

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ TEKNİĞİ İLE
MOTOR ARIZA TESPİTİ

HÜSEYİN FİDAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRONİK BİLGİSAYAR EĞİTİMİ A.B.D.

ISPARTA, 2006

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ TEKNİĞİ İLE MOTOR ARIZA TESPİTİ

HÜSEYİN FİDAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK BİLGİSAYAR EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI

ISPARTA, 2006

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne;

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRONİK BİLGİSAYAR EĞİTİMİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

ONAY

Bu tez/....../2006 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

....../....../2006

Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE
S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK BİLGİSİ	4
3. ARIZA TESPİT METODU VE DENEY DÜZENEGİ	8
3.1 Sinyal Analizi.....	8
3.1.1 Fourier Teoremi	8
3.1.2 Fourier Dönüşümü	10
3.1.3 Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü.....	12
3.1.4 Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü.....	12
3.1.5 Dalgacıklar	14
3.1.6 Dalgacık Analizi.....	16
3.1.7 Dalgacık Dönüşümleri	17
3.1.7.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü	18
3.1.7.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü	21
3.2 Arıza Tespit Deney Düzenegi	25
3.2.1 Deneysel Düzenek.....	25
3.2.2 Yapay Arıza Oluşturma.....	28
3.2.3 Veri Toplama Sistemi	29
3.2.4 Veri Toplama Kartı	35
4. DENEY BULGULARI	37
4.1 Titreşim Sinyallerinin Analizi ile Arıza Tespiti.....	37
4.2 Akım Sinyallerinin Analizi ile Arıza Tespiti	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	52

ÖZET

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ TEKNİĞİ İLE MOTOR ARIZA TESPİTİ

Hüseyin FİDAN

Elektrik motorları, neredeyse her türlü endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Motorda oluşacak hatalar tüm sistemin işlemez hale gelmesine sebep olabilir. Arızanın oluşmaya başlamasının tespiti, elektrik motorunun çalıştırdığı sistemin sürekliliğini sağlamak için oldukça önemlidir. Bir elektrik motorunun en fazla arıza veren kısmı rulmanlarıdır. Rulman bileşenlerinin herhangi birinde oluşacak arıza motordan alınarak tespit edilebilir. Bu hatalar belirli frekans değerlerinde ani sinyallerdir.

Geleneksel işaret işlemede kullanılan Fourier dönüşümünün bazı yetersizlikleri, işaret işlemede, farklı dönüşüm teknikleri geliştirme yolunu açmıştır. Sinyal analizinin sadece frekans düzlemi veya zaman düzleminde yapılması, sinyal içerisindeki bir bilginin düşünülmemesi anlamına gelmektedir. Özellikle durağan olmayan sinyallerin analizinde, işaretin frekans ve zaman bilgilerini aynı anda elde etmek için geliştirilen dalgacık dönüşümü tekniği mükemmel sonuçlar vermektedir. Bir sinyali, çok çözünürlü analiz mantığı ile frekans bileşenlerine ayırarak inceleyen ayrık dalgacık dönüşümü ile elektrik motorundan alınan arıza sinyalleri, analiz edilip arıza tanımlanabilir.

Bu çalışmada öncelikle sinyal analiz yöntemleri üzerinde durulmuş ve deneysel sonuçların incelenmesinde kullanılacak dalgacık dönüşümü hakkında bilgi verilmiştir.

Deneyde kullanılan 1 HP, üç fazlı, dört kutuplu elektrik motorundan bilgileri almak için veri toplama sisteminin tasarlanması, deneysel çalışmanın sonraki aşamasıdır. Deneysel düzenek, motordan gerilim, akım, hız, sıcaklık ve titreşim bilgilerini alıp, sinyal işleme kartı ile sayısallaştırılarak, bilgisayara kaydetmek amacıyla oluşturulmuştur. Veriler sağlam durum ve arızalı durum olmak üzere iki ayrı durum için alınmıştır.

Tezin son bölümünde, hazırlanan deneysel düzenek ile alınan sinyaller dalgacık analizi ile incelenmiş ve rulmandaki arıza tanısı gerçekleştirilmiştir. Rulmanda ki bilye ve dış bilezik arızaları belirlenmiş ve rulmanın iç bileziğinde arıza oluşmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu anlamda, dalgacık dönüşümü kullanılarak arızanın başlangıç anı tespiti, gerçek zamanlı motor izleme sistemi gerçekleştirilebilir.

ANAHTAR KELİMELER: Dalgacık dönüşümü, Rulman arızaları, motor arıza tanısı, Ayrık dalgacık dönüşümü

ABSTRACT**FAULT DETECTION OF ELECTRICAL MOTORS
USING WAVELET ANALYSIS**

Hüseyin FİDAN

Electrical motors are the most widely used in nearly every type of industrial process. Whole system can be out of service when the motors are out of order. The correct diagnosis of beginning of the faults is very important for the system in which electricity motors are used in. Most of the motor failures occur due to the bearing faults. The reason of the fault is recognized by obtained information regarding to the spike signals from motors.

Fourier transformation known as traditional transform process has some weakness in signal processing so it leads to apply new algorithms on signal analysis. Using only time domain or frequency domain restrict the analysis results. Especially, application of wavelet transformation to the non-stationary signals for getting frequency and time information at the same time gives excellent results. Discrete wavelet transformation that is a multi resolution algorithm analyses the signal by separating the signal into frequency components.

In this thesis, information on the signal analysis processes and wavelet transformation used in analysis are given initially.

Establishing the experimental system in order to get information from 1 HP, three phases, four poles electricity motor used in the experiment, is the next stage of the study. Experimental data such as motor vibration, current, voltage, shaft speed and temperature signals are acquired from experimental system. Then, the whole data set regarding to the healthy and faulty conditions are saved in a computer by digitizing using a data acquisition card.

In the last section of the thesis, received signals from experimental system are analyzed by using discrete wavelet transformation and motor bearing faults have been diagnosed. Ball and outer race faults were recognized by analyzing signal information. Besides, the inner race fault has been found at the beginning stage. Thus, in this context thesis contents can be used in real-time applications for further works.

KEY WORDS: Wavelet transformation, bearing faults, diagnosis of motor faults, Discrete Wavelet transform

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bilgi, deneyim ve özverili katkılarını, yorulmadan ve bıkmadan benimle paylaşan danışman hocam Sayın Yrd.Doç. Dr. Hakan Çalış' a, deneysel verileri almak için kullanılacak yöntem hakkında yön gösteren Yrd.Doç. Dr. Abdulkadir Çakır'a, deney düzeneğini oluşturmada bana yardımcı olan arkadaşlarım İlker Ünal ve Ünal Şanlı' ya, çalışmanın uygulama safhasında, müdürü olduğu Bucak Emin Gülmez Meslek Yüksekokulu, elektrik laboratuvarını tüm donanımıyla kullanmamı sağlayan Yrd.Doç. Dr. Cengiz Kayacan' a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tezin hazırlanma aşamasında manevi olarak bana destek veren eşime teşekkürü bir borç bilirim

Hüseyin Fidan

30.05.2006

SİMGELER ve KISALTMALAR

KZFD	Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü
AZFD	Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü
SDD	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
ADD	Ayrık Zamanlı Dalgacık Dönüşümü
ÇÇA	Çok Çözünürlü Analiz
HP	Horse Power
kW	Kilowatt
Hz	Hertz
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
FFT	Fast Fourier Transform
AGF	Alçak Geçiren Filtre
YGF	Yüksek Geçiren Filtre
ψ	Ana Dalgacık Fonksiyonu
C	Dalgacık Dönüşümü Katsayısı
m	Ayrıştırma seviyesi sayısı
d	Motor dönüş hızı
f_s	Şebeke frekansı
f_r	Rotor frekansı
f_i	Rulman İç Bilezik Hata Frekansı
f_d	Rulman İç Bilezik Hata Frekansı
f_b	Rulman Bilye Hata Frekansı
Ω	Ohm
DAQ	Veri İşleme (Data Acquisition)
OPAMP	İşlemsel Yükselteç (Operational Amplifier)
rpm	Dakikadaki motor devir sayısı (Revolution Per Minute)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Frekansı 5, 25 ve 50 Hz olan sinyaller.....	10
Şekil 3.2. x_1 , x_2 ve x_3 periyodik sinyallerinin Fourier dönüşümleri	11
Şekil 3.3. x_4 sinyali ve Fourier dönüşümü	11
Şekil 3.4. KZFD ile bir sinyalin pencerelemesi	13
Şekil 3.5. Dalgacık dönüşümünün gösterimi	16
Şekil 3.6. Zaman-frekans düzleminde sinyal dönüşümlerinin gösterimi	17
Şekil 3.7. Dalgacık örnekleri.....	17
Şekil 3.8. Dalgacığın sinyal üzerinde kaydırılması.....	19
Şekil 3.9. Ölçeğin değiştirilmesi	19
Şekil 3.10. Sinyal spectogramı.....	20
Şekil 3.11. Üç boyutlu gösterim.....	20
Şekil 3.12. SDD sonucunda oluşan katsayılar	21
Şekil 3.13. Temel filtreleme uygulanması	22
Şekil 3.14. Sinyal ayrıştırma işlemi	23
Şekil 3.15. Frekans bantları ile yaklaşımlar ve detaylar arasındaki ilişki.....	23
Şekil 3.16. ADD zaman-frekans düzlemi	24
Şekil 3.17. Deney düzeneğinin fotoğrafı.....	25
Şekil 3.18. Rulman bileşenleri	28
Şekil 3.19. Yapay arıza oluşturulan rulmanın fotoğrafı.....	29
Şekil 3.20. Motor arıza bilgisi almak için kullanılan deney düzenek şeması	31
Şekil 3.21. LM-741 opamp ile yapılan 166 kat yükseltme devre şeması	32
Şekil 3.22. LM-741 opamp ile yapılan 50 kat ayarlı yükseltme devre şeması	32
Şekil 3.23. Titreşim algılayıcıları beslemesi için sabit akım kaynağı devre şeması ..	33
Şekil 3.24. Alçak geçiren filtre devre şeması.....	34
Şekil 3.25. Alçak geçiren filtre frekans tepkisi	34
Şekil 3.26. Deneysel verileri elde etmek için kullanılan devreler.....	35
Şekil 3.27. Verileri kaydetmek için kullanılan Simulink modeli.....	36
Şekil 4.1. Motordan alınan titreşim bilgileri	37
Şekil 4.2. Sağlam durumda alınan titreşim sinyalinin yaklaşımları.....	39
Şekil 4.3. Sağlam durumda alınan titreşim sinyalinin detayları	39
Şekil 4.4. Arızalı durumda alınan titreşim sinyalinin yaklaşımları.....	40
Şekil 4.5. Arızalı durumda alınan titreşim sinyalinin detayları	40
Şekil 4.6. Arızalı durum titreşim sinyalinin d1 detay spektrumu	41
Şekil 4.7. Hatasız durum akım sinyali	42
Şekil 4.8. Arızalı durum akım sinyali	42
Şekil 4.9. Hatasız durum akım sinyali yan bantları	43
Şekil 4.10. Arızalı durum akım sinyali yan bantları	43
Şekil 4.11. Hatasız durum akım sinyali ve yaklaşımları.....	44
Şekil 4.12. Hatasız durum akım sinyali ve detayları.....	44
Şekil 4.13. Arızalı durum akım sinyali ve yaklaşımları.....	45
Şekil 4.14. Arızalı durum akım sinyali ve detayları.....	45
Şekil 4.15. Hatasız durum rotor frekansı ve genliği	46
Şekil 4.16. Arızalı durum rotor frekansı ve genliği	46

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Test motoru teknik özellikleri.....	27
Tablo 3.2. Rulman teknik bilgileri	27
Tablo 3.3. 6204 rulmanın hesaplanan hata frekans değerleri.....	28
Tablo 3.4. Titreşim algılayıcısı teknik özellikleri	32
Tablo 3.5. Yaklaşım algılayıcısı teknik özellikleri	33
Tablo 4.1. Titreşim sinyalinin yaklaşım ve detay alt bantları	38

1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda sistemlerin sağlıklı çalışmalarını sağlamak amacıyla, çeşitli bilgisayar destekli durum izleme metotları kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda en yaygın kullanılan elektrik motorları asenkron motorlardır. Elektrik motoru çalışırken, gürültü, akım, sıcaklık veya titreşim gibi bilgileri alınarak, bu motorların sağlıklı çalışıp çalışmadıklarına karar verilebilir.

Elektrik motorlarında çıkan sorunlar genellikle kullanım zamanından kaynaklanır. Uzun süre kullanılan motorlarda oluşan arızaların farklı sebepleri olabilir. Aşırı yük, motor içerisindeki parçaların aşınması veya çatlaması veya toz, kum gibi yabancı parçacıkların girmesi, bu arızaların çıkmasında etken sebeplerden sayılabilir. Elektrik motorunda oluşacak bir arıza, motorun çalışırken sağlıklı çalışmasından farklı olarak yeni titreşimler ortaya çıkaracaktır. Titreşim algılayıcısı yardımıyla elektrik motorundan alınan titreşim sinyalleri incelenerek, herhangi bir arıza olup olmadığı veya sebebi bulunabilir.

Titreşim algılayıcısı yardımıyla elektrik motorlarından alınan sinyaller, durağan olmayan sinyallerdir. Dinamik bir yapıya sahiptirler, zamanla değişirler. Bu sinyaller içerisinde arıza sinyalinin olup olmadığını anlaşılabilmesi için, elektrik motorundan alınan sinyallerin, sayısallaştırıldıktan sonra frekans ve genlik bileşenlerinin, sayısal olarak incelenmesi gerekir. Farklı zaman aralıklarında, frekans ve genlik bileşenlerinin elde edilmesinde, matematiksel dönüşüm fonksiyonları kullanılır.

Matematikte fonksiyonları temsil etme fikri 1800'lü yıllara dayanır. Bu yıllarda sinyallerin, sinüs ve kosinüs terimlerinin toplamı şeklinde ifade edilebileceği şeklinde bir teorem ortaya atıldı. Bu teoremi bulan Joseph Fourier adında bir matematikçidir. Bu teorem kullanılarak Fourier dönüşümü uygulanan bir sinyalde, zaman-frekans düzlemi arasında dönüşüm yapılabilir. Fourier dönüşümü, sinyal analizinde etkin bir şekilde kullanılmasına ve sinyal analizinde bir devrim olmasına karşın, özellikle dinamik sinyallerin incelenmesinde ve sinyal içerisindeki ani

değişimlerde yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu sorunu çözmek için farklı algoritmalara başvurulmuştur. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü gelişmiş Fourier dönüşüm algoritması olup dönüşüm işlemini oldukça hızlandırmış ve sinyal analiz etkinliğini arttırmış olmasına karşın ani frekans değişimleri tespitinde istenilen sonuçları verememiştir.

Fourier dönüşümlerindeki bu eksiklik, sinyalin analizinde yetersiz kalmasına sebep olur. Çünkü sağlıklı çalışan bir elektrik motorunun titreşimleri durağan olmayan sinyallerdir. Bu sinyaller içerisinde küçük geçici sinyaller olabileceği için Fourier metodlarının hiçbiri dinamik sinyallerin analizinde uygun değildir. Bu eksikliği ortadan kaldırmak için kullanılan dalgacık teoreminin, kısa zamanlı Fourier dönüşümüne benzer bir mantığı vardır. Ancak dalgacık dönüşümünde, kısa zamanlı Fourier dönüşümünde olduğu gibi sinyalin tamamı bir pencereden incelendikten sonra, sinyal, ikinin üsleri şeklinde ötelenerek tekrar incelenir. Bu işlem bize, sinyalin içerisindeki en küçük anlardaki bilgileri dahi verir. Bu sebepten dolayı dinamik sinyallerin incelenmesinde dalgacık dönüşümü mükemmel bir araçtır. Dalgacık ayrışımının sistemin sağlıklı çalışma durumu hakkındaki bilgisi, geniş frekans bandı üzerindeki bir sinyalden alınabilir ve analizi hem zaman hem frekans düzleminde yapılabilir.

Bu amaçla sayısal hesaplamalardaki üstün gücü ile veri işleme ve analizinde yaygın kullanılan Matlab programı tercih edilmiştir. C++ programlama diline benzer bir kodlama biçimi vardır. Özellikle veri analizinde görsel öğeler içermesi ve kullanımının kolay olması sebebiyle oldukça tercih edilen bir programdır.

Yapılan bu çalışma, mekanik arızası olan bir elektrik motorundan alınan titreşim bilgilerinin, dalgacık dönüşümü yardımıyla analiz edilerek, arızaların tespiti üzerinedir. Motora aksel ve radyal olarak yerleştirilen iki adet titreşim algılayıcısı ile motor titreşim bilgileri alınmıştır. Analog sinyaller olan titreşim bilgilerinin, bilgisayar yardımıyla işlenebilmesi ve analiz edilebilmesi için sayısallaştırılması gerekir. Bu işlem için bilgisayarın PCI slotuna takılan bir veri işleme kartı

kullanılmıştır. Sayısal forma getirilen titreşim bilgileri Matlab programına aktarılarak dalgacık dönüşümü uygulanmıştır.

Beş bölümden oluşan bu tez aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir:

Giriş bölümünde, elektrik motorlarında ki arızaların oluşma sebeplerine değinilerek, arıza bilgilerinin elde edilmesi ve literatürde, arıza sinyallerinin analiz yöntemlerinden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde, işaret analizinde yeni bir yöntem olan dalgacık dönüşümünün arıza tanıma sistemleri üzerine yapılan daha önceki çalışmalar gözden geçirilmiş, literatürdeki yayınların içeriklerinden bahsedilmiş ve bu tezin amacı anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, motor arıza tanısında kullanılan geleneksel yöntemler ve bunların yetersizlikleri incelenmiştir. Dalgacık dönüşümü temel ilkeleri anlatılmış, dalgacık dönüşümünün geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması yapılarak arıza tanısındaki bize sunduğu avantajlara değinilmiştir. Ayrıca motor arıza tanısı için kullanılacak deneysel düzeneğin birimleri, kullanılan motor ve rulman hakkında bilgiler verilerek, bunların karakteristiksel özellikleri verilmiştir. Ayrıca rulmanda kısa süre içinde arıza oluşturmak için yapılan rulman eskitme aşamaları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, elde edilen verilerin analizi ile arıza tanısının üzerinde durulmuş, deneysel sonuçlar tartışılmıştır.

Tezin sonuç ve öneriler kısmında ise, yapılan katkıları anlatılarak, gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK BİLGİSİ

Sinyal analizinde çeşitli teknikler kullanılmıştır. Bu tekniklerin içerisinde en yeni ve en verimli sonuç veren yaklaşım, temelleri 1909 yılında matematikçi Haar tarafından oluşturulan Dalgacık Analizi yöntemidir. Genişleyen ve daralan pencere fonksiyonlarını kullanarak, durağan veya durağan olmayan bir sinyaldeki frekans bilgisinin yanı sıra zaman bilgisinin de elde edilmesini sağlayan dalgacık analizinin mühendislikteki kullanımı, 1982 yılında J. Morlet'in sismik işaretleri incelemesinde dalgacık analizini kullanmasıyla başlar. Bu yöntem, gün geçtikçe gelişerek, mühendislikte birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır(Daubechies, 1990). Nükleer bilimi, elektrik, elektronik, bilgisayar sistemleri, tıp gibi bilimler bunlardan sadece birkaç tanesidir.

Elektrik motorlarındaki arıza tanıma uygulamalarının genelinde, sinyal analizi için, kullanılan geleneksel sinyal analiz yöntemleri arasında, kullanım alanı açısından, en ön sıralarda gelen Fourier dönüşümü ile spektral analiz kullanılmıştır. Ancak bu yöntemlerin bazı sakıncaları söz konusudur. Pillis ve Radunskaya (2003), Fourier dönüşümünü, uygulamalar ile anlatmış ve kullanım alanlarından bahsetmiştir. Fourier dönüşümü kullanılarak elde edilen sonuçlar ile bir elektrik motorundaki rulmanda oluşan hatalar tespit edilebilir. Ancak oluşan hatanın ne zaman oluştuğuna dair bilginin elde edilmesi, sinyalin dalgacık analizi ile mümkün olmuştur.

İşlem mantığı olarak, Fourier dönüşümüyle benzerlikler gösteren dalgacık dönüşümünün temelinde, Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümünde (KZFD) olduğu gibi sinyalin, belirlenen bir pencere fonksiyonu ile pencerelenmesi mantığı vardır. Ancak, dalgacık dönüşümünde, analizin zaman ve frekans çözünürlüğünü arttırmak için kullanılan pencere fonksiyonun boyutu daraltılıp genişletilir. Dalgacık dönüşümünün, Fourier dönüşümüne göre üstünlüklerini anlatan Valens (1999), dalgacık analizini, tüm detaylarıyla inceleyerek, matematik ve mühendislik alanlarında yeni bir bakış açısı getirdiğinden ve sinyal analizinde yeni bir çığır açtığından bahsetmiştir.

Aynı karşılaştırmayı yapan Philips (2003), dalgacık dönüşümü temellerinin filtreler olduğunu anlatmıştır. Analiz edilen sinyalin, filtreler sayesinde, istenilen frekans aralığı incelenebilir. Bir sinyale sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) ve ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) uygulanarak, dalgacık analizi yapılabilir. Bu iki dalgacık dönüşüm tipi arasındaki farkları anlatan Polikar (2001), ADD 'nün gereksiz bilgileri ayıklamak için uygulanacak en iyi yöntem olduğunu belirtmiştir.

Elektrik mühendisliği alanında, dalgacık dönüşümü, çok çözünürlü analiz (ÇÇA) özelliğine sahip olması sebebiyle, arıza tanıma sistemlerinde etkin bir kullanım alanı bulmuştur. Arslan vd. (2003), motordan alınacak sinyallerin arıza tanısında kullanılabileceğini belirtmiş ve modellenmesini gerçekleştirmiştir. Eren ve Devaney (2002), Elektrik motorlarındaki arıza tanısı için ani akım değişimlerini yakalayıp, dalgacık dönüşümü uygulayarak, iki farklı rulmandaki arızayı tanımlayabilmiştir. Elektrik motorlarındaki mekanik arızalara yönelik çalışmaların çoğu, özellikle rulman arızaları üzerine yoğunlaşmıştır. Bilyeli rulmanlardaki uzun süre çalışma ve sağlıklı ortamlardan kaynaklanan arızalar, motorda ses ve titreşime sebep olur (Şeker ve Ayaz, 2001).

Aktürk vd. (2002), eksene kaçıklık ve rulman arızası gibi mekanik arızalarının, motor titreşim bilgisi ile tespit edilebileceğini matematiksel model ile göstermiş ve rulman arızalarının, titreşim bilgisi ile tespit etme uygulamasını Orhan vd. (2003) bir elektrik motorundan periyodik titreşim bilgileri olarak gerçekleştirmiştir. Belirli zaman aralıklarıyla, motordan aldığı titreşim bilgilerindeki değişimleri inceleyerek, arıza tanısını gerçekleştirmiştir.

Dalgacık dönüşümünün ortaya çıkardığı sonuçların, daha önce kullanılan yöntemlerden daha başarılı olması, birçok araştırmacıyı bu yöne çekmiştir. Lin ve Mcfadden (1997), dişli elemanlar kutusundan aldığı titreşim bilgileri ile arıza tanı sistemini incelemiş, Xinsheng ve Kenneth (2004) tarafından dalgacık dönüşümü, titreşim bilgileri alınan bir elektrik motoruna uygulanmıştır. Purushotham vd. (2005), aynı işlemi birden fazla arızayı tanımlayabilmek için, motordan aldığı titreşim bilgilerinin dalgacık dönüşümünden sonra spektrumlarını çizdirerek, arıza ani

değerlerinin zaman aralığını hesaplayıp arıza tanısını başarılı şekilde tespit etmiştir. Bae vd. (2005), dalgacık dönüşümünü, 0.5 HP gücündeki bir motordan aldığı sinyallere uygulayarak, küçük güçteki motorlardaki arızaların tespit edilebileceğini belirtmişlerdir.

Şeker ve Ayaz (2001), elektrik motorlarında sürekli bakım ve durum izleme işlemlerinin, endüstriyel üretim süreçlerinde oldukça önemli olduğunu belirterek, titreşim bilgisinin yanı sıra gerilim ve akım bilgilerini de kullanarak, arızanın meydana geldiği kritik noktayı istatistiksel yöntem ve dalgacık analizi kullanarak belirlemiştir(Şeker ve Ayaz, 2003). Çolak vd. (2005) ise, 1,5 kW gücünde bir elektrik motorunun on-line korumasını gerçekleştirmek için, motordan aldığı gerilim, akım, sıcaklık ve motor hızı bilgilerini kullanarak, gerçek zamanlı bir arıza uyarı sistemi gerçekleştirmiştir.

Bir rulman, bilyeler, dış bilezik ve iç bilezik bileşenlerine sahiptir. Elektrik motorlarında uzun süre çalışma sebebiyle, motorda arızalar ortaya çıkmaya başlar. Motordaki arızaya dayalı titreşim bilgisi, bu bileşenlerden her birinin arıza durumunda, kendisine ait farklı frekans değerleri ile belirlenebilir. Bu frekansların hesaplanmasında ve tespit edilmesinde bilye sayısı, iç ve dış bilezik çapları önemlidir. Her biri farklı ve tek bir hataya sahip üç ayrı rulman kullanarak arıza tespiti üzerine çalışan Yiakopoulos ve Antoniadis (2002), üç ayrı rulmanın, her birindeki arızayı tanımlamıştır. Bu arızaların her birinin farklı frekans değerlerinde olduğunu belirlemiştir.

Ayaz (2002), hatasız bir elektrik motorunda oluşacak arıza sürecini inceleyerek, yapay bir arıza oluşturma modeli belirlemiş ve bu modeli aynı tipteki üç farklı motorda arıza oluşturmak için kullanmıştır. Uyguladığı yapay arıza modeli ile bozulan motorlardan titreşim, gerilim ve akım bilgilerini, dalgacık analizi ile inceleyerek, arızaları belirlemiştir. Ayrıca motorlardaki arızalar arasında mekanik arızaların daha fazla ortaya çıktığını ve buna da motorları kontrol eden güç devresinin motor milinden geçirdiği akımların sebep olduğunu belirtmiştir.

Bu tezde ise çok çözünürlü dalgacık analizi, üç fazlı asenkron motorlarda kullanılan rulmanlarda oluşacak arızaları belirlemek için kullanılmıştır. Öncelikle sağlıklı çalışan bir motordan titreşim, gerilim, akım, hız ve sıcaklık bilgileri deney düzeneği ile alınmıştır. Deneyde kullanılan elektrik motorunun rulmanında, yapay arıza oluşturma işleminden geçirilerek fiziksel bozulmalar meydana getirilmiştir ve aynı veriler arızalı durum için de alınmıştır.

Deney düzeneği ile alınan sinyaller veri işleme (DAQ) kartı yardımıyla bilgisayara sayısal olarak kaydedilmiştir. Hatasız ve hatalı olmak üzere iki farklı durum için ayrı ayrı elde edilen on farklı veriye analiz işlemi uygulanmıştır. Elde edilen verilerin analizi ayrık zamanlı dalgacık dönüşümü ile yapılmıştır. Analizi sonucunda, rulman arızalarını gösteren frekans değerleri belirlenmiş ve rulman hataları tespit edilmiştir.

3. ARIZA TESPİT METODU VE DENEY DÜZENEGİ

3.1 Sinyal Analizi

Bir sinyal frekans ve genlik olarak iki ayrı bileşene sahiptir. Frekans ve genlik bilgileri sabit bir düzlemde, zaman düzleminde tanımlanabilir. Bu bilgiler değerlendirilirken, zamana göre frekans veya zamana göre genlik şeklinde değerlendirilir. Sinyal analizinde, bir sinyali zamana göre düşünmek analiz işlemlerinin temelini oluşturur.

Sinyallerin matematiksel dönüşüm işlemleri uygulanarak, frekans ve genlik bilgileri elde edilebilir. Sinyal içerisinden frekans ve genlik bilgilerini almak için en yaygın kullanılan matematiksel dönüşüm tekniği Fourier dönüşümüdür.

Bir sinyalin incelenmesi için belirli noktalardan alınan örneklerle sinyalin incelenmesi, sinyalin sayısallaştırılmasıdır. Bu şekilde bir sinyal sayısallaştırılarak, elektronik ortamlarda incelenebilir (Uçan, 2003).

3.1.1 Fourier Teoremi

1807 yılında Fransız bir Matematikçi olan Joseph Fourier, kendi adıyla bilinen bir teorem geliştirmiştir. Bu teoremden periyodik fonksiyonların çoğunun, trigonometrik fonksiyonları kapsayarak, sonsuz seriler ve entegraller içerisinde genişletilebileceğini ifade etmiştir (Altmann, 1996).

Bir sinyal sinüs ve kosinüs toplamı ile ifade edilebilir ilkesi, Fourier teoreminin temelini oluşturur. Bu ilkeye göre sinyaller bir seri şeklinde ifade edilerek, daha kolay analiz edilebilir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (3.1)$$

Burada yazılan eşitlikte $f(x)$ fonksiyonu, sinüs ve kosinüs toplamlarının bir serisi olarak ifade edilmiştir. Eşitliğin sol tarafında yer alan a_0 , a_k ve b_k Fourier katsayılarıdır ve (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile hesaplanabilir.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (3.2)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (3.3)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad (3.4)$$

Sinyallerin, Fourier serilerinde tanımlanmasında, karmaşık üstel biçimde gösterimleri ise

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega t} \quad (3.5)$$

şeklindedir. Denklem 3.5 teki gösterimde bulunan katsayılar karmaşık Fourier katsayısıdır ve denklem (3.6) ile hesaplanır.

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega t} dt \quad (3.6)$$

Karmaşık sayılarla Fourier serisinin gösterimi ile trigonometrik gösterimi arasında sadece sinyalin genlik değerlerini gösteren katsayılar farklı çıkar. Karmaşık gösterimdeki katsayılar, trigonometrik gösterimin yarısı değerinde çıkar.

3.1.2 Fourier Dönüşümü

Fourier serilerinin fonksiyonlar üzerine olan bu yaklaşımı, matematikte bir devrim niteliğindedir. Bundan sonraki süreçlerde, sinyallerin incelenmesi ve frekans analizlerinin yapılmasında etkin olarak yararlanılan Fourier dönüşümleri, sinyallerin zaman ve frekans düzleminde incelenmesini mümkün hale getirmiştir.

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.7)$$

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

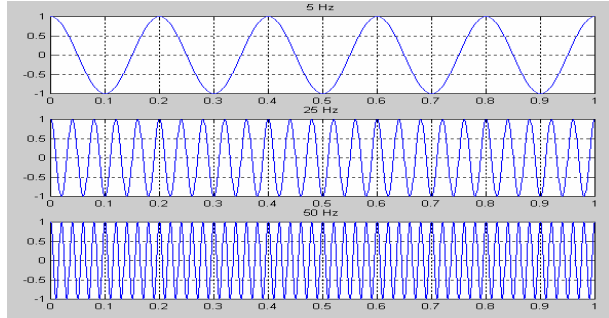
Karmaşık üstel gösterimde alınan bir sinyal bilgisinin Fourier dönüşümü (3.7) de $F(\omega)$ ile gösterilmektedir. Basit birkaç örnek ile Fourier dönüşümü daha kolay anlaşılabilir.

x_1 , x_2 ve x_3 periyodik sinyallerinin frekansları sırasıyla 5, 25 ve 50 Hz'dir. Sinyallerin Şekil 3.1 de genlik-zaman düzlemi gösterimi verilmiştir. Bu sinyallere Fourier dönüşümleri uygulandığı zaman Şekil 3.2 deki sinyal görüntüleri elde edilir.

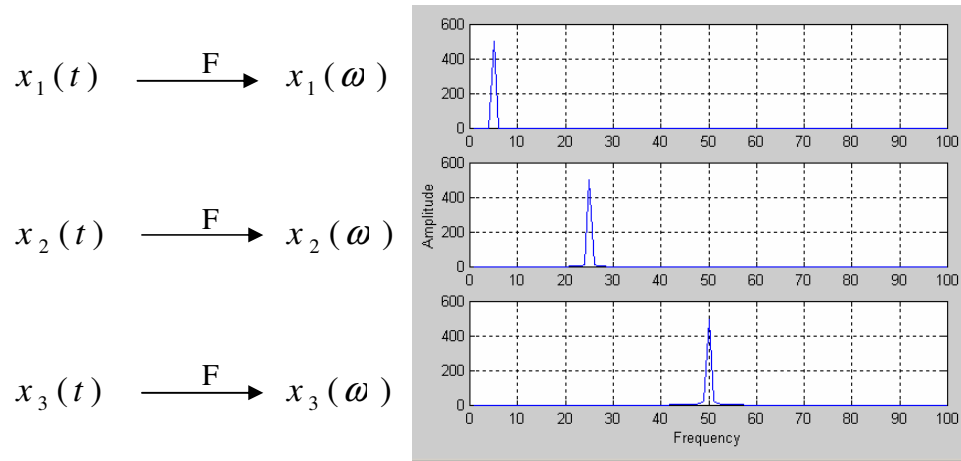
$$x_1(t) = \cos(2\pi \cdot 5 \cdot t)$$

$$x_2(t) = \cos(2\pi \cdot 25 \cdot t)$$

$$x_3(t) = \cos(2\pi \cdot 50 \cdot t)$$



Şekil 3.1. Frekansı 5, 25 ve 50 Hz olan sinyaller

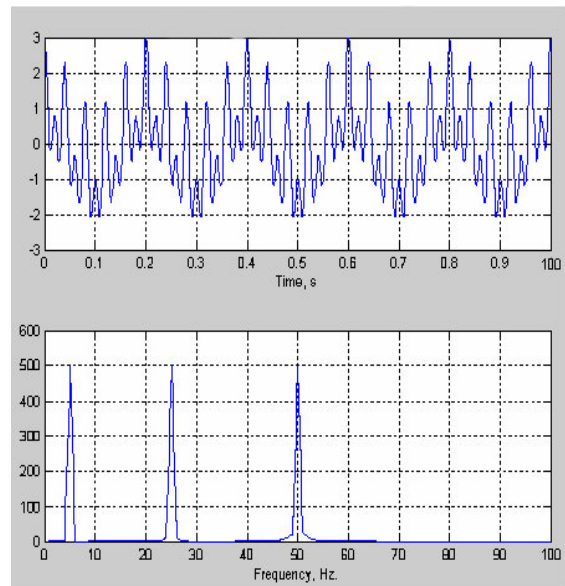


Şekil 3.2. x_1 , x_2 ve x_3 periyodik sinyallerinin Fourier dönüşümleri

Fourier dönüşümleri bir sinyal içerisindeki frekans bilgilerini yakalamada bize oldukça kolaylık sağlar. Ancak Fourier dönüşümünün yetersizliklerinden biri, sinyal frekans değerinin hangi zamanda alındığıdır. Bu eksikliği daha iyi anlayabilmemiz için sinyaller toplanıp Fourier dönüşümü uygulanırsa Şekil 3.3 deki sinyal şekillerini elde ederiz.

$$x_4(t) = \cos(2\pi \cdot 5 \cdot t) \\ + \cos(2\pi \cdot 25 \cdot t) \\ + \cos(2\pi \cdot 50 \cdot t)$$

$$x_4(t) \xrightarrow{F} x_4(\omega)$$



Şekil 3.3. x_4 sinyali ve Fourier dönüşümü

x_4 sinyalinin içerisinde, Fourier dönüşümü sonrası üç farklı frekans değeri olduğu görülmektedir. Frekanslardan biri 5 Hz., ikincisi 25 Hz. ve üçüncüsü de 50 Hz.' dir.

Ancak bu frekansların x_4 sinyali içerisinde hangi anlarda olduğuna dair bir bilgi alınmaz. Çünkü, Fourier dönüşümü sonrası frekans düzleminde temsil edilen sinyalin zaman bilgisi kaybolur (Polikar, 2001).

3.1.3 Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü (AZFD), bir fonksiyonun sonlu sayıdaki örnek noktasından, Fourier dönüşümünü tahmin etmek ilkesine dayanır. Örnek alınan noktaların tüm sinyali temsil ettiği kabul edilir. Sadece seçilen belirli bir sinyal bölgesine Fourier dönüşümünün uygulanması, geri kalan sinyalde bu alınan bölgeye benzediğinin kabul edilmesi, uygulama açısından kullanışlı değildir. Ancak bilgisayar gibi sonsuz bilgiyi saklayamayan ve işleme alamayan hesaplama ortamlarında, Fourier dönüşümü uygulamak için bu yapılmak zorundadır.

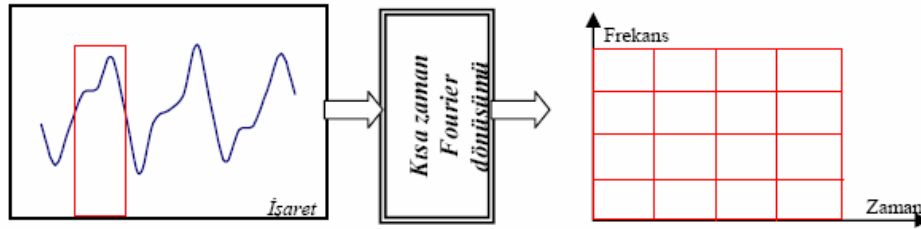
AZFD hesaplamasında günümüzde kullanılan yaklaşım Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) algoritmalarıdır. 1965 yılında Cooley ve Tukey tarafından kurulan HFD (Fast Fourier Transform – FFT) algoritması; AZFD' den farklı değildir. AZFD' nün hesaplanması için etkili ve mükemmel bir algoritmadır. AZFD' nün sayısal işaret işleme alanında spektrum analizi, konvolüsyon ve korelasyon gibi işlemlerin gerçekleşmesinde önemli rol oynamasının nedeni HFD algoritmalarından kaynaklanmaktadır (Çankaya ve Vatansever, 2002).

3.1.4 Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü, sinyal içerisinde yer alan tüm frekans bileşenlerini tanımlayabilir. Ayrıca daha önce de bahsettiğimiz gibi, zaman içerisindeki yerlerinin belirlenmesine dair hiçbir bilgi sağlamaz. Bunun sebebi, durağan sinyallerin zaman içerisinde değişmeyen frekans bileşenleri içermelerinden dolayıdır. Sinyalin zaman içerisindeki

frekans bileşenleri tüm zamanlarda aynıdır. Bu nedenle zaman bilgisine durağan sinyallerde ihtiyaç yoktur (Pillis ve Radunskaya, 2003).

Ancak tüm sinyaller durağan değildir. Sinyal içerisindeki frekans bileşenleri, zamana göre değişen bu sinyallere dinamik sinyaller denir. Dinamik sinyallerde frekans bileşenleri kadar, bu frekansların hangi zamanlarda olduğu bilgisi de çok önemlidir. 1946 yılında Dennis Gabor tarafından ortaya atılan, dinamik sinyallerin analizinde kullanılan, Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD), klasik Fourier dönüşümüne yeni bir boyut getirmiştir. Bu işlem, belirli zaman aralıklarında, AZFD' ne benzer pencereleme mantığını kullanarak yapılan analiz ile kaybolan zaman bilgisinin elde edilmesi yolunu açmıştır (Valens, 1999).



Şekil 3.4. KZFD ile bir sinyalin pencerelemesi

Kısa zamanlı Fourier dönüşümünün bir sinyale uygulanabilmesi için toplam altı adım işleme konulmalıdır.

1. Sonlu bir pencere fonksiyonu seçilir
2. Pencere $t=0$ anında, sinyalin başlangıcına yerleştirilir
3. Pencere kullanılarak sinyal yuvalanır
4. Pencere içerisindeki bu sinyale Fourier dönüşümü uygulanır
5. Pencere sağa kaydırılır
6. Sinyal sonuna kadar 3. adıma tekrar gidilir

Her Fourier dönüşümü uygulandığı 4. adımda bir frekans bilgisi elde edilir. Elde edilen bu değere Fourier katsayısı adı verilir ve uygulanan pencereye olan

benzerliğini gösterir. Pencerenin uygulandığı zaman bilgisi de belirlendiği için, aynı anda hem frekans hem de zaman bilgisi analiz sonucunda elde edilir (Polikar, 2001).

$$KZFD_x^\omega(t', \omega) = \int_t [x(t) \cdot W(t - t')] \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.9)$$

$x(t)$ sinyalinin KZFD' nün verildiği 3.9 da ki fonksiyonda, W pencere fonksiyonunu, ω frekans parametresini ve t' zaman parametresini temsil etmektedir.

KZFD, belirlenen zaman aralıklarında farklı dönüşüm değerlerinin hesaplanmasıyla, zaman bilgisinin de elde edilmesini sağlar. Hem frekans bilgisinin, hem de zaman bilgisinin, sinyal içerisinden alınmasını sağlar. Seçilecek olan pencere fonksiyonun biçimi ve genişliği sonuç kesinliği için oldukça önemlidir. Dikdörtgen, üçgen veya Hamming gibi pencerelerden biri sinyalin özelliğine göre seçilmelidir. Örneğin giriş sinyali periyodikse, sinyal kısa bir pals biçimindeyse veya başlangıç ve bitiş genliği aynı ise dikdörtgen pencere seçilmelidir. Sinyal periyodik değilse üçgen pencere fonksiyonu seçilmelidir.

Pencere fonksiyon şeklinin seçimi kadar, darlığı veya genişliği de çok önemlidir. Geniş bir pencere, az zaman aralığı belirleyeceğinden dolayı, dönüşüm sonucunda zaman çözünürlüğü az olur. Buna karşın frekans çözünürlüğü yüksek olur. Analiz pencere fonksiyonu dar alınrsa bu seferde, zaman çözünürlüğü iyi, frekans çözünürlüğü kötü olur.

3.1.5 Dalgacıklar

Dalgacıklar, bir sinyalin içerdiği bilgiyi, farklı frekans bileşenlerine ayıran ve sonra kendi ölçekleriyle eşleştirilmiş bir çözünürlüğe sahip bileşenler üzerinde çalışan, matematiksel fonksiyonlardır. Dalgacıkların arkasındaki temel fikir, belirlenen bir ölçeğe göre analizdir (Graps, 1995).

Son yıllarda, dalgacıları kullanarak sinyalleri analiz etmek ve uygulamalarda kullanmak oldukça yaygınlaşmıştır. Özellikle sinyal işlemede daha önce kullanılan geleneksel yöntemlere göre daha avantajlı olan dalgacık analizleri, matematik, kuantum fiziği, elektrik, elektronik ve bilgisayar gibi mühendislik alanlarında yeni bir devir açma niteliğindedir. Uygulama alanları da gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle tıp bilimine ve resim analiz işlemlerinde çok büyük kolaylık ve kalite getirmektedir (Uçan, 2003).

Dalgacılar kullanılmadan önce, şu an hala bazılarının kullanılmaya devam ettiği, birçok teknikler sinyal analizlerinde kullanılmaktadır. Bunlar arasında en kullanışlı ve en yaygın olanı Fourier dönüşümleridir. Daha önceki bölümde anlatıldığı üzere Fourier teoreminde bir sinyal sonsuz sinüs ve kosinüslerin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu teoremden yola çıkarak, bir sinyal içerisindeki frekans bileşenleri, sinyale Fourier dönüşümü uygulanarak elde edilebilir. Ancak Fourier dönüşümü, durağan sinyaller (stationary signal) olarak adlandırılan, tüm zamanlarda frekans değeri aynı olan sinyallerde güzel sonuçlar vermektedir (Marcianesi vd., 2001). Durağan sinyallerin tüm anlarda frekans değerleri aynı olmasından dolayı, bu sinyallerde zaman bilgisi önemli değildir. Fourier dönüşümü yapılan bir sinyalden zaman bilgisi kaldırılır, sadece frekans bilgisi elde edilir. Bunun anlamı; sinyalin içerisindeki tüm frekanslar bulunabilir ancak bu frekansların hangi zaman diliminde meydana geldikleri bilinemez. (Graps, 1995)

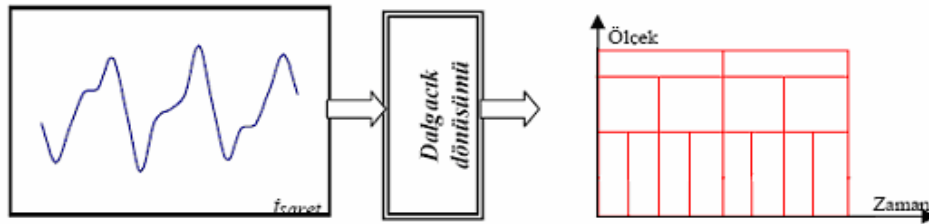
Fourier dönüşümündeki bu yetersizlikler, özellikle durağan olmayan sinyallerin analizinde oldukça büyük problemler ortaya çıkarır. Doğadaki sinyallerin büyük bir çoğunluğu, her an değişimin olduğu, durağan olmayan sinyaller (non-stationary signal) olması sebebiyle, Fourier yaklaşımlarıyla analiz, frekans bileşenlerinin hepsini yakalayamaz. Bu sorunun üstesinden gelmek için AZFD gibi çeşitli yöntemler kullanılsa da çözüme ulaşamamıştır. Durağan olmayan sinyallerin incelenmesinde dalgacık analizinden önce KZFD yaygın olarak kullanılmaktaydı. Ancak KZFD' nün de analiz sonuçlarında eksiklikleri vardır. Zaman bilgisi bu yöntemle sinyal içerisinde alınabilmektedir ancak, zaman çözünürlüğünün tüm sinyal boyunca aynı olması, sinyal içerisindeki ani frekans değişimlerinin

yakalanmasında KZFD yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca sinyali kesmek için kullanılan pencere sinyali ile orijinal sinyalin arasında bir konvolüsyon oluşacak ve bu da frekans düzleminde kalıntı sinyallere sebep olacaktır(Polikar, 2001).

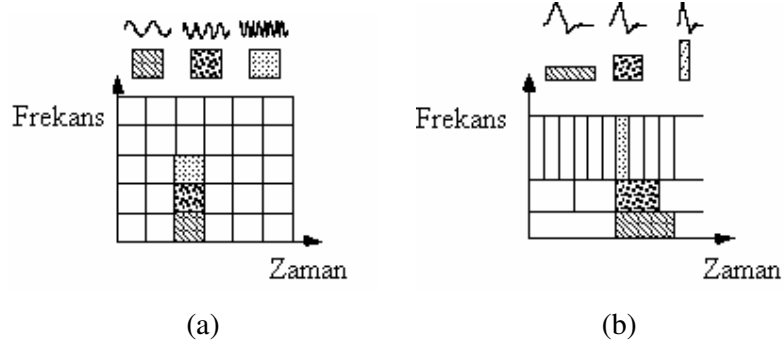
Dalgacık dönüşümü veya dalgacık analizi, şu ana kadar uygulanan analiz yöntemlerindeki noksanlıkları ortadan kaldırmak için kullanılan en son çözümdür (Valens, 1999). Fourier dönüşümündeki zaman bilgisinin kaybolması ve konvolüsyon gibi problemleri ortadan kaldıran dalgacık analizi, bir sinyalin içerisindeki tüm frekans bileşenlerinin hangi zamanlarda ve hangi genliklerde olduğunu tespit edebilir.

3.1.6 Dalgacık Analizi

Dalgacık dönüşümü bir ana fonksiyonun (dalgacık) ötelenme ve yayılması ile oluşturulan baz fonksiyonlarına, işaretin izdüşümünün alınması ile bulunur(Ayaz, 1997). Böylelikle, sinyalin yüksek ve düşük frekanslı bileşenleri, zaman bilgisi ile birlikte elde edilebilir. Şekil 3.5’ de görüldüğü gibi, yüksek frekanslar kısa süreli, düşük frekanslar ise uzun süreli dalgacık ile bulunabilir. Dalgacık dönüşüm işleminin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.6’ da verilen KZFD ile dalgacık dönüşümü zaman-frekans düzlemi gösterimleri verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi dalgacık dönüşümü daha iyi zaman çözünürlüğüne sahiptir.



Şekil 3.5. Dalgacık dönüşümünün gösterimi



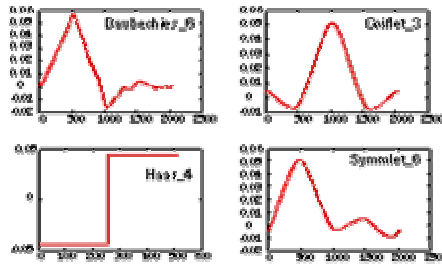
Şekil 3.6. Zaman-frekans düzleminde sinyal dönüşümlerinin gösterimi
(a)KZFD dönüşümü (b)Dalgacık dönüşümü

3.1.7 Dalgacık Dönüşümleri

Dalgacık dönüşümü değişken zaman-frekans çözünürlüğüne sahiptir. Bu nedenle çok çözünürlüklü işaret işleme aracı olarak nitelendirilir ve durağan sinyallerin analizinden çok ayrık zamanlı sinyalleri incelemeye kullanılır.

Dalgacık dönüşümleri sonsuz bir kümeden oluşur. Farklı dalgacık aileleri, dalgacık temel fonksiyonlarının, uzayda kompakt dağılımlarına göre farklılıklar gösterirler. Uygulamada çok kuvvetli işlem gücüne sahip dalgacıklar olduğu gibi sadece teorikte kullanılan dalgacıklar da vardır. Şekil 3.7 de bu dalgacık tiplerinden birkaçı verilmiştir. Dalgacık dönüşümlerinin farklı tipleri vardır:

- 1) Sürekli Dalgacık Dönüşümü
- 2) Ayrık Dalgacık Dönüşümü



Şekil 3.7. Dalgacık örnekleri

3.1.7.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü

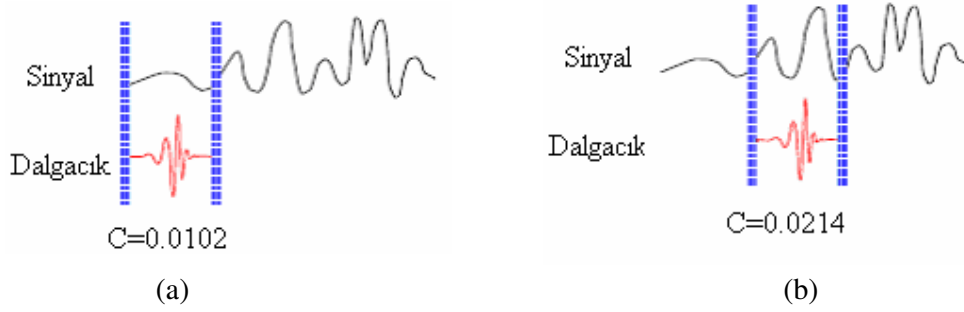
Sürekli dalgacık dönüşümü (SDD), sinyalin toplam zamanı ile, dalgacık fonksiyonunun değiştirilmiş ve ölçeklenmiş versiyonlarının çarpılması olarak tanımlanır. 3.10' da verilen fonksiyonda SDD görülmektedir. Bu fonksiyonda, $x(t)$ sinyalinin, zamanda kaydırılan ve ölçeklendirilen ψ dalgacığı ile çarpılması görülmektedir. Her ölçeğı değiştirme işlemi tespit edilecek frekans değerini belirlemek için, her zamanda kaydırma işlemi de sinyalin farklı bir bölgesini incelemek için kullanılır(Altmann, 1996; Ayaz, 1997; Valens, 1999).

$$SDD_x^{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_t x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (3.10)$$

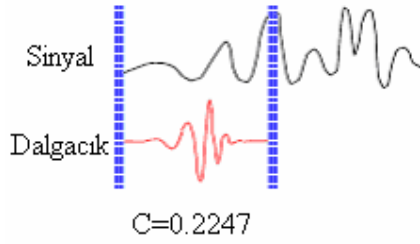
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.11)$$

Ölçeğı belirleyen her s değerinde dalgacık, zamanı belirleyen τ değeri ile zamanda kaydırılır. Bu işlem diğer ölçeklerde de devam edilerek dalgacık katsayıları elde edilir. 3.11' de ki eşitlikte de dalgacık fonksiyonu verilmiştir.

Analiz sonucunda oluşan değerlere dalgacık katsayıları denir ve seçilen dalgacık tipi ile orijinal sinyalin, 3.10 denklemi sonucunda ki üretilen değerleridir. Şekil 3.8 bir sinyale SDD uygulamak için, sinyalin üzerinde dalgacığın kaydırılması, Şekil 3.9' da dalgacığın ölçeklendirilmesi verilmiştir.



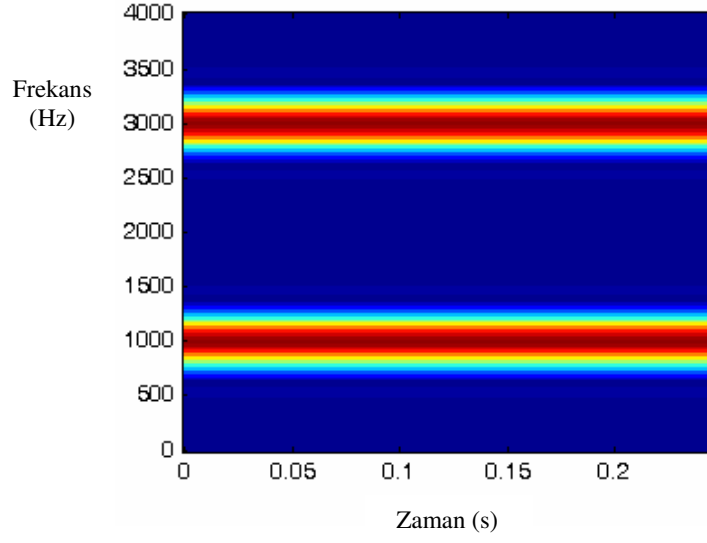
Şekil 3.8. Dalgacığın sinyal üzerinde kaydırılması
(a) Başlangıç durumu (b) Sağa kaydırılmış durum



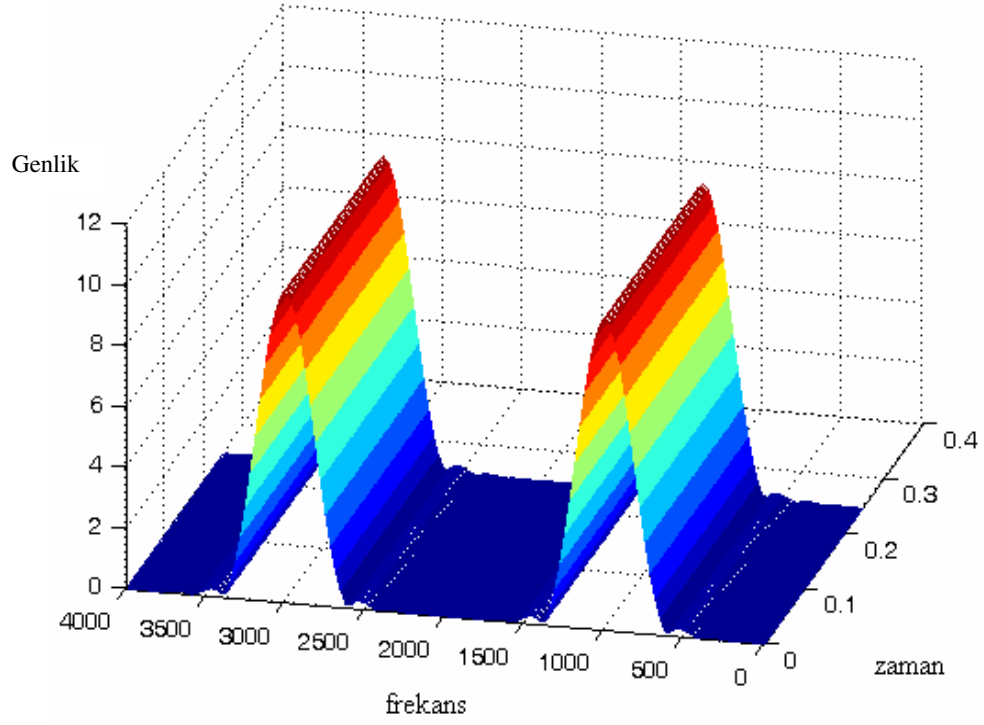
Şekil 3.9. Ölçeğin değiştirilmesi

SDD' nün genliği scolagram olarak adlandırılır. Scolagram sayesinde SDD'nün iki boyutlu veya üç boyutlu grafikleri çizilebilir (Phillips, 2003). 1000 Hz ve 3000 Hz frekans değerlerine sahip iki ayrı sinyalin toplamı sonucunda oluşan sinyalin iki boyutlu spectogramı Şekil 3.10' da verilmiştir. Yatay eksen zaman, düşey eksen de frekans bilgisini vermektedir. Sinyalin genliği ise renklerle belirlenmektedir.

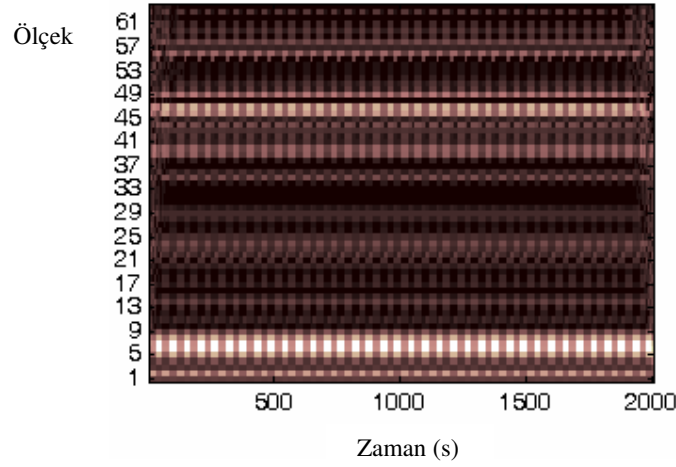
Şekil 3.11 aynı sinyalin üç boyutlu grafiğini göstermektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, sinyal içerisindeki frekans bileşenleri, zaman ve genlik bilgileri ile birlikte alınabilmektedir. Şekil 3.12 ise SDD sonucunda oluşan katsayıları göstermektedir.



Şekil 3.10. Sinyal spectogramı



Şekil 3.11. Üç boyutlu gösterim

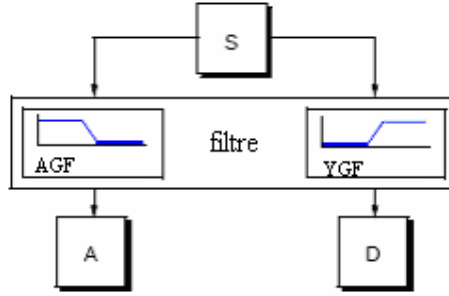


Şekil 3.12. SDD sonucunda oluşan katsayılar

3.1.7.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Mümkün olan her ölçek için dalgacık katsayılarının hesaplanması, gereksiz olan bilgileri de sinyal içerisinden alır. Dönüşüm işleminin ve dolayısıyla da analiz işleminin uzamasına sebep olur(Rioul ve Vetterli, 1991). Eğer seçilecek olan ölçek ve pozisyonları, ikinin üstleri biçiminde seçilirse, yapılan analiz daha etkili ve hızlı olur. İstenmeyen verilerin analiz işleminden ayıklanmasını sağlar ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) olarak adlandırılır.

ADD, filtreleri kullanarak gerçekleştirilir. 1988 yılında Mallat tarafından gerçekleştirilen bir algoritmadır. Bu çok pratik filtreleme algoritması, dalgacık dönüşümünü, SDD' ne nazaran daha hızlı yapılmasını sağlar(Graps, 1995). Şekil 3.13' de bir sinyale filtre uygulanışı ve elde edilen değerler verilmiştir. En temel filtre devresinde S sinyaline uygulanan bir filtre ile sinyal içerisindeki alçak ve yüksek frekanslar ayrılmıştır. Düşük frekansları geçiren filtre Alçak Geçiren Filtre (AGF) ve yüksek frekansları geçiren filtre de Yüksek Geçiren Filtre (YGF) olarak adlandırılır.



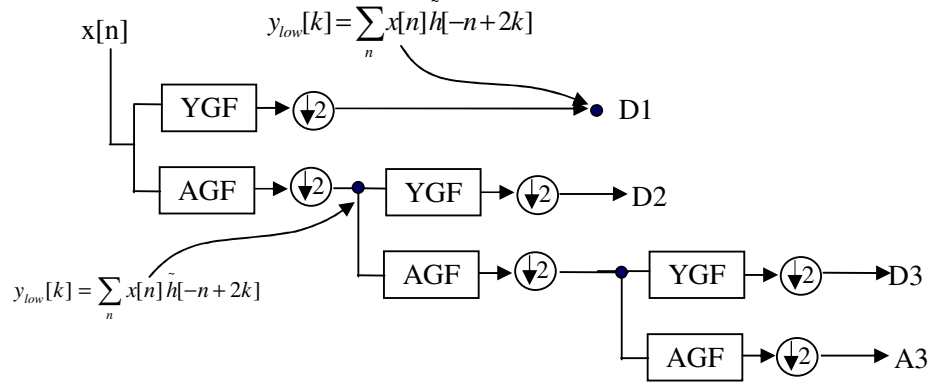
Şekil 3.13. Temel filtreleme uygulanması

Filtre sonucunda oluşan iki ayrı sinyalden A ile gösterilene yaklaşım (Approximation) ve D ile gösterilene de detay (Detail) ismi verilir. Yaklaşım sinyalleri, orijinal sinyali temsil eder ve sinyalin tanımını verir. Detaylar ise sinyalin karakteristiğini yada ayrıntısını içerir (Misiti vd., 2004). Örnek olarak insan sesini ele alırsak; insan sesinden yüksek frekanslar kaldırılırsa konuşmanın içeriği anlaşılabilir. Ancak düşük frekanslar kaldırılırsa içeriği anlaşılmayan, anlam verilemeyen sesler duyulur. Dalgacık dönüşümünde de yaklaşımlar sinyalin orijinalini temsil eder ve yüksek ölçek ile elde edilir. Detaylar ise düşük ölçekteki bilgilerdir ve sinyalin yüksek frekanslı bileşenleridir.

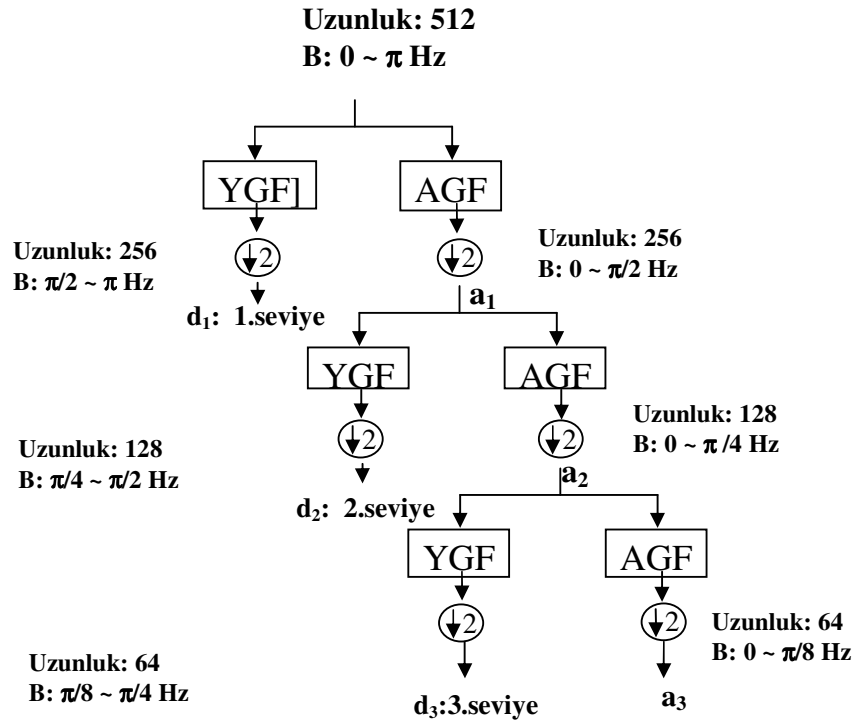
Sinyallere alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreler uygulayarak ve ortaya çıkan verileri iki ile azaltarak bu sinyalin ADD yapılabilir. Bu işlem çıkan sonuçlara da uygulanırsa çoklu çözünürlük analizi sinyale uygulanmış olur (Bae vd., 2005). Şekil 3.14 de $X(n)$ sinyaline uygulanan bu prosedür görülmekte ve burada YGF ve AGF sırasıyla yüksek geçiren ve alçak geçiren filtreleri belirtmektedir. Aşağı doğru ok ile gösterim ise iki üssü azaltılma (Downsampling) işlemidir. Her bir ayrıştırma seviyesinde ortaya çıkan detaylar ve yaklaşımlar gösterilmektedir.

$X(n)$ sinyalinin içerisindeki bilgi A3 yaklaşımıdır. D1, D2 ve D3 bu sinyalin farklı frekans değerlerindeki yüksek frekans kısımları olup, $X(n)$ sinyali tüm detaylarla A3 yaklaşımının toplamına eşittir. Ayrıştırma işlemi sonrasında, istenen frekans aralığı seviyesindeki detay veya yaklaşım bilgisi seçilerek analiz edilebilir (Liu, 2005).

Şekil 3.15, bu ayrıştırma işleminde oluşan yaklaşım ve detayları daha net göstermektedir. Ayrıca her ayrıştırma seviyesindeki frekans bantları da belirtilmiştir.



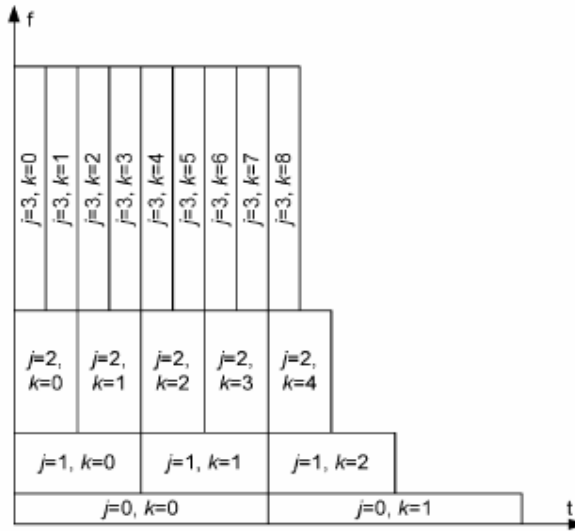
Şekil 3.14. Sinyal ayrıştırma işlemi



Şekil 3.15. Frekans bantları ile yaklaşımlar ve detaylar arasındaki ilişki

Şekil 3.15' de görüldüğü gibi her ayrıştırma aşamasında, orijinal sinyalden aldığımız örnek sayısı yarı yarıya azalmaktadır. Ayrıştırılan bu sinyallere ters ayrıştırma işlemi uygulanarak, orijinal sinyali tekrar elde etmek mümkündür. Dalgacık dönüşümlerinin bu yönü de oldukça kuvvetlidir ve görüntü işlemede resim bilgisinden daha iyi bilgiler alınmasını sağladığı için mükemmel sonuçlar vermektedir(Chhokra, 2002).

Şekil 3.16, ADD' nün frekans-zaman düzlemini göstermektedir. Burada ki j ölçeği, k ise filtreleme sonucunda oluşan alçak ve yüksek frekansları temsil etmek için kullanılmıştır. k değerinin düşük değerle temsil ettiği bölgeler, düşük frekanslı bileşenleri göstermektedir. Başka bir deyişle, düşük k değerleri bir frekans bandı içerisindeki yaklaşımları, yüksek k değerleri detayları nitelemektedir.



Şekil 3.16. ADD zaman-frekans düzlemi

$$m = \log_2 \text{örnekleme frekansı} \quad (3.12)$$

Şekil 3.16' dan da anlaşılacağı gibi ADD, yüksek frekanslarda mükemmel frekans çözünürlüğüne, alçak frekanslarda da çok iyi zaman çözünürlüğüne sahiptir(Zanardelli vd., 2005). Ayrıştırma işlemi teorikte sonsuza kadar devam ettirilebilir. Uygulamada ise ayrıştırma işlemi, en son elde edilen yaklaşım bilgisine

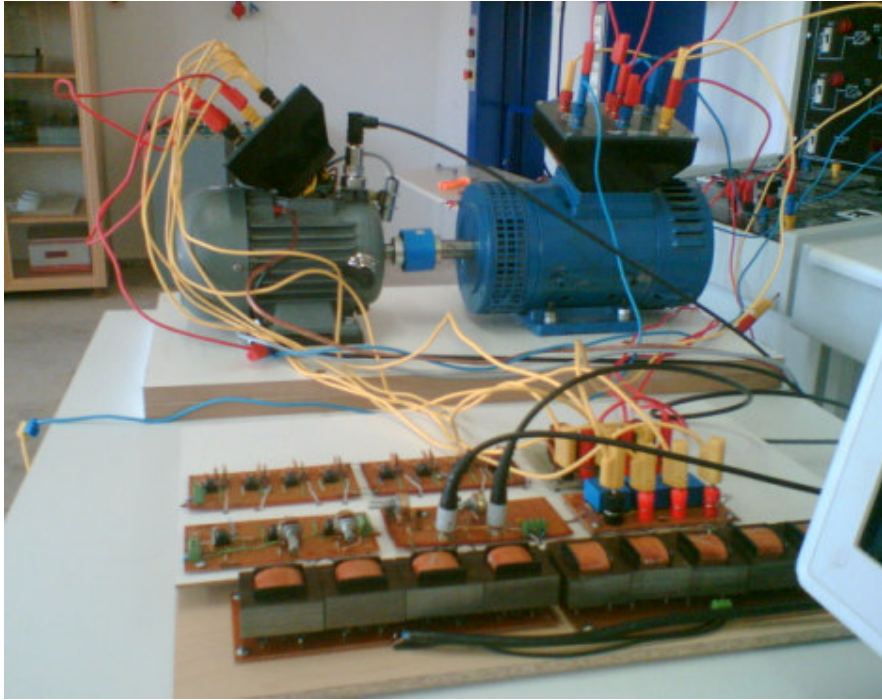
göre karar verilebilir. Genelleme olarak ise 3.12' deki fonksiyon ile ayrıştırma seviyesinin miktarı (m) bulunabilir(Ye vd., 2006).

3.2 Arıza Tespit Deney Düzeneği

3.2.1 Deneysel Düzenek

Bu bölümde motor arıza tanısı deneyinde kullanılan materyaller ve deney düzeneği hakkında bilgiler verilmiştir. Elektrik motorundan, arıza tanısında kullanılacak bilgilerin alınması için hazırlanan deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.17 de görülmektedir.

Bu deneysel çalışma, motordaki rulman arızasının dalgacık dönüşümü ile tespiti üzerine odaklanmıştır.



Şekil 3.17. Deney düzeneğinin fotoğrafı

Deney için, 1 HP güce sahip Volt Elektrik firmasına ait, 4 kutuplu asenkron motor kullanılmıştır. Motor üç fazlı olup, teknik özellikleri Tablo 3.1' de verilmiştir.

Yapay arıza oluşturma süreçleri sonucunda aşınan motor rulmanının, iç bilezik, dış bilezik veya bilyelerinde bozulmalar oluşur. Arıza tanısı, bozulan rulman bileşenlerinin, motor çalışırken ürettikleri sinyaller incelenerek tespit edilir. Bir rulmanın bileşenleri Şekil 3.18'de verilmiştir. Üretilen arıza sinyallerinin frekansları rulmanın teknik özelliklerine göre değişiklik gösterir ve (3.13), (3.14), (3.15) ve (3.16) deki fonksiyonlar kullanılarak hesaplanır.

$$f_r = d / 60 \quad (3.13)$$

Rotor frekansının bulunduğu bu denklemde d motorun dakikadaki devir sayısını gösterir. 3.14 denklemi ile iç bilezik, 3.15 ile dış bilezik ve 3.16 ile de bilye hata frekansları hesaplanır. Bu denklemlerdeki n rulmandaki bilye sayısını, BD bilye çapını, PD dış açıklık çapını, β temas açısını göstermektedir.

$$f_i = n / 2 (1 + (BD / PD) \cos \beta) f_r \quad (3.14)$$

$$f_d = n / 2 (1 - (BD / PD) \cos \beta) f_r \quad (3.15)$$

$$f_b = (PD / BD) (1 - (BD / PD)^2 \cos^2 \beta) f_r \quad (3.16)$$

Deney motorunda kullanılan ORS marka 6204 rulmanının teknik bilgileri Tablo 3.2 ve arıza durumlarında, hesaplanan frekans değerleri Tablo 3.3' de verilmiştir.

Tablo 3.1. Test motoru teknik özellikleri

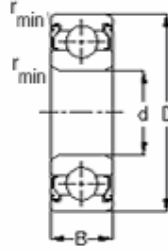
Üretici firma	Volt Elektrik
Tip	İndüksiyon
Güç	1 HP (0.75 kW)
Gerilim	380 V
Akım	2,1 A
Hız	1370 rpm (Tam yükte)
Güç Katsayısı	0,72 Cos
Verim	73 n %
Moment	5,2 Nm
Kalkış Akımı	9,8 A
Kalkış Momenti	10 Nm
Devrilme Momenti	10,4 Nm
Rotor oluk sayısı	22
Stator oluk sayısı	24
Rulman tipi	ORS 6204
Yaklaşık Ağırlık	8,6 kg

Tablo 3.2. Rulman teknik bilgileri

Rulman No	6204 ZZ
Bilya Sayısı	8 adet
Bilya Çapı	7,938 mm
İç Bilezik Çapı	20 mm
Dış Bilezik Çapı	47 mm
Diş Açıklık Çapı	33.5 mm
Temas Açısı	0
Rulman Eni	14 mm
Rulman Devir Aralığı	14000 rpm

Tablo 3.3. 6204 rulmanın hesaplanan hata frekans değerleri

Rotor frekansı	Dış Bilezik Hatası	Bilye Hatası	İç Bilezik Hatası
22.8 Hz	69.6 Hz	90.8 Hz	112.8 Hz



Şekil 3.18. Rulman bileşenleri

Arıza tespiti için hazırlanan deney düzeneğinin şeması Şekil 3.20' de verilmiştir. Motora uygulanacak yük için 1 HP gücünde, 200V , 4.5A'lık 1500 rpm dönüş hızına sahip Femsan firmasına ait bir DC motor kullanılır. DC motor çıkışı da 1800 W gücünde 27Ω dirence sahip bir ısıtıcıyla yüklenir. Ayrıca bir reosta sayesinde motordan alınacak akım kontrol edilir.

3.2.2 Yapay Arıza Oluşturma

Motor rulmanını bozmak için, yapay arıza oluşturma süreçleri temel alınarak(Ayaz, 2002), rulman nem, ısı ve akıma maruz bırakılır. Rulmanda arıza oluşturmak için beş ayrı işlem yapılır.

İlk olarak rulman kapağı çıkarılarak, içerisindeki yağ alınır ve rulman yağsız bırakılır. Rulmanda korozyona sebep olmak için 12 saat süreyle tuzlu suyun içerisinde bırakılır ve hemen arkasından bir ısıtıcıyla rulman 1 saat ısıtılır. Bu işlem iki defa gerçekleştirilir. Sonraki aşamada rulmana, bir kaynak makinesi ile 30 dakika

boyunca kesik aralıklarla akım verilir ve son olarak ta rulmanın içerisine demir tozu atılır.

Rulman eskitme aşamalarından geçirildikten sonra üst kapağı takılır ve elektrik motoruna monte edilir. Eskitme aşamalarından geçirilerek yapay arıza oluşturulan rulmanın fotoğrafı Şekil 3.19' da verilmiştir.



Şekil 3.19. Yapay arıza oluşturulan rulmanın fotoğrafı

3.2.3 Veri Toplama Sistemi

Motordan hatasız durum ve arızalı durum için veri toplamada kullanılacak deney düzeneğinin şeması Şekil 3.20' de verilmiştir. Veri toplama işlemine başlamadan önce, motor 15 dakika yüksüz çalışmaya bırakılır. Kararlı duruma ulaşan motora yük uygulanır. Yük uygulanmış halde 15 dakika daha çalıştırılır ve arkasından veri toplama işlemi yapılır. Veri toplama işleminde motordan alınan aşağıdaki veriler kaydedilir.

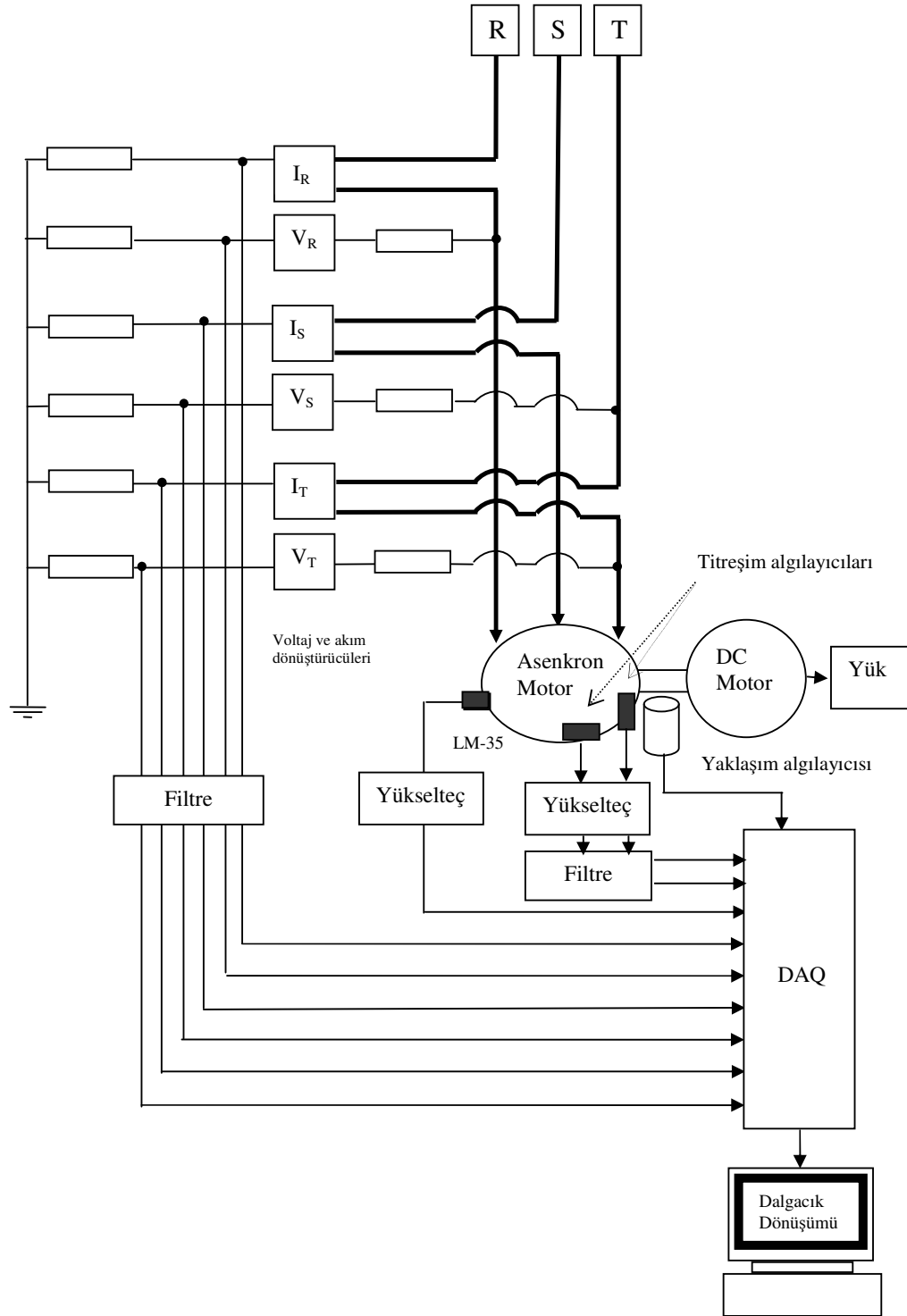
1. Motor sıcaklığı
2. 3 faz motor gerilimi
3. 3 faz motor akımı
4. Motor titreşimleri
5. Motor hızı

Motordan sıcaklık bilgisini almak için LM-35 ısı algılayıcısı kullanılır. Isı algılayıcısı 1 °C' de 1mV çıkış gerilimi üretir. Bu değer Şekil 3.21' de verilen yükselteç devresi sayesinde 166 kat arttırılarak veri işleme kartına uygulanır.

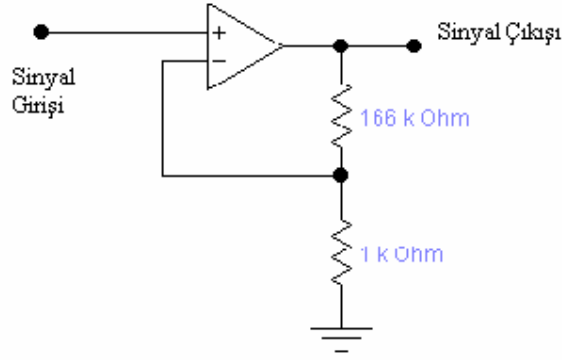
LEM firmasının üretmiş olduğu LV25-P gerilim dönüştürücüsü sayesinde motor gerilim bilgisi, aynı firmanın LTA 100P akım dönüştürücüsü sayesinde de her faz için motora uygulanan gerilim ve akım değerleri alınır. Gerilim ve akım bilgilerini almak için kullanılan devrelerin fotoğrafı Şekil 3.26' da görülebilir.

Titreşim bilgilerini almak için kullanılan iki tane titreşim algılayıcısı Metra Mess firmasının KS80C algılayıcısıdır ve teknik özellikleri Tablo 3.4' de verilmiştir. Algılayıcılardan bir tanesi motora yatay diğeri de dikey olarak, rulmana yakın olacak şekilde mıknatısla montaj edilir. Titreşim algılayıcılarından alınan sinyallerin genliği düşük olması sebebiyle her biri için yükseltme yapılır. Kullanılan yükseltme devresi Şekil 3.22' de verilmiştir. Titreşim algılayıcılarını aşırı akımdan korumak ve çalışmalarının kararlı hale getirilmesi için sabit akım kaynaklarıyla beslenmesi gerekir. Deney düzeneğinde, titreşim algılayıcılarının beslemesi için kullanılan devre Şekil 3.23' de verilmiştir.

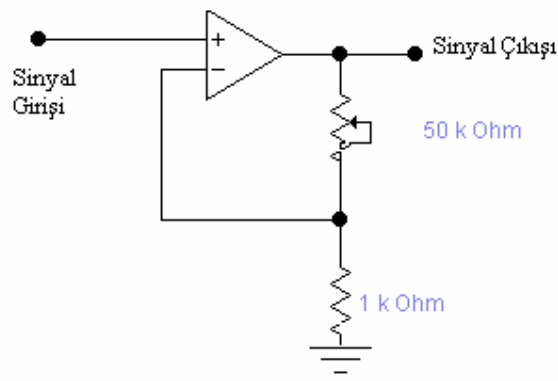
Motor hız bilgisi ise Contrinex firmasının ürettiği DW-AD-509-M18-390 yaklaşım algılayıcısı ile alınmıştır. Yaklaşım algılayıcısı, motor milinin her bir devrini tamamlamasında ürettiği gerilim değerlerine göre, motor milinin, devir sayısı ve dolayısıyla da hızının ve frekansının tespiti için kullanılmıştır. Bu algılayıcının teknik özellikleri de Tablo 3.5' de verilmiştir.



Şekil 3.20. Motor arıza bilgisi almak için kullanılan deney düzenek şeması



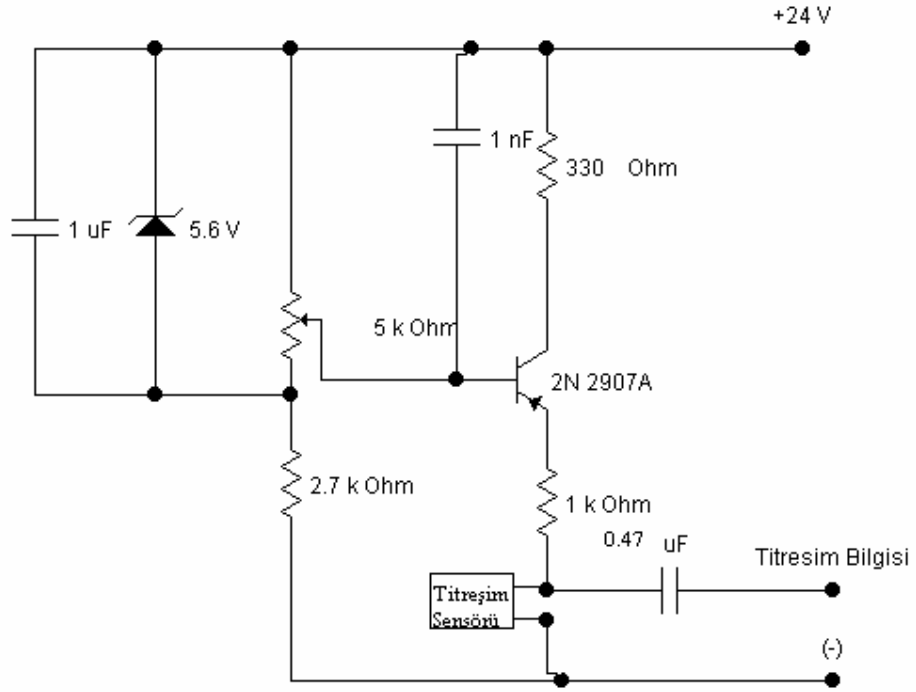
Şekil 3.21. LM-741 opamp ile yapılan 166 kat yükseltme devre şeması



Şekil 3.22. LM-741 opamp ile yapılan 50 kat ayarlı yükseltme devre şeması

Tablo 3.4. Titreşim algılayıcısı teknik özellikleri

Üretici firma	Metra Mess
Tip	KS80C
Gerilim Duyarlılığı	100 mV/g
Besleme Gerilimi	24-30 V
Besleme Akımı (Sabit)	2-20 mA
Frekans Aralığı	0.7-10000 Hz
Ağırlık	70 g



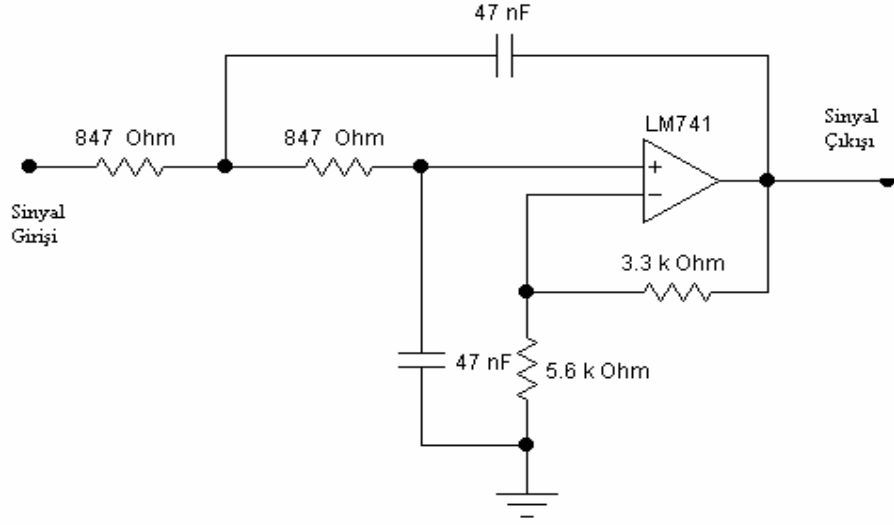
Şekil 3.23. Titreşim algılayıcıları beslemesi için sabit akım kaynağı devre şeması

Tablo 3.5. Yaklaşım algılayıcısı teknik özellikleri

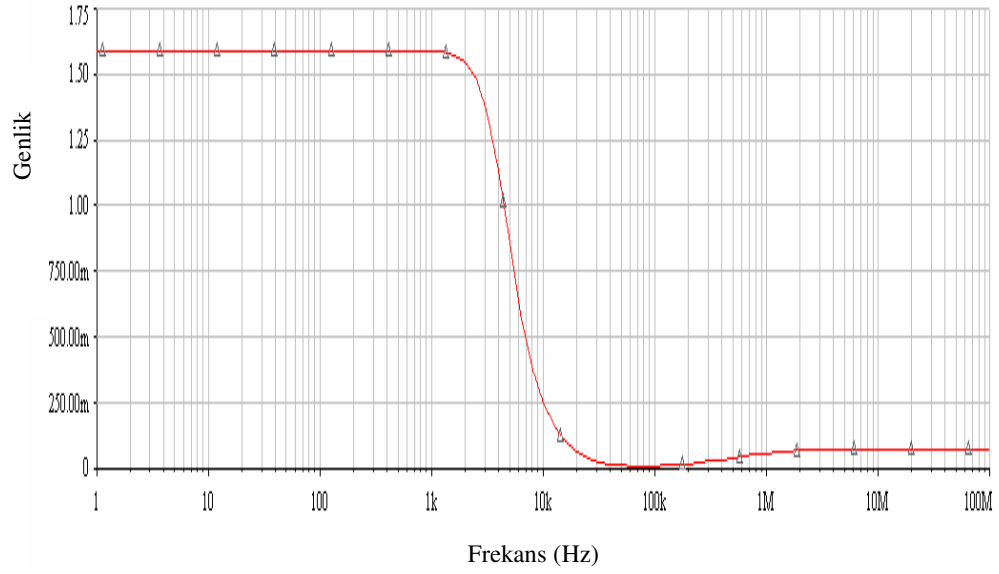
Üretici firma	Contrinex
Tip	Analog
Model	DW-AD-509-M18-390
Çıkış Gerilimi	0-10 V
Besleme Gerilimi	15-30 V
Akım	4-20 mA
Ölçüm Mesafesi	10 mm

Gerilim, akım ve titreşim bilgileri içerisinde istenmeyen frekans değerlerini analiz dışında bırakmak için filtreler kullanılır. Üç tane gerilim, üç tane akım ve iki

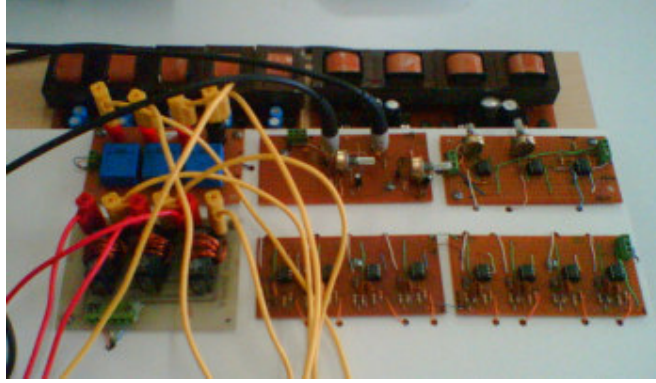
tane de titreşim için olmak üzere deney düzeneğinde, sekiz tane aynı karakteristiğe sahip Butterworth tipi ikinci dereceden 3 kHz'lik alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Kullanılan filtrelerin devresi Şekil 3.24, frekans tepkisi Şekil 3.25' de verilmiştir.



Şekil 3.24. Alçak geçiren filtre devre şeması



Şekil 3.25. Alçak geçiren filtre frekans tepkisi



Şekil 3.26. Deneysel verileri elde etmek için kullanılan devreler

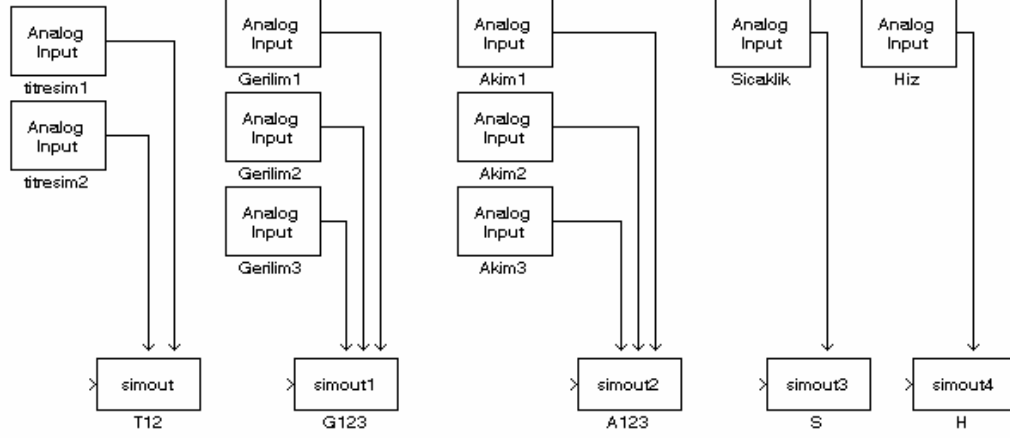
Deney düzeneği kullanılarak elektrik motorundan 10 saniye süre ile veriler alınır. Gerilim ve akım dönüştürücü devreden alınan altı durum bilgisi, her biri için ayrı tasarlanmış aynı özelliklere sahip filtrelerden geçirilir. İki tane titreşim algılayıcılarından alınan veriler düşük genlikte oldukları için yükseltildikten sonra filtrelenir. Aynı şekilde ısı algılayıcısı çıkışı da yükseltilerek sinyal işleme kartına uygulanır. Yaklaşım algılayıcısı bilgisi ile birlikte 10 farklı veri, bilgisayara takılmış olan sinyal işleme kartı üzerinden bilgisayara aktarılıp kaydedilir.

3.2.4 Veri Toplama Kartı

Elektrik motorundan alınan sinyaller analog sinyallerdir. Bu sinyallerin bilgisayar tarafından işlenmesi için verilerin sayısallaştırılması gerekir. Deneysel düzenek kullanılarak elde edilen verilerin bilgisayara aktarılmasında Advantech firmasına ait PCI 1710HG veri işleme (Data Acquisition) kartı kullanılmıştır. 12 bitlik olan bu kart ile 10 kanaldan alınan analog sinyal bilgileri dijital olarak çevrilerek bilgisayara kaydedilir. Kartın örnekleme hızı 100 kHz' dir. Elektrik motorundan alınan on farklı sinyal için kullanılan örnekleme frekansı 2.5 kHz' dir.

Veri işleme kartından sinyal bilgilerini alıp bilgisayara kaydetmek için, Matlab programının RTW ve Simulink araç kütüphaneleri kullanılır. Deneysel düzenden

on farklı sinyali sayısal olarak alıp kaydeden Simulink model'i Şekil 3.27' de verilmiştir.



Şekil 3.27. Verileri kaydetmek için kullanılan Simulink modeli

Veri elde etme işlemi iki aşamada gerçekleştirilir. İlk olarak, arıza aşamaları rulmana uygulanmadan önce deney düzeneği ile sağlam durum bilgileri, arkasından da rulman, arıza oluşturma aşamalarından geçirildikten sonra arızalı durum verileri deney düzeneği kullanılarak bilgisayara kaydedilir. Veriler alınmadan önce elektrik motoru tam yükte 15 dakika süre ile çalıştırılır ve böylece motorun kararlı hale gelmesi sağlanır.

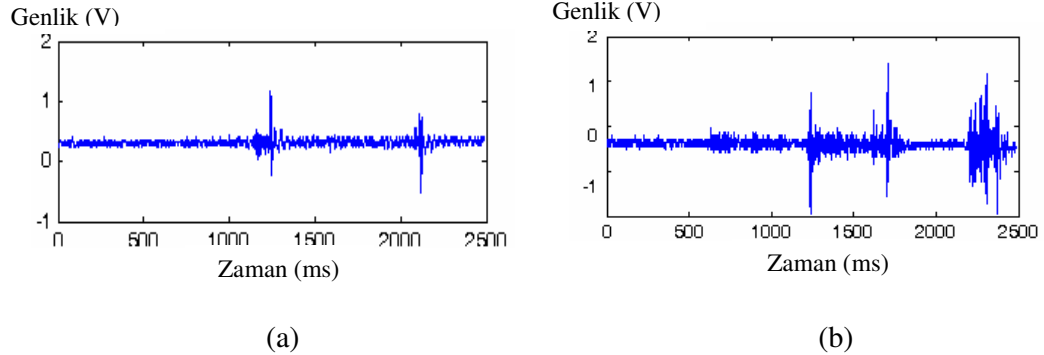
4. DENEY BULGULARI

Bu bölümde, deney düzeneği kullanılarak alınan verilerin, bilgisayara kaydedildikten sonra ADD kullanılarak analizleri anlatılmıştır. Hem bozuk durum hem de arızalı durum bilgileri için uygulanan ADD, db5 dalgacığı ile 6 seviyede gerçekleştirilmiştir.

Arıza tespitinde kullanılan en iyi iki yöntem, titreşim ve akım bilgilerinin takip edilmesidir(Ayaz, 2002). Bu sebeple ADD titreşim ve akım bilgilerine ayrı ayrı uygulanmıştır.

4.1 Titreşim Sinyallerinin Analizi ile Arıza Tespiti

Şekil 4.1’de hatasız ve hatalı durumlardaki titreşim bilgilerinin zaman-genlik düzlemindeki gösterimleri verilmiştir. Şekil 4.1’e bakıldığında, hatasız duruma göre, arızalı durum sinyalinin genlik değerlerindeki artış fark edilmektedir.



Şekil 4.1. Motordan alınan titreşim bilgileri

(a) Hatasız durum (b) Arızalı durum

Titreşim bilgilerine ÇÇA amacıyla, ADD uygulanmış ve Şekil 4.2’de motor hatasız durum sinyalinin yaklaşımları, Şekil 4.3’de ise detayları verilmiştir.

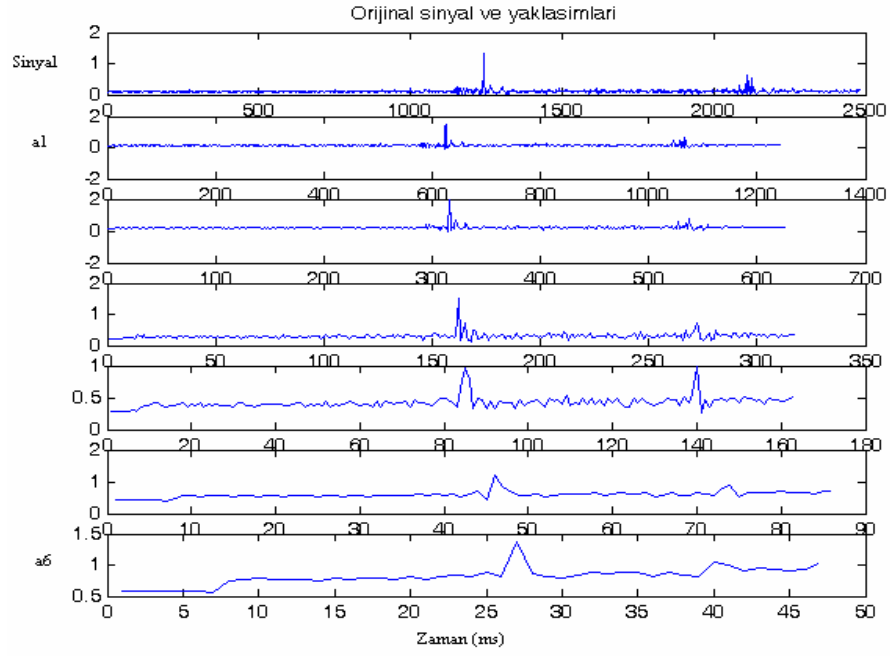
Motor rulmanı, yapay arıza aşamalarından geçirildikten sonra alınan arızalı durum sinyallerinin, ADD sonrası bulunan yaklaşımları Şekil 4.4’de, detayları ise Şekil 4.5’de verilmiştir. Arızalı durum sinyallerine de db5 dalgacığı ile 6 seviye ayırıştırma işlemi uygulanmıştır.

Yaklaşımlar sinyalin düşük frekanslı değerlerini, detaylar ise yüksek frekanslı değerlerini temsil eder. Titreşim bilgisi, 3 kHz değerindeki AGF’ den geçirildikten sonra alındığı için 3 kHz ve üzeri sinyalleri içerisinde bulundurmamaktadır. Tablo 4.1’de bulunan yaklaşım ve detay bilgilerinin ait oldukları frekans bantları verilmiştir.

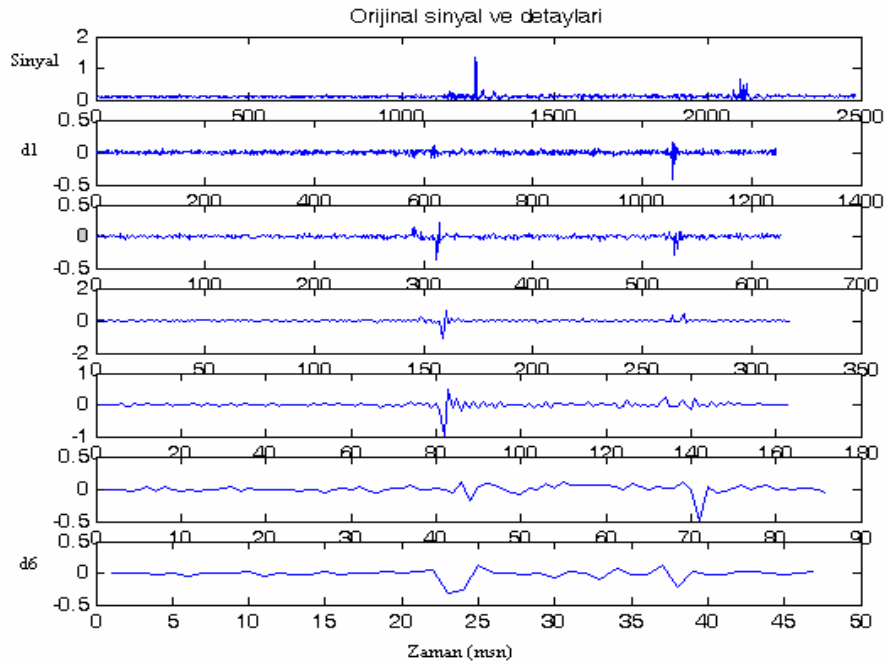
Rulman hatalarının tespitinde baz alınacak en iyi eğilim 1.5 – 3 kHz arasındaki alt bantlardır(Ayaz, 2002). Tablo 4.1’e göre, arızanın tespit edilmesi için kullanılacak olan frekans aralığı d1 detaydır. Arızalı durum sinyalinin ÇÇA sonucunda oluşan d1 detayının spektrumu Şekil 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.1. Titreşim sinyalinin yaklaşım ve detay alt bantları

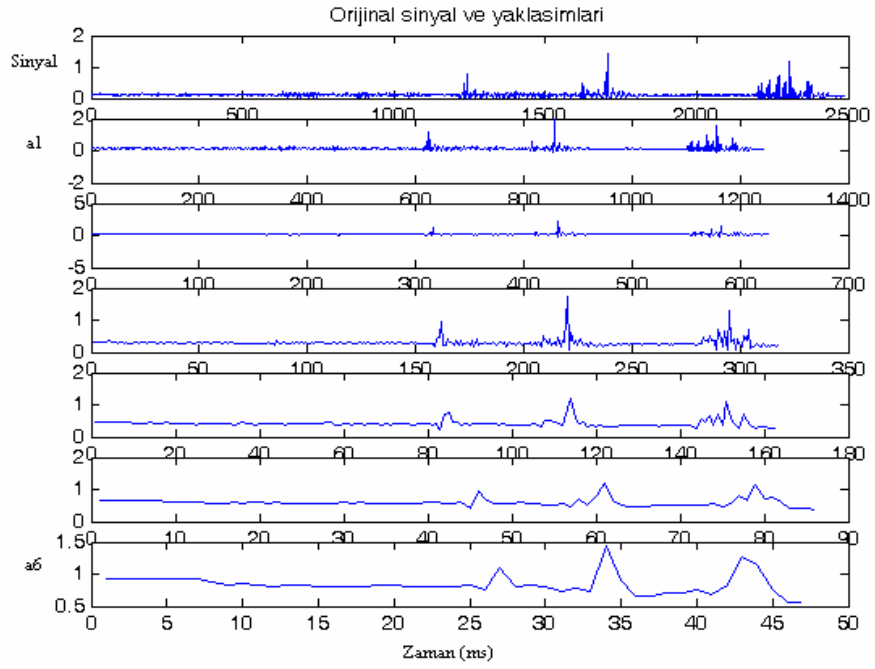
Yaklaşımlar	Yaklaşım Alt Bantlar (Hz)	Detaylar	Detay Alt Bantları (Hz)
a1	0-1500	d1	1500-3000
a2	0-750	d2	750-1500
a3	0-375	d3	375-750
a4	0-187.5	d4	187.5-375
a5	0-93.75	d5	93.75-187.5
a6	0-46.88	d6	46.88-93.75



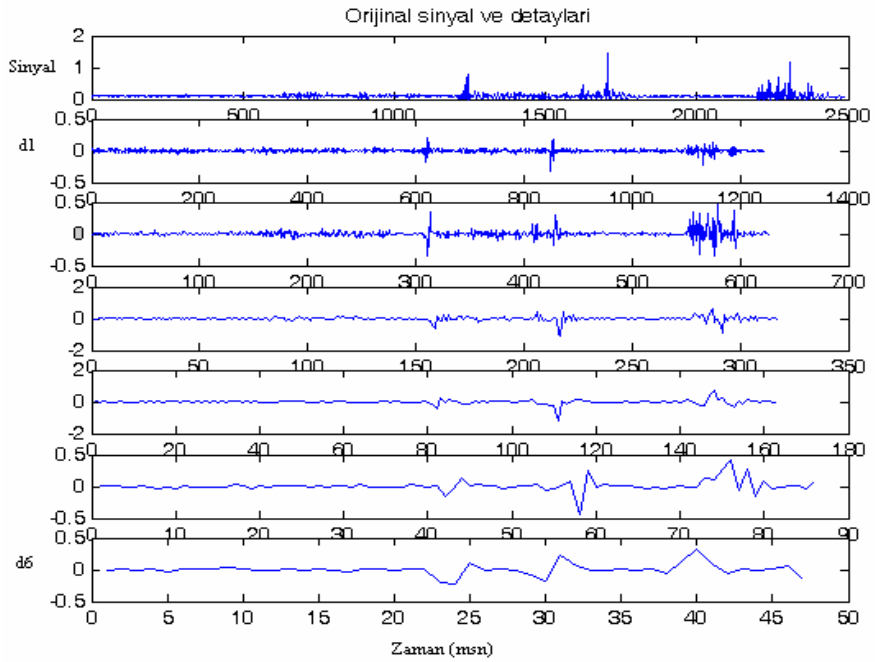
Şekil 4.2. Sağlam durumda alınan titreşim sinyalinin yaklaşımları



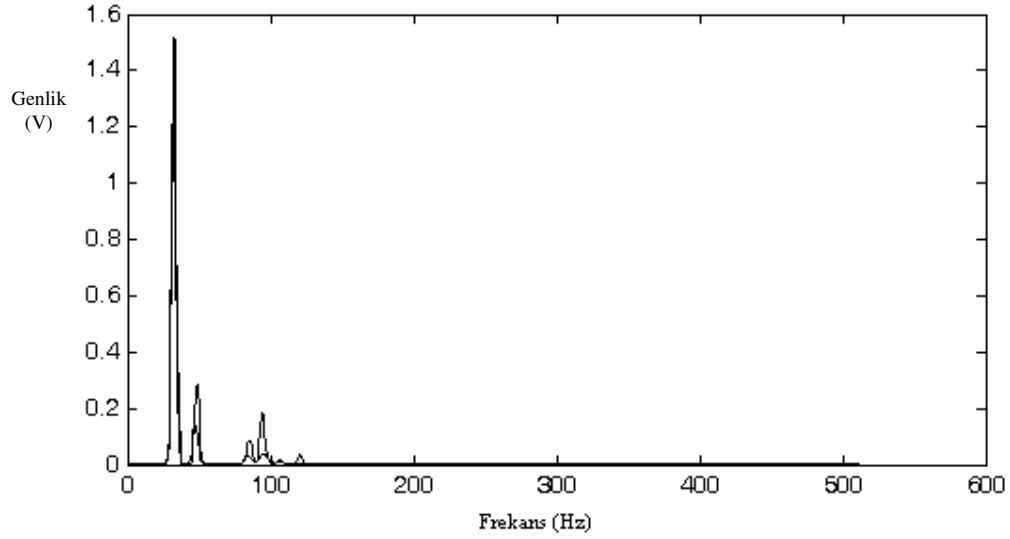
Şekil 4.3. Sağlam durumda alınan titreşim sinyalinin detayları



Şekil 4.4. Arızalı durumda alınan titreşim sinyalinin yaklaşımları



Şekil 4.5. Arızalı durumda alınan titreşim sinyalinin detayları

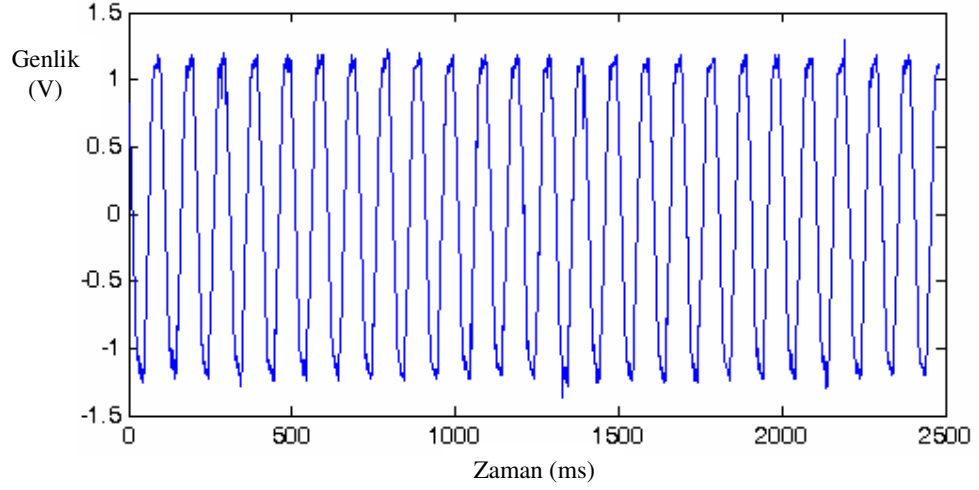


Şekil 4.6. Arızalı durum titreşim sinyalinin d1 detay spektrumu

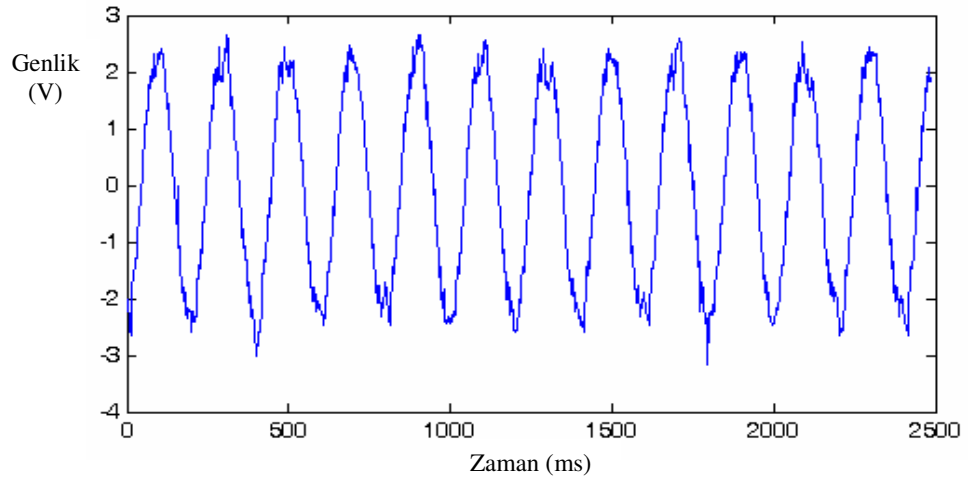
Şekil 4.6' da rotor frekansı, şebeke frekansı ve rulmanda oluşan arızalar açıkça görülmektedir. Rulmandaki en baskın arıza f_b ile gösterilen bilye arızasıdır. İç bilezikteki arıza çok büyük olmamakla beraber, spektrumda 113 Hz.'de tespit edilebilmektedir.

4.2 Akım Sinyallerinin Analizi ile Arıza Tespiti

Rulman arızasının rotor-stator arasındaki manyetik akı değişimine sebep olacağı ve motorun çektiği akımı etkileyeceği düşüncesi ile motor akımının analizi, rulman arızalarını belirlemede kullanılabilir(Schoen vd., 1995). Rulman arızalarını akım sinyalinin analizi ile tespit edilmesi için bir fazdan geçen akım sinyali Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Şekil 4.8' de ise arızalı durumda aynı fazdan geçen akımın şekli verilmiştir.

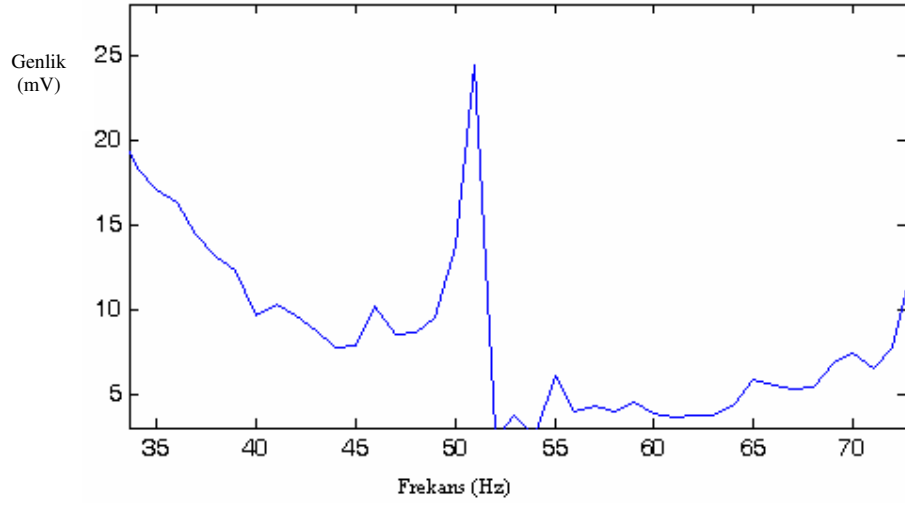


Şekil 4.7. Hatasız durum akım sinyali

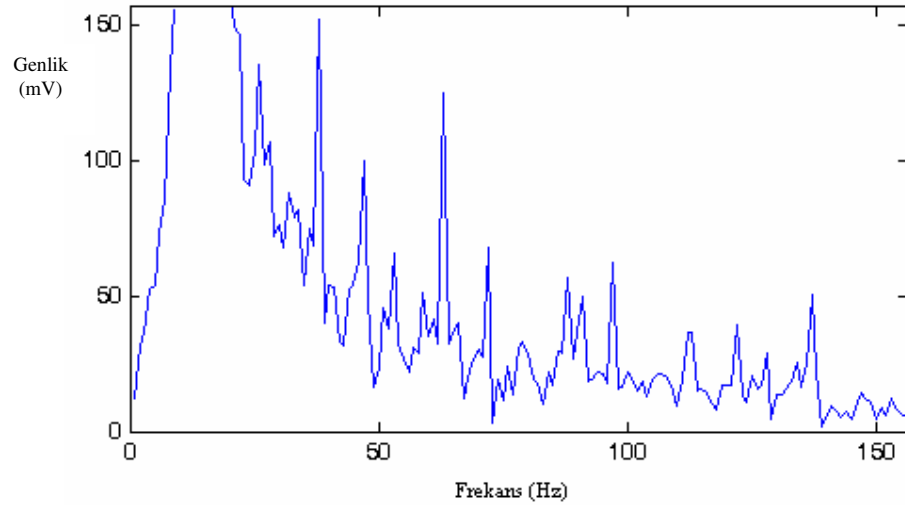


Şekil 4.8. Arızalı durum akım sinyali

Sinyallerin spektrumları çizilirse, 50 Hz olan şebeke frekansının yan bantlarındaki frekansların genlik değerlerindeki artış, rulman arızasının bir sonucu olarak düşünülebilir. Şekil 4.9 hatasız akım sinyali ve Şekil 4.10 arızalı durum sinyali için yan bant frekans değerlerindeki genliği göstermektedir.

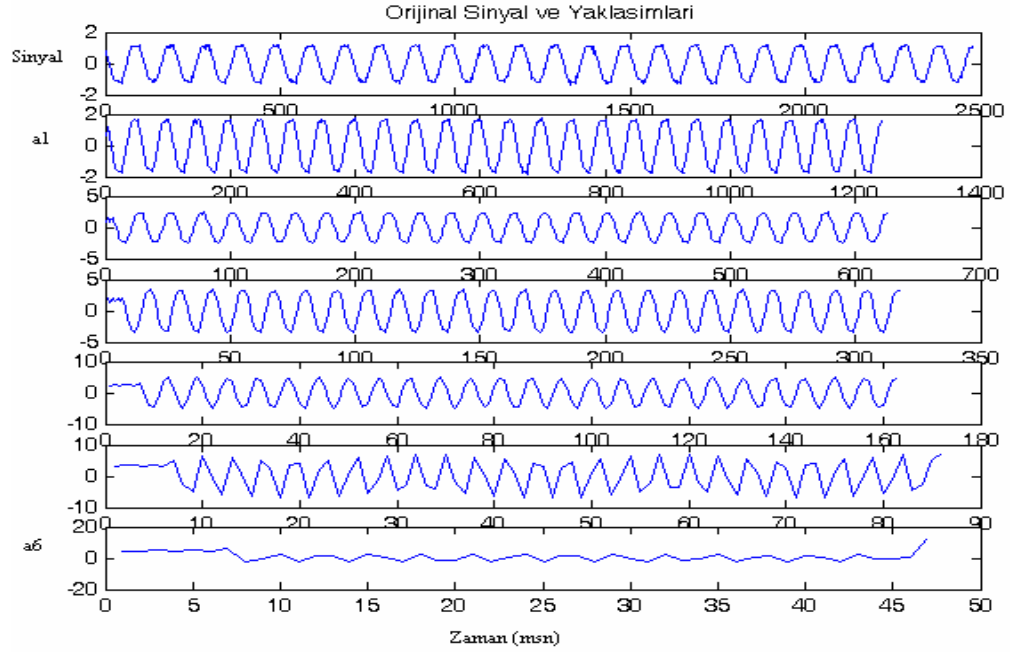


Şekil 4.9. Hatasız durum akım sinyali yan bantları

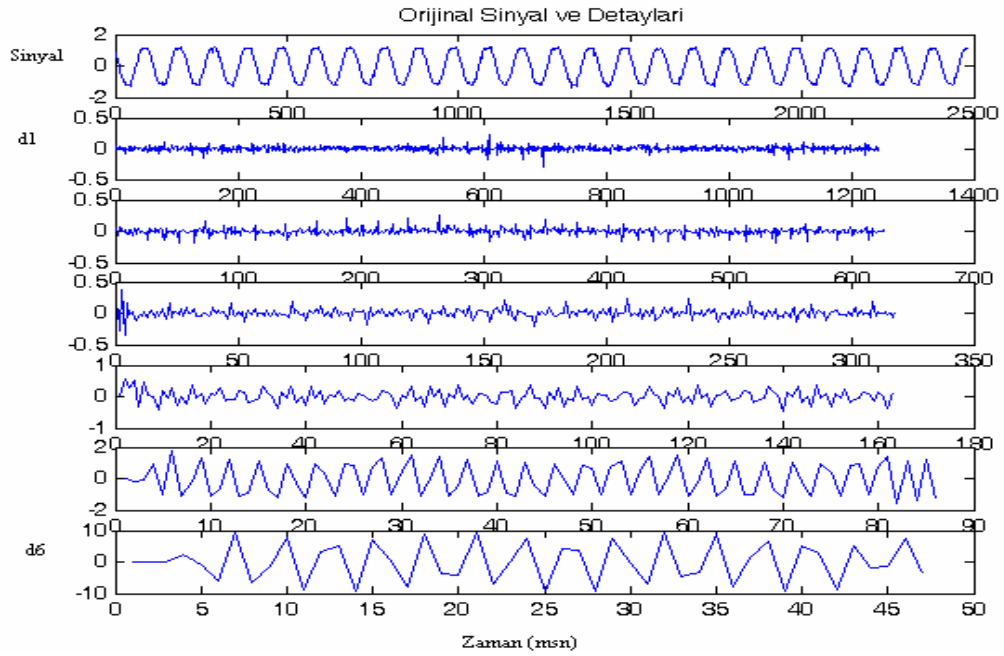


Şekil 4.10. Arızalı durum akım sinyali yan bantları

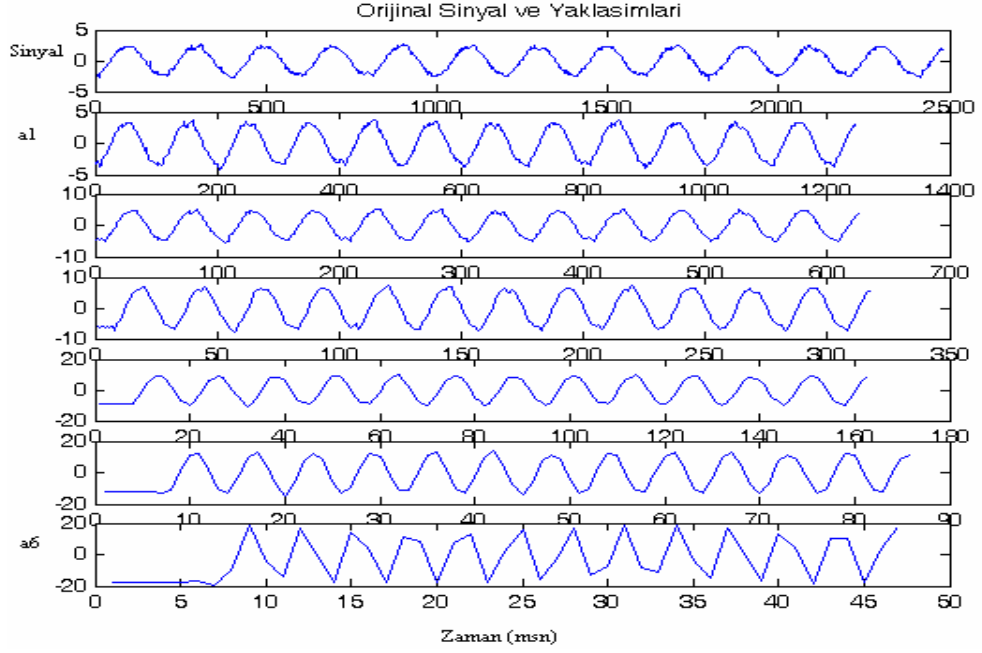
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 arıza tespit için kullanılamaz. Arızayı tespit etmek için ADD akım sinyallerine uygulanır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' de hatasız durum akım sinyali ve arızalı durum akım sinyali, yaklaşım ve detayları verilmiştir.



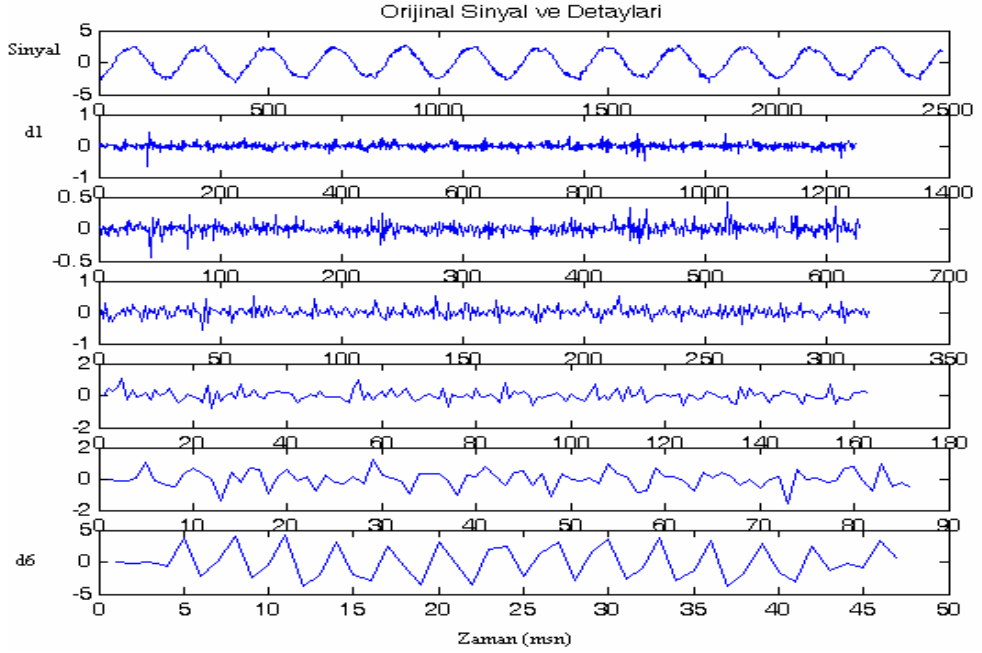
Şekil 4.11. Hatasız durum akım sinyali ve yaklaşımları



Şekil 4.12. Hatasız durum akım sinyali ve detayları

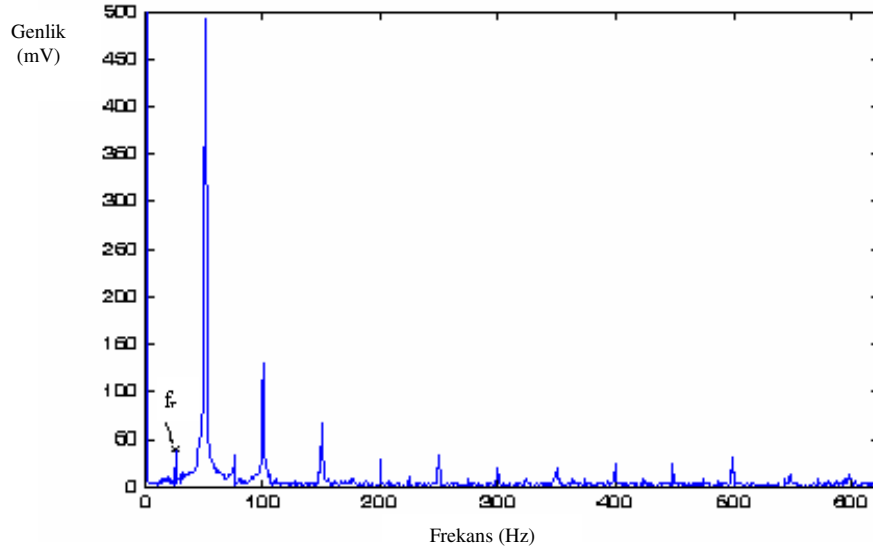


Şekil 4.13. Arızalı durum akım sinyali ve yaklaşımları

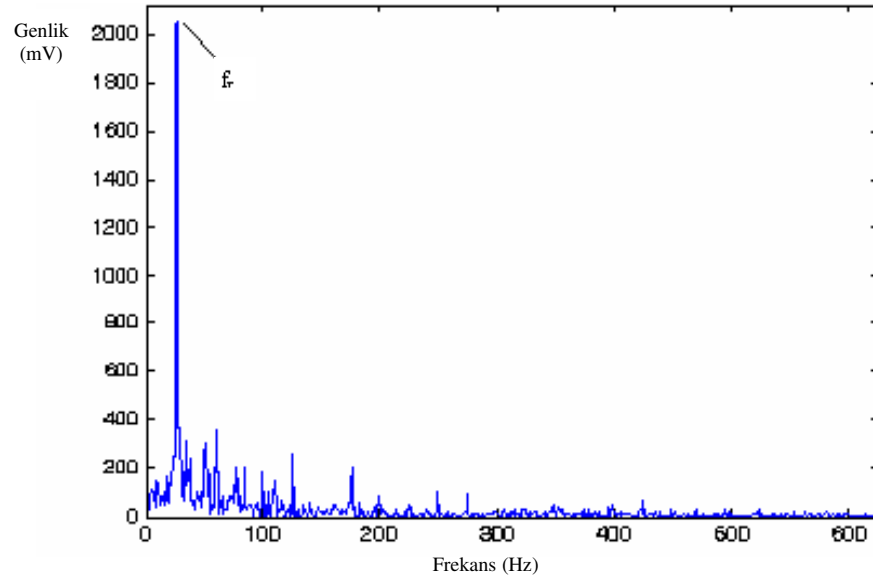


Şekil 4.14. Arızalı durum akım sinyali ve detayları

Şekil 4.12 ve Şekil 4.14' de d1 ve d2 detayları karşılaştırılacak olursa, rulmandaki arızalı durum için, yüksek frekanslı bileşenlerin ortaya çıktığı görülebilir. Akım analizi ile arızalı durum, rotor frekansının genlik değerindeki artış ile anlaşılır(Ayaz, 2002). Şekil 4.15 hatasız rotor frekansının genlik değerini ve Şekil 4.16' da arızalı motor için rotor frekansının genlik değerini göstermektedir.



Şekil 4.15. Hatasız durum rotor frekansı ve genliği



Şekil 4.16. Arızalı durum rotor frekansı ve genliği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, endüstride maliyeti ve ömründen dolayı en fazla tercih edilen asenkron motorlarda oluşan rulman arızalarının tanısı incelenmiştir. Elektrik motor arızalarının büyük bir kısmını rulman arızaları oluşturmaktadır(Şeker ve Ayaz, 2001). Motor kontrol devreleri sebebiyle, milden ve dolayısıyla rulmandan geçen akımlar, rulmandan parça koparmak suretiyle arıza oluşturur. Ayrıca aşırı ısı ve nem motorlarda korozyona sebep olur. Korozyon, elektrik motorlarında arıza oluşturan etkenlerden biridir.

Literatürdeki çalışmalarda, rulman arızalarının tespit edilmesi için titreşim ve akım bilgileri kullanılmıştır(McInerny ve Dai, 2003; Douglas vd., 2004). Bu tez çalışmasında ise rulman arızalarının tespit edilmesinde, hem titreşim verisi hem de akım verisi takip edilmiştir. Arıza tanısını gerçekleştirmek için kullanılacak deneysel düzenek, Bucak Emin Gülmez MYO elektrik laboratuvarında hazırlanmıştır.

Arıza tespitinde kullanılacak rulman, yapay eskitme aşamalarından geçirilmiştir. Yapay arıza süreçlerinin, motora zarar vermemesi için rulman sökümü ve yapay arıza oluşturma süreçleri sadece rulmana uygulanmıştır. Motordan, hatasız durum ve arızalı durum olmak üzere iki grup veri alınmış ve titreşim verisi ile akım verisi ADD tekniği ile analiz edilmiştir.

Titreşim verilerinin analizinde, sağlam motor verileri ile arızalı motor verileri incelenmiş ve eskitme aşamalarından sonra rulmanda oluşan bilye hatası ve dış bilezik hatası tespit edilmiştir. Rulmanın, yağsız bırakılması, korozyonun çok fazla olması ve içerisine demir tozları bulunması sebebiyle en fazla hata bilye hatası olarak tespit edilmiştir. Ayrıca rulmanın iç bileziğinin de bozulmaya başladığı belirlenmiştir.

Akım verisinin analizi sonucunda da, arıza tespit edilmiştir. Hatasız ve arızalı durumlarda motorun her bir fazından alınan akım sinyallerinin birbirine benzer oldukları belirlenmiştir. Akım sinyallerinden, bir fazdan alınan veriye ADD

uygulanmış ve ÇÇA yapılmıştır. Analiz sonucunda rotor frekansının genliğindeki artış tespit edilmiştir.

Bu anlamda, arızalı motorlardan alınacak titreşim verilerinin analizi, rulman arızalarını tespit etmede daha net sonuçlar ortaya çıkarır. ADD ile sinyal analizinde, endüstride kullanılan güçlü motorların yanı sıra, çok küçük güçteki motorlarında rulman arızaları tespit edilebilir.

Ayrıca rulman bileşenlerinden herhangi birinde, başlangıç aşamasındaki arıza tespit edilmiştir. Özellikle bu tespit, elektrik motorunun kullanıldığı, endüstriyel üretim sürecinin yarıda kesilmemesi için oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasının sonuçları, rulman hatalarının gerçek zamanlı dalgacık dönüşümü analizi ile tespiti çalışmalarında kullanılabilir. Arızanın başlangıç aşamasında tespit edilmesi ile gerçek zamanlı çalışan bir erken uyarı sistemi gerçekleştirilebilir. Arızanın ne zaman sistemi işlemez hale getireceğinin hesaplanması ve bu zaman dilimi içerisinde tedbirlerin alınarak, arızanın en az maddi ve zaman kaybıyla aşılması, ekonomik bir katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Aktürk, N., Erođlu, M., Karaçay, T., 2002. Rulmanların Titreşimlerinin İncelemesiyle Rulmanlarda Sağlık Kontrollerinin Yapılması. DPT Projesi, Proje Kodu: DPT 95 K 120370.
- Altmann, J., 1996. <http://www.wavelet.org/tutorial/index.html>
- Arslan, H., Orhan, S., Aktürk, N., 2003. Bilyeli Rulman Hasarlarının Neden Olduğu Titreşimlerin Modellenmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der Cilt 18, No 4, 123-146.
- Ayaz, E., 1997. Dalgacıklar ve Elektrik Mühendisliği'ndeki Uygulamaları. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Y.Lisans Tezi, 56s, İstanbul.
- Ayaz, E., 2002. Elektrik Motorlarında Dalgacık Analizi Yaklaşımı İle Rulman Arıza Tanısı Ve Yapay Zeka Tabanlı Bir Durum İzleme Sistemi. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 121s, İstanbul.
- Bae, H., Kim, Y.T., Lee, S.H., Kim, S., Lee M.H., 2005. Fault Diagnostic of Induction Motors for Equipment Reliability and Health Maintenance based upon Fourier and Wavelet Analysis. Artif Life Robotics 9, 112–116.
- Boltezar, M., Simonovski, I., Furlan, M., 2003. Fault Detection in DC Electro Motors Using the Continuous Wavelet Transform. Meccanica 38, 251–264.
- Chhokra, K., 2002. Applications of Wavelets Data Compression. www.vuse.vanderbilt.edu/~chhokrk/math297/wavelet_compression.ppt
- Çankaya, İ., Vatansever F., 2002. Fourier ve Dalgacık Dönüşümünün Karşılaştırılması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 6-3, 16-26.
- Çolak, İ., Çelik, H., Sefa, İ., Demirbaş, Ş., 2005. On Line Protection Systems for Induction Motors. Energy Conversion and Management 46, 2773-2786.
- Daubechies,I., 1990. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis. IEEE Transactions on Information Theory, Vol.36, No.5, 961-1005.
- Douglas, H., Pillay, P., Ziarani, A,K., 2004. A New Algorithm for Transient Motor Current Signature Analysis Using Wavelets. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 5, 1361-1368.

- Eren, L., Devaney, M.J., 2002. Bearing Damage Detection via Wavelet Packet Decomposition of the Stator Current. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conferences, Anchorage, AK, USA.
- Geng, Z., Chen, J., 2005. Investigation into Piston-Slap-Induced Vibration for Engine Condition Simulation and Monitoring. Journal of Sound and Vibration 282, 735-751.
- Graps, A., 1995. An Introduction to Wavelets. IEEE Computational Sciences and Engineering, Volume 2, Number 2, 50-61.
- Graps, A., 2004. <http://www.amara.com/current/wavelet.html>
- Güler, İ., Übeyli, E.D., 2004. Dalgacık Dönüşümünün Kullanımı ile Teşhis Sistemleri İçin Öznitelik Çıkarma: İç Karotid Atardamar Doppler İşaretlerinin Durum Analizi. Asyu-Inista.
- Johansson E., 2005. Wavelet Theory and some of its Applications. Lulea University of Technology Department of Mathematics, Licentiate Thesis, 76s, Lulea, Sweden.
- Lin, S.T., Mcfadden, P.D., 1997. Gear Vibration Analysis by B-Spline Avelet-Based Linear Wavelet Transform. Mechanical Systems and Signal Processing 11(4), 603 -609.
- Liu, B., 2005. Selection of Wavelet Packet Basis for Rotating Machinery Fault Diagnosis. Journal of Sound and Vibration, Volume 284, Issues 3-5, 567-582.
- Makinacı, M., 2003. Normal ve Kanserli Hücre Çekirdeklerinin Dalgacık Dönüşüm Yöntemi ile Sınıflandırılması. DEÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi Cilt:5, Sayı:1, 27-34.
- Mallat S.G., 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. II, NO. 7, 674-693.
- Marcianesi, A., Scaletti S., Speciale, N., 2001. A New Wavelet-Based Algorithm for Filtering Low SRN Signals. Neural Networks for Signal Processing XI, Proceedings of the IEEE Signal Processing Society Workshop, 549-558.
- McInerny S.A., Dai Y., 2003. Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection. IEEE Transactions on Education, Vol. 46, NO. 1, 149-156.
- Misiti M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J., 2004. User Guide Wavelet Toolbox For Use with MATLAB.
www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/wavelet/wavelet_ug.pdf

- Orhan, S., Arslan, H., Aktürk N., 2003. Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 18, No 2, 39-48.
- Phillips W,J., 2003. <http://www.engmath.dal.ca/courses/engm6610/notes/>
- Pillis L,G., Radunskaya A,E., 2003. An Introduction to Fourier Transforms, Fourier Series and the FFT. oldsite.capital.edu/acad/as/csac/Keck/modules/Depillis/Fourier/Intro.pdf
- Polikar, R., Udpa, L., Udpa, S,S., Taylor T., 1998. Frequency Invariant Classification of Ultrasonic Weld Inspection Signals. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, No. 3, 614-625.
- Polikar, R., 2001. <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>
- Purushotham, V., Narayanan, S., Suryanarayana, A,H,P., 2005. Multi-Fault Diagnosis of Rolling Bearing Elements Using Wavelet Analysis and Hidden Markov Model Based Fault Recognition. NDT&E International 38, 654-664.
- Rioul, O., Vetterli, M., 1991. Wavelets and Signal Processing. Signal Processing Magazine IEEE, Volume: 8, Issue: 4, 14-38.
- Schoen, R,R., Habetler, T,G., Kamran, F., Bartheld, R,G., 1995. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring. IEEE Transactions on Industry Applications, 31, No.6, 1274-1279.
- Şeker, S., Ayaz, E., 2001. Endüstriyel Süreçlerde Durum İzleme ve Öngörülü Bakım Teknolojileri. İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Dergisi Yıl:2001-2002, Cilt:1, Sayı:1, 140-142.
- Şeker, S., Ayaz, E., 2003. Feature Extraction Related to Bearing Damage in Electric Motors by Wavelet Analysis. Journal of the Franklin Institute 340, 125-134.
- Uçan, O,N., 2003. İşaret ve Görüntü İşlemede Yeni Yaklaşımlar. İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No:4408, 213s. İstanbul.
- Valens, C., 1999. A Really Friendly Guide to Wavelets. <http://perso.wanadoo.fr/polyvalens/clemens/wavelets/wavelets.html>
- Xinsheng, L., Kenneth, A,L., 2004. Bearing Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform and Fuzzy Inference. Mechanical Systems and Signal Processing 18, 1077-1095.
- Ye, Z., Sadeghian, A., Wu, B., 2006. Mechanical Fault Diagnostics for Induction Motor with Variable Speed Drives Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. Elektric Power System Research 76, 742-752.

Yiakopoulos, C.T., Antoniadis, I.A., 2002. Wavelet Based Demodulation of Vibration Signals Generated by Defects in Rolling Element Bearings. *Shock and Vibration* 9, 293-306.

Zanardelli, W.G., Strangas, E.G., Khalil, H.K., Miller, J.M., 2005. Wavelet-Based Methods for the Prognosis of Mechanical and Electrical Failures in Electric Motors. *Mechanical Systems and Signal Processing* 19, 411-426.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hüseyin FİDAN

Doğum Yeri : Yozgat

Doğum Yılı : 1974

Medeni Hali : Evli

Eğitim Ve Akademik Durumu:

Lise : 1988 – 1992 Kayseri Endüstri Meslek Lisesi Bilgisayar Bölümü

Lisans : 1992-1997 Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Elektronik ve Bilgisayar Öğretmenliği

Yabancı Dil : İngilizce

İş Denevimi

1997-1998 Milli Eğitim Bakanlığı
Ankara Bala Endüstri Meslek Lisesi
Öğretmen

1998- Süleyman Demirel Üniversitesi
Bucak Hikmet Tolunay Meslek Yüksekokulu
Öğretim Görevlisi