

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KESTİRİMCİ BAKIM VE ELEKTRİK MOTORLARINDA TİTREŞİM ANALİZİ
İLE ERKEN ARIZA TEŞHİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Müh. Sinan SARAÇ
504970302011

98447

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Mayıs 1999
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 1999

Tez Danışmanı : Prof. Dr. M. Emin Tacer
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Nurdan Güzelbeyoğlu
Doç. Dr. Tamer Ölmez

08/07/1999

Nurdan Güzelbeyoğlu
Prof. Dr. Nurdan Güzelbeyoğlu
Doç. Dr. Tamer Ölmez

HAZİRAN 1999

ÖNSÖZ

Ülkemizin mühendislik alanındaki en önde gelen bilim yuvası olan İstanbul Teknik Üniversitesi mezunu olmak ve yine bu üniversitede yüksek lisansımı yapmaktan dolayı büyük onur ve sevinç duyduğumu belirtmek istiyorum.

Gerek lisans gerekse yüksek lisans öğrenimim boyunca altı yıldır sürekli öğrencisi olduğum , dersler dışında da verdiği fikirler ile bana hep yol gösteren , bu tezin hazırlanması sırasında da bir yıl boyunca beni yönlendirip motive eden, daha iyiye ulaşma konusunda ateşleyen ve hiçbir konuda desteğini eksik etmeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Mehmet Emin Tacer'e şükranlarımı sunarım .

Sevgi ve disiplin anlayışı içinde üstün bilgi ve deneyimlerini aktararak yetiştirmemizi sağlayan diğer değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Nurdan Güzelbeyoğlu , Prof. Dr. R. Nejat Tunçay, Prof Dr. Adnan Kaypmaz, Prof. Dr. Faik Mergen, Doç Dr. Özcan Kalenderli,

Ayrıca isimlerini burada sayamadığım fakültemiz öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım .

Haziran 1999

Sinan Saraç

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

KISALTMALAR	
TABLO LİSTESİ	
ŞEKİL LİSTESİ	
SEMBOL LİSTESİ	
ÖZET	
SUMMARY	

1. GİRİŞ

1.1 Klasik makina kontrol metodları ve kestirimci bakım. (Durum görüntüleme yada izlemeye dayalı kontrol)	1
1.2 Arıza sonrası bakım	2
1.3 Önleyici bakım	2
1.4 Durum görüntüleme (İzlemeye dayalı kontrol) yada Kestirimci bakım (Predictive Maintenance)	2
1.5 Durum görüntüleme programının üstünlükleri	2
1.6 Durum görüntüleme programının çalışma şekli	3
1.7 Değerlendirilen çalışma parametreleri.	4
1.7.1 Titreşim	4
1.7.2 Sıcaklık	4
1.7.3 Yağ analizi	4
1.7.4 Akustik	4
1.7.5 Diğer makine performans parametreleri	5

2. MOTOR PROBLEMLERİNİN TESPİT VE ANALİZİ İÇİN KULLANILAN KAVRAM VE METODLAR

2.1 Tespit ve analiz	5
2.2 Titreşim	5
2.2.1 Frekans	6
2.2.2 Genlik	6
2.3 Ölçüm sensörünün konumu	6
2.3.1 Yatay Ölçüm	6
2.3.2 Dikey ölçüm	7
2.3.3 Eksenel ölçüm	7

2.4 Optimum ölçüm şartları	8
2.5 Titreşim ölçümlerinde trend eğrisi	8
2.6 Titreşim değerlendirme parametreleri	9
2.7 Kullanılan sensörlerin yapısı , çalışma prensipleri ve özellikleri	10
2.7.1 Yer değiştirme sensörleri (Displacement sensors)	10
2.7.1.1 Üstünlükleri	11
2.7.1.2 Eksik yanları	11
2.7.2 Hız Sensörleri (Velocity pickups)	11
2.7.2.1 Üstünlükleri	12
2.7.2.2 Eksik yanları	12
2.7.3 İvme sensörleri (Accelerometers)	12
2.7.3.1 Üstünlükleri	13
2.7.3.2 Eksik yanları	13
2.8 Standart ölçüm metodları	13
2.8.1 Toplam titreşim (Overall vibration)	13
2.8.2 Zarflama (Envelope detection)	14
2.8.3 SEE (Spectral emitted energy)	16
2.8.4 Faz ölçümü	16
2.8.5 HFD Yüksek frekanslı tespit (High Frequency Detection)	19
2.9 Sinyal işleme metodları (Signal processing methods)	19
2.9.1 Zaman Dalga Şekli (Time waveform analysis)	19
2.9.2 FFT Spektrum analizi (Fast Fourier Transformation Spectrum Analysis)	19
3. ELEKTRİKSEL PROBLEMLER	20
3.1 FFT analizinde kullanılan bazı tanım ve bağıntılar	24
3.2 Stator problemleri	25
3.3 Dış merkezli (eksantrik) rotor	28
3.4 Rotor problemleri	30
3.5 Rotorda değişik lokal ısınmalar nedeniyle oluşan bağıl eğilme (Thermal Bow)	34
3.6 Elektriksel faz problemleri	37
3.7 Senkron motor problemleri	38
3.8 Doğru akım motoru ve kontrol problemleri	39
3.8.1 Normal spektrum	39
3.8.2 Kırık armatür sarımları , topraklama problemleri , hatalı sistem ayarı	40
3.8.3 Hatalı ateşleme kartı veya yanmış sigorta	40
3.8.4 Hatalı SCR (Silican controlled rectifier) , kısa devre olmuş kontrol kartı , açık uçlu bağlantılar , ve/veya yanmış sigorta	41
3.8.5 Hatalı karşılaştırma kartı	41
3.8.6 Elektriksel kaynaklı doğru akım motoru rulman problemleri	42

3.9	Moment darbe problemleri (Torque pulse problems)	42
3.10	Kırık rotor çubukları için basit ve doğruluk oranı yüksek istatistiksel hesap yöntemi.	43
4.	SAYISAL BİLGİ ELDE ETMENİN TEMELLERİ VE SPEKTRAL ANALİZ İÇİN FFT (FAST FOURIER TRANSFORMATION) İŞLEMİ.	44
4.1	Giriş	44
4.2	FFT Özellikleri	44
4.2.1	Spektral çizgi sayısı	46
4.2.2	FFT çözünürlük çizgi aralığı	47
4.2.3	FFT frekans aralığı	47
4.3	Örnekleme ve dijitize etme	47
4.4	Kayma (Aliasing)	48
4.4.1	Frekans domeninde kayma	48
4.4.2	Anti aliasing filtrenin gerekliliği	49
4.4.3	Birden fazla anti aliasing filtre gerekliliği	49
4.4.4	Sayısal filtreleme (dijital filtering)	49
4.4.5	t_{max} ve F_{max} bağıntıları	50
4.5	Pencereleme ve pencerelemenin gerekliliği (Windowing)	51
4.5.1	Pencereleme işlemi (Windowing process)	52
4.5.2	Hanning Pencere (Hanning Window)	55
4.5.3	Penceresiz Durum (Uniform Window)	57
4.5.4	Yassı Tepeli Pencere (Flattop Window)	57
4.6	Ortalama alma (Averaging)	58
4.6.1	Güç ortalaması (RMS or Power Averaging)	58
4.6.2	Doğrusal ortalama ve senkronize zaman ortalaması	59
4.7	Üst üste kayıt işlemi (Overlap processing)	61
4.7.1	Üst üste kayıt işleminin kullanıldığı ve kullanılmadığı örnekleme zamanlarına ait uygulamalar	63
4.8	Titreşim spektrumunun incelenmesinde dikkat edilmesi gereken noktalar	66
4.8.1	Frekans hassasiyetinde FFT Çizgi sayısının etkisi	67
4.8.2	Hatasız frekans tespitinde frekans aralığının etkisi	71
4.8.3	Zoom ile frekans çözünürlüğünün geliştirilmesi ve Band seçmeli Fourier Analizi	72
5.	ASENKRON MOTORLARDA MOTOR AKIMININ İZLENMESİ	77
5.1	Giriş	77
5.2	Düzensiz hava aralığı ve etkileri	77
5.3	Alternatif akım motorlarında motor akım analizi teknikleri	78

6. ÇOK PARAMETRELİ GÖRÜNTÜLEME VE ON LINE SİSTEMLER (MULTI - PARAMETER MONITORING & ON LINE SYSTEMS)	81
6.1 Giriş	81
6.2 Çok parametrelİ görüntüleme	81
6.3 Kesintisiz iletişim	82
6.4 Sabit sensörlerin (Permanent mounted Sensors) üstünlükleri	82
6.5 Otomatik ve sürekli bilgi toplamanın üstünlükleri	83
6.6 Çok parametrelİ izlemede kağıt makinası uygulaması	83
7.ENDÜSTRİDE GERÇEKLEŞTİRİLEN DIAGNOSTİK UYGULAMALARI	
7.1 Giriş	85
7.2 Elektrik motorunda aşırı titreşime yol açan ve kaynağı gevşemiş kayış mekanizması olan fana ait diagnostik uygulaması	85
7.2.1 Probleme neden olan sisteme ait bilgiler ve problemin titreşim analizi ile teşhisi	85
7.2.2 Analiz ve kararlar	86
7.2.3 İlgili Firmaya Analiz sonucu verilen tavsiyeler	86
7.2.4 Bakım ve düzeltmeler sonrası alınan titreşim ölçümü ve sonuçları	87
7.3 Elektrik motorundan alınan titreşim ölçümü ile teşhis edilen rulman ve dişli problemlerine ait diagnostik uygulaması	89
7.3.1 Sisteme ait bilgiler ve alınan ölçüm tipleri	89
7.3.2 Analiz ve kararlar	92
7.3.3 İlgili Firmaya Analiz sonucu verilen tavsiyeler	93
8 SONUÇLAR VE TARTIŞMA	95
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	101

KISALTMALAR

FFT	: Fast Fourier Transformation
HFD	: High Frequency Detection
RBPF	: Rotor Bar Pass Frequency
SCR	: Silicon Controlled Rectifier
CPM	: Cycles Per Minute
AVG	: Average
A/D	: Analog/Digital
DEV	: Drive End Vertical
DEH	: Drive End Horizontal
DEA	: Drive End Axial
NDV	: Non Drive End Vertical
NDH	: Non Drive End Horizontal
NDA	: Non Drive End Axial.

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. 1996 yılı ölçüm sonuçları	36
Tablo 3.2. 1995 yılı ölçüm sonuçları	36
Tablo 3.3. 1994 yılı ölçüm sonuçları	37
Tablo 6.1. Kağıt makinası bölümleri ve bu bölümlerden alınması gereken ölçüm tipleri	83
Tablo 6.2. Kağıt makinası ekipmanlarına ait muhtemel arızaların görüleceği frekans aralıkları. (Ölçüm aralıkları).....	84
Tablo 7.1. Bu ölçüm sonunda elde edilen titreşim frekans ve genlikleri	88
Tablo 7.2. Onarılmış sistemden alınan spektruma ait titreşim frekans ve genlikleri...	88

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	Alarm Değerlerine Doğru Yükselen Titreşimin Trend Eğrisi.....	3
Şekil 2.1	Elektrik Motorundan Titreşim Ölçümü Alınan Noktalar Ve Sensörün Yerleştirilme Yönleri	7
Şekil 2.2	Trend Eğrisi	8
Şekil 2.3	Titreşim hareketi ve sinüs eğrisi	9
Şekil 2.4	Deplasman sensörünün bir rulman yatağına yerleştirilmesi.....	10
Şekil 2.5	Eski Tip Hız Sensörü Yapısı	11
Şekil 2.6	Accelerometer (ivme sensörünün iç yapısı).....	12
Şekil 2.7	Dış Bileziği Hasar Görmüş Bir Elk. Motor Rulmanı Ve Ürettiği Sinyal.....	14
Şekil 2.8	Hasarlı Rulmana Ait Titreşim İvme Sinyali.....	15
Şekil 2.9	Aynı Rulmanın Zarflanmış (Filtrelenmiş) Spektrumu.....	15
Şekil 2.10	Faz Ölçümü Konum:1	17
Şekil 2.11	Faz Ölçümü Konum :2	17
Şekil 2.12	Faz Ölçümü Konum:3	17
Şekil 2.13	Faz Ölçümü Konum 4	18
Şekil 2.14	Faz Ölçümü Konum :5	18
Şekil 2.15	Zaman Dalga Şekli Grafiği	19
Şekil 2.16	FFT Şekil 2.17 : FFT Spektrumu.....	20
Şekil 2.17	FFT Spektrumu.....	20
Şekil 3.1	İki kutuplu endüksiyon motoruna ait stator,rotor, rotor çubukları , hava aralığı ve magnetik alanı içeren diagram.	22
Şekil 3.2	İki kutuplu bir motorun rotor çubukları, kısa devre halkaları, ve rotor laminasyonlarını içeren isometrik görünüşü	22
Şekil 3.3	Rotor ve stator arasındaki düzensiz hava aralığı.....	23
Şekil 3.4	Durağan Ve Döner Hava Aralığı Değişimleri.....	23
Şekil 3.5	Stator Problemi Gösteren Zoom Spektrum	25
Şekil 3.6	Fmax = 50x RPM iken Normal Rota Spektrumu	27

Şekil 3.7 Stator problemine İşaret Eden Zoom Spektrum (Kutup Geçiş Yan Bandları Stator Probleminde Görünmez.)	27
Şekil 3.8 Devridaim Su Pompa Motoruna Ait 30000 CPM Fekans Bandlı Spektrum.	29
Şekil 3.9 Eksantrik (Dış Merkezli)Rotora İşaret Eden Zoom Spektrumu Mekanik Gevşeklik Yada Eksen Kaçıklığı Değil)	29
Şekil 3.10 Centac Motora Ait 30000 CPM li spektrum	32
Şekil 3.11 1xRPM Etrafında birçok yan band 30000 CPM li Spektrum içeren zoom spektrum. (Kırık yada çatlak rotor çubuğu teşhisi).	32
Şekil 3.12 2xRPM etrafında Zoom spektrum .	32
Şekil 3.13 3xRPM Etrafında Zoom Spektrum	32
Şekil 3.14 1xRPM İle 4xRPM Arası KutupGeçiş Frekanslı Yan Bandları Açıkça Gösteren Logaritmik Genlikli Spektrum	33
Şekil 3.15 1xRPM Ve Kutup Geçiş Yan Bandlı Logaritmik Genlikli Zoom Spektrum.	33
Şekil 3.16 2x RBPF de Teşhis Edilen Şiddetli Rotor Çubuğ problemi.	33
Şekil 3.17 6 Kutuplu Pompa Motoru İçin 6 Spektral Alarm Bandı Ayarı.	34
Şekil 3.18 Kırılmış Rotor Çubuğu Yada Kısa Devre Laminasyonlar Üzerinde Oluşan Nedeni İle Rotor Aşırı Sıcak Noktalar.	35
Şekil 3.19 Üç Yılın Kıyaslandığı Trend Eğrisi.	36
Şekil 3.20 Elektriksel Faz Problemleri Nedeni İle 1/3 x hat Frekansında Oluşan Yan bandlar.	38
Şekil 3.21 Senkron Motordaki Gevşek Sarımların Tespiti (BakımÖncesi) (14kutupx arım/kutup=84xRPM).	39
Şekil 3.22 Gevşek Sarım Problemi (Bakım Sonrası)	39
Şekil 3.23 Normal Spektrum.	40
Şekil 3.24 Kırık armatür sarımları, topraklama problemleri, hatalı sistem ayarı.	40
Şekil 3.25 Hatalı ateşleme kartı veya yanmış sigorta.	41
Şekil 3.26 Hatalı SCR I kısa devre olmuş kontrol kartı , açık uçlu bağlantılar, ve/veya yanmış sigorta.	41
Şekil 3.27 Hatalı karşılaştırma kartı.	42
Şekil 3.28 Elektriksel kaynaklı doğru akım motoru rulman problemi.	42
Şekil 4.1 Frekans ve zaman domenlerinden FFT örnekleri.	45
Şekil 4.2 Dolan zaman kaydının ardından her örnekte yeni bir zaman kaydı eklenmektedir.	46
Şekil 4.3 Kayma (aliasing) dan kurtulmanın frekans domenindeki gösterimi.	49
Şekil 4.4 Zaman kaydındaki sinüs dalgaları periyodik olmadığında sızıntı oluşur ve spektrumun geri kalanını etkiler.	51

Şekil 4.5 Zaman Domeninde Pencerelemenin etkisi.....	52
Şekil 4.6 Pencerelemenin periyodik olmayan bir dalga şeklini nasıl periyodik gibi görünmeye zorladığının basitleştirmiş gösterimi.....	53
Şekil 4.7 Pencereleme (windowing) işlemi ile sızıntının (leakage) azaltılması.....	54
Şekil 4.8 Pencereleme sızıntıyı azaltmakta , fakat tamamen yok edememektedir.....	54
Şekil 4.9 Hanning Pencere Geçişbandı şekilleri.....	55
Şekil 4.10 : Hanning pencere geçici (transient) olaylarda bilgi kaybeder.	56
Şekil 4.11 Geçici olayların hanning pencere ve penceresiz spektrumları.....	56
Şekil 4.12 Yassı tepeli geçişbandı şekilleri.....	57
Şekil 4.13 Hanning ve yassı tepeli (flattop)pencerelerin karşılaştırılması .Yassı tepeli pencerede frekans çözümü yeteneği azalmaktadır.	58
Şekil 4.14 Doğrusal ortalama gürültü tabanını düşürmekte ve harmoniklerin daha belirgin görünmesini sağlamaktadır.	61
Şekil 4.15 Tamamıyla yeni bilgi (zaman kaydı) üzerinde gerçekleştirilen üst üste kayıt yapılmamış işlem (process)	62
Şekil 4.16 Üst üste kayıt işlemi eski ve yeni zaman kaydını birleştiren bilgi üzerinde gerçekleştirilmiştir.	62
Şekil 4.17 Üst üste kayıt prensibi uygulanmamıştır. Her zaman kaydı başına 16 saniyede 8 ortalama alınmıştır. → 128 s.....	64
Şekil 4.18 % 50 lik üst üste kayıt işlemi uygulanmıştır. İlk zaman kaydı için 16 saniyede 4.5 ortalama ve diğer zaman kayıtları için 8 er saniye harcanmıştır. → 72 s	65
Şekil 4.19 % 90 lık üst üste kayıt işlemi uygulanmıştır. İlk kayıt için 16 saniyede 1.7ortalama ve diğer her zaman kaydı için 1.6 s harcanmıştır. → 27.2 s ...	65
Şekil 4.20 Kullanıcı için tespit edilmiş eşik değeri üzerinde kursör ile frekansı ve genlik tepe değerleri tespit edilmiş spektrum.	67
Şekil 4.21 12000 CPM frekans aralıklı 100 çizgi çözünürlüklü spektrum.....	69
Şekil 4.22 12000 CPM frekans aralıklı 200 çizgi çözünürlüklü spektrum.....	69
Şekil 4.23 Şekil 4.24 : 12000 CPM frekans aralıklı 3200 çizgi çözünürlüklü spektrumdan alınan zoom görüntü.....	70
Şekil 4.24 12000 CPM frekans aralıklı 3200 çizgi çözünürlüklü spektrumdan alınan zoom görüntü.....	70
Şekil 4.25 24000 CPM frekans aralıklı , 400 çizgili çözünürlüklü spektrum.....	72
Şekil 4.26 120000 CPM frekans aralıklı , 400 çizgili çözünürlüklü spektrum.....	72
Şekil 4.27 Motor akımının zoom yapılmadan ölçülmüş hali. (400 çizgi çözünürlüklü FFT'nin sadece 40 çizgisi görünmektedir.....	74
Şekil 4.28 Zoomlu görüntü.(50 –70 Hz arasında 400 çizgilerlik FFT yoğunlaştırılmıştır.).....	74

Şekil 4.29 Görüntü genişlemesi (sözde zoom).....	75
Şekil 5.1 Hat frekansı tepesiği.....	80
Şekil 5.2 Kürsör yan band frekansı üzerindedir.....	80
Şekil 5.3 Filtrelenmiş AA motor akım spektrumu. 5 kırık rotor çubuğu ve hasarlı bitiş halkası nedeniyle 0.8125 Hz kayma frekansında oluşan sinyal.....	80
Şekil 6.1 On line görüntülemeye bilgi akışı.....	81
Şekil 6.2 Kağıt makinası emme , presleme , kurutma kısımlarından oluşmaktadır..	83
Şekil 7.1 Problemlili sisteme ait spektrum ve titreşim genlik değeri.....	87
Şekil 7.2 Kestirimci bakım sonrası verilen rapor doğrultusunda tamir edilmiş sisteme ait spektrum ve genlik değeri	88
Şekil 7.3 İşlenmiş haldeki kağıdı keserek rula halinde saran winder makinasının görünüş şekli.....	89
Şekil 7.4 Redüktör girişinden yatayda alınan mm/s birimli hız ölçümü.....	90
Şekil 7.5 G birimli redüktör girişinden alınan gerçek zamanlı ivme ölçümü.....	91
Şekil 7.6 Elektrik motoru arka tarafından alınan mm/s genlikli hız ölçüm spektrumu.....	94

SEMBOL LİSTESİ

F_L	: Elektriksel Hat Frekansı
N_s	: Senkron Hız
P	: Kutup Sayısı
F_s	: Kayma frekansı
F_p	: Kutup Geçiş Frekansı
$F_{\max}$	: Maksimum Frekans
$F_{\min}$	: Minimum Frekans
T	: Peryot



KESTİRİMCİ BAKIM VE ELEKTRİK MOTORLARINDA TİTREŞİM ANALİZİ İLE ERKEN ARIZA TEŞHİSİ

ÖZET

Bu çalışmada , kesintisiz üretim ve ürün kalitesinin en büyük hedefler haline geldiği endüstride , problemlerin erken teşhisi ile bu hedeflere ulaşmada en başarılı yol olan kestirimci bakım programının , endüstrinin can damarı olan elektrik motorları üzerindeki uygulanış şekli ele alınmıştır.

Elektrik motorlarındaki beklenmedik arızalar ve duruşlar , düşük performanslı çalışma ve bunun gibi sorunların çözümünde kestirimci bakım programının en önemli parçası olan titreşim analizi metod olarak seçilmiştir.

Çalışma içerik olarak sekiz ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde kestirimci bakım programı ve bu metodun klasik makina kontrol tekniklerine karşı olan üstünlükleri tanıtılmıştır.

Takip eden bölüm ise elektrik motor problemlerinin henüz arıza haline gelmeden teşhis edilebilmesi için kullanılan kavram ve metodları içermektedir.

Üçüncü bölüm , ilk iki bölümde temelleri verilen titreşim analizinin elektrik motorları üzerinde nasıl uygulandığını , her çeşit motora ait analiz kural ve tekniklerini ve bu tür bir çalışma ile hangi elektriksel problemlerin henüz arıza haline dönüşmeden teşhis edilebildiğini içermektedir.

Dördüncü bölümde ise başlangıçta sadece mekanik bir tepki hareketi olan titreşim sinyalinin hangi prosesler sonucu bu denli önemli bir veri haline geldiğini , daha iyi bir analiz için sinyalin nasıl işlenmesi gerektiğini anlatılmaktadır.

Beşinci bölümde kestirimci bakım programı içinde titreşim analizinin yanısıra kullanıldığında daha kesin sonuçlar elde edilmesine olanak tanıyan motor akımı izlenmesine dayalı analiz kural ve teknikleri açıklanmıştır.

Altıncı bölümde , özellikle çok yüksek ürün kalitesinin arandığı kağıt ve tekstil sektörlerinde ön plana çıkan çok parametrelili görüntüleme ve on line sistemler üzerinde durulmuştur.

Yedinci bölümde ise şu ana kadar anlatılan teorik bilgilerin uygulaması ve mühendislik tarzında ıspatı niteliğinde olan , konu ile ilgili çalıştığım dönemlerde endüstrinin farklı iki dalında , iki ayrı fabrikada gerçekleştirilen diagnostik uygulamaları yer almaktadır

Son bölüm ise bu çalışma ile varılan noktaların özetlendiği sonuçlar kısmını kapsamaktadır.

PREDICTIVE MAINTENANCE AND FAULT DIAGNOSIS ON ELECTRICAL MOTORS BY VIBRATION ANALYSIS

SUMMARY

This study includes the way how predictive maintenance is applied on electrical motors as it is the most useful way in the industry to reach goals like uninterrupted production and product quality.

In solving problems like sudden stops, low performance etc the most important part of predictive maintenance program, the vibration analysis is chosen as a method.

The study consists of 8 main sections.

In the first section predictive maintenance program and its advantages to classical machine control techniques are introduced.

The following section includes the methods and descriptions used in condition monitoring.

In the third section the application of vibration analysis on electrical motors and all the analysis techniques used for fault diagnosis from electrical machines are explained in details.

In the fourth section all the processes that used for turning a simple mechanical motion (vibration) to such an important data used for diagnosing faults in the very early stages.

In the fifth section motor another useful part of predictive maintenance program, the motor current monitoring technique is introduced.

In the sixth section multi parameter monitoring and on line systems which are especially used in paper and textile industries are explained.

The seventh section includes two real diagnostic case stories which were taken from two different fields of industry during the time period which I was working at a company as a vibration analysis specialist.

The last section includes the conclusions that are reached at the end of this study.

1. GİRİŞ

1.1 Klasik Makina Kontrol Metodları ve Kestirimci Bakım (Durum Görüntüleme Yada İzlemeye Dayalı Kontrol)

Uzak değil ,çok yakın bir geçmişte elektrik motoru yada bir makina yaratıcılık alanın da bir devrim olarak değerlendiriliyordu. Son yüzyılda dünyamız endüstri çağına ve tüm bu makineleşmenin etkilerine tanıklık etmiştir. Bu endüstri devrimi bizi elektrik, elektronik ve mekanik düzenlerin iç içe kullanıldığı mekanize bir toplum haline getirmiştir.

Yıllar geçtikçe bir makina yada motorun çalışma performansının analizi, ne zaman bozulabileceğinin kestirilebilmesi büyük önem kazanmıştır. Klasik analiz teknikleri duyu organlarını kullanma esasına dayanır. Bunlar görme, duyma, dokunma, koklama şeklinde bir bozulma yada durmaya neden olabilecek , farklı ve ters durumları saptama yoluna dayanmaktadır. Örneğin evimizdeki buzdolabından duyacağımız değişik sesler ve yüksek titreşim bize birşeylerin yolunda gitmediğini ve dolabın yakında bir tamire ihtiyacı olduğunu anlatır.

Endüstriyel ortamlarda çalışan makina ve motorlar için konuşulduğunda da aynı şeyler söz konusudur. Geleneksel olarak kontrol ve bakım personeli görmeye , dokunmaya dayanan yağ kontrolü , titreşim , gürültü gibi semptomları izler ve değerlendirir. Bu gibi yaklaşımlar makinanın içinde bulunduğu durumu anlama konusunda bazı faydalar sağlayabilir, ancak bu tür çabalar problemlerin erken teşhisinde hiçbir fayda sağlamaz ve motor yada makina tam olarak bozulana dek sorunun ne olduğu hakkında bize hatasız ve güvenilir bilgi de vermez.

Durum görüntüleme ise gerekli tüm detayları bilgi ile birlikte vermektedir. Bu bilgi teknik olarak geçerli tüm bağıntıları ve gerçekleri içermektedir. Böylelikle motor yada makinanın durumu hakkında doğru ve hata yüzdesi çok düşük değerlendirmeler yapılabilir. Durum görüntüleme kullanıcıya ; cihazda arıza oluşmadan önce ne tür bir arıza ile karşılaşabileceğini söyleyerek gerekli önlemleri alması konusunda yardımcı olur. [1,2]

1.2 Arıza Sonrası Bakım

Bu en ilkel bakım metodudur. İkinci sınıf, işletme için önemi az olan ekipmanın bozulduktan sonra tamir edilmesi felsefesine dayanır.

1.3 Önleyici Bakım

Bir motorun yada makinanın bazı kısımlarının düzenli aralıklarla durumları gözetilmeksizin değiştirilmesi ilkesine dayanır.

Arıza sonrası bakıma kıyasla daha gelişmiş bir korumadır , ama yinede aşırı duruş zamanı oluşturmaları ve bozukluklar ile beraber durumu iyi olan parçalarında gereksiz yere değiştirilmesi nedeniyle yüksek harcamalara sebep olan bir bakım türüdür. [1,2]

1.4 Durum Görüntüleme (İzlemeye Dayalı Kontrol) Yada Kestirimci Bakım

Motor yada makinanın durumunu çalışırken belirleyen prosestir. Bir problem yaratacak bulguya rastlandığında durum görüntüleme ekipmanları problemin ne olduğunu ve daha da önemlisi problemin kaynağının ne olduğunun belirlenmesi konusunda işe yarar veri sağlamaktır. Bu da bize arıza oluşmadan önce o özel probleme ait gerekli bakım ve tamir işlemini yerine getirme imkanı verir.

Modern bir durum görüntüleme analizi bakım personeline arıza oluşma olasılığını azaltmada destek olmakla kalmaz aynı zamanda onlara yedek parça temin edimi , işçi gücünün en verimli şekilde kullanımı , tek bir duruşta birçok bakımın aynı anda yapılması gibi konuların planlanmasında yardımcı olur. [1,2,4]

1.5 Durum Görüntüleme Programının Üstünlükleri

- Makina güvenliğini maksimuma çıkarır.(Gereksiz duruşlar ve beklenmeyen arızaları önlediği için)
- Plansız duruşları minimuma indirir. (Üretimin yoğun olmayan saatlerinde bakım imkanı verir.)
- Bakım ve kontrol aralıklarını genişletir.
- Kaynağı ve ne olduğu bilinen bir problem üzerinde çalışma olanağı verir. (Makina açılıp kontrol edilmeden , arızanın ne olduğu bilinmemektedir.)
- Bakım süresini kısaltır.

1.7 Değerlendirilen Çalışma Parametreleri

1.7.1 Titreşim (Vibration)

Ölçümlenen ve analiz edilen titreşim bilgisi, döner hareket yapan motor yada makina gruplarına ilişkin durum değerlendirmesi yapımında en önemli ve en değerli parametredir.

Tezin bundan sonraki bölümlerinde titreşim analizi üzerinde durulacak ve basit bir mekanik hareket olan titreşimin nasıl bu denli önemli bir bilgi haline geldiği , titreşimin bu değişim sırasında geçirdiği tüm evreler tanıtılıp , bu yöntemin her tip elektrik motorunda nasıl tatbik edileceği üzerinde durulacaktır.

Elektriksel problemlerin tüm görünüş şekilleri, nedenleriyle birlikte ortaya konup bir elektrik motoruna ait arızanın motor çalışır durumdayken ve açılmadan tespit edilebileceği gösterilecektir. [1,2]

1.7.2 Sıcaklık

Sıcaklık ölçümü, mekaniksel durumun yada rulman gibi özel parçacıklara uygulanmış olan yükün tespiti için işe yarar bir parametredir . Motorlarda rulman yataklarına yerleştirilmiş olan termokopullar ile rulman veya yağdaki sıcaklık değişimlerinin incelenmesi problemlerin erken fark edilmesine olanak tanır. [2]

1.7.3 Yağ Analizi (Oil Lube Analysis)

Yağdaki yabancı maddelerin miktarındaki artış yağın yağlama özelliklerinin azalmasına neden olur. Bu da makina aksamalarının ve rulmanların aşınmasına neden olur. Ayrıca yağdaki metalik partiküller analiz edilerek hangi parçacığın hangi hızla tahrib olduğu anlaşılır , fakat bu tahribatın nedeni tam olarak belirlenemez. [2]

1.7.4 Akustik (Acustics)

Çok yüksek frekanslı, akustik olarak iletilen sinyal, çok yüksek frekanslı piezoelektrik sensör ile ölçülür.(SEE: Spectral emitted energy) Sensör, metal metale kontak nedeniyle oluşan basınç dalgalanmasıyla uyarılır. Akustik akış tespit sinyalleri, nümerik değerler halinde çıkış verecek şekilde işlenir. [2]

1.7.5 Diğer Makina Performans Parametreleri

- ◆ Basıç
- ◆ Akışkanlık
- ◆ Hız

2. MOTOR PROBLEMLERİNİN TESPİT VE ANALİZİ İÇİN KULLANILAN KAVRAM VE METODLAR

2.1 Tespit ve Analiz

Herhangi bir elektrik motoruna ait bir problemin saptanması ile o probleme neyin neden olduğunun anlaşılması arasında büyük fark vardır. Örneğin bir elektrik motorun da lokal olarak aşırı ısınma tespit edilebilir, ancak önemli olan bu ısınmaya neyin neden olduğunun anlaşılmasıdır. Bu da ancak ilgili motorda titreşim analizinin yapılması ile anlaşılabilir. Bir aksaklık tespit edildiğinde neden ve etki yaklaşımı kullanılarak analizde daha ileri adımlar atılmalıdır.

2.2 Titreşim

Titreşim bir makina yada motorun iç yada dış kuvvetlere karşı verdiği tepki hareketidir

Döner hareket yapan ekipmanlara ait problemler , çoğunlukla kendilerini aşırı titreşim şeklinde gösterirler.Bu nedenle titreşim sinyalleri motor yada makinanın çalışma performansının göstergesidir.

Elektriksel yada mekaniksel her problem yada arıza kendine özgü ayrı bir titreşim üretir .Bu nedenle problemin nedeninin anlaşılması için titreşimin ne tip bir titreşim olduğunun araştırılması gerekir.[1,2,4]

Titreşim analiz edilirken titreşimi oluşturan iki bileşen incelenir.

Bunlar genlik ve frekanstır.

2.2.1 Frekans

Titreşimin oluştuğu frekans, arızanın kaynağının ne olduğunu belirler. Bu da belirli arızaların tipik olarak yine belirli frekanslarda oluştuğu gerçeğine dayanmaktadır.

2.2.2 Genlil

Titreşim sinyalinin boyutudur. Titreşimin genliği arızanın şiddetini belirler. Daha yüksek genlik daha yüksek titreşim ve bu da daha büyük problem anlamına gelmektedir. Titreşim genliği motorun tipine göre değişir ve her zaman yeni , sorunsuz , düşük titreşimli bir motora göre bağl olarak değerlendirilir.

2.3 Ölçüm Sensörünün Konumu

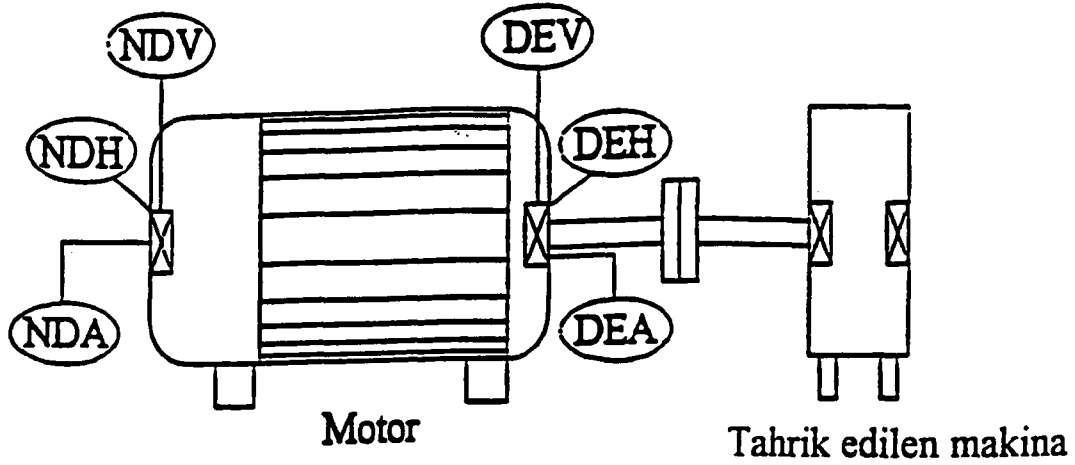
Makina üzerinde en uygun ölçüm noktası bulunmalıdır. Bunun için boyalı yüzeylerden , yüksüz rulman alanlarından , yarık yada çatlak yataklardan ve yapısal boşluklardan kaçınılmalıdır. Bir el sensörü ile ölçüm yapıldığında sensörün motor üzerindeki konumuna , sensör ile motor arasındaki açığa , motor ile sensör arasındaki temas basıncına oldukça dikkat edilmelidir. [1]

Konum: Eğer uygun ise titreşim üç yönden ölçülmelidir.

- Eksenel yön (axial direction) (A)
- Yatay yön (horizontal direction) (H)
- Dikey Yön (vertical direction) (V)

2.3.1 Yatay Ölçüm

Yatay titreşim tipik olarak motorun yatay yöndeki esnekliği nedeniyle oluşur. Aynı zamanda mekanik dengesizlik motorlarda sıkça rastlanan bir bozukluktur. Radyal yönde titreşim olarak kendini gösterir. Ancak motor yatay düzlemde daha esnek olduğu için yatay yönde yüksek titreşim mekanik dengesizliğin iyi bir göstergesidir. [1,3 -5]



Şekil 2.1 : Elektrik Motorundan Titreşim Ölçümü Alınan Noktalar Ve Sensörün Yerleştirilme Yönleri

2.3.2 Dikey Ölçüm

Dikey ölçümler yerçekimi ivmesi ve yere sabitlenme nedeniyle yatay ölçümlere kıyasla daha düşük genlikli olurlar. Dikey yöndeki yüksek titreşim motor gövdesinin zemine bağlantısında gevşeklik olduğunun göstergesidir. [1,3]

2.3.3 Eksenel Ölçüm

İdeal koşullarda eksenel ölçümlerin kuvvetlerin çoğu mile dikey etkidiğinden çok düşük genlikli titreşim göstermesi beklenir. Öte yandan eksen kaçıklığı yada eğilmiş mil, kaplin ayarsızlığı gibi problemler eksenel titreşime neden olmaktadır.

Yukarıdaki tanımlar tipik motor takımlarına rehberlik etmek üzere verilmiştir. Dikey monte edilmiş yada asılı (overhung) makinalarda yönler motor konumuna göre yeniden uyarlanmalıdır. Motordaki ölçüm noktaları şekil 2.1 de görüldüğü gibidir.

Ölçümler mümkün olduğu kadar rulman yataklarına yakın yerlerden alınmalıdır. Her üç düzlemden ölçüm almak aşırı titreşimin sebebinin bulmak açısından faydalı olur. Ölçümler düz, pürüzsüz yüzeylerden alınmalıdır. Karşılaştırma için mümkün olduğu kadar aynı nokta üzerinden ölçüm alınması gerekir. Birkaç cm. lik kaymalar dahi oldukça farklı değerler ölçülmesine sebep olabilir. [1,3-6]

Açı: Sensör motor üzerine $90^{\circ} \pm 10^{\circ}$ lik açı ile radyalde yatay ve dikey konumlarda eksenelde ise mile paralel doğrultuda yerleştirilmelidir.

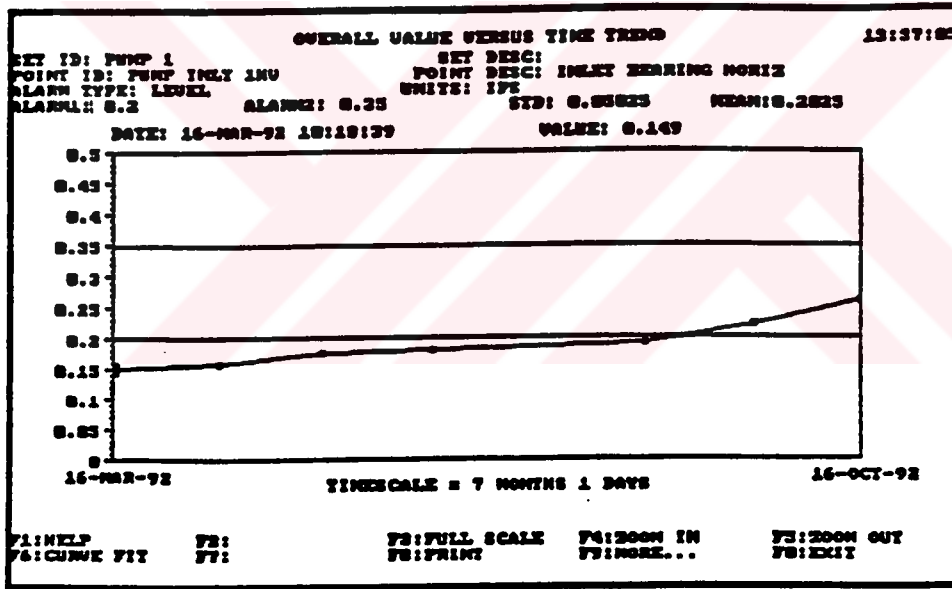
Basınç: Sensöre el yardımı ile dahi bir miktar basınç uygulanmalıdır. (fakat çok fazla basınç sinyalin okunamamasına neden olabilir.)

2.4 Optimum Ölçüm Şartları

Ölçümler normal çalışma koşullarında yapılmalıdır. Motor tam yükte veya buna yakın bir yükleme katsayısıyla ve nominal gerilim altında çalışıyor olmalıdır. Rulman yatakları ,ana rulmanlar ve rotor normal çalışma ısısına ulaşmış olmalıdır. Sürekli değişken hız veya değişken yük altında çalışan motorlarda ise normal çalışma şartlarının dışında sınır çalışma koşullarında da ölçümler tekrarlanmalıdır.[1,5]

2.5 Titreşim Ölçümlerinde Trend Eğrisi

Titreşim şiddetini ölçmenin en iyi yollarından biri de en son okunmuş toplam titreşim ölçümünü bundan öncekilerle kıyaslamaktır. Bu zamanla değerlerin nasıl değiştiğini görmede büyük kolaylık sağlar. Böylece eski ve yeni değerlerin karşılaştırılması yapılır. [2,4]



Şekil 2.2 : Trend Eğrisi

Şekil 2.2 deki trend eğrisi toplam titreşim değerlerinin tek bir hat ile birleştirilmesiyle oluşmuştur. Aynı gerilimli , aynı güçlü kısacası birbirine eş olan motorlar dahi farklı titreşim üretebilirler ,yani her motorun kendine özgü çalışma şekli vardır; bu yüzden bir motoru belirli aralıklarla gene kendi ile karşılaştırmak problem tespiti için oldukça iyi bir yoldur.

ISO titreşim için iyi ve kötü olarak kabul edilen değerleri tablolar halinde açıklamıştır.

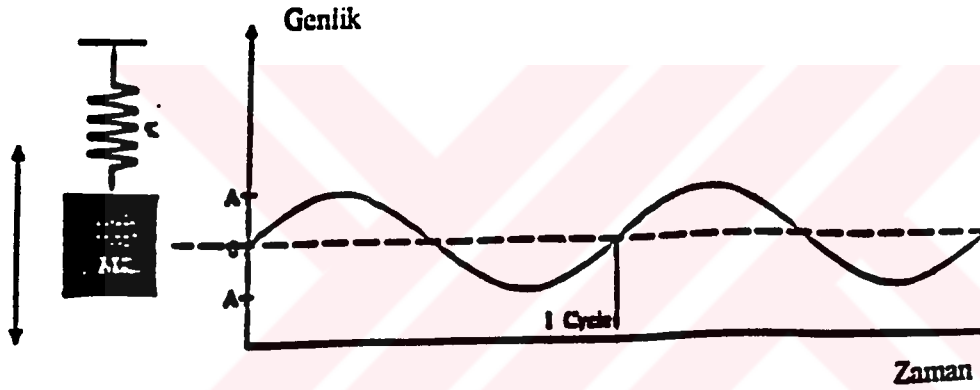
Buna rağmen her motor;

- 1- Farklı üretilmiştir.
- 2 -Değişik şekillerde kurulmuş yada monte edilmiştir.
- 3 -Farklı koşullarda çalıştırılmıştır. (Farklı yük , hız , çevre ...)
- 4 -Farklı şekillerde bakıma girmişlerdir.

Yukarıdaki nedenlerden dolayı bir motoru ISO tarafından oldukça geniş bir sınıfa ait titreşim seviyeleri yada kurallar ile karşılaştırmak sağlıklı değerlendirme yapmayı engeller.[1]

2.6 Titreşim değerlendirme Parametreleri (Titreşim birimleri)

Titreşim periyodik bir harekettir. Bir yay ve ağırlık sistemi ile örneklenebilir.



Şekil 2.3 : Titreşim hareketi ve sinüs eğrisi

Cisim serbest bırakıldığında yay nedeniyle osilasyon hareketi yapar. Bu osilasyon , takip edildiğinde bir sinüs eğrisi oluşturduğu görülür. Başlangıç noktası sıfır noktasıdır. Kütlenin bir tam dönüşü referans noktasına göre pozitif ve negatif yer değiştirmeler oluşturur. **Yer değiştirme** bir nesnenin referans noktasına göre mesafesinin veya konumunun değişmesidir.

Üç ölçüm karakteristiği mevcuttur: **Yerdeğiştirme , hız , ivme.** [1,3]

Bu karakteristikler matematiksel olarak birbiri ile ilişkili olduğu halde farklılardır, aynı isme ait üç ayrı miktar değillerdir. Örnek resim şekil 2.3 de görünmektedir.

Arıza karakteristiğini en iyi açıklayacak ölçüm ve sensör tipi seçilmelidir. Bunun için birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır:

- 1- Motor tipi , yapısı ve dönme hızı

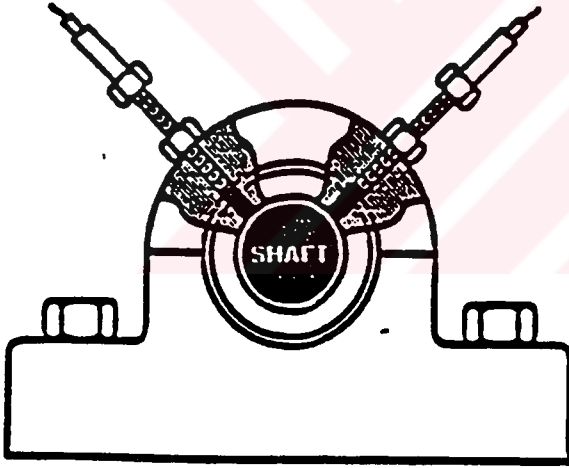
- 2- Şartlardaki değişimlere gösterilen makina cevabı
- 3- Motor titreşiminin frekans bandı
- 4- Oluşması muhtemel problemin tipi , doğası, şiddeti
- 5- Sensör karakteristikleri
- 6- Ölçüm konumu.

Yer değiştirmenin ölçülebilen iki ayrı türevi vardır. **Hız** ve **ivme**.

2.7 Kullanılan Sensörlerin Yapıları, Çalışma prensipleri ve Özellikleri

2.7.1 Yer Değiştirme (Displacement Sensors)

Bu büyüklük genel olarak yer değiştirme probu yada eddy probe olarak bilinen sensör ile yapılır. Bu sensörler kendi uçları ile hareketi ileten yüzey arasındaki mesafeyi ölçerler. Mildeki titreşimin yanısıra akışkan filmlili rulmanların incelenmesinde de kullanılırlar. Sensörün uygulanış tarzı şekil 2.4 te görünmektedir.[2,3,5,]



Şekil 2.4: Deplasman sensörünün bir rulman yatağına yerleştirilmesi.

Bu sensörler mil yada rotorun motora göre olan bağıl hareketini inceler. Eğer motor ve rotor birlikte hareket ediyorsa bu sensörler aşırı titreşim olsa dahi sıfır değerini okurlar. Deplasman ölçümleri motorun yada makinanın kendi ağırlığının rotor ve mil ağırlığına göre çok büyük olduğu durumlarda kullanışlıdır. Bu tip durumlarda mildeki deplasman daha hassastır. Bunlar aynı zamanda milin fazını ölçmeyede yararlar. Mil fazı mil üzerinde bilinen bir nokta ile titreşim sinyali arasındaki açısal mesafedir.

Bu ilişki balans ayarlarında kullanılır. Mil titreşimini ve fazını görüntülemek için iki ayrı deplasman sensörü her rulman üzerine 90° lik açı ile yerleştirilir.

2.7.1.1 Üstünlükleri

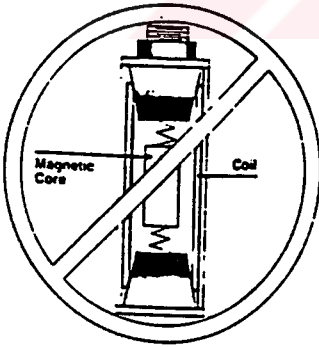
- 1- İki yüzey arasındaki bağıl mesafeyi ölçer.
- 2- Hatasız düşük frekans cevabı.
- 3- Statik ve dinamik mil hareketini ölçer.
- 4- Küçük boyut
- 5- Kolay kalibrasyon
- 6- Doğrudan deplasman birimlerinde ölçüm yapar .

2.7.1.2 Eksik Yanları

- 1- Kısıtlı yüksek frekans hassasiyeti.
- 2- Yerleştirilmesi ve yer değiştirilmesi zordur.
- 3- Harici güç kaynağına ihtiyaç duyar.

2.7.2 Hız (Velocity) Sensörü

Hız sensörleri rulman yatakları veya makine yuvalarındaki titreşimi ölçerler. Eski tip hız sensörleri bir sarım ve bir çekirdeğin hızla doğru orantılı olarak gerilim üretmesi gerçeğine dayanırdı. Bu tür sensörler kötü çevre şartları , çevredeki magnetik alanlardan etkilendikleri için güvenilir olmayan ve yanlış ölçüm sonuçları vermekteydi.



Şekil 2.5 : Eski Tip Hız Sensörü Yapısı

Günümüzde kullanılan modern hız sensörleri ivme ile orantılı titreşim üreten piezoelektrik kristal ve kütleden oluşan bir sistem ile çalışırlar. Daha sonra bu ivme değerini integre ederek hız değerine ulaşırlar. Bunlar piezoelektrik hız sensörleridir. [2,3,5]

Piezoelektrik hız sensörleri orta frekans bandında (3Hz – 3500Hz) çalışırlar. Sürekli görüntüleme için rulman yatağınada sabitlenebilirler. Sensör yapısı şekil 2.5 tedir.

2.7.2.1 Üstünlükleri

- 1- Kaliteli orta frekans cevabı
- 2- Bazı modelleri yüksek sıcaklıklı ortamlarda dahi çalışabilir.
- 3- Kolay yerleştirme.
- 4- Küçük boyut.

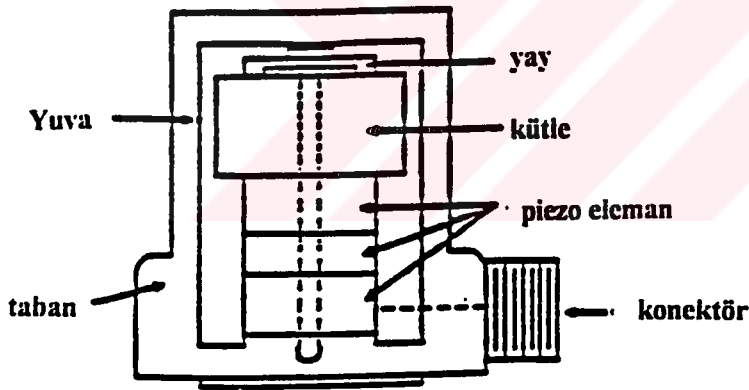
2.7.2.2 Eksik Yanları

- 1- Düşük frekansta gürültü oluşma olasılığı.
- 2- Empedans eşleşmesi ve sinyal işleme için ek elektronik düzen gerektirir.

2.7.3 İvme Sensörleri (Accelerometers)

Accelerometreler bir veya daha fazla piezoelektrik kristal ve bir kütle içerir. Kütle motor yada makina nedeniyle titreştiğinde kristalleri sıkıştırır.

Piezoelektrik kristaller sıkıştırıldıklarında ivme ile orantılı elektriksel çıkış sinyali oluştururlar. İvme sensörünün iç yapısı şekil 2.6 da gösterilmiştir. [2,5,6]



Şekil 2.6 : Accelerometer (ivme sensörünün iç yapısı)

Accelerometreler çok geniş bir frekans(0 – 100 kHz) aralığında çalışabilirler .Böyle çok geniş bir frekans bandını inceleyebilme yeteneği bu sensörlerin asıl gücünü oluşturur.

Geniş frekans aralığı nedeniyle accelerometer sinyali ölçümlenen cihazla ilgili olmayan titreşimlerin filtrelenmesi için sinyal işlemeye tabi tutulmalıdır. Bu sensörler kendi enerji üretme sistemlerine sahiptir ancak buna rağmen verdikleri çıkış sinyali yüksek empedanslıdır ve birçok görüntüleme cihazı ile direkt olarak kullanıma uygun değildir.

Bu yüksek empedanslı çıkışı düşük empedansa çevirmek için ek elektronik düzen gereklidir.

2.7.3.1 Üstünlükleri

- 1- Kaliteli yüksek frekans cevabı
- 2- Bazı modelleri yüksek sıcaklıklı ortamlarda dahi çalışabilir.
- 3- Kolay yerleştirme
- 4- Küçük boyut.

2.7.3.2 Eksik Yanları

- 1- Düşük frekansta gürültü oluşma olasılığı.
- 2- Empedans eşleşmesi ve sinyal işleme için ek elektronik devre ihtiyacı.

2.8 Standart Ölçüm Metodları

- 1 Toplam titreşim (Overall Vibration)
- 2 Zarflama (Acceleration Enveloping)
- 3 Akustik Emisyon (SEE Spectral Emitted Energy)
- 4 Faz Ölçümü (Phase Measurement)
- 5 Yüksek Frekanslı Tespit (High Frequency Detection)

2.8.1 Toplam Titreşim (Overall Vibration)

Belirli bir frekans bandında ölçümlenen toplam titreşimdir. Bu değer bir motorun ,makinanın, rotorun yada herhangi bir makina parçasığının mevcut sağlığı hakkında bilgi verir. Titreşim aynı zamanda dengesizlik (unbalance) , eksen kaçıklığı

(misalignment), mekanik gevşeklik (mechanical looseness), yapısal rezonans (structural resonance), Yumuşak temel bağlantısı (soft foundation) , mil eğikliği (shaft bow) , aşırı rulman aşınması (excessive bearing wear) , kırılmış pervane kanadı (lost rotor vanes) ,düşük frekanslı dinamik durumları değerlendirmede en önemli çalışma parametresidir. [1]

Frekans bandı: Toplam titreşim ölçümünün hangi frekans aralığı kullanılarak yapılacağı hala tartışma konusudur. Bunun nedeni hem iyi bir çözünürlük elde etmek , hemde arıza frekanslarını saptama amacından ileri gelmektedir. Bilindiği gibi geniş bir frekans bandı çözünürlüğü azaltmaktadır. Bazı titreşim ölçüm cihazları önceden

tanımlanmış kendi ölçüm aralıklarına sahipken bazıları da kullanıcıya bu aralığı seçme şansı verir ancak en önemlisi toplam titreşim değerlendirilmesi yapılırken her ikisi de aynı frekans bandından alınmış ölçümleri karşılaştırmaktır.

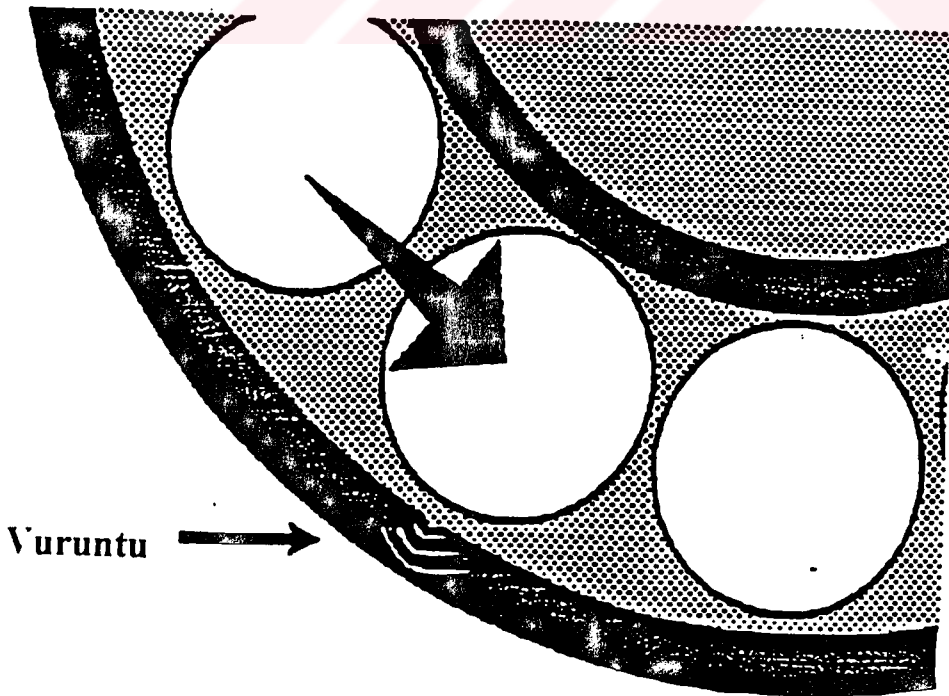
Skala Faktörleri: Toplam titreşim karşılaştırılırken toplam skala faktörlerinin aynı olmasına dikkat edilmelidir. Bunlar çok iyi tanıdığımız tepe, tepeden tepeye, ortalama ve RMS değerleridir.

2.8.2 Zarflama (Envelope Detection)

Yinelenen tip rulman ve dişli arızaları yapısal titreşime kıyasla düşük genlikli ve yüksek frekanslı titreşim üretirler. Zarflama (enveloping) adıyla anılan yöntemin amacı döner (rotasyonel) titreşime ait sinyalleri filtreleyerek rulman arızasına ait sinyalleri daha belirgin hale getirmektir. Rulman sinyalleri rulman arıza frekans bandında ortaya çıkar ve ard arda gelen tekrar edici özelliğe sahiptir. [1,5]

Zarflama metodu makinanın dönüşünden yada yapısından oluşan titreşimler nedeniyle tespit edilemeyen ,geri planda kalan rulman veya dişli takımı gibi düşük genlikli , yüksek frekanslı ve yineleyici titreşim üreten arızaların teşhisi için kullanılır.

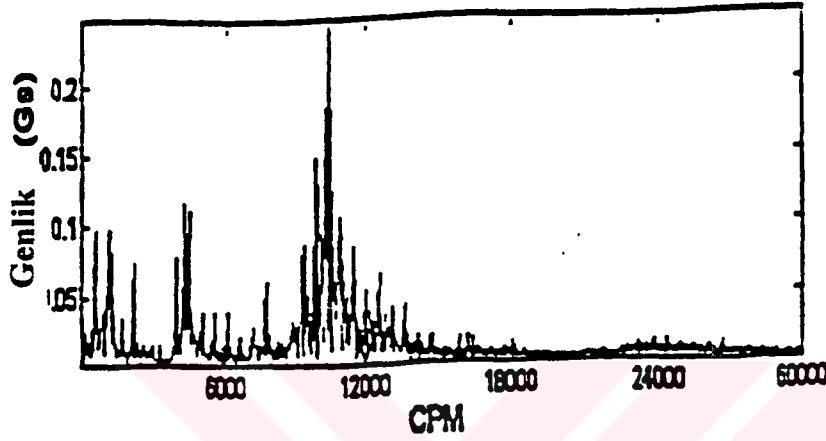
Endüstride elektrik motorlarının rulman dağılması sonucu tahrib olması oldukça sık gözlenen bir durumdur.



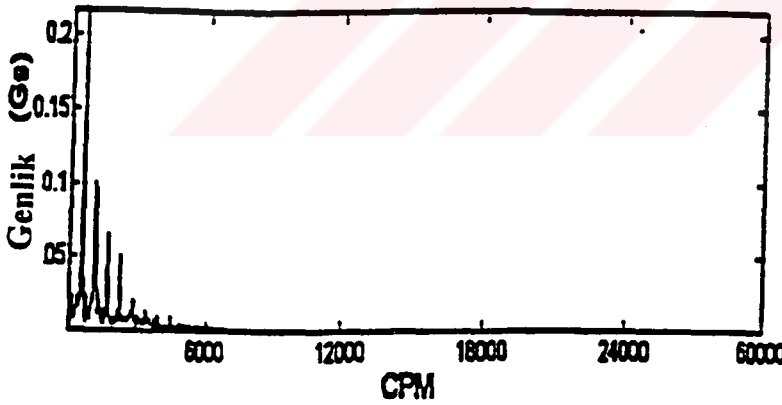
Şekil 2.7 : Dış Bileziği Hasar Görmüş Bir Elk. Motor Rulmanı Ve Ürettiği Sinyal

Şekil 2.7 deki gibi bir rulman dış bileziğinde bir hasara uğramışsa , bu hasarın üzerinden geçen her bilye sürekli ve birbiri ardı sıra oluşan titreşime neden olur. Buna rağmen bu sinyal o kadar düşük enerjilidir ki motorun kendi yapısal ve döner titreşimi yanında kaybolur gider. Bunun için düşük frekanslı ve büyük genlikli sinyalleri yüksek frekanslı ve küçük genlikli sinyallerden filtrelemek gerekir.

Aynı motora ait biri zarflanmış iki spektrum şekil 2.8 ve 2.9 da görülmektedir.



Şekil 2.8 : Hasarlı Rulmana Ait Titreşim İvme Sinyali



Şekil 2.9 : Aynı Rulmanın Zarflanmış (Filtrelenmiş) Spektrumu

Son zamanlarda bu ölçüm metodunun makina problemlerinin büyük bir kısmının tespiti için iyi bir gösterge olduğu ıspatlamıştır. Rulman arızaları , dişli kutularındaki defekte olmuş diş problemleri, kağıt makinasında hissedilen düzensizlikler, elektrik motor / stator problemlerinin tümü zarflama (filtreleme) metodunun uygulama alanındadır.

2.8.3 SEE (Spectral Emitted Energy)

Rulman ve dişli kutusu arızalarının tespitinde etkilidir. Metal metale kontakten veya başka nedenlerden oluşabilecek arızaların çok erken teşhisini sağlar. Bu işlemi metalin kendinde oluşan akustik emisyonları ölçerek yapar. Akustik yayılımı neden olabilecek durumlar aşağıdaki gibidir. [1]

Elektriksel Gürültü	Birbirine çarpan maddecikler.
Elektriksel ark oluşması	Kırık yada çatlaklar
Kavitasyon	Elektriksel olarak üretilen sinyaller
Metal kesmesi	Kompresör rotor teması
Mikro aşınmalar	Rulman sürtünmesi
Yağlama eksikliği	Dinamik aşırı yükleme
Rulman hasarları	Kirlenmiş , yabancı madde içeren yağ.

SEE teknolojisi bu tip durumlarda oluşan ultrasonik ses dalgalarını algılayan çok özel bir sensör kullanır. Bu tür akustik emisyonlar 150 – 500kHz aralığında ortaya çıkar. Böyle bir sinyal titreşim değil ; yüksek frekanslı bir ses dalgası olarak kabul edilir.

SEE metal aksamalarda oluşan mikroskopik ve henüz titreşim sinyali dahi vermeyen aşınmaların tespitinde kullanılır.

Bu ölçümlerde elde edilen değerlerde artma var ise artış görülen motorlar daha sık aralıklarla izlenmelidir.

2.8.4 Faz Ölçümü

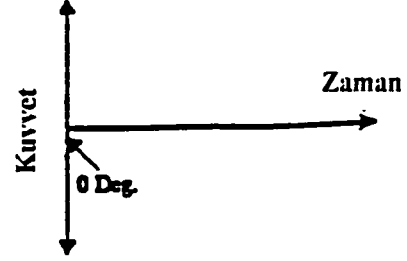
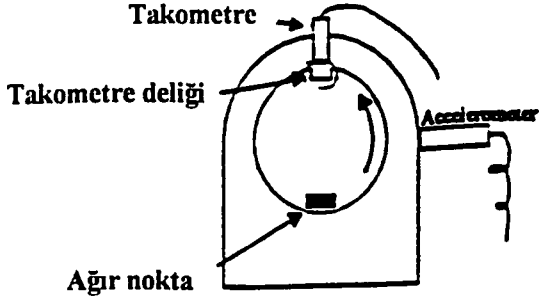
Faz ölçümü teknik olarak ayrı bir tür değildir. Burada faz ile kastedilen milden gelen titreşim sinyali ile dönen mil üzerinde işaretlenmiş, yeri bilinen bir nokta arasındaki açısal farktır. Bu ilişki titreşim seviyeleri ve milin yörüngesi hakkında değerli bilgiler sağlar. Bilgiler balans ayarı ve diğer analiz amaçları için çok kullanışlıdır. [1]

Aşağı da çok büyük bir fanı tahrik eden elektrik motoruna ait faz ölçümü örneklenmiştir. İlgili konum resimleri şekil 2.10 ile şekil 2.14 arası gösterilmiştir.

Kabul: Fazölümü için mile yapıştırılan bir işaret bandı , mil pozisyonunu belirlemek için takometre ve ölçüm için bir accelerometer kullanılmıştır.

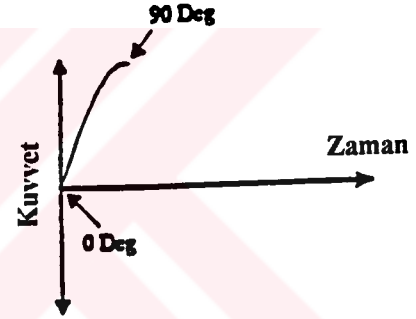
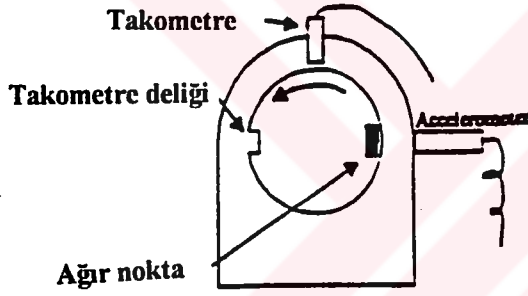
Takometre, işaret bandı kendi izasından her geçtiğinde bir darbe verir.

Bu darbe bilgi toplama işlemini başlatır. Faz açısı bilgi toplamanın başladığı nokta ile sensörün üzerine etkiyen en büyük pozitif kuvvetin algılandığı nokta arasındaki açıdır.



Şekil 2.10 : Faz Ölçümü Konum:1

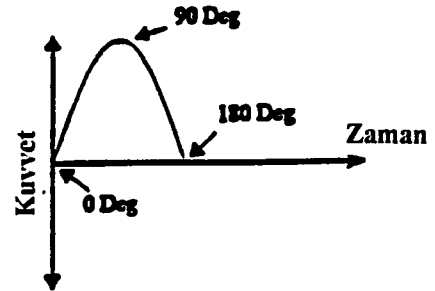
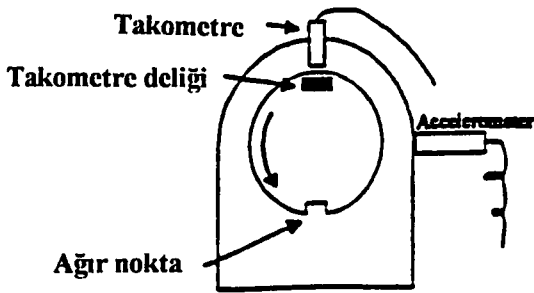
Takometre bandı hissedip bilgi depolama işlemini tetikler. Bu noktada kuvvet sıfırdır.



Şekil 2.11 : Faz Ölçümü Konum :2

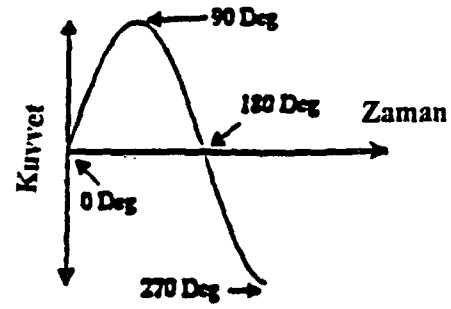
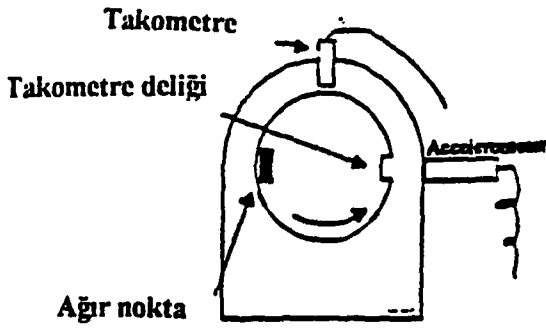
Mildeki ağır nokta sensörün bulunduğu konuma doğru 90° döner. Bu noktada dengesizliğin ürettiği kuvvet en büyük pozitif değerine ulaşır.

Ağır nokta sensöre doğru yaklaştığı için kuvvet pozitif olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2.12 : Faz Ölçümü Konum:3

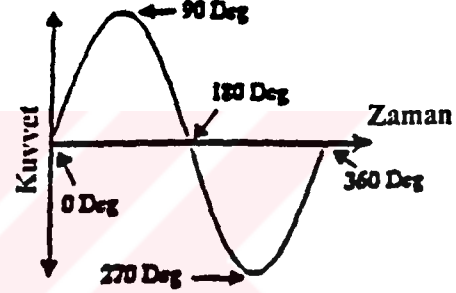
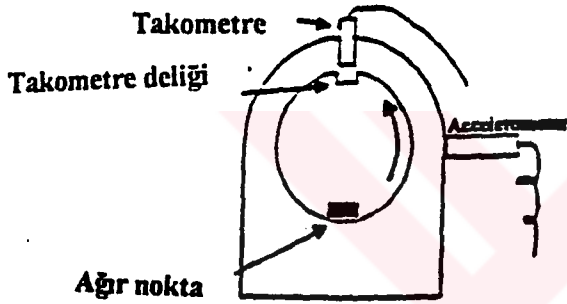
Ağır nokta 90°daha döner. Sensör tarafından algılanan kuvvet yine sıfırdır .



Şekil 2.13 : Faz Ölçümü Konum 4

Ağır nokta 90° daha dönerek sensörün tam karşısındaki konuma ulaşır. Bu noktada dengesizlik kuvveti en büyük negatif değerine ulaşır.

Not: Ağır nokta sensörden uzaklaştığı için kuvvet negatif olarak değerlendirilir.



Şekil 2.14 : Faz Ölçümü Konum :5

Ağır nokta 90° daha dönerek turunu tamamlar. Kuvvet yeniden sıfırdır.

Sonuç: Titreşim sensörü (accelerometer) 360°lik mil turu sırasında en büyük pozitif kuvveti ağır nokta ilk konumundan 90° uzaktayken hissetmiştir. Faz açısı 90° dir.

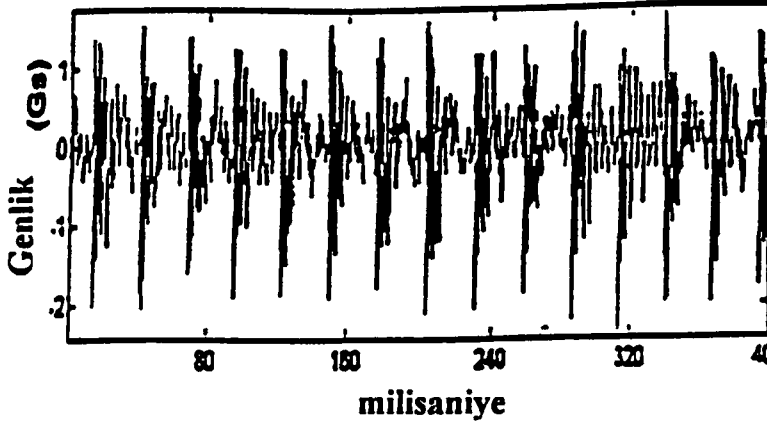
2.8.5 HFD Yüksek Frekanslı Tespit (High Frequency Detection)

HFD ile 5kHz – 60kHz arası küçük çatlakların nedeni olduğu titreşim tespit edilir. Sensörün rezonant frekansı , bu frekans bandı içindedir. Sensör küçük genlikli sinyallerin güçlendirilmesi için kullanılır. HFD ölçümü, yüksek frekanslarda gerçekleştirildiği için sensör olarak accelerometer kullanır. Titreşimin genlik birimi yerçekimi ivmesi olan 'g' dir. [1,2]

2.9 Sinyal İşleme metodları (Signal Processing Methods)

En önemli sinyal işleme metodları Zaman Dalga Şekli Analizi (Time Wave Form Analysis) ve FFT Spektrum Analizi (Fast Fourier Transform Spectrum Analysis) dir

2.9.1 Zaman Dalga Şekli (Time Wave Form Analysis)



Şekil 2.15 : Zaman Dalga Şekli Grafiği

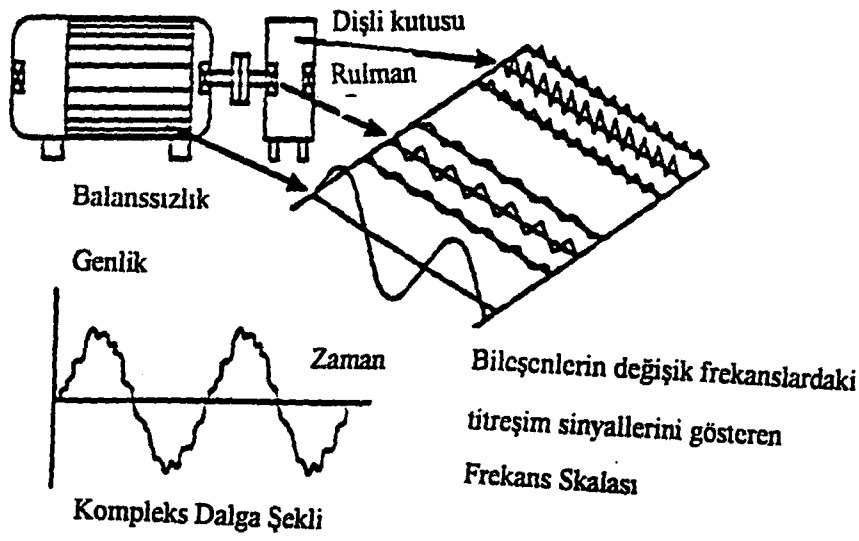
Şekil 2.15 deki zaman dalga formu grafiği ivme yada hız sensöründen gelen sinyalin genlik ve zaman koordinat eksenlerinde nasıl ortaya çıktığını göstermektedir.

Zaman dalga şekli titreşim sinyalinin kısa süreli zaman örneğini gösterir. Her ne kadar diğer sinyal işleme metodları kadar kullanışlı olmasada yinede frekans eksenli analizlerde ortaya çıkmayan bazı ip uçları içerir. [1 ,6]

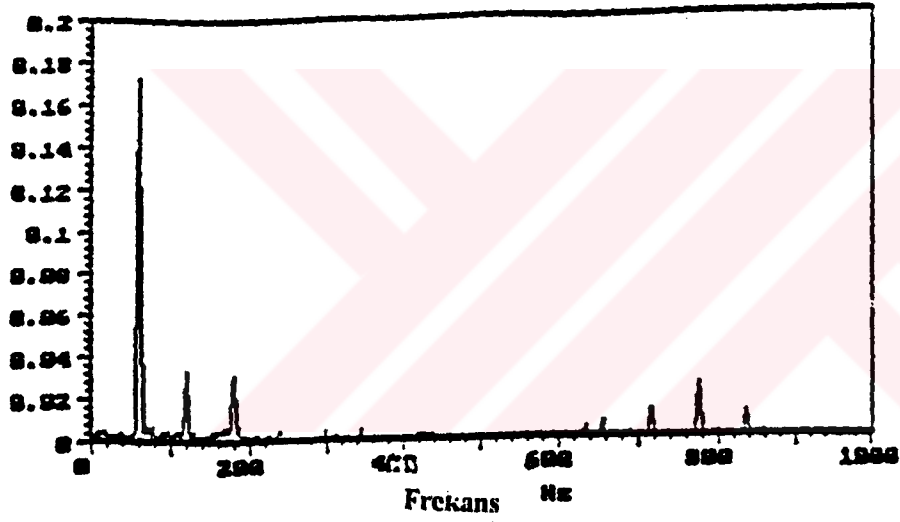
2.9.2 FFT Spektrum Analizi (Fast Fourier Transformation Spectrum Analysis)

Titreşim sinyalini işlemenin en kullanışlı biçimi bu sinyali FFT den geçirmektir. Matematiksel olmayan bir ifade ile FFT sinyalin değişik frekanslarda farklı genliklere bölmektir. İlgili gösterim şekil 2.16 dadır.

Örneğin sinyalin 10 Hz deki genliği daha sonra 20 Hz deki genliği vb. ölçülür . Bu şekilde sinyalin içerdiği her frekansın sahip olduğu genlik değeri bulunur. Bu değerler daha sonra frekans eksenine yerleştirilir. Dalga şeklinin bölünmüş olduğu frekans sayısı çözünürlük sayısı (line of resolution) olarak bilinir. Sonuçta ortaya çıkan grafik FFT Spektrum olarak isimlendirilir .[1,4,6]



Şekil 2.16 : FFT ' nin Sembolik Gösterimi



Şekil 2.17 : FFT Spektrumu

Bir problem oluşmuşsa FFT spektrumları sorunun nerede olduğunu , nedenini ve trend analizi ile sorunun ne zaman kritik hale geleceğini bildirir. Şekil 2.17 bir FFT spektrumudur. FFT spektrumunda titreşim genliği dikey ekseninde frekans ise yatay ekseninde yer alır.

3. ELEKTRİKSEL PROBLEMLER

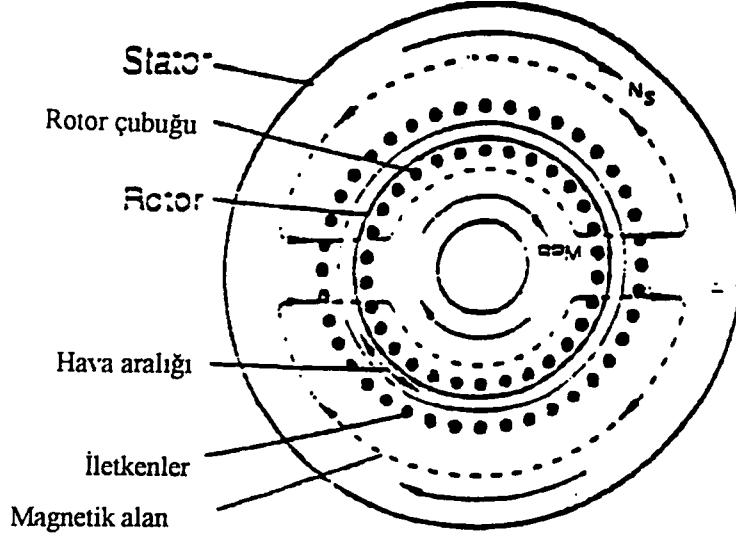
Vibrasyon analizi ile elektriksel arızaların tespiti şu temele dayanır: Motordaki magnetik alan akı yaratır , bu da elektromagnetik kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetler mekaniksel olan diğer kuvvetler ile beraber kendini motor rulmanı üzerinde gösterir. Bu kuvvetler daha sonra ya doğrudan rulman yuvasında yerleşmiş olan kuvvet transduserleri ya da dolaylı olarak titreşim sensörleri (ivme , hız, deplasman) ile ölçülür. Accelerometreler doğrudan kuvvet / kütle (f/m) oranını ölçerler. Kesirli ifade ile verilen bu değer elektriksel mi yoksa mekanik kaynaklı mı olduğu fark etmez.

Şekil 3.1 ve 3.2 kısa devre asenkron motora ait stator , rotor ,rotor çubukları, kısa devre halkalarını göstermektedir. Titreşim analiz ile tespit edilebilen elektrik motor problemleri şu ana başlıklar altında toplanabilir. [7]

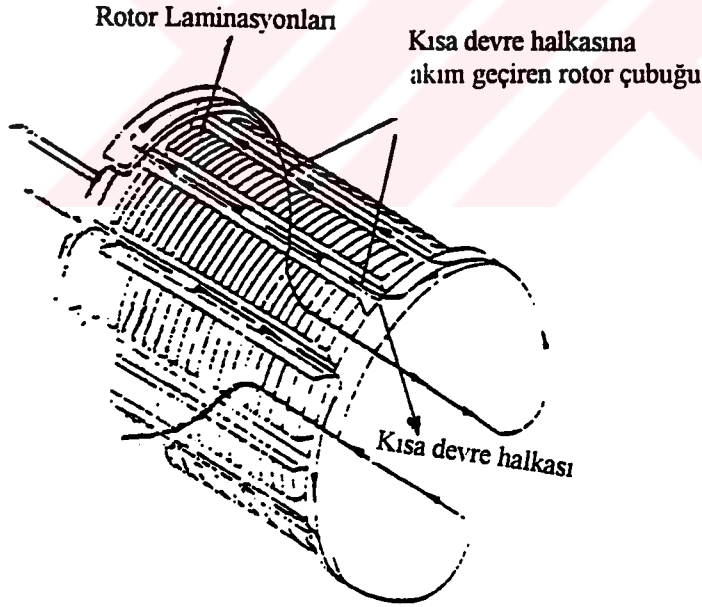
- 1- Stator Problemleri (Değişken Hava Aralığı , Kısa Devre Laminasyonlar, Gevşek Yada Zayıf Stator Gövdesi)
- 2- Eksentrik Rotor (Rotorda Değişken Hava Aralığı)
- 3- Rotor Problemleri (Kırık Veya Çatlamış Rotor Çubukları Yada Kısa Devre Halkaları, Kısa Devre Olmuş Rotor Laminasyonları , Gevşek Rotor Çubukları,vb)
- 4- Rotorun Lokalize Isınmasından Oluşan Termal Eğilme.
- 5- Gevşek Yada Kırık Konektörlerden oluşan Elektriksel Faz Problemleri.
- 6- Senkron Motor Problemleri
- 7- DC Motor Problemleri
- 8- Moment Darbesi Problemleri

Yukarıdaki problemlerin hepsi takip eden bölümlerde ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Eğer elektriksel bir problemden şüpheleniliyorsa elektriksel durumu tespit için yapılan testler motor tam yükte çalışırken yapılmalıdır. Bu şart özellikle elektromagnetik kuvvetlerin stator akımının karesiyle orantılı olarak değişmesi gerçeğine dayanmaktadır. Genellikle elektrik motorları tahrik ettiği makinadan ayrı çalıştırıldıklarında yada tıpkı hava kompresöründe olabileceği gibi yüksüz durumdaki bir makina ile beraber çalıştırıldığında problem olarak değerlendirilecek titreşim sinyali göstermemektedirler.

Elektriksel problemlerin çok büyük bir kısmı hat frekansının iki katında yani 100Hz (6000CPM) de normalden yüksek değer gösterir.



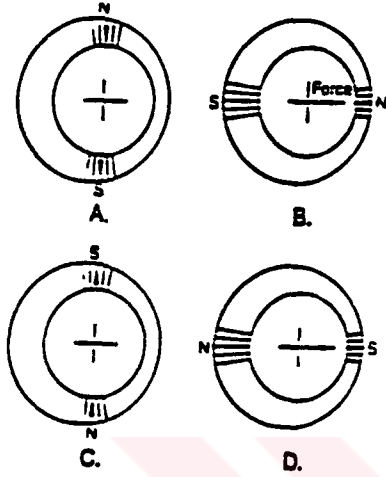
Şekil 3.1 : İki kutuplu endüksiyon motoruna ait stator,rotor, rotor çubukları , hava aralığı ve magnetik alanı içeren diagram.



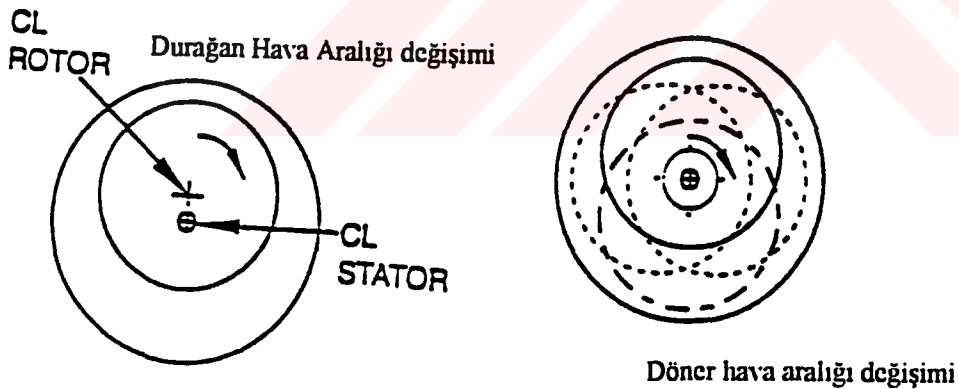
Şekil 3.2 : İki kutuplu bir motorun rotor çubukları, kısa devre halkaları, ve rotor laminasyonlarını içeren isometrik görünüşü

Şekil 3.3 birçok elektriksel problemin neden hat frekansının iki katında ortaya çıktığını anlatmaktadır .Şekil 3.3 c den de görüldüğü gibi eksantrik rotorlu bir motorda 3000 CPM lik bir stator alanında bir tur atıldığında en yakın kutba doğru olan magnetik çekim 0 dan maksimuma iki kez ulaşır. Alanın kendisi bir dakikada 3000 devir

dönerken magnetik çekim maksimum değerine dakikada 6000 kez ulaşır. Bir başka yaklaşım tarzı da şudur. Rotor ilk olarak kuzey kutbuna daha sonra güney kutbuna doğru çekileceği için kuvvet eksantrikliğe bağlı olarak magnetik alan frekansının iki katında değişecektir. Bu nedenle rotor ile stator merkezleri çakışmaz (eksantrik rotor yada stator nedeni ile) ise yani rotor stator ile tam olarak merkezlenmezse bu her zaman $2 \times$ hat frekansında (100Hz)te bir titreşim oluşturacaktır.



Şekil 3.3 : Rotor ve stator arasındaki düzensiz hava aralığı



Şekil 3.4 : Durağan Ve Döner Hava Aralığı Değişimleri

Şekil 3.4 durağan hava aralığı problemi yani hava aralığının aynı açısal pozisyonda kaldığı durum ile döner hava aralığı değişimi arasındaki farkı göstermektedir.

3.1 FFT Analizinde Kullanılan Bazı Elektriksel Tanım ve Bağlıntılar

$$F_L = \text{Elektriksel Hat Frekansı} = 50\text{Hz veya } 3000\text{CPM} \quad (3.1)$$

$$N_s = \frac{120 F_L}{P} \quad N_s = \text{Kayma'nın sıfır olduğu senkron hız} \quad (3.2)$$

$P = \text{Kutup sayısı}$

$$F_s = N_s\text{-RPM} \quad F_s = \text{Kayma Frekansı} \quad (3.3)$$

$$F_p = (\# \text{ Kutup}) \cdot (\text{Kayma frekansı}) = P \cdot F_s \quad (3.4)$$

F_p = Kutup geçiş frekansı = Birçok elektriksel problemin varlığını belirleyen anahtar yan band frekansı .

$$2 \text{ kutuplu } 3000 \text{ dev/dk motorlar için } = 2 F_s = F_p$$

$$4 \text{ kutuplu } 1500 \text{ dev/dk motorlar için } = 4 F_s = F_p$$

$$6 \text{ kutuplu } 1000 \text{ dev/dk motorlar için } = 6 F_s = F_p$$

$$\text{RBPF: } (\# \text{ Rotor çubuğu}) \cdot (\text{Dönüş devri}) \quad (3.5)$$

RBPF = Rotor Bar Pass Frequency = Rotor çubuğu geçiş frekansı

Şekil 3.5 stator problemi içeren tipik bir spektrum göstermektedir. $2F_L$ frekansında normalden daha yüksek titreşim görülmektedir.

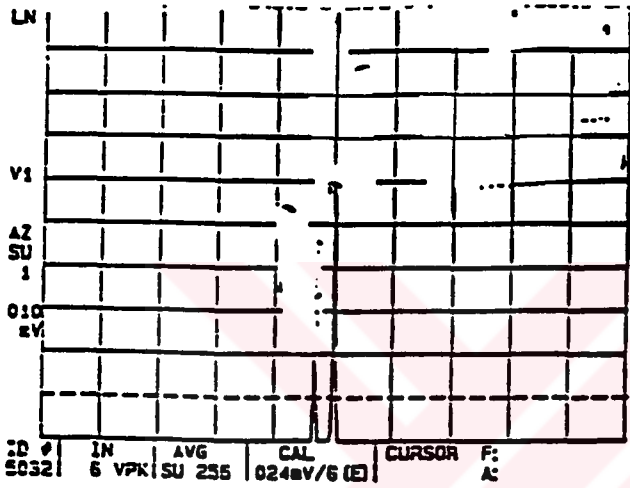
Hangi model yada hangi marka analiz cihazı kullanılırsa kullanılsın hat frekansının iki katı olan 100 Hz ile dönüş devri harmoniklerini birbirinden ayırd etmek gerekir Bunun için çok iyi çözümüleme (resolution) yapmak gerekir.

2 kutuplu motorda dönüş devrinin ikinci harmoniği, 4 kutuplu motorda dönüş devrinin dördüncü harmoniği 6000 CPM ile çakışabilir. Bu tip durumlarda dönüş devri harmoniklerinden hat frekansını ayırmak için FFT çizgi (çözümüleme) sayısını artırmak, $F_{\max}$ değerini düşürmek yada 6000 CPM (100Hz) etrafında zoom gerçekleştirmek gerekir.

Örneğin şekil 3.5 deki spektrumda 2983 Dev/dk ile dönen bir elektrik motoru söz konusudur. Bu analiz için 400 FFT çizgisi ve 60000 CPM maksimum frekans kullanılırsa dönüş devrinin ikinci harmoniği olan 5966 ile 6000 devri birbirinden ayırmak imkansız olacaktır. Çünkü ayırt edilebilen en yakın iki frekans arası $60000/400 = 150$ CPM olacaktır. 3200 FFT çizgi sayısı kullanılsa bu çözümüleme 3.75

CPM aralıklı bir değere ulaşacak ve bu aralık yeterince küçük olduğu için $3.75 < (6000 - 5966 = 34)$ böylelikle analiz yapan kişi sorunun elektriksel kaynaklı mı yoksa mekaniksel mi olduğunu anlayacaktır.

Elektriksel problem için zoom yaparken lineer değerler yerine logaritmik skala kullanmak oldukça faydalı bir yoldur. Logaritmik skala uygulanmazsa hat frekansı $2 \times$ hat frekansı veya dönüş hızı etrafında oluşabilecek kutup geçiş frekansı yanbandları kolaylıkla gözden kaçırılabilir. Çünkü kutup geçiş frekansı yanbandları potansiyel problemlerin göstergesi oldukları halde küçük genliklidirler. [7]



Şekil 3.5 : Stator Problemi Gösteren Zoom Spektrum

3.2 Stator Problemleri

Titreşim analizi ile teşhis edilebilen stator problemlerinin her biri aşağıdakileri içermektedir.

- Stator dış merkezliliği (dış merkezli bir stator rotor ile stator arasında durağan, farklı hava aralığı oluşturur.)
- Kısa devre laminasyonlar (laminasyon katmanlarındaki izolasyon problemleri lokalize ısınmalara neden olur.)
- Gevşek demir (Statorunda oluşabilecek gevşeklik veya zayıflıklar.)

Bu problemler aşağıdaki karakteristikleri gösterir.

1- Tüm stator problemleri 2x hat frekansında yüksek titreşim gösterir. Bu titreşim dönüş hızı yada kayma frekansı ile ilgili olmadığından kutup geçiş frekanslı yanbandlar görünmez. Şekil 3.7 büyük bir elektriksel problem işaret etmektedir. Şekil 3.6 7200 CPM de 0.5842cm/s ile band 3 değerini aşmış bir titreşimi göstermektedir. Bu problemin daha net anlaşılması için spektrumdan sonra aynı motorda bir de gerçek zaman ölçümü alınmıştır. Bu ölçüm Şekil 3.7 de gösterilmiştir. İkinci ölçümde 0.679cm/s değeri 2xhat frekansında görülürken 2xRPM de 0.011cm/s değeri okunmuştur. Değerlendirme sonucu stator dış merkezliliği sonucuna varılmıştır.

2-Yeni veya yeni bakımdan çıkmış motorlarda 2xhat frekansında 1.27cm/s nin üzerindeki değerlere ; çalışma halinde olan motorlarda ise 0.254cm/s nin üzerindeki değerlere dikkat edilmelidir.

3 - Stator dış merkezliliği hava aralığı farkının en geniş olduğu noktaya bağlı olarak yönsel titreşim oluşturur. Magnetik kuvvetler rotor stator arasındaki hava boşluğunun minimum olduğu noktada en büyüktür. Bu nedenle elektromagnetik kuvvetler magnetik alanın her turunda minimumdan maksimuma 2xhat frekansında (6000CPM) yükselir.

4- Diferansiyel hava aralığı asenkron motorlarda % 5 i senkron motorlarda % 10 u geçmemelidir. $2F_L$ deki titreşim zamanla artma gösteriyorsa motor eğer mümkün ise fiziksel olarak incelemeye alınmalıdır. Bunun için rotor ve stator üzerinde kalem ile birer nokta işaretlenir. İşaretlerin aynı hizaya geldiği noktada hava aralığı ölçülür.

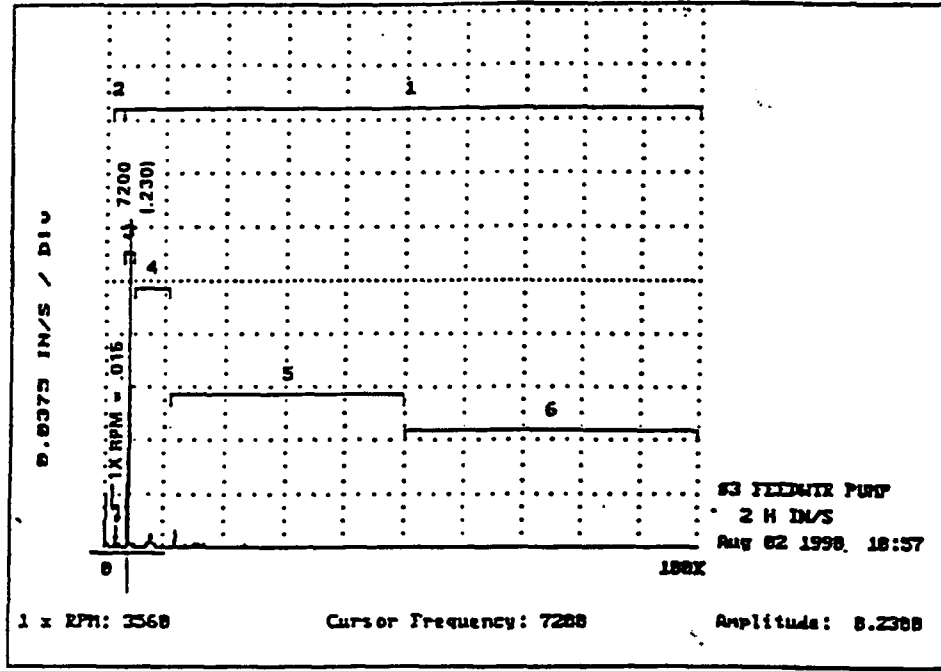
Daha sonra rotor tam 45° döndürülür ve statorun üzerindeki işaretli noktadan bir hava aralığı yeniden ölçülür. Eğer değişim % 5 ten fazla ise hava aralığındaki bu fark eksantrik (dış merkezli) rotordan ileri gelmektedir.

Bir sonraki adım rotoru yine 45° döndürmek ve bu sefer hava aralığını rotorun üzerindeki işaretli noktadan ölçmektir. Eğer aralık % 5 ten büyük bir değişim gösteriyorsa bu eksantrik (dış merkezli) bir stator olduğunun bir belirtisidir.

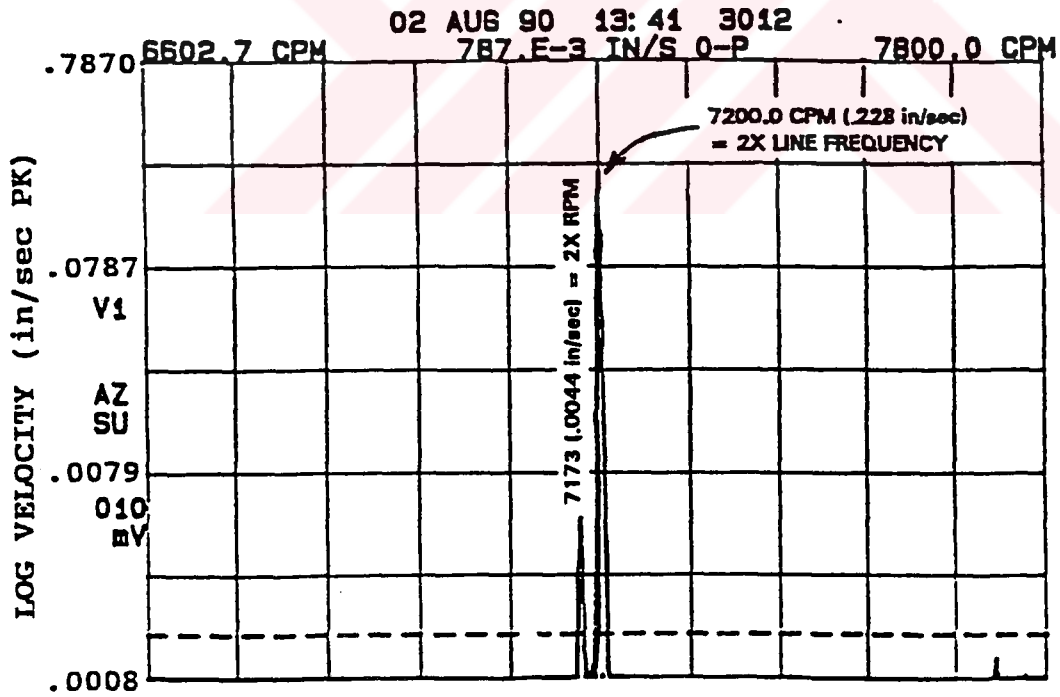
5- Zayıf yada gevşek stator desteklerinden oluşabilen gevşek zemin bağlantıları.

6-Kısa devre stator laminasyonları lokalize ısınmalara neden olur. Bu zamanla stator eksantrikliğine neden olup statoru bozabilir. Bu olay termal olarak çalışma zamanı arttıkça eğilmelere neden olabilir.

Bazen stator ve rotorun birbirine temas etmesiyle çok üzücü sonuçlar oluşturur.



Şekil 3.6 : $F_{max} = 50 \times \text{RPM}$ iken Normal Rota Spektrumu



Şekil 3.7 : Stator problemine İşaret Eden Zoom Spektrum (Kutup Geçiş Yan Bandları Stator Problemde Görünmez.)

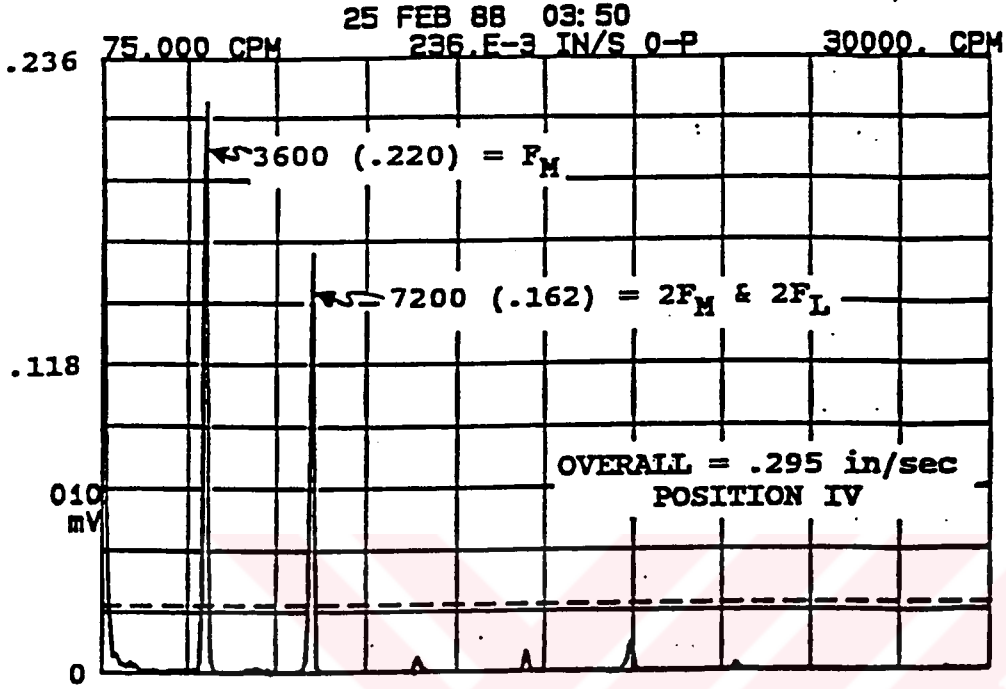
3.3 Dış Merkezli (Eksantrik) Rotor

Eksantrik rotor, rotorun kendi eksen çizgisiyle simetrisinin bozulması anlamına gelir. Bu lokalize ısınma, rotorun eğilmesi gibi nedelerlerden oluşabilir. Eksantrik rotor stator ve rotor arasında rotorla birlikte dönen değişken hava aralığına neden olur. Bu nedenden dolayı eksantrik rotor durağan değil aksine değişken hava aralığı düzensizliğine yol açar.

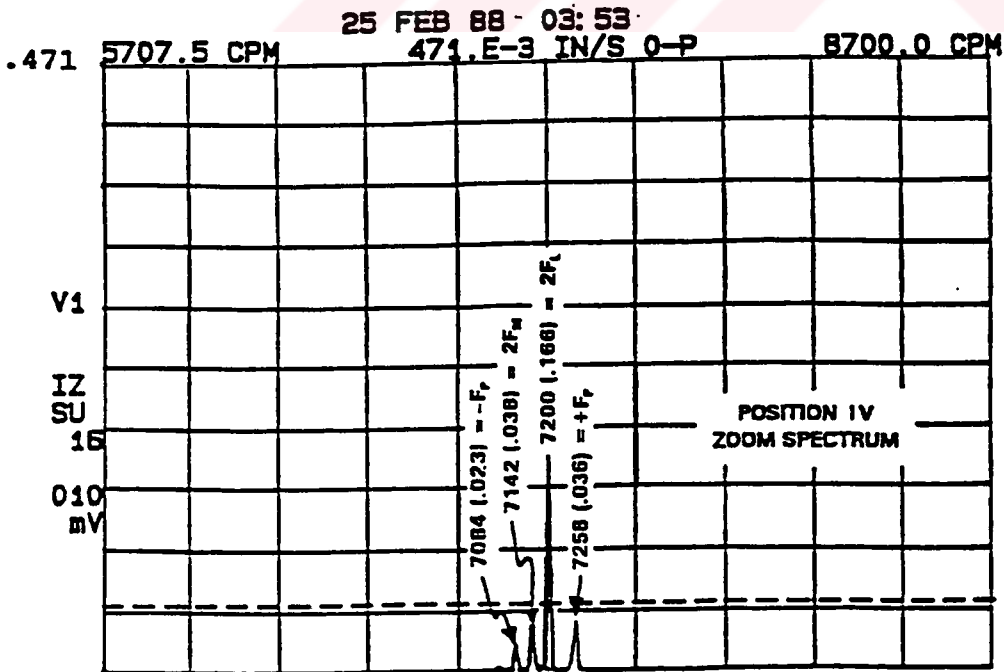
Eksantrik rotor aşağıdaki karakteristikleri gösterir.

- 1- Eksantrik rotor kutup geçiş frekanslı yan bandlar ile birlikte 2xhat frekansında yüksek titreşim oluşturur. ($F_p = \text{kutup sayısı} \times \text{kayma frekansı}$) Şekil 3.9 değişken hava aralığına yol açan eksantrik rotoru göstermektedir. İlk olarak Şekil 3.8 de 0.750cm/s değerli toplam titreşim görünmektedir. Aynı zamanda 7200 CPMde 0.4114cm/s genlikli titreşim vardır.Şekil 3.9 zoom spektrumunda ise 7200 CPM de 0.42 cm/ s genlikli ve kutup geçiş frekanslı yan bandlara sahip eksantrik rotor karakteristiği görünmektedir. (Bu ölçümlerin alındığı yerde hat frekansı 60Hz dir.)
- 2- Yeni veya yeni bakımdan çıkmış motorlarda 2xhat frekansında 1.27cm/s nin üzerindeki değerlere ; çalışma halinde olan motorlarda ise 0.254cm/s nin üzerindeki değerlere dikkat edilmelidir.
- 3- Tüm motor çevresi boyunca toleranslar dahilinde hava aralığı oluşturmak için eksantrik rotorda rulman yataklarının ayarlanması uyumlu hale getirilmesi gerekebilir.
- 4- Kestirimci bakım programında kutup geçiş frekans yan bandlı 2xhat frekansında titreşim ile rotor eksantrikliği tespit edilirse bu motorda trend analizi uygulanmalıdır. $2F_L$ deki titreşim 0.254 cm/s yi aşarsa ve aynı şekilde $2F_L$ üstünde ve altındaki yan bandlar gerek genlik gerekse adet olarak artış gösteriyorsa bu motor daha büyük bir dikkat ile takip edilmelidir.
- 5- Eksantrik rotorlu bir motor ısındıkça gittikçe artan titreşim sinyalleri gösterecektir. Örneğin motor ilk çalıştırıldığında 0.254cm/s olan titreşim sinyalleri 10 dakika sonra 0.32 ve takip eden 20 dakika içinde 0.45cm/s ye dahi çıkabilir. Son olarak aradan 30 dakika geçtikten sonra bu değer 0.63cm/s ye dahi ulaşabilir. Bunun sebebi rotorun homojen (uniform) olarak ısınmaması olabilir.

Önlem alınmaz ise rotor statora değecek miktarda eğilebilir ve bu da çözümlenmesi imkansız sorunlara yol açar.



Şekil 3.8 : Devridaim Su Pompa Motoruna Ait 30000 CPM Fekans Bandlı Spektrum.



Şekil 3.9 : Eksantrik (Dış Merkezli)Rotora İşaret Eden Zoom Spektrumu(Mekanik Gevşeklik Yada Eksen Kaçıklığı Değil)

3.4 Rotor Problemleri

Titreşim analizi ile teşhis edilebilen rotor problemleri aşağıdaki durumları içermektedir.

- Kırılmış/ çatlamış Rotor çubukları veya kısa devre halkaları.
- Rotor çubukları ile kısa devre halkaları arasındaki kötü , yüksek dirençli bağlantılar.
- Kısa devre olmuş rotor laminasyonları.
- Bitiş halkaları ile iyi kontak oluşturmayan Gevşek / açık uçlu rotor çubukları

Bu problemler aşağıdaki karakteristikleri gösterir.

1 – Çatlak yada kırılmış rotor çubuklarının tespiti için kilit nokta 1xRPM etrafında kutup geçiş frekanslı yan bandların varlığıdır. (2 kutuplu motorlarda bu yan bandlar 2xkayma frekansında olurken 4 kutuplu motorlarda 4xkayma frekansında görünürler.) 3.10 ile 3.13 nolu arası şekiller ileri seviyede rotor problemine sahip 2 kutuplu bir motor için tipik spektrumları göstermektedir. İlk olarak 30000 CPM geniş bandlı spektrum söz konusu büyük problem hakkında küçük ipuçları vermiştir. Bunu mekaniksel gevşekliğin ispatı olan dönüş hızı harmoniklerini göstererek yapmıştır. Şekil 3.11 ile Şekil 3.13 arasındaki zoom spektrumları 1xRPM , 2xRPM ve 3xRPM etrafında kutup geçiş frekanslı yan bandların varlığını açıkça göstermiştir. Bu spektrumlar kırılmış/çatlamış rotor çubuklarının , kısa devre halkası problemlerinin ya da kısa devre olmuş rotor laminasyonlarının olduğunu işaret etmiştir.

2- 3.11 ile 3.13 nolu resimlerinden de görüldüğü gibi kırılmış/çatlamış rotor çubukları ve/veya yüksek dirençli uçlar daha yüksek dönüş hızı harmonikleri etrafında da kutup geçiş frekansı yan bandlı sinyaller üretmektedir. Bunlar 2. ; 3. ; 4. ; 5. ; dönüş hızı harmoniklerini içermektedir. Bu gibi durumlarda genellikle 1 den fazla kırık yada çatlak rotor çubuğu bulunmuştur. Zaten rotorun bir devrinde birden fazla darbe olayı gerçekleştiğinden bu beklenen bir olaydır. Şekil 3.14 de dönüş hızı 1176 RPM dir. (Kayma frekansı $1200-1176=24$ CPM dir.)

Bu 6 kutuplu bir motor olduğu için kutup geçiş frekansı $F_p= 6 \times 24= 144$ CPM dir. Bu da 1xRPM den 5xRPM e kadar olan dönüş hızı harmonikleri etrafındaki kutup geçiş yan bandlarının yerleşme aralığıdır. Şekil 3.15 bu spektrumun zoom yapılmış halidir. Motor incelemeye alındığında 4 tane çatlamış rotor çubuğu olduğu anlaşılmıştır.

3- Gevşek / açık rotor çubukları için izlenmesi gereken anahtar frekans çok daha yüksek değere sahip RBPF (Rotor Bar Pass Frequency) Rotor Çubuğu Geçiş Frekansı ve harmonikleridir. $RBPF = \text{Rotor çubuk sayısı} \times \text{RPM}$ dir.

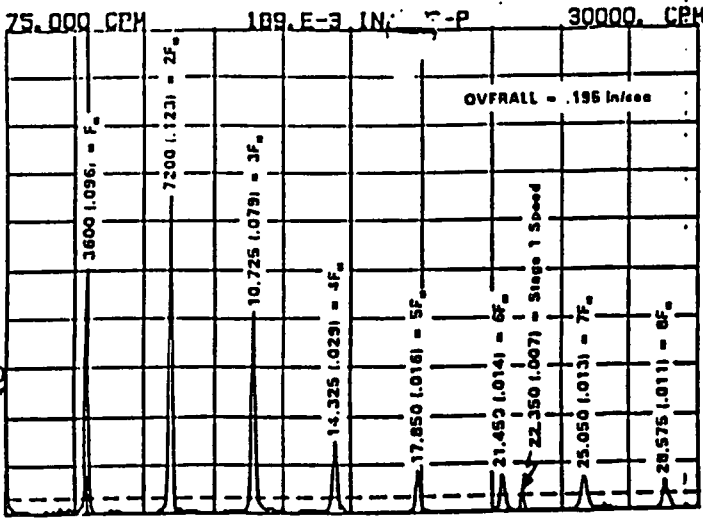
4-Özellikle dikkat edilmesi gereken RBPF ve harmoniklerinde($2 \times RBPF$ ve $3 \times RBPF$) de oluşabilecek 0.15 cm/s ve daha yüksek genlikli titreşimlerdir. Ek olarak RBPF ve harmonikleri etrafında yerleşecek yan bandlar tam olarak $2 \times$ hat frekanslıdır. RBPF deki titreşimin genliği kabul edilebilir sınırlar dahilinde olsa dahi frekans bandı genişletilip $2 \times RBPF$ izlenirse buradaki genliğin temel RBPF dekinin 10 katı mertebelerinde olabileceği bilinmelidir.

Şekil 3.16 da görülen ölçüm iki ya da daha çok açık rotor çubuğu olan motorda gerçekleştirilmiştir. 57 rotor çubuğu sahip ve 1793RPM ile dönmekte olan bu motorun RBPF frekansı 102200 CPM civarında idi . Şekil 3.16 daki geniş bandlı spektrum RBPF de 0.020cm/s genlikli titreşim göstermektedir. Öte yandan $2 \times RBPF$ de karşılaşılan sinyal bambaşka idi. Şekil 3.16'nın zoom spektrumu 204380CPM de yani $2 \times RBPF$ de 0.56cm/s ile yaklaşık 28 kat büyük genlikli bir titreşim göstermiştir. Eğer maksimum frekans sadece temel RBPF yi içine alacak genişlikte olsa idi büyük olasılıkla bu problem gözden kaçırılacaktı. Ek olarak kilit ipuçları $2 \times RBPF$ deki aşırı yüksek genlikli sinyalin yanısıra bunun etrafında bulunan tam olarak $2 \times$ hat frekanslı yan bandlardır.

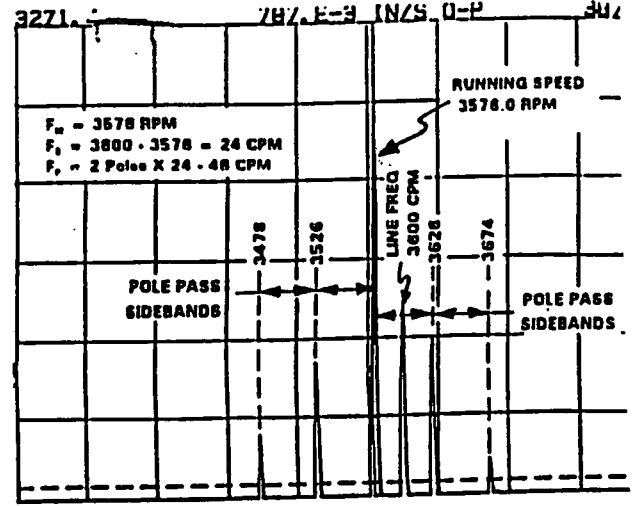
5-İstatistikler bazı zamanlarda RBPF veya harmoniklerindeki titreşimin en büyük değerde olmadığını bunun yerine değişik frekanslarda yer alan $2 \times$ hat frekanslı yan bandların en yüksek değerli olabileceğini göstermiştir. Bu tip spektrum yine gevşek veya açık rotor çubuğunun ve/veyadeğişken hava aralığının göstergesidir.

6-Birçok motor için RBPF ve harmoniklerindeki 0.15cm/s ve daha yüksek genlikli titreşimler arıza ihbarcısı olduğu halde yapılması gereken önce teşhisi koyup ani karar alıp müdahale yapmadan önce trend analizi yoluna gitmektir. Eğer yapılan birkaç ölçüm sonucu trend de bir artış görünmüyorsa bu hasar devam etmiyor , büyümüyor anlamına gelmektedir. Öte yandan bir ölçümden diğerine değerler artıyorsa bu acilen motorun bakıma alınmasını gerektirir.

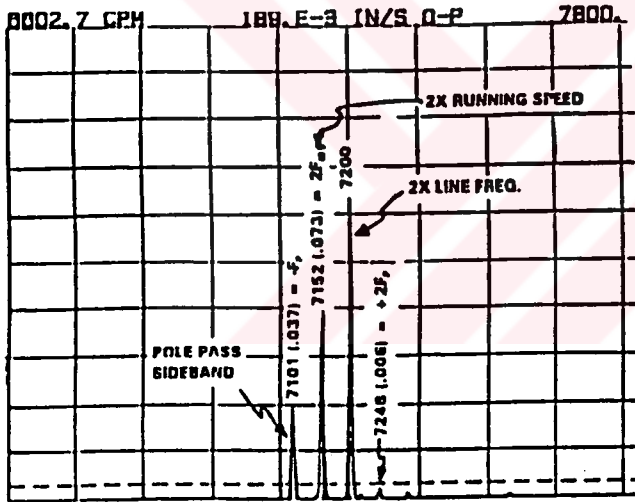
7-Durum görüntüleme programı uygulanırken elektriksel problemlerin teşhisinde şu iki önemli noktanın özellikle uygulanması , ölçüm rotalarının bu önemli noktalar doğrultusunda hazırlanması gerkir.



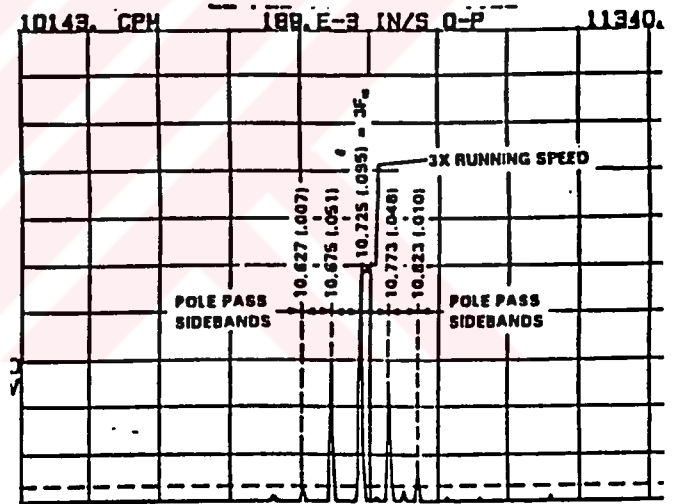
Şekil 3.10 : Centac Motora Ait band 30000 CPM li Spektrum



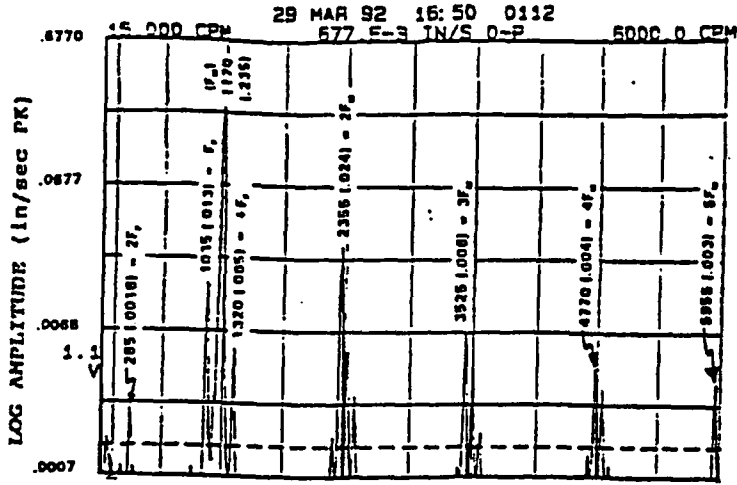
Şekil 3.11: 1xRPM Etrafında birçok yan içeren zoom spektrum. (Kırık yada çatlak rotor çubuğu teşhisi)



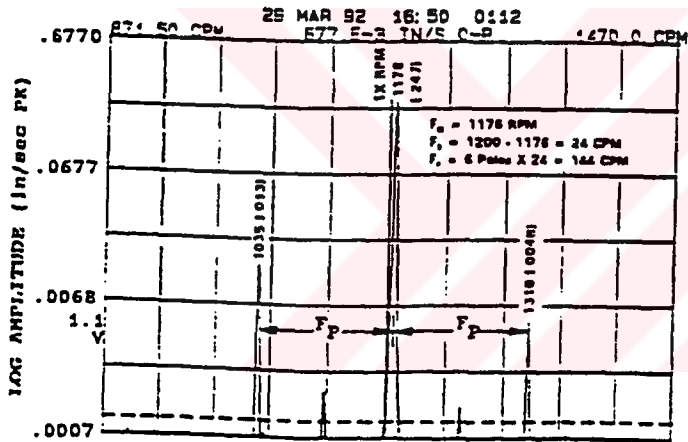
Şekil 3.12: 2xRPM etrafında Zoom Spektrum (Kutup Geçiş Yan Bandları Buradada Görülmektedir.)



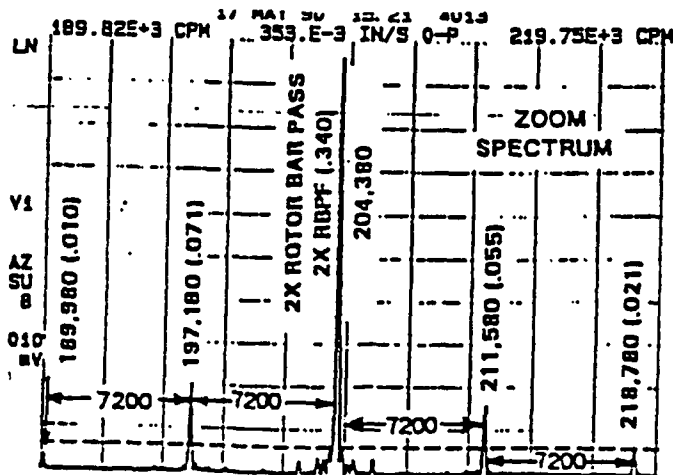
Şekil 3.13: 3xRPM Etrafında Zoom Spektrum. (Kutup geçiş Yan Bandları Mevcuttur.)



Şekil 3.14 : 1xRPM İle 4xRPM Arası KutupGeçiş Frekanslı Yan Bandları Açıkça Gösteren Logaritmik Genlikli Spektrum (4 Tane Çatlak Rotor Çubuğu belirlenmiştir.)



Şekil 3.15 : 1xRPM Ve Kutup Geçiş Yan Bandlı Logaritmik Genlikli Zoom Spektrum.



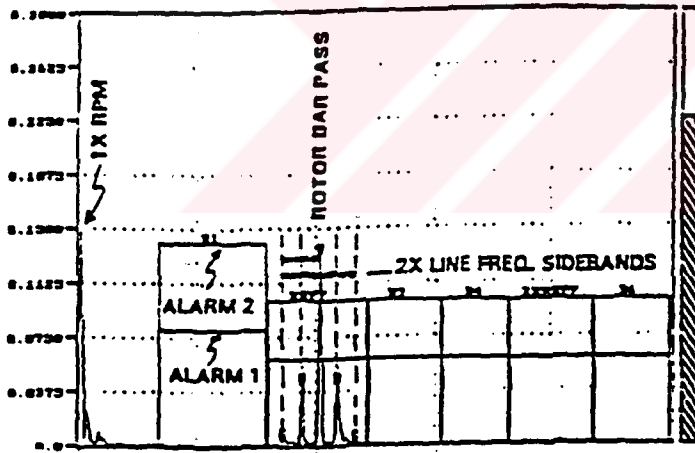
Şekil 3.16 : 2x RBPF de Teşhis Edilen Şiddetli Rotor Çubuğu problemi

Düşük Frekanslı sinyaller için $F_{max} = 12000\text{CPM}$; 3200FFT çözünürlük çizgisi ; 2 aritmetik ortalama alınır. Bu motor dönüş hızı harmonikleri ile $2F_L$ de oluşan sinyallerin birbirinden ayırt edilmesini sağlar.

Yüksek Frekanslı (RBPF) sinyaller için $F_{max} = 360000\text{CPM}$; 1600 FFT çizgisi ; 8 ortalama alınır . Bu RBPF ve 2xRBPF frekanslarında oluşabilecek problemlerin teşhisini sağlar. Aynı zamanda $2F_L$ aralıklarla yerleşmiş sinyallerin incelenmesi gerekir.

Şekil 3.17 de RBPF frekansında 0.345cm/s genlikle alarm 1 (0.15cm/s) ve alarm2 (0.25 cm/s) değerlerini aşmış sinyal görünmektedir. Bu sinyal aynı zamanda $2F_L$ aralıklı yanbandlar ile çevrelenmiştir.

Kazanılan tecrübeler bu ölçümlerin en iyi yatay yönden alındığını göstermektedir. Şu unutulmamalıdır ki yukarıdaki iki ölçüm durum görüntüleme metodunda elektrik motorlarına uygulanan standart ölçüm rotasına bir ektir. Elektrik motorlarının önünden ve arkasından olan yatay, dikey ve eksenel olan tüm standart ölçümler alınmalıdır.

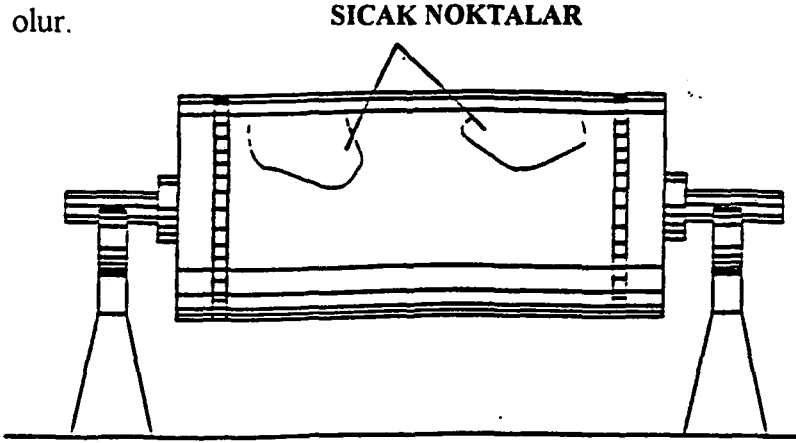


Şekil 3.17 : 6 Kutuplu Pompa Motoru İçin 6 Spektral Alarm Bandı Ayarı.

3.5 Rotorda Değişik Lokal Isınmalar Nedeni ile Oluşan Sıcaklığa Bağlı Eğilme (Thermal Bow)

Şekil 3.18 lokalize ısınmaya maruz kalan bir motoru sembolize etmektedir. Rotor üzerinde farklı lokalize ısınmalar büyük çoğunlukla birbirine komşu birkaç rotor laminasyonunun kısa devre olması ile meydana gelir. Bu ısı kısa devre laminasyonlarda akan çok daha büyük girdap akımları ve histerezis kayıpları nedeni ile oluşur.

Aynı şekilde kırılmış rotor çubuklarında rotor üzerinde farklı lokal ısınmalara neden olur.

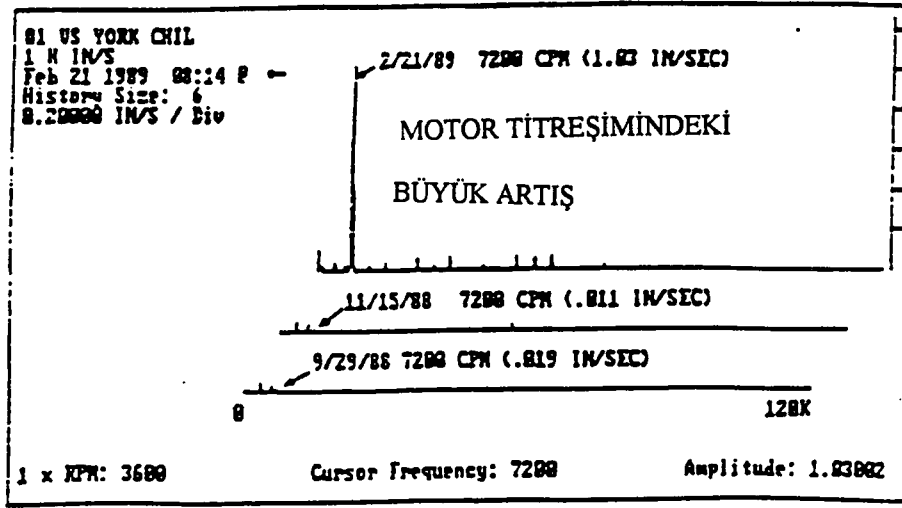


Şekil 3.18: Kırılmış Rotor Çubuğu Yada Kısa Devre Laminasyonlar Nedeni İle Rotor Üzerinde Oluşan Aşırı Sıcak Noktalar.

Bu lokalize ısıma rotorun eğilmesine ve sonuç olarak statora temas etmesine neden olabilir. Bu konu ile ilgili en büyük problem termal eğilmenin kendi kendini beslemesidir. Isınma ile mil başlangıçta çok az miktarda eğilir. Mil eğildikçe daha fazla elektromagnetik dengesizlik kuvvetlerinin oluşmasına neden olur ve bu da daha fazla ısı üretir. Bu da rotorda daha fazla eğilmeye neden olur. Birbirinin etkisini artıran bu olaylar zinciri doğru teşhis edilmezse büyük felakete yol açar. [7]

Termal eğilme aşağıdaki karakteristikler şeklinde kendini gösterir.

- 1- Motor ilk çalıştırıldığında 1xRPM de görülen titreşim sinyalinin, zamanla arttığı görülür. Çünkü zaman geçtikçe eğilme artacaktır. Bu spektrum mekanik dengesizlik olarak yorumlanabilir , ancak gerçek neden bu olmadığı için (balans) denge ayarı hiçbir işe yaramayacaktır.
- 2-Termal eğilme arttıkça spektrum dış merkezli (eksantrik) rotorun göstergesi olan 6000CPM de ve kayma frekansı yan bandlı sinyaller içerecektir.
- 3-Termal eğilme arttıkça eksenel yönde titreşim fazı 180° ye yaklaşır. Bu iç ve dış rulmanlar arasındaki titreşimin faz farkıdır. Bir başka deyişle bu görünüm kıvrık mili sembolize eder.
- 4-Infrared kamera bazı zamanlarda motor üzerindeki daha sıcak noktaların yerini belirlemek için kullanılır. Böylece tamir edilmesi gereken noktalar tespit edilmiş olur.



Şekil 3.19 : Üç Yılın Kıyaslandığı Trend Eğrisi

Tablo 3.1 : 1996 yılı ölçüm sonuçları.

<u>Frekans(CPM)</u>	<u>1xRPM</u>	<u>Genlik</u>	
300	0.08	0.1008	
7200	2.00	1.03002	2/2/1996
21600	6.00	0.06005	
28500	7.92	0.06990	
42900	11.92	0.06990	
46800	13.00	0.06005	
50100	13.92	0.06990	

Tablo 3.2 :1995 yılı ölçüm sonuçları

<u>Frekans (CPM)</u>	<u>1xRPM</u>	<u>Genlik</u>	
3600	1.00	0.05274	
6000	1.67	0.3272	3/5/ 1995
21300	5.92	0.02097	
49800	13.83	0.03781	

Tablo3.3 : 1994 yılı ölçüm sonuçları

<u>Frekans (CPM)</u>	<u>1xRPM</u>	<u>Genlik</u>	
300	0.08	0.00731	
900	0.25	0.00699	
3600	1.00	0.04988	
6000	1.67	0.03590	
7200	2.00	0.01875	9/6/1994
10800	3.00	0.01334	
21300	5.92	0.01843	
35700	9.92	0.01176	

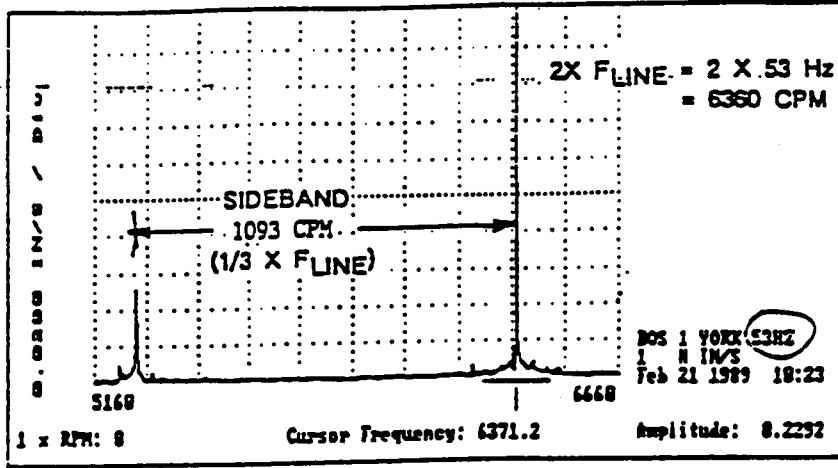
3.6 Elektriksel Faz Problemleri

Kırık yada çatlak konektörlerden oluşan elektriksel faz problemleri 2xhat frekansında (2.5cm/s) mertebelerinde aşırı yüksek titreşime neden olur. Etrafında 1/3 hat frekansı ($1/3 F_L$) uzaklığında yan bandlar oluşur.Bunun nedeni tam kontak sağlamayan bozuk bir konektör olabilir.

3.19 ile 3.20 nolu şekiller oldukça şiddetli elektriksel faz problemini göstermektedir. Şekil 3.19 soğuma fanını süren bir motorun dış rulmanından alınmıştır. Motor bir frekans / gerilim inverterinden sürülmektedir.

Trendinde büyük artış görülen bu motorun spektrum analizi sonucunda iverterin çıkış frekansının biraz düşürülüp (60Hz den 53 Hz'e) , bunun motor üzerinde ne gibi etkiler yapacağını görülmesi kararlaştırılmıştır. Şekil 3.20 2xhat frekansı etrafında 3200 FFT çözünürlüklü zoom spektrumunu göstermektedir.

Burada önemli olan 1093 CPM de ($1093\text{CPM} = 18.2\text{ Hz} = 1/3\text{ xhat frekansı}$) de (Yeni hat frekansı =53 Hz) göze çarpan yan bandın varlığı idi .Bu motorda elektriksel faz problemi teşhisi konulmuş ve tüm besleme hatlarının ve konektörlerin sadece ara istasyondan ana beslemeye değil aynı zamanda ana kaynaktan invertere ve inverterden motorun kendisine kadar incelenmesi önerisi getirilmiştir. Kontroller sonucu inverterden motora enerji getiren 3 hattan birisinin gevşemiş olduğunu ve tam temas etmediği bulunmuştur. Bu gevşek kontak tamir edildikten sonra 2x hat frekansındaki titreşim 2.57 cm/s den 0.43 cm/ s ye inmiştir.



Şekil 3.20 : Elektriksel Faz Problemleri Nedeni İle 1/3 x hat Frekansında Oluşan Yan Bandlar.

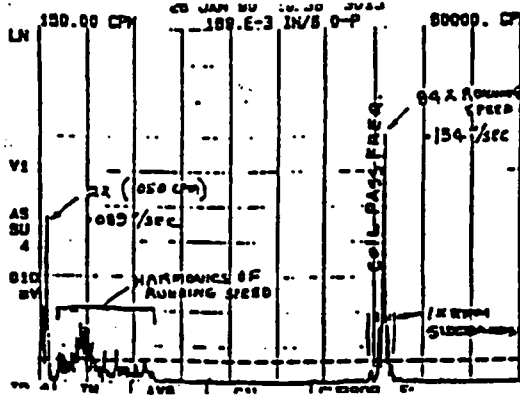
3.7 Senkron Motor Problemleri

Şekil 3.21 gevşek stator sarımı olan bir senkron motor problemini göstermektedir. Örnekteki motor pistonlu bir kompresörü sürmektedir ve son 6 ay içinde birçok rulman problemi geçirmiştir. Şekil 3.21 den de görüldüğü gibi spektrum 43200CPM de 0.34cm/ s genlikli yüksek titreşim sinyali göstermiştir. Zoom spektrum bunun tam olarak 84x RPM e karşılık düştüğünü göstermiştir. Derinlemesine inceleme bu senkron motorun 14 kutuplu olduğunu ve her kutupta 6 sarım bulunduğunu göstermiştir. Bu nedenle (CPF) Sarım Geçiş Frekansı = $14 \times 6 = 84 \text{ RPM}$ ' e eşittir.

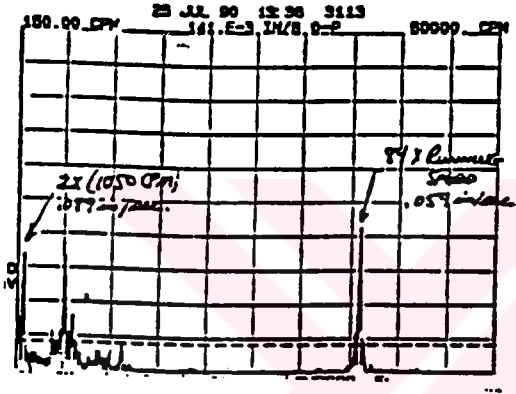
Zoom spektrum RBPF deki yüksek genliğin yanı sıra 1xRPM de etrafında da yan bandlar göstermiştir.

Burada baskın problem olarak gevşek stator sarımı teşhisi konulmuştur. Şekil 3.22 kutupların tamiri ve sarımlar arasındaki ulaşılabilen tüm boşlukların kapatılmasından sonraki spektrumu göstermektedir. [7]

CPF (Coil Pass Frequency = Sarım Geçiş Frekansı) deki sinyal 0.34 cm/s den 0.139 cm/s ye inmiştir.



Şekil 3.21 : Senkron Motordaki Gevşek Sarımların Tespiti (BakımÖncesi)(14kutupx 6sarımlar/kutup=84xRPM)

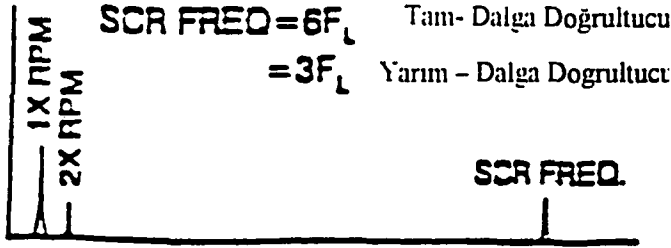


Şekil 3.22: Gevşek Sarım Problemi (Bakım Sonrası)

3.8 Doğru Akım Motoru ve Kontrol Problemleri

3.8.1 Normal Spektrum

Birçok Doğru Akım Motoru ve ve kontrol problemleri titreşim analizi ile tespit edilebilir. Tam dalga doğrultucu kullanıldığında DA Motorları 6xhat frekansında (6.SCR =Silicon Controlled Rectifier) ($50 \times 6 = 300 \text{ Hz} = 18000 \text{ CPM}$) sinyal üretirken yarım dalga doğrultulmuş gerilim kullanan DA Motorları $3F_L = 150 \text{ Hz} = 9000 \text{ CPM}$ de sinyal üretirler. Arızasız , normal çalışan DA Motoru Spektrumunda SCR ateşleme frekansında titreşim sinyali görünür, fakat bu küçük genlikte bir sinyaldir. Arızasız bir Doğru Akım motoruna ait spektrum şekil 3.23 te görülmektedir.



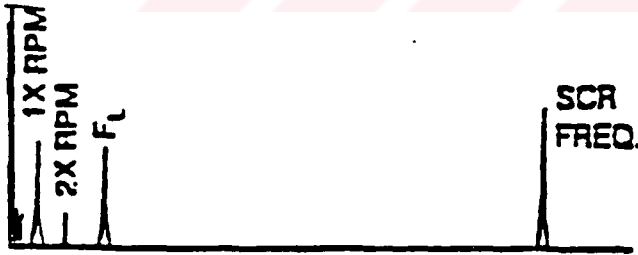
Şekil 3.23 : Normal Spektrum

Normal Spektrumda FL (hat frekansı) nın katlarında genlik görülmemektedir.

3.8.2 Kırık Armatür Sarımları , Topraklama Problemleri , Hatalı Sistem Ayarı

Doğru Akım Spektrumları SCR veya 2xSCR de yüksek seviyeli titreşim gösterirse bu kırık motor sarımları yada elektrik kontrol sisteminin hatalı ayarlandığını belirtir. Eğer kontrol problemleri baskınsa doğru sistem ayarı SCR ve 2xSCR deki titreşimi önemli oranda düşürür.

1x SCR de 0.254 cm/s genlikli tepeler ve 2xSCR ateşleme frekansında 0.1 cm/s genlikli tepeler ve bu değerlerin üzerindeki seviyeler yüksek genlikli titreşim olarak kabul edilir. İlgili resim şekil 3.24 tedir

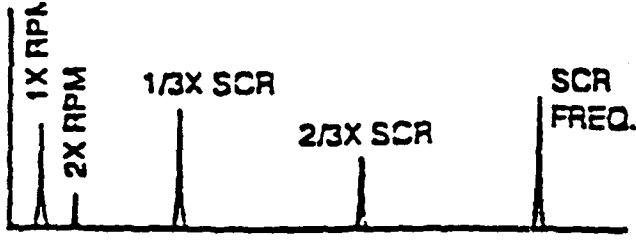


Şekil 3.24 : Kırık armatür sarımları, topraklama problemleri, hatalı sistem ayarı.

3.8.3 Hatalı Ateşleme Kartı veya Yanmış Sigorta

Ateşleme kartlarından bir tanesinin ateşleme görevini yerine getirememesi gücün 1/3 ünün kaybolmasına yol açar. Bu da motorda tekrar eden anlık hız değişimlerine yol açar. 1/3xSCR ve 2/3x SCR frekanslarında titreşim oluşur.

(Yarım dalga doğrultucuda 1/3xSCR= 1xFL ; tam dalga doğrultucuda 2xFL dir. Kart, SCR oranı konfigürasyonu (SCR sayısı , ateşleyici kart sayısı) bir müdahale yapılmadan önce bilinmelidir. Şekil 3.25 bu anlatılanları sembollemektedir.



Şekil 3.25 : Hatalı ateşleme kartı veya yanmış sigorta.

3.8.4 Hatalı SCR , Kısa Devre Olmuş Kontrol Kartı Açık Uçlu Bağlantılar ve/veya Yanmış Sigorta

Hatalı SCR , kısa devre kontrol kartları ve/veya açık uçlu bağlantılar, hat frekansının ve SCR ateşleme frekansının birçok kombinasyonunda göze batır genlikte titreşim üretirler. Şekil 3.26 arıza frekanslarını gösterir

Normalde 6 SCR li motorlarda 1 tane kötü SCR F_L ve/veya $5 F_L$ de yüksek değerli sinyal oluşturur. Şu unutulmamalıdır ki normal bir DA Motor spektrumunda ne F_L , $2F_L$, $4 F_L$ ne de $5F_L$ frekanslarında titreşim görülür.

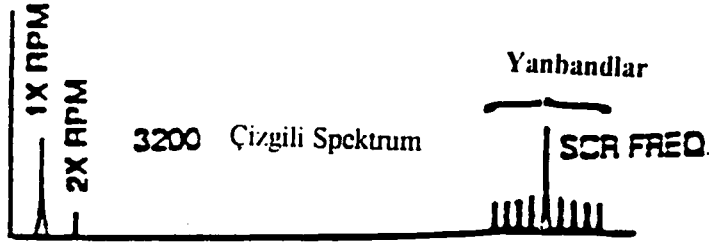


Şekil 3.26 : Hatalı SCR I kısa devre olmuş kontrol kartı , açık uçlu bağlantılar, ve/veya yanmış sigorta.

3.8.5 Hatalı Karşılaştırma Kartı

Hatalı karşılaştırma kartları RPM dönüş hızında dalgalanmalara yol açar. Bu magnetik alanda ani çökmelere ve yeniden oluşumlara neden olur.

Şekil 3.27 de görülen yan bandlar hız dalgalanması olarak değerlendirilir. Bunları teşhis etmek için yüksek çözünürlüklü FFT spektrumu uygulamak gerekir. Bu yan bandların nedeni aynı zamanda magnetik alanın zaman zaman çökmesi de olabilir.



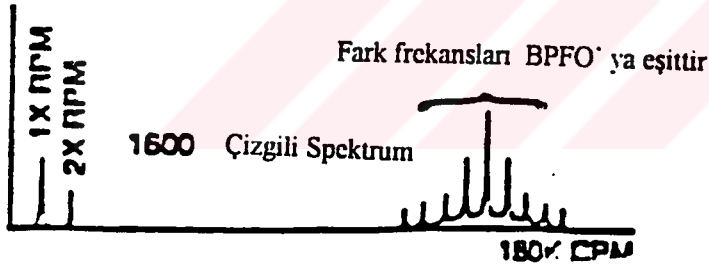
Şekil 3.27 : Hatalı karşılaştırma kartı.

3.8.6 Elektriksel Kaynaklı Doğru Akım Motoru Rulman Problemi

Elektriksel kaynaklı rulman problemi hem iç hem dış bilezikte oluşsa dahi çoğunlukla kendini bir seri dış rulman arıza frekansı (auther race defect frequency) aralıklarıyla yerleşmiş titreşim ile belli eder.

Bu sinyaller 100.000 ile 150.000 CPM aralığında merkezlenirler.

1600 çözünürlük çizgili 180.000 CPM frekans aralıklı spektrum Doğru Akım Motoru rulman problemlerinin teşhisi için tavsiye edilmektedir. Şekil 3.28 böyle bir görüntüdür.[7]



Şekil 3.28 : Elektriksel kaynaklı doğru akım motoru rulman problemi.

3.9 Moment Darbe Problemleri

Elektrik motorları yapıları gereği doğal olarak moment darbelerinden kaynaklanan titreşime sahiptirler. Bu moment darbeleri döner magnetik alan stator kutuplarını enerjilendirdikçe oluşur. Normalde bu titreşim çok düşüktür ve bir problem göstermez. Darbe momentleri hat frekansının 2 katında oluşurlar. Bunun nedeni alternatif akımın her periyodunda her motor kutbunun 2 kez enerjilenmesidir. [8]

Bu titreşim problemi bazı istisna durumlar dışında çok nadir görülür. Bu durumlardan biri de moment darbelerinin 2x hat frekansına yakın bir yerde oluşmuş motorun doğal titreşimini tahrik etmesi olayıdır.

Bir başka özel durum ise bu titreşimin gevşek rotor çubuklarını ve gevşek stator sarımlarını 2x moment darbe frekansı , 3x moment darbe frekansı ve hatta 4x moment darbe frekansında uyarması , zorlamasıdır.

Bir başka deyişle bunlar 6000CPM , 12000CPM , 24000CPM frekanslarıdır.

3.10 Kırık Rotor Çubukları İçin Basit ve Doğruluk Oranı Yüksek İstatiksel Hesap Yöntemi

F_1 = Hat frekansı (Hz)

F_r = Motor frekansı (RPM)

P = Motor kutup sayısı

R = Motor oluk sayısı

$$S = 1 - P.F_r / (120.F_1) \quad (3.6)$$

$$F_2 = F_1 \cdot (1 - 2S) \quad (3.7)$$

A = F_1 deki dB birimli titreşim genliği

B = F_2 deki dB birimli titreşim genliği

$$C = (A - B) / 20 \quad (\text{Mutlak değer}) \quad (3.8)$$

$$N = 4.R / (10^C + P) \quad (3.9)$$

Eğer motor nominal yükünün en az % 90 ında yüklü ise ve $N < 1$ ise büyük bir ihtimalle kırık rotor çubuğu yoktur.

$$F_3 = 5 \cdot F_1 \cdot (1 - 4S) \quad (3.10)$$

$$F_4 = 5 \cdot F_1 \cdot (1 - 6S) \quad (3.11)$$

$$F_5 = 7 \cdot F_1 \cdot (1 - 6S) \quad (3.12)$$

$$F_6 = 7 \cdot F_1 \cdot (1 - 8S) \quad (3.13)$$

Eğer $F_1 - F_3 < 48$ dB ve $F_1 - F_4 < 48$ dB ve eğer $F_1 - F_5 < 65$ dB ve $F_1 - F_6 < 65$ dB ise N tahmin edilen kırık rotor çubuğu sayısıdır. [8]

4. SAYISAL BİLGİ ELDE ETMENİN TEMELLERİ VE SPEKTRAL ANALİZ İÇİN FFT (FAST FOURIER TRANSFORMATION) İŞLEMİ

4.1 Giriş

Bu bölümde FFT 'nin temel özellikleri tanıtılmış , sonlu, örneklenmiş bir kaydın zaman domeninden frekans domenine dönüştürüldüğünde neler olduğu gösterilmiş ve filtrelemeye neden ihtiyaç duyulduğu açıklanmıştır.

Zaman kayıt uzunluğunun ; FFT çizgilerinin frekans domeninde birbirine ne kadar mesafe ile yerleşeceğini belirlediği gösterilirken , örnek sayısında frekans domenindeki çizgi sayısını belirlediği ifade edilmiştir.

Bu bölümde bazı istenmeyen karakteristikler olan aliasing (kayma) , dışarıya taşma , sızma gibi durumların ne olduğu tanıtılmış , bu tür problemlere çözümler olan analog/dijital filtreler ile pencereleme (windowing) yöntemi tanıtılmıştır.

En son olarak yüksek çözünürlüklü ölçüm yapmak için gerekli şartlar bunlarla birlikte zoom ve ortalama alma gibi teknikler açıklanmıştır.

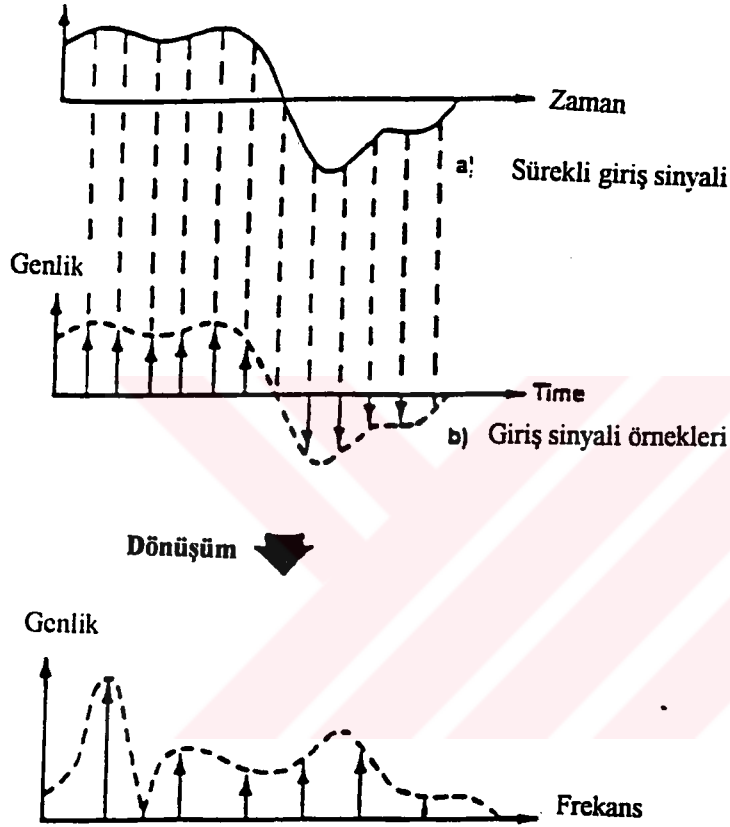
4.2 FFT Özellikleri

FFT, sinyali zaman domeninden frekans domenine çevirmek için kullanılan bir algoritmadır.

Sinyal frekans domenine sürekli , kesintisiz bir yolla çevrilemez. Sinyal önce örneklenmeli ve dijitize edilmelidir. Bu zaman domenindeki örneklerin frekans domenindeki örneklere çevrilmesi anlamına gelir. Şekil 4.1 bu işlemi basitçe ifade eder. Örnekleme nedeni ile her iki domendede tam , kesin bir gösterim elde edilemez. Öte yandan örnekleme birbirine ne kadar yakın ise örneklenmiş gösterim gerçeğine o kadar yakındır. Zaman kaydı ; sonlu sayıda birbirini takip eden , eşit aralıklarla yerleşmiş, giriş sinyal örnekleri olarak tanımlanır. Algoritmayı ve çevrimi çok daha hızlı hale getirdiği için örnek sayısı 2 nin üstleri olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Zaman kaydı bütün bir blok olarak yine bir bütün halindeki frekans çizgilerine çevrilir.

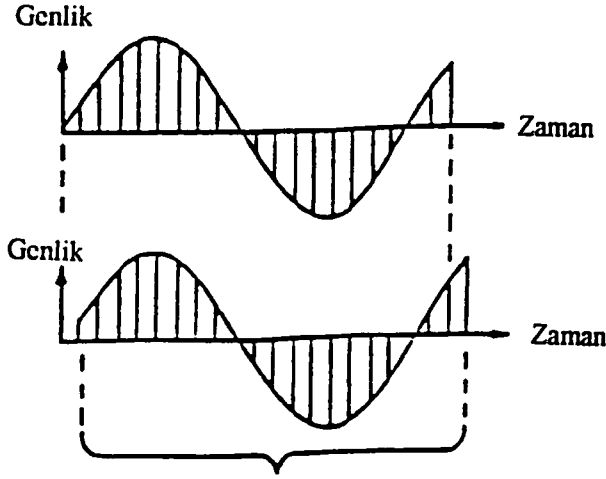
Zaman kaydının tüm örnekleri (giriş sinyallerinin tümü) frekans domenindeki çizgileri hesaplamak için gereklidir. Bu tek bir zaman domeni örneğinin tam bir frekans domeni çizgisine dönüştüğü anlamına gelmez.[9,10]

FFT tüm zaman kaydını bir bütün olarak çevirir , bu yüzden çevrim tam olarak bitene kadar hiçbir geçerli frekans bilgisi elde edilemez. İlk olarak bir zaman kaydı dolduğunda her zaman domeni örneğinde yeni bir zaman kaydı başlayacaktır.



Şekil 4.1: Frekans ve zaman domenlerinden FFT örnekleri

Dikkat edilmesi gereken nokta başlangıç zaman aralığından sonra spektrumda hızlı değişiklikler meydana gelecek olmasıdır. Şekil 4.2 bu durumu anlatmaktadır.



Bir Örnek Sonraki Yeni Zaman Kaydı

Şekil 4.2 : Dolan zaman kaydının ardından her örnekte yeni bir zaman kaydı eklenmektedir.

4.2.1 Spektral Çizgi Sayısı

FFT algoritması kompleks değişkenli bir işlemdir. Yani hem gerçek hem de imajiner sonuçlar üretir ve frekans domeninin bileşenleri hem pozitif hem de negatif frekanslarda ortaya çıkar. Kompleks düzlem 0 ile 2π arasındadır. Negatif vektör kompleks düzlemin alt kısmında yer almaktadır. Yani negatif frekans π ile 2π arasında yer almaktadır. (Dönen bir motor milinin her dönüşünde 2π radyan olduğu hatırlanmalıdır.)

Gerçek değerli sinyaller söz konusu olduğunda bunların pozitif bileşenlerinin negatif bileşenlerin simetriği olduğu görülür. Bu nedenle pratikte FFT gerçek değerli sinyalin grafiği oluşturulurken fazlalık olan negatif bileşen gösterilmez. FFT algoritmasından dönen bilginin sadece yarısı gösterildiği için değerler ekrana yansımada önce 2 ile çarpılır. (DA. Bileşeni haricinde; bu bileşen gerçek ekseninde 0 frekansındadır.)

Özetle frekans domenindeki bileşenlerden her biri kompleks değerlidir. Yani her biri hem genliğe hem de faza sahiptir.

FFT zaman domenindeki sonlu sayıdaki eşit aralıklı örnekleri frekans domenine eskisinin yarısı kadar çizgi sayısına sahip olarak çevirir. (Denklemler 4.1) Bunun nedeni her frekans çizgisinin gerçekte iki parça bilgi taşımasıdır. Bunlar genlik ve fazdır. 400 çizgili bir spektrum elde etmek için 800 bilgi noktalı gerçek değerli sinyale gerek vardır. [9]

Bununla beraber aliasing' i önleyici filtrenin etkisini kompanze etmek için bazı yüksek frekanslı bilgiler işleme tabi tutulmaz. Bu nedenle gerçekte 400 çizgili bir dönüşüm için 1024 bilgi noktası / 800 çizgili bir dönüşüm için ise 2028 bilgi noktasına ihtiyaç vardır.

4.2.2 FFT Çözünürlük Çizgi Aralığı

Çözümenebilecek en düşük frekans zaman kaydının uzunluğuna bağlıdır. Eğer giriş sinyalinin peryodu (T) zaman kaydından uzun ise peryodu belirlemenin hiçbir yolu yoktur. Bu nedenle FFT'nin en küçük frekans çizgisi zaman kayıt uzunluğuna karşılık düşen bir frekansta görünmelidir. Bunlara ek olarak 0Hz -DA da bir frekans çizgisi vardır. Bu giriş sinyalinin zaman kaydı üzerine ortalamasıdır. Pratik olarak hiçbir değeri olmamasına rağmen iki çizgi arasındaki aralığın (boşluğun) belirlenmesine yardım eder. Aslında her FFT çizgisi zaman kaydının bir karşılığıdır. Bu nedenle tüm spektral görüntü birçok birbirinden bağımsız dikey çizgilerin frekans eksenini boyunca birbirine komşu olarak yan yana dizilmesiyle oluşur. Bu dikey çizgilerden sadece genlik bilgisine sahip olanlar bir FFT tepesi oluşturacaktır. [9]

4.2.3 FFT Frekans Aralığı

Ölçülebilen en yüksek frekans =Fmax

$$F_{max} = \frac{\text{Örnek Boyu}}{2} \times \frac{1}{\text{Zaman Kayıt Peryodu}} \quad (4.1)$$

Bu frekans aralığının kullanılabilirliği kayma (aliasing) ismi verilen bir problem nedeniyle bazen sınırlanabilir.

Zaman örneklerinin sayısı (örnek boyu) FFT algoritmasının uygulanması ile sabitlenir. Bu nedenle zaman kaydının peryodu (saniye/devir) Fmax ' ı ayarlamak üzere değiştirilmelidir. Bunu gerçekleştirmek için örnekleme zamanı değiştirilmelidir , böylece her zaman değişken bir zaman kaydı peryodunda sabit sayıda zaman örnekleri bulunacaktır. Yüksek frekansları da içermek için zaman kayıt peryodu daha kısa olmalıdır , böylece çok yüksek örnekleme hızı elde edilmiş olur [9,10].

4.3 Örnekleme ve Dijitize Etme

Giriş sinyalinin accelerometer (ivme probu) dan gelen ve ivme ile doğru orantılı olan sürekli analog bir gerilim olduğu hatırlanmalıdır. Oysa FFT dijital hesaplamaları yapmak için dijital girişlere ihtiyaç duyar. Bu nedenle bir Analog Dijital çevirici ve bir örnekleyicinin FFT işlemcisine eklenmesi gerekir. Ancak bu şekilde bir spektrum analizörü elde edilebilir.

Analiz cihazının yüksek doğruluklu olması için A/D çeviricinin ve örnekleyicinin oldukça gelişmiş olması gerekir. A/D çevirici yüksek çözünürlüklü ve doğrusal olmalıdır. 70dB lik dinamik bir aralık için A/D çevirici en az 12 bitlik çözünürlüğe sahip olmalıdır. (12 bitlik A/D cihazı görüntüde 2^{12} tane eşit aralıklı örneğe veya aralığa sahiptir.)

Tipik olarak A/D çevirici 1 saniyede 100.000 okuma elde edecek yeteneğe sahiptir.[9]

4.4 Kayma (Aliasing)

FFT spektrum analiz cihazının bir saniye içinde bu denli çok örneğe ihtiyaç duymasının sebebi kayma problemini önlemektir. Bununla birlikte aliasing her zaman kötü bir durum değildir. Aliasing elektronikte mixing, karışma veya heterodyning olarak geçer ve el radyolarının , TV lerin tune (istasyon) ayarını yapmak için yaygın olarak kullanılır. [9,10]

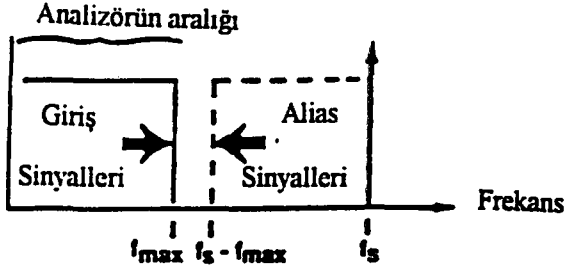
4.4.1 Frekans Domeninde Aliasing

Zaman domeninde iken giriş frekansının iki katı büyüklükte örnekleme frekansı seçmenin her zaman yeterli olmadığı açıkça görülmektedir. Öte yandan eğer örneklememizi en yüksek giriş frekansının 2 katından daha büyük bir hızla yaparsak alias ürünleri ilgilendiğimiz frekans dilimine düşmeyecektir. Bu nedenle örnekleyicinin ardına bir filtre (yada filtre gibi davranan bir FFT işlemcisi) yerleştirilir. Bu filtre alias ürünlerini ortadan kaldıracak , ama istenen giriş sinyallerinin geçmesine izin verilecektir. Şekil 4.3 örnekleme frekansının seçimini göstermektedir.

Eğer örnekleme hızı düşük ise alias ürünleri giriş frekans dilimleri içinde belirecek ve bu da kurgusal , gerçek olmayan frekanslar üretecektir. Böylelikle hiçbir filtreleme bu bozuklukları sinyalden uzaklaştırma gücüne sahip olmayacaktır.

Eğer iki sinyalin frekans farkı ilgilenilen frekans diliminin içine düşüyorsa ,bu iki

sinyalin alias olduğu söylenir. Bu fark frekansı örnekleme işlemi sırasında her zaman üretilir. [9,10]



Şekil 4.3: Kayma (aliasing) dan kurtulmanın frekans domenindeki gösterimi.

4.4.2 Anti Aliasing Filtrenin Gerekliği

Giriş frekans aralığının sınırlandırılmış olmasından emin olmanın tek yolu örnekleyci ve A/D çeviriciden önce bir alçak geçirgen filtre (low pass filter) koymaktır. Bu tür filtreler anti – alias filtre olarak adlandırılır. Filtrenin kademeli alanı geçiş alanı olarak bilinir. Giriş sinyalleri bu geçiş bandında yeterli düzeyde inceltiemez , bunlar hala kaymaya neden olabilirler. Bunu önlemek için örnekleme frekansı , geçiş bandının en yüksek iki katına çıkarılır. Tipik olarak bu artık örnekleme hızının maksimum giriş frekansının yaklaşık 2.5 ile 4 katı düzeyinde olduğunu gösterir.

4.4.3 Birden Fazla Sayıda anti Alias Filtre Gerekliği

Frekans açıklığını düşürmek için örnek hızı ve anti alias filtre frekansı aynı oranda düşürülmelidir. Geniş bir aralıktaki frekansları kaplamak amacıyla her kanal için bu ayar ile birçok anti alias filtreye ihtiyaç vardır. Ne yazıkki bu filtreler , özellikle düşük frekans filtreleri çok pahalıdır. Aynı zamanda A/D çeviricinin örnek hızının değiştiği her zaman değişik bir filtre daha kullanılmalıdır. Bunlar analog filtrelerdir.

4.4.4 Sayısal Filtreleme (Digital Filtering)

Dijital bir filtre, giriş sinyalini sinyal örneklendikten ve dijitize edildikten sonra filtreler. A/D örnek hızı en yüksek frekans aralığını elde edecek şekilde ayarlanır. Her seferinde değişik bir anti alias filtreye geçmektense , tek br analog anti aillas filtre kullanılır. Daha sonra dijital bir filtre A/D çeviricinin ardına eklenir. Bu sinyalin dijital gösterimini istenilen frekans aralığına getirmekle kalmaz , aynı zamanda örnek hızını da frekans genişliğinin istenilen hızına düşürür.

4.4.5 $t_{\max}$ ve $F_{\max}$ Bağıntıları

Nyquist örnekleme teoremine göre örnekleme örneklenen sinyaldeki hiçbir bilginin kaybedilmemesi için giriş sinyalindeki en yüksek frekansın en az iki katı frekanslı bir hızda yapılmalıdır. Nyquist teoremini ıspatlamak için $F_{\max}$ ın iki katından biraz büyük bir örnekleme hızı seçilsin. (Tipik olarak $2.56 \times F_{\max}$)

Aşağıdaki çevrim formülleri $F_{\max}$ bilindiği takdirde bilgiyi elde etmek için gerekli zamanı hesaplamaya yarar. Aynı şekilde $t_{\max}$ biliniyorsa buradan $F_{\max}$ hesaplanır.

$$t_{\max} = \frac{60.(\text{FFT çizgi sayısı})}{\text{Frekans Aralığı}} = \frac{60.(\text{Örnek boyu})}{2.56. \text{Frekans Aralığı}} \quad (4.2)$$

$t_{\max}$ = Genliğin hangi aralıklarla ölçüldüğü ve saklandığını ifade eden Toplam Örnekleme Peryodu.(s)

Örnek boyu (Sample Size) = Zaman dalgaşeklini oluşturmak için kullanılan A/D çevrimlerin sayısı. (Genellikle 400 çizgili FFT için 1024 örnek kullanılır)

Frekans Aralığı (Frequency Span) = $F_{\min}$ den $F_{\max}$ 'a olan CPM birimli frekans aralığıdır. Çoğunlukla $0 - F_{\max}$ dır.

$$F_{\max} = \frac{60.(\text{FFT çizgi sayısı})}{t_{\max}} = \frac{60.(\text{Örnek boyu})}{2.56. t_{\max}} \quad (4.3)$$

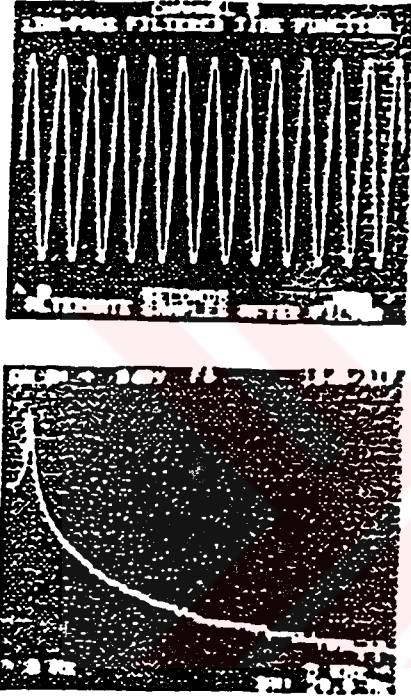
Eğer bu şart bozulursa (anti aliasing filtre kullanmayarak) örneklenmiş dalga formunda daha yüksek frekanslar daha alçak frekanslar olarak görünecektir. Bu görüntü yanılmasının bir örneği eski kovboy filmlerinde at arabası hızla ilerlerken tekerleğinin geri dönüyormuş gibi görüldüğü sahnedir. Bunun nedeni film hızı yani örnekleme zamanının arabanın hızına kıyasla çok yavaş olmasıdır.

Titreşim analizi yapan kişi aynı etkiyi sabit hızla dönen bir cisim üzerinde sürekli yanıp sönen bir flaş ışığının frekansını değiştirdiğinde görecektir . [9]

4.5 Pencereleme (Windowing) ve Pencerelemenin Gerekliği

Zaman kaydındaki bir sinüs dalgası eğer peryodikse pencereleme kullanıldığında bunun frekans domenindeki karşılığı tek bir FFT çizgisi olacaktır. Öte yandan zaman kaydındaki sinüs dalgası peryodik değilse , bunun gücü frekans spektrumu boyunca yayılacaktır. Bu şekilde enerjinin frekans spektrumu boyunca yayılıp gitmesine leakage (sızıntı) denir. Sızıntının oluşumu şekil 4.4 te görölmektedir.

Enerji FFT nin bir çözünürlük çizgisinden diğer çizgilerine doğru taşar.



Şekil 4.4 : Zaman kaydındaki sinüs dalgaları peryodik olmadığında sızıntı oluşur ve spektrumun geri kalanını etkiler.

Spektrumdan da açıda göröldüğü gibi sızıntı problemi sinüs dalgalarına yakın olan tüm sinyalleri maskeleyebilir. Bu problemin çözümü pencereleme (windowing) olarak bilinir.

Dikkat edilirse problemlerin büyük bir kısmının zaman kaydının uçlarında ortaya çıktığı görölmektedir . Otra kısım ise iyi bir sinüs dalgasıdır.

Eğer FFT nin bitiş noktalarını dikkate almayıp kaydın ortası üzerine yoğunlaşması sağlanırsa frekans domnindeki spektrum tek bir tepecik üretmeye daha yakındır.

Pencereleme bu görevi yerine getirir. Örnekleme peryodunun başındaki ve sonundaki örneklenmiş bilgiyi sıfır olmaya zorlar , böylece sızıntıyı minimuma indirir. [9,10]

4.5.1 Pencereleme İşlemi Windowing Process

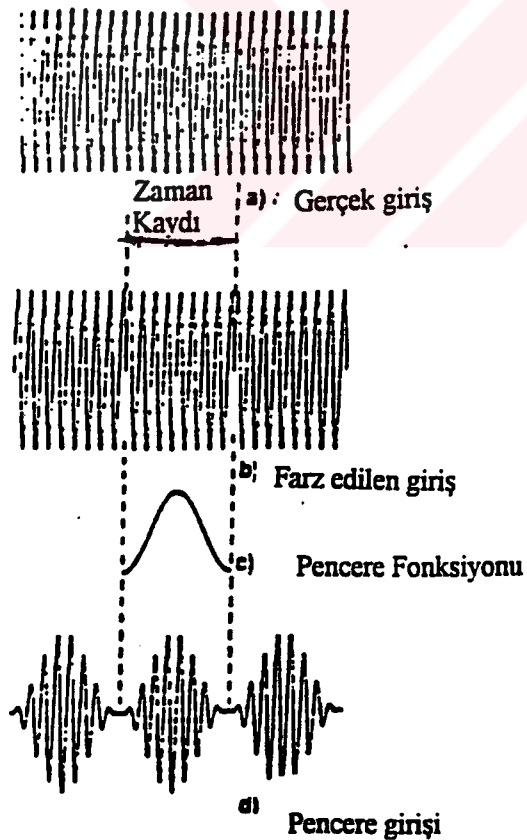
Eğer zaman kaydı başlangıç ve bitiminde sıfır olan ve orta kısımda büyük bir değere sahip bir fonksiyon ile çarpılırsa FFT zaman kaydının orta kısmı üzerinde yoğunlaşmış olur. Bu tür bir fonksiyon Şekil 4.5 (c) de gösterilmiştir. Bu tür fonksiyonlar pencere fonksiyonu olarak isimlendirilir , çünkü bunlar bizi bilgiyi dar bir aralıktan gözlemeye zorlarlar.

Şekil 4.5 (b) zaman kaydındaki sürekliliği göstermektedir.

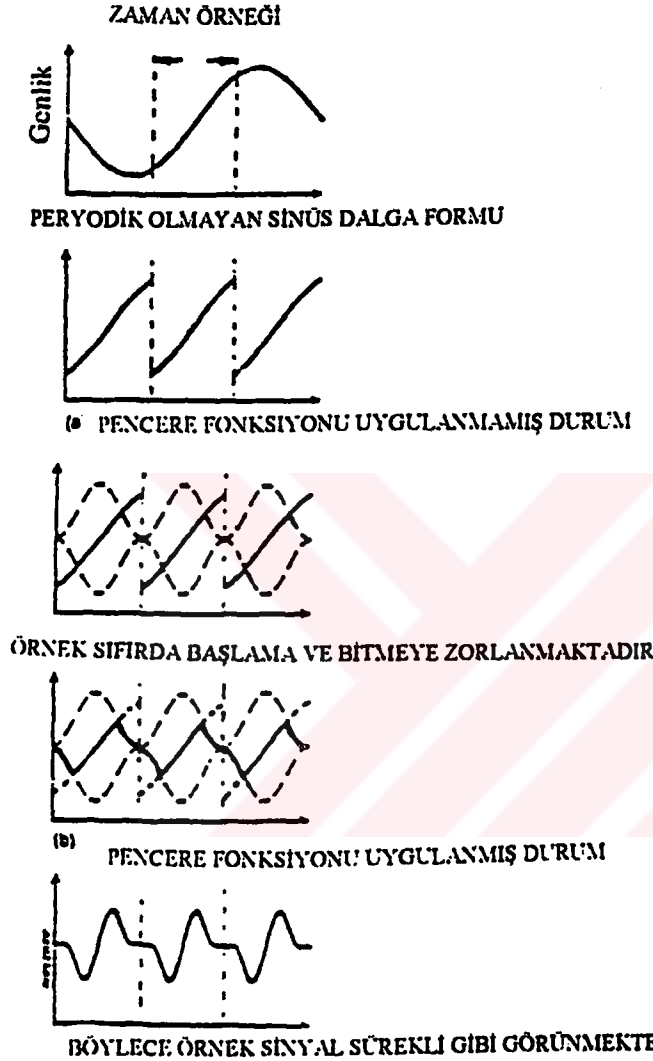
Hanning window uygulayarak Şekil 4.5 (c) den de görüldüğü gibi süreksizlik durdurulur. Böylece örnek sinyal tıpkı Şekil 4.5 (d) de olduğu gibi sürekli imiş gibi görünür. Çünkü örneklenmiş bilgi başlangıçta ve bitişte sıfır olmaya zorlanmıştır.

Şekil 4.6 zaman kaydında peryodik olmayan bir çevrimlik dalga şeklinin basitleştirilmiş gösterimidir.

Şekil 4.6 (b) de hanning penceresi uygulanmış ve peryodik olmayan dalga şekli peryodik gibi görünmeye zorlanmıştır.



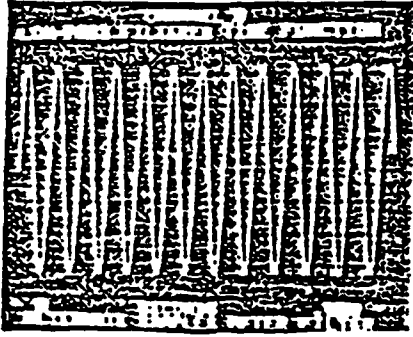
Şekil 4.5 : Zaman Domeninde Pencerelemenin etkisi



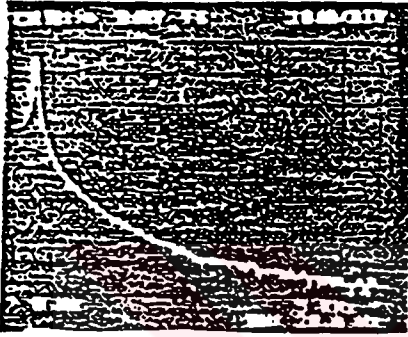
Şekil 4.6 : Pencerelemenin peryodik olmayan bir dalga şeklini nasıl peryodik gibi görünmeye zorladığının basitleştirilmiş gösterimi.

Öte yandan giriş sinyali sıkıştırıldığı için mükemmel sonuçlar beklenmemelidir. FFT girişin şekil 4.5 (d) deki gibi (Genlik modüleli sinüs dalgası benzeri bir eğri) olduğunu kabul eder. Bu tek çizgi tepecikli bir frekans spektrumu üretmeye şekil 4.5(b) deki dalga şekline kıyasla çok daha yakındır , fakat spektrum hala % 100 doğru değildir. Şekil 4.7 pencereleme işleminin zaman kaydında peryodik olmayan bir dalga şeklinde meydana getirdiği büyük ilerlemeyi gösterecek şekilde bu spektrum spektral bileşenler (sidebands) yani yan bandlar açısından hala hatalar içermektedir. Çünkü muhtemelen var olan yan bandların hiçbiri spektrumda görünmemektedir. Şekil 4.8 pencerelemiş

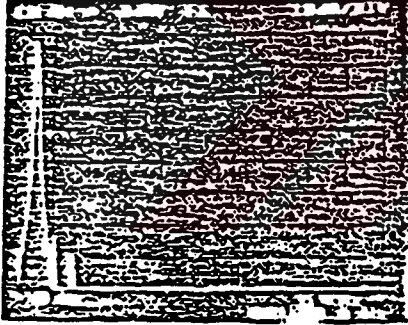
bilginin zaman kaydında peryodik olan pencerenememiş fonksiyon kadar dar bir spektruma sahip olmadığını göstermektedir.



a) Zaman kaydında peryodik olmayan sinüs dalgası

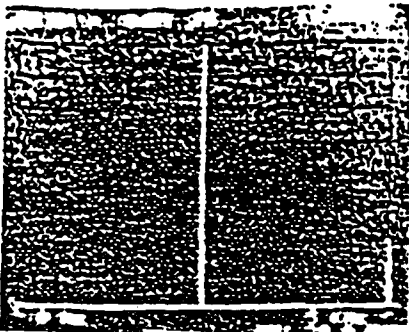


b) FFT Pencere fonksiyonsuz neticelenir.

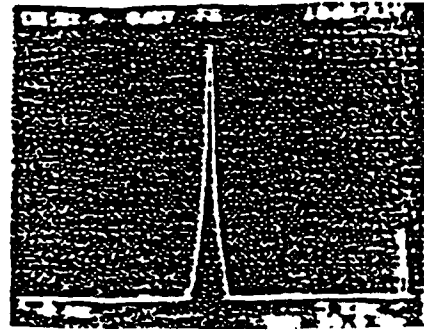


c) FFT Pencere Fonksiyonlu neticelenir.

Şekil 4.7: Pencereleme (windowing) işlemi ile sızıntının (leakage) azaltılması.



a) Sızmasız ölçüm Zaman kaydında giriş peryodiktir



b) Pencereli ölçüm Giriş zaman kaydında peryodik değildi

Şekil 4.8 : Pencereleme sızıntıyı azaltmakta , fakat tamamen yok edememektedir.

4.5.2 Hanning Pencere

Titreşim analizinde en yaygın kullanılan pencere hanning penceresidir. Şekil 4.6 da kullanılan pencereleme işlemi bir hanning pencere ile gerçekleştirilmiştir. Bu pencere gerek periyodik gerekse periyodik olmayan sinüs dalgalarıyla ilgili gerekli pencereleme görevlerini yerine getirir. Buna rağmen hanning pencere ile birlikte zaman kaydında periyodik olmayan sinyallerde hala birtakım sızıntı olacaktır.

Hatırlanacağı gibi FFT paralel filtrelerden oluşan bir küme gibi davranır. Şekil 4.9 hanning pencere kullanıldığında bu filtrelerin aldığı şekli gösterir. Hanning pencere filtreli spektrumun tepesine daha yuvarlak bir şekil verir. Eğer giriş sinyalinin bir bileşeni filtrede merkezlenirse genliği hatasız olarak ölçülecektir. Gerçekten de bu zaman kaydında periyodik olacaktır. Öte yandan bileşen filtrenin ortasına düştüğünde filtre şekli bileşeni 1.5 dB'e (-%16) ayarlayacaktır. Canlandırma yapmak için aşağıdaki örnek incelenebilir. [9,10]

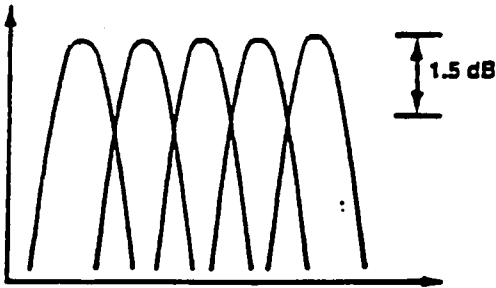
Asenkron Motor Hızı : 1785 RPM , $F_{max} = 12000$ CPN

FFT Çizgi Sayısı : 400 çizgi (Hanning Pencere)

Frekans çözünürlüğü : 30 CPM/çizgi. (1785 RPM lik hız 1770 ile 1800 arasına düşecektir. Bu da titreşim genliğinin gerçekte olduğundan % 16 düşük ölçüleceği anlamına gelir.)

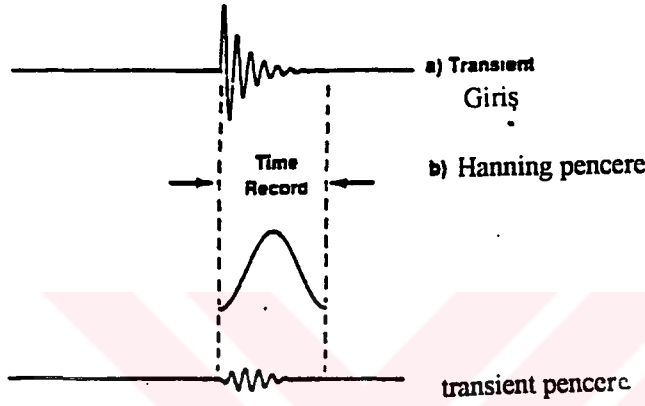
Eğer $F_{max} = 6000$ CPM ise 1785 RPM aralığın tam ortasına düşer bu da genlik okunumunda hiç hata olmadığı yani eksiksiz okunduğu anlamına gelir.

Hanning pencere kullanıldığında da titreşim genliği her zaman gerçek değerin +% 0 ile - %16 sı arasına okunur.

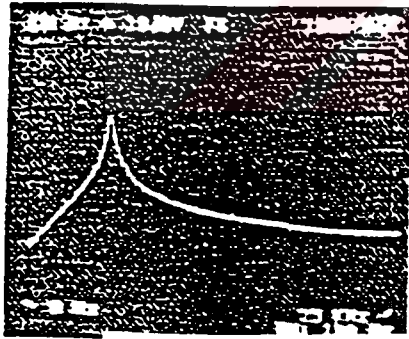


Şekil 4.9 : Hanning Pencere Geçişbandı şekilleri.

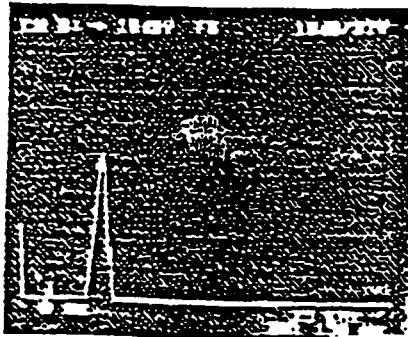
Yani hanning pencere daha geniş bir frekans çözümlemesi yaparken hatasız genlik ölçümünden fedakarlık etmeyi gerektirir. Bu nedenle hanning pencere tıpkı Şekil 4.10 daki darbe testinde olduğu gibi geçici olaylarda (transient events) bilgi kaybına neden olacaktır. Eğer geçici giriş sinyali Şekil 4.10 (b) de ki hanning pencere ile çarpılırsa , bu Şekil 4.10 (c) de olduğu gibi oldukça bozulmuş bir sinyal üretir. Gerçek geçici (transient) sinyalin Hanning pencereli ve hanning penceresiz frekans spektrumu Şekil 4.11 de gösterilmiştir. Hanning pencere frekans bandı boyunca enerji yayan geçici giriş sinyalini almış ve tek tepeli görünüm kazandırmıştır.



Şekil 4.10 : Hanning pencere geçici (transient) olaylarda bilgi kaybeder.



a) Pencelenmemiş transient sinyal



b) Hanning pencereli transient sinyal

Şekil 4.11: Geçici olayların hanning pencereli ve penceresiz spektrumları.

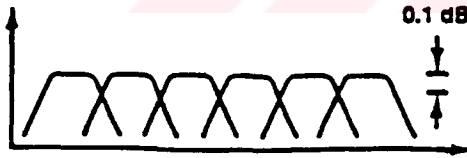
4.5.3 Penceresiz Durum (Uniform Window)

Geçici titreşim olaylarında hanning pencere pek işe yaramadığı için üniform pencere kullanılabilir , çünkü tüm kayıt boyunca üniform olarak kalır. Bir geçici titreşim durumunda analiz cihazı ayarlanabilir ve giriş sinyalini pencerelemeye hiç gerek kalmaz , çünkü geçici durum tüm kayıt boyunca varlığını sürdürmektedir. Bu öz pencereleme (self windowing) fonksiyonu olarak isimlendirilir. FFT de sızıntıya neden olunmadığı için pencerelemeye gerek yoktur.

Üniform pencereler doğal darbe frekans testleri için çok kullanışlıdır. Öte yandan peryodik olmayan bir sinüs dalgası üzerinde kullanılırsa o zaman spektrumdaki sızıntı ve enerji dağılımları önlenemez, ek olarak üniform pencere için genlik değişimi % 36 ya kadar ulaşabilir. [9]

4.5.4 Yassı Tepeli Pencere (Flattop Window)

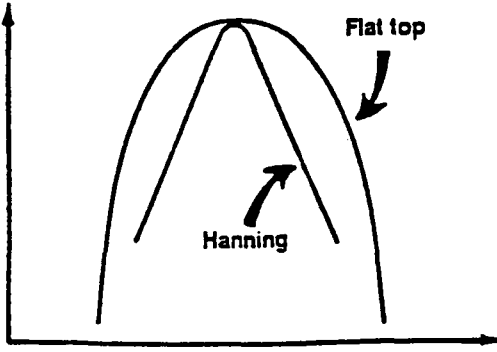
Hatırlanacağı gibi hanning fonksiyonu filtre çıkışına yuvarlatılmış bir üst kısım vermekte idi. Bu karakteristik frekans tepeciklerini ayırt etmede oldukça kullanışlı olsa da sinyalin genliğinin çok hassas olarak ölçülmesi gereken durumlarda yanlış bir seçimdir. Çözüm ise filtreye yassı geçiş bandı verecek pencere fonksiyonunu sağlamaktır. Yassı tepeli geçiş bandı görünüşleri şekil 4.12 dedir



Şekil 4.12 : Yassı tepeli geçişbandı şekilleri.

Bu pencere fonksiyonundaki genlik hatası % 1 değerini geçmez. Tabii dir ki bu yüksek doğruluk oranlı genlik ölçümü daha fazla paraya mal olmaktadır.

Şekil 4.13 geçişbandının tepesinin filtre eteklerinin genişletilmesiyle yassılaştırılmış halini göstermektedir. Bu nedenle büyük genliklere yakın olan küçük genlikli bileşenlerin teşhisi zordur.[9]



Şekil 4.13: Hanning ve yassı tepeli (flattop)pencerelerin karşılaştırılması .Yassı tepeli pencerede frekans çözümleme yeteneği azalmaktadır.

Bu anlatılanların dışında birçok değişik pencere fonksiyonları da mevcuttur , ama açıklananlar en yaygın kullanılanlardır.

Özet olarak yassı tepeli pencere en hatasız genlik ölçümünü mümkün kılar , Kaiser Bessel penceresi en iyi frekans ayrımını ve hanning pencere ise bu ikisi arasındaki en iyi uzlaşmayı sağlar.

4.6 Ortalama Alma (Averaging)

İstatistikte bir değere ait tahminleri geliştirmek için uygulanan standart teknik ortalama almaktır. Konumuzla ilgili iki çeşit ortalama vardır. Bunlar RMS (yada güç ortalaması) doğrusal ve senkronize zaman ortalamaları olarak adlandırılırlar.

4.6.1 Güç Ortalaması (RMS or Power Averaging)

RMS ortalamsı genlik ortalaması olarak düşünülebilir. Güç spektrumunda ki her frekansa ait bileşen Fourier Dönüşümünde ki ilgili bileşenin karesiyle orantılıdır. FFT deki titreşim genliğini daha vurgulu hale getirmek için analiz cihazı ilk olarak güç spektrumunu hesaplayacak daha sonra her bileşenin kare kökünü alacaktır.

İki pratik sonuca dikkat edilmelidir:

Güç spektrumu Fourier Dönüşümünden daha az zaman gerektirir. Çünkü karekök hesaplamaları yapılmamıştır. Yüksek ve düşük genlikler arasında bulunan tüm farklar vurgulanmıştır , çünkü tüm değerlerin karesi alınmıştır.

Doğal olarak güç spektrumu hiçbir fazbilgisi sağlamaz , sadece genlikler arasındaki farkı verir. Bizim ise bulmaya çalıştığımız sinyalin genlik ortalamasını (yada RMS) bulmaktır.

Bu ortalama tekniği herhangi bir cihazın filtresindeki ortalama gücün belirlenmesi için çok değerlidir. Alınan daha çok ortalama daha iyi güç seviyesi tahmini yapılmasını sağlayacak , böylece daha hatasız sonuçlar elde edilecektir.

Eğer var olan bir gürültü ortamı içinde küçük bir sinyal lldyse sinyal/gürültü oranı RMS ortalaması ile iyileştirilemez. RMS ortalama gürültüyü filtreleyemez , gürültüyü içinde tutar. Bu nedenle RMS ortalama ile toplam gteki doğruluk oranı artar iken sinyal/gürültü oranında bir iyileşme sağlanamaz. RMS ortalama spektral genlik bileşenleri çok büyük oranlarda değişiklik gösteriyorsa kullanılmalıdır. Başarılı bir FFT' nin RMS ortalamasının alınması titreşim genliğinin efektif değerinin daha doğru tahmin edildiği anlamına gelir. RMS ortalama değişken genlikleri RMS değerini yakınlarında toplar. [9,11,12]

4.6.2 Doğrusal Ortalama ve Senkronize Zaman Ortalaması

Doğrusal ve senkronize zaman ortalaması arasındaki en büyük fark senkronize zaman ortalaması için bir tetikleme cihazına ihtiyaç duyulmasıdır. Doğrusal ortalama için ise tetikleme cihazına gerek yoktur. Tetikleme cihazı senkronizasyon sinyalini üretmek için kullanılır ; en yaygın kullanılanları fotosel (photocell) ve pickup tır.

G (RMS) ortalamasının tersine doğrusal ortalama sinyal/gürültü oranını iyileştirir. Birçok durumda temel ve geçiş frekans genlikleri sabittir , fakat birçok rasgele genlik ve frekans bunlara eşlik eder.

Genliklerin küçük olduğu durumlarda dahi göze çarpan frekanslardaki genlik sabit kalırken rastgele frekanslarda oluşan sinyal genlikleri sıfır ile bazı tepe değerleri arasında salınım yapmaktadır.

Sonuç olarak rasgele sinyallerin ortalama genlikleri tepe değerlerinden oldukça küçük olacaktır. Her iki durumda da kararlı (sabit kalan) genlikler alınan ortalama sayısından bağımsız olarak aynı değerde bulunacaktır. Öte yandan (random or transient) rasgele yada geçici genlikler alınan ortalama sayısı arttıkça sıfıra yaklaşacaktır. şekil 4.14 gürültü ile dopdolu bir zaman kaydını göstermektedir. Bu örnekten 128 ortalama alındıktan sonra sonuçta oluşan zaman kaydı ve frekans spektrumu sinyal/gürültü oranında farkedilir bir iyileşme göstermektedir.

Doğrusal ortalama arıza trendi için tekrar edici bilgiyi toplamada kullanışlı bir metoddur. [9,11,12]

Program yazılımlarında genellikle 4 , 8 veya 16 ortalama beklenir. Yani 16 örneğin ortalaması alınmak istendiyse bilgi 16 kez örneklenmek üzere işlenir. Her seferinde mevcut bilgilerin 1/16 sı gösterilir. 16. örnek tamamlandıktan sonra hafızada saklı tutulan ortalaması alınmış spektrum görüntülenir.

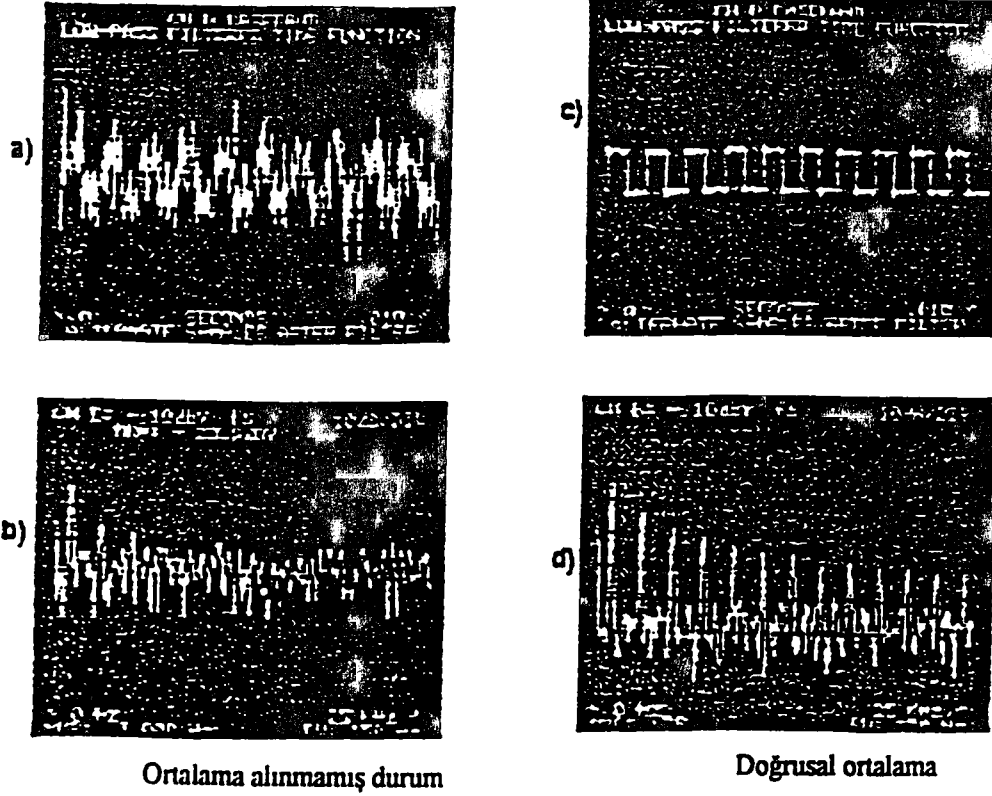
Her ölçüm noktasından hissedilen titreşim tüm çevreden gelen toplam titreşimdir. Bundan dolayı doğrusal ortalamanın en büyük eksiği kaynağı ölçüm noktası olan titreşim ile ölçüm noktasından alınan , fakat kaynakları başka noktalarda olabilen titreşimleri birbirinden ayırt edememesidir. Öte yandan senkronize zaman ortalaması ise makinanın yada motorun ilgilenilen parçasından kaynaklanan titreşimi çevredeki diğer makinalardan gelen , veya herhangi bir senkronize olmayan kaynaktan gelen titreşimden ayırır. Bu durumda zaman kaydının başlamasını tetiklemek için senkronizasyon sinyali kullanılır. Bu yolla titreşim örneği milin her dönüşüyle birlikte düzenli olarak alınır. Bu nedenle tetiğin kilitlendiği giriş sinyalinin periyodik kısmı alınan her kayıta tamamen aynı olacaktır. Eğer alınan bu bir seri tetiklenmiş zaman kaydı birbirine eklenip toplam kayıt sayısı olan N'e bölünürse , senkronize zaman ortalaması hesaplanmış olur.

Senkronize zaman ortalaması ile tetik (fotosel , strobe , laser tech) tarafından hedeflenen makina yada milden gelen titreşimler vurgulu , belirgin hale getirilir. Senkronie olmayan frekanslar görüntülenmezler , çünkü bunlar senkronizasyon sinyali olan 1xRPM in tamsayı katları değildir. Bu nedenle eğer çok sayıda ortalama alınacaksa rulman arıza frekansları , elektriksel hat frekansı ve katları tıpkı diğer harmonikli, bozulmuş sinyaller gibi sıfır olmaya zorlanacaktır.

Bu metod aynı hızla dönen birçok komponente sahip , örneğin fanlar , kağıt makinesi rulmanları , dişliler , dişli kutusundaki miller gibi makinalarda titreşim analizi yapmak için çok uygundur. [9,11,12]

Her iki sonuç frekans domenine çevrildikten sonra dönüş hızı ve harmonikleri net olarak görülebilir ve azaltılmış gürültü tabanı nedeniyle hatasız olarak ölçülebilir.

(Sinyal/gürültü oranı iyileştirilmiştir.)



Şekil 4.14 : Doğrusal ortalama gürültü tabanını düşürmekte ve harmoniklerin daha belirgin görünmesini sağlamaktadır.

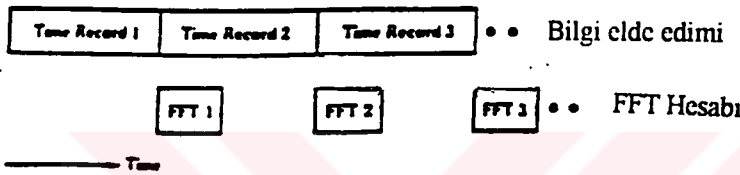
4.7 Üst Üste Kayıt İşlemi Overlap Processing

Zaman kaydının sabit olmadığı ve analiz cihazının frekans aralığını ayarlamak üzere sürekli değiştiği hatırlanacaktır. Geniş frekans aralıkları için zaman kaydı kısadır. Yani önce fizik kanunlarına göre ilk zaman kaydını elde etmek belirli bir zaman alacaktır. Bu işlemde analiz cihazının markası , yada 32 bitlik DSP (chip) çipi ile yüklü olup olmadığı önemli değildir. Bu ilk blok için gerekli olan zaman 4.2 nolu denklemde belirtilmiştir.

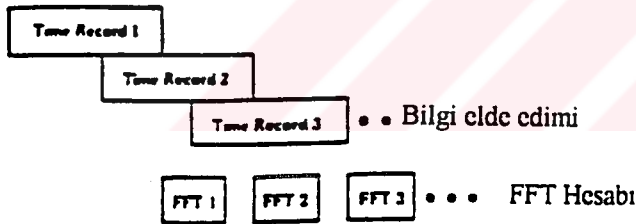
Zaman kaydı elde edildikten sonra FFT'nin hesaplanması için yine belli bir zaman gerekecektir. İşte işin bu noktasında yüksek hızlı bir mikroprosesörün etkisi vardır. Bu gerçek göz ardı edilemez. Düşük frekanslı analiz yapılması gerektiğinden bu özellikle önem kazanır. [9]

Bu tür bir durumda zaman kaydının elde edilmesi FFT' nin hesaplanmasına kıyasla çok daha uzun zaman alır. Böylece FFT prosesorü zamanın büyük bir bölümünde görev yapmadan bekler. Bu şekil 4.15 de zaman kaydı ve FFT' nin blok şema halinde tanımlanmasıyla gösterilmiştir. Eğer tamamen yeni bir kayıt için beklemek yerine yeni kayıt eski bilgilerin bir takımı ile üst üste bindirilirse yeni spektrum FFT'nin hesaplanma sıklığında elde edilebilir.

Bu şekil 4.16 da gösterildiği gibi bir üst üste kayıt prensibidir. Dikkat edilirse her zaman kaydının sonunda FFT elde edilmektedir. Her yeni FFT arasındaki zaman (boşluk) prosesorün FFT'yi görüntülemek için ihtiyaç duyduğu zamanı gösterir.



Şekil 4.15 : Tamamıyla yeni bilgi (zaman kaydı) üzerinde gerçekleştirilen üst üste kayıt yapılmamış işlem (process) .



Şekil 4.16 : Üst üste kayıt işlemi eski ve yeni zaman kaydını birleştiren bilgi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Özde , tam uzunluklu zaman kaydı öncelikle elde edilmiştir. Daha sonra yeni zaman kayıtlarının bazı parçaları depo edilmiş ve eski bilginin bazı parçaları üzerine eklenmiştir. % 50 lik üst üste binme ile eski bilginin yarısı ile yeni bilginin yarısı üst üste binmiştir , ve yeni bilginin sadece yarısı içeri alındığından bu FFT işlem zamanının yarıya inmesi anlamına gelir. Öte yandan eğer % 75 lik bir üst üste binme istenirse o zaman FFT' nin hesap süresi normalin $\frac{1}{4}$ üne iner ve her hesaplamada yeni bilginin sadece % 25' i hesaplanmış olur. Bu hesaplama zamanı önemli oranda hızlandırır , özellikle 8 veya daha fazla ortalama alındığı durumlarda ve titreşimin periyodik kestirilebilir olduğu ve geçici durumlar içermediği sürece üst üste kayıt prensibi birçok durum görüntüleme ölçümü için kabul edilir bir metoddur.

Tabii ki bazı artılardan fedakarlık etmeden hiçbir şey elde edilememektedir. Çünkü üst üste binmiş zaman kaydı eski bilgiyi de içerdiğinden % 100 doğru değildir. Bu proses, değişimin yönünü ve miktarını göstermektedir , fakat herhangi bir değişiklikten sonra yeni spektrumun tamamen doğru olarak görüntülenebilmesi için tüm zaman kaydının beklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle geçici (transient) ölçümler gibi zaman kaydından daha kısa süren ölçümler için üst üste kayıt prensibi işe yaramamaktadır. Zaman kaydından daha uzun süren geçici durumlar için analiz cihazının gerçek zaman band aralığı ve spektrum kaydedicisi sınırlıdır.

Normalde üst üste kayıt prensibi geçici olaylardan daha çok spektrum oluşturulmasını sağlar , böylece olaydan elde edilen spektral bilgide iyileşme saplanmış olur. Üst üste kayıt prensibi ortalamaları hesaplamak için harcanan zamanda büyük tasarruf sağlar ve FFT prosesörünün yeni bir zaman kaydı beklerken boşa geçirdiği zamanı da ortadan kaldırmış olur.

Titreşim analizinin kestirimci bakım ile kullanıldığı birçok durum için üst üste kayıt işlemi (overlap processing)güvenle kullanılabilir , bu nedenle bu metod normalde oldukça uzun ve aşırı ölçüm zamanına ihtiyaç duyan düşük frekanslı ölçümlerde oldukça yardımcı ve kullanışlıdır.

4.7.1 Üst Üste Kayıt İşleminin Kullanıldığı ve Kullanılmadığı Örnekleme Zamanlarına Ait Uygulamalar

Bu ölçümleri gerçekleştirmek için gereken toplam zaman , zaman dalga formundan FFT' nin hesaplanması için gerekli zamanın bir fonksiyonu olduğu gibi aynı zamanda transducer ve bilgi toplayıcısında harcadığı zamanın bir fonksiyonudur. Bu , düşük hızlı makinalarda 2 ile 3 dakika arasında bir zaman alır. Kullanılan cihaza bağlı olmaksızın bir zaman kaydı için harcanan zaman aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{BİLGİ ÖRNEKLEME ZAMANI} &= \frac{60 (\# \text{ÖRNEK}) \times (\# \text{ORTALAMA})}{(2.56) \times (\text{FREKANS ARALIĞI})} \\ &= \frac{60 (\# \text{FFT ÇIĞI}) \times (\# \text{ORTALAMA})}{\text{FREKANS ARALIĞI}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Örnekleme Zamanı : Saniye birimli toplam örnekleme periyodudur.

Titreşim genliğinin ne sıklıkla ölçüldüğünü ve saklandığını ifade eder.

(Hiç üst üste kayıt yapılmadığı varsayılmıştır.)

Örnek: Zaman dalga formunu oluşturmak için kullanılan analog/dijital çevrim sayısı.

#Ortalama: Alınan ortalama sayısı.

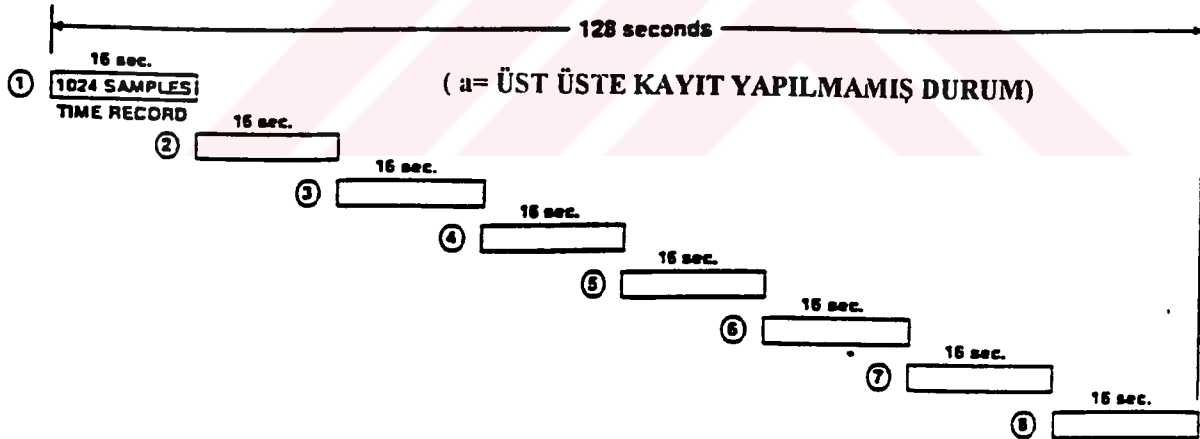
Frekans Aralığı: CPM birimli frekans aralığı. Sıfırdan farklı bir frekansta FFT ölçümüne başlamaya izin sistemlerde F_{min} ile F_{max} aralığıdır.

Aşağıdaki uygulama üst üste kayıt kullanıldığında örnekleme zamanının ne kadar kısaldığını göstermektedir.

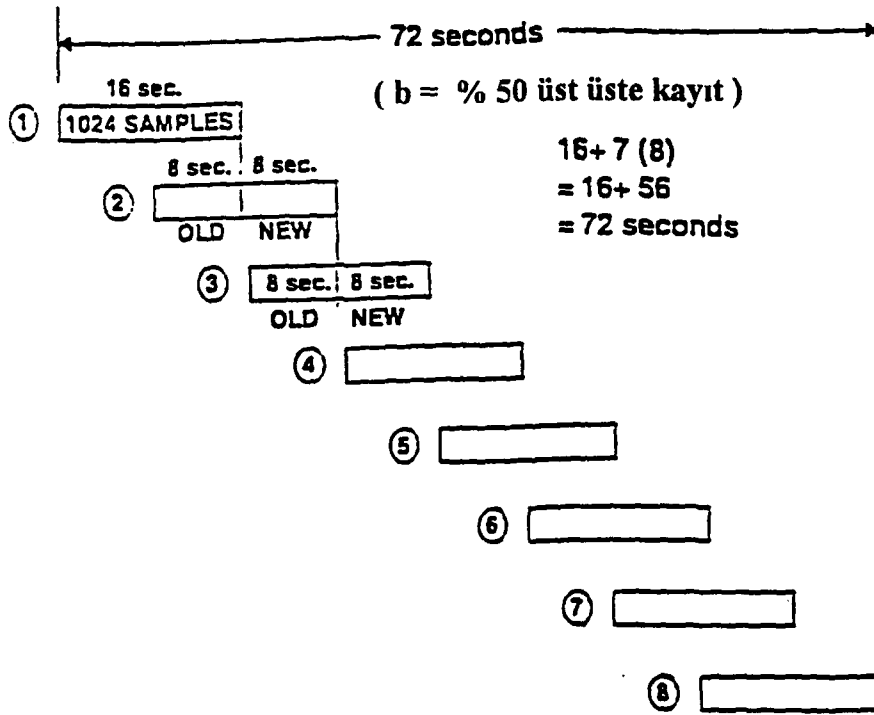
Üst üste kayıt işlemi (overlap processing) kullanıldığı ve kullanılmadığı durumların karşılaştırıldığı uygulama:

Eğer 400 çizgili FFT' yi 8 ortalama ve 0 ile 1500CPM aralıklı frekans bandı ile elde etmek gerekli ise sadece bilgiyi örnekleme 128 s alacaktır. (transducer ve bilgi toplayıcının harcadığı zaman bunun içinde değildir.) Resimler Şekil 4.17 —4.19 arasındır

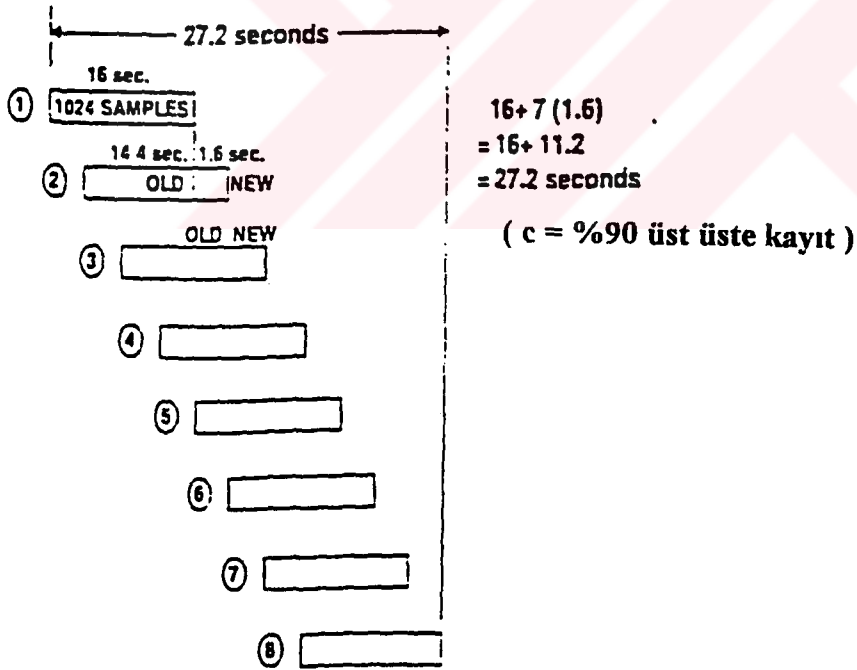
$$\text{Bilgi Örnekleme Zamanı} = \frac{60 \times 400(\text{ çizgi}) \times 8(\text{ortalama})}{1500} = 128 \text{ s} \quad (4.5)$$



Şekil 4.17 : Üst üste kayıt prensibi uygulanmamıştır. Her zaman kaydı başına 16 saniyede 8 ortalama alınmıştır. → 128 s.



Şekil 4.18 : % 50 lik üst üste kayıt işlemi uygulanmıştır. İlk zaman kaydı için 16 saniyede 4.5 ortalama ve diğer zaman kayıtları için 8 er saniye harcanmıştır. → 72 s



Şekil 4.19 : % 90 lik üst üste kayıt işlemi uygulanmıştır. İlk kayıt için 16 saniyede 1.7 ortalama ve diğer her zaman kaydı için 1.6 s harcanmıştır. → 27.2 s

Durum görüntüleme çalışmaları için % 90 lık overlap tavsiye edilmez , bununla beraber % 50 lik bir overlap dahi örnekleme zamanından oldukça büyük kazanç sağlamaktadır. % 90 lık overlap analizci tarafından ancak geçmiş ölçümler ile bir bağıl karşılaştırma yapabilmek amacıyla makinanın durumu hakkında çabucak bilgi sahibi olmak istendiğinde kullanılabilir. Bağıl karşılaştırma için birçok ölçüm noktasından birkaç değişik yönde alınan ölçüm %90 lık overlap kullanılsa dahi analizciye bir fikir verir.

Pratikte tüm araştırmalar için $F_{max} = 3000$ CPM olan bir frekans aralığında % 75 overlap ile 2 adet ortalama alınması yeterlidir. Yukarıdaki örnekte olduğu gibi 8 ortalamaya gerek yoktur. $F_{max} = 3000$ ile 12000 CPM arasında olan frekans aralıkları için ise 4 ortalama yeterlidir.

Yine % 50 lik overlap ile $F_{max} = 12000$ ile 60000 CPM arasında olan aralıkta 8 ortalama 60000 CPM (1000 Hz) den büyük frekans aralıklarında % 50 overlap ile 16 ortalama tavsiye edilir. [9]

Önceki örnekte frekans 150 000 CPM' e yükseltileseydi overlap küçük bir değer alırdı , çünkü örnekleme zamanı 1.28 saniyeden sadece 0.72 saniyeye inerdi (% 50 overlap) , ama 1500 CPM lik bir aralıkta 2 ortalama alındığında overlap örnekleme zamanını oldukça yüksek oranda kısaltır. Bu pratik bir tekniktir.

4.8 Titreşim Spektrumunun İncelenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

İlk bölümlerde de değinildiği gibi spektrum titreşimin frekans domeninde grafiksel olarak gösterimidir.

Şekil 4.20 bir spektrum örneğidir. X ekseni CPM birimiyle $F_{max} = 12000$ CPM olmak üzere frekansı , Y ekseni titreşimi gösterir. Yatay eksen aynı zamanda 10 bölmeden oluşur. Her bölüm 12000 CPM' in 1/10 luk frekans aralığına sahiptir.

Bir kursor kullanılması frekans ve genliğin belirlenmesinde yardımcıdır. Şekil 4.20 de kursor en baskın tepeliğin üzerindedir. Kursor frekansı 1770 CPM ve genliği 0.6 cm/s dir. Spektrumun alt tarafındaki kesikli çizgi hayali genlik eşik değeridir. Bu 1.25 cm/s nin % 1 i olan 0.0125 cm/s değeridir.

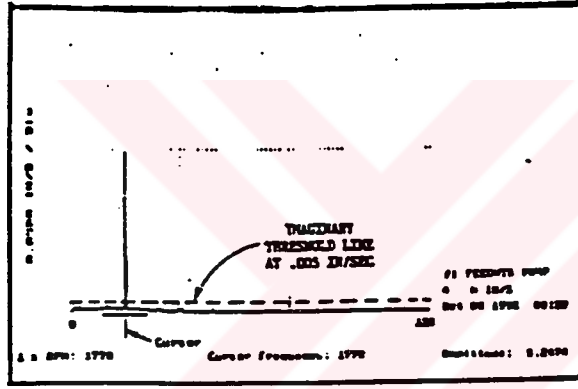
Spektrumun altında değeri 0.0125 cm/s eşik değerini geçen tüm genliklere ait frekans ve dönüş hızı katlarının yer aldığı bir liste vardır.

Spektrumdaki tüm tepelere ait genlik ve frekans değerlerinin hatasız olarak belirlenmesi çok önemlidir.

Genlik önemlidir , çünkü problemin şiddeti hakkında bilgi verir. Diğer yandan frekans problemin kaynağının belirlenmesi açısından önem taşır.

Örneğin şekil 4.20 de en yüksek tepeli genlik 1770 CPM dedir , bu makinanın dönüş hızına eşittir. Bu yüzden bileşenin 1770 CPM deki dönüş hızı en baskın titreşim kaynağıdır. Problemin 1xRPM' de olduğu bilindiğine göre 1xRPM' de titreşim yaratacak olası tüm problem kaynakları masaya yatırılır. Böylece başlangıçta problemin kaynağı

Olarak düşünülebilecek rulman arızası , pervane vurması , elektriksel problem gibi diğer tüm seçenekler elenir.[9]



10 x 0.500 = 0.0050

MACHINE	Pos	Amplitude
#1 FEEDWTR PUMP	4	N
Frequency	2 x RPM	Amplitude
180	0.362	0.0054
240	0.483	0.0057
300	0.604	0.0070
1050	0.593	0.0062
1270	0.661	0.0088
1280	0.712	0.0053
1350	0.783	0.0053
1470	0.831	0.0053
1620	0.915	0.0053
1770	1.000	0.0074
2910	1.644	0.0078
3540	2.000	0.0144
3660	2.068	0.0055
4680	2.644	0.0108
7200	4.068	0.0234

T - Threshold adjust Q - Quit

Şekil 4.20 : Kullanıcı için tespit edilmiş eşik değeri üzerinde kursor ile frekansı ve genlik tepe değerleri tespit edilmiş spektrum.

4.8.1 Frekans Hassasiyetinde FFT Çizgi Sayısının Etkisi

Makina problemlerine ait problem kaynağını bulmada en önemli ihtiyaç frekansın gerçek değerini bilmektir. Titreşim frekansının hatasız belirlenmesi bilgi toplama ve görüntüleme esnasında kullanılan spektral çözünürlük çizgi sayısına doğrudan bağlıdır.

Daha öncede tartışıldığı gibi spektral görüntü frekans eksenini boyunca yan yana dizilmiş 400 ayrı çizgi ile bölünür. Bazı frekanslarda titreşim sıfır olduğu için tüm çizgiler bilgi taşımaz. Bilgi taşıyan tüm çizgiler titreşimle orantılı olarak ilgili frekanslarda genlik tepcikleri oluştururlar. Çizgi başına düşen frekans aralığı frekans çözünürlüğü olarak bilinir. Frekans çözünürlüğü aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

$$\text{FREKANS ÇÖZÜNÜRLÜĞÜ} = \frac{\text{FREKANS ARALIĞI}}{\# \text{ FFT ÇİZGİSİ}} \quad (4.6)$$

Frekans Çözünürlüğü (Frequency resolution) : Çizgi başına düşen görüntü çözünürlüğü. (CPM/ Çizgi veya Hz/Çizgi)

Frekans Aralığı: $F_{\min}$ den $F_{\max}$ ' a veya $0 - F_{\max}$ arası olan frekans aralığı.

Örneğin şekil 4.20 deki $F_{\max} = 12000$ CPM aralık eğer 400 çizgili bir çözünürlük ile bölünürse her çizgi 30 CPM lik bir aralığa sahiptir.

59. çizgi 1755 ten 1785 e kadar olan aralıktaki titreşim bilgisini taşır. 1770CPM frekansı bu aralık içindedir , ama bu aralıkta başka genlik tepciklerinin olup olmadığı belli değildir. Görüntülenen titreşim tepciği bu aralıktaki tüm frekansların bir sonucudur ve bu aralıktaki frekanslara ait genliklerin toplamı 0.61 cm/s ye denk düşmektedir.

Çözünürlük çizgi sayısı daha fazla oldukça analiz cihazı tarafından tespit edilip görüntülenen frekansın doğruluk oranı da o nispette yüksek olacaktır.

Şu önemli bilgi her zaman göz önünde bulundurulmalıdır: Görüntülenen frekansın doğruluk aralığı = Okunan frekans $\pm$ çözünürlüğün yarısı' dır.

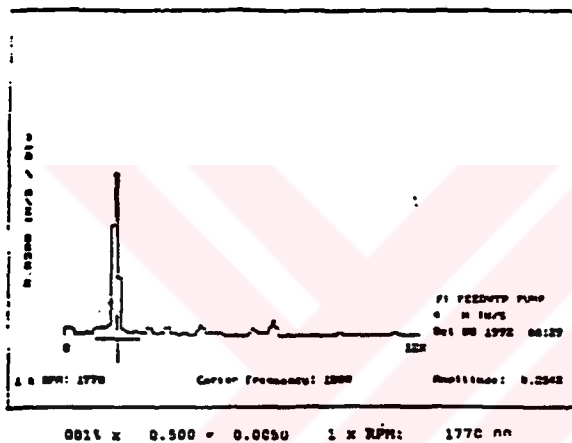
Örneğin 12000 CPM lik bir spektrumda 30 CPM lik bir çözünürlük ile 1800 CPM de bir titreşim genliği teşhis edildiyse , doğruluk aralığı $1800 \text{ CPM} \pm 15 \text{ CPM}$ olacaktır. Bir başka deyişle doğruluk aralığı 1785 ile 1815 CPM arası olacaktır.

Öte yandan eğer 120 000 CPM lik spektrum 400 çizgi kullanılarak alınsaydı doğruluk aralığı çözünürlüğün (300 CPM) $\pm$ yarısı olacaktı. (Yani 1650 ile 1950 CPM arası)

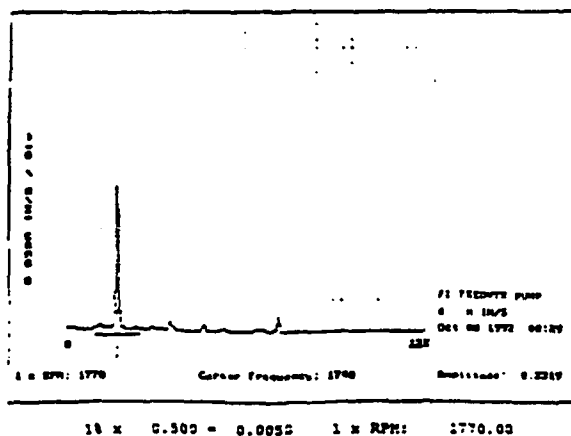
Şekil 4.21 ile 4.24 arası 100 , 200 , 400 ve 3200 çizgi çözünürlüklü spektrumlara aittir.

Şekil 4.22 200 çizgili bir çözünürlüğe sahiptir. Bunun sonucu olarak 60 CPM/ çizgilik bir çözünürlük Şekil 66 dakinden biraz daha açıktır. Burada baskın frekans 1740 CPM de gözlenmiştir.

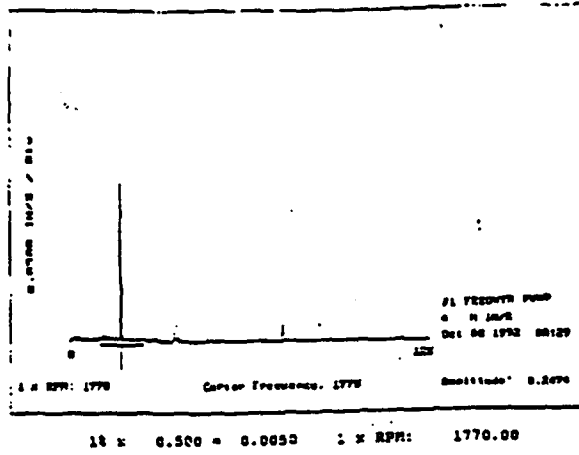
Şekil 4.23 400 çizgili , 30 CPM/ çizgi lik bir spektruma sahiptir. Titreşim genliği bu spektrumda 1770 CPM de görülmektedir. Bu şekil 4.21 ve Şekil 4.22 ye göre daha doğru bir değerdir.



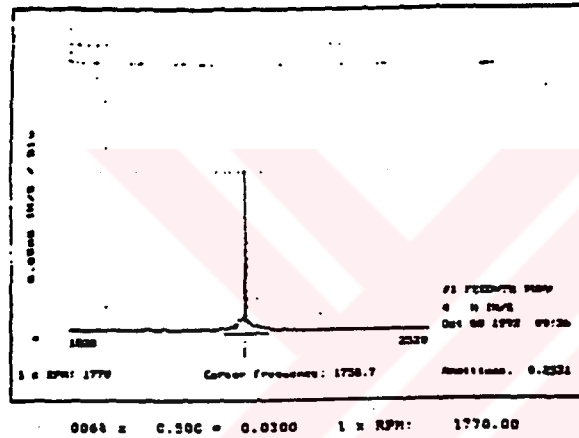
Şekil 4.21 : 12000 CPM frekans aralıklı 100 çizgi çözünürlüklü spektrum.



Şekil 4.22 : 12000 CPM frekans aralıklı 200 çizgi çözünürlüklü spektrum.



Şekil 4.23 : 12000 CPM frekans aralıklı 400 çizgi çözünürlüklü spektrum.



Şekil 4.24 : 12000 CPM frekans aralıklı 3200 çizgi çözünürlüklü spektrumdan alınan zoom görüntü.

Daha yüksek çizgi sayılı çözünürlük kullanılmasıyla doğruluk oranı daha da artırılabilir. Şekil 4.24 3200 çizgili bir spektrumun parçasıdır. 12000 CPM lik bir frekans aralığı için çözünürlük 3.75 CPM/çizgi dir. Baskın (dominant) titreşim frekansı 1758.7 CPM olarak tespit edilmiştir. Bu tahminin hata sınırı ± 1.875 (3.75/2) CPM dir. Yani gerçek frekans tam olarak 1756.8 ile 1760.6 CPM (29.281 ile 39.344 Hz) arasındadır.

Bu başarılı sonuç elde edildikten sonra Neden her zaman 3200 çizgili spektrum ölçümleri alınıp hatasız veriler elde etmiyoruz sorusu akla gelmektedir.

Herşeyden önce 3200 çizgi sayılı çözünürlük 400 çizgi sayılıya oranla tam 8 kat fazla zaman alır. Dolayısıyla bu bilgi toplama süresini oldukça uzatır. Aynı zamanda her ölçüm noktası için bu şekilde yüksek çözünürlüklü spektrumlar elde edilmesi bilgi toplayıcının spektral depolama kapasitesinin kısa sürede dolmasına neden olacaktır.

3200 çizgi çözünürlüklü spektrum ölçümleri almak şu durumlarda avantajlı olur:

Elektriksel problemlerin ani olarak belirlenmesi için bu şekilde yüksek çözünürlüklü spektrumlara ihtiyaç vardır. Aynı zamanda değişik makinalardan gelen titreşimler birbirine çok yakın ise bunları ayırt etmek için de yüksek çözünürlük çok kullanışlıdır. Tıpkı bunun gibi bazı rulman frekansları ve harmoniklerde motorun dönüş hızı katlarına çok yakın frekanslarda oluşurlar. Benzer bir durumda şöyle gelişebilir. 6 pervane kanadı olan bir pompanın rulman arıza frekansı $6.03 \times$ dönüş hızında ortaya çıkabilir. Böyle bir halde rulman arıza frekansı olan $6.03 \times \text{RPM}$ ile kanat geçiş frekansı olan $6 \times \text{RPM}$ frekanslarını birbirinden ayırt etmek gerekir. Bu tür bir durumda da yüksek çözünürlük gereklidir. [9]

Diğer yandan genel bilgi toplama için 400 çizgili bir çözünürlük yeterlidir.

$$\text{BİLGİ ÖRNEKLEME SÜRESİ} = \frac{60 \times (\# \text{ FFT çizgi}) \times (\# \text{ AVG})}{F_{\max}} \quad (4.7)$$

Bilgi örnekleme süresi: Zaman dalga formundan FFT'yi hesaplamak için kullanılan süre . (Hiç üst üste kayıt yapılmadığı kabul edilmiştir.)

FFT çizgi: Spektrumdaki FFT çizgi sayısı.

AVG : Alınan ortalama sayısı

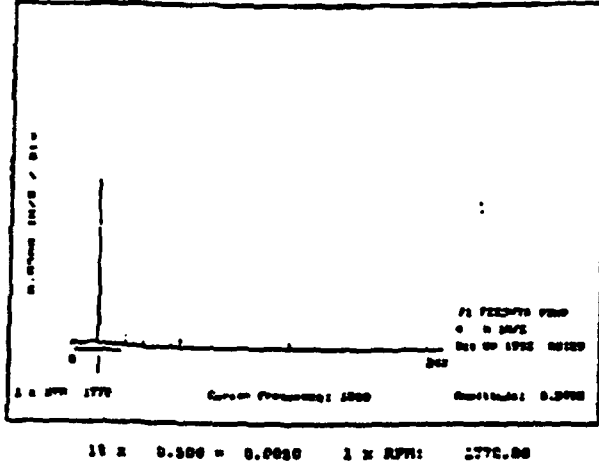
$F_{\max}$: Frekans aralığı (CPM)

4.8.2 Hatasız Frekans Tespitinde Frekans Aralığının Etkisi

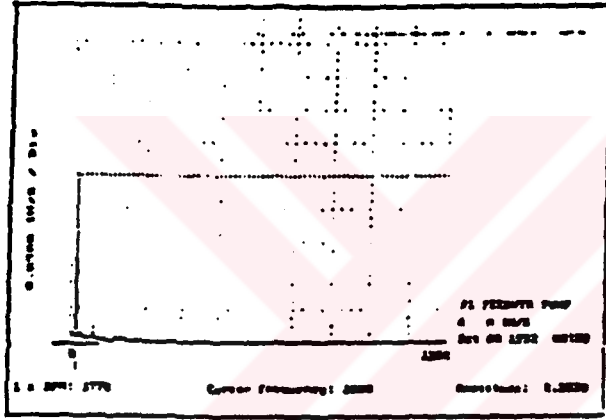
Çözünürlüğe Etkiyen bir başka faktörde frekans aralığı ayarıdır.

Frekans aralığı genişledikçe okunan frekanslardaki doğruluk oranı azalacak ve iki çözünürlük çizgisi arası daha geniş olacaktır.

Şekil 4.25 te $F_{\max} = 24000$ CPM ve 400 çizgili bir spektrum göstermektedir. Dolayısıyla bu spektrumun çözünürlüğü $24000/400 = 60$ CPM/çizgi dir. Şekil 4.23 deki $F_{\max} = 12000$ CPM ve 400 çizgili spektrum ile karşılaştırıldığında bu spektrumun frekans tanımı sadece % 50 doğruluktadır. Şekil 4.26 da ise 120000 CPM lik bir frekans aralığına ve 400 çizgilik bir çözünürlüğe sahip spektrum görünmektedir. Bu spektrumda görünen bir frekans ± 150 CPM lik hata payına sahiptir. Bu spektrumun frekans tanımı şekil 4.23 deki spektrumun sadece 1/10'u kadar doğruluğa sahiptir.



Şekil 4.25 : 24000 CPM frekans aralıklı , 400 çizgili çözünürlüklü spektrum.



Şekil 4.26 : 120000 CPM frekans aralıklı , 400 çizgili çözünürlüklü spektrum.

Analizci ihtiyaç duyacağı tüm bilgiyi içeren genişlikte bir F_{max} seçmelidir. Bunu yaparken ölçümlerdeki hatasızlık oranını göz ardı etmemelidir. [9]

4.8.3 Zoom İle Frekans Çözünürlüğünün Geliştirilmesi ve Band Seçmeli Fourier Analizi.

Hatırlanacağı gibi Fast Fourier transform sıfır Hertzden başlayan ve bir maksimum frekansa kadar eşit aralıklarla yayılan bir seri filtreye denktir. Bu nedenle frekans çözünürlüğü filtre sayısı ile bölünen maksimum frekans ile sınırlıdır.

Bölüm 4.8.1 de verilen örneklere ek olarak frekansı büyük genlikli bir sinyale çok yakın olan , ama küçük genlikli bir sinyali ölçme durumunda olunsun. Örneğin bir elektrik motorunun durumu transducer olarak bir akım trafosu kullanarak motor akım spektrumları elde edilip değerlendirilebilir. [6,9]

Rotor problemleri için motor akım spektrumu değerlendirilirken hat frekansı ile 1.kutup geçiş frekansı karşılaştırılmalıdır. (Kutup geçiş frekansı = kayma frek. x # kutup). Ülkemizde hat frekansı 50 Hz olduğu için bu frekans motor akım spektrumunda baskın olacaktır. Bu nedenle analizci hat frekansı çevresindeki kutup geçiş frekanslı yan bandları görmek için logaritmik genlik kullanacaktır. Tipik olarak kutup geçiş frekansları 30 CPM ile 180 CPM arasındaki bir frekans aralığına sahiptir. Bu nedenle söz konusu ölçümde hassas , net görüş sağlayan bir çözünürlüğe ihtiyaç vardır.

Önceki bölümlerde frekans çözünürlüğünü artırmanın iki yolu tanıtılmıştı. Bunlardan biri FFT çizgi sayısını artırmak vesadece ilgilenilen frekans dilimini görüntülemek , diğeri ise frekans zoom'u yapmaktır.

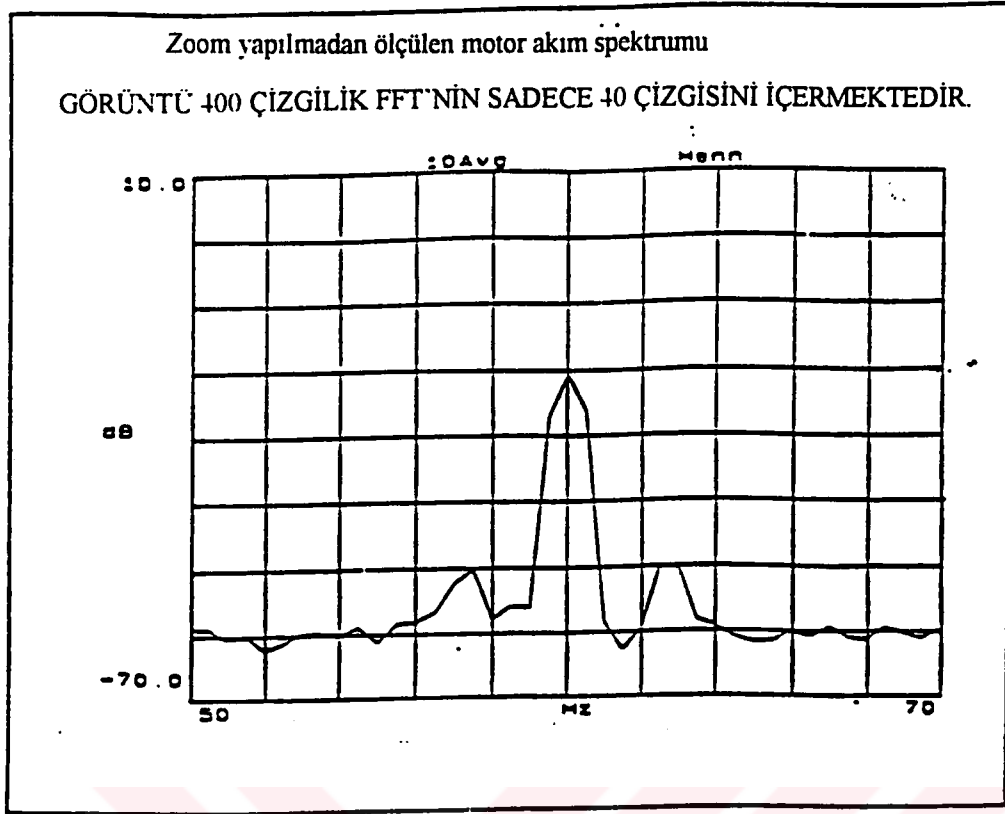
Frekans zoom'un anlamı 400 çizgili çözünürlüğün tamamını istenilen frekans bandı aralığına yoğunlaştırmaktır.

Şekil 4.27 bu tür örneğe ait bir görüntüdür. Şekil 72 A zoom yapılmamış görüntüdür. 400 çizgilik çözünürlüğün sadece 40 çizgisi istenilen frekans dilimindedir. Şekil 4.28 aynı ölçümün zoom lu halidir. Zoom ile 400 çizgili çözünürlüğün tümü 50 Hz ile 70Hz arasında yoğunlaştırılmıştır. Şekil 4.27 de yan bandlar gürültü tabanının çok üzerindedir. Bunların ölçümlenebilmesi için çok daha düşük seviyelerde olmaları gerekirdi. Oysa Şekil 4.28 deki gürültü tabanı düşürülmüştür. Böylece yan bandlar oldukça gözle görülür hale gelmiştir.

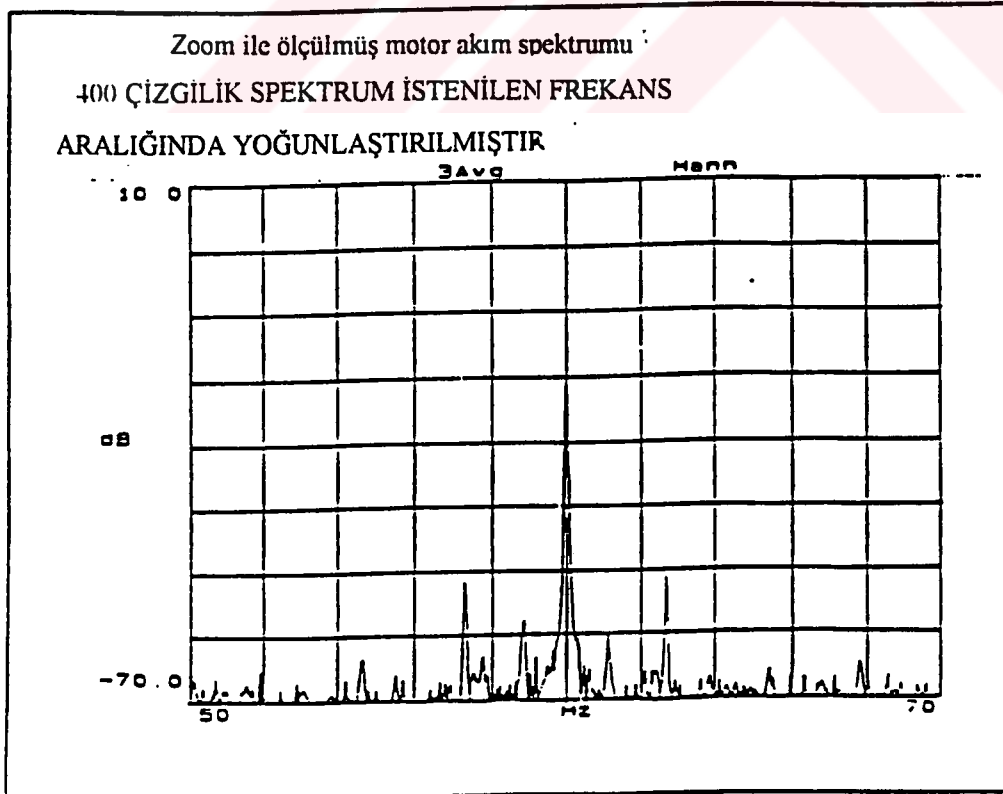
Sözde zoom ile doğru zoom (zoom – true zoom) arasında farklılık vardır.

Bazı analizörler spektrumu 12800 çizgiyle hesaplayabilirler. Eğer 12800 çizginin sadece bir kısmı görüntülenirse sonuç zoom ölçümü ile aynıdır. Bu sadece görüntünün genişlemesidir. Yani gerçek anlamda zoom değildir. Doğru zoom asıl ilgilenilen frekans aralığı FFT işleminden önce seçilirse gerçekleşir. Bu nedenle sadece 400 çizgilik FFT dahi true zoom yapmak için yeterlidir. Çünkü true zoom ile 400 çizgi istenilen frekans aralığında yoğunlaştırılabilir.

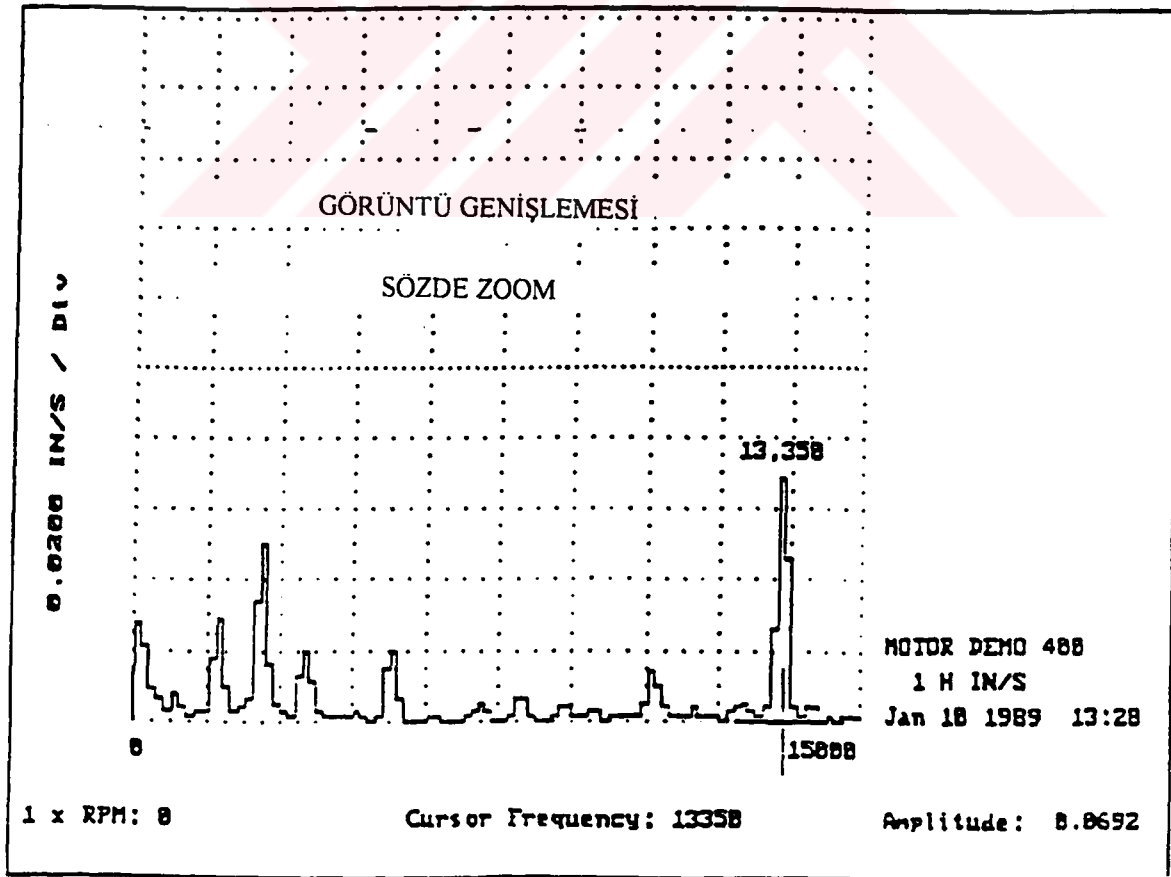
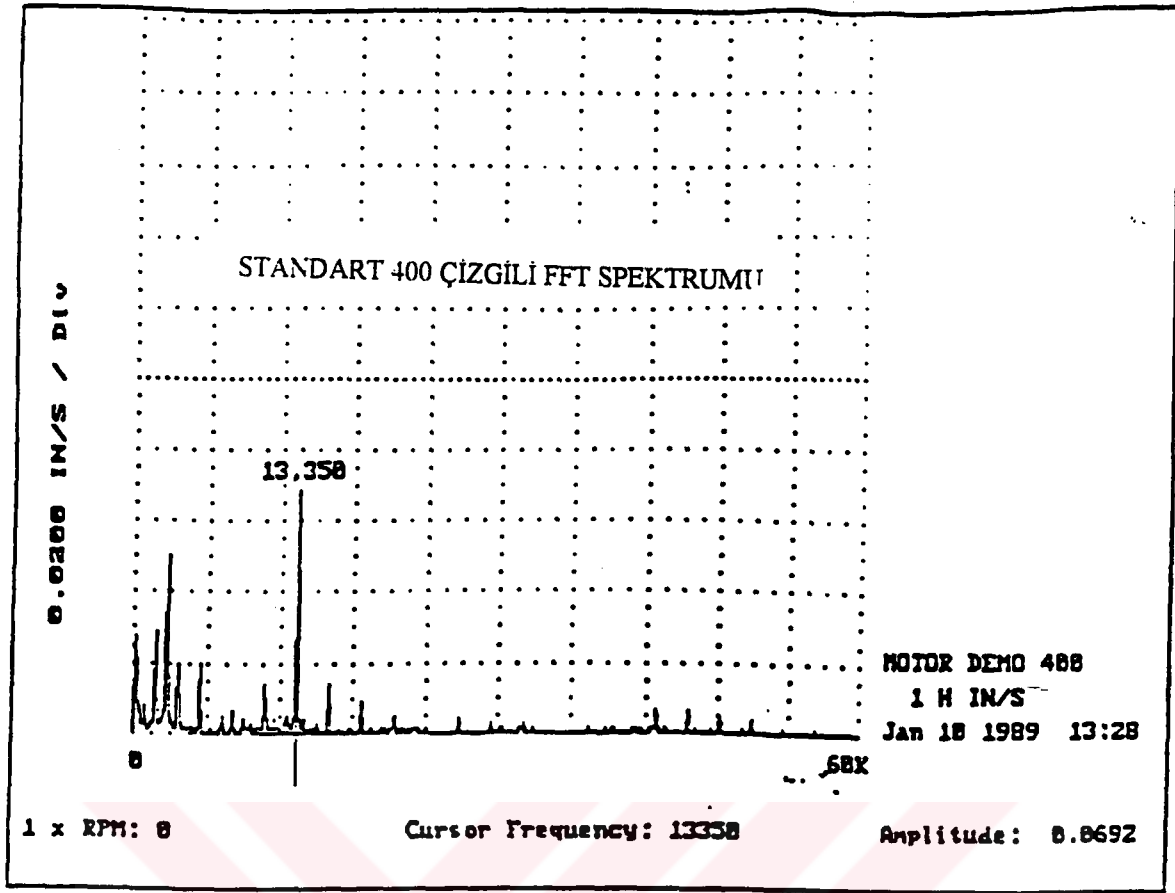
Sıradan bir zoom (görüntü genişlemesi) ile frekans çözünürlüğü artırılmaz.Buna bir örnek Şekil 4.29 dur. Buradaki faktör 4 tür. $F_{max}=60\ 000$ CPM yerine $F_{max} = 15\ 000$ CPM alınmıştır.



Şekil 4.27: Motor akımının zoom yapılmadan ölçülmüş hali. (400 çizgi çözünürlüklü FFT'nin sadece 40 çizgisi görünmektedir.



Şekil 4.28 :Zoomlu görüntü.(50 –70 Hz arasında 400 çizgilik FFT yoğunlaştırılmıştır.)



Şekil 4.29 : Görüntü genişlemesi (sözde zoom)

Daha öncede belirtildiği gibi çözünürlüğü artırmanın biryolu da FFT'deki çizgi sayısını artırıp bunu görüntülemektir. Örneğin 3200 çizgili bir FFT alıp görüntülemek çözünürlüğü artırır , amaç aynı zamanda 3200 çizgilik FFT 400 çizgili olanına göre ölçüm esnasında 8 kat daha fazla zaman alacak ve cihazda 8 kat fazla yer işgal edecektir. Bunun yerine istenilen frekans aralığı önceden bilindiğinde bu frekans aralığında doğru zoom gerçekleştirilirse hem iyi bir çözünürlük elde edilmiş hem de gereksiz zaman ve hafıza kaybı önlenmiş olur. Öte yandan maalesef pratikte zoom edilmesi gerekli frekans aralığı çok nadir bilinir.

Hatırlanması gereken nokta 400 çizgili bir FFT' de görüntü genişletmesi yapmanın frekans çözünürlüğünü genişletmeyeceğidir.

Çözünürlük çizgi sayısını artırmak ve/veya F_{max} 'ı azaltmak doğru zoom oluşturacak , spektral tepecikler ve yan bandların okunmasını sağlayacaktır. [6,9]



5. ASENKRON MOTORLARDA MOTOR AKIMININ İZLENMESİ.

5.1 Giriş

Bu bölüm, alternatif akım motorlarının elektriksel ve mekanik durumlarının elektriksel kaynaklı mekanik titreşim analizine ilave olarak motor akımının doğrudan gözlemlenmesi metoduyla analizini içerir.

Yine bu bölümde motor problemlerinin analizi için bazı pratik ipuçları ve öneriler bulunmaktadır. Burada tanıtılan teknikler güçleri 5 HP ile 700HP arasında değişen motorlar üzerinde uygulanmıştır. Motorun çektiği akımı FFT işlemcisine aktarmak için basit bir transducer (pens ampermetre) kullanılır. Bu , akımın görüntülenmesi için hem kolay hemde güvenli bir yoldur. Pens ampermetrenin içindeki sensör ölçümlenen akımın ürettiği magnetik alanı hissederek aynı zamanda güçlendirici bir devre (amplifier) yardımı ile çıkış sinyali üretir. Üretilen çıkış sinyali FFT işlemcisine aktarılır ve bundan önceki bölümde anlatılan tekniklerle spektrum oluşturulur. [13,14]

5.2 Düzensiz Hava Aralığı ve Etkileri

Elektriksel problemler şu ana kadar titreşim adıyla incelediğimiz mekaniksel tepki hareketi yaratırken motor akımının da harmonik adıyla bilinen temel bileşenden farklı frekansta akımlar içermesine neden olur.

Bozuk , yani üniform yapıya sahip olmayan hava aralığının dar olan kısmından motor kutupları geçtikçe hava aralığının geniş olduğu yerdeki magnetik çekim daha da büyür. Kutup sayısı (motor hızı) sonucu etkilemez. Spektrumda 100 Hz civarında bazı sinyaller oluşur. Motor gücü yada hızından bağımsız olarak hava aralığındaki % 10 luk bir değişim 2π frekansında sinyal üretir. Hasarlı bir stator aynı zamanda RBPF' de de (Rotor Bar PassFrequency) sinyal oluşturacak ve stator hasarının olduğu yerde magnetik alan zayıflayacak tam karşı noktada (180° ilerde) ise daha güçlü olacaktır. Daha güçlü magnetik alanı geçen her rotor çubuğu mekanik olarak bu yön doğrultusunda çekilecektir.

Statora zarar veren çok sayıda etken vardır : Üretim , çevre koşulları , izolasyon hataları vb. Statora verilen en küçük zarar yine rotor çevresinde düzensiz magnetik alan yaratmaktadır. Bu tür düzensizlikler motor akımında bozulmasına yol açmaktadır. [13,14]

5.3 Alternatif Akım Motorlarında Motor Akım Analizi Teknikleri

Motor durumunun yine motor akımının FFT'ye bağlı tutularak belirlenmesi konusundaki çalışmalar son 8 yılda büyük aşamalar kaydetmiştir. Genelde kırık rotor çubuklarını teşhis etmeye yarayan bir metod olarak bilinse de gerçekte bu teknoloji rotor devresindeki istenmeyen yüksek dirençleri de tespit eder. Bir başka deyişle bu teknik ile kötü kaynaklı bağlantı noktaları , gevşek bağlantılar , hasarlı rotor çubukları tespit edilmektedir. Tüm akım ölçümleri esnasında motor en az % 70 - 75 oranında yüklü olmalıdır.

Rotor devresinde bir arıza var ise spektrumda logaritmik skalalı Y ekseninde göze batan , baskın olan 2 görüntü elde edilir.

50 Hz hat frekansında ve bunun sol tarafında “kutup sayısız kayma frekansı” mesafesinde büyük birer sıçrama (tepecik)görünür.

Bu sinyaller sırasıyla A ve B olarak isimlendirilirsin.

Motor durumunun bekirlenmesi için aşağıdaki hesap tekniği kullanılır.

$$\text{Log (A/B) x 20 = dB cinsinden genlik olmak üzere;} \quad (5.1)$$

54 – 60 dB = Mükemmel.

48 – 54 dB = İyi.

42 – 48 dB = Orta .

36 – 42 dB = Kırık rotor çubuğu veya rotor devresinde benzer nedenli yüksek direnç.

30 – 36 dB = Birçok nedene dayalı yüksek direnç.

< 30 dB = Şiddetli hasar , arıza.

Kutup geçiş frekansındaki sinyalin genliği motorun yük oranı ile doğrusal olarak değişmez , öte yandan yük oranı % 75 in altında ise elde edilen sonuçların doğruluk oranı yoktur.

Yüksek verimli asenkron motorlar bu yüksek verimlerini iki yolla elde ederler. Bunlar daha küçük hava aralığı ve sınırlarda daha ince yalıtım malzemesi kullanılmasıdır. Eğer kullanıcı bu endüksiyon motorlarını DA motorlarında kurulu olduğu aynı transformatör ünitesinden besler ise DA Motoru yarı iletken kontrollü doğrultucuların alternatif akım devresine harmonik injekte etmesi olasıdır. Bu da motorda gerilim sıçramalarına neden olur. Böylece yalıtım zayıflar ve bu olay motor ömrünün kısılmasıyla sonuçlanır. Araştırmalar motor ömrünün kısılmasının % 50 oranla bu tür olaylar nedeniyle meydana geldiğini ortaya koymuştur.

Doğru akım motor problemleri SCR ateşleme frekansında (hat frekansının 6 katı) görünür. Eğer bu frekansta büyük sinyallere rastlanırsa SCR bağlantıları , kontrol kartları , sigortalar kontrol edilmelidir.

Akım probu ve FFT işlemcisinin birleşimi gelişmekte olan motor problemlerinin erken teşhisini sağlayan motor akım spektrumunu elde etmeye olanak verir. Özellikle sincap kafesli rotorlarda açık veya kısa devre olmuş endüksiyon çubukları nedeniyle rotor direncinde oluşan değişimler , spektrumda hat frekansı etrafındaki yan band tepcikleri olarak belirir. Yan band genliğinin hat frekansındaki genliğe oranı motorun çalışma performansının bir belirtisidir. Bu yan bandlar hat frekansından “2x kayma frekansı” kadar uzakta görünürler. [14]

$$\text{Kayma} = s = \frac{\text{RPM Senkron} - \text{RPM Gerçek}}{60} \quad (5.2)$$

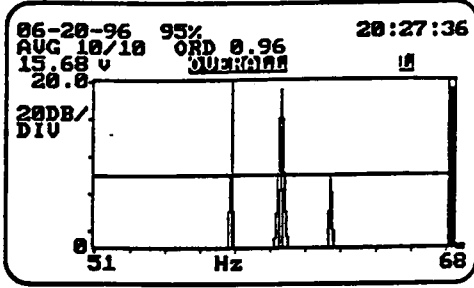
Motor tam yüke yakın bir yükte çalışırken ;

$$\frac{\text{Yan band genliği}}{\text{Hat frekansı genliği}} > \frac{1}{200} \quad (5.3)$$

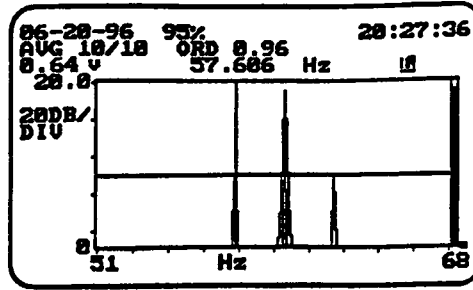
bu sonuç motorda bazı sorunlar olduğunu gösterir.

Yeni bir motor küçük yan bandlar göstermelidir. Trend analizi sırasında toplam harmonik (overall value) değeri 200 ile bölünmelidir. Yan band genliği bu bölümden büyük ise bu sonuç motorda bir hasar başlangıcı olduğunu gösterir. Yan band genliklerinin ölçümü zordur , çünkü normal 400 çizgili çözünürlük ile sinyal

tepecikleri (akım sıçramaları) birbirinden net olarak ayrılamaz. 1600 çizgili bir FFT çözünürlüğü 42 – 56 Hz aralığında (hat frekansı etrafında) tatbik edilmelidir. Şekil 5.1 deki toplam 15.68 lik akım değeri 200 ile bölündüğünde 0.075 sayısı elde edilir. Şekil 5.2 de ise yan band tepeciğinin genliği 0.064 A dir. Bu da normal , sorunsuz bir motor anlamına gelir. [14]

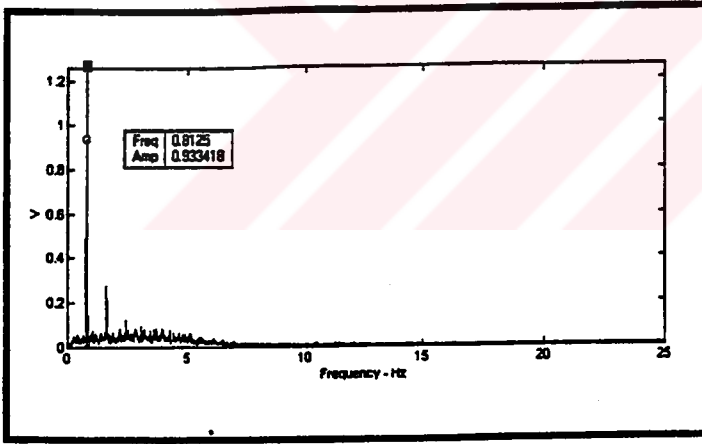


Şekil 5.1 : Hat frekansı tepeciği.



Şekil 5.2 : Kürsör yan band frekansı üzerindedir.

Bu test tekniğine ikinci bir örnekte kırılmış rotor çubukları ile ilgili olan Şekil 5.3 tür. Bu ölçüm sonunda motor açılmış ve 5 adet kırık rotor çubuğu bulunmuştur.



Şekil 5.3 : Filtrelenmiş AA motor akım spektrumu. 5 kırık rotor çubuğu ve hasarlı bitiş halkası nedeniyle 0.8125 Hz kayma frekansında oluşan sinyal. Kutup geçiş frekansındaki sinyal genliğinin toplam sinyal genliğine oranı % 63 tür.

Yukarıda değinilenlerin yanı sıra kayma frekansının harmoniklerinde oluşan sinyallerde motor hasarının bir belirtisi olarak kabul edilir. Hız ve ivme sensörleri kullanılarak gerçekleştirilen “titreşim analiziyle” , motor akımı takibine dayanan “motor akım analizinin” birlikte tatbik edilmesi alternatif akım endüksiyon motorlarının durumlarının saptanmasında , bu motorlarda potansiyel halde bulunan olası arızaların henüz meydana gelmeden teşhis edilmesinde yüksek başarılı sonuçlar elde etmeye olanak sağlar. [13,14]

6. ÇOK PARAMETRELİ GÖRÜNTÜLEME VE ON LINE SİSTEMLER.

6.1 Giriş

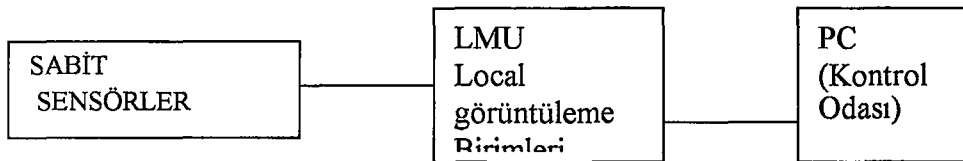
Elektrik motor bakımı on line görüntülemenin devreye girmesi ile oldukça farklı bir boyut almıştır. Rulman durumu , motor balans toleransları , rotor çubuğu durumunu vb. belirlemek için motorlardan aralıksız alınan spektral sinyaller analiz edilmektedir.

On line görüntüleme , kalite güvencesi için frekans spektrumunun tüm görüntülerini analiz etmeye olanak verir. Motor bakımından önce ve sonra alınan raporlar yapılan tamirin ne denli güvenilir olduğunun belirlenmesini sağlamaktadır.

Öte yandan yeni üretilmiş motorlarda LAN (Local Area Network) tabanlı on line görüntüleme teknolojisini kullanmak endüstriyel standart kalite kontrol güvencesine ulaşmada en güvenilir yollardan biridir.

On line görüntüleme kullanıcıya rahat , gürültüsüz , bir ortamda oturup motorlarının nasıl çalıştığını gözlemleme şansı verir. Spektrumlar istenildiğinde canlı olarak izlenebilir. [15,16]

Bu sistemin temeli sahada sabit olarak yerleştirilmiş olan sensörlerden kesintisiz olarak bilgi toplanıp, bu bilgilerin yerel görüntüleme birimlerinde işlenmesi ve ölçümlenen her bilginin kontrol odasında bulunan bir PC yardımı ile izlenmesine prensibine dayanır. Bu bilgi transferi şekil 6.1 deki sırayı takip eder.[15-17]



Şekil 6.1: On line görüntülemeye bilgi akışı.

6.2 Çok Parametrelili Görüntüleme

Çok parametrelili görüntüleme LMU lar vasıtası ile 20 ayrı tip dinamik giriş parametresinin değerlendirilmesine olanak verir.

32 kanallı dinamik , 8 takometre ve 8 mantıksal giriş kapasiteli modüller her türlü mekanik aksamın çok çeşitli yönlerden değerlendirilmesinde büyük esneklik sağlarlar.

Lokal görüntüleme birimleri (LMU) sürekli olarak motor ve makina aksamını tarayarak değişiklikleri ve alarm durumlarını gözden geçirir. Ayrıca bu tip sistemlerin genişlemeye uygun yapıda olması ileride büyüyecek olan tesislerin sisteme kolaylıkla adapte olmasına olanak verir. [15,17]

6.3 Kesintisiz İletişim

On line görüntülemenin en büyük önemi isminden de anlaşıldığı gibi sahadaki cihazlar ile kontrol odasındaki PC arasında kesintisiz iletişim sağlamasıdır. Bu gelişmiş komünikasyon kullanıcıya izleme merkezinden sistemi inceleme olanağı tanır. Analiz süresinde dahi LMU lar bilgi toplamaya devam eder. Sistemin bir yerinde analiz çalışmaları yapılırken aynı anda LMU sistemin başka bir yerinde alarm seviyelerinin aşıldığını bildirebilir.

Sensör gücü , sinyal elde edimi , sinyal işleme ve alarm seviyeleriyle karşılaştırma işlemlerinin tümü LMU larda gerçekleşir. Böylece arıza tespiti sistemin çalışma yapısı etki altında bırakılmadan gerçekleştirilmiş olur.[15]

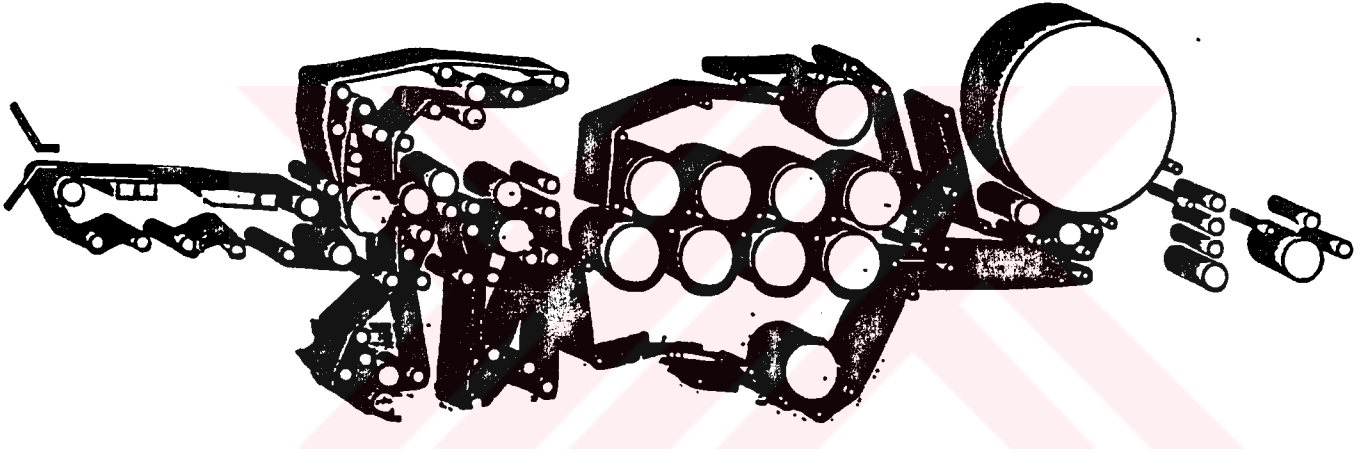
6.4 Sabit (Permanent Mounted Sensors) Sensörlerin Üstünlükleri

- ◆ Tehlikeli bölgeler güvenli şekilde izlenir. İşçi güvenliği önemli ölçüde artırılır.
- ◆ Ulaşılması güç noktalar görüntülenir. Gizli kalmış makina problemleri teşhis edilir.
- ◆ Sensörler sabit ve güvenilir bir şekilde yerleştirilmiştir. Makina durumu güvenilir ve hassas bir biçimde belirlenir.
- ◆ Birçok makina noktasına tek bir merkezden anlık ulaşma imkanı vardır. Makinaların çeşitli noktalarının birbiriyle ilişkisi belirlenir.[15]

6.5 Otomatik ve Sürekli Bilgi Toplamanın Üstünlükleri

- ◆ Zaman ve iş maliyetinde azalma.
- ◆ Yüksek frekanslı bilgi toplama. Motor ve rulman problemleri hakkında erken uyarı elde edilir.
- ◆ Anı anına gözlem olanağı. Motor yada makina durumlarındaki değişimler gözden kaçırılmamış olur. [15]

6.6 Çok Parametrelili İzlemede Kağıt Makinası Uygulaması



Şekil 6.2 Kağıt makinası emme , presleme , kurutma kısımlarından oluşmaktadır.

Tablo 6.1 Kağıt makinası bölümleri ve bu bölümlerden alınması gereken ölçüm tipleri

	ISLAK	KISIM	PRES	KISMI		KURUTMA	KISMI	
KİLİT EKİPMAN	Emme Silindiri	Emme Silindiri İç Rulmanı	Şerit&Kayış silindir Rulmanları	Pres Silindir	Kurutma Silindir rulmanı	Yankee Pres silindiri	Yankee Silindir Rulmanı	Calendar Silindir rulmanı
GEREKLİ GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİ	Senkronize Zaman Ortalaması İvme Filtrelemesi	İvme Filtrelemesi İvme/Hız Sıcaklık	İvme Filtrelemesi İvme/Hız	Senkronize Zaman Ortalaması İvme Filtrelemesi		Senkronize Zaman Ortalaması İvme filtrelemesi	SEE İvme Filtrelemesi Hız Sıcaklık	SEE İvme Filtrelemesi İvme/Hız Sıcaklık

Tablo 6.2 Kağıt makinası ekipmanlarına ait muhtemel arızaların görüleceği frekans aralıkları. (Ölçüm aralıkları)

ÖLÇÜM ARALIĞININ ÖNEMİ			
Analiz bandı	İvme filtrelemesi Geçiş bandı filtre ayarı	Toplam Titreşim aralığı	SEE Birimleri
KAYIŞLAR : 1-2 x RPM	5-100Hz , 50-1kHz	200Hz	-
SİLİNDİRLER: 10-20 x RPM	50-1kHz , 500-10kHz	1kHz	-
RULMANLAR: 100-200 x RPM	50-1 kHz , 500-10kHz , 5 –40 kHz	2kHz	yankee için 50 diğerleri için 100
DIŞLİLER: 500-2000x RPM	500-10kHz , 5-40 kHz	5kHz	100

Şekil 6.2 de kağıt makinasının resmi bulunmakta , bu resmin hemen altında tablo 6.1 de bu kağıt makinasına ait kilit ekipmanlar ve bu ekipmanlardan alınması gereken titreşim ölçüm çeşitleri yer almaktadır. Tablo 6.2 de ise kağıt makinasını oluşturan ana ekipmanlar olan kayışlar , silindirler , rulmanlar ve dişlilerden ölçüm alınırken kullanılması gereken frekans aralıkları yer almaktadır. Önceden de belirtildiği gibi frekans aralığının seçimi arıza frekansının doğru olarak belirlenmesinde oldukça büyük önem taşımaktadır. Bu örnek ile kestirimci bakımın vazgeçilmez bir unsur olduğu kağıt sektöründe bu metodun bir kağıt makinası üzerinde nasıl tatbik edildiği gösterilmiştir.

7 ENDÜSTRİDE GERÇEKLEŞTİRİLEN DIAGNOSTİK UYGULAMALARI

7.1 Giriş

İlk altı bölümde titreşim analizi ile kestirimci bakım yöntemi tanımlanmış , bilimselliği ve getirdiği üstünlükler ıspatlanmış , ölçüm ve analizlere ilişkin teknik ve teorik bilgiler gerekli bağıntılarla ; pratik bilgiler ise istatistiki sonuçlar baz alınarak açıklanmıştır.

Bu bölümde ise şu ana kadar anlatılan teorik bilgilerin uygulaması ve mühendislik tarzında ıspatı niteliğinde olan , konu ile ilgili çalıştığım dönemlerde endüstrinin farklı iki dalında , iki ayrı fabrikada gerçekleştirilen diagnostik uygulamaları yer almaktadır.

Burada tüm detayları ile açıklanmış olan titreşim analizleri Altınyıldız Kumaş ve Konfeksiyon Fabrikası ile Kartonsan Kağıt fabrikasında gerçekleştirilmiştir. İçerik olarak problemin geçmişi, ortaya çıkış şekli , titreşim ölçümünün alınıp analiz edilmesi ve bu analizler sonucunda problemin teşhisi ile gerekli önerilerin yapılması bölümlerini kapsamaktadır. Böylelikle makinalar durdurulmadan yani üretim kesintisi olmaksızın arıza tespiti yapılmış , ekipmanların planlı duruş döneminde bakıma alınarak tamirleri sağlanmıştır. Sonuçta titreşim analizi ile kestirimci bakım hedefine ulaşmış tesislerin bu arıza durumlarından minimum maliyetle kurtulmaları sağlamıştır.

7.2 Elektrik Motorunda Aşırı Titreşime Yol Açan ve Kaynağı Gevşemiş Kayış Mekanizması Olan Fana Ait Diagnostik Uygulaması

Bu çalışma , Altınyıldız Kumaş Fabrikasında , ham kumaşların işlenerek satışa hazır hale getirildiği ve bu amaç ile yıkama , boyama ve kurutma sobaları olarak tabir edilen birçok makinanın bulunduğu nem oranı oldukça yüksek Apre bölümünde gerçekleştirilmiştir.

7.2.1 Probleme Neden Olan Sisteme Ait Bilgiler ve Titreşim Analizi ile Problemin Teşhisi

Söz konusu problem yukarıda tanımı yapılan Apre bölümündeki kumaşların bozulmasını önlemek amacıyla nem oranını dengede tutmak için çalıştırılan on adet büyük güçlü fandan birinde ortaya çıkmıştır.

Rutin olarak alınan titreşim ölçümlerinin birinde söz konusu fanı tahrik eden elektrik motorundan , ön taraftaki rulman yatağında yatay da alınan hız ölçümünde toplam titreşim değerinde (overall vibration) büyük artış olduğu tespit edilmiştir.

Spektrumun incelenmesi ile titreşim genliğinin motorda daha önceki ölçüm değerlerine göre tespit edilmiş alarm seviyesini aştığı belirlenmiştir. Bu sistem için motor nominal hızı 1450 RPM iken takometre ile fan hızının 1230 RPM olduğu saptanmıştır. Fan hızının kasnak mekanizmasındaki çevrim oranı ile belirlenmesi yerine takometre ile ölçülmesinin sebebi fan hızını etkileyebilecek olan kayış mekanizmasının kayması veya kasnaklar arasındaki mesafenin değişmiş olması olasılığıdır.

FFT spektrumunun incelenmesi sonucunda 2700 CPM frekansında yüksek genlikli sıradışı motor titreşimine rastlanmıştır. 2700 CPM'in ne motor dönüş hızı ne de fan dönüş hızı harmoniği olması nedeniyle titreşimin farklı bir kaynaktan geldiği düşünülmüştür. Yapılan hesaplamalar ile kayış frekansının ortalama olarak 540 CPM civarında olduğu belirlenmiştir. Bu rakam yani 540 CPM 2700 CPM ve diğer harmoniklerdeki titreşimin nedenini aydınlatmıştır.

7.2.2 Analiz ve Kararlar

Frekanslardan da açıkça görüldüğü gibi yüksek genlikli titreşimin olduğu frekans yani 2700 CPM kayış frekansının yani 540 CPM'in 5. harmoniğidir. ($540 \text{ CPM} \times 5 = 2700 \text{ CPM}$) Bu tespitten sonra yüksek genlikli titreşimin büyük olasılıkla gevşek bir kayıştan ileri geldiği kararına varılmıştır.

7.2.3 İlgili Firmaya Analiz Sonucu Verilen Tavsiyeler

Bu kararlardan sonra Altınyıldız Kumaş Fabrikası bakım elemanlarına aşağıdaki tavsiyelerde bulunulmuştur.

- Kayışın uygun gerginliğe getirilmesi ,
- Motorun ve kayışın ileride benzer bir durumla karşılaşılması için daha yakın takibe alınması ,

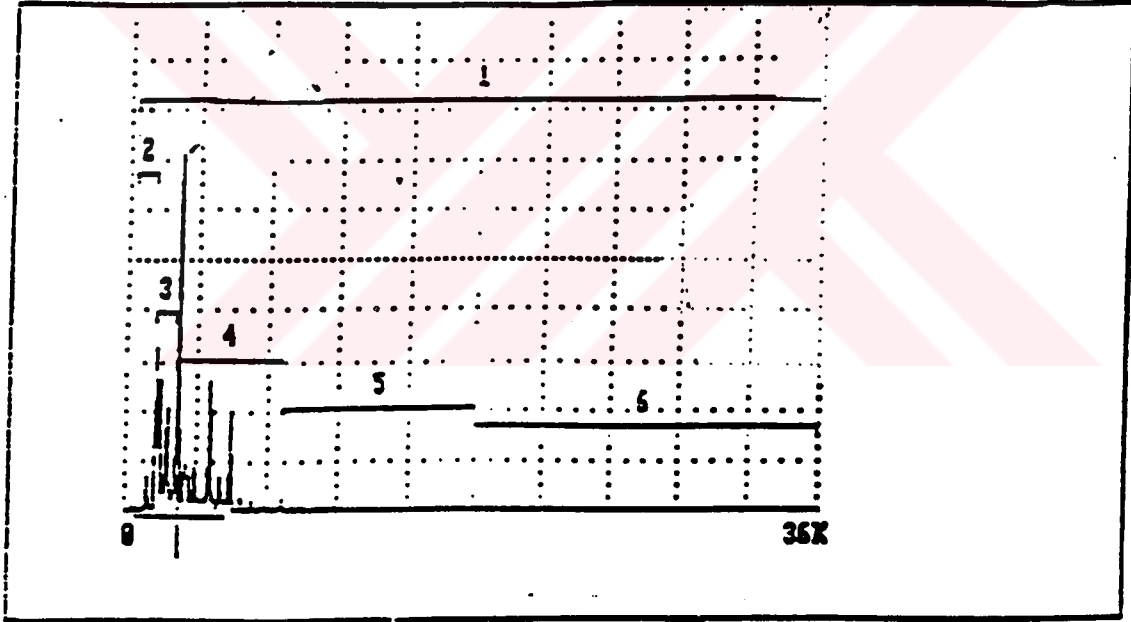
- c. Motor ve kasnak mekanizması arasında herhangi bir kayma var ise bunun giderilmesi .

7.2.4 Bakım ve Düzeltmeler Sonrası Alınan Titreşim Ölçümü ve Sonuçları

Verilen rapor doğrultusunda yapılan gerekli bakım işlerinin hemen ardından aynı motorda yine titreşim analizi ile inceleme yapılmıştır.

Buna göre kayışlar tamamen optimum gerginliğe getirildikten sonra 5 x kayış frekansındaki titreşim genliğinin ve diğer harmoniklerdeki genliklerin % 80 azaldığı gözlemlenmiştir.

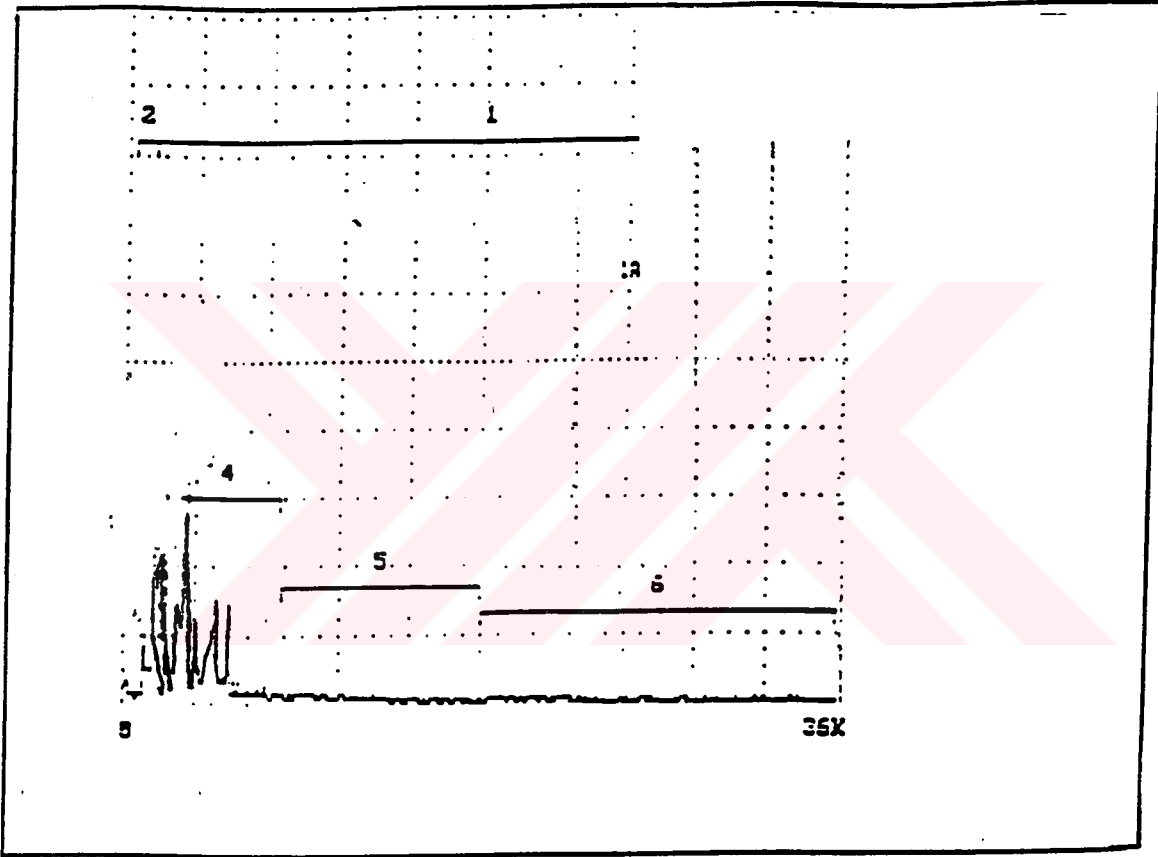
Bu tür gelişmeler aynı zamanda yüksek titreşim nedeni ile motorda kısa sürede oluşabilecek rulman arızası ve bunun gibi birçok problemlerin de önüne geçilmesini sağlamıştır. Motorun titreşimsiz çalışması uzun vade de ömrünün uzaması ile sonuçlanmıştır.



Şekil 7.1 : Problemlili sisteme ait spektrum ve titreşim genlik değeri.

Tablo 7.1: Bu ölçüm sonunda elde edilen titreşim frekans ve genlikleri.

<u>Frekans (CPM)</u>	<u>Genlik (mm/s)</u>	
1080.0	0.0349	2 x kayış frekansı
1230.0	0.1751	Fan dönüş hızı
14500.	0.14	Motor dönüş hızı
2160.0	0.1099	4 x kayış frekansı
2700.0	0.38	5 x kayış frekansı



Şekil 7.2: Kestirimci bakım sonrası verilen rapor doğrultusunda tamir edilmiş sisteme ait spektrum ve genlik değerleri.

Tablo7.2: Onarılmış sistemden alınan spektruma ait titreşim frekans ve genlikleri

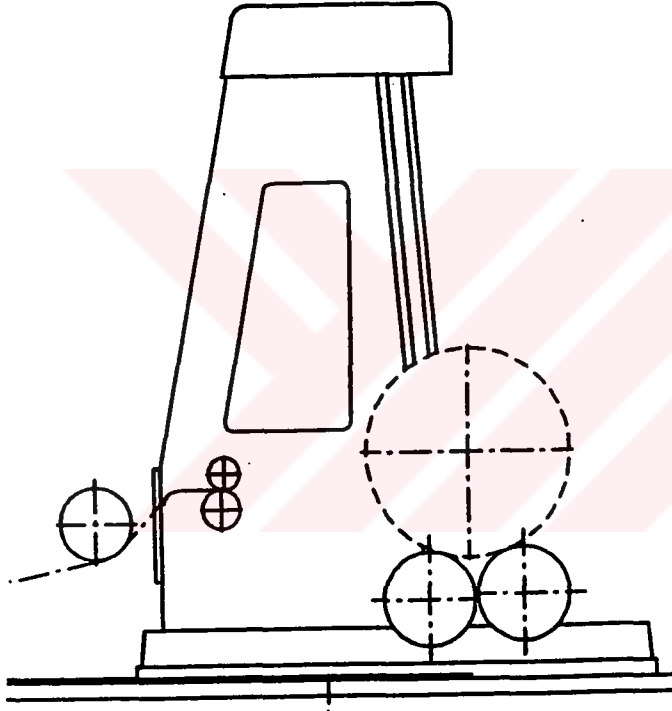
<u>Frekans (CPM)</u>	<u>Genlik (mm/s)</u>	
1080	0.0575	2 x kayış frekansı
1230	0.1250	Fan dönüş hızı
1450	0.0375	Motor dönüş hızı
2160	0.0375	4 x kayış frekansı
2700	0.0775	5 x kayış frekansı

7.3 Elektrik Motorundan Alınan Titreşim Ölçümü İle Teşhis Edilen Rulman ve Dişli Problemlerine Ait Diagnostik Uygulaması

Bu çalışma İzmit'in Kullar Köyü'ndeki Kartonsan Kağıt Fabrikasında Winder isimli makina üzerinde gerçekleştirilmiştir.

7.3.1 Sisteme Ait Bilgiler ve Alınan Ölçüm Tipleri

Bu makina ,altıncı bölümde genel görünüşü verilen kağıt makinasından çıkan kağıdı belirli aralıklar ile keserek bir rulo halinde sarma işlemini yerine getirmektedir. Makinanın yandan görünüşü Şekil 7.3 te olduğu gibidir.

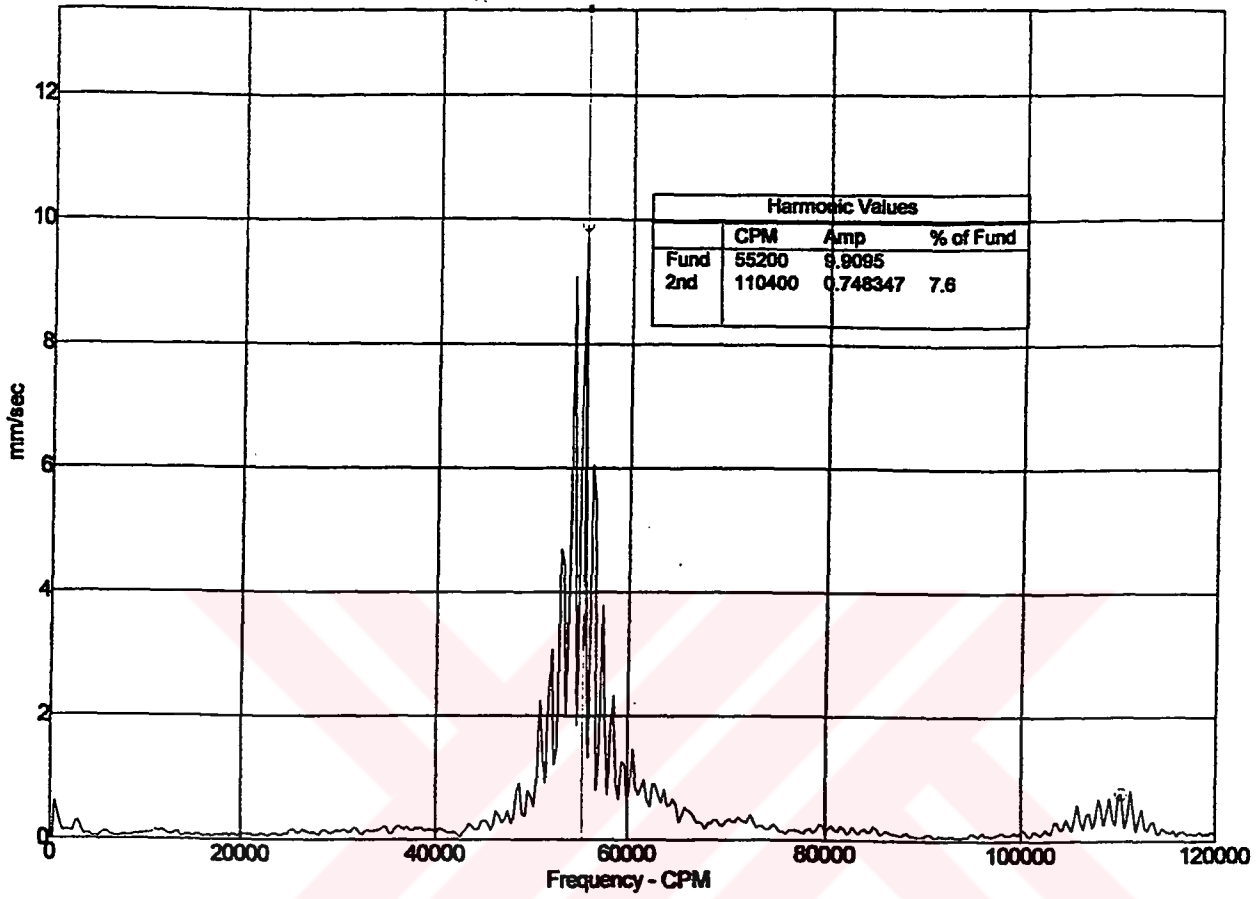


Şekil 7.3 : İşlenmiş haldeki kağıdı keserek rulo halinde saran winder makinasının görünüş şekli.

Sarma ve kesme işlemlerinden de tahmin edileceği gibi bu makina birkaç silindir , bunları tahrik eden motor ve motor hızını düşüren dişli sisteminden oluşmaktadır.

Söz konusu titreşim ölçümleri merkezleri arası 600 cm olan silindirleri süren motordan alınmıştır. Motorun ön ve arka tarafından yatayda hız ve ivme , dikey ve eksenel yönlerde ise hız ölçümleri alınmıştır. Buna ek olarak motorun ön tarafından G genlik birimli zaman dalga şekli ölçümü alınmıştır. Motorun ön tarafından yani redüktör girişinden alınan mm/s birimli (hız ölçümü) spektrum ile G birimli (ivme ölçümü) gerçek zamanlı titreşim ölçümleri Şekil 7.4 ve 7.5 te olduğu gibidir.

winder.1.motor:red.gir
11-Sep-98 21:39:04



1: red.gir
Velocity (Acc to Vel) (Peak)
10-May-99 10:26:30

POINT Id: red.gir

Desc:

Set Id: CELHART
Date: 10-May-99 10:26:30
Freq: 0.0 - 120000.0 CPM
Detect: Peak

Window: Hanning
Lines: 400
Aver: 4
Type: FFT and Time

Speed: 0.000 RPM
Threshold: 1.000000
Units: mm/sec

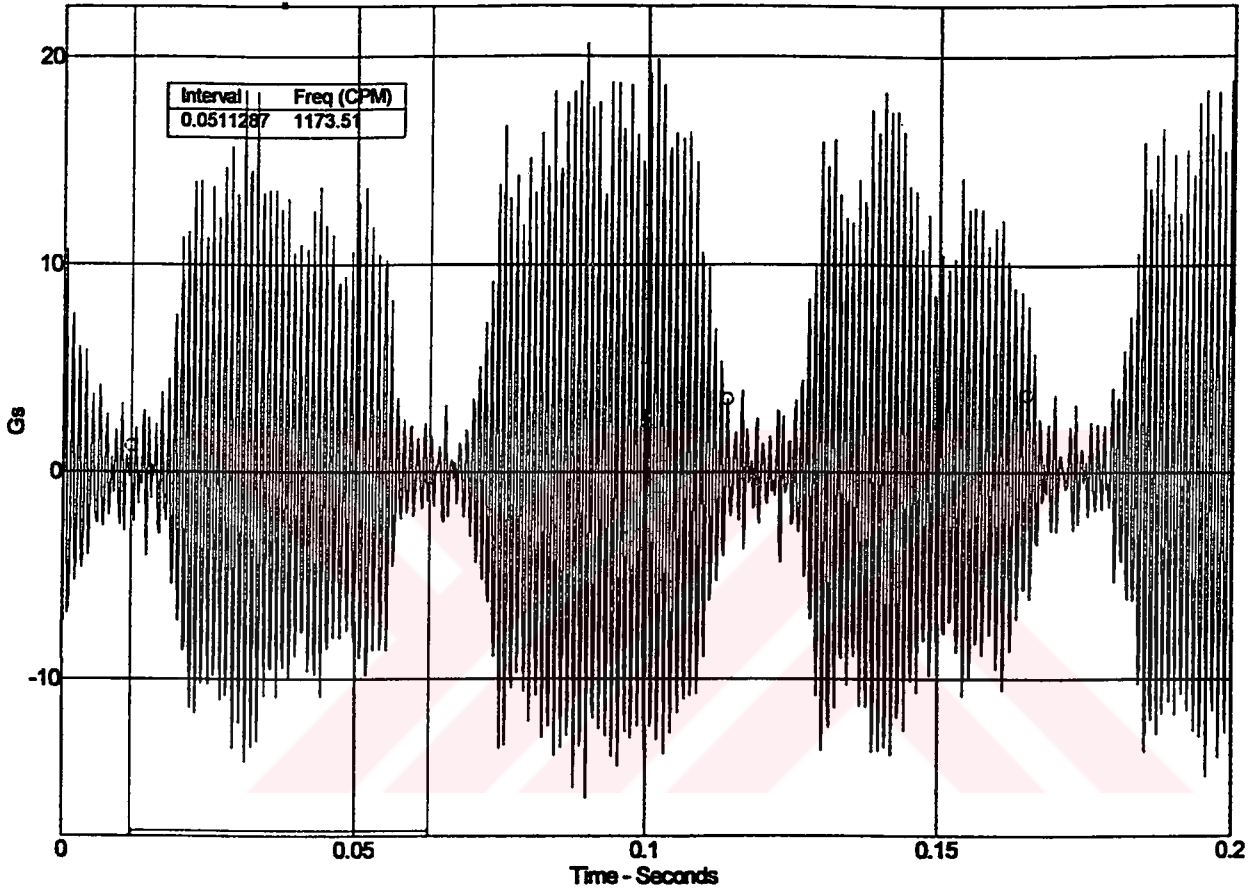
Overall: 18.203
Sync: 0.000
SubSync: 0.000
NonSync: 0.000

Spectral Peaks Above Threshold

#	Amplitude	Frequency (CPM)	Order	#	Amplitude	Frequency (CPM)	Order
1	2.242	50700.000	0.000	6	6.059	56100.000	0.000
2	3.074	51900.000	0.000	7	3.788	57300.000	0.000
3	4.694	52800.000	0.000	8	2.324	58500.000	0.000
4	9.080	54000.000	0.000	9	1.253	59400.000	0.000
5	9.909	55200.000	0.000	10	1.456	60600.000	0.000

Şekil 7.4 : Redüktör girişinden yatayda alınan mm/s birimli hız ölçümü.

winder.1.motor:red.gir
11-May-99 21:34:05



1: red.gir
Time
10-May-99 10:26:30

POINT Id: red.gir

Desc:

Set Id: CELHART Type: FFT and Time Date: 10-May-99 10:26:30
Window: Uniform Lines: 1023 Aver: 4 Seconds: 0.0000 - 0.2000
Detect: Peak Speed: 0.0 RPM Threshold: 1.000000

Şekil 7.5: G birimli redüktör girişinden alınan gerçek zamanlı ivme ölçümü.

7.3.2 Analiz ve Kararlar

Sistemdeki redüktör giriş hızının 1200 RPM olduğu bilinmektedir

Şekil 7.4 deki spektrumda Hanning pencere kullanılmış ,frekans aralığı 120000 CPM seçilmiş , 400 çizgilik FFTçözünürlüğü ile 4 ortalama alınarak ölçüm yapılmıştır. Titreşim genlik birimi mm/s iken bu genliklerin tepe değerleri ölçümlenmiştir.

Ölçüme ait toplam titreşim değeri (overall vibration) 18.203 mm/s kadardır

Bu spektrumda analize ait en can alıcı bilgiyi ise 55200 CPM frekansında görülen 9.909 mm/s genlikli yüksek titreşim vermektedir. Problemin kaynağının anlaşılması için bu frekansın neye ait olduğunun belirlenmesi gerekmektedir.

Bu doğrultuda sürdürülen çalışmalar sonrasında gerek bakım personelinin alınan bilgiler gerekse yapılan basit bir hesap ile sisteme ait dış frekansının 55000 civarında olduğu belirlenmiştir. Gerçekten de aşırı titreşim görülen arıza frekans yani 55200 CPM redüktör giriş hızı olan 1200 ile bölündüğünde ($55200/1200 = 46$) 46 rakamı elde edilmektedir. Kesirsiz olarak elde edilen bu sonuç ile 55 200 CPM'in dış frekansı olduğu kesinleşmiştir.

Spektrum dikkatle incelendiğinde 110 400 CPM frekansında yani dış frekansının 2. harmoniğinde de düşük genlikte de olsa titreşimin var olduğu görünmektedir. Bu tespitlerden yola çıkarak aşırı titreşime dış yüzeylerindeki aşınmanın yol açtığı sonucuna varılmıştır.

Öte yandan şekil 7.5 teki zaman dalga formu incelenirken frekanstan zaman birimine dönüş gereklidir. 1200 CPM lik redüktör frekansı bir başka deyişle 20 Hz'e eşittir. Bu da $f = 1/T$ bağıntısından $T = 0.05$ s değerini bize verir. Zaman dalga formu bu periyot etrafında yer alan dış frekanslı yan bandlar ve oldukça net görülen , harmonikli yapısı ile spektrumdan elde edilen analiz sonucunu destekler niteliktedir.

Silindiri tahrik eden elektrik motorunun arka tarafından yatayda alınan mm/s genlikli hız ölçümü Şekil 7.6 da görüldüğü gibidir.

Bu spektrumda frekans aralığı 0-30 000 CPM olarak seçilmiş , yine hanning pencere , 400 çizgili çözünürlük ve 4 ortalama kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar titreşim genliğinin tepe değerine aittir.

Spektrum incelendiğinde 4050 CPM ve harmoniklerinde hemen hemen tüm harmoniklerinde titreşim göze çarpmaktadır. Seviye olarak çok yüksek olmasada bu denli harmonikli yapı tekrar edici (repetitive) tip arıza sinyalleri şeklinde kendini gösteren rulman hasarının oluşmuş olabileceğini düşündürmüştür.

Rulman arızasının varlığı hakkında kanı oluşmasının diğer bir nedeni de açıkça görülen gürültü tabanının varlığıdır.

Güvenilirlik tabanlı bakım mühendisliğinde rulman ömrü 4 ayrı safhaya ayrılmıştır.

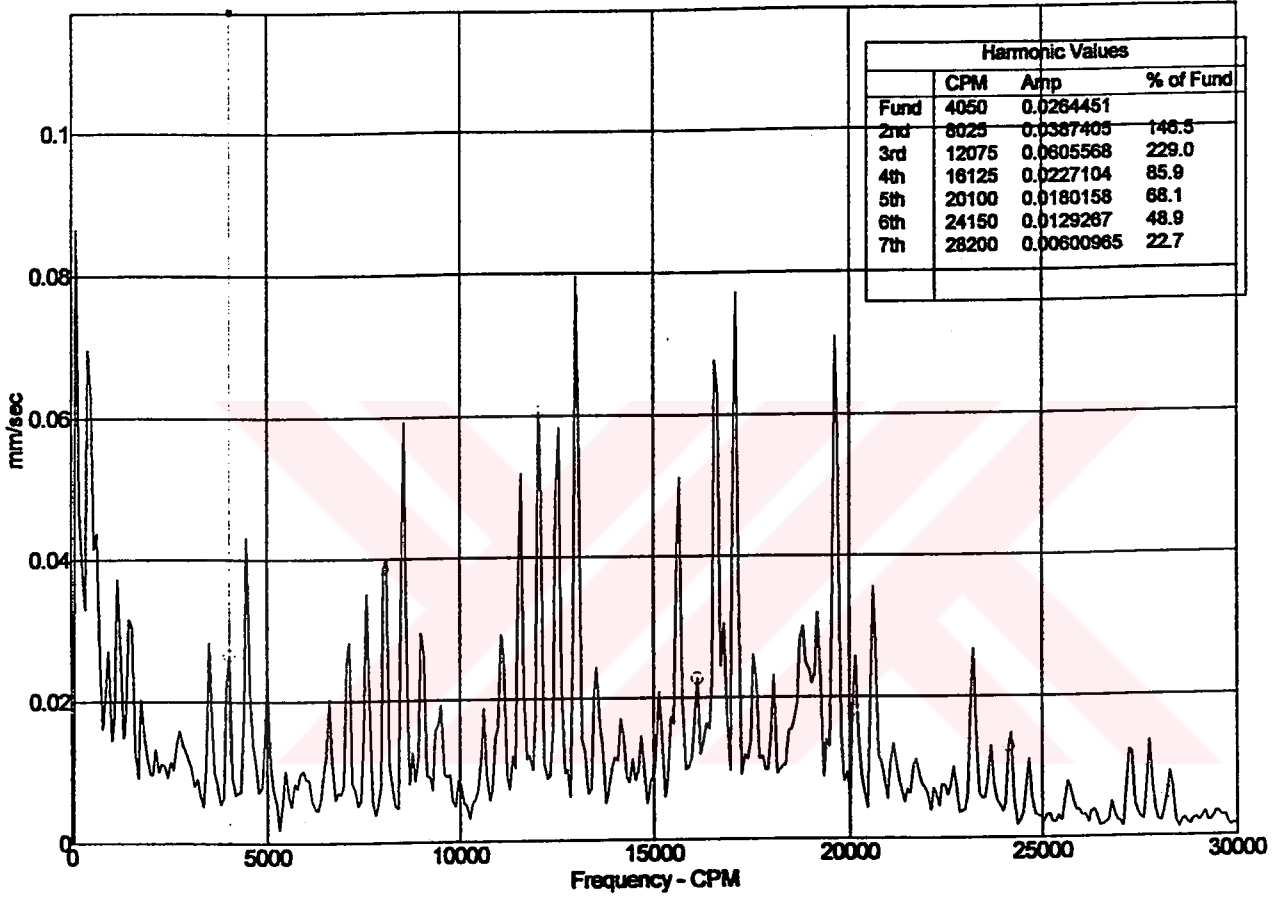
Birinci safha rulmanın sağlam olduğu , yani düşük genlikli titreşim sinyali ürettiği zaman dilimidir. İkinci safha ise rulmanın aşınmaya başladığı yani titreşim sinyali genliklerinin giderek arttığı zaman dilimidir. Üçüncü safha ise rulmanın artık hasarlı hale geldiği yüksek titreşimin yanı sıra harmonikli spektrumlar oluşturduğu zaman dilimidir. Kestirimci bakımda hedeflenen rulmanı daha geç olmadan bu safhada yakalayıp değiştirmektir. Dördüncü safha ise rulmanın aşınmalardaki aşırı ilerlemeden dolayı artık yalama diye tabir edilen hale gelmesi ve bu nedenle ürettiği arıza sinyal genliklerinin düştüğü , gürültü tabanlı spektrumlar halinde kendisini gösterdiği zaman dilimidir. Eğer rulmanın bu safhada olduğu anlaşılırsa derhal müdahale edilerek değiştirilmesi gereklidir.. Aksi halde rulmanın çok kısa bir süre içinde dağılması ve içinde bulunduğu motoru da etkileyerek çok büyük mali kayıplara neden olması söz konusudur.

Şekil 7.6 da görülen spektrumda yapılan incelemeler sonucunda fabrikanın bakım bölümünden motorda kullanılan rulmanın tip numarası istenmiş , bu tipten yararlanılarak rulman arıza frekansı rulman frekans tablosundan belirlenmiştir. Buna göre söz konusu rulmandaki iç bilezik rulman hasar frekansının 4050 CPM olduğu anlaşılmıştır. Böylelikle gürültü tabanının da varlığı göz önünde bulundurularak rulmanda iç bilezik aşınmasının söz konusu olduğu ve dördüncü safhaya ulaşıldığı sonucuna varılmıştır. Motorun derhal durdurularak rulmanının değiştirilmesi kararlaştırılmıştır.

7.3.3 İlgili Firmaya Analiz Sonucu Verilen Tavsiyeler

Analizler sonrası fabrika bakım personeline verilen raporlarda aşınmış dişlerin tamiri , bu mümkün değilse dişlinin değiştirilmesi ve elektrik motoru arka rulmanının motor hemen devre dışı bırakılarak yenilenmesi önerilmiştir.

winder.2.sal.v
11-Sep-98 21:56:40



1: 2.sal.v
Velocity (Acc to Vel) (Peak)
10-May-99 10:37:58

POINT Id: 2.sal.v

Desc:

Set Id: CELHART
Date: 10-May-99 10:37:58
Freq: 0.0 - 30000.0 CPM
Detect: Peak

Window: Hanning
Lines: 400
Aver: 4
Type: FFT and Time

Speed: 0.000 RPM
Threshold: 1.000000
Units: mm/sec

Overall: 0.319
Sync: 0.000
SubSync: 0.000
NonSync: 0.000

Şekil 7.6: Elektrik motoru arka tarafından alınan mm/sgenlikli hız ölçüm spektrumu.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada gerek teorik olarak gerekse endüstrideki gerçek uygulamalarıyla pratik olarak ısıpat edilen sonuçları dört ana bölüm altında toplamak mümkündür. Bu dört bölümden ilk üçü sırası ile kestirimci bakımın diğer bakım türleri olan arıza sonrası bakım ve önleyici bakım ile karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlar , titreşim sinyalinin kestirimci bakımdaki en önemli değerlendirme parametresi olduğunu gösteren sonuçlar ve titreşim analizinin endüstrideki uygulamaları sırasında daha sağlıklı analiz yapılması çalışmaları esnasında elde edilen analize ilişkin sonuçlar ana başlıkları altında yer almaktadır. Dördüncü bölüm ise bu yöntemin eksik yanlarını , zayıf noktalarını ortaya koyan sonuçlardan oluşmaktadır.

Kestirimci bakım diğer klasik bakım metodlarından üstündür , çünkü izlemeye dayalı kontrol bu çalışmadaki teorik ve pratik olarak açıklanan nedenlerden dolayı beklenmedik duruş zamanlarının minimuma indirilmesi, sık sık karşılaşılan acil durumların ortadan kaldırılması , ekipmanın güvenilirliğinin ve dolayısıyla çalışanların güvenliğinin artırılması , yüksek makina performansı ve dolayısıyla enerji tasarrufu elde edilmesi , yüksek ürün kalitesine ulaşılması , kesintisiz üretim sağlanması , bakım personelinin proses bilgisinin artırılması şeklinde özetlenecek ve günümüzde birçok üretim merkezinin ideali haline gelmiş hedeflere ulaşılmasına olanak sağlamaktadır.

Kestirimci bakımda özel birtakım ekipman ve analiz teknikleri iç içe kullanılmaktadır. İsmi “Kestirimci bakım ve elektrik motorlarında titreşim analizi ile erken arıza teşhisi” olan bu çalışmada , kestirimci bakım çok yönlü olarak tanıtılmış , elektrik motorlarındaki problemlerin henüz arıza meydana gelmeden önce erken teşhis edilmesinde ve getirilen çözüm önerilerinde titreşim analizi ile arıza tespiti yol olarak seçilmiştir. Bu yolla motorlardaki hangi elektriksel problemlerin nasıl tespit edildiği gerek teorik gerekse pratik anlamda açıklanmış , analize ait püf noktaları vurgulanmıştır.

Kestirimci bakımın kullandığı teknikler başta titreşim analizi olmakla birlikte termografik test , ultrasonik test , infrared inceleme , yağ analizi , motor akım takibi olarak özetlenebilir

Titreşim, kestirimci bakımdaki en önemli değerlendirme parametresidir , çünkü problemin sadece, şiddetinin ve ne olduğunun değil , aynı zamanda kaynağının da belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla beraber geçmiş ölçüm sonuçları ile yenilerinin karşılaştırılmasına olanak sunduğu için sağlıklı değerlendirme imkanı verir. Bunların yanı sıra titreşim ekipmanları alarm seviyesine ulaşıldığında ilgili motora durdurma emrinin gitmesini de sağlayabilir , bu nedenle kontrolle birlikte koruma görevini de yerine getirebilir. Diğer değerlendirme parametreleri ise problemin büyüklüğü hakkında bu denli net bilgi vermemekte ve problemi doğuran nedenin belirlenmesi konusunda oldukça yetersiz kalmaktadırlar. Endüstride diğer değerlendirme parametreleri ile analizler sonucunda bir problem belirlenip düzeltildiğinde dahi kaynağı bilinmediği yani sorunu yaratan etken giderilmediği için problemlerin yinelenmediği , benzer sorunlarla tekrar karşılaşıldığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, elektrik motorlarında titreşim analizi ile arıza tespitinin yanısıra alternatif akım motorları için motor akımının izlenmesine dayanan hata bulma teknikleri tanıtılmıştır. Pratik uygulamalar sonucunda kestirimci bakım programı yürütülürken motor kontrolü için titreşim analizinin yanısıra motor akımı izlemeye dayalı kontrol metodunda kullanılmasının analizlerde daha kesin sonuçlar elde etmeye olanak sağladığı anlaşılmıştır.

Çalışmalar sırasında elde edilen analize ilişkin sonuçlar ise en temelden detaya göre şu şekilde sıralanabilir. Titreşim genliği önemlidir , çünkü problemin büyüklüğü ve şiddeti hakkında bilgi verir , alarm seviyelerinin saptanmasını sağlar. Frekans ise problemin kaynağının belirlenmesini sağlar. Titreşim analizinin sağlıklı yapılması bu iki değer ne kadar doğru olarak ölçümlendiğine bağlıdır. Bunun yoluda ölçümler alınırken frekans aralığının ve spektral çözünürlük çizgi sayısının doğru seçilmesinden geçmektedir. Yüksek çizgi sayılı çözünürlük kullanılması frekansın belirlenmesinde doğruluk oranını artırır , fakat sürekli yüksek çözünürlük kullanmak hem ölçüm süresinin oldukça uzamasına hemde bilgi toplayıcılardaki spektral bilgi depolama kapasitesinin kısa sürede dolmasına neden olacaktır. Analizin doğru olarak yapılmasına etkiyen bir diğer faktörde frekans aralığıdır. Frekans aralığı genişledikçe okunan frekanslardaki doğruluk oranı düşecektir. Öte yandan frekans aralığının

oluşması muhtemel arızaların görüntülenmesine izin verecek kadar geniş seçilmesi gereklidir. Bu tür ayarların daha iyi yapılması tesisteki ekipmanların daha iyi tanınması ile sağlanacaktır.

Ölçüm sonuçları değerlendirilirken alarm seviyelerinin tespitinde motorların üretim kalitesi , çalışma koşulları , daha önce bakıma girip girmediği , markası gibi etmenler önemli rol almaktadır. Bu nedenle tercih edilen hareket tarzı alarm seviyelerinin yazılı olduğu standart titreşim tablolarını takip etmek yerine eski ve yeni sonuçların karşılaştırmasını yaparak bağıl değişimi hesaplamak , yani trend analizi yoluna gitmek olmalıdır.

Titreşim analizi ekipmanları sadece genlik ölçen çok basit yapıdaki sensörlerden aynı anda yüzlerce veriyi değerlendirecek gelişmiş görüntüleme sistemlerine uzanan geniş bir ürün yelpazesini içermektedir. İşletmeye bu geniş ürün ağından hangi grubun uygun geleceğini şüphesiz üretim hattındaki kritik ekipman adedi ve bu ekipmanların gerçekte ne kadar önemli oldukları belirleyecektir.

Teori ve pratikte bilgi ve deneyim gerektiren bu metodun uygulanmasındaki en önemli kural ise bildiğin şey üzerinde yorum yap , bilmediğin şey üzerinde hükümde bulunma şeklinde özetlenebilir. Çünkü analiz verisi yetersiz olan ve soru işaretleri ile dolu bir problem hakkında yanlış teşhis koymak bilmiyorum demekten çok daha kötü sonuçlar doğurabilmektedir.

Araştırılan ve uygulamaya konan her yeni metodun bilindiği üzere üstünlüklerinin yanı sıra birtakım eksik yanları mevcuttur. Bu teze konu olan titreşim analizi ile elektrik motorlarında arıza tespitinin de iki zayıf noktası bulunmaktadır.

Bu zayıf noktalardan ilki kestirimci bakım sistemlerinin pahalı olmasıdır. Gerçektende herhangi bir tesisin bu tür bir uygulamaya geçmesi oldukça büyük maliyetlere yol açmaktadır. Maliyetin büyüklüğü seçilecek kestirimci bakım sisteminin cinsinde bağlıdır. Örneğin ürün kalitesinin özellikle ön plana çıktığı kağıt sektöründe genellikle on line görüntüleme sistemleri tercih edilmektedir , böyle bir sistem için ise 100 000 \$ ile 200 000 \$ arası bir harcama gerekmektedir. Portatif cihazlar ile bilgi toplayıp bunların analizi yolu tercih edilirse rakamlar ortalama 25 000 \$ civarında olmaktadır. Dolayısıyla kestirimci bakım rekabet halinde olan ve yatırım gücü bulunan şirketler tarafından tercih edilmektedir.

İkinci zayıf nokta ise sistemin konu hakkında eğitimli , mühendislik formasyonuna sahip ve çalışma saatlerinde kapsamlı olarak bu konu ile ilgilenecek personele ihtiyaç duymasındır.

Bu konu hakkında yeterli bilgi ve tecrübeye sahip insanın az olması nedeni ile eğitim seminerleri oldukça yüksek fiyatlara verilmekte ve genelliklede yurtdışında gerçekleştirilmektedir. Bunlara ek olarak , yapılan araştırmalar bir elektrik mühendisi yada makina mühendisinin sadece işinden arta kalan mesai saatlerinde konu ile ilgilenmesinin kestirimci bakım programından yeterince yararlanılamamasına yol açtığını ve verimi düşürdüğünü göstermiştir.

Kestirimci bakım , satın alınıp kullanılması başlangıçta oldukça yüksek maliyetlere neden olmasına rağmen yukarıda adları geçen faydaları nedeniyle kendini kısa sürede amorti etmekte ve özellikle kesintisiz üretim ve ürün kalitesinin vazgeçilmez unsurlar olduğu kağıt , tekstil , gıda , çimento , petrokimya , otomotiv vb sanayilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Arıza sonrası bakımın sadece küçük işletmelerde kullanılmakta olduğu ve önleyici bakımdan kestirimci bakıma doğru süratli bir geçişte olan , fakat kısıtlı sayıdaki eğitimci ve çok pahalı eğitim seminerleri nedeniyle analiz tekniklerinin oldukça sınırlı olarak bilindiği ülkemizde bu çalışmanın izlemeye dayalı kontrol ve elektrik motor problemlerinin erken teşhisi konularına aydınlık getireceğini umuyorum.

KAYNAKLAR

- [1] Eyvazian, G., 1994. Vibration Diagnostic Guide , SKF Condition Monitoring , USA
- [2] Johnson, D. and Eyvazian, G., 1993. How To Understand and Buy Condition Monitoring Equipment, SKF Condition Monitoring, USA.
- [3] Jundgart, B., 1988 . Using Transducers For Mazhinery Fault Detection, *Sensors Magazine Helmers Publishing Inc.*
- [4] Wowk, V., 1991. Machinery Vibration Measurment and Analysis, Mc Graw Hill Book Company.
- [5] Watts, B. and Dyke, J.V., 1993. An automated Vibration – Based Expert Diagnostic System, *Sound and Vibration Magazine Eylül 1993.*
- [6] Mitchell, J.S., 1981. Machinery Analysis And Monitoring , Pennwell publishing Company , Tulsa Oklahoma USA.
- [7] Berry, J.E., 1993 . Electrical Problems Level II , *Vibration Analysis Seminar by Technical Associates of Charlotte Inc, Charlotte USA.*
- [8] CSI (Computational Systems Incorporated) 1992, Broken Rotor Bars, Application Paper , USA
- [9] Berry, J.E., 1993 . Principles Of Data Digital Acquisition For Spectral Analysis Level II , *Vibration Analysis Seminar by Technical Associates of Charlotte Inc, Charlotte USA.*
- [10] Vibrant Technology Inc., Nisan 1997. The FFT , Leakage and Windowing, ME' scope Application Note # 1.
- [11] Mc Hargue, P.L. and Richardson, M.H., 1993. Operating Deflection Shapes From Time Versus Frequency Domain Measurments, presented at 11. IMAC Conference , Kissimme, FL
- [12] Vibrant Technology Inc., Nisan 1997. Computing Linear and Auto power Spectra ME' scope Application Note # 10.
- [13] Dr Jones, B., 1997. AC Induction Motor Monitoring, *Revolutions Magazine.*

- [14] **SKF Condition Monitoring**, 1996. AC Motor Analysis, SKF Application Reference Catalog.
- [15] **SKF Condition Monitoring**, 1996. Features Of The On Line Monitoring System, SKF Application Reference Catalog.
- [16] **Herr, G.**, 1997. Qualifying Electric Motors On -Line , *Revolutions Magazine*.
- [17] **Watts, B. and Dyke, J.V., Şubat 1994.** Vibration Based Expert Diagnostic System Accuracy and Methodology, *P/PM Technology Magazine*.



ÖZGEÇMİŞ

Sinan Saraç 02.06.1975 tarihinde İstanbul'da doğdu. Sakıp Sabancı Yıldız İlkokulu'nun ardından Orta ve Lise öğrenimini Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi'nde gördü. 1997 yılında ise İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Elektrik Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Elektrik mühendisliği programında yüksek lisans yapmaya hak kazandı.

