

예지정비(PdM)와 Expert System

°전 형 식*, 데이브 밴다이크**

(Successful Application of an Expert System to Predictive Maintenance)

(Hyong-Shik Chun, David J. Van Dyke)

1. 서론

진동 스펙트럼분석을 통한 회전기기의 상태를 평가하는 데에는 세가지 종류의 정보를 알아야 한다.

- 1) 기기에 존재하는 진동 원인이 무엇인가?
- 2) 해당 기기의 정상적인 진동특성이 어떠한 것 인가?
- 3) 어떤 종류의 기기결합의 존재가 그 기기의 진동특성을 어떻게 변화 시키는가?

어느 한 기기에 대하여 위와 같은 모든 정보를 접할 수 있는 진동분석 담당자는 그 기기의 어떠한 결합이라도 정확하게 진단할 수 있다. 같은 방법으로 컴퓨터 시스템도 진동분석가처럼 위의 세가지 정보를 알고 각각의 지식을 적절히 적용한다면 진동분석가와 같은 혹은 더 합리적인 진동분석을 할 수 있다.

이와같은 원리는 문헌[1]에 기술된 전문가자동진단시스템(Expert Automated Diagnostic System, EADS)에 의해 적용되고 있다. 이 전문가자동진단시스템(EADS)은 예지정비(Predictive Maintenance, PdM)능력을 크게 향상시킬 수 있는 자동으로 전문적인 진동특성을 분석할 수 있는 능력을 갖춘 정비관리자 체계를 제공하고 있다.

2. 전문가자동진단시스템(EADS)의 운영원리

전문가자동진단시스템(EADS)는 자동화된 기기진단을 위하여 세가지 중요한 데이터베이스(database)를 사용한다.

- o 기기 기본정보 베이스(Machinery Knowledge Base)
- o 평균 스펙트럼 데이터베이스(Average Spectra Database)
- o 스펙트럼 분석 규칙 베이스(Spectrum Analysis Rule Base)

MACHINERY KNOWLEDGE BASE는 Expert System이 각 기기의 구성요소와 형태를 인식하고 정의를 내릴 때에 필요한 정보를 포함하고 있다. 그것은 또한 기기의 전반적인 묘사 예

를 들면 "Motor Coupled to a Pump"같은 정보와 회전속도, 피니언 톱니(Pinion Teeth)의 수와 펌프날개(Pump Vane)의 수와 같은 가진주파수 요소등을 포함한다. 이 기기정보 Database를 어느정도로 완성하느냐에 따라 전문가자동진단시스템(EADS)으로 알아내는 기기결합의 정보의 정확성이 결정되어진다. 매우 복잡한 기기에는 이 기기정보 Database가 차지하는 비중이 크지만 일반구조의 기기정보는 수집하기가 간단하고 수월하다.

AVERAGE SPECTRA DATABASE는 각각의 대표적인 기기종류의 상대적으로 건강한 기기로부터 수집한 진동스펙트럼의 집합체이다. 여러개의 유사한 기기들로부터 측정된 진동스펙트라는 그 기기에 의해 정해지는 그 기기만의 정확한 기본 데이터(baseline data)로 쓸 수 있는 한개의 평균 스펙트럼으로 결합할 수 있다. 이 Database는 Expert System에 지금 시험중인 어느 특정기기에서 기대할 수 있는 진동특성이 무엇인 지를 정확히 알려준다. Average Spectra Database는 진동측정 프로그램의 초기단계에서 정상적 상태에서 가동중인 상대적으로 건강한 기기들로부터 측정된 진동특성을 분석하고 포함시켜 특정 기기의 평균 Data File로 만들게 된다.

SPECTRUM ANALYSIS RULE BASE는 기기 진단분야에서 전문가들의 기기 진단지식을 축적한 Database를 말한다. 이 규칙들은 Expert System에게 현재의 스펙트럼에서 각각의 가진주파수에서의 피크치와 평균스펙트럼의 피크치와의 편차를 어떻게 분석하여야 하는가를 알려준다. 이 Database는 수계산에의한 결과를 상용하는 스펙트럼 데이터의 특성과 비교하며 그들의 관계를 논리적 검정체계에 한계진폭적용이라는 과정을 거쳐 만들어지게 된다. 이 과정은 진동분석자가 알기를 기대하는 관점에서는 논리적이라 표현할 수 있지만 오랜 시간을 두고 형성되는 관점에서 경험적이라 말할 수 있다. 이 Rulebase는 계속적으로 가장 경험이 많은 진동분석가의 분석과정을 가장 밀접하게 근접할 수 있도록 수정되어진다.

그림 1은 세 개의 중요한 Database가 진동특성 분석과정

* UVCOn Engineering Corp., Chicago, Illinois, USA
 ** DLI Engineering Corp., Bainbridge Island, WA, USA

에 적용되는 과정을 설명하고 있다. 첫째와 두번째 Database는 EADS를 적용하는 기기에 따라 다르게 작성된다. 이 두가지 Database는 어느 특정 사용자에게 따라 새로이 그리고 다르게 작성되며 계통업무를 극대화하기 위하여 반복적으로 개선하고 또한 수정한다. 그러나 Spectral Analysis Rule Base는 일반적으로 적용할 수 있는 전문적 규칙의 집합체로써 여러가지 종류의 기기중 기기별로 적용할 수 있도록 규칙을 분류할 수 있다. EADS의 저자들은 이와 같은 규정들을 수년간에 걸쳐 축적하여 왔다. 이 규칙 Database는 어느 때나 수정이 가능하며 능력있는 EADS의 사용자라면 이 규칙 Database를 일부 또는 전부를 업무의 최대 활용화를 위해 새로 만들거나 수정할 수 있다.

3. 기기별 스펙트럼 분석(COMPONENT SPECIFIC SPECTRAL ANALYSIS)

EADS를 구성하는데 가장 중요한 요소는 여러종류의 기기들에 적용할 수 있도록 스펙트럼 분석규칙을 세분화하는 것이다. 자동분석을 이와같은 개념에 기반을 둬으로써 분석 체계에 다양성을 부여하게 된다. 예를 들면 공장 "A", "B", "C"에 있는 모터의 진동분석을 위하여 개발된 진단규칙들은 공장 "D"에 있는 모터들이 실사 다르게 쓰여진다 할 지라도 곧바로 같은 규정을 적용할 수 있다. 이와같은 방법으로 수많은 기기의 진동문제들로부터 얻은 경험을 축적하여 포괄적이며 합리적인 규칙 Database를 만들게 된다.

4. 회전속도정규화 및 캡스트럼분석(ORDER NORMALIZATION AND CEPSTRUM ANALYSIS)

여러 세트의 스펙트라를 평균스펙트라 Database에 통합시키거나 현재의 스펙트라 세트를 평균 데이터에 비교할 때에는 이 일련의 스펙트라를 회전축 속도(Reference Shaft Speed)에 정규화한 스펙트라(Normalized Spectra)로 재편성하여야 한다. 수년간에 걸쳐 정규화절차(Normalization Procedure)를 시험하여 왔고 심층적으로 수정하여 현재의 정규화 절차를 확립하여 일정한 회전속도를 가진 일반기기는 물론, 복잡한 가변 회전속도를 가진 기기까지도 정확하게 회전속도를 알아낼 수 있다.

자동진단시스템의 융통성과 그의 설치에 중요한것은 베어링(Bearing)과 기어(Gear)의 결함을 알아내는 데에 문헌 [2]에 기술된 캡스트럼분석(Cepstrum Analysis)의 사용이다. 캡스트럼을 이용한 패턴인식기법(Pattern Recognition Scheme)을 이용하여 Rolling Contact 베어링의 결함을 알아

낸다면 베어링의 가진주파수를 알아내는데에 통상적으로 필요한 베어링 타이프나 베어링의 기하학적 구조에 대한 상세한 정보를 필요로 하지 않는다.

5. 융통성과 확장성(FLEXIBILITY AND EXPANDABILITY)

전문자동진단시스템(EADS)의 핵심은 많은 경험있는 분석가들의 전기모터나 왕복동압축기같은 일반기기들에서 얻은 경험을 바탕으로 만들어졌지만 특이하거나 유일무이한 기기들을 분석하기 위하여 사용자가 용이하게 진단시스템을 확장할 수 있다. 본질적으로 이 진단시스템은 프로그래밍이 가능하며 특히 주 입력데이터로 스펙트럼 데이터를 자동으로 받아드리도록 설계된 전문진단시스템이다. 이 시스템은 오일의 온도나 압력같은 진동데이터가 아닌 데이터도 이용할 수 있도록 되어있다. 진단시스템 사용자는 스펙트럼분석에 대한 자신의 경험과 지식을 진동특성분석이 유용하다고 생각되는 기기종류나 시스템의 범주를 신장함으로써 진동진단시스템에 포함시킬 수 있다. 이 방식으로 정비관리자들은 진동자동진단시스템(EADS)이 결코 진부하지 않으며 공장 기기구조가 바뀌거나 진단기술요원이 바뀌어도 이에 영향이 없이 진단시스템을 사용하는데에 아무 제약이 없음을 확신할 수 있다.

6. 품질보증(QUALITY ASSURANCE)

어떠한 테스트 프로그램을 수행하더라도 양질의 데이터를 획득하고 유지하는 것은 매우 중요한 일이다. 이 업무는 스펙트라 데이터의 측정이나 기기에 대한 지식이나 평균 스펙트럼 데이터의 결정이나 진단규정 Database의 작성 및 수정을 포함한다. 전문자동진단시스템(EADS)으로 얻을 수 있는 기기결함진단의 신빙성은 여러가지 입력데이터의 전반적인 건전성에 달려있다. 입력된 스펙트럼 데이터는 Transducer와 관련된 어떤 결함도 없어야하며 Transducer와 기기 베어링의 하우징(housing)간에 확실한 진동전달경로를 확인한 후에 측정된 것이어야 한다. 진동데이터 측정을 위하여 선정된 위치는 같은 종류의 기기끼리는 동일한 위치이어야 하며 평균스펙트럼 데이터에 적절하게 데이터축적을 할 수 있을 뿐만 아니라 평균스펙트럼 데이터와의 정확한 비교를 할 수 있도록 반복적이어야 한다. 마찬가지로 기기 정보도 가진주파수를 정확하게 기술할 수 있도록 정확하여야 할 뿐만 아니라 같은 종류의 기기라고 생각되지만 펌프의 날개(pump vane)의 개수같은 중요한 세부사항이 다른 기기들로부터 측정된 스펙트럼이 마치 같은 기기로 분류되어

실제로는 확연히 다른 스펙트럼 데이터가 같은 부류의 데이터로 평균되어지지 않도록 정확성이 증시된다.

RULE DATABASE의 품질보증은 주로 진단시스템의 저자에 의해 새로히 습득한 진동자료를 고려할 때나 진단시스템의 사용자로부터 개선사항을 받아들일 때처럼 계속적으로 행해진다. 인간이 항시 앞서는 정보로 발전하기를 기대하는 것처럼 전문가용진단시스템도 마찬가지로 항시 새로운 측정자료, 개선된 기기정보와 진단규칙으로 발전시키고 있다.

7. 전문가용진단시스템의 적용(APPLICATIONS OF EADS)

전문가용진단시스템(EADS)은 미국내의 수많은 산업공장, 발전소 그리고 선박들의 예지정비(Predictive Maintenance)에 꼭 필요한 불가결의 요소로 발전계통이나 일반생산계통, 송유나 정유계통의 회전기계의 결함을 초기에 알아내어 경향분석을 통해 적시적절한 정비대책을 세우는데 쓰여지고 있다.

전문가용진단시스템(EADS)은 사용자에게 기기결함에 대하여 간결한 진단보고서(Fig. 2)를 제공하는 것 외에 찾아낸 결함의 상태를 시간을 두고 경향분석(Fig. 3)하여 결과를 도표(Fig. 4)로 나타낸다. 측정된 진동의 스펙트럼과 스펙트럼의 특징과 그에 대한 규정의 적용결과도 진단시스템이 작성한다.

진단시스템은 정비계획을 세우는 담당자에게 부수적인 정보를 제공하도록 설계되었으며 대부분의 PC(386, 486, Pentium)에서 운영할 수 있으며 진단시스템의 결과를 제작자의 Computer Maintenance Management Software(CMS) System에게 자동으로 송출할 수 있다. 이 전문가용진단시스템(EADS)은 포괄적인 정비프로그램의 절대 필요한 요소로서 기기의 결함과 그 정도에 대한 사전정보를 제공한다.

8. 전문가용진단시스템(EADS)의 주요 요소

성공적인 진단시스템을 운영하려면 여러가지 주요한 기본요소를 갖추어야 한다. Reliable Data Acquisition이나 Skilled Spectrum Averaging이나 정확하고 포괄적인 Rule의 제정등 예지정비(PdM)의 기본요소와 다를 바 없다. 다음은 문헌[3]에서 기술한 진동진단 기본요소들이다.

SIGNIFICANT VIBRATION DATA: 일반기기의 진동분석에는 가장 균일한 스펙트럼(Spectrum)을 제공하는 진동속도(Vibration Velocity)를 측정하여 기기의 운전상태를 점검하게 된다. 대부분의 기기의 진동신호분석에 있어서 Spectrum상의 특정주파수의 진폭크기 그 자체는 기기진동의

진동문제에 대한 지표로서 중요한 의미를 부여하지 않는다. 예를 들면 어느 한 기기가 베어링 주파수(Bearing Tone)에서 94 VdB(0.028 ips, peak) 크기의 진동치를 가지고 있지만 진동치의 큰변화없이 수년간을 가동할 수 있다. Spectrum상의 Bearing Tone의 존재는 베어링에 문제가 생길 수 있다는 확실한 표시이기는 하지만 실제로 베어링에 가해지는 힘은 기기의 성능을 저하시킬 만큼 크지않을 수 있다. 한편으로 진동신호분석에서 Spectrum상에 초기에는 별로 크지 않은 70 VdB(0.0018 ips)크기의 Bearing Tone을 보여주지만 한달후에 76 VdB로 증가하고 그 다음달에 82 VdB로 증가한다면 Bearing Tone에서의 진동치 증가율은 Bearing 고장관점에서 큰 의미를 부여한다. 6 VdB의 진동치 증가는 실제로는 지금의 진동치가 그 전의 진동치의 두배로 증가했음을 의미하며 기하급수적인 진동치 증가를 뜻한다. 때에 따라서는 베어링에 생긴 결함은 베어링의 회전자 지지대역활로 인하여 결합정도가 매우 빠르게 가속화하는 경향이 있다. 위의 예는 조그만 문제가 급속히 크나큰 문제로 발전되는 상황을 설명한 것이다. 위 예에서 보듯이 진동의 크기는 적지만 결합주파수에서의 진동치의 증가율은 진동크기보다 훨씬 더 중요함을 알 수 있다. 따라서 기기의 결합주파수(Fault Frequency)에서의 진동치를 추적하여 기기의 정비를 가장 적당할 때에 수행하는 방법을 경향분석(Trend Analysis)이라 한다.

TREND ANALYSIS: 진동 경향분석 개념을 가장 간단하게 이용하는 방법은 정상 가동중인 기기의 대표적인 진동 Spectrum을 참고자료로 설정해 놓고 같은 기기에 대하여 추후에 측정된 진동 Spectrum과 비교분석하는 것이다. 진동 측정은 참고 Data를 측정할 때와 같은 방법으로 시행하여야 하며 Transducer는 같은 장소에 정확히 설치하여야 한다. 가능하다면 정확히 Calibration된 같은 Transducer로 측정하여야 한다. 주파수 분석기나 Data Collector로 진동을 측정할 때에 유의할 사항은 측정된 Data에 있을 수 있는 불규칙한 변화나 진동과 아무관계가 없는 소음을 줄이기 위하여 여러개의 순간 스펙트럼(Instantaneous Spectrum)의 평균값을 측정하는 것이다. 대개의 경우 고른 진동특성을 얻기 위해서는 6 내지 10개의 Spectrum 평균값이면 충분하다. 상당히 큰 불규칙한 소음이 존재하는 진동특성의 경우 더 많은 수의 Spectrum 평균치가 필요하며 여러번의 Averaging을 비교하여 전자와 후자의 Spectrum변화가 거의 없을 경우 전자의 Spectrum 수가 알맞은 것으로 생각할 수 있다.

AVERAGING: 경향분석에 가장 중요한 것은 최근 측정한 자료를 비교할 수 있는 그 기기를 정확히 대표할 수 있는 Reference Spectrum(RS)을 준비하는 일이다. 오랜 경험을

비추어 볼때 믿음만한 참고자료(RS)를 만드는 가장 좋은 방법은 같은종류의 여러개의 기기에서 측정된 Spectra의 평균치를 구하는 것이다. 아무 문제없이 순조롭게 가동중인 일련의 유사한 기기들은 상호간 매우 비슷한 진동Spectra를 제공하지만 그 크기에 있어 불규칙한 변이(Random Variation)를 포함하고 있기 때문에 기기의 Spectra의 평균치를 구할 때에 중요한 주파수에서의 표준편차(Standard Deviation)를 함께 계산한다. 그러나 기기종류에 따라서는 각 기기의 가동특성이 기기별로 특이하여 평균치를 산출할 경우 표준편차값이 너무 커서 Average의 의미가 사실상 없게 된다. 이런 경우에는 각 기기별로 꽤 오래동안 일련의 측정을 평균하여 유효한 참고 Data를 산출할 수 있다. 일단의 기기들의 참조 Spectrum을 만들때 주의할 것은 진동측정하는 기기가 결함이 없는 지를 확인하여야 하는 것이다.

MASK SPECTRUM(Alarm Envelope): 아무리 상태가 좋은 기기라도 작은 부하변화나 온도변화, 전압변화 또는 주변의 소음치의 변동등으로 진동Spectra에 사소한 편차를 보여준다. 이러한 진동특성치의 변동은 측정된 진동Data를 Reference Spectrum(RS)에 바로 비교할 경우에 맞지 않는 진단결과를 초래하게 됨으로 RS의 각각의 Spectral Peak에 표준편차값을 가산(Add)하여 Mask Spectrum을 만들어 적용하는 것이 바람직 하다. 일반적으로 6 dB를 적용하여 Mask Spectrum을 만들기도 한다.

FORCING FREQUENCIES: 기기의 진동분석의 핵심은 기기의 회전엔 관계한 어떤 특정한 부품이 기기에 힘을 가하게 되며 특정한 주파수에서 진동을 일으킨다는 사실에 근거를 두고 있다. 가장 중요한 가진주파수(Forcing Frequency)중의 하나는 축의 회전속도(RPM)이다. 기기의 회전자(Rotor)는 어느정도의 잔존하는 불평형(Residual Imbalance)을 가지고 있기 때문에 기기 베어링에 원주방향의 구심력(Centripetal Force)을 가하게 되어 기기에 1X 또는 기본진동수(Fundamental Frequency)에서 진동을 일으키게 된다. 베어링의 구조특성에 따른 Bearing Tone은 베어링 자체의 마찰면(Race)이나 Rolling Element의 결함으로 인하여 생기는 진동력을 말하며 베어링 구조에 따라 가진진동수가 다르다. 톱니 맞물림 주파수(Gear Tooth-Mesh Frequency)는 각각의 톱니가 서로 맞물리어 충격을 주어 일어나며 기본진동수는 기어(Gear)의 회전속도에 기어의 톱니수를 곱한 값이 된다. 펌프나 송풍기의 날개 통과주파수(Vane Pass Frequency)는 회전속도에 날개수를 곱하여 구한다. 대개의 경우 진동 Spectrum에서 기본진동수는 가장 지배적인 진동치를 가지며 그 크기는 결함의 정도에 달려 있다. 가진진동수로부터 진동문제의 종류를 알 수 있고 진폭의 크기로 기기결함의 정

도를 알아낼 수 있기 때문에 가진진동수를 정확히 도출하는 것이 중요하며 진동 경향분석을 통해 진동크기를 추적하여 적시적절한 진동대책을 수립하는 것이 바람직 하다.

9. 결론

기기의 결함을 진단하는데에 전문자동진단시스템(EADS)을 사용하는 것은 고도의 숙련된 진단원 없이, 시스템자와의 질의응답과같은 일련의 회의를 갖지않고도 정확하고 또한 믿음만하게 기기상태를 측정 분석할 수 있는 가장 효과적인 방법이다. 전문자동진단시스템(EADS)은 일본에 5개의 기기들을 분석하고 진동전문분석가에 버금가는(94%) 정확성으로 진단결과를 제공한다. 많은 전문진단시스템 중에서 DLI의 ExpertALERT[4]는 가장 정확하고 정교한 진단시스템으로 평가되고 있다.

전문자동진단시스템(EADS)의 시행으로 프랜트의 기기장으로 인한 작업중단의 회수가 줄어들고 정비비용을 절감하며 불필요한 정기점검식정비(PM)를 없앴다면 관계기술원들의 진동에 대한 이해와 기술습득으로 한차원 높은 기기정비를 통해 효율적인 생산성증가, 정비비용감소[5], 안전사고 미연방지등 많은 것을 함께 얻을 수 있어 Expert System기술의 성공적인 적용이라고 정의할 수 있겠다.

참고문헌

- (1) Watt, W.A. and Van Dyke, D.J., "An Automated Vibration-Based Expert Diagnostic System", Sound & Vibration, Machinery Monitoring, Volume 27/Number 9, September 1993.
- (2) Randall, R.B. and Hee, J., "Cepstrum Analysis", Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis, University of Adelaide, Australia, June 1987.
- (3) Chun, H.S. and White, G., "Not Preventive Maintenance, But Predictive Maintenance", Proceedings of KSNVE, May 1994.
- (4) ExpertALERT, Expert Automated Diagnostic System, Part #8567, Ver. 7.0, DLI Engineering Corp., 1994.
- (5) Sachs, N.W., "Predictive Maintenance Cuts Costs", Power Transmission Design, November 1986.

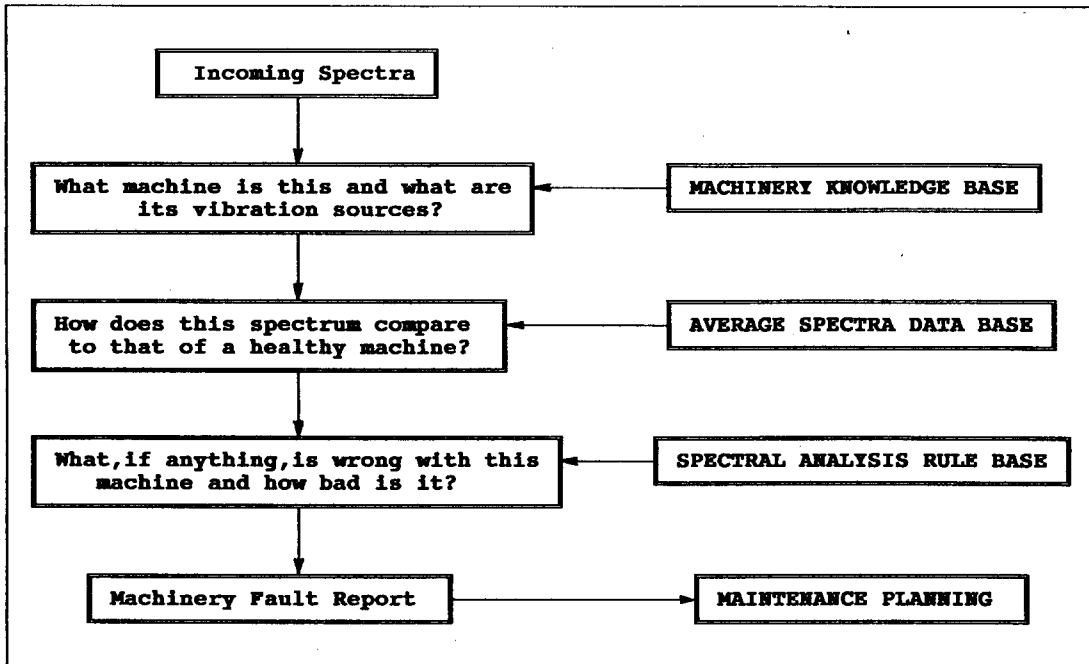


FIGURE 1: SYSTEM DATA FLOW

```

- EXPERT REPORT, WITH ExpertTutor
CIRCULATING WATER PUMP #101
Acquired: 07-29-1992 15:52:49 Speed: 1XM = 1753. RPM,      Avgs.= 6
  «
  PRIORITY IMP: ALIGN UNIT.
  Maximum Level is: .7865 (+ .2903) in/s [MFE-T] at 1.00xM

  SERIOUS ANGULAR MISALIGNMENT
  is indicated by .4962 (+ .2987) in/s [MFE-A] at 1.00xM
                  .4423 (+ .2447) in/s [PCE-A] at 1.00xM
                  .2217 (+ .1592) in/s [MFE-R] at 1.00xM
                  .7865 (+ .2903) in/s [MFE-T] at 1.00xM
                  .2791 (+ .1030) in/s [PCE-R] at 1.00xM
                  .7865 (+ .3442) in/s [PCE-T] at 1.00xM

  SLIGHT LINE PHASE VOLTAGE IMBALANCE
  is indicated by .0625 (+ .0427) in/s [MFE-T] at 120.1 Hz
  »
  
```

FIGURE 2: SAMPLE MACHINE FAULT REPORT

LOCATION: MOTOR, FREE END [1A1]
 FREQ: 1755 CPM ORDER: 1 X

DATE: 12 Apr 1992/11:40:07 RPM:
 LEVEL: 108.8 VdB DELTA: -----

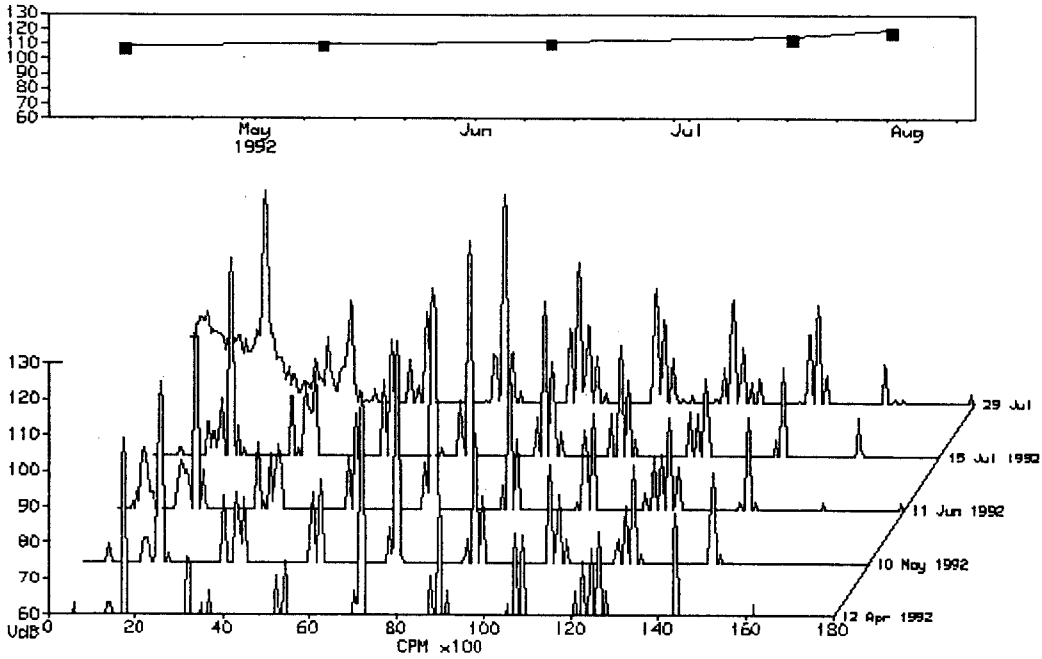


FIGURE 3: TYPICAL TREND ANALYSIS AT 1X

- OVERDUE ANGULAR MISALIGNMENT
- OVERDUE PUMP IMBALANCE
- ▼ ----- MOTOR MOUNTING FLEXIBILITY
- ◆ ----- LINE PHASE VOLTAGE IMBALANCE
- ▲ ----- MOTOR THRUST BEARING WEAR

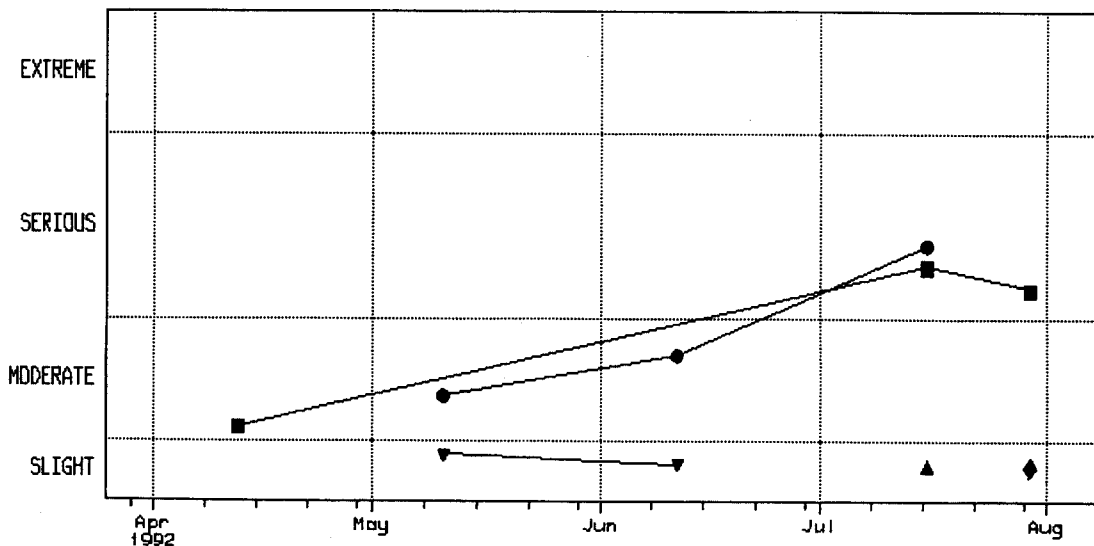


FIGURE 4: FAULT SEVERITY TREND PLOT