

광기기 저장매체 구동용 BLDC 모터의 신뢰성 평가기준

송병석*, 천성일**, 정해성***, 백재욱****

전자부품연구원 신뢰성본부*, 전자부품연구원 전북인쇄전자센터 운영지원팀**,
서원대학교 멀티미디어공학과***, 한국방송통신대학교 정보통계학과****

Reliability Assessment Criteria of Brushless Motor for Optical Disk Drive

Byeong Suk Song*, Sung il Chan**, Hai Sung Jeong***, Jaiwook Baik****

Reliability R&D Division, Korea Electronic Technology Institute*
Korea Printed Electronic Center, Korea Electronic Technology Institute**
Dept. of Multimedia Engineering, Seowon Univ.***,
Dept. of Information Statistics, Korea National Open Univ.****,

Abstract

BLDC motors are stored in the devices such as CD-RW, COMBO, DVD-ROM and CD-ROM. It is indispensable to establish reliability assessment criteria for BLDC motors, especially in the world where IT grows rapidly. In this article, reliability certification procedure is given. The reliability certification procedure consists of two separate tests such as quality certification test and lifetime test. The former quality certification test comprises general performance test and environmental test. Items which pass the test undergo lifetime test which guarantees the extent of mean lifetime with certain confidence.

Key word : BLDC, reliability certification, quality certification test, lifetime test, environmental test

1. 서론

DC 모터는 고정자로 영구자석을 사용하고, 회전자(전기자)로 코일을 사용하여 구성한 것으로, 전기자에 흐르는 전류의 방향을 전환함으로써 자력의 반발, 흡인력으로 회전력을 생성시키는 모터이다. 한편, BLDC 모터(Brushless Motor for Optical Disk Drive)는 DC 모터에서 브러시, 정류자 등 기계적인 접촉부를 없애고 이것 대신 전자적인 정류기구를 설치한 직류모터를 말한다. 이런 BLDC 모터는 CD-RW, COMBO, DVD-ROM, 및 CD-ROM과 같은 광기기 저장매체(ODD : Optical Disk Drive)에 들어가는 것으로 근래에 같이 IT가 매우 빠른 속도로 발전하는 상황에서는 신뢰성 평가기준의 확립이 절실하다. 이에 본 논문에서는 광기기 저장매체용 BLDC 모터의 신뢰성 평가기준을 제시하고자 한다.

이 기준의 목적은 신뢰성인증시험을 통해 BLDC 모터의 평균수명이 일정수준 이상임을 보증하는데 있다. 이 기준에 따른 신뢰성인증에 필요한 시험은 품질인증시험과 수명시험으로 구성되며, 수명시험은 품질인증시험 결과 결격사유가 없는 제품에 한하여 실시한다.

2. 품질시험

2.1. 적용범위

이 기준은 광기기 저장매체 구동용 드라이버에 사용되는 BLDC 모터의 신뢰성 인증 시험 방법에 대하여 규정하며, 광기기 저장매체의 범위는 CD-RW, COMBO, DVD-ROM 과 CD-ROM으로 제한한다.

2.2. 실험조건 및 요구사항

2.2.1 표준시험 상태 및 전원

- a) 주위온도 (25±10) °C
- b) 상대습도 (60±20) % R.H.
- c) 기압범위 (86~106) kPa
- d) 전 원 직류안정화 전원

2.2.2 정격

- a) 정격전압 DC 12 V를 원칙으로 한다.

- b) 정격부하 직경이 120 mm인 일반 CD 1 매를 장착한다.
- c) 회전방향 출력축으로 부터 시계방향의 회전을 원칙으로 한다.

2.3 품질시험 목적과 구분

일반적으로 품질시험은(신뢰성 인증시험) 전에 제품의 균일한 품질을 확인하기 위해 실시한다. 본 시험은 광기기 저장매체용 브러시리스 모터의 품질을 검사하기 위한 시험이다. 품질시험은 특성측정과 환경시험으로 구분되며, 환경시험을 위한 시료들은 특성측정 결과 합격한 제품만 사용한다.

2.4 샘플링

신뢰성 인증시험에 사용될 광기기 저장매체 구동용 모터는 원칙적으로 최종출하 전 가장 최근에 동일조건으로 생산된 것들로 한다. 본 연구에서는 양품 102 개를 발취한다. 단, 제조자의 잘못이 아닌 사고로 인한 제품을 대체하기 위해 예비시료 10 개를 추가로 발취한다.

2.5 특성측정 항목 및 성능기준

샘플링 된 102 개의 시료모터는 <표 1>과 같이 측정하여 성능기준을 모두 만족하여야 한다.

<표 1> 특성측정 항목 및 성능기준

No	시험항목	측정조건	성능기준
1	무부하 회전수	무부하, 정격전압	제품사양(rpm) 이상
2	무부하 전류	무부하, 정격전압	제품사양(mA) 이하
3	정격부하 회전수	정격부하, 정격전압	제품사양(rpm) 이상
4	정격부하 전류	정격부하, 정격전압	제품사양(mA) 이하
5	기동 토크	정격전압	제품규격(g/cm) 이상
6	기동전류	정지상태, 정격전압	제품사양(mA) 이상
7	절연저항	DC 100 V	10 MΩ 이상
8	절연내압	AC 250 V, 1 mA, 1 초	이상이 없어야 함
9	Hall소자 출력	정격전압	200 mVp-p 이상
10	코킹 토크	무통전	15 gf·cm 이하
11	Rotor case run-out	무통전	50 μm 이하
12	Run-out of shaft	무통전	10 μm 이하
13	소음	정격전압, 무부하	60 dB 이하

2.6 환경시험

샘플링된 102 개의 시험용 모터 중 특성특정에서 합격한 90 개의 모터를 대상으로 <표 2>와 같은 시험항목, 시험방법 및 시험조건으로 시험한다. 이때 90 개 모두가 판정 기준을 만족시켜야 한다.

<표 2> 환경시험 판정기준

No	시험항목	시험방법	시험조건	판정기준
1	고온 저장시험	3.6(a)	○ 온도 : (70±2) °C ○ 시간 : 144 시간 ○ 시료 : 10 개	※ 총 90개의 시료 모두가 아래 조건을 만족 할 것 (단 내 진동과 내 충격시험의 경우 정격부하 회전수와 정격부하 전류를 측정함) ○ 무부하회전수 : 제품사양(rpm) 이상 ○ 무부하 전류 : 제품사양(mA) 이하 ○ 정격부하회전수 : 특성 측정치의 ±20 % ○ 정격부하전류 : 특성 측정치의 ±30 % ○ 절연내압 : 이상이 없을 것 ○ 홀소자 출력 : 제품사양(mVp-p) 이상 ○ 소음 : 60 dB 이하
2	저온 저장시험	3.6(b)	○ 온도 : (-40±2) °C ○ 시간 : 144 시간 ○ 시료 : 10 개	
3	고온·고습 저장시험	3.6(c)	○ 온도 : (70±2) °C ○ 상대습도 : 95 % RH ○ 시간 : 144 시간 ○ 시료수 : 10 개	
4	열 충격시험	3.6(d)	○ 싸이클 : (80±2) °C (30 분) ↔ (-40 ±2) °C (30 분) ○ 횟 수 : 100 회 ○ 시료수 : 10 개	
5	고온·고습 동작시험	3.6(e)	○ 온도 : (60±2) °C ○ 상대습도 : 95 % RH ○ 정격전압, 정격부하 인가 ○ 시간 : 144 시간 ○ 시료수 : 10 개	
6	고온 동작시험	3.6(f)	○ 온도 : (60±2) °C ○ 정격전압, 정격부하 인가 ○ 시간 : 144 시간 ○ 시료수 : 10 개	
7	저온 동작시험	3.6(g)	○ 온도 : (0±2) °C ○ 정격전압, 정격부하 인가 ○ 시간 : 144 시간 ○ 시료수 : 10 개	
8	내진동시험	3.6(h)	○ 중력가속도 : 2.4 g ○ 파형 : 정현파 ○ 주파수 : (20~200) Hz ○ 진동방향 : X·Y·Z ○ 시간 : 각 방향 40 분씩 ○ 시료수 : 10 개	
9	내충격시험	3.6(i)	○ 중력가속도 : 80 g ○ 파형 : 정현파 ○ 충격시간 : 11 ms ○ 충격방향 : X·Y·Z ○ 횟수 : 각 방향 1 회씩 ○ 시료수 : 10 개	

3. 신뢰성 인증시험

3.1 평균수명 인증 시험방법의 적용과 고려사항

품질시험(특성측정 및 환경시험)에 합격한 시료모터에 한해서 12개를 선택하여 다음과 같이 신뢰성인증시험(평균수명 보증시험)을 실시한다.

본 기준에서 규정하는 고장은 사전시험을 통해 도출된 수명분포를 기본으로 한다. 브러시리스 모터는 고장률이 시간적으로 변화하는 와이בל 분포에 적합함을 도출하였다.

3.2 평균수명 인증시험 방법

시험용 모터 12 개를 정격전압과 정격부하를 인가 후 고온 (60±2) °C의 환경에서 1400 시간 동작 후 표준시험상태로 24 시간 방치하고 정격부하 회전수, 정격부하 전류를 측정한다.

a) 시험 조건 및 판정기준

<표 3>과 같은 시험방법 및 시험조건으로 시험하고 24 시간 방치한 후 정격부하회전수, 정격부하전류를 측정하여 12 개 모두가 판정기준을 만족시켜야 한다.

b) 평균수명의 인증(신뢰수준 90 %)

a)의 시험조건은 최소평균수명이 1600 시간(총구동시간)임을 신뢰수준 90 %에서 보증한다. 이는 모터의 고장분포가 형상모수 m=8.4186인 와이בל분포에 따름을 적용한 것이다

<표 3> 평균수명 인증시험 조건 및 판정기준

시험항목	시험방법	시 험 조 건	합격판정기준
평균수명 (MTTF) 보증시험	연속작동 시험	○ 온 도 : 60 °C ○ 정격부하 : 표준광기기 저장매체 1 매 ○ 시험시간 : 1400 시간 ○ 시 료 수 : 12 개	※ 총 12 개의 시험모터 모두가 아래 조건을 만족 할 것 (고장수 = 0) ○ 정격부하회전수 특성 측정치 ±30 % 이내 ○ 정격부하전류 특성 측정치 ±30 % 이내

3.3 보고서

보고서는 품질시험 데이터, 평균수명 인증시험 데이터 등을 포함하여야 한다.

3.4 평균수명 인증시험의 이론적 배경

a) 수명분포 추정결과

BLDC 모터의 수명분포를 추정하기 위하여 총 30개의 시료에 대하여 2004 시간 동안 60 °C, 정격부하 정시중단 시험을 실시한 결과 다음과 같은 고장시간 데이터를 수집하였다.

① 고장시간 데이터

2004 시간 동안 총 17 개의 고장이 발생하였으며 13 개는 정상작동을 하였다. 고장시간 데이터는 구간측정 데이터이며 총 6 번의 중간측정이 실시되었다.

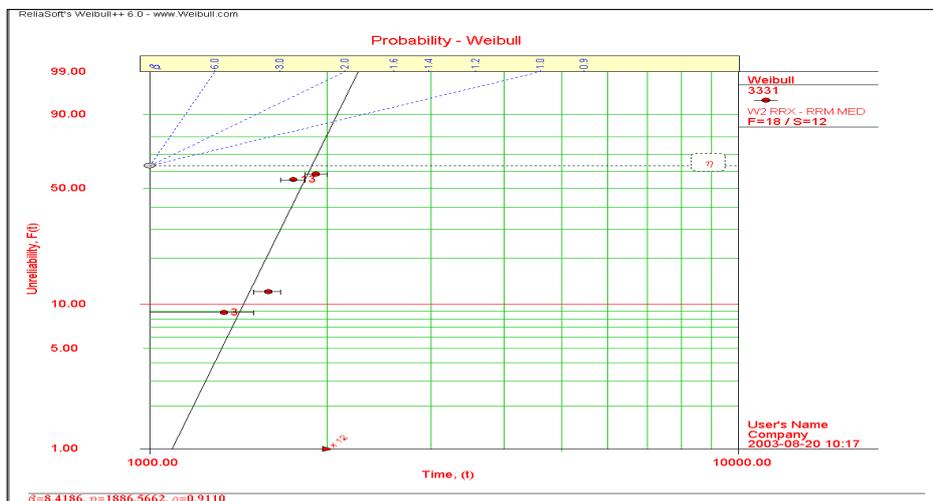
② 분포의 추정(모수 추정)과 적합도 검정

지수분포, 와이블분포, 기타분포에 대한 적합도 검정을 실시하여 수명분포를 선택하고 모수를 추정하였다. 적합도검정(goodness of fitness) 결과 기존에 사용되었던 지수분포는 통계적으로 적합하다고 볼 수 없다. 2모수 와이블분포의 경우 적합도 검정결과 매우 적합함을 알 수 있다. 분포적합은 수명데이터가 그룹데이터(구간데이터) 이므로 회귀분석법(Rank Regression Method)을 사용하여 추정하였다. 각 분포별 적합도검정은 χ^2 검정, K-S 검정, 상관계수 검정을 사용한다.

<표 4> 적합도 검정 결과표

	χ^2 검정 $P(X^2_{CRIT} < X^2_0)$	K-S 검정 $P(D_{CRIT} < D_0)$	상관계수 ρ
지수분포	3.7 %	44 %	-0.64
와이블분포 (2모수)	0.07 %	0.00012 %	0.91

<표 4>에서 알 수 있듯이 CD-ROM 구동용 브러시레스 모터의 수명분포는 와이블분포를 가정하는 경우가 관측치와 예측치의 차이확률이 매우 작으며 선형적합의 상관계수 역시 0.9 이상으로 통계적으로 유의함을 알 수 있다.



<그림 1> 와이블 분포

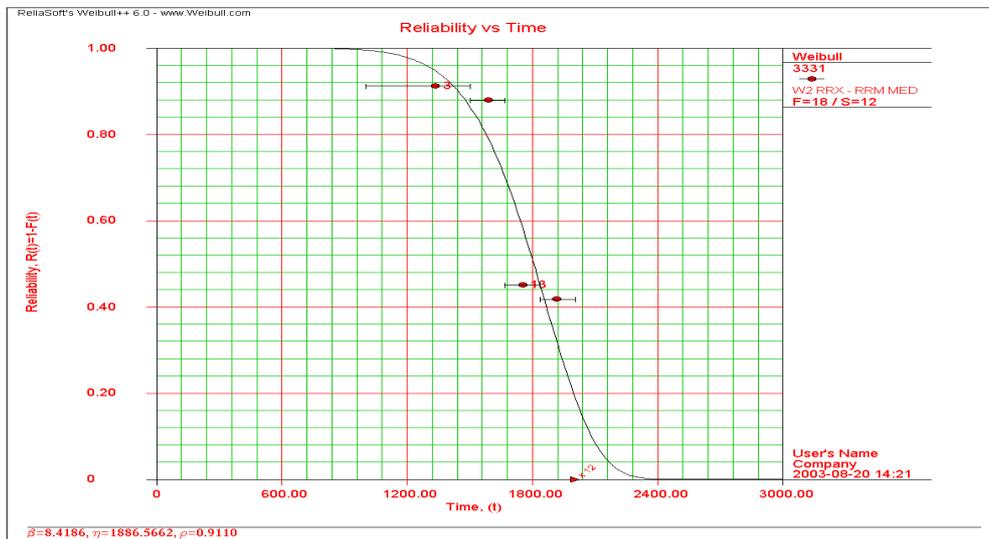
<그림 1>과 같이 2모수 와이블분포 가정 하에 회귀분석법(Rank Regression Method)을 사용하여 모수를 추정하였다. 점추정치는 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

형상모수 $m = 8.4186$, 척도모수 $\eta = 1886.5662$

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) = 1787.33,$$

$$R(1325.7) = 0.95$$



<그림 2> 시간경과에 따른 신뢰성

참고로 고장데이터의 샘플수가 작은 경우 신뢰구간의 추정방법은 Likelihood Ratio 와 Fisher Matrix 를 사용하는 경우가 있는데, 일반적으로 Fisher Matrix 추정방법은 적은 샘플수에서 Likelihood Ratio 추정방법에 비해 낙관적인 견해가 도출되는 경향이 있다. 따라서 본 기준에서는 Likelihood Ratio 추정방법을 사용한다.

b) 와이블 고장분포의 샘플링 검사방식

와이블분포가정하의 샘플링검사방식은 계수형과 계량형으로 구분된다. 일반적으로 계수형은 MIL-STD-105E (1989), 계량형은 MIL-STD-414 (1957)에 준해서 사용할 수 있다. 본 기준에서는 계수형 평균수명 보증 방식을 사용한다.

c) 평균수명 보증방식

보증하고자 하는 최소 평균수명을 θ_1 , 소비자위험을 β , 합격판정개수를 c 라고 하면 고장

개수는 자유도 $2(c+1)$ 의 χ^2 분포를 따르므로

$$2nF(t) \geq \chi^2_{\beta}[2(c+1)]$$

가 되고, 여기에서 샘플수 n 를 구하면 다음과 같다.

$$n \geq \frac{\chi^2_{\beta}[2(c+1)]}{2F(t)} \quad (1)$$

2모수 와이블 분포의 누적고장확률 $F(t)$ 는

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (2)$$

이다. 이로부터

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

가 되고, 양변에 대수를 취하면

$$-\ln[1 - F(t)] = \left(\frac{t}{\eta}\right)^m$$

된다. 그런데 일반적으로 $F(t)$ 값은 0에 가까움으로

$$-\ln[1 - F(t)] \approx F(t)$$

로 근사된다. 따라서 식 (2)는 다음과 같이 근사된다.

$$F(t) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^m$$

이로부터 t 를 구하면 다음과 같다.

$$t = \eta \cdot F(t)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

또한 2모수 와이블 분포에서의 평균수명 θ 는

$$\theta = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (4)$$

이므로 식 (3)을 평균수명으로 나누면

$$\frac{t}{\theta} = \frac{[F(t)]^{\frac{1}{m}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

가 되고, 여기에서 $F(t)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$F(t) = \left[\frac{t \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}{\theta} \right]^m \tag{5}$$

식 (5)의 θ 를 보증하고자 하는 최소평균수명 θ_1 으로 대치하고, 식 (5)를 식 (1)에 대입하면 구하는 샘플수 n 는 식 (6)과 같이 된다.

$$n \geq \frac{\chi^2_{\beta}[2(c+1)]}{2 \left(\frac{t \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)}{\theta_1} \right)^m} \tag{6}$$

그러므로 식 (6)에 의해 계산되는 n 개의 샘플에 대해 t 시간 수명시험을 하며 고장개수가 c 개 이하이면 이 로트는 합격시킨다.

합격판정개수 $c = 0$ 을 가정하고 신뢰수준 90% ($\beta = 0.1$)에서 시험시간 $t = 1,400$ 일 때, 최소평균수명이 1,600 시간을 보증하는 검사방식은 식 (6)에 따라 $\chi^2_{0.1}(2) = 4.61$, $m = 8.4186$ 을 각각 대입하여 $n = 12$ 임을 얻을 수 있다. 즉, 1,400 시간동안 12개의 시료를 시험하여 고장개수가 0이면 최소평균수명 $MTTF = 1,600$ 시간임을 신뢰수준 90%에서 보증할 수 있다. 형상모수 $m = 8.4186$ 인 와이블분포의 경우, 보증되는 평균수명 = 1,600시간을 목표신뢰도에서의 시간으로 환산하면 신뢰도 95%(누적고장확률 5%)인 시점은 식 (2)와 식 (4)에 의해 1,186.7임을 계산할 수 있다. <표 5>는 보증하고자하는 평균수명($MTTF$) = 1,600일 때, 다양한 시험시간별 유효 샘플수를 나타낸다.

<표 5> $MTTF = 1,600$, 신뢰수준 90% 보증을 위한 시험표 (합격판정개수 $c = 0$)

시험시간	보증 평균수명	필요 샘플수	유효 샘플수	$R(t) = 0.95$
2,000	1,600	0.555112	1	1186.7
1,900	1,600	0.854902	1	
1,800	1,600	1.347704	2	
1,700	1,600	2.180591	3	
1,600	1,600	3.632679	4	
1,500	1,600	6.254457	7	
1,400	1,600	11.1799	12	
1,300	1,600	20.86354	21	
1,200	1,600	40.92948	41	
1,000	1,600	189.9466	190	

<표 6>는 시험시간 = 1,400일 때, 다양한 보증하고자하는 평균수명(MTTF)별 유효 샘플수를 나타낸다.

<표 6> 시험시간 $t = 1400$, 신뢰수준 90 % 보증을 위한 시험표 (합격판정개수 $c = 0$)

시험시간	보증 평균수명	필요샘플수	유효 샘플수	$R(t) = 0.95$
1,400	1000	0.213813	1	741.7229
1,400	1500	6.493449	7	1112.584
1,400	1700	18.62477	19	1260.929
1,400	1800	30.13496	31	1335.101
1,400	1900	47.50601	48	1409.274
1,400	2000	73.16185	74	1483.446

3.5 고장메카니즘 (Failure Mechanism)

<표 7>과 <표 8>은 본 기준에서 적용된 고장판단기준과 시험방법을 도출하기 위한 Two level Quality Function Deployment를 나타낸 것이다.

<표 7> Requirements(Stresses and Performance) and Failure Modes/Mechanisms Matrix

Requirements (Stress and Performance)	Failure Modes /Mechanisms	부하 회전수 변화	정격전류 변화
Humidity		◇	◇
Heat		◎	◎
Vibration		◇	◇
Thermal Shock		○	○
Temperature Cycle		◎	◎
Humidity/Heat		○	○
Load		○	○

* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통
* Failure Mode/Mechanism은 해당 부품·소재에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 나타냄

<표 8> Failure Modes/Mechanisms Matrix and Test Methods

FailureModes /Mechanisms \ Test Method	Humidity	Heat	Vibration	Thermal Shock	Temperature Cycle	Humidity /Heat
부하 회전수 불량	◇	◎	◇	○	◎	○
정격전류 변화	◇	◎	◇	○	◎	○
* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통 * Failure Mode/Mechanism은 해당 부품·소재에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 나타냄 * Test Methods는 해당 발생고장을 일으킬 수 있는 시험방법을 나타냄						

4. 결 론

BLDC 모터는 CD-RW, COMBO, DVD-ROM 및 CD-ROM과 같은 광기기 저장매체에 들어가는 것으로 근래에 IT가 매우 빠른 속도로 발전하는 상황에서는 신뢰성 평가기준의 확립이 절실하다. 이에 본 논문에서는 광기기 저장매체용 BLDC 모터의 신뢰성 평가기준을 제시하고자 하였다. 신뢰성인증에 필요한 시험은 품질시험과 신뢰성 인증시험(평균수명 인증시험)으로 구성되어 있으며, 신뢰성 인증시험은 품질시험 결과 결격사유가 없는 제품에 한하여 실시한다. 품질시험은 특성측정 <표 1>과 환경시험 <표 2>로 이루어진다. 평균수명을 보증하는 인증시험은 <표 3>의 평균수명 인증 시험조건과 판정기준을 근거로 하여 <표 5>와 <표 6>의 시험표에 의해 판정한다. 다만 <표 5>와 <표 6>은 고장분포가 형상모수 $m=8.4186$ 인 경우에만 의미가 있음을 일러둔다.

참고문헌

- [1] 정해성, 권영일, 박동호 (2005), 신뢰성 시험분석 평가, 영지문화사.
- [2] IEC 60034-1 (2004), Rotating Electrical Machines - Part 1 : Rating and Performance.
- [3] IEC 60034-4 (2008), Rotating Electrical Machines - Part 4 : Method for Determining Synchronous Machine Quantities from Test.
- [4] IEC 60034-5 (2006), Rotating Electrical Machines - Part 5 : Classification of Degrees of Protection Provided by Enclosures of Rotating Electrical Machine(IP Code).
- [5] IEC 60034-14 (2007), Rotating Electrical Machines - Part 14 : Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mm and Higher - Measurement, Evaluation and Limits of Vibration.
- [6] MIL-STD-105E (1989), Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes.

- [7] MIL-STD-414 (1957), Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Defective.
- [8] MIL STD 810F (2000), Environmental Test Methods Engineering Guidelines.