



# אמינות ואורך חיים של מנוע זרם ישר עם מברשות

קמי בן-שם פלדשוה וחזי קורן  
חברת ט.מ.מ

■ Coffin Manson - השפעת חום והלם חום  
על חיי המוצר.

## הבדלים והסברים של :MTBF - MTTF

MTBF - Mean Time Between Failure  
- כלומר, הזמן הממוצע לכשל למוצרים  
הניתנים לתיקון.

MTTF - Mean Time To Failure - כלומר,  
הזמן הממוצע לכשל למוצרים שאינם  
ניתנים לתיקון.

לצורך הבנה יסודית של משמעות MTBF,  
נציג את הנוסחאות הבסיסיות, ונסביר  
בעזרת דוגמא פשוטה:

הנוסחה הבסיסית של MTBF הינה  $\theta = T/R$ ,  
כאשר

וקטורי - Phasor.  
הנדסת אמינות, למרות היותה לוטה  
בערפל, הינה ענף מתמטי המתבסס על  
מודלים מתמטיים ובדיקות האצה - Stress  
Tests - שניתוח תוצאותיהם מאפשר חיזוי  
סביר של ביצועי הרכיב בסביבת העבודה  
הרגילה שלו.

## מספר מודלים ונוסחאות מקובלים בתחום:

■ Weibull Analysis - ניתוח מתמטי וקביעת  
בגרותו של המוצר.

■ Arrhenius Model - השפעת טמפרטורה  
על חיי המוצר.

■ Halberg Peck - השפעת לחות על חיי המוצר.

תמיד כאשר מתכננים מכלול מבוסס הינע  
עם מנוע DC מברשות, עולה השאלה של  
אמינות, אורך חיים ו-MTBF.

## מהי אמינות ומהו MTBF:

אמינות מוגדרת כיכולת של רכיב לבצע  
ולפעול בהתאם להגדרות ואיפיונים  
שנקבעו לו לפרק זמן שהוגדר.

לחיזוי אמינות ברמת ביטחון גבוהה  
מבוקשת - Confidence - נדרשים הגדרות  
ותיחום פרמטרים של מאמץ, הצריכים  
לשקף ולאפיין את יישומו של המוצר.

בנוסף, יש לקבוע את המודל המתמטי  
והסטטיסטי ואת גודל המדגם.

פרמטרי המאמץ מכונים **Stressors**,  
משילוב המילים מאמץ - Stress ותיאור

$$\theta = MTBF$$

T = Total time

R = Number of failures

**דוגמא:**

10 מנועים נבדקים כל אחד במשך 500 שעות.

2 מתוך המנועים הנבדקים כשלו במהלך הבדיקה.

מכאן נובע:

$$\theta = MTBF = \frac{10 \times 500}{2} = 2500 \text{ Hours/Failure}$$

**מכאן נעבור להבנה יסודית של משמעות MTTF,** נציג גם כאן את הנוסחאות

הבסיסיות, ונסביר בעזרת דוגמא פשוטה:

הנוסחה הבסיסית של MTBF הינה  $\lambda = T/N$ , כאשר

$\lambda = MTTF$

T = Total time

N = Number of Units

**דוגמא:**

10 מנועים נבדקים כל אחד במשך 500 שעות.

מכאן נובע:

$$\lambda = MTTF = \frac{10 \times 500}{10} = 500 \text{ Hours/Failure}$$

## לאחר הקדמה זו, נעבור

### לאמינות מנועי DC מברשות:

1. מנועי DC מברשות מהווים אתגר אמיתי למהנדסי אמינות וזאת כי סיבת הכשל העיקרית לכל רכיב אלקטרו מגנטי הינה חום יתר - Over Heating.

חום זה מתפתח במוליכים נושאי הזרם של הרכיב.

במנועי DC עם מברשות, הסלילים הם המוליכים העיקריים, ואילו המברשות והקומוטטור המכני, היוצרים את תהליך הקומוטציה הינם סיבת הכשל המשני.

2. הספר היסודי של הצבא האמריקאי לאמינותם של רכיבים מסתובבים, כולל מנועי DC, הוא **MIL-HDBK-217F**.

היצרן:

**א.** התנגדות אוהמית - Terminal Resistance:

$$R = 1.6 \Omega \pm 15\%$$

**ב.** התנגדות תרמית רוטור + סטטור - Thermal Resistance:

$$R_{th1} + R_{th2} = 10 \text{ K/W}$$

**ג.** קבוע זמן תרמי רוטור + סטטור - Thermal Time Constant:

$$\tau_{w1} + \tau_{w2} = 827 \text{ Sec}$$

**ד.** מקסימום טמפרטורה רציפה של הרוטור:  $r_{\theta} = 125^{\circ}\text{C}$

**ה.** מקסימום טמפרטורה לזמן קצר של הרוטור, בהתאם לקבוצת חוטי ליפוף

$$r_{\theta1} = 155^{\circ}\text{C} : F$$

$$K = Kt / \sqrt{R} = 29.5$$

**7.** בהתאם לנתוני המנוע הנ"ל שנמסרו, אזי התוצאות המתקבלות עבור MTBF של

2000 שעות הינן:

**א.** Safe Operating Area Continues - SOAC:  
Speed - Between 3500 ÷ 4000 RPM

Current - Up to 2.5A

Torque Up to 95 mNm

**ב.** Safe Operating Area Intermittent - SOAI:  
Speed - Between 3000 ÷ 3500 RPM

Current - Between 3 ÷ 3.5A

Torque Between 110 ÷ 130 mNm

לדעת כותבי המאמר, גישה זו, של חברת ELECTRO CRAFT הינה המתאימה ביותר לחיזוי ואומדן אורך חיים של מנועי DC מברשות.

מנוע DC עם מברשות גרפיט, יכול לפעול באמינות גבוהה גם ביותר מ-3000 שעות בהתאם ל-Safe Operating Area.

#### Reference:

1. DC MOTORS SPEED CONTROLS SERVO SYSTEMS Engineering handbook by ELECTRO-CRAFT CORP.

2. Mr. Scott Speaks - VICOR Reliability Eng.

פרק 12 של הספר מתייחס לשני פרמטרים בלבד לצורך חישובי אמינות ואורך חיים של מנועי DC:

**א.** ליפופים - Windage.

**ב.** מיסבים - Bearing.

במקרה של מנועי DC עם מברשות, מניח המחבר שהמברשות מוחלפות ומתוחזקות באופן קבוע, ואינן מהוות חלק מחישובי האמינות.

**3.** קיים מפרט צבאי אמריקאי ישן - MIL-STD-8609/B - שאינו תקף יותר - המתייחס ישירות למנועי DC עם מברשות

בשימוש תעופתי, כאשר במנועי DC אלו יש נגישות למברשות חיצוניות המוחלפות באופן קבוע כל 500 שעות, ללא קשר לפרופיל העבודה ו/או מאמץ חומני של המנוע.

**4.** בשנות ה-70 המוקדמות, התפתחה תפיסה טכנולוגית - בהמלצת חברת

ELECTRO CRAFT - של תחום עבודה בטוח - Safe Operating Area.

הכוונה לתחום בעקומת מומנט מהירות של מנועי DC ללא ליבה, שבהם השיפוע הינו קו ישר ואילו השטח המתקבל ממכפלת המהירות במומנט, הינו ההספק.

תחום העבודה הבטוח חולק לשתי קטגוריות:

**א.** תחום עבודה בטוח רציף - Safe

Operating Area Continues

**ב.** תחום עבודה בטוח לסירוגין - Safe

Operating Area Intermittent

**5.** הבסיס לגישה זו, לפי אסכולת ELECTRO CRAFT, הינו חישוב מקסימום ההספק החומני המותר, בהתאם לטמפרטורת הליפופים, כנגד ההתנגדות התרמית של המנוע.

**6.** לצורך הדוגמא החישוב שלנו, בחרנו מנוע DC עם מברשות גרפיט, מסוג "ללא

ליבה" - CORELESS.

נתוני מנוע לדוגמא, כפי שנמסרו על ידי

