



# בדיקת התפרקויות חלקיות בציוד סובב חשמלי כחלק מתחזוקה חזויה

מציג: ישראל ברך

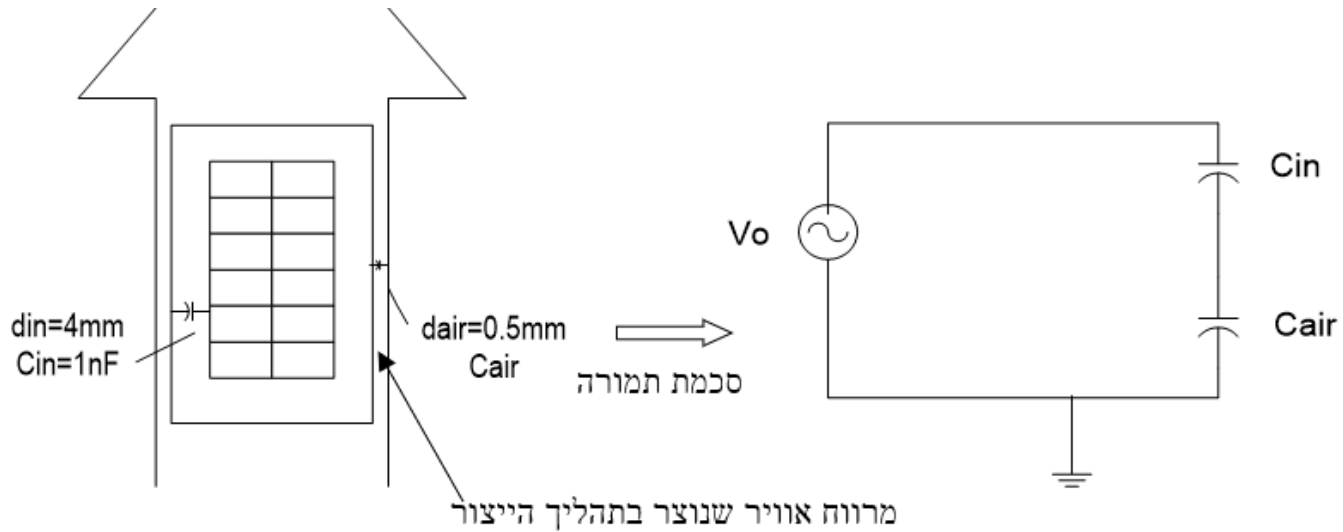


[israel@eltest.net](mailto:israel@eltest.net) ,0546050492



- בדיקות תחמ"ש
- בדיקת שנאים (כולל  $\tan \delta$ )
- בדיקת ממסרי הגנה
- בדיקת התפרקויות חלקיות
- VLF- 
- 
- בדיקת הארקות (כולל מתח מגע ומתח צעד)

# הקדמה – מודל בידוד של מכונה



$$\leftarrow C_{air} \approx \frac{1 \times A}{0.5} \approx 2A, C_{in} \approx \frac{4 \times A}{4} \approx A \leftarrow C \approx \frac{\epsilon \times A}{d}, \epsilon_{air} \approx 1, \epsilon_{epoxy mica} \approx 4$$

$$\text{במכונה } V_{air} \approx \frac{8}{3} \approx 2.5KV \leftarrow V_{air} = \frac{C_{in}}{C_{in} + C_{air}} \times V_o = \frac{A}{A + 2A} \times V_o = \frac{V_o}{3}$$

של 13.8 ק"ו.

מכאן אנו רואים שעל פני הבידוד כלפי הברזל במכונה של 13.8 ק"ו מתקבל מתח של כ-2.5 ק"ו ← בהנחה כי מרווח האוויר בין הבידוד לסטטור המכונה כ-

$$. E = \frac{V}{d} = \frac{2.5}{0.5} = 5KV \text{ מ"מ נקבל}$$

מתח הפריצה של האוויר הוא  $3 \frac{KV}{mm}$ , מתח הפריצה התיאורטי של אפוקסי מיקה

הוא  $300 \frac{KV}{mm}$  אך מכיוון שהבידוד אף פעם לא מושלם בפועל מתח הפריצה הוא

$$.30 \frac{KV}{mm}$$

# גורמי מאמץ על הבידוד והשפעתם על אורך החיים

## גורמי מאמץ על הבידוד:

1. תרמי.
2. חשמלי.
3. סביבה – כימי.
4. מכני.

## השפעת המאמץ על אורך החיים:

1. עליה בגורמי המאמץ מאיץ את תהליך ההזדקנות.
2. עליה של  $10^{\circ}\text{C}$  בטמפרטורות העבודה מקטינה ב-50% את אורך חיי הצידוד.
3. עליה של 1% במתח העבודה מקטין ב-50% את אורך חיי הצידוד.
4. השחיקה גדלה באופן אקספוננציאלי עם העלייה באמפליטודת הרעידות.
5. שינויי עומס קיצוניים גורמים למצב של שינויי טמפרטורה קיצוניים בנחושת בעוד שבבידוד התגובה יותר איטית, דבר שגורם במשך הזמן ל"ניתוק" הקשר בין הבידוד למוליך ולהיווצרות חללים, אשר בהם נקבל התפרקויות חלקיות.
6. זיהום על פני המוליכים הגורם להקטנת מעבר החום, וליצירת הפרש פוטנציאליים הגורם לפריצת האוויר ליד הבידוד (בגלל צימוד קיבולי לליפוף). תופעה זו תגרום במשך הזמן ליצירת סדקים בבידוד.

# "קמטים" בסרטי הבידוד ותהליך אימפרגנציה לקוי בזמן ביצוע אימפרגנצית ואקום- לחץ (VPI)

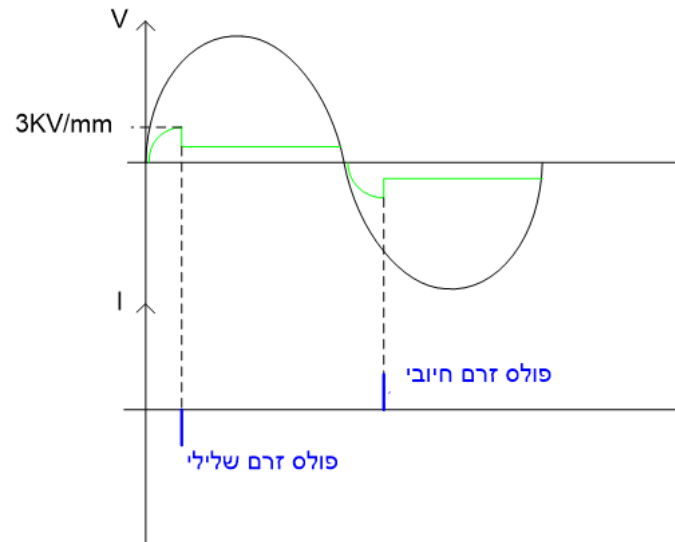


חללים  
פנימיים



# תהליך היווצרות התפרקויות חלקיות (PD)

התפרקויות חלקיות נוצרות כאשר הפרש הפוטנציאלים בתוך החללים בבידוד (VOIDES) גדול מ-  $3\text{KV/mm}$  (מתח פריצה באוויר).



הערכים האופייניים "לזמן העלייה" של הפולסים הם  $1\text{nS} \div 5\text{nS}$ , הבאים לידי ביטוי באותות בתדר של כ-  $40\text{-}350\text{MHz}$ .

פולסי הזרם יכולים להתקבל בתחום זוויות של  $0^\circ\text{-}90^\circ$  ו-  $180^\circ\text{-}270^\circ$  (בחלק העלייה של הגל הסינוסואידלי בלבד). ההתפרקויות החלקיות תלויות למעשה בעוצמת השדה בתוך המכונה ולכן במידה ולא הייתה פריצה בזמן העלייה של הגל, לא יתכן שהיא תתרחש בזמן הירידה (עוצמת השדה משתנה בצורת סינוס יחד עם שינוי במתח).

# תהליך היווצרות התפרקויות חלקיות (PD) - המשך

- כמות הפולסים שיכולים להתקבל מחלל אחד בשנייה אחת היא 50 חיוביים ו-50 שליליים.
- במידה ומתקבלת כמות גדולה יותר אזי מדובר ביותר מחלל אחד.
- במצב רגיל פולסי ה-PD מתרחשים בתוך הסליל, מכיוון שהתדר שלהם גבוה הערכים נמוכים ולא ניתן למדוד אותם בפאזות שונות מאשר בהם נוצרו.
- בגלל מבנה המכונה ישנם ליפופים של פאזות שונות אחת ליד השנייה באותו חריץ, ובמצב זה קיים צימוד קיבולי בין הפאזות, אשר גורם לפולסים מפאזה אחת להיראות בפאזה אחרת.



# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

## מה מודדים?

בעת ביצוע מדידת התפרקויות חלקיות, אנחנו אוספים את הנתונים הבאים:

1. כמות הפולסים ( PPS – כמות פולסים בשנייה).
2. גודל הפולסים (ערכי אמפליטודה מקסימאליים).
3. הקוטביות שלהם.
4. יחוס לזווית מתח המקור.

פרמטרים אלה נותנים לנו את המידע הדרוש לזהות את מיקום ההתפרקויות (בתוך חריצי הסטטור או בקצוות הליפוף), את אופיים (פאזי או בין פאזי) ואת עוצמתן וכו'.

מטרת מדידות אלה לאפשר לנו להיערך טוב יותר לביקורת במכונה עוד לפני פתיחתה, ובכך לתכנן את אופן ומיקום הבדיקה הוויזואלית לצורך איתור מדויק יותר של הנזק, ולעיתים אף להיערך לביצוע תיקון (במידה והליקוי בקצוות הליפוף) מבלי להפסיק את המכונה לזמן ממושך.

# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

גורמים מפריעים במדידה ואופן ה"טיפול" בהם

כדי שזיהוי ההתפרקויות החלקיות יהיה טוב יותר, בעת ביצוע המדידה יש לבצע הפרדה בין "רעשי" המערכת לבין ההתפרקויות בתוך המכונה, הפרדת הרעש מתבצעת במספר דרכים (עבור מכונות חשמליות – גנרטור, מנוע):

## 1. תחום תדרים:

מודדים את ה-PD החל מתדר של 40MHz כאשר בתדר זה רוב הרעש לא קיים.

## 2. עכבות:

אימפדנס אופייני של הפס הקושר גנרטור עם שנאי ראשי הוא כ- $100\Omega$  בעוד שאימפדנס אופייני של הסליל הוא כ- $30\Omega$ .

אותות שמגיעים מהרשת מונחתים בגלל העכבה הנמוכה של הסליל בעוד שאותות של התפרקויות שמקורם בסליל, בגלל העכבה הגבוהה של הפס יוגברו.

# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

גורמים מפריעים במדידה ואופן ה"טיפול" בהם - המשך

3. זמן הגעה דיפרנציאלי:

ע"י מדידת הזמן בין הופעת שני פולסים הנמדדים דרך 2 קבלים (זמן תנועת הפולסים הוא כ-3 nS/m).

צורות התקנת קבלים אלה:

3.1. בשתי קצוות המכונה (SSC – Stator Slot Coupler).

3.2. קבל אחד בקצה המכונה וקבל שני על פסי ההזנה (BUS).

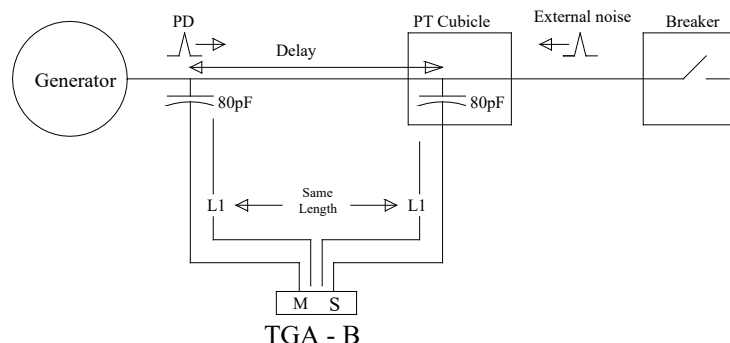
בשני המקרים יש להכניס זמן זה כפרמטר לתוכנה, אשר מזהה את כיוון "זרימת" הפולסים ובהתאם לזמן שנמדד מייחסים אותם למקור (רשת) או למכונה (התפרקויות חלקיות).

במכונות קיימות ההתקנה הנפוצה היא מסוג קבלי פס, מאחר והתקנת קבלים מסוג SSC אפשרית בעת ייצור המכונה או במקרה של שיפוץ חלקי/ליפוף מחדש.

# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

איך מודדים\*?

1. מדידת ON-LINE בגנרטור (2 קבלים מסוג BUS):



TGA-B - מכשיר למדידת התפרקויות חלקיות.

(סטיה מותרת במרחקי כבלי המדידה L1 עד 30 ס"מ)

2. מדידת ON-LINE במנוע:

משתמשים בצורת חיבור של קבל אחד בלבד וזאת מאחר וכאשר כבל המנוע באורך של יותר מ-30 מ', קיבולו העצמי מספיק כדי לסנן את רעשי המערכת.

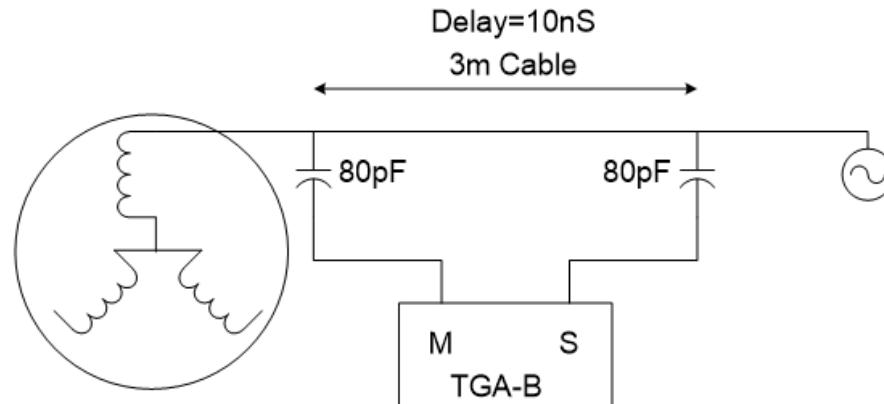
\* השרטוטים המוצגים הגרפים וניתוח התוצאות מתייחס לציוד של חברת IRIS שהיא חברה קנדית, המייצרת ציוד מדידה זה ומרכזת בסיס נתונים של מאות אלפי תוצאות מדידות, של עשרות אלפי מכונות מכל העולם ומסוגים שונים.

# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

## איך מודדים - המשך

### 2. מדידת OFF-LINE במנוע:

בעת ביצוע מדידת התפרקויות חלקיות במנוע בשיטת OFF-LINE יש לחבר את מעגל המדידה כפי שמבוצע בגנרטור ב- ON-LINE, כאשר נדרש לחבר מקור מתח AC לאספקת מתח נומינלי של המכונה, אשר מחובר בין הפאזה הנמדדת להארקה.

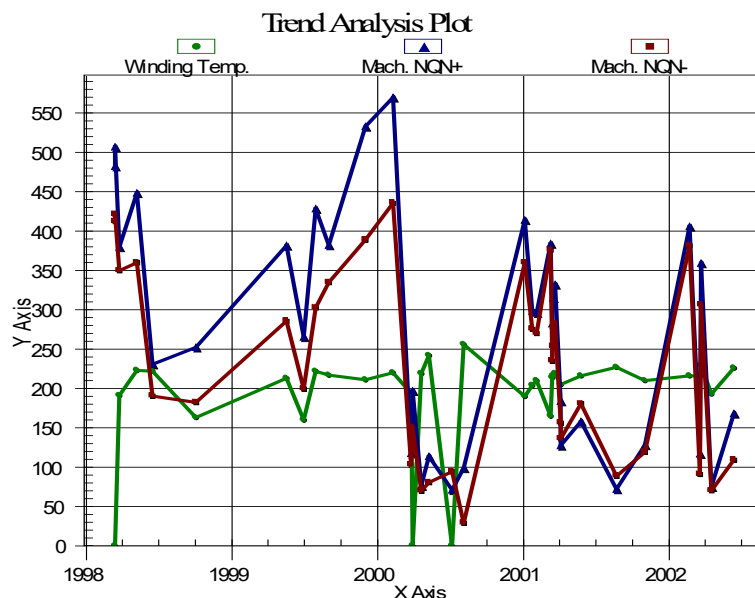


3. החיסרון של ביצוע מדידת OFF-LINE שההתפרקויות הנוצרות מסיבוב המכונה (רעידות קצות ליפוף למשל), לא ייווצרו ולכן לא ימדדו.  
מדידה אקוסטית של התפרקויות חלקיות מזהה תופעות חיצונית על פני הבידוד ולא בתוך החריצים או בליפוף עצמו.

# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

## מה מקבלים

בתהליך המדידה מעבר לנתונים המפורטים של המדידות אשר משמשים לניתוח מעמיק של מקור התפרקויות מתקבלים 2 פרמטרים מספריים הבאים:  
 $Q_m$  – ערך האמפליטודה המקסימאלית בה התקבלו 10 פולסים בשנייה (מתקבל עבור פולסים חיוביים ושלייליים  $Q_{m+}$ ,  $Q_{m-}$ ).  
 $NQN$  – ערך מנורמל המעיד על כמות התפרקויות כוללת.  
את הנתונים שהתקבלו ( $Q_{m+}$ ,  $Q_{m-}$  ו- $NQN$ ) מעלים על גרפים המציגים ערכים אלה לאורך זמן (בהתייחס למדידות העבר), כדי לדעת האם קיימת עלייה בערכים הנמדדים שמשמעותם התדרדרות בטיב הבידוד של המכונה.



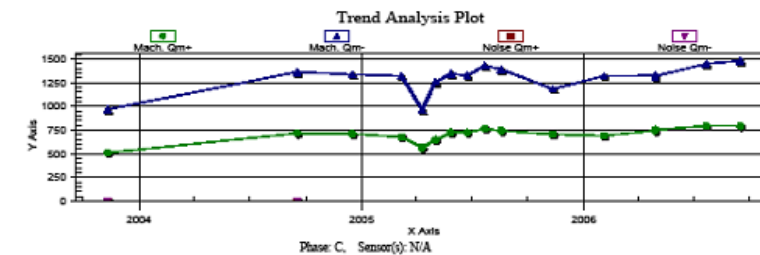
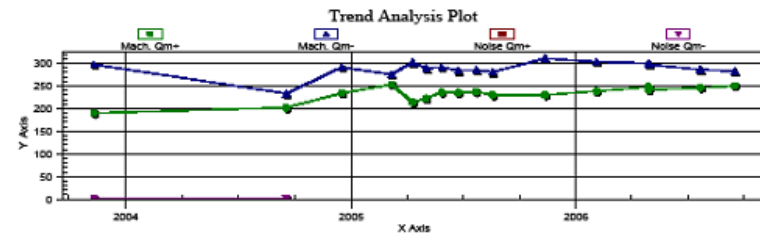
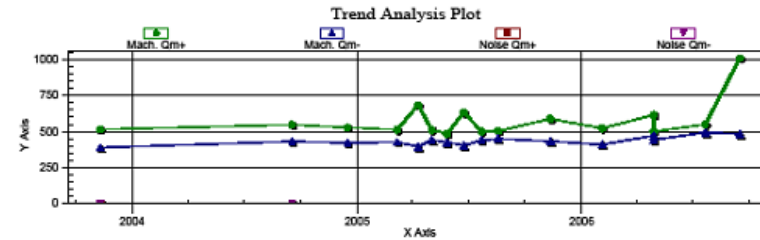
# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

## מה מקבלים - המשך



### PD Trend Analysis

Folder: TXU Electric/Comanche Peak Unit 2, Asset Name: CP2-CCAPCC-02M  
 Asset Class: Motor, Class: Directional BUS (TGA), Sensor Type: Epoxy Mica Capacitor (80pF)



Manufacturer: N/A, Year of Installation: 1975, Re-Wind Manufacturer: Westinghouse, Re-Wind Year: N/A  
 Stator Voltage Rating: 6600, Active Power Rating: 0.75 MW, Reactive Power: N/A, Gas Pressure Rating: N/A  
 Cooling System: N/A, Winding Type: N/A, Insulation Type: Epoxy Mica  
 Insulation Class: N/A, Insulation Process: N/A



# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

## מה עושים עם הנתונים

מאחר ובדיקת התפרקויות חלקיות היא בדיקה השוואתית, בשלב ראשון בודקים בטבלאות סטטיסטיות האם ערך  $Q_m$  שהתקבל מעיד על בעיה במכונה והאם יש צורך לבצע ניתוח לתוצאות.

דוגמא: לגנרטור במתח 13.8kV התקבל ערך  $Q_m=400mV$ .  
בטבלת חברת IRIS לגנרטור באותה רמת מתח מופיעים הערכים הבאים:

Rated V	2-4 kV	6-8 kV	10-12 kV	13-15 kV	16-18 kV	> 19 kV
Avg	89	88	121	168	457	401
Max	2461	1900	3410	3396	3548	3552
25%	2	6	27	9	145	120
50%	15	29	63	79	269	208
75%	57	68	124	180	498	411
90%	120	247	236	362	1024	912

מעיון בטבלה רואים כי הערך שהתקבל אומר שפחות מ-10% מגנרטורים זהים יש ערך גדול יותר, נתון האומר כי נדרשת התייחסות לתוצאות המדידה ולנתח אותם כדי לזהות את מקור הבעיה.

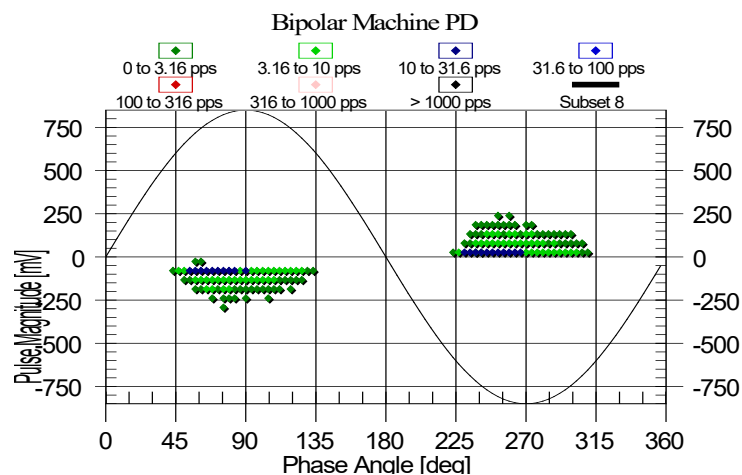
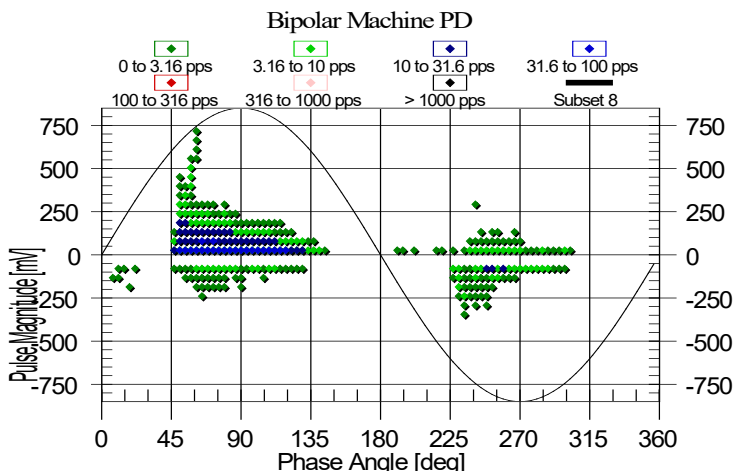
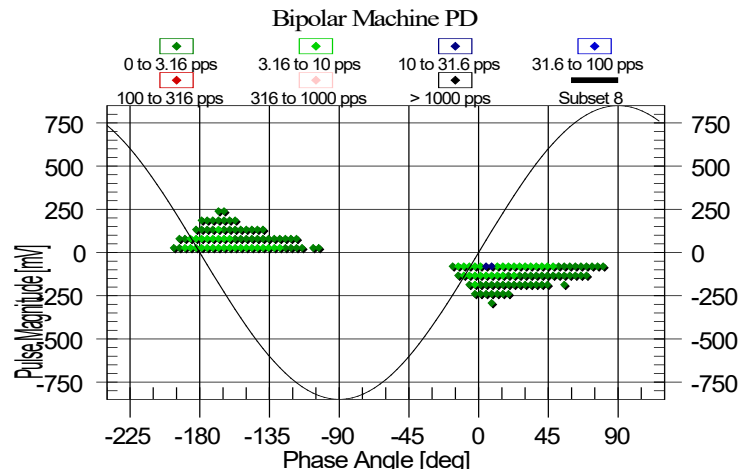
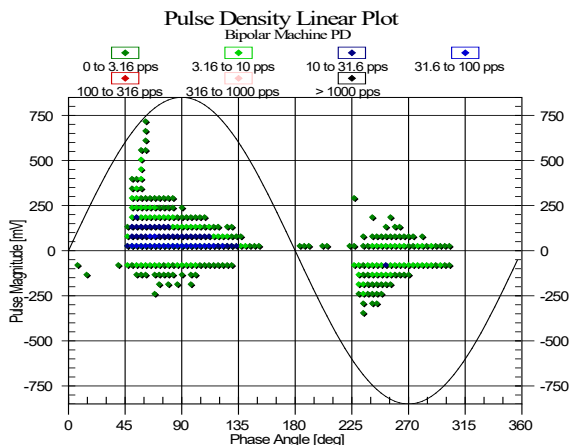
מניסיון חברת IRIS כאשר מתקבל ערך  $Q_m$  גדול מ-90% במכונות זהות, הדבר מעיד על בעיות משמעותיות בבידוד המכונה.



# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

## מה עושים עם הנתונים - המשך

לאחר הבדיקה הראשונית מעלים את תוצאות המדידה בפאזות השונות על גרפים שבאמצעותם מבצעים את הניתוח לזיהוי מיקום הפגיעה בבידוד.



# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

מה עושים עם הנתונים - המשך

לצורך השלמת המידע על מנגנון הכשל, מבצעים בדיקות נוספות במשטרי הפעלה וטמפרטורות שונות כדי לבדוק את השפעתם על תוצאות המדידה ונעזרים בטבלה הבאה בניתוח:

מנגנון הכשל	השפעת הטמפרטורה	השפעת העומס	קוטביות דומיננטית	זווית מיקום במחזור
פגיעה תרמית בלמינציה	שלילית	אין השפעה	אין	45° ו-225°
שינויי עומס קיצוניים	שלילית	עליה ב-PD	שלילית	דומיננטיות ב-45°
ליפופים משוחררים	שלילית	חיובית	חיובית	דומיננטיות ב-225°
התפרקויות בחריץ	שלילית	אין השפעה	חיובית	דומיננטיות ב-225°
אימפרגנציה לא תקינה	שלילית	אין השפעה	אין	45° ו-225°
זיהום קצות ליפוף	אין השפעה ברורה	אין השפעה	אין	15°, 75°, 195°, 225°
מרווח בין סלילים	אין השפעה ברורה	אין השפעה	אין	15°, 75°, 195°, 225°
בעיה בחצי מוליך	חיובית	אין השפעה	חיובית	דומיננטיות ב-225°

# מדידת התפרקויות חלקיות (PD)

## כיצד כל זה מסייע בתחזוקה מונעת

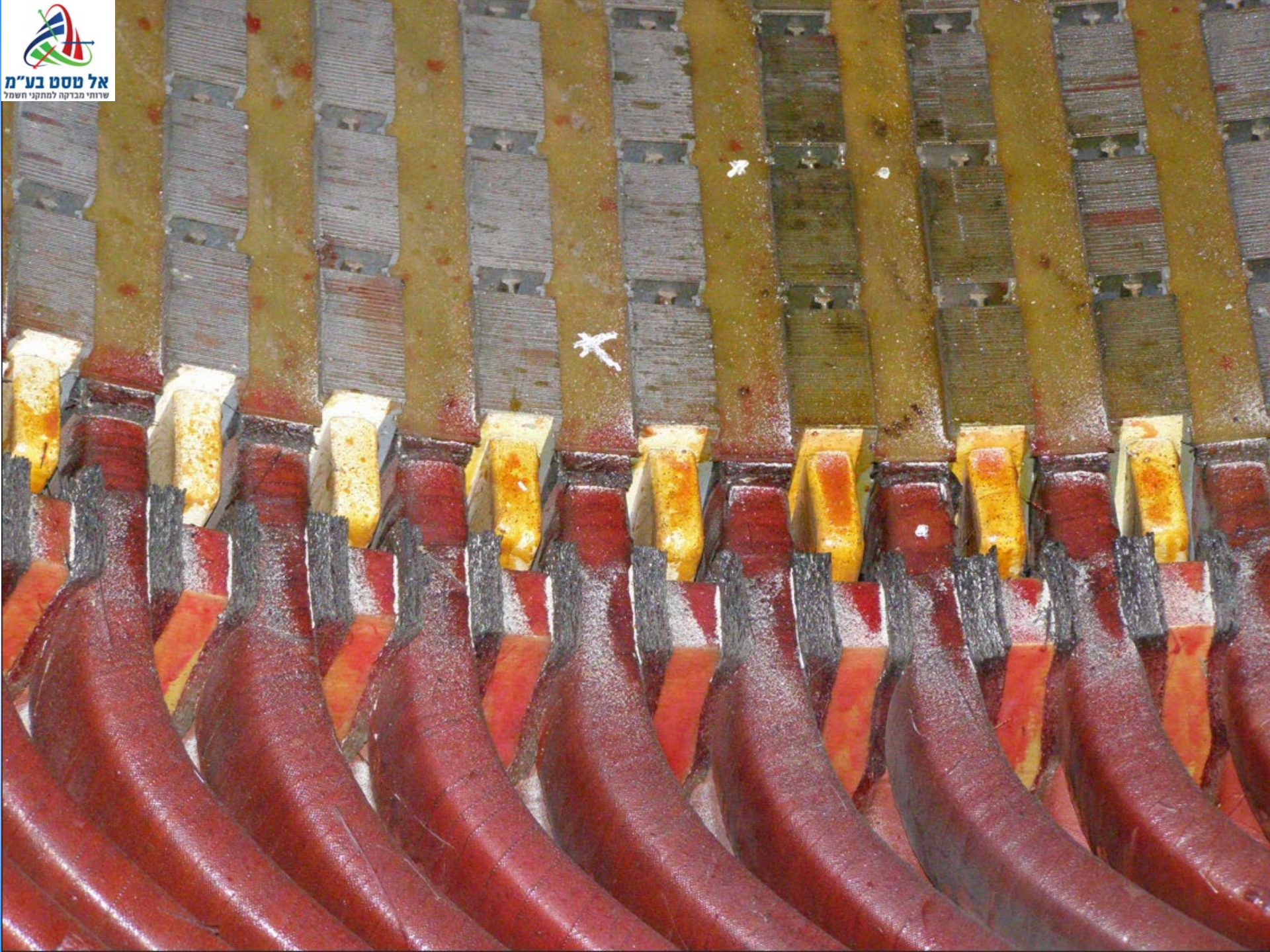
מאחר ותהליך פגיעה בבידוד כתוצאה מהתפרקויות חלקיות הוא תהליך איטי, מבצעים למכונה בדיקה ראשונית, אשר מהווה מעיין תביעת אצבע של המכונה. כדי לזהות תהליכים במכונה מבצעים בדיקה אחרי שנה מהבדיקה הראשונה. במידה ולא התקבל שינוי משמעותי בערכי  $NQN-I Q_m$  חוזרים על הבדיקה אחת לשנה.

במידה וזוהה שינוי משמעותי בערכים אלה מקטינים את מחזוריות הבדיקה לפעם בחצי שנה ומבצעים בדיקות במשטרים שונים כדי לזהות השפעת טמפרטורה ושינויי עומס עליהם.

לקראת ביצוע תחזוקה מונעת מבצעים בדיקה נוספת ומנתחים את תוצאותיה כדי לקבל הכוונה למנגנון הכשל לצורך איתור ממצאים פיזיים במכונה.

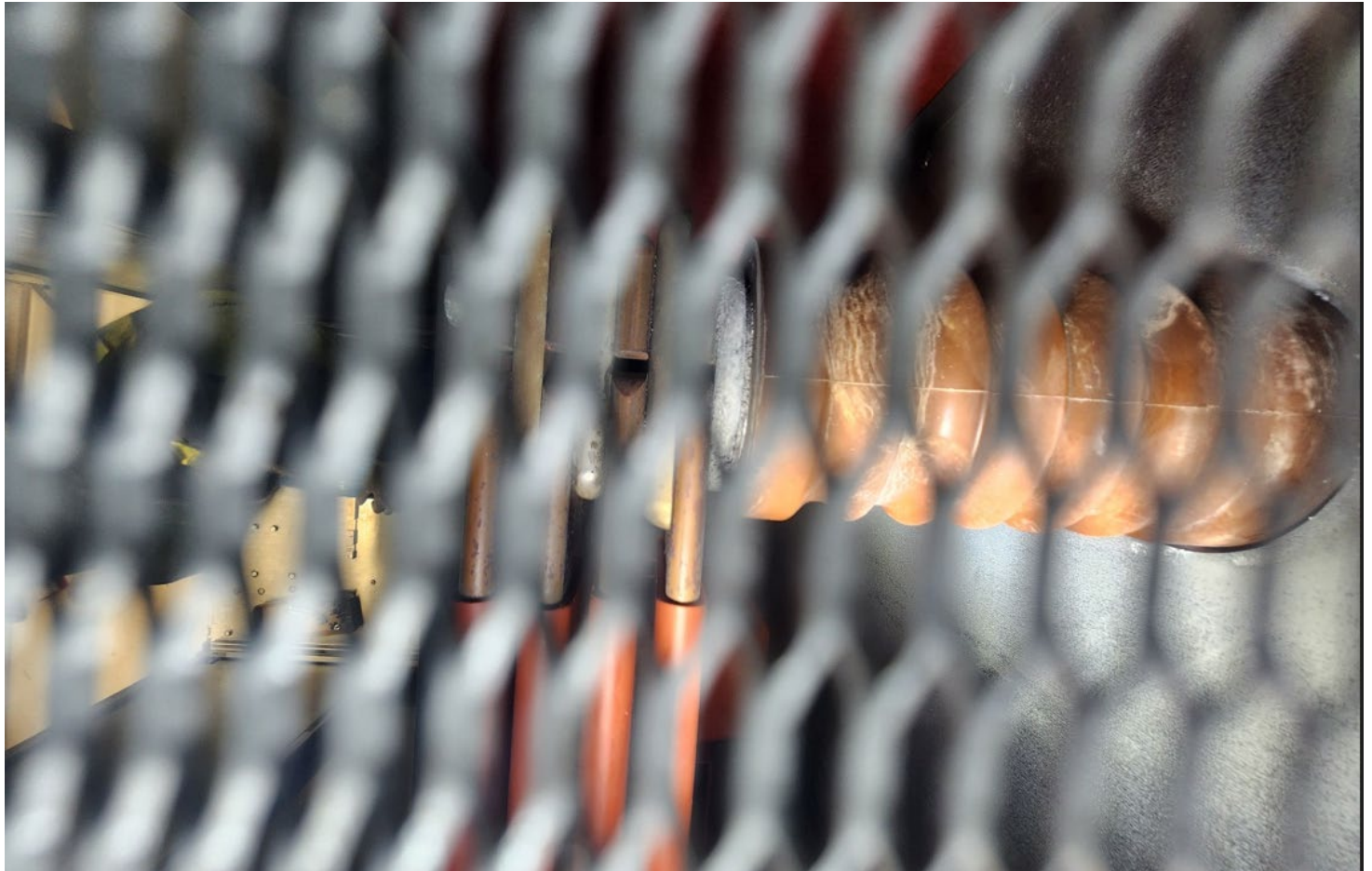
לאחר פתיחת המכונה מבצעים בדיקה ויזואלית ו/או בדיקות נוספות (חיזוק קצות ליפוף למשל) כדי לטפל בגורם להתפרקויות.

בבדיקה הוויזואלית מנסים לאתר פגיעות פיזיות בבידוד ובודקים האם נוצרה אבקה לבנה שהיא אחת מהתוצאות של התפרקויות על פני הבידוד או בקצותיו.



# התפרקויות חלקיות במסדרי מתח גבוה

במסדרי מתח גבוה, ניתן לבצע בדיקת התפרקויות חלקיות באמצעות מדידת הפרעות בשדה החשמלי ובאמצעות גלאי אקוסטי. במסדר 22kV נמדדו ערכים אקוסטיים חריגים, הומלץ בפני מחזיק המתקן לפתוח את המסדר ולנסות לאתר סימנים להתפרקויות חלקיות. בבדיקה ויזואלית שבוצעה התגלו הממצאים הבאים:



# תודה רבה על ההקשבה