

השפעת שינוי התדר על ניתוח תוצאות בדיקת $\tan \delta$ במנועי מתח גבוה.

כותבים: דר' אנטולי שקולניק*, מהנדס דורון עובד**

*** מעבדת חשמל מרכזית, חברת החשמל.**

**** תואר שני אוניברסיטת אריאל, חברת החשמל.**

מציג: מהנדס דורון עובד

מנועי מתח גבוה הינם רכיב קריטי במערכות ייצור.

תקלה בבידוד מנועי מתח גבוה עלולה להפעיל הגנות ולגרום להפסקת המנוע, דבר זה עלול לגרום נזק כלכלי ו/או תהליכי כבד מאוד, לדוגמא הפסקת יחידת ייצור של חברת החשמל.

על מנת לצמצם את הסיכוי להתרחשות תקלות מבצעים תחזוקה מונעת, אחת הבדיקות החיוניות לבדיקת טיב הבידוד היא בדיקת $\tan\delta$.

או בלעז: DDF(Dielectric Dissipation Factor)

על ידי ניתוח תוצאות בדיקת $\tan\delta$ – בשילוב בדיקות דיאלקטריות נוספות ניתן לקבוע את מצב הבידוד, ולהחליט על פעולות התחזוקה הדרושות.

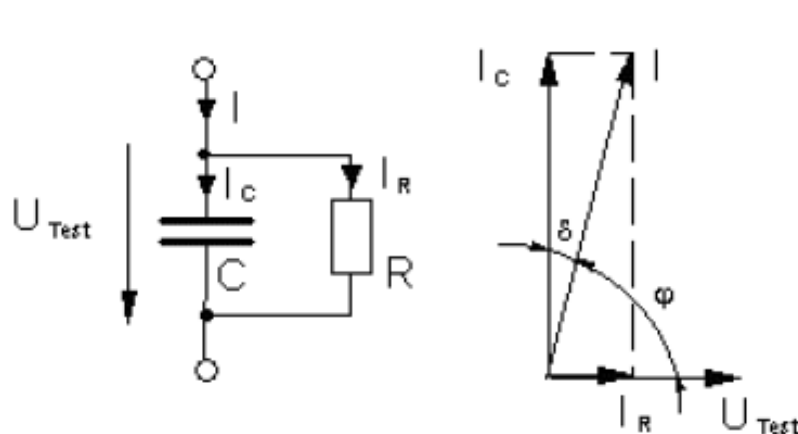
לדוגמא: עליה ב- $\tan\delta$ וירידה במקדם הקיטוב מצביעים על לחות בבידוד ויש לייבש את המנוע.

מהלך הבדיקה כיום

בדיקה זו מתבצעת במנועי מ"ג בתדר קבוע 50Hz ומתח הבדיקה עולה בקפיצות $0.2U_n$ מ- $0.2U_n$ - $1.2U_n$. לפי האופיין המתקבל ובהשוואה לבדיקות קודמות ניתן להעריך את טיב הבידוד.

חשוב לציין שערכי תוצאות $\tan\delta$ מתקבלים באחוזים!
 $\tan\delta$ מבטא את היחס בין הזרם ההתנגדוטי לזרם הקיבולי,
ככל שהזרם ההתנגדוטי גדול יותר אזי תוצאת $\tan\delta$ גדולה יותר וזה אומר שיש לכלוך, לחות ו/או כשל בבידוד.

היצרן נותן ערכי סף של $\tan \delta$ שבהם הבידוד תקין, שנעים בין 0.5% - 2% . כמו כן התוצאה בהכנסה לפעולה משמשת כתוצאת ייחוס לבדיקות הבאות.



U_{TEST} - מתח הבדיקה

I_C - זרם קיבולי (זרם דרך הקיבול).

I_R - זרם התנגדותי (זרם דרך ההתנגדות).

C - קבל אידיאלי.

R - נגד אידיאלי.

סכמת תמורה מקבילית לבידוד ודיאגרמת ווקטורים

מתוך הדיאגרמה נקבל את נוסחת החישוב:

$$\tan \delta = \frac{P_R}{Q_C} = \frac{I_R}{I_C} = \frac{X_C}{R}$$

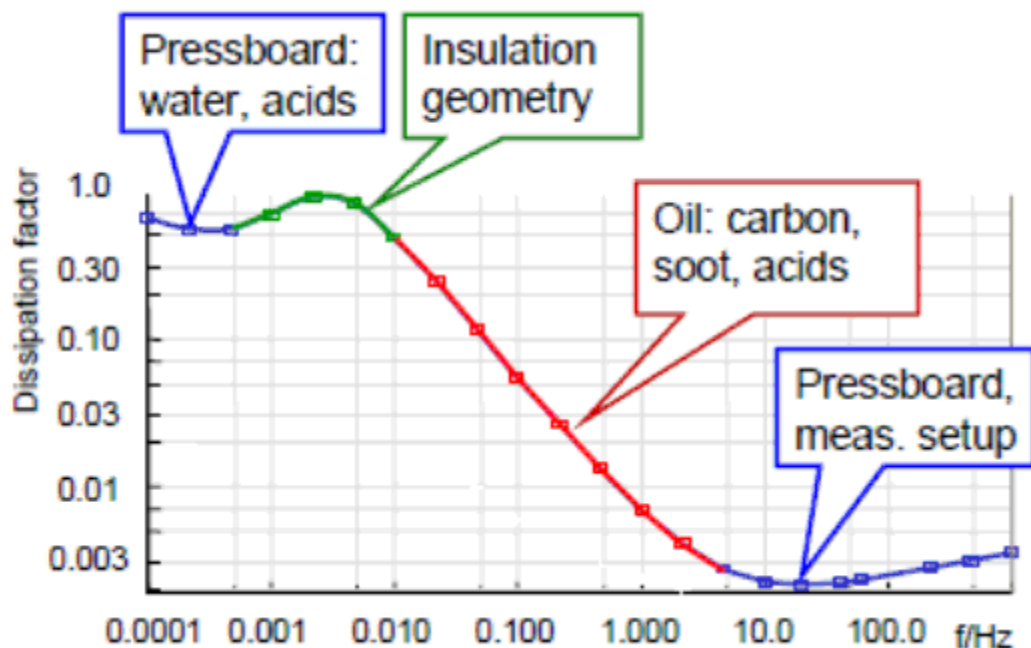
בעולם יש התפתחות במכשור עקב ההתפתחות באלקטרוניקת הספק, דבר המקנה אפשרות לבדיקה עם ספקטרום תדרים נרחב מ- kHz - mHz ויותר, בשנאים ומבודדים שמכילים בידוד על בסיס שמן ותאית בוצעו מחקרים רבים שמתוכם נובע שניתן לקבל אינדיקציה טובה יותר על מצב הבידוד, ממה נובעת התקלה ויתרה מכך לזהות את כמות המים בבידוד התאית (נייר) וזאת מתוך תוצאות ההענות הדיאלקטרית של הבידוד.

שיטות מתקדמות:

את מדידת האיבודים ניתן לבצע במרחב התדר
FDS(frequency domain spectroscopy) או במרחב
הזמן PDC(polarization depolarization current).
המידע מומר ממרחב הזמן למרחב התדר ולהפך. מדידת
ה- FDS מכסה את כל טווח התדרים מתדר נמוך מאוד עד
גבוה מאוד, אך בדיקות בתדר נמוך דורשות זמן ארוך
למדידה, כאשר בדיקת PDC הינה בדיקה מהירה אך
בתדר עד 1Hz.

גישה חדשה משתמשת בשילוב יתרונות 2 השיטות ומאפשרת מדידה בטווח של $(0.1-5000)\text{Hz}$ בעזרת FDS ומדידה עד 1mHz על ידי PDC. המידע של בדיקת ה- PDC מומר למידע במרחב התדר ומוצג בערכי $\tan\delta$.

משילוב השיטות מתקבל טווח מדידה מוגדל כאמור
 $(1\text{m}-1\text{k})\text{Hz}$.

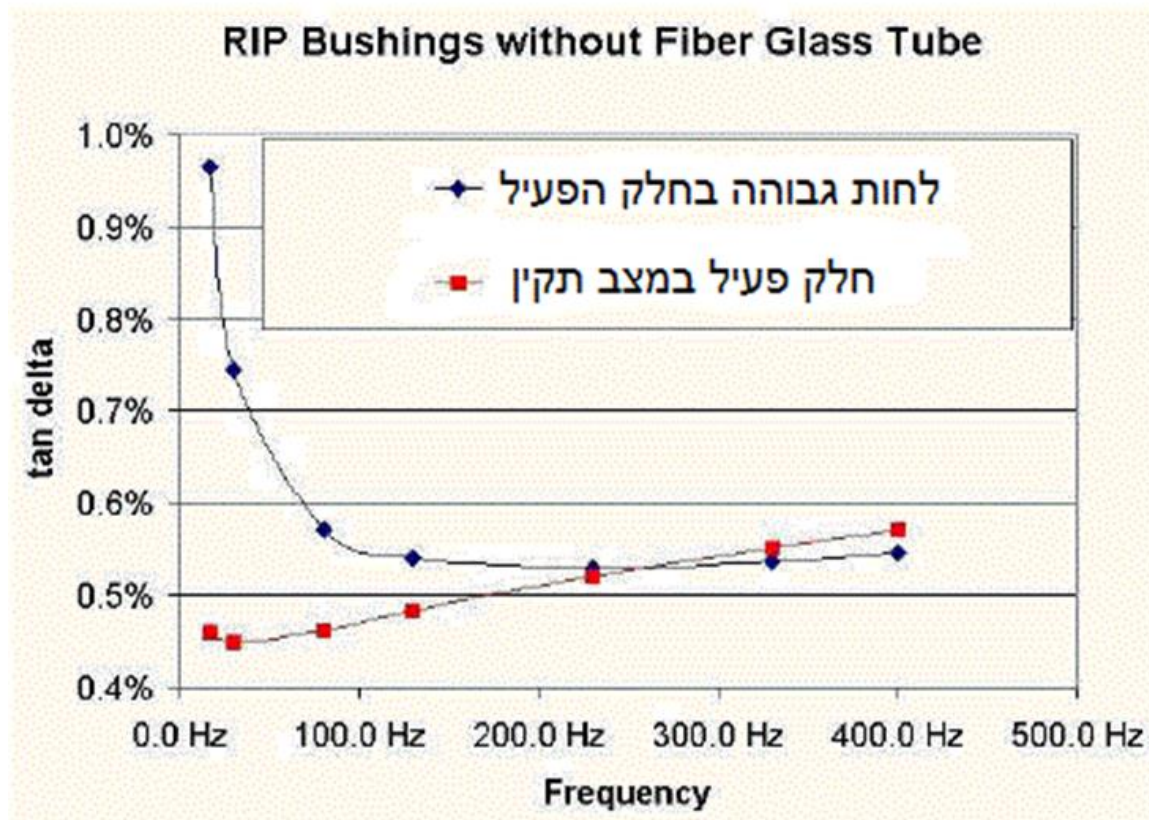


פרוש סכמתי של FDS המנפק הפרדה בין השפעת לחות, זקנה, מוליכות השמן וגאומטריה הבידוד.

קביעת הלחות מתבססת על השוואת התגובה הדיאלקטרית של השנאי עם מודל דיאלקטרי. אלגוריתם מתאים מסדיר את המודל של התגובה הדיאלקטרית ומספק תכולת מים ומוליכות השמן.

במחקר שנעשה במבודדים מסוג נייר טבול בשרף, RIP- Resin Impregnated Paper נמצא קשר ישיר בין $\tan\delta$ מצב הבידוד ואופי התקלה לתוצאות של בדיקת $\tan\delta$ בספקטרום תדרים נרחב. בידוד מסוג זה דומה במעט לבידוד שבשימוש במנועי מתח גבוה וזו המוטיבציה לביצוע המחקר גם לבידוד מנועי מתח גבוה.

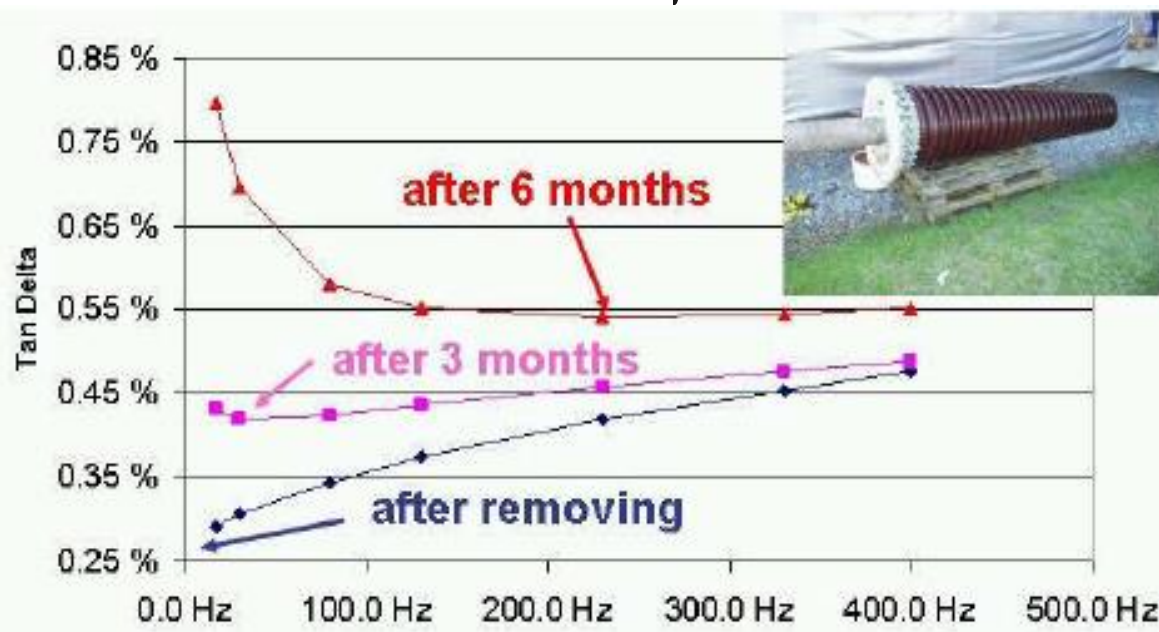
מבודדי - RIP



מבודד מ"ג מסוג RIP עם וללא לחות. בטווח תדרים בן (15-400)Hz

אזור התדר הנמוך בולט ברגישותו להמצאות לחות!!!!

באיור מופיעות עקומות $\tan \delta$ של מבודד מ"ג מסוג RIP שאופסן בחוץ ללא הגנה לאזור השמן.



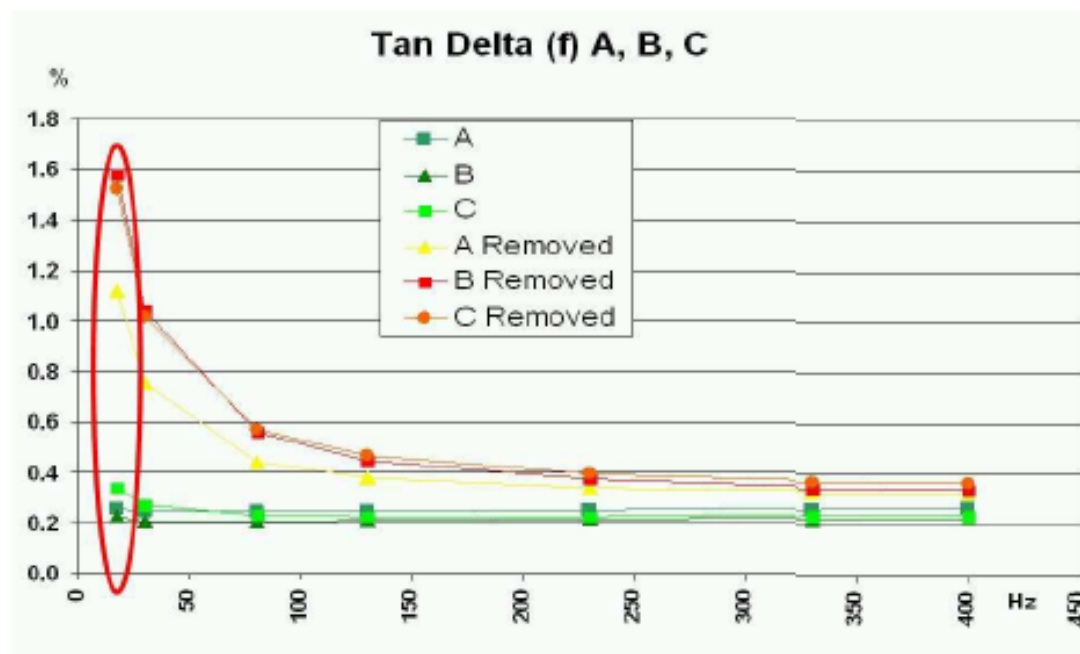
הענות דיאלקטרית של מבודדי מ"ג מסוג RIP החשוף ללחות.

אזור השמן הלא
מוגן ספג לחות
במהלך החודשים
והשינוי בתוצאות
בבדיקת $\tan \delta$
נראה בברור

גם במקרה

זה בתחום התדר הנמוך.

באיור מופיעות עקומות $\tan \delta$ של מבודדים ישנים (Removed) וחדשים.



בדיקת $\tan \delta$ (f) במבודדים חדשים וישנים (Removed) בטמפרטורה של 30°C.

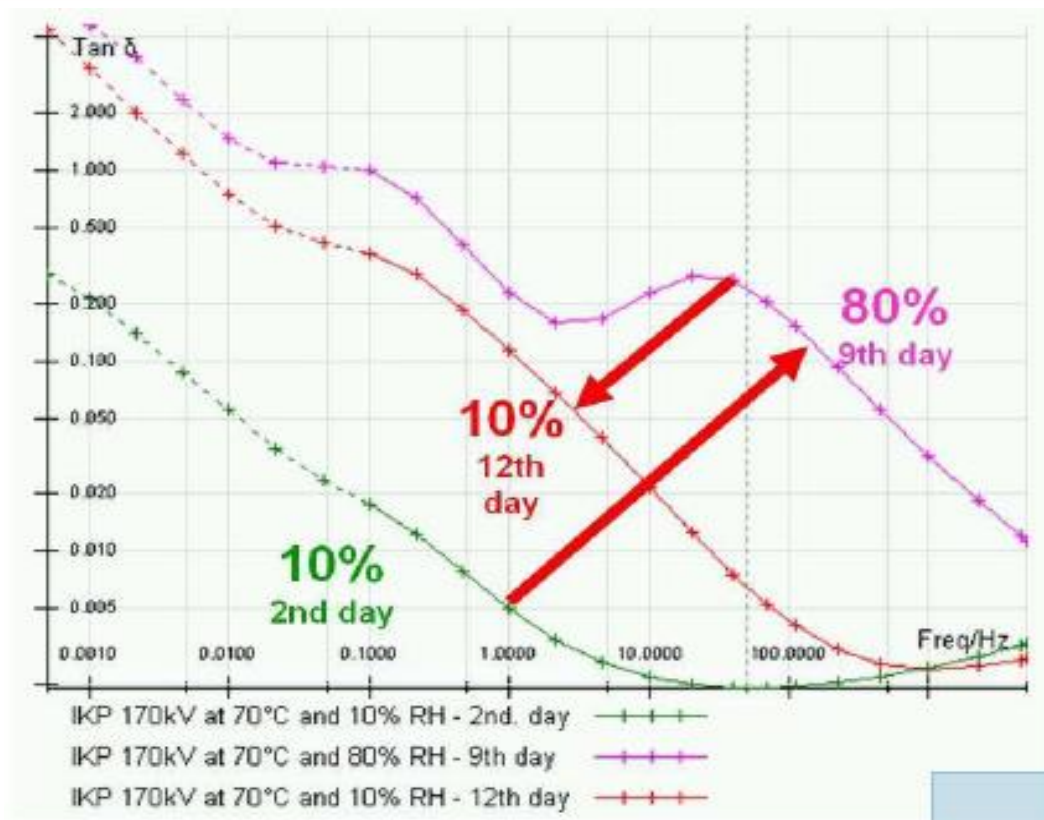
מתוך עקומות ה- $\tan \delta$ שהוצגו:

תדר נמוך רגיש ללחות!!

ניסוי במבודד מסוג RIP עם מילוי מיקה.

המבודד נחשף לדרגות לחות וטמפרטורה בתא אקלים. הניסוי החל ב- 20° צלזיוס ו- 38% לחות יחסית. ביום שני המבודד חומם ל- 70° צלזיוס ולחות יחסית 10% עקומה ירוקה, ביום למחרת חומם ל- 70° צלזיוס ו- 80% לחות יחסית העקומה הוורודה נמדדה. ביום העשירי הוקטנה הלחות ל- 10%, נמדדה העקומה האדומה עם 70° צלזיוס ו- 10% לחות יחסית.

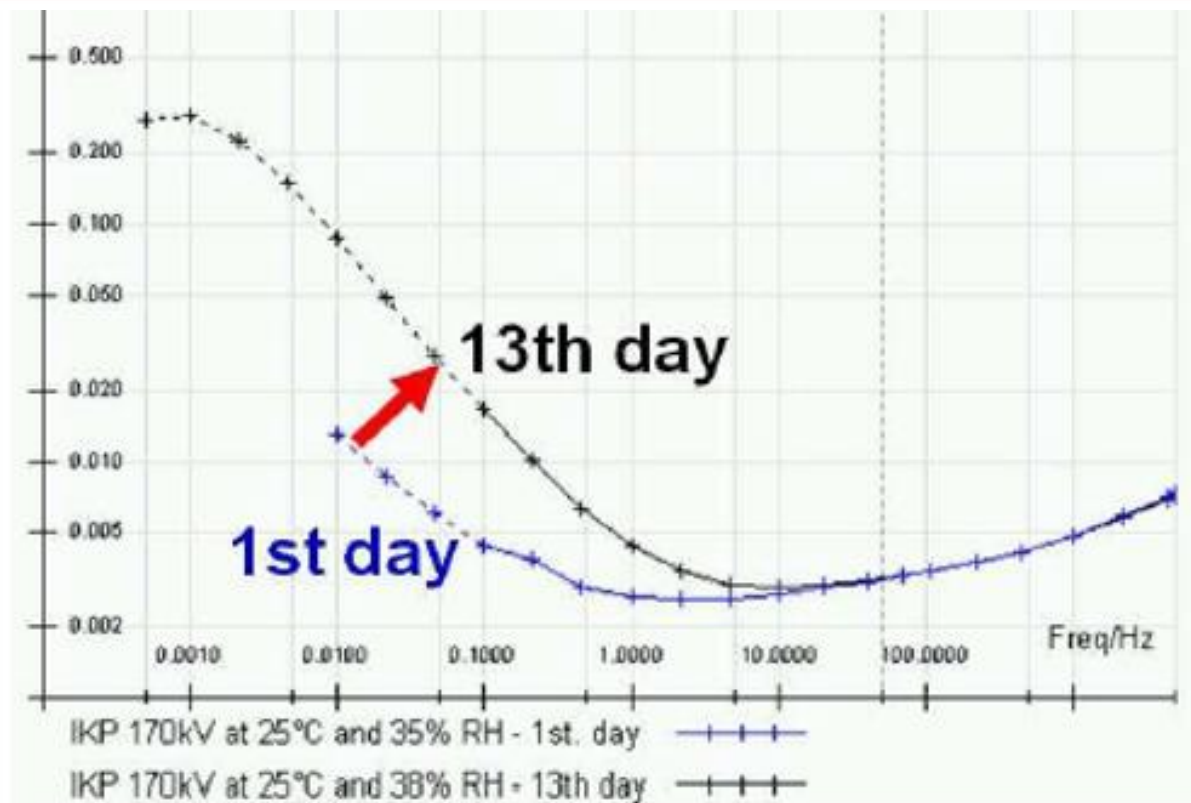
ניסוי עם מבודד RIP



מבודד RIP בדרגות לחות שונות

הלחות עדיין נותרה על פני השרף, מדידה אחרונה נלקחה
ביום ה-13 תוצאות באיור הבא.

ניסוי עם מבודד RIP



ניתן לראות שהלחות לא יובשה ועדיין יש לחות לפי התדרים שמתחת ל-10 הרץ, מעל 10 הרץ העקומות נפגשות ולא ניתן להבחין בלחות.

לפני מספר שנים נרכש מכשיר המדידה MIDAS 288x על ידי מעבדת חשמל מרכזית של חברת החשמל. מכשיר זה יכול לחשב בו זמנית קיבול ואיבודים דיאלקטרים של בידוד נוזלי ומוצק. ניתן לבצע בדיקת בידוד לכבלים, שנאי הספק, גנראטורים, מנועים, מבודדים וכולה. המערכת משמשת לבדיקת ציוד מתח נמוך וגבוה בתחום תדר נרחב $(15-400)\text{Hz}$. המכשיר מודולרי ומתאים לבדיקות בשטח!

מערכת מכשיר ה- MIDAS מתפרקת לרכיבים וניתנת להובלה והרכבה בקלות. המערכת כוללת ארגז הפעלה, עגלה ומחשב נייד.

- Instrument box
- Trolley
- Touchscreen operated PC head or
- Laptop

These parts can be mounted /
dismounted by opening the related
fastener.



חלקי המכשיר בנפרד - MIDAS288x

* במבודדים מסוג נייר טבול בשרף - RIP נמצא קשר ישיר
בין מצב הבידוד ואופי התקלה לתוצאות של בדיקת $\tan \delta$
בספקטרום תדרים נרחב.
* בידוד מסוג זה דומה במעט לבידוד שבשימוש במנועי מ"ג.

* מכשיר ה- MIDAS 288x מאפשר מדידות בתחום
תדרים מורחב בדיקה בטווח $(15-400) \text{ Hz}$.

שילוב 3 הנקודות מהווה את המוטיבציה לביצוע
המחקר בבידוד מנועי מתח גבוה!!



שיטה א':

תתבסס על ביצוע בדיקות רבות ככל הניתן, ריכוז הבדיקות וניתוח על פי סוג מכונה חדשה/ישנה ולפי סוג הבידוד (אם ניתן להשיג מידע זה), כדי להקל על הניתוח נכניס את התוצאות לגרפים ונבנה עקומות הענות של $\tan \delta$ לתדר משתנה. נכון לעת זו נבדקו עשרות מנועים במספר תחנות כח ובאזורים שונים בארץ באתרי חח"י.

שיטה ב':

תתבסס על איתור מנועים עם בידוד לקוי ולבצע מדידה של לפני ואחרי טיפול מתוך התוצאות שיתקבלו ננסה לבצע מיפוי של המקור הגורם לתוצאות הפחות טובות של $\tan \delta$. האם מהתיישנות הבידוד או עקב לחות שחדרה לבידוד. בהמשך נביא דוגמאות לממצאים משיטה זו.

שיטה ג':

בתחנת הכח אורות רבין פורק מנוע מטחנות פחם שלא בשימוש, המנוע נתרם על ידי מנהל תחנת הכח לביצוע ניסויים. המנוע ייבדק בשלושה מצבים:

1. לאחר אחסנה במחסן.

2. לאחר ייבוש בתנור במשך 3 ימים בטמפרטורה של 80°C .

3. לאחר עמידה בתנאי לחות גבוהה.

סעיפים 1, 2 בוצעו והתוצאות יוצגו בהמשך.

סעיף 3 עדיין לא בוצע נכון ליום כתיבת המצגת.

שיטה ב' - דוגמא 1

המנוע בדוגמא 1 הוא מנוע 3.3kV המשמש למשאבת כבוי אש באתר חברת החשמל.

המנוע הינו חדש ונבדק לפני הכנסה לפעולה ראשונית, מתוצאות הבדיקה נמצא שה- $\tan\delta$ בתדר 50Hz בין $4\%-5\%$, גבוה מהמומלץ במיוחד עבור מנוע חדש. הומלץ על ייבוש מנוע על ידי חימום חיצוני למשך מספר ימים. לאחר החימום נבדק שוב, המצב השתפר אך עדיין נשאר בתחום גבוה בין $3\%-3.3\%$, לכן הומלץ על המשך טיפול. בהמשך מוצגים טבלה וגרף של תוצאות הבדיקה לפני ואחרי הייבוש בטווח תדרים של $15\text{Hz}-500\text{Hz}$.

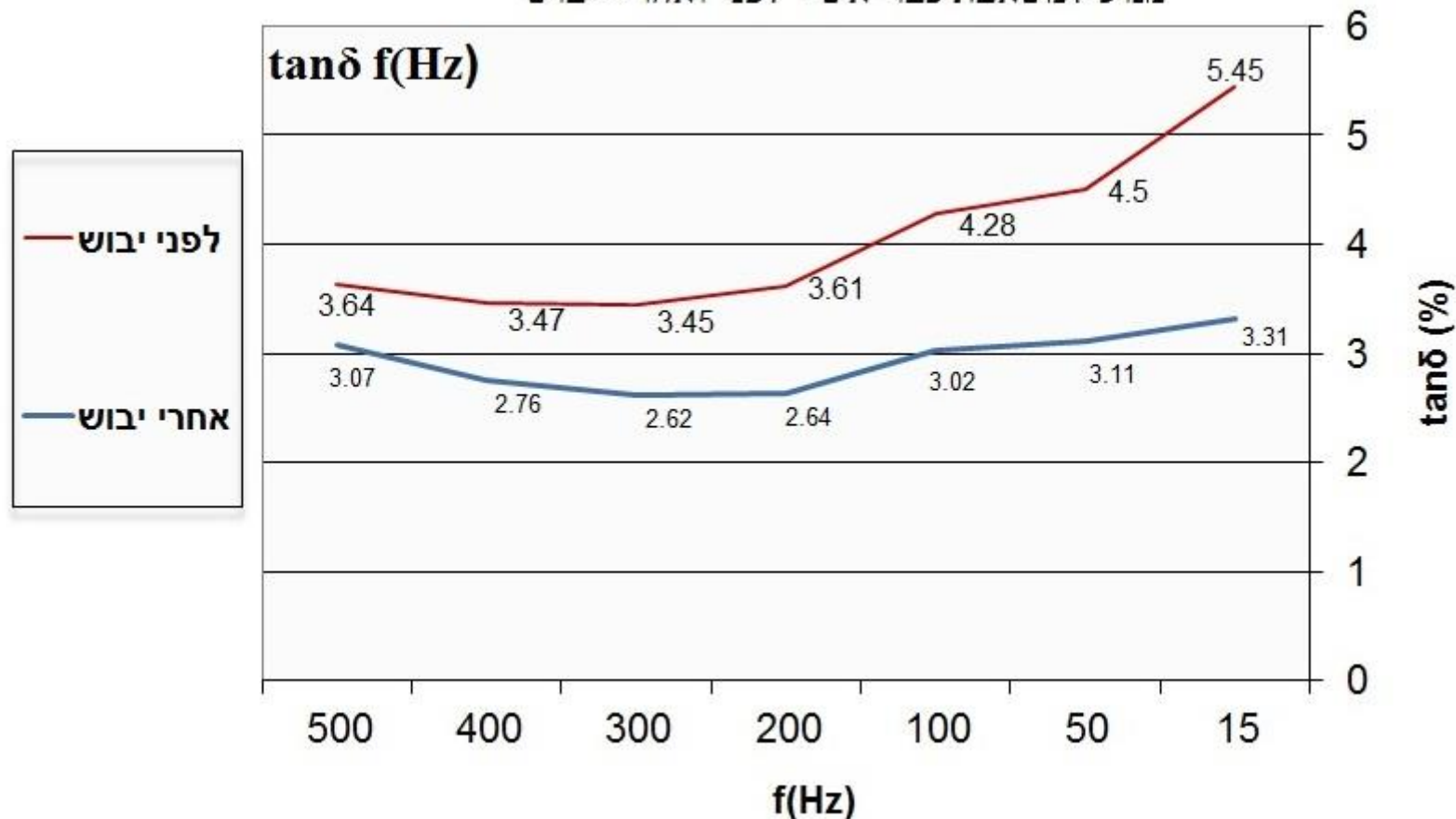
דוגמא 1 - נתוני המנוע

ריכוז של תוצאות הבדיקה לפני ואחרי הייבוש בטווח תדרים של $(15-500)\text{Hz}$, מנוע חדש למשאבת כיבוי אש.

MEGER	48.9G								
PI	5.5			F.P new - $\tan\delta=f(\text{Hz})$			F.P after drying - $\tan\delta=f(\text{Hz})$		
	F.P new - $\tan\delta=f(\text{V})$			kV	$\tan\delta\%$	Hz	kV	$\tan\delta\%$	Hz
kV	$\tan\delta\%$	C(nF)	PD	0.5	5.45	15	0.5	3.31	15
0.5	4.50	77.38	800	0.5	4.5	50	0.5	3.11	50
1	4.65	77.65	1,200	0.5	4.28	100	0.5	3.02	100
1.5	4.77	77.88	2,500	0.5	3.61	200	0.5	2.64	200
2	4.88	78.22	3,000	0.5	3.45	300	0.5	2.62	300
				0.5	3.47	400	0.5	2.76	400
				0.5	3.64	500	0.5	3.07	500
	הומלץ על ייבוש			לפני ייבוש			לאחר ייבוש 4 ימים		

דוגמא 1- הענות דיאלקטרית

מנוע למשאבת כבוי אש - לפני ואחרי ייבוש



הענות דיאלקטרית לפני ואחרי הייבוש של המנוע.

דוגמא 1- מסקנות

ממבט בגרף ניתן לראות בברור שאזור התדרים הנמוך יותר הושפע מאוד מהחימום של המנוע והירידה בערך $\tan\delta$ באזור זה היא גדולה יותר, דבר זה מצביע על המצאות לחות בבידוד! ניתן לראות בנוסף שכל הגרף ירד כלפי מטה לאחר הייבוש.

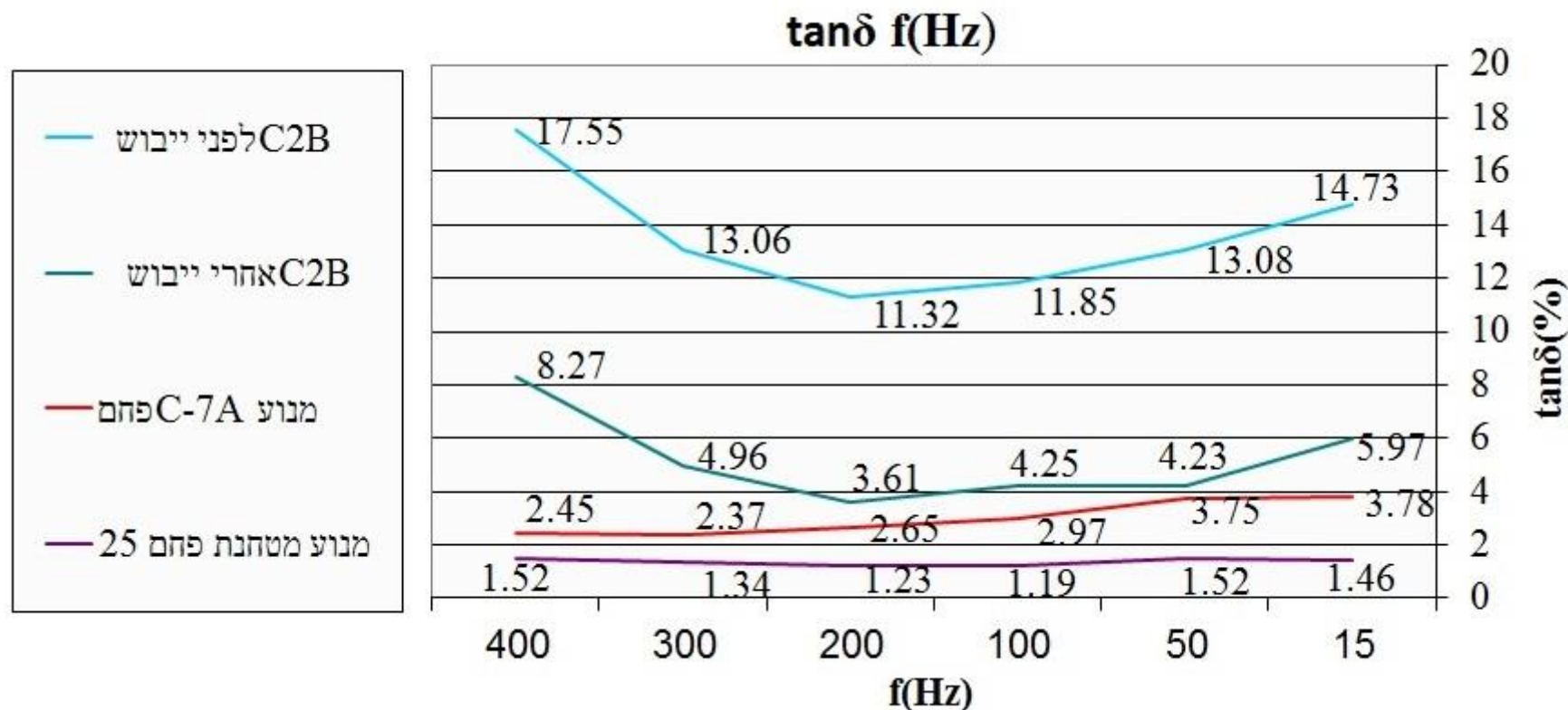
בדוגמא 2 מובאים 3 מנועים ישנים מאתר הפחם. מנוע 6.6kV ששמו C2B, שנבדק במהלך תחזוקה, מתוצאות הבדיקה נמצא ש- $\tan\delta$ בתדר 50Hz באזור 12% אחוז, גבוה מהמומלץ. הוחלט על ניקיון (הרבה פיח באזור) וייבוש המנוע על ידי חימום חיצוני. לאחר החימום המנוע נבדק שוב, המצב השתפר אך עדיין נשאר בתחום גבוה בין $4\%-5\%$. מאחר ובדיקת התנגדות הבידוד ומקדם הקיטוב נמצאו תקינים ($11.6\text{G}\Omega$ ומקדם קיטוב 1.95) המנוע הוחזר לעבודה.

דוגמא 2 - נתוני המנוע

ריכוז תוצאות בדיקת $\tan\delta$ לפני ואחרי ייבוש,
בטווח תדרים (15-400)Hz.

קובץ 18 מנוע פחם C - 2B									
C2B - $\tan\delta=f(V)$				C2B - $\tan\delta=f(Hz)$			C2B - $\tan\delta=f(Hz)$		
kV	$\tan\delta\%$	C (nF)	PD	kV	$\tan\delta\%$	Hz	kV	$\tan\delta\%$	Hz
0.9	12.96	90.33		0.5	14.73	15	0.5	5.97	15
1.8	12.97	90.35	1500	0.5	13.08	50	0.5	4.23	50
2.7	12.15	90.58	3000	0.5	11.85	100	0.5	4.25	100
3.8	13.48	90.55	8000	0.5	11.32	200	0.5	3.61	200
הומלץ על נקיון וייבוש				0.5	13.06	300	0.5	4.96	300
				0.5	17.55	400	0.5	8.27	400
				לפני נקיון וייבוש			לאחר נקיון וייבוש		

דוגמא 2- הענות דיאלקטרית



תוצאות מדידה של בדיקות בתחום תדרים (15-400)Hz לפני ואחרי יבוש, מנוע C2B.
מנוע C7A- ומנוע מטחנת פחם 25 תקינים.

ממבט בגרף ניתן לראות בברור שכל הגרף ירד כלפי מטה לאחר הייבוש, אך מצד שני צורתו נותרה ללא שינוי. בתדר הנמוך הירידה פי 3 בערך $\tan \delta$ ובתדרים הגבוהים פי 2. המשמעות של ערך גבוה בתדרים גבוהים שיש התיישנות לבידוד, הפולריזציה של החומר עולה. כמו כן מוצגים באיור שני מנועים מאותו אתר פחם מנוע מטחנת פחם 25 ומנוע פחם C7A עם תוצאות יחסית טובות למנוע ישן, וקו מגמה שבו רואים ערכים גבוהים בתדר נמוך ויורדים עם עליית התדר.

בדיקת מנוע מטחנות פחם, המנוע יוצר בשנת 2001, ומיועד למתח 6.6kV , המנוע פורק מאתר הפחם, לאחר הפרוק אוחסן מספר חודשים בתנאי סביבה.

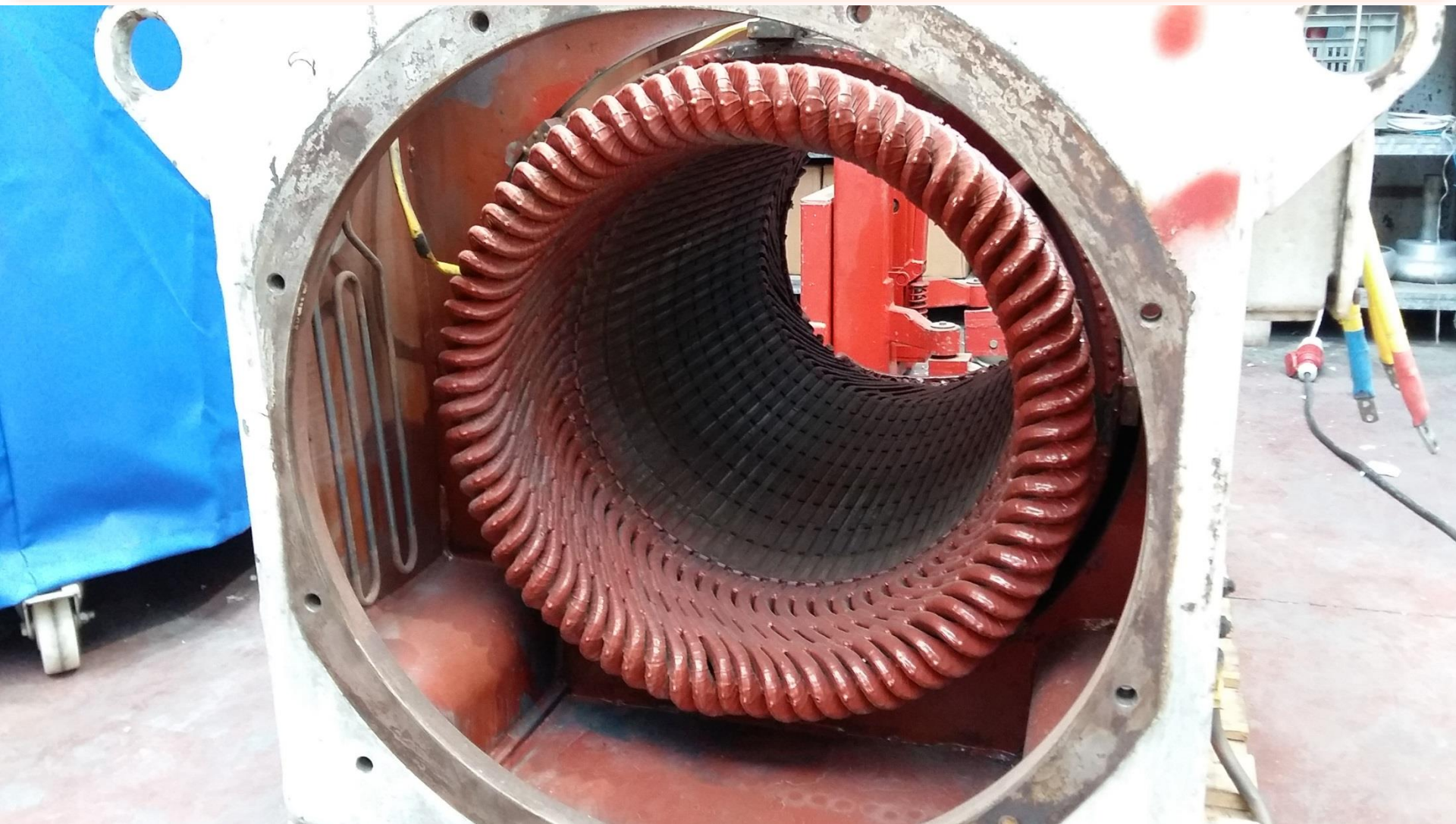
1. בדיקה ראשונה לאחר אחסון.

2. בדיקה שנייה לאחר ייבוש בתנור למשך 3 ימים ב- 80°C .

3. בדיקה בלחות מוגברת (עדיין לא בוצע נכון ליום כתיבת המצגת).

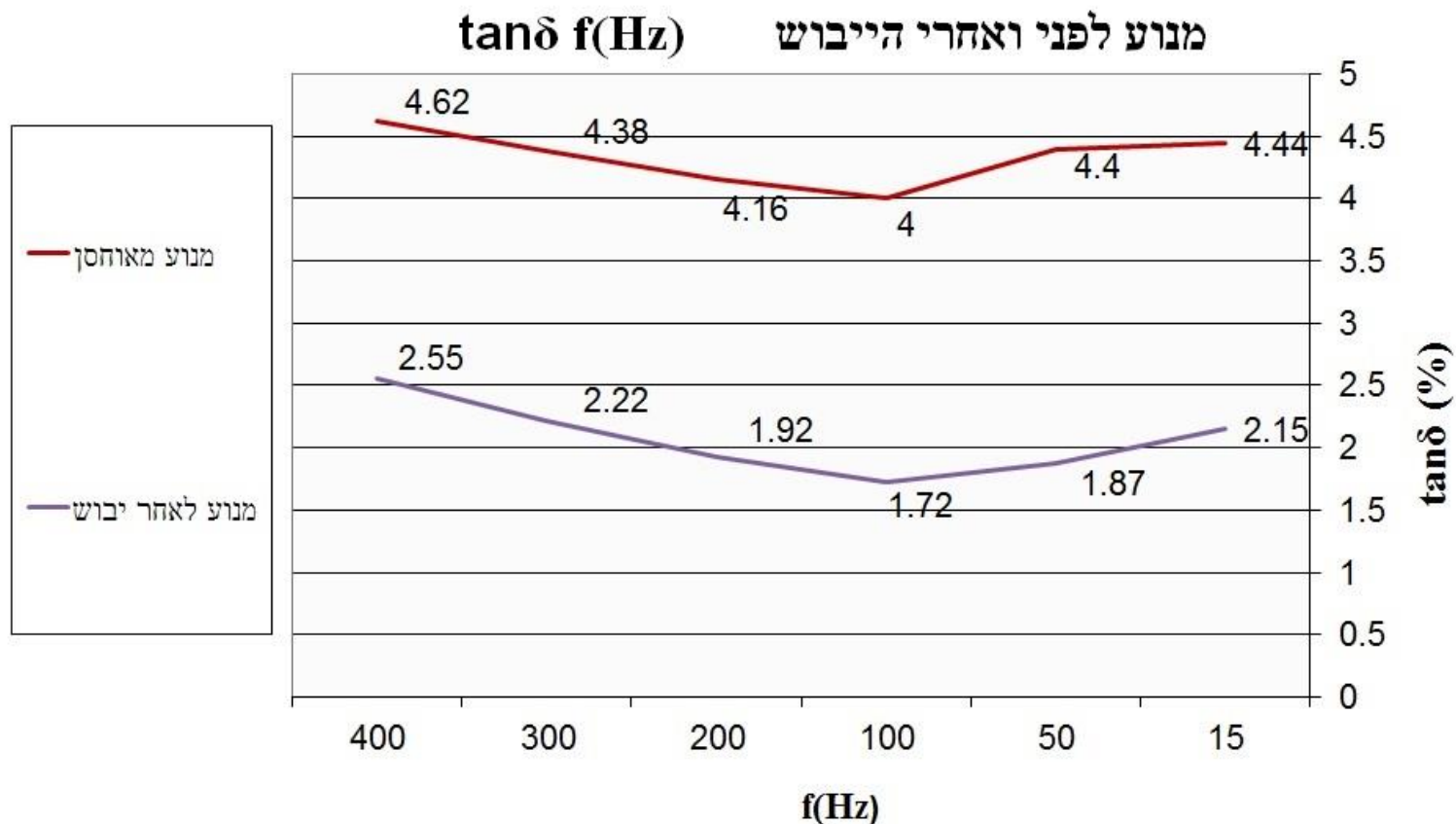
ריכוז תוצאות בדיקת $\tan\delta$ והגרף לאחר בדיקה בטווח תדרים $(15-400)\text{Hz}$ מוצגים בהמשך.

אוביקט הניסוי



ריכוז תוצאות בדיקת $\tan\delta$ לפני ואחרי ייבוש,
בטווח תדרים (15-400)Hz, מנוע שפורק מאתר פחם.

$\tan\delta=f(\text{Hz})$				$\tan\delta=f(\text{Hz})$			
מנוע לאחר אחסון				מנוע לאחר ייבוש			
kV	$\tan\delta\%$	Hz	n F	kV	$\tan\delta\%$	Hz	n F
1	4.44	15		1	2.15	15	90.16
1	4.4	50	98.11	1	1.87	50	88.96
1	4	100		1	1.72	100	88.65
1	4.16	200		1	1.92	200	88.5
1	4.38	300		1	2.22	300	88.77
1	4.62	400		1	2.55	400	89.32



הענות דיאלקטרית לפני ואחרי הייבוש של המנוע.

מהגרף ניתן לראות שיש ירידה בכל התדרים לאחר הייבוש, משמעו שהייתה לחות ברמה גבוה ולכן ירידה בכל תחום התדר, מאחר והמנוע ישן והבידוד התפרק חלקית, בתדרים הגבוהים יש $\tan \delta$ יחסית גבוה.

כהוכחה נוספת להימצאות הלחות, מתוך הטבלה ניתן לראות שיש ירידה של כ- 10% בקיבול בתדר 50Hz, ירידה בקיבול משמעותה ירידה בלחות.

מתוך הניסויים ניתן לראות שיש רגישות של $\tan \delta$ ללחות בבידוד בתדרים הנמוכים, ולהתפרקות הבידוד בתדרים הגבוהים.

במנוע החדש ניתן לראות שההפרש בין מינימום של $\tan \delta$ לבין המקסימום בתדר הגבוה הוא כ- 17% לעומת ההפרש במנוע ישן עם התפרקות בבידוד כ- 50%.

השפעה של הלחות על $\tan \delta$ גדולה יותר מאשר השפעת התפרקות הבידוד, כמו שניתן לראות במנוע הישן.

מטרת הניסוי הושגה וניתן לפי תוצאות הבדיקה לקבוע איזה טיפול יש לבצע למנוע לפי ההענות בתדר.

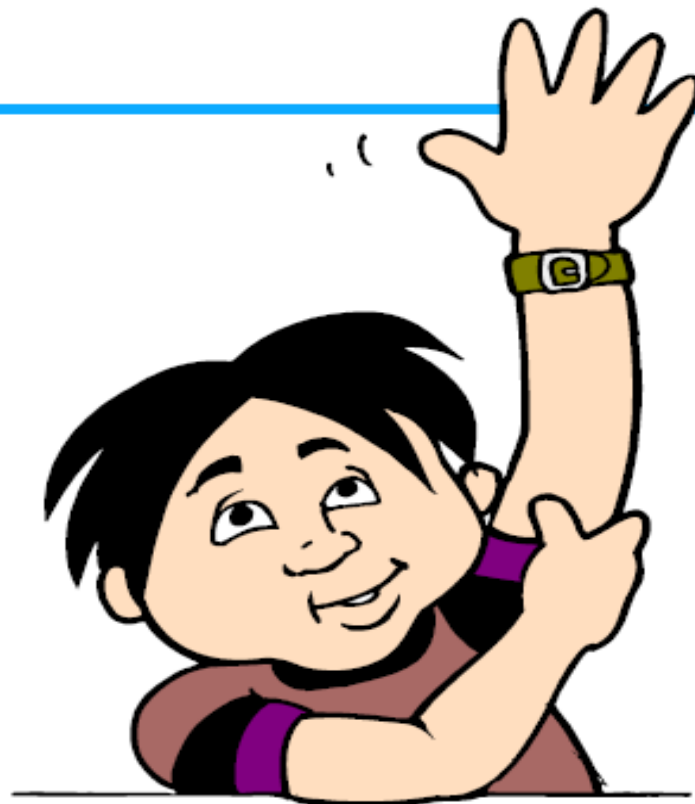
לדוגמא:

- ייבוש.
- ייבוש ואימפרגנציה.
- החלפת הסלילים.

- השלמת הבדיקה של המנוע בתנאי לחות מוגברת.
- ביצוע של המחקר עם מכשיר מתקדם יותר שמסוגל למדוד בשיטה המשולבת FDS-PDC, שכן ראינו שהרגישות ללחות מתבטאת בתדרים נמוכים מאוד, מכשיר ה- MIDAS288x מסוגל לרדת עד 15Hz בלבד! ההיענות הדיאלקטרית בתדרים נמוכים מאוד עשויה להיות יותר חד משמעית באבחון הלחות.
- בדיקת השפעת טמפרטורה על אופיין $\tan \delta$ לפי התדר.

QUESTIONS ???

???





Thank you