

# ספק

Power Quality Doctor



## הרמוניות במערכות מיזוג אוויר

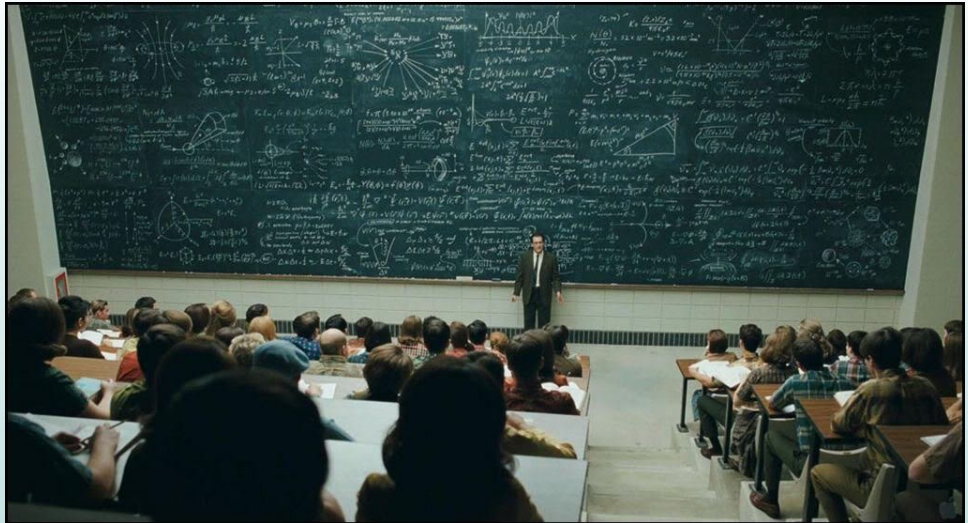
Harmonics in HVAC Systems (WPM 7 2.4)



1



## מה זה הרמוניות?



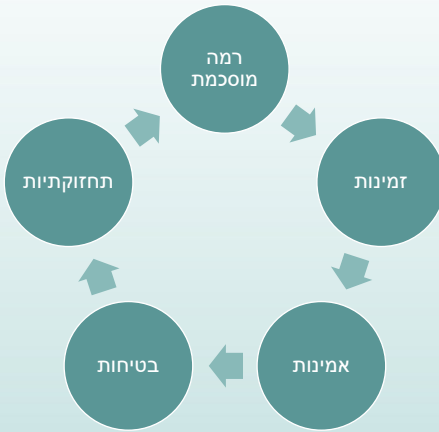
Copyright © Power Quality Doctor

2

2

## מדוע הרמוניות מעניינות אותנו?

- ווסתי מהירות הם הגורמים הנפוצים ביותר להרמוניות
- הרמוניות עלולות להשפיע על אמינות המתקן
- הרמוניות עלולות להשפיע על בטיחות המתקן
- הרמוניות עלולות להשפיע על בריאות המשתמשים במתקן
- דרישה רגולטורית



Copyright © Power Quality Doctor

3

3

## מה כל כך מסובך בהרמוניות?

- יש השפעה הדדית בין המתקן לעומסים, בין העומסים לבין עצמם ובין פתרונות הסינון לעומסים ולמתקן
- הספים בחלק מהתקנים תלויים בזרם הקצר במתקן הספציפי
- התקנים לציוד פחות מחמירים ולפעמים בכלל לא קיימים
- תקנים שונים מתייחסים לפרמטרים שונים
- המפרטים ודפי הנתונים כוללים מידע חלקי

Copyright © Power Quality Doctor

4

4

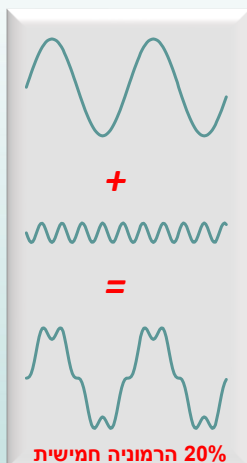
## תקנים בארץ ובעולם

יש חוסר התאמה בין התקנים השונים  
ציוד תקני ותקין עלול לא לפעול כראוי  
ברשת תקינה ותקינה

- חוק משק החשמל**  
 מסדיר את פעולת רשות החשמל
- אמות המידה**  
 חובות ספקי החשמל והצרכנים, כפי שמפרסמת רשות החשמל, מתוך חוק משק החשמל.  
 מחייבות עמידה של ספק חשמל חיוני בת"י 50160 והצרכן בת"י 51900.
- 50160 / ת"י EN 50160**  
 איכות מתח האספקה, נכתב בסיוע חברות החשמל
- 51900 / ת"י IEEE 519**  
 תקן אמריקאי הידוע בעיקר בתחום ההרמוניות (זרם ומתח), כולל גם תופעות מעבר
- 1547 / ת"י IEEE 1547**  
 תקן אמריקאי לחברור (interconnectivity) בין מערכות – בארץ חובה למתקני אגירת אנרגיה
- 63191 / ת"י IEC 63191**  
 ניהול איכות חשמל – תכנון מדידה רציפה, איתור גורמים מפריעים ומופרעים וספים מומלצים
- IEC 61000-3**  
 סדרת תקנים אירופאים אשר חלקם מגדירים את פליטת ההרמוניות ע"י עומסים (עד 75A)
- IEC 61000-4**  
 סדרת תקנים אירופאים המגדירים את שיטות המדידה. החלק המוכר ביותר הוא 4-30 שמגדיר דיוק מדידה Class S-I Class A

## הרמוניות - הגדרה

- גלים בתדרים שהם כפולה שלמה של תדר הבסיס (100 הרץ, 150 הרץ, 200 הרץ וכו').
- יש הרמוניות במתח ובזרם – ההרמוניות בזרם יוצרות הרמוניות במתח



## עיוות הרמוני כולל THD - Total Harmonic Distortion

$$THD(V) = \frac{100\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2)}}{V_1} (\%)$$

$$THD(I) = \frac{100\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)}}{I_1} (\%)$$

$I_n, V_n$  - רכיב מתח/זרם של הרמוניה מסדר n

בתקן הישראלי - עד הרמוניה 40  
בתקנים הבינלאומיים - עד הרמוניה 50

## TDD = Total Demand Distortion

$$THDv = \frac{100\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$

$$THDi = \frac{100\sqrt{i_2^2 + i_3^2 + \dots + i_n^2}}{i_1}$$

- THD לא נותן אפשרות להעריך את הנזקים הנגרמים ע"י הרמוניות בזרמים כי הוא לא מתייחס לזרמים נומינליים וכאשר הזרם ברשת נמוך הוא נותן הערכה לא נכונה.
- מסיבה זו בתקנים עבור זרמים מוגדר פרמטר TDD לפי הנוסחה:

$$TDD = \frac{100\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)}}{I_{Max\ Demand}} = \frac{I_1}{I_{Max\ Demand}} \times THDi$$

- כאשר  $I_{max. demand}$  - שיא הביקוש הרבע שעתי של הזרם בהרמוניה הראשונה הנמדד לאורך שנה

## הרמוניות מתח ע"פ ת"י 50160

Table 1 — Values of individual harmonic voltages at the supply terminals for orders up to 25 given in percent of the fundamental voltage  $u_1$

Odd harmonics				Even harmonics	
Not multiples of 3		Multiples of 3		Order h	Relative amplitude $u_h$
Order h	Relative amplitude $u_h$	Order h	Relative amplitude $u_h$		
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %1.0%	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %0.75%		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

NOTE: No values are given for harmonics of order higher than 25, as they are usually small, but largely unpredictable due to resonance effects.

- ע"פ אמות המידה באחריות חברת החשמל לספק מתח לפי ת"י 50160
- התקן נקבע ע"י חברת חשמל ולכן מקל
- במשך 95% מהזמן ממוצע 10 דקות יהיו נמוכים מהערכים בטבלה והעיוות הכולל נמוך מ-8% במשך 100% מהזמן
- התקן המקורי עודכן בשנת 2019 - ממתנים לפירסום בארץ
- המלצה לתכנון: 5% (תקן G5/4 או גירסה קודמת של IEEE 519)

## אמת מידה 41

- מחייבת עמידה בספים של ת"י 51900 שמבוסס על IEEE 519

(ט) ערכים חשמליים ברשת החשמל- תנאי בנתון שירות לצרכן

(1) ספק שירות חיוני יודא שצרכניו לא חורגים מרמת העיוות הרמוני בורם כמפורט בטבלה 3 שבנספח 1 לאמת מידה זו.

(2) מצא ספק שירות חיוני כי צרכן חורג מרמת העיוות הרמוני כאמור, יערוך ספק השירות החיוני דו"ח אשר יתייחס, לכל הפחות, לדרישות שלהלן:

- תיאור המתקן הנבדק;
- פירוט של מיקום ביצוע הניטור ומכשירי המדידה לרבות המועדים בהם בוצע הניטור;
- פירוט כל הממצאים הרלוונטיים לאיכות חשמל, לרבות: זרם, מתח, אי איזון עיוות הרמוני כולל בורם ובמתח, ות הקריטיות, הרמוניות ואינטר טווח הקרוב והארוך ותופעות מעבר

טבלה 3: רמת עיוות הרמוני בורם - אחוזי רמת העיוות הרמוני המרבי בורם:

$$I_{SC} \cong \frac{I_n}{UK\%}; I_L = I_n \times Load\%$$

$$\frac{I_{SC}}{I_L} \cong \frac{1}{UK\% \times Load\%} = \frac{1}{6\% \times 70\%} = 23.8$$

6% - 33%-83%; 5% - 40%-100%

דרישה לסילוק מקור ההפרעה ככל זק לראש אף הנדסה ברשות. מקור ההפרעה, יפעל הצרכן לסילוק דעה האמורה.

$$\frac{I_{Short Circuit}}{I_{Load}}$$

מספר הרמוניות יחס זרמים	עד 11	עד 17	עד 23	עד 35	מעל 35	TDD
פחות מ-20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
קטן מ-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
קטן מ-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
קטן מ-1000	12	5.5	5	2	1	15
גדול מ-1000	15	7	6	2.5	1.4	20

IEC 61000-3-12

Minimum $R_{s_{ce}}$	Admissible individual harmonic current $I_h/I_{ref}$ <sup>a</sup> %						Admissible harmonic parameters %	
	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$	$THC/I_{ref}$	$PWHC/I_{ref}$
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
≥350	41	24	15	12	10	8	47	47

The relative values of even harmonics up to order 12 shall not exceed 16/h %. Even harmonics above order 12 are taken into account in *THC* and *PWHC* in the same way as odd order harmonics.

Linear interpolation between successive  $R_{s_{ce}}$  values is permitted.

<sup>a</sup>  $I_{ref}$  = reference current;  $I_h$  = harmonic current component.

- תקן לציוד בין 75-ל-16 אמפר
- מעל 75 אמפר אין תקן

IEC 61000-3-12 vs IEEE 519

- פרמטרים דומים, ספים שונים
- $I_{ref} = TDD ; R_{SCE} = I_{sc} / I_L$

Minimum $R_{s_{ce}}$	Admissible individual harmonic current $I_h/I_{ref}$ <sup>a</sup> %						Admissible harmonic parameters %	
	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$	$THC/I_{ref}$	$PWHC/I_{ref}$
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
≥350	41	24	15	12	10	8	47	47

The relative values of even harmonics up to order 12 shall not exceed 16/h %. Even harmonics above order 12 are taken into account in *THC* and *PWHC* in the same way as odd order harmonics.

Linear interpolation between successive  $R_{s_{ce}}$  values is permitted.

<sup>a</sup>  $I_{ref}$  = reference current;  $I_h$  = harmonic current component.

Table 2—Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV

$I_{sc}/I_L$	Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$					
	Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a,b</sup>					
	$3 < h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20 <sup>c</sup>	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

<sup>a</sup> Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.  
<sup>b</sup> Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.  
<sup>c</sup> All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc}/I_L$ .  
 where  
 $I_{sc}$  = maximum short-circuit current at PCC  
 $I_L$  = maximum demand load current (fundamental frequency component) at the PCC under normal load operating conditions

## נזקים מהרמוניות



אפקט הקרום

$$\frac{66.04}{\sqrt{f}}$$

H1 (50Hz) -> 9.3mm  
 H5 (250Hz) -> 4.2mm  
 H25 (1250Hz) -> 1.9mm

- הגדלת הפסדי הולכה (אפקט הקרום)
- עליית טמפרטורה
- קיצור אורך חיים (כלל ארהניוס:  $10^\circ\text{C} = 50\%$  אורך חיים)

$$TPF = \frac{DPF}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

- הפעלת הגנות שגויה
- הגדלת הסיכון לשריפות
- פגיעה בקבלים לשיפור מקדם הספק
- פגיעה במקדם ההספק

## נזקים מהרמוניות (המשך)



- הגדלת קרינה חשמלית
- זרם באפס (יכול להיות עד פי 3 מזרם בפאזה)
- עליית מתח באפס – גורם נזק לצידוד, אסימטריה ברשת ו/או אי עמידה בדרישות מפל מתח 3% (תקנה 2 במעגלים סופיים)

- כוחות נגדיים הפועלים בתוך מנועים
- אי עמידת ציוד בתקנים.

דוגמאות: שגיאות במניית אנרגיה ומדידת LT, מנועים מוגני פיצוץ, בידוד כבלים

## פתרונות

כיצד לבחור את הפתרון הנכון לסינון הרמוניות

15

### 1. משנק טורי

#### עקרונות הפעולה

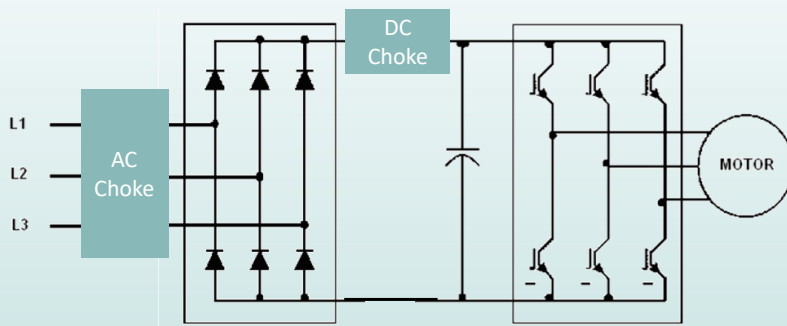
- השראות טורית מתנגדת לשינויי זרם
- ניתן להתקין בכניסה (צד AC) ו/או בתוך המיישר (צד DC)

#### יתרונות

- יחס עלות/תועלת מעולה
- פשוט לאיפיון ורכישה

#### חסרונות

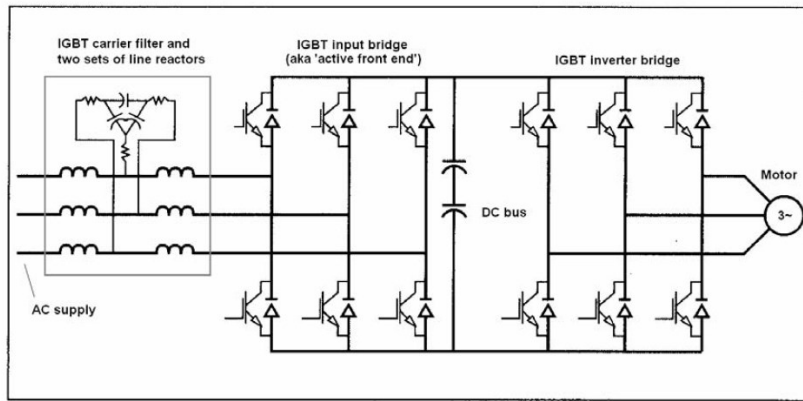
- סינון מקסימלי ל-20% עיוות הרמוני (בשילוב AC+DC)



16



## 2. ווסתי מהירות "ללא הרמוניות" AFE



### עקרון הפעולה

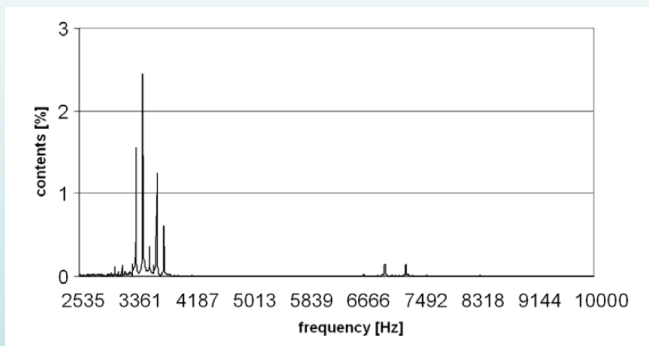
- שימוש ברכיבי מיתוג ואיפנון PWM ליישור גל "ללא הרמוניות"
- למעשה מדובר על מסנן הרמוניות אקטיבי טורי, בתוספת מסנן פאסיבי לתדרים הגבוהים

Copyright © Power Quality Doctor

17

17

## 3. ווסתי מהירות "ללא הרמוניות" (המשך)



### יתרונות

- סינון הרמוניות מעולה
- מאפשר זרימת אנרגיה הפוכה (רגרציה)

### חסרונות

- נצילות נמוכה (הפסדים גבוהים)
- גרימת הרמוניות בתדרים גבוהים יותר ("סופר הרמוניות")
- מחיר, אמינות

Copyright © Power Quality Doctor

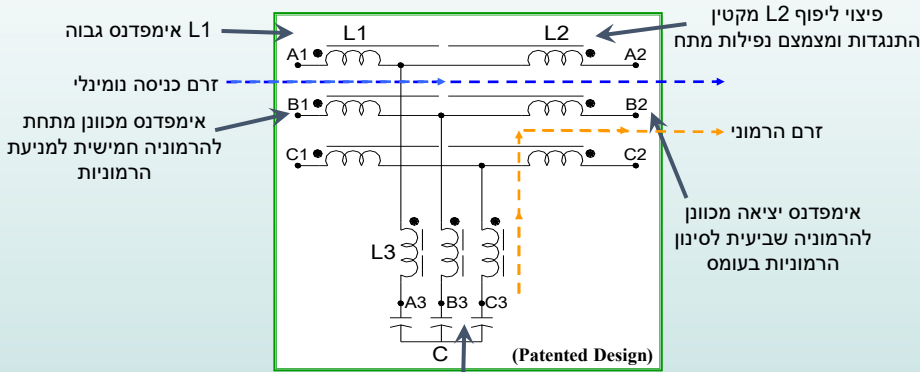
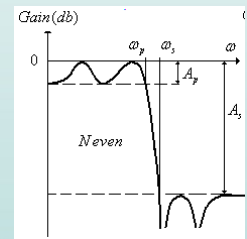
18

18

### 3. מסנן פאסיבי טורי (רחב סרט)

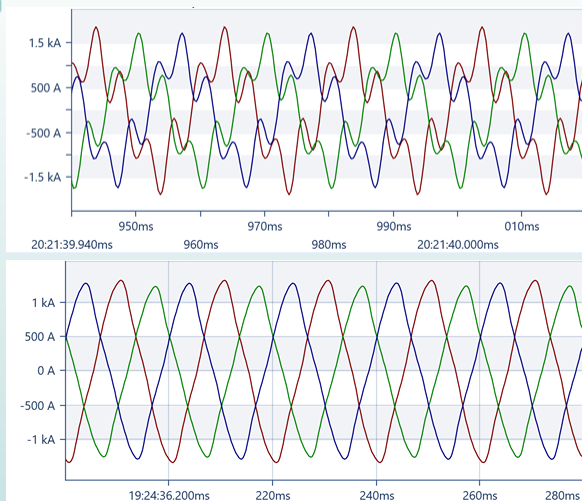
#### עקרונות הפעולה

מסנן אליפטי (Cauer) רחב סרט מהווה נתיב לזרם ההרמוני מצד העומס כלפי האפס ומשנה את צורת גל המתח מכיוון הרשת למניעת ייצור הרמוניות



תכנון ייחודי מוגן פטנט של מאפשר שימוש בבנק קבלים קטן להקטנת הגבר המתח ואנרגיה ריאקטיבית בעומס נמוך

### דוגמא לפרויקט – תאורת MH



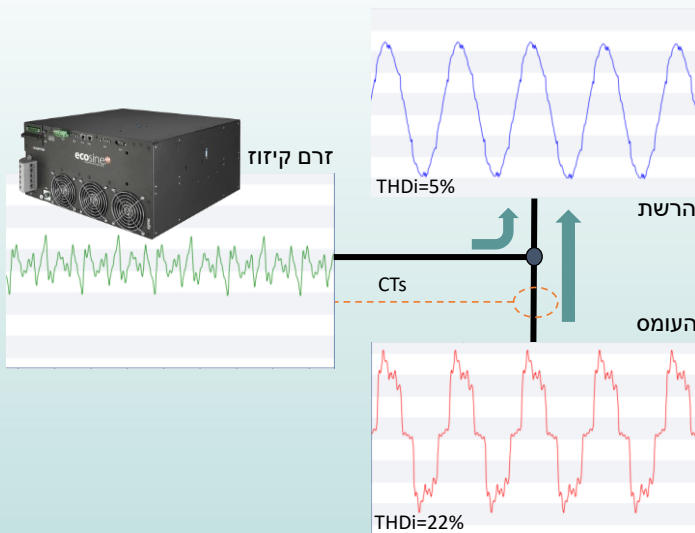
בלי מסנן

עם מסנן

- מסנן פאסיבי משולב LINEATOR
- בגרף מוצג הזרם לפני ואחרי סינון
- כמות התקלות במתקן פחתה בכמעט 100%

פרמטר	לפני	אחרי
THD <sub>v</sub>	7%	2%
THD <sub>i</sub>	50%	7%
זרם	940A	840A
הספק	574kW	560kW

## 4. מסנן אקטיבי



**עקרונ הפעולה**

- הזרקת זרם הפוך לזרם ההרמוני

### יתרונות

- סינון מעולה
- חיבור מקבילי
- ניתן להגדלה
- מתאים לכל עומס
- משפר מקדם הספק

### חסרונות

- מסנן כלפי הרשת בלבד
- עלול ליצור רזוננס בהרמוניות מסוימות
- דורש כיוונון והגדרות

Copyright © Power Quality Doctor

21

21

## סיכום



22

## השוואת חלופות

פתרון	תכונה	שיטת סינון	יתרונות	חסרונות	דגשים לאיפיון
משנק טורי		הוספת אימפדנס בטור	מחיר, פשוט לאיפיון, אינטגרלי	לא מספיק לחלק מהתקנים	לבדוק אם AC או DC, מה הערך (בד"כ 2%-4%)
ווסת "ללא הרמוניות"		יישור גל אלקטרוני	ביצועים, פשוט לאיפיון, אינטגרלי	יקר, הפסדים, אמינות	פתרון בעדיפות נמוכה
מסנן פאסיבי		הוספת אימפדנס טורי + מקבילי	פשוט לאיפיון, אמינות	חיבור טורי, גודל	לבדוק מקום פיסי
מסנן אקטיבי		הזרקת זרם נגדי	סינון מעולה, חיבור מקבילי	אמינות, עלול לא להספיק	הזרם הדרוש גדל לאחר התקנת המסנן

## סיכום


- חובה להתייחס לנושא ההרמוניות בכל מערכת מיזוג אוויר
- כדאי להבין את "האותיות הקטנות" של המפרטים והתקנים
- מומלץ לבצע סימולציה לפתרונות השונים ולבחור נכון


## שאלות?

Power Quality Doctor

אמיר ברושי

 [www.pqdoc.com](http://www.pqdoc.com)

052-6347737 

 [amir@pqdoc.com](mailto:amir@pqdoc.com)

09-7433377 