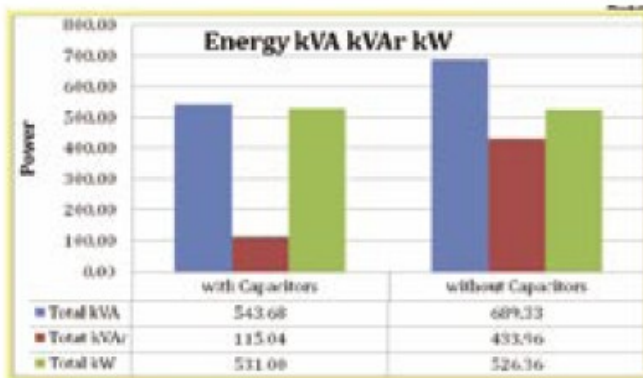


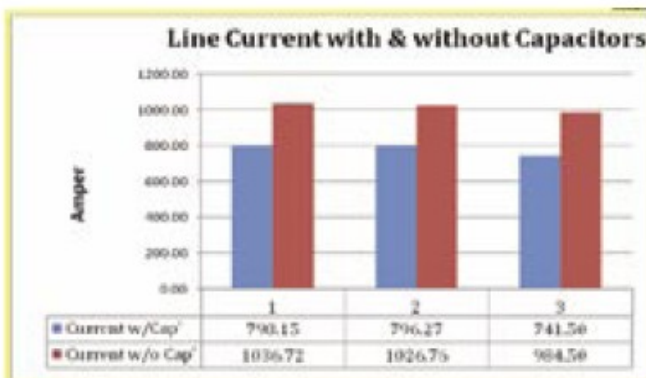
זיהוי מוקדם של הרמוניות

השוואה בין תיקון כופל הספק על-ידי קבלים בלבד, לעומת תיקון כופל הספק בעזרת בנק קבלים פסיבי, מצביעה בצורה חד משמעית על עליונות הגישה המטיפה תיקון כופל הספק בעזרת בנק קבלים פסיבי

מנחם ברכהולץ



גרף 2



גרף 3

(עלות תועלת) ההשקעה הכספית בבנק הקבלים. לכאורה, גרף 2 מדגים כי בשלב זה המטרה הושגה. בדיקת מאזן ההספקים מצביע על התוצאות הבאות:

- ההספק הראקטיבי (Q), עמודה אמצעית (חום), פחת בכ- 300kVAr
 - ההספק האקטיבי (P), עמודה ימנית (ירוק), נשאר דומה בערכו
 - ההספק העיוור (S), עמודה שמאלית (כחול), פחת בכ- 150kVA
- כל אלה נוסף על שיפור ערכו של כופל ההספק כפי שמופיע בגרף 1, משמעותם הקטנת/שיחרר עומסים מהשנאי והגדלת נצילות רשת החשמל.

השלב הבא בבדיקת ערכי הזרם והמתח במצב לאחר התיקון/שיפור, והשוואתם למצב ששרר ברשת החשמל לפני התיקון/שיפור. שני

כופל הספק והרמוניות אלה נושאים הגורמים לבילבול ומבוכה הן בגלל חוסר המודעות להשפעה ההדדית שביניהם, והן בגלל תפיסה מוטעית של הנושא.

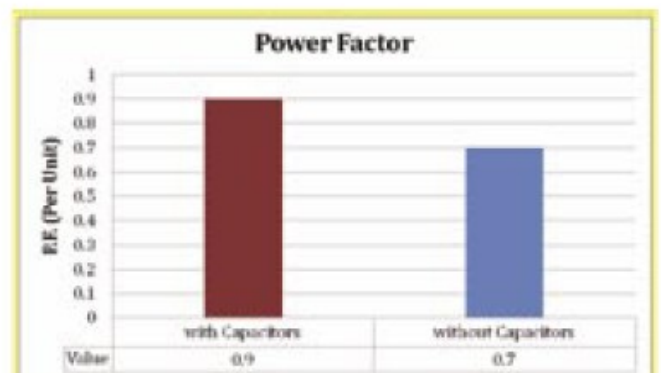
במאמר זה ננסה לברר סוגיה זו בעזרת מספר דוגמאות ולהבין את יחס הגומלין הקיים בין כופל הספק והרמוניות.

- העמסת ייתר של השנאי, כבלים, ציוד מיתוג ואחרים נובע מכופל הספק נמוך
- תהודה מקבילית (רזוננס), הגברת עיוותי מתח וזרם נובעים מהוספת קבלים לתיקון כופל ההספק.
- הרמוניות וכופל הספק נמוך גורמים להפסדים ברשתות חשמל, להלן אחדים מהם:

- הפסדי חשל (Hysteresis Losses).
- הפסדי תופעת הקרום (Skin Effect Losses).
- הפסדי תופעת הקירבה (Proximity Effect Losses).
- הפסדי השנאי (Transformer Losses).
- הפסדי הקווים (Line Losses).
- הפסדים נוספים (Eddy Current Losses).

גרף 1 מציג את כופל ההספק בשני מצבים עוקבים, לפני ולאחר חיבור בנק קבלים בהספק נקוב של 350kVAr. לפני חיבור בנק קבלים לרשת החשמל (צבע כחול) ערך כופל ההספק הנמדד היה כ-0.7 וערכו הנמדד לאחר חיבור בנק הקבלים (צבע חום) היה כ-0.9. חיבור בנק הקבלים לרשת החשמל גורם לעליה בערך הנמדד של כופל ההספק.

חשוב לבדוק את מאזן ההספקים החדש, במטרה לדעת האם השינויים שחלו ברשת החשמל חיוביים ובמקביל לבדוק את כדאיות



גרף 1

$$[3] \quad \%Loss = 100 \cdot \left[1 - \left(\frac{P.F_{Old}}{P.F_{New}} \right)^2 \right]$$

הרמוניות, עיוות מתח וזרם ברשת החשמל

הרמונייה מסדר 2 מוגדרת כמכפלת הרמונית הבסיס (50 הרץ), במספר טבעי (1, 2, 3, ...). מקור הרמוניות (זרם) הוא בדרך כלל עומסים לא ליניאריים, כגון משניי מהירות למיניהם, שנאים, ספקי כוח ממותגים וכד'. אחת מהתופעות החמורות העשויה להתרחש ברשתות חשמל, תהודה מקבילית המוכרת בשמה הלועזי רוזנס, מהווה את הקשר המעשי שבין הרמוניות (עיוות זרם/מתח) וקבלים לשיפור כופל ההספק.

הגדרה נוספת, העיוות הרמוני הכולל (Total Harmonic Distortion), או בקיצור THD, מצביעה עד כמה מעוות הגל הנמדד בהשוואה לגל סינוס אידיאלי. נוסף כי הזרם הרמוני מדומה למקור זרם אידיאלי, המאופיין בהתנגדות פנימית גבוהה והשוואף לזרם לכיוון בו אימפדנס רשת החשמל הוא הנמוך ביותר. שנאי רשת החשמל מהווה גורם בעל אימפדנס נמוך ביותר בהשוואה לשאר העומסים המותקנים ברשת החשמל.

השיפור שהושג ע"י התקנת בנק קבלים עומד עתה לבחינה מחדשת. נבחרה נקודת ייחוס שונה הבוחנת אפשרות למציאת קשר, כמותי ואיכותי, בין בנק קבלים והתנהגות רשת החשמל. הפרמטרים שנבחרו לאשש או לחילופין להפריך אפשרות זו הם:

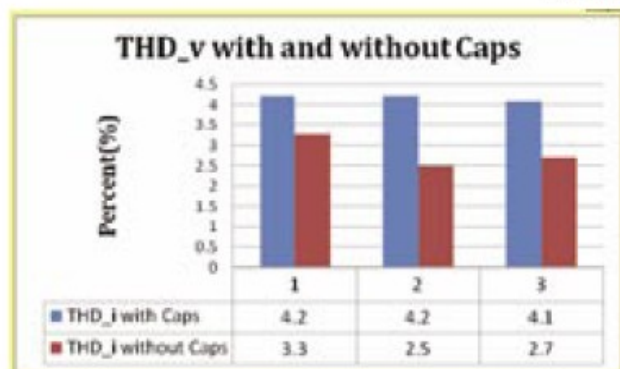
- העיוות הרמוני הכולל (THD), במתח ובזרם
- הרמוניות מתח וזרם

הגרפים הבאים, 5 & 6 מציגים שני מצבי בדיקה, לפני ולאחר חיבור בנק קבלים לרשת החשמל והקשר לרמת העיוות הרמוני הכולל (THD) והרמונית, כפי שנמדד ברשת החשמל.

גרף 5 מצביע על הקשר הקיים שבין רמת העיוות הרמוני הכולל (THD) במתח, לבין בנק קבלים.

העמודות מימין (צבע חום) מציגות את העיוות הרמוני הנמדד במתח (2.5% - 3.2%) ללא בנק קבלים. העמודות משמאל (צבע כחול) מציגות את הגברת העיוות הרמוני הנמדד במתח (4.2%), לאחר חיבור בנק קבלים לרשת החשמל.

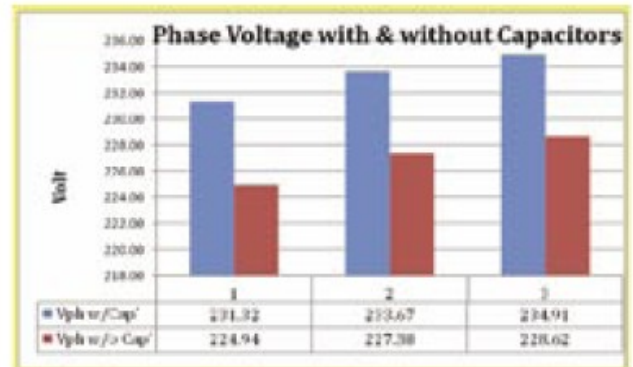
באופן דומה, גרף 6 מצביע על הקשר שבין רמת עיוות הזרם ובנק קבלים.



גרף 5

הגרפים הבאים, גרף 3 & 4 מציגים את הזרם והמתח לפני ולאחר חיבור בנק קבלים לרשת החשמל, בהתאמה.

גרף 3 מציג את הזרם בשלוש הפאזות, לפני חיבור הקבלים (עמודה בצבע חום) ולאחר חיבור בנק קבלים (עמודה בצבע כחול) לרשת החשמל. כצפוי, הזרם הכללי פחת בכ-200 אמפר.



גרף 4

הזרם הכללי מורכב משני זרמים. הראשון, הזרם פעיל הנחוץ לביצוע עבודה (מתכונתי להספק הפעיל) השני, זרם מגנטי (מתכונתי להספק המגנטי) הנחוץ ליצירתו של שדה מגנטי הדרוש להפעלת ציוד חשמלי כגון מנועים, שנאים וכד'. הזרם הכללי הינו סכומם הוקטורי (הזווית היא בת 90 מעלות) של שני זרמים אלו. ירידת הזרם הצפויה בגין הוספת קבלים ניתן בדיעבד למדוד (ראה גרף 3) או להעריך בעזרת נוסחה המחשבת את היחס שבין כופל ההספק לפני ולאחר חיבור בנק קבלים לרשת החשמל.

$$[1] \quad [1]\% \Delta I = 100 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos \Phi_{Old}}{\cos \Phi_{New}} \right) \right]$$

גרף 4 מציג את המתח בשלוש הפאזות, לפני חיבור הקבלים (עמודה בצבע חום) ולאחר חיבור בנק קבלים (עמודה בצבע כחול) לרשת החשמל. המתח בניגוד לזרם צפוי לעלות, ואכן נמדדה עליית מתח של כ-4 וולט (פאזי).

עליית המתח הצפויה עקב הוספת בנק קבלים ניתנת בדיעבד למדידה (ראה גרף 4) או להעריך בעזרת נוסחה המחשבת את היחס בין הספק בנק קבלים, הספק השנאי ואימפדנס הקצר.

$$[2] \quad [2]\% \Delta V = \frac{kVAR_{CAP} \cdot \%Z_{TX}}{kVA_{TX}}$$

סיכום ביניים

לכאורה, סיכום התוצאות שהתקבלו לאחר חיבור בנק קבלים לרשת החשמל מצביע על הצלחה. נמדדה עליית ערך כופל ההספק, הקטנה של ההספק המגנטי המועבר לעומס במסלול הכולל את השנאי, הורדת הזרם הכללי ועליית המתח על פסי הצבירה. הנוסחה המצורפת מעריכה בכמה יפחתו ההפסדים ברשת החשמל עקב חיבור בנק קבלים.

הפתרון

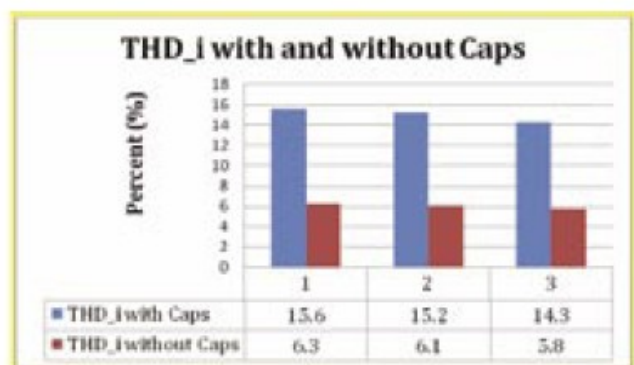
פילטר פסיבי לסינון הרמוניות, מניעת תהודה מקבילית (רזוננס) ולשיפור כופל הספק, הוא ללא ספק הפיתרון הרצוי. המערכת פותרת את בעיית הגברת ההרמוניות, העיוות ההרמוני הכולל (THD) ומשפרת את מקדם ההספק. מערכות אלו ניתן לחלק לשלוש קטגוריות:

- מערכת להסטת הרמוניות מסוג – Rejection.
 - מערכת למניעת תהודה מקבילית מסוג – De-Tuned.
 - מערכות לסינון הרמוניות מסוג – Tuned.
- ההבדל העקרוני שבין הקטגוריות השונות, הוא מידת ריחוקו של תדר החסימה מההרמוניה הדומיננטית (במרבית המקרים תדר התהודה המקבילית יהיה 250 הרץ, הרמוניה חמישית).
- מערכות מסוג Rejection; משמשות בעיקר לחסימת תהודה מקבילית בהרמוניה השלישית (135 הרץ), הנובעים מעומסים חד פאזיים ורשתות חשמל לא מאוזנות (unbalanced) כדגמת תעשיית הרכב.
 - מערכות מסוג De-Tuned; מערכות ששכיחותן הגבוהה ביותר עקב יציבותן. עיקר תפקידן שיפור מקדם ההספק, מניעת תהודה מקבילית והגברת העיוות ההרמוני הכולל ופגיעה בקבלים. חיבור נמצא בתחום שמתחיל מתחת להרמוניה הרביעית ומסתיים מעליה (189 הרץ ועד 210 הרץ).
 - מערכות מסוג Tuned; מערכות המיועדות לסינון הרמוניות וחיבורן בסמוך להרמוניה חמישית (225 הרץ).
- גרפים הבאים מציגים דוגמה מעשית למערכת פסיבית, תדר החסימה 210 הרץ (5.67%), מסוג De-Tuned Filter המבצעת פעולת סינון הרמוניות תוך מניעת תהודה מקבילית, מקטינה את

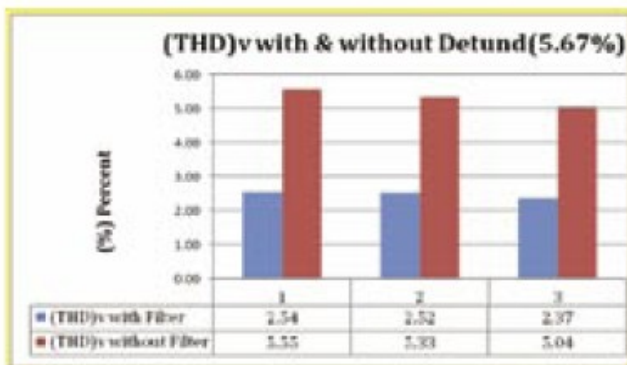
העמודות מימין (צבע חום) מציגות את העיוות ההרמוני הנמדד בזרם (5.8% - 6.3%) ללא בנק קבלים. העמודות משמאל (צבע כחול) מציגות את הגברת העיוות ההרמוני הנמדד (-14.3% 15.6%), לאחר חיבור בנק הקבלים מחובר לרשת החשמל.

הגרפים הבאים, 7 & 8 מציגים את ההרמוניה החמישית והשביעית במתח ובזרם. נתוני רשת החשמל נמדדו בשני מצבים עוקבים, הראשון כאשר בנק הקבלים מחובר והשני לאחר ניתוק בנק הקבלים מרשת החשמל. גרף 7, מציג את ההרמוניה החמישית (250 הרץ), והשביעית (350 הרץ) במתח (פאזה L1). ניתן להבחין בבירור בעליית המתח בהרמוניות אלו (עמודה שמאלית – צבע כחול), כאשר בנק הקבלים מחובר לרשת החשמל.

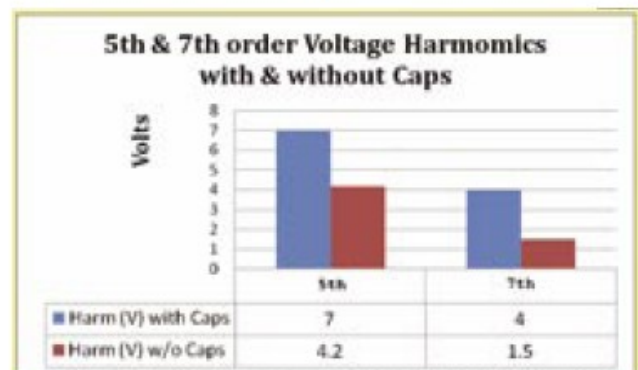
גרף 8 מציג את ההרמוניות החמישית (250 הרץ), והשביעית (350 הרץ) בזרם (פאזה L1). ניתן להבחין בבירור בעליית הזרם (עמודה שמאלית – צבע כחול) כאשר בנק הקבלים מחובר לרשת החשמל.



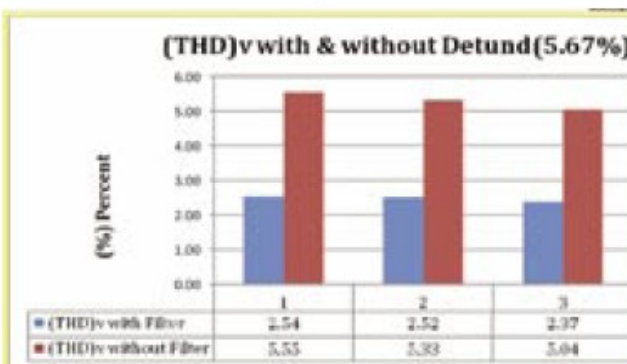
גרף 6



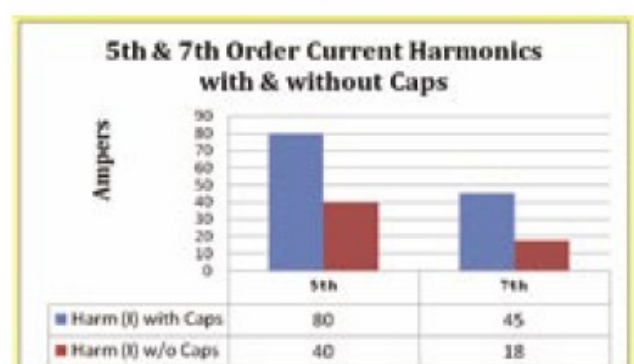
גרף 9



גרף 7



גרף 10



גרף 8

הימנית (צבע חום) מייצגת את המצב ברשת החשמל ללא בנק קבלים פסיבי, בהשוואה לעמודה השמאלית (צבע כחול) לאחר חיבור המערכת כאשר לרשת החשמל.

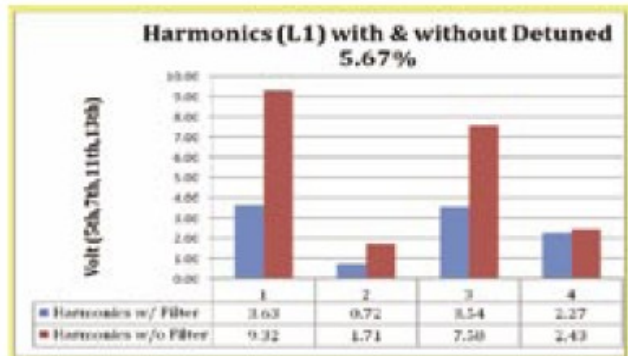
הגישה המנצחת

לסיכום, השוואה בין שתי הגישות הבסיסיות הנהוגות כיום בתעשייה; תיקון כופל הספק ע"י קבלים בלבד, לעומת תיקון כופל הספק בעזרת בנק קבלים פסיבי, מצביעה בצורה חד משמעית על עליונות הגישה המטיפה תיקון כופל הספק בעזרת בנק קבלים פסיבי.

- קבלים לשיפור כופל הספק ברשת החשמל עלולים לגרום לתהודה מקבילית ברשת החשמל.
- תהודה מקבילית גוררת עליית מתח חריגה על פסי הצבירה, הגורמת נזק חמור לצידוד הרגיש לעליית מתח כגון בקרים, מחשבים, משנה מהירות ועוד.
- נוסף לזאת, הזרם הרמוני החריג המתוסף לזרם הכללי, עשוי לפגוע במנועים, מנתקי זרם בעומס, שנאים ועלול לגרום לכשל מערכתי.
- בעיות הנגרמות על-יד הרמוניות:
- כשל וחימום ייתר של קבלים, שנאי, מנועים ועוד.
- נפילות סרק של מנתקי זרם לעומס או שרפת נתיכים.
- נוכחות הרמוניה שלישית וכפולותיה בקווי האפס המצריכה מוליך בעל חתך גבוה יותר.
- רעשים והפרעות בתקשורת כתוצאה מנוכחות הרמוניות.
- נזק לצידוד אלקטרוני רגיש.
- כופל הספק נמוך משמעו תשלום קנסות לחברת החשמל, נצילות שנאי נמוכה, זרם ראקטיבי גבוה הגורם להפסדים נוספים ועוד.

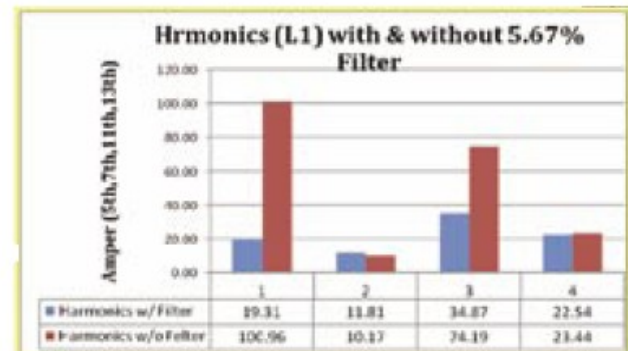
העיוות הכולל ברשת החשמל (מתח וזרם), ומשפרת את כופל ההספק.

הגרף הבא מציג את העיוות הרמוני הכולל (THD) במתח, בשני מצבים עוקבים לפני ולאחר חיבור בנק קבלים פסיבי לרשת החשמל. כאשר מערכת מנותקת, העיוות הרמוני הכולל הנמדד במתח, הוא כ-5.5% (עמודה ימנית - חום). לאחר חיבור המערכת לרשת החשמל, קטן העיוות הרמוני הכולל הנמדד במתח, כ-2.5% (עמודה שמאלית - כחול). ירידה משמעותית של העיוות הרמוני הכולל (THD) במתח (כ-45% בערכים מוחלטים), נוסף לשיפור כופל ההספק.



גרף 11

הגרף הבא מציג את העיוות הרמוני הכולל (THD) בזרם, בשני מצבים עוקבים לפני ולאחר חיבור בנק קבלים פסיבי לרשת החשמל. כאשר מערכת מנותקת, העיוות הרמוני הכולל הנמדד בזרם, הוא כ-12.5% (עמודה ימנית - חום). לאחר חיבור המערכת לרשת החשמל, העיוות הרמוני הכולל הנמדד בזרם, הוא כ-7% (עמודה שמאלית - כחול). ירידה משמעותית של העיוות הרמוני הכולל (THD) בזרם (כ-55% בערכים מוחלטים), נוסף לשיפור כופל ההספק.



גרף 12

על מנת להמנע מהסקת מסקנות מוטעות, שני הגרפים הבאים מציגים את התפלגותן של הרמוניות הבדידות (חמישית, שביעית, אחת עשרה ושלוש עשרה) זרם ומתח, בשני מצבים שונים האחד כאשר בנק הקבלים הפסיבי מחובר לרשת החשמל והשני לאחר ניתוק מרשת החשמל.

הרמוניות המתח והזרם המוצגות בגרפים אלו הן בערכים מוחלטים, וסדר הרמוניות משמאל לימין הוא 5, 7, 11 ו-13. העמודה

מנחם ברכהולץ



מנחם ברכהולץ הוא בוגר בית הספר הטכני של חיל האוויר במגמת חשמל ומכשירנות מטוסים; בוגר המכון הטכנולוגי במגמת חשמל ואלקטרוניקה B.Sc.T,E ומוסמך להוראה בבתי ספר על-יסודיים במקצוע חשמל ואלקטרוניקה.

ברכהולץ שימש בעבר כמנהל תפעול ואחזקה במפעל תרשיש לציפוי מתכות ועסק בתמיכה טכנית בארץ ובחור"ל ביישום טכנולוגיות מתקדמות לחיסכון ושיפור איכות החשמל בתעשייה בחברת אלספק.