

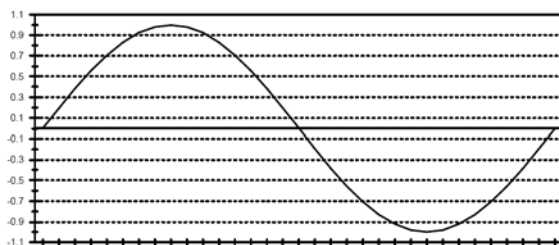
# הרמוניות וסינוסים



חובב הרדיו נחשף למושג הרמוניות במהלך לימוד "נהלי הקשר" וחלוקת ספקטרום התדרים של חובבי הרדיו בארץ ובעולם. במאמר זה ננסה להסביר מהן הרמוניות וכיצד הן נוצרות. ננסה להסביר זאת כהסבר "לחובבי רדיו" ולא הסבר למהנדסים. אמנם הדיון יפגע מעט מבחינת הדיוק המדעי, אך המטרה מקדשת את האמצעים.

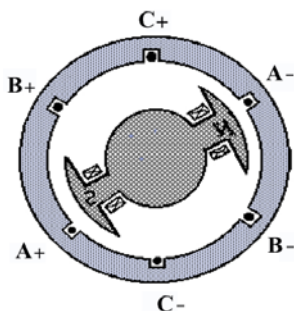
## למה סינוס?

לפני שנפנה להגדיר את המושג הרמוניה ננסה להבין מדוע צורת מתח רשת החשמל הארצית היא סינוס, כמוצג באיור. בכל ארצות העולם מתח הרשת הוא מתח חילופין AC (Alternating Current). מתח זה נבחר (ולא מתח ישר DC) בגלל הפשטות ליצרו והיכולת לשנות את עוצמתו בעזרת שנים.



עקרו הפעולה של רוב הגנרטורים למתח חילופין הוא על ידי הנעת שדה מגנטי מעל מוליך חשמלי או כריכה. עוצמת המתח שמתפתח במוליך הוא פונקציה של עוצמת שינוי השטף המגנטי. אם השטף המגנטי קבוע בעוצמתו, לא יתפתח מתח במוליך!.

כוח מכני כמו מים, קיטור או רוח, שימושיים להנעת השדה המגנטי. תנועה זו הכרחית לקבלת עוצמת שטף משתנה במוליך.



באיור נראה סרטוט עקרוני של גנרטור תלת-פאזי. במרכזו נראה המגנט או אלקטרומגנט, שמסתובב הודות לכוח מכני המופעל עליו, זהו הרוטור. מסביב ממוקם החלק הסטטי של הגנרטור, הסטטור. בתוך גרעין הסטטור מלופפים שלושה סלילים המסומנים A+, B+, C- ו-A-, B-, C+. כאשר הקוטב הצפוני של המגנט מתקרב לסליל כלשהו גדל המתח המושרה בסליל. התרחקות המגנט מקטינה את המתח. המתח המרבי בסליל נוצר כאשר הקוטב חולף ממש ליד הסליל. תנועת קוטב צפוני של המגנט ליד הסליל יצור בו מתח חיובי ותנועת הקוטב הדרומי יצור מתח שלילי.

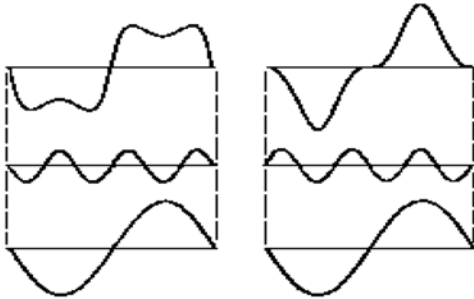
התנועה הסיבובית של המגנט יוצרת במוליכי הסליל מתח סינוסי. בגנרטור הנדון, קיימים שלושה סלילים הממוקמים פיזית בזווית של 120 מעלות זה מזה, לכן יושרו בהם מתחים סינוסים המווזאים גם הם זה כלפי זה בזווית של 120 מעלות. מערכת כזו נקראת מערכת תלת מופעית או תלת-פאזית.

תנועת הרוטור (המגנט) ומיקומו (במעלות) יחסי לזמן (בשניות) של תנועת המגנט. סרטוט של עוצמת המתח בסלילים כפונקציה של הזמן ייתן את הגרף שבאיור הראשון.

תדר המתח שהתקבל תלוי במספר הקטבים של הרוטור (במספר המגנטים שבו) ומהירות הסיבוב שלו, כמו גם במספר הסלילים שקיימים בסטטור. התדרים הנפוצים הם 50 הרץ בארץ ובאירופה, 60 הרץ בארה"ב ו-400 הרץ בחלק ממערכות החשמל במטוסים.

## מהי הרמוניה?

כל גל מחזורי ורציף, שאינו סינוסי, ניתן לבטא בעזרת אינסוף סינוסים שהם כפולות שלמות של תדר הגל היסודי. (מכונה במתמטיקה כטור או התמרת פורייה). גל הסינוס הראשון הוא בעל האמפליטודה הגבוהה ביותר ותידרו שווה לתדר הגל היסודי (המקורי). גלי הסינוס האחרים שתידריהם כפולות התדר היסודי נקראים בשם הרמוניה. תדר ההרמוניה השנייה כפול מהתדר היסודי ( $2f$ ), תדר ההרמוניה השלישית יהיה  $3f$  וכך הלאה עד אינסוף. ככול שתדר ההרמוניה גדל, כך יורדת אמפליטודת גל הסינוס שלה.

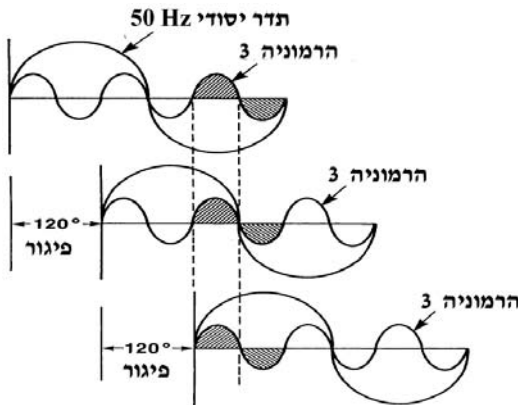


הרעיון פועל גם הפוך. אם נסכם את כל גלי הסינוס, זאת אומרת סינוס הגל היסודי וכל ההרמוניות שלו, אזי נקבל את הגל המקורי שפורק על ידי התמרת פורייה.

פרמטר נוסף הוא זווית המופע של גל ההרמוניה יחסית לגל היסודי. באיור מסוכמת הרמוניה שלישית (שעוצמתה 33% ממשרעת האות היסודי) עם גל הסינוס היסודי. באיור נראה כיצד הזז מופע של 180 מעלות בהרמוניה השלישית יוצר אחרי הסיכום אות מקורי שונה לחלוטין.

## האם ההרמוניות מזיקות?

המצאות הרמוניות על קווי רשת החשמל אינו בהכרח גורם שאנו חשים בו יום יום. ברוב המקרים אין אנו מודעים להימצאותם ולכן גם לא מטפלים בהם. אין הדבר אומר שעלינו להתעלם מהם, לא אחת הם קיימים וגם מזיקים. להדגמה נביט על המקרים הבאים:



R פזה

S פזה

T פזה

- ברשת חשמל תלת-מופעית, קווי המתח המזינים את בתי המגורים או התעשייה, מוליכים שלושה מתחים המוזזים ב-120 מעלות זה מזה. ברשת כזו, הפועלת כרשת  $Y$ , הזרם בקו האפס שואף לאפס אמפר, אם המערכת מאוזנת מבחינת העומסים. הדבר משתנה כאשר מופיעות הרמוניות על הרשת. בעיקר הנזק הוא בהרמוניות האי-זוגיות (הרמוניה 3, 5, 7, ...). האיור מראה כיצד זרמי ההרמוניה השלישית

במוליכי הפאזות השונים מתחברים זה לזה, כי המופעים שלהם כבר אינם מוזזים זה כלפי זה אלא נמצאים באותו מופע. התוצאה, במצב זה זרם דרך קו האפס גם כאשר העומס מאוזן. אם עוצמת ההרמוניות גבוהה, יתכן ויהיה צורך להגדיל שטח חתך של מוליך האפס.

- הרמוניות גורמת לסילוף במדידת מכשירים, שתוכננו למדוד מתחים סינוסיים כמו מדי זרם ומתח, שכוילו למדידת ערכים אפקטיביים של מתח חילופין סינוסי, ועתה השתנה הערך האפקטיבי בגלל ההרמוניות. ההרמוניות מסלפות מדידה של מדי קילו-ווט שעה ומדי קוסינוס-פי.
- התדרים הגבוהים של ההרמוניות גורמים לחימום יתר בשנאים. הדבר מורגש בעיקר בשנאים תלת פאזיים, אך גם בשנאים חד פאזיים גדלים ההפסדים. ההפסדים בגרעין הברזל של השנאי (הפסדי זרמי מערבולת, זרמי פוקו) תלויים בריבוע התדר, הכוונה, הגדלת התדר פי שנים מגדיל את ההפסד פי ארבע. והרי תדרי ההרמוניות הם כפולות של תדר היסוד אזי ההפסדים בהתאם. הפסדים נוספים בשנאים הם "הפסדי הנחושת". הפסדים אלו נוצרים בגלל התנגדות חוטי השנאי (חוטי הנחושת).

התנגדות זו עולה עם התדר בגלל תופעת הקרום (skin effect). מסיבה זו גדל הפסד ההספק על חוטי השנאי עבור תדרי הרמוניות הגבוהים.

- תדרי הרמוניות שנוצרים בעת שידורי רדיו יקלטו בתדרי הכפולה. לדוגמה שידור בתדר 7 מה"ץ, ייקלט גם בתדרי המכפלה 14, 21, 28 מה"ץ וכך הלאה. מסיבה זו קיבלו חובבי הרדיו את ספקטרום התדרים שלהם ככפולות. הכוונה הייתה שחובב שצוידו אינו תקין יגרום לשידורי הרמוניות ולהפרעות, לחבריו החובבים ולא לשירותים חיוניים אחרים.

## מי מיצר הרמוניות?

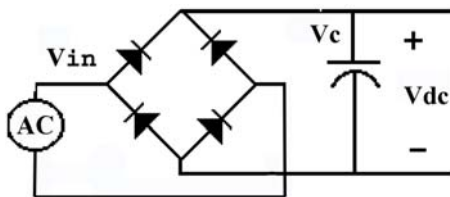
התשובה לשאלה זו פשוטה בתכלית, כל מה שמחובר לרשת החשמל (נו לא נכליל, כמעט הכול). רשת החשמל שמספקת לנו חברת החשמל, גם היא אינה מספקת מתח סינוסי. למעשה מתח סינוסי ניתן למצוא (אולי) במעבדה, במכשירים יקרים מאוד שזו מטרתם.

כזכור, הרמוניות נוצרות בגלל שהמתח ו/או הזרם אינם סינוסים מושלמים. גם אם נצא מהנחה שחברת החשמל מספקת לנו מתח סינוסי "טהור" להפליא, אז נגלה שאנו פוגעים בסינוסיותו. ולצורך זה נבדוק מספר דוגמאות.

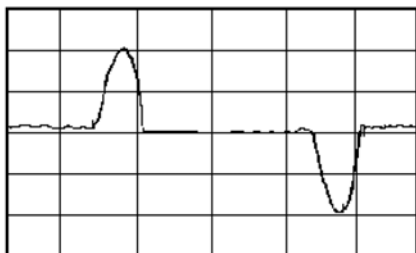
- המהם אורות (dimmer) – מכשיר זה השימושי כמעט בכל בית, משמש לשינוי עוצמת תאורה של נורות ליבון. מכשיר זה משנה את הזרם הממוצע שזורם דרך הנורה על ידי חיתוך חלק ממתח הסינוס שמספקת חברת החשמל. המתח והזרם שמתקבל בעומס הינו חלק מאות הסינוס לכן הוא מכיל הרמוניות.
- ספקים ממותגים – ספקי הכוח שמספקים מתחים שונים להפעלת הציוד האלקטרוני שלנו, פועלים על תדר גל ריבוע של עשרות קילוהרצים, גל ריבועי מיצר הרמוניות. ספקים כאלו ניתן למצוא במחשבי ה-PC, טלוויזיות, וידאו-טיפ, DVD וכל ציוד אלקטרוני אחר שפועל על מתח הרשת.
- UPS – מכשיר לגיבוי מתח הרשת למחשבים. המכשיר מכיל מצבר שנקנס לפעולה בעת ניתוק מתח רשת החשמל. המכשיר מייצר 220 וולט, שברוב המקרים רחוק מאוד מהסינוס "הנקי" המוכר לנו. מתח זה צריך להספיק לתת לנו שהות לשמור את המסמכים ולכבות באופן אלגנטי את המחשב.
- משדרים – משדרים שונים וביניהם גם שלנו, חובבי הרדיו, אינם משדרים אותות סינוסיים. בגלל איכותם הירודה ו/או כוון לא נכון.

## איך הם נראים?

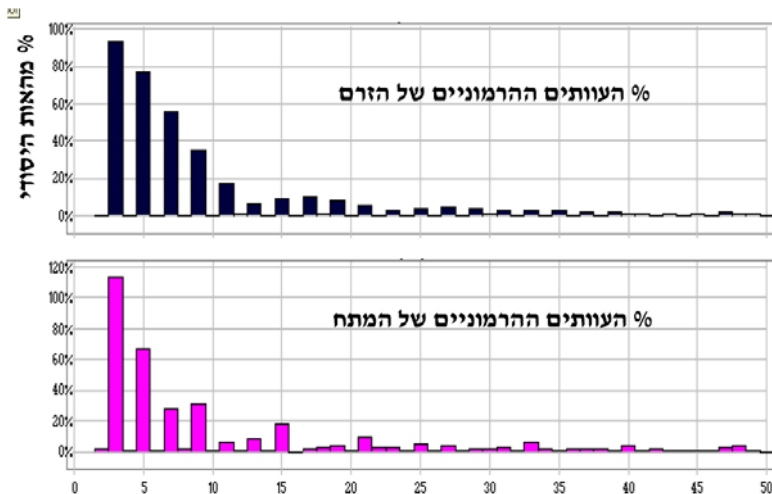
בין השנים 1985 – 2000 הוכפל בעולם מספר העומסים הלא-ליניאריים שגורמים ליצירת הרמוניות. החשוב במכשירים אלו והמוכר לנו מאוד הוא הספק הממותג. נעשה שימוש בספק זה לצורך ההמחשה.



האיור מראה את הדרגה הראשונה של כל ספק ממותג, זהו מישר גל שלם עם סינון קיבולי במוצאו. מוצא מעגל היישור ישמש את שאר מעגלי הספק הממותג לקבלת מתחי המוצא הרצויים. מעגל היישור מספק זרם טעינה לקבל הסינון כדי להשלים את המטען שאובד לו בתלות האנרגיה שנלקחת על ידי שאר מעגל הספק הממותג. הזרם ממקור החילופין זורם רק באותם חלקי זמן בהם מתח המקור גבוה ממתח קבל הסינון, התוצאה היא זרם שאינו סינוסי אלא כמוצג באיור. כמובן לזרם כזה הרמוניות משמעותיות בתדרים גבוהים.



באיור הבא ניתן לראות את ספקטרום ההרמוניות של מעגל היישור. במקרה זה נוצרים הרמוניות אי – זוגיות בלבד של זרם המעגל. אי לכך מיצגים הקווים האנכיים את ההרמוניות 3, 5, 7, 9 וכו'. גובה הקווים מייצג את עוצמת ההרמוניה ב - % יחסית להרמוניה הבסיסית שתדרה כתדר המקור. אם מעגל היישור היה מורכב מישור חד דרכי, הספקטרום היה נראה אחרת, שם היינו מוצאים את ההרמוניות הזוגיות בלבד.



אופי ההרמוניות ועוצמתם תלויים באופי העומס. הטבלה הבאה מראה מעגלי ישור שונים וההרמוניות שהם מייצרים.

ההרמוניות	מספר פולסי הזרם למחזור שלם של מתח המקור	סוג המעגל
2,4,6,8 ...	1	מעגל יישור חד - דרכי
3,5,7,9 ...	2	מעגל יישור דו - דרכי
5,7,11,13,17,19 ...	6	יישור תלת-פאזי
11,13,23,25,35,37 ...	12	יישור תלת-פאזי

מנורות פלואורסנטיות הן מקור לא אכזב להרמוניות. הטבלה הבאה מראה את עוצמת ההרמוניות ב-% יחסית לתדר היסודי.

מספר הרמונית הזרם	2	3	4	5	6	7	8
עוצמת ההרמוניה ב-%	4%	20%	1%	10%	1%	5%	6%

## סיכום

ההרמוניות הן תוצרים לפעולת המעגלים החשמליים והאלקטרוניים שעושים את חיינו כל כך נוחים. חלק מהציוד שאנו מפעילים רגישים לתדרי ההרמוניות הגבוהים, עלינו לדאוג לרסנם עד כמה שניתן. מאמר זה ניסה להסביר מהם ההרמוניות ומה מקורם. כיצד לטפל בהם, לרסנם או לדכאם הוא נושא למאמר אחר.