

# תהודה – מדידת עקומות הענות

פאב קרקובר, המרכז ללימודים קדם אקדמיים, האוניברסיטה העברית, ירושלים  
והמחלקה להוראת המדעים, מכון וייצמן למדע

תקציר

תופעת התהודה לא קיבלה את המקום הראוי לה בתכנית הלימודים, בין היתר מפני שמדידות של עקומות הענות היו בעבר תהליך מייגע. ציוד המדידה הקיים כיום ברמת בית הספר מאפשר לשנות את המצב מיסודו. במאמר יסקרו, בקיצור רב, חקירות של תלמידים שנעשו בבית הספר התיכון למדעים ולאומנויות בירושלים בשנת תשנ"ג.

מילות מפתח:

תהודה, מעגלי זרם חילופין, גלים בעמוד אוויר, גלים במיתר, פעילויות חקר, מדידה ממוחשבת.

ולאומנויות בירושלים בשנת תשנ"ג. עיקר המאמר יעסוק במדידות במעגלי זרם חילופין, שבהן מתקבלות עקומות מושלמות. לקראת סוף המאמר יוזכרו גם מדידות עקומות תהודה במערכות אחרות (מכניות/אקוסטיות).

## מדידות במעגל זרם חילופין

החקירה במעגלי זרם חילופין נעשתה על ידי צוות של שלושה: אלון בורנשטיין, ערן גולדברג ואושרי מוזס. מטרת העבודה הייתה לחקור מעגלי זרם חילופין בכל העוצמה שהמערכת הממוחשבת מאפשרת לנו: מדידות ישירות למחשב, שימוש בו-זמני במספר חישובים, שימוש במערכת הממוחשבת כפלט (מקור כא"מ) מבוקר מחשב, מדידות בקצב גבוה (10000 מדידות לשנייה), שימוש באופציות סטטיסטיות (מציאת מכסימום, לדוגמה), שימוש בהדק (Trigger), שימוש בחוצץ (Buffer), שימוש בטרנסופרם פורייה, הצגת תוצאות בייצוגים שונים, ניתוח מאוחר בגליון אלקטרוני וכיו"ב. נערכו מדידות של עקומות תהודה, התנהגות במהלך הזמן במצבים טרנזיינטיים ובמצבים עמידים, נחקרו תהליכים של צימוד ועוד. הניסויים השונים שנערכו הם קפיצת מדרגה בכל הנוגע לפשטות ההפעלה, לתיארוך, לשימוש במחשב, ולניתוח התוצאות.

תהודה (Resonance) אינה רק שם של כתב עת איכותי, אלא גם תופעה בעלת חשיבות שנתרת בשולי תכנית הלימודים. אפילו טובי התלמידים, הלומדים ברמה של 5 יח"ל, אינם פוגשים בתופעה זו באופן מסודר ומשמעותי במהלך לימודיהם. במקרה הטוב נאמר להם משהו איכותי על תופעת התהודה. כאשר עוסקים בגלים עומדים במיתר, מזכירים כי המיתר עשוי להתנווד דווקא בתדירויות מסויימות, אך המושג תהודה אינו נזכר בהקשר זה. לעיתים כל מה שהתלמיד יודע הוא כי אסור ללכת על גשר בצעידה קצבית (אפשר שראה סרטון אודות גשר הטאקומה).

שילוב של מושג התהודה בתכנית הלימודים כרוך בשני קשיים: הקושי העיוני-מתמטי ובעיית המדידה. אפשר להראות (ניסויית) בנקל כי מערכת מגיבה היטב לתדירויות מסויימות, בעוד אינה מגיבה כמעט לתדירויות אחרות, אך טיפול ניסויי-כמותי מסודר, המביא לשרטוט של עקומות הענות, נראה מעבר לרמת בית הספר התיכון.

מטרת מאמר זה היא להציג עבודות של תלמידים שמהן אפשר ללמוד כי טכנולוגייה חדשה, שקיימת כבר היום ברמת בית הספר, מאפשרת עריכת ניסויים שבהם עקומות תהודה מתקבלות בתוך שניות. העבודות נעשו על ידי קבוצות של תלמידים בבית הספר התיכון למדעים

אין צורך במעבר לחדר המחשבים. אין צורך במעבר למחשב אחר. אין סיבה שלא להשתמש בטכנולוגיה ככל האפשר כדי לצמצם פעילויות טכניות, ולהרוויח זמן לדיון בפיסיקה!

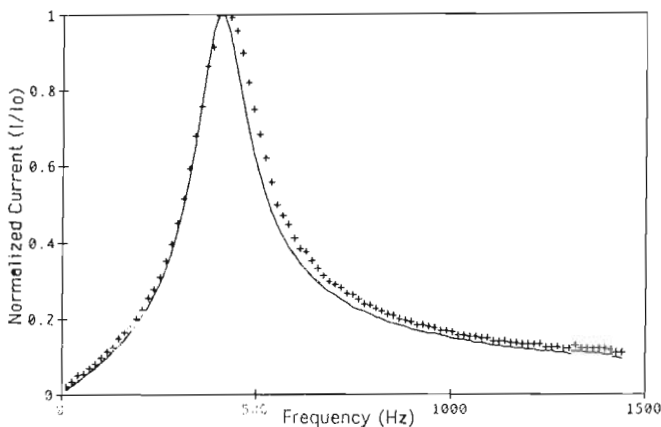
### אופן המדידה

**פלט:** המשתמש קובע מן המחשב את הכא"מ (עוצמה ותדירות) שיסופק למעגל על ידי הממשק. הצוות השתמש במקרה זה באופציה של סריקת תדירויות (ramp): בפרק זמן (שנקבע על ידי המשתמש) הכא"מ משתנה בקפיצות של 5 Hz על פני תחום תדירויות (ששני קצותיו נקבעים על ידי המשתמש). באופן כזה נסרקו בריצה אחת 96 תדירויות (5-480 Hz). משך הזמן של הסריקה נקבע כך שגם בתדירות הנמוכה ביותר (5 Hz) יהיה זמן לסרוק מחזור שלם. כתוצאה מכך נקבע פרק זמן כולל של כ-25 שניות לכל 96 התדירויות. כלומר: המדידות שנדרשו לצורך קבלת עקומת הענות שבה 96 נקודות נמשכו 25 שניות. לצורך סריקת תחום תדירויות שמתחיל ב-480 Hz די ברבע שנייה לכל המדידות.

**קלט:** הממשק קלט בין 5000 ל-10000 מדידות בשנייה. הקצב נקבע על ידי המשתמש. הצוות בחר באופציה הסטטיסטית: המערכת קצבה את ערכי המכסימום והמינימום של הקלט עבור כל תדירות, ומתוכם נקבעה האמפליטודה ונדגמה לגרף ולגליון.

### תוצאות

בתרשים 1 מוצגת דוגמה של עקומת הענות. הנקודות הבדידות מייצגות את תוצאות המדידה. הקו הרציף מייצג עקומה תאורטית שמבוססת על הפרמטרים של המערכת (התנגדות, קיבול והשראות) כפי שנקצבו בניסויים בלתי תלויים.



תרשים 1: מדידה ממוחשבת של עקומת הענות (בורנשטיין-גולדברג-מוזס). נקודות ניסוייות ועקומה תאורטית.

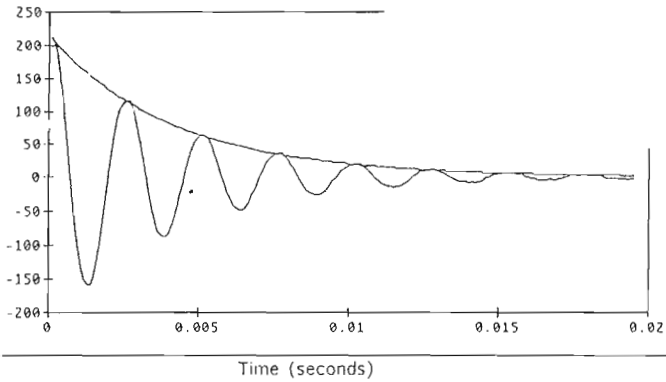
לצורך קבלת עקומת הענות בעבר היה צורך בשני רכיבים חשובים (נוסף לרכיבי המעגל): מחולל אותות בתחום התדירויות הנדרש, ואוסצילוסקופ ששימש לקציבת המתח והתדירות. התוצאות נקראו מן האוסצילוסקופ תוך השוואה למערכת הצירים. כל מדידה נרשמה ידנית, ולאחר מכן שורטט קו על סמך סך כל המדידות. הערכת זמן של כחצי שעה לצורך קבלת עקומה המתקבלת על סמך 25 נקודות היא הערכה סבירה. לאחר ציור הגרף אפשר שיתברר כי יש צורך לחזור על חלק מן המדידות. העבודה במהלך הניסוי היא טכנית ואינה מעוררת התלהבות. אם נרצה לשנות פרמטרים מסויימים כדי לבחון כיצד השינוי משפיע על עקומת ההענות נצטרך לחזור על התהליך שוב. תהליך כזה הוא מייגע וצורך זמן שאינו עומד בדרך כלל לרשותינו.

אנו מעוניינים לשפר את התהליך בהבטים הבאים: לוותר על מכשירים יקרים, לצמצם באופן ניכר את המקום שצויד המדידה תופש, לקרוא באופן מדוייק את התוצאות, להשתמש במערכת הממוחשבת לקריאה ישירה של התוצאות, ליצור עקומה על סמך הרבה יותר מ-25 נקודות, לקבל את הגרף מיידי, לשמור באופן אלקטרוני את כל המספרים לצורך ניתוח השוואתי מאוחר, להציג את התוצאות במגוון של ייצוגים גרפיים לפי בחירתנו ועוד. את כל אלה עשה הצוות בורנשטיין-גולדברג-מוזס.

### ציוד המדידה העכשווי

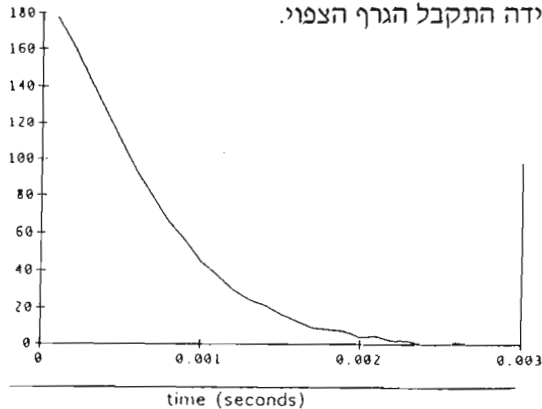
המדידות והניתוח נעשו על ידי סביבת העבודה "תוכנת-חקר" (Explorer). מצד התוכנה נעשה שימוש במודל MBL<sup>2,3</sup> של "תוכנת-חקר". מצד החומרה נעשה שימוש בממשק ה-MBL של "תוכנת-חקר". ממשק זה שימש הן לפלט והן לקלט. מחד גיסא שימש הממשק כמקור כא"מ בעוצמה ובתדירות שנקבעו על ידי המשתמשים; מאידך גיסא הוזרמו מדידות מתח מחישן אחד או שניים. הטיפול הראשוני בתוצאות נעשה על ידי הממשק. משם התוצאות מוזרמות למחשב ומעובדות באמצעות התוכנה, לפי הוראות המשתמשים. התוצאות מוצגות מיידי על המסך במגוון ייצוגים, ומאוחסנות (לפי בקשה) בגליון, שהוא חלק אינטגרלי מן התוכנה, לשימוש מאוחר. את מקום מחולל האותות והאוסצילוסקופ תפס הממשק. יש לזכור שבכל מקרה אנו נזקקים למחשב לצורך ניתוח תוצאות והצגת גרפים. היתרון כאן הוא שכל הפעילות (תכנון הניסוי, ההוראות למערכת הניסויית, הצגת הנתונים והגליון האלקטרוני) נעשית במחשב אחד ובמסגרת תוכנה אחת!

בתרשים 4 מתוארת התפרקות קבל במעגל ז"ח. מתקבלת תנודה מרוסנת. גרף המעטפת הוא גרף מעריכי. ציור בו זמני של הפונקציה ושל המעטפת (בזמן אמיתי או בניתוח מאוחר בגליון) הוא אחד היתרונות של השימוש במערכת הממוחשבת.



תרשים 4: המתח על הקבל בעת התפרקותו במעגל זרם חילופין. לצד הגרף הניסויי מוצג גרף המעטפת המעריכי (בורנשטיין-גולדברג-מוזס).

בציור 5 מתואר תהליך של ריסון קריטי (שבו קצב הדעיכה מרבי). הצוות חישב מראש את ההתנגדות הנדרשת. במדידה התקבל הגרף הצפוי.



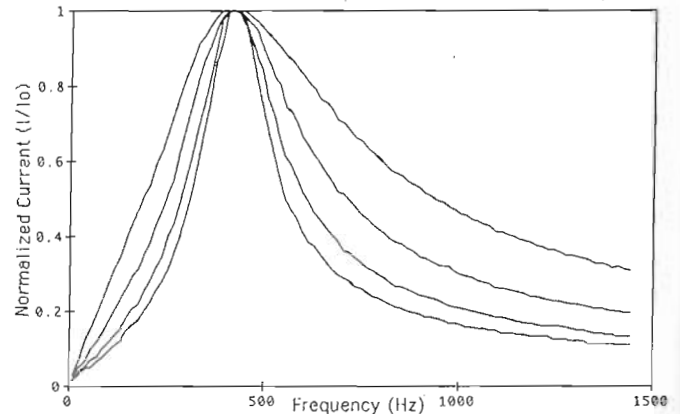
תרשים 5: המתח על הקבל בעת התפרקותו במעגל זרם חילופין במערכת של ריסון קריטי (בורנשטיין-גולדברג-מוזס).

### תהודה של גלי קול בעמוד אוויר

המדידות במעגל זרם חילופין מניבות עקומות הענות מושלמות. צוותים אחרים בבית הספר התיכון למדעים ולאמנויות חקרו תופעות תהודה במערכות אחרות. עדי אקר, ברק גל וקינן זוהר חקרו את גלי הקול המתקבלים בעמוד אוויר כתוצאה מערור חיכוני. בין היתר נמדדו עקומות הענות. לחלק זה של העבודה נתייחס כאן.

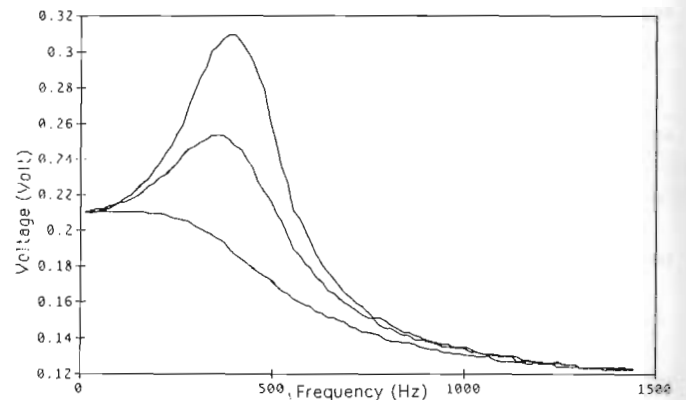
כמו במדידות במעגל זרם חילופין, שתוארו קודם, נעשה כאן

בתרשים 2 מוצגות עקומות הענות של המתח על הנגד (או הזרם) עבור ערכי התנגדות שונים. כל העקומות "נורמלו" כך שהערך המרבי שלהם זהה. רוחב העקומה תלוי בהתנגדות. בחינת התוצאות הראתה התאמה עם התאוריה. המכסימום מתקבל באותה תדירות, בלי קשר להתנגדות.



תרשים 2: עקומות הענות של הזרם עבור התנגדויות שונות (מנורמלות למכסימום משותף). העקומות הצרות יתר מתאימות להתנגדות נמוכה יותר (בורנשטיין-גולדברג-מוזס).

בתרשים 3 מוצגות עקומות של המתח על הקבל (או המטען). המכסימום אינו מתקבל בכל המקרים באותה תדירות, ויתכן שלא יהיה מכסימום כלל.



תרשים 3: עקומות הענות של המטען על הקבל (בורנשטיין-גולדברג-מוזס).

### ניסויים נוספים בזרם חילופין

כאמור, עבודת הצוות לא עסקה בעקומות הענות בלבד. כדוגמה למדידה מסוג אחר נציג כאן מדידת טרנזיינטיס. מדידה כזאת אינה יכולה להעשות בצורה פשוטה על ידי אוסצילוסקופ רגיל, מפני שאין מדובר כאן במצב העמיד שבו התופעה מחזורית. הצוות חקר מצבי מעבר בתנודה מאולצת ובתנודה לא מאולצת.

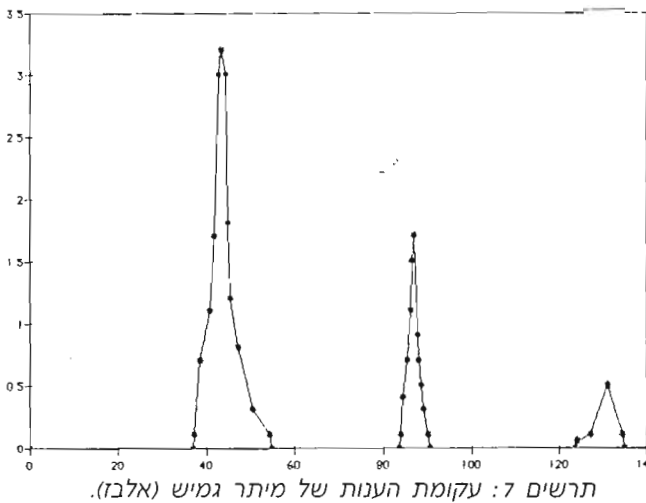
מופיעות שלוש הכפולות האי זוגיות הראשונות של התדירות היסודית.

### תהודה במיתר

הצוות שחקר את התנודות במיתר היה צוות של איש אחד - אריאל אלבו. עיקר החקירה התרכז בביצוע מדויק של ניסוי Melde<sup>4</sup>. מיתר גמיש נמתח באמצעות משקולת. עירור המיתר נעשה באופן מכני על ידי חיבור למרעד. החלק הממוחשב של הניסוי היה הניתוח בגיליון. הניסוי עצמו נעשה ידנית. נתייחס כאן רק לחלק הנוגע לעקומת ההענות.

בדרך כלל מחפשים את התדירויות העצמיות בלבד. במסגרת עבודה זו נבדקה ההענות בתדירויות אחרות במטרה לצייר עקומת הענות. המיתר הוא באופן סטרובוסקופי. הסטרובוסקופ שימש לקציבת התדירות המדוייקת. מעבר לזה, ההארה באמצעות הסטרובוסקופ אפשרה למדוד את האמפליטודה באמצעות סרגל. שלא כמו במערכות שתוארו קודם (מעגל ז"ח ועמוד אוויר), המיתר הוא מערכת בעלת "גורם איכות" גבוה, ויש לה עקומות הענות ברוחב של הרצים בודדים. הדבר מחייב מדידה עדינה במיוחד.

בתרשים 7 מוצגת עקומת הענות אופיינית של מיתר כפי שנמדדה על ידי אריאל אלבו.



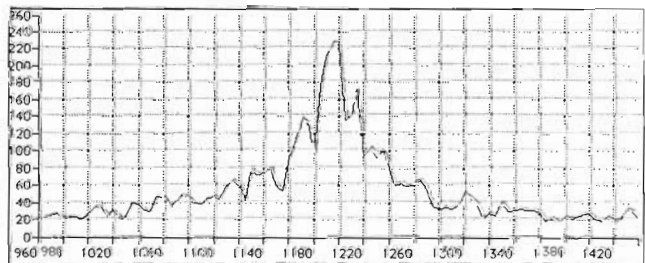
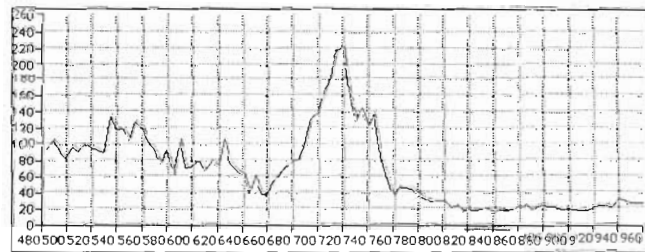
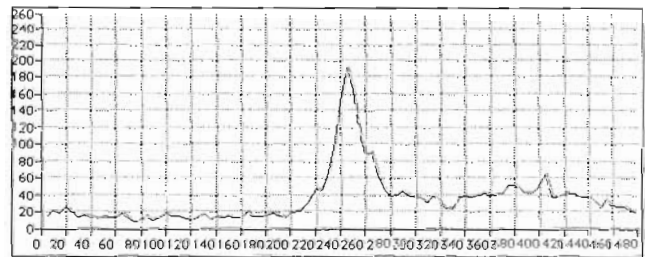
תרשים 7: עקומת הענות של מיתר גמיש (אלבו).

### תהודה בקפיץ

צוות רביעי (יצחק בוקינסקי ומשה רודרמן) עסק באנלוגיה בין מערכות חשמליות (מעגלי ז"ח) למערכות מכניות (קפיץ ומסה). הגורם האנלוגי לקיבול הוא קבוע הקפיץ. האנלוג של ההשראות הוא המסה. האנלוג של ההתנגדות החשמלית

שימוש בטכניקה של סריקת תדרים (המתוארת בסעיף "אופן המדידה"). הפלט חובר למקול שעורר את התנודות. כעמוד אוויר שימשה משורה. מיקרופון מדד את התנודות בתוך המשורה. תוצאות מדידת המיקרופון היו את הקלט שהתקבל במחשב.

ניסויים בגלי קול מניבים גרפים פחות חלקים ופחות אידאליים מאלה שמתקבלים במעגל זרם חילופין. כל מקור קול במעבדה ומחוצה לה מהווה הפרעה. הגרף המתקבל תלוי במיקום הרמקול. המיקרופון שנמצא בתוך המשורה ומחובר בחוט לממשק מפריע לעמוד האוויר האידאלי. התוצאות תלויות במיקום המדוייק של המיקרופון בתוך המשורה. כל אלה משפיעים על התוצאה. אף על פי כן התקבלו תוצאות מובהקות.



תרשים 6: עקומת הענות (מחולקת לשלושה תחומי תדירות) של תנודות גלי קול בעמוד אוויר (אקר-גל-זוהר).

בתרשים 6 מוצגת עקומת הענות אופיינית מחולקת לשלושה תחומים. סריקת כל אחד משלושת התחומים נמשכה פחות מ-2.5 שניות. אזורי ההענות נראים בולטים באופן מובהק מעל לרקע. בתחומי התדירות שמוצגים כאן

הוא הצמיגות. המערכת כללה קפיץ שקצהו האחד חובר למרעד וקצהו השני חובר לגלשן שנע על מסילת אוויר והיה קשור, באמצעות חוט, לגוף תלוי. השליטה בגורם הריסון (הצמיגות) נעשתה באמצעות גליונות קרטון שחוברו לגלשן כדי להגביר את התנגדות האוויר. אנו מקווים להביא תוצאות אופייניות מעבודה זו במאמר שיתפרסם בעתיד בתהודה, ויעסוק בעבודות על מערכות מכניות שנעשו בבית הספר.

## ישום בבית הספר

האם פעילויות מן הסוג שהוצג כאן מתאימות לכל בית ספר או שמקומן במסגרות לימוד מיוחדות בלבד? תשובה מקיפה לשאלה זו אפשר למצוא במאמר "חקירה מדעית בבית הספר" בגליון זה, ולכן נקצר.

העבודות שהוצגו כאן היו חקירות עצמאיות - התלמידים נדרשו להגדיר את גבולות העבודה, ללמוד את הצדדים העיוניים, ללמוד לבד את סביבת העבודה (תוכנה וחומרה), להגדיר את המערכת הנמדדת (אם יש צורך - לבנות אותה), להציע שיטות מדידה (כולל בחירת ציוד) ולמצות את האפשרויות שסביבת העבודה מאפשרת. התלמידים פעלו בשיטות ובאמצעים חדשים, ובמובן מסויים כל פעולה שלהם היתה פעולה ראשונית.

האם אפשר לאמץ רכיבים מן הפעילויות הללו במסגרת של הוראה "ריגילה"? האם מורה שרוצה להפגיש את תלמידיו עם תופעת התהודה באופן משמעותי יכול לעשות זאת במסגרת גגישת מעבדה אחת (ולא במסגרת של חקירה

מתמשכת)? מעבודות התלמידים למדנו כי אכן אפשר לבדד רכיבים כאלה. אפשר לבצע פעילות מעבדה במעגלי ז"ח כאשר כל הדרוש מוכן למעשה בקובץ מחשב מוכן מראש, שבו אנו מותירים לתלמיד מספר פרמטרי קלט פתוחים לפי אופי הפעילות. התלמיד לא יעסוק בתכנון ובתכנות, אך יקבל הסבר מלא. עיקר השהות במעבדה יוקצה למדידות. לדוגמה: מדידות של עקומות תהודה בתנאים שונים (שינויים בהתנגדות, בקיבול ובהשראות; הכנסת ליבה; חקירת מעגלי תהודה טוריים ומקביליים וכיו"ב). המעבדה תעשה במתכונת המסורתית אך טכניקת המדידה והניתוח יהיו עכשוויים, והדיון במהות הפיסיקלית יהיה עשיר.

מעגל זרם חילופין הוא מערכת טובה להדגמת התהודה מפני שהיא מניב תוצאות "מושלמות", אך בכל מקרה אין לוותר לפחות על הדגמה של אנלוג מכני. למערכות המכניות יש יתרון - אצלן התופעה נראית היטב לעיין. במעגל זרם חילופין התופעה סמוייה מן העיין. אפשר לבחור בניסויים כאלה כניסויים לבחינת הברות במעבדה.

### מראי מקום

1. רונן, מ., ליפמן, א., V-scope "אוסילוסקופ" לתנועה, תהודה 1991, 14, (2), עמ' 13-19.
2. אריאלי, ר., קדם, ע., המעבדה הממוחשבת (MBL), תהודה 15, (2), 1993 עמ' 45-48.
3. לוי, ד., ה MBL של חברת לוגל, תהודה 15, (2), 1993 עמ' 49-51.
4. מלצ'וק, י., אישור חוקי הגזים בעזרת צינורות מלדה, גליונות 1976, 5, (2), עמ' 26-29.

