

תנודות דיפול בשדה מגנטי

כאב קרקובר, המרכז לניסויים קרים אקדמיים, האוניברסיטה העברית, ירושלים
והמחלקה להוראת המדעים, מכון וייזמן למדע

תקציר

תנועתו של דיפול מתנודד בשדה מגנטי לא אחיד נחקרה על ידי תלמידים בבית הספר התיכון למדעים ולאומנויות בירושלים בשנת תשנ"ג. נעשתה מדידה ממוחשבת בו-זמנית של שדה מגנטי ומקום לצורך השוואה עם התאוריה. התלמידים גזרו (עיונית) את חוק הכוח, ומצאו, באמצעות אינטגרציה נומרית, את גרף הכוח כפונקציה של הזמן. גרף זה השווה עם גרף המהירות המתקבל מגזירה נומרית של המקום הנמדד.

מילות מפתח:

דיפול מגנטי, שדה מגנטי, החוק השני של ניוטון, מדידה ממוחשבת, אינטגרציה נומרית.

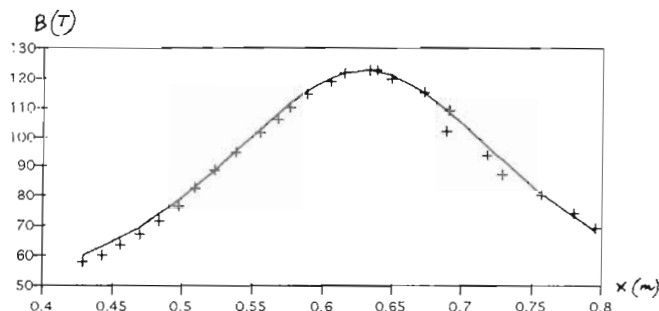
כדי לוודא שהדיפול נע לאורך הציר הניצב לכריכות, הוצמד הדיפול לגלשן שנע על מסילת אוויר. כך צומצמה גם האפשרות של השפעת כוחות נוספים (חיכוך) על התנועה. המעקב אחרי מקום הגוף נעשה באופן ממוחשב על ידי חיישן סונארי שממנו התוצאות הועברו בזמן אמיתי לממשק ומשם למחשב.

השדה המגנטי

השדה המגנטי על הציר במרחק x ממרכז הכריכה ניתן על ידי:

$$B(x) = \frac{\mu_0 N I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

כאשר R הוא רדיוס הכריכה, N מספר כריכות ו I עוצמת הזרם בסליל, הצוות בדק אם השדה המגנטי תלוי במקום לפי פונקציה מתמטית זו. השדה המגנטי והמקום נמדדו, באופן בו-זמני ממוחשב, באמצעות שני חיישנים. תוצאות המדידה מוצגות בתרשים 2. בצד אחד יש מעט סטיות, שמקורן, כנראה, בהסתרה של הדיפול ממכשיר המעקב. (מוסבר בהרחבה בסעיף "שיקולים ניסויים").



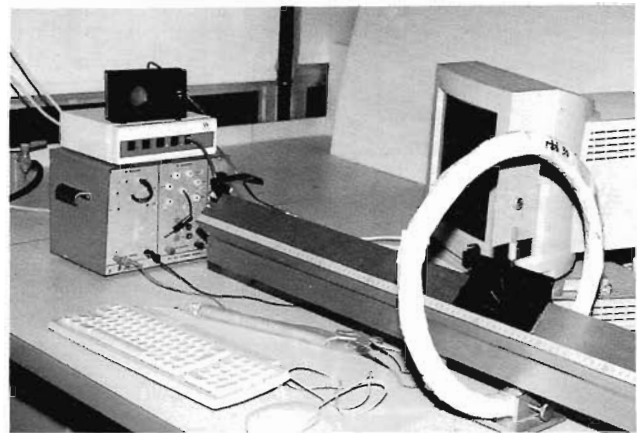
תרשים 2: שדה מגנטי (B) כפונקציה של הכנגד מקום (x) - נקודות מדודות, קווי רציף - עקומה עיונית. (טרייגר-סלובודוב)

דיפול מגנטי רגיש לחוסר אחידות בשדה, מפני ששני קטביו נתונים להשפעת כוחות שונים גודל. כתוצאה מכך הדיפול מואץ. מאמר זה מציג חקירה עיונית וניסויית של תנועה כזו, שנעשתה על ידי ששה טרייגר ואורי סלובודוב בבית הספר למדעים ולאומנויות בירושלים בשנת תשנ"ג.

בחקירה זו נכלל מגוון הרכיבים המקובלים בחקירה פיסיקלית: חישוב עיוני, תכנון המערכת ובנייתה, התגברות על בעיות ניסוייות, בחירה בין אמצעי מדידה, שימוש במדידה ממוחשבת בו זמנית של שני חיישנים, ניתוח ממוחשב (כולל גזירה נומרית ואינטגרציה נומרית).

המערכת הניסויית

מקור השדה המגנטי הלא-אחיד היה בטבעת נושאת זרם. ליתר דיוק - 90 כריכות של תייל נושא זרם בהתנגדות כוללת של 1.5Ω . התייל היה מחובר לספק זרם ולמד זרם. הדיפול המגנטי היה רב עוצמה וקטן (ממדיו קטנים מאוד ביחס לרדיוס הכריכות).

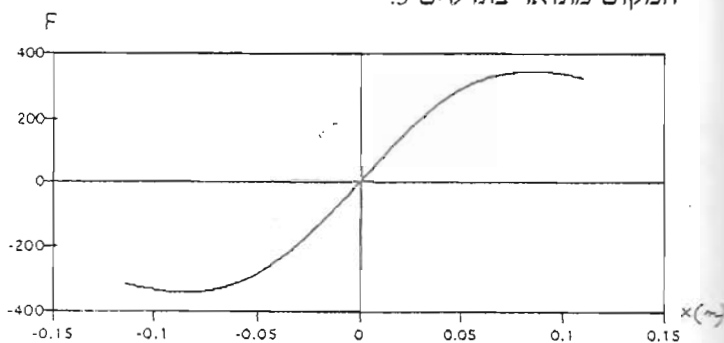


תרשים 1: תצלום המערכת הניסויית (טרייגר-סלובודוב).

הצוות חישב את הכוח המופעל על דיפול דק כהפרש (סכום וקטורי) של הכוחות הפועלים על שני הקטבים. נוסחת הכוח המתקבלת היא:

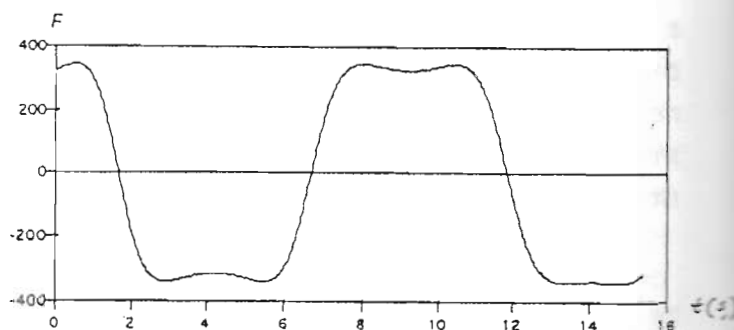
$$F(x) = -\frac{3}{2} \cdot \frac{x}{(R^2 + x^2)^{5/2}} \mu_0 N I R^2 m$$

כאשר m הוא מומנט הדיפול. עבור ערכי x קטנים מתקבל בקירוב כוח לינארי והתנועה הצפויה היא הרמונית. זה מתקיים כל זמן שהאמפליטודה קטנה מאוד מרדיוס הכריכה. במקרה הכללי התנועה מחזורית, אך לא הרמונית. הכוח הוא כוח מחזיר אך אינו גדל ללא הגבלה (כמו במתנד ההרמוני). לכן יש ערך מרבי בנקודה $x = R/2$. מעבר למרחק זה הכוח הולך ופוחת. גרף תאורטי של הכוח כפונקציה של המקום מתואר בתרשים 3.



תרשים 3: הכוח הפועל על הדיפול כפונקציה של המקום (טרייגר-סלובודוב).

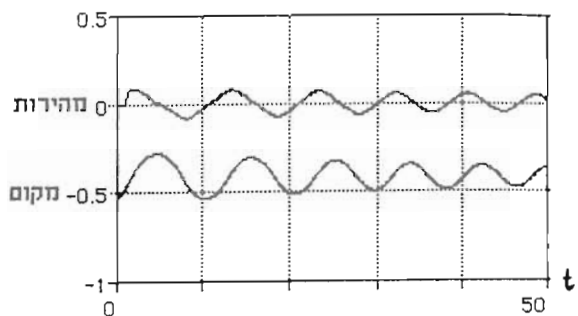
הגבולות של גרף הכוח בתרשים 3 מתאימים לאמפליטודה בניסוי מסויים שבו נמדד $x(t)$. על ידי הצבת הפונקציה המדודה $x(t)$ בתוך הפונקציה התאורטית $F(x)$ התקבלה הפונקציה המתוארת גרפית בתרשים 4. הגרף המתקבל אינו זה המוכר מתנועה הרמונית פשוטה (סינוס).



תרשים 4: הכוח הפועל על הדיפול כפונקציה של הזמן התקבל כהכלאה של גרף כוח-מקום תאורטי עם גרף מקום-זמן ניסוי (טרייגר-סלובודוב).

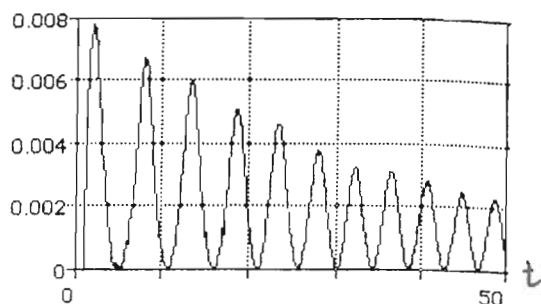
מעקב אחרי התנועה

המעקב נעשה באמצעות חיישן סונארי ומדידות המקום הוצגו מספרית וגרפית בזמן אמיתי על המסך. גם מדידות המהירות, הנגזרות ממדידות המקום, הוצגו בזמן אמיתי על המסך. גרפים אופייניים של מקום ומהירות מוצגים בתרשים 5. הגרפים מחזוריים, אך אינם גרפי סינוס. בגרף המהירות יש קטעים כמעט ישרים, בהתאמה עם גרף הכוח (תרשים 4) שהוא כמעט קבוע במהלך חלקים נכבדים של הזמן.



תרשים 5: מקום (גרף תחתון) ומהירות (גרף עליון) כפונקציה של זמן בתנועת דיפול על ציר טבעת נושאת זרם (טרייגר-סלובודוב).

נעשה גם מעקב, בזמן אמיתי, אחרי ריבוע המהירות המתכונתי לאנרגיה הקינטית. תרשים 6 מתאר מעקב כזה. מן התרשים עולה כי התנודה דועכת במהלך הזמן.



תרשים 6: אנרגיה קינטית כפונקציה של זמן בתנועת דיפול על ציר טבעת נושאת זרם (טרייגר-סלובודוב).

הדעיכה מוסברת על ידי התנגדות האוויר לתנועת הגלשן, שאליו היה צמוד משטח מחזיר להחזרת גלי הקול. מדידות שנעשו עבור ערכי זרם שונים בתייל תומכות בכך. ככל שהזרם גדול יותר והכוח המחזיר גדול יותר, מתקבלות מהירויות גדולות יותר. הפסדי אנרגיה קינטית הודות להתנגדות האוויר אמורים לגדול עם המהירות. המדידות הראו שכך אכן קורה.

לגלי הקול המשודרים מן החורים שבמסילה, ובניית מערך ניסויי טוב שכולל אותו חייבה מאמץ מיוחד והגדלה של המרחב שהוקצה למערכת. היתה בעייה של מרחב, מפני שהמערכת כללה כבר מסילת אוויר, ובמעבדת הפיסיקה עבדו במקביל עוד שבעה צוותים.

בסופו של דבר בחרו אנשי הצוות בחייון המבוסס על שיטת ההד. חיזוקים לבחירה זו נבעו מן הצורך למדוד בו-זמנית שדה מגנטי ומרחק שמתאפשר במערכת ה-MBL, הרצון לקבל מגוון של גרפים בזמן אמיתי (ריבוע המהירות למשל) והקשר המיידני עם הגליון האלקטרוני. כל אלה הם מאפיינים של "תוכנת חקר". האפשרות לחזור על הניסויים פעמיים (עם V-Scope ועם MBL) ולהשוות היתה מוגבלת, משיקולים של הקצאת אמצעים בין הצוותים השונים.

שיקולים של הקצאת אמצעים הטילו על הצוות מגבלות נוספות. המצב האידאלי היה לבנות מערכת "סגורה", כזו שבה מכוונים פעם אחת במדויק את מסילת האוויר ביחס לכריכות, כדי להבטיח שהתנועה תהיה בדיוק על הציר. למעשה נדרש מן הצוות הדבר ההפוך. מסילת האוויר והחיישן נדרשו לחקירות של צוותים אחרים ולפעילויות שוטפות של בית הספר. הצוות נדרש לבנות מערכת שקל לפרקה ולהרכיבה לצורך המשך החקירה.

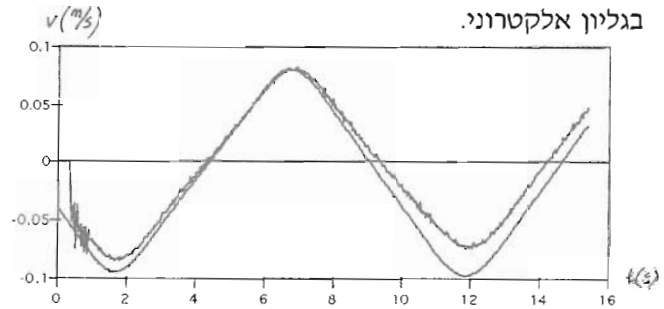
90 הכריכות נכרכו ידנית על ידי התלמידים על גבי מסגרת קרטון (חומר הגלם היה קופסת פיצה). המבנה המדויק של המסגרת נעשה כך שגלי הקול הפוגעים במסגרת לא יוחזרו אל החיישן, במטרה למזער הפרעות.

בפני הצוות עמדה בעיית אופטימום. מצד אחד כדאי להגדיל את לחץ האוויר כדי לצמצם חיכוך ולהקטין אובדן אנרגיה. מצד שני הגדלה כזו מטלטלת מעט את הגלשן ומכניסה רעש לחיישן. התוצאות שהוצגו כאן התקבלו לאחר בחירת תנאים אופטימליים. באותו הקשר יש להזכיר גם שיקולים של "החלקה" (בדרך של מיצוע תוצאות ניסוייות). עד כמה מותר להחליק תוצאות? מתי ההחלקה מנקה את התוצאות מהפרעות משניות, ומתי היא מחבלת בתוצאות הראשיות? אלה הן דוגמאות לבעיות שהעסיקו את התלמידים.

במהלך החקירה נחשפו התלמידים למגוון רחב מאוד של שיקולים המייצגים הבטים רבים של החקירה המדעית. ספק אם פעילות כזאת תזדמן להם שוב לפני לימודי המוסמך.

תהודה

לפי החוק השני של ניוטון התאוצה נמצאת ביחס ישר לכוח. הצוות בדק אם אכן זה מה שמתרחש במהלך תנועה לא-טריוויאלית זו. לשם כך נבדקה ההתאמה בין המהירות כפי שהיא חזוייה מתוך אינטגרציה של התאוצה המתקבלת מחוק הכוח התאורטי, לבין המהירות המתקבלת מן הניסוי (כפי שהיא נגזרת ממדידות המקום). תרשים 7 מציג את שני הגרפים במערכת צירים משותפת. הדמיון בין הגרפים בולט, ועיקר ההבדל נובע מכך שהגרף הניסויי דועך במהלך הזמן, כפי שראינו בגרף האנרגיה הקינטית. הפעילות נעשתה בגליון אלקטרוני.



תרשים 7: גרפי מהירות-זמן כפי שהתקבלו בשתי דרכים - "אינטגרציה של התאוריה" ו"גזירה של הניסוי" (טרייגר-סלובובדוב).

שיקולים ניסויים

עד כה ראינו כי במהלך החקירה עסק הצוות בהבטים שונים של "פיסיקה" - תאוריה, ניסוי, שילובים שלהם, ניתוח ממוחשב ועוד. כל אלה היו רק צד אחד של ההתנסות. צד שני, חשוב מאוד, היה הצד הניסויי: בניית המערכת, התמודדות עם אילוצים, בחירת אמצעי מדידה וכיו"ב. נעמוד מעט על כך, כדי לקבל "תמונת צבע" של המתרחש בסוג פעילות כזה.

כדוגמה להתלבטות שהיתה תהליך רצוף שיקולים פיסיקליים נציג את עניין בחירת חיישן המרחק. אמצעים עמדו לרשות הצוות: מכשיר V-Scope וחיישן מרחק סונארי משולב במערכת MBL של "תכנת חק" (Explorer). כל מכשיר מדידה מערים קשיים משלו. החיישן הסונארי מבוסס על שיטת ההד והתברר כי כאשר הדיפול מרוחק מן החיישן חלק מן הגלים מוחזרים מן ההתקן שנושא את הכריכות נושאות הזרם, ומשבשים במקצת את תוצאות המדידה (כפי שראינו בתרשים 2). שיקול נוסף לשימוש ב-V-Scope הוא העדר הצורך במשטח מחזיר, דבר שמקטין את התנגדות האוויר. מצד שני מכשיר ה-V-Scope רגיש יותר