

מחשפיזיקה

חקירת התגובה של מעגל LC לגירויים המופעלים על-ידי פולסים חיצוניים של אנרגיה אלקטרומגנטית, בעזרת תוכנת ה-MBL של חברת לוגל

ריקרו טרומפר, אורנים, בית הספר לחינוך של התנועה הקיבוצית, חטיבה אוניברסיטאית, ומשה גלבמן, "מחר 98", האוניברסיטה העברית, ירושלים

תקציר: מובאת דוגמה לניסוי חקר של תגובת מעגל LC לגירויים על-ידי פולסים אלקטרומגנטיים חיצוניים. שיטת החקר מתבצעת בעזרת תוכנת ה-MBL "Explorer" של חברת לוגל. מערכת זו מאפשרת קליטת נתונים פיזיקליים בזמן אמת ולאחר מכן ניתוחם ועיבודם. בשיטה זו אפילו תלמידי תיכון יכולים לחקור חוקים פיזיקליים באופן וברמה שקודם לכן לא היו נגישים להם.

מילות מפתח: MBL - "Explorer", מעגל LC, פולסי אנרגיה אלקטרומגנטית, תהודה.

1. יצירת פולסים של אנרגיה אלקטרומגנטית וקליטתם על-ידי מעגל LC – רקע תיאורטי

במאמר זה, אנו חוקרים את תהליך הקליטה של פולסי אנרגיה אלקטרומגנטית על-ידי מעגל LC. מקור השדה האלקטרומגנטי הוא דיפול מגנטי (במקרה שלנו סליל בעל 300 כריכות). האינדוקציה המגנטית B לאורך הציר העובר דרך מרכז הסליל תלויה בזמן, בהתאם לפולסי מתח המסופקים על-ידי מחולל אותות. הסליל של מעגל הקליטה נמצא מול המקור כך שלשני הסלילים ציר משותף העובר דרך מרכזיהם. השדה המגנטי המשתנה באופן חד מאד בסליל המקור (כפי שנראה מאוחר יותר) גורם למתח מושרה בסליל הקולט.

למעגל הקליטה תדירות עצמית המוגדרת על-ידי הקיבול של הקבל וההשראות של הסליל. כשנחשוף את מעגל הקליטה לגירוי חיצוני מחזורי בעל תדירות השווה לתדירות העצמית שלו, נצפה לקליטה מוגברת של אנרגיה. זהו מצב **תהודה**. לצורך הטיפול המתמטי נתייחס לסלילים של המקור ושל הקולט כאל סלילים צרים בעלי מספר כריכות המתאים לכל

מבוא

יישומי מחשב כגון הדמיות, גיליון אלקטרוני ו-MBL הפכו בשנים האחרונות לחלק מקובל ולפעמים חיוני של הוראת הפיזיקה. השימוש במחשב כאוסף נתונים אנלוגיים מתוך מערכת פיזיקלית, ההופך נתונים אלה לקלט דיגיטלי ובונה מודל גרפי בזמן אמת, מהווה יישום דידקטי הולם של היכולות המיוחדות של המחשב ומעניק למורה מכשיר הוראה בעל עוצמה גדולה.

מערכות החומרה והתוכנה המבצעות את הפונקציות הנ"ל נקראות MBL. Nakhleh¹ סיכם לאחרונה סידרה של מחקרים העוסקים בהשפעת השימוש ב-MBL על הוראת המדעים. טכנולוגיה חדשה זו התחילה לתפוס מקום נכבד בה בעת שהמחקרים הקוגניטיביים החלו לשנות את השקפתנו אודות האופן בו מתרחשת הלמידה.

עקרונות ה-MBL הוסברו כבר במאמר ממצה על-ידי אריאלי וקדם² וה-MBL של לוגל עצמו תואר בפרוטרוט על-ידי לויך³.

* מתורגם ברשות מהמהקור:

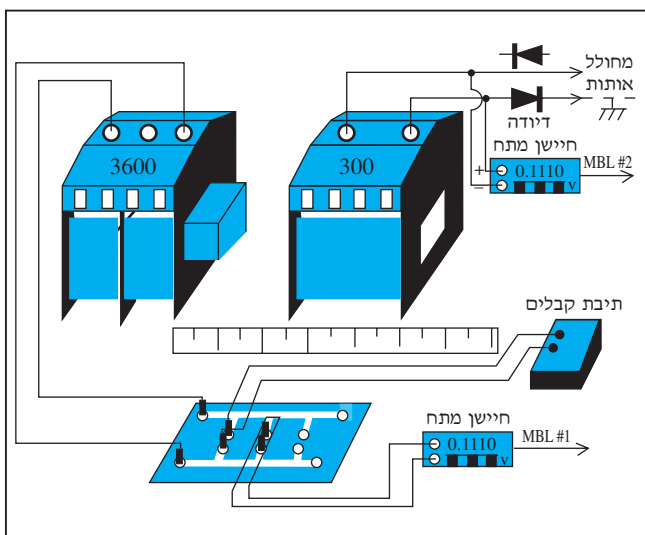
Exploring the response of an LC circuit to the stimuli of external electromagnetic energy pulses through MBL European Journal of Physics, **18**, pp. 277-283 (1997).

גל מלבני. למעשה, כפי שנראה יותר מאוחר, צורת אות המתח המסופק למעגל הקולט היתה סידרה של פולסים בעלי תדירויות שונות. אל מעגל הקליטה מחובר חיישן מתח המודד את תדירות תנודות המתח במעגל הקליטה ואת המתח המרבי בין קצות הקבל והסליל המחוברים במקביל. חיישן מתח שני מחובר לסליל בעל 300 הכריכות ומודד את פולסי המתח עליו. מערך זה מאפשר לחקור את:

- א. תגובת מעגל הקליטה לפולסים של אנרגיה חיצונית בעלי תדירות נמוכה.
- ב. השפעת המרחק בין מקור הפולסים לבין המעגל הקולט על האנרגיה הנקלטת על-ידי מעגל הקליטה במצב של תהודה.

הציוד הדרוש לביצוע הניסוי: מחשב PC עם תוכנת ה-MBL של לוגל (Explorer), ממשק MBL, שני חיישני מתח, שני סלילים - אחד בעל 3600 כריכות והשני בעל 300 כריכות (התנגדות $1\ \Omega$ בערך), ליבת ברזל, תיבת קבלים עמידים למתח AC של 250 V לפחות, לוח חיבורים, מחולל אותות בעל יציאת הספק של 5W, תיילים וסרגל.

מעגל הקליטה נבנה כמתואר בתרשים 1 - סליל בעל 3600 כריכות עם ליבת ברזל, בעל השראות של 1.88 H חובר במקביל לתיבת קבלים; שני חיישני המתח המחוברים לערוצים 1 ו-2 של ממשק ה-MBL מדדו את: א. תדירות תנודות המתח במעגל הקליטה והמתח המרבי בין קצות הקבל והסליל, ב. פולסי המתח בין קצות הסליל בעל 300 הכריכות.



תרשים 1
דיאגרמה המראה את המעגל החשמלי אשר היה בשימוש בניסוי

אחד מהם. קירוב כזה מוצדק מפאת הסימטריה של השדה המגנטי משני צידי הסליל. בהתאם להנחה זו, מיקומם של הסלילים נקבע לפי מיקום מרכזיהם.

האינדוקציה המגנטית הרגעית B לאורך ציר העובר דרך מרכז המקור ובכיוון מאונך למישור הכריכות, מוגדרת על-ידי חוק Biot-Savart כפי שצוטט לאחרונה בכתב עת זה על ידי גלר⁴:

$$(1) \quad B = \frac{\mu_0 i N R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

כאשר R רדיוס הכריכה, x המרחק מנקודת האמצע של סליל המקור לאורך צירו, i הזרם בכריכה, N מספר הכריכות ו- μ_0 קבוע הפרמיאביליות של הריק.

הכיוון של B הוא לאורך הציר העובר דרך מרכז סליל המקור. הואיל והמתח המזין את סליל המקור הוא בצורת פולסים קצרים וחדים, גם הזרם בסליל המקור ישתנה באופן דומה לשינוי המתח (ההשראות העצמית של סליל המקור קטנה מאוד, כ-2 mH). בגין השינוי בשטף המגנטי נקבל במעגל הקליטה מתח מושרה בהתאם לחוק פארדיי:

$$(2) \quad V_{\max} = -N_1 \cdot \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

כאשר N_1 הוא מספר הכריכות בסליל הקולט. את המשמעות המעשית של הסימן מינוס נראה מאוחר יותר בתרשים 5. המתח במעגל הקליטה יקבל ערך מרבי כאשר קצב השינוי של השטף המגנטי מקבל ערך מרבי. לפי המתואר במשוואות (1) ו-(2) יש לצפות במעגל הקליטה למתח מושרה מרבי הנתון על-ידי התבנית המתמטית:

$$(3) \quad V_{\max} = \frac{\gamma}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

כאשר γ הינו גודל קבוע התלוי בפרמטרים של המקור ושל מעגל הקליטה.

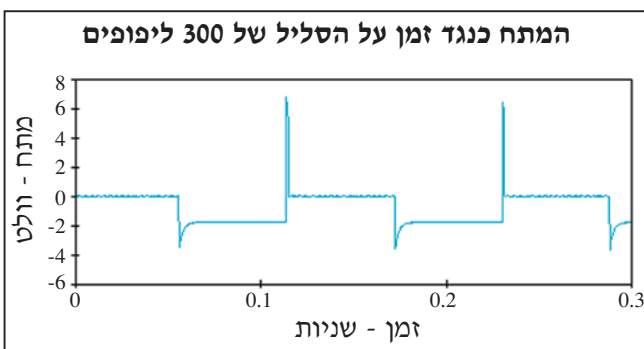
Manzanares et al⁵ הגיעו למשוואה דומה בניתוח של פולס המתח המושרה על-ידי מוט מגנטי הנע במהירות קבועה לאורך צירה של כריכה מעגלית.

2. חקירת התגובה של מעגל LC לגירוי של פולסי אנרגיה אלקטרומגנטית

2.1 תאור כללי של הניסוי

בניסוי זה חקרנו את תהליך הקליטה של אנרגיה אלקטרומגנטית על-ידי מעגל LC הנתון להשפעת פולסים של אנרגיה אלקטרומגנטית. השדה האלקטרומגנטי נוצר על-ידי סליל בעל 300 כריכות המזון על-ידי מחולל אותות המשדר

כאמור לעיל, בחרנו במחולל מתח מלבני. כדי לקבל פולסים קצרים השתמשנו בדיודה החותכת את המתח החיובי, אולם מספיקה להעביר פולס מתח לזמן קצר מאד (משך זמן זה תלוי במתח ההפעלה של הדיודה). מאחר שהסליל בעל 300 הכריכות משדר את השדה האלקטרומגנטי אשר נקלט על-ידי מעגל הקליטה, יהיה מעניין לבדוק מה טיבו של הגל המשדר. כדי לבדוק את הצורה האמיתית של הגירוי האלקטרומגנטי המשודר, חיברנו את חיישן המתח (המחובר לערוץ 2 של ממשק ה-MBL) אל הסליל בעל 300 הכריכות והתוצאה היא זו הנראית בתרשים 3.



תרשים 3: הצורה המעשית של המתח בסליל המשדר

בניסוי זה השתמשנו במתח בעל תדירות נמוכה של בערך 10Hz וסליל בעל השראות נמוכה של בערך 2 mH. במקרה זה, שינויי הזרם דומים מאד לשינויי המתח, וזה נותן לנו קירוב טוב עבור שינויי השטף המגנטי.

כעת נוכל להבין טוב יותר את הקשר בין צורת הגירוי של האנרגיה האלקטרומגנטית המשודרת לבין התנודות הנוצרות במעגל הקליטה. האנרגיה נקלטת במעגל הקליטה ומופיעים פולסי מתח סינוסואידלים שתדירותם מוכתבת על ידי L ו-C, וקצב דעיכתם (הפסד החום) תלוי בהתנגדות הסליל. רואים קשר זה בתרשים 4, המציג צירוף של שתי סדרות הניסוי אשר נרשמו בגיליון האלקטרוני של תוכנת ה-MBL של לוגל (Explorer).

ניתן להציג את צירוף התוצאות עבור פולס אח, כמוראה בתרשים 5.

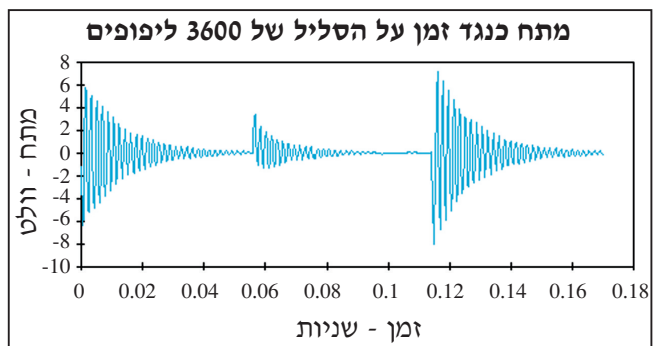
ניתן להבחין היטב בהפרש מופע של 180° בין הפולס המשודר לבין תנודות המתח במעגל הקליטה, כמתחייב מחוק פארדיי.

2.2 ההשפעה על מעגל LC של גירוי אלקטרומגנטי חיצוני בעל תדירות נמוכה

ניסויים קודמים (קרובר⁶, שוורץ⁷) הראו שכאשר מחברים מעגל LC למקור חיצוני המספק אנרגיה בתדירות השווה לתדירות העצמית של המעגל הוא ייכנס למצב של **תהודה**. בחלק הראשון של הניסוי הנוכחי נראה איך פולסים של אנרגיה בעלי תדירות **נמוכה** המסופקים על-ידי הסליל החיצוני נקלטים על-ידי מעגל ה-LC במרחקים גדולים יחסית. כל פעם שהזרם משתנה בסליל החיצוני בעל 300 הכריכות, ישנו גם שינוי בשטף המגנטי. בשלב ראשון, בחרנו מתוך תיבת הקבלים קבל של 47nF (המגדיר תדירות עצמית של 535Hz) וכיוונו את מחולל האותות לתדירות של בערך 10 Hz. המרחק בין קצות הסלילים היה 10 cm.

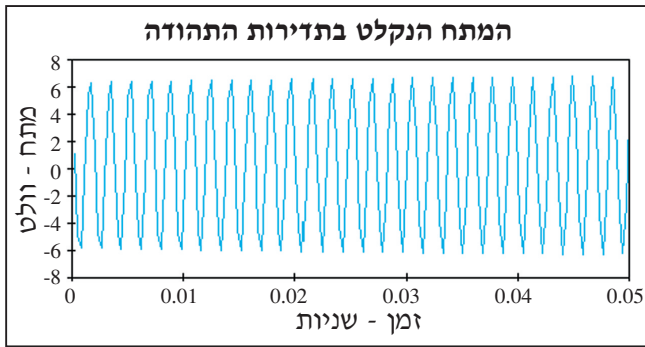
כשהפעלנו את מחולל האותות קיבלנו את הגרף המראה את תגובת המעגל (תרשים 2). ניתן לראות מספר תנודות מרוסנות בצורה קריטית כשהמתח המרבי הוא 7.8 V. בעזרת התוצאה הזאת, אנו יכולים לחשב את האנרגיה המרבית U אשר נקלטה על-ידי המעגל כתגובה לגירוי של השדה האלקטרומגנטי:

$$U = \frac{1}{2} C \left(\frac{V_{\max}}{2} \right)^2 = 357.4 \text{ nJ}$$

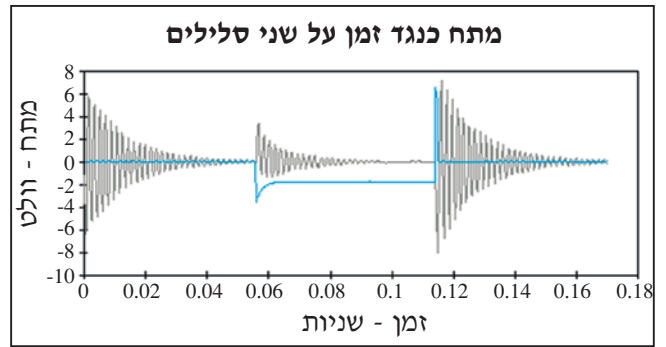


תרשים 2: תגובת מעגל ה-LC לגירוי של שדה אלקטרומגנטי בתדירות של בערך 10 Hz

מתוך הגרף ניתן לראות שהאנרגיה נקלטה בצורה מחזורית, כשהסיבה לכך היא שדעיכת המתח במעגל ה-LC מהירה יותר ממחצית המחזור של השדה האלקטרומגנטי המשודר. בנוסף לכך, ניתן לראות שהמעגל מגיב לגירוי כל 0.05 s ולא כל 0.1 s, כשהסיבה לכך היא שעבור כל מחזור נקלטת האנרגיה פעמיים על-ידי המעגל (כשמתרחש שינוי ממתח חיובי לשלילי ולהיפך).



תרשים 6: תגובת המעגל הקולט (LC) לגירוי של שדה אלקטרומגנטי המשודר בתדירות התהודה (535 Hz), כשהמרחק בין קצות סליל המקור והסליל הקולט הינו 25cm.

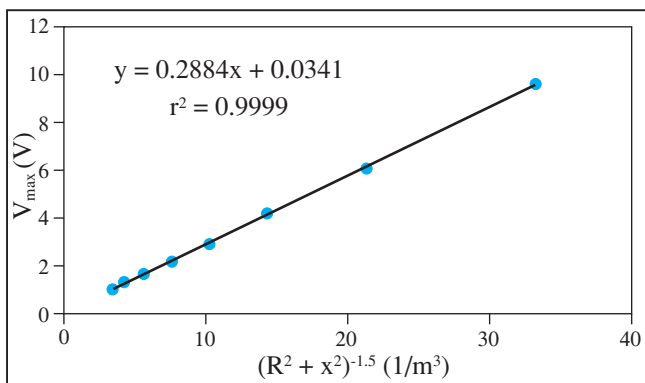


תרשים 4 המתח בסליל המשדר ביחד עם תגובת המעגל הקולט

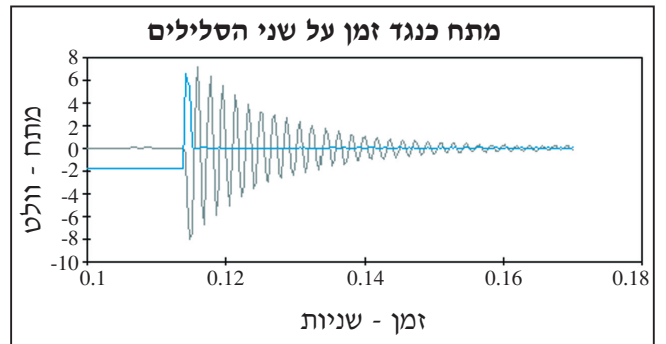
x(m)	$(R^2 + x^2)^{-1.5} (m^{-2})$	$V_{max} (V)$
.31	33.30	9.68
.36	21.31	6.12
.41	14.44	4.19
.46	10.24	2.98
.51	7.52	2.20
.56	5.68	1.68
.61	4.40	1.31
.66	3.47	1.06

טבלה 1: המתח המרבי של המעגל הקולט (LC) כפונקציה של הערך ההופכי של המרחק בין מרכזי הסלילים - סליל המקור הוא בעל 300 כריכות ואורך של 6 cm ($R = 0.0225 m$)

סירטטנו גרף המראה את המתח המרבי כפונקציה של הערך ההופכי של $(R^2 + x^2)^{-1.5}$ וקיבלנו פונקציה קווית כצפוי (ראה תרשים 7).



תרשים 7: המתח המרבי של המעגל הקולט (LC) כפונקציה של $(R^2 + x^2)^{-1.5}$, כאשר x הוא המרחק בין מרכזי הסלילים ו-R הוא רדיוס הסלילים (סליל המקור הוא בעל 300 ליפופים ואורך של 6cm)



תרשים 5: פולס אחד של המתח בסליל המשדר ביחד עם תגובת המעגל הקולט

2.3 השפעת המרחק בין הסליל המשדר והסליל הקולט על כמות האנרגיה הנקלטת על-ידי מעגל הקליטה במצב של תהודה
כיוונו את תדירות מחולל האותות לתדירות התהודה של המעגל, 535 Hz, ושינינו את המרחק בין קצות הסלילים ל-25 cm. התוצאה (תגובת מעגל הקליטה) נראית בתרשים 6. כצפוי, כשחושפים את מעגל ה-LC לגירוי מחזורי חיצוני השווה לתדירות העצמית של המעגל, הוא יקלוט אנרגיה וכמות האנרגיה הכוללת שלו תגדל.

כפי שהראינו ברקע התיאורטי, יש להניח שכמות האנרגיה המועברת קטנה כשגדל המרחק בין הסליל המשדר והסליל הקולט. על מנת לחקור את השפעת המרחק בין הסלילים על עוצמת הקרינה האלקטרומגנטית הנקלטת, מדדנו את המתח המרבי במעגל כששינינו את המרחק בין קצות הסלילים מ-25cm עד 60 cm; אורכו של הסליל המשדר הוא 6 cm. התוצאות מופיעות בטבלה 1.

ותגובת המעגל הקולט (מתח ותדירות). בדקנו את השפעתם של גירויים אלקטרומגנטיים בעלי תדירות נמוכה על המעגל ומצאנו את התוצאה המעניינת שהאנרגיה הנקלטת על-ידי המעגל במצב של תהודה פרופורציונית לערך ההופכי של החזקה השישית של המרחק בין מרכזי הסלילים. אנו מאמינים שמערך זה מספק דוגמה ברורה ומוחשית של תופעות אלו המתאימה לרמה של בית ספר תיכון. כשמנצלים את היתרונות של מערכות ה-MBL, יכולים התלמידים לבצע ניסויים שונים וללמוד כ"חוקרים מתחילים" כפי שמוצע על-ידי המחקרים האחרונים בהוראת המדעים, לדוגמה: Gil-Perez and Carrascosa-Alis⁸.

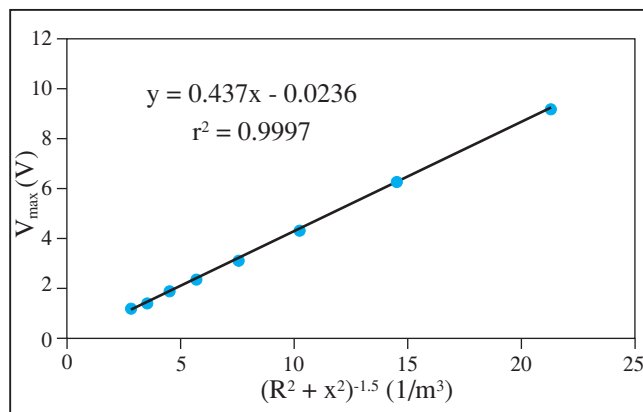
4. מראי מקום

1. Nakhleh, N., A Review of Microcomputer-Based Labs: How have they affected science learning? Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching, **13**, pp. 368 - 381, 1994.
2. אריאלי, ר. וקדם, ע., המעבדה הממוחשבת (MBL), תהודה **15**(2), עמ' 45-48, 1994.
3. לוין, ד., ה-MBL של חברת לוגל, תהודה **15** (2), עמ' 49-51, 1994.
4. גלר, צ., אפקט Hall והשימוש בו למדידת שדות מגנטיים, תהודה **18** (2), עמ' 13-21, 1997.
5. Manzanares, J., Bisquert, J., Garcia-Belmonte, G. and Fernandez-Alonso, M., An experiment on magnetic induction pulses, American Journal of Physics **62**, pp. 702-706, 1994.
6. קרקובר, ז., תהודה - מדידת עקומות הענות, תהודה, **16** (3), עמ' 23-27, 1995.
7. שוורץ, ר., הקבל - מהתפרקות לא מחזורית לתהודה. תהודה **17** (1), עמ' 31-39, 1996.
8. Gil-Perez, D. and Carrascosa-Alis, J. Bringing pupils' learning closer to a scientific construction of knowledge: a permanent feature in innovation in science teaching. Science Education, **78**, pp. 301-315, 1994.

מכיוון שהאנרגיה פרופורציונית לריבוע המתח, מראה תוצאה זו שהאנרגיה הנקלטת פרופורציונית לערך ההופכי של החזקה השישית של המרחק בין מרכזי הסלילים. כדי לוודא שתוצאה זו אינה מקרית החלפנו את סליל המקור בסליל בעל 500 כריכות ואורך של 15 cm, וחזרנו על אותן המדידות, אותן ניתן להשיג במהירות וברמת דיוק גבוהה הודות לתכונות המיוחדות של ה-MBL (ראה תוצאות בטבלה 2 ותרשים 8).

x(m)	$(R^2 + x^2)^{-1.5} (m^{-2})$	$V_{max} (V)$
.355	22.22	9.75
.405	14.98	6.47
.455	10.58	4.56
.505	7.74	3.30
.555	5.84	2.50
.605	4.51	1.96
.655	3.55	1.58
.705	2.85	1.27

טבלה 2: המתח המרבי של מעגל ה-LC הקולט כפונקציה של הערך ההופכי של המרחק בין מרכזי הסלילים. סליל המקור הוא בעל 500 כריכות ואורך של 15 cm. ($R = 0.0225$ m).



תרשים 8: המתח המרבי של המעגל הקולט (LC) כפונקציה של ההופכי של $(R^2 + x^2)^{1.5}$, כאשר x הוא המרחק בין מרכזי הסלילים ו-R הוא רדיוס הסלילים (סליל המקור הוא בעל 500 ליפופים ואורך של 15cm).

3. סיכום

במאמר זה הצגנו מערך המייצר ומשדר פולסים של אנרגיה אלקטרומגנטית למעגל LC. ניתחנו תופעות שונות בצורות שונות בעזרת מדידת התדירות של הפולסים המשודרים