



## הקריה למחקר גרעיני שטח פיתוח הנדסי

מערכת חד ערוצית - חלק א'  
ריסון תנודות אקטיבי באמצעות חוק משוב PD

ע. בראונשטיין  
קריה למחקר גרעיני

א. מנור  
קריה למחקר גרעיני

א. שפיר  
קריה למחקר גרעיני

א. כוכבי  
קריה למחקר גרעיני  
ג. רודנאי  
קריה למחקר גרעיני

ז. ברנד  
קריה למחקר גרעיני  
אוניברסיטת בן גוריון בנגב  
א. ניזרי  
קריה למחקר גרעיני  
א. לוינשטיין  
קריה למחקר גרעיני

פברואר 2009



## ריסון תנודות אקטיבי באמצעות חוק משוב PD

ז. ברנד, א. שפיר, ע. בראונשטיין, א. ניזרי, א. כוכבי, א. מנור, א. לוינשטיין, ג. רודנאי

### תקציר

במערכות מכאניות רבות דרוש להגן על המערכת מפני תנודות עצמיות או מהסביבה. הפתרון הנפוץ ביותר הוא תליית המערכת על מרסנים וקפיצים המתוכננים בשיטות מתורת התנודות. לחליפין, ניתן להתבסס על רכיבים אקטיביים כגון מיסוב מגנטי אקטיבי (ממ"א) וחיישני מיקום ואז ניתן לתכנן את המערכת באמצעות כלים מתורת הבקרה ובאופן זה לקבל ביצועים וגמישות משופרים. במסגרת המחקר בנושא זה בקמ"ג ובאב"ג, תוכננה מערכת חד ערוצית הכוללת מוט וליבה הנעה בין שני אלקטרו-מגנטים, כצעד ראשון לקראת פיתוח בעתיד של מערכות מורכבות יותר. מפיתוח משוואות התנועה של המערכת החד ערוצית מתקבל מודל לא ליניארי שאינו יציב. בספרות קיימות שלוש גישות מרכזיות ליישום חוקי בקרת משוב לריסון תנודות עבור מודלים מסוג זה. גישה ראשונה היא תכנון חוק בקרה ליניארי (כגון: PID ורשתות קידום פיגור) על בסיס מודל ליניארי מקורב למערכת. גישה שנייה היא ליניאריזציה משוב (feedback linearization) וגישה שלישית היא שימוש בטכניקות חסינות לאי וודאות כגון  $H_\infty$ . דוח זה מתאר את הגישה הראשונה לריסון תנודות אקטיבי במערכת החד-ערוצית באמצעות חוק בקרת משוב מסוג PD ו-PID. הדוח כולל פיתוח מודל דינאמי למערכת הניסוי, פיתוח חוקי בקרת משוב, סימולציה וניסויים. חוקי הבקרה שתוכננו עמדו בהצלחה רבה בדרישות הדינאמיות שהוגדרו ואף אומתו לתוצאות סימולציה. דוח נוסף במסגרת עבודה זו יעסוק בגישה השנייה והגישה השלישית תיחקר במסגרת ות"ת בשנת 2009.

### מילות מפתח:

מיסוב מגנטי אקטיבי, בקר PD, בקר PID, רוטור, סטטור, אלקטרו-מגנט

#### מאשרים:

שם: ע. ענתבי

תפקיד: רשפ"ה

תאריך: 12.11.08

שם: א. יהל

תפקיד: מנהל "אבני בניין"

תאריך: 22.11.08

#### בודק:

שם: א. כוכבי

תפקיד: ממ"ר שפ"ה

תאריך: 3/11/08



## תוכן עניינים

5.....	מבוא.....	1.
5.....	כללי.....	1.1
5.....	סקר ספרות ממ"א.....	1.2
8.....	מודל אלקטרומגנטי.....	1.3
12.....	מערך הניסוי.....	2.
15.....	תאור פעולת המערכת.....	2.1
16.....	מודל דינאמי.....	3.
17.....	כוח מאלץ כהפרעה חיצונית.....	3.1
20.....	חוק בקרת משוב מסוג PD ו-PID.....	4.
22.....	פיתוח חוק בקרת משוב מסוג PD.....	4.1
22.....	בעיית שיווי משקל טבעית.....	4.1.1
23.....	בעיית שיווי משקל מאולצת.....	4.1.2
24.....	חוק בקרת משוב מסוג PID.....	4.2
24.....	הבדלים בין בקרת זרם לבקרת מתח.....	4.3
27.....	חישוב מקדמי חוקי בקרת משוב.....	5.
27.....	חוק בקרת משוב מסוג PD.....	5.1
29.....	עמידות להפרעה חיצונית של אקצסנטר.....	5.1.1
30.....	הדמיה של תגובת המערכת בחוג סגור.....	6.
35.....	תוצאות ניסוי והשוואה לסימולציה.....	7.
35.....	בקרת PD.....	7.1
38.....	בקרת PID.....	7.2
41.....	סיכום ומסקנות.....	8.
42.....	סימוכין.....	9.
44.....	אלקטרומגנט.....	נספח א'
46.....	חיישן קיבולי.....	נספח ב'
48.....	מגבר זרם.....	נספח ג'
52.....	טבלת אפליקציות בשלבי הניסוי.....	נספח ד'



## קבועים וסימנים

מטען	Q	תדר [Hz]	f
התנגדות אומית	R	תדירות זוויתית	$\omega$
קיבול	C	מסה	m
מתח ע"פ קבל	$V_c$	אורך	l
התנגדות מגנטית	$R_L$	מסה	m
שטף מגנטי [Wb]	$\phi$	התנגדות אומית סגולית	r
מקדם גזירה של טימושנקו	$\kappa$	מרווח אוויר בין רוטור למסב	s
צפיפות	$\rho$	זמן	t
זרם bias	$i_{bias}$	מקדם אלקטרומגנט	c
נקודת שיווי משקל	$x_{ep}$	קואורדינאטה	x, y, z
זווית עיבור הזיחה	$\gamma$	שטח חתך	A
מספר כריכות	n	שטח חתך במרווח אוויר	$A_s$
זווית הכיפוף	$\varphi$	צפיפות שטף מגנטי [Tesla]	B
מקדם שטף מגנטי (פרמביליות)	$\mu$	מודול אלסטיות	E
[Vs/Am]		עוצמת שדה חשמלי	E
מהירות זוויתית	$\omega$	מודול גזירה	G
קואורדינאטה	$\xi$	שדה מגנטי [Amp/m]	H
זרם דרך מיסב 1	$I_1$	מומנט התמד של שטח החתך, זרם	I
זרם דרך מיסב 2	$I_2$	[Amp]	
<b>סימון תחתי</b>		מומנט התמד של מסה	J
תדר עצמי	n	קבוע קפיץ	K
נגזרת לפי הזמן	t	השראות עצמית	L
נגזרת לפי המקום	x	מומנט	M
אותיות דקות - סקלר		מספר כריכות	N
אותיות עבות - וקטור או מטריצה		הגבר בחוג פתוח	$A_{ol}$
		מקדם שטף חשמלי [C/Vm]	$\epsilon$



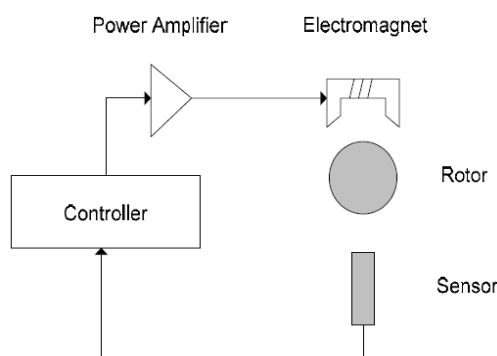
## **1. מבוא**

### **1.1. כללי**

מיסב מגנטי אקטיבי (ממ"א) תופס נתח הולך וגדל מעולם המסבים על חשבון מיסב גלגול ומסבים הידראוליים. יכולת המיסוב מושגת בממ"א על-ידי שימוש בשדה מגנטי בו צף הרוטור. הממ"א הינו התקן אקטיבי. דהיינו, נדרשת בקרה בחוג סגור על-מנת לשמור על יציבותו. יתרונותיו של הממ"א רבים. בראש ובראשונה מדובר בהתקן בעל אורך חיים גדול, שכן אין חיכוך ובלאי בין החלקים הסטטי והדינאמי. ניתן להגיע, אודות לכך, למהירויות הפעלה גבוהות יותר ממיסב חיכוך רגיל ובדרך-כלל המגבלה על המהירות היא מגבלת חוזק החומר ממנו בנוי הרוטור. מאותה סיבה, צריכת האנרגיה של הרוטור נמוכה. הממ"א מאפשר עבודה בתנאי חום ולחץ קיצוניים ואינו דורש שימון. מכיוון שחלק אינטגרלי של מערכת הממ"א הוא חישן קרבה, יש למערכת יכולת בקרה על רעידות הרוטור ויכולות מדידה ואפיון אינטגרליים. החסרונות העיקריים של הממ"א, הם עלות גבוהה, מימדים גדולים יחסית למיסוב מכאני, חוסר יציבות בחוג פתוח ומורכבות יחסית. לאור היתרונות הרבים משמש הממ"א במערכות מורכבות, בהן נדרשים ביצועים מעולים. בתוך מגוון היישומים הרחב של מערכות עם מיסוב מגנטי אקטיבי ניתן למנות מערכות שינוע מהירות, כגון רכבות [4], בידוד מפני רעידות, אגירת אנרגיה קינטית [31] ומערכות סובבות במהירויות גבוהות כגון משאבות טורבו-מולקולאריות [6]. מטרת שלב זה בפרויקט הוא הקטנת פערי הידע ואי-הוודאות הקיימים במערכת רב-ערוצית הדרושה למיסוב מגנטי. לצורך כך, פותחה מערכת מכאנית חד-ערוצית הכוללת ממ"א [4,28]. בפרק הראשון מוסבר עקרון הפעולה של מיסוב מגנטי אקטיבי באופן כללי, וכן רקע הכרחי באלקטרומגנטיות. בפרק 2 מוצג מערך הניסוי ועקרון פעולת מערכת הניסוי שפותחה ומטרתה. בפרק 3 מוצג מודל אנליטי למערכת. בפרק 4 מוצגים השלבים בפיתוח חוק הבקרה המתמטי. בפרק 5 מוצג חישוב למציאת מקדמי בקר PD. בפרק 6 מוצגת הדמיה בחוג סגור למערכת הניסוי כולל חוק בקרת משוב לריסון התנודות. בפרק 7 מוצגות תוצאות הניסוי והשוואה לסימולציה.

### **1.2. סקר ספרות ממ"א**

מיסוב מגנטי אקטיבי (להלן ממ"א), הוא מתקן המבוקר אלקטרומגנטי אשר שומר על החלק הסובב של המכונה (רוטור) במקום מסוים ביחס לחלק הנייח (סטטור) [10]. למעשה ממ"א הוא העיקרון בו משתמשים בד"כ במתלים מגנטיים. איור 1 מסביר את הרכיבים והפונקציות השונות של מיסב פשוט. כוחות המשיכה המגנטיים המשפיעים על הרוטור מהצד של האלקטרומגנט מבוקרים באמצעות מערכת בקרה אלקטרונית. לכן ממ"א מורכב משני חלקים עיקריים: החלק האלקטרו מכאני או המיסב ומערכת הבקרה האלקטרונית.

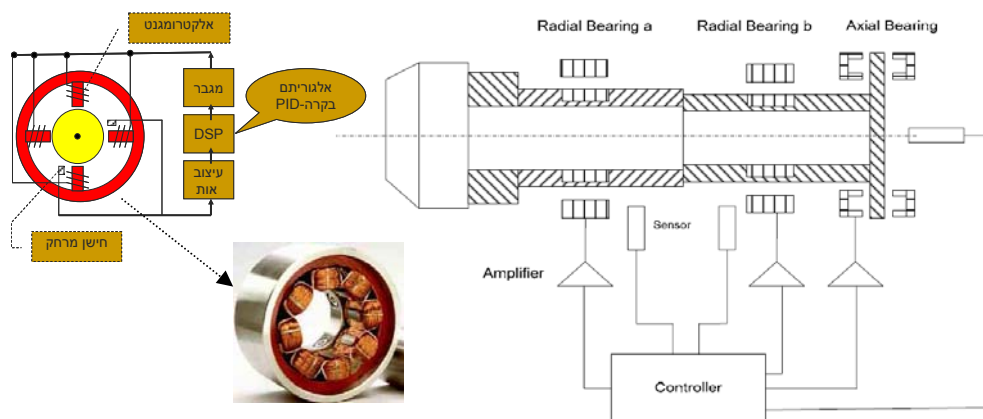


**איור 1 העיקרון הפונקציונאלי של מערכת ממ"א**

המיסב כולל את הרוטור התלוי בשדה המגנטי, האלקטרומגנטים וחיישני מיקום ממוקמים על הסטטור [10-17]. באיור 1 ניתן לראות שחיישני המיקום מודדים את התזוזות של הרוטור ממקומו היחסי, מיקרופרוססור המשמש כבקר, מעבד את המדידות לאותות בקרה שמומרים באמצעות מגבר הספק לזרם בקרה. זרם הבקרה מייצר את הכוחות המגנטיים ששומרים את הרוטור במיקום הנדרש. חוק הבקרה וגם הקשיחות והריסון של המתלים אחראים ליציבות של בקרת המיקום.

את הקשיחות והריסון של הממ"א ניתן לשנות באופן נרחב במסגרת המגבלות הפיסיקליות ולכוונם לפי הדרישות הטכניות. ניתן לבצע את השינויים גם בזמן פעולה.

רוטור אמיתי צריך מספר מגנטים, באיור 2 ניתן לראות מספר מגנטים המחוברים אחד לשני באמצעות בקר רב-משתנים.



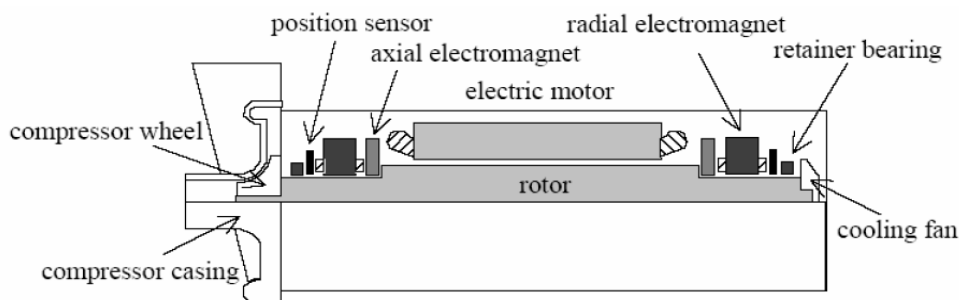
**איור 2 דיאגרמת בלוקים למתלה של רוטור**

המערכת הראשונה עם מתלה מגנטי אקטיבי נוצרה בשנות ה-40 על-ידי בימס [18]. בימס הרחיף כדורי פלדה קטנים בוואקום וסובב אותם במהירויות של מאות אלפים סיבובים לשנייה כדי להשיג מאמצים צנטריפוגליים גבוהים. מסבים מגנטים מסוגלים לפעול בוואקום, הפסדי החיכוך שלהם קטנים מאוד, הם פועלים ללא רעידות ולמעשה הם אינם זקוקים כלל לתחזוקה. תכונות אלו הופכות אותם למתאימים במערכות לאגירת אנרגיה של גלגלי תנופה, מערכות ייצוב ללוויינים ויישומים דומים אחרים [19,20].

תחום יישום נרחב נוסף לטכנולוגיית ממ"א הוא במדחסים כבדים וטורבינות. ביישומים אלו היתרונות הגדולים ביותר של ממ"א הם פעולה ללא שמן (מניעת סיכוני שרפות וזיהום), בקרת דינאמיקת מנוע טובה יותר ותחזוקה נמוכה. בעזרת טכנולוגיית ממ"א וללא כל ציוד נוסף ניתן לנטר רעידות כתוצאה מחוסר איזון של המנוע וכוחות של המדחס. בעזרת מידע זה ניתן לוודא פעולה בטוחה ולהעריך את הצורך בתחזוקה.



טכנולוגית ממ"א יושמה גם באפליקציות רבות אחרות כמו: משאבות טורבו-מולקולאריות, בולמי רעידות לטורבו-גנראטורים גדולים, מדחסי טורבו למהירויות גבוהות, מנועי טורבינת גז של מטוסים ומשאבות טורבו למנועים של טילים.



**איור 3 תרשים של מדחס טורבו למהירויות גבוהות**

היתרונות הרבים של ממ"א הם תוצאה של שני מאפיינים עיקריים: חוסר מגע בין החלקים הנעים לחלקים הנייחים במכונה ונוכחות של מערכת בקרה אלקטרונית.

תוצאה	יתרון
<b>חוסר במגע מכאני</b>	
זמן פעולה בלתי מוגבל, ירידה בעלויות תחזוקה ושירות, אין צורך במערכות שימון (משאבות, מסננים וכו') ופעולות מקדימות לפני הרצה.	חוסר בבלאי.
מכונות קומפקטיות יותר, טכנולוגיות למהירויות גבוהות.	מהירויות סיבוב גבוהות.
חיסכון באנרגיה, זיהום אוויר נמוך, חיכוך נמוך.	חיסכון באנרגיה.
עבודה בוואקום, עבודה בתחום טמפרטורות קיצוניות, עבודה בתנאי קרינה, עבודה בסביבה תוקפנית.	פעולה בתחום נרחב.
לא רגיש לזיהומים.	מרווח אוויר גדול.

<b>נוכחות של מערכת בקרה אלקטרונית</b>	
יכולת ליצור ולשלוט על תזוזות עדינות של הרוטור במרווח האוויר, חוסר איזון בסיבוב הרוטור, יכולת ריסון של רעידות לא רצויות, וודאות גבוהה של מיקום, התגברות פשוטה על תדרים קריטיים.	בקרה על מיקום ציר הרוטור.
חוסר רעש ורעידות, בקרה על מהירות הסיבוב, בחינת העומסים על המיסב.	בקרה ושליטה על הריסון והקשיחות של המתלים.
בחינה של מיקום הרוטור ובחינה של איזון הרוטור.	יכולת שימוש באות מהחישנים עבור בקרה של תהליכים.



החסרונות של ממ"א הם בעיקר: צורך במקור אנרגיה חיצוני, מורכבות של מערכת הבקרה האלקטרונית, יכולת עמידה בעומסים נמוכים יחסית ועלות גבוהה יחסית.

הקשר בין כוח, זרם ומרווח האוויר במסבים המגנטיים אינו ליניארי (הכוחות האלקטרומגנטיים שנוצרים על-ידי הממ"א פרופורציוניים לריבוע הזרם שבסלילים ולהופכי של ריבוע המרחק בין הרוטור לסטטור) ולכן קיימות דרישות מיוחדות מטכניקות הבקרה של ממ"א. הטכנולוגיות הקיימות כיום במסבים מגנטיים רבים, מגבילות את התנועה של הרוטור לתחום צר בשדה המגנטי סביב נקודת פעולה נומינאלית. האסטרטגיות של הבקרה הליניארית מבוססות על פיתוח טור טיילור של הכוח המפולג הלא-ליניארי סביב נקודה נומינאלית זו.

יכולת העקיבה של הבקרה הליניארית מדרדרת במהירות ככל שהסטייה מהנקודה הנומינאלית גדלה. בספרות מדווח על שתי גישות קיימות לטיפול בבעיה של תלות הביצועים של מערכת הבקרה בנקודת הפעולה הנומינאלית. גישה אחת [21] היא ביצוע ליניאריזציה רציפה של הקשרים הלא ליניאריים בין הכוח, זרם ומרווח האוויר בנקודות פעולה שונות באמצעות בקר מתאים שתוכנת עבור כל אחד מנקודות פעולה אלו. גישה שנייה [22] היא ליניאריזציית משוב. גישה זו מנצלת את התיאור השלם של אי הליניאריות של השדה האלקטרומגנטי כדי להפיק ביצועים בלתי תלויים בנקודות הפעולה. גישה זו נחקרה רבות במהלך השנים האחרונות וקיימים מספר רב של פרסומים בנושא [23-25], בנוסף גישה זו יושמה בצורה טובה במערכות לבקרת טיסה. אולם, חיסרון גדול בשיטה זו הוא הרגישות לאי וודאויות במערכת. לכן, בתקופה האחרונה מיושמת גישה חדשה בתחום הממ"א, בנוסף לשתי הגישות הקיימות, המבוססת על תכנון בקרה רובוטי, כגון: בקרת  $H_\infty$  [26].

### 1.3. מודל אלקטרומגנטי

מיסבים מגנטיים אקטיביים מתחלקים לשני סוגים עיקריים, בהתאם לסוג הכוח המגנטי הפועל בהם. בסוג הראשון פועל כוח על המוליך שזורם בו זרם חשמלי. המוליך מצוי בשדה מגנטי שנוצר בדרך כלל על-ידי מגנט קבוע. כוח זה פועל בניצב לקווי השטף, הוא יכול להיות כוח משיכה או דחייה, והוא נקרא כוח לורנץ. הסוג השני מבוסס על כוח הפועל בין שני משטחים של חומר פרומגנטי, אשר ביניהם מרווח עם פרמביליות קטנה, בד"כ אוויר. בתווך זה קיים שדה מגנטי וכוח השראות בין שני המשטחים תלוי בשינוי האנרגיה האצורה בשדה כפונקציה של המרווח. במקרה זה, הכוח פועל בניצב למשטחים והוא תמיד כוח משיכה. לכן, יש צורך בזוג מיסבים המותקנים בכיוונים מנוגדים, כך ניתן להפעיל כוח בכיוון כלשהו ע"י משיכה של אחד המיסבים. זוהי השיטה השכיחה יותר בממ"א ובה נתמקד.

עקרון הפעולה של המיסב האקטיבי הוא כוח משיכה בין שני חלקי המיסב – הרוטור והסטטור. על-ידי הזרמת זרם באלקטרומגנט מופעל כוח משיכה בין שני חלקי האלקטרומגנט – הנייח והנייד. בשיטה זו ניתן לבנות מיסב צירי, בו המשיכה היא בכיוון ציר הרוטור או מיסב רדיאלי, בו המשיכה היא בכיוון ניצב לציר הרוטור. מערכת זו אינה יציבה בחוג פתוח, ולכן חלק אינטגרלי של המיסב הוא חוג בקרה אשר מביא את המערכת בחוג סגור ליציבות. הכניסה של חוג הבקרה היא אות מחיישן קרבה (איור 2), והיציאה היא זרם לאלקטרומגנט.

השדה המגנטי נוצר בעקבות תנועת מטענים (זרם) או באמצעות מגנט קבוע. השדה המגנטי  $H$ , המתפתח סביב סליל בעל  $N$  כריכות הזורם בהם זרם  $I$  מחושב מתוך חוק אמפר (Ampere):

$$\oint Hdl = NI$$

משוואה 1

כאשר  $I$  מסלול הלולאה המגנטית.





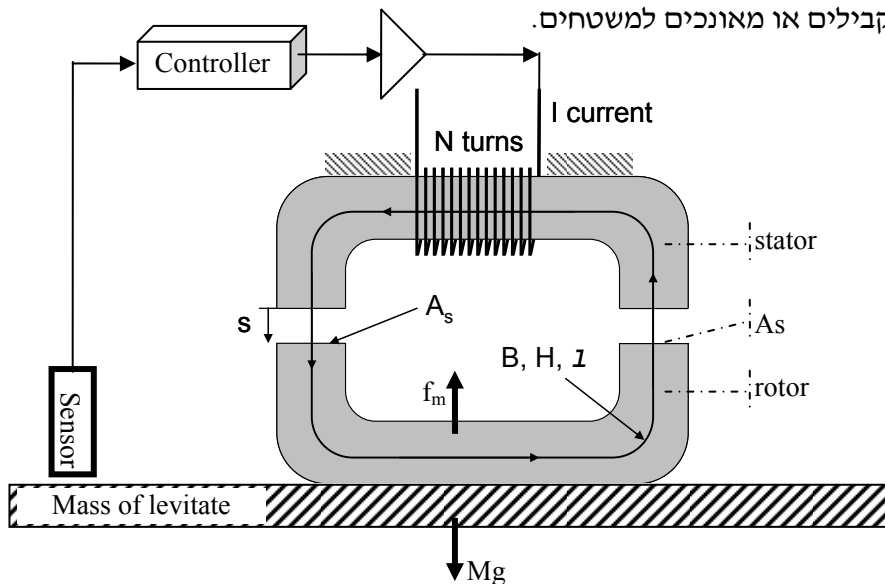
השדה המגנטי  $H$  אינו תלוי בחומר הנמצא סביב המוליך המשרה את השדה. הקשר בין השדה המגנטי לצפיפות השטף המגנטי  $B$  הוא

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad \text{משוואה 2}$$

כאשר  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  הוא מקדם פרמביליות בריק, ו- $\mu_r$  מקדם פרמביליות היחסית של החומר דרכו עוברים קווי השטף המגנטי. ערכו של  $\mu_r$  בואקום הוא 1 ובחומרים פרומגנטיים גדול בהרבה מאחד. השטף המגנטי  $\phi$  מוגדר כאינטגרל של צפיפות השטף המגנטי על פני שטח מסוים  $A$  על-ידי

$$\phi = \int_A B dA \quad \text{משוואה 3}$$

באיור 4 מתואר חתך אופייני של אלקטרומגנט פרסה. בגיאומטריה זו סביר להניח בקירוב שצפיפות השטף קבועה, ושקווי השטף תמיד מקבילים או מאונכים למשטחים.



איור 4 חתך אופייני של אלקטרומגנט

מתוך חוק אמפר מתקבל:

$$\oint H dl = H_{iron} l_{iron} + H_{gap} l_{gap} = H_{iron} l_{iron} + H_{gap} 2s \approx NI \quad \text{משוואה 4}$$

בהצבת משוואה 2 לתוך משוואה 4 ובהנחה כי צפיפות השטף נשמרת במעבר מהליבה לאוויר ( $B_i = B_s$ ), מתקבל:

$$l_{iron} \frac{B}{\mu_0 \mu_r} + 2s \frac{B}{\mu_0} = NI \quad \text{משוואה 5}$$

פתרון משוואה 5 עבור צפיפות השטף המגנטי  $B$ , מניב:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\left( \frac{l_{iron}}{\mu_r} + 2s \right)} \quad \text{משוואה 6}$$

אם  $\mu_r \gg 1$  ניתן להזניח את השפעת הליבה. במקרה זה



$$B = \mu_0 \frac{NI}{2s}$$

משוואה 7

ההשראות  $L$  במסלול המגנטי היא היחס בין השטף המגנטי  $\phi$  הנוצר על-ידי כריכה אחת בסליל לזרם הזורם בה  $i$ . סכום השטף המגנטי  $\phi$  הינו:

$$L = \frac{n\phi}{i}$$

משוואה 8

ע"י הצבת שטף מגנטי השווה לצפיפות השטף המגנטי  $B$  ממשוואה 7 כפול השטח היעיל של מרווח האוויר  $A_s$  במשוואה 8, נקבל את ההשראות  $L$ :

$$L = n^2 \mu_0 A_s \frac{1}{2s}$$

משוואה 9

על-פי חוק פרדיי (Faraday), על פני מוליך הנמצא בשדה מגנטי משתנה מתפתח מתח מושרה  $v$ :

$$v = N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

משוואה 10

כאמור, במיסבים המבוססים על כוח השראות, מחושב הכוח הפועל באלקטרומגנט על-ידי השינוי לפי המרחק של האנרגיה האצורה בהתקן:

$$f_m = -\frac{dW_m}{ds} = -\frac{d(\phi^2 R_L(s)/2)}{ds}$$

משוואה 11

כאשר  $R_L$  ההתנגדות מגנטית (reluctance) של המעגל המגנטי. עבור אלקטרומגנט כמתואר באיור 4, עיקר ההתנגדות היא של מרווחי האוויר והביטוי עבורה הוא:

$$R_L = \frac{l}{\mu A} = \frac{2s}{\mu_0 A_s}$$

משוואה 12

לפיכך מתקבל עבור הכוח:

$$|f_m| = \frac{\mu_0 (NI)^2 A_s}{4s^2} = \frac{B_s^2 A_s}{\mu_0} = c \frac{i^2}{s^2}$$

משוואה 13

$$c = \frac{1}{4} \mu_0 n^2 A_s$$

הכוח הפועל על-ידי האלקטרומגנט הוא ביחס ישר לריבוע סך הזרם העובר בכריכותיו וביחס הפוך לריבוע המרווח. כאשר לא מזניחים את התנגדות הברזל לשטף המגנטי, מתקבל הביטוי הבא עבור הכוח:

$$|f_m| = \mu_0 \left( \frac{NI}{2s + l_{iron}/\mu_r} \right)^2 A_s$$

משוואה 14

נגזרת הכוח לפי הזמן:



$$\frac{df_m}{dt} = \frac{2\mu_0 N^2 I A_s}{4s^2} \frac{dI}{dt} - \frac{2\mu_0 (NI)^2 A_s}{4s^3} \frac{ds}{dt}$$

משוואה 15

מתוך חוק אום וחוק פרדיי, המתח על הסליל:

$$\begin{aligned} V_{coil} &= N \frac{d\phi}{dt} + RI = N \frac{d(LI/N)}{dt} + RI = \\ &= L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} + RI = L \frac{dI}{dt} - I \frac{L}{s} \frac{ds}{dt} + RI \end{aligned}$$

משוואה 16

מכאן,

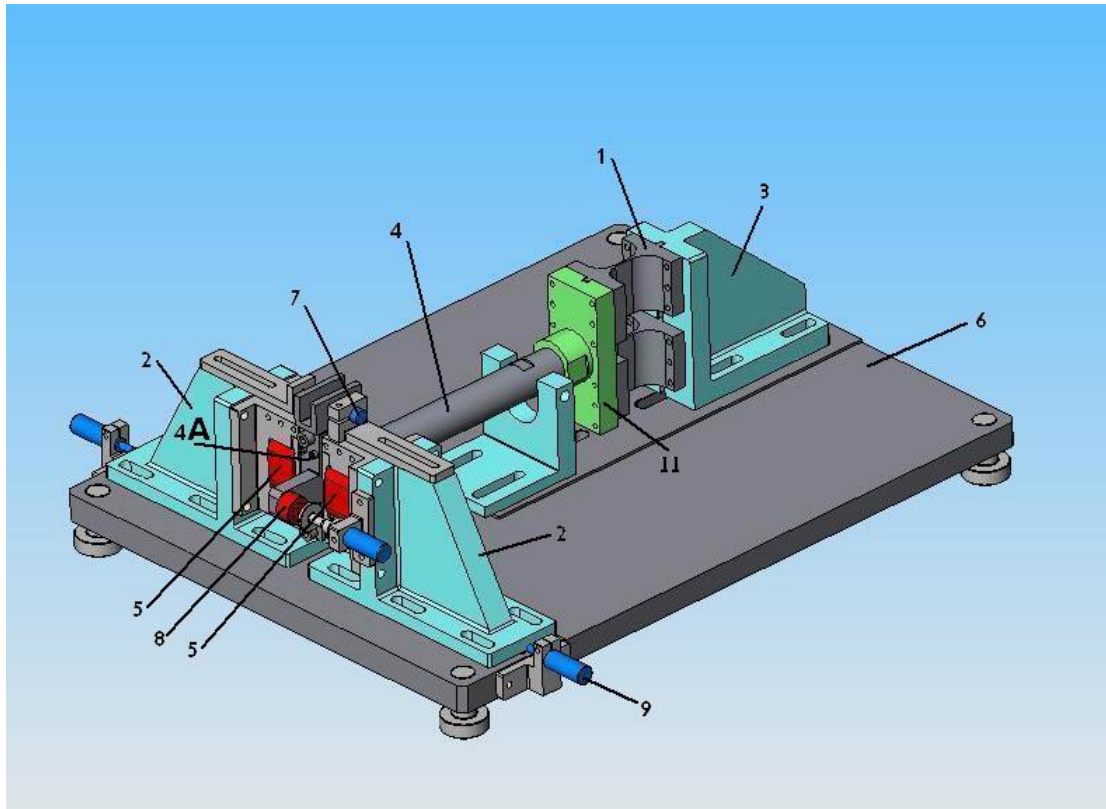
$$\frac{df_m}{dt} = (V_{coil} - RI) \frac{I}{s}$$

משוואה 17



## 2. מערך הניסוי

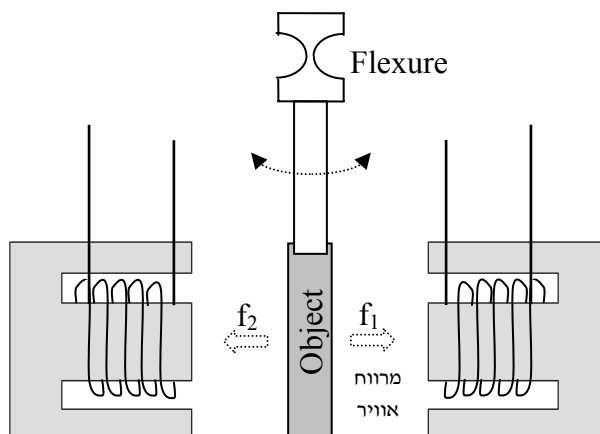
מערך הניסוי כולל את מתקן הניסוי, מערכת שליטה, מערכת איסוף נתונים, מערכת המדידה ומגברי הזרם. מתקן הניסוי מתואר באיור 5. המתקן מורכב משישה חלקים עיקריים: ציר גמיש (1), מוט וליבה נעה (4 ו-4A), עמודים לקיבוע האלקטרומגנטים (2), עמוד לקיבוע הציר הגמיש (3), אלקטרו-מגנטים (5) ובסיס (6).



איור 5 מערכת ניסויית מיסוב מגנטי חד ערוצי.

הציר הגמיש (גמישון) מהווה את ציר הסיבוב של המוט והליבה הנעה. המבנה הגיאומטרי של הגמישון מאפשר תנועה מישורית בלבד במקביל לבסיס. המוט והליבה הנעה מקושרים לגמישון באמצעות מתאם (11) המחובר מצידו האחד בברגים לגמישון ומצידו השני בהברגה נקבית לבסיס המוט. המוט הינו צינור בעל קשיחות גבוהה, משקל נמוך (המשקל השקול של המוט והליבה הנעה הינו:  $0.486\text{Kg}$ ) ואורך גדול יחסית למרווח, כך שתנועת העתקה של הליבה תהיה, בקירוב טוב, קווית. התדר הקשיח של המוט עם הליבה והגמישון הוא כ-8Hz והתדרים האלסטיים מעל 500Hz (על-מנת למנוע עירור של התדרים האלסטיים מערכת הבקרה תוכננה לתחום תדר של עד 80Hz, פרטים נוספים יובאו בהמשך).

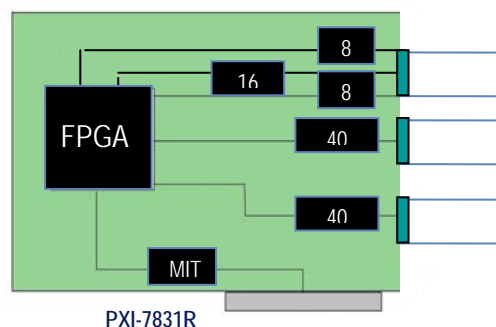
כל אלקטרומגנט מורכב מליבת שכבות סטנדרטית במבנה E, העשויה פלדת סיליקון, וסליל סביב הקוטב האמצעי. מבנה השכבות נועד להקטנת הפסדים הנובעים מזרמי מערבולת. בין שני האלקטרו מגנטים ממוקמת ליבה במבנה I כך שקיים בינה לבין כל אלקטרו מגנט מרווח אוויר קטן (ראה איור 6). פירוט נוסף ראה נספח א'. ליבת ה-I חופשית לנוע בדרגת חופש אחת של העתקה קווית בלבד בין שני האלקטרומגנטים. כיוון המרווח בין פני הליבה הנעה ופני האלקטרומגנטים מתבצע בעזרת 2 המיקרומטרים (9) ומדיד מרווח. פירוט מלא על כל רכיבי המתקן ראה [28].



איור 6 תיאור סכימטי שילוב ציר גמיש במערכת ממ"א חד-ערוצית

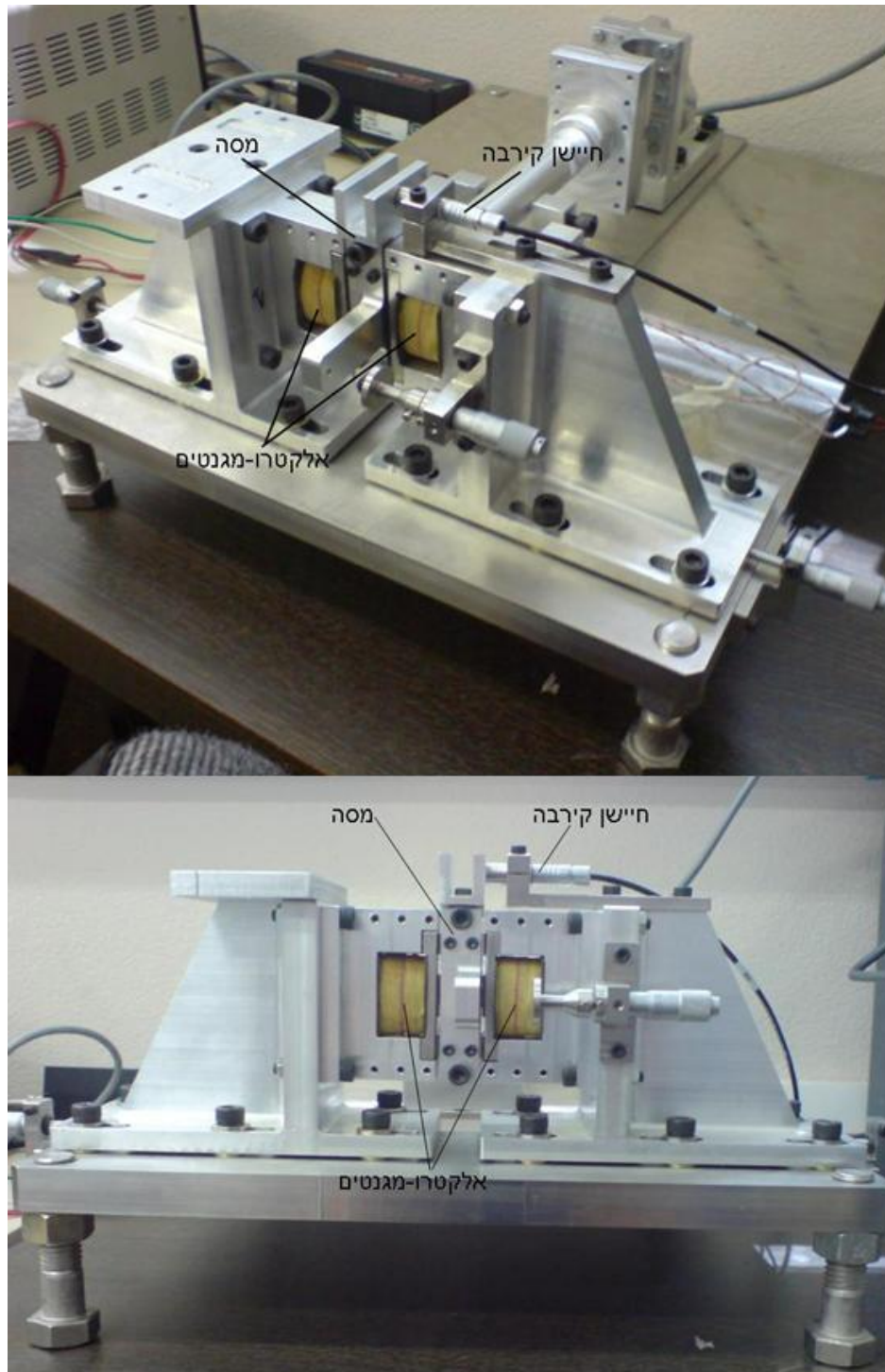
עוצמת הזרם באלקטרומגנטים בכל רגע נתון, לצורך ריסון הליבה הנעה, נקבעת באמצעות מערכת השליטה. מערכת השליטה (איור 7) מבוססת על בקר זמן אמת (Real Time) מסוג PXI ומתוצרת National Instrument. הבקר בעל התונים הבאים:

- RT reconfigurable control system
- PXI – 7831R FPGA
- קצב דגימה של 1Mhz DAC ,200K sample/sec ADC
- 96 ערוצי כניסה/יציאה דיגיטאלית (multi purpose).
- שמונה ערוצי יציאה אנלוגיים.
- שמונה ערוצי כניסה אנלוגיים.
- ממשק בארכיטקטורה פתוחה LabView.



איור 7 בקר PXI 7831 WITH NI-PXI-8187

למערכת השליטה תפקיד נוסף של איסוף נתונים לצורכי אימות ועיבוד תוצאות. ריסון אקטיבי של הליבה הנעה מבוסס על מדידת תזוזתה בכל רגע נתון. מדידת התזוזה נעשית באמצעות חיישן קיבולי (איור 8) תוצרת micro epsilon דגם 6100 capaNCDD סוג S600-0.5. לפירוט נוסף על החיישן ראה נספח ב'.



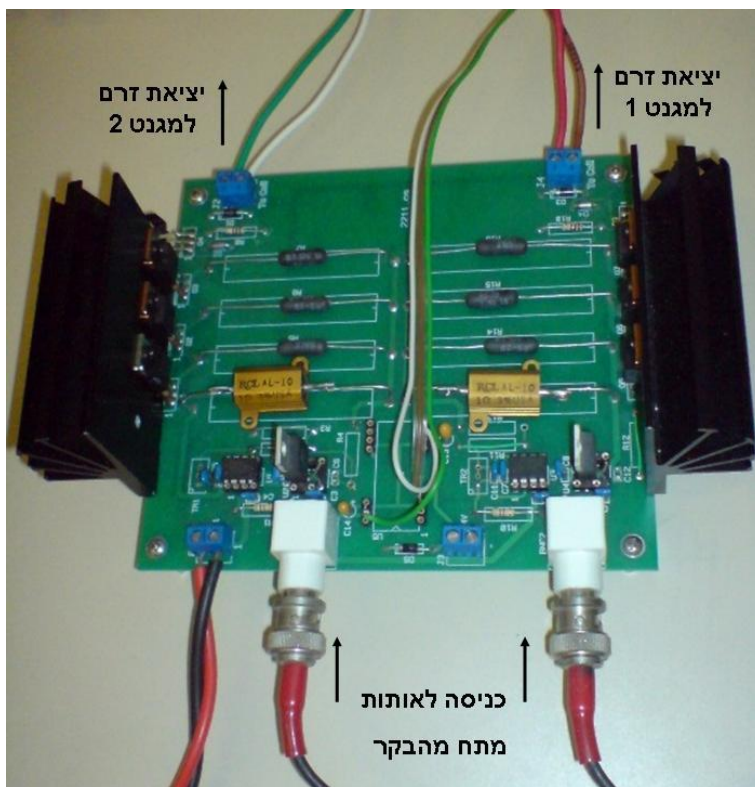
איור 8 צילום של מערכת הניסויית

הספקי היציאה של אותות מערכת השליטה נמוכים מדי ליצירת כוחות מגנטים לריסון הליבה הנעה, לפיכך, משתמשים ביחידות הספק. בעבודה זאת נעשה שימוש במגברי זרם (תוצרת בימ"מ/קמ"ג), ראה איור 9. המגבר נדרש לספק זרם חד-קוטבי אבל עם יכולת לספק מתח דו-קוטבי לסליל וזאת על מנת לאפשר דעיכה מהירה של הזרם בסליל (נגזרת שלילית של הזרם). בנוסף על מנת להפחית מקורות רעש חשמלי במערכת הניסוי ישנה העדפה לשימוש במגבר זרם ליניארי על פני שימוש במגבר ממותג.





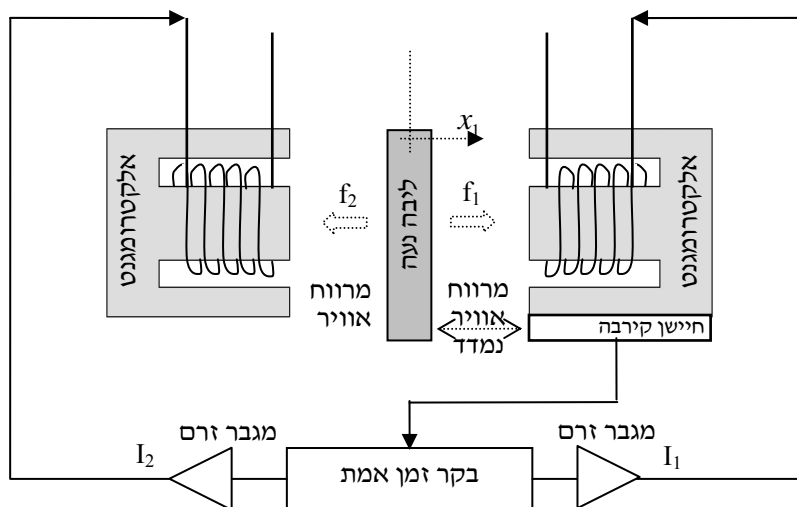
המגבר שתוכנן הוא מגבר זרם ליניארי מבוקר מתח המבקר את הזרם בסליל לפי המתח במבוא. נגד בערך של  $1\Omega$  משמש לחישה הזרם בסליל והמתח המתפתח עליו עובר כאות משוב למבוא השלילי של מגבר השרת. מגבר השרת משנה את מתח המוצא כך שיתקבל הזרם הרצוי בסליל. לפירוט נוסף על החיפושן ראה נספח ג'.



איור 9 צילום מגבר זרם דו ערוצי

## 2.1 תאור פעולת המערכת

הליבה הנעה חופשית לנוע בתחום של  $600\mu\text{m}$  בין שני האלקטרומגנטים. מיקום הליבה הנעה נמדד בכל רגע נתון ומועבר למערכת השליטה ואיסוף הנתונים. מערכת השליטה מבוססת על מערכת זמן אמת המחשבת בכל רגע נתון את עוצמת זרם האלקטרומגנטים הדרוש לעמוד בביצועים הדינאמיים הנדרשים (ראה פרק 4.1.1). מגברי הזרם משמשים להגברת הזרם הדרוש לאלקטרומגנטים. באיור 10 מתואר באופן סיכמתי מרכיבי המערכת העיקריים.



איור 10 תיאור סכימטי מערכת ממ"א חד-ערוצית



### 3. מודל דינאמי

מודל אנליטי למערכת המתוארת באיור 6 מתקבל על-ידי שימוש בחוק השני של ניוטון והנחת מודל גופים קשיחים, כדלקמן:

$$ma = \Sigma F = f_1 - f_2 - f_{flexure} \quad \text{משוואה 18}$$

כאשר,  $m$  היא ה"מסה השקולה" של המוט והליבה הנעה בקצה,  $f_{flexure}$  כוח הגמישות,  $f_1$  ו-  $f_2$  כוח מגנטי של אלקטרומגנט 1 ו-2 בהתאמה.

הכוח המחזיר מהגמישות  $f_{flexure}$  הוא פונקציה ליניארית של תזוזת הליבה הנעה,

$$f_{flexure} = k_{flexure} x_1$$

מתוך ידיעת התדירות הטבעית ( $\omega$ ) של המערכת ניתן לחשב את קבוע כוח הגמישות  $k_{flexure}$  על-ידי,

$$k_{flexure} = \omega^2 m = (2\pi \cdot 8.2)^2 \cdot 0.48 = 1272.8 \frac{N}{m}$$

בהתאם למשוואה 13 הכוח המגנטי המופעל על-ידי המיסב הוא ביחס ישר לריבוע הזרם הכולל העובר בכריכותיו וביחס הפוך לריבוע המרווח. נציב את משוואה 13 במשוואה 18,

$$\ddot{x}_1 = \frac{c}{m} \left( \frac{i_1^2}{(x_0 - x_1)^2} - \frac{i_2^2}{(x_0 + x_1)^2} \right) - \frac{k_{flexure}}{m} x_1 = f(x_1, i_1, i_2) \quad \text{משוואה 19}$$

כאשר  $x_1$  הוא המרווח בין הליבה הנעה לאלקטרומגנט, ראה איור 10.

משוואה 19 היא משוואה דיפרנציאלית רגילה לא ליניארית המתארת את דינאמיקת המערכת.

ללא אילוץ חיצוני ( $i_1=i_2=0$ ) משוואה 19 תהיה מהצורה:

$$\ddot{x}_1 + \frac{k_{flexure}}{m} x_1 = 0$$

נקבל שתגובת המערכת ללא אילוץ חיצוני ועבור תנאי התחלה  $x_1(0) = const = X_1$  ו-  $\dot{x}_1(0) = 0$ ,

$$x_1(t) = X_1 \sqrt{\frac{m}{k_{flexure}}} \sin \left( \sqrt{\frac{k_{flexure}}{m}} t \right)$$

התגובה שמתקבלת היא תגובה מחזורית (ללא ריסון) בתדירות של  $\omega = \sqrt{\frac{k_{flexure}}{m}}$  ובאמפליטודה של  $X_1 \sqrt{\frac{m}{k_{flexure}}}$ .

לפיכך המערכת (משוואה 19) מוגדרת כמערכת על סף יציבות.

כפי שנאמר, הליבה הנעה יכולה לנועה בתחום של  $\pm 300 \mu m$ , מעבר לכך, הליבה פוגעת באלקטרומגנט.





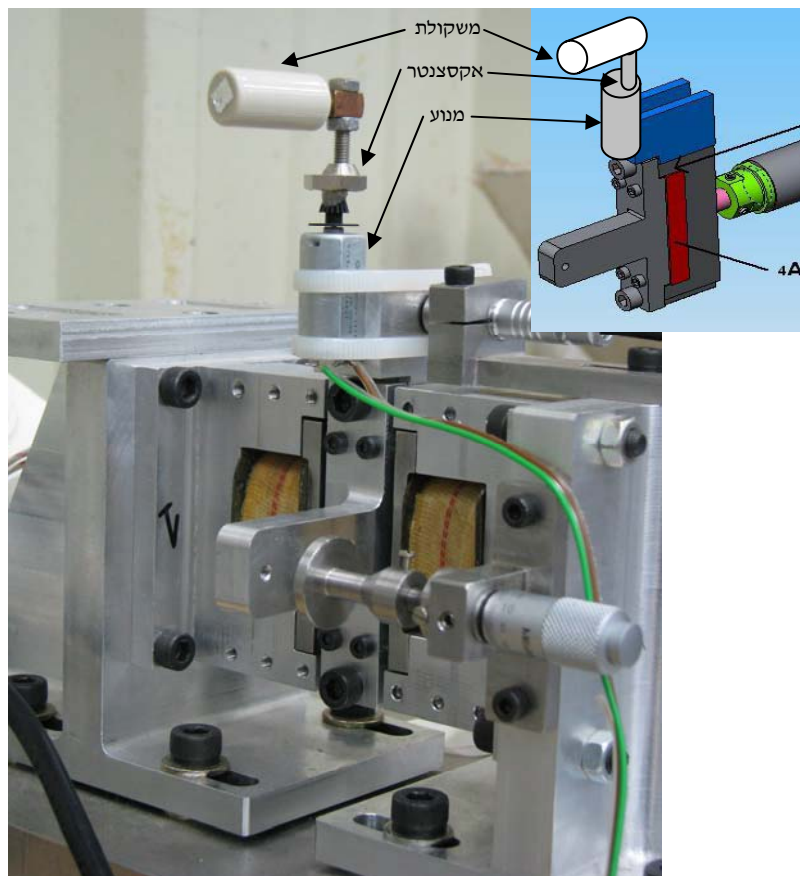
### 3.1 כוח מאלץ כהפרעה חיצונית

כחלק מהליך בדיקת ביצועי המערכת בחוג סגור שולבה אופציה לעירור חיצוני של המערכת באמצעות אקסצנטר הממוקם על הליבה הנעה (איור 11). האקסצנטר מפעיל כוח מאלץ  $f_e$  על הליבה הנעה. בהנחה של מסה מרוכזת הכוח המאלץ הוא פונקציה של משקל, מהירות סיבוב ואורך המשקולת

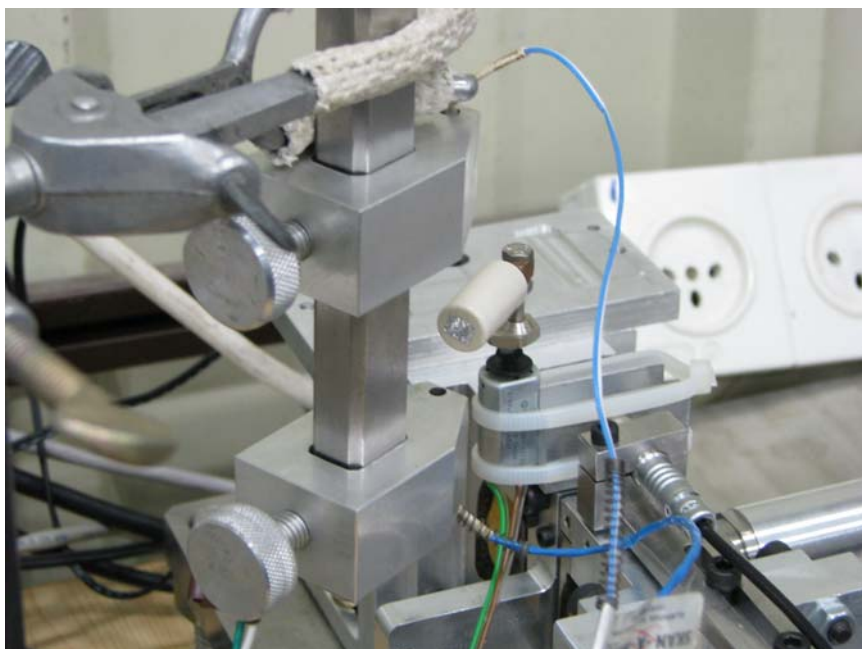
$$f_e = m_e \omega^2 r \quad \text{משוואה 20}$$

כאשר,  $m_e = 8gr$  מסת האקסצנטר,  $r = 3cm$  אורך האקסצנטר ו- $\omega$  מהירות סיבוב. סיבוב האקסצנטר מושג בעזרת מנוע לזרם ישר (מסת המנוע זניחה בהשוואה למסה השקולה של הליבה הנעה ולכן היא מוזנחת ממודל המערכת). מהירות המנוע כתלות במתח ההזנה כוילה באמצעות התקן מדידת מהירות סיבוב המבוסס על עקרון של פוטו-טרנזיסטור (ראה איור 12). אמצעי מדידה זה מפיק אות ריבועי שתדירותו שווה לתדר הסיבוב של המנוע (ראה איור 13). באיור 14 מתואר גרף כיול של מהירות סיבוב האקסצנטר כתלות במתח הזנה של המנוע. לאחר הוספת האקסצנטר מתווסף למודל המערכת (משוואה 19) הכוח המאלץ,

$$\ddot{x}_1 = \frac{c}{m} \left( \frac{i_1^2}{(x_0 - x_1)^2} - \frac{i_2^2}{(x_0 + x_1)^2} \right) - \frac{k_{flexure}}{m} x_1 + \frac{f_e}{m} \quad \text{משוואה 21}$$



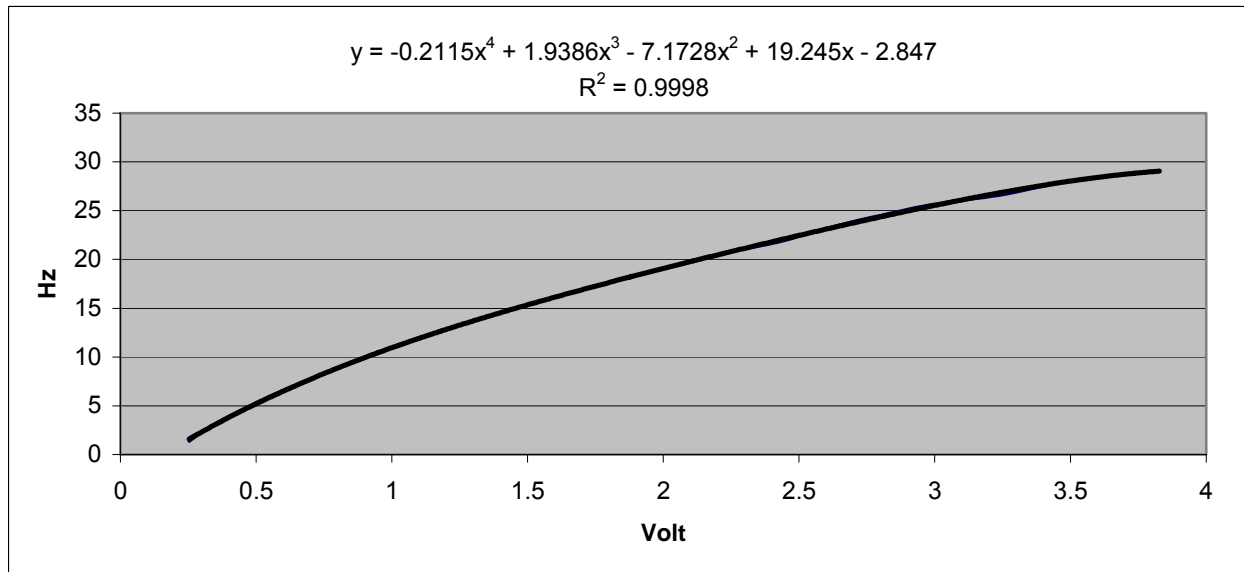
איור 11 אקסצנטר על גבי הליבה הנעה



איור 12 ניסוי כיוול מהירות כתלות במתח הזנה למנוע



איור 13 מדידת מהירות סיבוב באמצעות פוטו-טרנזיסטור



איור 14 גרף כיול מהירות סיבוב כתלות במתח הזנת המנוע



#### 4. חוק בקרת משוג מסוג PD ו-PID

כפי שצוין קודם, יכולת הריסון מושגת על-ידי ויסות הכוח המגנטי בהתאם למיקום ומהירות הליבה הנעה. הכוח המגנטי ניתן לשליטה באמצעות שינוי זרם (להלן - בקרת זרם) או מתח (להלן - בקרת מתח) הסליל של האלקטרומגנט. דיון בין ההבדלים ביניהם מופיע בהמשך. בעבודה זו השליטה בכוח המגנטי נעשה באמצעות בקרת זרם.

בפרק זה נעסוק בפיתוח חוק בקרת משוג מסוג PD לריסון תנודות אקטיבי של הליבה הנעה וחוק בקרת מיקום מסוג PID. חוקי בקרה אלה הינם ליניאריים ולכן ניתן לכיילם רק עבור מערכות המתוארות על ידי משוואות ליניאריות. המערכת שאנו דנים בה היא אינה ליניארית ולכן כשלב מקדים לפיתוח חוק הבקרה נבצע ליניאריזציה (משוואה 22) למודל המערכת (משוואה 19) סביב נקודת שיווי משקל  $x_{ep} = 0$  ובזרם  $i_1 = i_2 = i_b$ , על-בסיס המודל הליניארי נפתח את חוקי הבקרה מסוג PD ו-PID. ברור כי חוקי בקרה אלו תקפים רק סביב נקודת שיווי המשקל.

זרם ה-bias ניתן לחישוב בהתאם להפרעה המרבית ההתחלתית. למשל, עבור הפרעה מחזורית מהצורה

$$x(t) = X \sin(\omega t)$$

נדרש, באופן תיאורטי שינוי מרבי בכוח המגנטי של

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{\max} = mX\omega^3$$

מצד שני, נרשום את השינוי של הכוח המגנטי באופן הבא

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt}$$

השינוי בכוח המגנטי מושג על-ידי שינוי עוצמת הזרם  $\frac{di}{dt}$  באמצעות מערכת הבקרה. הנגזרת החלקית של הכוח בזרם מושגת באמצעות משוואה 13,

$$\frac{\partial f}{\partial i} = 2c \frac{i}{s^2}$$

כלומר, עבור זרם bias אפס השינוי בכוח יהיה אפס. מכאן אנו מסיקים שעבודה סביב זרם התחלתי אפס יגרום לכוח התחלתי אפס וכתוצאה מכך מערכת הבקרה לא תצליח לרסן את הליבה הנעה לפני מגע של הליבה הנעה באלקטרומגנט. לכן, נחשב את זרם ה-bias בהתאם לשינוי הכוח המרבי ההתחלתי העלול להיווצר במערכת, למשל עבור ההפרעה מחזורית, נדרש זרם bias של

$$i_b = \frac{mX\omega^3 s^2}{2c} \left( \frac{di}{dt} \right)^{-1}$$

כאשר,  $\frac{di}{dt}$  נקבע מתוך תחום התדר של המערכת בחוג סגור.



המעבר למודל מערכת ליניארי מקורב מבוסס על פיתוח טור טיילור של הכוח המפולג הלא-ליניארי סביב זרם bias ומיקום אפס של הליבה הנעה,

$$f(x_1, i_{c1}, i_{c2}) = f(x_{ep}, i_b) + \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_{ep}=0, i_1=i_2=i_b} (x_1 - x_{ep}) + \left. \frac{\partial f}{\partial i_1} \right|_{x_1=x_{ep}=0, i_1=i_2=i_b} (i_1 - i_b) + \left. \frac{\partial f}{\partial i_2} \right|_{x_1=x_{ep}=0, i_1=i_2=i_b} (i_2 - i_b) \quad \text{משוואה 22}$$

נגדיר:  $i_1 := i_b + i_c, i_2 := i_b - i_c$  כאשר  $i_c$  זרם הבקרה.

מכאן נקבל כי צד ימין של משוואה 19

$$f(x_1, i_{c1}, i_{c2}) = \left( 4c \frac{i_b^2}{x_0^3} - k_{flexure} \right) x + 4c \frac{i_b}{x_0^2} i_c$$

בהתאם לכך, המודל הליניארי יהיה,

$$m\ddot{x} - \left( 4c \frac{i_b^2}{x_0^3} - k_{flexure} \right) x = 4c \frac{i_b}{x_0^2} i_c \quad \text{משוואה 23}$$

נפשט את משוואה 23 באופן הבא:

$$m\ddot{x} - k_s x = k_i i_c \quad \text{משוואה 24}$$

מניתוח דינאמי מתקבל כי הקטבים של המערכת המתוארת במשוואה 23,

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\left( 4c \frac{i_b^2}{x_0^3} - k_{flexure} \right)}{m}}$$

קיימים שלושה פתרונות אפשריים למיקום קטבי המערכת (משוואה 23),

$$\text{פתרון ראשון: מערכת על סף יציבות, } \lambda_{1,2} = \pm jS, \text{ כאשר } 4c \frac{i_b^2}{x_0^3} < k_{flexure}$$

$$\text{פתרון שני: מערכת לא יציבה, } \lambda_{1,2} = 0, \text{ כאשר } 4c \frac{i_b^2}{x_0^3} = k_{flexure}$$

$$\text{פתרון שלישי: מערכת לא יציבה, } \lambda_{1,2} = \pm \sqrt{S}, \text{ כאשר } 4c \frac{i_b^2}{x_0^3} > k_{flexure}$$

היות וחוק הבקרה יתוכנן כך שתחום התדר של המערכת בחוג סגור יהיה גדול מ-80Hz המערכת תתאפיין על-ידי הפתרון השלישי, כמערכת לא יציבה בחוג פתוח.



#### 4.1. פיתוח חוק בקרת משוג מסוג PD

##### 4.1.1. בעיית שיווי משקל טבעית

נבחר חוק בקרת משוג במבנה של בקר מסוג PD. כלומר, אלגוריתם חוק הבקרה הוא פונקציה זרם האלקטרומוגנטים כתלות במרחק בין הליבה הנעה לאלקטרומוגנט ושל מהירות הליבה הנעה.

$$i(x, \dot{x}) = -\frac{(k + k_s)x + d\dot{x}}{k_i} \quad \text{משוואה 25}$$

כאשר,  $k$  ו- $d$  הם קבועי חוק בקרת משוג מסוג PD. נציב את חוק הבקרה (משוואה 25) בתוך המודל הדינאמי הליניארי (משוואה 24), נקבל את מודל המערכת בחוג סגור (משוואה 26),

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = 0 \quad \text{משוואה 26}$$

הפתרון של משוואה 26 הוא פונקציה מעריכית מהצורה  $x(t) = e^{\lambda t}$ . הערכים העצמיים של הפתרון מחושבים מתוך הפתרון של הפולינום האופייני של מערכת מסדר שני

$$m\lambda^2 + d\lambda + k = 0$$

אם הערכים העצמיים מצומדיים ובהכרח מרוכבים  $\lambda = -\sigma \pm j\omega_d$ . כאשר  $\omega_d$  תדר הריסון ו- $\sigma$  קבוע קצב הדעיכה. מפתרון המשוואה הדיפרנציאלית (משוואה 26) מתקבל,

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{d^2}{4m^2}} \quad \sigma = \frac{d}{2m} \quad \text{משוואה 27}$$

מכאן, הפתרון של משוואה 26 עבור ערכים עצמיים מרוכבים,

$$x(t) = Ce^{-\sigma t} \cos(\omega_d t - \varphi)$$

כלומר, מתוך משוואה 27 ניתן לחשב את קבוע הבקר  $d$  כאשר מגדירים את קצב הדעיכה  $\sigma$  ולאחר מכן לחשב את קבוע הבקר  $k$  על-ידי קביעת תדר הריסון  $\omega_d$  של המערכת בחוג סגור. כמובן, קצב דעיכה מהיר יגרום לתגובת יתר ראשונית, עד כדי למצב של התנגשות בין הליבה הנעה לאלקטרומוגנט.

כפי שנאמר, פונקציה הזרם (משוואה 25) היא בהתאם לבקר מסוג PD כאשר, החלק הפרופורציונאלי  $P = (k + k_s)/k_i$  והחלק הדיפרנציאלי  $D = d/k_i$ . החלק הפרופורציונאלי כולל פיצוי עבור הקשיחות השלילית  $k_s$  ממשוואה 24 ותוספת של קשיחות חיובית  $k$ .

הבחירה של הקשיחות  $k$  תלויה כמובן ביישום. בדרך כלל, הבחירה של הקשיחות תעשה בהתאם לכוח המרבי של המיסב ותחת הערכה של התזוזה המרבית של הליבה הנעה. נהוג להבדיל בשלוש בחירות של קשיחות:

##### • קשיחות מאוד נמוכה -

מוגדרת על-ידי בחירה של קשיחות  $k$  נמוכה מאוד בהשוואה לקשיחות של המערכת  $k_s$ . לפיכך, הקשיחות של חוק הבקרה הוא הסכום של  $k$  ו- $k_s$ . בחירה כזו תגרום לרגישות גבוהה מאוד של הערכים העצמיים בחוג סגור ביחס לקשיחות המערכת  $k_s$ . יתרה מכך, בגלל אי-וודאות שקיים ב- $k_s$  המערכת יכולה לצאת בקלות מיציבות.



• קשיחות גבוהה מאוד-

קשיחות גבוהה מאוד תאלץ כוח מגנטי גבוהה לשינויים קטנים של הליבה. הכוח המגנטי חסום עקב רוויה מגנטית של האלקטרומגנט ו/או על-ידי מגבר הזרם. מכיוון שכך המערכת סובלת מחוסר יציבות (destabilize). בנוסף, תחום תדר של המערכת בחוג סגור יהיה גדול, וכתוצאה מכך נכנסים רעשים למערכת המוגברים בצורה דרסטית על-ידי הקשיחות הגבוהה של חוק הבקרה.

• קשיחות "טבעית"-

קשיחות טבעית נקבעת כאשר בוחרים את הקשיחות  $k$  בהתאם לקשיחות השלילית של המערכת  $k_s$ . בחירה זו תגרום לערכים העצמיים של המערכת בחוג סגור להיות שווים לערכיים העצמיים של המערכת בחוג פתוח ( $\omega = \sqrt{k_s/m}$ ). בנוסף, הקשיחות הטבעית שווה לקשיחות האופטימאלית המתקבלת מאופטימיזציה למינימום אנרגיה על הכניסה ועל משתנה המצב.

4.1.2. בעיית שיווי משקל מאולצת

לעיתים במערכות מיסוב מגנטי אקטיבי עם בקר PD נדרש לשלוט על מיקום הליבה הנעה כלומר, לאלץ נקודת שיווי משקל חדשה – להלן אות ייחוס  $r$ . באיור 15 מתואר תרשים מלבנים של המערכת בחוג סגור הכולל: בקר PD, מגבר זרם, מודל המערכת ליניארי (משוואה 19) ואות ייחוס  $r$ . אות השגיאה  $e$  מוגדר כהפרש בין אות הייחוס  $r$  לבין אות המדידה  $y$  (מיקום הליבה הנעה).

$$e = r - y \quad \text{משוואה 28}$$

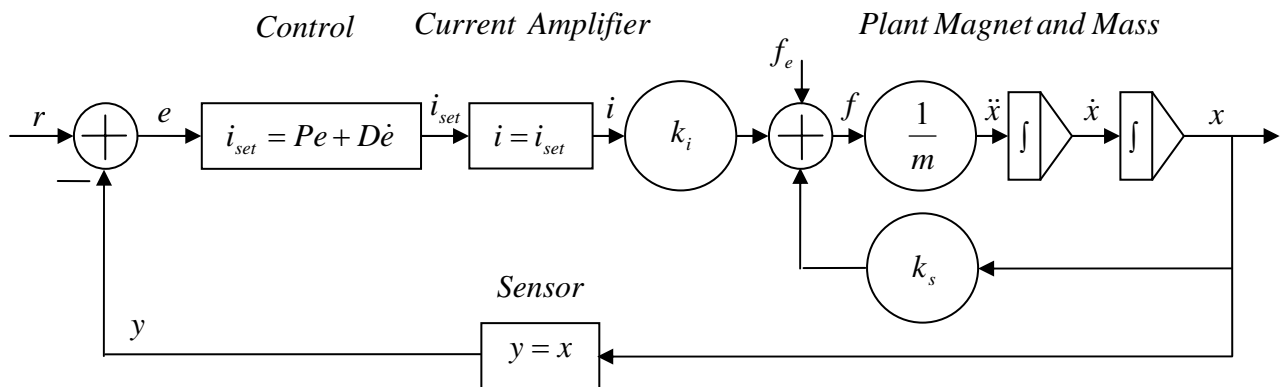
מגבר הזרם וחיישן המיקום מתוארים באיור כאידיאליים  $i = i_{set}$  ו-  $y = x$ . עבור בחירת אות ייחוס שונה מאפס נוכל לשנות את מיקום הליבה הנעה. לכל מיקום חדש של הליבה הנעה נגזרת השגיאה תהיה שווה לאפס ולכן נקבל מתוך משוואה 26 ומשוואה 25:

$$k_s x = -k_i i \quad \& \quad i = P e = P(r - x), \quad P = \frac{(k + k_s)}{k_i}$$

מתוך שתי המשוואות האחרונות ניתן למצוא את מיקום הליבה הנעה  $x_r$  עבור כל בחירה רצויה של מיקום הליבה הנעה  $r$ .

$$x_r = r \frac{k + k_s}{k} \quad \text{משוואה 29}$$

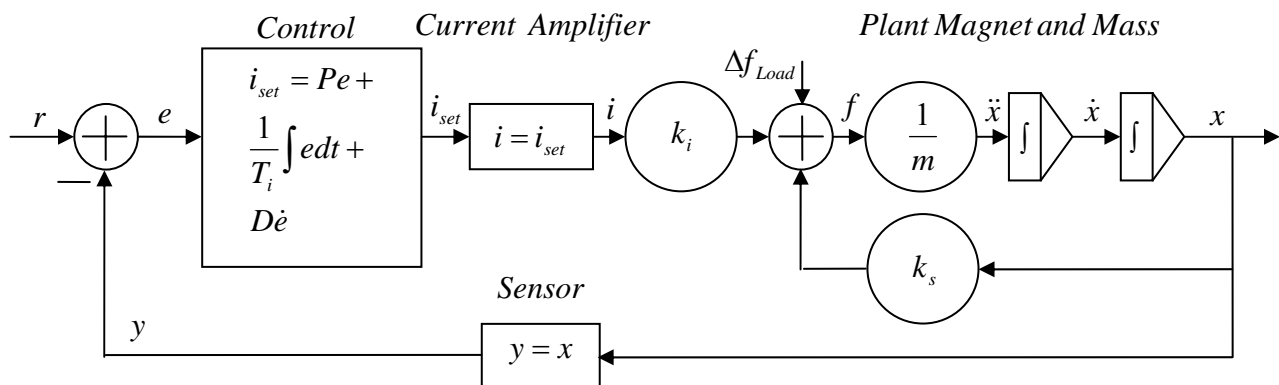
מתוך המשוואה האחרונה ניתן לראות שעבור בחירה של מקדם  $k$  גדול מאוד נקבל  $x_r = r$ . מצד שני נקבל קשיחות גבוהה מאוד במערכת עבור בחירה של  $k$  גדול מאוד. לכן, נדרש לבחור  $k$  גדול מספיק ביחס ל- $k_s$ . היות ו- $k_s$  הוא מקדם של מודל המערכת סביב נקודת שיווי כלומר, הוא משתנה בכל תחום העבודה. לכן, נהוג להשתמש בשיטה זאת רק עבור שינויים קטנים במיקום הליבה הנעה.



איור 15 בקרת אות ייחוס באמצעות חוק בקרת משוב מסוג PD

#### 4.2. חוק בקרת משוב מסוג PID

באופן מעשי מיקום הליבה הנעה תלוי גם בשינויי עומס, הפרעות חיצוניות ומאי-וודאות פנימי במערכת. הוספת חלק אינטגרלי לחוק הבקרה (איור 16) מפצה על שינויים בעומס. עבור כל שגיאה בין אות הייחוס לאות הנמדד, מתבצעת סכימה לסטייה בכל צעד זמן עד שהשגיאה דועכת לאפס, כלומר מתקבל במצב המתמיד  $x=r$ .



איור 16 בקרת אות ייחוס באמצעות חוק בקרת משוב מסוג PID

#### 4.3. הבדלים בין בקרת זרם לבקרת מתח

ההשראה של השדה המגנטי "תתנגד" לכל שינוי פתאומי בזרם ותאלץ את המגבר לספק מתח יציאה גבוה כאשר נדרש שינוי מהיר של הזרם. לכן, כדי לקבל מודל מדויק יותר של המיסב המגנטי יש לכלול את ההשראה L של המיסב המגנטי. המתח  $u_L$  על פני השראה טהורה הוא:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

משוואה 30

לליפוף של המיסב יש גם התנגדות, R, הגורמת לנפילת מתח בגודל:

$$u_R = R \cdot i$$

משוואה 31



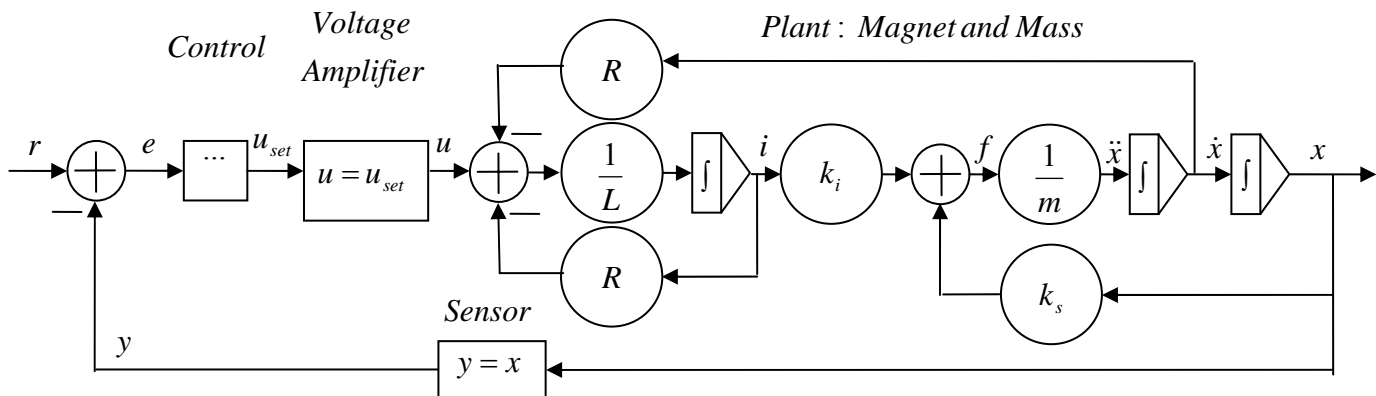


ההשראה  $L$ , היא פונקציה של מיקום הרוטור  $x$ . הערך של  $L$  בדיון זה, יוגדר כקבוע כאשר הרוטור נמצא בנקודת הפעולה ( $x = 0$ ). תנועה של הרוטור בשדה המגנטי תיצור מתח הפרופורציוני ל-  $dx/dt$ . כדי לקחת בחשבון מרכיב זה, בנוסחת המתח הכללית הוגדר מקדם מהירות מתח  $k_u$ :

$$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + k_u \cdot \dot{x}$$

משוואה 32

בעזרת התיאוריה הבסיסית של ממירי אנרגיה אלקטרו-מכאניים, ניתן להראות שפקטור  $k_u$ , שווה מבחינה תיאורטית, לפקטור כוח-זרם,  $k_i$ . המיסב המגנטי הוא ממיר של אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכאנית והתמרה זו מתרחשת בשני הכיוונים, חשמלי למכאני והפוך (בדיוק כמו שמונע חשמלי מתפקד כגנראטור). השוויון התיאורטית של  $k_i$  ו-  $k_u$  חייבת להיות קשורה לשימור האנרגיה של מתמרים אילו. במציאות השפעות רבות כמו: היסטריזיס, זרמי מערבולת ותופעות אי-ליניאריות אחרות, ייגרמו לכך ש-  $k_u$  ו-  $k_i$  לא יהיו שווים. היחס בין מתח לזרם (35) ומשוואות התנועה (משוואה 24) הן סט המשוואות המלא של מיסב מגנטי במערכת חוג סגור, כמו שניתן לראות באיור 17.



איור 17 בקרת משוב של ריסון תנודות אקטיבי עם בקרת מתח, אות ייחוס וליניאריזציה למשוואת המערכת

משתנה הכניסה החדש במודל מערכת "bearing and rotor" הוא המתח  $u$  שעל סליל הליפוף, המגבר הוא מגבר מתח למתח ולא מגבר מתח לזרם כפי שמומש במערכת ממ"א חד ערוצית. תרשים הבקרה החדש נקרא "בקרת מתח" מול "בקרת זרם" שמגד.

מכיוון שבקרת זרם מצריכה בקר מובנה בתוך המגבר, יהיה יותר מדויק לתאר מיסב מגנטי מבוקר זרם כמבוקר מתח עם בקרת זרם אינטגרלית במגבר.

ניתוח של החוג הפתוח במודל המערכת שבאיור 17 עבור  $R=0$  ו-  $k_u=k_i$  מראה 3 קטבים באפס, בניגוד לקטבים של החוג הפתוח ב-  $\pm\sqrt{m/k_s}$ .

החיסרון העיקרי בגישת בקרת מתח הוא שהבקר חייב להיות מסדר שני לפחות, סדר אחד יותר מבקר ה- PD הפשוט ביותר.



יתרונות בקרת מתח		יתרונות בקרת זרם	
תכנון מדויק יותר של מודל המערכת ולכן חסין יותר		תיאור פשוט של מודל המערכת. מספיק לרוב היישומים	
אי יציבות של החוג הפתוח חלשה יותר		בקר PD או PID פשוט.	
יישום פשוט יותר של קשיחויות נמוכות מאוד			
מגבר מתח (קל יותר לייצור וזול יותר ממגבר זרם)			
ניתן לנצל את תכונות הדו-כיווניות של המתמרים האלקטרו-מכאניים לשיפור המערכת.			



## 5. חישוב מקדמי חוקי בקרת משוב

בפרק זה נחשב את מקדמי חוק בקרת משוב שתוארו בפרק 4, עבור המערכת המכאנית הנתונה (איור 5). המודל הדינאמי של המערכת המכאנית (משוואה 19) פותח בפרק 3. במודל הדינאמי קיימים ארבעה פרמטרים קבועים: המסה השקולה  $m$  בקצה המוט, קשיחות הגמישון  $k_{flexure}$  בכיוון  $x$ , קבוע מיסב מגנטי  $C$  וקבוע מרחק בין האלקטרומגנט לליבה הנעה  $x_z$ .  $x_z$  אינו מופיע במודל (משוואה 19) אך ברור שבמודל מעשי נדרש להוסיף אותו, היות ובלעדיו במרחק אפס יתקבל באופן תיאורטי כוח אינסופי והרי ידוע שהכוח הוא סופי כתוצאה מרוויות. המסה השקולה  $m$  וקשיחות הגמישון חושבו ב-[28]. קבוע מיסב מגנטי  $c$  וקבוע המרחק  $x_z$  חושבו מתוך ניסויים סטטיים שבוצעו על-גבי המערכת (ראה [30]).

יחידות	ערך	סימן
Kg	0.48	m
N/m	1272.8	$k_{flexure}$
$Nm^2/A^2$	$3.73 \cdot 10^{-6}$	c
m	$1.8634 \cdot 10^{-6}$	$x_z$

לאחר הצבת הקבועים במודל (משוואה 19) נקבל:

$$\ddot{x}_1 = \frac{3.73 \times 10^{-6}}{0.48} \left( \frac{i_1^2}{(300 \times 10^{-6} + 1.8634 \times 10^{-6} - x_1)^2} - \frac{i_2^2}{(300 \times 10^{-6} + 1.8634 \times 10^{-6} + x_1)^2} \right) - \frac{1272.8}{0.48} x_1$$

### 5.1 חוק בקרת משוב מסוג PD

בהתאם לתת פרק 4.2 נחשב את קבועי חוק בקרת משוב מסוג PD. זרם ה-bias חושב בהתאם למשוואה

$$i = \frac{mX\omega^3 s^2}{2k} \left( \frac{di}{dt} \right)^{-1} = 50mA$$

כאשר:

תאור	יחידות	ערך	סימן
תדירות הברך בחוג סגור	rad/sec	350	$\omega_d$
תדירות הפרעה חיצונית	rad/sec	230	$\omega_{ex}$
תזוזה מרבית של הפרעה חיצונית	m	$250 \cdot 10^{-6}$	$X_d$
מרווח אוויר נומינאלי במיסב	m	$300 \cdot 10^{-6}$	s

המודל הליניארי (משוואה 24) סביב  $I_{bias}$  המקורב למשוואה 19 יהיה,

$$0.48\ddot{x} - 101x = 8.24i_c$$



כאשר,

$$k_s = 4 \cdot C \cdot \frac{I_{bias}^2}{(x_z + x_0)^3} - k_f = 101$$

$$k_i = 4 \cdot C \cdot \frac{I_{bias}}{(x_z + x_0)^2} = 8.24$$

המקדם הדיפרנציאלי D של חוק בקרת המשוב חושב באופן הבא:

$$D = \frac{2m\sigma}{k_i} = 8.1549$$

כאשר, קצב הדעיכה  $\sigma$  נקבע באופן שרירותי ל-70.

המקדם הפרופורציונאלי P של חוק בקרת המשוב חושב באופן הבא:

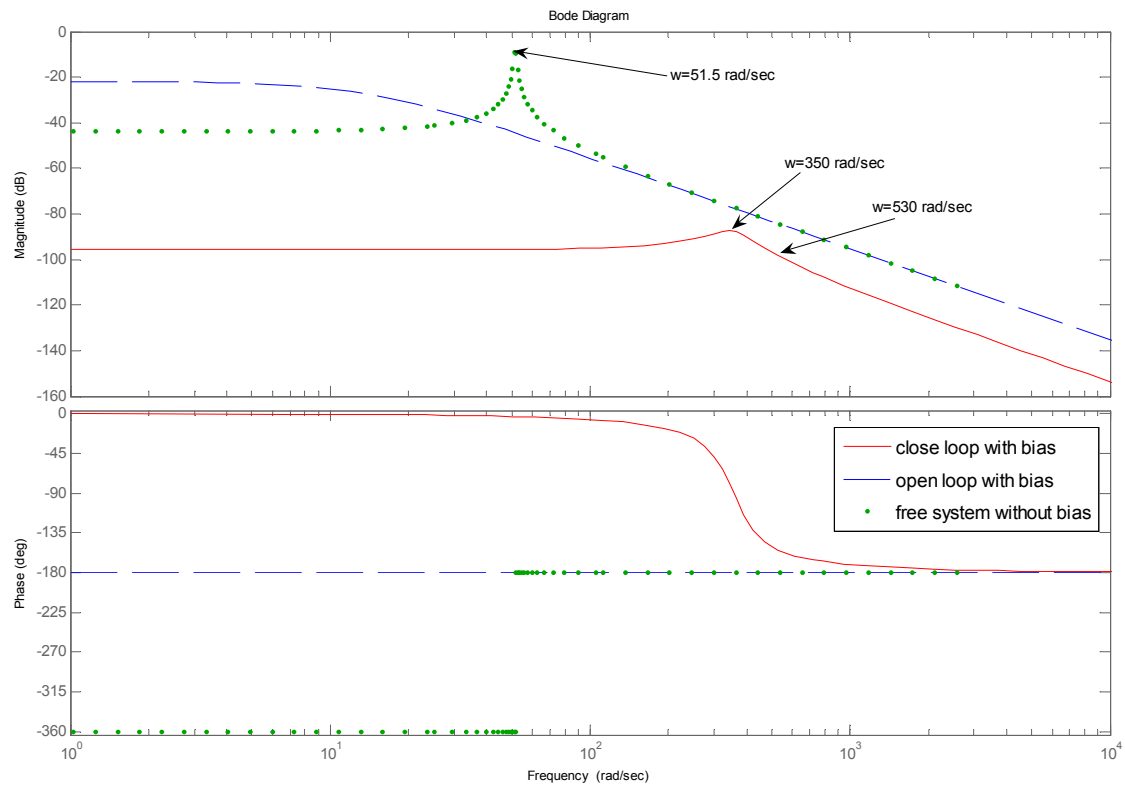
$$P = \frac{k + k_s}{k_i} = 7433.3$$

כאשר k חושב באמצעות משוואה 27:

$$k = m\omega^2 + \frac{(2m\sigma)^2}{4m} = 61152$$

\*\* משך מחזור הריסון נקבע מתוך תדירות הברך  $\omega$  והוא שווה ל-17.95msec.

באיור 18 מתוארות תגובות תדר של המערכת המכאנית ללא אילוץ, של המערכת הליניארית המקורבת סביב זרם bias ושל המערכת בחוג סגור. מתוך האיור ניתן לראות כי המערכת החופשית היא על סף יציבות (מערכת מחזורית) ובעלת תדירות טבעית של 51.5rad/sec, המודל הליניארי אינו יציב והמערכת בחוג סגור יציבה בעלת רוחב פס רחב של 530rad/sec ותדר ריסון של 350rad/sec. ניתן לראות כי הרזוננס הטבעי של המערכת המכאנית הוזנח משמעותית בתגובת המערכת בחוג סגור.



איור 18 תגובת תדר

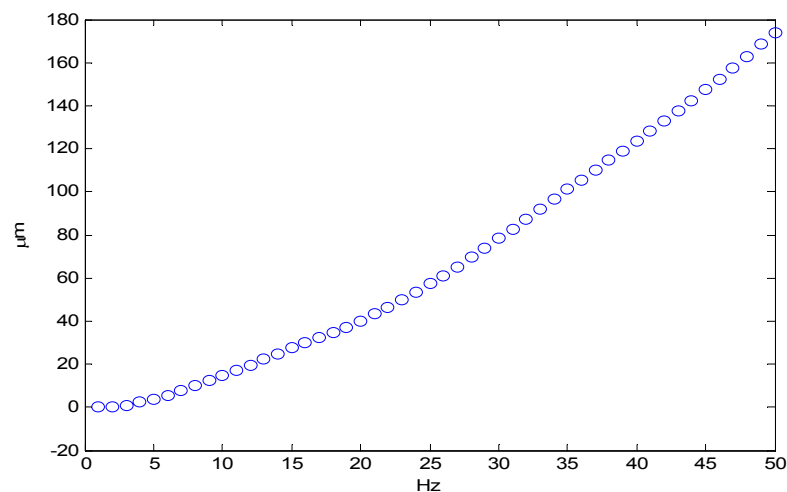
### 5.1.1. עמידות להפרעה חיצונית של אקסצנטר

רגישות התזוזה  $x_1$  לכוח המאלץ  $f_e$  ניתנת לתיאור באמצעות תגובת התדר של היחס בין  $x_1$  ל- $f_e$ . פונקצית התמסורת בין התזוזה  $x_1$  לכוח המאלץ  $f_e$  עבור המערכת בחוג סגור עם בקר PD ומודל מערכת ליניארי מקורב:

$$\frac{X_1(s)}{F_e(s)} = \frac{1}{ms^2 + k_iDs + k_iP - k_s}$$

משוואה 33

באיור 19 מתוארת סימולציה המתארת את תגובת הליבה הנעה לעירור חיצוני כתלות במהירות האקסצנטר.

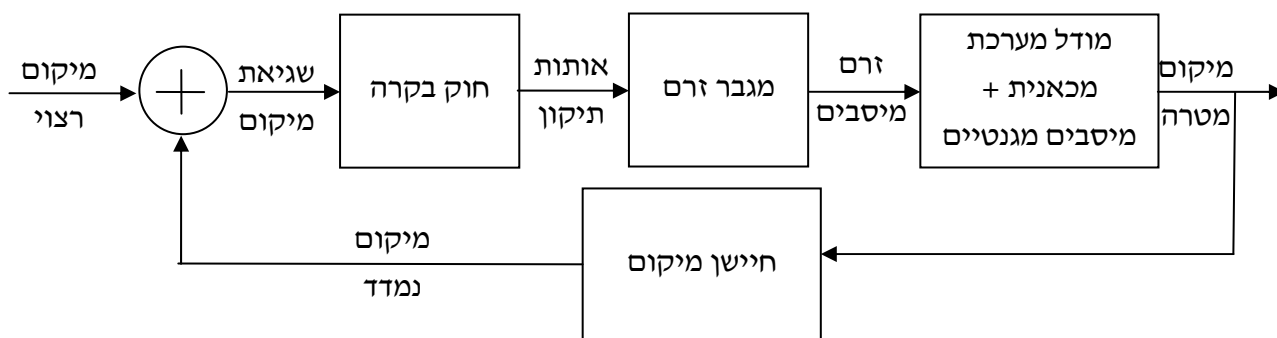


איור 19 חישוב תזוזת הליבה הנעה כתלות במהירות אקסצנטר



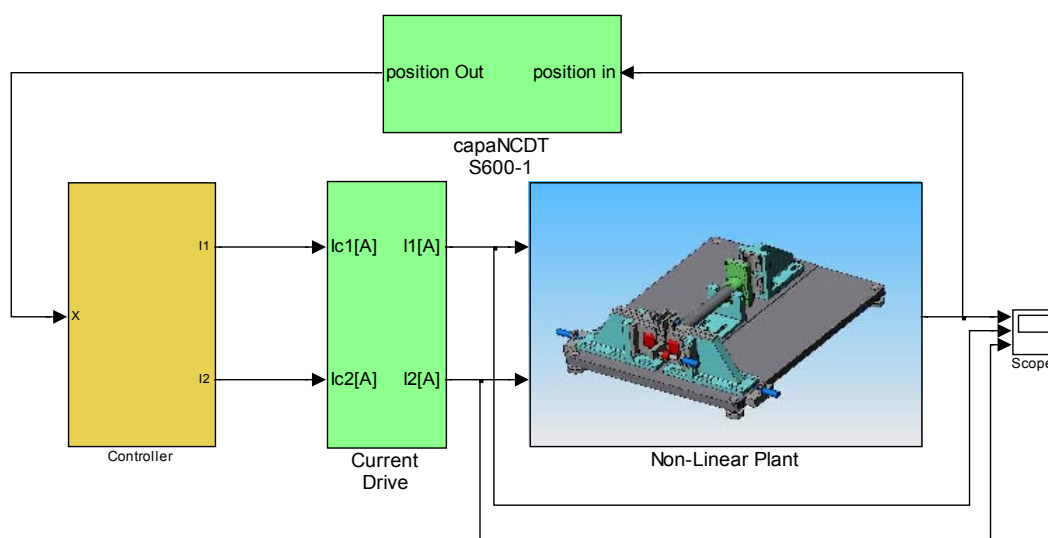
## 6. הדמיה של תגובת המערכת בחוג סגור

כשלב מקדים לניסויי תיקוף נבחן את חוק הבקרה בסימולציה בחוג סגור באמצעות תוכנת Matlab Simulink ראה איור 21. באיור 20 מתואר תרשים מלבנים כללי של הסימולציה עבור מערכת מיסוב מגנטי בחוג סגור. מודל המערכת המכאנית כולל המסבים המגנטיים מומשו בסימולציה בהתאם למשוואה 19 עם הקבועים שפורטו בפרק 5. חוק הבקרה מומש בהתאם לפרק 5. מודל מגבר הזרם ומודל חיישן המיקום הוזנחו היות ותחום התדר שלהם גדול בסדר גודל מתחום התדר של תחום התדר של המערכת בחוג סגור.



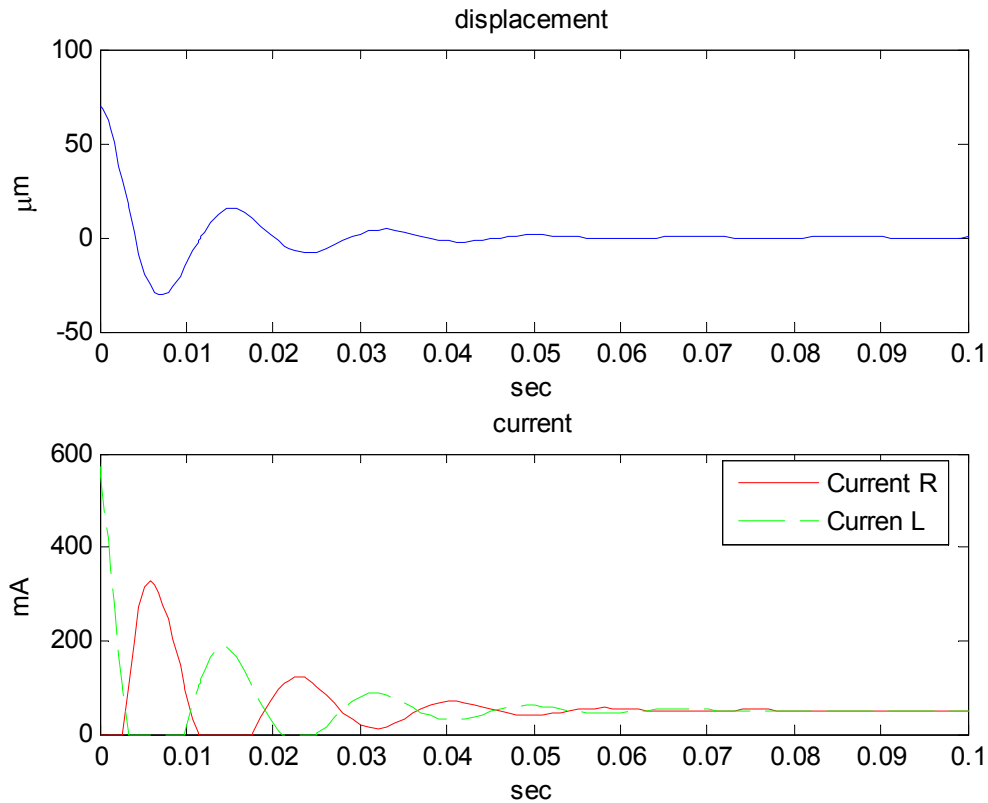
איור 20 תרשים מלבנים מערכת מיסוב מגנטי בחוג סגור

באיור 21 מוצגת דיאגרמת ה-Simulink המשמשת לסימולציה של המערכת בחוג סגור.

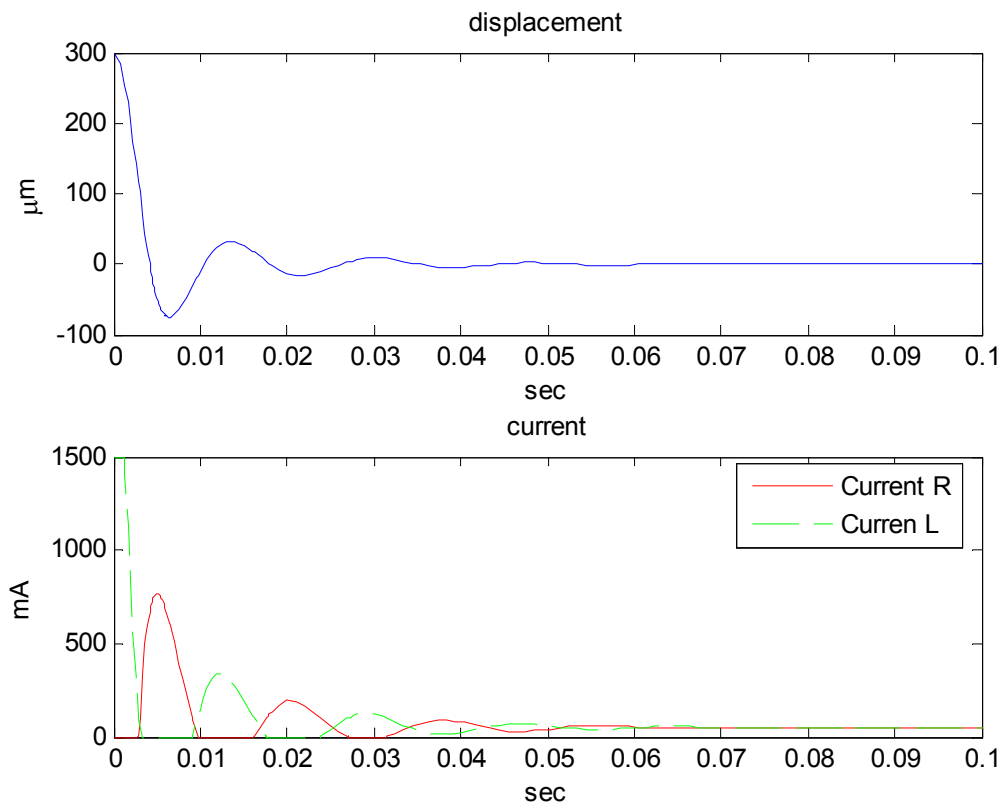


איור 21 דיאגרמת Simulink לסימולציה בחוג סגור עבור בקר PD

באיור 22 ובאיור 23 מתוארת הדמיה של תגובת המערכת (מיקום הליבה) וזרמי המיסבים כתלות בזמן עבור תנאיי התחלה שונים. בשני המקרים מיקום הליבה הנעה מתכנס לאפס. תדר הריסון וקצב הדעיכה של הליבה הנעה בהתאם לדרישה.

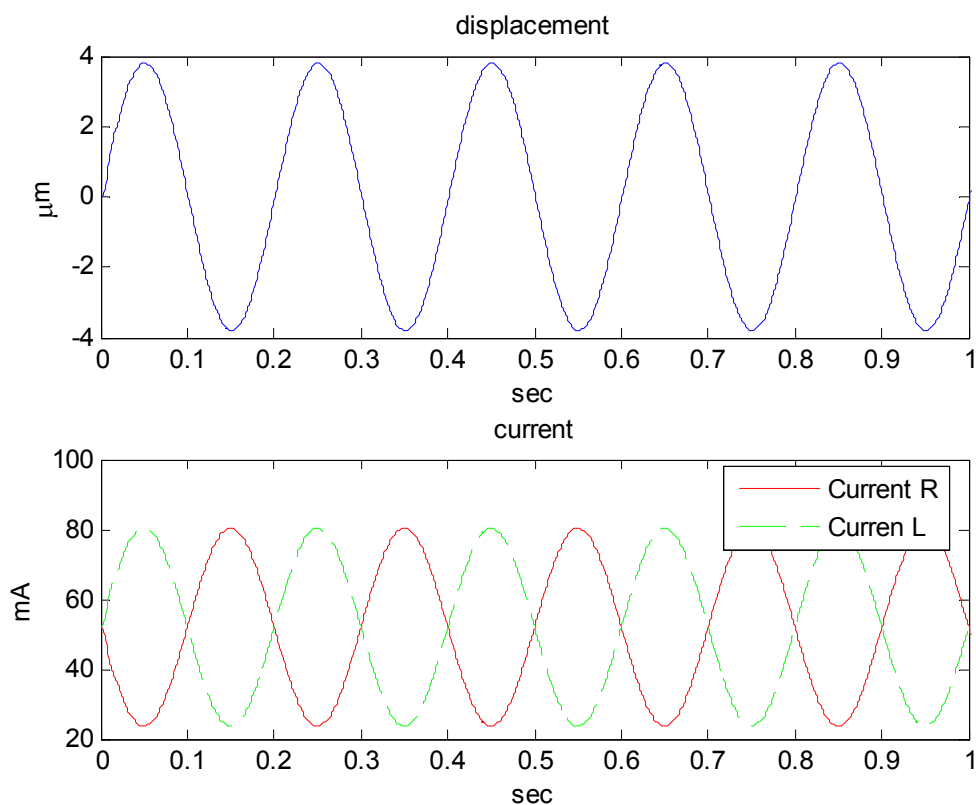


איור 22 סימולציה בחוג סגור עם תנאי התחלה של  $70\mu\text{m}$  ובקר מסוג PD

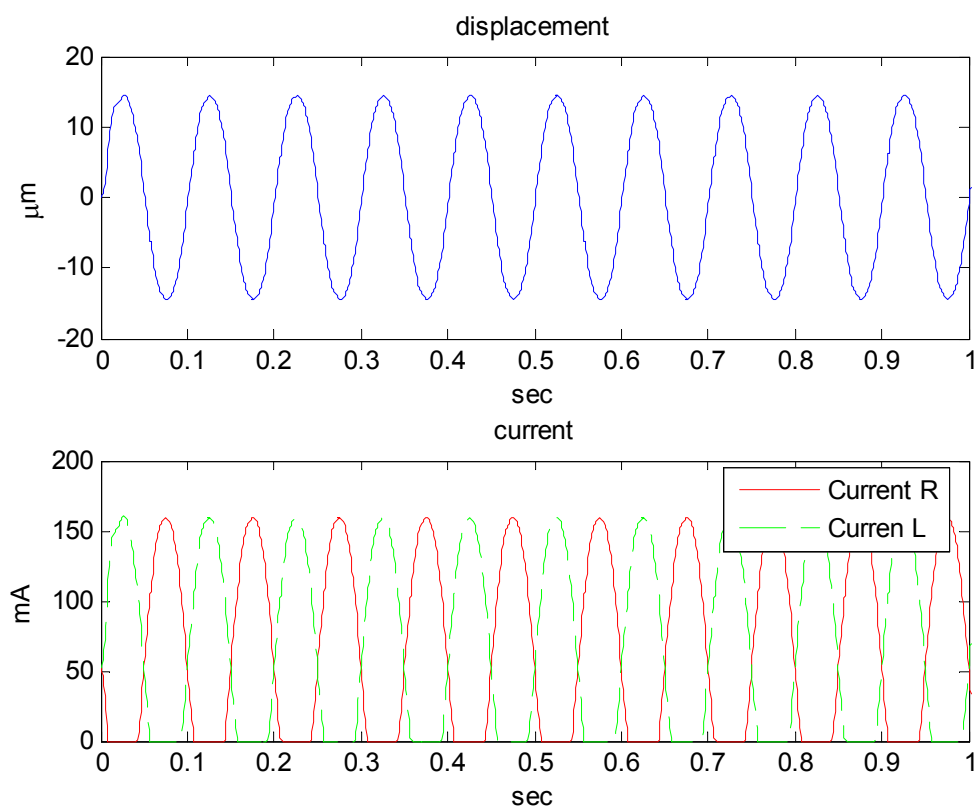


איור 23 סימולציה בחוג סגור עם תנאי התחלה של  $300\mu\text{m}$  ובקר מסוג PD

מאיור 24 ועד לאיור 28 מתוארת הדמיה של תגובת המערכת לעירור חיצוני באמצעות האקסצנטר. ניתן לראות שמעל תדר הפרעה של 60Hz הליבה הנעה נוגעת באלקטרומגנט.

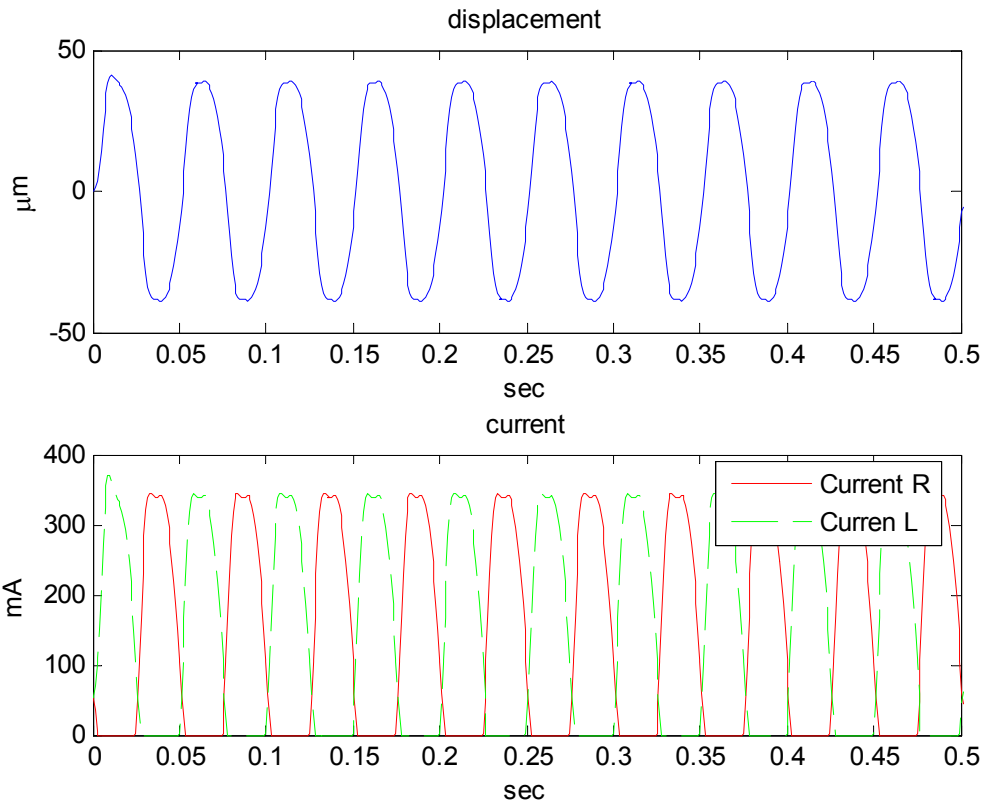


איור 24 תגובת המערכת בחוג סגור עם בקר PD לכווץ מאלץ של האקסצנטר בתדר 5Hz

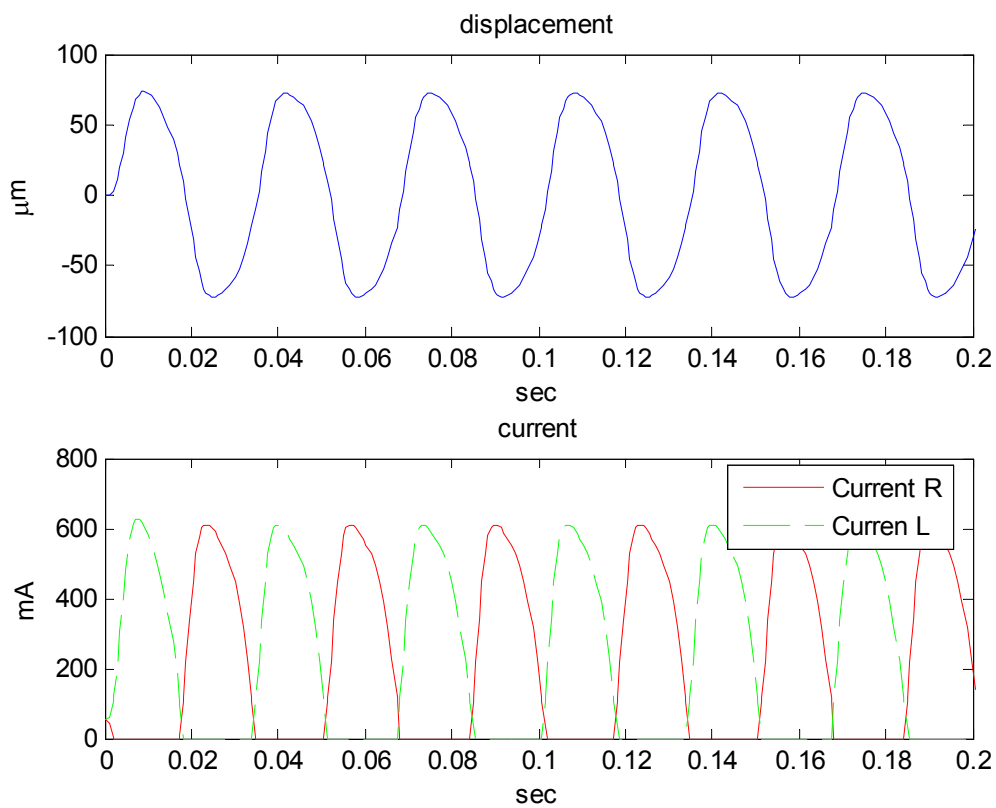


איור 25 תגובת המערכת בחוג סגור עם בקר PD לכווץ מאלץ של האקסצנטר בתדר 10Hz

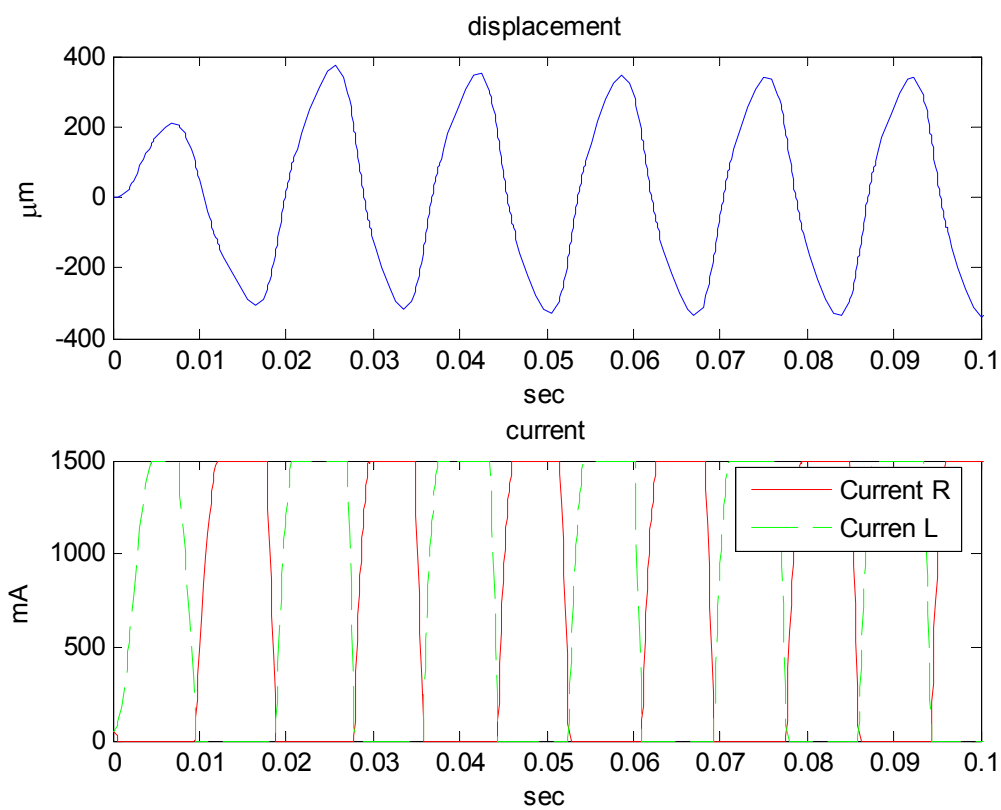




איור 26 תגובת המערכת בחוג סגור עם בקר PD לכוח מאלץ של האקסצנטר בתדר 20Hz



איור 27 תגובת המערכת בחוג סגור עם בקר PD לכוח מאלץ של האקסצנטר בתדר 30Hz

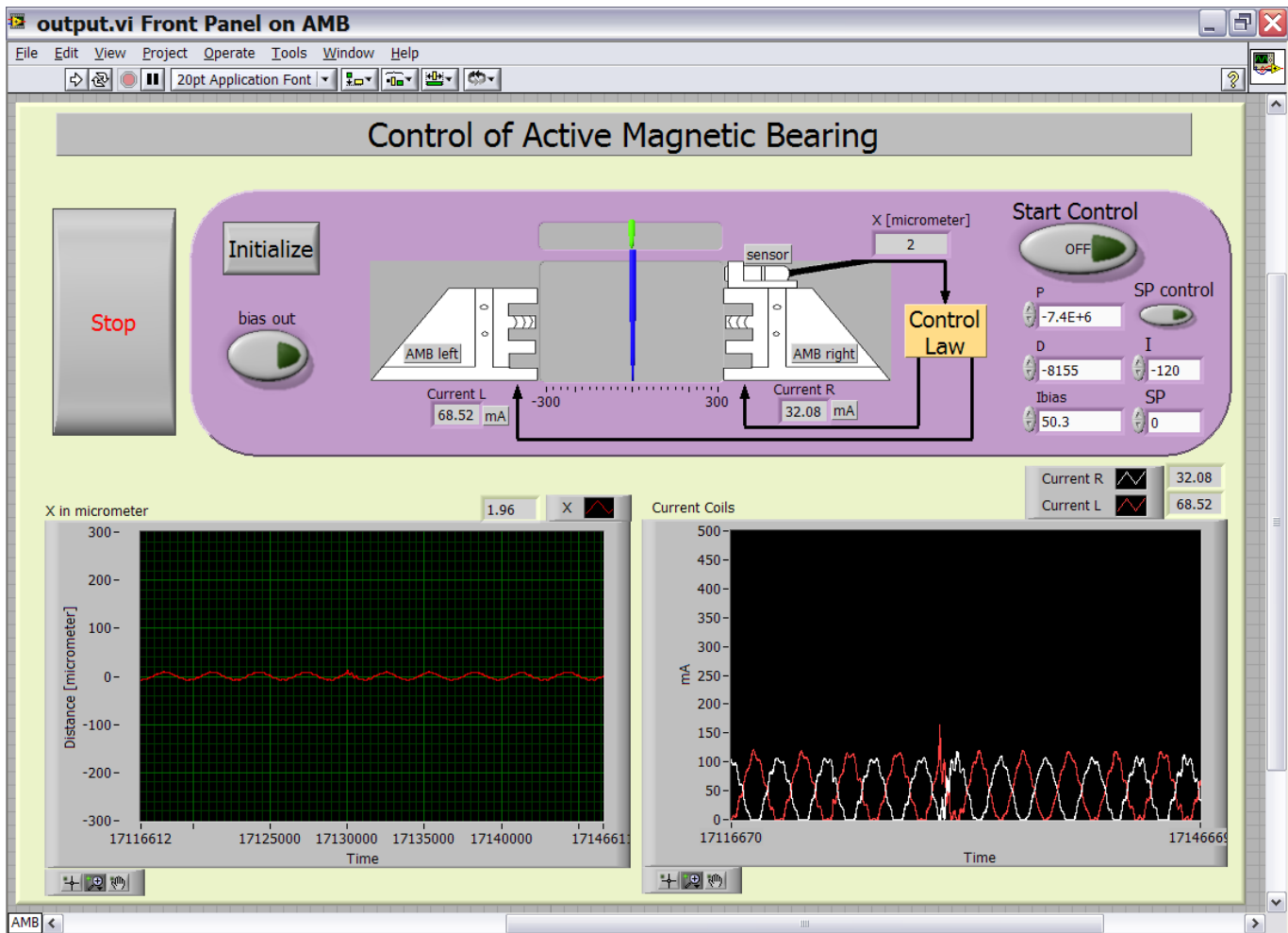


איור 28 תגובת המערכת בחוג סגור עם בקר PD לכות מאלץ של האקסצנטר בתדר 60Hz



## 7. תוצאות ניסוי והשוואה לסימולציה

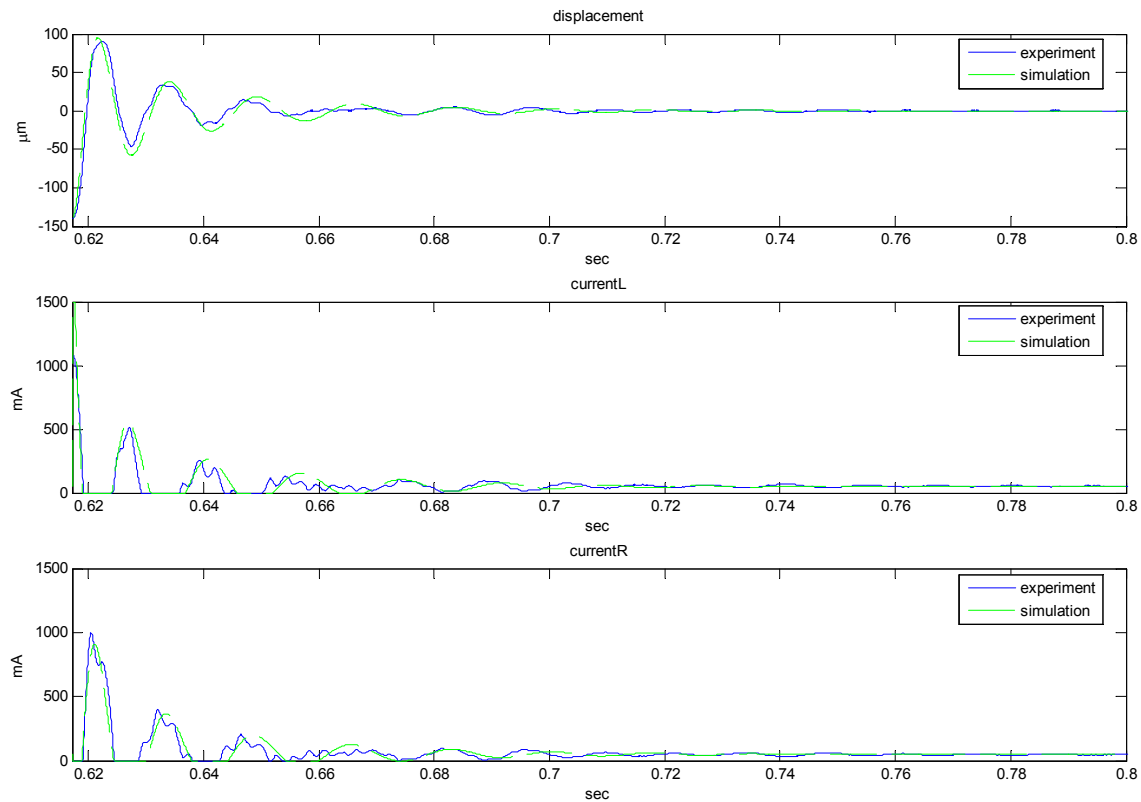
חוקי הבקרה שפותחו בסביבת Matlab תורגמו לשפת LabView ומומשו בבקר זמן אמת של חברת National Instruments. באיור 29 מתואר ממשק ההפעלה לריסון תנודות אקטיבי בחוג סגור.



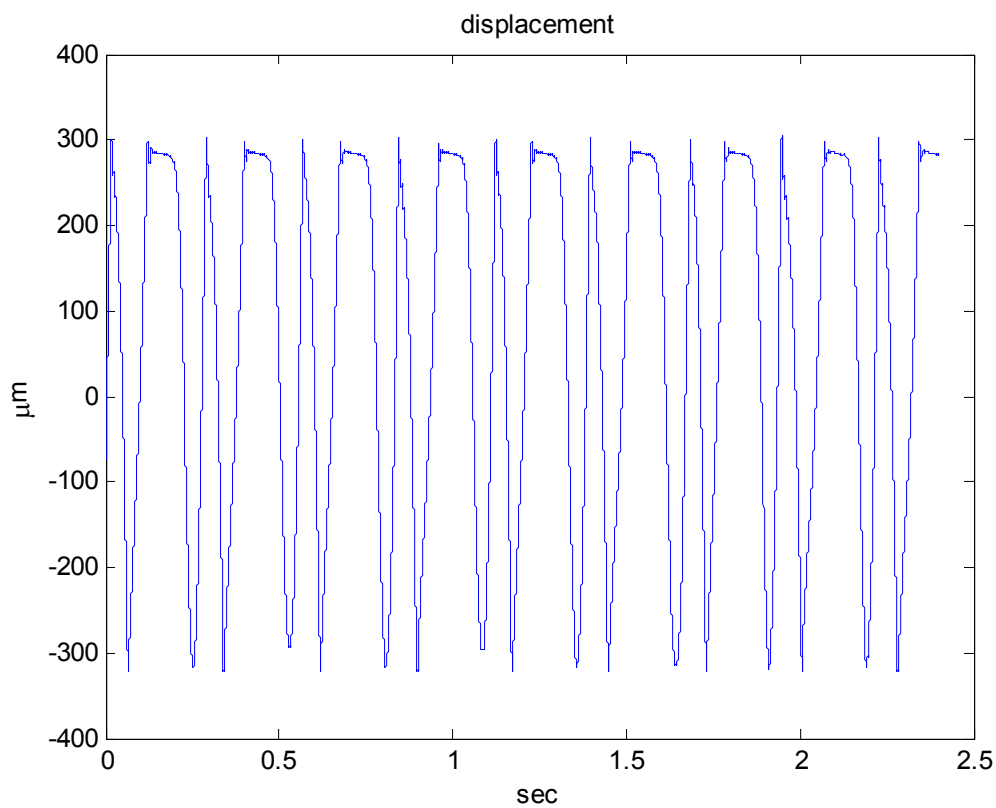
איור 29 ממשק משתמש לבקרת מיסוב אקטיבי

### 7.1 בקרת PD

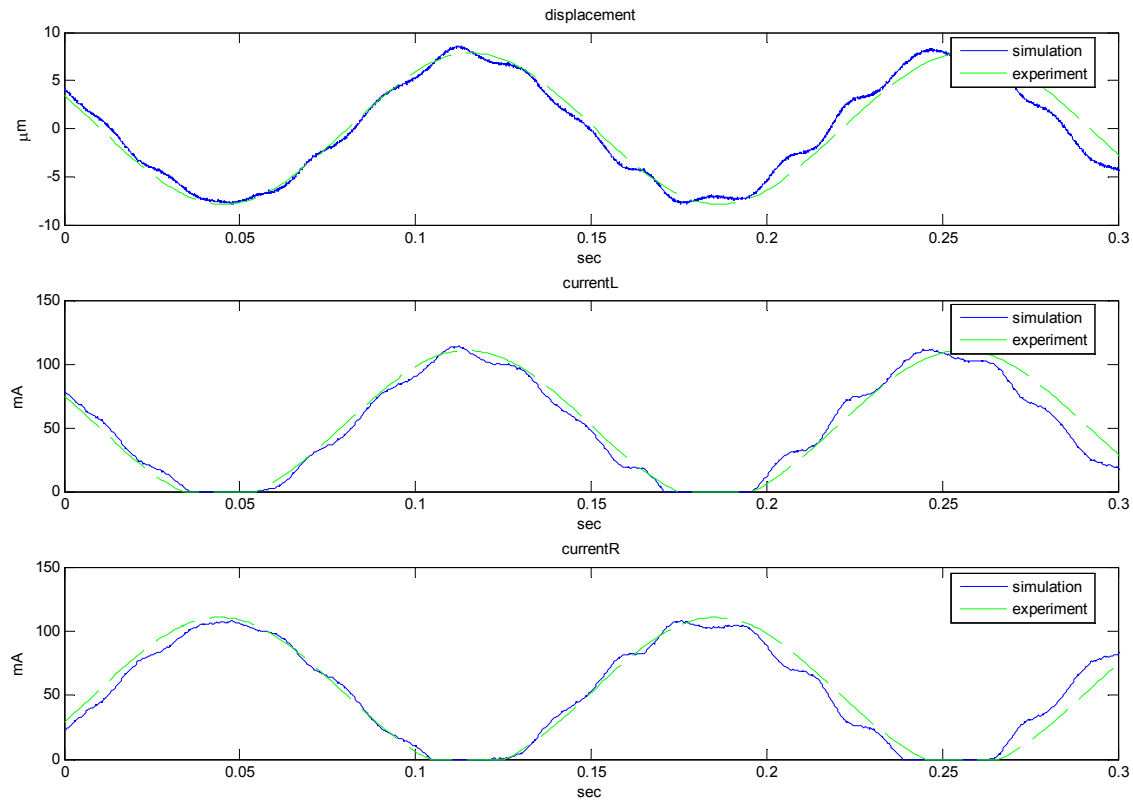
באיור 30 מתוארת השוואה בין תגובת המערכת בניסוי להדמיה של תגובת המערכת עבור תנאי התחלה של  $140\mu\text{m}$ . באיור 31 מתוארת תגובת המערכת לעירור חיצוני בתדר של  $7.1\text{Hz}$  ללא בקרה, ניתן לראות שלא בקרה הליבה הנעה נוקשת באלקטרומגנטים בכל מחזור. באיור 32 מתוארת תגובת המערכת בהדמיה ובניסוי לעירור דומה אך הפעם עם ריסון אקטיבי. ניתן לראות שהליבה הנעה אינה נוקשת באלקטרומגנטים ותזוזתה מונחת עד כדי  $7\mu\text{m}$ , התגובה המתקבלת מתאימה גם לחישוב שבוצע ומוצג באיור 19. באיור 33 מתוארת תגובת הליבה הנעה לעירור חיצוני של אקסצנטר בתדר של  $17.3\text{Hz}$ , פעם כשהמערכת ללא בקרה ופעם כשהמערכת עם בקר PD. ללא בקרה הליבה הנעה נוקשת באלקטרומגנטים בכל מחזור ועם בקרה תזוזת הליבה הנעה מונחת ל- $25\mu\text{m}$ .



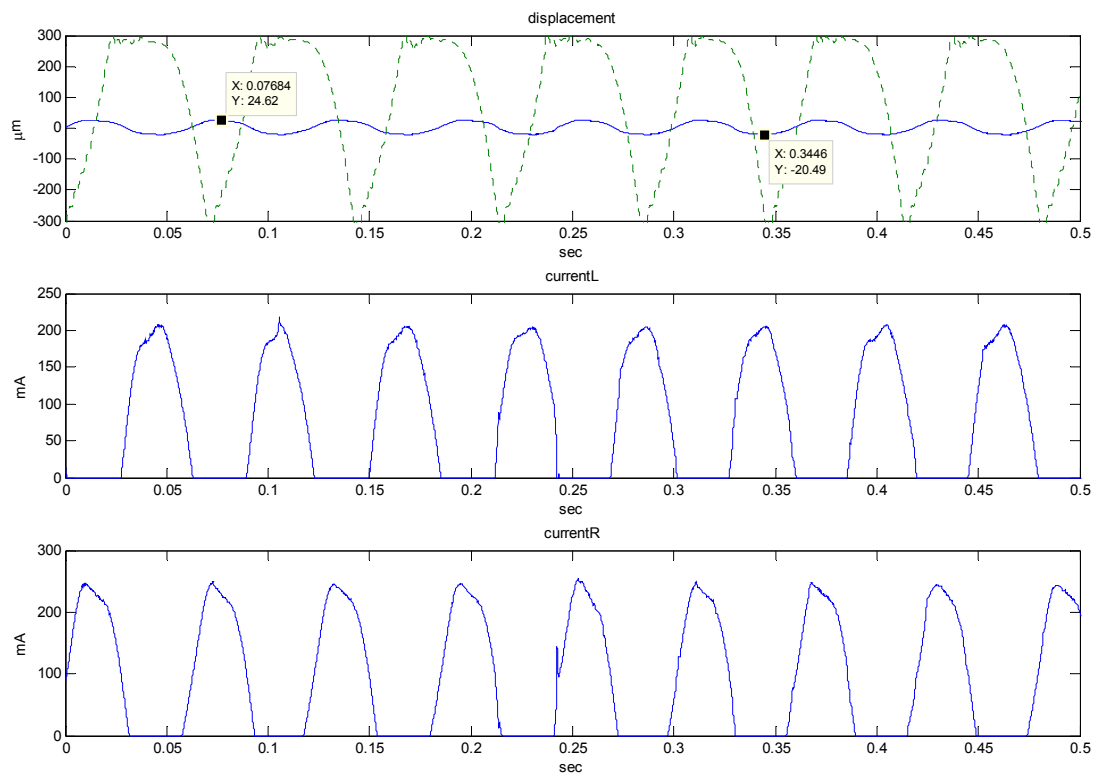
איור 30 אימות בניסוי בחוג סגור בקר PD עם תנאי התחלה  $140\mu\text{m}$



איור 31 ניסוי בחוג פתוח עם אקסצנטר בתדר 7.1Hz



**איור 32** אימות סימולציה וניסוי בחוג סגור עם אקסצנטר בתדר 7.1Hz ובקר מסוג PD

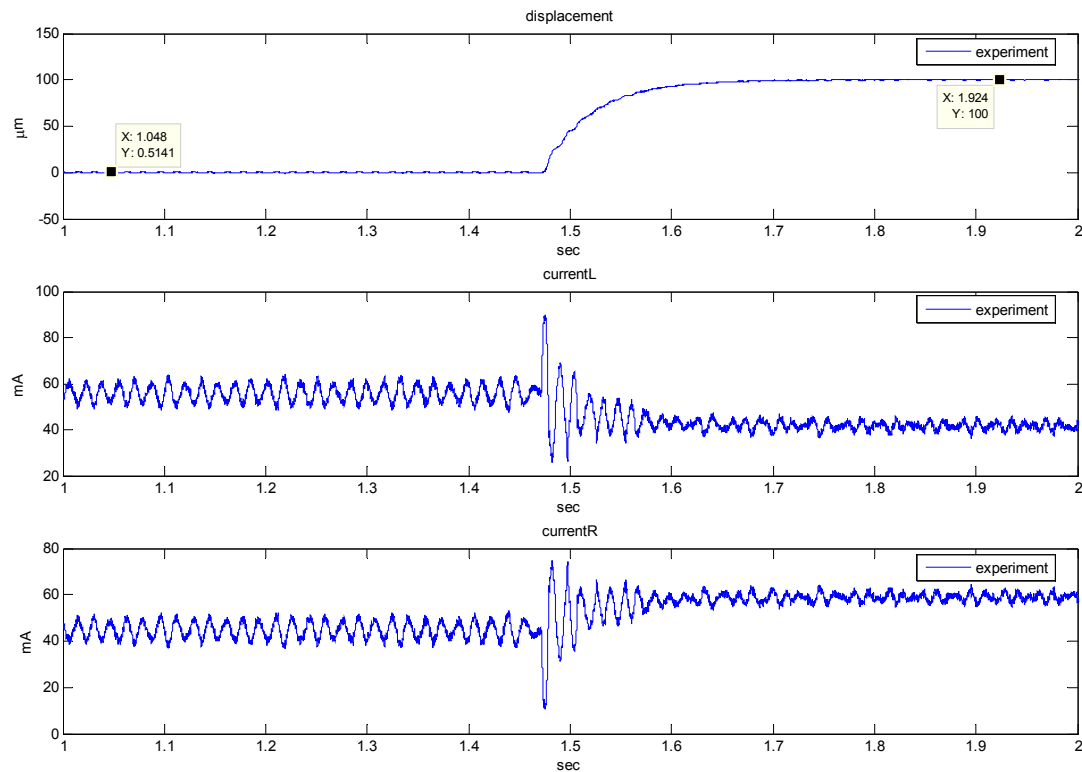


**איור 33** תזוזת הליבה החופשית על-ידי עירור אקסצנטר בתדר 17.3Hz עם ריסון וללא ריסון

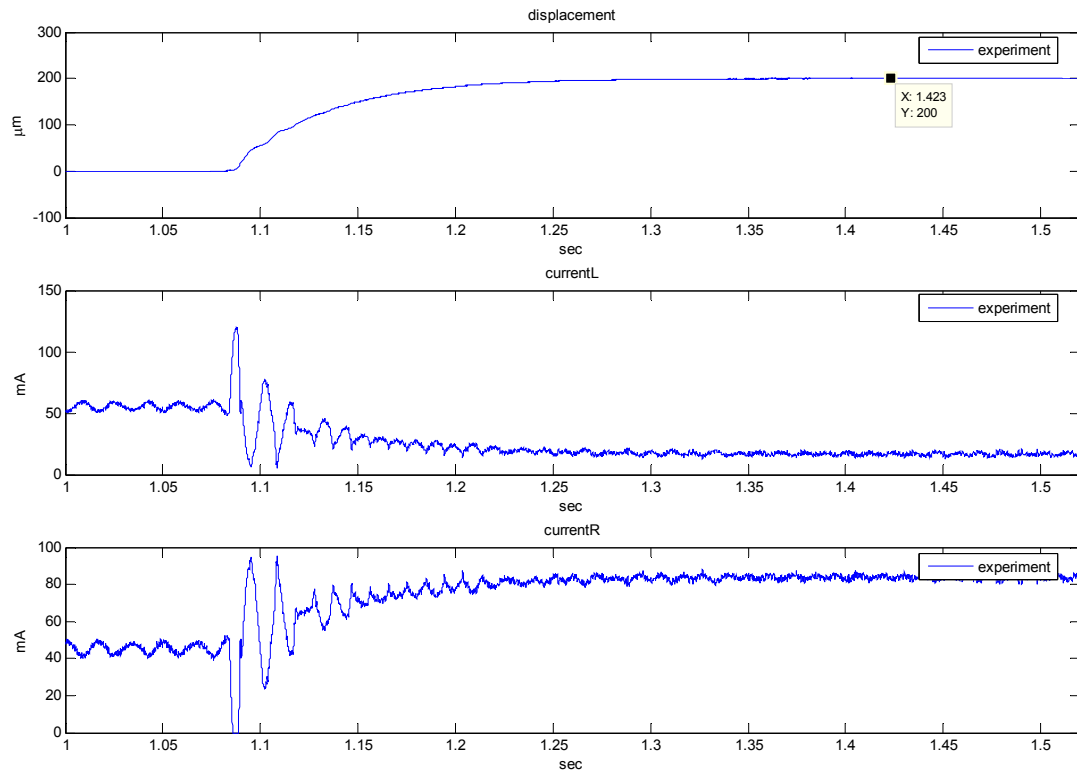


## 7.2 בקרת PID

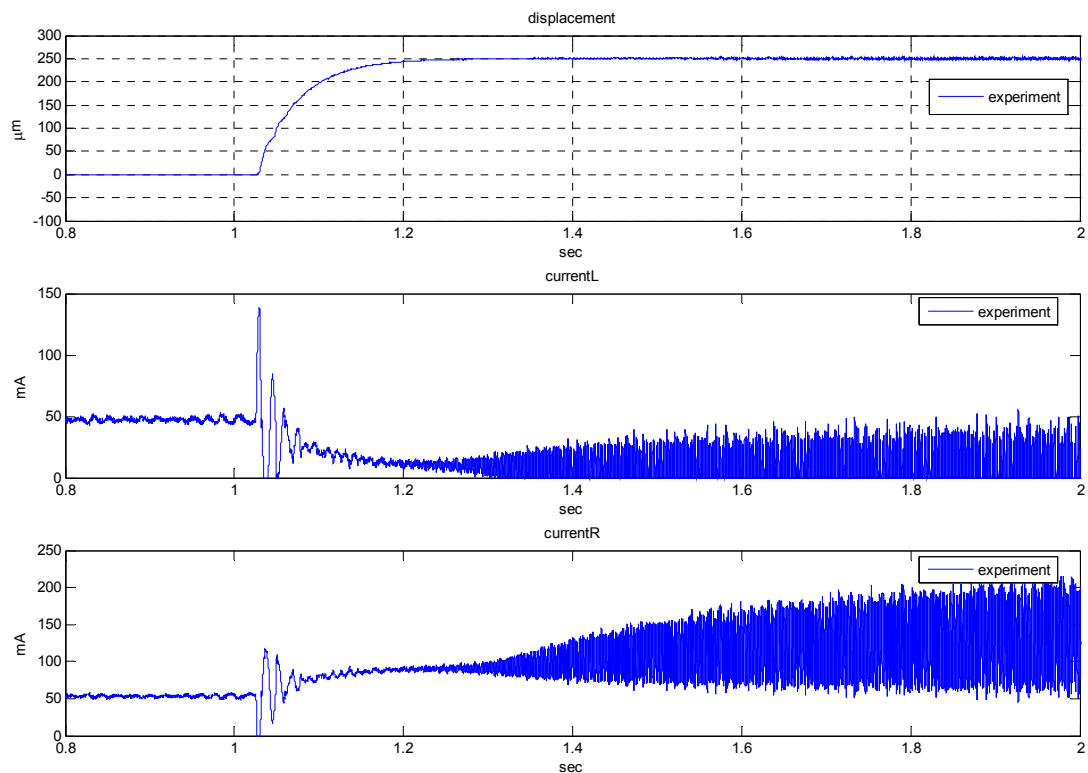
מאיור 34 ועד לאיור 39 מתוארת תגובת המערכת לשינויים במיקום הרצוי של הליבה. האיורים מחולקים כך: בחלקו העליון מופיע מיקום הליבה הנעה כתלות בזמן ומתחת מופיעים זרמי האלקטרומגנטיים כתלות בזמן. בכל אחד מהניסויים (איורים) ניתן לראות כי חוק הבקרה הצליח לייצב את הליבה הנעה במיקום הרצוי. צורת ההתכנסות היא מעריכית וניתן לשנותה על-ידי שינוי מקדמי חוק בקרת משוב (למשל, תגובה הרמונית מרוסנת). לדוגמא באיור 34 מתוארת התכנסות של הליבה הנעה למיקום רצוי חדש ב- $100\mu\text{m}$  כאשר תנאי ההתחלה היה קרוב לאפס.



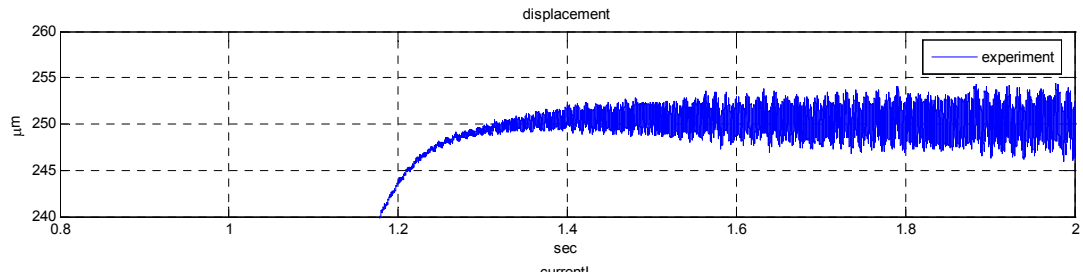
איור 34 תגובת המערכת למיקום רצוי של  $100\mu\text{m}$



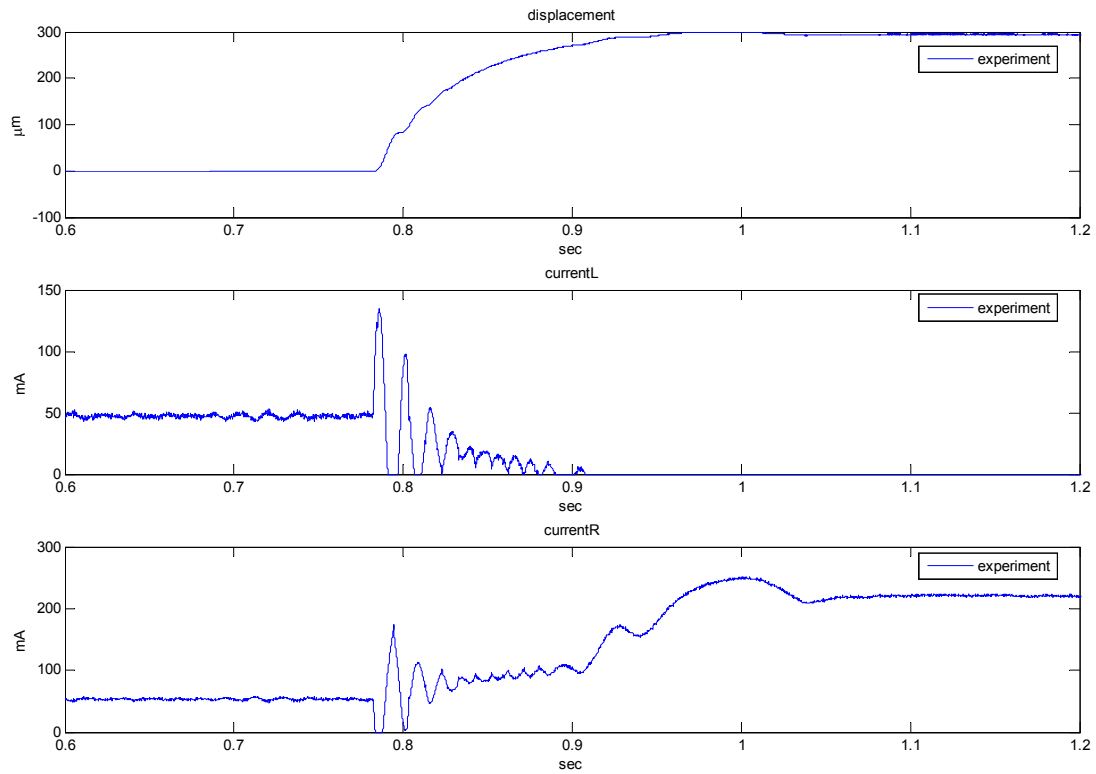
**איור 35 תגובת המערכת למיקום רצוי של  $200\mu\text{m}$**



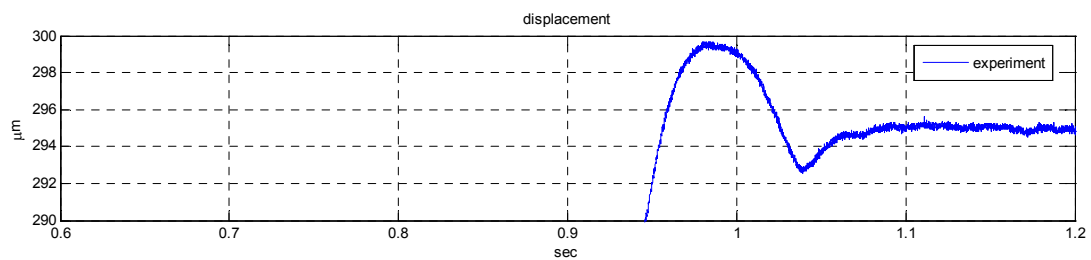
**איור 36 תגובת המערכת למיקום רצוי של  $250\mu\text{m}$**



**איור 37 הגדלה של תגובת המערכת למיקום רצוי של  $250\mu\text{m}$**



**איור 38 תגובת המערכת למיקום רצוי של  $295\mu\text{m}$**



**איור 39 הגדלה של תגובת המערכת למיקום רצוי של  $295\mu\text{m}$**





## **8. סיכום ומסקנות**

בעבודה זו הוצגה יכולת לפיתוח חוקי בקרת משוב ליניאריים מסוג PD ו-PID לריסון תנודות אקטיבי במערכת מכאנית חד ערוצית. מודל דינאמי של המערכת פותח על בסיס החוק השני של ניוטון, תורת האלקטרומגנטיות ובהנחת מודל גופים קשיחים. קבועי חוק הבקרה חושבו מתוך הגדרת הביצועים הדינאמיים (תחום תדר וקצב דעיכה) של המערכת. חוקי הבקרה שתוכננו הוכחו כיעילים הן בסימולציה, והן בניסוי. יעילות חוקי הבקרה באו לידי ביטוי בכל תחום העבודה למרות תקפותם רק סביב נקודת שיווי משקל. חסינות המערכת עם חוק בקרת משוב מסוג PD נבחנה תחת הפרעות חיצוניות. ההפרעות החיצוניות נבעו מהרעדת בסיס המתקן והרעדת הליבה הנעה על-ידי אקצסנטר. חסינות המערכת להפרעות אלו הייתה גבוהה הן בסימולציה והן בניסוי.

בעבודה זו הוכחנו שניתן ליישם את גישת הפתרון של בקרת משוב מסוג PD לריסון מערכות רגישות בצורה אקטיבית (כמו: תעשיית הננו טכנולוגיה – בדיקות סופיות של פרוסות סיליקון) ולשליטה מדויקת (nano-meter) למשל במכונות לעיבוד שבבי.

למרות התוצאות המוצלחות שהתקבלו הוחלט לבחון גם את הגישה השנייה לריסון תנודות אקטיבי באמצעות ליניאריזציית משוב לצורכי יתירות בגישות פיתרון לריסון במערכת מורכבת יותר - מערכת רב ערוצית.



## 9. סימוכין

- [1] J.S. Park. et. al., "**Vibration reduction of a CD-ROM drive base using a piezoelectric shunt circuit**", Journal of sound and vibration, 2004, p.1111-1118.
- [2] M. Spirig. et. al., "**Three Practical Examples of Magnetic Bearing Control Design Using a Modern Tool**", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, October 2002. Vol. 124 / 1025.
- [3] G. Schwetizer, "**Active magnetic bearing – chances and limitations**", *International Center for Magnetic Bearings, ETH Zurich*.
- [4] Trumper D. L. et. al., "**Linearizing Control of Magnetic Suspension System**", *IEEE Trans. On Control System Technology*, Vol. 5, No. 4, 1997.
- [5] Ali.C. et. al., "**Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System Without Premagnetization**", *IEEE Transaction on control system technology*, Vol. 4, No. 5, September 1996.
- [6] Scott. L. et. al., "**Effect of Magnetic Pole Arrangement on Core Loss in Laminated High-Speed Magnetic Journal Bearings**", *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 32. No. 4. July 1996.
- [7] Shyh.L. et. al., "**Optimal Design of a Three-Pole Active Magnetic Bearing**", *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 38. No. 5. September 2002.
- [8] Panagiotis.T. et. al., "**Zero and Low Bias Control Designs for Active Magnetic Bearings**", *IEEE Trans. On Control System Technology*, Vol. 11. No. 6. November 2003.
- [9] Thomas.R. et. al., "**Nonlinear control of active magnetic bearing with bias current: experimental study**", *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, Minnesota, USA, June 14-16, 2006.
- [10] Zhuravlev J.N., *Active magnetic bearings: Theory, calculation, application*. SPb.:Politechnika,2003.
- [11] Schweitzer G., Bleuler H., Traxler A., *Active magnetic bearings: Basic properties and application of active magnetic bearings*. Zurich,2003.
- [12] Antila M., *Electromechanical properties of radial active magnetic bearings*. Ph. D. work, Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No.92, Espo 1998, 96 pp. Published by the Finnish Academy of Technology, ISBN 952-5148-73-4. ISSN 0001-6845.
- [13] Betschan F., *Design principles of integral magnetic bearings*. Ph. D. work Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 2000.



- [14] Lantto E., ***Robust control of magnetic bearings in sub critical machines***, Ph. D. work. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No.92, Espo 1998, 96 pp. Published by the Finnish Academy of Technology, ISBN 952-5148-80-7. ISSN 0001-6845.
- [15] Losch. F., ***Identification and automated controller design for active magnetic bearings systems***. Ph. D. work. Swiss federal institute of technology, ETH Zurich, 2002.
- [16] Zhuravlev J. N., ***Lectures on active magnetic bearings***. St. Petersburg State Technical University, Pskov, 1998.
- [17] Larssonneur R., ***Design and control of active magnetic bearings systems for high speed rotation***. Ph. D. work. Swiss federal institute of technology, Zurich, 1990.
- [18] Bims D., Spitce R., ***Rotor vacuumeter with magnet suspension***. Devices for research activities, 1962.
- [19] Nakajima A., ***Research and development of magnetic bearings flywheels for attitude control of spacecraft***. ETH Zurich, Switzerland, June 6-8 1988.
- [20] Kirk J. A., Anand D.K., Pang D., ***Performance of a magnetically suspended flywheel energy storage system***. ETH Zurich, 1994.
- [21] C. Y. Kim and K. H. Kim, ***Gain scheduled control of magnetic suspension systems***. In Proc. Amer. Conf.. June 1994. pp. 3127 – 3131.
- [22] D. L. Trumper, J. Sanders, T. Nguyen. And M. Queen, ***Experimental results in nonlinear compensation of a one-degree-of-freedom magnetic suspension***. In Proc. NASA Int. Symp. Magn. Suspension Technol., NASA Langley Research Center, Hampton, VA. Aug. 19 – 23, 1991.
- [23] R. Su. ***On the linear equivalents of nonlinear systems***, Syst. Contr. Lett., vol. 2. no 1, pp. 48 -52. July 1982.
- [24] L. R. Hunt, R. Su. and G. Meyer, ***Global transformation of nonlinear systems***, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC – 28, Jan. 1983.
- [25] L. R. Hunt, R. Su. and G. Meyer, ***Application of nonlinear transformations to automatic flight control***, *Automatica*, vol. 20, no. 1. pp 103 – 107, 1984.
- [26] I. Arrendondo, J. Jugo, ***Active Magnetic Bearings Robust Control Design based on Symmetry Properties***, American Control Conference, 2007. ACC apos;07 Volume, Issue, 9-13 July 2007 Pages:5975 – 5976.
- [27] R. Dorf, R. Bishop, ***Modern Control Systems***, 8<sup>th</sup>.
- [28] ע. בראונשטיין, ז. ברנד, ג. רודנאי, ***תיכון מתקן לבדיקת מיסוב מגנטי חד ערוצי***, אפריל 2007.
- [29] פרופ' ז. פלמור, ***מערכות ליניאריות***, הפקולטה להנדסת מכונות, טכניון, יוני 1989.
- [30] ז. ברנד, א. שפיר, ג. רודנאי, ***מערכת חד – ערוצית, מדידה וחישוב של קבועי משוואת הכוח המגנטי דוח מס' 3***, בהפצה.
- [31] D. Johnson, M. Malengret, P. Pillay, ***High-speed, low-cost flywheels for energy storage in sustainable power systems with distributed generation***, IEEE, 2001.



## נספח א' אלקטרומגנט

המידות הגיאומטריות של ליבת שכבות במבנה E הם, קוטב מרכזי: רוחב 19mm, עומק 10mm, שטח חתך  $190\text{mm}^2$ . קטבים משניים: רוחב 9.5mm, עומק 10mm, שטח חתך  $95\text{mm}^2$ .

על הקוטב המרכזי של המיסב מלופפים שני סלילי נחושת בקוטר 0.65mm (כולל בידוד 0.71mm):

- סליל ראשון: ב-220 כריכות.

- סליל שני: ב-55 כריכות.

כריכות הסלילים נבנו על גליל מותאם לקוטב המרכזי של ה אלקטרומגנט. הגליל בגובה 23mm.

השראות הסליל תלויה במרווח האוויר ומחושבת באמצעות משוואה 8 או בקירוב ממשוואה 9 (איור 41), כאשר:

$$n = 275T - \text{מספר כריכות.}$$

$$R = 1.21\Omega - \text{התנגדות הסליל.}$$

$$A_a = 190\text{mm}^2 - \text{שטח חתך של הקוטב המרכזי.}$$

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{AT} \times \text{m}} - \text{מקדם פרמביליות בריק.}$$

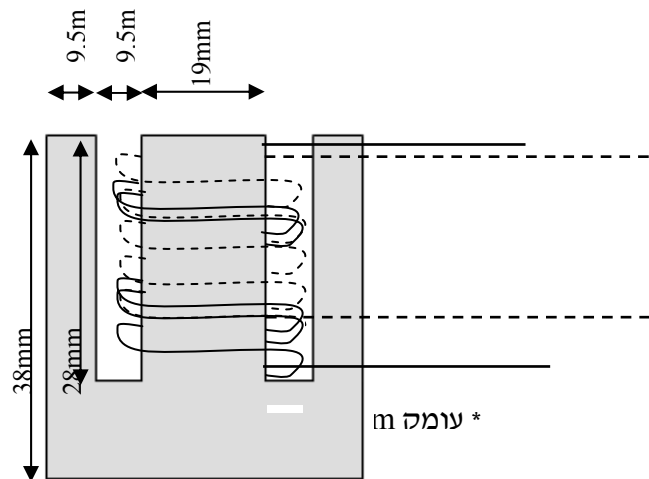
$$\mu_r = 5000 - \text{מקדם פרמביליות יחסית של המיסב.}$$

$$l_{\text{iron}} = 75.5 \times 10^{-3} \text{m} - \text{אורך הלולאה המגנטית דרך פלדת סיליקון.}$$

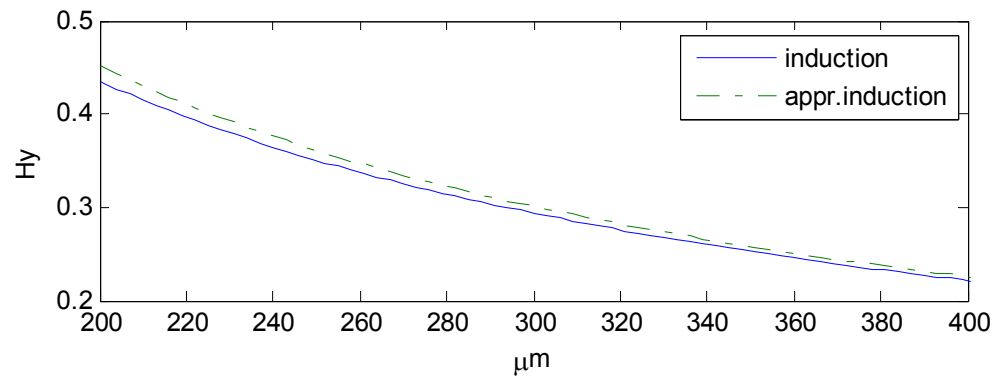
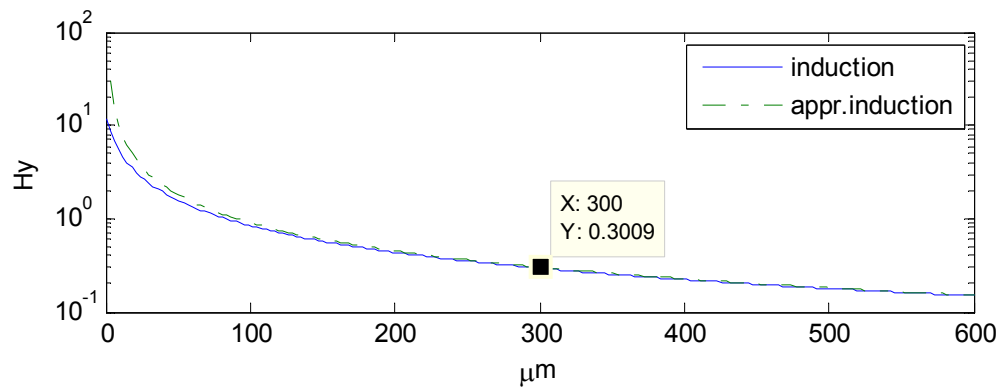
$$s = 300 \times 10^{-6} \text{m} - \text{מרחק נומינאלי בין המיסב לליבה I.}$$

המידות הגיאומטריות של ליבה שכבות במבנה I: גובה 38mm, רוחב 57mm, עומק 10mm.

קבוע הכוח המגנטי,  $c = 4.5141 \times 10^{-6}$ , חושב באמצעות משוואה 13.



**איור 40 מיסב מגנטי במבנה E**

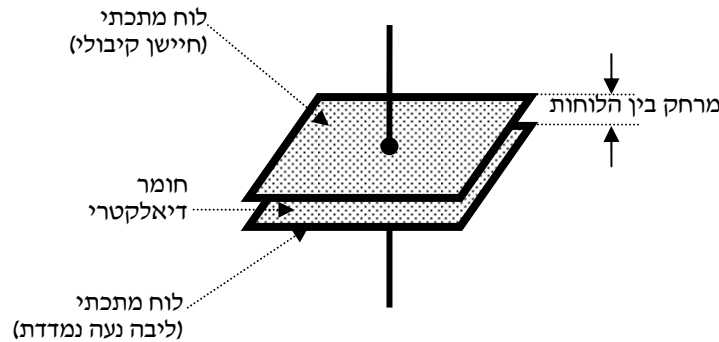


איור 41 השראות כתלות במרווח אוויר



## נספח ב' חיישן קיבולי

חיישני הקירבה שנבחרו למערכת הניסוי הם מסוג קיבולי. העיקרון הפיזיקאלי למדידת מרחק בעזרת חיישן קיבולי מבוסס על מדידת היגב קיבולי. החיישן בשילוב המטרה הנמדדת יוצרים מבנה של קבל, בו קיימים שני לוחות מוליכים מקבילים, לוח אחד מהווה את החיישן הקיבולי (חלק סטטי) והלוח השני מהווה את הליבה הנעה (חלק דינאמי), אשר ביניהם מצוי חומר דיאלקטרי (ראה איור 42).



איור 42 קבל

מדידת המרחק בין שני הלוחות מתבצעת באופן עקיף, וזאת על-ידי מדידת היגב הקבל, לפי הקשר הבא:

$$x_c = \frac{1}{j\omega C}, \quad C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A_c}{x_1}$$

משוואה 34

שינוי במיקום המטרה משפיעה על המרחק בין שני הלוחות  $x_1$  וכתוצאה מכך שינוי בהיגב הקבל. החיישן הקיבולי נבחר בהתאם לנתונים הבאים:

- תחום תדר הגדול פי 10 מתחום התדר של המערכת בחוג סגור (1500Hz).
- תחום מדידה בתחום 0.6mm.
- ליניאריות של  $<0.3\%$  FSO.
- רזולוציה של  $<0.015\%$  FSO.

נבחרו שני חיישני קירבה מתוצרת MICRO-EPSILON, הבאים:

Type	Sensor model	Range	Target type	Power supply	output	Bandwidth
capaNCDT 6100	S600-0.5	0.5mm	Metals	24Vdc	0-10v	2kHz(-3db)
capaNCDT 6100	S600-1	1mm	Metals	24Vdc	0-10v	2kHz(-3db)

טבלה 1: נתוני חיישן קירבה מסוג קיבולי

בהתאם לנתוני החיישן, ניתן לקרב את דינאמיקת החיישן כמערכת מסדר ראשון (הנקרא גם – מסנן מעביר נמוכים), ראה [29]. פונקציית התמסורת של מערכת מסדר ראשון נתונה על ידי:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

משוואה 35



כאשר  $\tau$  הוא קבוע הזמן של המסנן.

$G(j\omega)$  המתאים יהיה,

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

לכן, היחס בין אמפליטודת היציאה לאמפליטודת הכניסה (הנקרא Amplitude Ratio ויסומן להלן – AR) נתון על-ידי:

$$AR = |G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\tau^2 \omega^2 + 1}}$$

$$(AR)_{db} = -10 \log_{10}(\tau^2 \omega^2 + 1) \quad \text{ו-}$$

הזזת הפאזה (פגור הפאזה – phase lag) שתסומן להלן  $\phi$  נתונה על-ידי:

$$\phi = \arg G(j\omega) = \tan^{-1}(\tau\omega)$$

טבלה 2 מציגה את תגובת התדירות של משוואה 35 בערכים קיצוניים של  $\tau\omega$ . מהטבלה ניתן לראות כי ה-AR של פיגור מסדר ראשון קרוב לשתי אסימפטוטות: האחת,

$$AR_{db} = 0, \quad (0 < \tau\omega < 1) \quad \text{משוואה 36}$$

והשנייה,

$$AR_{db} = -20(\log \tau\omega), \quad (1 < \tau\omega < \infty) \quad \text{משוואה 37}$$

$\tau\omega$	$(AR)_{db}$	$\phi$
$\tau\omega \ll 1$	0	$0^\circ$
$\tau\omega = 1$	-3	$-45^\circ$
$\tau\omega \gg 1$	$-20 \log_{10}(\tau\omega)$	$-90^\circ$

טבלה 2: תגובת תדר בערכים קיצוניים

האסימפטוטה (משוואה 37) אינה אלא ישר היוצא מהנקודה ( $AR = 0, \tau\omega = 1$ ) ושפועו  $-20db/decade$ . התדירות בה נחתכות שתי האסימפטוטות נקראת תדירות הברך ( $\omega_c$ ). תדירות הפינה נתונה על ידי:

$$\tau = 1/\omega_c$$

לפיכך, פונקצית התמסורת המקורבת של חיישן הקירבה,

$$G_f(s) = \frac{1}{s/\omega_c + 1} \quad \text{משוואה 38}$$

כאשר,  $\omega_c = 2\pi \cdot 2000$ .



## נספח ג' מגבר זרם

### דרישות

לצורך קביעת מתח זרם יציאת מגבר הזרם, נניח כי הליבה נעה בתנועה מחזורית  $x(t) = X_m \sin(\omega t)$  בתדירות מקסימאלית של חוג הבקרה  $\frac{rad}{sec} = 942.42 = 2\pi \cdot 150 = \omega$ . מתוך חוק השני של ניוטון, נרשום את מאזן הכוחות במערכת באופן הבא:

$$\begin{aligned} \Sigma F = ma(t) &= m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = m \frac{d^2}{dt^2} (X_m \sin(\omega t)) \\ &= -mX_m \omega^2 \sin(\omega t) \approx 136 \sin(\omega t), [N] \end{aligned}$$

מתוך משוואה 13 ניתן לחשב את הזרם המרבי הנדרש ממגבר הזרם להשגת תזוזה הרמונית בתדירות 150Hz ובאמפליטודה של  $300\mu m$  (המרחק בין הליבה הנעה למיסב), כך:

$$F = \left( \frac{\mu_0 N^2 A_a}{4} \right) \frac{i^2}{x^2} \Rightarrow I_m = \sqrt{\frac{X_m^2 F_m}{c}} = \sqrt{\frac{(300\mu)^2 \cdot 136}{4.5141\mu}} = 1.6466A$$

מתוך משוואה 9 ניתן לחשב את השראות המיסב:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A_a}{2x_0} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{275^2 \cdot 1.9 \times 10^{-4}}{2 \cdot 300\mu} \approx 30mH$$

ובעזרת משוואה 10 ניתן לחשב את מתח המוצא הנדרש ממגבר הזרם, בהתאם לתנועה הרמונית הנתונה:

$$u_L = L \frac{di(t)}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t) \Rightarrow u_{Lmax} = 46.55V$$

המתח הנובע מההתנגדות האוהמית של הסליל הוא כ-2V ולכן הוא מוזנח. בנוסף מוזנח המתח הנובע מתנועת הליבה.

בהתאם לחישוב שהוצג, ובהתאם למשפט הדגימה של Nyquist, נתוני מגברי הזרם יהיו:

- יציאת זרם בתחום 0-2A מבוקרת על-ידי כניסת אות מתח בתחום 0-(-10)V.
- מתח יציאה מגבר זרם  $\pm 80V$ .
- תחום תדר לא פחות מ-1000Hz.
- הפרש מופע לא יותר מ-0.2248msec.

לצורך תכנון חוק הבקרה, נניח כי מגבר הזרם בעל מבנה ליניארי ומסדר ראשון:

$$G_{CD} = \frac{1}{(1/\omega_c)s + 1} e^{-0.2248 \times 10^{-3}s}, \omega_c = 2\pi \cdot 1000$$

נתוני המודל נלקחו מדרישות המגבר.

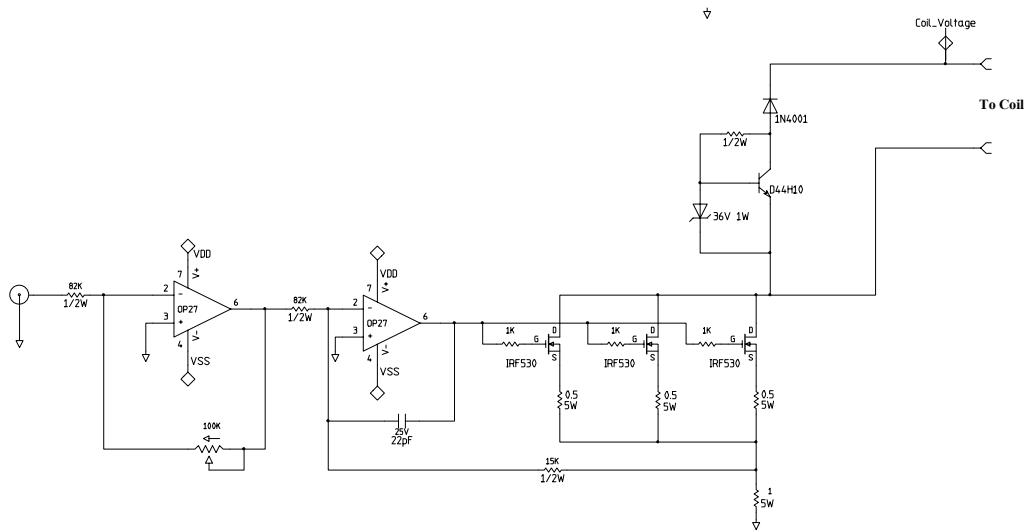
### עקרון הפעולה

כל אחד מסלילי המיסב מוזן ממגבר זרם. המגבר נדרש לספק זרם חד-קוטבי אבל עם יכולת לספק מתח דו-קוטבי לסליל וזאת על מנת לאפשר דעיכה מהירה של הזרם בסליל (נגזרת שלילית של הזרם). בנוסף על מנת להפחית מקורות רעש חשמלי במערכת הניסוי ישנה העדפה לשימוש במגבר זרם ליניארי על פני שימוש במגבר ממותג.





המגבר שתוכנן הוא מגבר זרם ליניארי מבוזר מתח המבקר את הזרם בסליל לפי המתח במבוא. נגד בערך של  $1\Omega$  משמש לחישת הזרם בסליל והמתח המתפתח עליו עובר כאות משוב למבוא השלילי של מגבר השרת. מגבר השרת משנה את מתח המוצא כך שיתקבל הזרם הרצוי בסליל.



איור 43 מגבר זרם – שרטוט חשמלי

המגבר יכול לספק לסליל מתח חיובי של עד מתח הספק ומתח שלילי של עד מתח הפריצה של דיודת הזנר. ניתן לשנות את ערך המתח השלילי המרבי וכך את נגזרת הזרם השלילית המרבית באמצעות שימוש בדיודות זנר שונות. חלק הפסיאודו-זנר של המגבר קיים על מנת לאפשר יצירת מתח דו-קוטבי תוך כדי הגנה על הרכיבים האלקטרוניים במעגל. ברור כי על מנת לגרום לירידת הזרם בסליל, המתח בהדק ה-Drain של הטרנזיסטורים בדרגת ההספק צריך לעלות על מתח הספק (מתח שלילי על הסליל) וכן שכאשר מגבר הזרם מנתק באופן פתאומי את הזרם דרך הסליל, המתח בהדק ה-Drain עשוי להגיע לערך גבוה שעלול לפגוע בטרנזיסטורים בדרגת ההספק. כדי למנוע מצב זה מעגל ה הפסיאודו-זנר מגביל את המתח השלילי על הסליל ופותח מסלול למטען האגור בסליל לזרום דרך הנגד וטרנזיסטור ה-BJT. חלק זה של המעגל מגביל למעשה את המתח בהדק ה-Drain של הטרנזיסטורים למתח הספק ועוד מתח הזנר. כאשר המתח בנקודה זו עולה מספיק, הזרם דרך דיודת הזנר גורם לפתיחת מסלול הולכה לזרם דרך טרנזיסטור ה-BJT. הדיודה המחוברת בין הספק ל-Emitter של טרנזיסטור ה-BJT מונעת מעבר זרם דרך הפסיאודו-זנר בזמן פעולה רגילה כאשר כל הזרם צריך לעבור דרך הסליל.

### שיקולי תכנון

#### חישוב נגזרות מרביות

לדרגת ההספק של המגבר נבחרו טרנזיסטורים מדגם IRF540, עם מתח כשל Drain to Source של 100V ויכולת פיזור הספק מרבי של 150W בטמפרטורת רכיב של  $25^{\circ}\text{C}$ . כאשר באופן בסיסי מתח הסליל מתנהג לפי

$$u_L = L \frac{di(t)}{dt}$$

ומגבלת המתח על הטרנזיסטורים (ולכן על הסליל) היא 100V ניתן להגיע עם השראות סליל נתונה של 30mH לנגזרת שלילית של כ-  $\frac{di(t)}{dt} = 3300 \frac{\text{A}}{\text{sec}}$  בערך כפול מהערך הנדרש. נגזרת הזרם החיובית נקבעת על ידי מתח הספק ולכן ניתן למשל לקבוע את מתח הספק ל-47V ולבחור דיודת זנר עם מתח של 30V ולקבל מתח שלילי של



77V העולה על הדרישה. יש להקפיד לא להעלות את מתח הספק מעל ל-70V על מנת לא לעבור את מגבלת המתח על הטרנזיסטורים ומומלץ לעבוד עם מתח ספק נמוך ככל האפשר על מנת להקטין את התחממות דרגת ההספק.

#### דרגת ההספק

במגבר זרם ליניארי מתבצעת בקרת הזרם באמצעות שינוי ההתנגדות של אלמנט התנגדותי הנמצא במסלול הזרם בשונה ממגבר ממותג בו השליטה על הזרם (הממוצע) נעשית באמצעות מיתוג בתדר גבוה של הזרם. מכיוון שבמגבר ליניארי זרם כל העת הזרם דרך ההתנגדות של אלמנט הבקרה, מתפזר הספק דרך אלמנט זה והוא מתחמם. בחישוב גס אם לוקחים במסלול הזרם התנגדות סליל אופיינית של  $1.5 - 2\Omega$  ועוד התנגדות של נגד המשוב בערך של  $1\Omega$  יחד עם מתח ספק של 60V נקבל בזרם שיא של 2A הספק של 110W המפוזר בדרגת ההספק.

$$P = IV = 2 \cdot (60 - 2 \cdot (1.5 + 1)) = 110W$$

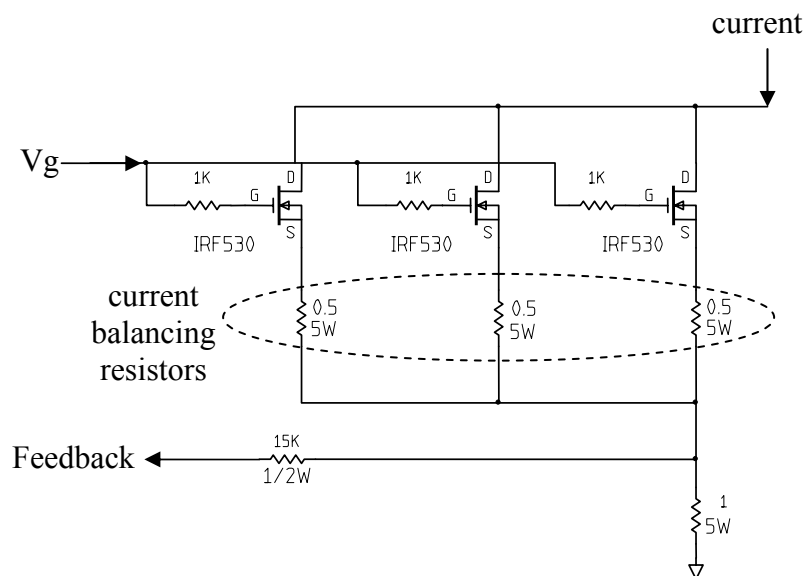
אם נבצע חישוב לפי זרם נומינלי של 300mA נקבל הספק של כ-18W המפוזר בדרגת ההספק.

$$P = IV = 0.3 \cdot (60 - 0.3 \cdot (1.5 + 1)) \approx 17.77W$$

פיזור הספק בסדרי גודל כאלו בדרגת ההספק יגרום לחימום משמעותי של הרכיבים ועשוי לגרום נזק לרכיבים. על מנת להקטין את ההספק המפוזר דרך רכיב בודד, מורכבת דרגת ההספק משלושה טרנזיסטורים המחוברים במקביל כך שהזרם מתחלק בין שלושת הטרנזיסטורים. חיבור כזה מקטין את הזרם ברכיב בודד לשליש מהזרם הכולל כך שגם ההספק המפוזר לרכיב בודד בשיא יורד לערך של כ-36.7W.

בחיבור מקבילי של טרנזיסטורים כגון זה המבוצע כאן קיימת הנחה תיאורטית שהטרנזיסטורים זהים בתכונותיהם ולכן הזרם דרכם יהיה זהה בזמן פעולת המגבר. למעשה קיים פיזור משמעותי בתכונות הטרנזיסטורים שמחריפה בגלל אפקטים של בריחה תרמית. לכן התכנון משלב מבנה מאזן זרם (איור 44) המפצה על הפיזור בתכונות הטרנזיסטורים באמצעות חוג משוב שלילי המשפיע על  $V_{gs}$  לכל טרנזיסטור בנפרד.

למעשה שלושת הטרנזיסטורים מקבלים אותו מתח בקרה (gate) ממגבר השרת, ליצירת משוב פרטי לטרנזיסטור, חובר נגד קטן בטור לרגל ה-source של כל אחד מהטרנזיסטורים. עלייה בזרם בטרנזיסטור מעלה את המתח על נגד ה-source ולכן גם את מתח ה-source. מכיוון שמתח ה-gate נשאר קבוע  $V_{gs}$  של הטרנזיסטור יורד והזרם דרכו יורד בהתאמה. גודל נגד ה-source קובע את ההגבר של חוג זה.

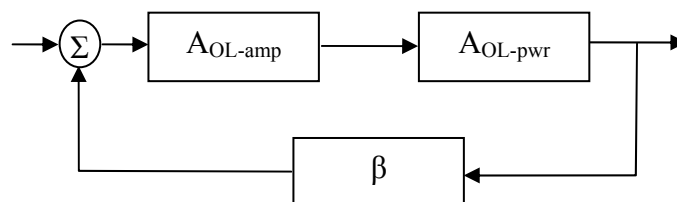


איור 44 מאזן זרם בדרגת ההספק



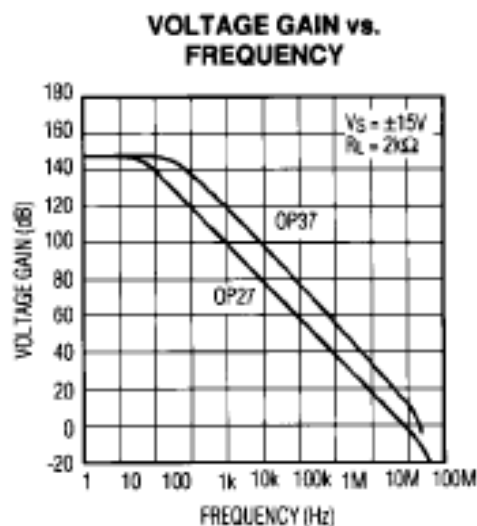
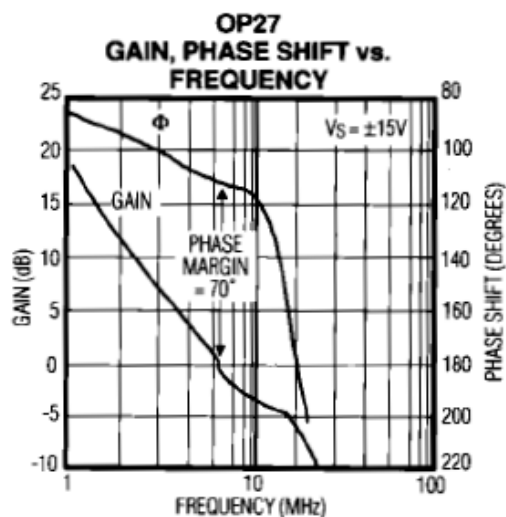
### הגבר ורוחב סרט

תגובת התדר של המגבר מורכבת משלושה גורמים, הגבר חוג פתוח של מגברי השרת  $A_{OL-amp}$ , הגבר חוג פתוח של דרגת ההספק  $A_{OL-pwr}$  והגבר חוג המשוב  $\beta$  (איור 45).



איור 45 תגובת תדר, תאור דיאגרמת מלבנים

נתעלם בניתוח זה מתגובת התדר של דרגת תיאום ההגבר (מגבר הכניסה), ניתן לעשות זאת מכיוון שדרגה זו אינה תלויה במשוב המוצא, היא יציבה ורוחב הסרט גדול משמעותית מהנדרש למגבר השלם. למגבר השרת שנבחר OP27 רעש נמוך ומכפלת הגבר רוחב סרט של 8MHz, תכונות ההופכות אותו מתאים ליישום.



איור 46 OP27 נתוני תגובת תדר

בעוד שנתונים עבור תגובת התדר של מגבר השרת קל למצוא בדפי המפרט (איור 46), נתונים עבור תגובת התדר של דרגת ההספק אינם מופיעים בדפי מפרט. לכן, יש לאמת את התכן התבצע בעזרת סימולציה ב-Spice הכוללת גם את דרגת ההספק.



## נספח ד'      טבלת אפליקציות בשלבי הניסוי