

פיתוח מערכת סימולציה לבקרת סרוו לייצוב אינרציאלי של מערכת נשק כנגד הפרעות קרקע



מגישים: אורי מרקוביץ' סבי אסקוב
בהנחיית ד"ר גבי דוידוב

תוכן עניינים

1. מבוא

- 1.1 תקציר.....3
- 1.2 רקע ומוטיבציה.....3
- 1.3 עבודות קודמות בנושא.....3
- 1.4 רשימת איורים.....4

2. רקע תיאורטי

- 2.1 מושגי יסוד.....5
- 2.2 מבנה עמדת הנשק.....6
- 2.3 מודל המולקולות.....7-8

3. יישום הפרויקט

- 3.1 בניית הסימולציה.....9-10
- 3.2 הוראות הרצה של המודלים.....11
- 3.3 אימות המודלים בתחום התדר.....11-13
- 3.4 סינתזה של בקרים לאופני כח וייצוב.....14-18
- 3.5 אופטימיזצית התכן להשגת ביצועי כינון וייצוב כנגד הפרעות קרקע מדודות
ואלמנטים לא לינארים.....19-23

4. סיכום

- 4.1 מסקנות.....24
- 4.2 המלצות.....24

1. מבוא

1.1 תקציר

בפרויקט זה עסקנו בבניית סימולציה של עמדת נשק לא מאויישת ותכן בקרים לייצוב עמדת הנשק כנגד הפרעות קרקע. עמדת הנשק מורכבת מכמה מכלולים המחוברים יחד ליצירת העמדה המלאה והבקרה מתבססת על תפוקות מחיישנים שנמצאים בחלק מהמכלולים הללו. העמדה מורכבת על רכב גלגלי או רכב עם זחל. בפרויקט הושם דגש מיוחד על התמודדות עם הפרעות קרקע, שהינן בעלות אלמנט של אי ודאות, כמו עם הפרעות לא לינאריות נוספות מסוג חיכוך ואי-איזון. השתמשנו בטכניקות בקרה קלאסיות לשם עמידה במפרט הנדרש. הפרויקט מומש במטלב ובסימולינק.

1.2 רקע ומוטיבציה

פרויקט מסוג זה מהווה בדיקת היתכנות לפיתוח עמדה כפי שנדרש ע"י הלקוח. חברת אלביט מערכות מפתחת עמדות נשק אשר מורכבות על כלי רכב שונים וחלק מתהליך עבודה יעיל ונכון הוא סימולציה מדויקת ככל האפשר של העמדה המתוכננת לפני מעבר לשלב ניסויי השטח. לאחר ניסויי שטח ניתן לשפר את ביצועי הסימולציה ומכאן לשפר את תכן המערכת. בנוסף עמדות הנשק נבדלות זו מזו באלמנטים ספציפיים (סוג נשק ותחמושת למשל) אך דומות במבנה ובמכלולים, ומכאן שניתן יהיה להשתמש באותה סימולציה עם התאמות מסוימות עבור תכנון של עמדות נשק חדשות ופיתוח בקרים מתאימים עבורן.

1.3 עבודות קודמות בנושא

Selected topics on the synthesis and analysis off all-electric heavy gun/turret drive control systems, Dr. Gavriel Davidov

מאמר זה סייע לנו בהבנה כיצד יש להתמודד עם בעיית החיכוך ובעיית האי-איזון בעומס, שתיהן תופעות לא-לינאריות שמעלות את רמת הסיבוכיות של המערכת ושל תכן הבקרה.

מאחר ומלבד עבודה זו לא נעשו עבודות דומות בנושא, השתמשנו בידע שצברנו בקורס בקרה אחד עבור מימוש הבקרים השונים – קידום/פיגור, PI, NOTCH כמו גם עמידה בתנאי עודף הגבר, עודף פאזה ושגיאת מצב מתמיד.

בפרויקט המשך ובפרויקטים דומים ניתן יהיה להשתמש בטכניקות בקרה מודרניות שנלמדות בקורס בקרה 2 ושאלנו לא השתמשנו בהן.

1.4 רשימת איורים

- איור 1: עמדת הנשק
- איור 2: מודל המולקולות
- איור 3: מולקולת סימולינק בסיסית
- איור 4: מערכת שלמה בציר הגבהה
- איור 5: מערכת שלמה בציר צידוד
- איור 6: מודל סימולינק לאי-איזון בעומס באופן כח
- איור 7: מודל סימולינק לאי-איזון בעומס באופן ייצוב
- איור 8: אופן כח בציר הגבהה
- איור 9: אופן ייצוב בציר צידוד
- איור 10: אופן כח בציר צידוד
- איור 11: אופן ייצוב בציר הגבהה
- איור 12: תמסורת בקר בציר הגבהה
- איור 13: תמסורת בקר בציר צידוד
- איור 14: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר הגבהה אופן כח
- איור 15: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר הגבהה אופן ייצוב
- איור 16: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר צידוד אופן כח
- איור 17: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר צידוד אופן ייצוב
- איור 18: מימוש חיכוך קולוני בסימולינק
- איור 19: מימוש גוזר בסימולינק
- איור 20: מהירות הפרעת קרקע כנגד מהירות הפוד בציר הגבהה
- איור 21: זווית סטיית הפוד מהזווית הרצויה בציר צידוד
- איור 22: מהירות הפרעת קרקע כנגד מהירות הפוד בציר צידוד
- איור 23: מהירות הפרעת קרקע כנגד מהירות הפוד בציר צידוד
- איור 24: תגובת מדרגה בציר הגבהה אופן כח ואופן ייצוב
- איור 25: תגובת מדרגה בציר צידוד אופן כח ואופן ייצוב

2. רקע תיאורטי

2.1 מושגי יסוד

בקרת סרוו – בקרה המתבססת על תפוקות מחיישנים לשמור על מוצא קבוע. בעמדת הנשק המוצא שיש לשמור עליו קבוע הוא מיקום קנה הנשק, והחיישנים הינם ג'ירוסקופים וטכומטרים.

ג'ירוסקופ – חיישן אשר מודד זווית בין גוף בתנועה לבין כדור"א ומפיק מהירות זוויתית ביחס לכדור"א. יש לנו שני ג'ירוסקופים במערכת שאיתם אנחנו סוגרים חוגי בקרה, אחד על הנשק ושני על הפדסטל. בנוסף קיימים שני ג'ירוסקופים בפדסטל אשר מאפשרים לנו למדוד את השפעת הקרקע על זווית הרכב וכך לתקן את ההשפעה הזו על כינון הנשק באופן ייצוב.

טכומטר (Shaft Encoder) – חיישן אשר מודד מהירות זוויתית יחסית. במערכת יש שני טכומטרים, אחד על הנשק ושני על הפדסטל אשר מודדים מהירות בין הרכיב עליו הם מותקנים לבין הרכב על יושבת מערכת הנשק. יש לנו שני טכומטרים במערכת, אחד על הנשק ושני על הפדסטל.

מד תאוצה (Accelerometer) – חיישן המשמש למדידת תאוצה קווית. הפרעות הקרקע בניסוי השטח נמדדו ע"י מדי תאוצה כחלק מיחידה חיצונית (IMU) שהורכבה על עמדת הנשק בעת ביצוע הניסוי בשטח.

אופן כח – כינוי לאופן הפעולה בו מפעיל המערכת מסיט את הנשק כדי לכוון על מטרה. באופן זה המערכת לא נמצאת בתנועה. אופן כח מתבסס על תפוקות הטכומטרים.

אופן ייצוב – כינוי לאופן הפעולה בו הנשק מכוון על מטרה מסוימת והמפעיל מעוניין להישאר מכוון עליה. אין צורך בהתערבות המפעיל והנשק נשאר מכוון על המטרה. באופן זה המערכת בתנועה. אופן ייצוב מתבסס על תפוקות הג'ירוסקופים.

2.2 מבנה עמדת הנשק

עמדת הנשק מורכבת ממספר גושי אינרציה (מכלולים). גושי האינרציה אליהם התייחסנו הם:

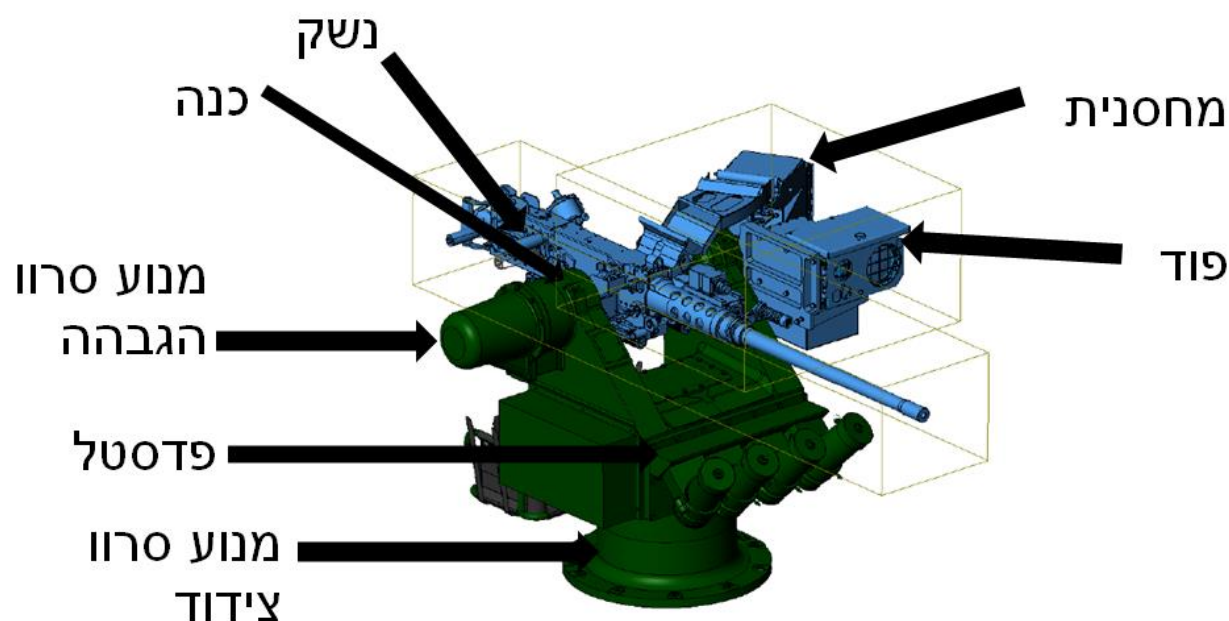
פוד – מכלול האמצעים האופטיים של העמדה.

פדסטל(צריח) – בתוכו יושב מנוע שמסובב את המערכת בציר צידוד.

כנה – מכלול שמחובר לצריח ועליו יושב הנשק.

נשק – כלי ירי, בעמדת הנשק הזו מדובר במק"כ.

בעמדה זו מידלנו את המחסנית כחלק מהפוד ולא התייחסנו אליה כגוש אינרציה נוסף, זאת לאור העובדה שהן ממוקמות זו ליד זו. כמובן שהמחסנית יכולה להיות בעלת השפעה משמעותית על העמדה, בעיקר לאור העובדה שהיא בעלת מסה משתנה בעקבות הירי.

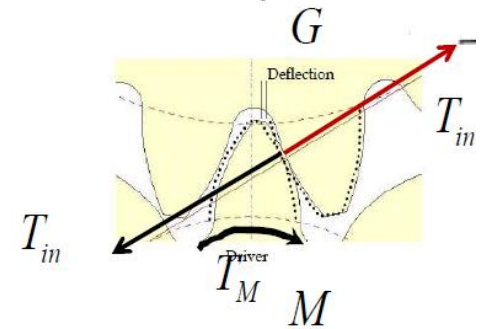
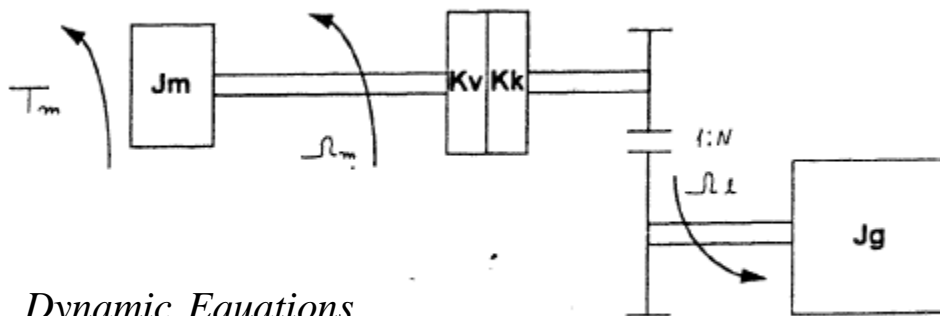


איור 1: עמדת הנשק

2.3 מודל המולקולות

כפי שציינו קודם, במערכת זו אנו מתייחסים אל גושי האינרציה המרכזיים במערכת. כעת נסביר כיצד מידלנו את המערכת השלמה ואת יחסי הגומלין בין המכלולים.

גוש אינרציה מאופיין ע"י מומנט, אשר נמדד ביחידות של *Newton-meter*. כל שני גושי אינרציה שכאלה ניתן למדל ע"י מכלול מניע ומכלול מונע והדינמיקה ביניהם מאופיינת ע"י קפיץ ומרסן. את המומנטים של כל מכלול קיבלנו מאנשי המכניקה של אלביט מערכות.



Dynamic Equations

$$(1) T_{in} = J_G \frac{d\Omega_G}{dt}$$

$$(2) T_M = I_C K_T$$

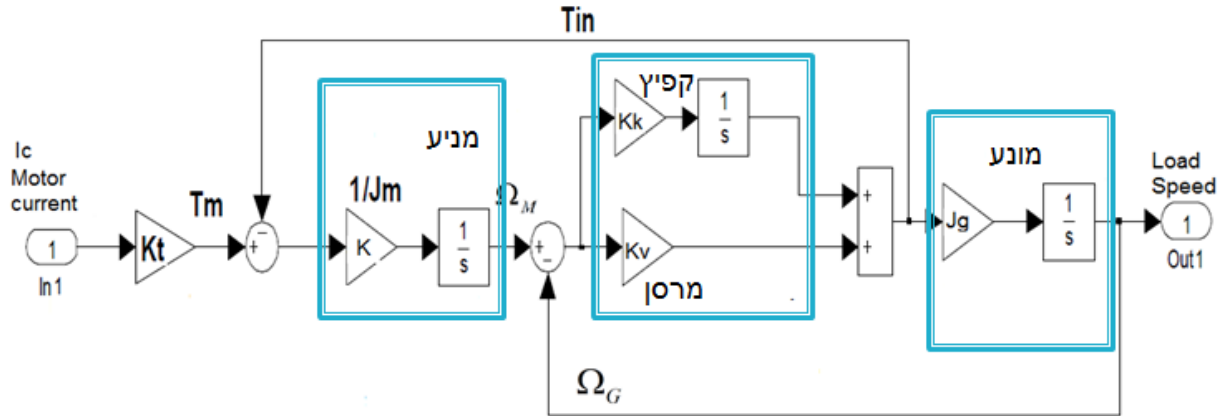
$$(3) T_M - T_{in} = J_M \frac{d\Omega_M}{dt}$$

$$(4) T_{in} = K_K \int (\Omega_M - \Omega_G) dt + K_V (\Omega_M - \Omega_G)$$

איור 2: מודל המולקולות

המשוואות הנ"ל אשר מתארות את הדינמיקה של שתי המולקולות הן משוואות ניוטון. משוואות 1 ו-3 מתארות החוק השני של ניוטון: מומנט = תאוצה זוויתית • מומנט אינרציה. משוואה 4 מתארת את חוק הפעולה והתגובה. משוואה 2 אינה קשורה לחוקי ניוטון ומתארת את הקשר בין זרם המנוע לבין מומנט המנוע. K_V, K_K הם מקדמי הקשיחות והקפיציות של המולקולה ומבטאים את הקשר בין שני גושי האינרציה. מקדמים אלו אינם ידועים ואותם אנחנו נצטרך להעריך מתוך מדידות שבוצעו בשטח. אם למשל נקבע כי מקדם הקשיחות הוא אינסוף, למעשה אנחנו מקבעים את שני גושי האינרציה זה לזה והם מתנהגים כגוף אחד.

הקשרים המתמטיים לעיל באים לידי ביטוי במולקולת הסימולינק הבאה:



איור 3: מולקולת סימולינק בסיסית

מתוך המשוואות הדינמיות ניתן לקבל את התמסורות הבאות:

תמסורת מזרם המנוע למהירות ציר מנוע

$$\frac{\Omega_M(s)}{I_C(s)} = \frac{K_T}{S(J_M + J_G)} \cdot \frac{1 + S \frac{K_V}{K_K} + S^2 \frac{J_G}{K_K}}{1 + S \frac{K_V}{K_K} + S^2 \frac{1}{K_K} \frac{J_G J_M}{J_M + J_G}}$$

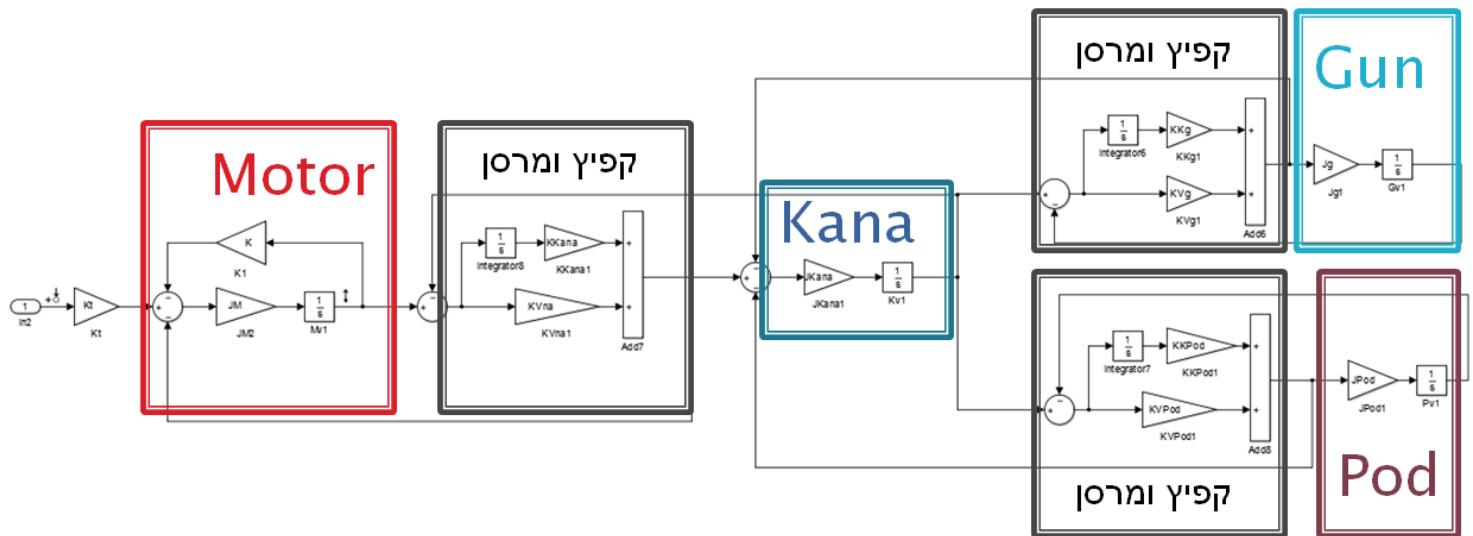
תמסורת מזרם המנוע למהירות העומס

$$\frac{\Omega_G(s)}{I_C(s)} = \frac{K_T}{S(J_M + J_G)} \cdot \frac{1 + S \frac{K_V}{K_K}}{1 + S \frac{K_V}{K_K} + S^2 \frac{1}{K_K} \frac{J_G J_M}{J_M + J_G}}$$

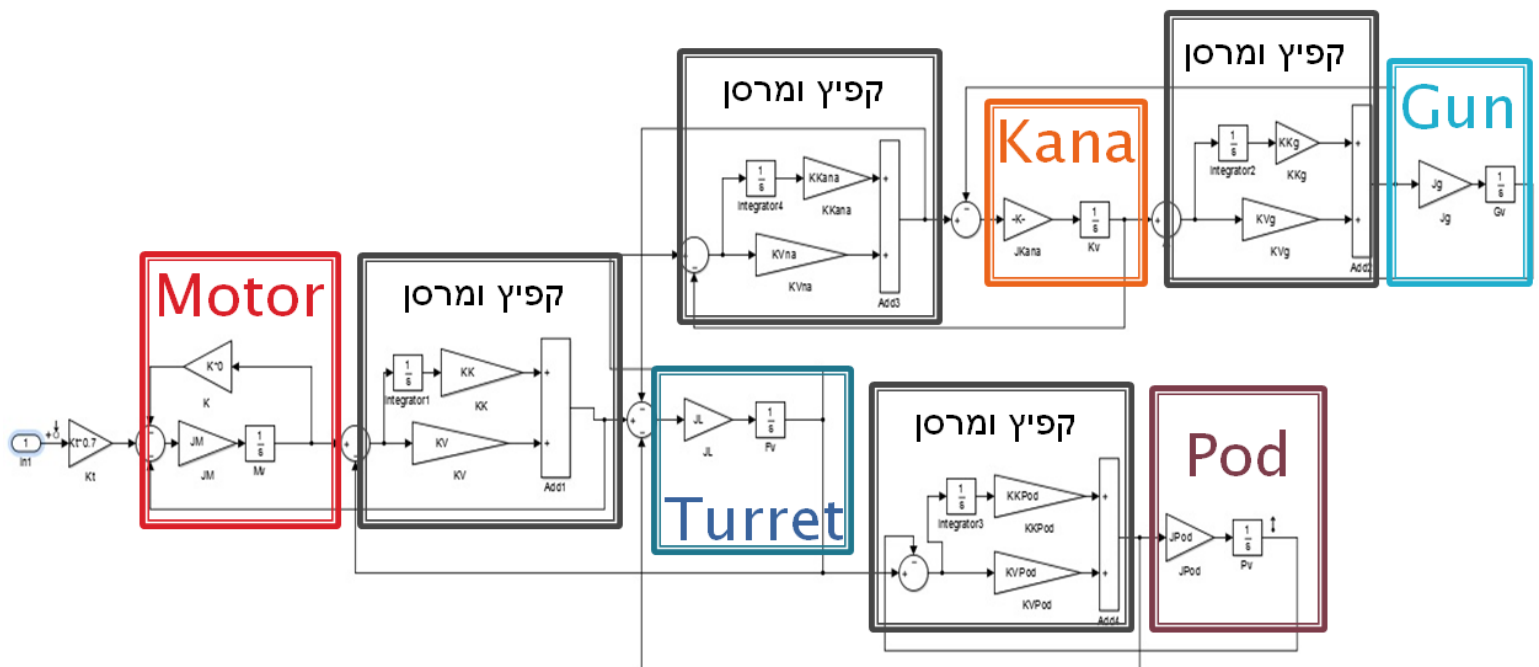
3. יישום הפרויקט

3.1 בניית הסימולציה

על בסיס מולקולה אחת נבנה כעת את המודל השלם עבור כל ציר בנפרד, בהתאם לדינמיקה של העמדה ושל ציר הסיבוב.



איור 4: מערכת שלמה בציר הגבהה

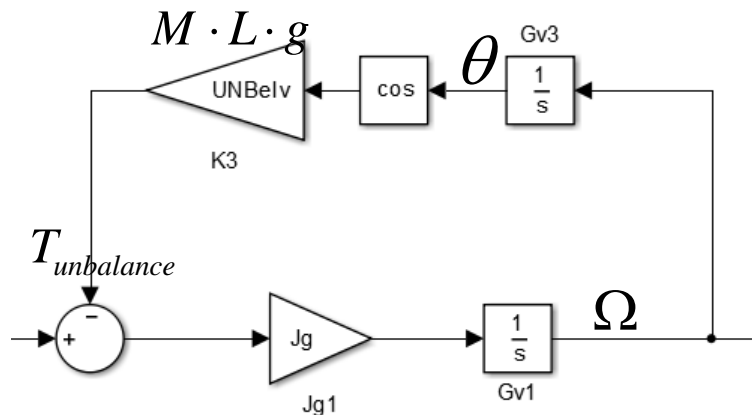


איור 5: מערכת שלמה בציר צידוד

לאחר שבנינו את המערכת השלמה לכל ציר, התחלנו לשערך את ערכי הקשיחות והקפיציות של כל מולקולה שייתנו לנו את התוצאות הקרובות ביותר לאלו שהתקבלו במדידות בניסוי השטח.

כדי לשפר את איכות הסימולציה הכנסנו אליה אלמנט לא לינארי של אי-איזון בעומס. כלומר השפעה של כוחות על מיקום קנה הנשק. גם כאן יש להתייחס להשפעה בכל ציר בנפרד, ובנוסף להתייחס לכל מוד פעולה בנפרד- הגבהה וייצוב.

בציר הגבהה באופן כח האי-איזון בעומס ממודל ע"י $M \cdot L \cdot \cos(\theta) \cdot (g + a)$ כאשר M היא מסת האי-איזון, L האורך של הנשק, θ הזווית של הנשק ביחס לרכב עליו העמדה יושבת, g תאוצת הכובד, a תאוצת הרכב. המידול בסימולינק:

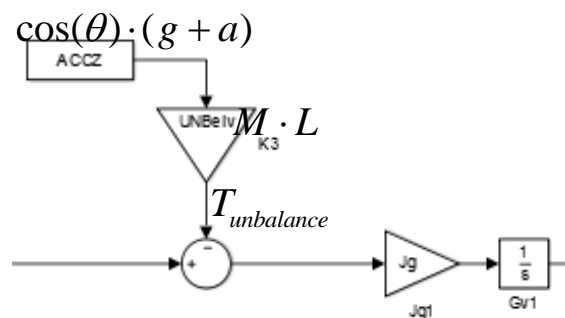


איור 6: מודל סימולינק לאי-איזון בעומס באופן כח

בציר צידוד באופן כח המידול זהה למעט העובדה שכעת אנו בציר γ ולכן יש לקחת את סינוס הזווית כדי לקבל את עוצמת האי-איזון $M \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot (g + a)$

באופן כח הרכב לא נע לכן $a = 0$. אנו ממדלים בסימולינק את האי-איזון ע"י אינטגרטור על מהירות הנשק שתיתן לנו את הזווית, וכעת נוכל בקלות לקבל את הביטוי הרצוי שייתן לנו את מומנט האי-איזון ואותו אנו מזינים לנשק.

באופן ייצוב הרכב בתנועה. ה-IMU מספק לנו כבר את $\cos(\theta) \cdot (g + a)$ ולכן נותר להכפיל רק ב- ML ולקבל את מומנט האי-איזון ולהזין אותו לנשק. גם כאן הצירים השונים נבדלים זה מזה רק בציר מדידת התאוצה והמודל בסימולינק יהיה:



איור 7: מודל סימולינק לאי-איזון בעומס באופן ייצוב

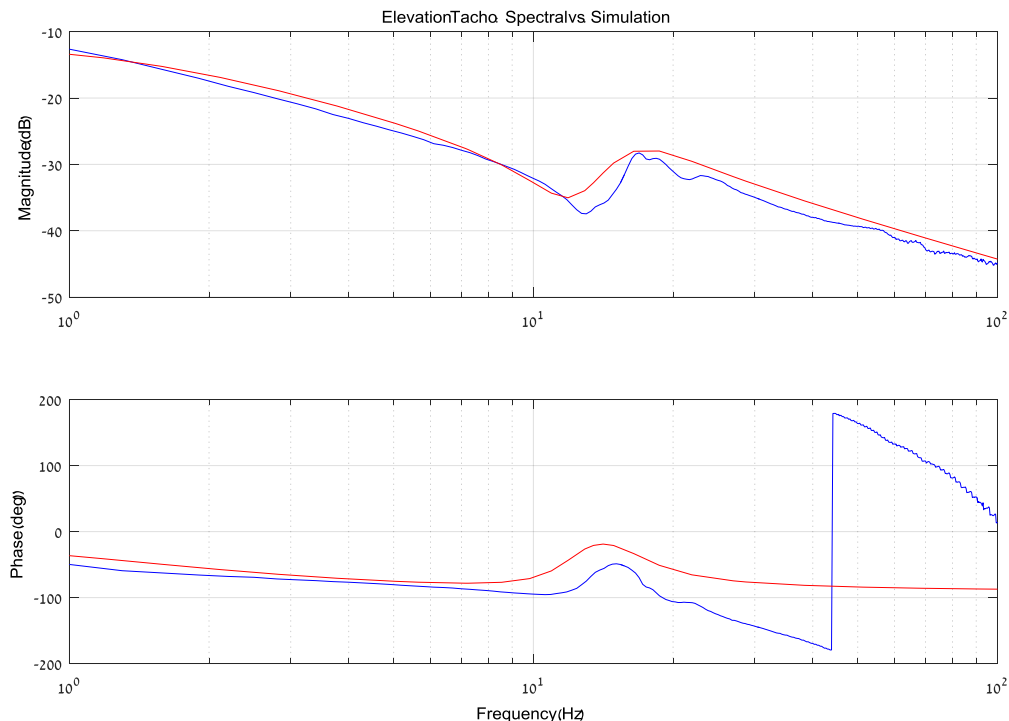
3.2 הוראות הרצה של המודלים

ישנם שני מודלים בסימולינק: צידוד אופן ייצוב/כח – Traverse.slx הגבהה אופן ייצוב/כח – Elevation.slx. לפני הרצתם יש לוודא שיש ב-workspace את הקבצים gyroY.mat, gyroZ.mat, ACCZ.mat, ACCY.mat. יש לשים לב לסגירת החוגים: באופן כח סוגרים חוג על המנוע והטאכו ובאופן ייצוב סוגרים חוג על הפוד והגיירו. בציר הגבהה יש רק בקר אחד אבל בציר צידוד יש שני בקרים ולכן חשוב לשים לב לבקר. ישנם ארבעה סקריפטים להרצת ה-data מניסוי השטח ושמותיהם init_gyro_elv.m, init_tacho_trv.m, init_gyro_trv.m, init_tacho_elv.m. **כל המודלים, הקוד והחומר הרלוונטי נמצאים אצל אורלי מהמעבדה לבקרה.

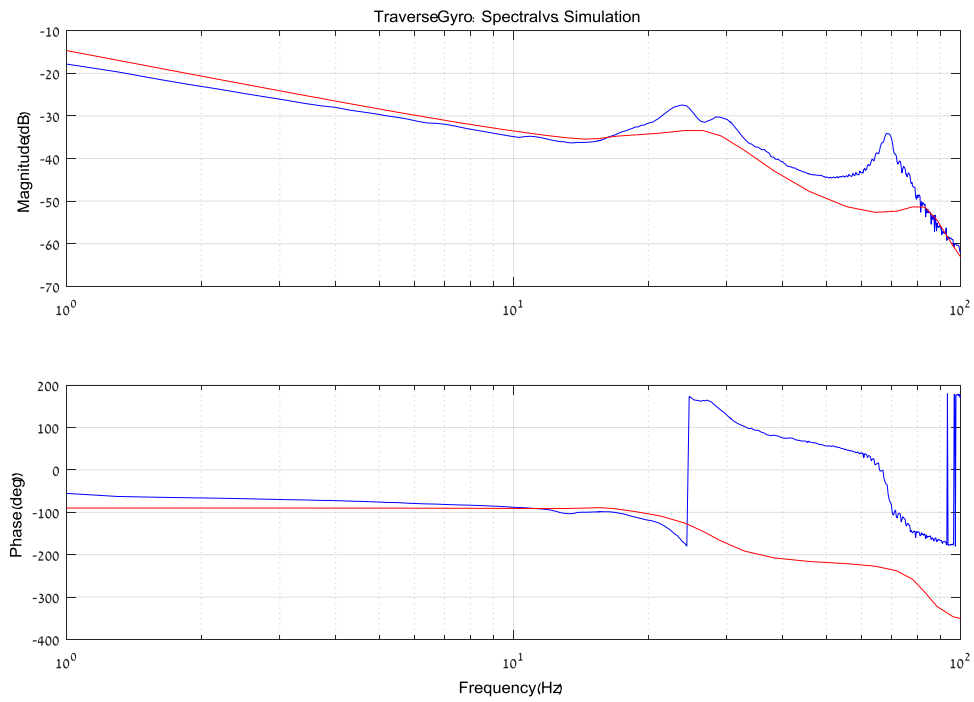
3.3 אימות המודלים בתחום התדר

סיום השלב הקודם משמעו הגעה לסימולציה אשר נותנת תוצאות קרובות ככל האפשר לתוצאות שנמדדו בניסוי השטח שבוצע לעמדה. בכדי להגיע להתאמה גבוהה הושם דגש על השגת רזוננסים ואנטי-רזוננסים כפי שהופיעו בניסויים.

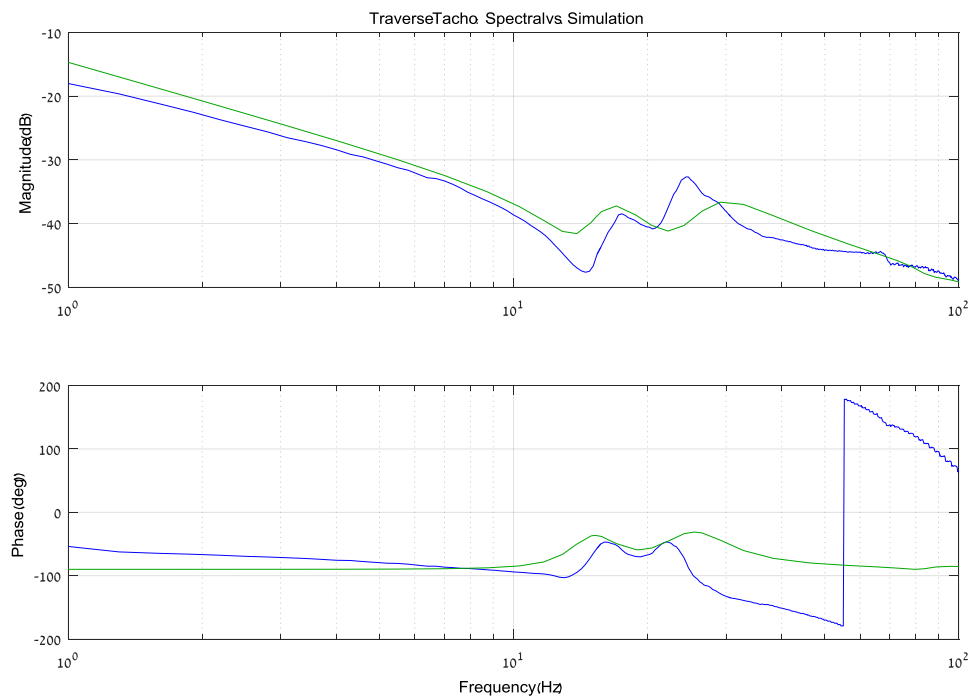
התוצאות שהתקבלו בסימולציה לעומת הנתונים המדודים:
בכחול – תמסורות מדודות **באדום** **וירוק** – תמסורות מהסימולציה



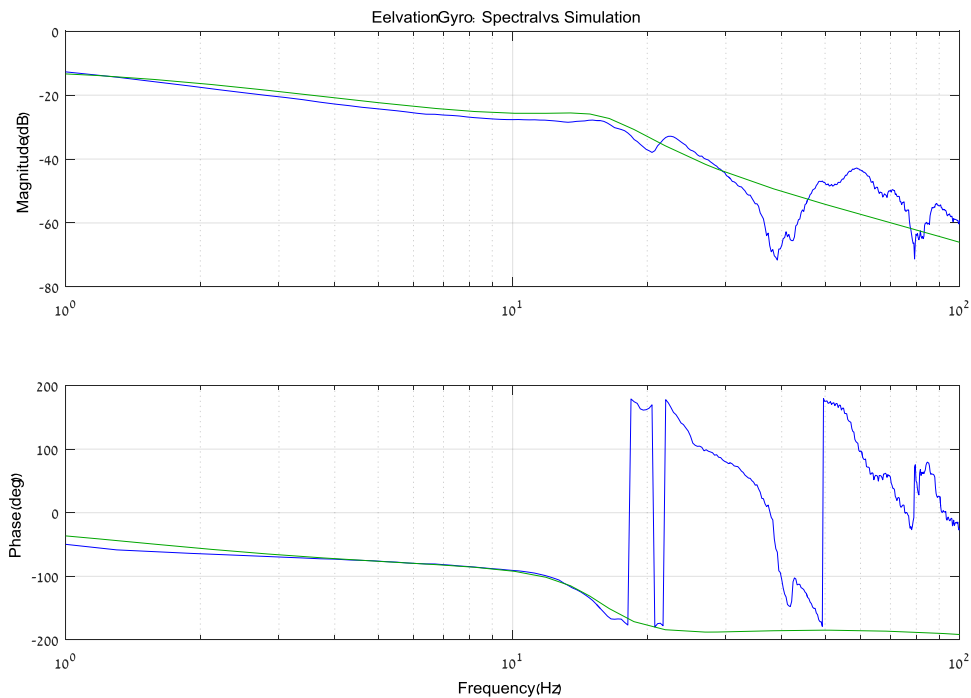
איור 8: אופן כח בציר הגבהה. יש התאמה



איור 9: אופן ייצוב בציר צידוד. יש התאמה עד 20Hz



איור 10: אופן כח בציר צידוד. יש התאמה חלקית



איור 11: אופן ייצוב בציר הגבהה. יש התאמה עד 20Hz

אנו יכולים לראות התאמה טובה מאוד בין התמסורות המדודות לבין התמסורות בסימולציה עד תדר של 20Hz ולאור העובדה שהמערכת עובדת בתדרים עד 10Hz אלו תוצאות משביעות רצון.

נשים לב כי בשני הצירים באופן ייצוב התוצאות המדודות החל מתדר של כ- 20Hz לא מתנהגות לפי המשוואה התיאורטית וגם לא באופן שניתן להבחין בתופעות מוכרות (קוטב, אפס, אינטגרטור וכו'). זה נוסע מהעובדה שאופן זה מתבסס על הגיירוסקופים אשר ממוקמים בפוד, כלומר רחוק יחסית מהמנוע והדינמיקה בין המנוע לבינם מורכבת מאוד. לעומת זאת באופן כח, אשר מתבסס על הטאכומטרים שממוקמים בציר המנוע ניתן לראות התנהגות אשר תואמת את המשוואה התיאורטית וניתן לראות את ההתנהגות שמתאורת בה בבירור – קטבים ואפסים קומפלקסיים ואינטגרטור.

3.4 סינתזה של בקרים לאופני כח וייצוב

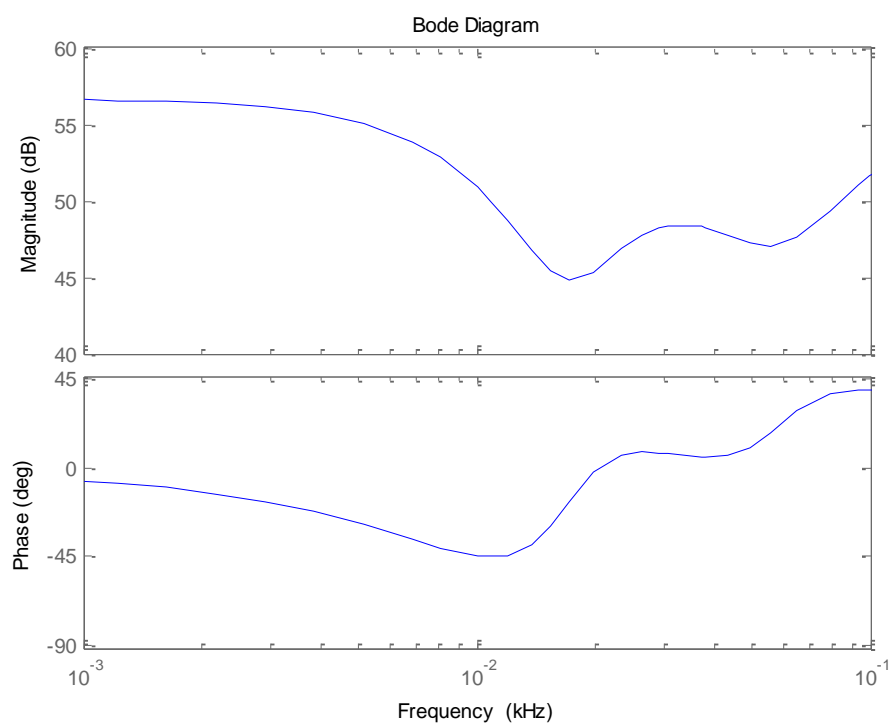
בשלב זה נעזרנו ב-SISOTOOL, כלי מובנה במטלב שמסייע בתכן ובניית בקרים. שמנו דגש על דרישות הביצוע שקיבלנו וביטול הרזוננסים במערכת. אנו מציגים כאן את התמסורות שקיבלנו בסימולציה כמובן ולא את אלה שנמדדו בשטח. התנאים שהיינו צריכים לעמוד בהם:

1. שגיאת מצב מתמיד לקלט ריצה תהיה אפס – ניתן לראות בכל תמסורת ח"פ כי יש אינטגרטור בהתחלה ומכיוון שבמערכת כבר יש אינטגרטור נוסף אז לקלט ריצה נקבל שגיאת מצב מתמיד אפס.
2. תדר חצייה מעל 5Hz
3. עודף פאזה של 40Deg
4. עודף הגבר של 7dB
5. הגבר מערכת בח"פ בתדר של 1Hz מעל 20dB

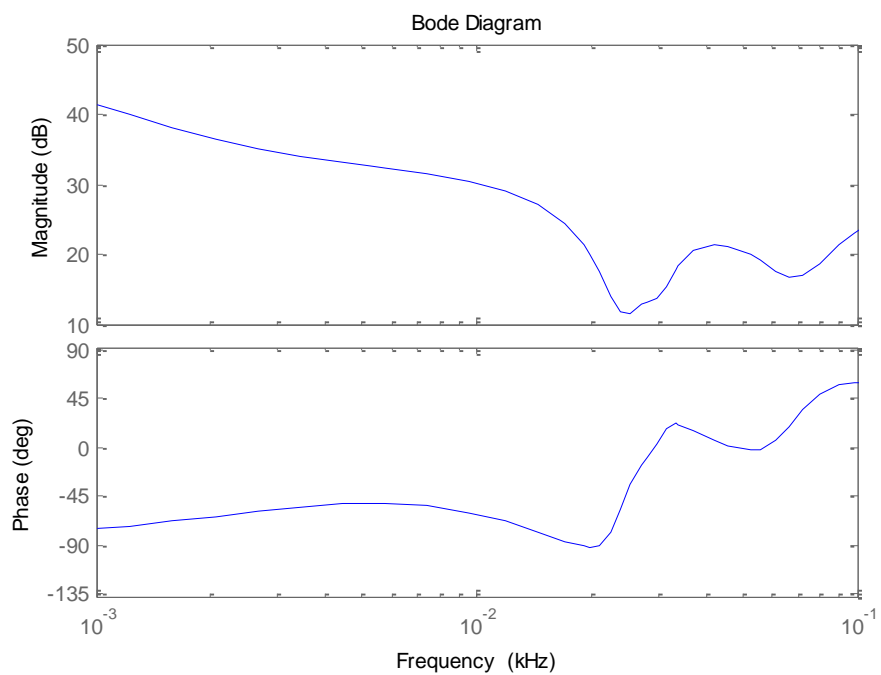
השתמשנו במספר טכניקות ובקרים כדי להשיג את המפרט הנדרש. מסנני NOTCH שימשו אותנו לביטול הרזוננסים והאנטי-רזוננסים. השתמשנו בבקרי PI כדי להגדיל את ההגבר עבור עמידה בסעיף 5, עמידה בתנאי זה גוררת את הגדלת תדר החצייה שתואם גם את הדרישה של סעיף 2 אך מקטין את עודף הפאזה ועודף ההגבר ולכן עלול לפגוע בעמידה בסעיפים 3 ו-4, ולכן כדי לעמוד בהם השתמשנו בבקרי קידום/פיגור כדי לשפר PM ו-GM.

חשוב לציין כי נדרש לתכנן 4 בקרים, אחד לכל ציר ואופן פעולה, אך אנחנו הצלחנו לתכנן בקר אחד לכל ציר שיוכל לעמוד בפרמטרים הנדרשים עבור שני האופנים. הבקרים מורכבים למעשה ממספר תמסורות שמטרתן להנחית או להגביר תופעות מסוימות וניתן לראות כי הקטבים והאפסים של התמסורות השונות קרובים מאוד לעיתים, אך התוצאה הסופית נותנת את התוצאות הרצויות.

**ציר X בתמסורת הבקרים הוא ב-KHz ולא ב-Hz מסיבות טכניות. מוצגות התמסורות מ-1 Hz עד ל-100Hz.

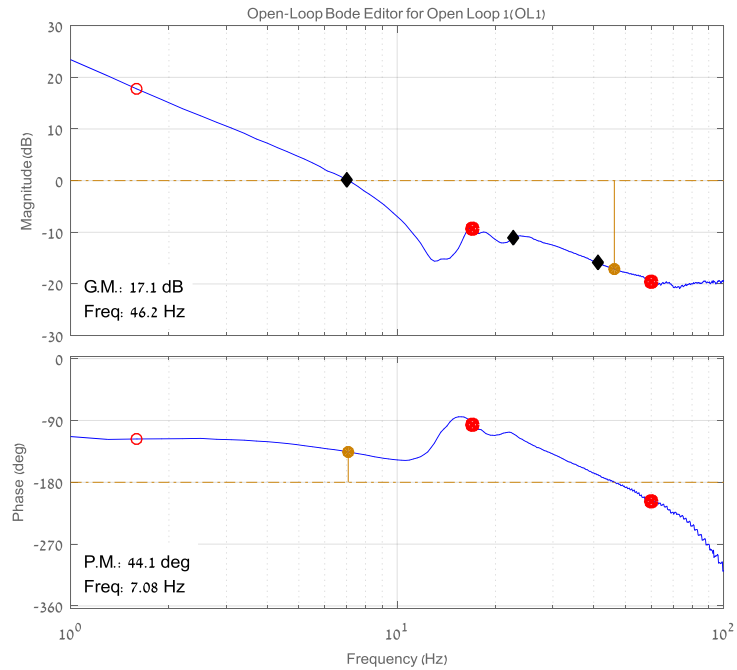


איור 12: תמסורת בקר בציר הגבהה

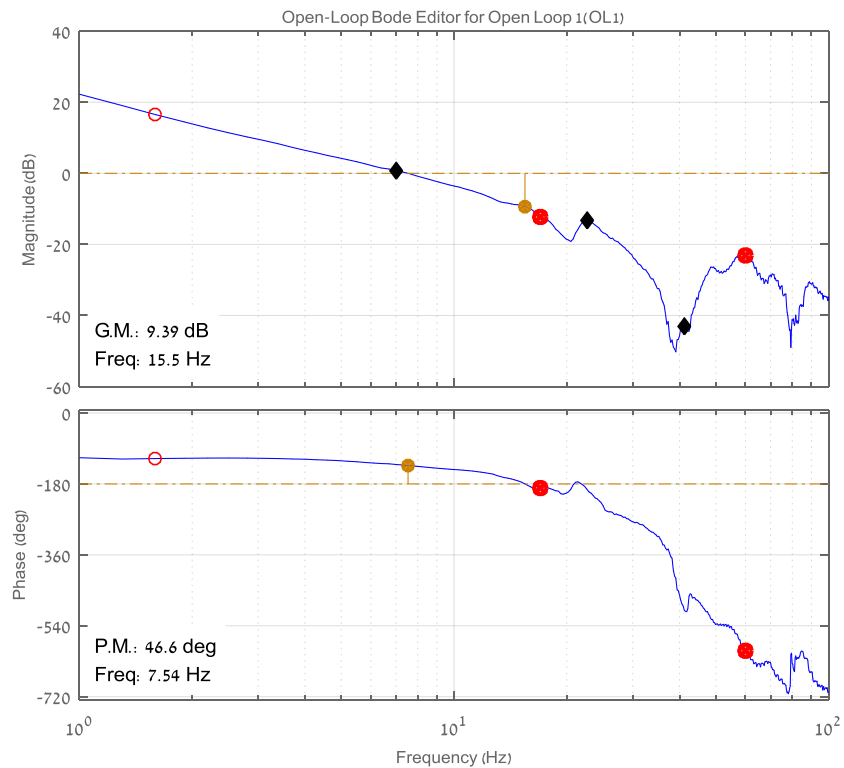


איור 13: תמסורת בקר בציר צידוד

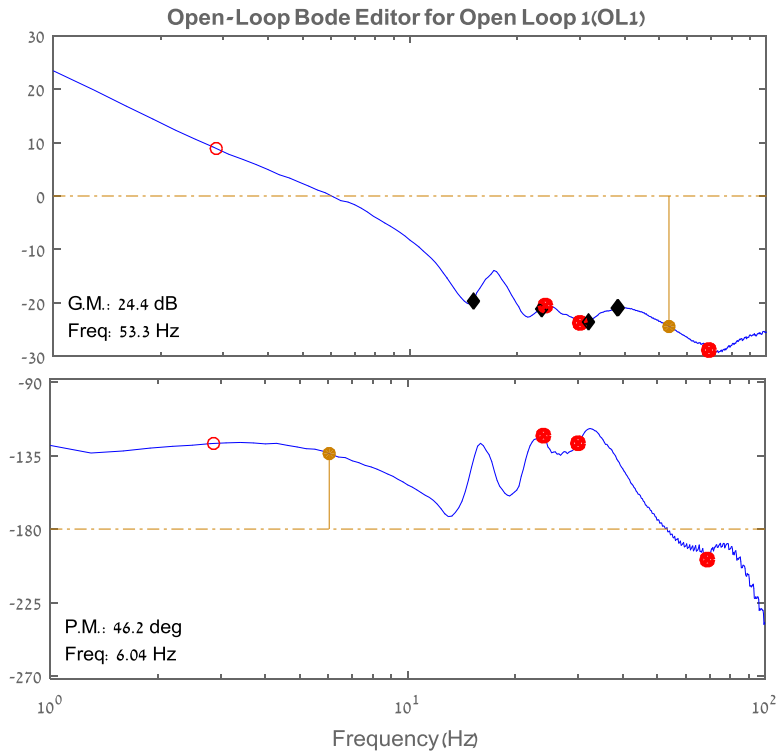
תמסורות בחוג פתוח עם הבקרים



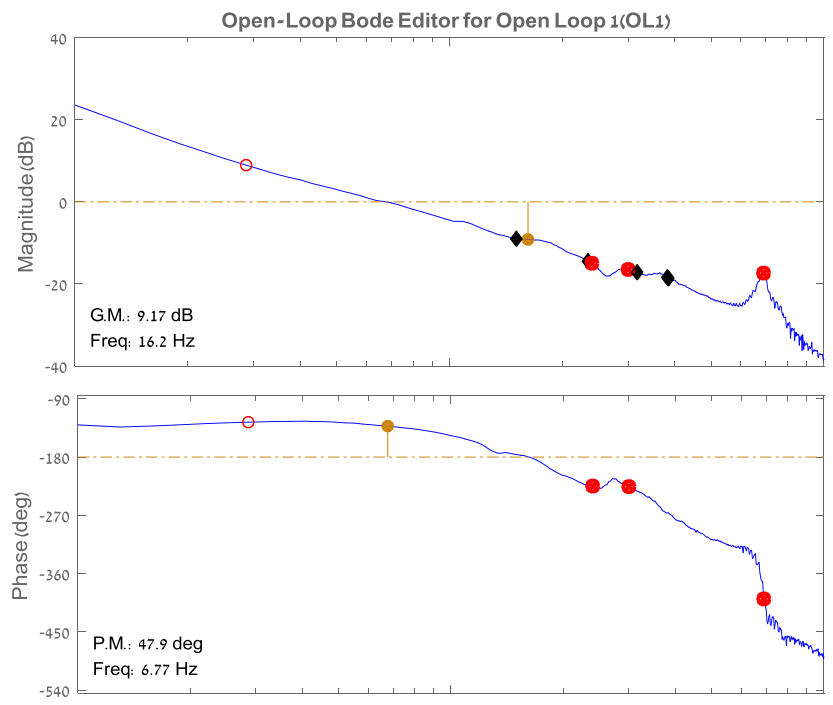
איור 14: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר הגבהה אופן כח



איור 15: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר הגבהה אופן ייצוב



איור 16: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר צידוד אופן כח



איור 17: תמסורת ח"פ עם הבקר בציר צידוד אופן ייצוב

סיכום תוצאות:

פרמטר	ציר	צידוד אופן כח	צידוד אופן ייצוב	הגבהה אופן כח	הגבהה אופן ייצוב
שגיאת מצב מתמיד לקלט ריצה תהיה אפס	V	V	V	V	V
תדר חצייה מעל Hz5	6.04	6.77	7.08	7.54	
deg40<PM	46.2	47.9	44.1	46.6	
DB7<GM	24.4	9.17	17.1	9.39	
הגבר מערכת בח"פ בתדר של 1Hz מעל 20dB	23	21	23	21	

כאמור, הבקרים שתכננו לכל ציר שונים אך בכל ציר הבקר עבור האופנים השונים זהה. אנחנו יכולים לראות את הקשר הישיר בין גודל הגבר המערכת בתדר נמוך לבין תדר החצייה וערכי PM ו-GM. הגדלת ההגבר מכתיבה תדר חצייה נמוך יותר שגורר PM קטן יותר אך GM גדול יותר. אנחנו רואים שעבור דרישת ההגבר בתדר של 1Hz לא התוצאה יחסית קרובה לנדרש בכל הבקרים, כך גם עם דרישת PM ודרישת תדר החצייה. לגבי דרישת GM אנו רואים כי באופן ייצוב אנו קרובים לדרישה אך באופן כח ה-GM גדול יותר מפי 2 ומפי 3 מהדרישה וייתכן שזה פוגע בביצועים אחרים. לסיכום, עבור מערכות שדורשות מפרט הדוק יותר, כלומר הגבלות מינימום ומקסימום, ייתכן ויידרש לתכן 4 בקרים ולא שניים אך אנו רואים שע"י שימוש בטכניקות הבקרה הקלאסיות בהן השתמשנו ניתן להגיע לתוצאות שהן מאוד משביעות רצון.

3.5 אופטימיזצית התכן להשגת ביצועי כינון וייצוב כנגד הפרעות קרקע מדודות ואלמנטים לא לינארים

עד כה לא התייחסנו לאלמנטים הלא לינארים שמשפיעים על ביצועי המערכת :

1. חיכוך קולוני – טופל ע"י מנגנון אנטי-חיכוך.

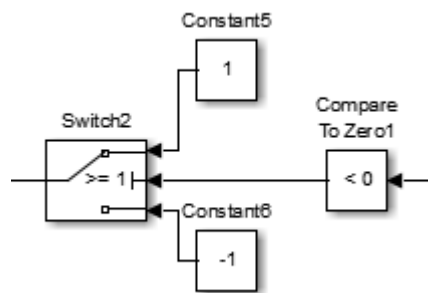
2. הפרעות קרקע – טופל ע"י גוזר.

הפרעות הקרקע נמדדו ע"י IMU – Initial Measurement Unit. ביחידה זו יש 3 גיירים ניצבים ושלושה מדי תאוצה ניצבים השתמשנו במדידות שלהם בניסוי השטח כדי לתקן את הפרעות הקרקע והאי-איזון.

1. חיכוך קולוני – משוואת החיכוך הקולוני הינה $T_f = T_{coulomb} \cdot \text{sign}(\omega_{disturbance})$ כאשר את

$T_{coulomb}$ ניתן לשערך. אנחנו השתמשנו בכך כדי להזין את המומנט הנדרש בסימן הפוך לפקודת הזרם.

המימוש בסימולינק נעשה בעזרת לוגיקה באופן הבא :



איור 18: מימוש חיכוך קולוני בסימולינק

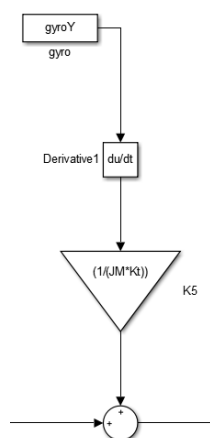
2. הפרעות הקרקע נמדדו בניסוי וכך יכולנו לקבל את מהירות הפרעות הקרקע. אנו יודעים כי התמסורת מזרם המנוע למהירות ההפרעה היא

$$\frac{\omega_{disturbance}}{I_C} = \frac{K_t}{J_m \cdot S}$$

המנוע את הזרם הנדרש כדי להתנגד להפרעות הקרקע ע"י inverse-plant שנובע מהתמסורת

הנ"ל. הזרם הנדרש יהיה $I_C = \frac{\omega_{disturbance}}{K_t} \cdot J_m \cdot S$, ובאופן מעשי המימוש בסימולינק יעשה ע"י

גוזר:

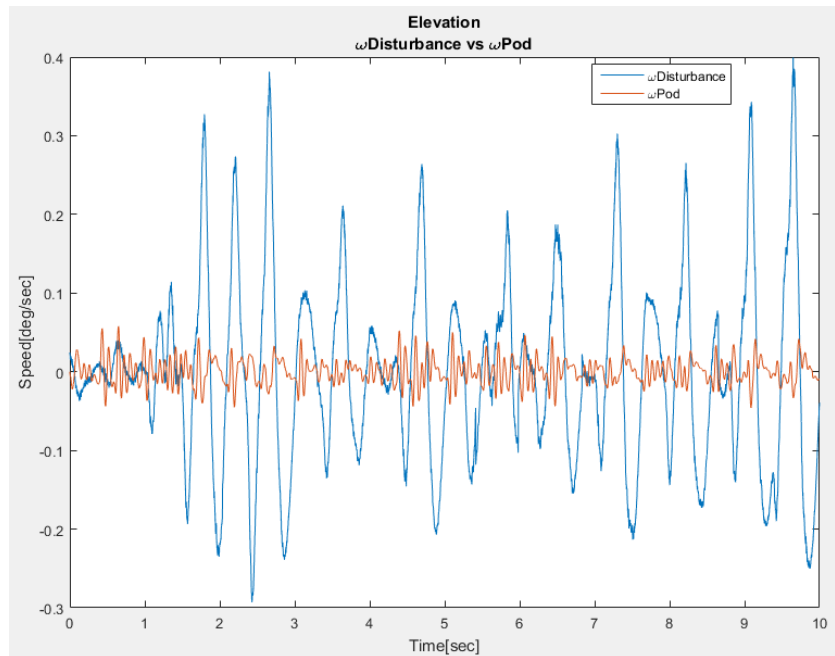


איור 19: מימוש גוזר בסימולינק

טיב ייצוב – הגבהה

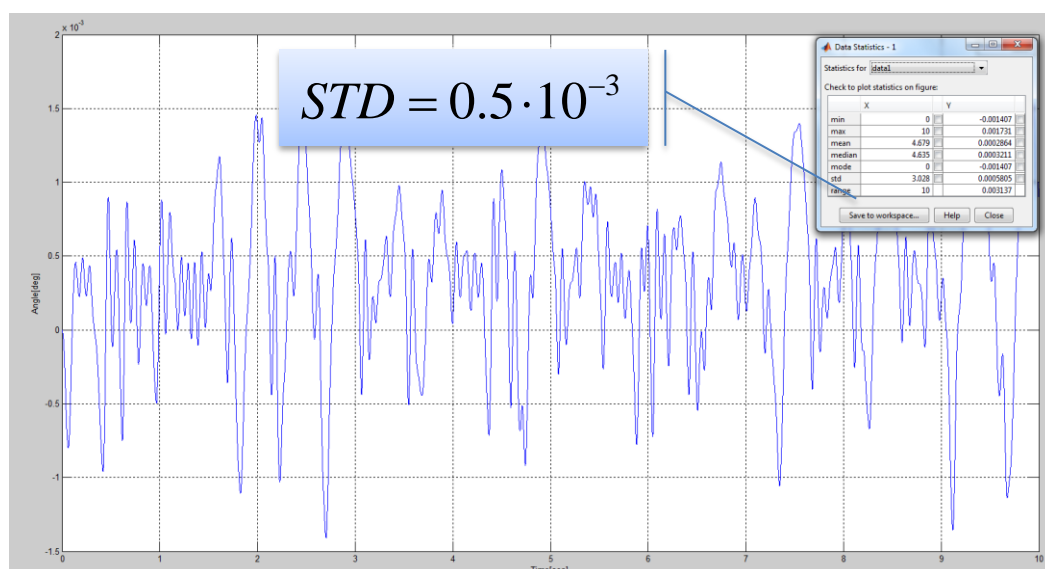
הוראות הרצה: מודל בסימולינק - Elevation.slx. יש לראות בזמן ההרצה כי סוגרים חוג בקרה על הפוד. התוצאה של מהירות הפוד היא מדידה מהפוד עצמו והתוצאה של הזווית היא מהאינטגרטור ששמנו במוצא הפוד.

ניתן לראות את מהירות ההפרעה כנגד מהירות הפוד וכיצד יש הנחתה גדולה מאוד של מהירות ההפרעה.



איור 20: מהירות הפרעת קרקע כנגד מהירות הפוד בציר הגבהה

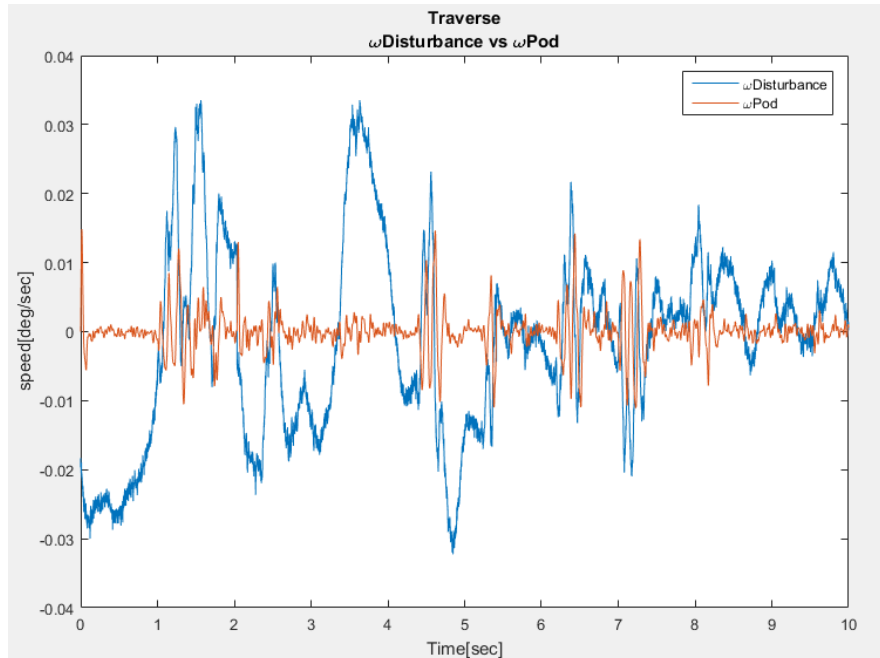
ניתן לראות את התזוזה הזוויתית של הפוד ביחס לזווית עליה הנשק מיוצב ואנו רואים כי הנשק נע לכל היותר 0.0015 מעלות ביחס לזווית הרצויה ועמידה בדרישה ל-STD של 0.5 אלפית



איור 21: זווית סטיית הפוד מהזווית הרצויה בציר צידוד

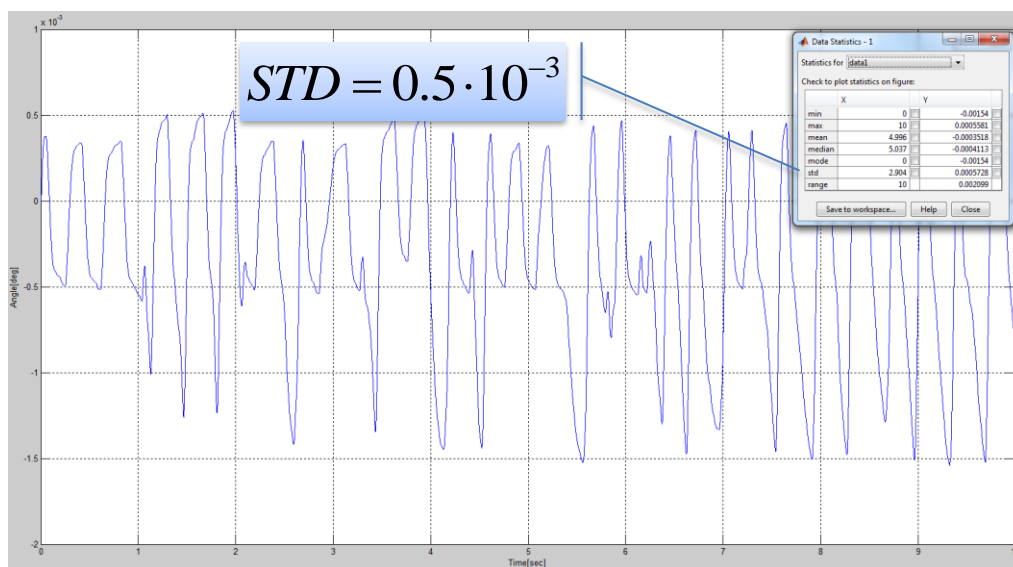
טיב ייצוב – צידוד

הוראות הרצה: מודל בסימולינק - Traverse.slx. יש לראות בזמן ההרצה כי סוגרים חוג בקרה על הפוד עם הבקר של הגיירו. התוצאה של מהירות הפוד היא מדידה מהפוד עצמו והתוצאה של הזווית היא מהאינטגרטור ששמנו במוצא הפוד. ניתן לראות את מהירות ההפרעה כנגד מהירות הפוד וכיצד יש הנחתה גדולה מאוד של מהירות ההפרעה.



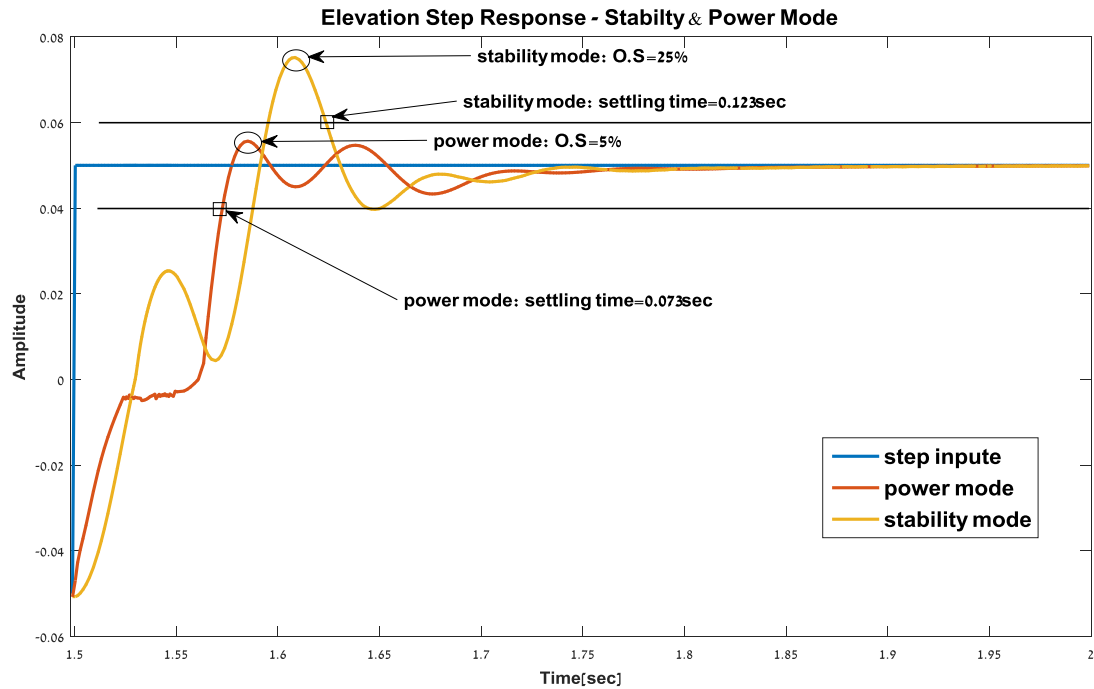
איור 22: מהירות הפרעת קרקע כנגד מהירות הפוד בציר צידוד

ניתן לראות את התזוזה הזוויתית של הפוד ביחס לזווית עליה הנשק מיוצב ואנו רואים כי הנשק נע לכל היותר 0.0005 ביחס לזווית הרצויה ועמידה בדרישה ל-STD של 0.5 אלפית.

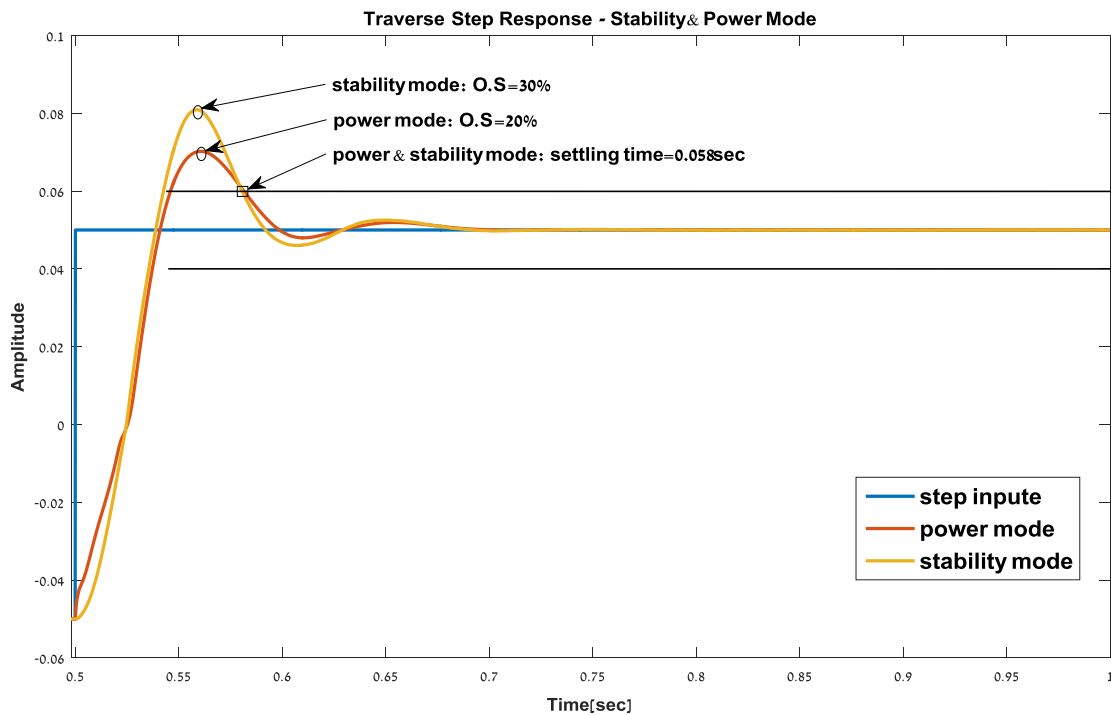


איור 23: מהירות הפרעת קרקע כנגד מהירות הפוד בציר צידוד

תוצאות – תגובה לכניסת מדרגה בגודל 0.1



איור 24: תגובת מדרגה בציר הגבהה אופן כח ואופן ייצוב



איור 25: תגובת מדרגה בציר צידוד אופן כח ואופן ייצוב

4. סיכום

4.1 מסקנות

1. שיטת המולקולות ושיטת המידול מאפשרת לנו למצוא מודל מתימטי למערכת מדודה. זהו כלי המאפשר לשערך פרמטרים אשר קשה למצוא אותם בפועל, כגון קפיציות וריסון האלמנטים.
2. היתכנות תכן בקרה לפי מפרט לקוח.
3. מטרת הסימולציה היא אפקטיביות – הסימולציה עשויה להקטין את מספר ניסוי השטח. המודל שבידנו יכול לשמש כלי עזר בסיסי למהנדסי בקרה בשלבי הפיתוח הראשוניים, ואף בשלבים מתקדמים אם תתבצע אחזקה של המודל.
4. המודל שבנינו עשוי לתאר באופן מדויק את המערכת עד 20 הרץ.
5. מאפשר ביצוע סינתזה של בקרים בצורה פשוטה, ואחר כך לבחון אותם בשטח.

4.2 המלצות

1. ביצוע מדידות ספקטרליות נוספות כרפרנס, יכולות לעזור לנו לשפר את הדיוק של המודל. באמצעות מדידות נוספות ניתן לקבל משפחה של פלאנטים ועבורם לתכנן הבקרים – התוצאה תהיה הגברת רובוסטיות למגוון רחב של קלטים.
2. בעמדה שלנו המחסנית חלק מהפוד, ובסימולציה הנוכחית הזנחנו את המחסנית. יש פרוייקטים שבהם המחסנית היא דומיננטית כפונקציה של מסת הכדורים ומיקומה שונה. מומלץ להוסיף למודל מולקולת מחסנית.
3. המלצה להמשך הפרוייקט: ביצוע אופטימיזציית התכנן להשגת טיב החזרת התותח לנקודת מכוון ראשית בין כדוד לכדור בצרור, כל זאת בהינתן מדידות מתאימות המתארות הנהגות בזמן ירי.