



בי"ס להנדסת חשמל

פרויקט מס' 22-1-1-2480

תכנית עבודה

שם הפרויקט: פיתוח סימולציה של מערכת בקרת סרוו לייצוב אינרציאלי של

מערכת נשק משועבדת למערכת תצפית

מבצעים:

ת.ז. 319091583

שם: איתמר הורוביץ

ת.ז. 207331950

שם: יובל דקל

מקום ביצוע הפרויקט: אוניברסיטה

לשימוש המנחה:

הנני מאשר את תכנית העבודה המצורפת

שם: ד"ר גבריאל דוידוב

חתימה: ד"ר גבריאל דוידוב

תקציר



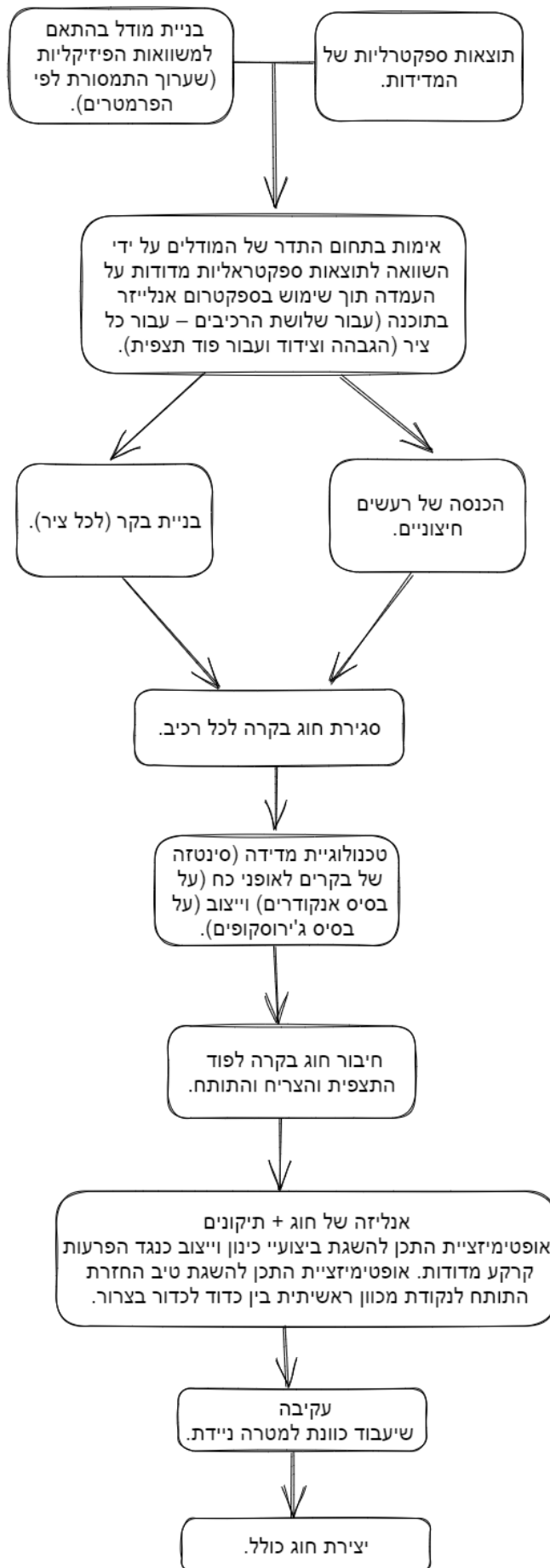
איור 1- תמונת מערכת הנשק הכוללת מנוע, צריח, עמדת תצפית, קנה וצירי הגבהה וציוד- נלקח ממצגת "קורס בקרה 2 שנכתב על ידי ד"ר גבריאל דוידוב

במהלך הפרויקט אנו נתעסק עם מערכות מכניות המצויות בטנקים כגון: צריח, תותח, פוד תצפית. כמו כן, יתבצע ניתוח של הפונקציות התמסורת בתחום התדר (המתארות את הקשר בין כניסת המערכות למוצאן). בנוסף, בהיתן מודל "מולקולה" שניתן לנו על ידי המנחה, ד"ר גבריאל דוידוב, המקשר בין המומנט המכני של המערכת למהירות הזוויתית של המנוע והצריח, נאמת את המדידות למול התוצאות שאנו מצפים לקבל. לאחר שערך ואימות פונקציית התמסורת, ניעזר בטכניקות ובתיאוריות מתורת הבקרה על מנת לעמוד בדרישות הפרויקט ליציבות המערכת. במהלך הפרויקט נבחן השפעות של בקרים שונים כגון: PID, PI על תפקוד המערכת בחוג פתוח ובחינת הביצועים בחוג הסגור לאחר הוספת הבקר לסכמת המערכת.

החוג הסגור יתבטא בעזרת לולאת משוב, כלומר החזרת המוצא לכיוון הכניסה בשביל ייצוב המערכת. בעזרת לולאת המשוב אנו נחקור את פונקציית השגיאה ונרצה כי תשאף לאפס כאשר הזמן שואף לאינסוף. באופן מעשי נשאף בעזרת הבקר שנתכנן לזמן התייצבות מינימלי. במהלך הפרויקט נתעסק בנוסף עד כמה המערכת יציבה ולא רק בשאלה האם זו מערכת יציבה. יתר על כן, נתייחס לגורמים חיצוניים כגון: כוחות חיכוך, הפרעות שונות, רעשים, וזאת על מנת לדמות את המערכת מהסימולציה למציאות. לאחר ביצוע הפעולות לעיל עבור ציר ההגבהה וציר הציוד של הצריח ועבור מערכת התצפית, נבנה בקר נוסף שיאפשר סנכרון בין שלושת הגורמים עם גורם שגיאה נמוך שהמשמעות הינה סגירת חוג בקרה עבור שלושת המערכות. לבסוף, ניעזר במערכת ניווט אינרציאלית כדי לעקוב אחר מטרה נידת.

סביבת הפרויקט תיעשה בתוכנות matlab ו-simulink שבמסגרתן נמדל את המערכת הפיזיקלית המבוקרת בעזרת דיאגרמת בלוקים אשר תתאר אופן הפעולה של המערכת (שטף המערכת).

דיאגרמת בלוקים :



מוטיבציה

כיום ישנן מערכות מכניות רבות לשימושים שונים. ברצוננו לבקר את המערכת כדי לוודא שהמערכת אכן מבצעת את תפקידה. כתוצאה מכך, משתמשים בבקרים דיגיטליים/אנלוגים לשם מטרה זו. במהלך הפרויקט נבנה בקרים שונים למערכות נשק כדי לפקח על תפקודם. כמו כן, הבקרים יבקרו את המערכת לתפקוד תקין עבור כניסות מוגדרות וגם עבור רעשים חיצוניים כגון הפרעות מהירות וחיכוך כדי להתאים את המערכת לתנאים חיצוניים ולא לתנאי מעבדה. המערכת הכוללת מורכבת ממספר תתי מערכות (צריח, קנה, מערכת תצפית ומנוע) הנדרשות להיות מתואמות. בעזרת משוואות מצב המתארות את המערכת הפיזיקליות ניתן לכוון את המערכות להיות מסונכרנות אחת עם השנייה.

במסגרת הפרויקט נבנה בקרים שישמשו כייצוב אינרציאלי: ייצוב אינרציאלי של כוונת ועקיבה אחר מטרה ניידת. היתרון במערכות אינרציאליות הוא מניעת שיבושים. המערכת מקבלת בעזרת חיישנים נתונים התחלתיים ובעזרה בקרה פנימית מחשבת ומשערכת את הגדלים השונים וגם את כיוונם כגון מהירות או תאוצה.

תכולת העבודה:

שלבי הפרויקט:

- נתונים פרמטרים מיכאניים של עמדת הנשק ופוד תצפית ונדרש לבנות סימולציה לינארית בצירי הגבהה וצידוד. לצורך אימות הסימולציות יש להשתמש בתוצאות נתונות של בדיקות ספקטראליות בתחום התדר הכוללות עקומת היענויות ג'ירו תותח/צריח ואנקודר תותח/צריח לקלט הרמוני של פקודות זרם למנוע וכנ"ל לפוד תצפית. כל וקטור בקובץ מכיל נתונים על תדרים בטווח מ-1 Hz עד 100 Hz.
- ציור גרף Bode של המדידה הספקטראלית בעזרת Matlab
- ביצוע סימולציה ב-Simulink של המודל על פי המשוואות לעיל.
- הערכת שיעורי השיכוך וקפיציות על סמך משוואות תדירות עצמית וריסון של מערכת מסדר שני של רזוננס המערכת
- הזנת נתונים שמצאתם בסימולציה ומציאת גרף Bode מהסימולציה ושילוב הגרף עם גרף המדידות.
- ביצוע אופטימיזציה על ערכי הקפיציות והשיכוך (והגבר כולל אם נדרש) עד לקבלת התאמה מיטבית באיזור הרזוננסים
- הביצוע יהיה על מדידות הטכנו ועל מדידות הגירו לציר הגבהה וציר צידוד.
- האם המערכת יציבה בחוג סגור עם משוב יחידה? ניתוח יציבות המערכת עבור כל הנקודות הקריטיות שלה.
- מציאת בקר פשוט כך שלמערכת בסימולציה ולמערכת מהמדידות עודף הגבר גדול מ-10 [dB] לפחות. מה הוא עודף הפאזה של המערכת עם הבקר הפשוט?
- הערכת ביצועי המערכת הזו בחוג סגור (עודף פאזה? רוחב סרט? שגיאת מצב מתמיד לתגובה למדרגה)?
- תכנון בקרים לאופני כח וייצוב שיעניקו למערכות בצירי הגבהה וצידוד את הביצועים הבאים: שגיאת מצב מתמיד לקלט ריצה אפס. תדר חיתוך 0 [dB] מעל 5 [Hz] הגבר מערכת בחוג פתוח בתדר 1 [Hz] מעל 20 [dB] עודף פאזה של המערכת בסימולציה ובמציאות – מעל 40 [deg] עודף הגבר של המערכת בסימולציה ובמציאות – מעל 7 [dB]
- הנחתת אמפליטודה כ-11 פי את עוצמת הרזוננסים בעזרת מסננים Notch Filter ותכנון מקדמי הריסון כך ששיעור פגיעת הפאזה בתדר 5 [Hz] בשתי המערכות לא תהיה נמוכה מ-10 [deg]
- מציאת הגבר עבור המערכות כך שתדר החיתוך 0 [dB] כ-5 [Hz] | עודף הגבר של המערכת בסימולציה ובמציאות – מעל כ-7 [dB]

- מציאת בקר P+I (הגבר ואינטגרטור) כך שעודף פאזה של המערכת בסימולציה ובמציאות – מעל $40[\text{deg}]$ וכן הגבר מערכת בחוג פתוח בתדר $1[\text{Hz}]$ מעל $20[\text{dB}]$
- בדיקת ביצועי המערכת לקלטי מדרגות של $0.05[\text{rad/sec}]$, $1[\text{rad/sec}]$
- הוספת מומנטי החיכוך ואי איזון לכל ציר. בדיקת תגובות ספקטרליות בעזרת ספקטרום אנלייזר. בדיקת התוצאות מהיבט עמידה בביצועים נדרשים .
- עבור באופן ייצוב : הרצת סימולציה עם ווקטורי הפרעות הקרקע מהירות זוויתית ותאוצה קווית (מפילי אקסל) ביצוע אינטגרציה על תפוקת הג'ירו לקבלת זווית תותח אינרציאלית. חישוב טיב הייצוב Standard Deviation STD (במונחי אחת סיגמה)
- ביצוע אופטימיזציה על פרמטרי הבקרים עד לקבלת טיב הייצוב הרצוי תוך שמירה על כל דרישות הבקרה שצוינו .
- בדיקת טיב ייצוב המערכת להפרעות קרקע מהירות זוויתית ותאוצות (מתוך קבצי אקסל).
- שיפור הבקרים לקבלת תוצאות טובות מ- 0.5mrad אחת סיגמה.
- הוספת מנגנוני אנטי חיכוך לשיפור ביצועי המערכת עבור אופן ייצוב הערכת טיב השיפור .
- הזנת הלמי הירי לסימולציה (ללא הפרעות הקרקע) ובדיקת טיב החזרת התותח לאחר ירי של כל כדור. יש לבצע זאת עבור אופני כח וייצוב בהגבהה וצידוד .
- שיפור פרמטרי הבקרה לקבלת תוצאות מיטביות .
- חזרה על הסעיפים הקודמים ללא ביצוע סימולציה להלמי ירי עבור פוד התצפית.
- סגירת חוג בקרה עם התותח והצריח ועם צירי הגבהה וצידוד של פוד התצפית בעזרת בקרי מצב .
- בדיקת תפקוד המערכת הכוללת עבור כניסת הפרעות קרקע ועבור כניסת הלמי הירי
- שיפור פרמטרי הבקרה לקבלת תוצאות מיטביות .
- בניית חוגי מצב אינרציאליים לפוד לעקיבה אחר מטרה ניידת. בדיקת טיב עקיבת הפוד למטרה ואת שגיאות שיעבוד תותח לכוונת- כל זאת בנוכחות הפרעות קרקע.

השיטות והעקרונות שנשתמש:

שיטות בקרה קלאסיות (חקירת פונקציית תמסורת הרגישות של המערכת, עקומת נייקוויסט, עקומת ניקולס root-locus, בדיקת מיקום קטבים ואפסים, קידום-פיגור, גרף בודה) ושיטת feedforward להתייחסות גורמים חיצוניים

שיטות בקרה מודרניות: קונטרולביליות / אובסרווביליות/ברת ייצוב, משוואת צופה, שילוב עם בקרה ספרתית-דוגם ובקרים דיגיטליים, שיטת יציבות של ליאפנוב, משפט השמת קטבים

מקורות המידע בהם נשתמש:

- קורס "מבוא לתורת הבקרה" שמועבר על פרופ' ג'ורג' וויס
- "מבוא לבקרה ספרתית" שמועבר על ידי פרופסור מיכאל מרגליות
- קורס "מערכות משוב שימושיות" שמועבר על ידי פרופסור גרשון אליהו
- מצגת "קורס בקרה 2" שנכתבה על ידי ד"ר גבריאל דוידוב.
- אתר MathWorks-matlab

תוצרים כמותיים

- עבור ציר הצידוד וציר ההגבהה נדרש לבנות בקר כך ש: $GM > 10[dB]$
 - עבור עמדת התצפית: $GM > 10[dB]$
 - עבור אופן כוח ואופן ייצוב הביצועים של המערכת (סימולציה ומציאות עבור כל ציר ועמדת התצפית) - שגיאת מצב מתמיד עבור קלט של תאוצה הינו אפס
 - תדר חיתוך $0[dB]$ מעל $5[Hz]$
 - הגבר חוג פתוח בתדר $1[Hz]$ יהיה גבוה $20[dB]$
 - $GM > 7[dB], PM > 40[deg]$
 - עבור מסנני Notch Filter: הנחתה פי 11 ששיעור פגיעת הפאזה בתדר $5[Hz]$ בשתי המערכות לא תהיה נמוכה מ- $-10[deg]$
 - $Overshoot < 27\%$ עבור הכניסות הבאות (פונקציית מדרגה): $0.05[rad/sec], 1[rad/sec]$
 - שיפור ביצועים עבור הכנסת כוחות חיצוניים (בדיקה של עמידה בציפיות שתוארו בנקודה השלישית).
 - לאחר תוספת הפרעות קרקע: נדרש כי השגיאה הריבועית הממוצעת RMS תקיים: $STD > 0.5[mrad]$ במונחי אחת סיגמא
 - סגירת חוג בקרה כולל
 - עקיבה אחר מטרה ניידת
- במפגש אמצע נציג את הדרישות ל-*overshoot*, דרישות המערכת עם הכנסת גורם חיכוך והדרישה של *notch filter* עבור ציר צידוד.
- במפגש סיום נציג את סגירת החוג הכולל של הצריח עם עמדת התצפית ונציג עקיבה אחר מטרה ניידת.
- הפרויקט יבנה בתוכנת *Simulink* עם פונקציות נוספות ב-*matlab* שיצרו את הבלוקים השונים בתוך תוכנת *Simulink*. עבור כל בלוק בסימולציה ניתן להציג את פונקציית התמסורת, את המוצא בתחום הזמן ואף הצגה של המדדים השונים. מזין למערכת פונקציות מדרגה שונות, פונקציית הלם ופונקציות תאוצה שונות כדי לבדוק את הביצועים השונים.

לוח זמנים

- חזרה ויישור קו על החומר בתורת הבקרה. למידת הממשק *Simulink*. עד ה-16.4.
- בניית סימולציה ליניארית לצירי ההגבהה – שערך התמסורת ויוצר גרף של התמסורת (צירי ההגבהה וצידוד) – עד ה-23.4.
- בניית סימולציה ליניארית לצירי ההגבהה – ניתוח יציבות של המערכת בעזרת *sisotool* (צירי ההגבהה וצידוד) – עד ה-30.4.
- בניית בקר העומד בדרישות הפרויקט. עד 14.5 או 18.5.
- בניית מסנן *notch* והנחתה של התדרים הרלוונטיים. עד ה-28.5.
- מציאת בקר *PI*. עד ה-9.6.
- התייחסות לגורמים לא ליניאריים. עד ה-20.6.
- תיקונים לעמידה ביעד כמותי. עד ה-27.6.
- אופטימיזציה של התוצאות + הפרדה לאופן ייצוג ואופן כוח + בדיקה של הלמי ירי בתוכנה. עד ה-17.7.
- חזרה עבור רכיב פוד התצפית. עד ה-17.8.
- סגירת חוג בקרה. עד ה-15.9.
- סימולציה של החוג הכולל. תקופת החגים (עד תחילת הסמסטר).
- עקיבה אחרי מטרה ניידת + תיקון בזמן אמת. (עד דצמבר).
- הכנת פוסטר + סיכום של הפרויקט. (עד אמצע ינואר).

משימה	סיום משוער
חזרה ויישור קו על החומר בתורת הבקרה. למידת הממשק Simulink.	עד ה-16.4.
בניית סימולציה ליניארית לצירי ההגבהה – שערוך התמסורת ויוצר גרף של התמסורת (צירי הגבהה וצידוד)	עד ה-23.4.
בניית סימולציה ליניארית לצירי ההגבהה – ניתוח יציבות של המערכת בעזרת sisotool (צירי הגבהה וצידוד)	עד ה-30.4.
בניית בקר העומד בדרישות הפרויקט	עד 18.5
בניית מסנן notch והנחתה של התדרים הרלוונטים.	עד ה-28.5.
מציאת בקר PI.	עד ה-9.6.
התייחסות לגורמים לא ליניאריים.	עד ה-20.6.
תיקונים לעמידה ביעד כמותי.	עד ה-27.6.
הגשת דו"ח אמצע+מצגת אמצע	עד ה-29.6.
הפרדה לאופן ייצוב ואופן כוח + בדיקה של הלמי ירי בתוכנה עבור תותח וצריח	עד ה-17.7.
תיקון התוצאות	עד ה-1.8.
חזרה על השלבים הקודמים עבור פוד התצפית	עד ה-15.9.
סימולציה של התותח והצריח משולב עם פוד התצפית עבור הלמי ירי+תיקונים	עד 22.10
עקיבה אחרי מטרה ניידת + תיקון בזמן אמת	עד 6.12
הכנת פוסטר + סיכום של הפרויקט.	סוף סמסטר א' תשפ"ד