

דו"ח – פרויקט בקרה  
קורס מערכות משובצות מחשב

מרצה: ד"ר טל אלון

גרסה 0.92

סמסטר ב' 2023

**מגישים:**

**שיר ליברמן – 315765172**  
**שגב בלור - 208509166**

**תאריך:**

**16.01.2022**

## תוכן עניינים

1	דו"ח – פרויקט בקרה	1
1	קורס מערכות משובצות מחשב	1
1	מבוא	1
5		5
2	המערכת החשמלית	2
6		6
3	מצבי המערכת	3
7		7
8	מצב 0:	8
8	מצב 1:	8
8	מצב 2:	8
9	מצב 3:	9
9	מצב 4:	9
9	מצב 5:	9
10	מצב 6:	10
11	4. מערכת בקרה בחוג פתוח	11
11	4.1 – מבוא	11
12	4.2 - בדיקת זמן התכנסות	12
13	4.3 – כיול המערכת	13
16	4.4 – בדיקת המערכת המכויילת	16
17	4.5 – סיכום בקרה בחוג פתוח	17
18	5. בקרת ON-OFF	18
18	5.0 – מבוא	18
19	5.1 הקוד לבקרת ON-OFF:	19
20	5.2 בדיקת מערכת הבקרה	20
21	5.3 השוואת תנודתיות סביב מטרה נמוכה ומטרה גבוהה:	21
23	5.4 – התמודדות עם הפרעה חיצונית	23
24	5.5 – שיפור ביצועי המערכת	24
25	5.6 – סיכום בקרת ON-OFF	25
6	6. בקרת PID	26
26		26
26	מבוא	26
6.1	6.1 – קוד	27
27		27

28.....	6.2 – בקר P.....
PI בקר – .....	6.3.....
31.....	
PID בקר – .....	6.4.....
35.....	
התמודדות עם הפרעה חיצונית – .....	6.5.....
38.....	
39.....	6.6 – סיכום בקר PID.....
40.....	7 – סיכום.....
40.....	7.1 – השוואה חוג פתוח, PID, On/Off.....
41.....	7.2 – סיכום כללי.....

## רשימת איורים

6.....	איור 1 - חיבור המערכת בTINKERCAD.....
7.....	איור 2 - שיטת מכונת המצבים.....
11.....	איור 3 - אילוסטרציה לבקרת חוג פתוח במערכת חימום צנימים.....
13.....	איור 4 - גרף מיצוי פוליון ממעלה 4.....
14.....	איור 5 - גרף מיצוי פוליון ממעלה 5.....
14.....	איור 6 - גרף מיצוי פוליון ממעלה 6.....
15.....	איור 7 - מקדמי הפוליון מדרגה 4 של הפוליון הנבחר.....
16.....	איור 8 - טבלת הערכים הרצויים והמקבלים והשגיאה המתקבלת עבור אותם ערכים בהדלקת הנורות בחיישן.....
18.....	איור 9 - סכימת בקרה ON OFF.....
28.....	איור 10 - טבלת השוואה של מקדם $K_p$ למטרה.....
29.....	איור 11 - התכנסויות גרפים במטרה בינוני לפי שינוי של מקדם קבוע $K_p$ .....
30.....	איור 12 - - טבלת השוואה של מקדם $K_p$ למטרה בינונית.....
32.....	איור 13 - טבלת התכנסויות גרפים במטרה גבוהה לפי שינוי של מקדמים קבועים $K_p$ $K_i$ .....
33.....	איור 14 - טבלת התכנסויות גרפים במטרה בינונית לפי שינוי של מקדמים קבועים $K_p$ $K_i$ .....
36.....	איור 15 - טבלת השוואה של פרטמטרים שנתחשב בהם לפי ערכי $K_d$ .....
37.....	איור 16 - טבלת השוואה של פרטמטרים שנתחשב בהם לפי ערכי $K_d = 3$ .....

## רשימת גרפים

- גרף 1 - גרף חיפוש מגמת התייצבות על ידי הזנת ערכי הDUTY.....12
- גרף 2 - הגרפים המתקבלים אחרי חישוב DUTY מוערך לפי הפולינום המתקבל.....16
- גרף 3 - גרפים המתקבלים מבדיקת מערכת הבקרה ON OFF.....20
- גרף 4 - תנודות סביב מטרה נמוכה (100).....21
- גרף 5 - תנודות סביב מטרה גבוהה (500).....22
- גרף 6 - גרף המציג את התמודדות האלגוריתם ON OFF עם הפרעה של המנורה השניה.....23
- גרף 7 - התכנסות ערך מטרה ידוע עם קצב דגימות מקסימלי של 1000Hz (גרף צהוב) לעומת ערך שרירותי עם קצב דגימות של 100Hz (גרף שחור).....24
- גרף 8 - התכנסויות גרפים במטרה גבוהה לפי שינוי של מקדם קבוע  $K_p$ .....28
- גרף 9 - - התכנסויות גרפים במטרה גבוהה לפי שינוי של מקדמים קבועים  $K_p$   $K_i$ .....31
- גרף 10 - התכנסויות גרפים במטרה בינונית לפי שינוי של מקדמים קבועים  $K_p$   $K_i$ .....32
- גרף 11 - ערכי  $K_p$ ,  $K_i$  שלדעתנו אופטימליים והצגת הגרפים המתקבלים לכל הערכים.....34
- גרף 12 - בדיקת ערכי  $K_d$ .....35
- גרף 13 - זום אין (קירוב) לגרף 12 לראות את תגובת O.S.....35
- גרף 14 - הצגת הגרפים המתקבלים ע"י הפרמטר  $K_d = 3$ .....37
- גרף 15 - גרף המחשה ליכולת אלגוריתם הבקרים PID עם הפרעה של מנורה נוספת.....38
- גרף 16 - השוואת בין שלושת שיטות קירוב למטרה.....40

## 1. מבוא

בעבודה שלפניכם קיבלנו מערכת ייעודית לביצוע פרויקט בקרה – אשר משלב את אשר נלמד בקורס במהלך הסמסטר.

במהלך הפרויקט נעבור על מטרת המערכת ודרכי הפתרון השונים להשגת מטרה זו, תוך כדי ביצוע ניסויים וניתוח התוצאות שלהם. כל זאת יבוצע על ידי תכנות כרטיס פיתוח ארדואינו, אשר מחובר אל מערכת הבקרה, ומנוהל על ידי תוכנה שכתבנו ב-CVI, עם הארדואינו ומנתחת את הנתונים המתקבלים.

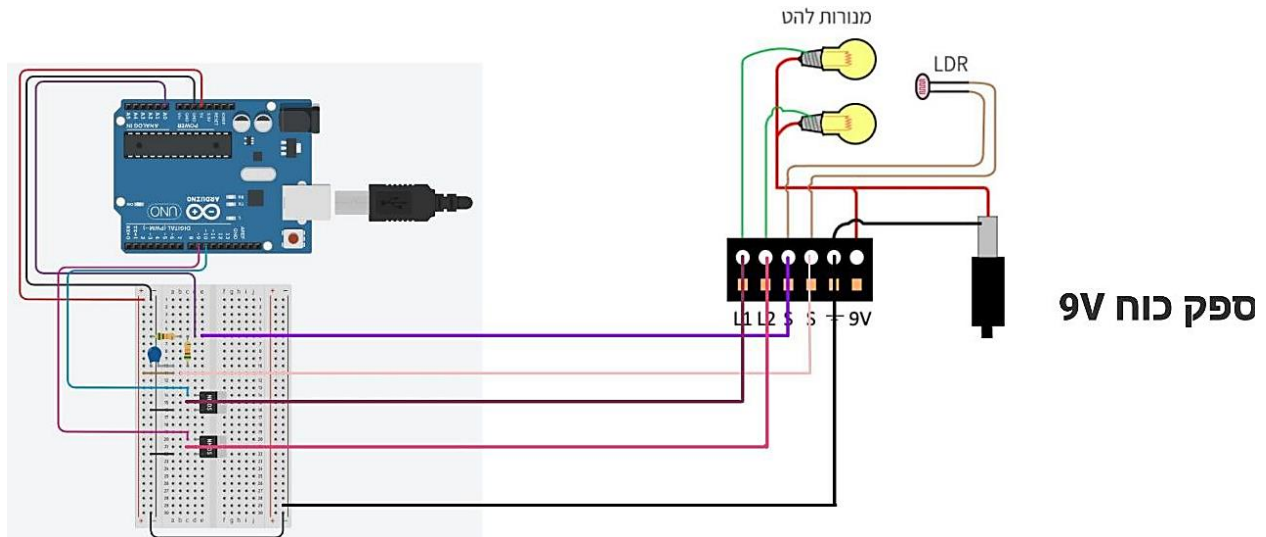
תחילה, נסביר על מצבי העבודה השונים של המערכת, נציג את הגרפים שהמערכת יודעת לייצר ונכיל את המערכת ונמצא את הנגד המתאים למערכת אשר יספק לנו טווח ערכים רחב דיו.

נבצע ניסויי בקרה בחוג פתוח על ידי מציאת פונקציית קירוב בין ערך חיישן רצוי לבין אות PWM אשר יוזן למערכת ונבחן את איכות הקירוב. לאחר מכן, נבחן אלגוריתם בקרה מסוג ON OFF, תוך כדי שינויים שונים כמו תדרי דגימה ועוצמה מקסימלית, כמו כן נבחן את המערכת תחת הפרעה חיצונית.

בנוסף, נבצע בנייה של אלגוריתם בקרת PID, תוך כדי התמקדות בכל רכיב בנפרד ובניית הבקר בהדרגה עד למציאת הערכים האידיאליים עבורנו.

לבסוף, נשווה בין מערכות הבקרה השונות שפיתחנו ונסיק מסקנות.

## 2. המערכת החשמלית



איור 1 - חיבור המערכת בTINKERCAD

בתוך הקופסה – שתי מנורות להט וחיישן LDR.

מנורות הלהט מקבלות מתח  $9 [V]$  מספק הכוח וה- GROUND של ספק הכוח מחובר לאותו הGROUND של הארדואינו, זאת כדי לייצר מתח ייחוס אחיד בין הארדואינו לספק הכוח החיצוני.

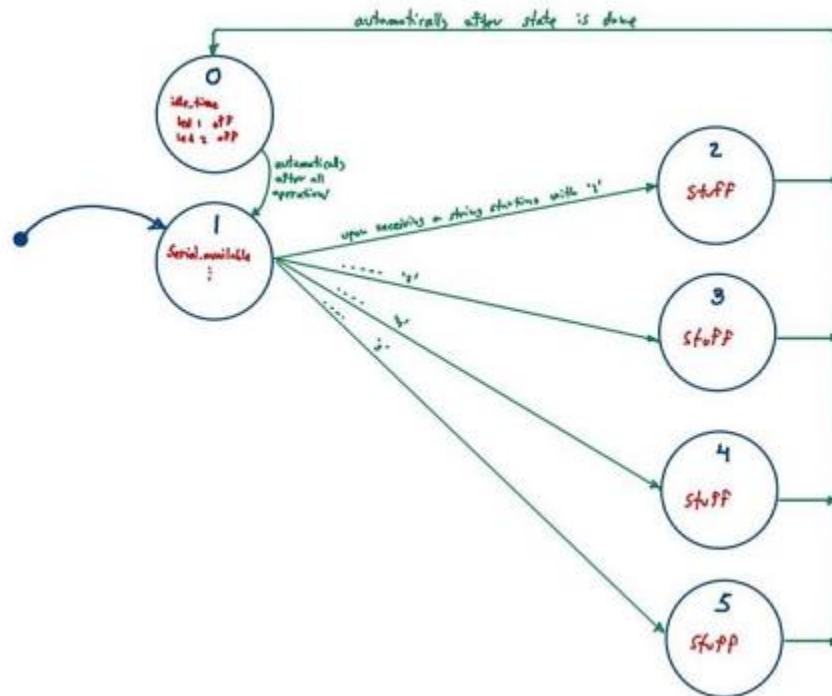
צד החיבור השני של המנורות ("המינוס"), מחובר לכניסות L1, L2 אשר בקופסה, ומשם להדק D של טרנזיסטור MOSFET. הדק S של כל טרנזיסטור מחובר לGROUND והדק G של כל טרנזיסטור מחובר לפין PWM בארדואינו, ובנוסף דרך נגד לGROUND.

כאשר מוזן אות PWM ל $G$ , נסגר המעגל בין  $D$  ל $S$  והמנורה נדלקת. ערך ה  $Duty\ cycle$  יקבע את עוצמת ההארה של המנורה.

חיישן הLDR מחובר כמחלק מתח: צד אחד של החיישן למתח  $5 [V]$  מהארדואינו, צדו השני לפין קריאה אנלוגי A0 ובהמשך דרך נוסף לGROUND.

### 3. מצבי המערכת

הקוד למערכת נכתב בשיטת מכונת מצבים כפי שניתן לראות באיור מטה:



איור 2 - שיטת מכונת המצבים

מכונת המצבים היא שיטת כתיבה ובה האלגוריתם עובר ממצב למצב לפי שליחה וקבלה של תווים בתקשורת סריאלית. בפרויקט זה השתמשנו ב SWITCH אשר קולטת תו מהמשתמש וכך יודעת לאיזה מצב להיכנס. בחלק מהמקרים המשתמש שולח פרמטרים נוספים.

## פירוט במצבים:

### מצב 0:

- כיבוי שתי הנורות ב  $DUTY = 0$ : (DUTY זו דרך להגדיר את עוצמת הדלקת כל נורה בטווח של 0-255, כאשר  $DUTY = 0$  המנורה כבויה וב  $DUTY = 255$  המנורה דלוקה במלוא העוצמה). מצב אפס יוודא את כיבוי הנורות בתום שאר המצבים שמכונת המצבים תבצע.
- נשתמש בדילאי של 30 שניות על מנת שהנורות יתקררו חזרה לטמפרטורת החדר.
- חזרה למצב 1.

### מצב 1:

המצב הראשוני אליו האלגוריתם מפנה ובו מתקבלות הקריאות (תווים) מהמשתמש דרך ה SERIAL MONITOR של תוכנת הארדואינו שלפי התו המתקבל מתבצעת ההחלטה לאיזה מצב האלגוריתם עובר.

### מצב 2:

1. שליחת ערכי  $DUTY = 0$  לשתי הנורות וקריאת ערך החיישן – נצפה לקבל ערך אפס מכיוון שאין תאורה כלל ( למעט הפרעה של התאורה בחדר לימוד).
2. הדלקת מנורה ראשונה למשך שתי שניות וקריאת ערך התאורה SENSOR על ידי החיישן LDR. נצפה לקבל את הערכים בחיישן LDR בטווח בין 0-1023.
3. הדלקת מנורה ראשונה למשך שתי שניות וקריאת ערך התאורה SENSOR על ידי החיישן LDR. נצפה לקבל את הערכים בחיישן LDR בטווח בין 0-1023. ערך החיישן המתקבל יהיה קרוב לערך החיישן בסעיף 2.
4. הדלקת שתי הנורות יחדיו וקריאת ערך התאורה SENSOR על ידי החיישן LDR. נצפה לקבל את הערכים בחיישן LDR בטווח בין 0-1023. לעומת סעיף 3, כאן נקבל ערך חיישן LDR גבוה יותר מכיוון ששתי הנורות פועלות באותו זמן מה שמשפיע על ערך קריאת החיישן LDR .
5. בסיום רצף הפקודות הנ"ל מתבצע מעבר למצב 0.



### מצב 3:

מצב בו המשתמש מכניס מספר תווים המציינים את מספר המצב ("3") וערך מספרי שלם בין בטווח 0-255, (טווח הערכים שבה המנורה נדלקת כאשר 0 היא כבוייה ו255 היא דלוקה בעוצמה מלאה), ובו אחת המנורות נדלקת בערך אשר נשלח מהמשתמש ומתבצעות 500 דגימות למשך חמש שניות (100Hz). לאחר חמש שניות האלגוריתם מורה למנורה להיכבות ולעבור למצב הבא, מצב 0.

### מצב 4:

בקרה בחוג פתוח, מצב בו המערכת תבצע מספר מדידות כאשר כל דגימה תתבצע למשך זמן קבוע מרגע הדלקת הנורה, ובין כל מדידה תהיה הפסקה של מספר שניות הנקבע מראש לצורך קירור הנורה לקראת המדידה הבאה. המדידות יבוצעו עבור מספר ערכי DUTY CYCLE שונים. לאחר לקיחת כל המדידות, המדידות יועברו מהARDUINO אל ה-CVI אשר בו נציג אותם על גרף כנקודות בהתאמה לפולינום מקורב אשר יהווה את פונקציית ההתאמה לחוג הפתוח.

### מצב 5:

בקרת OFF/ON, המערכת תקבל מהמשתמש חמישה פרמטרים: מצב, ערך מטרה, תדר דגימת המערכת (לביצוע תיקון), ערך DUTY עבור מצב בו המערכת במצב ON וערך הפרעה (אופציונאלי) ממנורה נוספת. המערכת תפעל עבור הערכים שהתקבלו מהמשתמש למשך זמן מסוים ולאחר זמן זה יתקבל גרף DUTY כתלות בערך הסנסור. התיקון מתבצע באמצעות דגימת המערכת בקצב קבוע אשר נקבע באמצעות תדר דגימת המערכת אשר מתקבל מהמשתמש ולאחר מכן האלגוריתם נכנס לבדיקת תנאי בו אם ערך השגיאה גדול מאפס המערכת תישאר במצב ON, ואם ערך השגיאה קטן או שווה לאפס המערכת תהיה במצב OFF ובמצב זה ערך ה-DUTY יהיה אפס. לדוגמא כאשר המשתמש ישלך 4,255,1000,200 קצב הדגימה יהיה 0.001 -אלפית השניה ( $\frac{1}{f}$ ). בפועל בכל דגימת תיקון יתבצע חישוב של ההפרש בין ערך המטרה (המתקבל מהשתמש) וערך הסנסור הנוכחי, הפרש זה מייצג את ערך השגיאה.

לאחר מכן במידה וערך השגיאה גדול מאפס המערכת תישאר במצב ON על מנת להקטין את ערך השגיאה, המנורה תפעל לפי ערך ה-DUTY שהתקבל מהמשתמש. במידה וערך השגיאה קטן או שווה לאפס המערכת תהיה במצב OFF במצב זה ערך ה-DUTY יהיה אפס.

במצב זה נקבל מערכת בחוג סגור ובאמצעותה נוכל לייעל את המערכת בהגעה לערך המטרה.

## מצב 6:

המערכת תקבל ערך מטרה, ואת ערכי מקדמי הבקר  $K_p, K_i, K_d$  ולאחר מכן גם את האות שיוזן למנורת ההפרעה החיצונית.

מצב זה דוגם בתדר בקרה של  $1000[Hz]$  כלומר ביצוע תיקון כל 1 מילישנייה.

לדוגמה:

"6,600,6,80,10,60" המערכת תזין את הנתונים:

ערך מטרה: 600,

$$k_p = 6, k_i = 80, K_d = 10$$

מנורת ההפרעה תקבל אות  $PWM = 60$ .

המערכת תוציא נתונים ל CVI אשר יספק גרף של תגובת המערכת כפונקציה של הזמן.

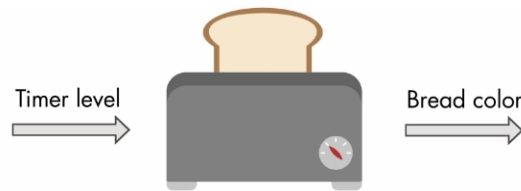
## 4. מערכת בקרה בחוג פתוח

### 4.1 – מבוא

בקרה בחוג פתוח היא בקרה ללא משוב. כלומר, המשתמש מגדיר את ערך המטרה, המערכת מבצעת את ההתאמות ושולחת את האות המתאים לARDUINO. לאחר שליחת האות אין משוב חזרה למערכת ולכן אין תיקון של השגיאה, ואין יכולת לבקר את התוצאות – לכן לא נוכל לשלוט בזמני העלייה, זמן ההתייבשות והשגיאה הסופית.

בחלק זה של הפרויקט, נכניס את המערכת למצב 3, בו יתבצע כיול והתאמה של פונקציית הבקרה. לאחר מכן נזין את ערך החיישן הרצוי ונבדוק את ביצועי המערכת – מהו הערך המתקבל. ה CVI ייקח את ערך החיישן הרצוי – TARGET, יעביר אותו בפונקציה המקרבת שמצאנו במצב 3 ותשלח את ערך ה Duty cycle המתאים אל הארדואינו.

בטוסטר קפיצי, המשתמש קובע את הערך מהאפשרויות שנמצאות במכשיר (ערך מטרה) וממתין זמן מסוים עד לסיום התהליך ללא איזשהו משוב. מכיוון שאין משוב אז גם במידה וישנן שגיאות מסוימות לא מתבצעים תיקונים כמו במקרים של בקרה בחוג סגור.



איור 3 - אילוסטרציה לבקרת חוג פתוח במערכת חימום צנימים

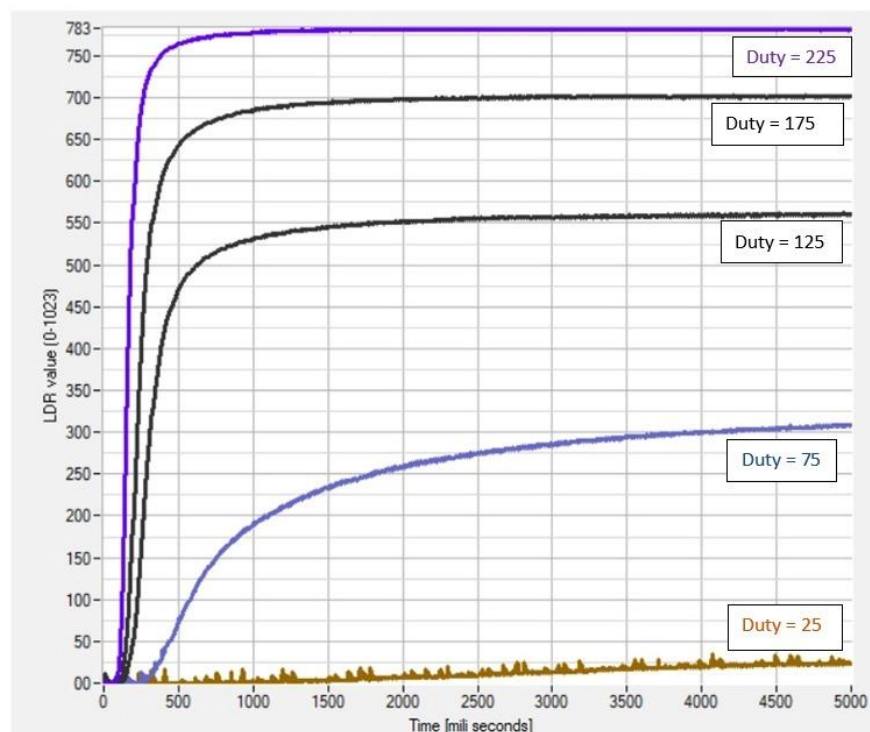
## 4.2 - בדיקת זמן התכנסות

בחלק זה נדגום מספר ערכי DUTY CYCLE שונים למשך חמש שניות. זאת בכדי לבדוק את זמן ההתכנסות הנדרש לכל ניסוי.

המערכת מושפעת משינויי טמפרטורה של הנורות ומכאן משתנה ערך החיישן המתקבל. מרגע קבלת האות, המנורה מתחילה להתחמם, אך לוקח לה פרק זמן מסוים עד להגעה לערך הסופי שלה, כתלות באות ה PWM שהוזן.

נרצה לבדוק כי אכן קיימת התכנסות בפרק זמן של שתי שניות כך שנוכל לבצע את הניסויים השונים עבור ערכים סופיים רצויים, בפרק זמן הנתון.

כשנבדוק את זמן ההתכנסות נביט על טווח של ערכי DUTY ונרצה לבחון האם קיים טווח רחב דיו אשר מגיע להתכנסות תוך חמש שניות. יחד עם זאת, נצפה לקבל דגימות אשר לא מספיקות להתייבב על ערך מסוים בפרק זמן זה, אלו יהיו דגימות עם Duty נמוך, שכן זמן העלייה יהיה ארוך וגם זמן ההתייבבות יהיה ארוך בהתאמה. את בדיקת זמן ההתכנסות נעשה ע"י מצב 3 כאשר נזין את הפקודה "3,DUTY" כאשר ה DUTY משתנה בכל דגימה. בין בדיקה לבדיקה נמתין שלוש שניות על מנת לתת למנורה זמן להתקרר וכך לשפר את הסיכוי שהתנאים בין כל מדידה יהיו זהים ולמנוע מצב בו המנורה חמה בטרם החלה הבדיקה שתוביל לשינוי בתוצאות ולמדידות לא אחידות.



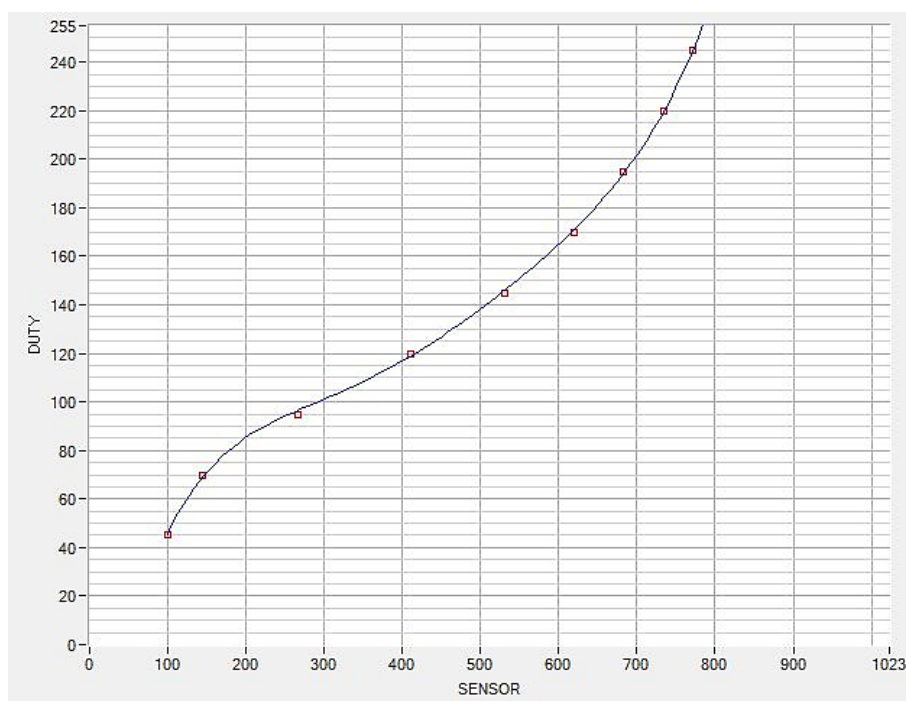
גרף 1 - גרף חיפוש מגמת התייבבות על ידי הזנת ערכי DUTY

הגרף מציג את ערכי החיישן כפונקציה של זמן המדידה (5 שניות) ואת ערכי DUTY השונים (25-225) – החל מערך של DUTY של 25 וכל מדידה נוספת קפיצה של 50 DUTY). ניתן לראות כי החל מערך של 125 ומעלה ישנה התכנסות כבר לאחר כ 2 שניות. לבסוף, כאשר בוחנים את ערכי ה-DUTY הנמוכים (25-75) מבחינים בעליה מסוימת אך קשה להבחין בהתייבשות בזמן הנתון. לסיכום נוכל להסיק כי פרק זמן של חמש שניות לכל דגימה הוא מספיק עבור ערכי CYCLE DUTY גדולים מ 125.

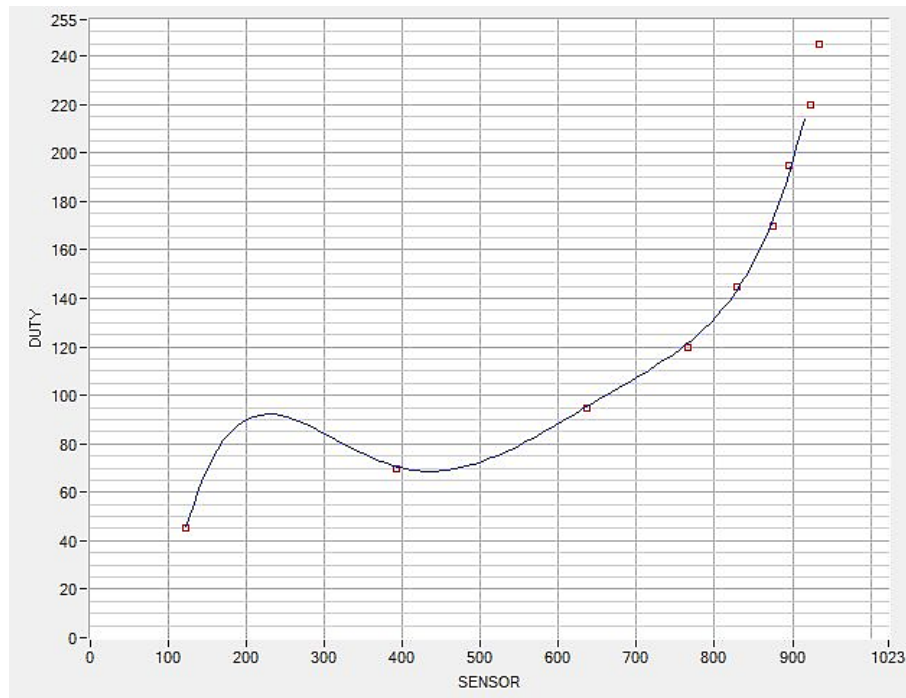
### 4.3 – כיול המערכת

בשלב זה נבצע עשר מדידות בערכי DUTY שונים, עם הפרש של 30 שניות בין כל מדידה, בדומה לבדיקת זמן ההתכנסות ונדגום את ערך החיישן עבור כל ערך DUTY שהזנו במטרה למצוא מעלת פולינום נכונה עבור פולינום המקרב את הקשר בין ערך ה duty לערך החיישן, ובשימוש פולינום זה נבנה פונקציית בקרה אשר תוכל לחזות את ערך ה duty הדרוש מהמערכת כדי להגיע לערך חיישן רצוי. תוצאות המדידה:

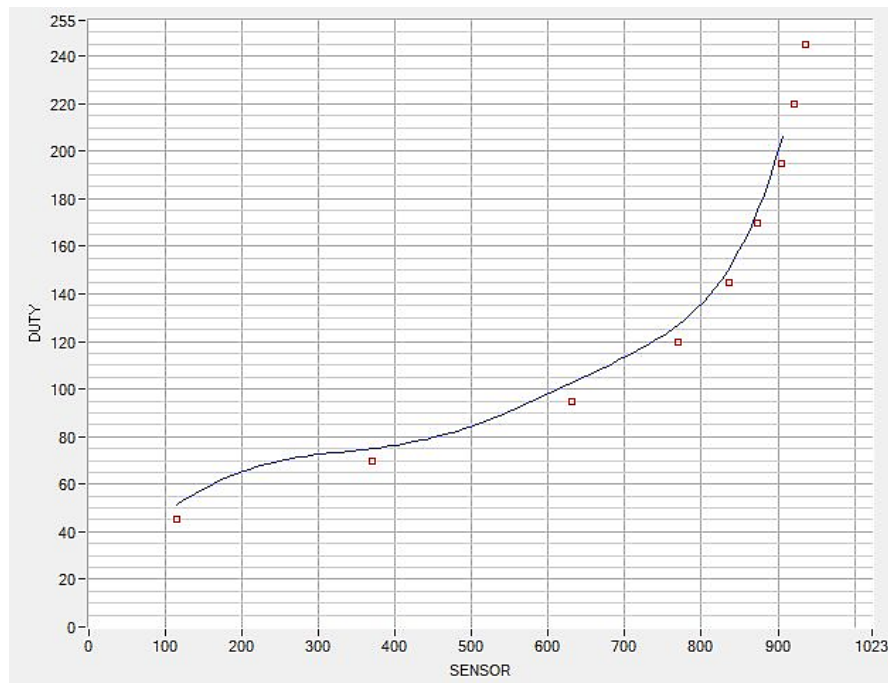
נייצר את הפונקציה  $DUTY = f(SENSOR)$  אשר מבצעת את הפעולה ההפוכה למתואר מעלה בכך שהזנת ערך חיישן נקבל ערך DUTY מתאים כמצופה בטווח קירוב טוב בין הערך המצוי ורצוי. נעביר את נתוני הטבלה ל CVI שם נעלה על גרף את עשר הנקודות ואת הפולינום המקורב. קירוב הפולינום נעשה על ידי פונקציה אשר בין היתר מקבלת את מעלת הפולינום. המטרה היא למצוא פולינום בעל שגיאה קטנה העובר בכל הנקודות בצורה החלקה ביותר כפי שנראה באיורים מטה.



איור 4 - גרף מיצוי פולינום ממעלה 4



איור 5 - גרף מיצוי פולינום ממעלה 5



איור 6 - גרף מיצוי פולינום ממעלה 6

כאשר מסתכלים על קירובים ממעלה רביעית, חמישית ושישית רואים כי מתקבלים קירובים טובים ברמה מספקת.

כלל הגרפים מתארים את ערכי הDUTY (ציר Y) וערכי החיישן LDR (ציר X).

בהתבסס על כלל השיקולים שפירטנו מעלה נמצא כי פולינום ממעלה רביעית הינו המתאים ביותר. המקדמים שהתקבלו לפולינום מסדר 4 (כלומר 5 מקדמים).

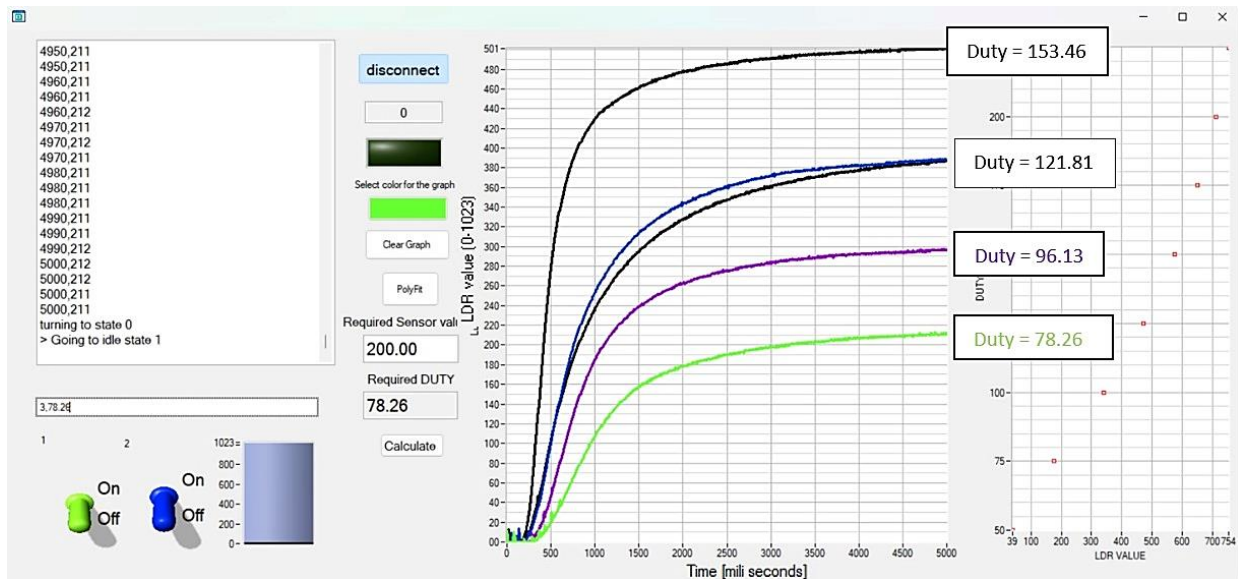
מקדמי הפולינום:

Name	Value
-coef_arr	0x00418DF0
coef_arr[0]	129.7644909234169006
coef_arr[1]	-1.2028702167140404
coef_arr[2]	0.0051794871281997
coef_arr[3]	-0.0000079525681741
coef_arr[4]	4.190777260141483e-09
coef_arr[5]	0
coef_arr[6]	0

איור 7 - מקדמי הפולינום מדרגה 4 של הפולינום הנבחר

#### 4.4 – בדיקת המערכת המכויילת

בשלב זה נבחן את רמת איכות מערכת הבקרה בחוג פתוח שיצרנו. נבחן את פונקציית הבקרה ואת הפולינום מהסעיף הקודם האם הוא באמת מצליח להגיע לערך מטרה שהמשתמש מזין לו. בפועל אנו נזין למערכת ערכי חיישן רצויים, כלומר ערכים עליהם נרצה שהמערכת תתייצב לאחר חמש שניות. המערכת תכניס ערך זה אל תוך פולינום הקירוב שמצאנו, ותשלח את ה DUTY המתאים למנורה ולבסוף נעלה את ערכי החיישן אל מול הזמן על גרף לבחינת התוצאה.



גרף 2 - הגרפים המתקבלים אחרי חישוב DUTY מוערך לפי הפולינום המתקבל

ערך רצוי	Duty cycle	ערך מצוי	אחוז שגיאה
200	78.26	211	10.55%
300	96.13	296	1.35%
390	121.81	387	0.77%
390	121.81	388	0.51%
500	153.46	501	0.25%

איור 8 - טבלת הערכים הרצויים והמתקבלים והשגיאה המתקבלת עבור אותם ערכים בהדלקת הנורות בחיישן

ניתן לראות בבירור כי ככל שהערך הרצוי עולה כך השגיאה יורדת. עבור ערכי LDR רצויים קטנים, מנופק ערך DUTY CYCLE קטן אשר אינו מספיק בשביל להגיע קרוב לערך LDR הרצוי בזמן הדגימה.



בבדיקת זמן התכנסות על מנת להבין עבור אילו ערכי DUTY מתקבלת התכנסות למטרה בזמן הדגימה שהוגדר מראש (5 שניות). חלק זה היה חשוב על מנת להבין את מגמת השגיאות שהתקבלו לאחר מכן בבדיקה שערכנו לאחר כיול המערכת (סעיף 4.4). הכיול של המערכת נעשה על ידי מציאת פולינום בקירוב גבוה בהתאם לנקודות הדגימה ובניית פונקציה המקבלת ערך חיישן ומוציאה ערך DUTY.

בבדיקת הכיול עמדנו על ההבדלים בין ערכי החיישן שהתקבלו. ביצועי המערכת הינם סבירים כשמדובר בערכי DUTY גבוהים אך נמוכים בערכי דיוטי בינוניים\נמוכים. במערכת מסוג זה לא קיים משוב שזה יתרון מבחינת פשטות ומבחינה תכנותית אך חסרון מבחינת דיוק המערכת. בנוסף, כיול המערכת שבוצע עבור ערכי DUTY שונים נכון אך ורק עבור המערכת הספציפית שקיבלנו ואין להסיק מתוצאותיה עבור מערכות אחרות. על פי דעתנו מערכת כזו יכולה להיות הצלחה רק במידה ורמת הדיוק היא מעל עד 1% ולא פחות כי ברמת ערכים נמוכים מתקבלת שגיאה מעל 1% מה שכן גם דרישה למקדם בטיחות מבחינת הכפלה של המקדם בשגיאה מינימלית.

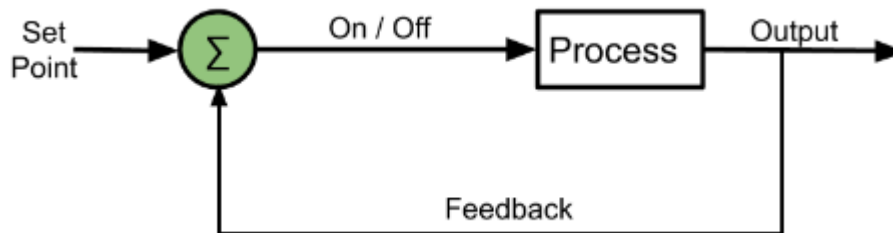
## 5. בקרת ON-OFF

5.0 – מבוא

בקרת ON – OFF היא הצורה הבסיסית והאינטואיטיבית ביותר של בקרה בחוג סגור. בקרה מסוג זה מדליקה על מקסימום או מכבה לחלוטין את האות הנכנס, וכך בעצם מנסה לשמור על ערך החיישן סביב הערך הרצוי.

נזין למערכת ערך חיישן רצוי, תדר בקרה וערך מקסימום של CYCLE DUTY. הארדוואינו יבצע בקרה בתדר שהגדרנו אך יזין נקודות בקצב של 100 [Hz] ללא תלות בתדר הבקרה שהגדרנו. בבקרה זו ישנו משוב חזרה למערכת, וכל דגימה מחדש מוזן ערך השגיאה. כלומר, המערכת בודקת את ערך החיישן הנוכחי, תבדוק האם הוא גדול או קטן מהערך הרצוי ולאחר מכן תכבה או תדליק את הנורה בהתאם.

בעקבות כך נצפה לקבל תנודות, סביב הערך הרצוי. זאת מכיוון שהמערכת נדלקת ונכבית. ככל שתדר הבקרה יהיה גדול יותר – כלומר שגיאת המערכת תחושב יותר פעמים בשנייה, כך התנודות סביב הערך הרצוי יהיו קטנות יותר.



איור 9 - סכימת בקרה ON OFF

פעולות המערכת על פי סדר הריצה הינן:

1. קבלת ערך מטרה
2. חישוב שגיאה.
3. בדיקת השגיאה שהתקבלה.
4. הדלקה או כיבוי המנורה על פי סימן השגיאה (שגיאה חיובית מצריכה הדלקה של המנורה ושגיאה שלילית מצריכה כיבוי של המנורה).
5. שליחת הערך שהתקבל חזרה להשוואה אל מול ערך המטרה הרבוע (משוב).

חשוב לציין כי למעגל בקרה זה ישנו קצב בקרה מוגדר מראש של 100 הרץ. ההתנהגות שאנו מצפים לה הינה עליה אגרסיבית יחסית עד לאזור המטרה ולאחר מכן קבלת תנודות (אוסילציות) קבועות יחסית סביב המטרה כתלות בקצב הדגימה. כלומר, ככל שנגדיל את קצב הדגימה השגיאות יהיו קטנות יותר אך עד גבול מסוים הקשור כבר למגבלות אחרות כמו מגבלות מנורה ומגבלות ערך int בהגדרת פרמטר קצב הדגימה כערך INT ההגבלה היא עד 1000 הרץ (ערך של 1) מכיוון שערך גבוה יותר יוביל לערך עשירי שהמשתנה ה-INT יקלוט כ-0 וישבש את הדגימה.

## 5.1 הקוד לבקרת ON-OFF:

```
case 5:
    sscanf(rdata + 2, "%d,%d,%d,%d", &target,&sampling_time,&duty,&duty_2);
    now_time = millis();
    while(now_time - start_time <= 5000)
    {
        if(now_time - start_time >= 2500){
            analogWrite(9,duty_2);
        }
        if (now_time - prev_time >= sampling_time )
        {
            LDR_val = analogRead(0);
            error = target - LDR_val;
            sprintf(data, "1,%lu,%d",now_time-start_time
, LDR_val);
            Serial.println(data);
            //analogWrite(9,duty_2);
            if (error > 0)
            {
                analogWrite(10,duty);
            }

            else
                analogWrite(10, 0);

            prev_time = now_time;

        }
        now_time = millis();
    }
    Serial.println("*");
    Serial.println("Returning to state 0");
    state = 0;
    break;
```

הגדרת קצב דגימה

חישוב השגיאה

תנאי בקרת off/on

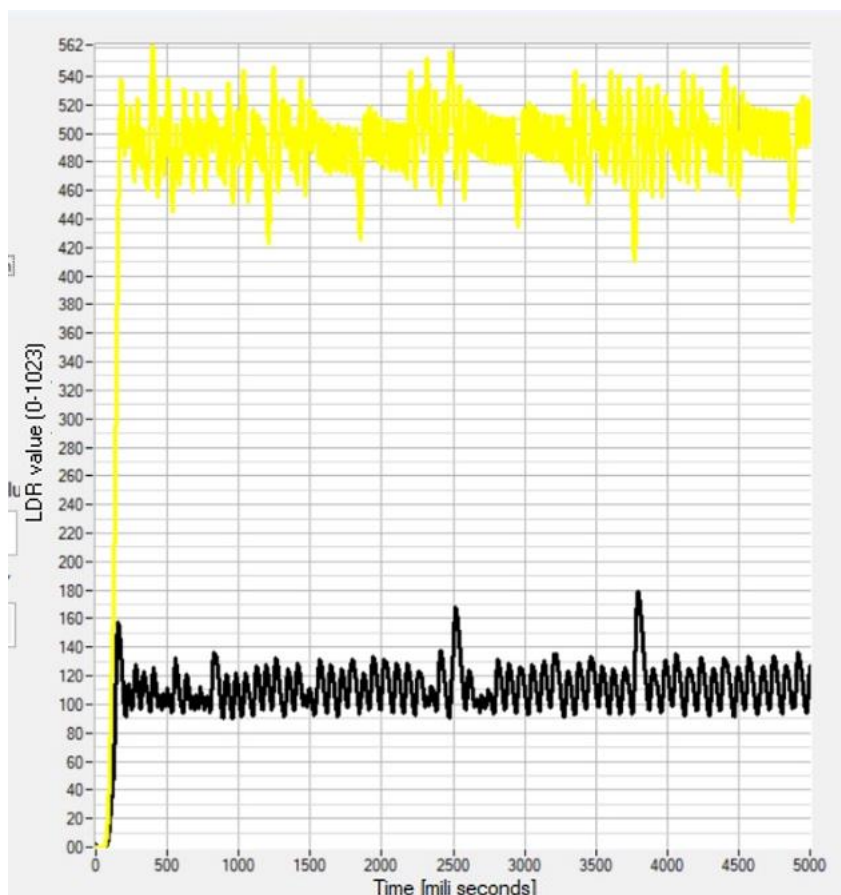
הדלקת נורה

כיבוי נורה

הקפצת ערך הרצה

## 5.2 בדיקת מערכת הבקרה

נבצע התכנסויות לערכי מטרה שונים:



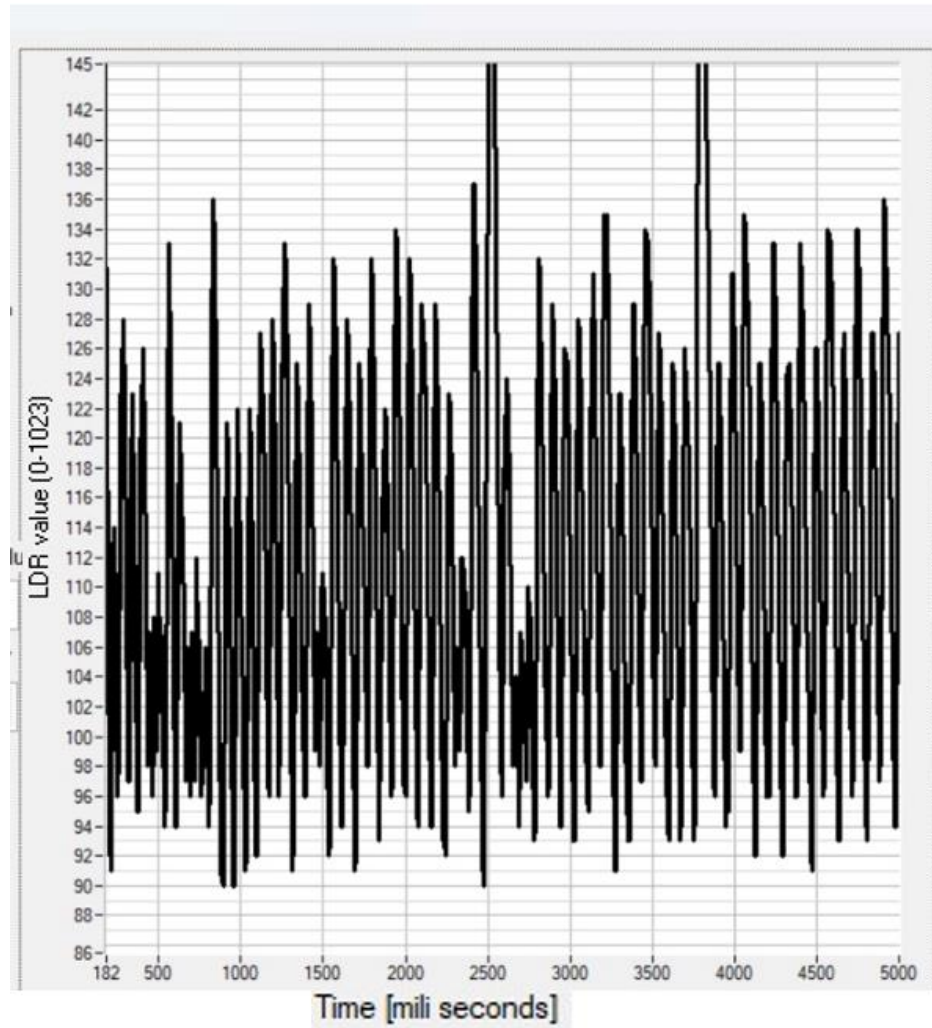
גרף 3 - גרפים המתקבלים מבדיקת מערכת הבקרה ON OFF

#	Target	Max target	Min target	O.S.
1	100	180	90	145
2	500	562	410	562

לפי נתוני הטבלה ניתן לראות כי ישנם התכנסויות בשגיאות בינוניות יחסית לערך המטרה כמצופה. כמו כן כאשר ערך LDR רצוי הוא נמוך כמו הערך 100, ישנה שגיאה גדולה יותר מתגובת היתר בהתחלה שכן קשה לו לפצות את השגיאה בערכים נמוכים אלו. לעומת זאת כאשר ערך התחלתי גבוה יותר כמו הגרף הצהוב שהוא בערך של 500, תגובת יתר היא השגיאה הכי גדולה המתקבלת בזמן דגימת חיישן LDR.

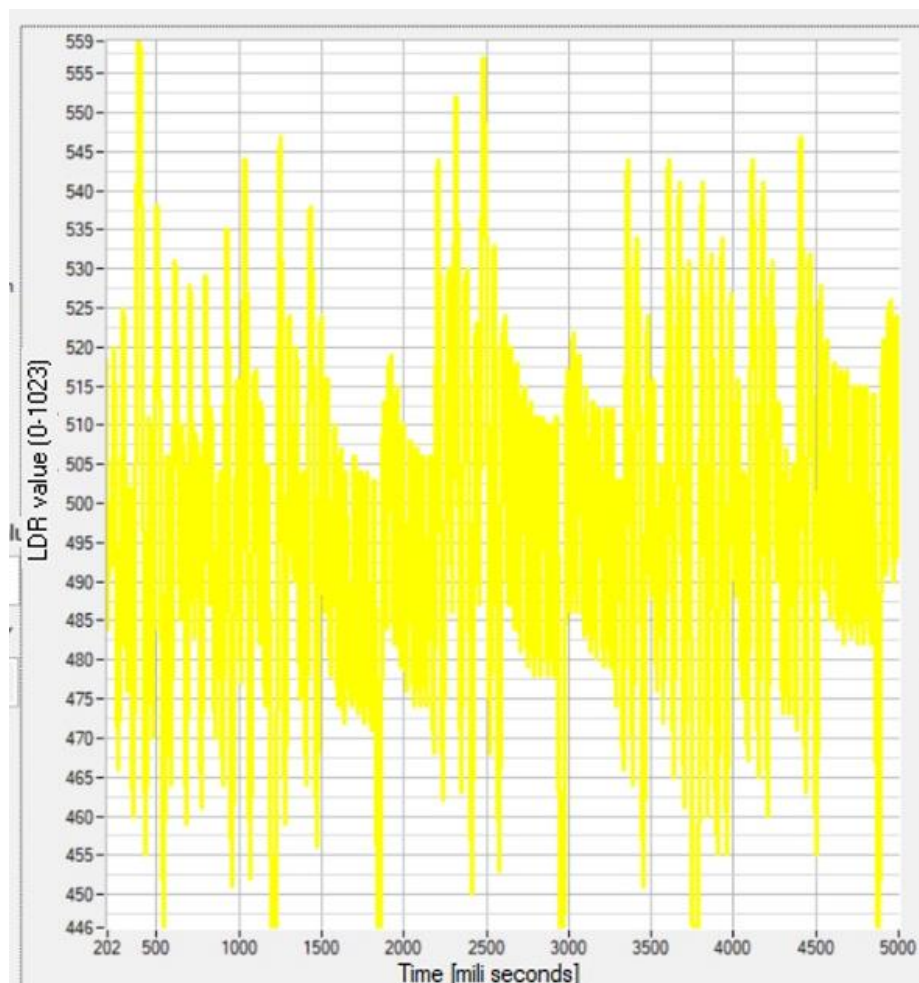
### 5.3 השוואת תנודתיות סביב מטרה נמוכה ומטרה גבוהה:

נציג את הבדלי התנודות סביב מטרה נמוכה וסביב מטרה גבוהה באותו קצב דגימה: הגף הבא מראה זום אין לתנודות סביב מטרה נמוכה (100):



גרף 4 - תנודות סביב מטרה נמוכה (100)

ניתן לראות כי סביב מטרה נמוכה ערכי התנודתיות החיוביים יהיו גדולים יותר מאשר התנודות תחת המטרה, וזאת מכיוון שבטווח זה ההשפעה של נורה הדולקת בעוצמה מרבית גדול יותר ובעצם "מושך" מעלה יותר.



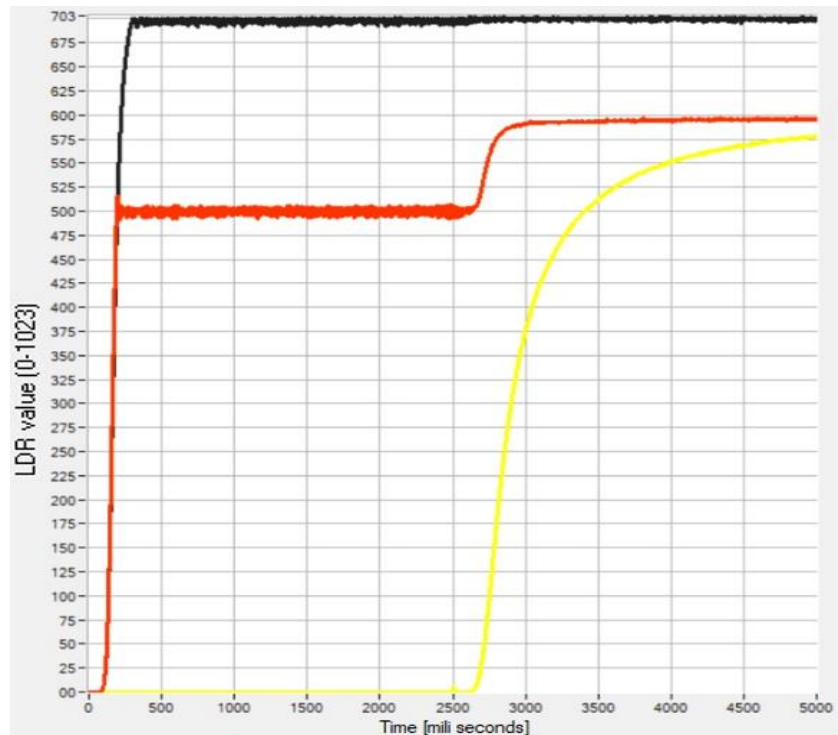
גרף 5 - תנודות סביב מטרה גבוהה (500)

סביב מטרה גבוהה ההתנהגות שונה מההתנהגות סביב מטרה נמוכה בכך שערכי התנודתיות החיוביים יהיו קטנים יותר מאשר התנודות תחת המטרה ביחס לגרף הקודם בירך מטרה של 100, וזאת מכיוון שבעוצמה גבוהה יותר קצב קירור הנורה (קצב מסירת חום) גבוה יותר מקצב מאשר קצב חימום הנורה (קצב קליטת חום).

\* בדומה לדוגמא שניתנה בכיתה עבור ערבוב מידי של כוס קפה חמה עם חלב פושר (קצב מעבר חום מהיר) אל מול המתנה טרם ערבוב הקפה עם החלב (קצב מעבר חום איטי יותר).

#### 5.4 – התמודדות עם הפרעה חיצונית

נציג את התמודדות האלגוריתם עם הפרעה חיצונית ונדון בתוצאות הגרף:



גרף 6 - גרף המציג את התמודדות האלגוריתם ON OFF עם הפרעה של המנורה השנייה

התרשים מעלה מציג הכנסת הפרעה חיצונית לאחר 250 דגימות מתוך 500 (לאחר כ-2.5 שניות) בעוצמת תאורה של 150 (0-255 PWM) המתוארת בגרף הצהוב ומגיעה לערך סנסור של 575 (0-1023).

הגרף האדום מתאר את התמודדות האלגוריתם עם הכנסת ערך מטרה נמוך מערך התכנסות ההפרעה (200) ואכן ניראה כי לפני הכנסת ההפרעה הגרף מתייצב לערך המטרה אך מרגע הכנסת ההפרעה, המערכת לא מצליחה להתמודד איתה מכיוון שההפרעה איננה ניתנת לשליטה בשונה מהמנורה הראשונה ולכן מתכנסת לערך ההתייצבות של מנורת ההפרעה.

הגרף השחור מתאר את התמודדות האלגוריתם עם הכנסת ערך מטרה גבוה מערך ההפרעה (700).

כצפוי, מכיוון שעריך ההפרעה נמוך יותר, הוא לא משפיע על ההתכנסות למטרה מכיוון שניתן לשלוט במנורה הראשונה ללא כל השפעה ולכן היא נשארת יציבה ומצליחה להתמודד עם ההפרעה.

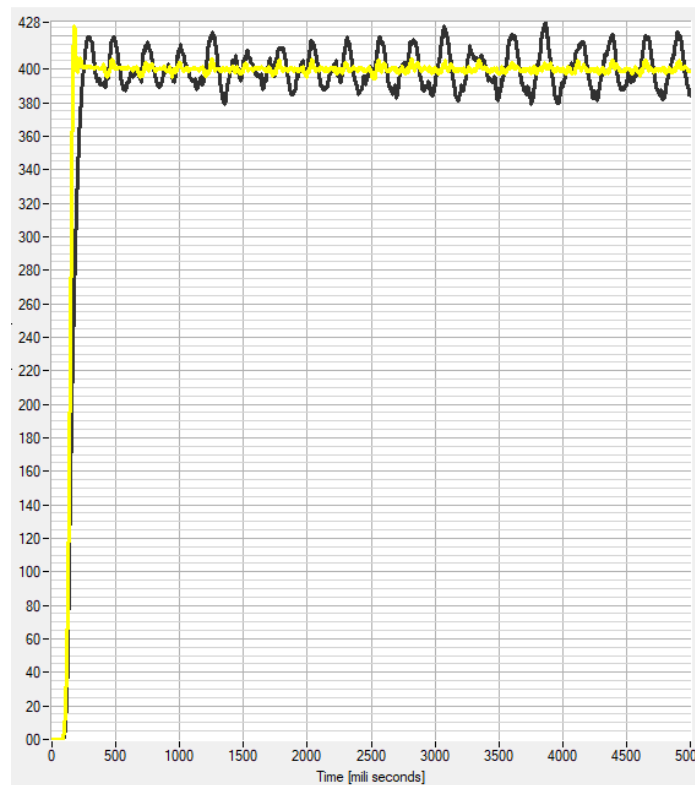
## 5.5 – שיפור ביצועי המערכת

במערכת OFF/ON ניתן להוסיף שיפורים באלגוריתם שיכולים להוביל לקירוב טוב יותר סביב ערך המטרה:

### 1. הגברת קצב הדגימה

בניסוי זה התבקשנו להגדיר קצב דגימה קבוע של  $100[\text{Hz}]$  כפי שהצגנו בסוף המבוא בסעיף 5.1. הגדלת קצב הדגימה תוביל להקטנת התנודות סביב ערך המטרה ולקירוב טוב יותר. כמו כן כפי שצוין בסוף המבוא בסעיף 5.1 יש גבול לקצב הדגימה והוא סופי, לכן אם נגדיר קצב דגימה מקסימלי של  $1000[\text{Hz}]$  המערכת תדע להתמודד פי עשר יותר טוב עם שגיאת המטרה.

2. חשוב לציין כי כל מערכת מתנהגת באופן שונה ומתכנסת לערכי מטרות מסוימים בצורה טובה יותר וטובה פחות תלוי מערכת (תאורה חיצונית בחדר רגישות החיישן, נגדים שונים וקבל שונה). המערכת שלנו מתבססת על מנורת להט וחיישן תאורה ולכן בעצם מתבססת על קצב מעבר חום. ככל שערך המטרה יהיה גבוה יותר כך תרומת ההדלקה והכיבוי של הנורה במצב מקסימלי (255) יהיה מעודן יותר ונקבל אוסילציות קטנות יחסית בניגוד לערכי מטרה נמוכים בהם ערך תאורה מקסימלי הינו אגרסיבי מאוד ויוצר אוסילציות גדולות יותר סביב ערך המטרה הנמוך. ולכן נוכל לשפר את ביצועי המערכת על ידי בחירת ערך תאורה סלקטיבי על פי ערך מטרה שאליו אנו שואפים להתכנס. בדוגמא מטה ניתן לראות התכנסות לערך מטרה בינונית (400) בשימוש תאורה בעוצמה מלאה (255 גרף שחור) ובעוצמה נמוכה (100 גרף צהוב).



גרף 7 - התכנסות ערך מטרה ידוע עם קצב דגימות מקסימלי של  $1000\text{Hz}$  (גרף צהוב) לעומת ערך שרירותי עם קצב דגימות של  $100\text{Hz}$  (גרף שחור)



## 5.6 – סיכום בקרת ON-OFF

בפרק זה בחנו מערכת בקרה בחוג סגור מסוג OFF/ON על ידי הכנסת ערכי מטרה ותדר דגימה למערכת וראינו כיצד המערכת מתכנסת על ידי אלגוריתם פשוט שמתבסס על הדלקת הנורה כאשר הערך הנמדד נמצא נמוך מערך המטרה שגיאה חיובית וכיבוי הנורה כאשר הערך הנמדד נמצא גבוה מערך המטרה שגיאה שלילית.

כמו כן בחנו את השפעת ערך קצב הדגימה להתכנסות למטרה ומצאנו כי על מנת להקטין את האוסילציות סביב המטרה יש לבחור ערך קצב דגימה גבוה ככל הניתן בכפוף למגבלות המערכת. בנוסף, ראינו כיצד האלגוריתם מתמודד עם הכנסת הפרעה חיצונית של הדלקת נורה שניה כשמדובר בערכי מטרה נמוכים מערך ההפרעה וגבוהים ממנו. בפרק זה גם ראינו את ההשפעה של סוג המערכת. המערכת המתבססת על קצב מעבר חום.

בהיבטי אוסילציות על מטרות גבוהות ועל מטרות נמוכות ועמדנו על הסיבה לתופעות אלו:

בבחינת מערכת הבקרה מצאנו כי היא עדיפה על מערכת בקרה בחוג פתוח ומובילה לקירובים טובים יותר סביב ערך המטרה. נקודת החוזקה העיקרית של מערכת בקרת OFF/ON הינה השימוש באלגוריתם פשוט ואינטואיטיבי, אך הבעיה העיקרית היא שהדיוק אינו אחיד לכלל המטרות בכך שמטרות גבוהות מובילות להתכנסות טובה הרבה יותר בהשוואה למטרות נמוכות בהם כיבוי והדלקת הנורה משפיעים בצורה אגרסיבית יותר עקב קצה מעבר החום של הנורה.

## 6. בקרת PID

### מבוא

בקרת PID היא בקרה בחוג סגור אשר התיקון לשגיאה נעשה על בשלושה פרמטרים אשר כל אחד מהם אחראי על חלק אחר במאמץ ההתכנסות אל ערך המטרה, פועלים במקביל ונסכמים יחדיו על מנת ליצור ערך DUTY אחד. בקרת PID בנוי כאלגוריתם שתוכנן לפי החשיבה האינטואיטיבית של בני האדם

באלגוריתם זה מצוינים שלושת הבקר המשתנים:

P – בקר פרופורציונאלי, אחראי על ההתכנסות הפרופורציונאלית הראשית לפני דרישת התיקונים לטווח הרצוי. הבקר מכפיל את השגיאה הפרופורציונאלית תלוית הזמן בקבוע הפרופורציונאלי כתלות בקצב הדגימה.

$$P = K_p * error(t)$$

I – בקר אינטגרלי (אינטגרטור), האחראי בעיקר על ההתכנסות העדינה לעבר ערך המטרה ומשפיע בעיקר על הקטנת ערך השגיאה הסופי (מצב מתמיד) שמתקבל סביב המטרה המחושב על ידי הכפלת מקדם קבוע אינטגרלי באינטגרל השגיאה בזמן.

$$I = K_i * \int_0^t error(t)dt$$

D – בקר דיפרנציאלי (גוזר), האחראי בעיקר על צמצום ערך ה O.S. בכך שהוא מרסן את תגובת הבקר הפרופורציונלי המשפיע מעט על זמן העלייה (לרוב באופן זניח) ומחושב על ידי המשוואה הבאה: הבקר הגוזר שווה לקבוע הבקר הגוזר הנכפל בפרש השגיאות בין השגיאה הקודמת לנוכחית בנגזרת הזמן.

$$D = \frac{de(t)}{dt}$$

בסוף חישוב כל הבקרים נסכום את כולם לפרמטר חדש לכל דגימה כאשר הוא יקרא P.I.D:

$$P + I + D = P.I.D$$

לבסוף נזין את הבקר P.I.D לתוך ערך ה DUTY שהמנורה תקבל וכך מקבל בשאיפה טווח מטרה כמה שיותר מדויק לפי אלגוריתם P.I.D

```

case 6:
    sscanf(rdata + 2, "%d,%d,%d,%d", &target,&Kp,&Ki,&Kd);
    now_time = millis();
    sum_max = (I_MAX / (Ki * dt));
    while(now_time - start_time <= 5000)
    {

        //if(now_time - start_time >= 2500){
        //  analogWrite(9,duty_2);
        //}
        if (now_time - prev_time >= 1 )
        {

            LDR_val = analogRead(0);
            error = target - LDR_val;
            error_sum += error;

            if(error_sum > sum_max) error_sum = sum_max;

            D = (long int) Kd * (error - prev_error);
            P =(long int) Kp * error;
            I = (long int) Ki*error_sum*dt;

            pid = P + I + D;

            sprintf(data, "1,%lu,%d",now_time-start_time ,LDR_val);
            Serial.println(data);
            prev_error = error;
            if(now_time - start_time >= 2500) analogWrite(9,60);

            if (pid >= 255 ) pid=255;
            if (pid < 0 ) pid=0;
            analogWrite(10,pid);

            prev_time = now_time;
        }
        now_time = millis();
    }
    Serial.println("*");
    Serial.println("Returning to state 0");
    state = 0;

```

הגדרת קצב דגימה

חישוב שגיאה נוכחית

סכימת השגיאה לחישוב של הבקר האינטגרלי

בדיקה אם הערך של השגיאה גדול מהערך המקסימלי של שגיאה שהוגדר מראש

חישוב בקר דיפרנציאלי

חישוב בקר פרופורציונאלי

חישוב בקר אינטגרלי

במידה וכן, קביעת ערך שגיאה שווה לערך שגיאה מקסימלי

סכימת ערכי הבקרים לדיוטי

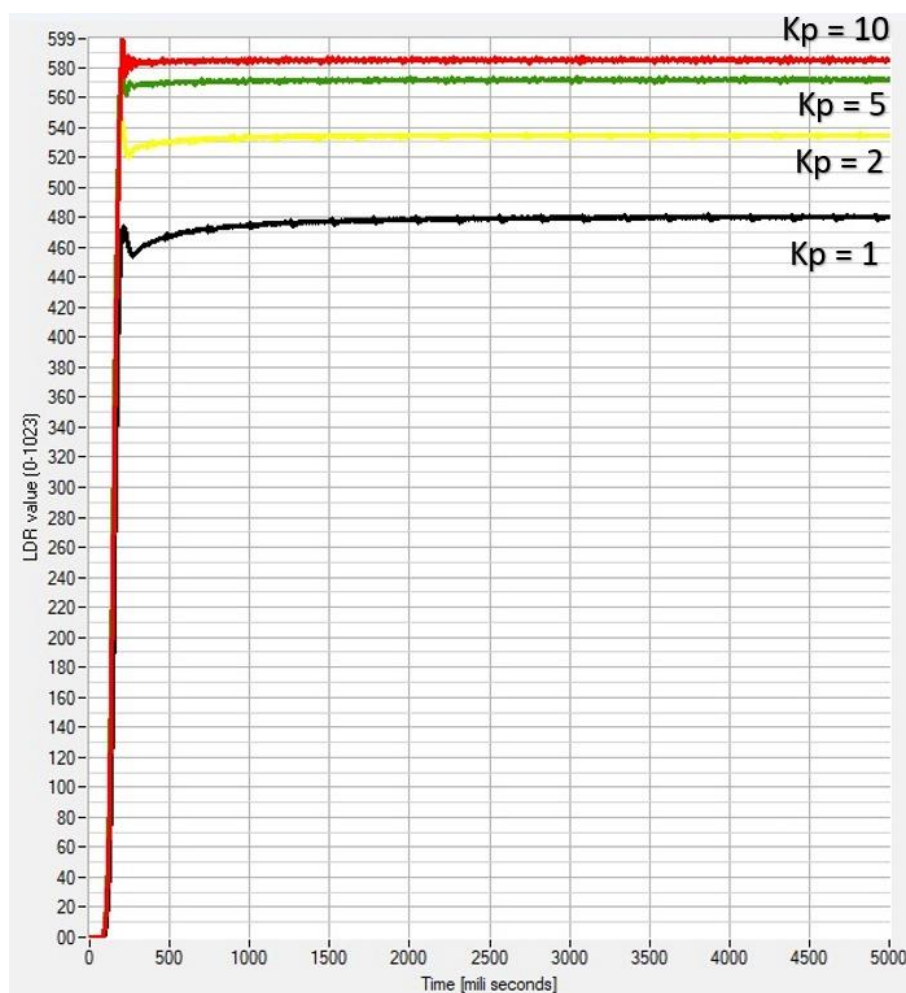
שמירת ערך השגיאה אחרון בזיכרון לחישוב הפרש שגיאות לבקר הגוזר

הגבלת ערך דיוטי מקסימלי ל255

הגבלת ערך דיוטי מינימאלי ל0

## 6.2 – בקר P

עקרון פעולה של בקר P הינו עליה חדה המובילה לזמן עליה מהיר וקירוב טוב יותר למטרה ככל שמגדילים את  $K_p$  המקדם הקבוע עד לערכים גבוהים שכבר ישנה התכנסות למטרה אך נוצרות סביבה אוסילציות באופן זהה להתנהגות בקר OFF/ON בכך שנעשית בדיקה האם ערך השגיאה הוא חיובי או שלילי ובהתאם לתוצאה המתקבלת הנורה נדלקת או נכבית. נציג ארבע התכנסויות של ערכים שונים על גרף בשימוש בקר P לערך מטרה גבוה של 600:



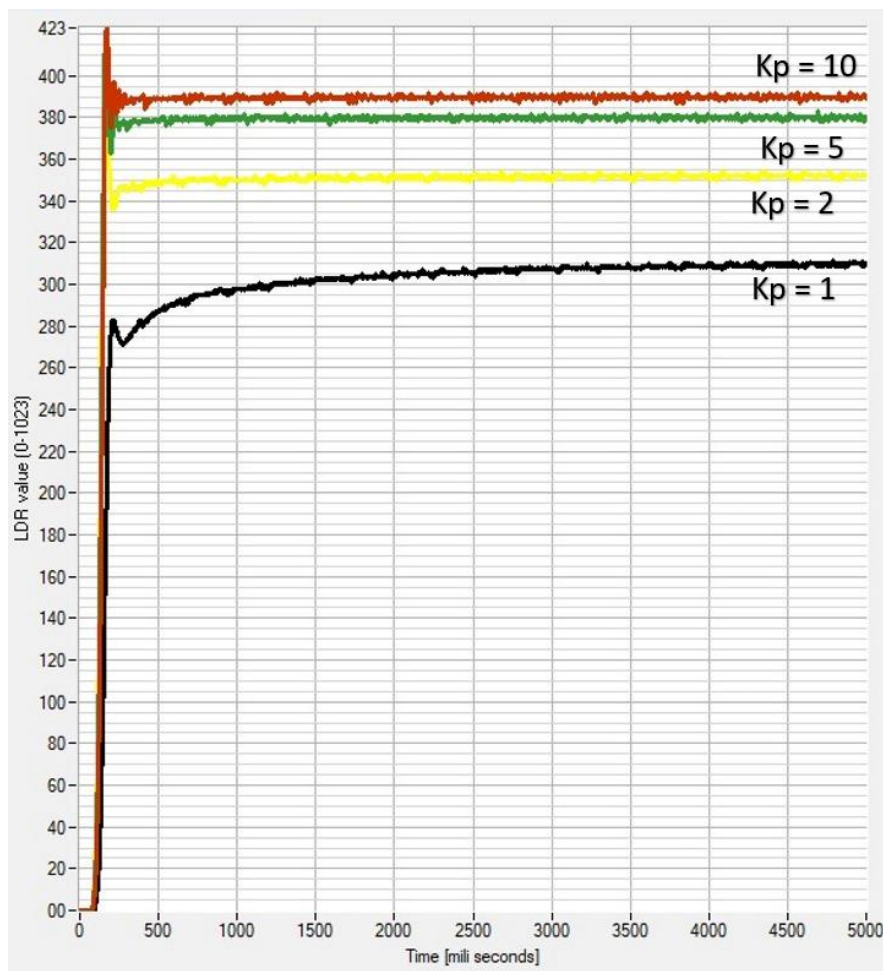
גרף 8 - התכנסויות גרפים במטרה גבוהה לפי שינוי של מקדם קבוע  $K_p$

#	$K_p$	Target	Expected duty	Error	Error in percent
1	1	600	481	119	24.7%
2	2	600	533	67	12.5%
3	5	600	572	28	4.8%
4	10	600	584	16	2.7%

איור 10 - טבלת השוואה של מקדם  $K_p$  למטרה

בגרף הנ"ל ניתן לראות את השפעת  $K_p$  על ההתכנסות לערך מטרה גבוהה שנקבע מראש וערכו 600 .  
 בגרף השחור ערך  $K_p$  הינו 1 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 481, כלומר התקבלה שגיאה גדולה של 24.7% מערך המטרה.  
 בגרף הצהוב ערך  $K_p$  הינו 2 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 533, כלומר התקבלה שגיאה משמעותית של 12.5% מערך המטרה.  
 בגרף הירוק ערך  $K_p$  הינו 5 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 572, כלומר התקבלה שגיאה של 4.8% מערך המטרה.  
 בגרף האדום ערך  $K_p$  הינו 10 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 588, כלומר התקבלה שגיאה קטנה יותר של 2.7% מערך המטרה.

כעת נבחן ארבעה התכנסויות של גרפים עם אותם מקדמים קבועים לערך מטרה חדש בינוני – 400



איור 11 - התכנסויות גרפים במטרה בינוני לפי שינוי של מקדם קבוע  $K_p$

#	Kp	Target	Expected duty	Error	Error in percent
1	1	400	309	91	29.4%
2	2	400	346	54	15.6%
3	5	400	378	22	5.8%
4	10	400	391	9	2.3%

איור 12 - - טבלת השוואה של מקדם Kp למטרה בינונית

בגרף הנ"ל ניתן לראות את השפעת Kp על ההתכנסות לערך מטרה גבוהה שנקבע מראש וערכו 400. בגרף השחור ערך Kp הינו 1 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 309, כלומר התקבלה שגיאה גדולה של 29.4% מערך המטרה. בגרף הצהוב ערך Kp הינו 2 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 346, כלומר התקבלה שגיאה משמעותית של 15.6% מערך המטרה. בגרף הירוק ערך Kp הינו 5 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 378, כלומר התקבלה שגיאה של 5.8% מערך המטרה. בגרף האדום ערך Kp הינו 10 ורואים כי ישנה התייצבות על ערך נמוך יותר מערך המטרה 391, כלומר התקבלה שגיאה קטנה יותר של 2.3% מערך המטרה.

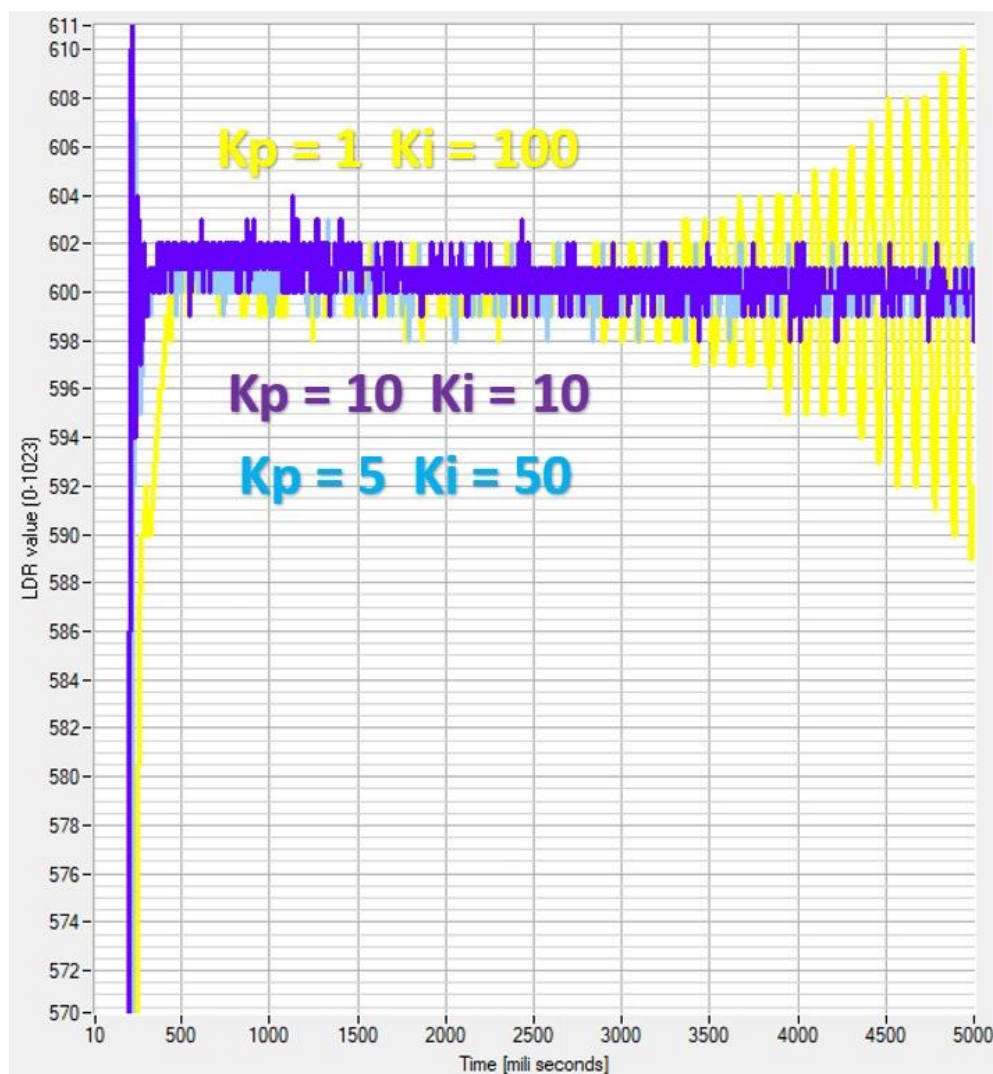
אפשר להסיק מצפייה בגרפים ובתוצאות הנ"ל כי כאשר מדובר בערכי מטרה גבוהים אפשר לקבוע ערך Kp גבוה יותר על מנת להתקרב יותר לערך המטרה בשונה מערכי מטרה בינוניים ונמוכים שבהם ערך Kp גבוה יגרום ל O.S. ולאוסילציות בסביבות ערך המטרה ולהתנהגות שדומה לבקר OFF/ON, וכאשר מדובר בערך קבוע גדול מאוד ה DUTY יהיה שווה לאפס.

### 6.3 – בקר PI

בקר PI הוא בעצם בקר P בתוספת הרכיב האינטגרלי I ותפקידו לבוא לידי ביטוי כאשר הבקר הפרופורציונלי כבר קרוב למדי לערך המטרה ולבצע קירוב מעודן יותר בדומה להאצת רכב. כאשר אנו רחוקים מערך המטרה נלחץ על דוושת הגז בצורה אגרסיבית על מנת להגיע לשם כמה שיותר מהר (בקר P) ולקראת ערך המטרה אנו מורידים מעט את הרגל מהדוושה ומבצעים תמרונים עדינים יותר לעבר ערך המטרה (בקר I).

בפועל, תוספת הרכיב האינטגרלי מתחשבת בסכימה כוללת של כל ערכי השגיאה שנמדדו מרגע הרצת המערכת ובכך מצמצמת את הפער לקראת המטרה במרחב בו בקר P כבר אגרסיבי מדי.

נבחן שלושה התכנסויות בעלות ערכי מקדמים  $K_p$ ,  $K_i$  שונים עבור ערך מטרה גבוה 600:



גרף 9 - - התכנסויות גרפים במטרה גבוהה לפי שינוי של מקדמים קבועים  $K_p, K_i$

#	Ki	Kp	Target	Error range
1	100	1	600	31
2	50	5	600	4
3	10	10	600	6

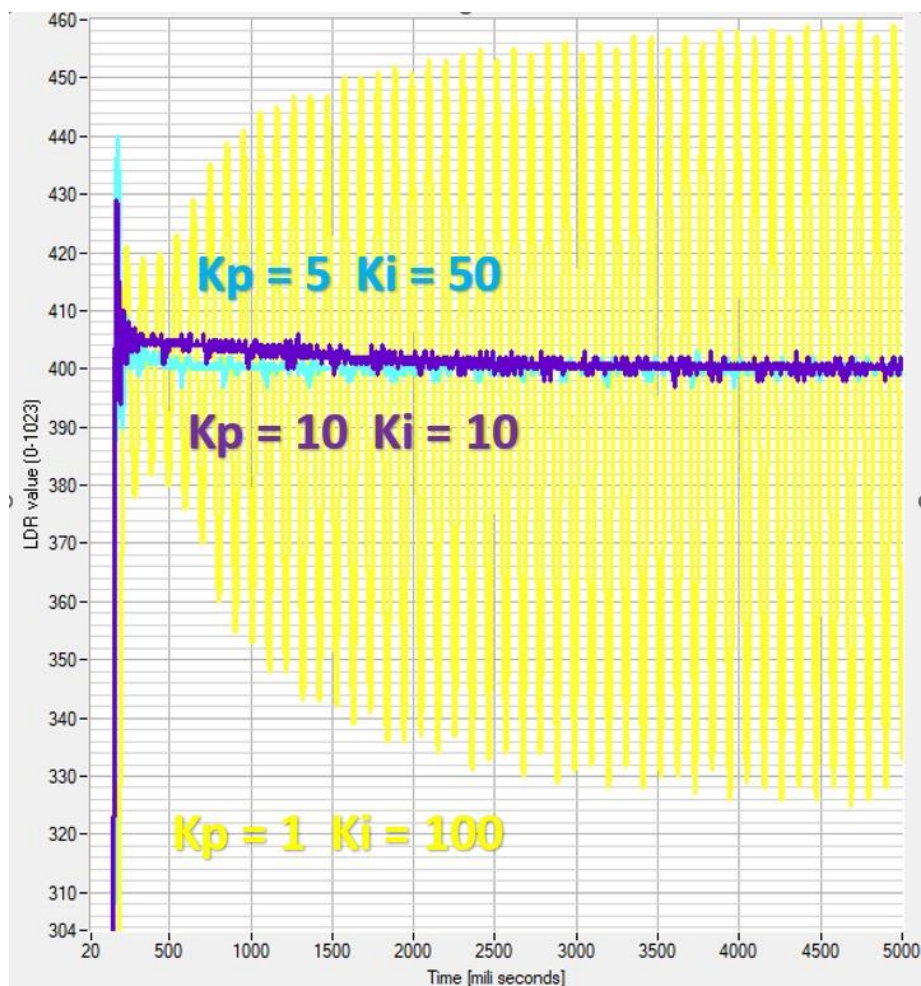
איור 13 - טבלת התכנסויות גרפים במטרה גבוהה לפי שינוי של מקדמים קבועים  $K_i$   $K_p$

ניתן לראות באופן מובהק ששילוב ערכי  $K_p$  נמוכים עם ערכי  $K_i$  גבוהים כמו גרף 1 הצהוב, יוצרים אוסילציות גדולות מאוד מסביב ערך המטרה וזמן עליה ארוך יותר.

מאידך ניתן לקבל תוצאה סבירה במצב הפוך, ששילוב ערכי  $K_p$  גבוהים עם ערכי  $K_i$  נמוכים כמו גרף 3 הסגול, יוצרים אוסילציות קטנות אך בקירוב ניתן לראות שעדיין ישנה שגיאה שלא זניחה.

כאשר נבחן את שלושת הגרפים ניתן לראות גם מהטבלה הנ"ל שהקירוב הכי טוב לפי בקר PI זה קירוב עם ערכי  $K_p$  בינוניים יחד עם ערכי  $K_i$  בינוניים כמו גרף 2 התכלת ולכן קירוב לטווח זה של ערכים יהיה הבחירה העדיפה מבין האפשרויות.

נבחן שלושה התכנסויות בעלות ערכי מקדמים  $K_i$ ,  $K_p$  שונים עבור ערך מטרה בינונית 400 :



גרף 10 - התכנסויות גרפים במטרה בינונית לפי שינוי של מקדמים קבועים  $K_i$   $K_p$



#	Ki	Kp	Target	Error range
1	100	1	400	128
2	50	5	400	4
3	10	10	400	9

איור 14 - טבלת התכנסויות גרפים במטרה בינונית לפי שינוי של מקדמים קבועים  $K_p$   $K_i$

בדומה לאותה בדיקה עם מטרה גבוהה של 600, גם כאן התקבלו תוצאות דומות בהווייתן לתוצאות הנ"ל של בדיקת מטרה גבוהה יותר.

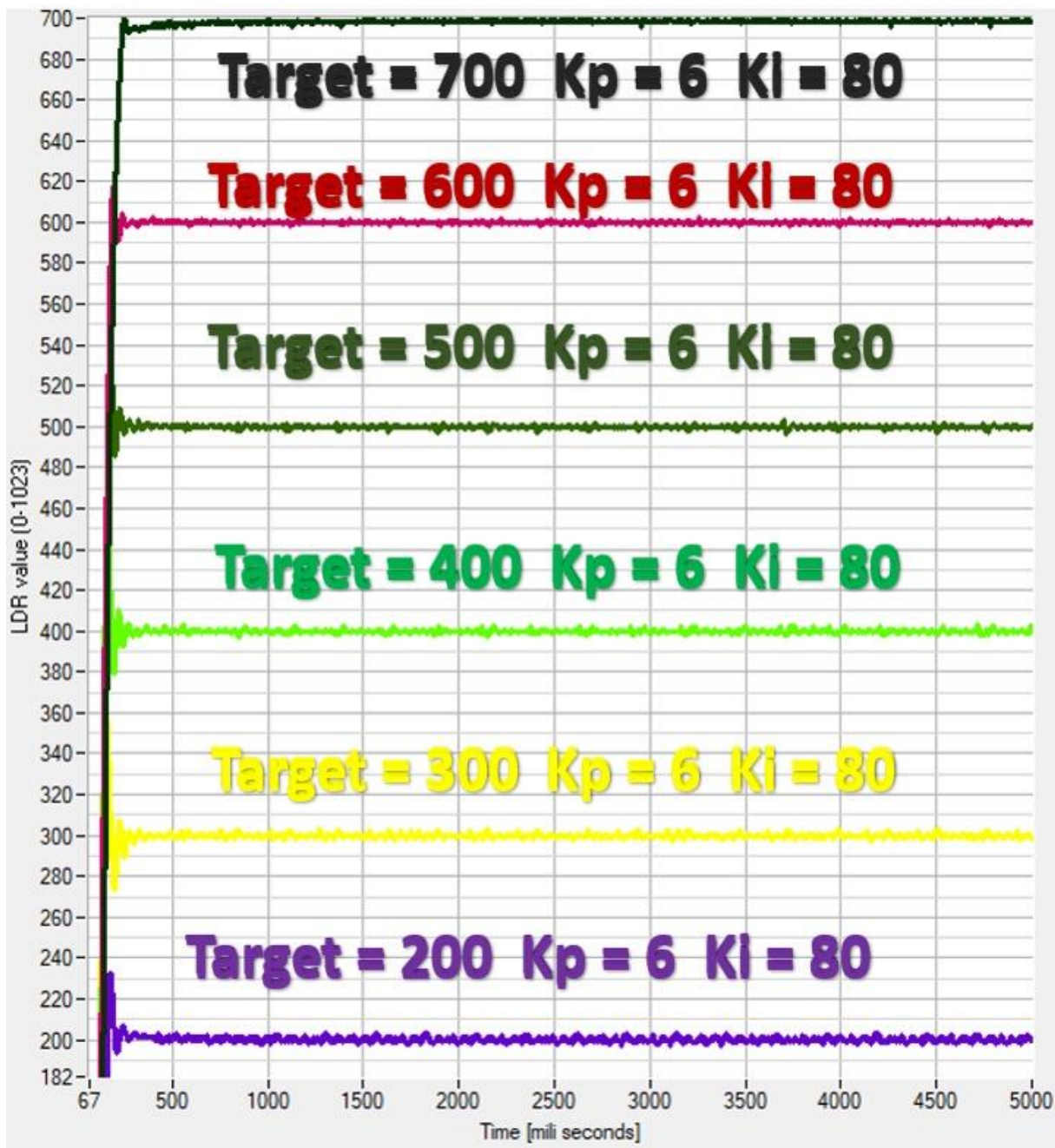
ניתן לראות באופן מובהק ששילוב ערכי  $K_p$  נמוכים עם ערכי  $K_i$  גבוהים כמו גרף 1 הצהוב, יוצרים אוסילציות גדולות מאוד מסביב ערך המטרה וזמן עליה ארוך יותר.

מאידך ניתן לקבל תוצאה סבירה במצב הפוך, ששילוב ערכי  $K_p$  גבוהים עם ערכי  $K_i$  נמוכים כמו גרף 3 הסגול, יוצרים אוסילציות קטנות אך בקירוב ניתן לראות שעדיין ישנה שגיאה שלא זניחה.

כאשר נבחן את שלושת הגרפים ניתן לראות גם מהטבלה הנ"ל שהקירוב הכי טוב לפי בקר PI זה קירוב עם ערכי  $K_p$  בינוניים יחד עם ערכי  $K_i$  בינוניים כמו גרף 2 התכלת ולכן קירוב לטווח זה של ערכים יהיה הבחירה העדיפה מבין האפשרויות.

בהשוואה בין ערך מטרה גבוה לבינוני רואים בעיקר שההשפעה באה לידי ביטוי בכך שזמן ההתכנסות בערך מטרה גבוה מהיר יותר לעומת ערך מטרה בינוני. כמו כן, השגיאות המתקבלות בהתכנסות לערך מטרה גבוה הינם קטנות יותר בהשוואה לשגיאות היתכנות לערך מטרה בינוני.

לאחר מספר שלבים של ניסוי ותהיה הגענו לפי דעתנו לערכי  $K_p$ ,  $K_i$  אופטימליים אשר ייתנו את הקירוב הטוב ביותר במערכת בקרה PI. ערכי מקדמי הבקרים הנבחרים הם  $K_p = 6$ ,  $K_i = 80$ .



גרף 11 - ערכי  $K_p$ ,  $K_i$  שלדעתנו אופטימליים והצגת הגרפים המתקבלים לכל הערכים

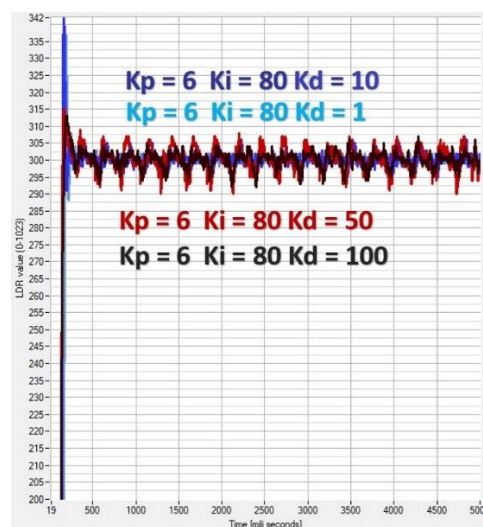
ניתן לראות כי עבור ערכי המקדמים שבחרנו, התקבלו קירובים טובים מאוד בעלי שגיאות קטנות יחסית. כמצופה, ככל שערך המטרה גדל כך גם השגיאה יורדת, האוסילציות קטנות O.S.I נמוך יותר.

## 6.4 – בקר PID

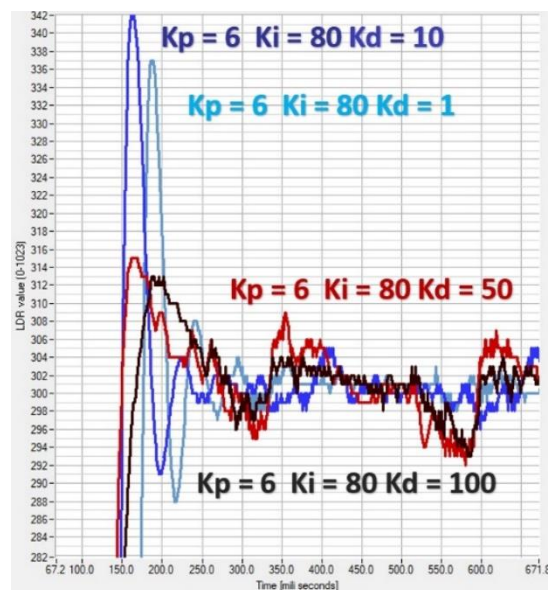
הוספת רכיב דיפרנציאלי D לסכימת הבקר PI גורמת להקטנה עד כדי ביטול של תגובת היתר. בפועל בקר D מרסן את תגובת הבקר הפרופורציונלי ע"י התחשבות בהפרש השגיאות הנוכחי לשגיאה הקודמת בנגזרת הזמן כפול קבוע בקרה גוזר Kd.

נציג שלוש התכנסויות לערך מטרה אחד עבור ערכים משתנים של Kd, כאשר קבועי הבקרים האחרים Kp=6, Ki=80 הם אותם קבועים שנבחרו בסעיף הקודם בתור הקבועים האופטימליים.

נבדוק את הגרפים במטרה קבועה בשביל למצוא את סביבת הקבוע Kd שאיתה יהיה כדאי לעבוד.



גרף 12 - בדיקת ערכי Kd



גרף 13 - זום אין (קירוב) לגרף 12 לראות את תגובת O.S.

\*ניתן לראות מעלה כי עבור ארבעה ערכי  $K_d$  שונים מתקבלות התנהגויות שונות המתבטאות בתגובת היתר וזמן התייצבות כפי שניתן לראות בטבלה מטה:

#	$K_p$	$K_i$	$K_d$	Target	O.S.	זמן התייצבות [ms]
1	6	80	1	300	37	290
2	6	80	10	300	42	310
3	6	80	50	300	15	360
4	6	80	100	300	13	520

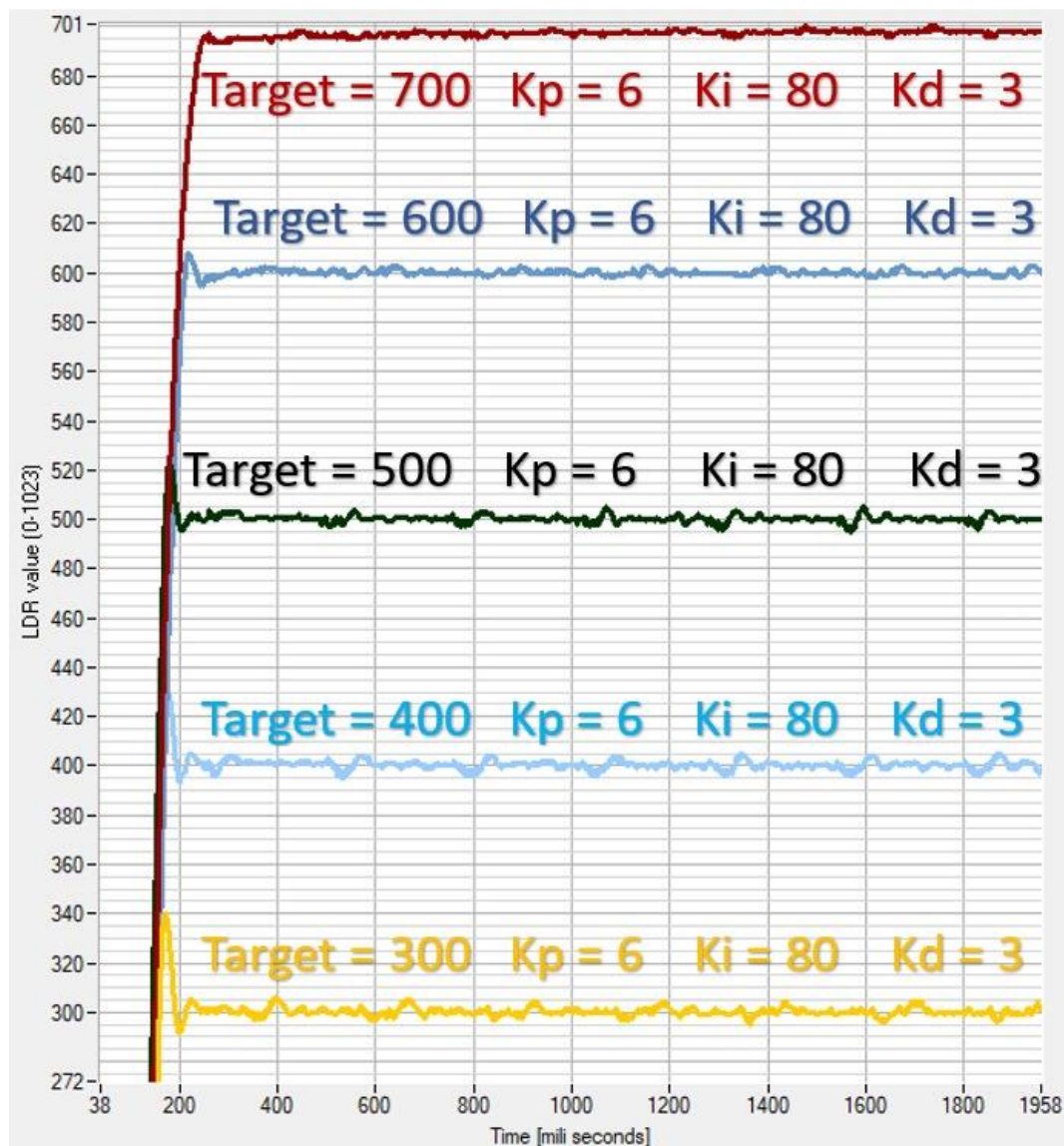
איור 15 - טבלת השוואה של פרמטרים שנתחשב בהם לפי ערכי  $K_d$

המסקנה שלנו היא כאשר נבחן את תוצאות הטבלה היא שהגדלת ערך  $K_d$  מורידה באופן משמעותי את תגובת היתר O.S. וצפויה גם להקטין את זמן ההתייצבות. נראה מן תוצאות הגרף לפי תגובת היתר הראשונית ולאחר זמן ההתייצבות של ערכי  $K_d$  נבחרים אכן ישנה תגובת של התייצבות לאחר משך זמן ארוך יותר עם תגובת יתר קטנה יותר ככל שעולים בערך קבוע המקדם גזירה  $K_d$ .

יחד עם זאת ניתן לראות מן הגרף שערך השגיאה לאחר התייצבות ככל שעולים בערכי  $K_d$ , הגרף היציב מוצג כ"שעיר" ולא יציב בצורה מספקת שעל כן נבחן שילוב של ערך תגובת יתר O.S. לא גבוה מידי וגם גרף יחסית יציב מבחינת שגיאות מסביב למטרה לכל טווחי המטרה.

לאחר מספר נסיונות הגענו לערך  $K_d$  אופטימלי עבור המערכת של  $K_d = 3$ .

נציג את בקרת ה P.I.D שתכננו לאחר בחירת המקדמים האופטימליים עבור מספר ערכי מטרה משתנים ונשווה בין הערכים המתקבלים:



גרף 14 - הצגת הגרפים המתקבלים ע"י הפרמטר  $K_d = 3$

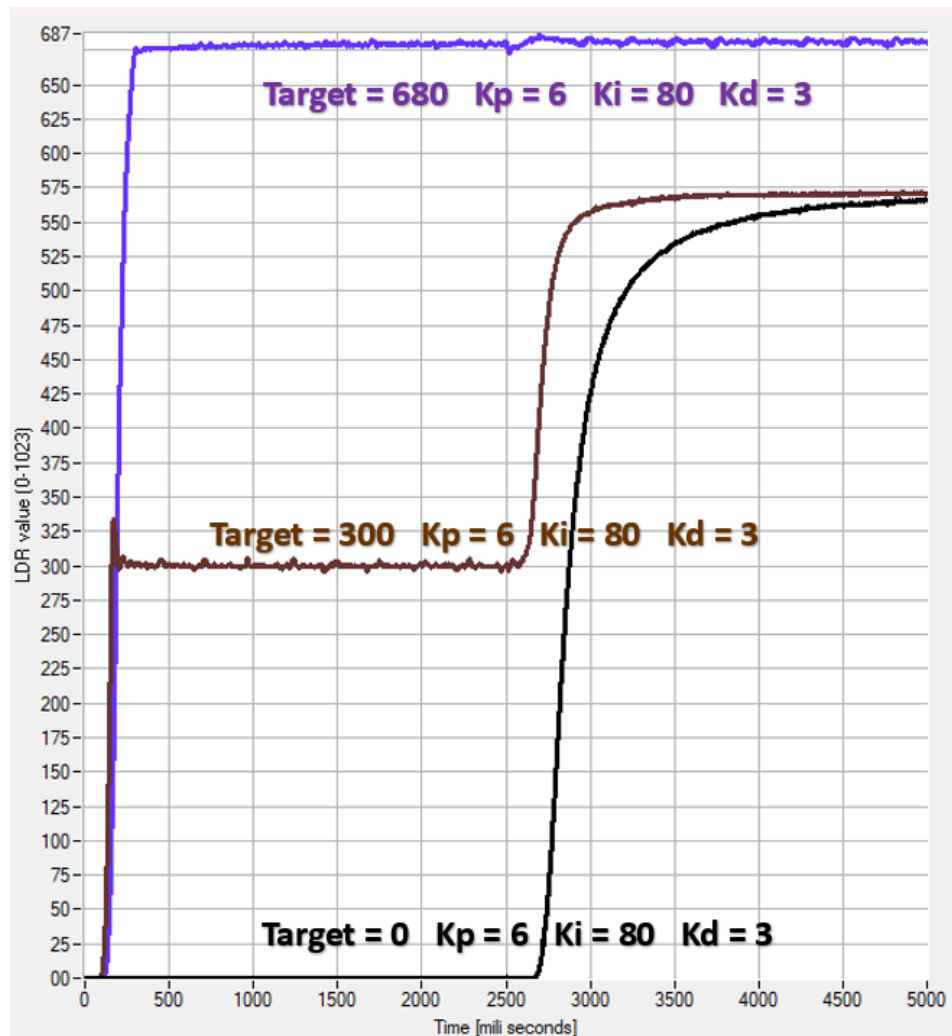
#	Kp	Ki	Kd	Target	O.S.	זמן התייצבות [ms]
1	6	80	3	300	40	210
2	6	80	3	400	30	230
3	6	80	3	500	21	210
4	6	80	3	600	8	280
5	6	80	3	700	1	410

איור 16 - טבלת השוואה של פרמטרים שנתחשב בהם לפי ערכי  $K_d = 3$

לכל ערך מטרה אליו התכנסנו התקבלו תגובות יתר קטנות יחסית לתגובות יתר שראינו ללא השימוש בבקר הגוזר וכאן באה לידי ביטוי התועלת העיקרית של בקר זה. כמו כן שערך המטרה גדול יותר כך תגובת היתר קטנה אך זמן ההתייצבות לא מראה מגמה ברורה.

#### 6.5 – התמודדות עם הפרעה חיצונית

כעת נציג על גרף בודד כיצד אלגוריתם בקר ה PID מתמודד עם הפרעה חיצונית ונדון בתוצאות בדומה לנעשה בסעיף 5.4 בפרק בקרת: OFF/ON



גרף 15 - גרף המחשה ליכולת אלגוריתם הבקרים PID עם הפרעה של מנורה נוספת

באופן דומה להשוואה שביצענו בבקרת OFF/ON, גם כאן מדובר בערך מטרה נמוך מערך ההפרעה הגרף מתייצב לערך המטרה שאליו הוא מכוון אך מרגע הכנסת ההפרעה המערכת לא מצליחה להתמודד איתה מכיוון שההפרעה איננה ניתנת לשליטה בשונה מהמנורה הראשונה ולכן מתכנסת לערך ההתייצבות של מנורת ההפרעה. כאשר מדובר בערך מטרה גבוה מערך אין כל השפעה על ההתכנסות למטרה מכיוון שניתן לשלוט במנורה הראשונה ללא כל השפעה ולכן היא נשארת יציבה ומצליחה להתמודד עם ההפרעה.

## 6.6 – סיכום בקר PID

בפרק זה לאחר שבחנו את הבקר PID אשר סכם את שלושת הבקרים שנראו בסעיפים הקודמים (פרופורציונלי, אינטגרטור ודיפרנציאלי), וראינו את תרומתו של כל בקר אל ההתכנסות האופטימלית לעבר המטרה. תחילה בקר PID היה נראה לנו מורכב ביחס לבקרת OFF/ON אך כשירדנו לשורש לתוך בקר זה הבנו שגם הוא אינטואיטיבי מאוד ובעצם פותח על ידי מתמטיקאים אשר ניתחו תגובות אנושיות להתכנסות לערך מטרה כדוגמת האצת רכב למהירות קבועה לאורך זמן. כל בקר P הפרופורציונלי. I האינטגרטור ו-D הדיפרנציאלי, תורם תרומה שונה למאמץ תיקון השגיאה הכללי.

הבקר הפרופורציונלי אחראי על הגעה אל סביבת ערך המטרה באופן מהיר ככל הניתן.

הבקר האינטגרטור אחראי כל ההתכנסות המעודנת יותר לערך הרצוי.

הבקר הגוזר אחראי על ריסון תגובת היתר.

לסיכום בהשפעת שלושת הבקרים מתקבלת התכנסות למטרה בשגיאה נמוכה יותר ביחס לבקרת OFF/ON עם אוסילציות קטנות יותר ובתגובת יתר קטנה יותר. מה שהופך אותו על פי דעתנו לבקר הטוב ביותר מתוך שיטות הבקרה שנבחנו בקורס זה. נקודות החוזקה של בקרת PID הינה שמתקבלות תוצאות התכנסות טובות גם לערכים נמוכים בשונה מבקרת OFF/ON מה שהופך אותה לשיטת בקרה ורסטילית יותר.

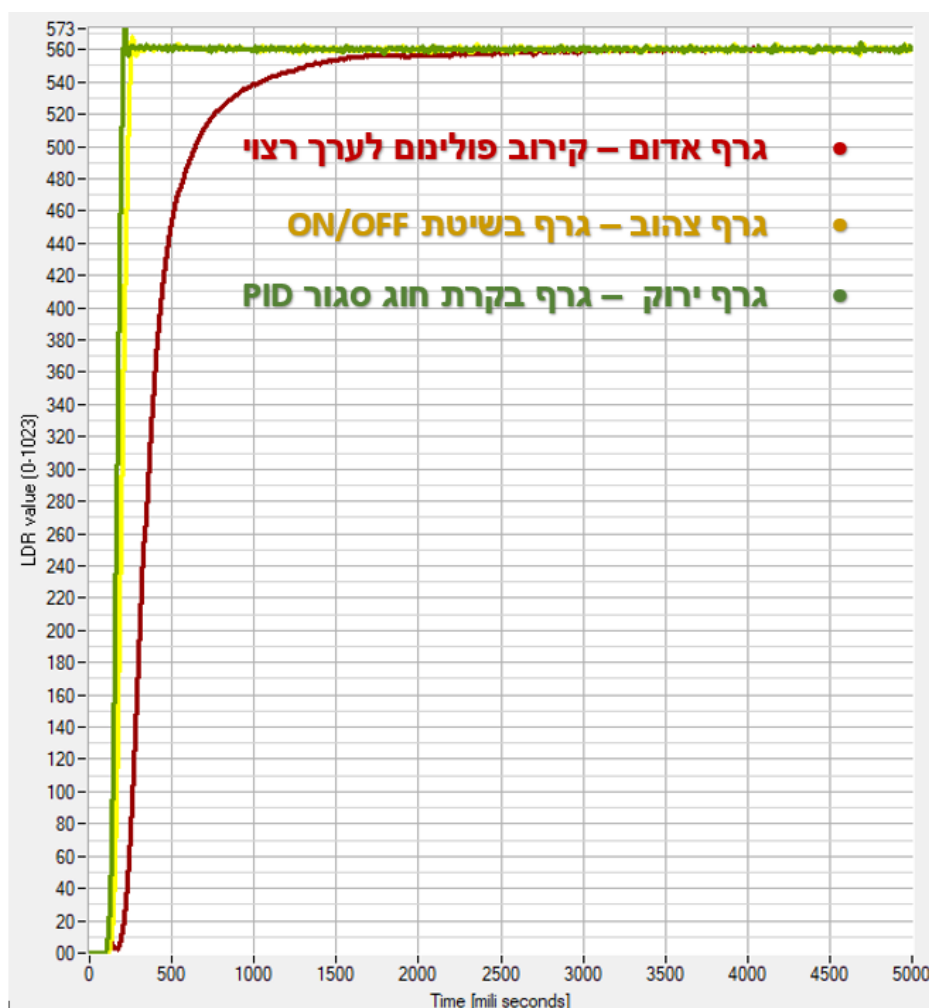
החיסרון בשיטה הינה אלגוריתם מורכב יותר מהאלגוריתם של בקרת OFF/ON, אך המורכבות הינה מינורית ביחס לתמורה ששיטת בקרה זו נותנת מבחינת תוצאותיה.

## 7 – סיכום

### 7.1 – השוואה חוג פתוח, PID, On/Off

תחילה נציג את שלושת שיטות הבקרה אליהם נחשפנו במהלך פרויקט זה:

1. בקרה בחוג פתוח המתבססת על קירוב פולינום לערך המטרה הרצוי - גרף אדום.
2. בקרה בחוג סגור בשיטת OFF/ON אשר מדליקה ומכבה את הנורה בהתאם לסימן השגיאה המתקבלת (חיובי הדלקה , שלילי כיבוי) – גרף צהוב.
3. שיטת הבקרה השלישית הינה בקרת חוג סגור מסוג PID המשלבת שלושה בקרים שלכל אחד מהם השפעה שונה להתכנסות המערכת – גרף ירוק.



גרף 16 - השוואת בין שלושת שיטות קירוב למטרה



ניתן לראות מהתבוננות בגרף מעלה כי בקרה בחוג פתוח לא מדויקת מספיק ומתקבלת שגיאה גדולה ביחס לשיטות בקרה בחוג סגור. חשוב לציין כי עבור ערכי מטרה גבוהים נקבל שגיאות קטנות בהתכנסות מאשר התכנסות לערכי נמוכה בינוניים/נמוכים.

שתי שיטות בקרת חוג סגור שבחנו נתנו תוצאה טובה והשינוי העיקרי ביניהן היה שבשימוש בקרת PID התקבלו שגיאות קטנות יותר מבקרת OFF/ON וערך תגובת היתר קטן יותר ועל כן בקרת PID היא העדיפה יותר בהשוואה לבקרת OFF/ON ובטח בהשוואה לבקרה בחוג פתוח.

## 7.2 – סיכום כללי

פרויקט זה מסכם את כלל החומר הנלמד בקורס החל מפרוטוקולי תקשורת, כתיבת אלגוריתמים שונים בשימוש מכונת מצבים ושימוש נכון במיקרו בקר מסוג Uno Arduino, ועד בחירת שיטת בקרה אופטימלית להתכנסות לערך מטרה.

הפרויקט נבנה בצורה הדרגתית החל משיטת הבקרה הפשוטה ביותר - בקרה בחוג פתוח, ועד לשיטות בקרה מתקדמות יותר בחוג סגור, תוך בחינה מעמיקה עבור כל שיטת בקרה. הפרויקט היווה עבורנו "קפיצת ראש" ראשונה לתוך עולם הבקרה, וברור לנו כי זוהי רק טעימה קטנה מעולם גדול הרבה יותר.

קורס זה הוא מבין הקורסים האחרונים שנשארו לנו בתואר ואנו מאוד מרוצים מכך שבשונה מקורסים אחרים אשר נותנים דגש על תאוריות מערכות בקרה שונות נחשפנו לראשונה למימוש התאוריות הללו באופן מעשי ואינטואיטיבי ביותר ואנו מרגישים כי הרחבנו את סל היכולות שלנו בתחום הבקרה בצורה משמעותית.