אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

Ben-Gurion University of the Negev

# פרויקט גמר

קורס: מבנה מחשבים ספרתיים

361-1-4191

# Control system of motor-based machine

## תכנון ומימוש מערכת בקרה למכונה מבוססת מנוע צעד בשליטה ידנית ומרחוק

18/07/2024

## תוכן עניינים:

## A. מטרת הפרויקט:

*i.* תכנון ומימוש מערכת משובצת מחשב מבוססת MCU לצורך בקרת מכונה מבוססת מנוע צעד בשליטה ידנית ע"י analog joystick בנוסף לשליטה מרחוק ממחשב אישי דרך ערוץ תקשורת טורית. הדגשים בתכנון המערכת הם של רמת ביצועים גבוהה, הספק נמוך ככל שניתן תחת משטר של Hard Real time ברמת דיוק גבוהה.

*ii.* במסגרת הפרויקט יפותח קוד בשפת C++/C למימוש מערכת Embedded מבוססת גרעין הפעלה FSM וכתיבת המערכת במתודולוגית תוכנה של שכבות אבסטרקציה למימוש מערכת Embedded מרובת חיישנים תחת משטר Hard Real Time.

*iii.* מחשב PC ישמש לצורך ממשק GUI ( PySimpleGUI , Tkinter , etc ) למשתמש ולצורך תצוגה לכל פעולה המוגדרת במערכת ודורשת תצוגה וממשק למשתמש. ה- MCU יחובר למחשב ה- PC באמצעות תקשורת טורית אסינכרונית בסטנדרט RS-232.

*iv.* ממשק למשתמש בצד ה- PC יאפשר קביעת פרמטרים, שליחת קבצים ופקודות High-level ל- MCU. הממשק בצד ה- PC ייכתב בשפה עילית (לבחירתכם: JAVA, C++, Python, Matlab, או שימוש במעטפת C# - מומלץ למי שמכיר) ויתמוך במימוש של תקשורת טורית בין הבקר ל- PC.

*v.* הממשק יאפשר העברת קבצים הכוללים פקודות High-level מקודדות (scripts) למימוש בצד הבקר.

**כל הקבצים בצד בקר יישמרו בזיכרון FLASH בלבד.**

*vi.* הגדרת הפרויקט המתוארת בקובץ זה מכילה דרישות של מערכת Embedded בלבד, שלב ראשון בתהליך הפיתוח של המערכת לאחר הבנת הדרישות הוא שלב אפיון המערכת. בשלב חשוב זה יש צורך לחקור ולהבין את המגבלות ההנדסיות של המערכת, לסרטט גרף מפורט של גרעין ההפעלה FSM של המערכת, ולכתוב תיאור של האלגוריתמים השונים הנדרשים למימוש במערכת. בשלב חשוב זה נדרש לבצע תכנון מדויק ולסנן את כל השגיאות הלוגיות הקיימות בתכנון (במקביל לשלב זה ניתן לכתוב דרייברים בשכבת ה- HAL בנפרד לכל מודל חומרה בפרויקט). רק לאחר מכן ניתן להתחיל בכתיבת קוד המערכת ומימוש האלגוריתמים השונים. ***זכרו, הגדרת הפרויקט משאירה שטח "אפור" בו כל זוג צריך להביא את עצמו לידי ביטוי ויצירתיות במימוש אופטימאלי מבחינת סיבוכיות מקום, סיבוכיות זמן לצורך מימוש מערכת רובסטית (מערכת הפועלת בצורה יציבה ואינה "נתקעת"), בזמן תגובה RT תחת מגבלות הנדסיות של המערכת.***

*vii.* הסבר מפורט של הממשק ומבנה הקבצים מתואר בפירוט בהמשך.

## B. דרישות משימת הפרויקט:

- ארכיטקטורת התוכנה של המערכת נדרשת להיות מבוססת גרעין הפעלה מסוג ***Simple FSM*** המבצעת קטע קוד השייך לאחד ממצבי המערכת בהינתן בקשה של פסיקת RX המגיעה מה PC לבקר דרך ערוץ התקשורת ל UART. **קוד המערכת נדרש להיות מחולק לשכבות אבסטרקציה כך שיהיה נייד (portable) בקלות בין משפחות בקר MSP430 ע"י החלפת שכבת ה- BSP בלבד.**
- טרם שלב כתיבת הקוד בשלב התכנון נדרש לשרטט גרף של דיאגרמות FSM מפורטות , אחת של ארכיטקטורת התוכנה של המערכת בצד MCU והשנייה של חלק התמיכה בתקשורת באפליקציה בצד מחשב ולצרפן לדו"ח מכין. גרף של דיאגרמת FSM בצד MCU המצבים אלו הצמתים והקשתות אלו המעברים ממצב למצב בגין בקשות פסיקת RX (המסווגות לקליטת מידע מסוג Command ומסוג Data, כפי הנלמד בניסוי מעבדה 4).
- אסור לבצע השהייה ע"י שימוש ב poling למעט עבור debounce ברוטינת שירות של בקשות פסיקה בגין לחצנים.
- המערכת נשלטת אך ורק דרך ערוץ התקשורת בין המחשב לבקר ובשימוש joystick בלבד (אסור להשתמש במתגים, לחצנים, Keypad אלא אם כן צוין במפורש)
- **באתחול המערכת (בלחיצה על כפתור RESET), הבקר נמצא במצב שינה.**

**הערה:** כפתור RESET מותר לשימוש אך ורק לאתחול המערכת בלבד

- רמת הדיוק וזמן תגובת המערכת בהתאם לדרישות מהווים חלק מרכזי בהערכת הפרויקט.
- מקוריות העבודה היא חלק חשוב בביצוע הפרויקט, במקרה של העתקה, הפרויקטים של שני הצדדים ייפסלו.
- עקב מגבלה של גודל ה RAM עליכם להשתמש בתבונה בזיכרון ה FLASH (ראו חומר עזר במודל).
- נדרש לעבוד בסביבת פיתוח **CCS IDE** מבוססת Eclipse (כפי הנלמד בחומר ההכנה למעבדה 1).
- לצורך ביצוע המשימה נדרש ליצור ממשק GUI למשתמש (לא שימוש בממשק של חלון טרמינל) בצד ה- PC המכיל את סעיפי התפריט הבא:

1. **Manual control of motor-based machine: (משקל 30%)**

שליטה ידנית בעזרת analog joystick בצורה דינאמית על זווית ה pointer של מנוע צעד (זווית אליה מצביע מוט המחובר לידית המנוע) בהיקף של 360 מעלות, תדר הזזת המנוע בתחום של 5Hz-50Hz .

***הערה:*** *מאחר ומדובר בבקרה בחוג פתוח, טרם ביצוע מצב זה, נדרש להביא את ה pointer של המנוע לזווית אפס ע"י הודעה מתאימה למשתמש. המשתמש נדרש לתת פקודה מתפריט המחשב לתחילת סיבוב המנוע ברצף (בתדר שהמשתמש יוכל להבחין בהגעת ה pointer לפס הכיול השחור, זווית אפס) ופקודה לסיום.*

***הדגש בתכנון הוא של זמן תגובת המערכת (בין שינוי מיקום זווית ב Joystick ולבין זווית ה pointer של מנוע הצעד) תחת משטר של Hard Real time עם רמת דיוק גבוהה.***

2. **Joystick based PC painter: (משקל 30%)**

נדרש לממש צייר על גבי מסך המחשב הנשלט ע"י analog joystick המשמש "כחוד עיפרון לצייר". לצייר ישנם שלושה מצבים הנשלטים ע"י לחיצה אנכית על ראש ה joystick: מצב כתיבה -> מצב מחיקה -> מצב ניוטרל (לצורך הזזת חוד הצייר למיקום כלשהוא על המסך).

***הדגש בתכנון הוא של זמן תגובת המערכת (בין שינוי מיקום ב Joystick ולבין מיקום חוד עיפרון של הצייר) תחת משטר של Hard Real time עם רמת דיוק גבוהה*** *(בדיקה פשוטה היא היכולת לצייר צורות גאומטריות נפרדות בצורה סימטרית וברורה).*

3. **Stepper Motor Calibration : (משקל 10%)**

כיול מנוע צעד (כמפורט בסעיף C2i), נדרש להציג את תוצאת הכיול על גבי מסך המחשב, כלומר את כמות הצעדים בסיבוב שלם ואת גודל זווית הצעד $\varphi$ של המנוע. לצורך התחלה וסיום תהליך הכיול נשתמש בלחיצה אנכית על מוט ההיגוי האנלוגי (המהווה לחצן).

***הערה:*** *הכיול נדרש להיעשות פעם אחת בלבד בבחירת סעיף תפריט זה כך שלאחר ביצוע הכיול הפרמטרים נדרשים להישמר בזיכרון ה- FLASH של הבקר בלבד.*

4. **Script Mode: (משקל 30%)**

הפעלת כל המערכת בהתאם לקובץ script המכיל פקודות High Level המוגדרות מראש, ניתן לתפעל את המערכת באופן אוטומטי ולבדוק את כל חלקי המערכת (כמפורט בהמשך ה ISA של קובצי ה Scripts).

נדרש לתמוך ביכולת שליחה וקבלה של עד שלושה קבצים ולבחור להפעיל כל אחד מהם בנפרד ובאופן בלתי תלוי מתוך התפריט בצד מחשב בלבד.

***הדגש בתכנון הוא של זמן תגובת המערכת עם רמת דיוק ביצוע של תוכן קובץ ה scripts ואמינות תוכן המידע הנשלח/מתקבל דרך ערוץ התקשורת.***

***הערה:*** *ניתן להניח שכל קובץ script בנפרד יכול להכיל עד מקסימום עשר שורות*

**הסבר:**

- המשתמש יוכל לשלוח לבקר קובץ ***script_i.txt*** המכיל פקודות ברמת High Level (כמפורט בהמשך). שליחת הקובץ לצד הבקר נעשית בלחיצת כפתור מתאים דרך הממשק למשתמש בצד ה PC ולאחר מכן שליחת הקובץ מהמחשב האישי לבקר באופן טורי תו אחר תו (ללא קידוד). הקובץ נשמר בזיכרון ה- FLASH של הבקר כקובץ txt.* . לאחר קבלת הקובץ בצד הבקר, תישלח הודעת Acknowledge לצד ה- PC.
- הוראת ביצוע ה- script בצד הבקר הינה בלתי תלויה בשליחת הקובץ לבקר ומתבצעת בלחיצת כפתור מתאים דרך הממשק למשתמש בצד ה PC .

**צורת שמירת קובץ txt.* בצד הבקר:**

קובץ מוגדר ע"י רצף פיזי של תווים שמיקומו ההתחלתי נתון ע"י מצביע לקובץ ותוכנו מסתיים בתו EOF .

עליכם לנהל שמירה של עד שלושה קבצים בזיכרון FLASH של הבקר ולהגדיר ***struct*** מתאים המכיל את השדות הבסיסיים הבאים (ניתן להוסיף שדות עזר לבחירתכם תוך נימוק הנדסי):

- כמות קבצים קיימים
- מערך מצביעים לשמות הקבצים
- מערך מצביעים לתחילת כל קובץ
- מערך המכיל את גודלי הקבצים

רשימת פקודות High Level נדרשות לתמיכה במצב של Script Mode:

| OPC (first Byte) | Instruction | Operand (next Bytes) | Explanation |
|---|---|---|---|
| 0x01 | inc_lcd | x | Count up from zero to **x** with delay d onto LCD |
| 0x02 | dec_lcd | x | Count down from **x** to zero with delay d onto LCD |
| 0x03 | rra_lcd | x | Rotate **right** onto LCD from pixel index 0 to pixel index 31 a single char **x** (ASCII value) with delay d |
| 0x04 | set_delay | d | Set the delay **d** value ( ***units of 10ms*** ) |
| 0x05 | clear_all_leds | | Clear LCD |
| 0x06 | stepper_deg | p | Points the stepper motor pointer to degree p and show the degree (dynamically) onto PC screen |
| 0x07 | stepper_scan | l,r | Scan area between left l angle to right r angle (once) and show the start and final degrees (right on time the motor pointer reaches them) ***onto LCD screen*** |
| 0x08 | sleep | | Set the MCU into sleep mode |

**Note:** The default delay d value is 50 (***units of 10ms***)

0103

script1_code.txt - Notepad

```
inc_lcd 3
set_delay 30
dec_lcd 3
rra_lcd 4
clear_lcd
stepper_deg 35
inc_lcd 5
stepper_scan 20,60
sleep
```

***Python based translator script***

Script1.txt - Notepad

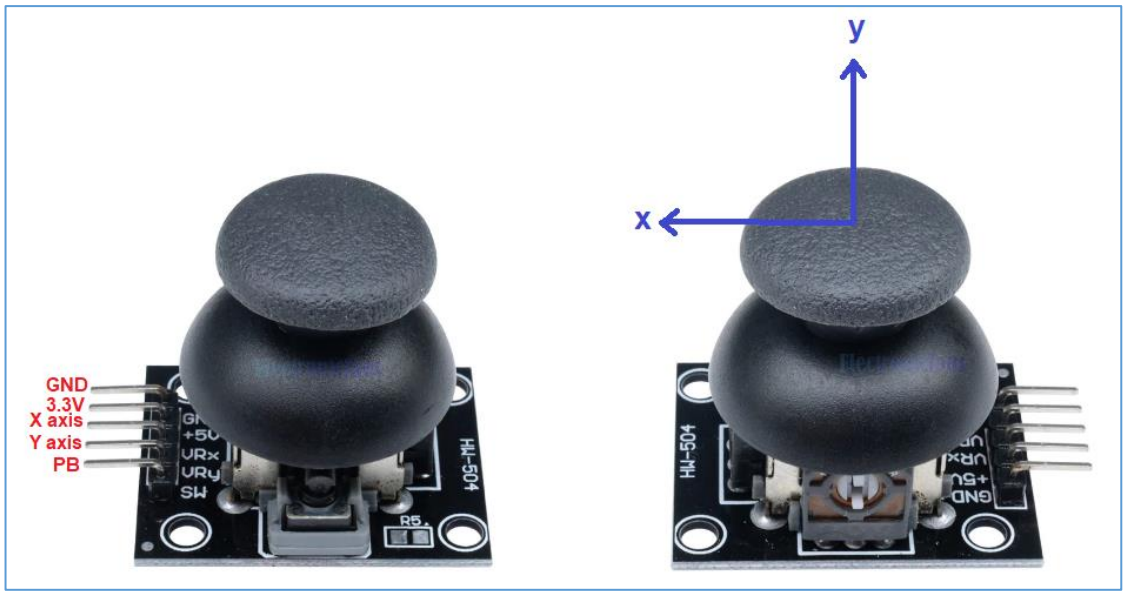
```
0103
041E
0203
0304
05
0623
0105
07143C
08
```

## C. הסברים טכניים – מוט היגוי אנאלוגי, מנוע צעד:

### 1. מוט היגוי joystick:

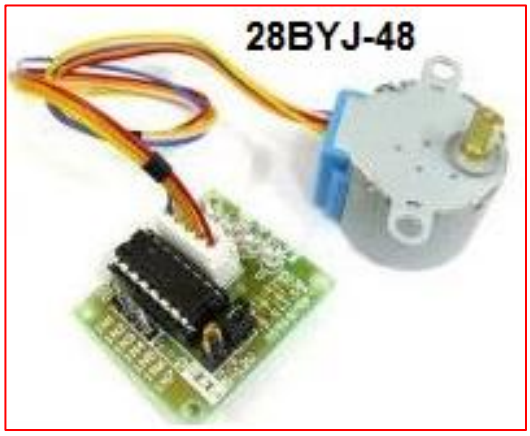
כמפורט לעיל, לצורך שליטה על זווית המיקום של מוט מנוע stepper נשתמש במוט היגוי (joystick ) הפועל בצורה הבאה:

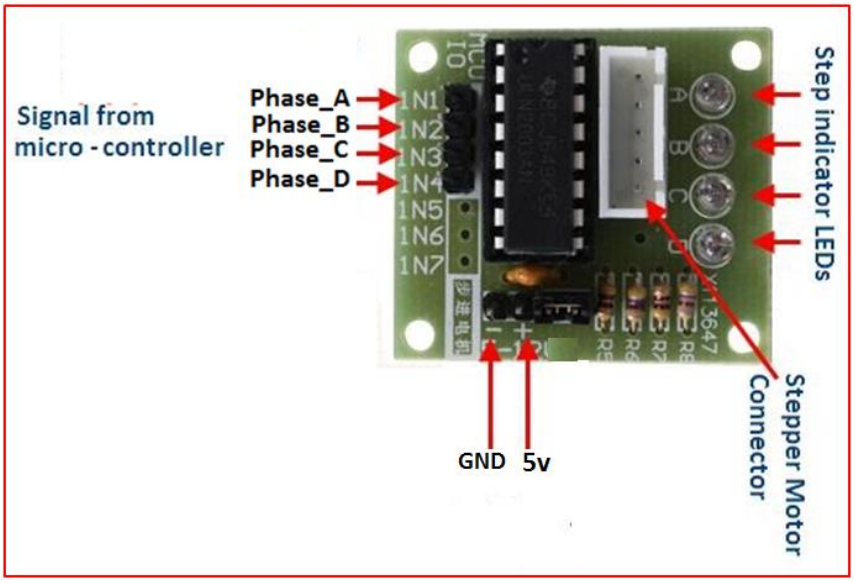
- כאשר המוט במצב המקורי (לא מוטה) המתח במוצא הרגליים Vrx , Vry הוא $\frac{V_{cc}}{2} = \frac{3.3v}{2} = 1.65v$
- בהטיית המוט לכיוון y,x המתחים Vrx , Vry בהתאמה יעלו בצורה יחסית בטווח [1.65v,3.3v]
- בהטיית המוט לכיוון -y,-x המתחים Vrx , Vry בהתאמה ירדו בצורה יחסית בטווח [0,1.65v]
- לחיצה אנכית על ראש מוט ההיגוי מהווה לחיצת לחצן (בחיבור לרגל בקר MSP430 משפחה 2 השתמשו ברגיסטר PxREN לצורך הגדרת הלחצן בקונפיגורציה של Pullup/Pulldown)




### 2. מנוע Stepper Motor:

מנוע צעד, זהו מנוע שניתן להפעילו כך שמוט הסיבוב שלו, יסתובב בכל איטרציה בזווית φ הנקראת צעד.
מנוע צעד מהווה עומס, המחובר לכרטיס ממשק המתווך בין הבקר לעומס. מצד אחד נחבר לכרטיס הממשק את ה- MCU המספק מידע בהספק נמוך, מצד שני נחבר את המנוע המהווה עומס וצורך הספק גבוה.
יש צורך לחבר לכרטיס מתח הפעלה של 5v ברגל המיועדת לכך (ראה תצלום הבא).



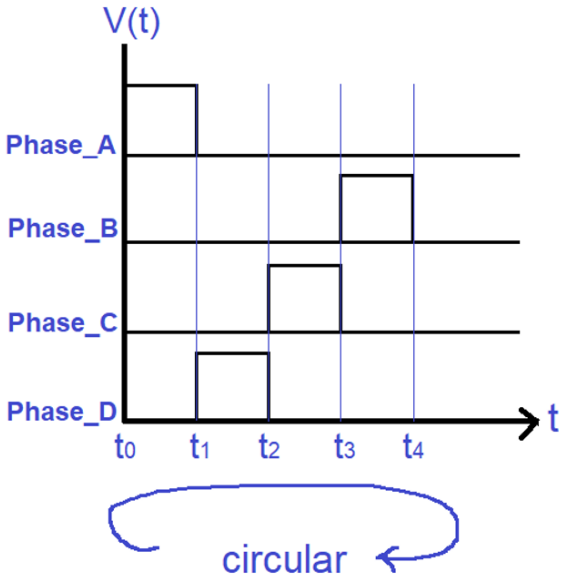
## ***סיבוב המנוע בצעד / חצי צעד :***

- סיבוב המנוע בצעד מלא בכיוון clockwise:

כדי להפעיל את המנוע **בצעד בודד** (סיבוב אחד בזווית **נומינאלית** $\varphi = 0.088°$) **בכיוון השעון**, נדרש להכתיב מהבקר (MCU) מתח לארבע רגליים Phase_A, Phase_B, Phase_C, Phase_D לפי הטבלה הבאה:

כדי לבצע הזזה רציפה כרצוננו, נצטרך לבצע את המתואר בטבלה בצורה מחזורית (***בשימוש פסיקות Timer בלבד***). קצב השינוי (בתחום של 5Hz-50Hz) יקבע את מהירות הסיבוב של מוט המנוע.

| רגל בכרטיס הממשק המחוברת לבקר | $t_0$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ |
|---|---|---|---|---|
| Phase_A | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Phase_B | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Phase_C | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Phase_D | 0 | 1 | 0 | 0 |




- סיבוב המנוע בצעד בכיוון counter clockwise:

כדי להפעיל את המנוע **בצעד בודד** (סיבוב אחד בזווית **נומינאלית** $\varphi = 0.088°$) **בכיוון נגד כוון השעון**, נדרש להכתיב מהבקר (MCU) מתח לארבע רגליים Phase_A, Phase_B, Phase_C, Phase_D נפעיל את הטבלה הנ"ל בכיוון הפוך.

| רגל בכרטיס הממשק המחוברת לבקר | $t_0$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ |
|---|---|---|---|---|
| Phase_A | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Phase_B | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Phase_C | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Phase_D | 1 | 0 | 0 | 0 |

- סיבוב המנוע בחצי צעד בכיוון clockwise:

כדי להפעיל את המנוע **בחצי צעד** (סיבוב אחד בזווית **נומינאלית** $\varphi = \frac{0.088°}{2}$) **בכיוון השעון (**לכיוון הפוך, נדרש להזין את הטבלה בסדר הפוך**)**, נבצע לפי הטבלה הבאה:

| רגל בכרטיס הממשק המחוברת לבקר | $t_0$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $t_5$ | $t_6$ | $t_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Phase_A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Phase_B | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Phase_C | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Phase_D | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

***הערות:***

*i.* בהגדרת הפרויקט נתונה לכם זווית **נומינאלית** $\varphi = 0.088°$ של גודל צעד המנוע, אולם גודל הזווית באופן מעשי נדרש למדידה. באופן כללי, ישנה שונות במבנה הפיזי בין מנועים זהים מאותו פס ייצור כך שעבור כל מנוע שונה נדרש שלב כיול לצורך מדידת הערך המעשי של זווית הצעד $\varphi$ ועליכם למצוא בעזרת ניסוי מקדים.

*ii.* <u>כיול לצורך מדידת הערך המעשי של זווית הצעד $\varphi$ של המנוע:</u>

המשתמש נדרש לתת פקודה מתפריט המחשב לתחילת סיבוב המנוע ברצף (בתדר שהמשתמש יוכל להבחין בהשלמת סיבוב שלם במדויק בהתאם לפס הכיול השחור) ופקודה לסיום הסיבוב בהשלמתו. בקוד נדרש לנהל משתנה counter למניית הצעדים במשך הסיבוב השלם, בפקודה לתחילת הסיבוב counter מתחיל את המנייה מאפס ובפקודה לסיום הסיבוב נעצרת המנייה וניתן לבצע חישוב

$$\varphi = counter/360°$$

## 3. חיבורי חומרה והקצאת רגלי הבקר (ערכת פיתוח אישית):

- קישור המכיל סרטון וקובץ בינארי לצריבה ל MCU לבדיקת תקינות מנוע Servo וחיישן אולטרסוניק.
  Binary_MSP430G2xx3 + Video - Stepper Motor
- רגליים P1.1 , P1.2 – אינן בשימוש, תפוסות לתקשורת טורית מול המחשב (ראו הגדרת ניסוי LAB4).
- מנוע צעד – חיבור ארבע רגלי GPIO לארבע פאזות של המנוע
- מוט היגוי אנאלוגי – חיבור שתי רגליים באופן עבודה אנאלוגי (X axis, Y axis) ורגל GPIO ללחיצת ראש המוט, לבחירתכם.
- מסך LCD נדרש לחבר את D7-D4 קווי מידע (אופן עבודה של ה- LCD בארבעה קווי מידע) + שלושת קווי הבקרה של ה- LCD לבחירתכם
- סה"כ חיבור 16 רגליים של הבקר לממשק החומרה הנדרש בפרויקט.

## 4. ממשק משתמש בצד ה- PC :

שליחת מידע בין הבקר ל- PC מבוססת תקשורת טורית וליצירת תפריט ממשק למשתמש על גבי מסך ה- PC הכולל יכולת הצגה וויזואלית דינאמית למשתמש על גבי מסך ה- PC. עליכם לכתוב את המעטפת והממשק (GUI)בצד ה- PC בכל שפה שתבחרו,Matlab ,Python JAVA , C++ , או שימוש במעטפת #C - מומלץ.
במעטפת זו תצטרכו לתמוך בתקשורת טורית אסינכרונית של המחשב עם הבקר מבוססת סטנדרט RS-232 לצורך העברת תווים וקבצים (העברת הקובץ תו אחר תו) בין המחשב לבקר וההיפך. מצב ברירת המחדל הוא:

**9600 BPS , 8-bits , 1 Start , 1 Stop , (none) No parity**

## D. דו"ח מכין: (משקל 10%)

1. כתיבת דו"ח מכין פרויקט מסכם, לפי הוראות לכתיבה ועריכת דו"ח מכין הנמצא במודל.
2. צורת הגשה:

- הגשת דוח מכין תיעשה ע"י העלאה למודל של תיקיית zip מהצורה **id1_id2.zip** (**כאשר id1 < id2**), **רק הסטודנט עם הת"ז id1 מעלה את הקבצים למודל.**
- התיקייה תכיל את **שלושת** הפרטים הבאים בלבד:
  - ✓ **קובץ pre_final$_x$.pdf** – מכיל תשובות לחלק תיאורטי דו"ח מכין
  - ✓ תיקייה בשם **CCS** - מכילה שתי תיקיות, אחת של קובצי source (קבצים עם סיומת ***.c**) והשנייה של קובצי header (קבצים עם סיומת ***.h**).
  - ✓ תיקייה בשם **PC_side** - המכילה קובצי מקור של אפליקציית צד מחשב + קובץ ReadMe המתאר בקצרה מה תפקיד כל קובץ מקור במימוש האפליקציה.

## E. מבנה הציון בפרויקט:

1. משקל הפרויקט הוא 50% מהציון הסופי - חלק ביצוע (תמיכה בארבעת סעיפי התפריט בסעיף B) משקלו 90% וחלק דו"ח תיעוד הפרויקט (כמפורט בקובץ הוראות לכתיבת דו"ח תיעוד הפרויקט) 10%
2. הציון יינתן על-פי הערכה המבוססת על קריטריונים של ביצוע תוך עמידה בדרישות הפרויקט, בקיאות בקוד+אלגוריתם+תיאוריה, דו"ח תיעוד הפרויקט. המשמעות, כל סטודנט בנפרד יידרש לגלות הבנה מעמיקה במרכיבי הפרויקט (תיאוריה, חומרה, תוכנה ואלגוריתם).
3. כל קבוצה תגיש דו"ח תיעוד הפרויקט לפי קובץ "הוראות לכתיבת דו"ח תיעוד הפרויקט" המופיע במודל.

# בהצלחה!