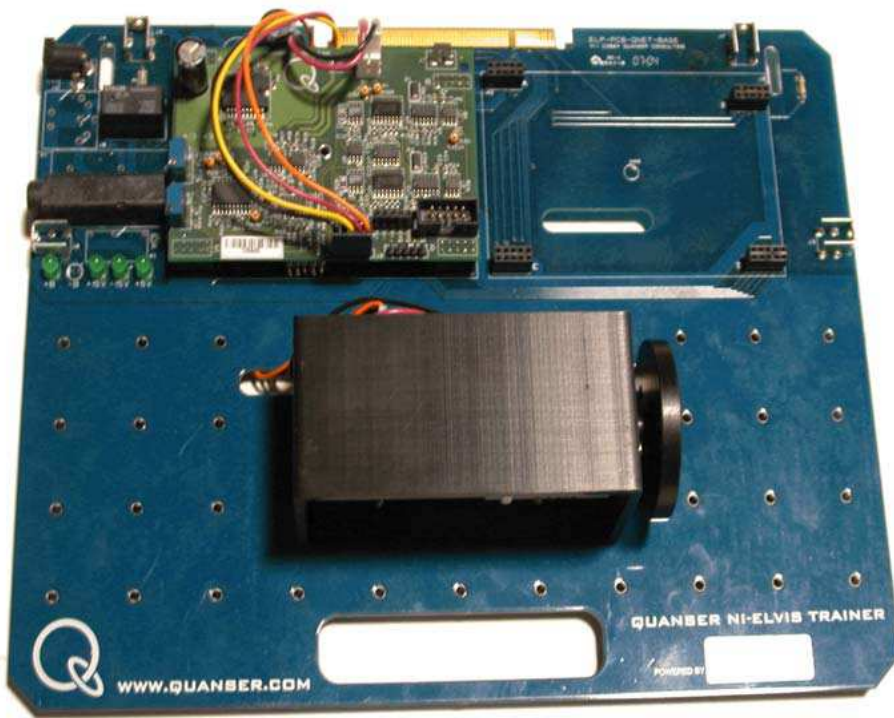




סדרת מאמני NI-ELVIS של קוונזר (Quanser):
Quanser NI-ELVIS Trainer (QNET)

ניסוי QNET מס' 1: בקרת מהירות מנוע ז"י

ערכת לימוד לבקרת מנוע DC DC Motor Control Trainer (DCMCT)



מדריך לסטודנט

תוכן העניינים

1.	מטרות המעבדה	2
2.	סימוכין	2
3.	תצוגת הסביבה המבוקרת ע"י מודול הבקרה DCMCT	2
3.1	מינוח רכיבים	2
3.2	תיאור הסביבה המבוקרת ע"י ה- DCMCT	3
4.	מטלה טרום-מעבדה	3
4.1	תרגיל: בניית מודל פתוח-לולאה	4
5.	פגישת מעבדה	4
5.1.	הגדרת חומרת המערכת	4
5.2.	מהלך המעבדה	4

1. מטרת המעבדה

מטרת הניסוי הזה הינה לתכנן מערכת בקרה בחוג-סגור (closed-loop) המווסתת את מהירות מנוע זרם-ישר (ז"י = DC). המודל המתמטי של מנוע DC נסקר והפרמטרים הפיזיקליים שלו מזוהים. לאחר ידוי נכונותו, המודל משמש לתכנון בקר פרופורציוני-אינטגרלי (PI).

2. סימוכין

- [1] מדריך למשתמש עבור ה-NI-ELVIS.
 [2] מדריך למשתמש עבור ה-DCMCT.

3. תצוגת הסביבה המבוקרת ע"י מודול הבקרה DCMCT

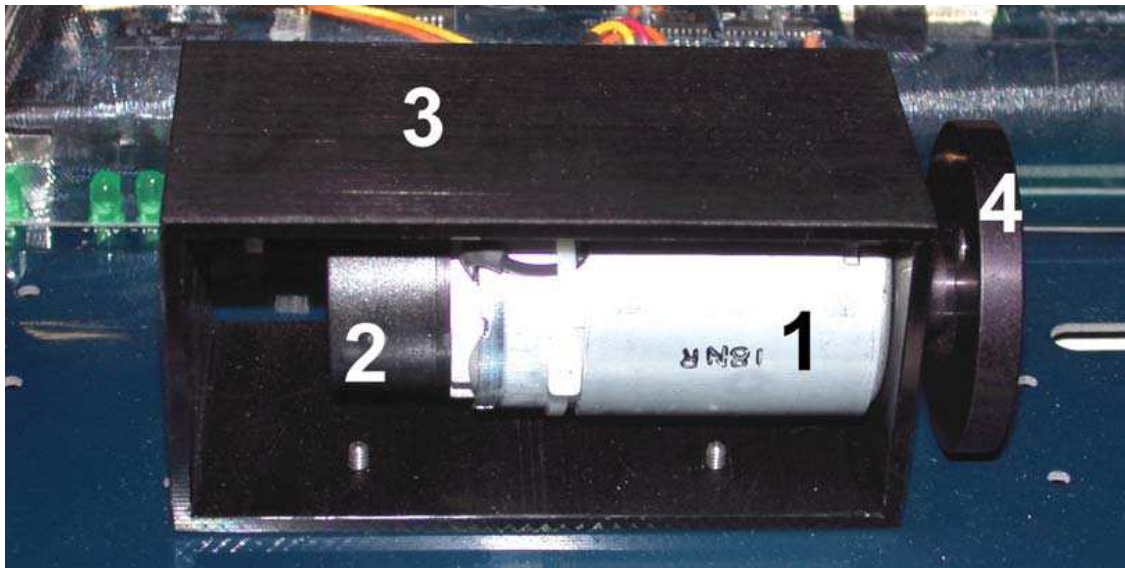
3.1 מינוח רכיבים

לטובת מינוח מהיר, טבלה מס' 1, למטה, מספקת רשימה של המרכיבים העיקריים של ערכת הלימוד לבקרת מנוע DC (DCMCT). כל רכיב מאותר ומזוהה באמצעות מספר זיהוי ייחודי (unique ID) על הסביבה המבוקרת, להלן ה-Plant של ה-DCMCT, כפי שמופיע באיור מס' 1.

מס' זיהוי (ID#)	תיאור	מס' זיהוי (ID#)	תיאור
1	מנוע DC	3	מארז מנוע DC
2	מקודד (אינקודר) מנוע	4	עומס דיסק

טבלה 1: מינוח רכיבי ה-DCMCT

[1] Plant - הינו מונח מעולם המכניקה והמכונות המתאר את החלק של המערכת וסביבת העבודה הפיזיקאלית המבוקרת על ידי הבקר. המונח בא מעולם הדימויים של מפעל שמבוקר



איור 1: רכיבי ה-DCMCT

3.2 תיאור הסביבה המבוקרת ע"י ה- DCMCT

מערכת ה-DCMCT מורכבת ממנוע DC בעל מנוע סרוו המניע עומס דיסק. המגבר המצוי על הלוח, אשר מניע את המנוע, מקבל אספקת מתח ממקור עצמאי של DC $\pm 24V$. מקור המנוע הינו מתח בעל טווח של $\pm 24V$. למנוע יש אינקודר המודד את מיקומו, טכומטר דיגיטלי המודד את מהירותו וחיישן זרם המודד את הזרם המעשי המוזן למנוע.

ההנחה היא כי מערכת ה-QNET מוגדרת כראוי כפי שמוכתב בסימוכין [1].

4. מטלה טרום-מעבדה



עליך לקרוא, להבין ולבצע חלק זה לפני שאתה מבצע/ת את המעבדה.

מטרת ניסוי זה היא להציג מושגים של בקרה על-ידי חקירת המאפיינים וההתנהגויות של מנוע סרוו DC. אי-לכך, קיימת חשיבות רבה בהכרת המאפיינים הפיזיקליים של המנוע.

למנוע ה-DC יש מאפיינים חשמליים ומכניים כאחד. עבור הפרמטרים השונים המוגדרים בטבלה מס' 2, המשוואות החשמליות המתארות את תגובת חוג-פתוח של מנוע ה-DC הן:

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - E_{emf}(t) = 0 \quad \text{וגם} \quad [1]$$

$$E_{emf}(t) = K_m \omega_m(t) \quad [2]$$

המשוואות המכניות המתארות את המומנט של המנוע הן:

$$T_m(t) = J_{eq} \left(\frac{d}{dt} \omega_m(t) \right) \quad \text{וגם} \quad [1]$$

$$T_m(t) = K_t I_m(t) \quad [2]$$

יחידות	תיאור	סימון
V	מתח סופי של המנוע (terminal)	V_m
Ω	התנגדות סופית של המנוע (terminal resistance)	R_m
A	זרם העוגן (armature)	I_m
N·m/A	קבוע מומנט סיבוב (torque)	K_t
V/(rad/s)	קבוע back-emf של המנוע *	K_m
rad/s	מהירות זוויתית של ציר המנוע	ω_m
N·m	מומנט סיבוב של המנוע	T_m
Kg·m ²	מומנט האינרציה של עוגן והעומס של המנוע	J_{eq}

טבלה 2: מינוח רכיבי ה-DCMCT

* back-electromotive force הינו הפרש המתח בין מתח העוגן לשדה המגנטי מסביב למנוע.

כאשר הסימולים $T_m, J_{eq}, \omega_m, K_t, K_m, I_m$ מתוארים בטבלה מס' 2.

4.1 תרגיל: מידול חוג-פתוח

גזור את פונקציית התמסורת בחוג-פתוח, $\omega_m(s)/V_m(s)$, המייצגת את מהירות מנוע ה-DC על-ידי שימוש במשוואות [1], [2], [3], [4].

5. פגישת מעבדה

5.1 הגדרת חומרת המערכת



פגישת המעבדה הזאת מבוצעת באמצעות מערכת ה-NI-ELVIS המצוידת בלוח QNET-DCMCT וקובץ צלמית יישום הבקרה של Quanser - Qnet_DCMCT_Lab_01_Speed_Control.vi. אנא פנה/י להמדריך בסימוכין [2] עבור הוראות האתחול והחיווט הדרושים לצורך ביצוע מעבדת הבקרה הנ"ל. המדריך בסימוכין [2] מספקת גם-כן את המאפיינים ותיאור של הרכיבים העיקריים המרכיבים את המערכת שלך.

לפני תחילת המעבדה, וודא/י כי המערכת מוגדרת כדלקמן:

- מודול ה-DCMCT של QNET מחובר ל-ELVIS.
- מתג התקשורת של ה-ELVIS נמצא במצב מעקף (Bypass).
- מודול ה-DCMCT מחובר לספק חשמל ה-DC.
- 4 נורות ה-LED: +5V, -15V, +15V, +B, המצויות על מודול ה-QNET נמצאות במצב דלוק.

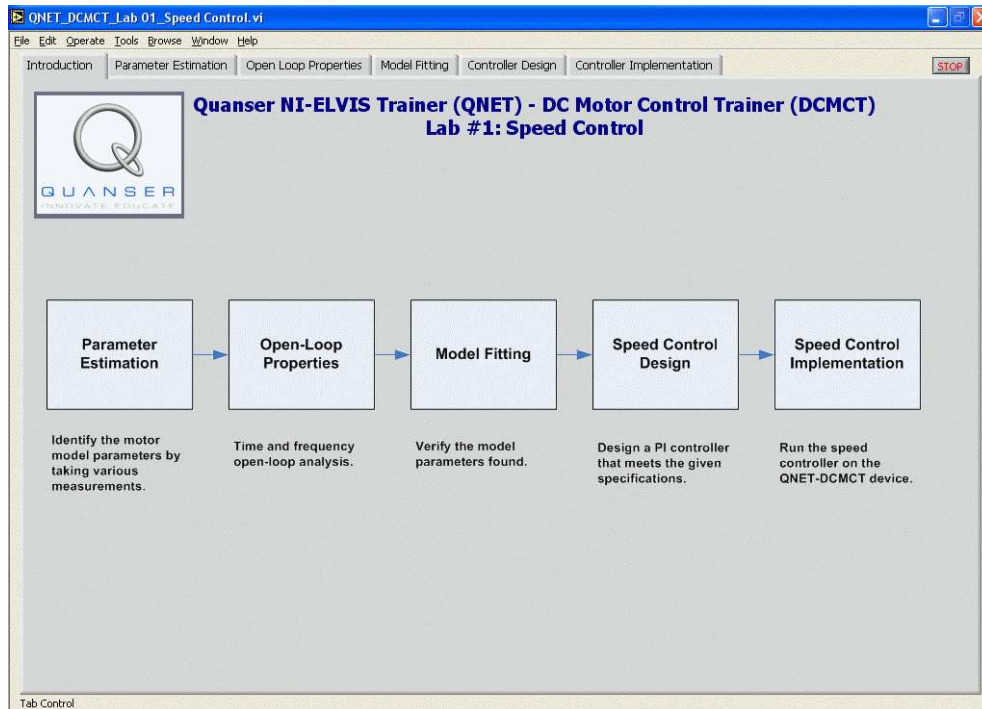
5.2 מהלך המעבדה

החלקים הבאים מתאימים לטאבים (tabs) של היישום, המוצג באיור 2. אנא עקוב/עקבי אחר השלבים הבאים:

שלב 1 – קרא את חלק 5.1 ועבור על מדריך ההתקנה בסימוכין [2].
 שלב 2 – הרץ את היישום QNET_DCMCT_Lab_01_Speed_Control.vi המוצג באיור 2. יישום בקרת המהירות המופיע באיור 2 הוא התוכנית ברמה העליונה, אשר תדריך אותך במהלך המעבדה.

** צלמית VI =

צלמית היישום הינה היררכיה אחת מיני רבות של יישום שלם ומלא בתוכנת המידול והתכנות LabVIEW של חברת National Instruments. בהיררכיה העליונה קיימת הצלמית הראשית. קיימות צלמיות הקרויות sub-VI, שהינם צלמיות לכל דבר, רק נמצאות בהיררכיה מתחת לראשית/עליונה.



איור 2: קובץ יישום VI של מבט על למעבדת בקרת מהירות של QNET-DCMCT

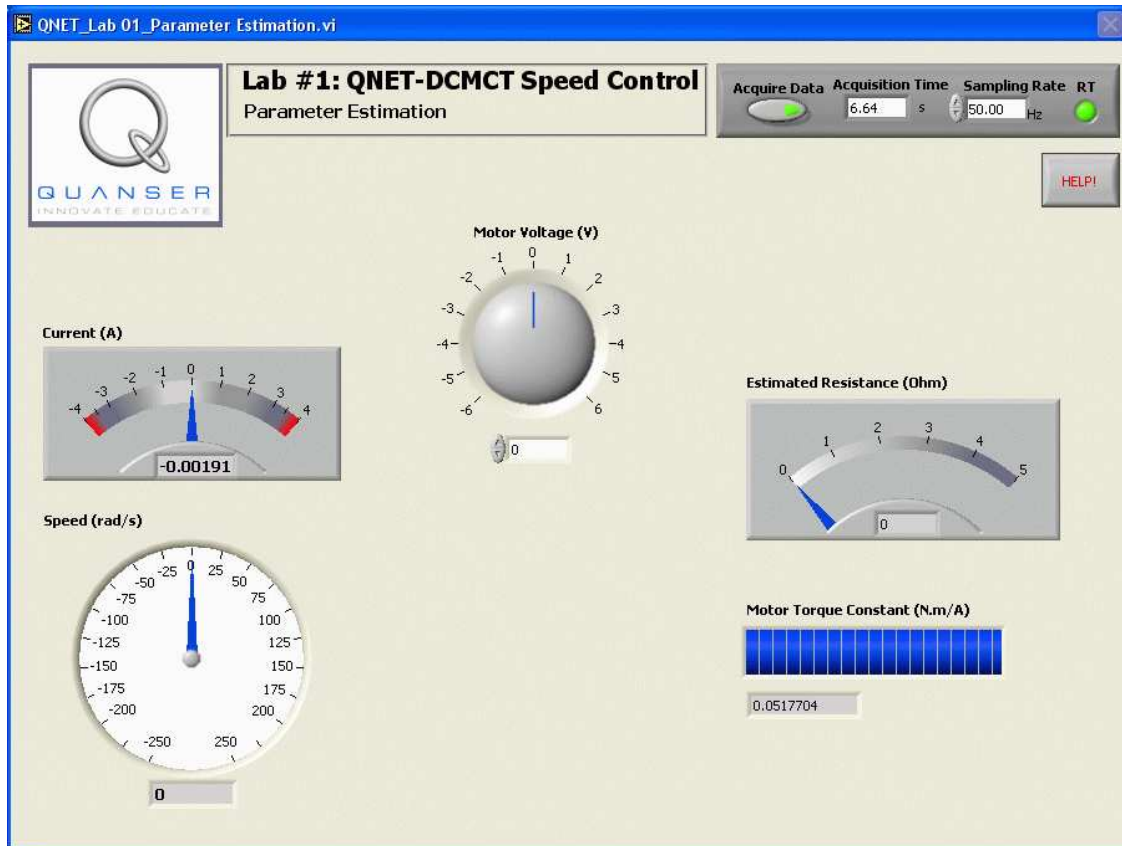
שלב 3 – כפי שהתגלה בתרגיל טרום-המעבדה, קיימים שלושה מאפיינים הקובעים את אופן הפעולה וההתנהגות של מנוע סרוו DC:

(1) ההתנגדות החשמלית של המנוע (R_m) – תכונה חשמלית של מנוע. היא מתארת את תגובת המנוע למתח נתון וקובעת את כמות הזרם שיוכל לעבור דרך המנוע.

(2) קבוע המומנט הסיבוב של המנוע (K_t) – מתאר את המומנט שהמנוע מייצר - בעל יחס ישיר לזרם העובר דרך המנוע. שים לב כי קבוע K_m , back-emf, שווה לקבוע המומנט הסיבוב של המנוע, K_t .

(3) מומנט האינרציה (J_{eq}) – מומנט האינרציה של עומס הדיסק ושל ציר המנוע. שלושת הפרמטרים האלה של מודל חוג-פתוח יזוהו.

שלב 4 – בחר בלשונית שערך פרמטרים ("Parameter Estimation" tab) אשר פותח את צלמית תת-היישום כפי שמוצג באיור 3.



איור 3: צלמית יישום (vi) Parameter Estimation (שערוך פרמטרים)

שלב 5 – הזרם עובר דרך עוגן המנוע, המהירות של ציר המנוע, ההתנגדות הסופית של המנוע וקבוע המומנט הסיבוב נמדדים באמצעות מד-מהירות (טאכומטר) וחיישן הזרם. הם מוצגים באמצעות השעונים השונים המוצגים באיור 3. המתח הנכנס למנוע, V_m , נשלט באמצעות החוגה בחלק האמצעי-עליון של היישום. לוח המחוגים בחלקו הימני-עליון מכיל כפתור 'דגום' (Acquire Data) אשר עוצר את צלמית היישום כאשר נלחץ. בנוסף לכך, הלוח מכיל מחוון 'זמן דגימה' (Acquisition Time), המציג את משך זמן הסימולציה של צלמית היישום, בקר שיכול לשנות את קצב הדגימה שבו הבקר האנלוגי דוגם ונורית המראה האם הבקר משמר קצב זמן-אמת. זמן-אמת נשמר כאשר צלמית היישום איננה מאבדת דגימות מהחיישנים. **אם הנורית אדומה או מהבהבת, משמעות הדבר היא שאין ליישום כח חישוב מספק כדי שצלמית היישום תעמוד בקצב של החיישנים.** במקרה כזה, האט את קצב הדגימה ואתחל את צלמית היישום על-ידי לחיצה על כפתור הדגימה כדי לסגור את צלמית היישום ובחירה בלשונית (tab) הערכת פרמטרים (parameter estimation) כדי לטעון את הצלמית מחדש.



שלב 6 – הגבר/י את המתח של המנוע במרווחים של 1V החל מ-5V ועד ל-+5V. בכל מרווח, מדוד/מדדי את מהירות המנוע, את הזרם העובר דרך המנוע ואת זרם ההשהיה. זרם ההשהיה נמדד כאשר העומס נשמר בצורה שלא מאפשר למנוע להסתובב יותר. תעד/י את ממצאיך בטבלה 3.

זרם מנוע (V)	מהירות מנוע (rad/s)	זרם מנוע (A)	זרם השהייה (A)
-5			
-4			
-3			
-2			
-1			
1			
2			
3			
4			
5			

טבלה 3: מדידות שערך הפרמטרים

שלב 7 – לחץ/י על מחוון *Acquire Data* לאחר שכל המדידות הסתיימו על-מנת להמשיך עם המעבדה.
 שלב 8 – מדידות אלה משמשות לזיהוי הפרמטרים הפיזיקליים של המנוע המסויים שברשותך. בהמשך, המודל המתמטי שכעת מפותח ישמש לתכנון הבקר. וודא/י שאותה מערכת שמשמשת אותך לפיתוח המודל תשמש אותך בעת יישום מערכת הבקרה. כפי שנידון מוקדם יותר, יש לזהות שלושה פרמטרים – ההתנגדות חשמלית, קבוע המומנט הסיבוב של המנוע ומומנט האינרציה בהתאמה.
 שלב 9 – זכור/זכרי כי המשוואות החשמליות של מנוע ה-DC הן:

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - E_{emf}(t) = 0 \quad \text{וגם} \quad [5]$$

$$E_{emf}(t) = K_m \omega_m(t) \quad [6]$$

כפי שמשוואה [6] מתארת, אם לא מאפשרים למנוע להסתובב (לדוגמא המנוע מושהה), אין מתח *back-emf*. אי-לכך, אם $E_{emf}=0$ v כאשר $I = I_{stall}$, משוואה [5] הופכת ל-

$$R_m = \frac{V_m(t)}{I_{stall}(t)} \quad [7]$$

שלב 10 – ניתן להעריך את התנגדות המנוע על-ידי העתקת מדידות זרם ההשהיה מטבלה מס' 3 לטבלה מס' 5 וחישוב R_m בכל מרווח מתח על-ידי שימוש בביטוי ב-[7]. ההערכה של התנגדות המנוע תמצא על-ידי חישוב הממוצע של עשרת החישובים.

מתח מנוע (V)	זרם השהייה (A)	התנגדות משוערכת (Ω)
-5		
-4		
-3		
-2		
-1		
1		
2		
3		
4		
5		
התנגדות ממוצעת:		

טבלה 4: שערך התנגדות חשמלית

שלב 11 – הפרמטר השני של המודל שיש למצוא הוא קבוע מומנט הסיבובי של המנוע, המסומן ב- K_t . בהינתן שביחידות SI $K_t=K_m$ (mks), שילוב המשוואות [5] ו-[6] ופיתרון עבור קבוע המומנט הסיבובי נותן:

$$K_t = \frac{V_m(t) - R_m I_m(t)}{\omega_m(t)} \quad [8]$$

ניתן לחשב את קבוע המומנט הסיבובי בכל מרווח מתח באמצעות מהירות המנוע והזרם שהוקלט בטבלה מס' 3, בתוספת ההתנגדות החשמלית המשוערכת בטבלה מס' 4. ההערכה הסופית של קבוע מומנט הסיבובי של המנוע נמצאת על-ידי חישוב הממוצע של עשרת קבועי המומנט. השלם את טבלה מס' 5.

קבוע המומנט (N·m/a) המוערך	זרם המנוע (A)	מהירות המנוע (rad/s)	מתח מנוע (V)
			-5
			-4
			-3
			-2
			-1
			1
			2
			3
			4
			5
קבוע המומנט הממוצע:			

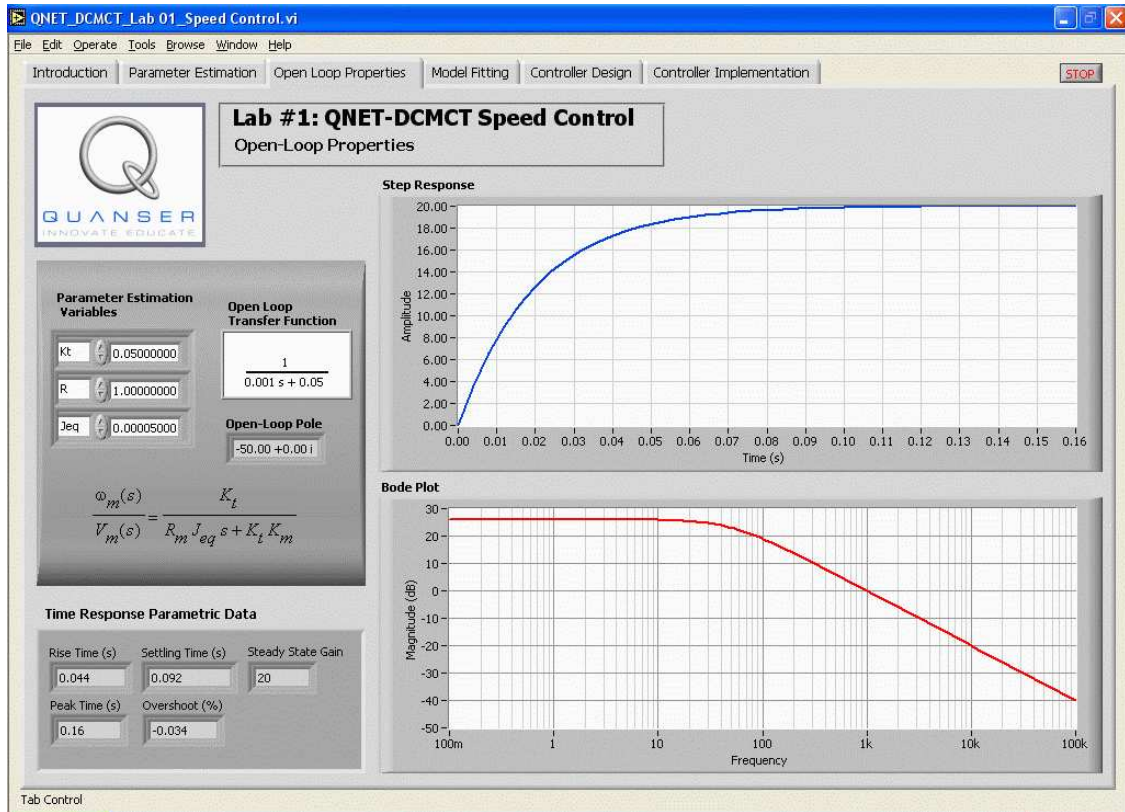
טבלה 5: שערך קבוע מומנט הסיבוב של המנוע

שלב 12 – הפרמטר האחרון שיש לחשב הוא מומנט האינרציה. במקרה של מודול ה-QNET, ישנו עומס על הדיסק המחובר לציר המנוע. מומנט האינרציה של דיסק המסתובב סביב צירו הוא:

$$J_l = \frac{mr^2}{2} \quad [9]$$

מומנט האינרציה של הדיסק בו נעשה שימוש במערכות QNET הוא 0.000015 ק"ג מ². ציר המנוע מוסיף גם הוא למומנט האינרציה של המערכת ושונה במקצת בכל מודול של QNET. המומנט המשוקלל J_{eq} , יחושב על-ידי ויסות (*fitting*) המודל למערכת עצמה מאוחר יותר.

שלב 13 – לחץ על לשונית (tab) מאפייני החוג-פתוח (*Open-Loop Properties*) וצלמית היישום המוצגת באיור מס' 4 אמורה להיטען.

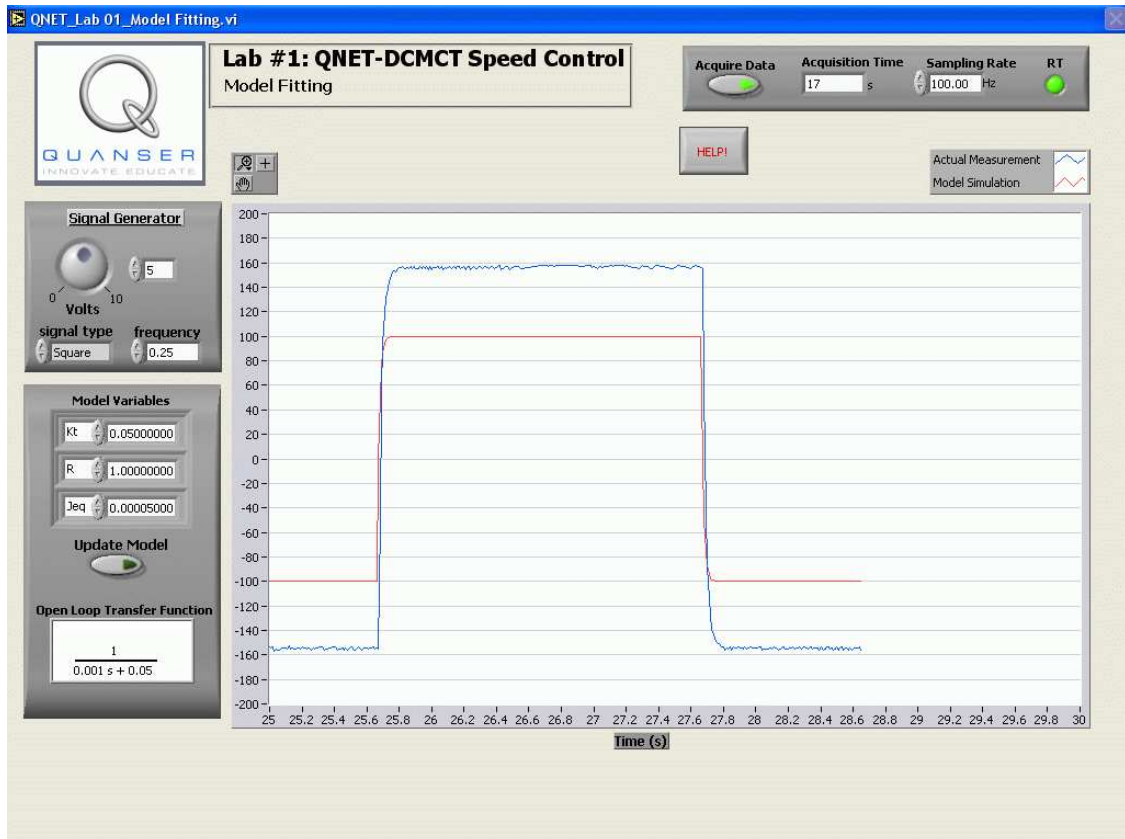


איור 4: מאפייני מערכת חוג-פתוח

שלב 14 – הזן את הערכים המשוערכים של K_t , R_m , ו- J_{eq} . התגובה אמורה להישנות בהתאם.

שלב 15 – תגובת המרווח של המנוע היא התגובה של מהירות המנוע לשינוי מתח של 1V. דיאגרמת בודה (Bode) ממפה את תגובת מהירות המנוע לתדר נתון. שיים-לב כי העוצמה נמדדת בדציבלים (dB) ונחלשת בתדרים גבוהים יותר. נצלי את ההזדמנות הזו על-מנת לחקור את המודל של המערכת בכך שתשנה/י את שלושת הפרמטרים של המודל ותצפה/י כיצד כל אחד מהם משנה את תגובת המרווח, דיאגרמת bode ופונקציית התמסורת. לדוגמא, צפה/י כיצד $peak\ time$ ו- $setting\ time$ מתקצרים ככל שהאינרציה J_{eq} גוברת.

שלב 16 – לאחר שמאפייני החוג-הפתוח נחקרו, וודא/י כי הפרמטרים מוחזרים למצב בו הם זוהו לראשונה. בחר/י בלשונית *יסות מודל* (Model Fitting) הטוען את צלמית היישום המופיע באיור מס' 5 והמשר/י עם המעבדה.



איור 5: ויסות המודל

שלב 17 – כפי שמתואר באיור מס' 5, הסקופ (מסך המציג את האותות) מציג את הסימולציה של תגובת מהירות המנוע, הנוצרת בעזרת המודל המתמטי שפותח, ותגובת מהירות המנוע האמיתית, הנמדדת על-ידי מד-המהירות. המנוע של QNET מופעל על ידי מחולל אותות.

שלב 18 – הכנסו את ערכי R_m ו- K_t המשוערכים אל תוך משתני המודל. בחרו/י בכפתור ה-עדכן מודל (Update Model) ושיום/י-לב שהסימולציה בדיאגרמה משתנה מכיוון שהיא מדמה את המערכת בעזרת פרמטרים חדשים.

שלב 19 – שנה את פרמטר האינרציה J_{eq} עד שהתגובה הממודלת תחל להתאים לתגובה האמיתית. כפי שצוין מוקדם יותר, האינרציה של עומס הדיסק ידועה אך האינרציה של ציר המנוע לא ידוע. זכרו/י ללחוץ על כפתור ה-Update Model לאחר שינוי פרמטר של המודל על-מנת לראות את השינויים בסימולציה.



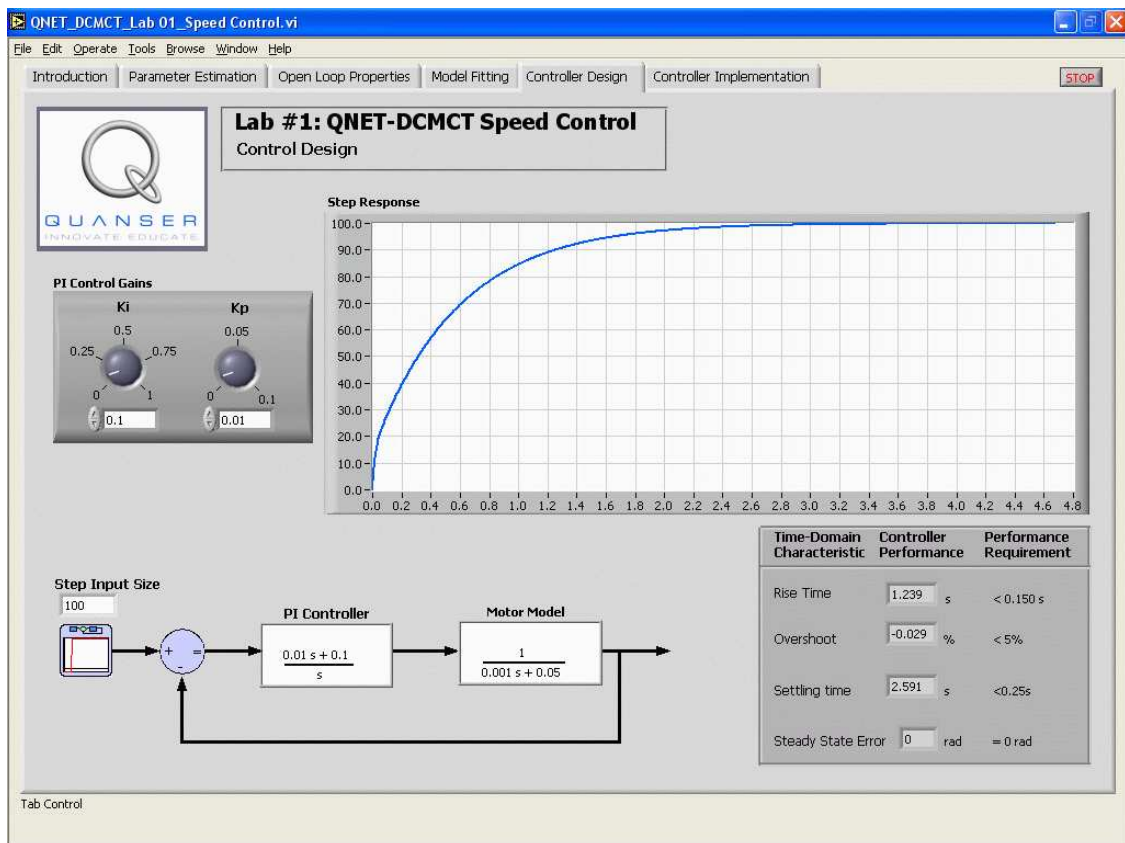
שלב 20 – בנוסף לכל, ניתן לשנות את קבוע המומנט הסיבוב K_t ואת קבוע התנגדות המנוע R_m , על-מנת לכייל את המודל בצורה מדויקת. ברגע שהסימולציה מתאימה לתגובה האמיתית, הקלט את K_t ו- J_{eq} ו- R_m הסופיים שהתקבלו ולחץ על כפתור ה-Acquire Data כדי להתקדם לתכנון הבקר. הקלט את הפרמטרים הנ"ל לשימוש בפגישת המעבדה הבאה – מעבדת DCMCT מס' 2 – בקרת מיקום.

מדריך מעבדת בקרת מהירות של DCMCT

יחידה	מדידה	פרמטר ויסות למודל
Ω		R_m
N·m/A		K_t
$Kg \cdot m^2$		J_{eq}

טבלה 6: פרמטרים לויסות המודל

שלב 21 – כעת יש לבחור את לשונית תכנון בקר (controller Design). כפי שמוצג באיור מס' 6, בלוק מודל המנוע (Motor Model) הינו פונקציית התמסורת המייצגת את מערכת החוג-הפתוח וקובית בקר ה-PI הוא מערכת הבקרה שיש לתכנן. שני הבלוקים נמצאים בלולאת משב שלילית, ובכך הופכים את המערכת למערכת בקרה חוג-סגור. כברירת מחדל, אות הבדיקה הוא בקפיצות של 100 deg/s. מערכת הבקרה אמורה להוציא מתח למנוע שיבטיח כי המנוע אכן ישיג את המהירות הרצויה.



איור 6: תכנון הבקר

שלב 22 – שני המחווים הבקרה העגולים באיור מס' 6 משנים את הגבר הפרופורציוני K_p ואת ההגבר האינטגרלי K_i , של הבקר. תשנה/י את ההגברים K_p ו- K_i כפי שמופיע בטבלה מס' 7 ותעד/י את השינויים בתגובת מדרגה (step response) ואת השינויים ב-ביצועי הבקר (Controller performance).

K_p (V/rad)	K_i (V/rad·s)	Rise Time (s)	Max. Overshoot (%)	Setting Time (s)	Steady-State Error (%)
0.00	0.50				
0.03	0.50				
0.05	0.50				
0.08	0.50				
0.10	0.50				
0.05	0.00				
0.05	0.25				
0.05	0.50				
0.05	0.75				
0.05	1.00				

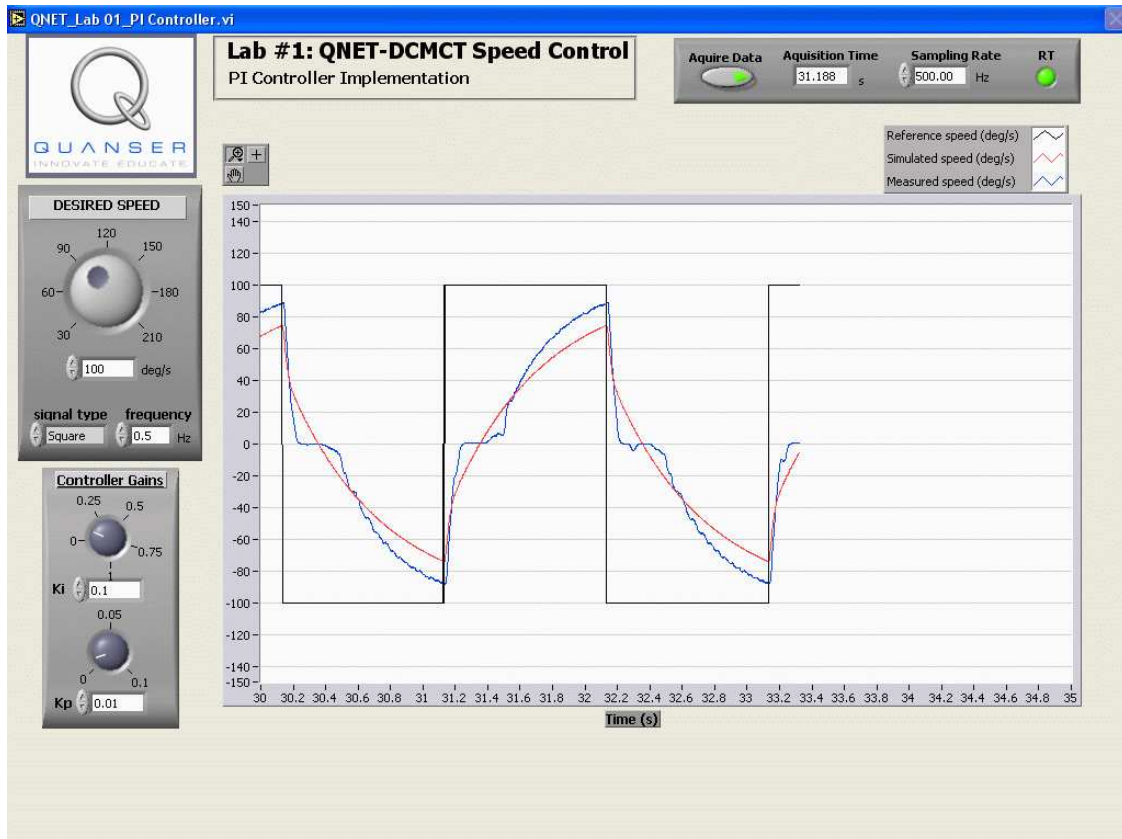
טבלה 7: ביצועי הבקר

שלב 23 – בכלליות, האפיון והביצועים הנדרשים ממערכת בקרה משתנים בהתאם לצרכים של המערכת בכללותה והמגבלות הפיזיקליים של המערכת. מצא/י את הגברי הבקר K_p ו- K_i שמתאימים לדרישות הבאות של מערכת ה-DCMCT בצורה המירבית:

- (1) מקסימום זמן עליה (rise time) של 0.15 שני'.
- (2) תגובת-יתר (Overshoot) פחות מ- 5%.
- (3) זמן יצוב (Setting time) פחות מ- 0.25 שני'.
- (4) שגיבת מצב יציב (Steady-state) של 0% (לדוגמא, מהירות מנוע נמדד צריך להתכנס למהירות פקודה).

שלב 24 – לאחר שהגברי הבקרים משיגים תגובת חוג-סגור המתאימה לאפיון הדרוש, הכנס/י את ערכי ה- K_p ו- K_i שמופיעים בשורה האחרונה של טבלה מס' 7, יחד עם תוצאות מאפייני זמן התגובה התואמים (response time-domains).

שלב 25 – בחר/י את הלשונית מימוש הבקר (Controller Implementation) על-מנת לטעון את צלמית היישום המופיע באיור מס' 7. על הבקר שתוכנן כעת להיות מיושם במערכת מנוע ה-DC של QNET. הצג ביישום השמשת הבקר, כפי שמופיע באיור מס' 7, מציב את מהירות המנוע המסומלצת מהמודל המתמטי ואת המהירות האמיתית בחוג-הסגור כפי שהיא נמדדת על-ידי מד-המהירות.



איור 7: מימוש בקר PI (פרופורציוני אינטגלי)

שלב 26 – וודאי כי קבועי הפרופורציוני והאינטגרלי שתוכננו להתאים לדרישות, מופיעים בלוח הגברי הבקר (Controller Gains) המוצג באיור מס' 7. מחולל הפונקציות בלוח מהירות רצויה (Desired Speed) משמש ליצור את מהירות הבקרה ליחוס. קבע/י את אות המהירות הנשלטת לגל מרובע בעל אמפליטודה של 100 מעלות לשנייה. **ממשי/י את הבקר עבור אותה המערכת ממנה פותח המודל. דבר זה יבטיח שהבקר לא מבוסס על מודל שעלול לא לייצג את המנוע שלך.**



שלב 27 – אם תגובת החוג-הסגור האמיתית או המדומה כבר לא עונה לדרישות, כוון את הבקר בלוח הגברי הבקר. הקלט את K_p ו- K_i הסופיים שהשתמשתם ואת מאפייני ביצועי הבקרה המתקבלים של תגובת החוג-הסגור – Rise Time, Max. Overshoot, Setting Time, – בטבלה מס' 8. Steady-State Error

הגדרות	ערך נמדד	יחידות
K_p		V/rad
K_i		V/rad·s
Rise Time		s
Max. Overshoot		%
Setting Time		s
Steady-State Error		deg/s

טבלה 8: ביצועי החוג-הסגור האמיתיים

שלב 28 – שנה/י את האמפליטודה, התדר ו/או סוג של אות הבקרה (סינוס, שן-מסור וריבוע) ושים/י לב לשינויים בהתנהגות התגובות.

שלב 29 – עצור את יישום הבקר על-ידי לחיצה על כפתור *דגום מידע (Acquire Data)* וזה יעביר אותך ללשונית *מודל מתמטי (Mathematical Model)*. כבה את מתג הכוח *PROTOTYPING* ואת מתג *POWER BOARD* ואת מתג *SYSTEM POWER* בצד האחורי של יחידת ה-ELVIS. נתק את כבל (זרם-החילופין) AC של המודול. לבסוף, סיים את מפגש המעבדה על-ידי לחיצה על כפתור ה-*עצור (Stop)* בצלמית היישום.