

הנדסת מכונות - אב"ג

מעבדה בחשמל - מנוע זרם ישר

התדריך כתוב בלשון זכר אך מיועד לסטודנטים ולסטודנטיות כאחד.

ניסוי זה עוסק בעקרונות הפעולה והשימוש של מנוע זרם ישר (מנוע DC) תעשייתי. מנוע זה דורש הספקה של מתח ישר (DC) לצורך הפעלתו, לכן לא ניתן לחבר אותו לרשת החשמל באופן ישיר. מצד שני, מנוע זרם ישר נחשב נוח לבקרה של מהירות ומומנט (לדוגמה כאשר יש צורך להפעיל את המנוע במהירות רצויה שאינה קבועה). למנועים כאלה גם יתרון כאשר מקור המתח מתבסס על סוללות. בגלל יתרונות אלה, מנועי זרם ישר נפוצים בתעשייה.

אזהרה – המנוע בניסוי הינו מנוע תעשייתי לכל דבר. במהלך הניסוי תידרשו להפעיל את המנוע עם אספקה של מתח חשמלי עד ערכים של 230V. רמות מתח אלה הינן מסוכנות ביותר. יש להקפיד על הוראות הבטיחות המופיעות מטה. כל סטודנט נדרש לחתום (למטה) כי קרא והבין את הוראות הבטיחות לפני ביצוע הניסוי. אין לבצע את הניסוי ללא קריאה והבנה של הוראות הבטיחות.

הוראות בטיחות

יש להקפיד לבצע את ההוראות הכתובות בתדריך באופן מדויק. במהלך הניסוי תידרשו לשנות את החיבורים החשמליים של המנוע. כל החוטים והמחברים הינם מבודדים ובטוחים לשימוש סביר. כל שינוי בחיווט החשמלי של המנוע ושל מכשירי המדידה יעשה כאשר אספקת המתח מנותקת, כלומר כאשר ספק המתח נמצא במצב כבוי. לאחר כל חיווט מחדש (כאשר הספק כבוי) יש לקרוא לאחד מטכנאי המעבדה כדי שיאשר את נכונות החיבור ויפעיל את ספק המתח. רק טכנאי מעבדה רשאי להפעיל את ספק המתח. אין להשתמש בכל ציוד אשר אינו חלק מהציוד האינטגרלי של הניסוי (בייחוד אין להשתמש בחוטי חשמל ללא בידוד או עם מחברים לא מבודדים). יש ללמוד ולהכיר את מערכת הניסוי לפני תחילת ביצוע הניסוי, בייחוד יש להכיר את אופן השימוש בספק המתח, אופן השימוש במכשירי המדידה (מדידת התנגדות, מדידת זרם, מדידת מתח, מדידת הספק מדידת מומנט, מדידת מהירות סיבוב), אופן חיבור המנוע לספק המתח ולמכשירי המדידה. ספק המתח כולל מפסק חירום לניתוק מהיר של אספקת המתח. המפסק בצבע אדום נמצא בפינה השמאלית עליונה של הספק. לחיצה על המפסק מנתקת מייד את אספקת המתח. יש לבצע את הניסוי בלבוש הולם כפי שנדרש במעבדות הוראה, יש להקפיד על נעליים סגורות. מערכת הניסוי כוללת חלקים מסתובבים (במהירות עד 5000 סל"ד) לכן סטודנטים וסטודנטיות בעלי שיער ארוך מתבקשים לבצע את הניסוי עם שיער אסוף. אין לבצע את הניסוי לבד. משיקולי בטיחות ניתן לבצע את הניסוי בזוגות או בשלושות בלבד.

קראתי והבנתי את הוראות הבטיחות

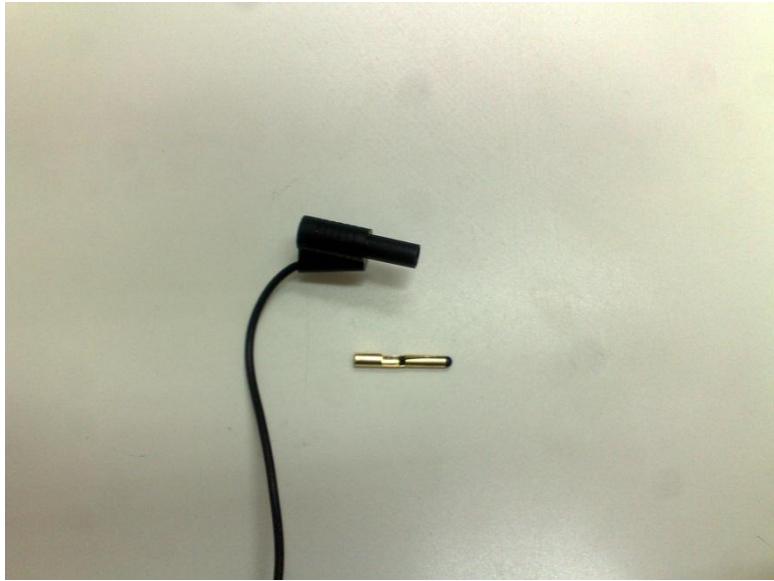
שם הסטודנט: _____ ת"ז: _____ תאריך: _____ חתימה: _____

בטיחות

- במנוע החשמלי חלקים נעים, לכן יש חשיבות מיוחדת לאיסוף השיער על מנת שלא ייתפס בציר המסתובב, כמו כן אין ללבוש פרטי לבוש אשר עלולים להיתפס בציר המסתובב (שרוולים רפויים, צעיפים, שרשראות וכדומה)
- חוטי חשמל חשופים – ספק הכוח מסוגל לספק מתחים וזרמים מסוכנים. במקרה של חוט חשוף, או פין מתכת שנשאר תקוע במכשירים – אין לגעת, יש לקרוא למדריך או לטכנאי המעבדה.
- בשום פנים אין להחדיר חפץ כלשהו למחברי המנוע או הספק שאינם החוטים הייעודיים לכך.
- אין להפעיל את ספק הכוח ללא אישור מפורש מהמדריך. יש להקפיד על בדיקה של המדריך את המערכת לפני כל הפעלה.
- ניצוצות – במקרה שניצוצות נוצרים במנוע – יש להפסיק את הניסוי ולדווח לטכנאי המעבדה.
- בכל הפעלה של המנוע יש לעקוב אחרי הזרם בעוגן ולוודא שהוא אינו גדל בצורה חריגה (עלול לקרות עקב חיבור שגוי של המנוע).



חלקים נעים במנוע מהווים סכנה לתפיסת שיער\ביגוד



כבל תקול – פין הברזל ניתק ועלול להישאר מחובר
למכשור ולהוות סכנת התחשמלות.

1. מטרת הניסוי

לימוד היבטים שונים של מנוע זרם ישר (ז"י) תעשייתי.

- א. הבנת עקרון הפעולה של מנוע זרם ישר.
- ב. שרטוט אופייני המנוע.
- ג. הפעלת מנוע זרם ישר עם עירור מקבילי.
- ד. הפעלת מנוע זרם ישר עם עירור טורי.
- ה. הפעלת מנוע זרם ישר עם עירור מרוכב.
- ו. הפעלת מנוע זרם ישר עם עירור נפרד.

2. רקע עיוני

לפני ביצוע המעבדה יש ללמוד את הנושאים הבאים:

זרם ישר (DC) - יש לקרוא בוויקיפדיה בכתובות:

http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_current

מנוע זרם ישר (DC) עם מברשות - יש לקרוא בוויקיפדיה בכתובות:

http://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor

יש לקרוא את התדריך כולו לפני ביצוע הניסוי, התדריך כולל גם רק תיאורטי המשולב בתוך מהלך הניסוי.

יש לענות בקצרה על שאלות ההכנה הבאות:

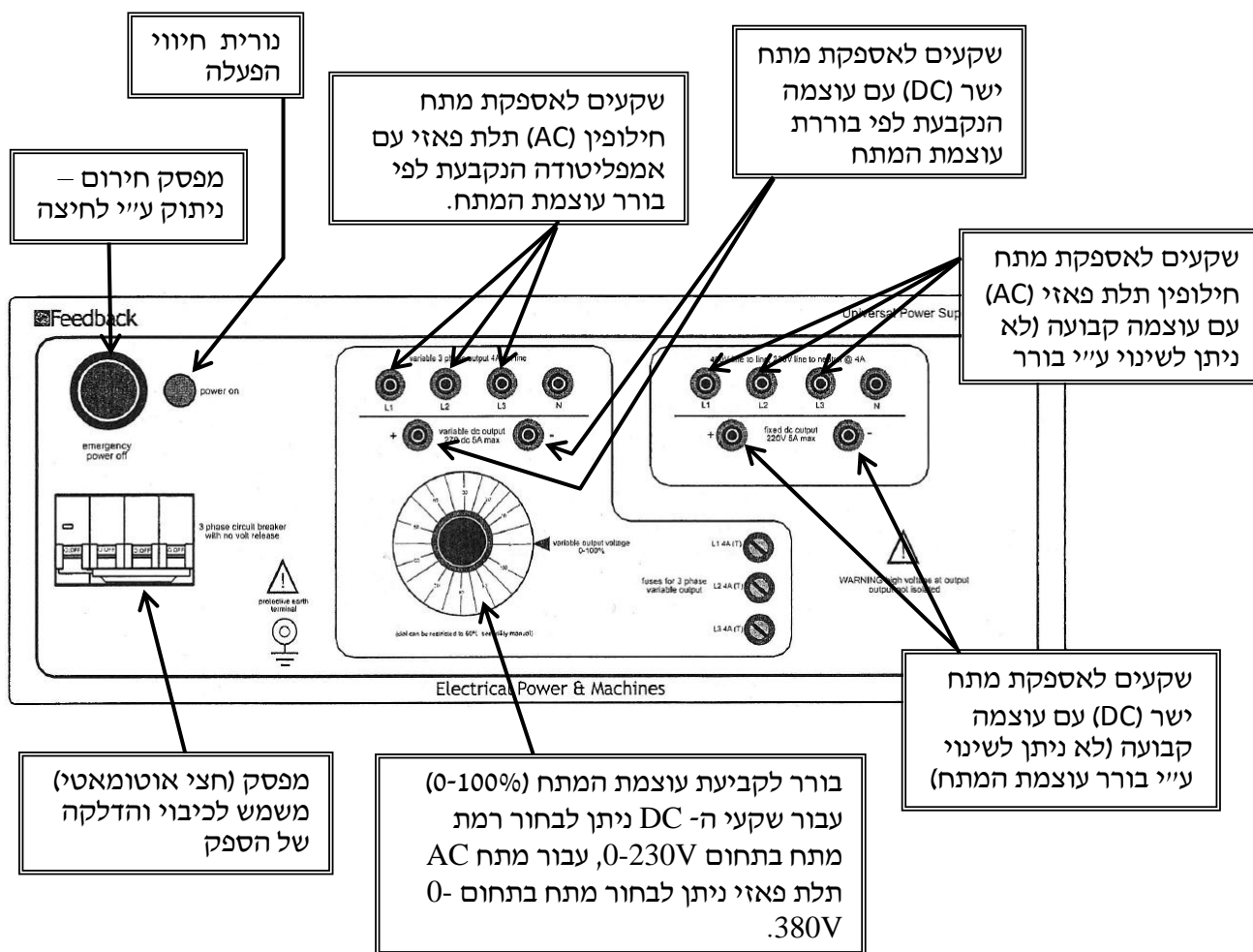
1. מהם עקרונות הפעולה של מנוע זרם ישר – מהם הכוחות הפועלים והגורמים להם.
2. מה תפקיד המחלף והמברשות במנוע זרם ישר.
3. מה תפקיד סלילי השדה ומה תפקיד סלילי העוגן.
4. מהם ארבעת צורות החיבור הבסיסיות של סלילי השדה וסלילי העוגן.

3. מערכת הניסוי

מערכת הניסוי כוללת מנוע DC עם מברשות ושני סלילי עירור נפרדים, ספק מתח אוניברסאלי (בניסוי זה מתפקד כשני ספקים נפרדים, ספק מתח DC עם עוצמה קבועה 230V וספק מתח DC עם עוצמה משתנה), גנרטור (משמש להעמסת המנוע באופן מבוקר), ממשק חיבור למדידת זרמים ומתחים, מחשב PC (להצגת קריאות מדידה של זרם, מתח והספק), ערכת נגדים וסט חוטי חשמל עם מחברים מבודדים.

ספק מתח

הפנל הקדמי של הספק עם הפונקציות השונות מתוארים באיור 3.1. ספק זה יכול לספק מתח DC עם עוצמה קבועה בגודל 230V, מתח AC תלת פאזי עם אמפליטודה קבועה בגודל 400V, מתח DC עם עוצמה לפי בחירה (ע"י בורר עוצמת מתח 0-230V) ומתח AC תלת פאזי עם אמפליטודה לפי בחירה (0-380V).

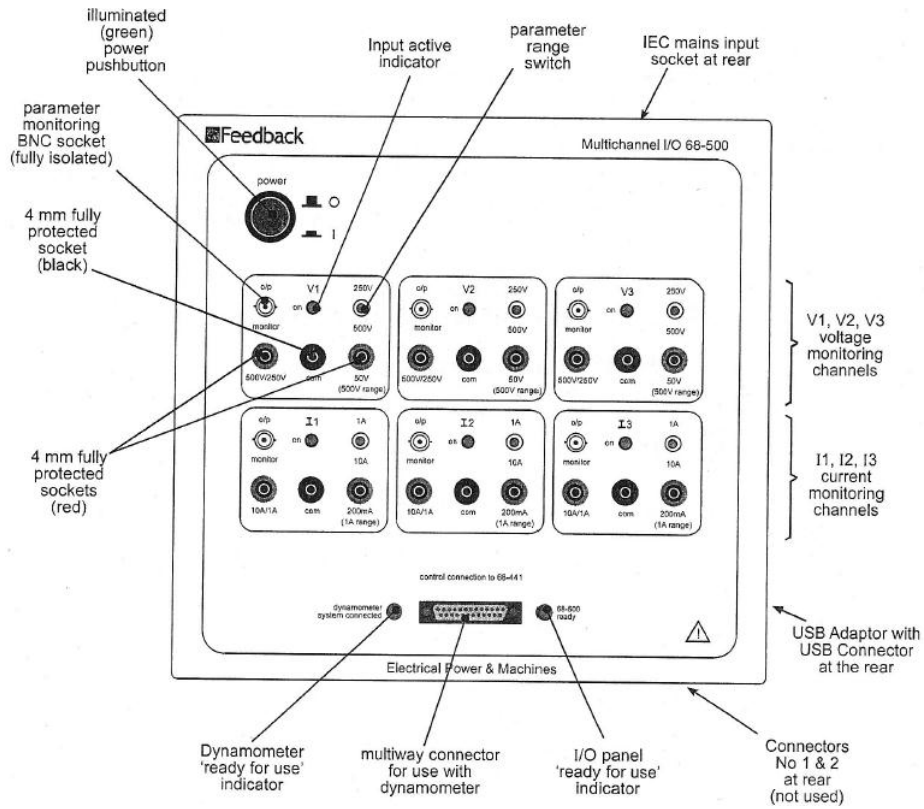


איור 3.1 – ספק מתח ישר (DC) ומתח חילופין (AC) תלת פאזי

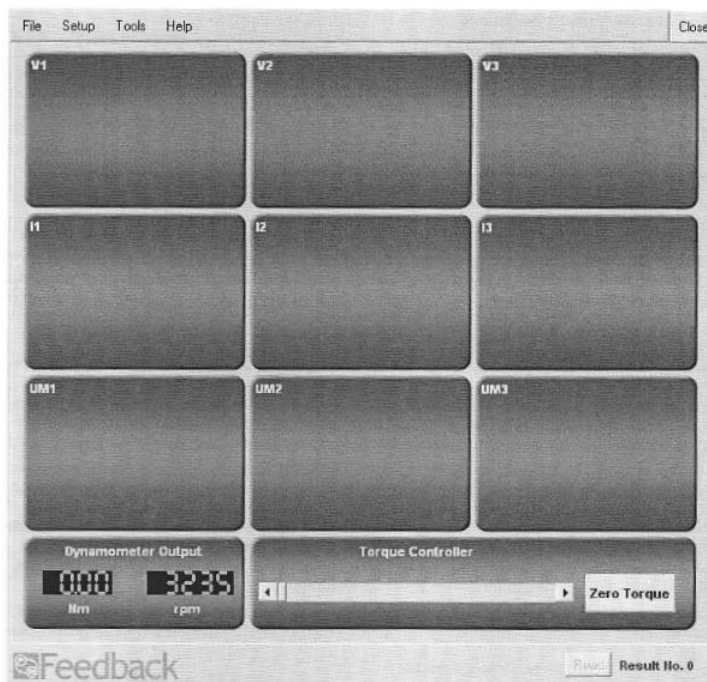
ממשק חיבור ודגימה למדידת זרמים מתחים והספקים

הפאנל הקדמי של הממשק מוצג באיור 3.2. מערכת זו מאפשרת מדידת שלושה זרמים (AC או DC) ושלושה מתחים (DC או AC). לחצן הפעלה נמצא בפינה השמאלית עליונה. הממשק מחובר למחשב PC באמצעות חיבור USB. הקריאות מוצגות על מסך המחשב ע״י שימוש בתוכנה מיוחדת. תחילת יש להפעיל את הממשק ע״י הלחצן הירוק ורק אז לפתוח את תוכנת המחשב. בסוף הניסוי יש לסגור תחילה את תוכנת המחשב ורק אחר כך לכבות את הממשק. השורה העליונה משמשת למדידת מתחים, יש להקפיד לחבר את החוטים למחבר המתח הגבוה – 500/250V. בניסוי זה מומלץ להשתמש בתחום הנמוך, כלומר 250V. השורה התחתונה משמשת למדידת זרמים. יש להקפיד לחבר את החוטים למחבר הזרם הגבוה – 10/1A. יש להקפיד שהמפסקים יצבעו על התחום הגבוה כלומר 10A.

הממשק של תוכנת המחשב (כפי שמופיע על גבי מסך המחשב) מוצג באיור 3.3. שלושת החלונות בשורה העליונה מאפשרים קריאה של שלושה מדי מתח. שלושת החלונות בשורה האמצעית מאפשרים קריאה של שלושה מדי זרם. כדי להפוך את תצוגת המדדים לפעילה יש להקליק עם העבר בכל חלון – יש לבחור את תחום המדידה המתאים (התחום הגבוה הינו ברירת המחדל). שלושת החלונות בשורה השלישית ממלאים פונקציה הניתנת לבחירה ע״י המשתמש (ולכן נקראים UM – User Meter). אנו נשתמש ב- User Meters למדידת הספק חשמלי. נמדוד את ההספק החשמלי בכניסה ביחידות [W]. החלק התחתון של מסך התוכנה מיועד לחיבור דינמומטר ואינו פעיל בניסוי זה. בניסוי זה, נמדוד שני מתחי DC, שני זרמי DC והספקים (מדובר במעגל DC, לכן ההספק הינו מכפלת המתח בזרם)



איור 3.4 – ממשק חיבור למדידת מתחים זרמים והספקים



איור 3.5 – ממשק התוכנה להצגת קריאות של מדידת זרמים מתחים והספקים

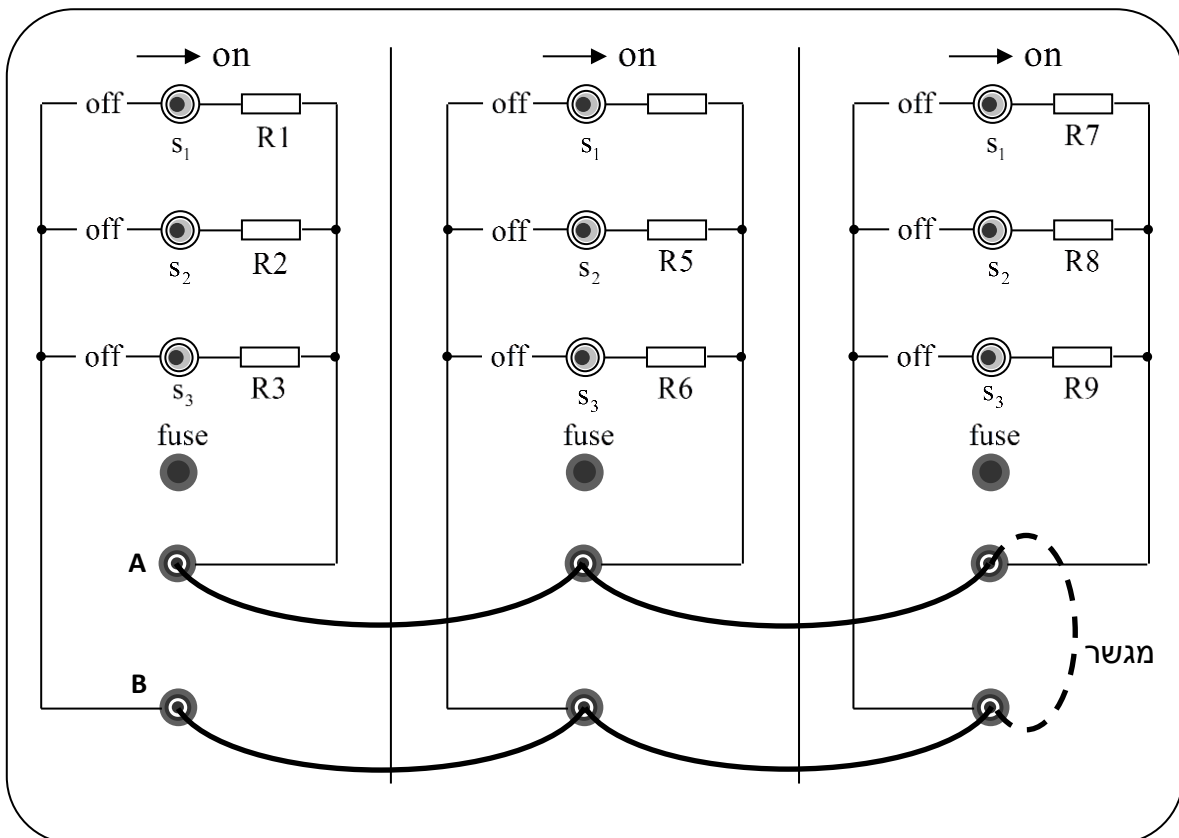
מערך נגדים

תפקיד מערך הנגדים הוא לווסט את הזרם שזורם בסלילי השדה. אסור להפעיל את המנוע מבלי לחבר את סלילי השדה ולכן חשוב לשים לב שבין הנקודות A ו B לעולם אין נתק! אם הנגדים לא מחוברים יש להשתמש במגשר (חוט חשמל) כדי לקצר בין A ל B.
 ערכי הנגדים הם:

$$R1 = R4 = R7 = 1000\Omega$$

$$R2 = R5 = R8 = 2200\Omega$$

$$R3 = R6 = R9 = 4400\Omega$$



איור 3.7 - מערך נגדים (עומס נגדים תלת-פאזי)

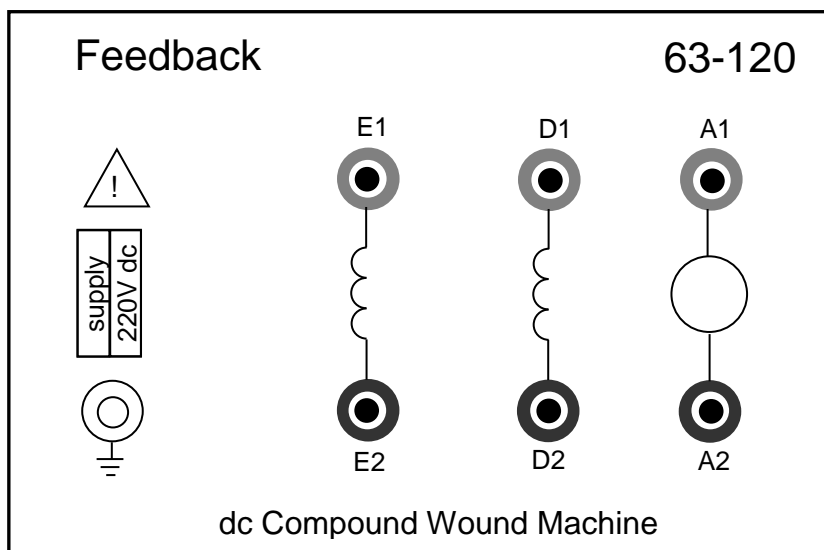
ערכי התנגדות אפשריים מוצגים בטבלה הבאה. עבור המפסקים $(s_1 - s_3)$, המצב 1 מייצג מפסק סגור (מוליך) והמצב 0 מייצג מפסק פתוח (לא מוליך). הטבלה מתארת ערכי התנגדות עבור שימוש בסט נגדים יחיד, בשני סטים במקביל ושלושה סטים במקביל (כאשר סטים מחוברים במקביל אז הטבלה מתארת מצב בו מצב המפסקים בכל סט הינו זהה). בניסוי זה שלושת הסטים מחוברים במקביל (כפי שנתון באיור) ושני מצבים המפסקים הנדרשים בניסוי מודגשים בטבלה.

S_1	S_2	S_3	סט אחד [Ω]	2 סטים במקביל [Ω]	3 סטים במקביל [Ω]
1	1	1	595	275	198
1	1	0	688	344	229
1	0	1	815	407	272
1	0	0	1000	500	333
0	1	1	1467	733	489
0	1	0	2200	1100	733
0	0	1	4400	2200	1466

טבלה 3.1 – טבלת התנגדויות

המנוע

המנוע בניסוי הוא מנוע זרם ישר עם שלושה סטים נפרדים של סלילים, קופסת החיבורים של המנוע מוצגת באיור 4.1.



איור 4.1 – לוח החיבורים של המנוע

הסט של סלילי העוגן (הרוטור) מסומן ע"י A1-A2. המנוע כולל שני סטים נפרדים של סלילי שדה. את סט הסלילים המסומן ע"י E1-E2 ניתן לחבר במקביל לסלילי העוגן, או בנפרד מסלילי העוגן. את סט הסלילים המסומן ע"י D1-D2 ניתן לחבר בטור עם סלילי העוגן (אופן החיבור נקבע לפי האופן בו מעוניינים להפעיל את המנוע). נתוני המנוע: מהירות נומינאלית 2000 rpm, מהירות מקסימאלית 6000 rpm, מתח הספקה 220 V, הספק נקוב (בעבודה רציפה) 250 W.

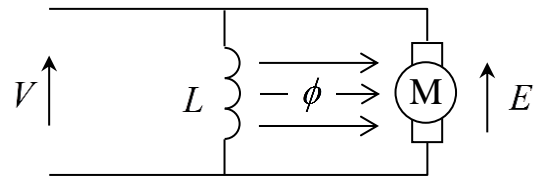
שאלה – התנגדות אילו סלילים תהיה נמוכה והתנגדות אילו סלילים תהיה גבוהה (התנגדות אוהמית)?

5. רקע תיאורטי לחיבורים השונים

קצת סדר – במנוע שלושה סטים של סלילים. סלילי העוגן – אלו הם הסלילים המחוברים לרוטור ומסתובבים יחד עם המנוע. רוב ההספק החשמלי מועבר לסלילים אלו. בנוסף שני סטים של סלילי עירור הנקראים גם סלילי שדה. סלילים אלו סטאטיים ומחוברים לסטטור. התפקיד של סלילים אלו הוא ליצר שדה מגנטי. האינטרקציה בין השדה המגנטי הנ"ל לזרמים בסלילי העוגן היא שיוצרת כוחות ומומנטים. יש שני סטים של סלילי עירור – אחד מהם נועד לחיבור טורי ומאופיין בהתנגדות אוהמית נמוכה והשני נועד לחיבור מקבילי ומאופיין בהתנגדות אוהמית גבוהה. במנועים מסויימים אין סלילי עירור ובמקומם משתמשים במגנטים קבועים.

5.1 רקע תיאורטי, מנוע DC עם עירור מקבילי

במנוע DC עם עירור מקבילי (Shunt connected motor) סלילי העוגן וסלילי השדה מחוברים במקביל אל מקור המתח. איור 4.1.1 מציג מעגל חשמלי שקול של מנוע DC עם עירור מקבילי.



איור 4.1.1 - מעגל חשמלי אקוויולנטי של מנוע DC עם עירור מקבילי

כאשר V הינו מתח הספק, E הינו כוח אלקטרומניע מושרה (back EMF), L השראות עצמית של סלילי השדה ו- ϕ שטף מגנטי במעגל העוגן (רוטור).

הגודל של E (המתח המושרה בסלילי העוגן כתוצאה מתנועה בשדה מגנטי) הינו יחסי לשטף המגנטי ϕ ולמהירות המנוע N (סל"ד) באופן הבא:

$$E = K_E \phi N \quad (4.1.1)$$

כאשר K_E הינו קבוע שערכו תלוי בסליל השדה. זרם העוגן נתון ע"י:

$$I_a = \frac{V - E}{R_a} \quad (4.1.2)$$

כאשר כאן R_a התנגדות סלילי העוגן ו- I_a הזרם בסלילי העוגן. המומנט המיוצר על ידי המנוע ופועל על הרוטור (עוגן) הינו יחסי לשטף ויחסי לזרם בסלילי העוגן באופן הבא:

$$T = K_T \phi I_a \quad (4.1.3)$$

כאשר K_T הוא קבוע התלוי במאפיינים של סלילי העוגן (רוטור).
 בתנאי מצב מתמיד ללא עומס וכאשר מזניחים את החיכוך הקיים במנוע (וכאשר מניחים כי המנוע פועל ללא הפסדים כלל), המומנט הפועל על הרוטור הינו אפס ומתוך (4.1.3) גם הזרם בסלילי העוגן I_a צריך להיות אפס. מכאן נובע כי במצב מתמיד ללא עומס:

$$V = E = K_E \phi N \quad (4.1.4)$$

מכאן ברור כי (עבור מתח קבוע) אם השטף המגנטי קטן אז המהירות גדלה (לפי יחס הפוך) עד שהמנוע מגיע למצב שיווי משקל חדש (בו המהירות היא קבועה).

חשוב להבין כיצד המהירות משתנה בעקבות שינוי של העומס (כאשר מתח ההספקה הינו קבוע). במנוע עם עירור מקבילי השטף אינו תלוי בזרם העוגן. לכן, כאשר העומס גדל, זרם העוגן גדל באופן פרופורציונאלי לעומס, מה שמוביל לירידה בכוח האלקטרומוניע (EMF) ולהקטנה של מהירות המנוע ביחס ישר להגדלה בעומס.

השטף הינו יחסי לזרם השדה, ולכן ניתן לבקר את מהירות המנוע ע"י שינוי זרם השדה (עם מתח הספק נשאר קבוע). את זרם השדה ניתן לשנות (ללא שינוי מתח הספק) ע"י שימוש בנגד משתנה.

כאשר בודקים ביצועים של מנוע חשמלי, חשוב לבדוק את נצילות (יעילות - efficiency) המנוע בתנאי עבודה שונים. הנצילות מוגדרת כיחס בין ההספק החשמלי בכניסה וההספק המכאני במוצא. במקרה של מנוע עם עירור מקבילי, ההספק בכניסה נתון ע"י:

$$P_i = V_f I_f + V_a I_a \quad (4.1.5)$$

כאשר V_f, I_f המתח והזרם בסלילי השדה ו- V_a, I_a המתח והזרם בסלילי העוגן.
 ההספק המכאני במוצא מחושב ע"י:

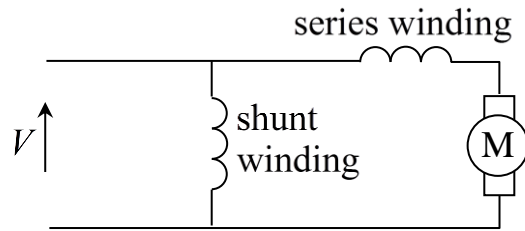
$$P_o = \frac{2\pi TN}{60} \quad (4.1.6)$$

והנצילות מוגדרת באופן הבא:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Power Out}}{\text{Power In}} \times 100\% = \frac{\frac{2\pi TN}{60}}{V_f I_f + V_a I_a} \times 100\% \quad (4.1.7)$$

5.2 רקע תיאורטי, מנוע זרם ישר עם עירור מרוכב (dc Compound Wound Motor)

במנוע DC עם עירור מרוכב (Compound connected motor) קיימים שני סטים של סלילי שדה. סט אחד מחובר בטור עם סלילי העוגן וסט שני מחובר במקביל לסלילי העוגן ובמקביל למקור המתח. איור 4.3.1 מציג מעגל חשמלי שקול של מנוע DC עם עירור מרוכב.



איור 4.3.1 - מעגל חשמלי אקוויוולנטי של מנוע DC עם עירור מרוכב

מנוע זה מהווה מיזוג (הכלאה) של מנוע עם עירור טורי (ראה פרק 5.3) ומנוע עם עירור מקבילי (shunt). ניתן להשיג תחומי עבודה עם תכונות דומות לתכונות של מנוע טורי ותחומי עבודה עם תכונות של מנוע מקבילי. השדה המגנטי הנוצר ע"י סלילי השדה הוא חיבור של השדות הנובעים משני סלילי השדה (לכן המנוע גם נקרא cumulative compound wound motor).

כאשר יש עלייה בעומס, הזרם דרך העוגן גדל. הזרם דרך העוגן זורם גם דרך סלילי העירור הטוריים מה שמוביל להגדלת השטף המגנטי והגדלת היחס מומנט לאמפר של המנוע. בהשוואה למנוע מקבילי, כאן יש ירידה גדולה במהירות כאשר העומס גדל.

כמו במקרה של מנוע מקבילי, גם כאן ניתן להוסיף נגד משתנה בטור עם סלילי השדה המקביליים (shunt). שינוי ההתנגדות מוביל לשינוי מאפייני המנוע (torque/speed characteristics).

את היעילות מחשבים ע"י שימוש בנוסחאות הבאות:

$$P_i = V_f I_f + V_a I_a \quad (4.3.1)$$

הספק מכאני במוצא.

$$P_o = 2\pi TN / 60 \quad (4.3.2)$$

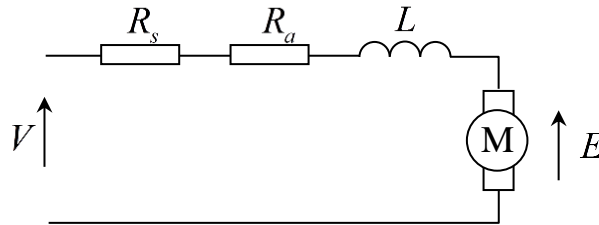
מאן הביטוי לחישוב הנצילות הינו

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Power Out}}{\text{Power In}} \times 100\% = \frac{2\pi TN / 60}{V_f I_f + V_a I_a} \times 100\% \quad (4.3.3)$$

כאשר V_f, I_f הזרם והמתח בסלילי השדה.

5.3 רקע תיאורטי, מנוע זרם ישר עם עירור טורי (DC Series Motor)

במנוע DC עם עירור טורי (Series connected motor) סלילי העוגן וסלילי השדה מחוברים בטור אל מקור המתח. איור 4.2.1 מציג מעגל חשמלי שקול של מנוע DC עם עירור טורי.



איור 4.2.1 - מעגל חשמלי אקוויולנטי של מנוע DC עם עירור טורי

כאשר V מתח הספק, E כוח אלקטרומניע מושרה (בסלילי הרוטור בגלל התנועה בשדה מגנטי, back EMF), R_a ההתנגדות הפנימית של סלילי העוגן ו- R_s התנגדות חיצונית המחוברת בטור עם סלילי העוגן.

גודל הכא"מ המושרה (E) יחסי לשטף ולמהירות באופן הבא:

$$E = K_E \phi N \quad (4.2.1)$$

כאשר N מהירות סיבוב (ביחידות rpm) ו- K_E הוא קבוע התלוי בתכונות של סלילי השדה.

הזרם דרך העוגן נתון בקשר הבא (עבור $R_s = 0$):

$$R_a I_a = V - E \quad (4.2.2)$$

השטף הינו יחסי (פרופורציונאלי) לזרם השדה (עד מצב רוויה מגנטית) ובמקרה של מנוע טורי זרם זה שווה גם לזרם העוגן, לפי:

$$\phi = K_f I_f = K_f I_a \quad (4.2.3)$$

כאשר K_f הוא קבוע התלוי בתכונות של סלילי השדה.

מהירות המנוע ניתנת לוויסות ע"י הוספה של נגד משתנה בטור עם סלילי העוגן. הגדלת ערך הנגד המשתנה תגדיל את מפל המתח על הנגד, מה שיחייב הקטנה של הכא"מ המושרה E ולכן גם הקטנה במהירות של המנוע.

המומנט הנמסר לציר המנוע (לעוגן) הינו יחסי לשטף ולזרם העוגן באופן הבא:

$$T = K_T \phi I_a \quad (4.2.4)$$

כאשר K_T הוא קבוע התלוי בתכונות סלילי העוגן.

ע"י הצבה של (4.2.3) ב- (4.2.4) ניתן לקבל את הקשר הבא:

$$T = K I_a^2 \quad (4.2.5)$$

כאשר K הינו קבוע. מכאן ברור כי במנוע עם עירור טורי המומנט הנמסר לעוגן הינו יחסי לריבוע הזרם דרך העוגן. הזרם נמצא ביחס הפוך למהירות (בגלל שהקטנה של המהירות גורמת להקטנה של E). קשרים אלה מקנים למנוע מומנט גבוה במהירות נמוכה (לדוגמא מומנט התנעה גבוה). בגלל תכונות אלה מנוע עם עירור טורי מתאים ליישומים בהם דרוש כוח גרירה (traction applications). מתוך משוואות (4.2.1), (4.2.2) ו- (4.2.3) מתקבל:

$$V = I_a (R_a + K_1 N) \quad (4.2.6)$$

ומתוך (4.2.5) בהנחה ש- V הינו קבוע

$$T = \frac{K_3}{(R_a + K_1 N)^2} \quad (4.2.7)$$

כאשר K_1 ו- K_3 הם קבועים.

עבור ערכים גבוהים של N (מהירות גבוהה), ניתן להניח $R_a \ll K_1 N$ לכן במהירויות גבוהות ניתן לומר שהמומנט שמייצר המנוע הוא ביחס הפוך לשורש הריבועי של המהירות (הנחה זו תקפה במהירויות גבוהות עד הופעת השפעות של רוויה מגנטית).

ההספק החשמלי בכניסה למנוע דרוש לצורך חישוב נצילות המנוע. את ההספק בכניסה ניתן לחשב מתוך הקשר הבא:

$$P_i = VI_a \quad (4.2.8)$$

את ההספק במוצא מחשבים ע"י:

$$P_o = \frac{2\pi TN}{60} \quad (4.2.9)$$

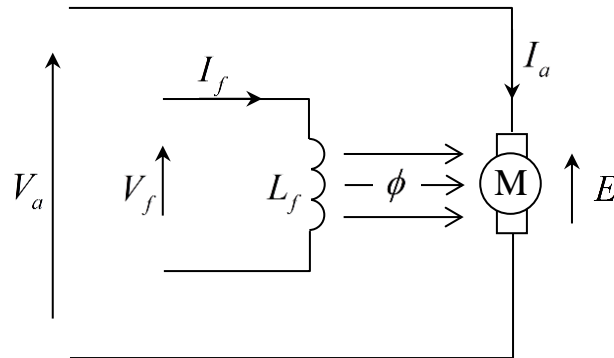
ואת הנצילות מתוך:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Power Out}}{\text{Power In}} \times 100\% = \frac{2\pi TN/60}{VI_a} \times 100\% \quad (4.2.10)$$

כאשר V מתח הספק.

5.4 רקע תיאורטי, מנוע זרם ישר עם עירור נפרד (dc Separately Excited Motor)

במנוע DC עם עירור נפרד (Separately Excited) הפעלת המנוע מתבססת על שני ספקי מתח בלתי תלויים. ספק אחד מאפשר את הזרם הדרוש בסלילי העוגן וספק שני מאפשר את הזרם הדרוש בסלילי השדה. איור 4.4.1 מציג מעגל חשמלי שקול של מנוע DC עם עירור נפרד.



איור 4.4.1 - מעגל חשמלי אקוויולנטי של מנוע DC עם עירור נפרד

במידה וזרם השדה קבוע ניתן להתייחס אל השטף המגנטי ϕ כאל קבוע. לכן מתוך הנוסחה הבאה ניתן לראות את היחס הישר הקיים בין זרם העוגן והמומנט שמייצר המנוע, כאשר K_T הינו קבוע.

$$T = K_T \phi I_a \quad (4.4.1)$$

זרם העוגן תלוי בהפרש בין מתח הספק של העוגן (V_a) ובין הכוח האלקטרומניע המושרה E (back EMF).

$$E = K_E \phi N \quad (4.4.2)$$

מתוך הנוסחה האחרונה, עבור מתח הספק קבוע (בסלילי השדה), הכא"מ המושרה E נמצא ביחס ישר למהירות N .

ע"י שינוי הזרם בסלילי השדה (ולכן גם שינוי השטף ϕ) ניתן לקבל מאפייני מהירות/מומנט שונים עבור המנוע. שינוי הזרם בסלילי השדה אפשרי בשני דרכים:

1. שימוש בנגד משתנה בטור עם סלילי השדה.
2. שינוי מתח הספק של סלילי השדה.

לחישוב הנצילות יש לחשב את ההספק החשמלי במבוא P_i .

$$P_i = V_f I_f + V_a I_a \quad (4.4.3)$$

ואת ההספק המכאני במוצא:

$$P_o = \frac{2\pi TN}{60} \quad (4.4.4)$$

הנצילות מחושבת ע"י:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Power Out}}{\text{Power In}} \times 100\% = \frac{\frac{2\pi TN}{60}}{V_f I_f + V_a I_a} \times 100\% \quad (4.4.5)$$

כאשר V_f, I_f מתח הספק והזרם בסלילי השדה ו- V_a, I_a מתח הספק והזרם בסלילי העוגן.

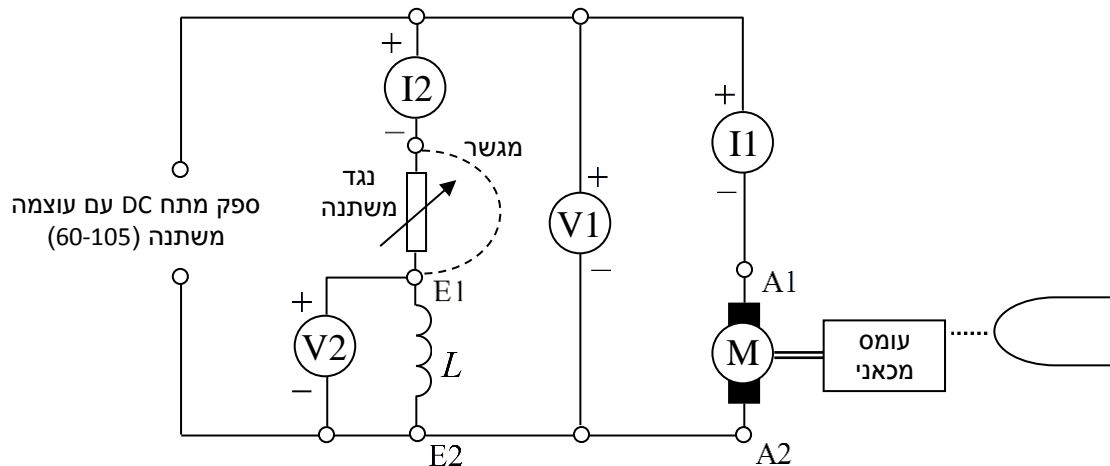
6.1 - מנוע זרם ישר עם עירור מקבילי (DC Shunt Motor)

משימות:

1. שרטוט אופייני המנוע (Speed/torque relationship)
 - זרם עוגן כנגד מומנט מוצא (Armature current/output torque relationship)
 - מתח עוגן כנגד מהירות (Armature voltage/speed relationship)
 - יעילות (Efficiency)
2. זרם שדה כנגד מהירות (Field current/shaft speed relationship)

מהלך

מדוד את התנגדות הסלילים. איזה סליל עירור מיועד לחיבור בטור ואיזה סליל מיועד לחיבור במקביל? כבה את ספק המתח ואת מכשירי המדידה. חבר את המנוע, מכשירי המדידה וערכת הנגדים כפי שנתון באיור 4.1.2 (בערכת הנגדים כל המפסקים במצב on). הפעל את מכשירי המדידה. בחלק זה של הניסוי יש לקצר את הנגד המשתנה ע"י שימוש במגשר.



איור 4.1.2 – מערך ניסוי הכולל מנוע DC עם עירור מקבילי

כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% והפעל את הספק. הגדל את עוצמת המתח בהדרגתיות ל- 220V. יש להגדיל את העומס המכני במרווחים של 0.2 Nm עד 1.4 Nm. עבור כל עומס יש להמתין עד מצב מתמיד (כ 2-3 שניות) ולרשום את המדידות הבאות בטבלה 4.1.1, כאשר V1 מתח העוגן, V2 מתח השדה, I1 זרם העוגן ו-I2 זרם השדה.

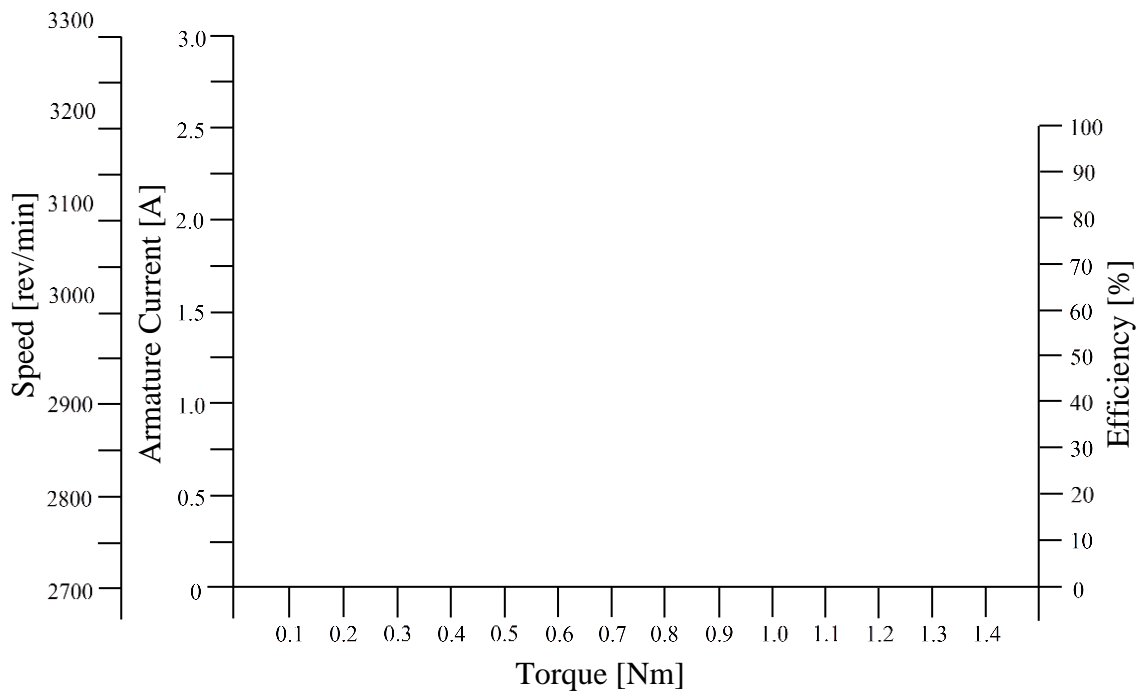
בתום תהליך המדידה כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% וכבה את ספק המתח.

חשב את הספק הכניסה, הספק המוצא והנצילות והשלם את הנתונים הדרושים בטבלה 4.1.1.

לפי הנתונים בטבלה שרטט את שלושת אופייני המנוע הדרושים בגרף 4.1.1. יש לשרטט את המהירות, את זרם העוגן ואת הנצילות כנגד מומנט העומס.

Armature Voltage V1 [V]	Field Voltage V2 [V]	Armature Current I1 [A]	Field Current I2 [A]	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Input Power [W]	Output Power [W]	Efficiency [%]

טבלה 4.1.1 – טבלת תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור מקבילי



גרף 4.1.1 – גרף תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור מקבילי

החלק הבא של הניסוי בא לבדוק את השפעת זרם השדה על אופייני המנוע. כוון את מצב המפסקים כך שהערך של הנגד המשתנה הוא 198Ω (כל המפסקים במצב on, ושלושת הסטים מחוברים במקביל) והסר את המגשר.

בשום מקרה אין להפעיל את המנוע ללא זרם בסלילי השדה (כלומר ללא המגשר וכאשר כל המפסקים במצב נתק). במצב זה לא נוצר שטף מגנטי ע"י סלילי השדה ולכן גם לא מתפתח כא"מ מושרה בסלילי העוגן, מה שגורם לזרם גבוה מאוד בסלילי העוגן ונזק אפשרי למנוע.

כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% והפעל את הספק. הגדל את עוצמת המתח עד שמהירות המנוע היא 3200 rpm ועוצמת המתח אינה גבוהה מ- 220V. הגדל בהדרגה את העומס המכאני על המנוע. יש להגדיל את העומס במרווחים של 0.2 Nm עד 1.4 Nm. עבור כל עומס יש להמתין עד מצב מתמיד (כ 3 שניות) ולרשום את המדידות בטבלה 4.1.1, כאשר I2 זרם השדה. יש למלא את מהירות המנוע (ביחידות rpm) ומומנט העומס (ביחידות Nm). מדידות אלה מתייחסות לחלק המרכזי של הטבלה (Set 2) עבור נגד (198Ω בתום תהליך המדידה כבה את ספק המתח.

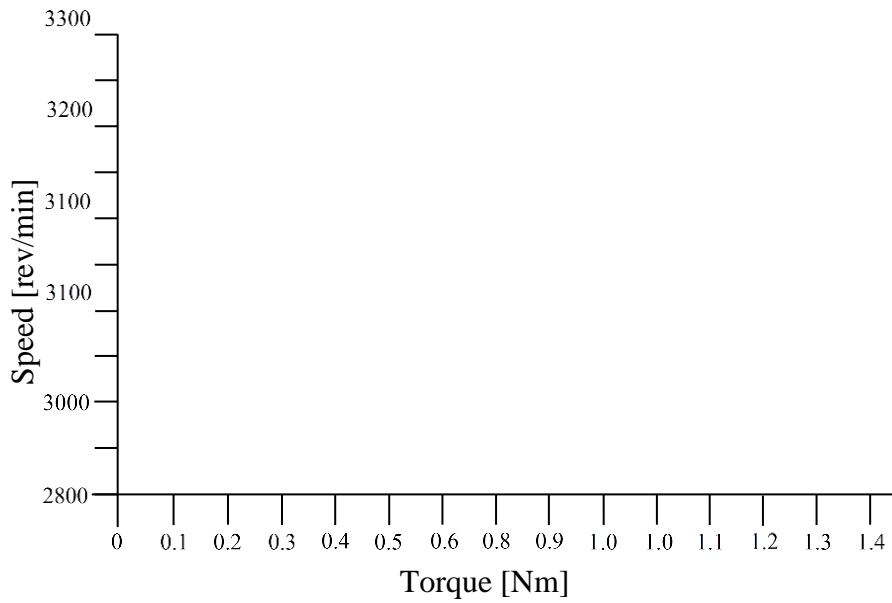
יש לחזור על התהליך כאשר ערך הנגד המשתנה הוא 333Ω (שלושת הנגדים העליונים על on והשאר על off) ולמלא את החלק הימני של הטבלה (Set 3). את החלק השמאלי (Set 1) ללא נגד) יש להשלים מתוך המדידות שנרשמו בטבלה 4.1.1.

Set 2: 198Ω resistance in series with field winding I2 =		Set 3: 333Ω resistance in series with field winding I2 =	
Torque [Nm]	Speed [rpm]	Torque [Nm]	Speed [rpm]

טבלה 4.1.2 – טבלת תוצאות 2, ניסוי מנוע DC עם עירור מקבילי

שרטט גרף של המהירות כנגד מומנט העומס לפי מערכת הצירים הנתונה בגרף 4.1.2. יש לשרטט שלוש עקומות על מערכת צירים אחת. כל עקומה מתאימה לערך אחד של זרם שדה (כלומר לערך אחד של הנגד המשתנה).

כיצד משפיע שינוי זרם השדה על ביצועי המנוע (במקרה של עירור מקבילי)?



גרף 4.1.2 – גרף תוצאות 2, ניסוי מנוע DC עם עירור מקבילי

התנהגות הזרם ברגע ההנעה

בסרגל העליון בחר :

Tools -> data capture -> capture data

בלשונית ה – signal בחר II.

כוון את בורר המתח ל50 אחוז והדלק את הספק.

שמור גרפים מתאימים וצרף לדוח הסופי בתוספת להסבר על התנהגות הזרם והגורמים לכך.

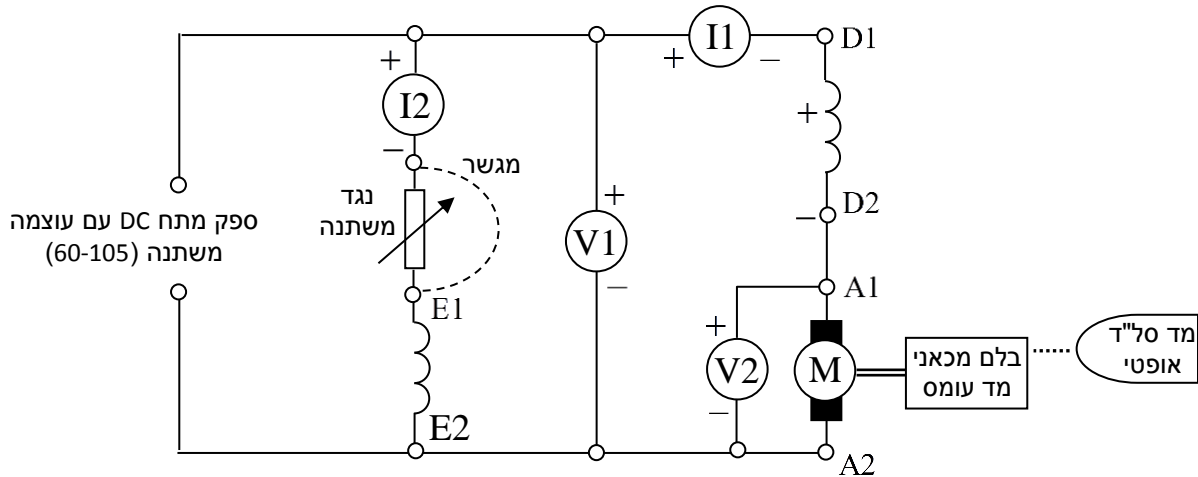
יש לבחור סקלה מתאימה כדי שהגרפים יהיו ברורים – graph - > rescale graph axes

שמירת הגרפים – file -> export data

4.2 - מנוע זרם ישר עם עירור מרוכב (dc Compound Wound Motor)

מהלך

כבה את ספק המתח ואת מכשירי המדידה. חבר את המנוע, מכשירי המדידה וערכת הנגדים כפי שנתון באיור 4.3.2 (בערכת הנגדים כל המפסקים במצב on). כוון את הבלם המכאני לעומס מינימאלי (ללא עומס). הפעל את מכשירי המדידה. בחלק זה של הניסוי יש לקצר את הנגד המשתנה ע"י שימוש במגשר. שים לב כי בחלק זה של הניסוי נעשה שימוש בשני סלילי העירור (סלילי שדה). הסליל המסומן ע"י D1-D2 מחובר בטור עם סלילי העוגן והסליל המסומן ע"י E1-E2 מחובר במקביל.



איור 4.3.2 – מערך ניסוי הכולל מנוע DC עם עירור מרוכב

כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% והפעל את הספק. הגדל את עוצמת המתח ל- 220V. מלא את הטבלה:

Armature Voltage V1 [V]	Armature Current I1 [A]	Field Voltage V2 [V]	Field Current I2 [A]	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Input Power [W]	Output Power [W]	Efficiency [%]

טבלה 4.3.1 – טבלת תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור מרוכב

בתום תהליך המדידה כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% וכבה את ספק המתח.
 חשב את הספק הכניסה, הספק המוצא והנצילות והשלם את הנתונים הדרושים בטבלה 4.3.1.
 לפי הנתונים בטבלה שרטט את שלושת אופייני המנוע הדרושים בגרף 4.3.1. יש לשרטט את המהירות, את זרם העוגן ואת הנצילות כנגד מומנט העומס.

את הגרפים ניתן לחשב בצורה אוטומטית –

Tools -> torque speed Plotter -> new test

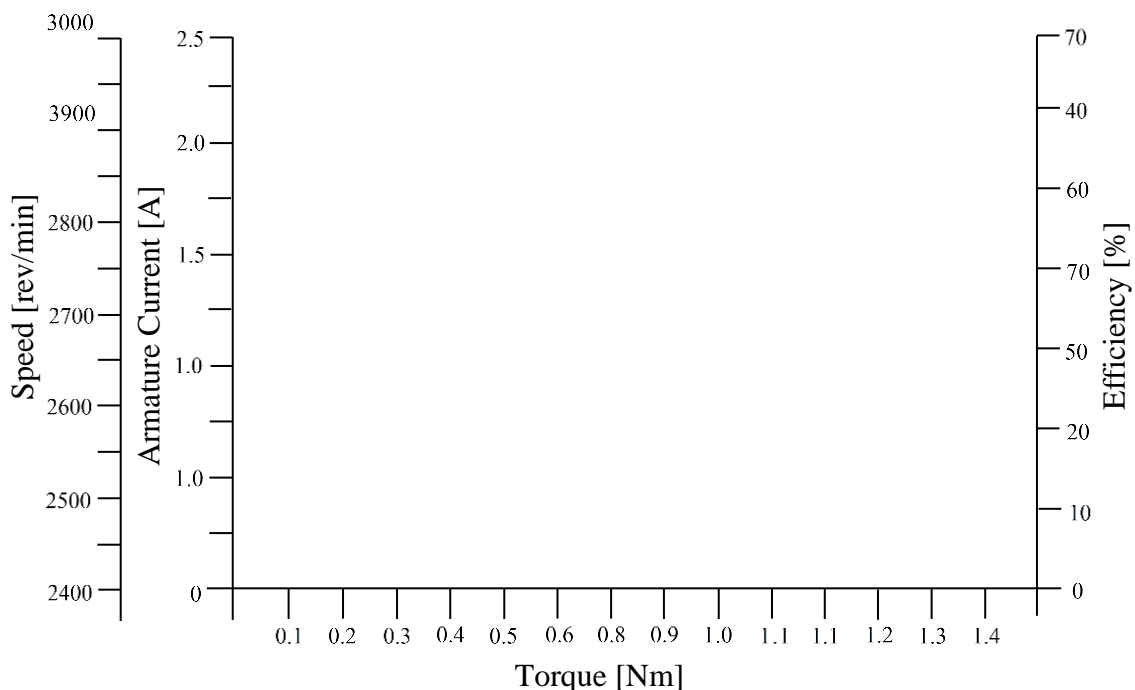
בשלב זה יש לקבוע את תווך הצירים ע"י לחיצה על set axes. מהירות 2000 – 3500, מומנט 0 עד 1.4.

יש ללחוץ על graph preview ולקבוע את הציר האופקי כציר המומנט.

יש להוסיף מדידות של I_1 , I_2 , V_2 כפונקציה של מומנט בגרפים הנוספים (לסמן וי בחלונית מימין למעלה).
 יש ללחוץ על ok.

בשלב זה יש להפעיל את המנוע וללחוץ על run test.

בסוף המדידות יש לשמור את התוצאות.



גרף 4.3.1 – גרף תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור מרוכב

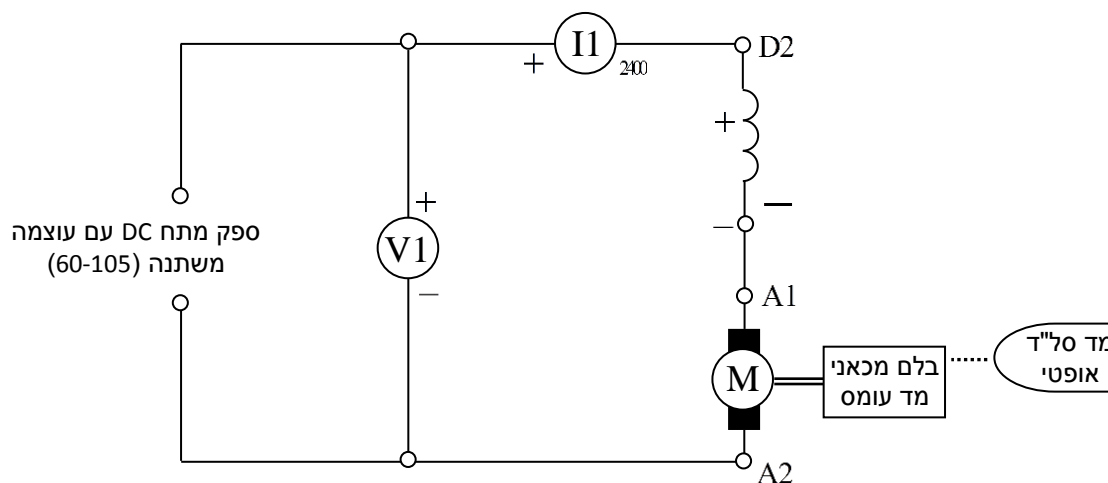
4.2 - מנוע זרם ישיר עם עירור טורי (DC Series Motor)

מטרות:

הכרת עקרונות הפעולה של מנוע DC עם עירור טורי
הכרה של הקשרים בין הפרמטרים – מהירות, מומנט, זרם ומתח מתוך סרטוט אופייני המנוע

מטלות לביצוע

כבה את ספק המתח ואת מכשירי המדידה. חבר את המנוע ואת מכשירי המדידה כפי שנתון באיור 4.2.2. שים לב כי עבור מנוע עם עירור טורי יש להשתמש בסלילי השדה המסומנים ע"י D1-D2. כמו כן דרוש מד זרם יחיד ומד מתח יחיד.



איור 4.3.2 – מערך ניסוי הכולל מנוע DC עם עירור טורי

במנוע טורי, בהשוואה למנוע מקבילי, קיים קושי מסוים בביצוע המדידות הדרושות לצורך שרטוט אופייני המנוע. בעומס קטן המהירות מאוד ועם הגדלה של העומס המהירות יורדת באופן חד. עם הגדלה של העומס מומנט המנוע גדל במהירות וכך גם זרם העוגן.

כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% והפעל את הספק. הגדל את עוצמת המתח עד 160V. מהירות המנוע תגדל בקצב מהיר ועשויה להגיע ל- 5000 rpm. הקטן בהדרגה את מתח הספק כך שמהירות המנוע היא 4900 rpm. אלה יהיו מתח ההספקה הבסיסי ומהירות מנוע ללא עומס בחלק זה של הניסוי.

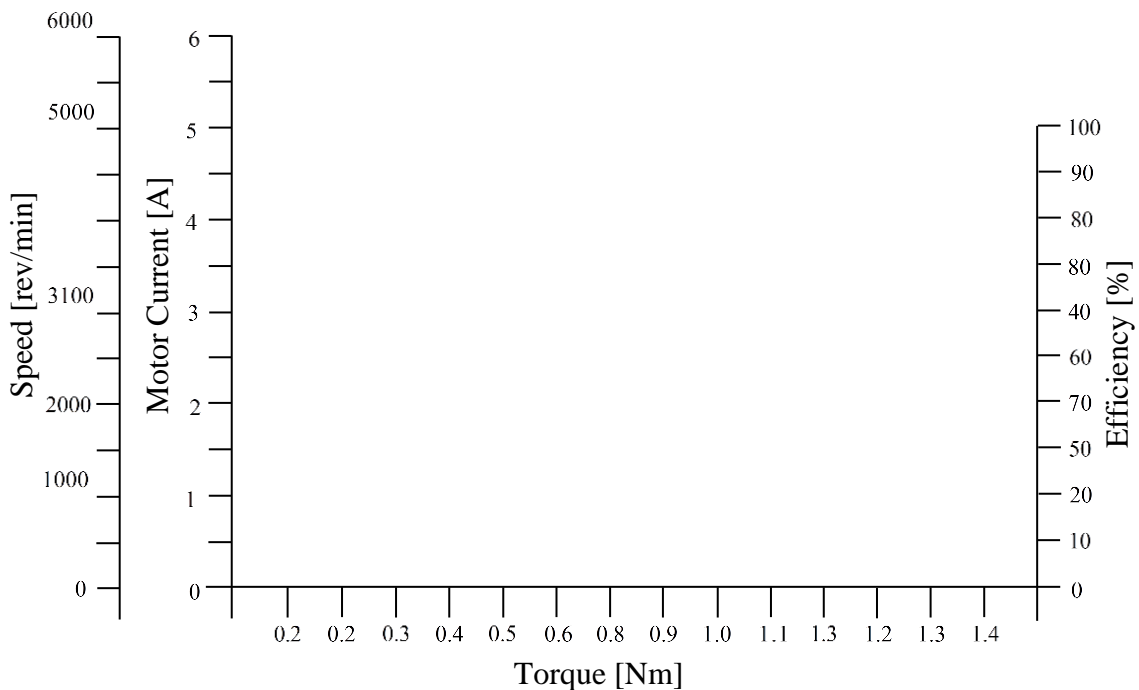
הגדל בהדרגה את העומס המכאני על המנוע. יש להגדיל את העומס במרווחים של 0.2 Nm עד 1.2 Nm עבור כל עומס יש להמתין עד מצב מתמיד ולרשום את המדידות הבאות בטבלה 4.2.1, כאשר V1 מתח המנוע (מתח הספק) ו-I1 זרם המנוע (שווה כאן גם לזרם העוגן וגם לזרם השדה).

בתום תהליך המדידה כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% וכבה את ספק המתח. חשב את הספק הכניסה, הספק המוצא והנצילות והשלם את הנתונים הדרושים בטבלה 4.2.1.

לפי הנתונים בטבלה שרטט את שלושת אופייני המנוע הדרושים בגרף 4.2.1. יש לשרטט את המהירות, את זרם העוגן ואת הנצילות כנגד מומנט העומס.

Motor Voltage V1 [V]	Motor Current I1 [A]	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Input Power [W]	Output Power [W]	Efficiency [%]

טבלה 4.2.1 – טבלת תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור טורי



גרף 4.2.1 – גרף תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור טורי

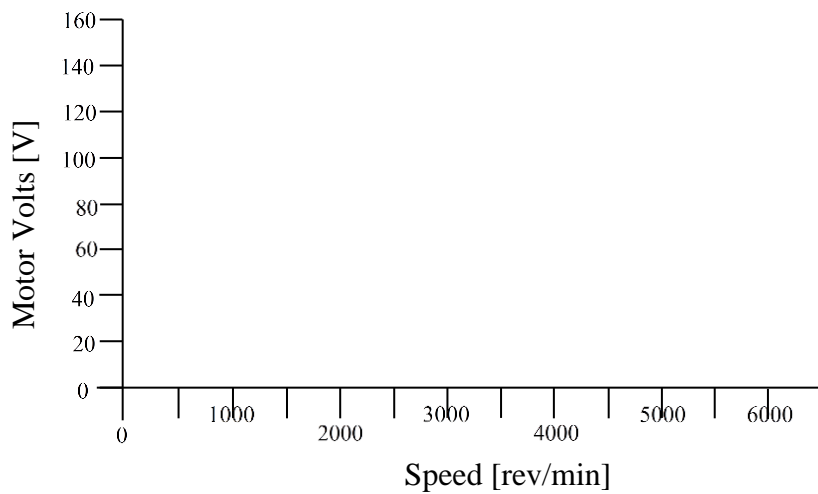
בחלק זה של הניסוי מעוניינים לבדוק את התלות של מהירות הסיבוב במתח המנוע, במנוע עם עירור טורי (speed/applied-voltage characteristics).

כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% והפעל את הספק. הגדל את עוצמת המתח עד שמהירות המנוע היא 4500 rpm.

יש לקחת את הקריאות הבאות, מתח מנוע (V1 volt) ומהירות (ב- rpm) ולרשום בשורה המתאימה בטבלה 4.2.2. יש להקטין את מתח המנוע במרווחים של 20 V. עבור כל מתח מנוע יש למדוד את המהירות ולמלא את הטבלה 4.2.2. את תוצאות הטבלה יש להעתיק לגרף 4.4.2. האם התוצאות תואמות את משוואה (4.2.6)?

Speed [rpm]	Motor Voltage [V]

טבלה 4.2.2 – טבלת תוצאות 2, ניסוי מנוע DC עם עירור טורי

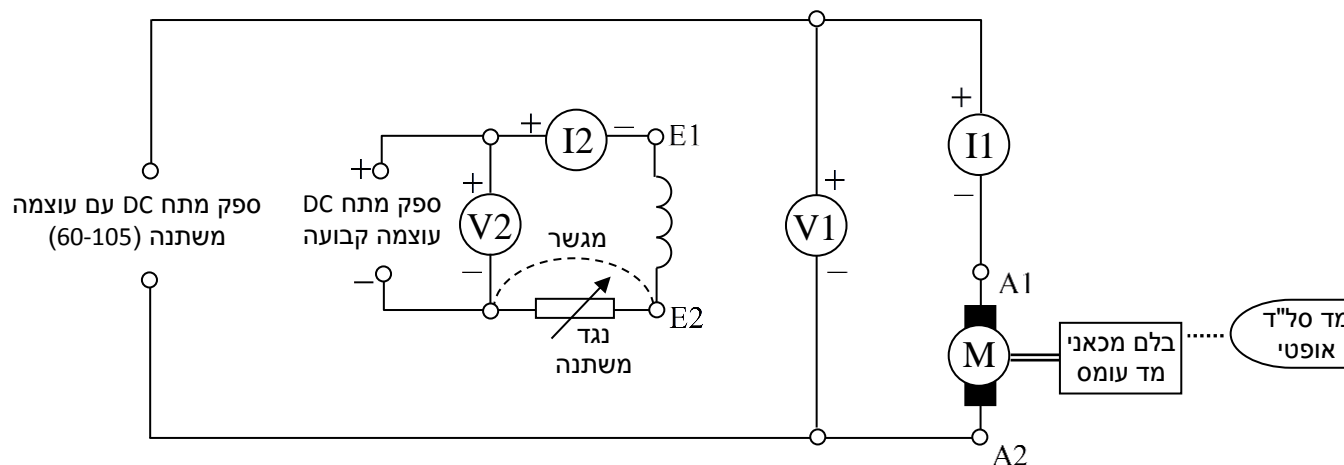


גרף 4.2.2 – גרף תוצאות 2, ניסוי מנוע DC עם עירור טורי

4.4 - מנוע זרם ישר עם עירור נפרד (dc Separately Excited Motor)

מטלות לביצוע

כבה את ספק המתח ואת מכשירי המדידה. חבר את המנוע, מכשירי המדידה וערכת הנגדים כפי שנתון באיור 4.4.2. בחלק זה של הניסוי יש לקצר את הנגד המשתנה ע"י שימוש במגשר. שים לב כי בחלק זה של הניסוי נעשה שימוש רק בסלילי העירור המסומנים ע"י E1-E2, המחבורים למקור הספקה בלתי נפרד. סלילי העירור E1-E2 מוזנים ע"י החלק של הספק האוניברסאלי המספק מתח ישר עם עוצמה קבועה (230V).



איור 4.4.2 – מערך ניסוי הכולל מנוע DC עם עירור נפרד

כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% והפעל את הספק. הגדל את עוצמת המתח ל- 220V. הגדל בהדרגה את הומס המכאני על המנוע. יש להגדיל את העומס במרווחים של 0.2 Nm עד 1.4 Nm. עבור כל עומס יש להמתין עד מצב מתמיד ולרשום את המדידות הבאות בטבלה 4.4.1, כאשר V1 מתח העוגן, V2 מתח השדה, I1 זרם העוגן ו-I2 זרם השדה.

בתום תהליך המדידה כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0% וכבה את ספק המתח.

את הגרפים ניתן לחשב בצורה אוטומטית –

Tools -> torque speed Plotter -> new test

בשלב זה יש לקבוע את תווך הצירים ע"י לחיצה על set axes. מהירות 2000 – 3500, מומנט 0 עד 1.4.

יש ללחוץ על graph preview ולקבוע את הציר האופקי כציר המומנט.

יש להוסיף מדידות של V2, I2, I1 כפונקציה של מומנט בגרפים הנוספים (לסמן וי בחלונית מימין למעלה).

יש ללחוץ על ok.

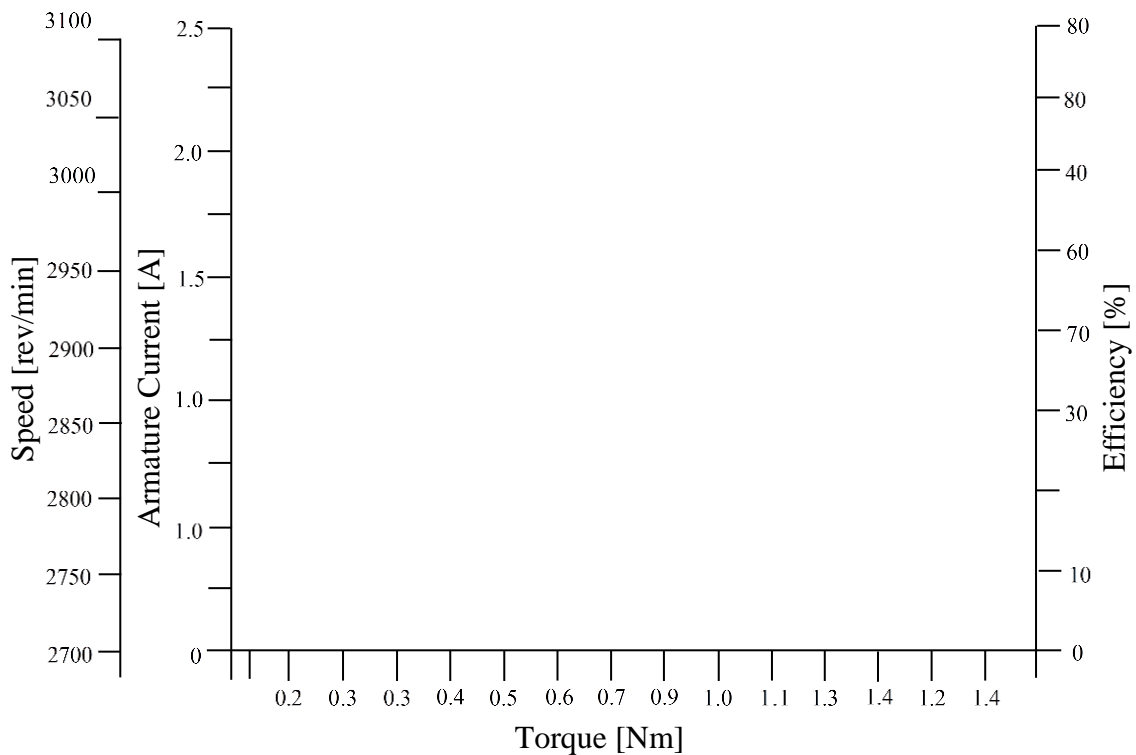
בשלב זה יש להפעיל את המנוע וללחוץ על run test.

בסוף המדידות יש לשמור את התוצאות.

חשב את הספק הכניסה, הספק המוצא והנצילות והשלם את הנתונים הדרושים בטבלה 4.4.1. לפי הנתונים בטבלה שרטט את שלושת אופייני המנוע הדרושים גרף 4.4.1. יש לשרטט את המהירות, את זרם העוגן ואת הנצילות כנגד מומנט העומס.

Armature Voltage V1 [V]	Armature Current I1 [A]	Field Voltage V2 [V]	Field Current I2 [A]	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Input Power [W]	Output Power [W]	Efficiency [%]

טבלה 4.4.1 – טבלת תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור נפרד



גרף 4.4.1 – גרף תוצאות 1, ניסוי מנוע DC עם עירור נפרד

החלק הבא של הניסוי בא לבדוק את השפעת זרם השדה על אופייני המנוע. כוון את מצב המפסקים כך שהערך של הנגד המשתנה הוא 198Ω (כל המפסקים במצב on, ושלושת הסטים מחוברים במקביל) והסר את המגשר.

בשום מקרה אין להפעיל את המנוע ללא זרם בסלילי השדה (כלומר ללא המגשר וכאשר כל המפסקים במצב נתק). במצב זה לא נוצר שטף מגנטי ע"י סלילי השדה ולכן גם לא מתפתח כא"מ מושרה בסלילי העוגן, מה שגורם לזרם גבוה מאוד בסלילי העוגן ונזק אפשרי למנוע.

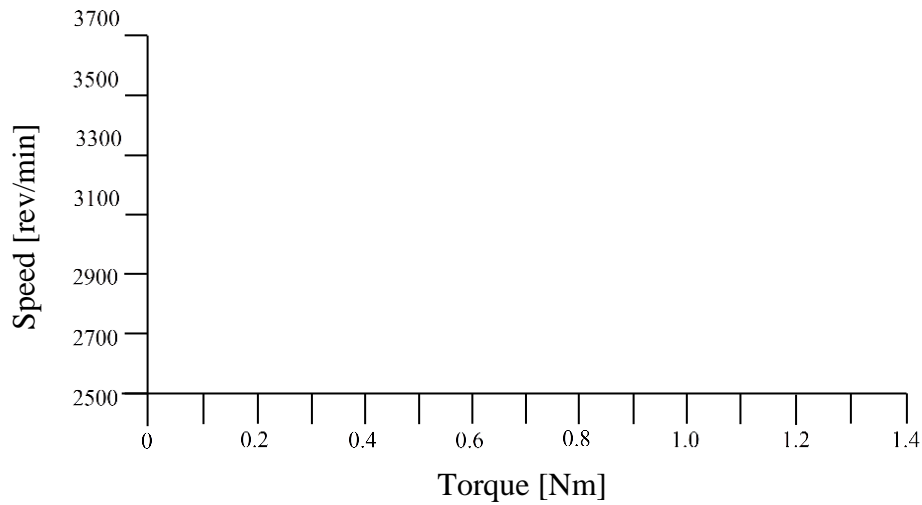
כוון את בורר עוצמת המתח בספק ל- 0.1 והפעל את הספק. הגדל את עוצמת המתח עד שמהירות המנוע היא 3200 rpm ועוצמת המתח אינה גבוהה מ- $220V$. הגדל בהדרגה את העומס המכאני על המנוע. יש להגדיל את העומס במרווחים של 0.2 Nm עד 1.4 Nm. עבור כל עומס יש להמתין עד מצב מתמיד ולרשום את המדידות בטבלה 4.4.1, כאשר I_2 זרם השדה (יש לרשום את זרם השדה בשורת הכותרת בטבלה). יש למלא את מהירות המנוע (ביחידות rpm) ומומנט העומס (ביחידות Nm). מדידות אלה מתייחסות לחלק המרכזי של הטבלה (Set 2) עבור נגד 198Ω בתום תהליך המדידה כבה את ספק המתח. יש לחזור על התהליך כאשר ערך הנגד המשתנה הוא 333Ω ולמלא את החלק הימני של הטבלה (Set 3). את החלק השמאלי (Set 1) ללא נגד) יש להשלים מתוך המדידות שנרשמו בטבלה 4.4.1.

Set 1: No resistance in series with field winding Field Current $I_2 =$ [A]		Set 2: 198Ω resistance in series with field winding Field Current $I_2 =$ [A]		Set 3: 333Ω resistance in series with field winding Field Current $I_2 =$ [A]	
Torque [Nm]	Speed [rpm]	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Torque [Nm]	Speed [rpm]

טבלה 4.4.2 – טבלת תוצאות 2, ניסוי מנוע DC עם עירור נפרד

שרטט גרף של המהירות כנגד מומנט העומס לפי מערכת הצירים הנתונה בגרף 4.4.2. יש לשרטט שלוש עקומות על מערכת צירים אחת. כל עקומה מתאימה לערך אחד של זרם שדה (כלומר לערך אחד של הנגד המשתנה).

כיצד משפיע שינוי זרם השדה על ביצועי המנוע (במקרה של עירור נפרד)?



גרף 4.4.2 – גרף תוצאות 2, ניסוי מנוע DC עם עירור נפרד

5. הנחיות לעיבוד התוצאות והכנת דו"ח המעבדה

- א. יש להציג סיכום של הרקע התיאורטי. 5 נקודות
- ב. יש להציג את כל התוצאות שנמדדו, בטבלאות המתאימות. 10 נקודות
- ג. יש לשרטט את אופייני המנוע באמצעות המדידות שהתקבלו בניסוי כולל גרפים של נצילות עבור כל חיבור. אחרי כל גרף (בצמוד אליו) יש להסביר מה מופיע בו, ובחינה של התוצאות אל מול התיאוריה. – 65 נקודות
- ד. פרק סיכום ומסקנות – 10 נקודות
- ה. 10 נקודות אחרונות ינתנו עבור סדר, בהירות, וסרטוט נכון של הגרפים (קנה מידה, יחידות וכותרות)