

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
הפקולטה למדעי ההנדסה  
המחלקה להנדסת חשמל ומחשבים

## ממיר הספק ובקרה לקצירת אנרגיה ביו-מכנית

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: זאב רובינשטיין

דצמבר 2013

כסלו תשע"ד





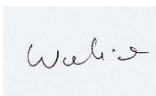
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב  
הפקולטה למדעי ההנדסה  
המחלקה להנדסת חשמל ומחשבים

## ממיר הספק ובקרה לקצירת אנרגיה ביו-מכנית

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: זאב רובינשטיין

מנחים: פרופ' שמואל בן-יעקב  
ד"ר מור פרץ  
ד"ר רזיאל רימר

03.12.2013	תאריך:		זאב רובינשטיין	חתימת המחבר
03.12.2013	תאריך:		פרופ' שמואל בן-יעקב	אישור המנחים
03.12.2013	תאריך:		ד"ר מור פרץ	
03.12.2013	תאריך:		ד"ר רזיאל רימר	
03.12.2013	תאריך:			אישור יו"ר ועדת תואר שני מחלקתית

## תקציר

מכשירי חשמל ניידים מהווים חלק בלתי נפרד מאורח החיים המודרני. מקור האנרגיה של מכשירים אלו הן הסוללות שגודל הקיבול שלהן מגביל את זמן פעולת המכשיר. במקרים בהם המשכיות הפעלתם של המכשירים הינה קריטית ורשת החשמל אינה זמינה נאלצים המשתמשים (כדוגמת חיילים, נכים ומטיילים) לשאת סוללות גיבוי. אחד הפתרונות שהוצעו להארכת זמן פעולת מכשירים ניידים הוא ניצול אנרגיה ביו-מכאנית של המשתמש לטעינת הסוללה.

במחקר זה מוצעת מערכת ניהול הספק לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית המתבססת על גישת בלימה גנרטיבית במהלך הליכה רגילה (בדומה למכונות חשמליות). במחקרים קודמים קצירה אופטימאלית הושגה ע"י ניסוי וטעייה בבחירת עומס התנגדותי קבוע. הגישה החדשנית המוצעת במחקר זה מבצעת אופטימיזציה של קצירת מקסימום האנרגיה הזמינה תוך הבאה למינימום את המאמץ מצד המשתמש באופן אוטומטי. המערכת המוצעת מתבססת על ממיר ממותג מעלה מתח המכתיב את פרופיל הזרם (פרופיל הקצירה) הנצרך מהגנראטור ואלגוריתם ייחודי לחיפוש ועקיבה אחר נקודת קצירה אופטימאלית. שימוש בממיר המכתיב את פרופיל הקצירה מאפשר לבצע התאמה של הפרופיל למשתמש ולקצב ההליכה תוך שימוש במשובים אלקטרוניים וביולוגיים. במחקר זה המיקוד הינו על מפרק הברך כמקור האנרגיה כיוון שמרבית עבודת המפרק בהליכה מישורית היא שלילית (השרירים פועלים כבולמים).

הגישה המוצעת במחקר נבחנה באמצעות מודל סימולציה וניסויים באב טיפוס. פעולת המערכת נבדקה בניסויים באמצעות מערכת מכאנית המדמה את תנועת מפרק הברך בהליכה. התוצאות מראות שהמערכת מצליחה להכתיב פרופיל קצירה ולבצע אדפטציה של הפרופיל לקצירת כמות אנרגיה אופטימאלית. העבודה שנעשתה במחקר זה פורסמה בשני מאמרים בכנסים היוקרתיים ביותר בתחום אלקטרוניקת הספק.

## **מילות מפתח**

ממיר מעלה מתח

בקרת זרם ממוצע

בקרת פולסים

בקרה דיגיטלית

מכונות חשמל

קצירת אנרגיה ביו-מכאנית

בלימה גנרטיבית

קצירה אופטימאלית

מידול מערכת אלקטרו-מכאנית

משוב ביולוגי

## **הבעת תודה**

אני רוצה להודות למנחי אשר הציבו בפני אתגרים והכוינו אותי בחיפוש אחר פיתרונות פוטנציאליים. הודות לעבודה המשותפת למדתי רבות ונחשפתי למגוון רחב של תחומים. כמו כן, אני רוצה להודות למשפחתי ולחברי אשר דחפו אותי ותמכו בי לאורך כל הדרך ובלעדיהם לא הייתי מצליח.

תודה רבה

## תוכן עניינים

1	מבוא	1
1	הקדמה	1.1
2	הגדרת הבעיה והצעות לפתרונה	1.2
3	קצירת אנרגיה ביו-מכאנית שלילית	1.3
5	מתמרים לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית	1.4
7	עבודות קודמות – מערכות לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית	1.5
9	קצירה אופטימאלית	1.6
11	רקע תיאורטי – ממירי הספק	1.7
17	עבודות קודמות – ממירי הספק לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית	1.8
19	מטרת המחקר	1.9
20	שיטות המחקר	1.10
22	מידול מערכת קצירת אנרגיה ביו-מכאנית [29]	2
22	הקדמה	2.1
22	גישת מידול	2.2
24	מידול הגנראטור	2.3
26	מידול של המערכת המלאה	2.4
27	יכולות הסימולציה	2.5
29	סיכום ומסקנות	2.6
30	קצירה אופטימאלית [30]	3
30	הקדמה	3.1
31	זיהוי מקטעים של עבודה שלילית	3.2
33	משוב ביולוגי	3.3
35	אדפטציה של פרופיל הקצירה	3.4
36	אלגוריתם עקיבה אחר נקודת קצירה אופטימאלית	3.5
37	סיכום	3.6
38	מערכת לניהול הספק (דור א')	4
38	הקדמה	4.1
38	מבנה מערכת דור א'	4.2
42	סיכום	4.3
44	מערכת לניהול הספק (דור ב')	5
44	הקדמה	5.1
45	מיישר תלת פאזי	5.2
48	הממיר	5.3
53	טעינת סוללה	5.4

55	תוצאות סימולציה	5.5
58	מתחי עזר	5.6
59	מיקרו-בקר	5.7
63	לוגיקת פעולת המערכת	5.8
63	הקדמה	5.8.1
65	פונקצית מיקום הברך	5.8.2
67	פרופיל קצירה	5.8.3
68	פונקצית קצירה	5.8.4
72	פונקצית חיפוש נקודת מקסימום ההספק	5.8.5
75	סיכום	5.9
76	הוכחת התכנות	6
76	הקדמה	6.1
76	הוכחת המודל	6.2
76	מערך ניסויים לאישוש מודל הגנראטור	6.2.1
79	מערך ניסויים לאישוש המודל המלא	6.2.2
81	מסקנות מניסויים בנסיינים	6.2.3
86	הוכחת גישת הקצירה	6.3
86	מערכי ניסויים	6.3.1
87	בדיקות בסיסיות	6.3.2
90	בדיקות מצב יציב	6.3.3
92	בדיקות במדמה ברך	6.3.4
96	סיכום	6.4
97	סיכום	7
99	מסקנות והמלצות	8
101	ביבליוגרפיה	9
105	נספחים	10
105	מעגל הסימולציה של מודל המערכת בספייס	10.1
107	שרטוטי המעגל הבסיסי	10.2
110	מעגל סימולציה של המערכת המלאה	10.3
113	שרטוט חשמלי של כרטיס המערכת	10.4
114	Layout של כרטיס המערכת	10.5

## מינוח ורשימת סימונים

- $A_{OL}$  – פונקציית תמסורת דרגת הספק בחוג פתוח
- $A_{CL}$  – פונקציית תמסורת דרגת הספק בחוג סגור
- $Angle$  – זווית מדומה במיקרו-בקר
- $Angle_{res}$  – רזולוציית מדידה של זווית מפרק הברך
- alfa – תאוצה זוויתית מדומה במיקרו-בקר של מערכת ניהול הספק דור א'
- Analog to Digital converter – A/D
- $AD_{res}$  – רזולוציית A/D
- Applied Power Electronics Conference - APEC
- $B$  – קבוע הפסדי ליבה במכונה חשמלית
- Back Electro Motive Force – BEMF (כוח אלקטרו-מניע = כא"מ)
- Brushless Direct Current machine – BLDC
- $BASE_{K_i}$  – פרופיל קצירה בסיסי עבור אזור  $K_i$
- $C$  – קיבול המדמה מקדם אינרציה של מסה ( $J$ ) באנלוגיה אלקטרו-מכאנית
- $C_{bank}$  – קיבול בנק האנרגיה
- $C_g$  – קיבול המדמה מומנט אינרציה של גיר במודל של מערכת הקצירה
- $C_G$  – קיבול שער של טרנזיסטור במיישר אקטיבי (המורכב מגשר טרנזיסטורים)
- $C_j$  – עומס דמה הנועד עבור ריצה תקינה של הסימולציה במודל של מערכת הקצירה
- $C_r$  – קיבול המייצג את מקדם האינרציה של הרוטור במודל הגנראטור
- $C_{per}$  – מספר פעימות שעון במחזור בודד של מיתוג בממיר
- COS – חישת שינוי מתח בכניסה של מיקרו-בקר (Change Of State).
- Cost Of Harvesting – COH
- duty cycle –  $D$
- duty cycle באות קטן –  $d$
- DPWM – אפנון רחב דופן דיגיטלי
- $DELTA_{K_i}$  – פרופיל שינוי של פרופיל הקצירה עבור מקטע  $K_i$ , נמצא בשימוש של אלגוריתם לקצירה אופטימאלית
- $e$  – שגיאת בקרה
- $\hat{e}$  – שגיאת בקרה המותאמת לערכי A/D בתוכנת מיקרו-בקר
- $E$  – האנרגיה שנקצרת במערכת ניהול הספק דור א'
- $E_i$  – מתח המושרה בפאזה  $i$

$E_{instep}$  – האנרגיה הנקצרת במהלך צעד בודד  
 $E_{inav}$  – האנרגיה הממוצעת של N צעדים אחרונים  
 $\tilde{E}_{inav}$  – האנרגיה הממוצעת של N צעדים אחרונים בחישוב של מיקרו-בקר (כאשר לא מתבצעת המרה מלאה של הערכים הנדגמים לערכיהם האמיתיים מתוך שיקולים של חסכון בכוח העיבוד)  
 $\bar{E}_L$  – מתח ממוצע על סליל בממיר מעלה מתח  
 $E_{max}$  – מקסימום האנרגיה שהמערכת תוכננה לקצור בצעד בודד  
 $\tilde{E}_{step}$  – האנרגיה שנקצרה במהלך צעד בודד בחישוב של מיקרו-בקר (כאשר לא מתבצעת המרה מלאה של הערכים הנדגמים לערכיהם האמיתיים מתוך שיקולים של חסכון בכוח העיבוד)  
 $E_{RMS}$  – שגיאת עקיבה ב-RMS אחר הפרופיל הזוויתי של המפרק המוזן למערכת  
*Energy Conversion Congress & Exposition – ECCE*  
*feedback* – משוב של האות המבוקר בדרגת ההספק  
 $f_{switch}$  – תדר המיתוג של מיישר אקטיבי  
 $F_{CY}$  – תדר ביצוע פקודות במיקרו-בקר  
 $F_{PWM}$  – תדר מיתוג של הממיר  
 $F_L$  – תדר שנמדד במוצא הגנראטור בניסויים של מערכת דור א'  
*GearRatio* – יחס ההמרה של הגיר המכאני במערכת קצירת האנרגיה  
 $G_v$  – הגבר המתח במגבר לחישת זרם  
 HE – חיישן Hall Effect  
 $i$  – אינדקס פאזה  
 $I$  – זרם בהדקי מכונה חשמלית  
 $\bar{I}_b$  – זרם ממוצע דרך הדיודה בממיר מעלה מתח  
 $\bar{I}_c$  – זרם ממוצע דרך המתג בממיר מעלה מתח  
 $I_d$  – זרם המייצג את הפסדי הליבה  
 $I_{DSRMS}$  – זרם RMS דרך טרנזיסטור במיישר אקטיבי  
 $I_{em}$  – זרם המייצג את המומנט המושרה ע"י הגנראטור  
 $I_f$  – זרם המייצג את החיכוך  
 $I_g$  – זרם המדמה מומנט המופעל על ציר הגנראטור אחרי הגיר אך לפני המצמד החד כיווני במודל החשמלי של המערכת  
 $I_{gf}$  – זרם המדמה את הפסדי החיכוך הפיזיים במודל החשמלי של המערכת  
 $I_i$  – זרם בפאזה  $i$   
 $I_{in}$  – זרם המייצג את המומנט המכאני החיצוני המופעל על הציר במודל המערכת או זרם בכניסה לממיר

$\hat{I}_{in}$  – זרם בכניסה לממיר בערכי A/D  
 $\bar{I}_L$  – זרם ממוצע דרך הסליל בממיר מעלה מתח  
 $i_L$  – זרם דרך הסליל באות קטן  
 $I_{load}$  – זרם העומס של בנק האנרגיה  
 $I_{res}$  – רזולוציית מדידה של זרם הכניסה לממיר  
 $I_{max}$  – הזרם המקסימאלי הניתן למדידה  
 $I_{net}$  – סכום זרמים המדמה סכום מומנטים ( $T_{net}$ ) באנלוגיה אלקטרו-מכאנית  
 $I_{out}$  – זרם במוצא הממיר

*Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE*

$J$  – מקדם אינרציה של מסה מכאנית  
 $K_P$  – קבוע הפונקציה הפרופורציונלית בבקר PID  
 $K_I$  – קבוע הפונקציה האינטגרלית בבקר PID  
 $K_D$  – קבוע הפונקציה הדיפנציאלית בבקר PID  
 $K_t$  – קבוע המומנט של מכונה חשמלית [Nm/A]  
 $K_n$  – קבוע המהירות של מכונה חשמלית [rpm/V]  
 $K_e$  – קבוע ה-BEMF (כוח אלקטרו-מניע חוזר) ביחידות של [rad/s/V]  
 $K_{erms}$  – קבוע ה-BEMF (כוח אלקטרו-מניע חוזר) ביחס למתח RMS במוצא הגנראטור  
 $KneeAngle$  – זווית עקיבה של הסימולציה אחר פרופיל זוויתי של המפרק שהוזן למערכת  
 $K_i$  – מקטע עבודה שלילית של מפרק הברך במחזור הצעד ( $i = 1,3,4$ )  
 $L$  – השראות סליל  
 $L_i$  – השראות פאזה  $i$

*Maximum Power Point Tracking – MPPT*

$msr$  – מדידה של זווית  
 $Msr$  – מדידה של זווית בערכי A/D במיקרו-בקר של מערכת ניהול הספק דור א'  
 $N$  – מספר פאזות בסטאטור של מכונה חשמלית  
 $n$  – מהירות סיבוב הרוטור ב-rpm  
 $NewMsr$  – מדידה חדשה של זווית בערכי A/D במיקרו-בקר של מערכת ניהול הספק דור א'  
 $NewAngle$  – זווית מדומה במיקרו-בקר של מערכת ניהול הספק דור א'  
 $OldAngle$  – זווית מדומה במיקרו-בקר של מערכת ניהול הספק דור א'  
 $OldMsr$  – מדידה של זווית בערכי A/D במיקרו-בקר של מערכת ניהול הספק דור א'

$p$  – מספר זוגות קטבים במכונה חשמלית  
 $P_{in}$  – הספק כניסה  
 Proportional Integral Derivative – PID  
 $P_{out}$  – הספק מוצא  
 PWM – אפנון רוחב דופק (Pulse Width Modulation)  
 $PWM_{res}$  – רזולוציה דיגיטלית של שיטת PWM  
 $P_{passive\ loss}$  – הפסדים במיישר פסיבי המורכב מדיודות  
 $P_{active\ loss}$  – הפסדים במיישר אקטיבי המורכב מטרנזיסטורים  
 $P_{HES}$  – הפסד הנובע מחיישני Hall effect  
 $P_{control}$  – הספק הנצרך על ידי מעגל הבקרה בשלב האי-קצירה  
 $R_{charger}$  – פוטנציומטר לקביעת זרם צריכה רצוי מבנק אנרגיה לטעינת סוללה.  
 $R_{DS(ON)}$  – התנגדות הולכה של טרנזיסטור  
 $R_i$  – התנגדות פאזה  $i$  במכונה חשמלית  
 $R_L$  – התנגדות כל פאזה בעומס תלת פאזי של מודל המערכת  
 $R_{LOAD}$  – התנגדות העומס  
 $R_{sense}$  – נגד חישת זרם  
 $ref$  – אות ייחוס בכניסה לבקר  
 $reference$  – אות ייחוס  
 $REF_{K_i}$  – פרופיל רפרנס לקצירת אנרגיה במקטע  $K_i$   
 $RefKneeAngle$  – פרופיל זוויתי המוזן למערכת  
 Single Ended Primary Inductor Converter – SEPIC  
 $Sw$  – שן מסור  
 $T$  – מומנט על ציר מכונה חשמלית  
 $T_c$  – טמפ' של גוף קר  
 $T_d$  – מומנט המדמה את הפסדי הליבה במכונה חשמלית  
 $T_{em}$  – סך המומנטים המושרים על ציר המכונה כתוצאה מהזרם הנצרך ממנה  
 $T_f$  – חיכוך שאנו מניחים כקבוע במכונה חשמלית  
 $T_{gen}$  – מומנט שעל מכונה חשמלית להפעיל  
 $T_h$  – טמפ' של גוף חם  
 $T_i$  – מומנט המושרה על ציר המכונה כתוצאה מזרם בפאזה  $i$

$T_{in}$  – המומנט החיצוני שמופעל על הציר  
 $T_{knee}$  – מומנט שמופעל על מפרק הברך  
 $T_{net}$  – סכום מומנטים על ציר  
 $T_{res}$  – רזולוציית מומנט המופעל על המפרק  
 $T_s$  – זמן מחזור בממיר ממותג  
 $t_{on}$  – זמן הולכה של מתג בממיר ממותג  
 $t_{off}$  – זמן אי הולכה של מתג בממיר ממותג  
 $\Delta T$  – זמן בין דגימה לדגימה  
 $u$  – אות בקרה עבור בקר PI  
 $\hat{u}$  – אות בקרה במוצא בקר PI דיגיטלי  
 $\tilde{u}$  – אות בקרה המותאם לתכנות בעל חסכון בכוח עיבוד (הימנעות משימוש בשברים ע"י שימוש במספרים גדולים)  
 $U$  – מתח בין הדקי מכונה חשמלית  
 $v$  – מתח הפאזה  
 $V$  – מתח המדמה מהירות זוויתית ( $\omega$ ) באנלוגיה אלקטרו-מכאנית  
 $V_{AD}$  – הוא מתח הרפרנס של ה-A/D  
 $V_{bank}$  – מתח בנק האנרגיה  
 $\hat{V}_{bank}$  – מתח בנק האנרגיה בערכי A/D  
 $V_{bank_{max}}$  – מתח מקסימאלי בבנק האנרגיה  
 $V_{bank_{res}}$  – רזולוציית מדידה של מתח בנק האנרגיה  
 $V_F$  – מתח הולכה של דיודה במיישר  
 $V_g$  – מתח המייצג את מהירות מפרק הברך המשוקפת דרך הגיר  
 $V_{GS}$  – מתח ה-gate-source של טרנזיסטור במיישר אקטיבי.  
 $V_j$  – מתח המייצג את מהירות המפרק  
 $V_{in}$  – מתח כניסה  
 $V_{in}$  – מתח המייצג את תדירות הציר של הגנראטור  
 $\hat{V}_{in}$  – מתח הכניסה לממיר בערכי A/D  
 $V_{in_{res}}$  – רזולוציית מדידה של מתח הכניסה  
 $V_{in_{max}}$  – מתח מקסימאלי בכניסה לממיר  
 $V_\theta$  – מתח המייצג את הזווית החשמלית של הציר  
 $V_{\theta^*}$  – מתח המייצג את הזווית המכאנית של הציר

- $V_{\theta ref}$  – מתח המייצג את זוויות הייחוס של המפרק
- $V_{\omega ref}$  – מתח המייצג את מהירות הייחוס הזוויתית של המפרק
- $\{V_{out_{min}}, V_{out_{max}}\}$  – מתחי הקיצון של בנק האנרגיה
- $\{V_{in_{low}}, V_{in_{high}}\}$  – ספי ההיסטרזיסט לחיבור/ניתוק של ה-dump resistor.
- Velocity* – מהירות דמה של מפרק הברך שבה משתמשים בקוד של המיקרו-בקר
- $V_{Lrms}$  – מתח העומס ב-RMS על פאזה בודדת במערכת דור א'
- $V_{out}$  – מתח מוצא
- $w$  – מהירות זוויתית מדומה במיקרו-בקר של מערכת ניהול הספק דור א'
- $ZT$  – מאפיין המרה של מתמר
- $\alpha$  – תאוצה זוויתית
- $\beta(s)$  – פונקציית תמסורת של המשוב
- $\theta$  – זווית מכאנית של הרוטור
- $\mu_{lin}$  – נצילות ממיר ליניארי
- $\mu_{thermal}$  – נצילות המרה של מערכת תרמית
- $\omega$  – מהירות סיבוב רוטור מכונה חשמלית ביחידות של rad/s
- $\omega_{gen}$  – מהירות סיבוב הגנראטור
- $\omega_{knee}$  – מהירות סיבוב מפרק הברך

## רשימת איורים

- 1.1 – מערכת מופשטת לעיבוד הספק ..... 1
- 1.2 – פעילות מפרק הברך במהלך צעד בודד. הגרפים מהעליון לתחתון הם: זווית (0 משמעותה רגל ישרה), מהירות, מומנט והספק. נתוני מפרק הברך התקבלו מ-Dr. S. Wolf מאוניברסיטת Heidelberg בגרמניה. .... 5
- 1.3 – מכשיר קצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך שהוצע ע"י קבוצתו של Donelan. איור A מציג את אופן הליבישה של המכשיר על המפרק באמצעות ברכיה אורטופדית ואיור B מציג את המבנה הפנימי של ..... 8
- 1.4 – מכשיר קצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך שנמצא בשימוש במחקר זה ..... 9
- 1.5 – סכימה טיפוסית של ממיר ליניארי ..... 11
- 1.6 – סכימה של רכיבים פעילים בממיר ממותג ..... 12
- 1.7 – מבנה סכמטי של מערכת מבוססת מממיר ממותג מבוקר ..... 12
- 1.8 – מבנה סכמטי של ממיר (Power Stage) המבוקר ע"י בקר PID ..... 13
- 1.9 – מבנה סכמטי של בקר PWM הבנוי ממשווה אשר בכניסתו אות הבקרה (u) המשווה לשן מסור (Sw) ובמוצאו אות בינארי בתדר קבוע ורוחב פולס משתנה. .... 13
- 1.10 – ממיר מעלה מתח בסיסי' ..... 15
- 1.11 – תת מחזור *ton* בו מתג S מוליך ..... 15
- 1.12 – תת מחזור *toff* בו מתג S אינו מוליך ..... 15
- 1.13 – הזרמים בהדקים של היחידה המתמתג (זרמים אמיתיים וזרמים ממוצעים) ..... 16
- 1.14 – מודל ממוצע של ממיר מעלה מתח ..... 16
- 1.15 – מערכת לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממרכז מסה מבוססת תיק גב [22] ..... 18
- 1.16 – מבנה מערכת לניהול הספק לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממרכז מסה [24] ..... 18

- איור 2.1 – מעגל חשמלי אקוויולנטי (מימין) למערכת מכאנית (משמאל).....23
- איור 2.2 – מעגל סכמתי של מודל גנראטור תלת פאזי (a) מעגל אקוויולנטי של הרוטור, (b) מודל הסטאטור, (c) מעגל עזר למציאת זווית מכאנית של הרוטור, (d) מעגל עזר למציאת זווית חשמלית של הרוטור, (e) מעגל לדוגמא המתאר את התנהגות חיישני Hall Effect.....24
- איור 2.3 – אותות שלושת חיישני Hall effect מתוך ספר הדרכה של יצרן הגנראטור שבשימוש במחקר זה...26
- איור 2.4 – מעגל סכמתי של מודל המערכת המלאה.....26
- איור 2.5 – הדגמת יכולות הסימולציה (a) פרופיל זוויתי שהוזן לסימולטור, (b) מהירות זוויתית של הברך, (c) המומנט בציר הגנראטור, (d) מתח אחת הפאזות, (e) אינטגרל על האנרגיה שנקצרה.....27
- איור 3.1 – תיאור סכמטי של המערכת המוצעת.....31
- איור 3.2 – פעילות מפרק הברך במהלך צעד בודד. הגרפים מהעליון לתחתון הם: זווית (0 משמעותה רגל ישרה), מהירות, מומנט והספק.....32
- איור 3.3 – תרשים זרימה של אלגוריתם לזיהוי מקטעים ו"למידה" של פרופיל ההליכה.....33
- איור 3.4 – צריכה מטבולית כפונקציה של כמות האנרגיה שנקצרה, הצורות הינן פרופיל קצירה בעוצמות שונות.....36
- איור 4.1 – סכימת בלוקים למערכת קצירה בסיסית המבוססת על שלושה חיישנים לזיהוי אזורים של עבודה שלילית.....39
- איור 4.2 – סכימת בלוקים למערכת קצירה בסיסית המבוססת על חיישן בודד לזיהוי אזורים של עבודה שלילית.....39
- איור 4.3 – אלגוריתם זיהוי עבודה שלילית המתבסס על חישת זווית המפרק בלבד.....41
- איור 4.4 – מעגל חשמלי של מערכת לניהול הספק.....42
- איור 4.5 – לוח פיתוח של חברת Arduino עבור מיקרו-בקר מסוג ATME328 (התמונה נלקחה מאתר החברה).....43
- איור 4.6 – מערכת לניהול הספק מזוודת בקופסת ניסויים.....43
- איור 5.1 – מבנה בלוקים של המערכת לניהול הספק דור ב'.....45
- איור 5.2 – השוואה בין הפסדי ההספק במיישר הפאסיבי (כחול) והאקטיבי (אדום).....47
- איור 5.3 – מיישר אקטיבי תלת פאזי.....47
- איור 5.4 – ממיר מעלה מתח כפי שהוא מומש בסימולציה עם ערכי רכיבים שנבחרו למימוש.....49
- איור 5.5 – סכמה בלוקים של הממיר עם בקר PI ומשוב זרם.....49
- איור 5.6 – גרף בודה של: power stage ב-open loop (כאשר כחול עבור מתח מוצא מינימאלי ואדום עבור מתח מוצא מקסימאלי), המשוואה (בשחור) והמערכת ב-close loop בירוק.....51
- איור 5.7 – משוואה עם היסטריזיס לשליטה על מיתוג עומס.....52
- איור 5.8 – תוצאות סימולציה של משוואה עם היסטריזיס עבור עומס דמה.....52
- איור 5.9 – כרטיס פיתוח של מטען לסוללת Li-ion של חברת Linear.....53
- איור 5.10 – פרופיל טעינה סטנדרטי של סוללת Li-ion.....53
- איור 5.11 – קשר בין זרם העומס של בנק האנרגיה לבין ערך הפוטנציאומטר של מטען.....54
- איור 5.12 – זרם טעינת הסוללה כפונקציה של מתח בנק האנרגיה וכפרמטר של הפוטנציאומטר.....54
- איור 5.13 – נצילות כרטיס הפיתוח של מטען הסוללות כפונקציה של מתח בנק האנרגיה וכפרמטר של הפוטנציאומטר.....55
- איור 5.14 – מודל המטען בסימולציה.....55
- איור 5.15 – סימולציה קצירה של אזורים K1 ו-K3 באמצעות זרם ישר. הגרפים מלמעלה למטה הם: זווית המפרק ב-rad, מהירות המפרק ב-rad/sec, המומנט הנדרש מהמפרק כדי להניע את מערכת הקצירה ב-Nm, מתח הכניסה לממיר, זרם הקצירה.....57
- איור 5.16 – סימולציה במצב יציב: מתח בנק האנרגיה (גרף עליון), זרם הנצרך מהבנק (גרף תחתון).....57
- איור 5.17 – מעגל סימולציה לבדיקת תכנון מתחי עזר באמצעות מייצב ממותג מסוג מוריד-מעלה ל-11v ומייצב ליניארי ל-3.3v. העומסים של השניים מודלו באמצעות מקורות זרם.....58
- איור 5.18 – אותות מסימולציה מתחי עזר: מתח מוצא מודול מוריד-מעלה מתח (vin33), מתח מוצא מודול מייצב ליניארי (vout33), זרם הממדל את המיקרו-בקר והחיישנים (I3), זרם פולסים הממדל את דוחף המתגים במיישר (I2), זרם פולסים הממדל את דוחף הממיר (I1).....59
- איור 5.19 – מיקרו-בקר PIC24FJ16GA102.....60
- איור 5.20 – חישת זרם, ערכי A/D בתלות בזרם הכניסה לממיר מעלה מתח.....61
- איור 5.21 – חישת מתח בכניסה לממיר מעלה מתח.....62

63	איור 5.22 – חישת מתח בנק האנרגיה
65	איור 5.23 – תרשים זרימה של מבנה התוכנה
67	איור 5.24 – תרשים זרימה של פונקציית מיקום הברך
71	איור 5.25 – תרשים זרימה של פונקציית קצירה
73	איור 5.26 – תרשים זרימה של פונקציית חיפוש אחר נקודת מקסימום ההספק
75	איור 5.27 – כרטיס המערכת לניהול הספק (דור א')
75	איור 5.28 – קופסת זיוד של המערכת לניהול הספק (דור ב')
76	איור 6.1 – תשתית למערך ניסוי בו הגנראטור הנבדק מסובב ע"י מנוע DC והם נמצאים בחיבור 1:1
76	איור 6.2 – גרף המרכז את תוצאות הניסויים (עיגולים כחולים) ואת תוצאות הסימולציה של המודל (איקסים אדומים)
78	איור 6.3 – מעגל סכמתי של סימולציה לבדיקת מודל הגנראטור
80	איור 6.4 – פרופיל זוויתי של הברך
80	איור 6.5 – השוואה בין מתח הפאזה בסימולציה באדום למתח הפאזה בניסויים בסגול
80	איור 6.6 – תוצאות ניסוי הליכה ברך שמאל במהירות 6kph כאשר הגנראטור מנותק בצורה פיזית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)
83	איור 6.7 – תוצאות ניסוי הליכה ברך שמאל במהירות 6kph כאשר הגנראטור מחובר בצורה פיזית אך ללא קצירה חשמלית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)
83	איור 6.8 – תוצאות ניסוי הליכה ברך שמאל במהירות של 6kph עם קצירה חשמלית כאשר העומס הינו $1\Omega$ (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)
84	איור 6.9 – תוצאות ניסוי הליכה ברך ימין במהירות 6kph כאשר הגנראטור מנותק בצורה פיזית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)
84	איור 6.10 – תוצאות ניסוי הליכה ברך ימין במהירות 6kph כאשר הגנראטור מחובר בצורה פיזית אך ללא קצירה חשמלית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)
85	איור 6.11 – תוצאות ניסוי הליכה ברך ימין במהירות של 6kph עם קצירה חשמלית כאשר העומס הינו $1\Omega$ (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)
85	איור 6.12 – מערך ניסוי של האמולטור עם המכאניקה של הברכה והמערכת החשמלית המוצעת
87	איור 6.13 – תמונה של מערך ניסוי עם מדמה ברך
87	איור 6.14 – ניסוי מצב יציב לזמן תגובת המערכת לשינוי במצב של חיישן Hall effect
89	איור 6.15 – ניסוי תגובת הממיר למדרגת זרם בבקרה
89	איור 6.16 – נצילות מיישר פסיבי במצב היציב כפונקציה של מתח בכניסה למיישר וכפרמטר של שני זרמים
90	איור 6.17 – פעילות המיישר הסינכרוני במצב יציב: האותות הסינוסואידליים הינם מתחי שלושת הפאזות בכניסה למערכת החשמלית, שלושת אותות חיישני ה-Hall effect הינם D8-D10, 6 אותות הבקרה בשערים של מתגי המיישר הינם D1-D6
91	איור 6.18 – בדיקת בקרת הממיר באמצעות עקיבה אחר פרופיל זרמים גינרי שהוצג ע"י אות סינוסואידלי. האות העליון בגרף הוא הזרם הנמדד ע"י
92	איור 6.19 – צורות האותות בממיר בעת פעילות מדמה הברך: האות העליון הוא מתח בבנק האנרגיה, שני האותות האמצעים הם המתח בפאזה ובמוצא המיישר, האות התחתון הינו הזרם המבוקר בכניסה לממיר
93	איור 6.20 – צורות האותות בממיר בעת פעילות מדמה ברך: האות העליון הינו המתח בבנק האנרגיה, האות השני מלמעלה הוא מתח בכניסה לממיר והאות השלישי הינו הזרם במוצא המטען. האות הרביעי התחתון ביותר אינו מחובר
94	איור 6.21 – נצילות הממיר כפונקציה של כמות האנרגיה שנקצרה במערכת עם מיישר סינכרוני
95	איור 6.22 – תוצאות ניסויים לאופן פעולת אלגוריתם לחיפוש נקודת קצירה אופטימאלית. בגרף העליון מוצגת כמות האנרגיה הנקצרת אל מול כמות האופטימאלית שהוגדרה במערכת, בגרף התחתון מוצגת התוצר של הצריכה המטבולית המסונטזת באמצעות סקריפט במטלאב
96	

105	איור 10.1 – מודל של המערכת המכאנית
105	איור 10.2 – מודל הרוטור בגנראטור
105	איור 10.3 – מעגלי עזר למציאת מיקום הרוטור (G4), זווית הברך (G8), זווית חשמלית של הרוטור (E12) ומעגל לקביעת כיוון הסיבוב של הרוטור לקביעת כיוון כוח החיכוך ברוטור
105	איור 10.4 – מודל של 3 חיישני Hall effect
105	איור 10.5 – מעגלי עזר אשר ביצעו קריאה של נתוני הניסויים לתוך הסימולציה להשוואה בין התוצאות בתוך תוכנת SPICE
106	איור 10.6 – מודל הסטאטור מצד שמאל ומודל העומס בצד ימין
107	איור 10.7 – שרטוט המעגל הבסיסי שהתקבל מהנדסת מכונות בעת קבלת המערכת בצוות מעבדת אלקטרוניקת הספק
107	איור 10.8 – הווריאציה הראשונה שנבחנה עבור מעגל חשמלי אשר משתמש הן בזווית הברך והן בחיישני לחץ
108	
109	איור 10.9 – ניסיון שני להתמודד עם חיישני לחץ הפעם ההשוואה מתבצעת ברמת המשווה
110	איור 10.10 – מעגל חשמלי בסיסי המבוסס רק על חישת הזווית
110	איור 10.11 – מודל הכוח שמפעיל
110	איור 10.12 – מודל הציר המכאני של הרוטור
111	איור 10.13 – מודל מערכת לניהול הספק עם מודל הסטאטור של הגנראטור
111	איור 10.14 – מעגלי עזר המחשבים את הזווית המכאנית לפני העיבוד (מימין) ואת זווית מפרק הברך (משמאל)
111	איור 10.15 – מעגלי עזר המחשבים את הזווית המכאנית (מימין) ואת הזווית החשמלית (משמאל) של הרוטור
111	
111	איור 10.16 – בלוק קוד C הממש את הקשרים המתמטיים בין הזרם למומנט, בין מהירות הסיבוב למתח המושרה בפאזות, ואת האותות של חיישני Hall effect
113	איור 10.17 – שרטוט חשמלי של המערכת
114	איור 10.18 – איור מיקום הרכיבים בכרטיס המערכת
114	איור 10.19 – layout של שכבה 1 (שכבה חיצונית)
115	איור 10.20 – layout של שכבה 2 (שכבה פנימית)
115	איור 10.21 – layout של שכבה 3 (שכבה פנימית)
116	איור 10.22 – layout של שכבה 4 (שכבה חיצונית)

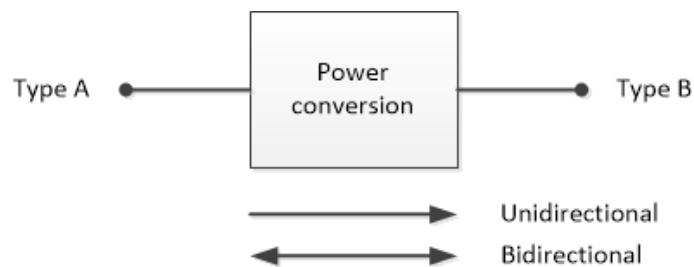
## רשימת טבלאות

4	טבלה 1.1 – טבלת הכוחות והעבודה המתבצעת במפרקים השונים בצעד בודד
23	טבלה 1.2 – טבלה המסכמת את הקשר בין משתנים ויחידות חשמליות למכאניות
48	טבלה 1.5 – מצב החיישנים ובקרת המתגים כאשר הגנראטור מסובב עם כיוון השעון
48	טבלה II.5 – מצב החיישנים ובקרת המתגים כאשר הגנראטור מסובב נגד כיוון השעון
74	טבלה III.5 – טבלה המסכמת את ההודעות הנשלחות ע"י פונקציית חיפוש נקודת מקסימום ההספק
78	טבלה 1.6 – נתונים טכניים של הגנראטור הנמצא בשימוש מערכת קצירת אנרגיה מהברך (מתוך דפי המפרט של היצרן)
81	טבלה II.6 – נתונים טכניים חשובים של הסימולציה

# 1 מבוא

## 1.1 הקדמה

אלקטרוניקת הספק הינו תחום באלקטרוניקה האחראי על עיבוד הספק חשמלי [1]. הכוונה בעיבוד הספק היא להמרה של אנרגיה חשמלית זמינה מצורה א' (Type A) לאנרגיה חשמלית דרושה מצורה ב' (Type B), ההמרה יכולה להיות חד-כיוונית או דו-כיוונית (איור 1.1). המרה חד-כיוונית קיימת כאשר מוגדר באופן ברור מקור האנרגיה והעומס, לדוגמה מכשירי חשמל (העומס) הצורכים אנרגיה מרשת החשמל (המקור). המרה דו-כיוונית קיימת כאשר המקור והעומס מתחלפים על פי צורת האנרגיה הזמינה והנדרשת. דוגמא לכך ניתן למצוא ברכבים חשמליים בהם הבלימה הינה גנרטיבית ומשמשת כמקור אנרגיה זמין לטעינת מצברים שהם העומס ובעת האצה האנרגיה האגורה בסוללות היא המקור ומנוע הרכב הוא העומס. כיוון שכל מכשיר הצורך אנרגיה חשמלית להפעלתו חייב לכלול מרכיבים של אלקטרוניקת הספק מדובר באחד התחומים החשובים והמורכבים באלקטרוניקה המודרנית. מורכבות התחום מתבטאת בכך שנדרש ידע במספר רב של נושאים בהנדסת חשמל לביצוע ההמרה. נושאים כדוגמת: מעגלים אנלוגיים, רכיבים אלקטרוניים, מערכות בקרה, מערכות הספק, מגנטיקה ומכונות חשמליות.



איור 1.1 – מערכת מופשטת לעיבוד הספק

דרך אחת לסווג אנרגיה חשמלית היא לפי צורת הזרם/המתח: ישר (DC) או חילופין (AC). מעגל המבצע המרה ממתח ישר לחילופין (DC-AC) נקרא inverter וממתח חילופין לישר (AC-DC) נקרא rectifier. פרט להמרות בין צורות שונות של אנרגיה חשמלית ישנן המרות בתוך אותה אנרגיה. מעגל המבצע המרה מרמה אחת של מתח ישר לרמה אחרת (DC-DC) נקרא converter (ממיר) ומעגל המבצע המרה ממתח חילופין למתח חילופין (AC-AC) בעוצמה ו/או בתדר נקרא cycloconverter.

## 1.2 הגדרת הבעיה והצעות לפתרונה

במהלך העשורים האחרונים קיימת גדילה מתמשכת בכמות מכשירי חשמל ניידים. מכשירים אלו נהיים בעלי ביצועים חזקים יותר ויותר ועל אף ההתקדמות בהקטנת צריכת ההספק של המרכיבים השונים, צריכת ההספק של מכשירים אלו עולה. מקור האנרגיה של מכשירים אלו הן סוללות שגודל הקיבול שלהן מגביל את זמן פעולת המכשיר. זמן פעולה מוגדר כמשך פעולת המכשיר בין טעינה לטעינה. במקרה של מכשירים בהם המשכיות ההפעלה הינה קריטית ורשת החשמל אינה זמינה בכל רגע נתון נאלצים המשתמשים לסחוב סוללות נוספות (כדוגמת חיילים, נכים ומטיילים).

אחד הפתרונות שהוצעו להארכת זמן פעולת המכשירים הוא ניצול אנרגיה ביו-מכאנית של המשתמשים לטעינת הסוללה. אנרגיה ביו-מכאנית הינה אנרגיה מכאנית הנוצרת בתהליך ביולוגי. ההיגיון מאחורי קצירת אנרגיה ביו-מכאנית הוא בכך שאדם ממוצע משתמש בכ-  $10.7\text{MJ}/\text{day}$ . המקור של אנרגיה זו הוא האוכל הנצרך ע"י המשתמש ומצבורי השומן הקיימים בגוף. הצפיפות האנרגטית של אוכל גדולה פי 100-35 מזו של הסוללות הקיימות כיום (תלוי בסוג האוכל והסוללות) [2]. חלק ניכר מהאנרגיה מושקע בהנעת הגוף לביצוע הפעולות היומיומיות. הנצילות המכאנית של הגוף עומדת על כ-30%-15 כך שרוב האנרגיה משתחררת לחלל החופשי כחום. למרות הנטייה הראשונית לקצירת אנרגיה טרמית, יש לדעת שהאנרגיה משתחררת לחלל החופשי באמצעות חום מורגש ונידוף (זיעה). שימוש בגנראטור תרמי מאפשר קצירה אך ורק של חום מורגש. נצילות ההמרה מתקבלת ממכפלת הגבול העליון לנצילות המרה של מכונות טרמיות (הנתונה ע"י משוואת Carnot) ונצילות ההמרה של המתמר [2]:

$$\mu_{thermal} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{(\sqrt{1+ZT} - 1)}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (1)$$

כאשר  $T_h$  הינה הטמפר' החמה (במקרה שלנו של גוף האדם),  $T_c$  היא הטמפר' הקרה (במקרה שלנו מדובר בטמפר' הסביבה),  $ZT$  היא מאפיין ההמרה של המתמר.

כיוון שהפרש טמפר' הגוף לסביבה נמוך נצילות ההמרה מאוד נמוכה. לדוגמא עבור המקרה הקיצוני בו טמפר' הסביבה  $273^\circ\text{F}$  ( $0^\circ\text{C}$ ), טמפר' הגוף  $310^\circ\text{F}$  ( $37^\circ\text{C}$ ) ומאפיין ההמרה 1 נצילות המרה עומד על 2.15% ולפי [2] ניתן לקצור במהלך הליכה בשיטה זו כ-2W. כמובן שהחישוב הינו תיאורטי עבור המקרה והמשתמש יהיה עטוף כולו

בחומר המבצע את ההמרה דבר שאינו ישים ואשר נמצא בתנאי סביבה קיצוניים ולכן כמות האנרגיה שניתן לקצור בשיטה זו בפועל נמוך בהרבה מההערכה שהוצגה.

המרת עבודה של אדם לחשמל אינו רעיון חדש וקיימים כבר הרבה שנים מימושים מסחריים כדוגמת רדיו/פנס המופעלים מסיבוב ידית שמטעינה סוללה [3]. במימושים אלו משתמשים במכונות אלקטרומגנטיות מסתובבות עם תמסורת, כמות ההספק המועבר ע"י המשתמש תלויה במהירות הסיבוב של הידית ובכוח המופעל לסיבובה. החסרון בגישה זו היא שהמשתמש נדרש לבצע פעולה ייעודית ליצירת החשמל ולכן זמן יצירת האנרגיה מוגבל. גישה נוספת הינה ניצול של פעילות יומיומית כדי לקצור אנרגיה – כדוגמת פעילות בחדר כושר [4] או ריקודים על רחבת ריקודים מותאמת [5]. צורת קצירה זו מוגבלת בכך שהיא מקבעת את המשתמש למקום מסוים.

### 1.3 קצירת אנרגיה ביו-מכאנית שלילית

במחקרים שנעשו בתחום ביו-מכאניקה ([6], [7]) וחקרו את הפעולות הנעשות ע"י מפרקים שונים בגוף האדם נמצא שהפעולות מתחלקות לשניים. פעולה של יצירת תנועה הינה עבודה חיובית ואילו פעולה של בלימה והתנגדות לתנועה הינה עבודה שלילית. מבחינה תיאורטית קצירה של עבודה שלילית בנוסף ליצירת החשמל גם תקל על המשתמש בביצוע הפעולה בכך שיוריד ממנו את העומס של הבלימה. כדי לייצר אנרגיה לאורך זמן יש לקצור אנרגיה מפעילות יומיומית שגרתית של המשתמש אשר אינה דורשת ממנו פעולה ייעודית. הליכה היא פעילות יומיומית המבוצעת לאורך זמן והיא מקור פוטנציאלי לקצירת אנרגיה קינטית שלילית. דוגמה לקצירת אנרגיה שלילית ניתן למצוא מתחום המכונות ההיברידיים והחשמליות בהן הבלימה נעשית ע"י גנראטור חשמלי הממיר את האנרגיה הקינטית לחשמלית אשר מתועלת לטעינת מצברי הרכב [8].

צורת ההליכה של בני אדם הינה תהליך מחזורי, כאשר שני צעדים (צעד של כל רגל) נחשב למחזור בודד. הפעולה המחזורית עצמה וחלוקת העומסים שונה בין מפרק למפרק. המפרקים מבצעים עבודה חיובית המתבטאת בהאצה של איברי הגוף ועבודה שלילית המתבטאת בבלימת האיברים. העבודה השלילית אינה תורמת לכיוון ההליכה והיא בעצם סופגת את האנרגיה הקינטית. חלק מהאנרגיה שנספג הופך לאנרגיה אגורה (כמו בקפיץ) כדי להתניע את תנועת הגפה בכיוון הנגדי והשאר מתבזבז כאנרגיית חום. בעבודות שנעשו בתחום הביו-מכאניקה נמצאו אופייני העבודה של המפרקים השונים. טבלה 1.1 מסכמת את העבודה הנעשית ע"י

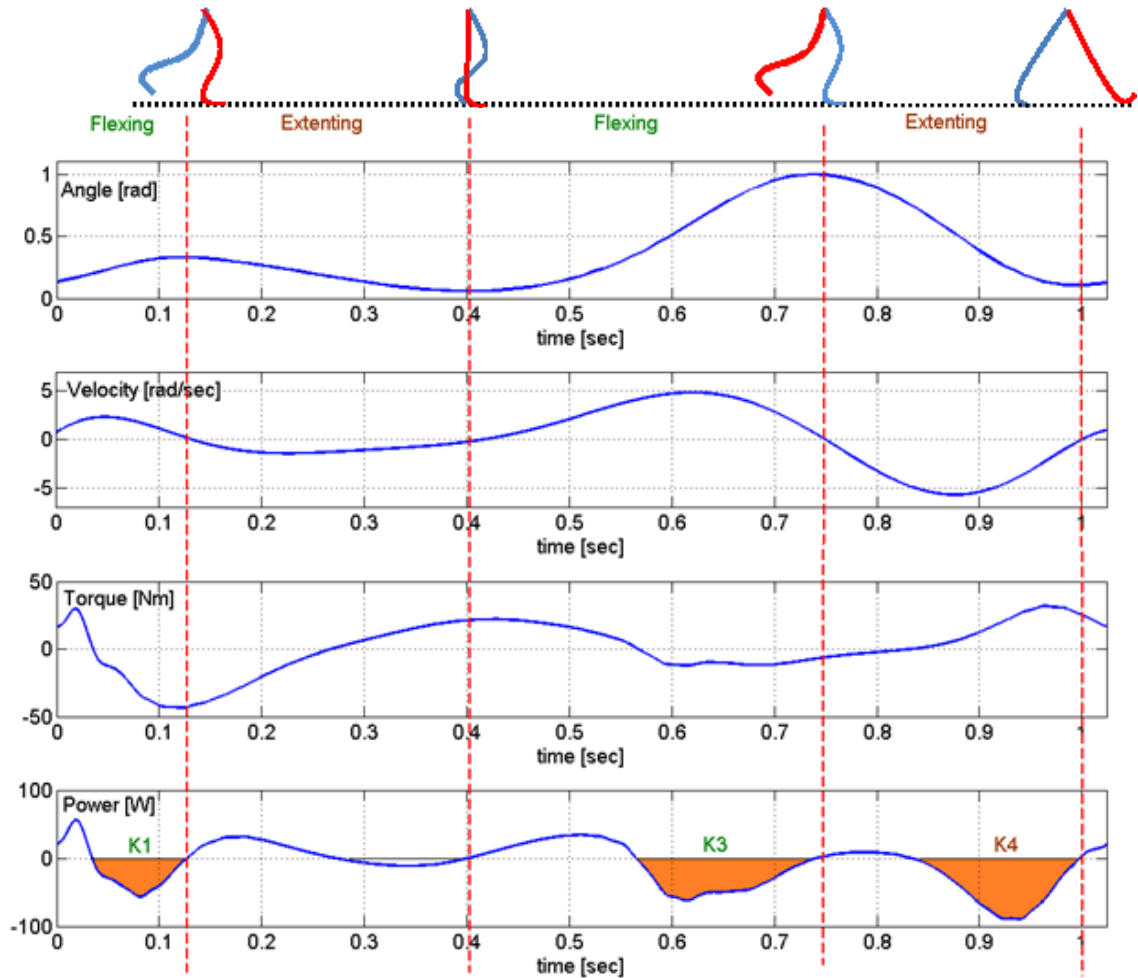
המפרקים השונים במהלך מחזור בודד [2]. כל החישובים בטבלה מתייחסים למשתמש במשקל של 80Kg אשר תדר המחזור הינו 1Hz ומהירות ההליכה במישור כ-1.38m/s. עבור מפרק הברך נמצא שכ-92% מסך העבודה הינה עבודה שלילית וכמות האנרגיה השלילית שנמצאת בכל מחזור בברכיים הינה כ-33J. כלומר קיימים כ-33W של הספק שלילי זמין בשני ברכי המשתמש במחזור בודד וזה יותר מסך העבודות השליליות של שאר המפרקים יחד. לכן, המחקר מתמקד בקצירת אנרגיה ממפרק הברך.

טבלה 1.1 – טבלת הכוחות והעבודה המתבצעת במפרקים השונים בצעד בודד

מפרק	עבודה [J]	הספק [W]	מומנט מקס' [Nm]	הספק שלילי [%]	הספק שלילי [W]
קרוסול	33.4	66.8	140	28.3	19
ברך	18.2	36.4	40	92	33.5
ירך	18.96	38	40-80	19	7.2
מרפק	1.07	2.1	1-2	37	0.8
כתף	1.1	2.2	1-2	61	1.3

כדי לבנות מכשיר לקצירת אנרגיה ממפרק הברך יש להבין תחילה את פרופיל פעולת הברך במהלך מחזור הצעד ללא מכשיר לקצירת אנרגיה. איור 1.2 מתאר את העבודה הנעשית ע"י מפרק הברך במהלך צעד בודד כפי שהתקבלו מ-Dr. S. Wolf מאוניברסיטת Heidelberg בגרמניה. הצעד מחולק לארבעה אזורים לפי כיוון תנועת הברך: פשיטה וכיפוף. הגרפים באיור הם כדלקמן (מהעליון לתחתון): זווית הברך ברדיאנים (כאשר 0 משמעותו רגל ישרה), מהירות הברך ברדיאנים לשנייה, מומנט מפרק הברך, וההספק של המפרק. האזורים שסומנו בגרף ההספק הינם אזורים של עבודה שלילית. על מנת לבצע קצירה של אנרגיה שלילית עם מינימום הפרעה למשתמש יש לקצור אך ורק באזורים של עבודה שלילית ופעולת הבלימה (המומנט) חייבת להיות יותר קטנה מזו שמבצע מפרק הברך ללא הקצירה. כאשר מומנט גדול יותר יגרום לאחד משניים: פגיעה בתנועה או אילוץ המשתמש להשקיע עבודה חיובית נוספת כדי להשלים את התנועה. מניתוח עבודת מפרק הברך במהלך צעד בודד עולות המסקנות הבאות:

- כמות האנרגיה השלילית באזור K4 הינה הגדולה מבין שני האזורים האחרים ומכילה מחצית מכמות האנרגיה השלילית של מפרק הברך בצעד.
- אזור עבודה K4 קורא במהלך פשיטת הברך ואילו האזורים K1, K3 במהלך כיפוף.
- ניתן לשים לב גם שאזור K1 הינו אזור בעייתי במיוחד כיוון שמהירות התנועה של המפרק היא הנמוכה ביותר מצד אחד אך מצד שני הכוח שמפעיל המפרק בזמן זה הוא הגדול מבין כל האזורים האחרים.



איור 2.1 – פעילות מפרק הברך במהלך צעד בודד. הגרפים מהעליון לתחתון הם: זווית (0 משמעותה רגל ישרה), מהירות, מומנט והספק. נתוני מפרק הברך התקבלו מ-Dr. S. Wolf מאוניברסיטת Heidelberg בגרמניה.

#### 1.4 מתמרים לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית

מתמר הינו רכיב המקשר בין הכוחות של העולם הפיזיקלי לזה לבין זה של העולם החשמלי. המתמר נקרא על פי הקשר אותו הוא מייצג. להלן רשימה חלקית של מתמרים קיימים: פיאזו-אלקטרי, אלקטרו-סטאטי ואלקטרו-מגנטי.

מתמר פיאזו-אלקטרי מבוסס חומר אשר הפעלה של כוח מכאני עליו (כיפוף או דחיסה) דוחף מטענים אל שפת החומר וכתוצאה מכך נוצר מתח בין הדקי הרכיב. השימוש במתמרים פיאזו-אלקטריים נפוץ במחקרים העוסקים בקצירת אנרגיה ביו-מכאנית מדחיסת סוליית הנעל [9,10]. היתרון של מתמר זה הוא משקלו הנמוך והחסרון הוא בנצילות המרה נמוכה.

מתמר אלקטרו-סטטי מתבסס על קבל בעל קיבול משתנה בצורה מכאנית. אופן הפעולה הוא כדילקמן הקבל נטען ע"י מטען חיצוני למתח התחלתי כאשר לוחות הקבל נמצאים קרוב אחד לשני, ע"י הפעלת כוח חיצוני אשר יכול להיות ליניארי או סיבובי מגדילים את המרחק בין הדקי הקבל ובכך מגדילים את כמות האנרגיה האגורה בתוך החומר [11]. עקב הצורך במקור חיצוני לטעינת המתמר למתח התחלתי נפסל השימוש במתמר זה במערכת הייעודית.

מתמר אלקטרו-מגנטי מתבסס על חוק פאראדיי לפיו מושרה מתח בין הדקי מוליך ( back electro motive force ) כתוצאה מתנועה יחסית בין שדה מגנטי ללולאת המוליך. מכונות אלקטרו-מגנטיות מתחלקות לשניים לפי אופן התנועה היחסית בין המוליך לשדה המגנטי: ליניאריות [12] או סיבוביות [13,14]. השדה המגנטי של המתמר יכול להיות מעורר ע"י מגנטים או סלילים דרכם זורם זרם קבוע ממקור חיצוני ויוצר שדה מגנטי. כיוון שמדובר במערכת אוטונומית האופציה העדיפה היא עירור שדה מגנטי באמצעות מגנטים.

מחקר [15] מתאר את השיקולים בתכנון מערכת קצירה המתאימה להמרת אנרגיה מכאנית לאנרגיה חשמלית במערכות ביו-מכאניות תוך התחשבות במפרקים ומתמרים שונים במונחים של אנרגיה, הספק, משקל ועלות. מסקנת המחקר הינה שהמועמד הטוב ביותר לקצירת הספק ממפרק הברך הינן מכונות אלקטרו-מגנטיות מסתובבות בעלות מספר רב של קטבים.

היתרונות הבולטים של מכונה אלקטרו-מגנטיות מסתובבות למתח ישר (עם וללא מברשות) המבוססות מגנטים קבועים הוא הקשר הליניארי [16] בין העומס החשמלי ( $I$ ) למכאני ( $T$ ) ובין מהירות הסיבוב ( $n$ ) למתח בין הדקי המכונה ( $U$ ) המתואר ב-(2) ו-(3). לכן, בהכתבת עומס חשמלי לגנראטור מוכתב מומנט תואם על ציר הגנראטור (מומנט הבלימה). במכונות חשמליות למתח ישר עם מברשות מתבצעת קומוטציה מכאנית בין הסלילים המרכיבים את הרוטור ולכן המתח בהדקי המכונה הינו מתח ישר.

$$T = K_t I \quad (2)$$

$$n = K_n U \quad (3)$$

כאשר  $K_t$  הוא קבוע המומנט של המערכת של  $[Nm/A]$  ו- $K_n$  הוא קבוע המהירות של המערכת של  $[rpm/V]$

במכונות חשמליות למתח ישר ללא מברשות, המגנטים נמצאים ברוטור והסטאטור מורכב מ-N סלילים המרכיבים את N הפאזות של המכונה. המקרה הנפוץ ביותר הוא של מכונות חשמליות בעלות 3 פאזות. כיוון שבמכונות אלו אין מברשות המבצעות קומוטציה מכאנית יש לבצע את הקומוטציה באמצעות גשר של מתגים. המודל הבסיסי של פאזה הוא השראות והתנגדות הסליל ממנו עשויה הפאזה והמתח המושרה בפאזה. המשוואות (4), (5) מתארות את הקשרים הליניאריים, במכונות בהן המתח המושרה סינוסואלי, בין הזרם ( $I_i$ ) הנצרך למומנט ( $T_{em}$ ) ובין מהירות הסיבוב ( $\omega$ ) למתח המושרה בפאזה ( $E_i$ ):

$$T_{em} = \sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N K_t I_i \sin(p\theta - (i-1)2\pi/N) \quad (4)$$

$$E_i = K_e \omega \sin\left(p\theta - \frac{(i-1)2\pi}{N}\right) \quad (5)$$

כאשר  $i$  הוא אינדקס הפאזה,  $N$  הוא מספר הפאזות במכונה,  $p$  מספר הקטבים במכונה,  $\theta$  זווית הרוטור,  $K_e$  הוא קבוע ה-BEMF (Back Electro-Motive Force) ביחידות של [rad/s/V] ו- $K_t$  הוא קבוע המומנט של המכונה.

מכונות אלקטרומגנטיות קטנות מתאפיינות במומנט קטן (מתחת ל 100mNm) ומהירות סיבוב גבוה (מעל 3000rpm). לעומתן תנועתו המפרקים הינה תנועה זוויתית איטית עם מחזור של כ-1Hz (תלוי במהירות ההליכה) ומומנטים גבוהים. לכן, כדי להשתמש במכונות חשמליות מסתובבות לקצירת אנרגיה מתנועה של בני אדם יש להמיר ע"י תמסורת את המהירות הזוויתית הנמוכה של המפרק למהירות סיבובית גבוה (6) ואת המומנט הגבוה במפרק להקטין (7), כך שיתאימו למכונה החשמלית:

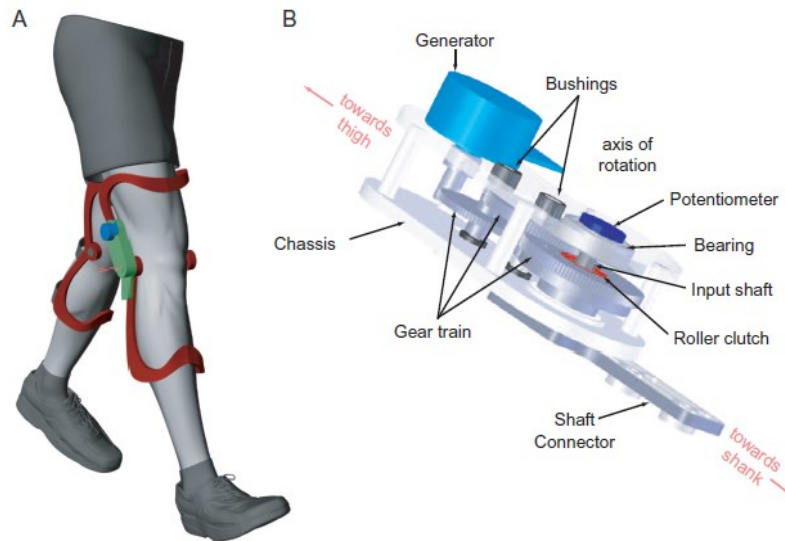
$$\omega_{gen} = \omega_{knee}(GearRatio) \quad (6)$$

$$T_{gen} = \frac{T_{knee}}{GearRatio} \quad (7)$$

## 1.5 עבודות קודמות – מערכות לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית

קבוצתו של Donelan ( [17], [18], [19] ) הציעה מכשיר לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך (איור 1.3). מכשיר זה בנוי מברכייה אורטופדית אשר ממירה את התנועה הזוויתית האיטית של הברך לתנועה סיבובית מהירה. בקונפיגורציית המכשיר שהוצג במחקרים אלו רק תנועת הפשיטה (K4) של המפרק מניעה את הגיר המכאני המסובב גנראטור חשמלי מסוג BLDC (Brushless Direct Current). בניסויים הצליחו הממציאים

להפיק  $4.8 \pm 0.8 [W]$  הנמדד על עומס התנגדתי בהליכה במהירות של  $1.5 [m/s]$  [17]. במחקרים אלו בוצע שימוש בנגדים כעומס לגנראטור מבלי לנסות לאגור את האנרגיה שנקצרה. האלגוריתם זיהוי אזורים רצויים לקצירה שהוצג פעל על בסיס ספי זווית הברך והשהייה קבועים שנמצאו מתאימים עבור פרופיל הליכה ממוצע של משתתפי הניסוי במהירויות ההליכה בהן בוצע הניסוי.



איור 3.1 – מכשיר קצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך שהוצע ע"י קבוצתו של Donelan. איור A מציג את אופן הליבישה של

המכשיר על המפרק באמצעות ברכיה אורטופדית ואיור B מציג את המבנה הפנימי של

אופן בחירת הגנראטור והתמסורת הינו נושא קריטי בתכנון מערכות להספק נמוך, עם דרישות נצילות גבוהות ודרישות למשקל וגודל קטנים. צפיפות ההספק של מכונות חשמליות מסתובבות עולה ככל שעולה מהירות הסיבוב שלהן ולכן הגדלת יחס תמסורת יאפשר שימוש במכונה חשמלית קטנה יותר אך נצילות של תמסורת מכאנית יורדת ככל שיחס התמסורת עולה. ב- [20] הוצעה שיטת אופטימיזציה לתכנון מערכת הקצירה מבחינת בחירת גנראטור ויחס תמסורת. האופטימיזציה מתבצעת על כמות האנרגיה המקסימאלית שנקצרת תחת האילוץ שהמומנט שמפעיל הגנראטור על הברך במהלך קצירה עם עומס התנגדתי הינה יותר קטנה ממומנט שהברך מפעילה בהליכה רגילה בכל נקודה במהלך הצעד. במהלך החיפוש משנים את יחס התמסורת ואת העומס עבור הגנראטור הנבחר. כחלק מהמחקר הושו 9 מנועי DC עם ובלי מברשות. החוקרים הגיעו למסקנה שבאמצעות ביצוע האופטימיזציה של הגנראטור והתמסורת ניתן להגדיל את הנצילות הכללית של המערכת בעשרות אחוזים. על פי הממצאים של המחקר נבחר גנראטור BLDC מדגם EC45 flat של חברת maxon עבור מערכת קצירה הנמצאת בשימוש במחקר זה. התמסורת האופטימלית שחושבה ב- [20] עבור המנוע שנבחר הינה 92. אך בעת

בניית מכשיר הקצירה עבור מחקר זה (איור 1.4) המתבסס על עיצוב המכשיר של Donelan נעשה שימוש בתמסורת בעלת יחס של 83 והוחלט לא להחליפה. על פי המחקר עם מערכת ביו-מכאנית זו ניתן לקצור בצורה אופטימאלית 2.5J.



איור 4.1 – מכשיר קצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך שנמצא בשימוש במחקר זה

## 1.6 קצירה אופטימאלית

אחד המדדים לבחינת השפעת קצירת האנרגיה על המשתמש נקרא מחיר הקצירה ( = Cost Of Harvesting ) ומוגדר כיחס בין הפרש צריכה מטבולית עם וללא קצירה ( $\Delta metabolic energy$ ) לבין כמות האנרגיה שנקצרה מהמפרק ( $\Delta electrical energy$ ) [18].

$$COH = \frac{\Delta metabolic energy}{\Delta electrical energy} \quad (8)$$

צריכה מטבולית הינו קצב המטבוליזם של הגוף כלומר כמות אנרגיה המושקעת במהלך פעולה מסוימת בפרק זמן מסוים. מטבוליזם הוא תהליך כימי של יצירת אנרגיה אגורה או זמינה ע"י פירוק או שינוי מולקולרי. מתוך התבוננות בצריכה המטבולית של המשתמש ניתן לכמת את כמות האנרגיה שמשקיע המשתמש לביצוע פעולה מסוימת. כאשר ככל שמקשים יותר על המשתמש כדוגמת קצירה במהלך עבודה חיובית כך תעלה גם הצריכה המטבולית של המשתמש אשר יאלץ להשקיע יותר עבודה כדי לבצע את אותה המטלה. לעומת זאת קצירת חלק מהעבודה השלילית תקטין את מאמץ הבלימה של המשתמש ולכן גם הצריכה המטבולית תקטן. עם

זאת ברור שלא ניתן לקצור את כל האנרגיה במקטע עבודה שלילית מאחר וזה יגרום לכך שהמכשיר יוליך את המשתמש דבר שהוא לא אפשרי אצל בני אדם ללא מגבלות. מתוך כך ניתן להניח שקיימת נקודת קצירה אופטימלית בה כמות האנרגיה הנקצרת מביאה למינימום את הצריכה המטבולית של המשתמש.

חיפוש נקודת מקסימום ההספק (Maximum Power Point Tracking - MPPT) הינו מושג באלקטרוניקת הספק המתייחס לטכניקות חיפוש בהן משנים את נקודת העבודה של המתמר באפליקציות של קצירת אנרגיה במהלך חיפוש אחר נקודת עבודה של המתמר בה ההספק הנקצר ממנו יהיה מקסימאלי. תאים סולאריים וטורבינות רוח הינן דוגמאות לאפליקציות בהן משתמשים באלגוריתמים לחיפוש מקסימום ההספק [21]. אחת משיטות החיפוש נקראת Hill Climbing, שיטה זו מתאימה לפונקציית עבודה בה קיים מקסימום יחיד. בגירסא הבסיסית של השיטה מתבצע שינוי של נקודת העבודה (ע"י הגדלה והקטנה של העומס) ולפי כמות האנרגיה הנקצרת מתבצעת החלטה באלגוריתם האם להמשיך ולשנות את נקודת העבודה באותו כיוון (במקרה של שינוי חיובי בכמות הספק הנקצר), או במקרה של שינוי שלילי בכמות ההספק הנקצר לשנות את כיוון שינוי נקודת העבודה. האלגוריתם בגירסתו הבסיסית לעולם אינו מתייצב על נקודת מקסימום ההספק והוא ממשיך להתנדנד סביבה.

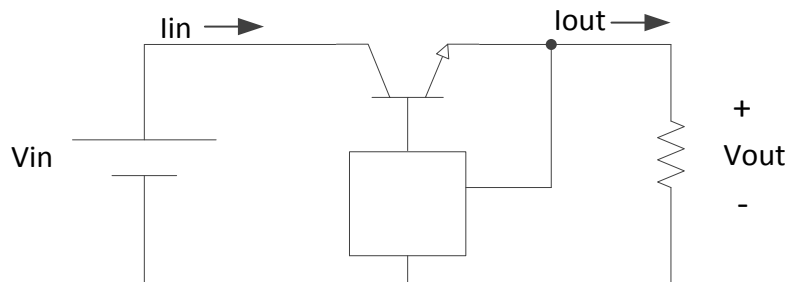
במחקרים המתועדים בספרות מתחום קצירה ביו-מכאנית ממפרק הברך ([17], [18], [2], [22]) החוקרים מחפשים את העומס ההתנגדתי האופטימאלי בצורת ניסוי וטעייה ע"י עומס פסיבי לקצירת כמות אנרגיה מקסימאלית תחת אילוניה המומנט. שיטה זו מאפשרת מציאת עומס התנגדתי אופטימאלי לקצירת מקסימום אנרגיה עבור משתמש נתון המבצע תנועה ספציפית (כגון הליכה במישור במהירות קבועה). אם זאת ידוע שכמות האנרגיה האופטימאלית לקצירה משתנה בין משתמשים שונים, קצבי הליכה, משטחים עליהם מתבצעת התנועה וצורת פרופיל הקצירה. כמו כן, שימוש בנגדים מקבע את היחס בין מהירות סיבוב הגנראטור למומנט הבלימה אותו הוא מפעיל כאשר לפי פרופיל פעילות המפרק (איור 1.2) זה לא המצב האופטימאלי. במחקר זה מוצעת גישה חדשנית אשר מתייבה את פרופיל הקצירה ללא תלות במהירות הסיבוב של הגנראטור ואשר מבצעת התאמה של פרופיל הקצירה למשתמש בצורה אוטומטית לקצירת כמות אנרגיה אופטימאלית, קצירת מקסימום אנרגיה במינימום מאמץ. האדפטיביות של פרופיל הקצירה מתבססת על משוב ביולוגי. במהלך המחקר ייבחנו משובים ביולוגיים שונים, אופן האדפטציה של פרופיל הקצירה, והאלגוריתם בו יעשה שימוש לעקיבה אחר נקודת הקצירה האופטימאלית. העקיבה אחר פרופיל הקצירה והאדפטציה של הפרופיל יעשו באמצעות מערכת לניהול

הספק המבוססת על ממיר הספק אשר יבקר את הזרם הנצרך מהגנרטור ובצורה זו תכתיב את פרופיל הבלימה למשתמש.

### 1.7 רקע תיאורטי – ממירי הספק

ממירי הספק הינם מעגלים חשמליים אשר מבצעים את ההמרות בין האנרגיה החשמליות השונות שהוזכרו בתחילת הפרק. סוג אחד של המרה הינה DC-DC (מרמה אחת של מתח ישר לאחרת) אשר מטרתה לספק לרכיבי אלקטרוניקה המרכיבים מערכות חשמליות את רמות המתח השונים הדרושים לתפקודם התקין. משימה זו ממלאים ממירי DC-DC, ממירים אלו מסווגים לפי היותם ממירים ליניאריים או ממותגים. ממירים ליניאריים מבוססים רכיב מבוקר כדוגמת טרנזיסטור BJT (איור 1.5) שבאמצעות אות בקרה שולטים על מפל המתח המתפתח על הרכיב כדי לשמור את מתח המוצא יציב. היתרונות של ממירים אלו הם: מחיר, אמינות ומוצא נקי מרעשים. החסרונות הם: שניתן לבצע אך ורק הורדת מתח (step down) ושנצילות הממיר ( $\mu_{lin}$ ) תלויה במפל המתח על הרכיב המבוקר (9). לכן בממירים אלו מומלץ להשתמש כאשר מתח הכניסה ומתח המוצא קרובים.

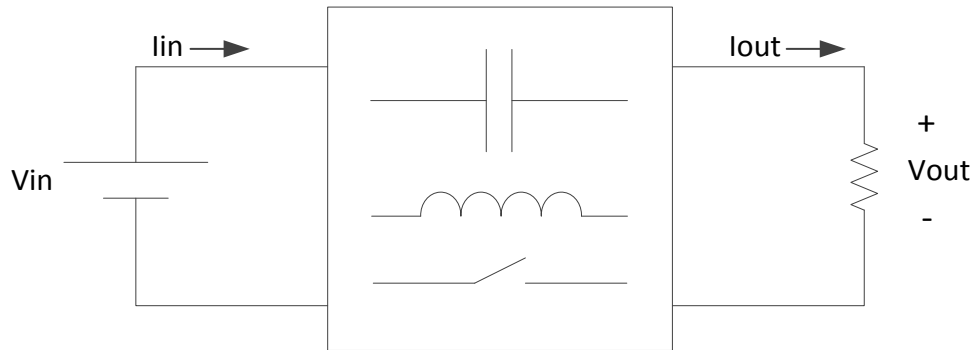
$$\mu_{lin} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out}I_{out}}{V_{in}I_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{in} - (V_{in} - V_{out})}{V_{in}} = 1 - \frac{V_{in} - V_{out}}{V_{in}} \quad (9)$$



איור 5.1 – סכימה טיפוסית של ממיר ליניארי

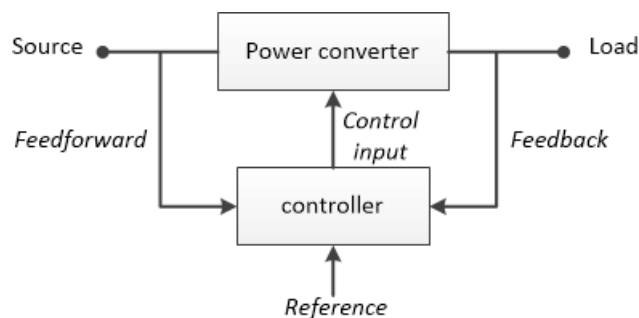
ממירים ליניאריים אינם נותנים מענה לכל דרישות של מערכות הספק מודרניות הדורשות נצילות גבוה יחד עם יכולות העלאת והורדת מתח. ממירים ממותגים (איור 1.6) מבוססים על מיתוג בקצב גבוה של רכיבים אוגרי אנרגיה (סלילים וקבלים). בשונה ממירים ליניאריים בהם העברת ההספק מתבצעת בצורה רציפה בממירים ממותגים העברת האנרגיה מתבצעת במנות. מנה היא מחזור פעולה של הממיר במהלכה רכיב אגירת אנרגיה ממותג בין הכניסה המטעינה אותו באנרגיה למוצא אליה הוא נפרק. ממירים ממותגים מסוגלים לעלות ולהוריד את מתח המוצא לעומת מתח הכניסה בתלות בטופולוגיה ובאות הבקרה. יתרון מובהק של ממירים ממותגים הוא

שמבחינה תאורטית (בו המתגים והרכיבים אוגרי אנרגיה הינם אידיאליים) נצילות הממיר יכולה להגיע ל-100%.  
חסרונו הגדול של ממיר ממותג הוא הרעש האלקטרו-מגנטי שיוצר הממיר עקב המיתוגים.



איור 6.1 – סכימה של רכיבים פעילים בממיר ממותג

ברוב האפליקציות הקיימות הממירים הינם מערכות בחוג סגור כאשר לפחות אחד מהפרמטרים הבאים מבוקר: מתח/זרם מוצא/כניסה. איכות הבקרה נמדדת בדיוק עקיבת הפרמטר המבוקר אחר אות הייחוס (תגובה דינאמית של המערכת בעקבות שינוי באות הייחוס ויציבות מבחינת שגיאת מצב יציב) ובעמידתה בפני שינויים בעומס ובמקור. את מערכת הממיר ניתן לתאר מבחינה סכמטית (איור 1.7) כמערכת המתחלקת לדרגת הספק ממותגת וליחידת בקרה, בעלת 2 כניסות (Power input, Reference) ויציאה בודדת (Power output). במערכת זו מוגדרים שני סוגים של משוברים: מהמקור לבקרה (Feedforward) ומהמוצא לבקרה (Feedback). במקרה של משוּב בודד נהוג לקרוא למשוּב בפשטות Feedback.



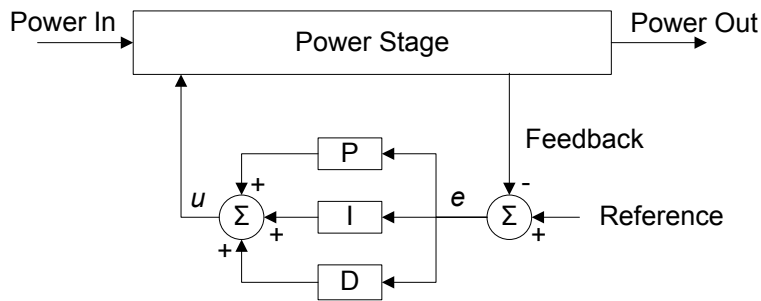
איור 7.1 – מבנה סכמטי של מערכת מבוססת מממיר ממותג מבוקר

אחד הבקרים הפופולריים והפשוטים הינו בקר PID (Proportional-Integral-Derivative), סכימת בלוקים של הבקר נתונה באיור 1.8. בקר זה מורכב מסכום של שלוש פונקציות המופעלות על אות השגיאה ( $e$ ) המוגדר ב- (10) כהפרש בין אות הייחוס ( $reference$ ) לאות המשוּב ( $feedback$ ). לכל פונקציה של הבקר יש את הקבוע שלה (11):  $K_P$  קבוע הפונקציה הפרופורציונלית (P) אשר מתחשבת בשגיאה הנוכחית,  $K_I$  קבוע הפונקציה

האינטגרלית (I) אשר לוקחת בחשבון את סך כל השגיאות שקראו עד עכשיו,  $K_D$  קבוע הפונקציה הדיפרנציאלית (D) החוזה את השגיאה העתידית על בסיס שינוי השגיאה הנוכחית. קביעת קבוע מסוים ל-0 מבטל את תרומת הפונקציה השייכת לאותו קבוע.

$$e = \text{reference} - \text{feedback} \quad (10)$$

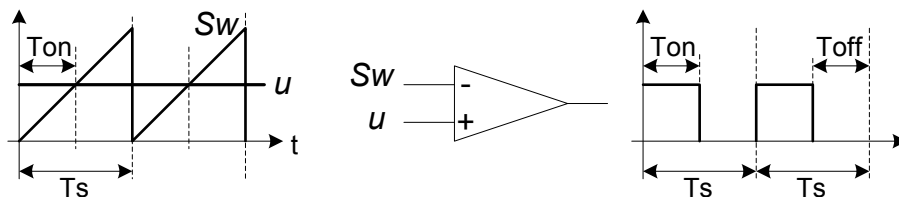
$$u = K_P e + K_I \int_0^t e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (11)$$



איור 8.1 – מבנה סכמטי של ממיר (Power Stage) המבוקר ע"י בקר PID

אות הבקרה ( $u$ ) מאופן ע"י גל נושא בתדר המיתוג של הממיר לקבלת אות בינארי השולט במצב המתג/ים בממיר. אחד האפנונים המוכרים הוא אפנון רוחב דופק (PWM), בו תדר המיתוג קבוע והבקרה מתבצעת ע"י שינוי רוחב הפולס (זמן ההולכה של המתג/ים). הפולסים נוצרים מתוך השוואת אות הבקרה לשן מסור (איור 9.1). היחס בין זמן ההולכה ( $t_{on}$ ) לזמן המחזור ( $T_s$ ) מוגדר כ- $D$  duty cycle:

$$.D = t_{on}/T_s \quad (12)$$



איור 9.1 – מבנה סכמטי של בקר PWM הבנוי ממשווה אשר בכניסתו אות הבקרה ( $u$ ) המשווה לשן מסור ( $Sw$ ) ובמוצאו אות בינארי בתדר קבוע ורוחב פולס משתנה.

את הבקרה ניתן לממש בצורה אנלוגית או דיגיטלית. בקרה אנלוגית מבוססת על מגברי שרת כאשר מעגל הפריפריה קובע את אופי המשוב שהן וריאציות של בקר PID. בקרה דיגיטלית מבוססת בעיקרה על מיקרו-בקרים. בבקרה דיגיטלית הפרמטרים המבוקרים נדגמים באמצעות A/D (Analog to Digital converter). הבקרה

ממומשת בקוד על בסיס משוואות מתימטיות המתארות את הקשרים בין פרמטר מבוקר לאות הבקרה. היתרון של בקרה דיגיטלית הוא בגמישות המתבטאת במגוון גדול יותר של בקרות ובכך שניתן לקבוע בקרות שונות לאותו ממיר בהתאם למצב העבודה. לדוגמא ניתן להשתמש בבקרה אחת למצב מעבר ובבקרה אחרת למצב היציב. החסרון של בקרה דיגיטלית הוא ברזולוציה המוגבלת התלויה בקצב הדגימה, בקוונטיזציה שעובר האות הדגום (רזולוציה של A/D) ובמהירות העבודה של המיקרו-בקר. ההבדל בתכנון בקרה אנלוגית לבקרה דיגיטלית הוא בכך שהבקרה האנלוגית מתבצעת בזמן רציף ואילו בקרה דיגיטלית בזמן בדיד. את התכנון של הבקרה דיגיטלית ניתן לבצע ישירות במישור הבדיד (Z) או במישור רציף (s) ואת ההמרה למישור הבדיד לבצע במועד מאוחר יותר בהתאם לתדר הדגימה.

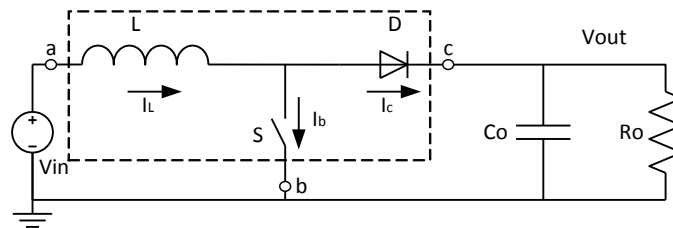
המשוב מתוכנן עבור נקודת עבודה ספציפית (מתח מוצא, מתח כניסה ו-duty cycle), סביב נקודה זו מתבצעת ליניאריזציה כך שהמשוב נסגר על תגובת המעגל לאות קטן סביב נקודת העבודה. במקרה שבו המערכת עובדת במספר נקודות עבודה יש לוודא שהמשוב שתוכנן יוצר מערכת יציבה בכל הטווח על פי קריטריון נייקוויסט הקובע שכדי שהמערכת תהיה יציבה הקטבים של המערכת צריכים להיות בחצי השמאלי של המישור המרוכב. השיקולים בסגירת המשוב מעבר לשמירת המערכת יציבה הם: תגובה דינאמית טובה של המערכת הדורשת סגירת משוב בתדר מספיק גבוה ושגיאה השואפת ל-0 במצב היציב. הדורשת שהגבר המשוב ב-DC יהיה גדול. את פונקציית התמסורת של המערכת בחוג סגור ( $A_{CL}(s)$ ) מחלצים מאיור 1.8:

$$A_{CL}(s) = \frac{A_{OL}(s)}{1 + \beta(s)A_{OL}(s)} \quad (13)$$

כאשר  $A_{OL}(s)$  היא פונקציית התמסורת של דרגת ההספק ללא בקרה (open loop) ו- $\beta(s)$  פונקציית התמסורת של המשוב (הבקר והאפנן).

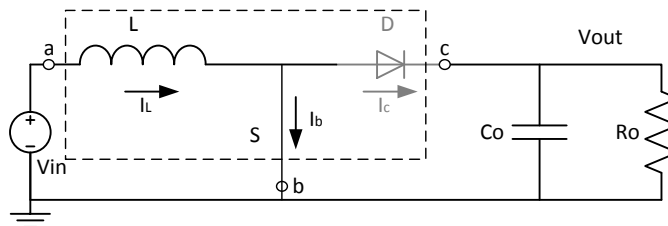
ההגדרה של פונקציית תמסורת נתונה עבור מערכות ליניאריות קבועות בזמן (LTI). ממיר ממותג הינו מעגל לא ליניארי לכן את פונקציית התמסורת בחוג פתוח לא ניתן לקבל בצורה ישירה (straight forward). אחת השיטות לניתוח ממירים ממותגים וחילוץ פונקציית התמסורת הינה שיטת מעגל ממוצע [23]. בשיטה זו ממדלים את החלק המתמג של המעגל על פי עיקרון זרמים ומתחים ממוצעים של מחזור מיתוג כך שההתנהגות האופיינית של הממיר בתדר נמוך נשמרת. כלומר בשיטה זו לא ניתן לראות את אותות המעגל בתוך מחזור

המיתוג אלא רק את ההתנהגות הכללית של הממיר. לשיטה זו מספר יתרונות: הניתוח האנליטי קל ומהיר והיא חסכונית בכוח העיבוד הדרוש לביצוע סימולציות המעגל. השיטה מודגמת כאן על ממיר מעלה מתח (BOOST) כאשר הפרמטר המבוקר הוא זרם הכניסה והנחת העבודה היא שהמעגל פועל במצב של זרם רציף (Continuous Current Mode). היחידה המתמתגת בממיר זה מסומנת באזור מקווקוו כאשר מתגי הממיר הם המפסק והדיודה.

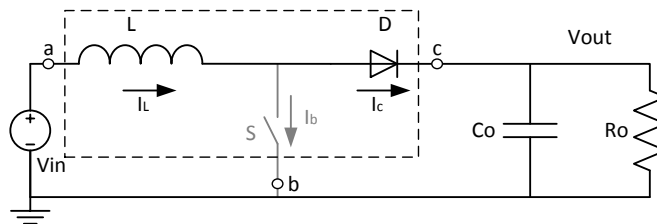


איור 10.1 – ממיר מעלה מתח בסיסי

למעגל קיימים שני מצבי פעולה לפי מצב המתג S מוליך ( $t_{on}$ ) ולא מוליך ( $t_{off}$ ). בכל תת מחזור מדובר במעגל ליניארי. בזמן  $t_{on}$  (איור 1.11) הדיודה D נמצאת בממתח אחורי כך שבעצם קיימים שני מעגלים נפרדים: המקור המטעין את סליל הכניסה וקבל המוצא הנפרק אל העומס. בזמן  $t_{off}$  (איור 1.12) בו המתג אינו מוליך זרם הסליל זורם דרך הדיודה אל המוצא ופורק את האנרגיה שנאגרה בו אל העומס ולקיבול המוצא.



איור 11.1 – תת מחזור  $t_{on}$  בו מתג S מוליך



איור 12.1 – תת מחזור  $t_{off}$  בו מתג S אינו מוליך

משני תתי מעגלים אלו ניתן לראות שהזרם דרך הסליל רציף במהלך מחזור המיתוג והשינוי בזרם במחזור הוא פונקציה של המתח הממוצע על הסליל ( $\bar{E}_L$ ) באותו המחזור:

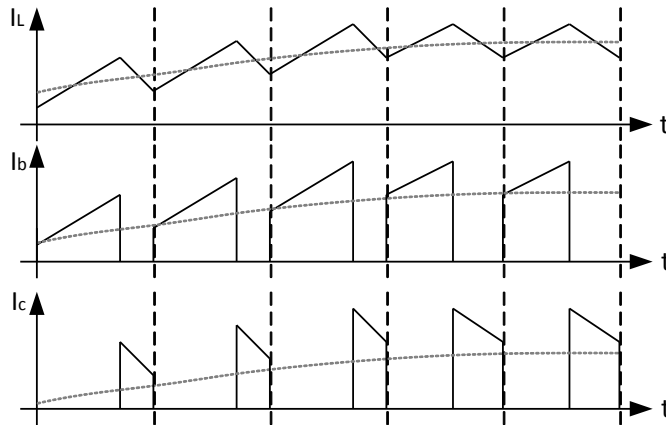
$$\bar{E}_L = V_{in}D + (V_{in} - V_{out})(1 - D) = V_{in} - V_{out}(1 - D) \quad (14)$$

ואילו הזרמים דרך ההדקים b ו-c של יחידת המיתוג אינם רציפים והזרמים הממוצעים דרכם הינם פונקציה של הזרם הממוצע בסליל וה-duty cycle:

$$\bar{I}_b = \bar{I}_L D \tag{15}$$

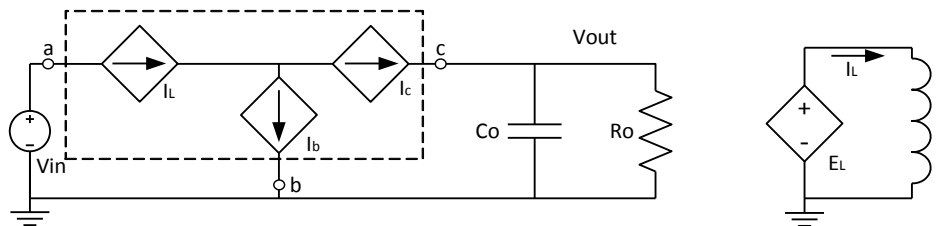
$$\bar{I}_c = \bar{I}_L (1 - D) \tag{16}$$

שלושת הזרמים מוצגים באיור 1.13 כאשר הקו השלם הוא האות האמיתי ואילו הקו המקווקוו הוא האות הממוצע:



איור 1.13 – הזרמים בהדקים של היחידה המתמג (זרמים אמיתיים וזרמים ממוצעים)

הממיר מגיע למצב היציב כאשר שינוי הזרם הממוצע על הסליל הינו 0. מידול הרשת המתמגת במקורות זרם ממוצעים לפי המשוואות המתמטיות הנתונות נותן את המעגל השקול של הממיר (איור 1.14). כאשר זרם הסליל נתון באמצעות מעגל עזר בו הסליל מחובר במקביל למתח הממוצע המופעל עליו.



איור 1.14 – מודל ממוצע של ממיר מעלה מתח

ניתוח מעגל הסליל שהינו מעגל ליניארי מסדר ראשון נותן את פונקציית התמסורת לאות קטן של הממיר בחוג פתוח עבור נקודת עבודה התלויה במתח המוצא:

$$A_{OL}(s) \triangleq \frac{i_L}{d} = \frac{V_{out}}{sL} \tag{17}$$

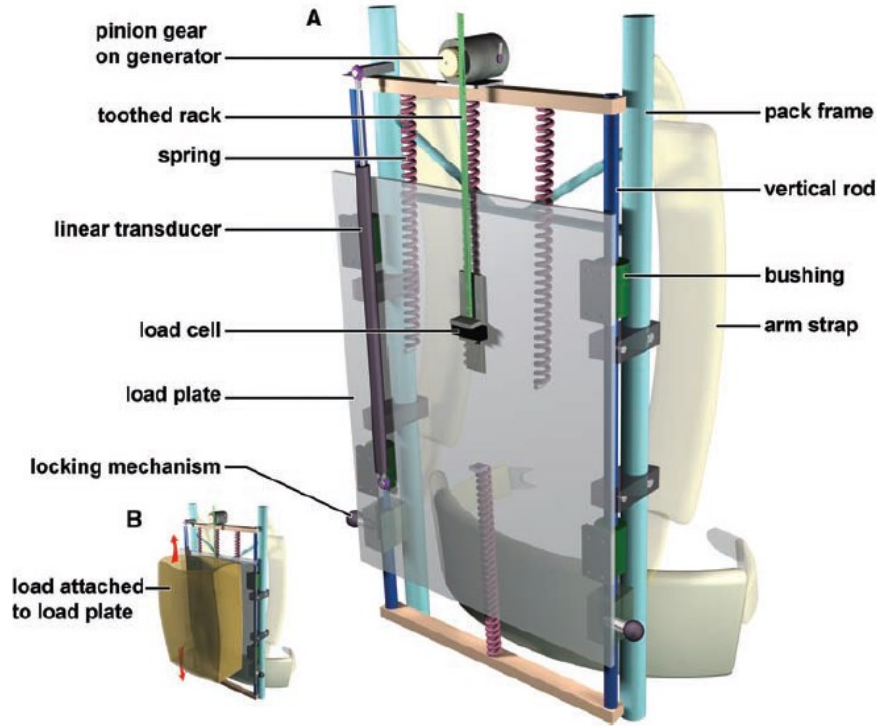
במחקר זה נעשה שימוש בבקרה דיגיטלית, המשוב הרצוי נמצא תחילה במישור התדר הרציף ורק לאחר מכן עבר המרה למישור הבדיד. האפנון בו נעשה שימוש הינו PWM דיגיטלי (DPWM). ההבדלים בין האפנון האנלוגי שתואר כאן לדיגיטלי הם: אות שן המסור מוחלף במונה הסופר פולסים של שעון המיקרו-בקר, במקום משווה בודד קיימים שניים - אחד עבור תדר המיתוג והשני עבור רוחב הפולס.

## 1.8 עבודות קודמות – ממירי הספק לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית

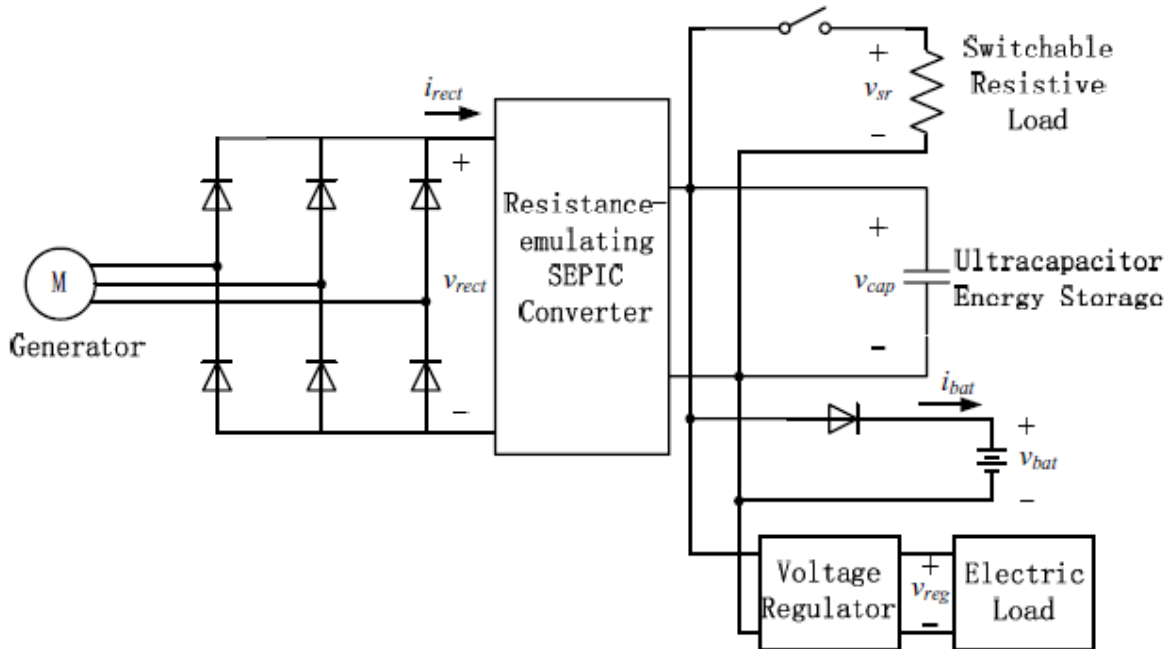
באפליקציה שבה המקור פועם עם מתחי כניסה המשתנים מ-0v עד 14v וצורך בטווח מתחי עבודה רחב (החל ממתחים כמה שיותר קרובי ל-0) מתאימות שתי טופולוגיות של ממירים ממותגים לתפקיד הממיר: מעלה מתח ומוריד-מעלה מתח. בסקר הספרות שבוצע לא נמצאו הצעות לממירים עבור אפליקציה זו. לכן, ההתמקדות הינה על מערכות לניהול הספק מאפליקציות דומות.

טופולוגית מוריד-מעלה מתח הינה הופכת מופע בקונפיגורציה הבסיסית שלה דבר שאינו מומלץ באפליקציה זו עקב סיבוכיות מעגל הבקרה. כדי שהממיר יהיה ללא היפוך מופע יש להשתמש בגשר טרנזיסטורים מלא המסבך גם את הבקרה וגם מוסיף רכיבים למערכת אשר מורידים את הנצילות. טופולוגית מוריד-מעלה מתח נוספת שנבחנה הינה טופולוגית SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter). ב-[24] הוצע אופן תכנון של מערכת לניהול הספק המבוססת ממיר SEPIC עבור מערכת לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממרכז מסה. לקצירת אנרגיה זו החוקרים השתמשו בתיק גב אשר נותק הקשר הקשיח בינו לבין גוף האדם והוכנסה מערכת קפיצית כך שבעת הליכת המשתמש התיק נע בצורה תנודתית מעלה ומטה, תנודה זו הומרה לתנועה סיבובית במהירות גבוה והניע גנראטור (איור 1.15). מערכת לניהול הספק (איור 1.16) הכתיבה זרם בכניסה לממיר כך שלגנראטור ייראה עומס התנגדותי. האנרגיה שנקצרה נאגרה ב-super-capacitor, ממנו נטענה סוללת Li-Ion ונלקח ההספק למעגל הבקרה של האלקטרוניקה כך שהמערכת הינה אוטונומית. המערכת שהוצגה במחקר הציגה תוצאות של כ-80% נצילות בעת קצירה של כ-7.4W עבור תיק השוקל 36Kg עם תנודות בתדר של 2Hz. אופן התכנון של המערכת לניהול הספק מתאים גם לאפליקציה של קצירת אנרגיה ממפרק הברך אבל באפליקציה תיק גב מדובר במקור תנודתי בתדר נמוך אך קבוע, לעומתו באפליקציית הברך מדובר במקור פועם. לכן קיימת בעייתיות בשימוש בממיר מטופולוגיית SEPIC. היתרון הבולט של שימוש במוריד-מעלה מתח הינו שניתן לקבוע את מתח

המוצא למתחי פעולה של super-capacitors אשר קטנים יותר, קלים יותר ובעלי צפיפות אנרגטית גדולה יותר מקבלים רגילים. אך טופולוגיה זו נפסלה עקב סיבוכיות הבקרה.



איור 15.1 – מערכת לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממרכז מסה מבוססת תיק גב [22]



איור 16.1 – מבנה מערכת לניהול הספק לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממרכז מסה [24]

טופולוגית מעלה מתח, הינה פשוטה, רובסטית ומיקום הסליל בכניסה לממיר נותן לה מאפיינים טבעיים של מקור זרם. החסרון היחיד של טופולוגיה זו היא מגבלת הגבר המתח בממיר המעשי העומדת על 7-8. לכן, מתח העבודה המקסימלי במוצא הממיר קובע את המתח בכניסה לממיר ממנו ניתן לעבוד. מגבלה נוספת של טופולוגית מעלה מתח הוא שמתח המוצא חייב להיות יותר גבוה ממתח הכניסה בכל רגע נתון. שני מגבלות אלו קובעות את טווח המתחים במוצא הממיר. את טופולוגיית מעלה מתח ניתן לממש במספר דרכים. אחת מהן הינה שילובה במיישר תלת פאזי [25,26,27,28], היתרון הבולט בגישה זו היא הקטנת כמות רכיבים טוריים במעגל שאמורה להעלות את נצילות המערכת. בגישה זו משתמשים בסלילים של הגנראטור בתור הסלילים של הממיר אך במחקר זה לסלילי הגנראטור ישנה התנגדות פנימית מאוד גבוה ביחס להתנגדות של סליל המתאים לממיר ממותג כך שדבר זה אינו יתרון. בנוסף לכך, ידוע שהגנראטור הקיים במערכת הנוכחית יוחלף בעתיד כאשר המערכת המכאנית תשודרג. לכן כדי לשמור על תאימות מירבית עבור מכשירי קצירה עתידיים נעדיף ממיר אשר תכונותיו אינן תלויות בגודל סליל הפאזה של הגנראטור.

היות והמחקר של קצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך נמצא עדיין בחיתוליו וצפויים שינויים משמעותיים הן למערכת המכאנית והן לגנראטור הוחלט במחקר זה להתבסס על ממיר מעלה מתח פשוט להכתבת נקודת העבודה. השיקול העיקרי בבחירת טופולוגיה זו מבין שאר הטופולוגיות המתאימות הוא הרובסטיות של הממיר וקלות הבקרה שלו.

## 1.9 מטרת המחקר

מטרת המחקר הינו חקר מערכת לניהול הספק לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית. המערכת המוצעת מבוססת ממיר ממותג אשר מכתוב פרופיל קצירה למכונה אלקטרו-מגנטית ליצירת בלימה גנרטיבית. כמו כן, מוצע אלגוריתם לקצירת מקסימום ההספק תוך עזרה מקסימאלית למשתמש במהלך הליכה (קצירה אופטימאלית). האנרגיה הנקצרת נאגרת בסוללה. המחקר מתמקד בקצירת אנרגיה שלילית מהליכה של בני אדם, ספציפית מתנועת מפרק הברך, תוך הפרעה מינימלית לתנועה. במחקר נעשה שימוש במכשיר הבנוי מברכיה אורתופדית, אשר ממירה תנועה קווית של כיפוף הברך לתנועה סיבובית המסובבת מכונה אלקטרו-מגנטית.

החידושים של המחקר הינם: מידול דינמי של מערכת קצירת אנרגיה ביו-מכאנית המאפשרת תכנון טוב יותר של מערכת הקצירה (בנושא נכתב מאמר [29] אשר פורסם בכנס ECCE שהוא אחד הכנסים היוקרתיים של

ארגון IEEE העולמי בתחום אלקטרוניקת הספק), קצירה באמצעות פרופיל הניתן לתכנות עם משוב ביולוגי ואלגוריתם לעקיבה אחר נקודת קצירה אופטימאלית (בנושאים אלו נכתב מאמר [30] אשר התקבל לפרסום בכנס APEC שהוא הכנס היוקרתי ביותר של ארגון IEEE העולמי בתחום אלקטרוניקת הספק).

האפליקציות בהן ניתן להשתמש במערכת זו כוללות:

- פרוטזות אקטיביות של גפות תחתונות – מערכת זו תאריך את הזמנים בין ההטענות של הפרוטזות ויאפשר לנכים חופשיות רבה יותר בתנועה במהלך היום.
- חיילים ומטיילים – יאפשר הקטנת כמות הסוללות הנסחבות עבור המכשירים הניידים בהם נעשה שימוש בשטח.

### 1.10 שיטות המחקר

פרויקט קצירת אנרגיה מהברך הינו מחקר מולטי דיסצפלינרי בו שותפות שלוש מחלקות כאשר חלוקת האחריות בין המחלקות היא כדלקמן:

- הנדסת תעשייה וניהול – הובלת הפרויקט, חקירת פרופיל הליכה והשפעות הקצירה.
- הנדסת מכונות – תכן מכאני, ייצור ואחזקתו
- הנדסת חשמל – מידול, תכנון ובנייה של המערכת לניהול הספק

המחקר בתוך הנדסת חשמל מתפרס על פני מספר תחומים: אלקטרוניקת הספק, מכונות חשמל, בקרה, תכנות ואלגוריתמיקה. עבור כל אחד ממטרות המחקר נעשה שימוש בכלים ממוחשבים המתאימים לאותה מטרה:

- MATLAB – תוכנה מתמטית המשמשת לביצוע אנליזה של נתונים שנדגמו במהלך ניסויים, תכנון בקרה, בדיקה של אלגוריתמים, ומימוש צד בית במערכת הכללית אשר מאפשרת לחוקרים לקבל משוב ממערכת הקצירה ולהעביר פקודות תוך כדי ביצוע ניסויים.
- SPICE – קבוצת תוכנות סימולציה חשמליות המכילה מספר רב של מודלים לרכיבים ממשיים ובכך מאפשרות קבלת תוצאות מדויקות בעת סימולציות של מעגלים. בתוכנת PSPICE נעשה שימוש לצורך בניית מודל דינאמי של המערכת המכאנית החשמלית המלאה תוך שימוש באנלוגיה אלקטרו-מכאנית

בשלב הראשון של המחקר. בתוכנת LTSPICE נעשה שימוש לבדיקת התאמה של רכיבים מחברת Linear ולתכנון מעגלי העזר שלהם.

- PSIM – תוכנת סימולציה חשמלית אשר שימשה לתכנון מערכת לניהול הספק, יתרונה של תוכנה זו על פני תוכנות מסוג SPICE זה שהיא מאפשרת לשלב בין תכנון חשמלי ותכנון בקרה (כתיבת קוד). חסרון התוכנה הוא בכך שאין בה ספריות מודלים של רכיבים ממשיים כך שאת כל הרכיבים יש למדל בצורה עצמאית או להסתפק ברכיבים אידיאליים.
- MPLAB – תוכנת קידוד, בתוכנה זו נעשה שימוש כדי לכתוב את הקוד בשפת C מותאמת למיקרו-בקרים של חברת microchip.
- ARDUINO – תוכנת קידוד, בתוכנה זו נעשה שימוש לכתיבת קוד בשפת C מותאמת למיקרו-בקרים של חברת ARDUINO.

העבודה במחקר זה מתחלקת לשני חלקים: מחקרי והנדסי. מחקרי עוסק במידול דינאמי של המערכת (פרק 2) וקצירה אופטימאלית (פרק 3). הנדסי עוסק בתכנון, בנייה (פרקים 4-5) ובדיקה של שני אבות טיפוס לאישוש המידול המוצע ולהוכחת היתכנות של קצירה אופטימאלית (פרק 6). אב טיפוס ראשון הינה מערכת ניהול הספק דור א' (פרק 4) אשר מחברת/מנתקת עומס התנגדותי טהור בהתאם לזיהוי מקטעי עבודה שלילית. במערכת זו נעשה שימוש כדי לאמת את מידול המערכת המוצע ולבדיקת גישות שונות לזיהוי מקטעי עבודה שלילית. באמצעות המודל הדינאמי תוכנן אב טיפוס שני והוא מערכת ניהול הספק דור ב' (פרק 5) המבוססת על ממיר ממותג ועל גישת קצירה אופטימאלית.

## 2 מידול מערכת קצירת אנרגיה ביו-מכאנית [29]

### 2.1 הקדמה

מידול המערכת האלקטרו-מכאנית לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית נעשה לצורך הקמת תשתית לתכנון מערכות לניהול הספק. מתוך הבנה שהמקור הינו דינאמי המודל של המערכת חייב לתאר את התגובה הדינאמית של המערכת. המודל המוצג כאן הוא ראשון מסוגו – ההתייחסות בספרות בהקשר של מערכות קצירת אנרגיה ממקורות ביו-מכאניים הינה אך ורק על בסיס מצב יציב. מידול מלא של מערכת קצירת אנרגיה (כולל מרכיביה המכאניים) מאפשר בחינה מהירה וקלה לא רק של מעגלים חשמליים אלה גם: הערכת מומנטים מכאניים המופעלים על המשתמש שהגישה אליהם במהלך ניסויים מסובכת, ניתוח תוצאות ניסויים ובחינה נוחה של אלגוריתמים לזיהוי מקטעי עבודה שלילית. המודל המוצג בפרק זה מתאר את מערכת לניהול הספק דור א'. השלמת המודל כך שיכלול את המערכת לניהול הספק דור ב' נעשה בפרק 5 בו מתואר אופן התכנון של המערכת. הפרק מציג את: גישת המידול, מודל הגנראטור ומודל המערכת המלאה עם עומס התנגדותי תלת פאזי. הוכחת שני המודלים מוצג בפרק 6. המעגלים בפרק זה הינם מעגלים סכמטיים מופשטים לצורך קריאה נוחה – מקורות המתח והזרם התלויים המצויים בסכימות מוחלפים בסימולציה ברכיבי EVALU ו-GVALUE בהתאמה. את המעגלים המלאים ניתן למצוא בנספח 10.1.

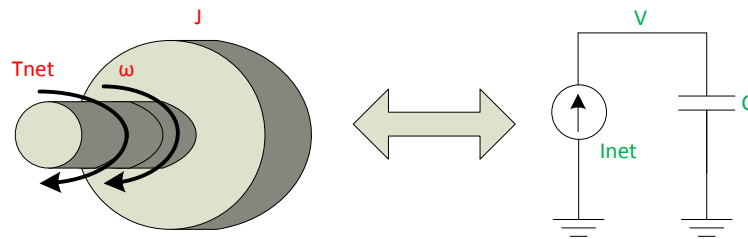
### 2.2 גישת מידול

מערכת קצירת האנרגיה המתוארת במחקר זה הינה מערכת אלקטרו-מכאנית. קיימות מספר גישות למידול מערכת מסוג זה. שתי גישות שנלקחו בחשבו הן:

- מידול ישיר בו ממדלים את החלקים המכאניים באמצעים מכאניים ואת החשמליים באמצעים חשמליים.
- מידול כלל המערכת באמצעות מעגלים חשמליים ע"י המרת רכיבים מכאניים לרכיבים חשמליים אקוויולנטיים תוך שימוש באנלוגיה אלקטרו-מכאנית.

למרות שקיימים סימולטורים התומכים בגישה הישירה הוחלט שהמידול ייתבצע באמצעות מעגלים חשמליים כדי שתהיה התאמה מלאה לסימולטורים חשמליים. הסיבות העיקריות לבחירת גישת מידול זו הן שההתמקדות במחקר זה חשמלית וכן לצורך למידת השפעות כל אחד ממרכיבי המערכת ועיצובה על פי רצונו.

מידול המרכיבים המכאניים במערכת נעשה לפי מודל קלאסי המתבסס על רכיבים אלקטרוניים אקוויולנטיים. דוגמא לאנלוגיה ניתן לראות באיור 2.1, כאשר מצד שמאל קיימת מסה מכאנית בעלת מקדם אינרציה ( $J$ ) המסתובבת סביב ציר שסכום המומנטים המופעל עליו ( $T_{net}$ ) גורם להאצה/האטה זוויתית ( $d\omega/dt$ ) של המסה. התנהגות זהה מציג המעגל החשמלי המצוייר מצד ימין באיור כאשר מקור הזרם ( $I_{net}$ ) מתאר את סכום המומנטים, הקבל ( $C$ ) את מקדם האינרציה והמתח ( $V$ ) את מהירות הסיבוב. האנלוגיה גם נתונה בקשר המתואר ע"י משוואה (18). הקשר בין המשתנים השונים ויחידותיהם מסוכם בטבלה 1.2. כדי להקל על המעקב אחר המקור של המשתנים השונים בפרק זה נעשה שימוש בצבעי הקוד הבאים: משתנים מכאניים מסומנים באדום, משתנים חשמליים המדמים את המשתנים המכאניים מסומנים בירוק, ומשתנים חשמליים מסומנים בכחול.



איור 1.2 – מעגל חשמלי אקוויולנטי (מימין) למערכת מכאנית (משמאל)

$$T_{net} = J \frac{d\omega}{dt} \Leftrightarrow I_{net} = C \frac{dV}{dt} \quad (18)$$

טבלה 1.2 – טבלה המסכמת את הקשר בין משתנים ויחידות חשמליות למכאניות

מכאני		חשמלי	
משתנה	יחידות	משתנה	יחידות
$\omega$	rad/sec	$V$	V
$T$	Nm	$I$	A
$J$	$\text{Kgm}^2$	$C$	F

להדגמת גישת המידול נעשה שימוש בסימולטור SPICE של חברת Orcad בגירסא v16.2. סימולטור זה

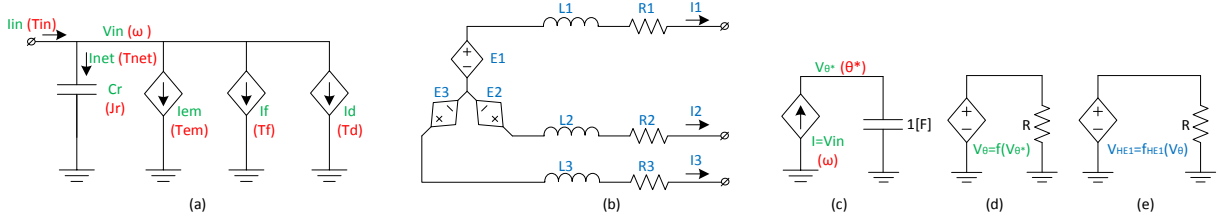
נבחר להדגמת הגישה עקב היכרות קודמת עם התוכנה אך כל תוכנת סימולציה אשר יש לה מקורות תלויים יכול

למש משמאל זה.

## 2.3 מידול הגנראטור

הגנראטור שנמצא בשימוש של המערכת הינו גנרטור תלת פאזי שהוגדר ע"י היצרן כ-BLDC ונמכר לשימוש

כמונע. המודל של גנראטור תלת פאזי מחולק למספר חלקים (איור 4.2):



איור 2.2 – מעגל סכמתי של מודל גנראטור תלת פאזי (a) מעגל אקוויולנטי של הרוטור, (b) מודל הסטאטור, (c) מעגל עזר למציאת זווית מכאנית של הרוטור, (d) מעגל עזר למציאת זווית חשמלית של הרוטור, (e) מעגל לדוגמא המתאר את התנהגות חיישי Hall Effect.

מעגל (a) מתאר את המעגל האקוויולנטי של הרוטור שהינו החלק המכאני המסתובב בגנראטור שמודל לפי שיטת המידול שתוארה בסעיף הקודם לפיה מקורות זרם מייצגים את הכוחות השונים הפועלים על ציר הסיבוב והמחוברים במקביל לקבל יחיד ( $C_r$ ) המייצג את מקדם האינרציה של הרוטור. הכוחות השונים הפועלים על הציר הינם: המומנט החיצוני שמופעל על הציר ( $T_{in}$ ), המומנט המושרה ע"י הגנראטור ( $T_{em}$ ) אשר הינו פונקציה של מיקום הרוטור והזרם בפאזה, חיכוך שאנו מניחים כקבוע ( $T_f$ ) ומומנט המדמה את הפסדי הליבה ( $T_d$ ) אשר הינם תלויי מהירות סיבוב. הביטויים עבור מומנטים אלו נתונים במשוואות הבאות:

$$T_{net} = T_{in} - T_{em} - T_d - T_f \rightarrow I_{net} = I_{in} - I_{em} - I_d - I_f \quad (19)$$

$$T_d = B\omega \rightarrow I_d = BV_{in} \quad (20)$$

$$T_{em} = \sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N K_t I_i \sin\left(p\theta - \frac{(i-1)2\pi}{N}\right) \rightarrow I_{em} = K_t \sum_{i=1}^N I_i \sin\left(V_\theta - \frac{(i-1)2\pi}{N}\right) \quad (21)$$

כאשר  $\omega$  הינה תדירות הציר;  $V_{in}$  הינו המתח מייצג את תדירות הציר;  $B$  הינו הקבוע של הפסדי ליבה;  $i$  הינו האינדקס של הפאזה;  $N$  הינו המספר של הפאזות;  $T_i$  הינו המומנט האלקטרו-מגנטי של פאזה  $i$ ;  $K_t$  הינו קבוע המומנט;  $I_i$  הינו הזרם בפאזה  $i$ ;  $\theta$  הינה הזווית המכאנית של הציר;  $p$  הינו מספר זוגות הקטבים ברוטור;  $V_\theta$  הינו מתח המייצג את הזווית החשמלית של הציר;  $I_{em}$  הינו הזרם המייצג את המומנט המושרה ע"י הגנראטור;  $I_{in}$

הינו הזרם המייצג את המומנט המכאני החיצוני המופעל על הציר;  $I_d$  הינו הזרם המייצג את הפסדי הליבה;  $I_f$  הינו הזרם המייצג את החיכוך.

מעגל (b) ממדל את הסטאטור של הגנראטור. הסטאטור בעיקרו מורכב ממספר סלילים כמספר הפאזות. במקרה זה הפאזות מחוברות בחיבור כוכב (Y). כל פאזה ניתן לייצג ע"י מקור מתח סינוסוידלי תלוי  $(E_i)$ , השראות  $(L_i)$  והתנגדות  $(R_i)$ . מקור המתח המבוטא ב-(22) מייצג את המתח המושרה בסליל הפאזה (BEMF – Back Electro Motive Force) כאשר הוא נמצא בשדה מגנטי משתנה, גודלו ותידרו תלויים במהירות הסיבוב של הציר. ההשראות וההתנגדות ממדלים את המאפיינים של סליל הפאזה.

$$E_i = K_e \omega \sin \left( p\theta - \frac{(i-1)2\pi}{N} \right) \rightarrow E_i = K_e V_{in} \sin \left( V_\theta - \frac{(i-1)2\pi}{N} \right) \quad (22)$$

כאשר  $(K_e)$  הינו קבוע ה-BEMF.

המקורות התלויים המייצגים את מתחי הפאזה והמומנט המושרה תלויים במיקום הרוטור אשר אינו זמין במודל החשמלי (a,b) ולכן את הזווית מושגת ע"י אינטגרציה על מתח  $V_{in}$  אשר מייצג את תדירות הסיבוב של הציר המכאני באמצעות המעגל (c). תוצר של מעגל זה הינו מתח  $(V_{\theta^*})$  אשר מייצג את הזווית המכאנית של הציר:

$$\theta = \int_0^t \omega dt \rightarrow V_{\theta^*} = \int_0^t V_{in} dt \quad (23)$$

על מנת לקבל את הזווית החשמלית של הציר (המתח  $V_\theta$ ) נעשה שימוש במעגל (d) אשר מימש באמצעות מקור תלוי את משוואה (24) המכפילה את המתח המייצג את הזווית המכאנית של הציר במספר הקטבים  $(p)$  ועושה מודולו של  $[0, 2\pi]$ .

$$V_\theta = pV_{\theta^*} - 2\pi \left\lfloor \frac{pV_{\theta^*}}{2\pi} \right\rfloor \quad (24)$$

במעגלים אלו המתח שהינו בוולטים מייצג את הזווית ברדיאנים וההתנגדות במעגל העזר (d) הינה התנגדות דמה עבור הסימולציה.

להשלמת המידול של הגנראטור משתמשים במעגל (e) כדי לדמות את האותות (איור 2.3) של חיישני Hall effect הנמצאים בתוך הגנראטור ואשר משמשים לבקרה של מיישר סינכרוני במוצא הגנראטור בשלב מאוחר יותר של

המחקר. בסימולציה האמיתית קיימים שלושה מעגלים אלו כדי לדמות כל אחד משלושת החיישנים והם ממשים את האותות לפי הזווית החשמלית של הרוטור באמצעות משפטי התנייה.

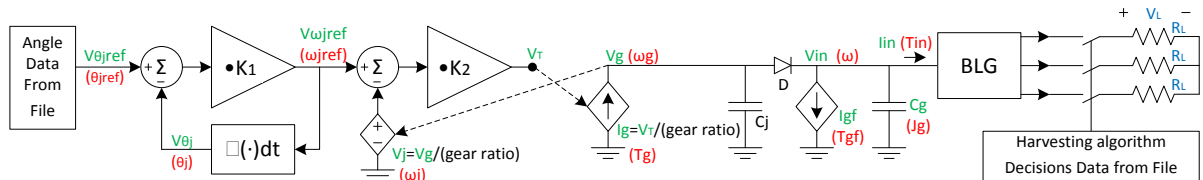
Rotor position	60	120	180	240	300	360
Hall sensor 1	1	1	1	0	0	0
Hall sensor 2	0	0	1	1	1	0
Hall sensor 3	1	0	0	0	1	1

איור 3.2 – אותות שלושת חיישני Hall effect מתוך ספר הדרכה של יצרן הגנראטור שבשימוש במחקר זה

המודל שתואר בסעיף זה הינו מודל בסיסי למכונה מסוג זה אך לצורך מחקר זה מודל זה נמצא מספק. המודל יכול לשמש גם לתיאור מנוע. כאשר השימוש במודל זה כגנראטור הוא מעורר באמצעות מומנט חיצוני המופעל על הציר (זרם חיצוני).

## 2.4 מידול של המערכת המלאה

המודל המלא של המערכת האלקטרו-מכאנית מובא באיור 2.4. הכניסות למודל הינם שני מדדים שנידגמו במהלך ניסויים שבוצעו על נסיינים אנושיים: זווית הברך והחלטות של האלגוריתם קצירה.



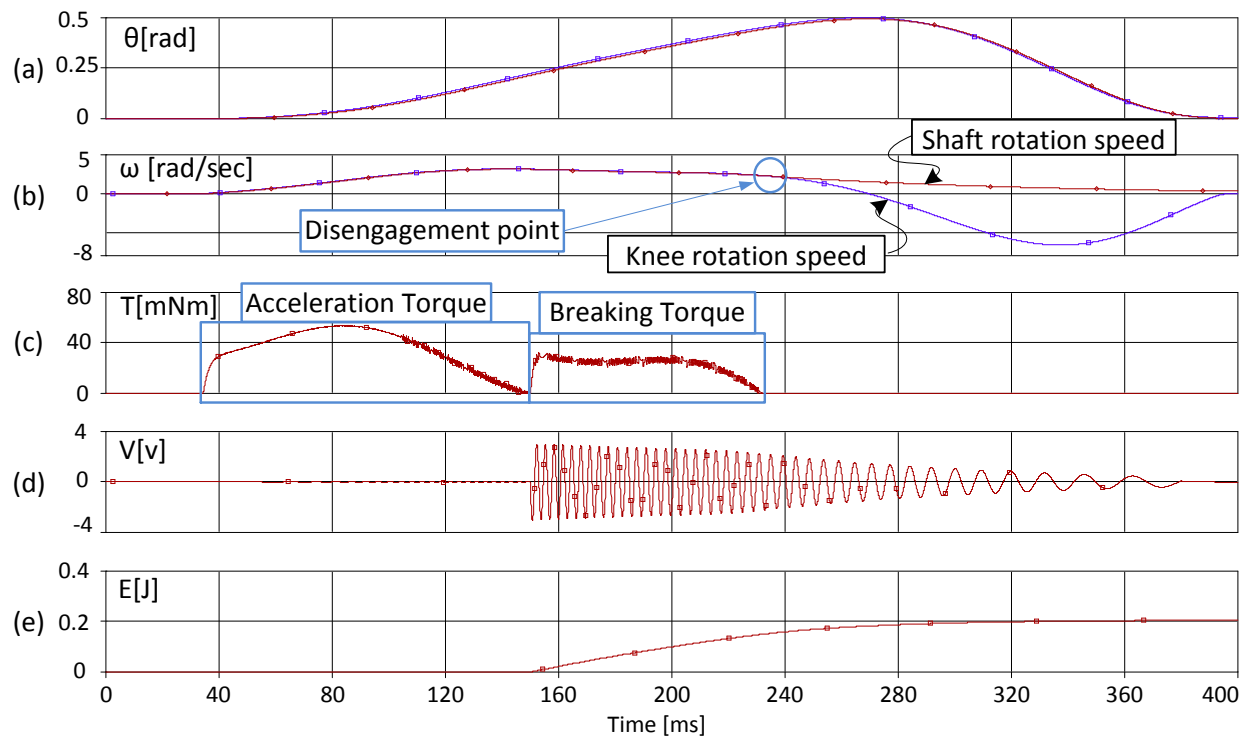
איור 4.2 – מעגל סכמתי של מודל המערכת המלאה

הפרופיל הזוויתי ( $V_{\theta ref}$ ) עובר דרך שתי זולאות בקרה משורשרות שהופכות אותו למומנט המופעל על ציר הגנראטור. זולאה ראשונה הופכת את הזווית למהירות זוויתית ( $V_{\omega ref}$ ). כיוון ששימוש בגוזר דיסקרטי יוצר רעשים הגזירה מתבצעת באמצעות חוג סגור עם אינטגרציה במשוב. הלולאה הינה מסדר ראשון וההגבר הנבחר עבורה  $K_1$  שווה ל-500. הלולאה השנייה יוצרת את המומנט המופעל על ציר הגנראטור אחרי הגיר אך לפני המצמד החד כיווני ( $I_g$ ). משוב הלולאה השנייה הינו מהירות המפרק ( $V_j$ ), גם לולאה זו הינה מסדר ראשון וההגבר  $K_2$  שווה ל-100, הנבחר כך שיביא את שגיאת העקיבה אחר המהירות הזוויתית תהיה זניחה. בצעד חריג פוצל מודל הגיר האמיתי לגיר אידיאלי הכלול במשוואות של המקורות התלויים בלולאה השניה לבין מומנט האינרציה של הגיר ( $C_g$ ) שהיצרן הגדיר כ-430nF והפסדיי החיכוך ( $I_{gf}$ ) שנמצאו במהלך כיוול הסימולציה להיות 1mA,

הנמצאים על ציר הגנראטור אחרי המצמד החד כיווני. עקב השימוש במצמד חד כיווני הממודל התנהגותית ע"י דיודה אידיאלית (D) המומנט שיוצרת הלולאה השנייה יכול אך ורק להאיץ את הגנראטור. לכן, תגובת הבקרה צריכה להיות מספיק מהירה ומספיק חזקה כדי לעקוב אחר הפרופיל הזוויתי אך לא חזקה מדי כיוון שבמקרה של overshoot לא ניתן לבצע תיקון. הקבל  $C_j$  הינו עומס דמה הנועד עבור ריצה תקינה של הסימולציה. המתח המתפתח על קבל זה ( $V_g$ ) הינו אקוויולנטי למהירות הזוויתית של הברך המשוקפת דרך הגיר. המומנט שלבסוף מופעל בכניסה לגנראטור ( $I_{in}$ ) מעורר את הבלוק BLG אשר מתאר את המודל של הגנראטור התלת פאזי שתואר ואומת בסעיפים הקודמים. חיבור/ניתוק העומס המחובר בחיבור כוכב "Y" ומורכב מנגדים מאוזנים ( $R_L$ ) מתבצע על פי אות החלטות האלגוריתם. הן הפרופיל הזוויתי והן אות החלטות האלגוריתם נשמרו בקבצי טקסט מסוג tab delimited והובאו לתוך הסימולציה על ידי מקורות מתח תלויים מסוג VPWL\_FILE.

## 2.5 יכולות הסימולציה

יכולות הסימולציה בתחומי הניתוח והעזרה בתכנון הינן רבות, איור 2.5 מציג חלק מיתרונות אלו:



איור 2.5 – הדגמת יכולות הסימולציה (a) פרופיל זוויתי שהוזן לסימולטור, (b) מהירות זוויתית של הברך, (c) המומנט בציר

הגנראטור, (d) מתח אחת הפאזות, (e) אינטגרל על האנרגיה שנקצרה

בדוגמא זו הוזן פרופיל זוויתי של חלק מהצעד שאותו מעוניינים לקצור ככניסה לסימולציה בכחול בגרף (a) ועליו באדום הוא אופן העקיבה של הסימולציה אחר פרופיל הייחוס. גרף (b) מראה את המהירות שהתפתחה בברך בכחול ובציר הגנראטור המשוקף לברך באדום, ניתן לשים לב להתאמה מלאה ביניהם עד לנקודה ההתנתקות (disengagement point) ב-230ms שבו מהירות הברך יורדת במהרה ומחליפה כיוון ואילו מהירות הגנראטור דועכת לאיטה. בנקודה זו הגיר והגנראטור נותקו מהברך ע"י המצמד החד כיווני והגנראטור המשיך להסתובב לפי האנרגיה שנאגרה במומנט האינרציה שלו. נקודה זו היא נקודה חשובה ביותר כיוון שמעבר לנקודה זו כל האנרגיה הנקצרת הינה אך ורק האנרגיה שנאגרה במומנט אינרציה של הגנראטור והגיר ולא נעשית בלימה של המשתמש. בניסוי ספציפי זה הגנראטור הואץ למהירותו המקסימלית ובערך ב-150ms הועמס באמצעות עומס תלת פאזי של נגדי  $2\Omega$ . גרף (c) מציג את המומנט המופעל על ציר הגנראטור על מנת לעקוב אחר הפרופיל הזוויתי בכניסה. ידיעת הצורה והעוצמה של המומנט הדרוש להאצת המערכת (החלק בין 50-150ms) התלוי אך ורק במומנט אינרציה של המערכת וקצב ההליכה מאפשר לבצע תיכנון מכאני נכון של המערכת כך שהמומנט שנדרש מהמשתמש בשלב שבו אין קצירה יהיה נמוך מספיק כדי שלא תיווצר הפרעה לפעילותו. דבר נוסף שהסימולציה מאפשרת הוא ביצוע אופטימיזציה על מיקום ועוצמה של הקצירה (החלק בין 150-230ms). לדוגמא עבור מערכת בעלת מומנט אינרציה גדול לא נרצה לבצע את הקצירה בזמן ההאצה כדי לא להעמיס על המשתמש עוד יותר לכן הקצירה תתבצעה בשלב מאוחר יותר. במקרה זה המומנט המקסימלי הדרוש להאצת הגנראטור הינו 60mNm בזמן שהמומנט המקסימלי בזמן הקצירה הינו 30mNm, מה שמשוקף לברך כמומנטים של 5.7Nm ושל 2.85Nm בהתאמה. בהתחשב בעובדה שהמומנטים הפועלים במפרק הברך הינם כ-15Nm [2], המומנט של הקצירה שהופעל הינו רק כ-1/5. גרף (d) מציג את המתח על העומס באחת הפאזות במוצא הגנראטור, קיומו של מתח במצביע על קיומה של הקצירה. מכך ניתן ללמוד שקיומה של הקצירה אחר נקודת הניתוק אינו אומר שקיימת בלימה של המשתמש שלשם מכוונים במחקר זה. מידיעת גודל העומס ההתנגדתי ושימוש בעוצמת המתח במוצא חושבה כמות האנרגיה שנקצרה בפאזה זו בצעד בודד – גרף (e). מתוך זה ניתן להסיק שהמערכת קצרה במהלך צעד בודד בשלושת הפאזות בשני הברכיים כ-1.2J. נתון זה תואם לניסויים שבוצעו.

## 2.6 סיכום ומסקנות

בפרק זה הוצגה גישת מידול שבו מערכת אלקטרו-מכאנית מודלה במודל דינאמי באמצעות סימולטור חשמלי. במקרה זה המימוש בוצע ע"י סימולטור SPICE אך ניתן להשתמש בכל סימולטור בעל מקורות תלויים. תוצאות הסימולציה של מודל זה תואמים את תוצאות הניסויים שבוצעו במכשיר. מודל זה הראה שהמומנט אינרציה של הגנראטור משחק תפקיד חשוב בהתנהגותה של המערכת לקצירת אנרגיה ושניתן להשתמש בו כדי לאגור אנרגיה באופן זמני. לדוגמא, ע"י השהיית שלב קצירת האנרגיה עד לאחר שלב ההאצה (איור 2.5) מקטין את המומנט שמרגיש המשתמש בהשוואה למקרה בו מתבצעת קצירה במקביל לשלב ההאצה. גישה זו מתאימה כאשר הגנראטור הינו בעל מומנט אינרציה יחסית גדול כמו במקרה זה. למרות ששימוש בגנראטור בעל מומנט אינרציה גדול יכול להביא לקצירת יותר אנרגיה הוא מגביל מבחינת גמישות פעולת המפרק עקב העמסה מכאנית בשלב ההאצה. לכן במקרה של הליכה במשטחים משתנים (במעבר בין הליכה במישור לירידה או עליה ולהיפך) ובמהירויות משתנות ישנה העדפה לגנראטורים בעלי מקדם אינרציה קטן יותר. המודל שהוצג כאן יכול לעזור באופטימיזציה של מצבי הפעולה.

בנוסף לשימוש במודל ללימוד האינטראקציה האלקטרו-מכאנית של מערכת הקצירה, המודל משמש לביצוע אופטימיזציה של המערכת לניהול הספק אשר חוצצת בין הגנראטור לצרכן (כדוגמת מטען סוללה). למרות שמידול זה הודגם אך ורק על מפרק הברך, ניתן להשתמש בגישת מידול זו כדי למדל מערכות לקצירת אנרגיה ביו-מכאניות ממפרקים שונים, כדוגמת מרכז מסה וקרסול [2].

### 3 קצירה אופטימאלית [30]

#### 3.1 הקדמה

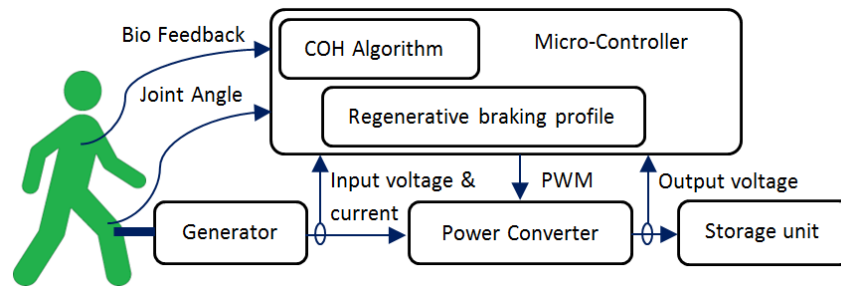
מטרת קצירה אופטימאלית הינה להביא למינימום את פונקציית COH (8). מטרה זו מושגת ע"י מיקסום כמות האנרגיה השלילית הנקצרת תוך הורדת עומס הבלימה מהמשתמש למינימום. באופן טבעי, קצירת כמות אנרגיה העולה על כמות אנרגיה שלילית זמינה יוביל לעצירת התנועה ויצריך מהמשתמש להפעיל עבודה חיובית כדי להשלים את התנועה. לכן, המומנט אותו מפעילה המערכת בעת בלימת המפרק חייב להיות תמיד יותר קטן מזה שמפעילים שרירי המפרק במהלך התנועה ללא מערכת הקצירה. יתרה מכך, הפעלת מומנט בלימה הזהה לזה שמפעיל המפרק בעת תנועה ללא מערכת קצירה לא ייתן את התוצאה הרצויה [2]. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שבן אדם ללא מגבלות גופנית יתקשה לאפשר למערכת חיצונית לבצע את כל עבודת הבלימה של שרירי המפרק.

עבודות שהוצגו עד עתה בספרות עסקו בקצירת אנרגיה ביו-מכאנית באמצעות נגדים פסיביים למציאת עומס אופטימאלי עבור המשתמש או מערכות ניהול הספק אשר דימו עומס התנגדותי אופטימאלי עבור הגנראטור. מערכת קצירה גנרטיבית אמיתית, הקוצרת ואוגרת את האנרגיה השלילית של המשתמש תוך ביצוע אופטימיזציה של COH, טרם תוארה בספרות.

גישת הקצירה המוצעת במחקר זה מבוססת על הכתבת פרופיל בלימה וביצוע אדפטציה רציפה של הפרופיל לקצירת כמות אנרגיה אופטימאלית. נקודת הקצירה האופטימאלית הוגדרה כנקודה בה כמות ההספק הנקצר תורמת את העזרה הגדולה ביותר למשתמש (עבור פרופיל קצירה מסוים). הצורך בעקיבה אחר נקודת הקצירה האופטימאלית נובע מכך שכמות האנרגיה הזמינה משתנה ממשתמש למשתמש, בין משטחי הליכה שונים וקצבי הליכה שונים.

תיאור סכמטי של מערכת קצירה בחוג סגור נתון באיור 3.1. המערכת מורכבת מברכיה אורטופדית וגנראטור המבצעים המרה של תנועת המפרק לחשמל, ממיר מבוקר דיגיטלית לביצוע הקצירה ויחידה לאגירת אנרגיה. עקב השימוש בגנראטור חשמלי סינכרוני בתור מתמר אלקטרו-מכאני מתקיים יחס ליניארי בין הזרם הנצרך מהגנראטור למומנט הבלימה של הגנראטור (פרופיל הקצירה) ובין מהירות הסיבוב של הגנראטור לאמפליטודת המתח במוצאו. כיוון שהדרישה במחקר הינה להכתיב את פרופיל הקצירה ללא תלות במתח מוצא

של הגנראטור מוצע במערכת לניהול הספק דור ב' ממיר ממותג מבוקר דיגיטלי אשר מדמה בהתנהגותו מקור זרם (הנושא מוסבר בפרוטרוט בפרק 5). זיהוי מיקום הברך במחזור הצעד מתבצע ע"י חישת זווית הברך ונגזרותיה. כדי שהמערכת תוכל לעקוב אחר נקודת הקצירה האופטימאלית נעשה שימוש במשוב ביולוגי אשר מכמת את השפעת הקצירה על המשתמש. במהלך פרק זה מתוארת הלוגיקה לזיהוי מקטעים של עבודה שלילית, נבחים משובים ביולוגיים פוטנציאליים, צורות אדפטציה של פרופיל הקצירה ומוסבר האלגוריתם לעקיבה אחר נקודת הקצירה האופטימאלית.



איור 1.3 – תיאור סכמטי של המערכת המוצעת

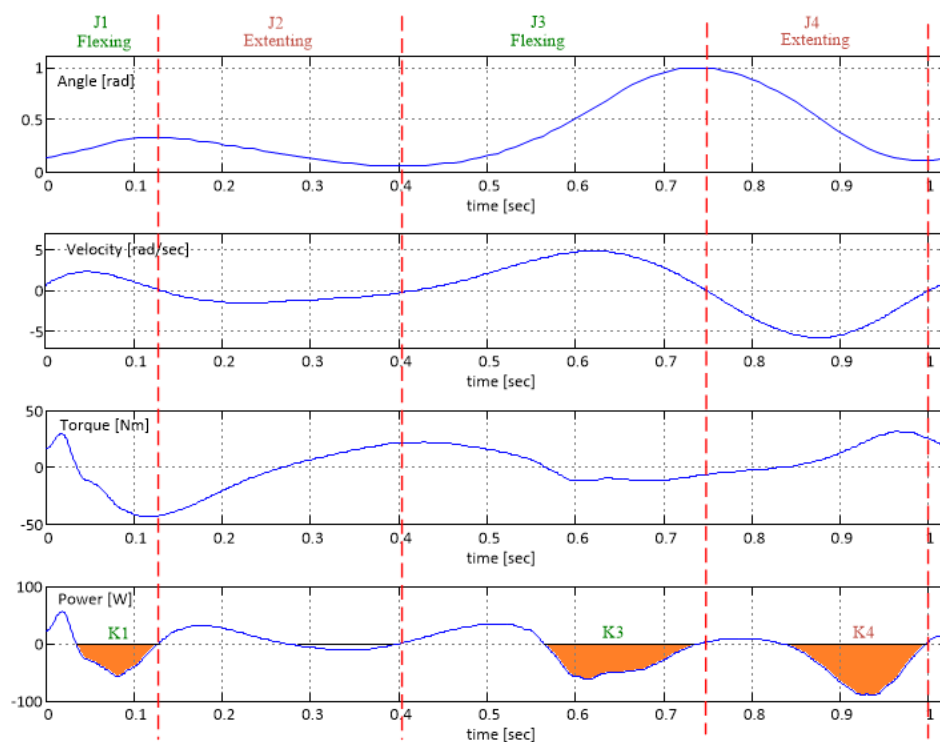
### 3.2 זיהוי מקטעים של עבודה שלילית

בפרק המבוא תוארה פעילות מפרק הברך כפעולה מחזורית כאשר המחזור הוא צעד בודד. לצורך נוחות הקריאה מובאים כאן שוב הגרפים של פעילות המפרק במהלך צעד בודד (איור 3.2). הגרפים מלמעלה למטה הם: זווית (0 מייצג רגל ישרה), מהירות, מומנט והספק. המחזור מחולק ל-4 מקטעים (J1-J4) כאשר המעבר בין מקטע למקטע הוא מהירות 0. כלומר, חלוקת המחזור הינה לפי כיוון תנועתו של המפרק. כמו כן, ניתן להתרשם מהאיור שאת האזורים של עבודה שלילית ניתן לגלות על פי המכפלה של מומנט ומהירות (מסומנים כ-K1, K3, K4). יש לשים לב שמקטעי עבודה שלילית אינם מתחילים בתחילת המקטעים J1, J2, J3 אך כן מסתיימים בסיומם [31].

מדידה ישירה של סך המומנטים במפרק אינה אפשרית ושערוך המומנטים דורש חומרה נוספת אשר קשה להתאימה למפרק הברך. לכן, במחקר זה נבחרה גישה אלטרנטיבית המתבססת על זווית הברך ומהירות הסיבוב לזיהוי המקטעים J1-J4. כיוון שאת מהירות סיבוב המפרק ניתן לקבל מגזירת הזווית ניתן להסתפק בחיישן בודד המודד את זווית הברך. באמצעות הידע על פרופיל התנועה הכללי של המפרק פותח אלגוריתם לזיהוי המקטעים (איור 3.3). האלגוריתם מזהה שינוי סימן של מהירות המפרק ובהתאם לזווית המפרק והמקטע הקודם נקבע המקטע החדש בו נמצאת הברך. לדוגמא בזיהוי מעבר מהירות מחיובי לשלילי כאשר הזווית הינה מקסימאלית

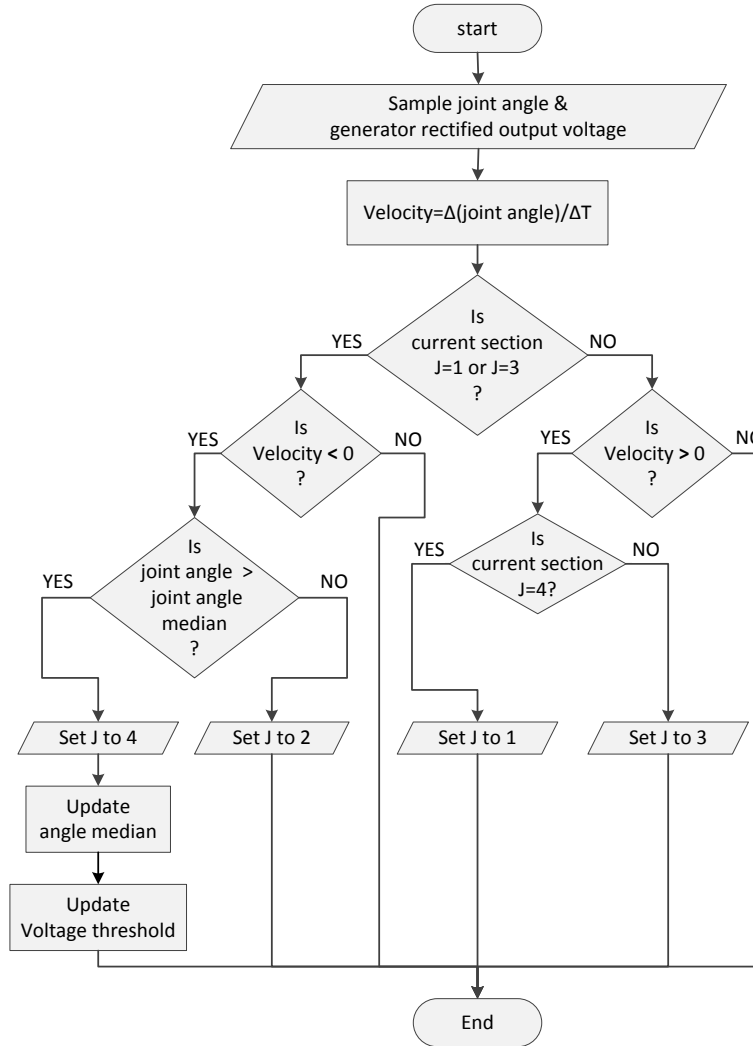
האלגוריתם ייקבע שהברך נכנסה ל-J4. ברגע ש-J4 זוהה ניתן בקלות לזהות את שאר המקטעים בהתאם לכיוון מהירות המפרק. מכיוון שהזווית בתחילת J4 הינה גבוה משמעותית מכל שאר הזוויות בעת שהמהירות משנה כיוון ניתן להסתפק בבדיקה האם הזווית בעת האירוע גדולה ממחצית הזווית המקסימאלית (angle median).

פרופיל ההליכה הינו תלוי בפרמטרים רבים החשובים בהם: משתמש, קצב הליכה ומשטח הליכה. כיוון שפרופיל ההליכה יכול להשתנות בכל עת המערכת מבצעת "למידה" רציפה של פרופיל ההליכה. תהליך ה"למידה" הינו איטרטיבי בו המערכת מעדכנת את ספי הזיהוי כדוגמת angle median בסיום כל מחזור. ברגע התעוררות המערכת (בצעד הראשון) מניחים מצב התחלתי של רגל ישרה, כאשר המפרק נמצא ב-J1 ו-angle median מכיל ערך התחלתי. לכן, במהלך שלושת הצעדים הראשונים המערכת אינה קוצרת בזמן שפרופיל ההליכה נלמד והספים מעודכנים עבור המשתמש והפעילות. מרגע שהמערכת פעילה ומוכנה לקצירה, בעת זיהוי מקטע אשר כולל אזור עבודה שלילית מתבצעת השהייה. ההשהייה במחקר זה מבוססת על המתח המיושר במוצא הגנראטור אשר הינו יחסי למהירות הסיבוב של המפרק. הסף אשר נקבע בקוד ביחס לערכו המקסימאלי של מתח המוצא במחזור הקודם והוא מתעדכן בסיומו של כל מחזור.



איור 2.3 – פעילות מפרק הברך במהלך צעד בודד. הגרפים מהעליון לתחתון הם: זווית (0 משמעותה רגל ישרה), מהירות, מומנט

והספק



איור 3.3 – תרשים זרימה של אלגוריתם לזיהוי מקטעים ו"למידה" של פרופיל ההליכה

### 3.3 משוב ביולוגי

שימוש במשוב ביולוגי דורש הבנה שבני האדם הינם ייצורים המבקרים את פעולותיהם ולכן שינויים חיצוניים כדוגמת שימוש במערכת קצירה אשר משנה את המעמסה על השרירים דורשים פרק זמן של מספר מחזורי צעד שבו הגוף יסתגל לשינויים אלו לפני שיהיה ניתן למדוד את הפרמטר הביולוגי ולהסתמך עליו. את השפעת הקצירה על המשתמש ניתן לכמת בכמה דרכים, להלן שלושה משובים ביולוגיים אופציונלים:

- מומנטים – המשוב דוגם את סך המומנטים המופעלים על מפרק הברך, על בסיס ידיעת הפרופיל בזמן הליכה ללא קצירה משנים את פרופיל הקצירה כך שפרופיל המומנטים המופעל על המפרק במהלך הקצירה ידמה לפרופיל המומנטים ללא קצירה. נכון לכתיבת שורות אלו מכשיר אשר משערך את

המומנטים שמרגיש מפרק הברך נמצא בפיתוח במחלקה להנדסת מכונות ובעתיד יישולב המכשיר במערכת הכללית כשהמשק בינו לבין הממיר המדובר יעשה באמצעות תקשורת דיגיטלית.

- זווית המפרק – העיקרון המנחה הינו שלאדם קיים פרופיל זוויתי הטבעי למשתמש לביצוע הפעולה הנדרשת והוא ינסה לעמוד בו. כל עוד המומנט בלימה אשר תפעיל המערכת הינו נמוך יותר מהמומנט שמפעיל הבן אדם אזי הפרופיל הליכה שלו לא ישתנה. לכן ניתן להגדיל את עוצמת פרופיל הבלימה עד אשר פרופיל ההליכה ישתנה באחוז מסוים מהפרופיל הליכה ללא העמסה. הרעיון הינו רעיון מתקדם מאוד והיופי בו שהוא לא דורש תוספת מכשירים וחיישנים למערכת הקיימת החסרון הוא שנדרש ידע על רמת השינוי הרצוי בפרופיל ההליכה, ידע שעדיין לא קיים בקבוצה.

- צריכה מטבולית – העיקרון המנחה הוא שעצם נשיאת המערכת (ללא קצירה פעילה) מגדיל את הצריכה המטבולית עקב תוספת משקל המערכת. קצירת חלק קטן מהאנרגיה השלילית של המשתמש יוריד את העומס מהשרירים ובכך יקטין את הצריכה המטבולית. קצירת כמות אנרגיה שלילית הגדולה יותר מהכמות הזמינה יגרום למשתמש לעשות עבודה חיובית נוספת כדי להמשיך את התנועה כסדרה. יתרה מכך, קצירת כלל האנרגיה השלילית לא יביא את הצריכה המטבולית למינימום כיוון שבמקרה זה השרירים לא מבצעים בלימה כלל, פעולה שהיא בלתי אפשרית אצל משתמש ללא מגבלה גופנית. מתוך הנחות אלו הרי שקיים מינימום גלובלי לצריכה מטבולית. הנקודה בה הצריכה המטבולית הינה מינימלית הינה נקודת הקצירה האופטימאלית כיוון שבנקודה זו העזרה הניתנת למשתמש הינה הגדולה ביותר. מימוש משוב זה דורש שיתוף פעולה של מכשיר נוסף אשר ימדוד את הצריכה המטבולית של המשתמש. המכשיר המדובר זמין ונמצא בשימוש במחקרי השפעת הקצירה.

מבין שלוש האופציות נבחר משוב צריכה מטבולית כדי להראות שקונספט עקיבה אחר נקודת קצירה אופטימאלית פועל. בנקודת זמן זו משוב זה הוא המתאים להרחבת ההבנה של השפעות הקצירה. במחקרים מתקדמים יותר יבחנו גם המשובים האחרים. במשוב המומנט יעשה שימוש כבר בעתיד הקרוב כאשר ייסתיים הפיתוח של המחלקה להנדסת מכונות. משוב זוויתי ימתין עד ליום בו ניתן יהיה לבדוק אותו ניסיונית על בני אדם כיוון שהאמולטור המבוסס על מנוע סרבו פועל בבקרת זווית ולכן לא ניתן לבדוק את האלגוריתם באמולטור.

הדרך שנבחרה להצגת השפעת הקצירה על הצריכה המטבולית מוגדרת כ-COH (Cost of Harvesting).

כאשר בספרות [18] מוגדר COH כיחס בין הפרש צריכה מטבולית עם קצירה וללא ( $\Delta$ metabolic energy) לבין

כמות האנרגיה שנקצרה (*Delectrical energy*). בלי לפגוע בכלליות, ההגדרה במחקר זה הותאמה לצרכי העקיבה אחר נקודת הקצירה האופטימאלית כך שמדובר בין הפרש של המצב הנוכחי (צריכה מטבולית נוכחית והאנרגיה הממוצעת שנקצרה במהלך N הצעדים האחרונים) לבין הפעם הקודמת בה הופעל אלגוריתם עקיבה אחר נקודת הקצירה האופטימאלית.

$$COH = \frac{\Delta \text{metabolic energy}}{\Delta \text{electrical energy}} \quad (25)$$

עקב המבנה של פונקציית COH עלייה ליניארית באנרגיה השלילית הנקצרת תוריד בצורה ליניארית את הצריכה המטבולית עד למצב בו עלייה באנרגיה הנקצרת תגרוור עליה בצריכה המטבולית. מתוך היקשים אלו נוכל להסיק שפונקציית COH הינה פונקציה פרבולית בעלת מינימום בודד. יש לציין שעבור פרופילי קצירה שונים מיקום נקודת האופימום משתנה אך היא תמיד קיימת.

### 3.4 אדפטיציה של פרופיל הקצירה

קיימות רמות שונות של שליטה בפרופיל הקצירה. כאשר יש לזכור שככל שרמת השליטה גבוה יותר כך תהליך החיפוש אחר נקודת הקצירה האופטימאלית מסובך יותר. להלן נתונות רמות שליטה שונות (מהקלה ביותר למסובכת ביותר):

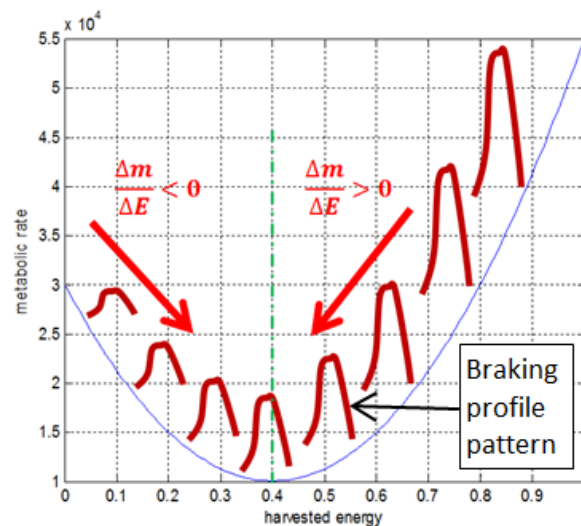
- שליטה בעוצמה – רמת השליטה הבסיסית ביותר בה השינוי של פרופיל הבלימה מתבצע אך ורק בעוצמתו. מיקום תחילת הקצירה ואורכו של הפרופיל הינם קבועים או יחסיים לפרמטרים שונים של הצעד אך אינם משתתפים בתהליך החיפוש. השינוי בפרופיל בסיסי יכול להתבצע באמצעות צעדים קבועים של שינוי הפרופיל או צעדים התלויים ברמת השפעת הקצירה על המשתמש.
- שליטה בעוצמה והשהייה – רמת השליטה השנייה מכילה את יכולת הרמה הבסיסית ומוסיפה את היכולת שליטה בהשהיית תחילת הקצירה מרגע זיהוי המקטע השלילי.
- שליטה בעוצמה, בהשהייה וברוחב – רמת השליטה השלישית מוסיפה על שתי הרמות הקודמות את יכולת שינוי רוחב פרופיל הקצירה (כיווץ והרחבה) ע"י שינוי מרווחי הזמן בין ערכי הפרופיל.
- שליטה בתצורת הפרופיל – רמת השליטה הגבוהה ביותר בה ניתן לשנות כל ערך וערך בפרופיל בעוצמה הרצויה, לקבוע את ההשהייה מתחילת זיהוי המקטע השלילי וכיוון שהשליטה בפרופיל הינה אבסולוטית גם שליטה ברוחבו. רמת שליטה זו שונה משלושת הרמות הקודמות בגישה, בזמן ששלושת הרמות

האחרות מתבססות על פרופיל מוגדר העובר מניפולציה שנקבעה מראש, בשיטה זו הפרופיל יכול להשתנות במלואו. כדי לממש רמת שליטה זו נדרש משוב ביולוגי המחזיר פרופיל מלא של המומנטים הפועלים במפרק ונדרשת הבנה עמוקה של צורת פרופיל המומנטים הרצוי.

עבור 3 רמות השליטה הראשונות מספיק משוב ביולוגי אשר מספק סיכום של השפעת הקצירה על הגוף במהלך מספר מחזורי הליכה, עבור רמת שליטה 4 נדרשים משובים ביולוגיים המספקים פרופיל המתאר את פעילות הפרמטר הביולוגי הנבחר (סך מומנטים על המפרק, פרופיל זוויתי וכו'). במחקר זה הפרמטר היחיד שעובר שינוי הינו העוצמה של פרופיל הקצירה כדי להקטין את דרגת בעיית החיפוש אך ככל שיורחב הידע על השפעת הקצירה ניתן יהיה להעלות את דרגת הבעייה.

### 3.5 אלגוריתם עקיבה אחר נקודת קצירה אופטימאלית

עקב המבנה של פונקציית COH ואופן האדפטציה של פרופיל הקצירה, האלגוריתם שנבחר מתבסס על הקונספט של Hill Climbing [32]. אופן פעולת האלגוריתם הוא כדילקמן, אם היחס בין הפרש הצריכה המטבולית לכמות האנרגיה שנקצרה הינו שלילי אזי יש להגדיל את פרופיל הקצירה ואם היחס הינו חיובי אזי יש להקטין את פרופיל הקצירה. איור 3.4 מתאר את הקשר בין צריכה מטבולית כפי שסונתזה באמולטור ההליכה שבו נבדקה המערכת לבין האנרגיה הנקצרת, עוצמת צורות פרופיל הבלימה המתוארות באיור באות כדי לתת הצגה וויזואלית בין עליה בעוצמת הפרופיל לבין העליה בכמות האנרגיה הנקצרת.



איור 4.3 – צריכה מטבולית כפונקציה של כמות האנרגיה שנקצרה, הצורות הינן פרופיל קצירה בעוצמות שונות

הערכים בהם משתמש אלגוריתם עקיבה הינם חישוב האנרגיה הממוצעת שנקצרה במהלך N צעדים אחרונים וצריכה מטבולית המתקבלת כמשוב חיצוני. כמות האנרגיה הנקצרת במהלך צעד בודד ( $E_{in\_step}$ ) מחושבת ב-(26) מתוך דגימת המתח ( $V_{in}$ ) והזרם ( $I_{in}$ ) בכניסה לממיר מעלה מתח באמצעות אינטגרציית רימן כאשר מרווח הזמן ( $\Delta T$ ) הינו המרווח בין הדגימות.

$$E_{in\_step} = \sum_n V_{in}(n)I_{in}(n)\Delta T \quad (26)$$

את האנרגיה הממוצעת של N צעדים אחרונים מחשבים באמצעות המשוואה:

$$.E_{in\_av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{in\_step}(i) \quad (27)$$

### 3.6 סיכום

הצריכה המטבולית של המשתמש נבחרה כמשוב ביולוגי מאחר והיא מדד לרמת המאמץ של המשתמש ולכן נשתמש בה לכימות השפעת הקצירה על המשתמש. לצורך ביצוע קצירת כמות אנרגיה אופטימאלית מבוצעת אדפטציה של פרופיל הקצירה. האדפטציה נעשית בצעדים קבועים להגדלת או הקטנת פרופיל הקצירה. החיפוש אחר נקודת הקצירה האופטימאלית נעשית באמצעות אלגוריתם Hill Climbing המחפש את נקודת המינימום של פונקציית COH (איור 3.4). לצורך כך פונקציית ב-COH הוגדרה במחקר זה בשונה מהגדרתה בספרות אך בלי לפגוע בכלליות ההגדרה כיחס בין הפרש הצריכה המטבולית להפרש האנרגיה הנקצרת בין איטרציות עוקבות של אלגוריתם לקצירה אופטימאלית. בפרק זה הוצגה הגישה בצורה רעיונית בלבד אופן מימושו מוצג בהרחבה בפרק 5 המתאר את המערכת לניהול הספק (דור ב').

## 4 מערכת לניהול הספק (דור א')

### 4.1 הקדמה

תחום קצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך נמצא בחיתוליו ולכן קיים צורך במערכת ראשונית אשר תשמש את המחקר להכנת השטח לתכנון מערכת קצירה מתקדמת. המטרות שלשמן תוכנה ובנתה המערכת הינם:

- בחינת מודל דינאמי של המערכת
- הערכת כמות אנרגיה שניתן לקצור ממפרק הברך באמצעות מערכת אלקטרו-מכאנית קיימת
- בחינת חיישנים ואלגוריתמים לזיהוי תחילה וסיום של שלב הקצירה
- איפיון מערכת ניהול הספק מתקדמת (דור ב') על פי תוצאות הניסויים ומסקנותיהם

הדרישות ממערכת ניהול הספק דור א' הינן בסיסיות ביותר - חיבור/ניתוק עומס התנגדותי תלת פאזי בזמן עבודה שלילית של הברך. בקרת המערכת מתבצעת ע"י מיקרו-בקר אשר משמש כפלטפורמה לבחינת חיישנים ואלגוריתמים שונים לזיהוי אזורי עבודה שלילית.

במהלך הפרק נבחנות שתי גישות לזיהוי מקטעים של עבודה שלילית. הגישות נבדלות בכמות החיישנים המשמשים את המערכת. במהלך הפרק מובאות סכימות הבלוקים של הגישות לנוחות הקריאה והסכימת החשמליות של המעגלים נמצאות בנספח 10.1. כמו כן, מוצע אלגוריתם לזיהוי מקטעים שליליים.

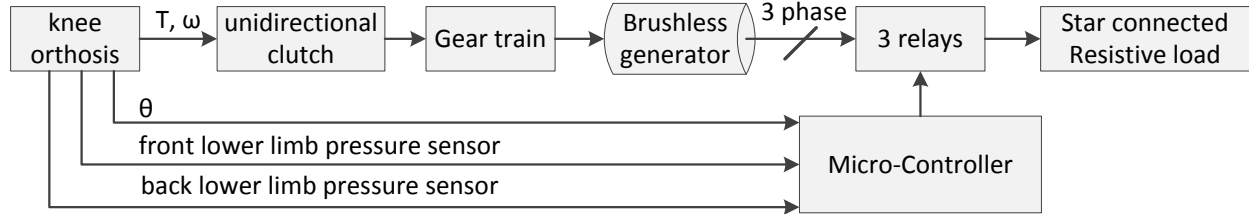
### 4.2 מבנה מערכת דור א'

הגישה הראשונה שנבחנה לזיהוי אזורים של עבודה שלילית מתבססת על שלושה חיישנים (איור 4.1). חיישן זווית זווית המפרק המורכב מפוטנציומטר ושני חיישני כוח המורכבים מחיישני לחץ אשר מוקמו בחלק הקדמי והאחורי של הגפה התחתונה ואמורים לספק את כיוון הכוח שמפעילה הגפה התחתונה. ההיגיון מאחורי גישה זו הוא בכך שאם הכוח המופעל ע"י הגפה הפוך לכיוון התנועה של המפרק הרי שמדובר בעבודה שלילית. בבחינת הגישה נבחנו שתי קונפיגורציות של חיבור חיישנים הלחץ:

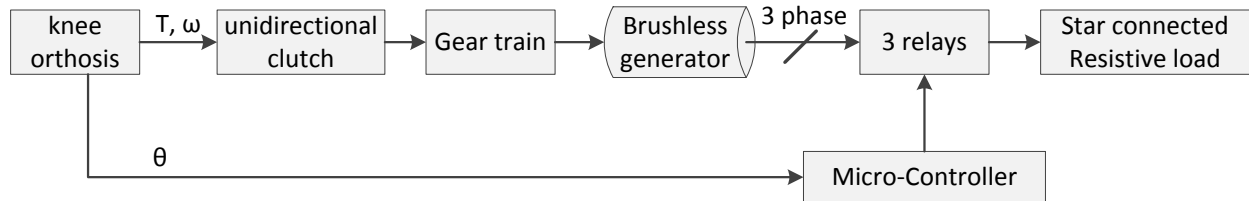
א. האותות הוגברו ונדגמו בנפרד, השוואתם בוצעה בקוד (איור 10.8) לקביעת כיוון הכוח.

ב. האותות הוגברו והשוו באמצעות מגבר סוכם והתוצאה נדגמה (איור 10.9).

בשתי הגישות נמצא שלא ניתן למדוד בצורה אמינה את כיוון הכוח המופעל ע"י הגפה עקב חופש מכאני הקיים בין הגפה לברכיה ומכיוון שמדובר באזורים של רקמה רכה. מסיבה זו נזנחה גישה זו.



**איור 1.4 – סכימת בלוקים למערכת קצירה בסיסית המבוססת על שלושה חיישנים לזיהוי אזורים של עבודה שלילית**  
 הגישה השנייה שנבחנה התבססה על חיישן בודד שמדד את זווית המפרק (איור 4.2). בגישה זו מבצעים גזירות של הזווית הנמדדת לקבלת מהירות ותאוצה זוויתית של המפרק. כאשר הלוגיקה העומדת מאחורי האלגוריתם היא שכאשר סימן התאוצה הזוויתית שונה מסימן המהירות הזוויתית מתבצעת בלימה ולכן מדובר על אזור של עבודה שלילית.



**איור 2.4 – סכימת בלוקים למערכת קצירה בסיסית המבוססת על חיישן בודד לזיהוי אזורים של עבודה שלילית**  
 תרשים הזרימה המתאר את אופן פעולת האלגוריתם נתון באיור 4.3. אופן פעולת המערכת הוא כדילקמן: זווית המפרק ( $\theta[n+1]$ ) הינה מיצוע נע של שלוש דגימות עוקבות ( $msr[n+1], msr[n], msr[n-1]$ ), מהזווית הממוצעת מתבצעות גזירות נומריות לקבלת המהירות ( $\omega[n]$ ) והתאוצה ( $\alpha[n]$ ) הזוויתית של המפרק.

$$\theta[n+1] = \frac{msr[n+1] + msr[n] + msr[n-1]}{3} \quad (28)$$

$$\omega[n] = \frac{\theta[n+1] - \theta[n-1]}{2\Delta t} \quad (29)$$

$$\alpha[n] = \frac{\theta[n+1] - 2\theta[n] + \theta[n-1]}{\Delta t^2} \quad (30)$$

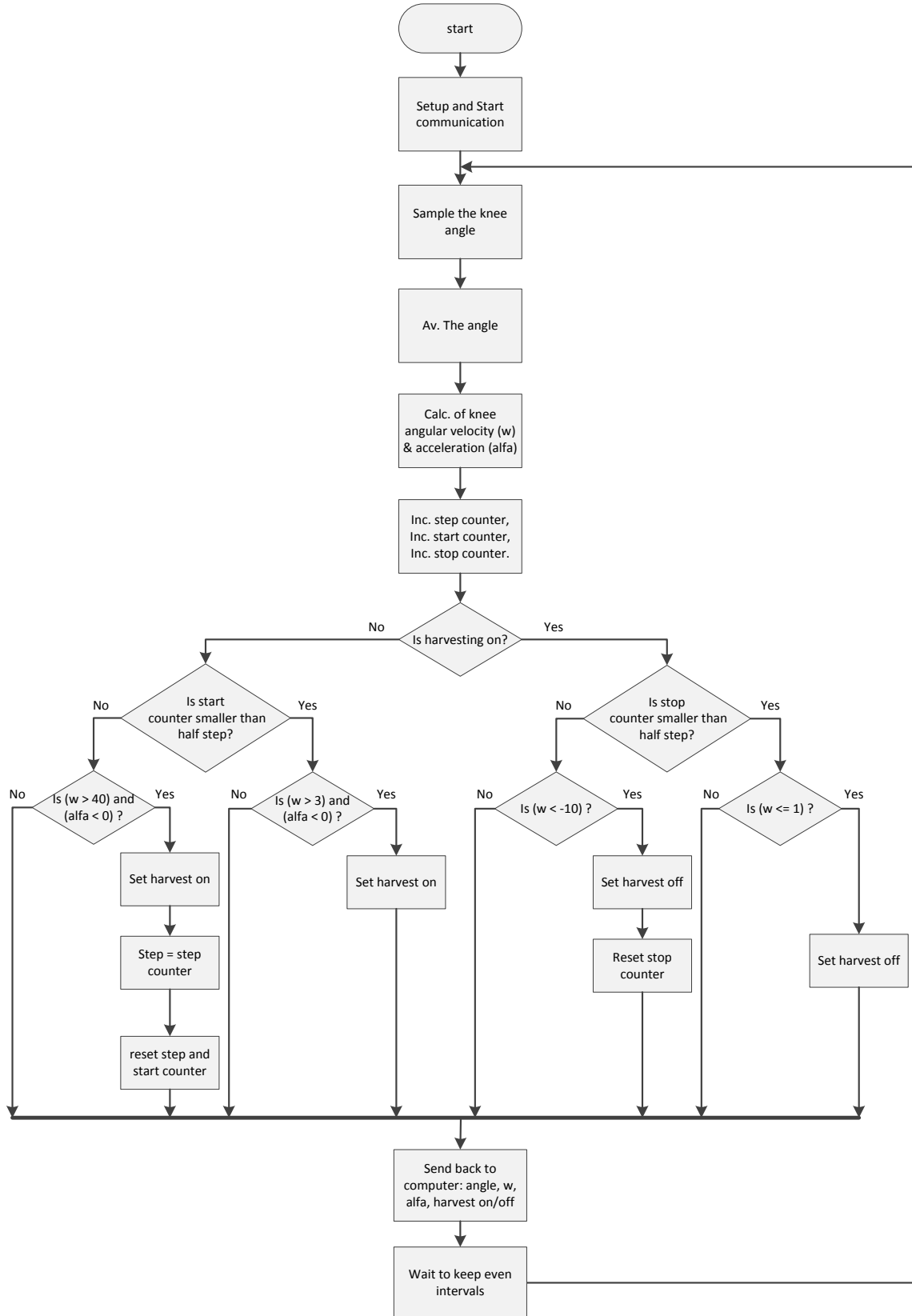
כדי לחסוך בכוח העיבוד המוגבל של המיקרו-בקר החישובים שבוצעו בו לא כללו חלוקה. כיוון שבעת קביעת הספים של האלגוריתם ניתן להתחשב באי חלוקה זו הרי שהשמיטה שלה אינה גורמת לאיבוד מידע.

$$\text{NewAngle} = (\text{NewMsr} + \text{Msr} + \text{OldMsr}) \quad (31)$$

$$w = (\text{NewAngle} - \text{OldAngle}) \quad (32)$$

$$\text{alfa} = (\text{NewAngle} - 2 * \text{Angle} + \text{OldAngle}) \quad (33)$$

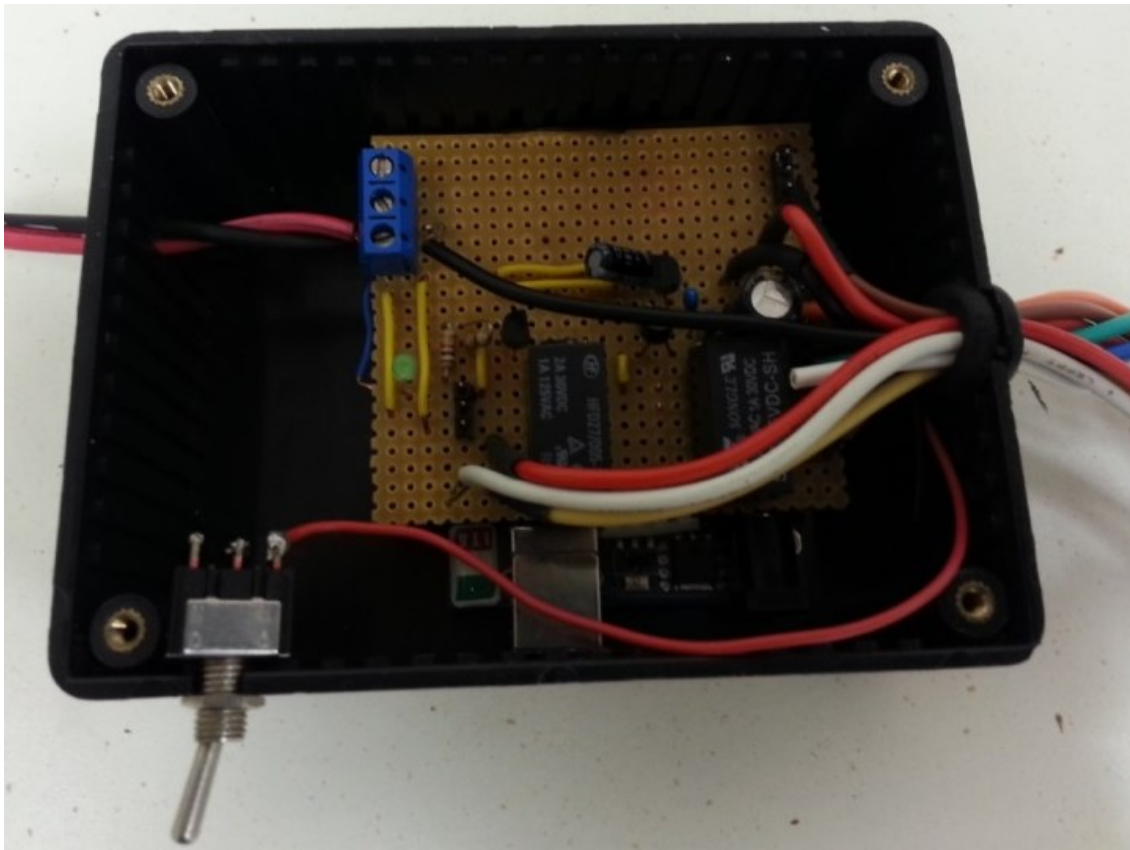
שני אזורי עבודה שלילית שהאלגוריתם נועד לזהות הינם K1 ו-K3, בין שני מקטעים אלו קיימים הבדלים מהותיים בקביעת הספים: K1 הינו מקטע בעל מהירות זוויתית נמוכה הדורש ספים נמוכים לזיהוי, ו-K3 הינו בעל מהירות זוויתית גדולה ולכן ניתן להעלות את הספים כדי להקטין את הסיכוי לזיהוי מוטעה של תחילת/סוף עבודה שלילית. לכן, האלגוריתם משתמש בשני ספים שונים לפי שלב ההליכה על מנת להקטין למינימום טעויות בזיהוי. לצורך שימוש בספים שונים על המערכת לדעת באיזה שלב של הצעד היא נמצאת. לכן הצעד חולק לשני חצאים, תחילת הצעד היא בתחילתו של מקטע K3, העקיבה אחר המיקום בצעד מתבצעת ע"י שלושה מונים אשר מתקדמים בכל פעם שהלולאה מתבצעת: הראשון מונה צעד (step) סופר כמה פעמים הלולאה חזרה על עצמה במהלך הצעד, ברגע הזיהוי של K3 תוצאת המונה נשמרת והוא עובר איפוס, שני המונים האחרים נועדו למקם את תחילת (start) וסיום (stop) הקצירה ביחס לאורך הצעד הקודם. ההבדל בין מוני תחילת וסיום הקצירה הינו ברגע בו הם מאופסים. מונה התחלה מאופס יחד עם מונה הצעד ברגע זיהוי K3 ואילו מונה סיום מאופס בסוף K3. הספים של מהירות זוויתית ותאוצה לקביעת תחילת וסיום אזורי עבודה שלילית נבחרו בשלב הראשוני על בסיס תוצאות ניסויים שהיו זמינים ברגע כתיבת האלגוריתם. בסוף ביצוע כל לולאה הנתונים שנדגמו, חושבו והחלטת האלגוריתם נשלחו למחשב בשביל ניתוח בשלב מאוחר יותר. כמו כן, בסיום הלולאה מתבצע עיכוב במקרה הצורך של סיום הלולאה כדי לשמור את דגימות זווית המפרק במרווחים קבועים. הלולאה חוזרת על עצמה כל 10ms.



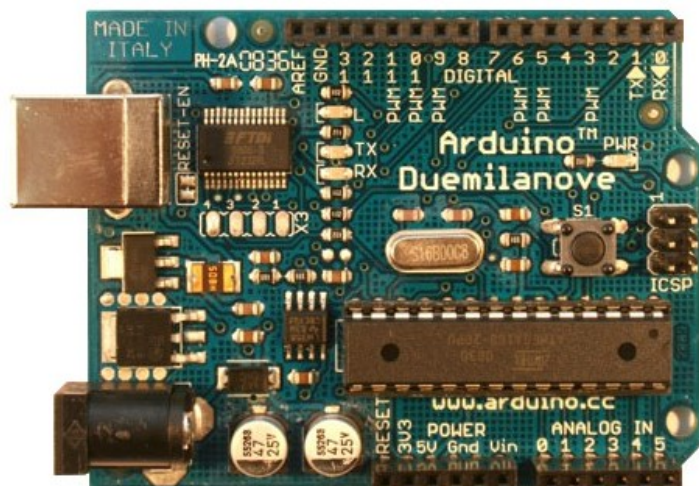
איור 3.4 - אלגוריתם זיהוי עבודה שלילית המתבסס על חישת זווית המפרק בלבד

### 4.3 סיכום

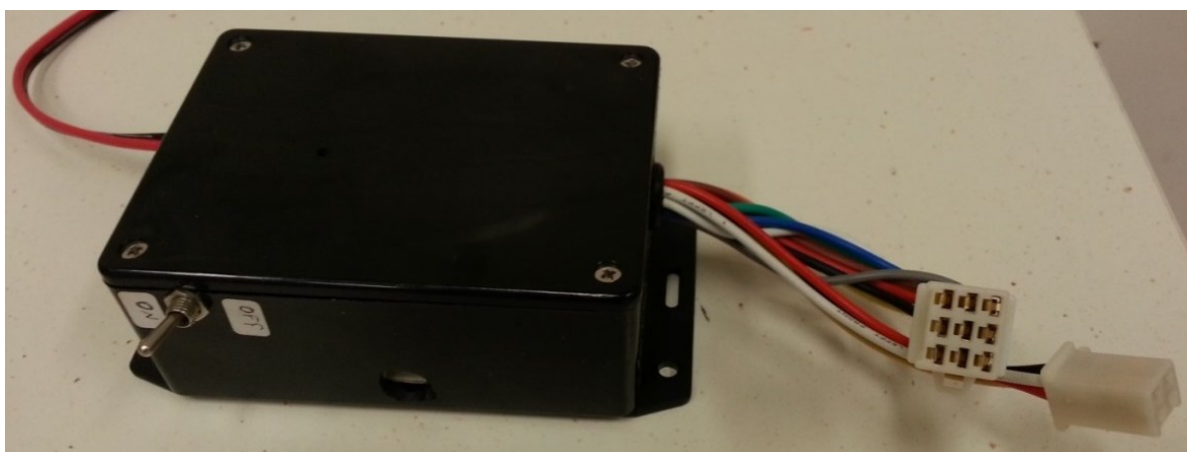
מערכת ניהול הספק דור א' הינה מערכת בסיסית השולטת על חיבור/ניתוק של עומס התנגדותי תלת פאזי. זיהוי המקטעים של עבודה שלילית נעשה על פי מדידת זווית המפרק ונגזרותיה הנותנות את המהירות והתאוצה זוויתית של המפרק. סכימת המעגל החשמלי הסופי נתונה באיור 10.10. האות מחיישן הזווית נדגם ע"י ה-A/D של המיקרו-בקר. לפי אלגוריתם זיהוי מקטעי עבודה שלילית שולטת יציאה דיגיטלית בודדת על ניתוק/חיבור העומס ההתנגדותי לגנראטור. בין המיקרו-בקר למחשב מומשה תקשורת טורית בקצב 19.2Kbps להעברת אותות החיישנים והחלטות האלגוריתם לניתוח בשלב מאוחר יותר. כל הרכיבים האלקטרוניים המרכיבים את המעגל החשמלי הורכבו על vector board (איור 4.4) אשר התלבש כקומה שנייה על לוח פיתוח של מיקרו-בקר מחברת Arduino Duemilanove (איור 4.5). במערכת ניהול הספק יש שתי אופציות לקבלת ההספק הדרוש להפעלתה – כבל USB המשמש גם לתקשורת מול המחשב או סוללה של 9V למקרה של עבודה ללא מחשב. כלל המערכת זוודה בתוך קופסת פלסטיק מתוך מחשבה ששתי הקופסאות יורכבו על המשתמשים במהלך הניסויים (איור 4.6).



איור 4.4 – מעגל חשמלי של מערכת לניהול הספק



איור 5.4 – לוח פיתוח של חברת Arduino עבור מיקרו-בקר מסוג ATME1328 (התמונה נלקחה מאתר החברה)



איור 6.4 – מערכת לניהול הספק מזוודת בקופסת ניסויים

## 5 מערכת לניהול הספק (דור ב')

### 5.1 הקדמה

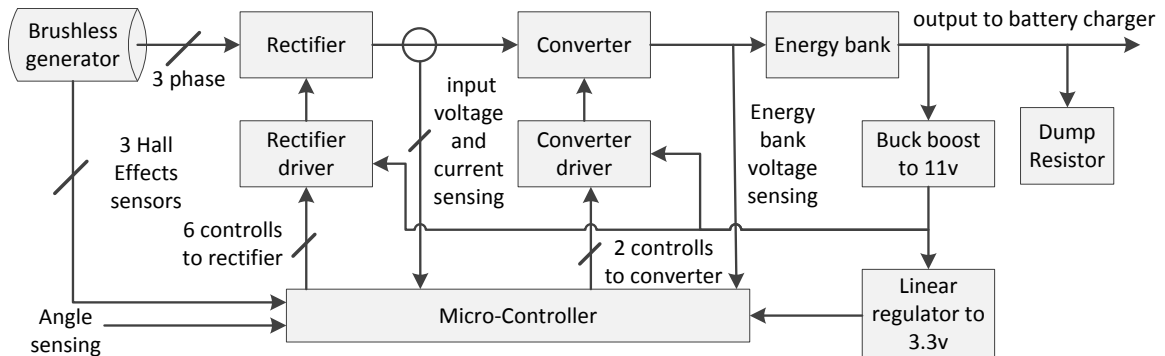
מטרת הפרק הינו לתאר את תהליך התכנון של מערכת ניהול הספק לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית והשיקולים מאחורי בחירת מרכיבי המערכת. שני קווים מנחים ליוו את תכנון המערכת לכל אורך הדרך והם שמדובר במערכת להספק נמוך ושעל המשתמש לסחוב את המערכת בלי שתפריע לתנועה.

הבחירה במכונה חשמלית בתור מתמר יוצרת יחס ליניארי בין מומנט הבלימה אותו מפעילה המכונה לזרם הנצרך ממנה. פעולת הקצירה במחקר זה מתבצעת ע"י הכתבת פרופיל בלימה למכונה החשמלית. כיוון שאין קשר בין מתח מוצא הגנראטור לבין המומנט אותו מעוניינים להכתיב על הממיר לדמות בפעולתו למקור זרם. לכן, פרופיל הקצירה מומר מפרופיל בלימה רצוי של הגנראטור לפרופיל זרמים הנצרך מהגנראטור והבקרה מתבצעת על זרם הכניסה לממיר.

המערכת תוכננה לפי צפי קצירה של מקסימום 2.5J במהלך צעד בודד ( $\sim 2.5W$ ). הצורה הנפוצה ביותר לאחסון אנרגיה עבור מערכות בסדר גודל זה הינה סוללה. טעינה ישירה של סוללה אינה מעשית כיוון שהמקור הוא מקור פועם שברצוננו להכתיב לו פרופיל קצירה כלשהו ופרופיל טעינה של סוללה תלוי בכימיה שלה וטעינה בפולסים של זרם אינה מומלצת. לכן, מוגדר בנק אנרגיה אשר משמש כחוצץ בין המקור לעומס. בנק אנרגיה סופג את הפולסים של הקצירה ומשמש כמקור חצי-קבוע (semi-constant) לטעינת הסוללה ולהפעלת מעגל הבקרה של המערכת.

מבנה הבלוקים של המערכת המוצעת בעבודה זו נתון באיור 5.1. הגנראטור במחקר זה הינו גנראטור זרם ישר ללא מברשות תלת פאזי בעל כ"מ סינוסוידלי בתדר ואמפליטודה התלויים במהירות הסיבוב של הרוטור. דרגת הכניסה של המערכת לניהול הספק הינו מיישר תלת פאזי. הלב של מערכת ניהול הספק הוא הממיר אשר מכותיב את הזרם שרואה הגנראטור ואשר מעביר את האנרגיה שנקצרה לבנק האנרגיה. בנק האנרגיה סופג את הפולסים של האנרגיה ואוגר אותה בתוכו. הצרכנים של בנק האנרגיה הינם מטען סוללה המוגדר כעומס המערכת ומעגל הבקרה (פעולה אוטונומית). במקרה שבו נוצרת אנרגיה עודפת במערכת עקב אי צריכה או צריכה מועטה, קיים מעגל הגנה המחבר עומס דמה (Dump Resistor) כדי להיפטר מהאנרגיה העודפת ולאפשר למערכת להמשיך לתפקד בצורה תקינה. מערכת לניהול הספק מבוקרת דיגיטלית ע"י מיקרו-בקר. הכניסות למיקרו-בקר הן

כדלקמן: חישת זווית המפרק המבוצע ע"י פוטנציומטר הממוקם על הברכיה, חישת מיקום הרוטור ע"י שלושת חיישי Hall effect הנמצאים בתוך הגנראטור, חישת מתח וזרם בכניסה לממיר ומתח בנק האנרגיה. כמו כן, למיקרו-בקרי יש תקשורת טורית אסינכרונית להתממשקות למערכות חיצוניות למימוש משוברים נוספים וחיבור לתכנות המיקרו-בקרי במעגל הייעודי.



איור 1.5 – מבנה בלוקים של המערכת לניהול הספק דור ב'

עבור בדיקת אופן תכנון מערכת לניהול הספק ובקרתה נעשה שימוש בתוכנת סימולציה PSIM אשר מאפשרת שילוב בין תכנון דרגת הספק וכתובת קוד בקרה בשפת C. במהלך הפרק יוצגו תתי מעגלים של המערכת המלאה כדי לתת המחשה וויזואלית, מעגל הסימולציה המלא נמצא בנספח 10.3, השרטוט של המעגל החשמלי המלא נמצא בנספח 10.4. בדיקת התאמה של הרכיבים נבחרים שעבורם היצרנים פרסמו מודלים נעשתה בסימולציות ייעודיות בתוכנות SPICE ו-LTSPICE.

## 5.2 מיישר תלת פאזי

קיימים בגדול שני סוגים של מיישרים: פסיבי ואקטיבי. המיישר הפסיבי הינו גשר תלת פאזי המורכב מדיודות. יתרון בולט של גשר זה הוא בכך שאינו דורש בקרה אך החיסרון הוא בהפסדי ההולכה של הדיודות. ההפסד בגשר פאסיבי הינו המכפלה בין מפל המתח על הגשר (מתח הולכה של 2 דיודות) לבין הזרם העובר דרכו:

$$P_{passive\ loss} = 2V_F I_{in} \quad (34)$$

כיוון שהזרם דרך הדיודות שווה לזרם המקור קיים איבוד הספק התואם את היחס בין מפל המתח על המיישר לבין מתח הכניסה. באפליקציה המדוברת מתח מוצא הגנראטור משתנה מ-0V עד 14V, הממיר פעיל עד מתח של 4V

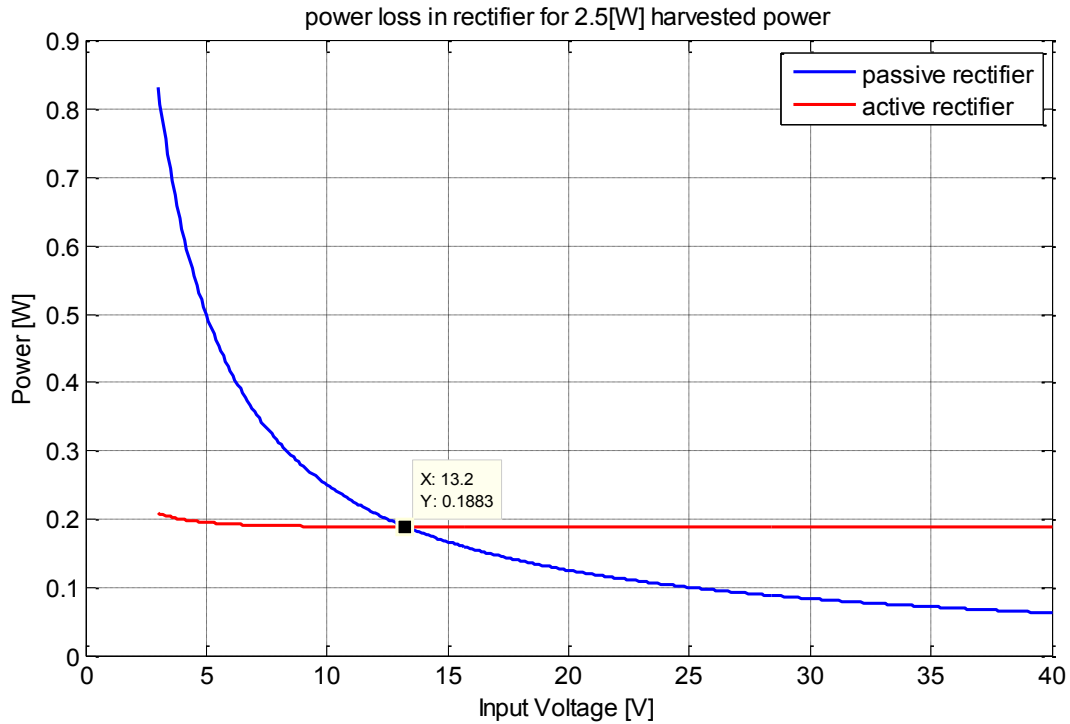
ומפל המתח על המיישר הינו קבוע העומד על 1V. לכן ההפסד על גשר דיודות נע בין 7% באמפליטודת המתח המקסימלית ל- 25% במתח כניסה מינימלי.

מיישר אקטיבי הינו גשר תלת פאזי המורכב מטרנזיסטורים. בשונה מגשר דיודות אשר עצמאי הטרנזיסטורים זקוקים לדוחפים, בקרה וחיישנים לסנכרון מיתוגם עם מתחי הפאזות. היתרון הבולט של מיישר אקטיבי הוא בהפסדי ההולכה הנמוכים שלו השווים למכפלת התנגדות ההולכה ( $R_{DS(ON)}$ ) והזרם  $I_{DSRMS}$  בריבוע. החיסרון הוא שמעגלי העזר צורכים הספק סטטי כדוגמת חיישני Hall effect. את ההפסדים השונים ניתן להקטין ע"י כיבוי מעגלי העזר כאשר אין בהם צורך, בחירת טרנזיסטורים בעלי התנגדות הולכה נמוכה ובעלי קיבול gate ( $C_G$ ) קטן:

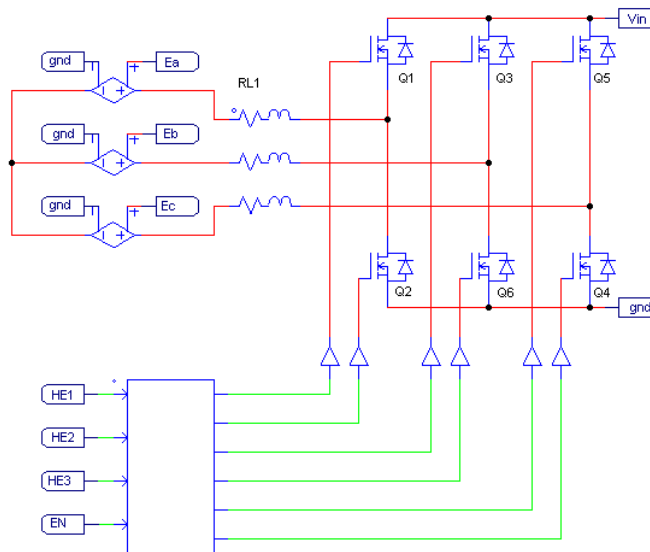
$$P_{active\ loss} = 2R_{DS(ON)}I_{DSRMS}^2 + 2C_GV_{GS}^2f_{switch} + P_{HES} \quad (35)$$

ההחלטה בין שני מיישרים אלו אינה פשוטה והיא תלויה בזרם הנצרך ובמתח שבכניסה למיישר. ככל שהמתח כניסה יהיה גבוה יותר והזרם בהתאם יהיה קטן יותר (עבור אותו הספק קצירה) כך ההעדפה לשימוש במיישר פסיבי תהיה גדולה יותר. על בסיס נתונים של רכיבים מציאותיים ומצב עבודה יציב (מתח כניסה קבוע), בוצעה השוואה במטלאב בין שני מיישרים אלו ותוצאותיה נתונים באיור 5.2. המסקנה היא שעבור הספק קצירה שעבורו תוכננה המערכת ומתח כניסה ממוצע הנמוך מ-13V קיימת העדפה למיישר אקטיבי. דבר נוסף שניתן ללמוד מאיור זה הוא שרוב רובם של ההפסדים במיישר האקטיבי הינם ההפסדים הנובעים משימוש בחיישני Hall effect. היתרון הנוסף של המיישר האקטיבי הוא שעקב השימוש בטרנזיסטורים מסוג MOSFET ניתן להשתמש בדיודות הפרזיטיות של הטרנזיסטורים כמיישר פסיבי במקרה הצורך. על פי האמור לעיל נבחר מיישר אקטיבי לאפליקציה זו (איור 5.3).

מטרת המיישר האקטיבי באפליקציה זו הינו לדמות את התנהגותו של מיישר פאסיבי. כדי שהמיישר האקטיבי יידמה למיישר פסיבי המיתוג של הטרנזיסטורים צריך להיות מסונכרן עם מתחי הפאזות. מתחי הפאזות הינם אותות סינוסוידליים כאשר המופע של האותות קשור למיקום הרוטור. לכן, מיתוג המיישר מסונכרן עם מיקום הרוטור וכיוון תנועתו. מיקום הרוטור ניתן לעקבה לפי 3 חיישני Hall effect הנמצאים בתוך הגנראטור. שלושת חיישנים אלו מייצרים אותות דיגיטליים המגדירים 6 מצבים שונים של המתגים.



איור 2.5 – השוואה בין הפסדי ההספק במיישר הפאסיבי (כחול) והאקטיבי (אדום)



איור 3.5 – מיישר אקטיבי תלת פאזי

קוד בקרת המיישר מממש מכונת מצבים אשר בהתאם למצב החיישנים פותחת וסוגרת את המתגים המתאימים. נושא תזמון המיתוגים הינו קריטי כדי לא ליצור מצב בו מקוצרות שתי פאזות. המימוש של הבקרה בוצע כך שקיימת חישת רמת מתח (COS) של מוצאי החיישנים. ברגע שינוי רמת המתח באחת משלושת הכניסות

המוגדרות, נוצר interrupt שבדק את רמת המתח של כל החיישנים ולפי כיוון הסיבוב קובע אילו מתגים מוליכים ואילו בקיטעון (טבלה I.5, טבלה II.5).

טבלה I.5 – מצב החיישנים ובקרת המתגים כאשר הגנראטור מסובב עם כיוון השעון

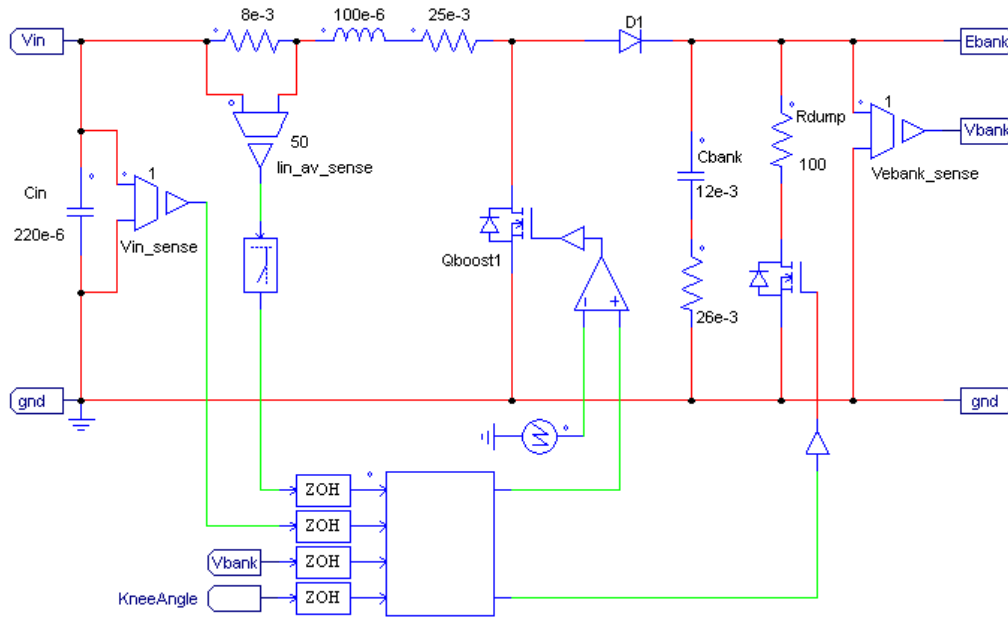
HE1	HE2	HE3	gate 1	gate 2	gate 3	gate 4	gate 5	gate 6
1	0	1	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	0	0	0	0	1
0	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1	0	0	0

טבלה II.5 – מצב החיישנים ובקרת המתגים כאשר הגנראטור מסובב נגד כיוון השעון

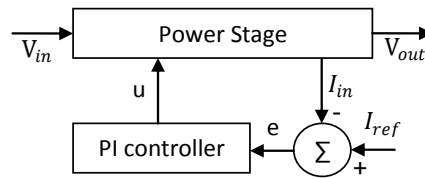
HE1	HE2	HE3	gate 1	gate 2	gate 3	gate 4	gate 5	gate 6
1	0	1	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0	0	1	1

### 5.3 הממיר

הממיר שנבחר במחקר זה הוא ממיר מעלה מתח (איור 5.4). שיטת הבקרה שנבחרה הינה רוחב פולס (PWM) והבקר מסוג PI. מטרת הבקרה להפעיל את הממיר כך שיתפקד כמקור זרם. לכן, הבקרה הינה מסוג זרם ממוצע (Average Current Mode) ומשוב הבקרה נסגר על זרם הכניסה לממיר. חישת הזרם בכניסה לממיר מתבצעת באמצעות נגד חישה ( $R_{sense} = 8m\Omega$ ). המתח הנופל על הנגד מוגבר ועובר מסנן לתדרים נמוכים בעל תדר ברך ב-10kHz. בקרת הזרם עוקבת אחר פרופיל זרמי ייחוס (פרופיל הקצירה) המקודד במיקרו-בקר. איור 5.5 מדגים מבחינה סכמטית את מבנה הממיר עם בקר PI ומשוב זרם.



איור 4.5 – ממיר מעלה מתח כפי שהוא מומש בסימולציה עם ערכי רכיבים שנבחרו למימוש



איור 5.5 – סכמה בלוקים של הממיר עם בקר PI ומשוב זרם

רוחב הפס של הבקרה נבחר כך שהממיר יוכל לעקוב בצורה מדויקת אחר הפרופיל. קצב הליכה רגיל של משתמש כפי שתואר בפרק המבוא הינו בערך 1Hz, במערכת זו אנו מעוניינים לקצור את K3 אשר רוחבו כ- 200msec. קצב עדכון הפרופיל קצירה המהיר ביותר שהונח עבור מחקר זה הוא של 5ms (בפועל קצב עדכון הפרופיל שבו נעשה שימוש הינו 8.25ms). לכן, חוג הבקרה נסגר בתדר של 1Khz. קבועי הבקר תוכננו מתוך ניתוח הממיר בשיטת המודל הממוצע אשר תוארה בפרק המבוא בה נמצא הקשר בין זרם הסליל לאות הבקרה באות קטן:

$$\frac{i}{d} = \frac{V_{out}}{\omega L} \quad (36)$$

כפי שניתן לראות הגבר פונקצית התמסורת תלוי במתח המוצא ובגודל הסליל. במהלך פעילות תקינה של המערכת מתח המוצא נמצא בתוך הגבולות  $\{V_{out_{min}}, V_{out_{max}}\}$ . גודל הסליל נבחר לפי תדר המיתוג ומתוך רצון להפעיל את הממיר במצב זרם רציף (Continuous Current Mode). עבודה במצב של זרם רציף נבחרה כיוון

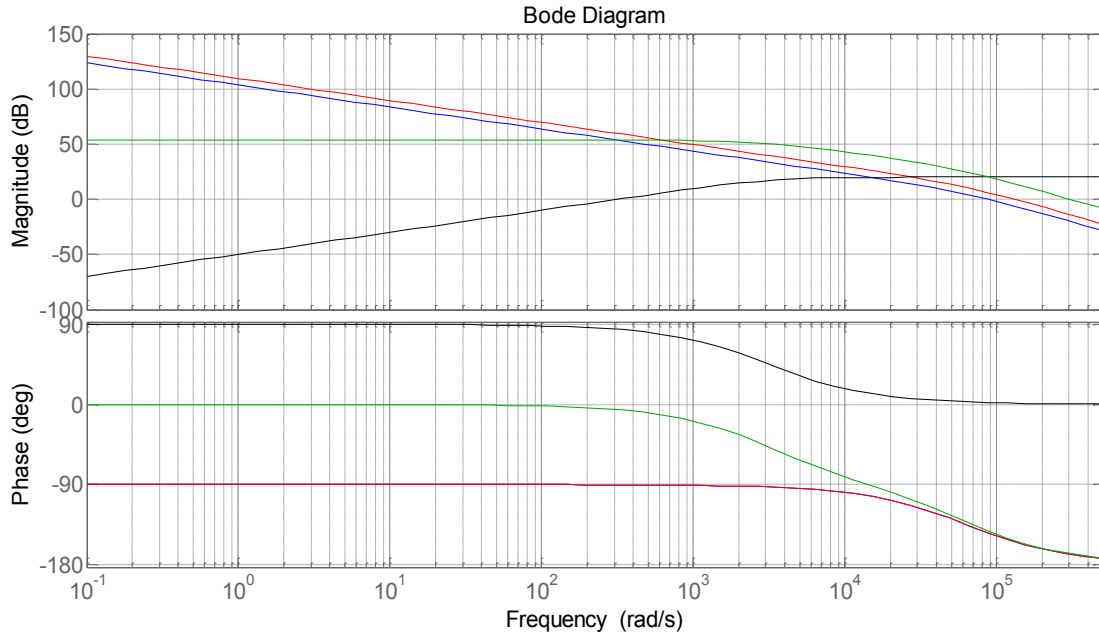
שהזרם האפקטיבי במצב עבודה זה יותר נמוך. בחירת תדר המיתוג של המערכת נעשית תחת מספר אילוצים. מצד אחד תדר המיתוג חייב להיות לפחות דקדה אחת מעל תדר סגירת המשוב ולכן עליה בתדר המיתוג מאפשרת סגירת חוג הבקרה בתדר גבוה יותר (תגובה דינאמית טובה יותר) ושימוש בסליל קטן יותר וקל יותר. מצד שני עליה בתדר המיתוג מגדילה את הפסדי המיתוג ומקטינה את רזולוציית ה-PWM הפוגעת ברזולוציית פרופיל הקצירה. רזולוציית פרופיל הקצירה הרצויה צריכה להיות מספיק גדולה מצד אחד שתאפשר גמישות מירבית בתכנון פרופיל הקצירה ומצד שני קטנה יותר מרזולוציית A/D [33]. מעבר לכך רזולוציית PWM דיגיטלי תלויה ביחס שבין תדר שעון בו פועל המיקרו-בקר לבין תדר המיתוג. כלומר ניתן להגדיל את תדר המיתוג של הממיר ולשמור על רזולוציית PWM ע"י העלאת תדר השעון בו פועל המיקרו בקר אך הדבר יגרור עלייה בצריכת ההספק של המיקרו-בקר. מתוך אילוצים אלו נבחר תדר העבודה של המיקרו-בקר להיות  $F_{CY} = 16MHz$  ותדר המיתוג של הממיר  $F_{PWM} = 50KHz$  בתדרים אלו רזולוציית PWM הינה כ-8bit:

$$PWM_{res} = \frac{\log\left(\frac{F_{CY}}{F_{PWM}}\right)}{\log(2)} \quad (37)$$

בעקבות בחירת תדר המיתוג והרצון לעבוד במצב של זרם רציף (Continues Current Mode) נבחר הסליל להיות  $100\mu H$ . מתוך בחירות אלו הוחלט שהמשוב יהיה מסוג PI בעל תדר ברך ב-500Hz וסגירת המשוב תהיה בתדר 1kHz. כתוצאה מכך פונקציית התמסורת במישור התדר של הבקר הינה:

$$D(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{318 \cdot 10^{-6}s + 1}{6.35 \cdot 10^{-3}s} \quad (38)$$

לצורך המחשה ויזואלית של אופן סגירת המשוב מובא כאן גרף בודה (איור 5.6) המכיל את פונקציות התמסורת של דרגת ההספק בחוג פתוח בשני מצבי הקיצון  $\{V_{out_{min}}, V_{out_{max}}\}$ , הבקר והמערכת בחוג סגור. מאיור זה ניתן לראות שהסגירה בוצעה על פי התיכנון האנליטי המתואר בפסקה הקודמת.



איור 6.5 – גרף בודה של: power stage ב-open loop (כאשר כחול עבור מתח מוצא מינימאלי ואדום עבור מתח מוצא מקסימאלי), המשוב (בשחור) והמערכת ב-close loop בירוק.

בנק האנרגיה משמש כחוצץ בין המקור שהוא מקור פועם בתדר נמוך לבין הצרכנים הזקוקים להספק רציף. השיקול העיקרי בבחירת גודל בנק האנרגיה היא שעליו להיות מסוגל לאגור את מקסימום האנרגיה שהמערכת תוכננה לקצור בצעד בודד ( $E_{max} = 2.5$ ) תוך שמירה ששינויי המתח עליו יהיו בתוך הטווח המוגדר לעבודה תקינה  $\{V_{out_{min}} = 18V, V_{out_{max}} = 28V\}$  של הממיר. בנק האנרגיה מורכב מקבל גדול בודד אשר גודלו נבחר להיות  $12mF$  לפי:

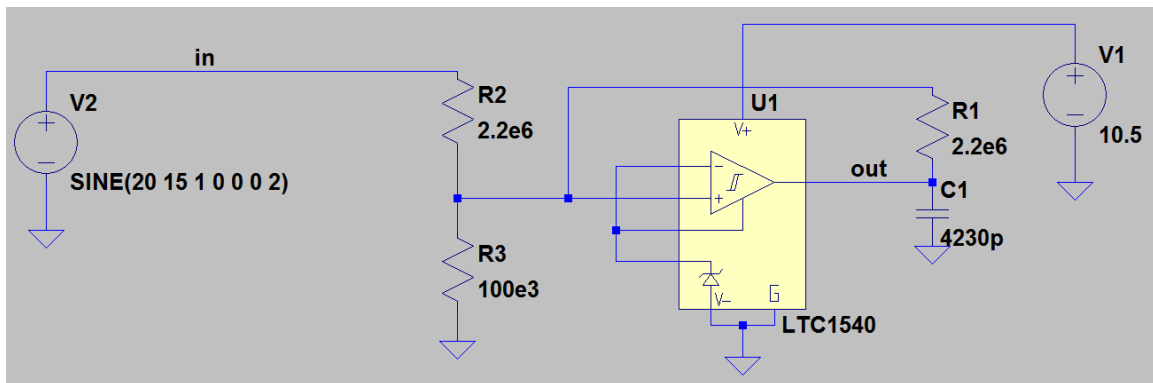
$$C_{bank} = \frac{2E_{max}}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad (39)$$

העומס של הממיר הינו מטען הסוללה, במקרה בו העומס אינו קיים או שאינו גדול דיו נוצרת אנרגיה עודפת במערכת. כדי שהמערכת תוכל להמשיך לעבוד בלי תלות בתפקוד העומס הורכב מעגל הגנה המורכב מנגד עומס מתמתג בגודל של  $100\Omega$  בעל יכולת פיזור הספק של  $5W$ . נגד העומס מחובר במקביל לבנק האנרגיה כאשר המתח בבנק האנרגיה עובר את ה- $V_{out_{max}}$  ומנותק כאשר המתח יורד אל מתחת ל- $V_{out_{min}}$ . הסיבה לבחירת ערכים אלו טמונה הן במתחי העבודה התקינים שהוגדרו עבור הממיר והן ברצון שהחיבור ניתוק ייתרחש לעיתים כמה שיותר נדירות ושימוש יורגש ע"י מבצעי הניסוי שיעקבו אחר מתח בנק האנרגיה. בקרת החיבור ניתוק מבוקרת באמצעות משווא עם היסטריזיס אשר דוחף את הטרנזיסטור לחיבור/ניתוק של נגד העומס. המשוואה

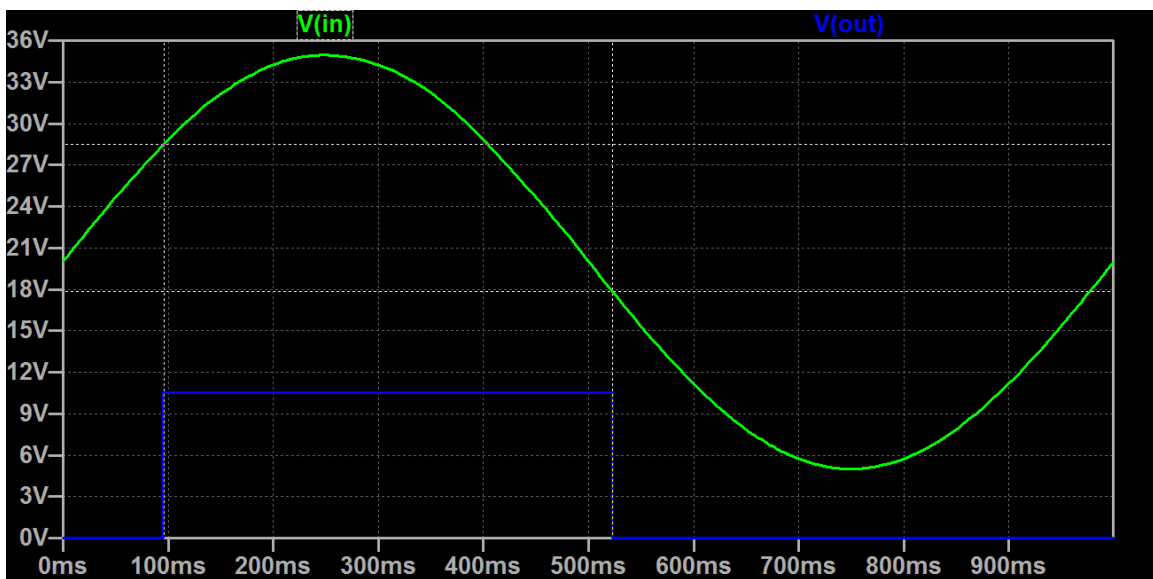
שנבחר הינו LTC1540 של חברת Linear עקב צריכת הזרם המאוד נמוכה שלו של  $0.3\mu A$ . ספי ההיסטרזיס  $\{V_{in_{low}}, V_{in_{high}}\}$  תוכננו לפי משוואות משווה פשוטות תוך התחשבות בכך שהרכיב מייצר מתח רפרנס עצמי של  $V_{ref}$  של 1.182V ברגל – והעומס הקיבולי אותו הוא דוחף הוא קיבול ה-gate של המתג. עבור ערכים שנמצאו בצורה אנליטית על פי משוואות (40), (41) בוצעה סימולציה (איור 5.7). תוצאות הסימולציה מוצגים באיור 5.8 כאשר מתח הכניסה הינו סינוס  $V(in)$  והמוצא את ריבועי בהתאם לספים שנבחרו  $V(out)$ .

$$V_{ref} = V_{in_{high}} \frac{R_3 \parallel R_1}{R_2 + R_3 \parallel R_1} \quad (40)$$

$$V_{ref} = V_{in_{low}} \frac{R_3 \parallel R_1}{R_2 + R_3 \parallel R_1} + V_{out} \frac{R_3 \parallel R_2}{R_1 + R_3 \parallel R_2} \quad (41)$$



איור 7.5 – משווה עם היסטרזיס לשליטה על מיתוג עומס



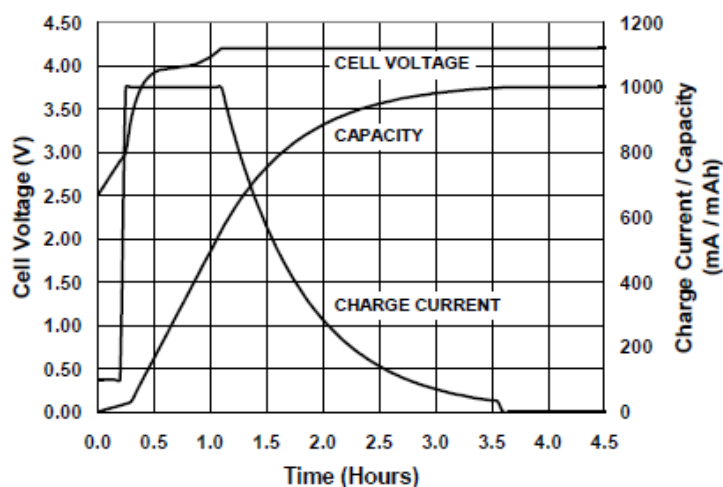
איור 8.5 - תוצאות סימולציה של משווה עם היסטרזיס עבור עומס דמה

## 5.4 טעינת סוללה

העומס של הממיר הוא מטען לסוללת Li-ion. במחקר זה הוחלט להשתמש במטען מסחרי, הסיבה לכך הוא הרצון להימנע מהגבלת המערכת לסוג מסויים של סוללה. הדרישות מהמטען הם: עבודה במתחי בנק האנרגיה, יכולת טעינה של סוללת Li-ion בודדת למתח 4.2V בהתאם לפרופיל המתאים לסוללה, שליטה דינאמית בהדלקה וכיבוי של הרכיב ובזרם הטעינה לפי כמות האנרגיה בבנק האנרגיה. הרכיב הנבחר הינו LT3650-4.2 של חברת Linear. הרכיב נקנה עם כרטיס פיתוח (איור 5.9) אשר מטעין את הסוללה לפי פרופיל הטעינה המוצג באיור 5.10.



איור 9.5 – כרטיס פיתוח של מטען לסוללת Li-ion של חברת Linear

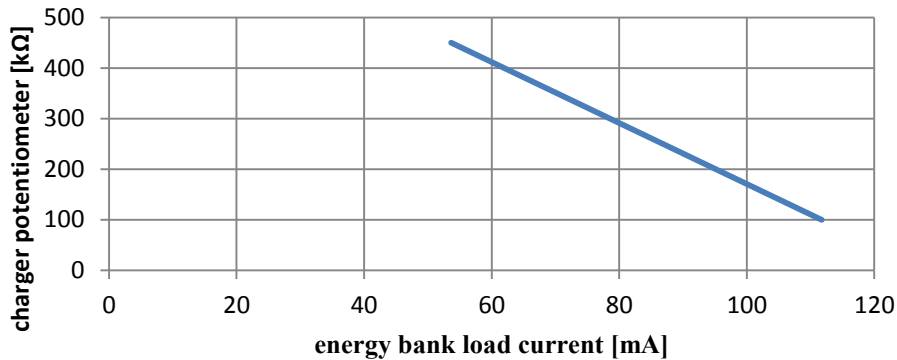


איור 10.5 – פרופיל טעינה סטנדרטי של סוללת Li-ion

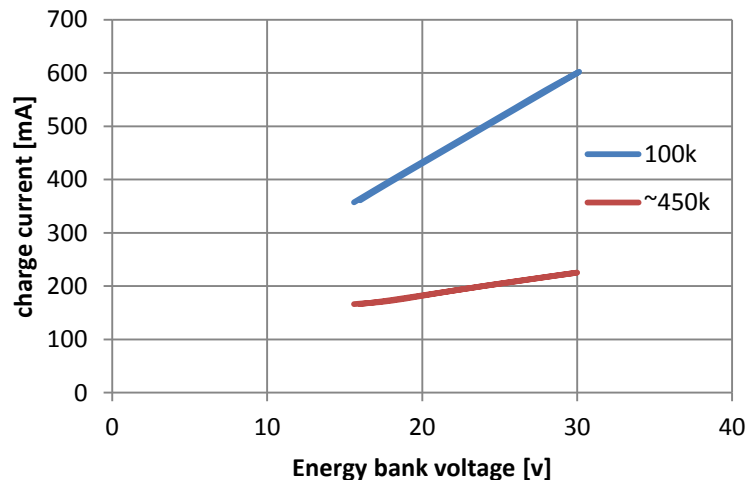
כדי שהמערכת תוכל לעבוד בצורה תקינה, המוגדרת כמצב בו מתח בנק האנרגיה נשאר בטווח שהוגדר לעבודה לאורך כל המחזור, בהספקי קצירה שונים הוכנסו מספר שינויים בכרטיס הפיתוח של המטען. הראשון הוא מחלק מתח קבוע אשר הגדיר את מתח סף העבודה כדי להימנע ממצב בו הטעינה מורידה את מתח בנק

האנרגיה מתחת לסף העבודה התקינה ( $V_{out-min}$ ). השני הינו מחלק מתח משתנה עם פוטנציומטר כדי לשלוט בצורה דינאמית על זרם הטעינה המקסימאלי לפי כמות האנרגיה שמעוניינים לקצור תוך שמירה על מתח בבנק האנרגיה באמצע תחום העבודה שלו. הקשר בין זרם העומס הרצוי ( $I_{load}$ ) של בנק האנרגיה לערך הפוטנציומטר של המטען ( $R_{charger}$ ) מוצג באיור 5.11 ונתון במשוואה הבאה:

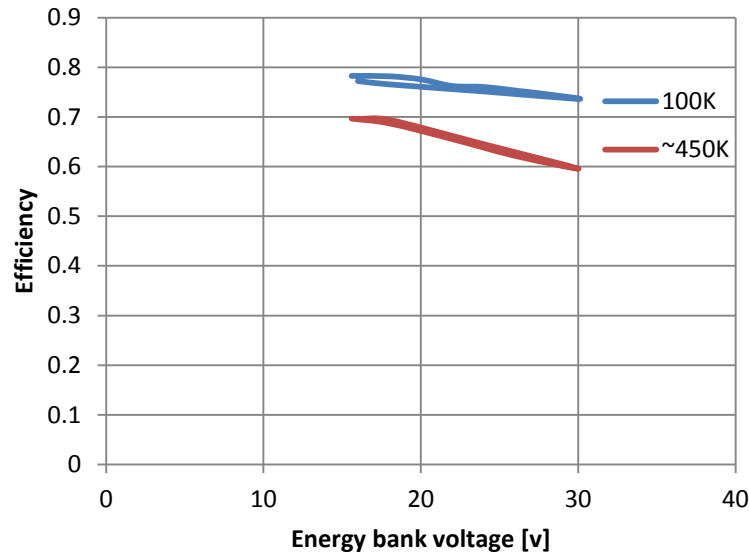
$$R_{charger}[k\Omega] = 773 - 6I_{load}[mA] \quad (42)$$



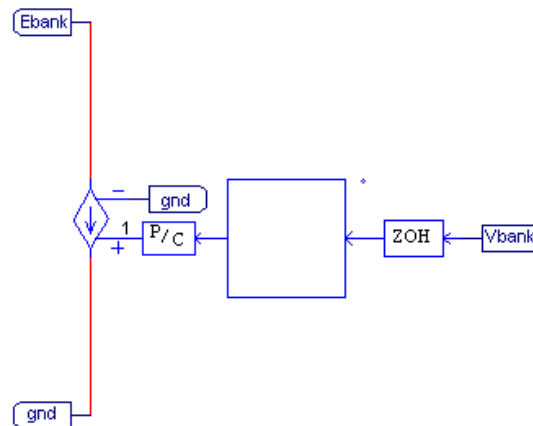
איור 11.5 – קשר בין זרם העומס של בנק האנרגיה לבין ערך הפוטנציומטר של מטען זרם העומס של בנק האנרגיה אינו תלוי בתח עליו אך כיוון שהמטען הינו מוריד מתח מסוג BUCK זרם הטעינה של הסוללה תלוי ברמת המתח של בנק האנרגיה. איור 5.12 מציג את השינויים בזרם כתלות במתח בנק האנרגיה עבור שני ערכים של הפוטנציומטר. נצילות המטען נעה בין 60-80% כאשר ככל שהצריכה גדולה יותר ומתח בנק האנרגיה נמוך יותר הנצילות גבוהה יותר (איור 5.13).



איור 12.5 – זרם טעינת הסוללה כפונקציה של מתח בנק האנרגיה וכפרמטר של הפוטנציומטר



איור 13.5 – נצילות כרטיס הפיתוח של מטען הסוללות כפונקציה של מתח בנק האנרגיה וכפרמטר של הפוטנציאל הממוצע של הברק. בניסויים נמצא שזרם העומס כמעט ואינו משתנה, בזרמים קטנים של עשרות מיליאמפרים מדובר על סטיה הקטנה מ-10% ובזרמים הגדולים של מאות מיליאמפר מדובר במתחת ל-4%. לכן בסימולציה מודל המטען כמקור זרם קבוע מבוקר (איור 5.14). הבקרה של המקור מסתכמת בכך שהמקור צורך זרם קבוע כאשר מתח בנק האנרגיה נמצא מעל סף הטעינה.



איור 14.5 – מודל המטען בסימולציה

## 5.5 תוצאות סימולציה

המערכת המלאה מודלה בתוכנת PSIM כאשר המודל המכאני ומודל הגנרטור זהים למודל שהוצג בפרק 2, למודל זה התווסף מודל של מערכת לניהול הספק שהוצג בפרק זה (את חלקי המודל ניתן לראות לאורך סעיפי

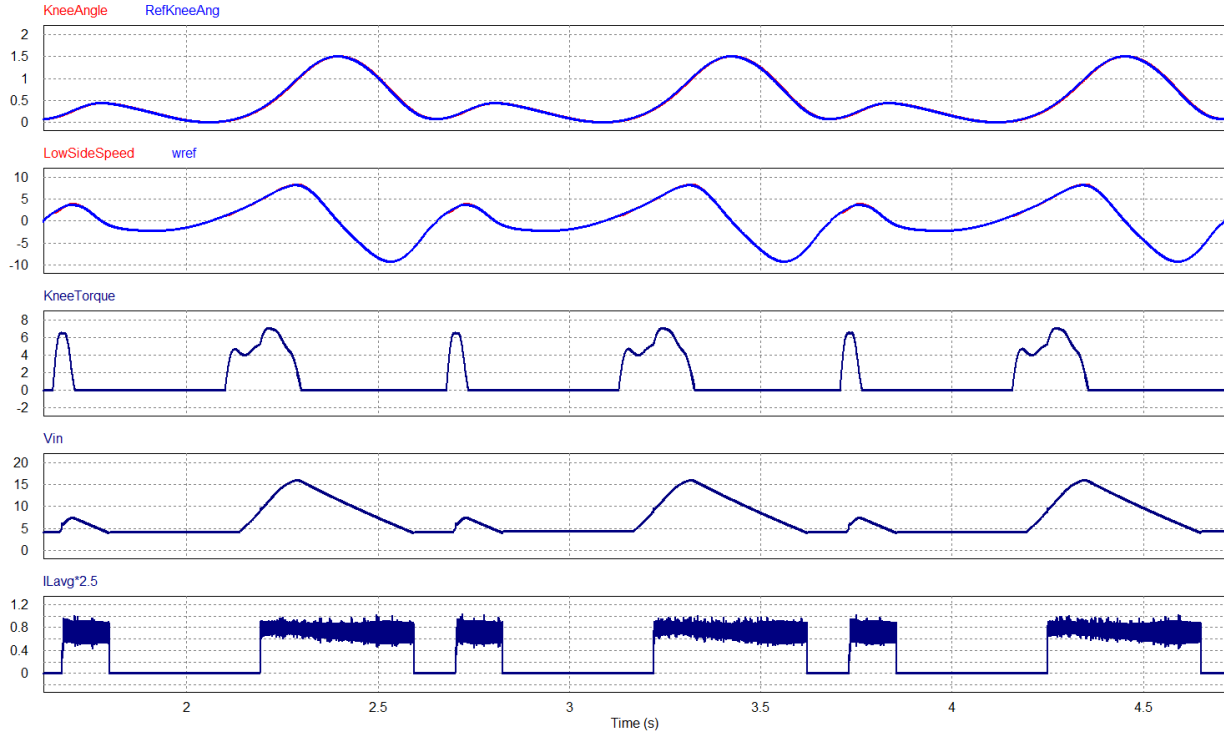
הפרק לפי חלקי המעגל שהם מייצגים). המודל המלא נימצא בנספח 10.3. לסימולציה קיימת כניסה בודדת והיא העירור הזוויתי של המפרק. הפרופיל הזוויתי של המפרק בו נעשה שימוש בסימולציה ובניסוי מעבדה התקבל מ- Dr. S. Wolf מאוניברסיטת Heidelberg בגרמניה ובוצעה לו התאמה קטנה כך שיתאים לסימולציה. ההתאמה כללה ביצוע אינטרפולציה בשיטת spline למרווחי זמן של 0.1ms כדי שהאות יראה חלק. שגיאת העקיבה (43) ב-  $E_{RMS}$  (RMS) חושבה בין הפרופיל הזוויתי המוזן למערכת ( $RefKneeAngle$ ) לבין הפרופיל הזוויתי המתקבל מתוך ביצוע אינטגרציה על המהירות במשוב של המודל המכאני ( $KneeAngle$ ). כפי שניתן להתרשם מכך באיור 5.15 (האיור העליון מציג את פרופיל הייחוס והעקיבה של זווית המפרק ב-rad והגרף השני מלמעלה מציג את מהירות הייחוס והעקיבה של המפרק ב-rad/sec) העקיבה מתבצעת בצורה טובה והשגיאה עומדת על כ- 0.01.

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RefKneeAngle(i) - KneeAngle(i))^2} \quad (43)$$

כמו כן, ניתן להתרשם מתוצאות הסימולציה בה נקבע פרופיל הקצירה להיות זרם ישר של 0.8A (הגרף התחתון). הספים לתחילת הקצירה (לפי מתח הכניסה איור שני מלמטה) נקבעו שרירותית כאשר עבור אזורי קצירה שונים קיימים ספים שונים - עבור K1 הסף הינו 5V ועבור K3 הסף 9V. פעילות הקצירה מופסקת בשני אזורי העבודה ברגע שמתח הכניסה יורד אל מתחת ל-4V. באיור האמצעי ניתן להתרשם מהמומנט הנדרש מהמפרק כדי להניע את מערכת הקצירה לפי הפרופיל הזוויתי. המסקנה מהסימולציה היא שהמערכת שתוכננה הינה יציבה והיא מבקרת את זרם הכניסה בצורה טובה.

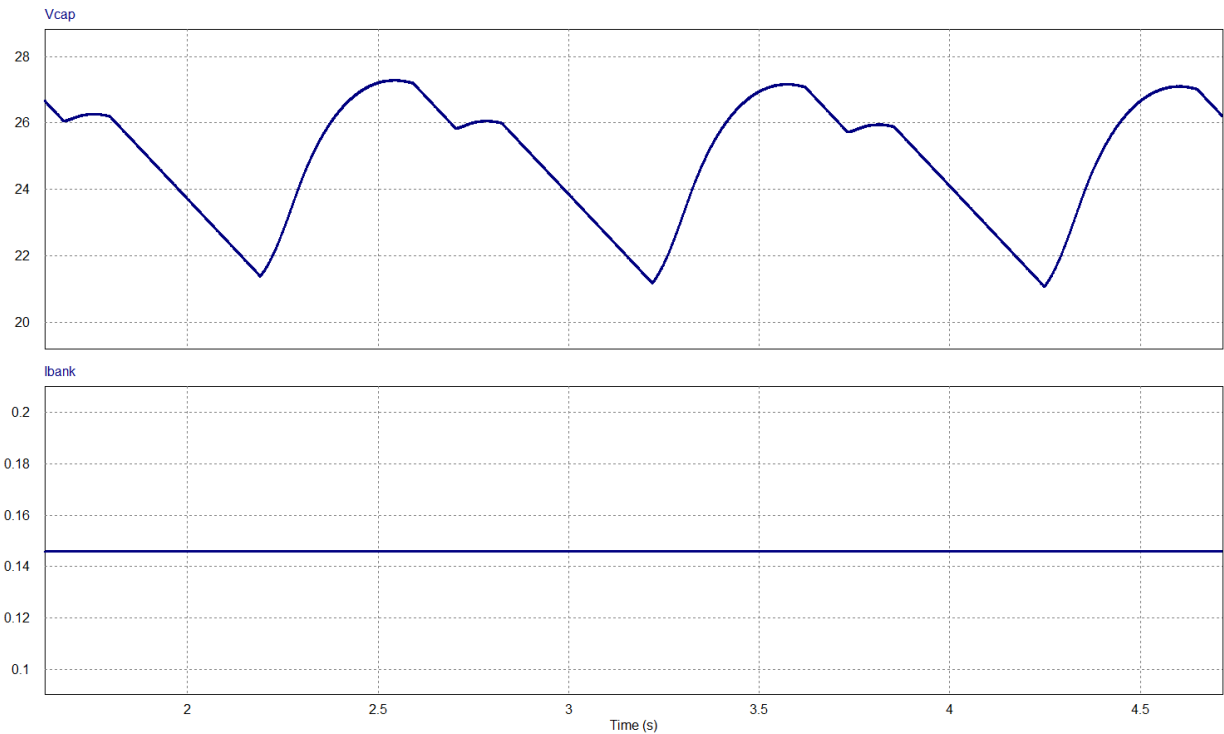
תוצאות הסימולציה מוצגים עבור מערכת הנמצאת במצב היציב. המצב היציב מוגדר כמצב בו המתח בבנק האנרגיה בתחילת ובסוף המחזור הינו אותו מתח (כלומר כמות האנרגיה הנקצרת ע"י המערכת שווה לכמות האנרגיה הנצרכת ע"י המטען) כפי שניתן לראות באיור 5.16 (איור עליון). באיור ניתן לראות שמתח העבודה של בנק האנרגיה נמצא בתוך טווח העבודה המוגדר (18-28V) וזרם הטעינה קבוע והוא 0.145A (איור תחתון).

מתוצאות הסימולציה חושב ההספק הממוצע שנקצר במהלך צעד בודד והוא 3.65W. הספק קצירה רגעית הגיע במהלך המחזור עד ל-15W עבור פרופיל קצירה זה. במודל חושבה גם נצילות המערכת להיות 96% אך נצילות זו היא אופטימית כיוון שאינה כוללת את ההספק הנצרך ע"י מעגל הבקרה.



איור 15.5 – סימולציה קצירה של אזורים K1 ו-K3 באמצעות זרם ישר. הגרפים מלמעלה למטה הם: זווית המפרק ב-rad, מהירות

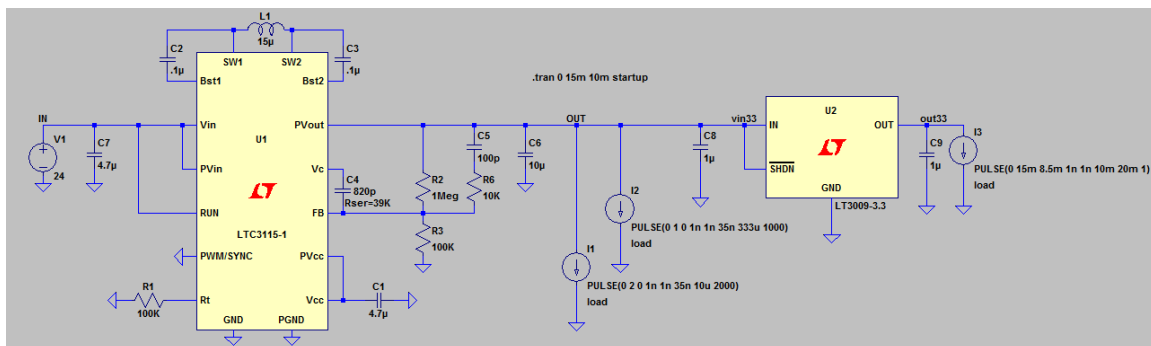
המפרק ב-rad/sec, המומנט הנדרש מהמפרק כדי להניע את מערכת הקצירה ב-Nm, מתח הכניסה לממיר, זרם הקצירה.



איור 16.5 – סימולציה במצב יציב: מתח בנק האנרגיה (גרף עליון), זרם הנצרך מהבנק (גרף תחתון)

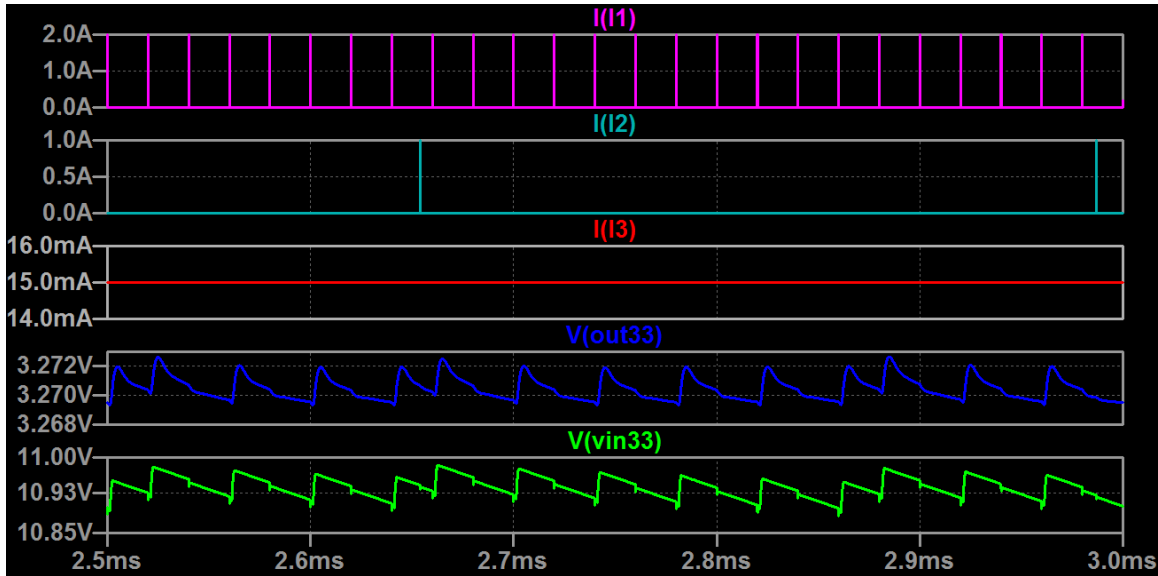
## 5.6 מתחי עזר

לצורך תפקוד מעגל הבקרה קיימים שני מודולים של ממירים ליצירת מתחים מיוצבים. האחד מודול ממיר ממותג מסוג מוריד-מעלה מתח (LTC3115-1) הממיר את מתח בנק האנרגיה ל-11V המודל השני הוא מייצב ליניארי (LT3009-3.3) ממתח 11v ל-3.3v שניהם של חברת Linear (איור 5.17). ה-11v משמש במעגל את הדוחפים של המתגים וחיישני Hall effect, ה-3.3v משמש למיקרו-בקר ולחישת הזרם. הבחירה בממיר ממותג מסוג מוריד-מעלה מתח מאפשרת למעגל הבקרה להתחיל לתפקד ממתח בנק אנרגיה של 2.6V ובכך מאפשר תחילת עבודה של המערכת כולה בצעדים הראשונים בהם דרגת ההספק עדיין אינה מבצעת קצירה ובנק האנרגיה נטען בצורה טבעית מתוך הולכת דיודות המסלול. הדוחפים של מתגי הממיר והמיישר מודלו בסימולציה כמקורות זרם פולסיים: הדוחף של הממיר מודל על ידי מקור I1 הפועל בתדר 50kHz ומעביר בכל פולס 70nC (2A/35ns), הדוחף של המיישר מודל ע"י I2 הפועל בתדר מיתוג של 3kHz ומעביר בכל פולס 35nC (1A/35ns). גובה הפולס נבחר לפי המקסימום של הדוחפים שנבחרו. העומס של מיקרו-בקר עם החיישנים הינו עומס קבוע והוא מודל בסימולציה ע"י I3. תוצאות הסימולציה מוצגים באיור 5.18. המודול מוריד-מעלה מתח תוכנן לפעולה ב-burst mode להקטנת הצריכה הסטטית של המודול. המתחים המתקבלים במוצא הינם מיוצבים כאשר תנודות המתח 11v הינם של  $\pm 10\text{mV}$  ועבור מתח 3.3v הינם  $\pm 1\text{mV}$ .



איור 5.17 – מעגל סימולציה לבדיקת תכנון מתחי עזר באמצעות מייצב ממותג מסוג מוריד-מעלה ל-11v ומייצב ליניארי ל-3.3v.

העומסים של השניים מודלו באמצעות מקורות זרם.



איור 18.5 – אותות מסימולציה מתחי עזר: מתח מוצא מודול מוריד-מעלה מתח (vin33), מתח מוצא מודול מייצב ליניארי (vout33), זרם הממדל את המיקרו-בקר והחיישנים (I3), זרם פולסים הממדל את דוחף המתגים במיישר (I2), זרם פולסים הממדל את דוחף הממיר (I1).

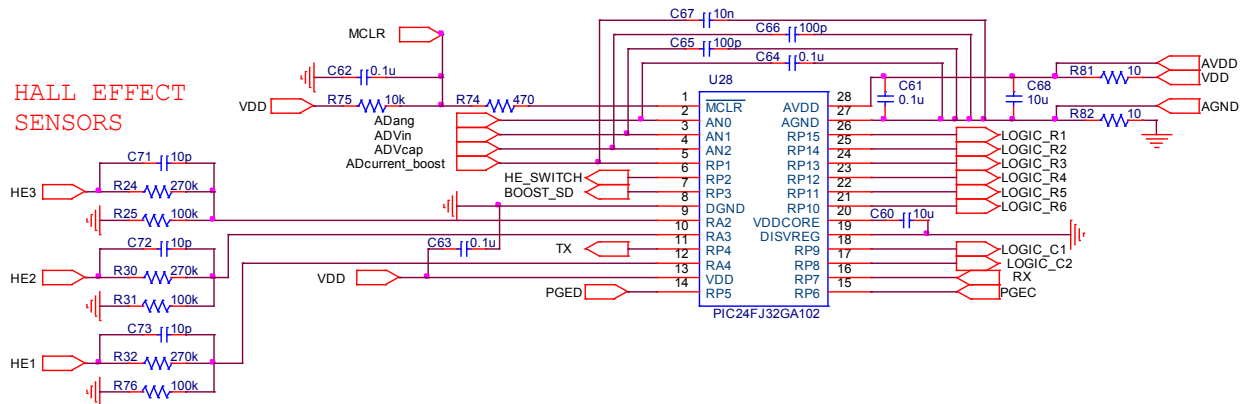
## 5.7 מיקרו-בקר

במחקר זה הוחלט לממש את בקרת אלקטרוניקת ההספק בצורה דיגיטלית, הפלטפורמה שנבחרה למימוש הבקרה הינה מיקרו-בקר. לצורך כך הוגדר מפרט דרישות מהרכיב:

- הספק פעולה נמוך
- מודול PWM – לשליטה על הממיר
- מודול UART – למימוש התקשורת הדיגיטלית בין המערכת למחשב או למערכות נוספות
- לפחות 4 כניסות אנאלוגיות – עבור A/D לדגימת זווית הברך, מתח וזרם בכניסה לממיר, מתח בנק האנרגיה
- לפחות 3 כניסות דיגיטליות – עבור חיישני Hall effect
- לפחות 6 יציאות דיגיטליות – עבור בקרת גשר תלת פאזי ליישור סינכרוני
- יכולת צריבה חוזרת בתוך מעגל היעד

החיפוש התמקד בשתי חברות הידועות במיקרו-בקרים שלהם: Texas Instruments- ו-Microchip. בשתי החברות קיימות משפחות מיקרו-בקרים עבור מימושים מוגבלי הספק. בחברת Texas Instruments מדובר במשפחת MSP430 ב-Microchip מדובר במשפחת PIC24F. משתי משפחות אלו נבחרו שני מיקרו-בקרים שעמדו בדרישות האפליקציה MSP430F5510 ו-PIC24FJ32GA102. מבחינת צריכת הספק קיים יתרון קל למיקרו-בקר של חברת Texas Instruments, אך למיקרו-בקר של חברת Microchip שני יתרונות: הראשון מודול המוגדר לבקרת PWM, השני ניסיון קודם מוצלח עם מיקרו-בקרים של חברה זו והיכרות מעמיקה עם כלי הפיתוח של הרכיב. לכן המיקרו בקר שנבחר עבור מחקר זה הינו PIC24FJ32GA102.

המיקרו-בקר הנבחר (איור 5.19) הינו בעל 28 רגליים כאשר באפליקציה זו נעשה שימוש בכל רגלי הרכיב. גמישות מאוד גבוהה במיפוי הרגליים לפונקציונליות שונות הממומשות בחומרת הרכיב מה שמקל על תכנון ה-layout של הכרטיס. היתרון במיפוי הרגליים למודולים הוא שאותם רגליים מקושרות חומרתית ולצורך תפקודם לא נדרשת התערבות תוכניתית.



איור 19.5 – מיקרו-בקר PIC24FJ16GA102

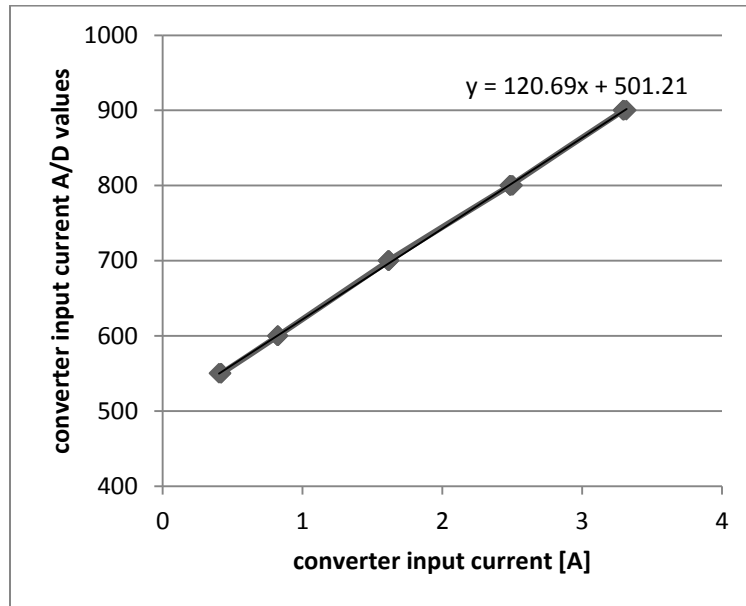
חלוקת הרגליים לפי פונקציונליות הינה: 4 כניסות משמשות את ה-A/D, 3 כניסות מבצעות חישת רמת מתח של חיישני Hall effect, יציאה בודדת משמשת לכיבוי והדלקה של חיישני Hall effect, 6 יציאות משמשות את בקרת המישר, 3 יציאות מוגדרות עבור בקרת הממיר, 2 רגליים משמשות את התקשורת הטורית מול המחשב ו-3 רגליים משמשות לצריבת הרכיב בתוך מעגל היעד.

הכניסות אנלוגיות של A/D נדגמות ברזולוצייה של 10bit, אופן קינפוג המודול מתואר בפרק התוכנה. כדי לחסוך בכוח העיבוד של מיקרו-בקר ערכי ה-A/D הנעים בין 0 ל-1024 אינם מומרים לערך האמיתי שהם מייצגים ולכן

המשוואות הממומשות בתוכנה עברו התאמה לערכים אלו. לצורך ההתאמה נתונות כאן פונקציות ההמרה עבור הכניסות שנמצאו בניסויים והרזולוציה האבסולוטית שלהן.

הקשר בין זרם הכניסה לממיר לערכי ה-A/D נתון באיור 5.20. מתוך האיור ניתן לראות את הקשר הליניארי הנתון במשוואה:

$$\hat{I}_{in} = 120.69I_{in} + 501.21 \quad (44)$$



איור 20.5 – חישת זרם, ערכי A/D בתלות בזרם הכניסה לממיר מעלה מתח

רזולוציה במדידת זרם:

$$I_{res} = \frac{V_{AD}}{AD_{res} R_{sense} G_v} \approx 8mA \quad (45)$$

כאשר  $I_{res}$  רזולוציית מדידת הזרם,  $V_{AD}$  – הוא מתח הרפרנס של ה-A/D,  $AD_{res}$  – רזולוציית A/D,  $R_{sense}$  – נגד חישת זרם, ו- $G_v$  הוא הגבר המתח של מגבר חישת זרם. הזרם המקסימאלי הניתן למדידה:

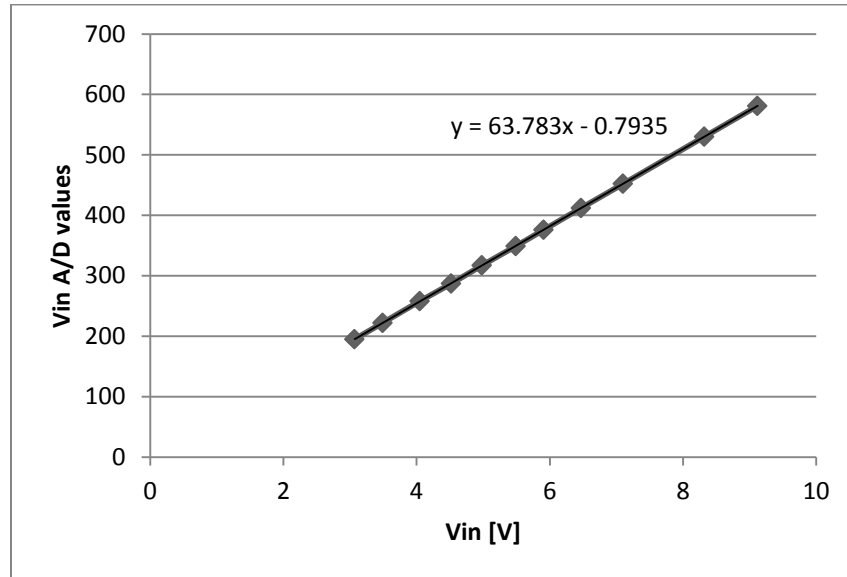
$$I_{max} = \frac{V_{AD} - 0.4 - V_{AD}/2}{R_{sense} G_v} \approx 3.2A \quad (46)$$

מתוך ידיעת רזולוציה של הזרם ניתן גם למצוא את הרזולוציה מבחינת המומנט המופעל על המפרק (בלי להתייחס לאי אידיאליות מערכת מכאנית):

$$T_{res} = I_{res}K_T R_G \approx 16.6mNm \quad (47)$$

במידת המתח בכניסה לממיר קיים מחלק מתח כדי להתאים את המתחים לרמות של ה-A/D, הקשר הסופי נתון באיור 5.21. הפונקציה המתארת את הקשר נתונה במשוואה הבאה:

$$\hat{V}_{in} = 63.78V_{in} - 0.79 \quad (48)$$



איור 21.5 – חישת מתח בכניסה לממיר מעלה מתח

המתח הגבוה ביותר הצפוי בכניסה לממיר הינו 14V ונלקח טווח ביטחון של 2V כדי להימנע מפגיעה ב-A/D. לכן רזולוציית המדידה של ה-A/D הינה:

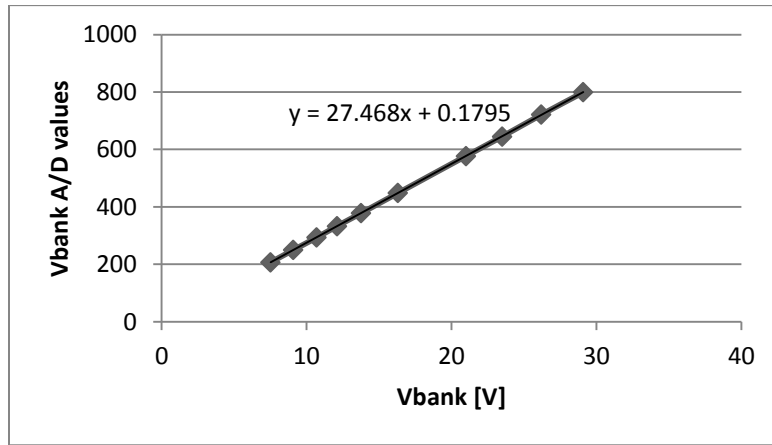
$$V_{in_{res}} = \frac{V_{in_{max}}}{AD_{res}} \approx 15mV \quad (49)$$

גם במדידת המתח בנק האנרגיה קיים מחלק מתח כדי להתאים את המתחים לרמות של ה-A/D, הקשר הסופי נתון באיור 5.22. הפונקציה המתארת את הקשר נתונה במשוואה הבאה:

$$\hat{V}_{bank} = 27.47V_{bank} - 0.18 \quad (50)$$

המתח הגבוה ביותר הצפוי בבנק האנרגיה הינו 28V כפי שהוגדר כבר קודם ונלקח טווח ביטחון של 8V. לכן רזולוציית המדידה של ה-A/D הינה:

$$V_{bank_{res}} = \frac{V_{bank_{max}}}{AD_{res}} \approx 35mV \quad (51)$$



איור 22.5 – חישת מתח בנק האנרגיה

כניסת ה-A/D היחידה שלא נתונה כאן היא של דגימת זווית הברך. הסיבה לכך היא שבכל פעם שמפרקים ומרכיבים את הברכייה הערכים משתנים. כמו כן, השימוש בזווית הינו תמיד יחסי לערכי קיצון (מינימום ומקסימום) המתעדכנים בכל צעד. לכן אין צורך בידיעת ערכיהם האבסולוטיים. הרזולוציה במדידת זווית הברך הינה:

$$Angle_{res} = \frac{360^\circ}{AD_{res}} = 0.35^\circ \quad (52)$$

## 5.8 לוגיקת פעולת המערכת

### 5.8.1 הקדמה

לוגיקת העבודה של המערכת מוצגת כאן מתוך נקודת מבט של תוכנת המיקרו-בקר המתחלקת לשני חלקים: free-run ו-wake-up. הפונקציות העיקריות של התוכנה (מיקום הברך, קצירה וחיפוש נקודת מקסימום ההספק) יפורטו במהלך הפרק. מטרת הפרק לתאר את הלוגיקה מאחורי התוכנה המשמשת כמח למערכת ניהול ההספק ומתארת את אופן ההתנהגות של המערכת ויכולתיה. תרשים הזרימה המתאר בצורה סכימטית את אופן התנהגות התוכנה נתון באיור 5.23.

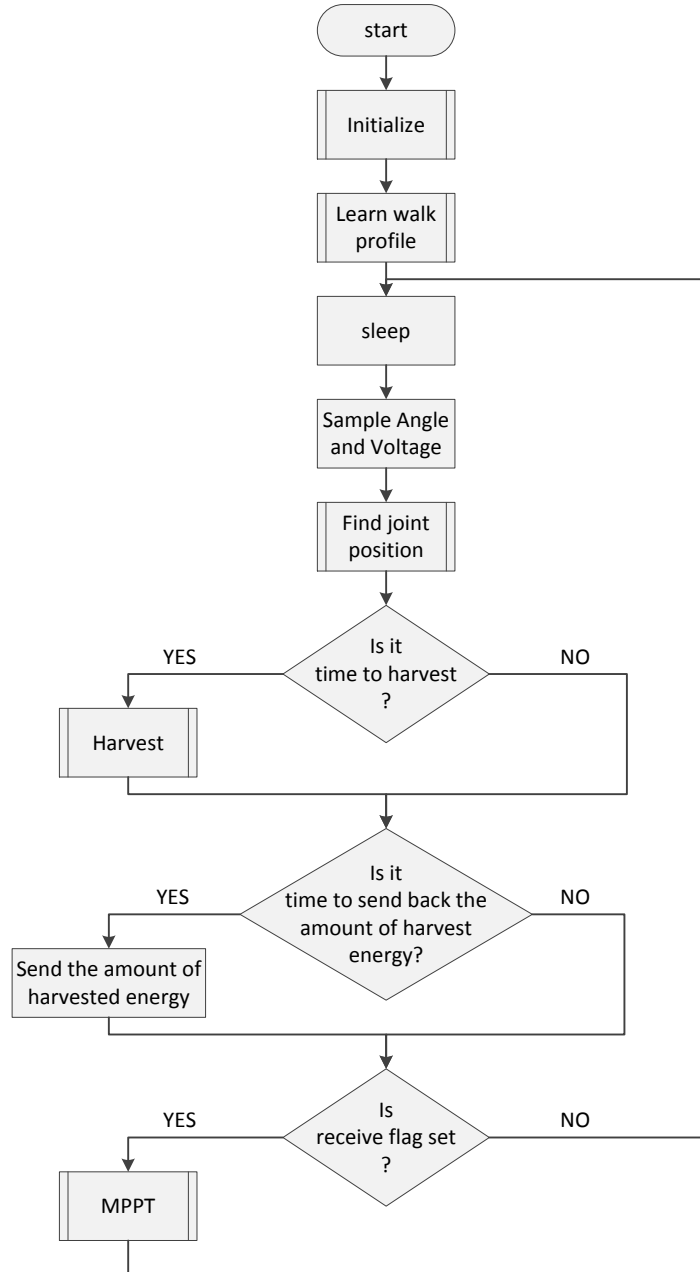
לפני תנועתו הראשונה של המשתמש בנק האנרגיה פרוק ולכן המתח שיוצר הגנראטור במהלך התנועה מספיק כדי להכניס את דיודות המסלול של החומרה להולכה ולהטעין את בנק האנרגיה לרמה המאפשר את הפעלת המיקרו-בקר במצב של צריכה אנרגטית נמוכה. בשלב ה-wake-up המיקרו-בקר מבצע את הפעולות

הבאות: אתחול משתנים, מיפוי פינים למודולים והגדרת אופן התפקוד של המודולים (כדוגמת PWM ו-UART). הפעולה העיקרי המתבצעת בשלב זה היא לימוד פרופיל תנועה של המשתמש. בשלב זה המערכת אינה קוצרת והשלב נמשך מספר צעדים. בשלב הלמידה המודול A/D מכוון לדגימה ידנית. זווית הברך ומתח הכניסה לממיר נדגמים פעם ב- $8.25ms$ . כל זמן שלא מתבצעת הדגימה הממשית המודול מכובה. הדגימה מועברת לפונקציית מיקום הברך לזיהוי הערכים החשובים בפרופיל ההליכה אשר יתוארו בסעיף 5.8.2. ברגע סיום ביצוע הפונקציה המיקרו-בקר מוכנס לשינה לחיסכון באנרגיה. המערכת עוברת לשלב ה-free-run לאחר שזוהו בהצלחה 3 צעדים.

שלב ה-free-run מתחלק לשני מצבי עבודה שונים: קצירה ואי קצירה. מצב אי קצירה זהה למצב הלמידה עם הבדל אחד, לאחר כל דגימה נשאלת השאלה האם הגיע הזמן לקצירה. אם כן, המערכת נכנסת לפונקציית הקצירה (סעיף 5.8.4). פונקציה זו מעירה את כלל המערכת והיא אחראית על בקרת החומרה והעקיבה אחר פרופיל הקצירה. בסוף הקצירה התוכנה חוזרת ללולאה הראשית (מצב אי קצירה) ונשאלות שתי שאלות. האם בוצע המספר הדרוש של צעדים למיצוע האנרגיה שנקצרה. אם כן, הערך נשלח למחשב באמצעות מודול UART והמשתנים הקשורים בחישוב האנרגיה הממוצעת שנקצרה מאותחלים. האם התקבלה צריכה מטבולית. אם כן, מתבצעת קריאה לפונקציית חיפוש נקודת מקסימום ההספק (MPPT) אשר מתוארת בהרחבה בסעיף 5.8.5. בסוף הלולאה המערכת חוזרת לישון עד שיגיע הזמן לבדוק שוב את מיקום המפרק במחזור הצעד.

זמן שינה של  $8.25ms$  נקבע כך כיוון שהרגיסטר האחראי על זמן שינה של המיקרו-בקר הינו בעל מספר בדיד של זמני שינה. כמו כן, רזולוציית המדידה של זווית הברך לא מאפשרת דגימה יותר מהירה מ- $5ms$ . המדידה של זווית הברך מתבצעת ע"י פוטנציומטר מסוג single turn, אך כיוון שמפרק הברך אינו עושה תנועה יותר רחבה מרבע סיבוב אזי גם הרזולוציה של המדידה קטנה פי 4 כלומר מדידת ה-A/D הינה ברזולוציה של 8bit במקום 10.

מודול ה-UART אחראי על תקשורת דיגיטלית מול המחשב. התקשורת הינה בקצב של 19.2kbps. השליחה למחשב הינה של 4 בתים: שני הראשונים הינם זהים כדי שתוכנת ה-MATLAB תוכל להבדיל בין מידע תקין ללא תקין ושני האחרונים מכילים את המידע על כמות האנרגיה הממוצעת שנקצרה במהלך N הצעדים האחרונים.



איור 23.5 – תרשים זרימה של מבנה התוכנה

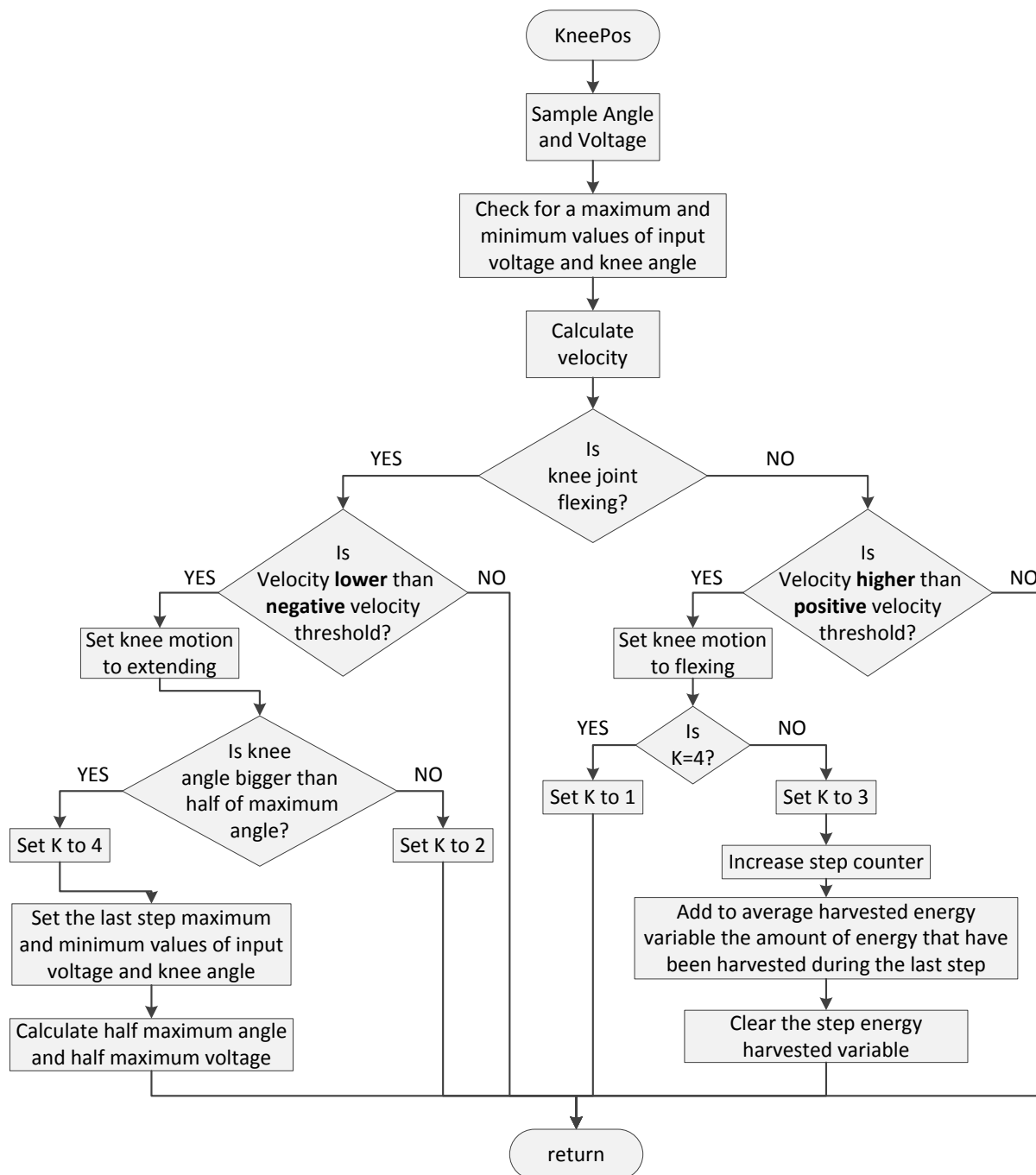
## 5.8.2 פונקציית מיקום הברך

תפקיד פונקציית מיקום הברך הוא לבצע זיהוי של 4 מקטעי מחזור ההליכה (המחולק לפי כיוון תנועת המפרק – כיפוף/פשיטה). תרשים הזרימה המתאר את אופן פעולת הפונקציה נתון באיור 5.24. פונקציה זו נקראת כל 8.25ms לאחר דגימת זווית הברך והמתח המיושר בכניסה לממיר. מתוך הזווית מחושבת המהירות דמה של הברך (53). מדובר במהירות דמה ( $Velocity(k)$ ) כיוון שמשיקולי חסכון בכוח העיבוד ערכי זווית ה-A/D

של זווית המפרק ( $Angle(k)$ ) אינם מומרים לערכים בעלי משמעות ולא מתבצעת חלוקה של הפרש הזוויות בהפרש הזמנים ביניהם. כיוון שמהירות הדמה משמשת אך ורק לבחינת כיוון התנועה של המפרק לא קיימת פגיעה במידע עקב אי ביצוע ההמרה.

$$Velocity(k) = Angle(k) - Angle(k - 1) \quad (53)$$

כמו כן, במהלך כל צעד של המשתמש נמצאים מחדש הפרמטרים של מינימום ומקסימום זווית הברך והמתח המיושר. בפרמטרים אלו נעשה שימוש לקביעת ספי זיהוי של מקטעי הצעד השונים וזמני תחילת הקצירה. מתוך ידיעת כיוון התנועה של הברך (כיפוף או פשיטה) נבדק האם השתנה כיוון המהירות מעבר לסף שנקבע. אם הברך נמצאת במצב של כיפוף והמהירות נהייתה שלילית מעבר לסף אזי מצב הברך מתעדכן לפשיטה ולפי הזווית מתבצעת ההחלטה האם מדובר בשלב K2 או K4. כאשר המשתמש נכנס לשלב K4 על זווית המפרק להיות גדולה יותר ממחצית הזווית המקסימלית. מחזור העקיבה אחר זווית מפרק ומתח מיושר מקסימאליים ומינימאליים מתבצע במחזור צעד שתחילתו ב-K4. לכן, בכל כניסה ל-K4 משתמשים בערכים אלו כדי לחשב מחדש את הספים של מחצית הזווית המקסימאלית ומחצית המתח המקסימאלי. ספים צפים אלו עוזרים למערכת להתכוון לצורת ההליכה הייחודית של המשתמש ועדכונם מאפשר עקיבה אחר שינוי בקצב ההליכה או במשטח ההליכה. השימוש במחצית זווית המקסימום נבחר שרירותית לבחינת תכנון המערכת. אם הברך נמצאת במצב של פשיטה והמהירות נהייתה חיובית מעבר לסף אזי מצב הברך מתעדכן לכיפוף. במקרה והשלב הקודם הינו K4 אזי המפרק נכנס לשלב K1 ואם לא מדובר בשלב K3. בכניסה ל-K3 מסתיים מחזור הצעד מבחינת קצירה. הדבר מתבטא בכך שמונה הצעדים גדל והחלק היחסי של האנרגיה שנקצרה במהלך הצעד האחרון מתווסף לממוצע אשר יישלח במועד מאוחר יותר למחשב.



איור 24.5 – תרשים זרימה של פונקציית מיקום הברך

### 5.8.3 פרופיל קצירה

צורתו מיקומו ועוצמתו של פרופיל קצירה הוא נושא מחקר בפני עצמו. נושא אשר עוד ייחקר בתעשייה וניהול. כדי לאפשר מחקר זה אופן שמירת פרופיל הקצירה צריך להיות נוח לשינוי וצורתו גמישה מספיק כדי שכל חוקר בלי הבנה מעמיקה בתוכנת המיקרו-בקור יוכל להשתמש בו.

לכל אזור אותו מעוניינים לקצור קיימים שלושה מערכים חד ממדיים ייעודיים: פרופיל בסיסי ( $BASE_{K_i}$ ), פרופיל שינוי ( $DELTA_{K_i}$ ) ופרופיל רפרנס ( $REF_{K_i}$ ). אורכי המערכים עבור אזורי קצירה שונים לא חייב להיות זהה. פרופיל קצירה בסיסי מכיל את פרופיל הקצירה ההתחלתי. פרופיל השינוי הינו פרופיל המכיל את הקפיצות הקבועות לשינוי כל אחד מתאי מערך פרופיל הקצירה והוא נמצא בשימוש בפונקצית חיפוש נקודת מקסימום ההספק. המערכים פרופיל בסיסי ושינוי הינם מתוכננים בקוד ע"י החוקר ב-off-line ונשארים קבועים במהלך פעולת המערכת. פרופיל הרפרנס מאותחל כפרופיל בסיס בהפעלת המערכת (54) אך הוא משתנה תוך כדי פעולת המערכת (55) באמצעות פונקצית חיפוש נקודת מקסימום ההספק. הזרם המוכתב ע"י המערכת עוקב אחר הערכים המופיעים במערך הרפרנס.

$$REF_{K_i}(n) = BASE_{K_i}(n) \quad (54)$$

$$REF_{K_i}(n) = REF_{K_i}(n) \pm DELTA_{K_i}(n) \quad (55)$$

הערכים המופיעים במערכים הינם הערכים השקולים של זרם הכניסה המיוצגים ע"י ערכי A/D מתאימים. הסיבה לכך הוא הרצון לחסוך בכוח העיבוד בזמן ריצת המערכת, באופן פעולה זה אין צורך לבצע המרה בכל פעם שדוגמים את הזרם אלא במקום זאת עובדים ישירות עם ערכים שקולים. חוקר אשר מעוניין לתכנת את פרופיל הקצירה יצטרך לבצע את הפעולות הבאות:

1. המרת פרופיל מומנטי הבלימה שבמפרק לערכי זרמים מתאימים לפי: יחס התמסורת, קבוע המומנט של המנוע והאינרציות הקיימות במערכת.
2. המרת פרופיל הקצירה מזמן רציף לבדיד
3. המרת ערכי הזרמים האמיתיים לערכי A/D מתאימים. זאת יוכל לעשות לפי הפונקציה הנתונה באיור 5.20.
4. קביעת פרופיל שינוי. לדוגמא לצורך בדיקת המערכת ערכיו של פרופיל השינוי נקבעו ל- 5% מערכי המערך הבסיסי.

#### 5.8.4 פונקצית קצירה

מטרת פונקצית הקצירה הינו להעיר את הממיר לחיים ולבקר את פעולתו כך שיידמה למקור זרם עבור הגנראטור. תרשים הזרימה של הפונקציה נתון באיור 5.25. במהלך פעולת הפונקציה מופעלים חיישי Hall effect

של הגנראטור אשר מספקים אותות לבקרת מיישר סינכרוני, הבקרה פועלת ברקע ומומשה באמצעות interrupt. בכל קריאה ל-interrupt מושוים שלושת האותות למצבים מוכרים ובהתאם לכך ממותג המיישר.

במצב קצירה מודול ה-A/D מקונפג לעבודה רציפה של דגימת זווית הברך, מתח זרם בכניסה לממיר, ומתח במוצא הממיר. כאשר הדגימה של ה-A/D מסונכרנת עם תחילת מחזור ה-PWM. המיקרו-בקר מסוגל לדגום אך ורק כניסה אחת בכל פעם ולכן כל 4 מחזורים של PWM נדגמות כל הכניסות בצורה עוקבת (sequential). כיוון שתדר ה-PWM הינו 50KHz אזי הפרש הזמנים בין דגימה לדגימה של אותו ערוץ הינו  $80\mu\text{sec}$ . כדי לשמור על תאימות בין מצב הקצירה לבין שאר מצבי המערכת בהם הזווית נדגמת כל  $8.25\text{msec}$  משתמשים אך ורק בדגימה ה-103. הפונקציה מורכבת מלולאה החוזרת על עצמה כל עוד דגל הקצירה מורם כאשר בתוכה שתי התניות המתבצעות בהתאם לדגל המורם.

התניה ראשונה הינה של דגל הזרם המתרחשת כל 4 מחזורים של PWM. במהלך ביצוע ההתניה נבדק האם מתח בכניסה לממיר ירד מתחת לסף בו לא נרצה להמשיך בקצירה. במקרה שמתח בכניסה לממיר הינו מתחת לסף מאפסים את כל המשתנים הקשורים לבקרה, מפסיקים לקצור ומורידים את דגל הקצירה. במקרה והמתח מעל הסף מחושב ה-D.C החדש לפי משוואות הבקרה במישור הבדיד:

$$D(z) = 19.95 * \frac{z-1}{z-0.73} \quad (56)$$

$$u(k) = u(k-1) + 0.05(e(k) - 0.73e(k-1)) \quad (57)$$

עקב הרצון להקטין את עומס העיבוד במיקרו-בקר הערכים שנדגמים ל-A/D אינם מומרים לערכים אותם הם מייצגים ובמקום זאת מומרת הפונקציה לשימוש בערכי A/D. הקשר בין אות השגיאה ( $e$ ) לאות המתאים לערכי A/D ( $\hat{e}$ ) נתון במשוואה הבאה:

$$e(k) = \frac{V_{AD}}{AD_{res} R_{sense} G_v} \hat{e}(k) \quad (58)$$

כאשר  $V_{AD}$  מתח הייחוס של ה-A/D,  $AD_{res}$  הרזולוציה של ה-A/D,  $R_{sense}$  נגד חישת זרם,  $G_v$  הגבר מגבר חישה. כמו כן, ערכי אות הבקרה של בקר PI ( $u$ ) הינם מותאמים לאות בקרה של DPWM ( $\hat{u}$ ) שהיחס ביניהם הוא מספר פעימות שעון המיקרו-בקר ( $C_{per}$ ) במחזור בודד של מיתוג ( $F_{PWM}$ ):

$$.u(k) = \frac{1}{C_{per}} \hat{u}(k) \quad (59)$$

לחסכון נוסף בכוח העיבוד אנו נמנעים משימוש בשברים ולכן ההעדפה הינה עבודה במספרים גדולים. לכן משוואת הבקרה מוכפלת ב- $2^{11}$  וערכיה מעוגלים למספרים שלמים.

$$\tilde{u}(k) = 2^{11} \hat{u}(k) \quad (60)$$

$$\tilde{u}(k) = \tilde{u}(k-1) + 2^{11} \frac{0.05}{100} \frac{V_{AD}}{AD_{res}} \frac{C_{per}}{R_{sense} G_v} (100 \hat{e}(k) - 73 \hat{e}(k-1)) \quad (61)$$

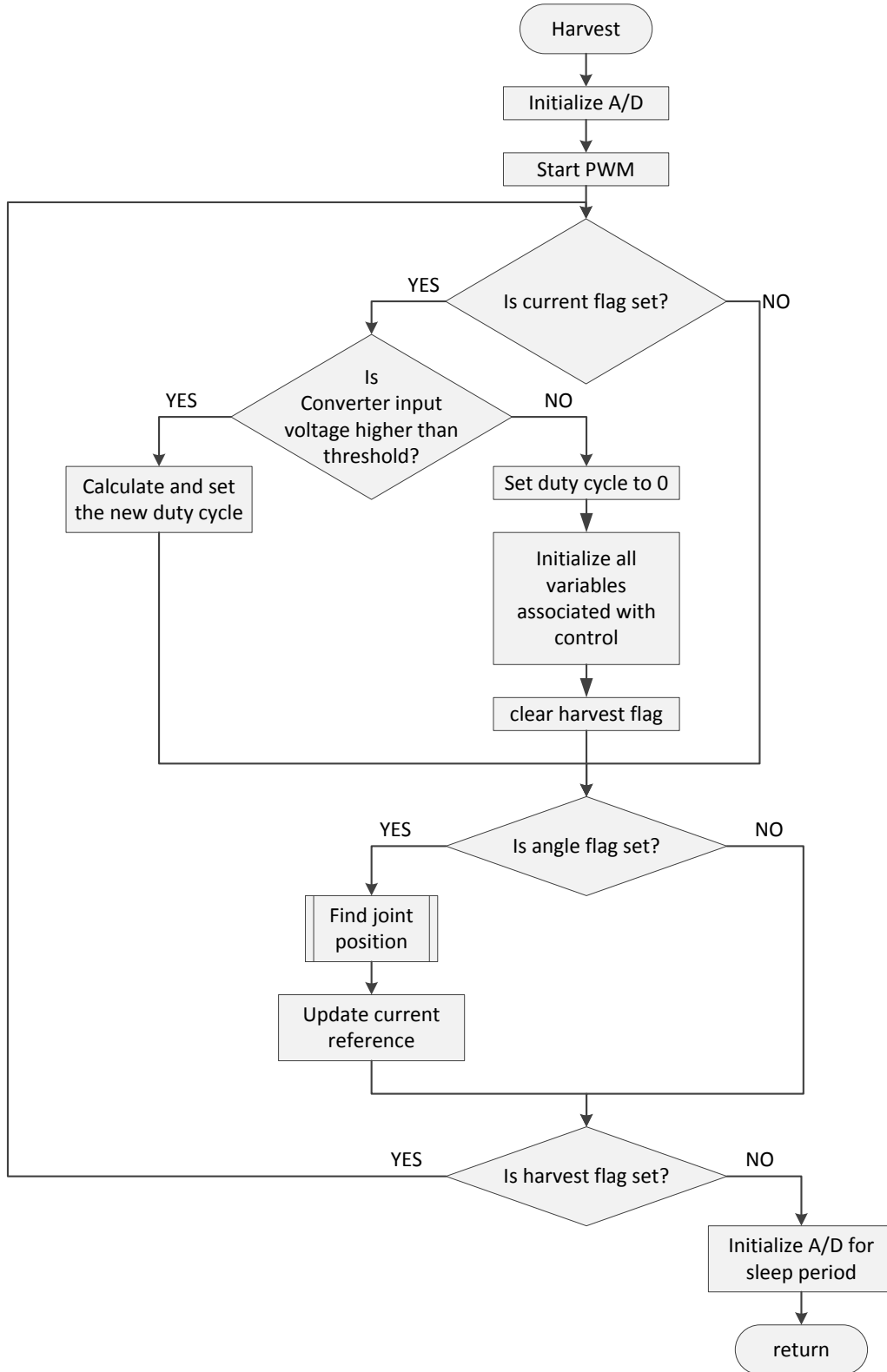
בשלב האחרון לפני העברת הערך למודול ה-PWM ( $OC1R$ ) אות הבקרה  $\tilde{u}$  מוזז ימינה 11 מקומות. פעולה זו מדמה חלוקה כאשר הערך המתקבל הינו מספר שלם:

$$OC1R = \tilde{u}(k) \gg 11 \quad (62)$$

קבועי המשוואות הינם:  $V_{AD} = 3.26$ ;  $AD_{res} = 1024$ ;  $C_{per} = 318$ ;  $R_{sense} = 0.008$ ;  $G_v = 50$ .

התניה שנייה הינה של דגל הזווית המתרחשת כל 103 מחזורים של PWM. במקרה זה מתבצעת קריאה לפונקצית מיקום הברך להמשך עקיבה אחר מיקום המפרק במחזור הצעד. כמו כן, מתבצע עדכון של ערך רפרנס הזרם מתוך פרופיל הרפרנס. אם לא הסתיימה הקצירה לפני ההגעה לסוף המערך של פרופיל הרפרנס, ערך הרפרנס של הזרם נשאר קבוע ושווה לערך האחרון במערך הרפרנס.

בסיום הפונקציה ולפני החזרה ללולאה הראשית מכויל מחדש מודול ה-A/D כך שיתאים למצב אי קצירה.



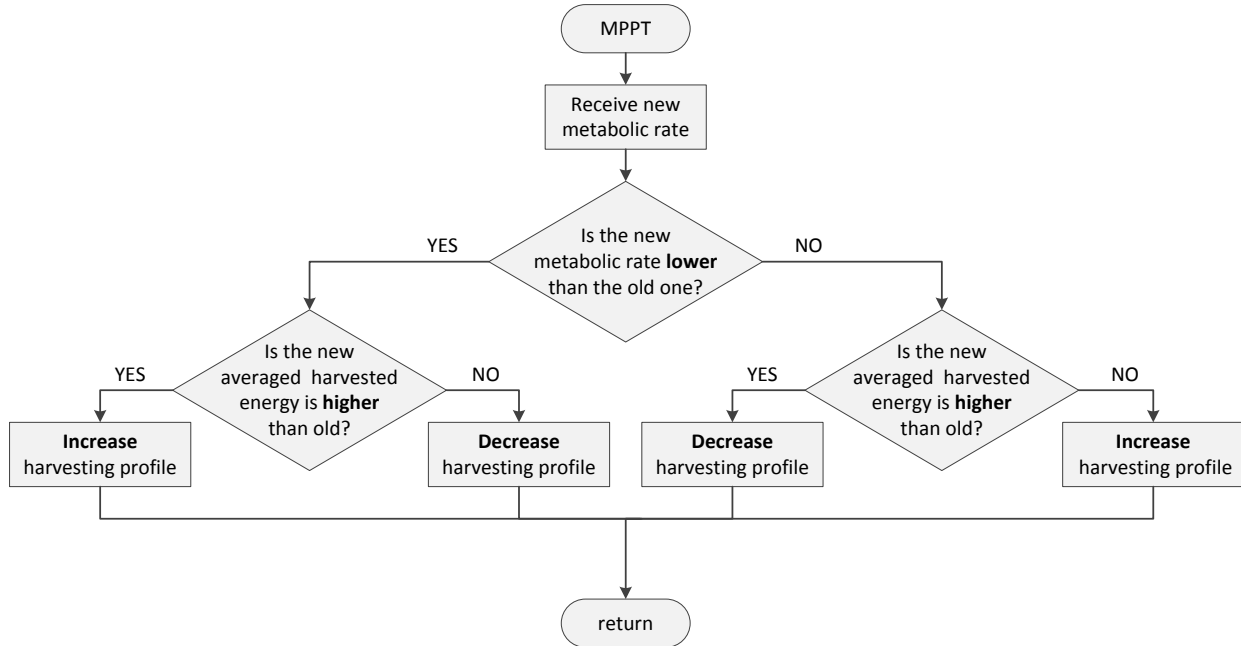
איור 25.5 – תרשים זרימה של פונקציית קצירה

### 5.8.5 פונקציית חיפוש נקודת מקסימום ההספק

מטרת פונקציית ה-MPPT הינו חיפוש ועקיבה אחר נקודת עבודה אופטימאלית בה נקצר מקסימום ההספק תוך עזרה מקסימאלית למשתמש. הקריאה לפונקציה מתבצעת כאשר מתקבל במשוב הביולוגי ערך חדש של צריכה מטבולית. תרשים זרימה המתאר את פעולת הפונקציה מוצג באיור 5.26.

הערך החדש של צריכה מטבולית משווה לערך של האיטרציה הקודמת. בנוסף לכך, מתבצעת השוואה בין כמות האנרגיה הממוצעת שנקצרה באיטרציה הנוכחית לעומת האיטרציה הקודמת. מתוך שתי ההשוואות הללו אנו מקבלים את ארבעת האפשרויות:

- הצריכה המטבולית **ירדה** ובמקביל האנרגיה הממוצעת שנקצרה **עלתה**. מצב זה אומר שבאיטרציה הקודמת הוגדל פרופיל הקצירה והמיקום על גרף צריכה מטבולית עדיין מתחת לנקודת המינימום של הצריכה המטבולית ולכן גם באיטרציה הנוכחית **מוגדל** פרופיל הקצירה.
- הצריכה המטבולית **ירדה** ובמקביל האנרגיה הממוצעת שנקצרה **ירדה**. מצב זה אומר שבאיטרציה הקודמת הוקטן פרופיל הקצירה והמיקום על גרף צריכה מטבולית עדיין מעל לנקודת המינימום של הצריכה המטבולית ולכן גם באיטרציה הנוכחית **מוקטן** פרופיל הקצירה.
- הצריכה המטבולית **עלתה** ובמקביל האנרגיה הממוצעת שנקצרה **עלתה**. מצב זה אומר שבאיטרציה הקודמת הוגדל פרופיל הקצירה ונחצתה נקודת המינימום של הצריכה המטבולית ולכן באיטרציה הנוכחית **מוקטן** פרופיל הקצירה.
- הצריכה המטבולית **עלתה** ובמקביל האנרגיה הממוצעת שנקצרה **ירדה**. מצב זה אומר שבאיטרציה הקודמת הוקטן פרופיל הקצירה ונחצתה נקודת המינימום של הצריכה המטבולית ולכן באיטרציה הנוכחית **מוגדל** פרופיל הקצירה.



איור 26.5 – תרשים זרימה של פונקציית חיפוש אחר נקודת מקסימום ההספק

חישוב האנרגיה שנקצרה ( $\tilde{E}_{step}$ ) מתבצע במיקרו-בקר בצורה הבאה: במהלך הצעד בכל קריאה לפונקציית מיקום הברך מתבצעת מכפלה של זרם ומתח בכניסה לממיר. כדי לחסוך בכוח העיבוד מתבצעת אך ורק המרה קריטית של ערכי A/D לערכים אותם הם מייצגים כדי שלתוצאת המכפלה יהיה קשר ליניארי למכפלה של הערכים אותם הם מייצגים. חסכון נוסף מתבטא באי הכפלת הביטוי בקבוע הזמן שבין המדידות. תוצאת המכפלה מתווספת לתוצאות כל המכפלות שנעשו לפניו באותו הצעד לקבלת כמות האנרגיה שנקצרה בצעד בודד עד אותו הרגע:

$$\tilde{E}_{step} = \tilde{E}_{step} + (\hat{I}_{in} - 501)(\hat{V}_{in} \gg 6) \quad (63)$$

בסוף כל צעד מתווסף הערך היחסי של האנרגיה שנקצרה במהלך הצעד מתוך N הצעדים לקבלת אנרגיה ממוצעת ( $\tilde{E}_{inav}$ ). ערכה של האנרגיה שנקצרה בצעד מאופס לקראת תחילתו של צעד חדש:

$$\tilde{E}_{inav} = \tilde{E}_{inav} + (\tilde{E}_{step} \gg \log_2 N) \quad (64)$$

הפונקציה גם עוקבת אחר כמות השינויים שבוצעו וכיוונם (הגדלה/הקטנה) על פרופיל הקצירה כדי לוודא שערכיו אינם יוצאים מגבולות מוגדרים. גבולות אלו קובע החוקר באמצעות כמות הקפיצות המותרת בכל כיוון לכל פרופיל בהתאם לגודל השינוי, לפרופיל הבסיסי ולכך שהערכים צריכים להיות מותאמים לערכים הנדגמים ע"י ה-A/D.

הפונקציה מקבלת ממודול ה-UART 3 בתים כאשר שני הראשונים מייצגים integer חיובי בין 0 ל- 65535 והשלישי הוא זבל. הסיבה לשימוש בשלושה הינו כיוון שבהגדרות ה-interrupt של UART אין מצב בו הוא נקרא כשיש לו 2 בתים בחוצץ. לערך ה-integer אין משמעות מיוחדת מבחינה תוכניתית כיוון שההתייחסות אליו הינה ביחס לערך הקודם שהתקבל. הסיבה לשימוש ב-integer הוא מתוך הרצון לרזולוציה טובה מבחינת הצריכה המטבולית. מתוך ניתוח הנתונים נמצא שעבור שינוי פרופיל הקצירה בקפיצות של 5% מגודל הפרופיל הבסיסי יש צורך בערך integer אשר ייצג את הצריכה המטבולית.

הפונקציה מעבירה למודול ה-UART את החלטתה שגם היא integer כאשר הבתים התחתון והעליון שווים. הסיבה הפעם לשימוש ב-integer היא כדי לבודד מקרים בהם נשלח זבל מהמיקרו-בקר למחשב אשר יכול לבלבל את התוכנה שנכתבה במטלאב (נכון לכתיבת שורות אלו שליחת זבל קרה אך ורק בשלב הדלקה וכיבוי של המיקרו-בקר). הודעות הפונקציה הן כדילקמן: החלטה על הגדלת/הקטנת פרופיל קצירה, הודעת שגיאה על כך שכמות השינויים חרגה מהמותר, הודעת שגיאה פנימית של הפונקציה על כך שהיא לא מזהה את הפעולה שעליה לעשות (הודעה זו היא שגיאת קוד). כלל ההודעות מרוכזות בטבלה 5.111.

**טבלה 5.111 – טבלה המסכמת את ההודעות הנשלחות ע"י פונקציית חיפוש נקודת מקסימום ההספק**

ערך	ההודעה
31	הודעה על הגדלת פרופיל הקצירה
32	הודעה על הקטנת פרופיל הקצירה
5	שגיאת מספר השינויים חורגת מהמותר
6	שגיאה פנימית של הפונקציה על כך שהיא לא מזהה את הפעולה

## 5.9 סיכום

במהלך הפרק הוצגו השיקולים ואופן התכנון של המערכת לניהול הספק דור ב'. המערכת מורכבת ממיישר תלת פאזי אקטיבי סינכרוני בדרגת הכניסה. לב המערכת הוא ממיר ממותג מסוג מעלה מתח הפועל עם בקרת זרם כדי להכתיב את פרופיל הבלימה. האנרגיה שנקצרת מאוחסנת בבנק אנרגיה המורכב מקבל גדול ואשר משמש כחוצץ בין המקור הפועם לבין הצרכנים החשמליים. המערכת הינה מערכת אוטונומית ולכן צריכת ההספק של רכיבי מעגל הבקרה הינה מבנק האנרגיה. העומס של המערכת הינו מטען סוללת Li-Ion.

פיתוח חומרת המערכת הסתיים בייצור מעגל מודפס (איור 4.22). הכרטיס הינו בעל 4 שכבות, כאשר שתי השכבות החיצוניות משמשות לניתוב המוליכים ושתי השכבות הפנימיות משמשות ל-2 רמות מתחי עזר ול-3 אדמות. ההפרדה בין האדמות הינה להספק (power stage), לבקרה ולחישה של ה-A/D. השרטוט החשמלי של הכרטיס נתון בנספח 10.4 ותמונות של כל אחת משכבות הכרטיס נתונות בנספח 10.5. הכרטיס נארז בתוך קופסא חשמל (איור 5.28) לעמידה בניסויים עם נסיינים.



איור 27.5 – כרטיס המערכת לניהול הספק (דור א')



איור 28.5 – קופסת זיווד של המערכת לניהול הספק (דור ב')

## 6 הוכחת התכנות

### 6.1 הקדמה

פרק הוכחת התכנות מציג את החלק הניסויי של התזה. הפרק מתחלק לשני חלקים: הוכחת המידול והוכחת גישת הקצירה.

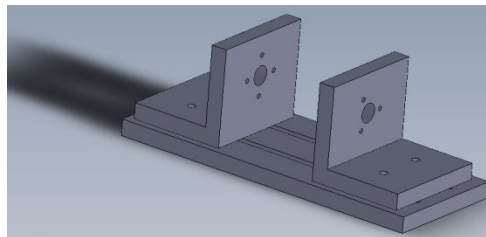
גישת המידול הוצגה בפרק 2 והיא נבחנת בשני שלבים. בשלב הראשון מוכח מודל הגנראטור המוצע באמצעות מערך ניסוי בו חובר הגנראטור בחיבור ישיר למנוע DC והגנראטור סובב במהירויות קבועות. בשלב השני נבחן המודל המלא באמצעות השוואת בין הסימולציה לתוצאות ניסויי הליכה עם נסיינים אנושיים על הליכון וקצירה באמצעות מערכת לניהול הספק דור א' אשר תוארה בפרק 4.3.

גישת הקצירה הוצגה בפרק 3 והיא נבחנת באמצעות מערכת לניהול הספק דור ב' אשר תוארה בפרק 5. בשני השלבים הראשונים של הבדיקות המוצגים בפרק זה מבוצע כיוול ובדיקת של כל חלקי המערכת לניהול הספק דור ב'. בשלב האחרון של הבדיקות נעשה שימוש במדמה הליכה אשר בוחן את גישת הקצירה בסביבה מעבדתית סטרילית.

### 6.2 הוכחת המודל

#### 6.2.1 מערך ניסויים לאישוש מודל הגנראטור

לאימות המאפיינים הבסיסיים של הגנראטור (EC-45 flat) נבנה מערך ניסוי שכלל את הגנראטור בחיבור 1:1 עם מנוע DC. ע"י קביעת מתח ספק סובב המנוע DC במהירות הרצויה. הבדיקות נעשו כאשר עומס הגנראטור מומש ע"י שלושה נגדים משתנים ( $R_L$ ) בחיבור כוכב. הבדיקות נעשו עבור התנגדויות של  $0.92, 2, 5, 10, 20 \Omega$  כל עומס נבדק עבור סידרת מהירויות עד ל-4000rpm. במהלך הניסויים נמדדו המתחים והתדרים על אחת הפאזות.



איור 1.6 – תשתית למערך ניסוי בו הגנראטור הנבדק מסובב ע"י מנוע DC והם נמצאים בחיבור 1:1

תוצאות הניסויים הראו התנהגות ליניארית באמפליטודת המתח אשר מצביעה על כך שניתן להזניח את השראות הפאזות בתחום המהירויות בהם נבדק הגנראטור ובו מתוכננת לעבוד המערכת לצורך מציאת קבועי הגנראטור. מתח העומס ( $V_{Lrms}$ ) והתדר ( $F_L$ ) שנמדדו שימשו לחילוץ קבוע ה-BEMF ( $K_{erms}$ ) והתנגדות הפאזה ( $R_i$ ). כיוון שמדובר במערכת תלת פאזית סימטרית ומאוזנת הניתוח בוצע בצורה חד פאזית. בניתוח זה השראות הפאזה הזנחה עקב תוצאות הניסוי ולכן מדובר במעגל בסיסי של מקור מתח התנגדות פאזה והתנגדות עומס המחוברים בתור. מתוך האמור לעיל מתח העומס הינו פונקציה של קבוע BEMF, תדר, מספר הקטבים ( $p$ ), התנגדות הפאזה והעומס ( $R_L$ ):

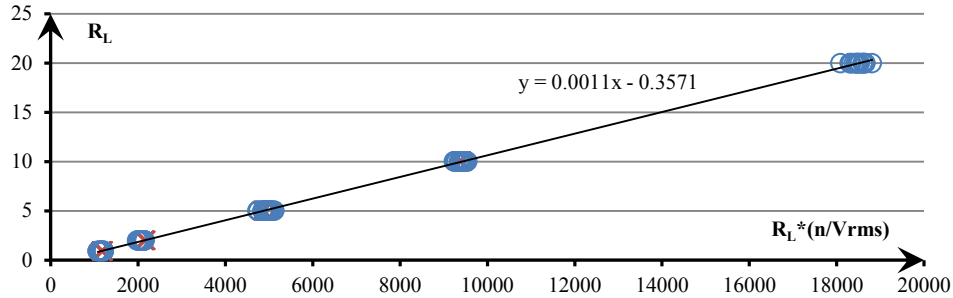
$$V_{Lrms} = K_{erms} \left( \frac{F_L}{p} * 60 \right) \left( \frac{R_L}{R_L + R_i} \right) = K_{erms} n \left( \frac{R_L}{R_L + R_i} \right) \quad (65)$$

כאשר  $n$  הינו מהירות הרוטור ב-rpm.

משוואה (65) שוכתבה כמשוואה ליניארית  $y = ax + b$  כדי לבודד את הפרמטרים  $x = (nR_L/V_{Lrms})$  ו- $y = R_L$ :

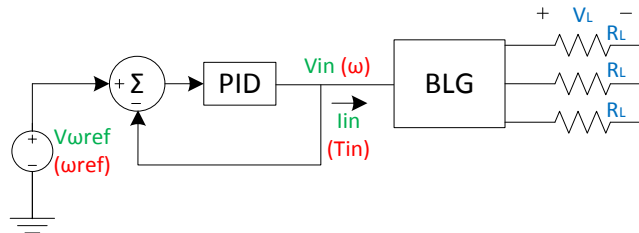
$$R_L = K_{erms} (nR_L/V_{Lrms}) - R_i \quad (66)$$

תוצאות הניסויים מסומנות בעיגולים כחולים באיור 6.2, לפי ה-linear trendline מתקבל השיעור של קבוע ה-BEMF ( $K_{erms} = 0.0011 V_{rms}/rpm$ ) ושל התנגדות הפאזה ( $R_i = 0.357 \Omega$ ). קבוע ה-BEMF תואם את המאפיינים שעליהם הכריז היצרן (טבלה 1.6) בהתחשב בפקטור  $\sqrt{6}$  הנובע מכך שההסתכלות במחקר זה על קבוע ה-BEMF של פאזה עבור מתח RMS ואילו היצרן מכריז על קבוע המהירות של אמפליטודת מתח בין הפאזות. ההתנגדות שנמצאה בשיטה זו כוללת בתוכה את התנגדותם של החוטים והמחברים של מערך הניסוי שנמצאו להיות  $0.12 \Omega$ . לאישוש התנגדות הפאזה שנמצאה בוצעה מדידת התנגדות והשראות בין שתי פאזות באמצעות INSTEK RLC והערכים שנמדדו הם:  $0.445 \Omega$  ו- $0.28mH$ . המדידה איששה הן את הנתונים עליהם הצהיר היצרן ואת הערך שחולץ מתוך תוצאות הניסויים.



איור 2.6 - גרף המרכז את תוצאות הניסויים (עיגולים כחולים) ואת תוצאות הסימולציה של המודל (איקסים אדומים)

הפרמטרים שחולצו הוכנסו לסימולציה לבדיקת המודל. בסימולציות מהירות הסיבוב של הגנראטור נשמרה קבועה באמצעות חוג סגור המימש בקרת PID (איור 6.3). קבועי בקר PID הינם:  $K_p = 1000, K_I = 1000, K_D = 0.1$ . תוצאות הסימולציה כלולים באיור 6.2 ומסומנים באיקסים אדומים. השגיאה בין תוצאות הסימולציה לתוצאות הניסויים אינה עולה על 5%.



איור 3.6 - מעגל סכמתי של סימולציה לבדיקת מודל הגנראטור

לצורך נוחות הקריאה רוכזו הנתונים הטכניים של הגנראטור הנמצא בשימוש מערכת קצירת האנרגיה מתוך דפי המפרט של היצרן [34]:

טבלה 1.6 - נתונים טכניים של הגנראטור הנמצא בשימוש מערכת קצירת אנרגיה מהברך (מתוך דפי המפרט של היצרן)

Nominal voltage	18 V
No load speed	6710 rpm
No load current	294 mA
Nominal speed	5250 rpm
Nominal torque	96.9 mNm
Nominal current	3.54 A
Terminal resistance phase to phase	0.413 Ohm
Terminal inductance phase to phase	0.322 mH
Torque constant	25.1 mNm/A
Speed constant	380 rpm/V
Rotor inertia	135 gcm <sup>2</sup>

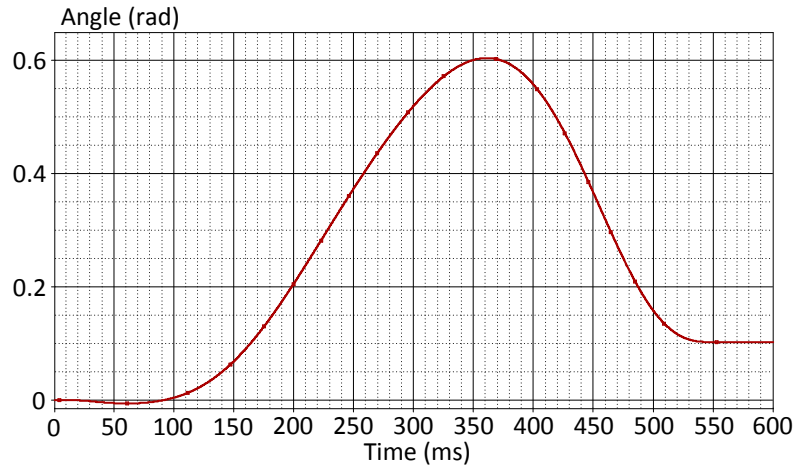
### 6.2.2 מערך ניסויים לאישוש המודל המלא

הניסויים בוצעו על הליכון ב-8 נסיינים אשר הלכו בקצבי הליכה שונים (4,5,6 kph). במהלך הניסויים נדגמה זווית המפרק ומתח אחת הפאזות באמצעות סקופ Tektronix 2014B והמידע נאגר ע"י תוכנת NI LabVIEW Signal Express 3. בנוסף לכך, נעשה שימוש בתקשורת הטורית בין המיקרו-בקר למחשב כדי לשמור במחשב את הנתונים שרואה המיקרו-בקר והיא כללה זווית המפרק, מהירות ותאוצה זוויתית שחושבו בצורה נומרית והחלטה של האלגוריתם. המידע נקלט במחשב באמצעות שימוש בתוכנת HyperTerminal ונשמר כקובץ טקסט. סקריפט שנכתב ב-MATLAB שיחזר את המידע מתוך הקבצים. שחזור המידע כלל המרת הערכים מערכי מוצא של A/D לערכים בעלי משמעות וביצוע פעולות אשר לא בוצעו במהלך הניסוי משיקולי חיסכון כוח עיבוד של מיקרו-בקר (כדוגמת חלוקה ב- $\Delta T$ ). הניסויים בוצעו ע"י סטודנטים מתעשייה וניהול במהלכם נבדקה השפעת לבישת המכשיר ועוצמות קצירה שונות על הצריכה המטבולית של המשתמש ועל פרופיל ההליכה של המשתמש. העומסים שנבדקו הינם  $1, 2, 5, 10 \Omega$ .

כדי למצוא את כמות האנרגיה שנקצרה בודדו צעדים אשר נדגמו במלואם ע"י LabVIEW, בוצעה אינטגרציית רימן על דגימות מתח הפאזה ( $v$ ) בריבוע תוך חלוקה בהתנגדות העומס ( $R_L$ ) והכפלתם בקבוע הזמן שבין הדגימות ( $\Delta T$ ). לקבלת כלל האנרגיה שנקצרה בשלושת הפאזות ובשני המכשירים הוכפל הנתון ב-6.

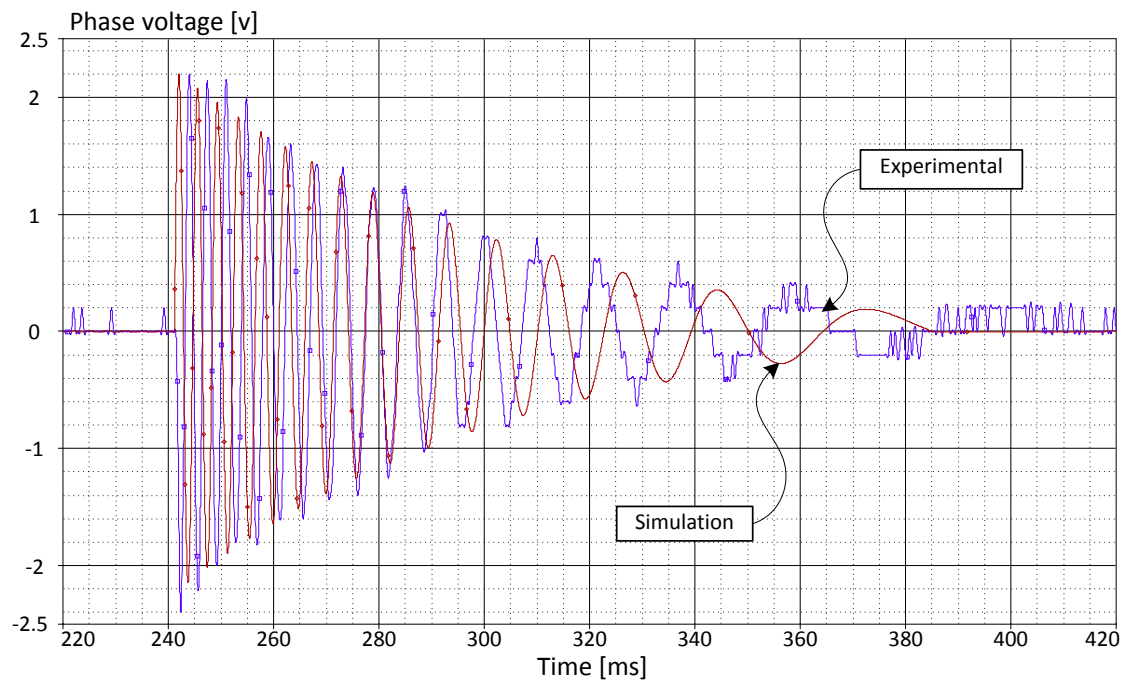
$$E = 6 \sum \frac{v^2}{R_L} \Delta T \quad (67)$$

מדגימות זווית הברך שנאספו במהלך הניסויים שתוארו בפרק הקודם נבחרו מספר צעדים עבור כל נסיין במהירויות שונות ואלו עברו התאמת עקומה (curve fitting) במטלאב ע"י פולינום מסדר 11 כדי להחליק את הנתונים ולהתאימם לשימוש בסימולטור. כיוון שבשלב זה של המחקר העניין הינו אך ורק בקצירת אנרגיה מאזור K3 רק חלק מהצעד המכיל מקטע זה הוכנס לסימולציה. הדוגמאות המובאות בסעיף זה מתבססות על חלק מהצעד המוצג באיור 6.4.



איור 4.6 – פרופיל זוויתי של הברך

ההפסדים המכאניים של הגיר, הפסדי הליבה והחיכוך של המנוע כוילו ע"י התאמת תוצאות הסימולציה לתוצאות של נסיינים שונים. לאחר הכיול, המודל נמצא כתואם לתוצאות של שאר הניסויים שבוצעו כפי שניתן לראות באיור 6.5. כפי שניתן לראות מהאיור המודל המוצע מדמה את ההתנהגות הדינאמית הכללית של המערכת בצורה טובה. מהשוואת תוצאות הסימולציה לתוצאות הניסויים מבחינת כמות האנרגיה הנקצרת עולה ששיאית המודל הינה מתחת ל-10%. הפרמטרים החשובים של הסימולציה רוכזו בטבלה 11.6.



איור 5.6 – השוואה בין מתח הפאזה בסימולציה באדום למתח הפאזה בניסויים בסגול

## טבלה 6.6 – נתונים טכניים חשובים של הסימולציה

Gear Ratio	83
Gear moment of inertia	4.3 gcm <sup>2</sup>
Gear friction on the high speed side	1 mNm
Phase resistance	0.22 Ohm
Phase inductance	0.12 mH
BEMF constant	0.0011 Vrms/rpm
Torque constant	14.855 mNm/A
Core losses constant	0.01 mNm/(rad/sec)
Rotor friction	1 mNm
Wire resistance	0.3 Ohm

## 6.2.3 מסקנות מניסויים בנסיינים

בסעיף זה מובאות המסקנות שנבעו מניסויי הליכה בקצב של 6kph. המהירות המקסימאלית אליה הגיע מפרק הברך עם הגנראטור מחובר, עם ובלי הקצירה, הינה 5 rad/sec מתוך כך המהירות המקסימאלית שאליה הגיע הגנראטור הינה 3965 rpm. מהניסויים שערכו הסטודנטיות מתעשייה וניהול נמצא שההתנגדות הנותנת את מירב האנרגיה במוצא ושהמשתמשים מרגישים אותה אך היא אינה מפריעה להליכה הינה  $1\Omega$ . המתח שנמדד על העומס הגיע לכ-4Vpk הסיבה למתח הנמוך מהמצופה (הצפי הינו ל-6Vpk עבור מהירות זו של הגנראטור) הינה כיוון שההתנגדות הינה התנגדות הקרובה להתנגדות הפנימית של הגנראטור וכאשר מחשיבים גם את התנגדות החוטים והמחברים קיים מחלק מתח שלא ניתן להזניח. האנרגיה שנקצרה בניסויים אלו הינה 0.9 וכיוון שמחזור הצעד הינו 0.9s הרי שההספק הממוצע שנקצר מהמכשיר הינו 1W.

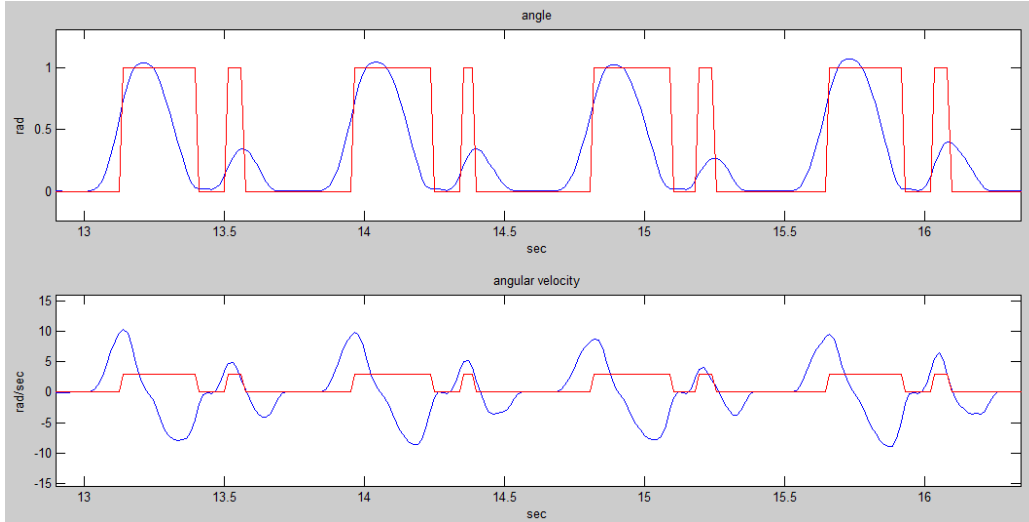
במהלך הניסויים בוצע גם ניסוי הליכה עם מערכת קצירת אנרגיה אך כאשר הגנראטור מנותק בצורה פיזית במהלך ניסויים אלו המהירות הזוויתית המקסימאלית של הברך היא כ-11rad/sec.

בעמודים הקרובים מוצגות תוצאות ניסויים לפי החישה של המיקרו-בקר עבור שתי הברכיות בקצב הליכה של 6kph: גנראטור מנותק פיזית (איור 6.6, איור 6.9), גנראטור מחובר פיזית אך ללא קצירה חשמלית (איור 6.7, איור 6.10) ושלישי עם קצירה חשמלית שבה העומס הינו נגד של  $1\Omega$  (איור 6.8, איור 6.11). עבור כל ניסוי ישנם שני גרפים כאשר בעליון מופיע זווית המפרק ובתחתון מהירות הזוויתית של המפרק, על הגרפים מופיע באדום גם החלטת האלגוריתם לגבי זיהוי עבודה שלילית (אות דיגיטלי).

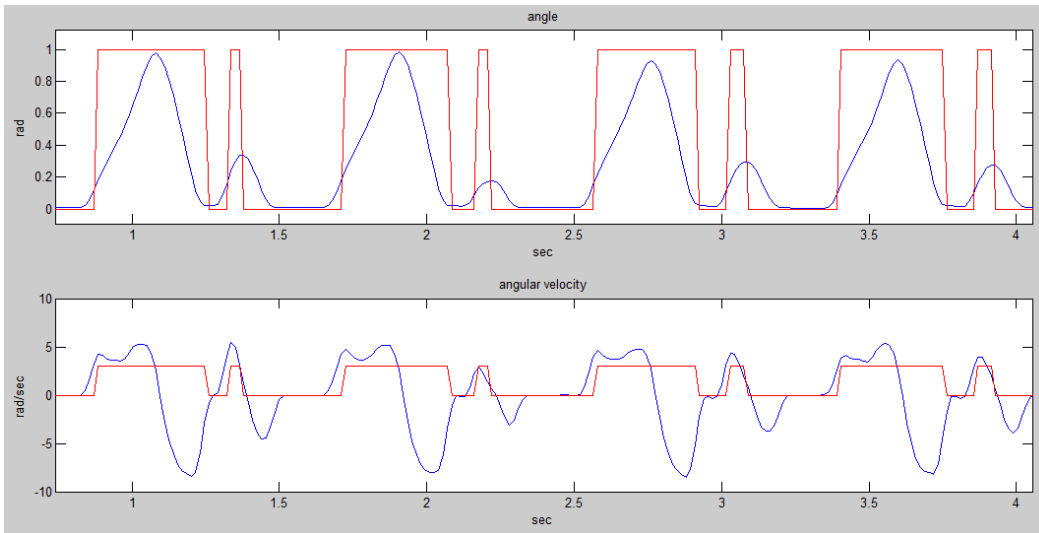
במהלך הניסויים התגלו מספר ליקויים באופן תכנון ומימוש המערכת המכאנית. אופן תכנון המערכת התבסס על מצב יציב ולכן בשלב התכנון לא נלקחה בחשבון התגובה הדינאמית של המערכת. את ההשפעה של הזנחת התגובה הדינאמית על המשתמש ניתן ללמוד מתוך השוואת איור 6.6 לאיור 6.7 ואיור 6.9 לאיור 6.10 כאשר מספיק לחבר את הגנראטור מבחינה מכאנית ללא הפעלת קצירה חשמלית כדי להשפיע בצורה ניכרת על פרופיל הזוויתי של המפרק והמהירות המתפתחת כתוצאה מכך. בעצם בחירת גנראטור בעל מקדם אינרציה גבוה כל כך המתכננים יצרו מערכת המבצעת קצירה מכאנית של אנרגיה חיובית בזמן ההאצה של מפרק הברך, כיוון שאין קצירה חשמלית בשלב זה של המקטע האנרגיה נאגרת בצורת אנרגיה קינטית ברוטור של הגנראטור. דבר נוסף שניתן ללמוד הינו שקיימים חופשים מכאניים בברכיה וזאת לפי אזורים בהם אין שינוי בזווית המפרק כאשר זה מגיע לכיפוף מלא ללא חיבור הגנראטור (איור 6.6, איור 6.9). למרות שלא הוצגו כאן, בניסויים במהירויות הליכה נמוכות נעלם המקטע של K1 עקב אותם החופשים שהוזכרו קודם. כמסקנה מכך הוחלט לבצע תכנון מחדש של המערכת המכאנית ובמערכת הנוכחית להתמקד אך ורק בקצירת המקטע K3.

למרות האמור לעיל לא היה ברור מדוע כמות האנרגיה שנקצרה העומדת על 1W במקרה הטוב ביותר הינה נמוכה משמעותית מהציפיות שחזו יכולת קצירה של לפחות 2.5W. לאחר מידול דינאמי של המערכת אשר יתואר בפרק הבא. הליקויים שנמצאו הם:

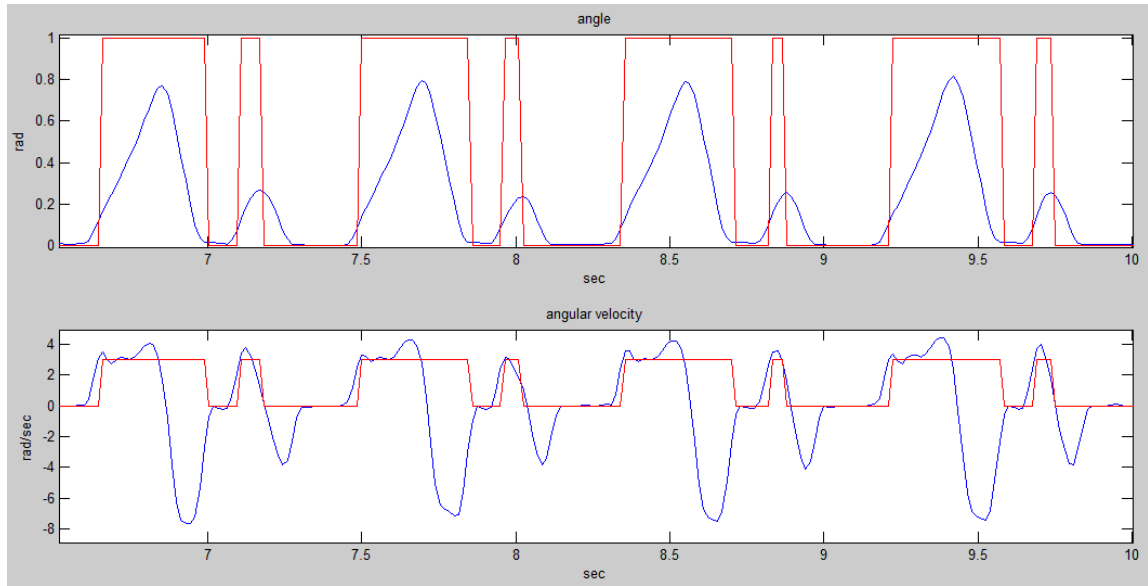
- האלגוריתם בו נעשה שימוש לזיהוי מקטעים שליליים איחר בזיהוי בכ-30ms עקב השימוש בממוצע נע ונגזרות נומריות. כתוצאה מעיכוב זה פוספס חלק מקטע העבודה השלילית.
- עקב מקדם האינרציה הגבוה של הגנראטור המערכת קצרה אך ורק את האנרגיה שהייתה אגורה באינרציה של הרוטור. בעצם המערכת הנוכחית שנבדקה קצרה עבודה חיובית ולא שלילית כפי שתוכננה לעשות.



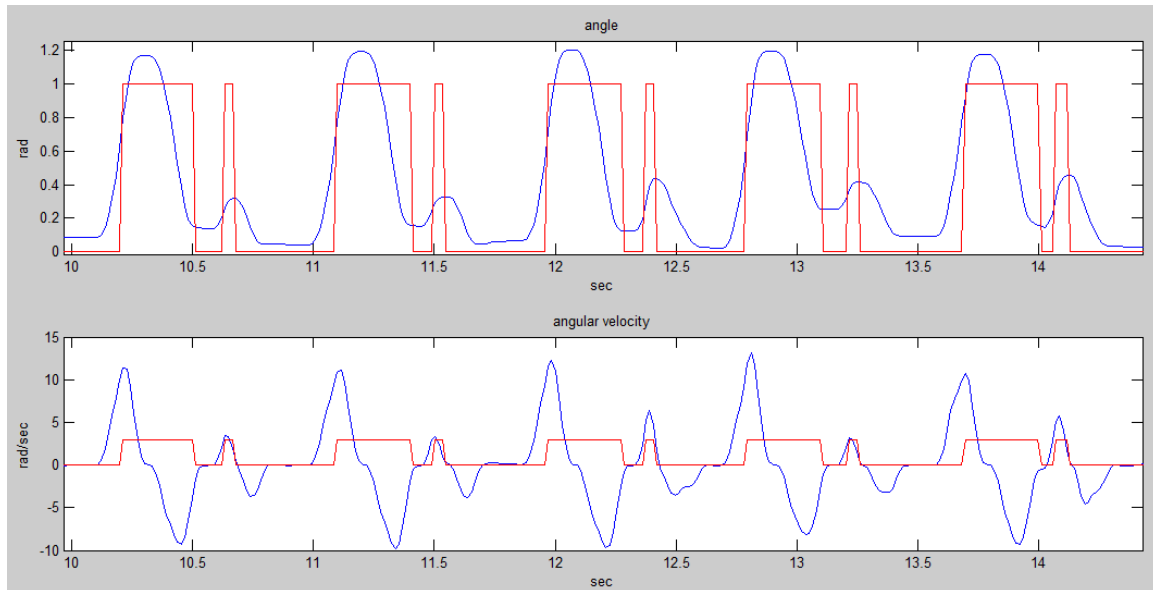
איור 6.6 – תוצאות ניסוי הליכה ברך שמאל במהירות 6kph כאשר הגנראטור מנותק בצורה פיזית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)



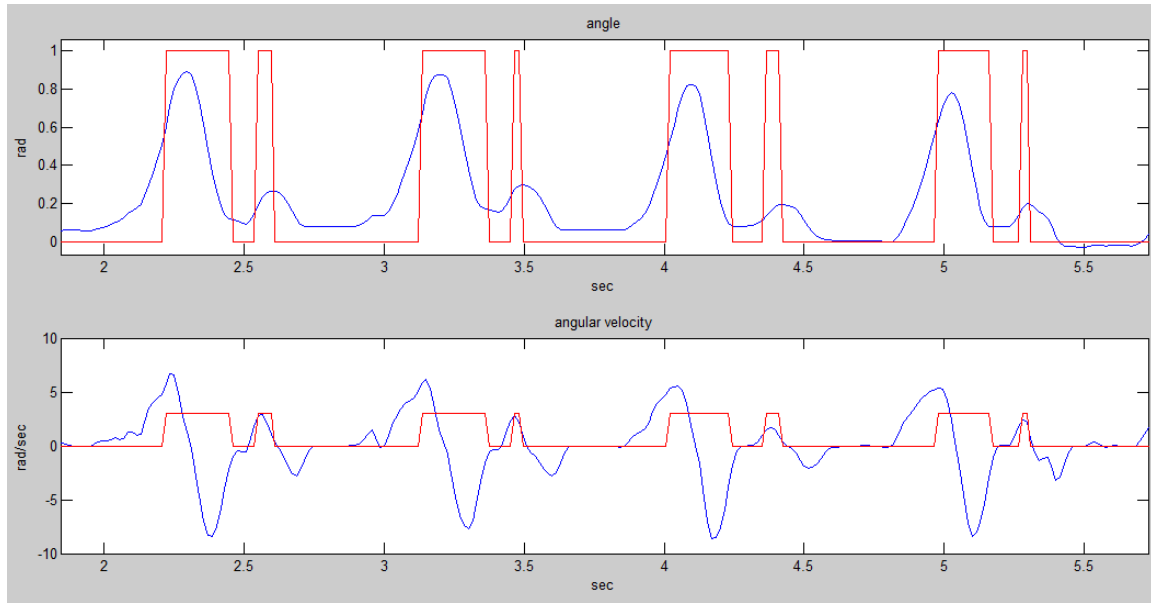
איור 7.6 – תוצאות ניסוי הליכה ברך שמאל במהירות 6kph כאשר הגנראטור מחובר בצורה פיזית אך ללא קצירה חשמלית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)



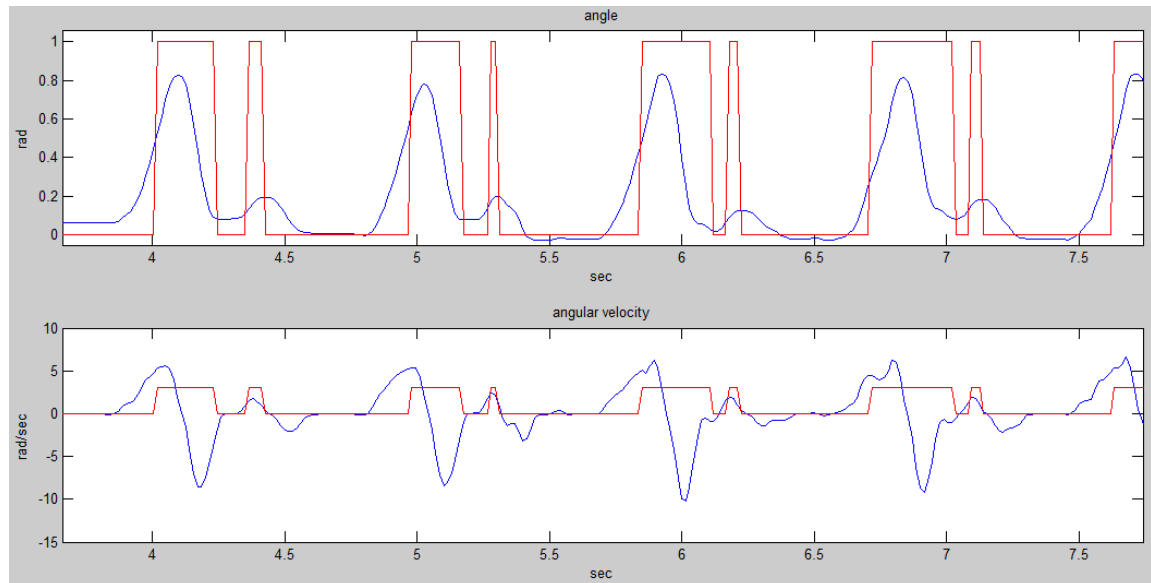
איור 8.6 – תוצאות ניסוי הליכה ברך שמאל במהירות של 6kph עם קצירה חשמלית כאשר העומס הינו  $1\Omega$  (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)



איור 9.6 – תוצאות ניסוי הליכה ברך ימין במהירות 6kph כאשר הגנראטור מנותק בצורה פיזית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)



איור 10.6 – תוצאות ניסוי הליכה ברך ימין במהירות 6kph כאשר הגנראטור מחובר בצורה פיזית אך ללא קצירה חשמלית (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)



איור 11.6 – תוצאות ניסוי הליכה ברך ימין במהירות של 6kph עם קצירה חשמלית כאשר העומס הינו  $1\Omega$  (הגרף העליון הינו זווית המפרק בכחול ובגרף התחתון מהירות זוויתית של המפרק בכחול, בשני הגרפים האדום הינו הזיהוי האלגוריתם של אזורי עבודה שלילית)

## 6.3 הוכחת גישת הקצירה

### 6.3.1 מערכי ניסויים

המערכת המוצעת נבדקה ב-3 רמות שונות של ניסויים:

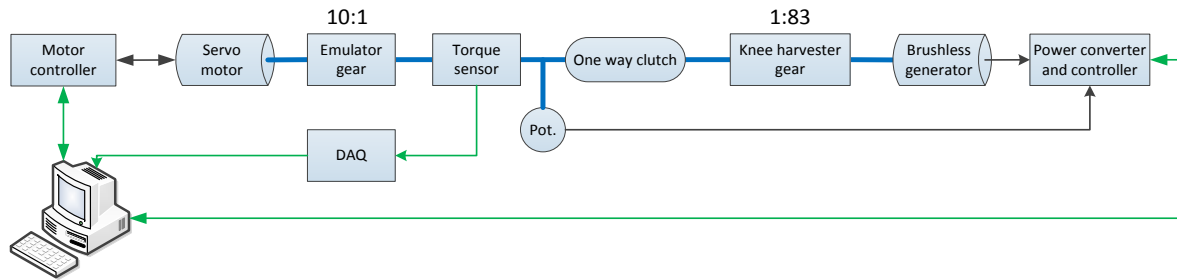
1. בדיקת כל אחד מחלקי המערכת בנפרד במצב יציב עם ספק חיצוני
2. בדיקת תפקוד המערכת בפעולה אוטונומית עם גנראטור מסובב במהירות קבועה
3. בדיקת תפקוד המערכת המלאה במדמה ברך

במערך ניסויים לבדיקת כל אחד מחלקי המערכת במצב יציב סופק מתח הדרוש לפעילות המערכת החשמלית מספק חיצוני. הבדיקות שבוצעו בשלב זה הן: פעולת המודולים של מתחי העזר עבור מעגל הבקרה, אופן פעולת מעגל ההגנה של בנק האנרגיה, אופן הפעולה של בקרת המיישר הסינכרוני ללא מתח בפאזות, מציאת הקשר בין ערכי ה-A/D במיקרו-בקר לערכים הנמדדים (תוצאות אלו הוצגו ב-5.7) ותגובת בקרת הממיר למדרגה.

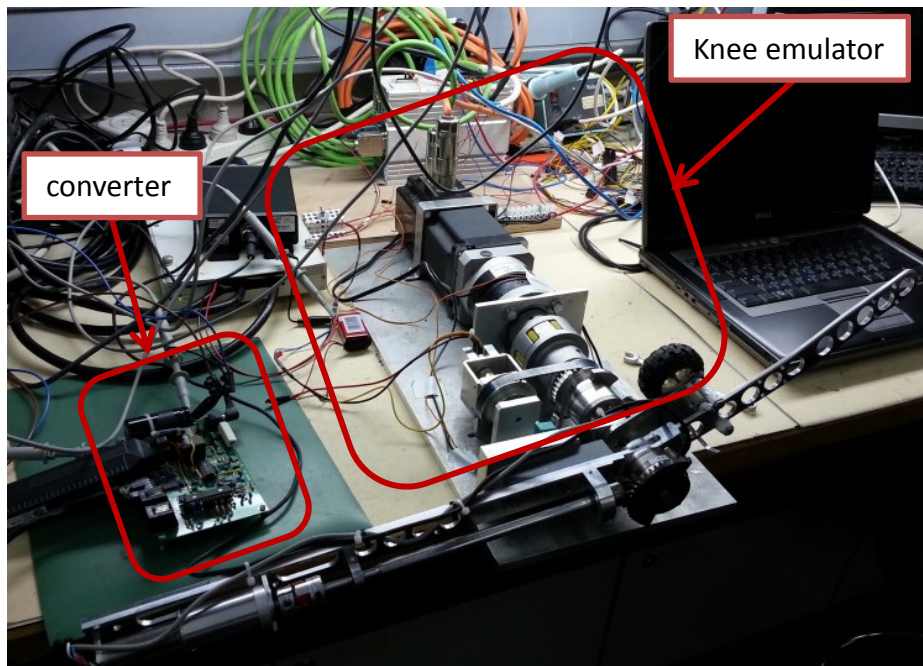
במערך הניסויים השני נעשה שימוש במערך המורכב מגנראטור בחיבור ישיר למנוע אשר סובב במהירות קבועה. במערך זה הניסויים בדקו את פעילות בקרות הממיר והמיישר. המטרה הייתה לוודא התנהגות תקינה של מיישר סינכרוני (התנהגות תקינה הינה מצב בו זרמי הפאזות בכניסה למיישר סינכרוני זהים לאלו של מיישר פאסיבי) ועקיבה אחר פרופיל זרמים גנרי בכל טווח מתחי העבודה.

במערך הניסויים השלישי נעשה שימוש במערכת המדמה את פעולת הברך (איור 6.12, איור 6.13). מערכת זו תוכננה ונבנתה במיוחד לניסויים אלו בשיתוף פעולה עם המחלקה להנדסת מכונות. המערכת מתבססת על מנוע סרבו הנשלט ע"י בקר מתוכנת. לבקר הוזן פרופיל זוויתי של צעד בודד הזזה לזה שהוזן לסימולציה. בדומה לאופן פעולת מעגל הבקרה המכאנית בסימולציה, בקר מדמה הברך השתמש בשתי לולאות בקרה עוקבות הראשונה המירה את הפרופיל הזוויתי לפרופיל מהירויות והשניה נסגרה על מהירות המנוע. כדי שהמנוע יוכל לספק את המומנט הדרוש הורכבה לו תמסורת של 1:10. המערכת בנויה בצורה כזו שאליה מתחברת המערכת המכאנית של הברכיה בצורה מלאה. לכן, בדיקת פעילות המערכת החשמלית במערך זה הינה הצורה הקרובה ביותר שניתן להגיע אליה בבדיקות מעבדה מבוקרות אשר אינן כוללות שימוש בניסויים חיים. בניסויים אלו נבדק אופן פעולה מלא של המערכת הכוללת טעינה של סוללה, פרופילי קצירה ואלגוריתם קצירה אופטימלי. לפי נתונים

שהוצגו בבקר של המנוע הסינכרוני שגיאת העקיבה אחר פרופיל הזוויתי שהוכנס למערכת הינה זניחה ולכן לא תהיה התייחסות לשגיאה זו במהלך ניתוח תוצאות הניסויים.



איור 12.6 – מערך ניסוי של האמולטור עם המכאניקה של הברכיה והמערכת החשמלית המוצעת



איור 13.6 – תמונה של מערך ניסוי עם מדמה ברך

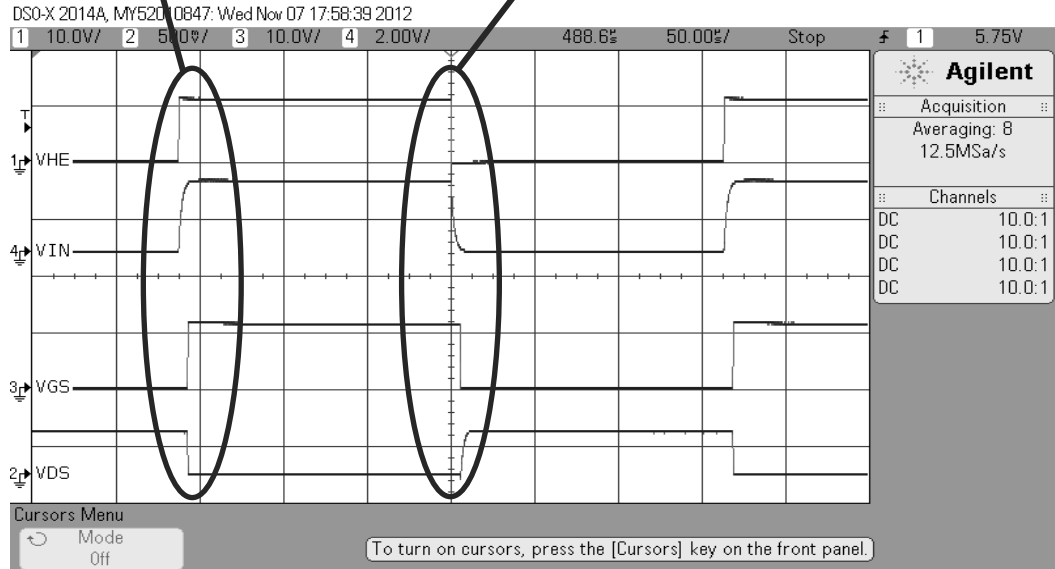
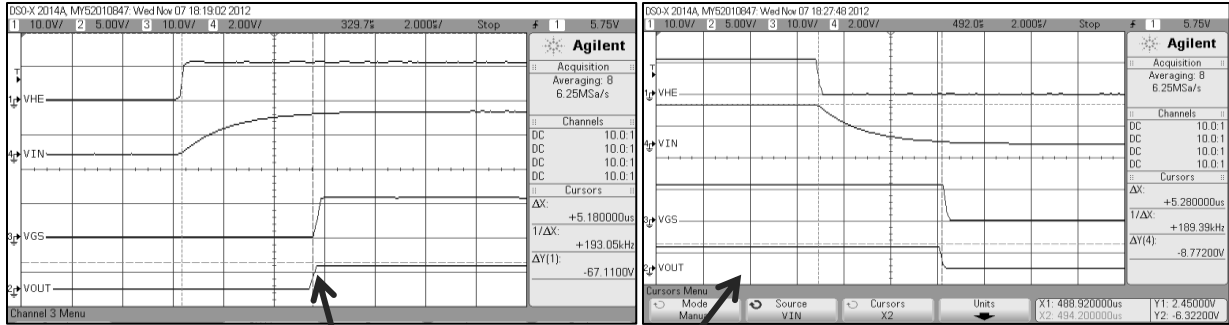
### 6.3.2 בדיקות בסיסיות

בשלב הראשון בבדיקות המערכת נעשו ניסויים לבדיקת תקינות כל אחד מחלקי המערכת בנפרד לפני הפעלתה המלאה. בניסויים אלו סופק המתח הדרוש לפעילות המערכת ע"י ספק חיצוני. בניסוי הראשון חובר הספק במקביל לבנק האנרגיה והועלה המתח עד ל-32V כדי לוודא פעילות תקינה של מודולי מתחי העזר. המודול מוריד-מעלה מתח נכנס לפעולה במתח של 2.6V והתייצב ישר על מתח של 11.07V המייצב הליניארי התייצב על 3.26V בשניהם הריפל מתחת ל-10mV. העומס דמה חובר ונותק מבנק האנרגיה בהתאם לחישובים התיאורטיים

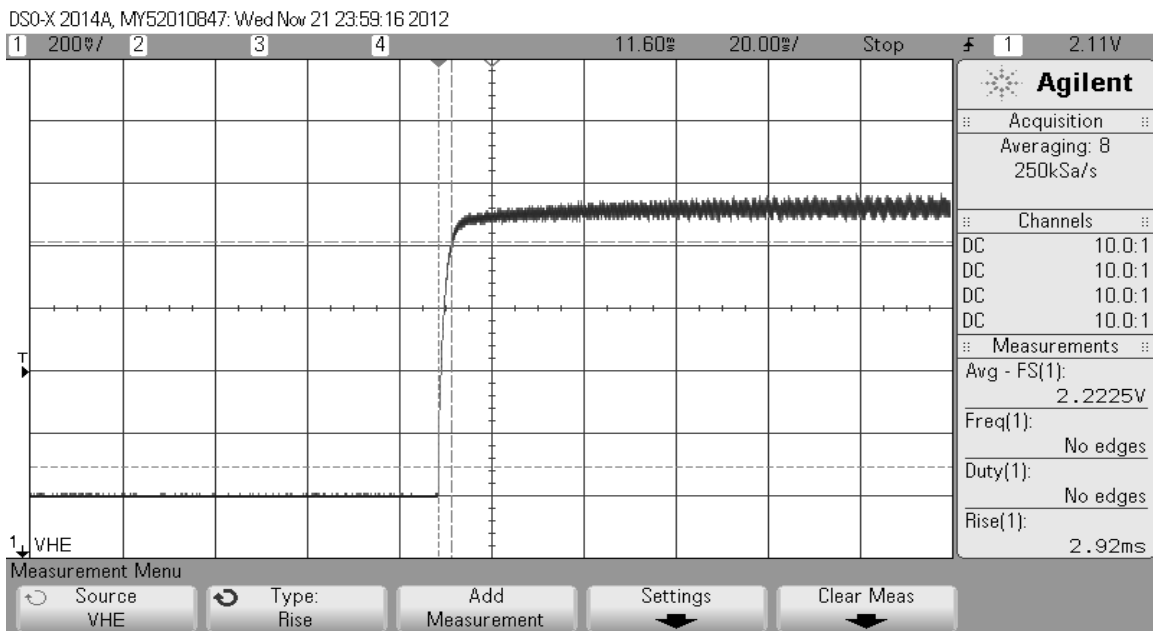
ב-28.8V וניתוק ב-17.8V הסטייה הקטנה בין המחושב לספים שכאן הינם מתחת לדיוק הנגדים בהם נעשה שימוש במחקר זה. בנוסף לכך נבדקו ונמצאו תקינים הדרייברים של מתגי המעגל ע"י הזנת אותות בקרה ממחולל, וכן נמצא הקשר בין האותות הנדגמים ב-A/D של המיקרו-בקר לבין ערכי ה-A/D שלהם כפי שכבר הוצגו בפרק על הממיר בסעיף 5.7 ניתן להתרשם שכל האותות בעלי קשר ליניארי כפי שמצופה מהתאוריה.

בניסוי שני חוברו חיישני ה-Hall effect של הגנראטור אך לא הפאזות, הגנראטור סובב על ריקם ע"י מנוע בחיבור ישיר במהירות קבועה. בניסוי זה נבדקה הבקרה וזמני התגובה של המיישר הסינכרוני. בדומה לניסוי הראשון המתח הנחוץ להפעלת מעגל הבקרה סופק ע"י ספק חיצוני אשר חובר במקביל לבנק האנרגיה, וספק נוסף שסיפק מתח נמוך לפאזה הנבדקת (עם נגד טורי כדי שלא ייווצר קצר בעת הפעלת הטרנזיסטור). איור 6.14 מציג את התקדמות האות לאורך המסלול משינוי מצב בחיישן Hall effect מספר 3 (VHE) לכניסת מיקרו-בקר (VIN), למוצא המיקרו-בקר (VOUT) לאחר השהייה של  $5.38\mu s$  ועד לשינוי במתח השער של המתג המתאים (VGS) לאחר השהייה נוספת של  $180ns$ . כיוון שמחזור המיתוג המינימלי עבור גנראטור זה הוא  $333\mu s$  הרי שמדובר בהשהייה זניחה.

בניסוי שלישי נבדקה תגובת בקרת הממיר למדרגת זרם (שסומלצה ע"י העברת פקודת תחילת עבודה מהמחשב למיקרו-בקר באמצעות תקשורת טורית). מטרת הניסוי בדיקת זמן התייצבות בקרת הממיר על זרם הייחוס. בניסוי זה הספק חובר בין שתי פאזות בכניסה למערכת החשמלית. הזרם נמדד בכניסה לממיר על ידי פרוב זרם את תוצאת הניסוי ניתן לראות באיור 6.15. זמן העלייה שנמדד הינו  $2.92ms$ , הסיבה לתגובה היחסית איטית היא עקב קביעה לא נכונה של תנאי התחלה. זמן ההתייצבות לאחר התיקון עמד על  $1.2ms$ . כיוון שפרופיל הזרמים מתעדכן כל  $8.25ms$  מדובר בזמן התייצבות סביר. כמו כן, הניסוי הראה שהבקרה שומרת את המערכת יציבה. זרם הייחוס שניתן בבקרה 1A הזרם הנמדד לפני מתן הפקודה ואשר שימש להפעלת מעגל הבקרה הינו  $0.099A$  עם מתח כניסה של 6V לאחר מתן הפקודה הזרם הנמדד היה  $1.05A$  כלומר סטייה של 5%.

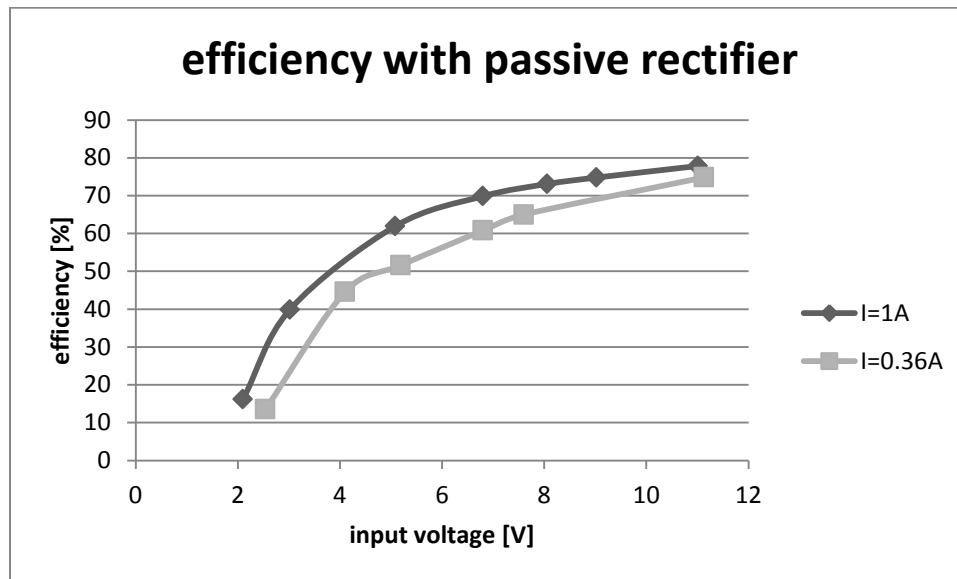


איור 14.6 – ניסוי מצב יציב לזמן תגובת המערכת לשינוי במצב של חיישן Hall effect



איור 15.6 – ניסוי תגובת הממיר למדרגת זרם בבקרה.

ניסוי אחרון שבוצע בבדיקות בסיסיות הינו בדיקת נצילות המערכת עם מיישר פאסיבי כפונקציה של מתח הכניסה למערכת וכפרמטר של זרם הקצירה. מטרת הניסוי לבצע השוואה מול נצילות המערכת עם מיישר אקטיבי אשר נבדקה במערך הניסויים של מערכת מלאה עם מדמה ברך. בניסוי זה ספק חובר בין שתי פאזות. משתמשים בדיודות הפרזיטיות של מתגי המיישר כמיישר פאסיבי והממיר חובר ריאוסטט ששימש כעומס ולשמירת המוצא במצב באחד הוכתב זרם של 0.36A ובשני 1A. במוצא הממיר חובר ריאוסטט ששימש כעומס ולשמירת המוצא במצב יציב, במקרה של צריכת 0.36A ערך הריאוסטט עמד על  $300\Omega$  ובמקרה של 1A על  $100\Omega$ . איור 6.16 מציג את תוצאות הניסוי. על פי האיור עלייה בזרם הנצרך מעלה את נצילות המערכת במקצת וזאת כיוון שהצריכה הסטטית של מעגל הבקרה מהווה חלק קטן יותר מסך ההספק העובר במערכת, אך הדבר החשוב ביותר שיש לשים לב אליו הוא שהנצילות נופלת בצורה משמעותית כאשר יורדים במתח הכניסה והסיבה לכך הוא מפל המתח הקידמי של הדיודות היוצרות את המיישר הפאסיבי. תצוגה ויזואלית זו מדגישה את החשיבות בשימוש במיישר סינכרוני כאשר מדובר במתחי כניסה נמוכים.

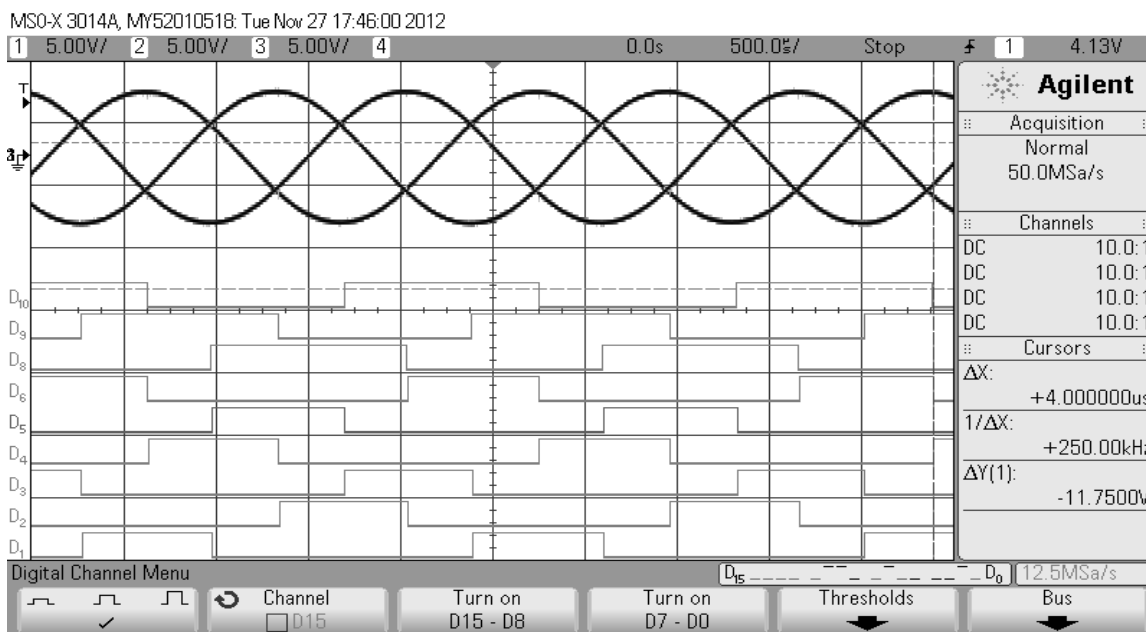


איור 6.16 – נצילות מיישר פסיבי במצב היציב כפונקציה של מתח הכניסה למיישר וכפרמטר של שני זרמים

### 6.3.3 בדיקות מצב יציב

לאחר שנעשה ווידוא שכל מרכיבי המערכת פועלים בצורה התואמת את המצופה נעשו ניסויים במערכת חשמלית מלאה במצב יציב אוטונומי. בניסויים אלו המתח הדרוש לפעולת המערכת סופק ע"י גנראטור הזהה לגנראטור המותקן במערכת המכאנית לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית. הגנראטור סובב במהירות קבועה בחיבור

ישיר ע"י מנוע זרם ישר, חיבור זה אפשר בדיקת המערכת במספר מצבים יציבים בהן מתח מוצא הגנראטור הינו סינוסידלי באמפליטודה ותדר התלויים במהירות. בשלב זה נבדקה פעילות מלאה של המיישר בכל טווח המהירויות הצפויות במערכת. תוצאות ניסוי עבור מהירות סיבוב של 3530rpm מוצגות באיור 6.17 בהן נמדדים מתחי שלושת הפאזות, האותות משלושת חיישני Hall effect (D8-D10) ואותות הבקרה בשערים של מתגי המיישר. ההשהיות שנמדדו בניסוי עמדו על  $6\mu s - 4$ . השהייה זו זניחה לעומת זמן פעולת המתג.

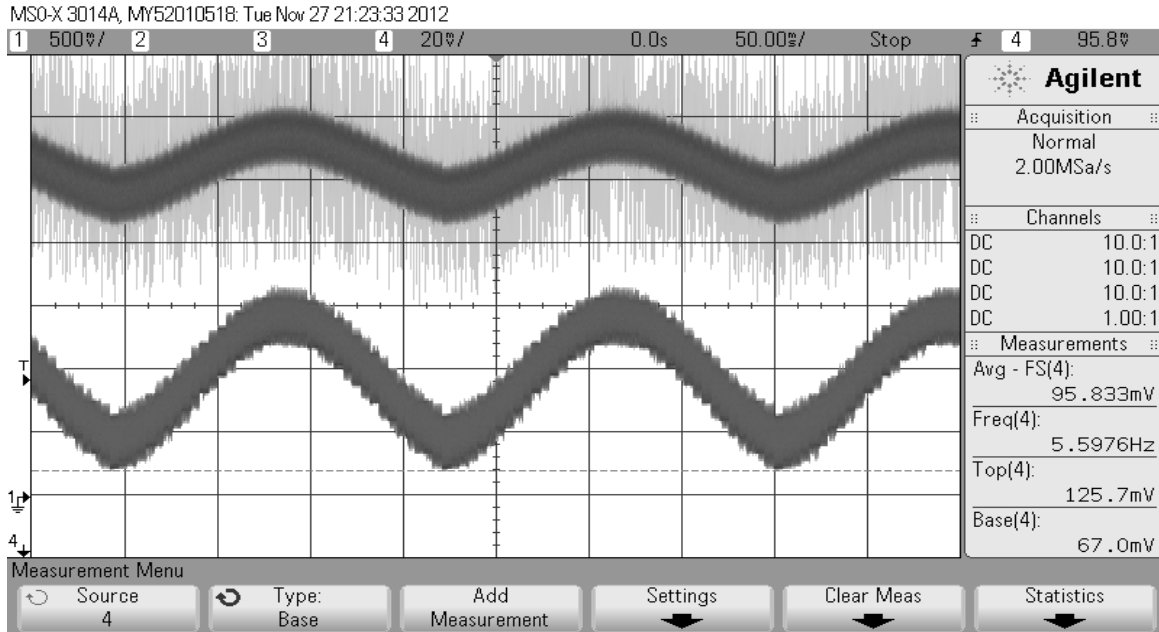


איור 17.6 – פעילות המיישר הסינרוני במצב יציב: האותות הסינוסידליים הינם מתחי שלושת הפאזות בכניסה למערכת החשמלית, שלושת אותות חיישני Hall effect הינם D8-D10, 6 אותות הבקרה בשערים של מתגי המיישר הינם D1-D6. בניסוי נוסף נבדקה יכולת הממיר לעקוב אחר פרופילי זרמים גינריים. באחד הניסויים הפרופיל נקבע להיות זרם DC של 0.9A עם סינוס בתדר 5.5Hz ואמפליטודה של 0.2A לפי (68). עדכון הפרופיל בוצע כל 5ms.

$$I_{ref} = 0.9 - 0.2\cos(2\pi ft) \quad (68)$$

את תוצאות הניסוי ניתן לראות באיור 6.18, במהלך הניסוי הזרם נמדד ע"י פרוב זרם על נגד חישה של  $20m\Omega$  (הגרף התחתון באיור – CH4) ונמדד במוצא מגבר חישת הזרם לווידוא (הגרף העליון באיור – CH1). כפי שניתן לראות באיור האותות הנמדדים הינם זחים. כמו כן, המערכת עוקבת בצורה טובה אחר אות הייחוס כאשר נמדד שזרם הממוצע הינו כ-960mA, האמפליטודה של האות הינה כ-220mA ותדר האות הינו 5.6Hz. השגיאות הן

כדילקמן: זרם ממוצע כ-7%, אמפליטודה כ-10% ותדר פחות מ-2%. כיוון שהאות עצמו הינו בעל ריפל של 120mA בתדר המיתוג הרי ששגיאות אלו מקורם במדידה והינם מתקבלים על הדעת.

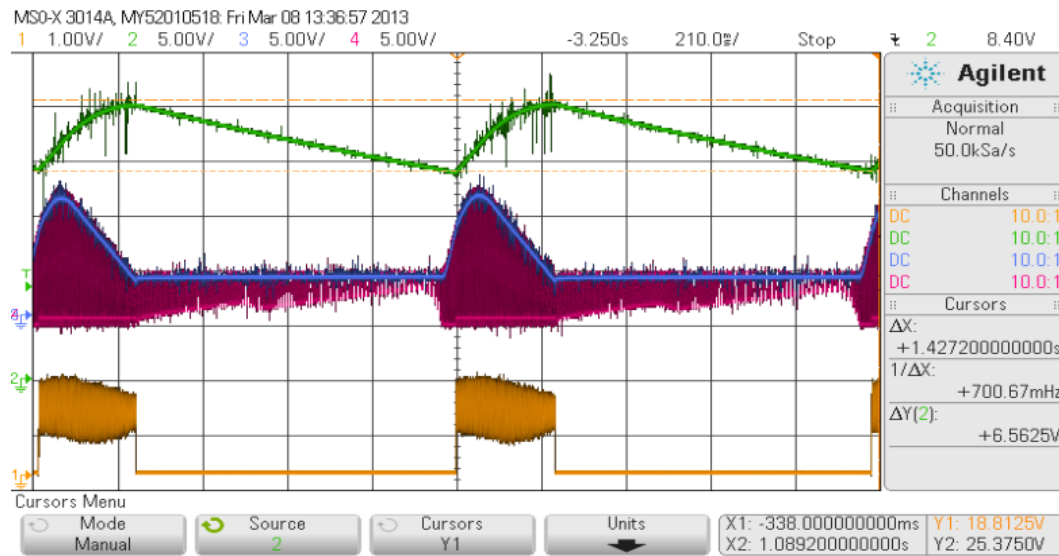


איור 18.6 – בדיקת בקרת הממיר באמצעות עקיבה אחר פרופיל זרמים גינרי שהוצג ע"י אות סינוסואדלי. האות העליון בגרף הוא הזרם הנמדד ע"י

### 6.3.4 בדיקות במדמה ברך

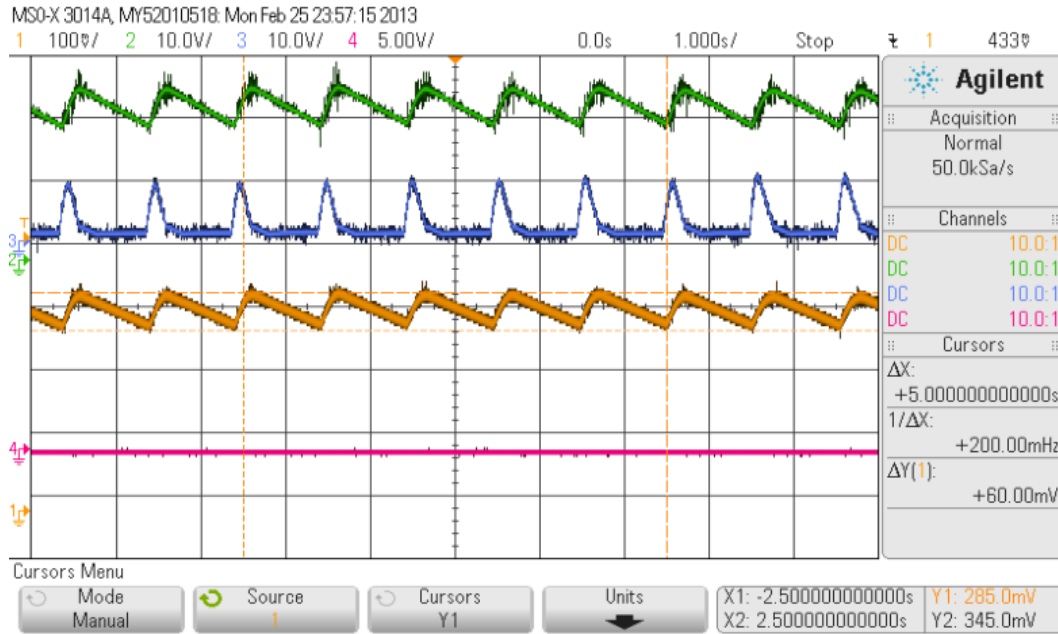
בדיקת המערכת המלאה נעשתה ע"י שימוש במדמה ברך. בבקר של מדמה הברך הוזן פרופיל זוויתי של מפרק הברך שהתקבל מ-Dr. S. Wolf מאוניברסיטת Heidelberg בגרמניה שמדד את פעילות המפרק ללא מערכת קצירה (כפי שהוצג בפרק המבוא). לפי תצוגת הבקר של מדמה הברך שגיאת העקיבה אחר הפרופיל הינה זניחה. איכות העקיבה גם נבדקה לפי מדידת המתח על הפוטנציומטר של מדמה הברך. חיבור הסקופ למדידת זווית המפרק במקביל לפעילות המיקרו-בקר הכניסה רעשים שפגעו בפעולת המיקרו-בקר ולכן לא נמדדה במהלך הניסויים לבדיקת המערכת המלאה. כמו כן, עקב חופשים וקפיציות ידועה במערכת המכאנית לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית בה נעשה שימוש במחקר זה מהירות הסיבוב הגנראטור ולכן גם אמפליטודת המתח במוצא הינם נמוכים מהמצופה, בנוסף לכך לא ניתן להבחין כלל ב-K1 כפי שזה קורה גם בניסויים בבני אדם. כיוון שזו בעיה ידועה במערכת המכאנית אשר תוקנה במערכת המכאנית החדשה הוחלט להשוות אך ורק בין תוצאות הסימולציה והניסויים בתחום של בקרת ממיר.

פרופיל הקצירה הנבחר לבחינת המערכת הינו של זרם ישר. הסיבה לבחירת זרם ישר היא שקל להציג בצורה ויזואלית את תקינות פעולת המערכת ולבצע השוואות. תוצאות הניסוי מוצגות באיור 6.19 המציג באות העליון את מתח בנק האנרגיה, בשני האותות האמצעים את מתח פאזה ומתח במוצא המיישר, האות התחתון הינו הזרם המבוקר בכניסה לממיר. מניתוח הנתונים עלה שהמערכת זיהתה בצורה נכונה את האזור שהוגדר לה כאזור עבודה שלילית. לאחר מכן ביצעה השהייה שהתבססה על מתח הממיר המקסימלי שנמדד בצעד קודם. הקצירה החלה כאשר המתח בכניסה לממיר עלה מעל מחצית המתח המקסימלי של הצעד הקודם. בקרת הזרם בכניסה לממיר עבדה בצורה תקינה תוך התמודדות עם שינוי מתמיד במתח הכניסה לממיר ובמתח בנק האנרגיה. הקצירה הופסקה ברגע שמתח הכניסה לממיר ירד אל מתחת לסף עבודה שהוגדר (4V). המתח בכניסה לממיר בניסויים אלו לא עבר את ה-10V. הזרם שהוכתב במהלך ניסויים אלו הינו 1.2A. המערכת במהלך הניסוי כולו עבדה במצב CCM כפי שתוכנן מבחינה תאורטית.



**איור 19.6 – צורות האותות בממיר בעת פעילות מדמה הברך: האות העליון הוא מתח בנק האנרגיה, שני האותות האמצעים הם המתח בפאזה ובמוצא המיישר, האות התחתון הינו הזרם המבוקר בכניסה לממיר.**

באיור 6.20 נדגם המתח בכניסה לממיר ובנק האנרגיה כמו באיור 6.19 אך במקום מדידת הזרם בכניסה לממיר נדגם הזרם במוצא מטען הסוללה ולא נמדד מתח פאזה. כפי שניתן לראות באיור זרם הטעינה עוקב אחר מתח בנק האנרגיה כפי שתוכנן באופן תאורטי לשמירה של מתח בנק האנרגיה בטווח מתחי עבודה תקינים כך שהמערכת נישארת במצב עבודה יציב. בניסוי זה מתח בנק האנרגיה נשמר ב-18.8-25.4V, כאשר זרם הטעינה של הסוללה השתנה בין 285mA לבין 345mA.



איור 20.6 – צורות האותות בממיר בעת פעילות מדמה ברך: האות העליון הינו המתח בבנק האנרגיה, האות השני מלמעלה הוא

מתח בכניסה לממיר והאות השלישי הינו הזרם במוצא המטען. האות הרביעי התחתון ביותר אינו מחובר.

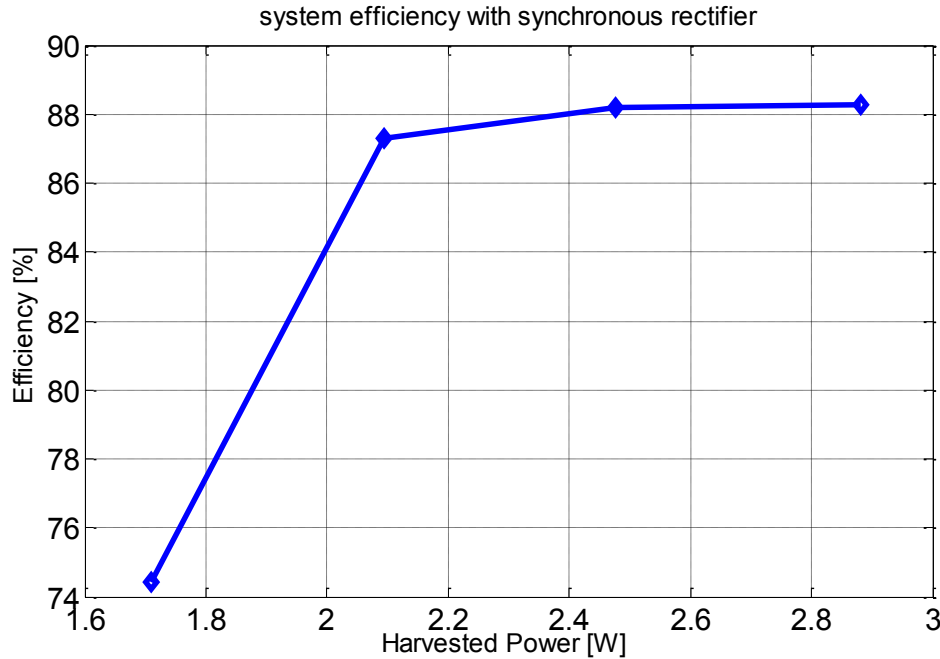
בניסוי בדיקת צריכת הספק של מעגל הבקרה בו לא חובר עומס למעגל נבחנה צריכת מעגל הבקרה כאשר אין קצירה והמעגל נמצא במצב של שינה. הספק מעגל הבקרה בשלב אי קצירה ( $P_{control}$ ) חושב על פי שינוי מתח בנק האנרגיה ( $V_{start}, V_{stop}$ ) במרווח זמן נתון ( $\Delta T$ ) ומתוך ידיעת גודל הבנק ( $C_{bank}$ ) ונמצא קטן מ-  
:100mW

$$P_{control} = \frac{1}{\Delta T} \left( \frac{1}{2} C_{bank} (V_{start}^2 - V_{stop}^2) \right) \quad (69)$$

הספק המבוזבז במהלך אי קצירה חשוב ביותר כיוון שהמערכת מיועדת לשימוש במקור מוגבל הספק ומרבית זמן המחזור לא מתבצעת קצירה (אורכו של K3 כ-200ms בזמן שאורך הצעד כ-1s כך שהמערכת פעילה אך ורק חמישית מהזמן). עקב המבנה של האב טיפוס לא ניתן לבצע מדידה ישירה של צריכת מעגל הבקרה דבר המקשה על מציאת הצריכה המדויקת של מעגל הבקרה בעת הקצירה. במהלך הקצירה הספק הרגעי של מעגל הבקרה עולה משמעותית ולפי חישוב אנליטי מגיעה לכ-0.5W אך כיוון שבזמן זה מתבצעת קצירה שההספק הריגעי שלה יכול לעבור את ה-20W הרי שהפסדים אלו זניחים.

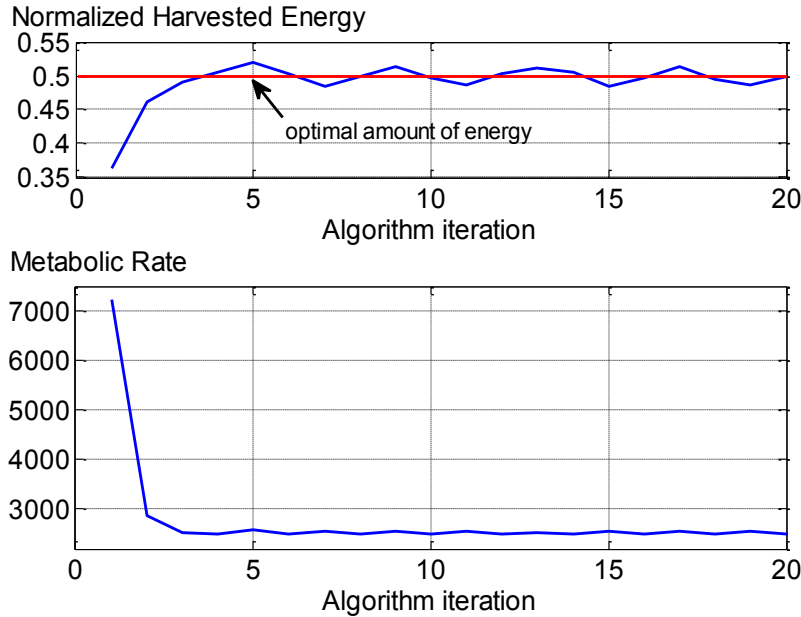
מהעמסת המערכת בעוצמות שונות של פרופיל קצירה בזרם ישר נמצאה נצילות הממיר כפונקציה של כמות האנרגיה הנקצרת. עקומת הנצילות צוירה באיור 6.21 עבור הספקי קצירה שונים עד כמעט 3W ואילו

הנצילות מאמירה עד 88%. אומנם מערכת לניהול הספק יכולה להתמודד עם הספקים יותר גדולים מאלו אך התכנון המכאני של מערכת הברכיה הישנה לא עמד בכך ולכן הניסויים הוגבלו אל מתחת ל-3W.



איור 21.6 – נצילות הממיר כפונקציה של כמות האנרגיה שנקצרה במערכת עם מיישר סינכרוני

מטרת הניסוי האחרון לבדיקת פעולת המערכת הינו בדיקת אופן פעולת אלגוריתם עקיבה אחר נקודת עבודה אופטימאלית. כיוון שלצורך בדיקת האלגוריתם נדרש משוב צריכה מטבולית אשר אינו זמין במקרה בו הניסוי לא מתבצע על בני אדם נכתב סקריפט ב-MATLAB אשר דימה את התנהגות הצריכה המטבולית בהתאם לכמות האנרגיה שנקצרה. בהתאם להנחת עבודה שהקשר בין כמות האנרגיה הנקצרת לצריכה המטבולית הינו קשר פרבולי הרי שנכתבה משוואה פרבולית בסקריפט MATLAB. משוואה זו הפיקה את הצריכה המטבולית של המשתמש בהתאם לכמות אנרגיה נקצרת מנורמלת לפי מקסימום האנרגיה הנקצרת שנקבעה ע"י מבצע הניסוי. נקודת הקצירה האופטימלית נקבעה במשוואה זו להיות מחצית מכמות האנרגיה המקסימלית. תוצאות הניסוי מוצגות באיור 6.22, הגרף העליון מציג את כמות האנרגיה הנקצרת המנורמלת כפונקציה של איטרציית האלגוריתם ובגרף התחתון את הצריכה המטבולית אשר נשלחת אל המיקרו-בקר כמשוב ביולוגי. מהאיור ניתן לראות שהאלגוריתם מוצא את נקודת הקצירה האופטימאלית ועוקב אחריה תוך התנדנדות סביב הנקודה האופטימאלית. התנהגות זו היא התנהגות המצופה משיטת Hill Climbing בה נעשה שימוש באלגוריתם העקיבה.



איור 22.6 – תוצאות ניסויים לאופן פעולת אלגוריתם לחיפוש נקודת קצירה אופטימאלית. בגרף העליון מוצגת כמות האנרגיה הנקצרת אל מול כמות האופטימאלית שהוגדרה במערכת, בגרף התחתון מוצגת התוצר של הצריכה המטבולית המסונטזת באמצעות סקריפט במטלאב.

## 6.4 סיכום

במהלך הפרק הוכחת התכנות נבחנו שני היבטי המחקר. בהוכחת מודל המערכת נמצא שהמודל מצליח לדמות בצורה טובה את ההתנהגות הדינאמית של המערכת לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית ממפרק הברך הנעשית באמצעות מערכת לניהול הספק (דור א') והשגיהה שנמצאה בין ניסויים עם נסיינים אנושיים לבין תוצאות הסימולציה קטנה מ-10% מבחינת אנרגיה נקצרת. בשלב הניסויים נמצא שהמערכת המכאנית משנה את פרופיל ההליכה ללא קשר לקצירה עקב חופשים מכאניים הקיימים במערכת ועקב גנראטור בעל מומנט אינרציה מאוד גדול. לכן כתוצאה מניסויים אלו ומתוך המודל הוחלט על בניית מערכת מכאנית חדשה. בהוכחת גישת הקצירה האופטימאלית נעשה שימוש במערכת לניהול הספק (דור ב') ומערך ניסויים שכלל מדמה הליכה שנבנה במיוחד לבחינת הגישה בתנאי מעבדה. הניסויים הראו שהגישה מתפקדת בצורה טובה ומתכנסת תוך מספר איטרציות לנקודת הקצירה האופטימאלית. נצילות המערכת לניהול הספק (דור ב') נמצא להיות 88% והמערכת קצרה בניסויים 2.5W במערך המדמה הליכה. המערכת לניהול הספק מסוגלת לעבד כמות גדולה מזה של אנרגיה אך המגבלה נקבעה עקב המערכת המכאנית. כאשר מגבלה זו תוסר במערכת מכאנית חדשה.

העבודה שהוצגה בדוח זה מתארת קונספט לקצירת אנרגיה ביומכאנית שלילית מהליכה של בני אדם. המחקר התמקד בשני היבטים של קצירת אנרגיה ביו-מכאנית: מידול מערכת אלקטרו-מכאנית לקצירת אנרגיה ביו-מכאנית באמצעות סימולטור חשמלי [29], בחינת קונספט לקצירה אופטימאלית המתבסס על הכתבת פרופיל בלימה והתאמתו למשתמש בצורה אוטונומית ע"י מערכת לניהול הספק לקצירת כמות אנרגיה אופטימאלית [30].

שני ההיבטים מהווים חידושים בתחום קצירת אנרגיה ביו-מכאנית. החידוש הראשון הוא בכך שמדובר במודל דינאמי של המערכת כאשר בספרות עד עתה ההתייחסות הייתה למודל סטטי בלבד. המודל מאפשר בחינת פרמטרים שונים בתהליך ההליכה, תכנון מערכת אלקטרו-מכאנית ובחינת פעולתה באמצעות סימולציה ממוחשבת. החידוש השני במחקר הוא קונספט הקצירה האופטימאלית. הקונספט אומץ בחלקו מבלימה גנרטיבית אשר נמצאת בשימוש במכונות חשמליות והיברידיות. בשונה מהמימוש במכונות בהן פעולת הבלימה מופעלת ע"י המשתמש הקובע את התזמון ואת פרופיל הבלימה, המערכת היא זו שמזהה את אזורי העבודה השלילית של המשתמש בהם מתבצעת הבלימה והיא זו שקובעת את פרופיל הבלימה המתאים מבלי להפריע לתנועתו של המשתמש. לצורך פעולה זו המערכת "לומדת" את אופן הליכתו של המשתמש לזיהוי אזורים של עבודה שלילית. כדי להכליל את הגישה המוצעת לכל משתמש, פרופיל הליכה, קצב וכד' פותח אלגוריתם המבוסס על משוב ביולוגי להבאת פונקציית COH למינימום. גישה זו הודגמה באמצעות מערכת לניהול הספק המבוססת על ממיר ממותג המכתיב את פרופיל הקצירה. כאשר לא קיים קשר ישיר בין פרופיל הקצירה לרמת המתח במוצא הגנראטור ומממשת אלגוריתם עקיבה אחר נקודת קצירה אופטימאלית בהתבסס על משוב ביולוגי. במחקר זה המשוב הביולוגי נבחר להיות משוב צריכה מטבולית. החידושים בגישה זו הם: האדפטציה של פרופיל הקצירה מתבצעת בצורה אוטונומית ע"י המערכת, המערכת מכתיבה פרופיל קצירה המנותק ממתח מוצא הגנראטור וקוצרת את כמות ההספק האופטימאלית למשתמש ולא לגנראטור.

הוכחת ההיבטים המחקריים נעשתה בתנאי מעבדה באמצעות שתי מערכות לניהול הספק (דור א' וב'). בשלב תכנון ובנייה של אבות הטיפוס הוגדרו המאפיינים והשיקולים בהקמת מערכת אלקטרונית עבור מקור אנרגיה זה. מעבר להוכחת החלקים המחקריים המערכות לניהול הספק הקימו תשתית לביצוע מחקרים מתקדמים בנושאים של: השפעות הקצירה, פרופילי קצירה ואלגוריתמים לזיהוי מקטעי עבודה שלילית.

הוכחת המודל נעשתה באמצעות מערכת לניהול הספק דור א'. מערכת דור א' מבוססת ממסרים ועומס התנגדוטי תלת פאזי המבוקרים באמצעות מיקרו-בקר. השוואות בין תוצאות ניסויי הליכה עם קצירת אנרגיה לבין תוצאות סימולציה הראו התאמה טובה של המודל המוצג. הוכחת קונספט הקצירה האופטימאלית נעשתה באמצעות מערכת לניהול הספק דור ב'. המערכת שמבוססת ממיר ממותג מסוג מעלה מתח המבוקר באמצעות מיקרו-בקר, המערכת הינה אוטונומית והעומס שלה הוא מטען לסוללת ליתיום-יון. המערכת נבדקה על מערך מעבדתי המדמה את תנועת מפרק הברך וכיוון שהמערכת לא נבדקה על נסיין חי הצריכה המטבולית סונטזה לתוך המערכת באמצעות סקריפט במטלאב. מערך זה איפשר בחינת תפקוד מערכת הקצירה בסביבה מבוקרת. תוצאות הניסויים הראו שהמערכת מציגה יכולת דינאמית מספקת עם שגיאה אפסית במצב היציב. כמו כן, אלגוריתם עקיבה אחר נקודת קצירה אופטימאלית מתכנס ועוקב אחר נקודת הקצירה האופטימאלית.

למרות שההיבטים המחקריים הודגמו על מפרק הברך, ניתן להשתמש בשיטות המוצעות לקצירת אנרגיה ממפרקים אחרים או/ו שימוש במשובים ביולוגיים אחרים תוך התאמה מסויימת.

## 8 מסקנות והמלצות

המחקר הוביל למספר תובנות חשובות לגבי השיקולים השונים בתכנון ובנייה של מערכת לקצירת אנרגיה מתנועה של אנשים. תובנות אלו כללו:

1. לא ניתן להזניח את הכוחות הדינאמיים הפועלים במערכת כפי שנעשה בספרות עד עתה.
2. באפליקציה זו קיימת עדיפות לגנראטור בעל מקדם אינרציה נמוך כדי לאפשר גמישות העמסה על המשתמש בזמני עבודה חיובית של המשתמש.
3. בעת תכנון המערכת המכאנית יש לקבוע את הפרמטרים הבאים:
  - א. קצב הליכה/ריצה מקסימאלי שעבורה מתוכננת המערכת ומתוך זה לגזור את ההאצה הזוויתית הגדולה ביותר של המפרק.
  - ב. לבצע החלטה על המומנט המקסימאלי שמוכנים שהמשתמש ירגיש בעת ההאצה כאשר המערכת אינה קוצרת.
  - ג. על פי א' וב' למצוא את מקדם האינרציה של המערכת המכאנית
  - ד. לבצע החלטה על מומנט הבלימה המקסימאלי שעל המערכת המכאנית להפעיל על המפרק.
  - ה. ביצוע אופטימיזציה של הגנראטור והתמסורת כך שהמערכת המכאנית תוכל להפעיל את פרופיל הבלימה הרצוי, תוך עמידה באילוצים של מקדם האינרציה שנמצא בג' ומהירות העבודה שהוגדרה על פי היצרן הן עבור הגנראטור והן עבור התמסורת. בנוסף לכך יש לקחת בחשבון גם את השפעות המשקל של המערכת על המשתמש.
4. בעת תכנון המערכת החשמלית השיקולים צריכים להיות:
  - א. המערכת חייבת להיות אוטונומית במובן שהאנרגיה המשמשת להפעלתה תהיה חלק מהאנרגיה הנקצרת.
  - ב. המקור מוגבל הספק לכן קיימת דרישה למינימום צריכה חשמלית של מעגל הבקרה ומקסימום נצילות של כלל המערכת החשמלית.
  - ג. המערכת צריכה להיות מסוגלת להכתיב פרופיל בלימה כדי לאפשר קצירה של כמות הספק מקסימאלית.

- ד. לקצירת כמות אופטימאלית של הספק המערכת צריכה להיות בחוג סגור – יש צורך במשוב ביולוגי של המשתמש כדי לכמת את השפעות הקצירה על המשתמש.
- ה. המערכת צריכה להיות "חכמה" – על המערכת "ללמוד" תוך כדי העבודה לזהות את המקטעים של עבודה שלילית ולדעת להתאים את פרופיל הבלימה בהתאם לכמות האנרגיה השלילית הזמינה.

מחקר המשך עתידי בתחום זה יכול להתמקד במערכת ניהול הספק דו-כיוונית. מטרת המערכת הזו יהיה לא לקצירת אנרגיה לטובת טעינת והפעלת מוצרי חשמל ניידים אלא עזרה למשתמשים הן בבלימת הגוף והן בהאצתו. לפי השערה הקיימת כרגע צורה זו של עבודה הינה נכונה יותר למשתמש כיוון שהיא עוזרת באופן סימטרי לשרירים. כחלק ממחקר עתידי יבוצעו אופטימיזציות לצריכת האנרגטית של המערכת וייבחנו טופולוגיות שונות של ממירים ממותגים אשר יאפשרו עצירה מוחלטת של הגנראטור דבר שאינו אפשרי במערכת הנוכחית.

- [1] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. USA: Springer, 2001.
- [2] R. Riemer and A. Shapiro, "Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions," *J. of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 8, no. 20, April 2011.
- [3] Etón Corporation. (2013, September) Etón Corporation. [Online]. <http://www.etoncorp.com/>
- [4] Parker Akweli. (2013, September) ecopedia. [Online]. <http://www.ecopedia.com/lifestyle/human-powered-gyms-make-watts-out-of-your-workout/>
- [5] (2013, September) energy floors. [Online]. <http://www.sustainabledanceclub.com/>
- [6] D. A. Winter, "Biomechanical Motor Patterns in Normal Walking," *Journal of Motor Behavior*, vol. 15, no. 4, pp. 302-330, 1983.
- [7] D. A. Winter, "Energy Generation and Absorption at the Ankle and Knee during Fast, Natural and Slow Cadences," *Clin Orthop.*, vol. 197, pp. 147-154, May 1983.
- [8] M. K. Yoong et al., "Studies of regenerative braking in electric vehicle," in *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, 2010, pp. 40-45.
- [9] J.A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *Pervasive Computing*, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, January-March 2005.
- [10] N.S. Shenck and J.A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics," *Micro*, vol.

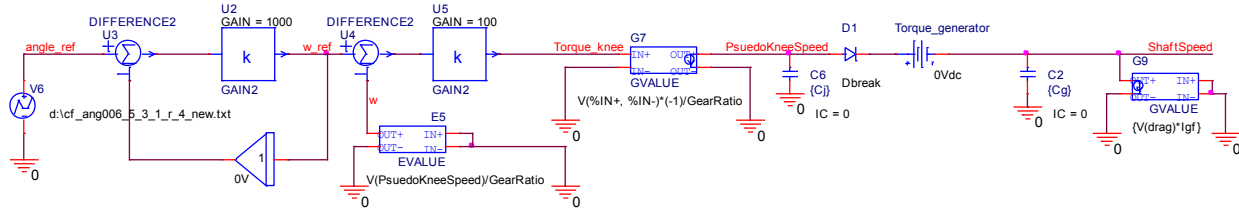
21, no. 3, pp. 30-42, May/June 2001.

- [11] S. Boisseau, G. Despesse, and B. A. Seddik, "Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting," in *Small-Scale Energy Harvesting*, Mickael Lallart, Ed.: inTech, 2012, ch. 5, pp. 91-132.
- [12] Penglin Niu, P. Chapman, L. DiBerardino, and E. Hsiao-Wecksler, "Design and optimization of a biomechanical energy harvesting device," in *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 4062-4069.
- [13] R. Geiger and H. Hofmann, "Energy harvesting using AC machines with high effective pole count," in *Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 2229-2234.
- [14] A. Sayyah, A. Davoudi, and P.L. Chapman, "Optimization of permanent magnet brushless machine for biomechanical energy harvesting applications," in *Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2011, pp. 1405-1409.
- [15] P. Niu, P. Chapman, R. Riemer, and X. Zhang, "Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting," in *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2004, pp. 2100-2106.
- [16] J. F. Gieras and M. Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [17] J. M. Donelan et al., "Biomechanical energy harvesting: generating electricity during walking with minimal user effort," *Science*, vol. 319, no. 5864, pp. 807-810, 2008.
- [18] Q. Li, V. Naing, and J. M. Donelan, "Development of a biomechanical energy harvester," *J. of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 6, no. 22, June 2009.

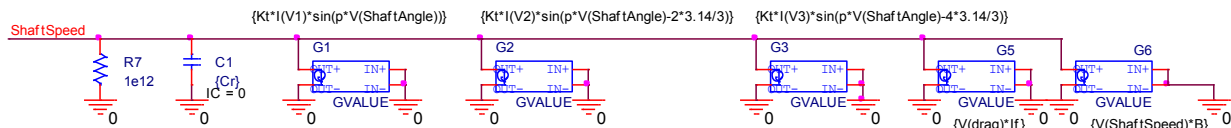
- [19] Q. Li et al., "Biomechanical Energy Harvesting: Apparatus and Method," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, 2008.
- [20] R. Riemer, A. Shapiro, and S. Azar, "Optimal gear and generator selection for a knee biomechanical energy harvester," in *1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics*, Venice, 2010.
- [21] Trishan Eram and Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 22, no. 2, June 2007.
- [22] L. C. Rome, L. Flynn, E. M. Goldman, and T. D. Yoo, "Generating electricity while walking with loads," *Science*, vol. 309, no. 5741, pp. 1725-1728, 2005.
- [23] S. Ben-Yaakov, "Average simulation of PWM converters by direct implementation of behavioral relationships," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1993. APEC '93*, 1993, pp. 510-516.
- [24] Guanghui Wang, Cheng Luo, H. Hofmann, and L. Rome, "Power electronic circuitry for energy harvesting backpack," in *Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 3544,3549.
- [25] D. Krahenbuhl, C. Zwyssig, K. Bitterli, M. Imhof, and J.W. Kolar, "Evaluation of ultra-compact rectifiers for low power, high-speed, permanent-magnet generators," in *Industrial Electronics, IECON*, 2009, pp. 448,455.
- [26] C. Zwyssig, S.D. Round, and J.W. Kolar, "An Ultrahigh-Speed, Low Power Electrical Drive System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 577-585, February 2008.
- [27] D. Krähenbühl, C. Zwyssig, and J.W. Kolar, "Half-Controlled Boost Rectifier for Low-Power High-

- Speed Permanent-Magnet Generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 11, pp. 5066-5075, Nov. 2011.
- [28] Hyung-Min Ryu, "highly efficient ac-dc converter for small wind power generators," *Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 188-193, March 2011.
- [29] Z. Rubinshtein, R. Riemer, and S. Ben-Yaakov, "Modeling and analysis of brushless generator based biomechanical energy harvesting system," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 2784-2789.
- [30] Z. Rubinshtein, M. M. Peretz, and Riemer R., "Biomechanical Energy Harvesting System with Optimal Cost-of-Harvesting Tracking Algorithm," in *APEC*, Fort Worth, 2014.
- [31] Sarai Mizrahi and Raziel Riemer, "Biomechanical energy harvesting: control and evaluation of device efficiency," in *ICR 2013*, Tel Aviv, 2013.
- [32] T. Esum and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, June 2007.
- [33] M.M. Peretz and S. Ben-Yaakov, "Digital Control of Resonant Converters: Resolution Effects on Limit Cycles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1652-1661, June 2010.
- [34] Maxon Motor Co. (2012, January) Maxon EC 45 flat 339285 Datasheet. site. [Online].  
[http://www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/8796893708318/EC-45-flat-339285\\_11\\_EN\\_194.pdf](http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8796893708318/EC-45-flat-339285_11_EN_194.pdf)

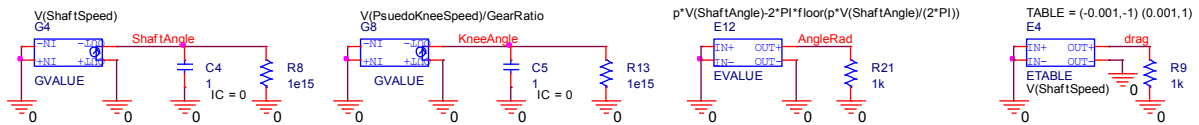
10.1 מעגל הסימולציה של מודל המערכת בספיים



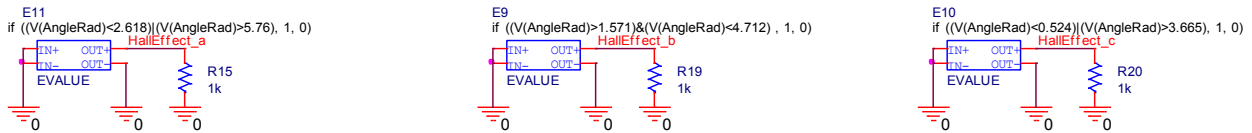
איור 1.10 – מודל של המערכת המכאנית



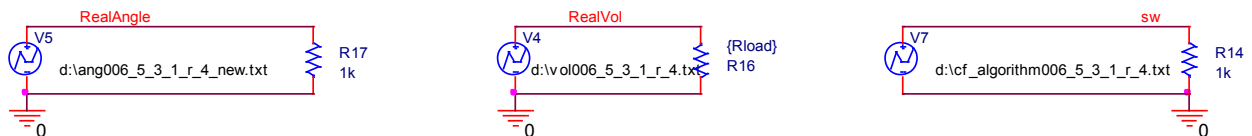
איור 2.10 – מודל הרוטור בגנראטור



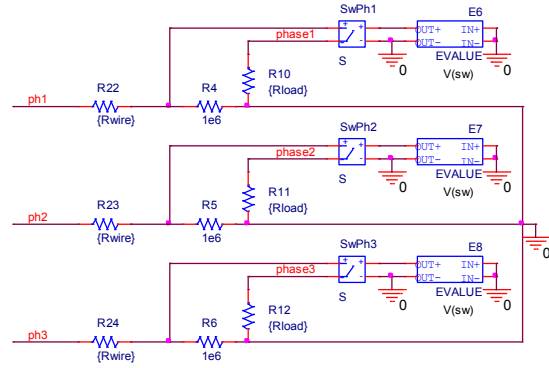
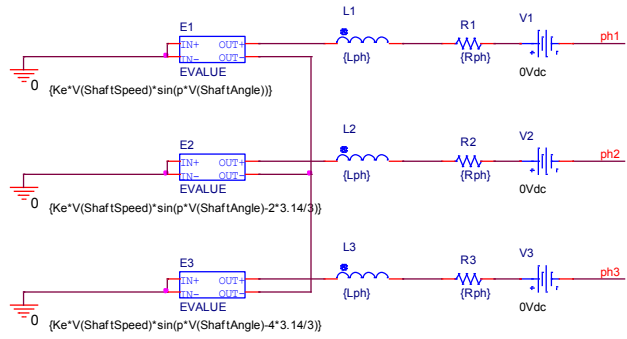
איור 3.10 – מעגלי עזר למציאת מיקום הרוטור (G4), זווית הברך (G8), זווית חשמלית של הרוטור (E12) ומעגל לקביעת כיוון הסיבוב של הרוטור לקביעת כיוון כוח החיכוך ברוטור.



איור 4.10 – מודל של 3 חיישני Hall effect

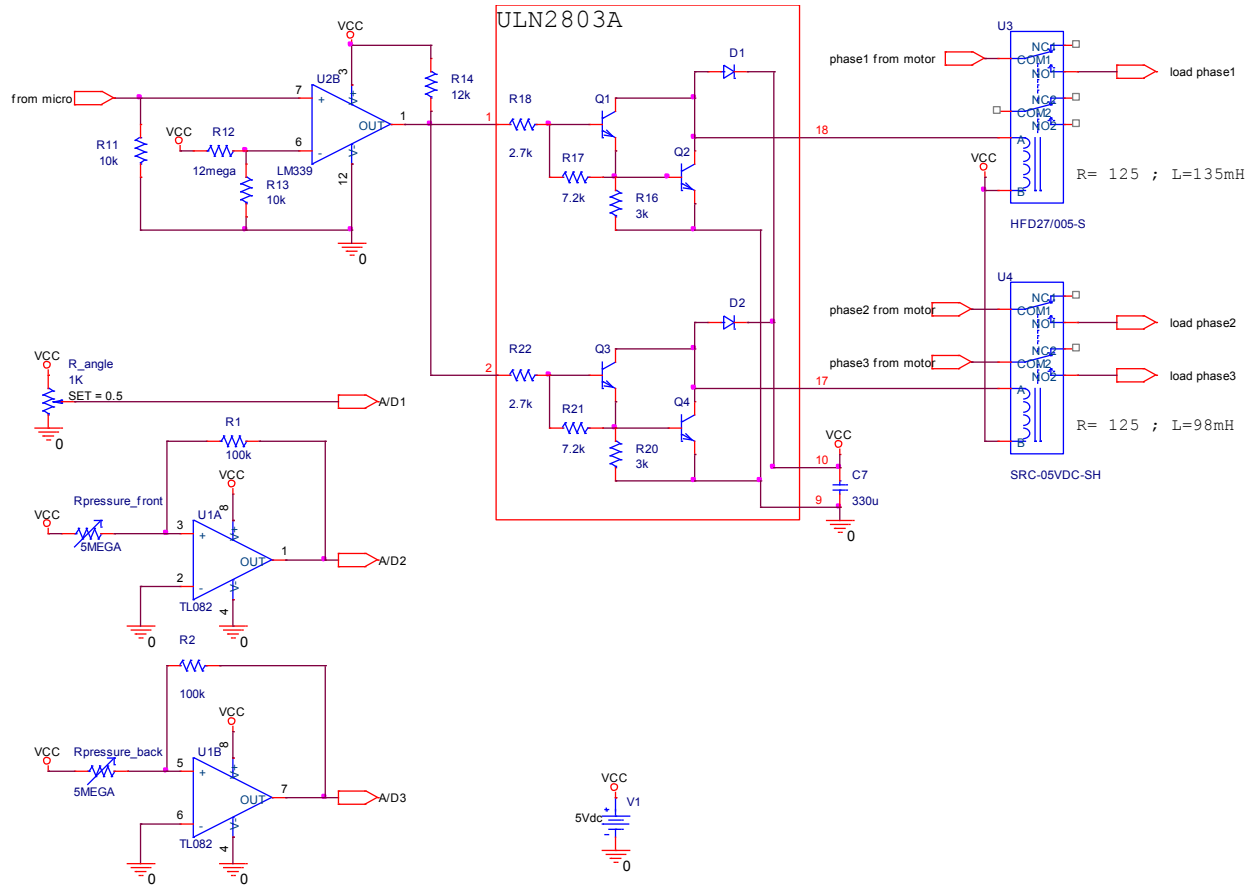


איור 5.10 – מעגלי עזר אשר ביצעו קריאה של נתוני הניסויים לתוך הסימולציה להשוואה בין התוצאות בתוך תוכנת SPICE

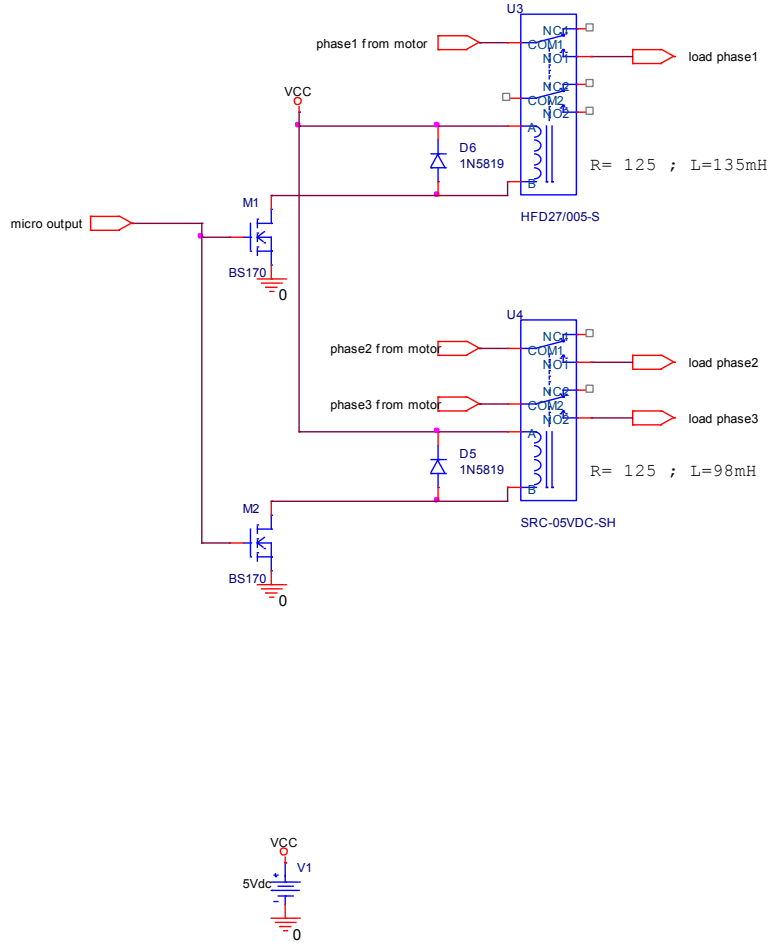
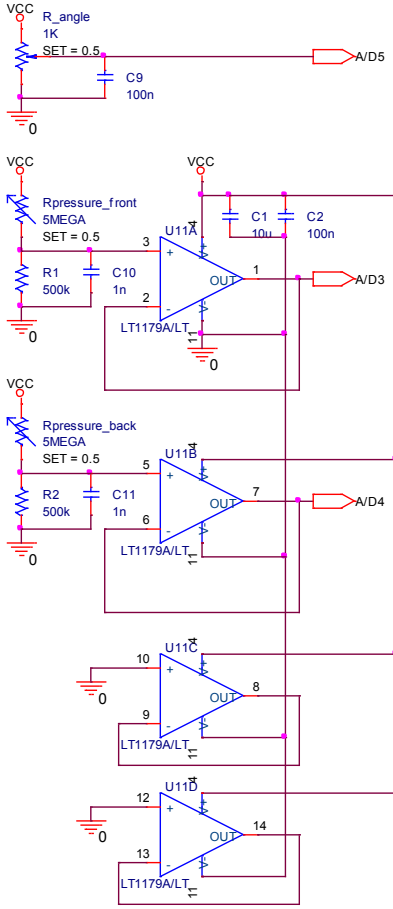


איור 6.10 – מודל הסטאטור מצד שמאל ומודל העומס בצד ימין

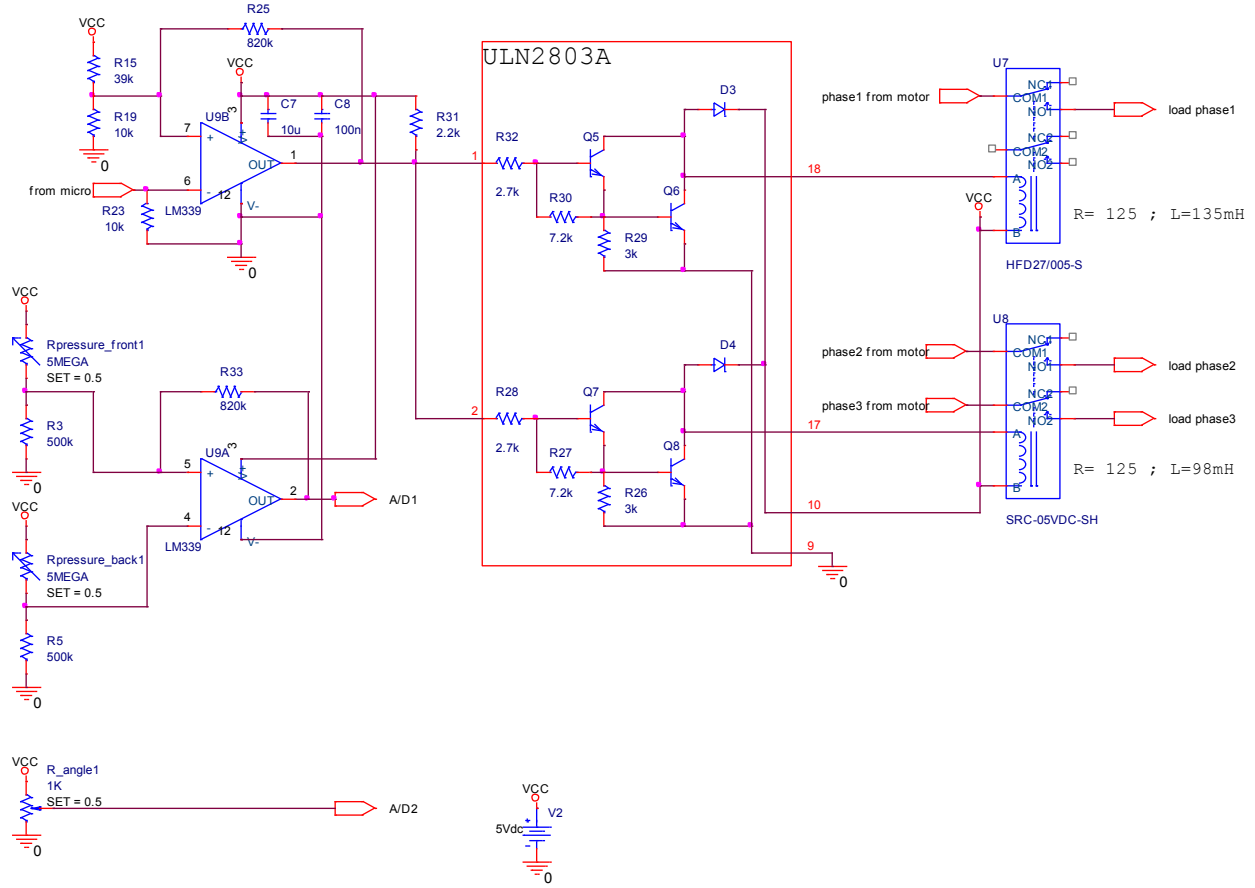
10.2 שרטוטי המעגל הבסיסי



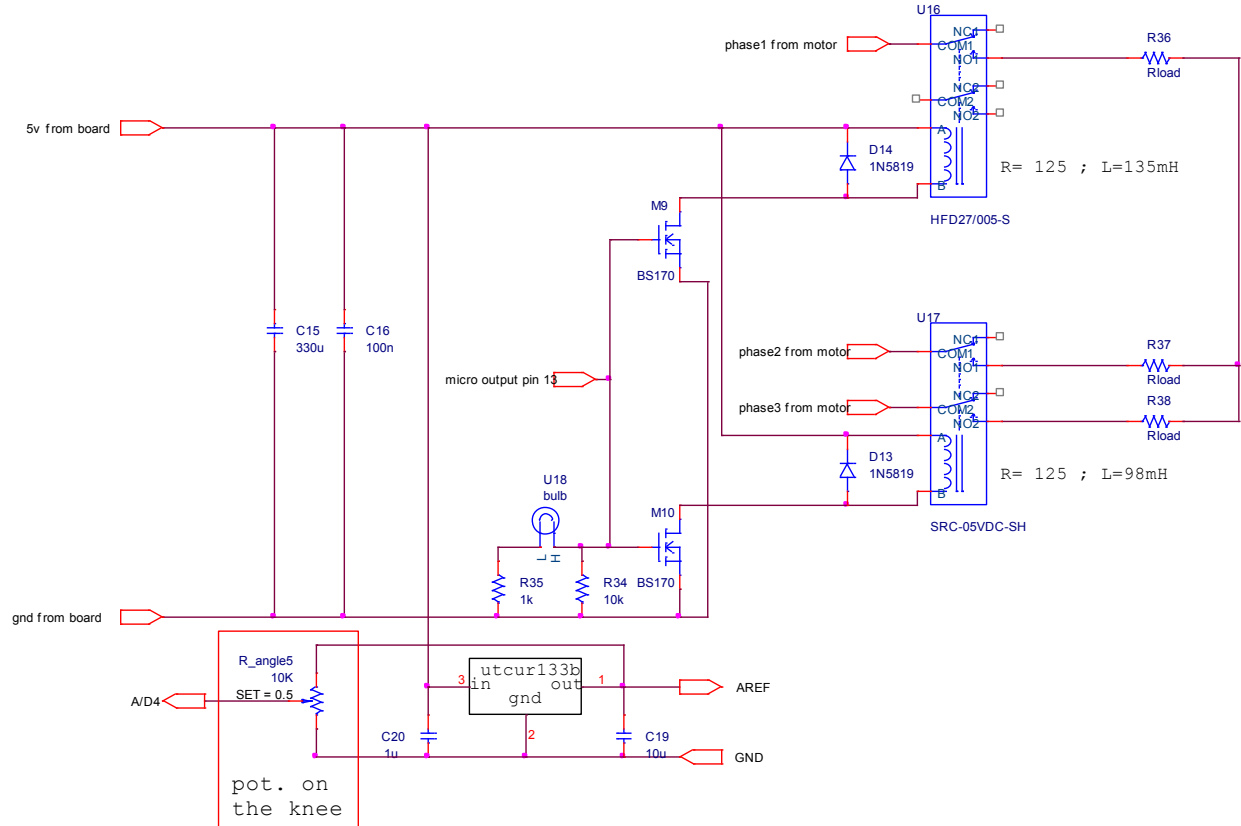
איור 7.10 – שרטוט המעגל הבסיסי שהתקבל מהנדסת מכונות בעת קבלת המערכת בצוות מעבדת אלקטרוניקת הספק



איור 8.10 – הוריאציה הראשונה שנבחנה עבור מעגל חשמלי אשר משתמש הן בזווית הברך והן בחיישני לחץ

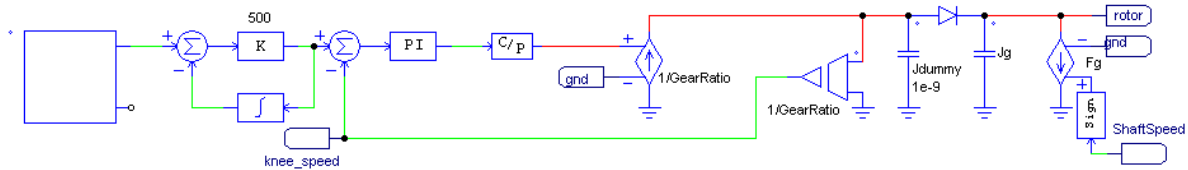


איור 9.10 – ניסיון שני להתמודד עם חיישני לחץ הפעם השוואה מתבצעת ברמת המשווה

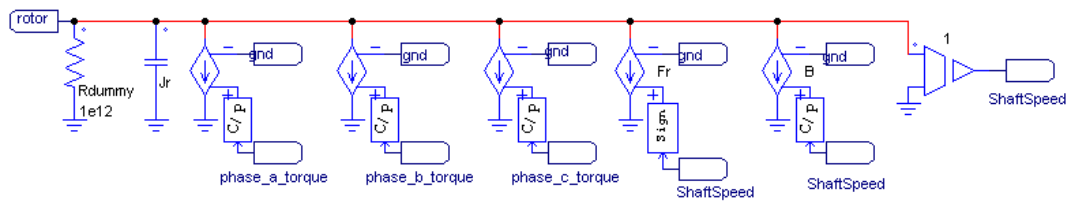


איור 10.10 – מעגל חשמלי בסיסי המבוסס רק על חישת הזווית

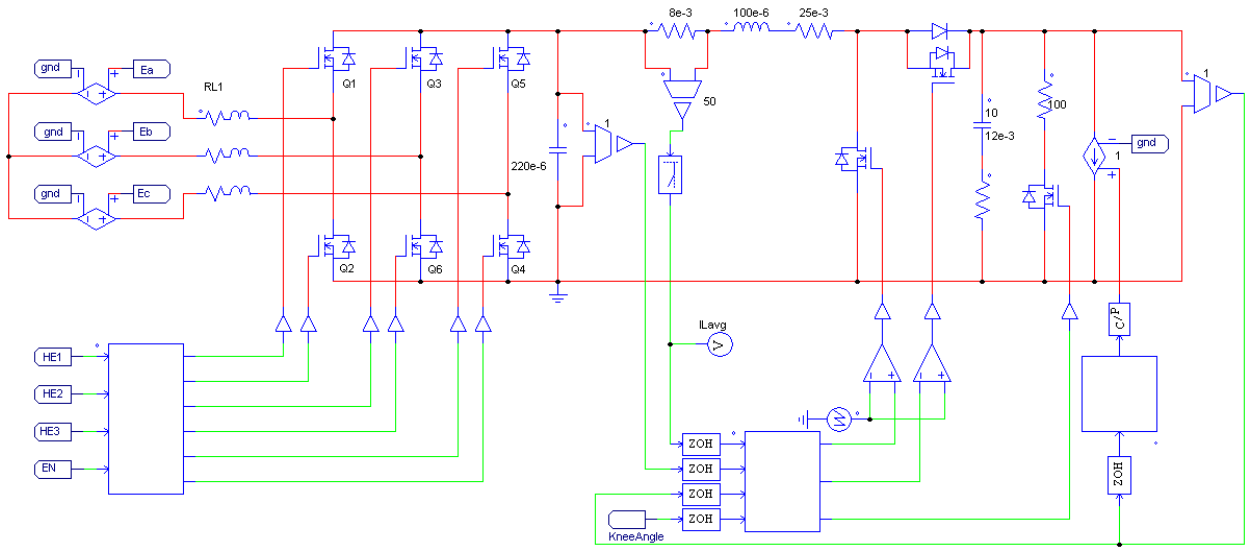
### 10.3 מעגל סימולציה של המערכת המלאה



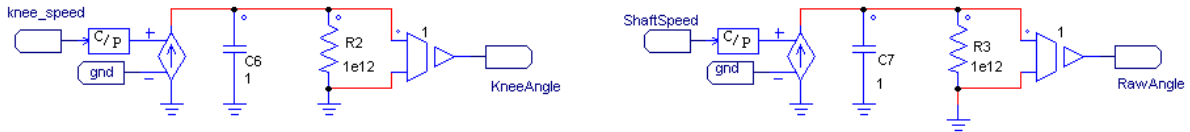
איור 11.10 – מודל הכוח שמפעיל



איור 12.10 – מודל הציר המכאני של הרוטור



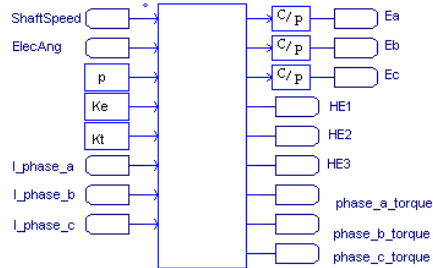
איור 13.10 – מודל מערכת לניהול הספק עם מודל הסטאטור של הגנרטור



איור 14.10 – מעגלי עזר המחשבים את הזווית המכאנית לפני העיבוד (מימין) ואת זווית מפרק הברך (משמאל)



איור 15.10 – מעגלי עזר המחשבים את הזווית המכאנית (מימין) ואת הזווית החשמלית (משמאל) של הרוטור



איור 16.10 – בלוק קוד C הממש את הקשרים המתמטיים בין הזרם למומנט, בין מהירות הסיבוב למתח המושגה בפאזות, ואת

האותות של חיישני Hall effect

הפרמטרים של הסימולציה:

Rload=8

Rph=0.22

Lph=0.14e-3

$K_e=0.0015556$

$\pi=3.141592$

$V_{df}=0.6$

$R_{D_{son}}=80e-3$

$J_r=135e-7$

$J_g=4.3e-7$

$K_t=14.855e-3$

$p=8$

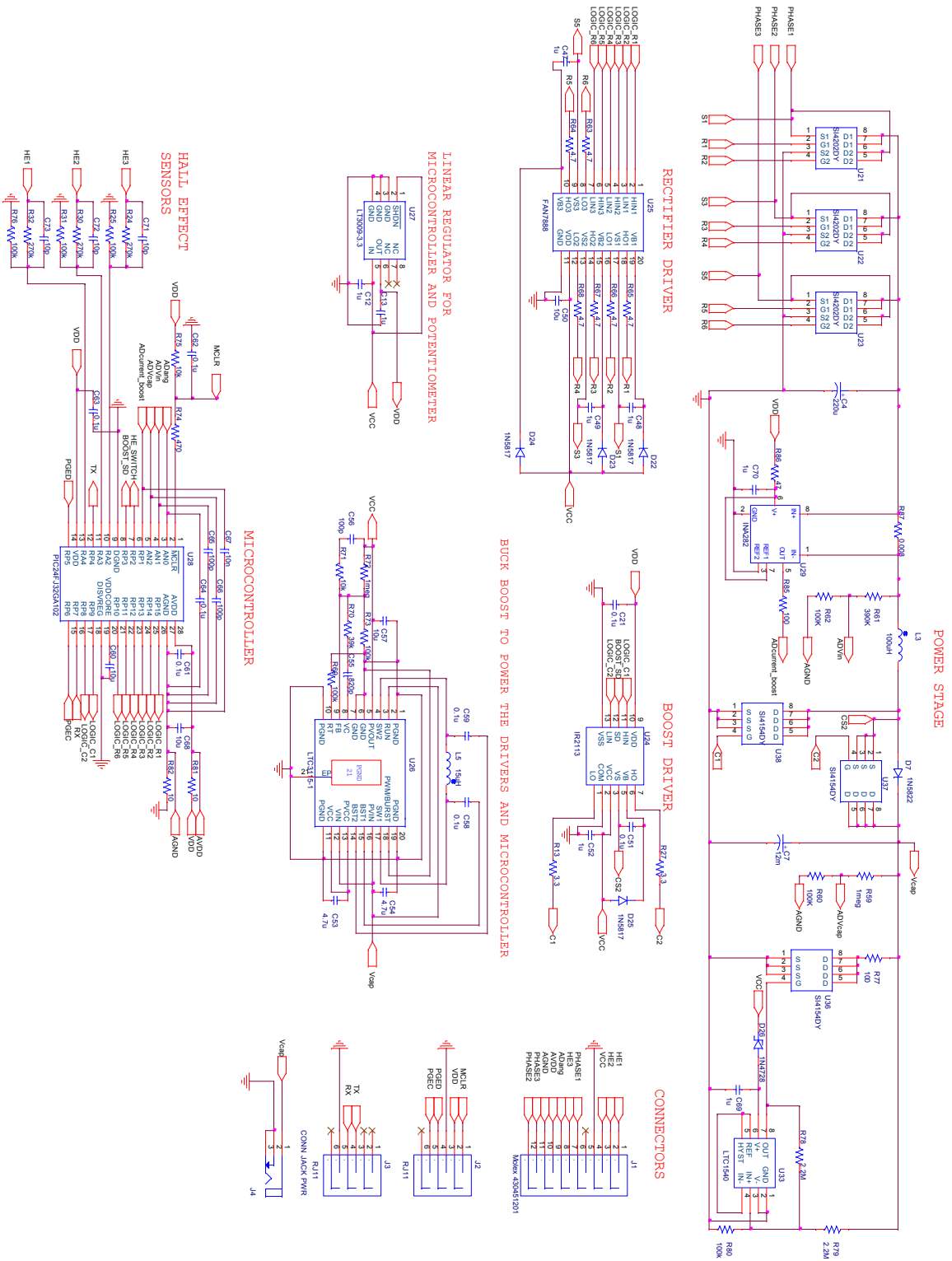
$B=1e-5$

$F_r=1e-3$

$F_g=1e-3$

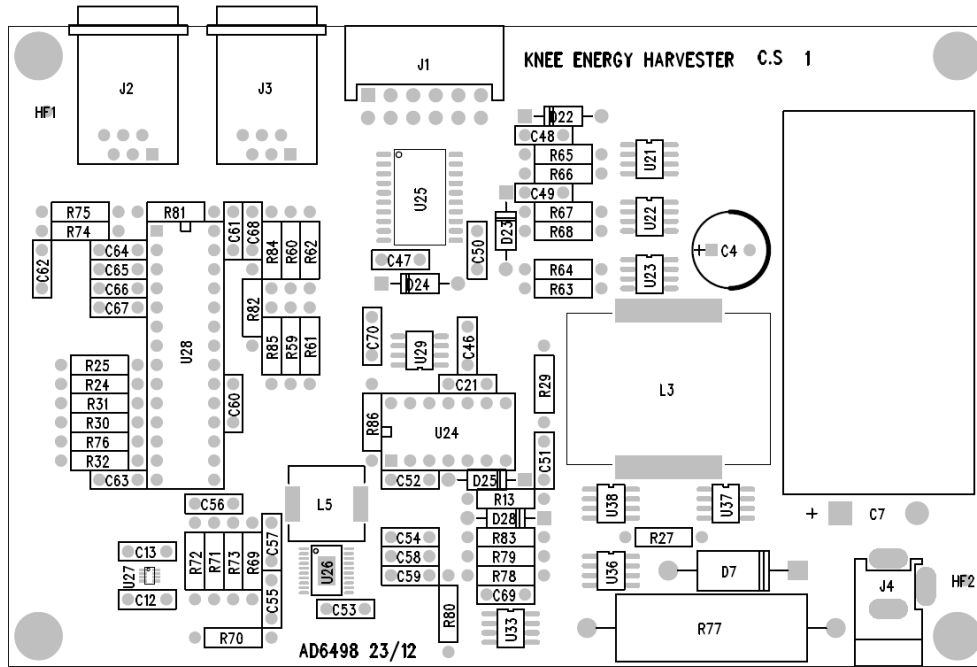
$\text{GearRatio}=83$

10.4 שרטוט חשמלי של כרטיס המערכת

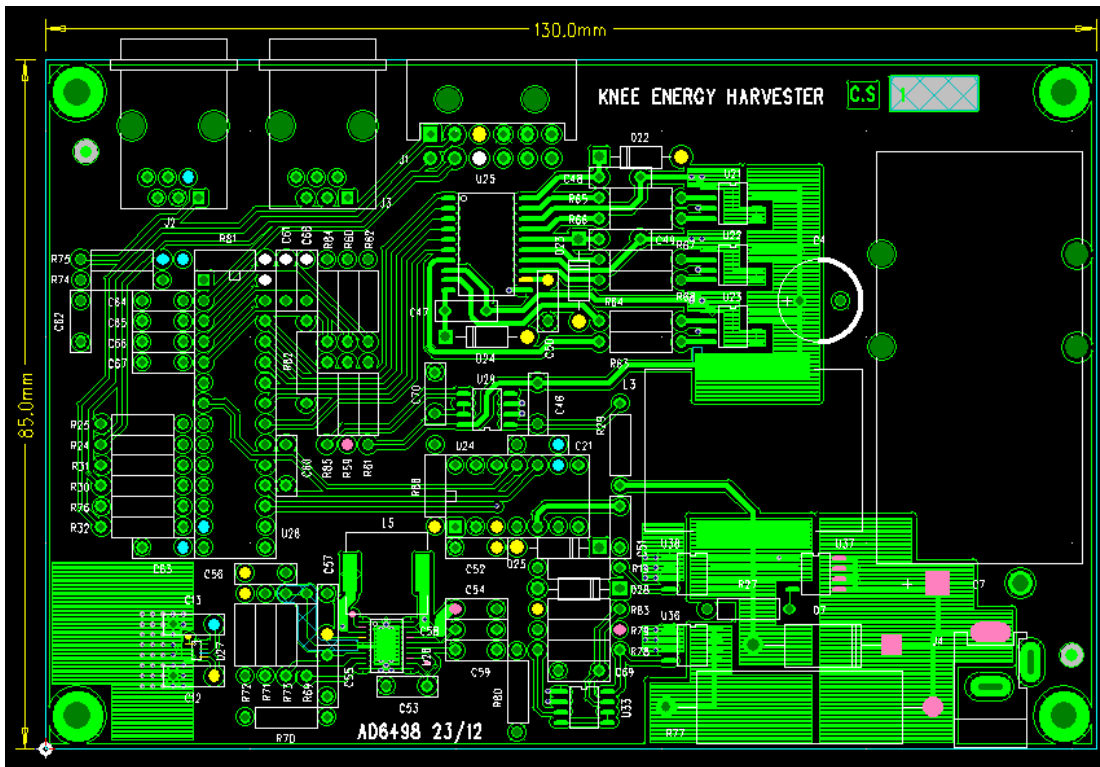


איור 17.10 – שרטוט חשמלי של המערכת

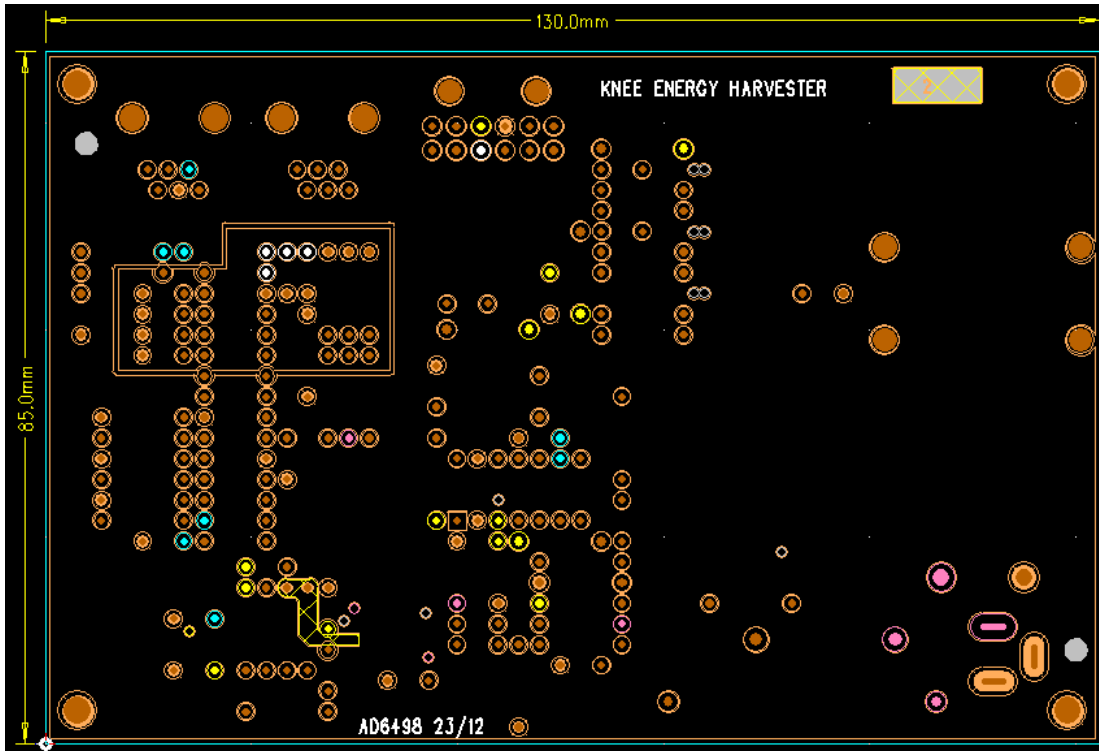
Layout 10.5 של כרטיס המערכת



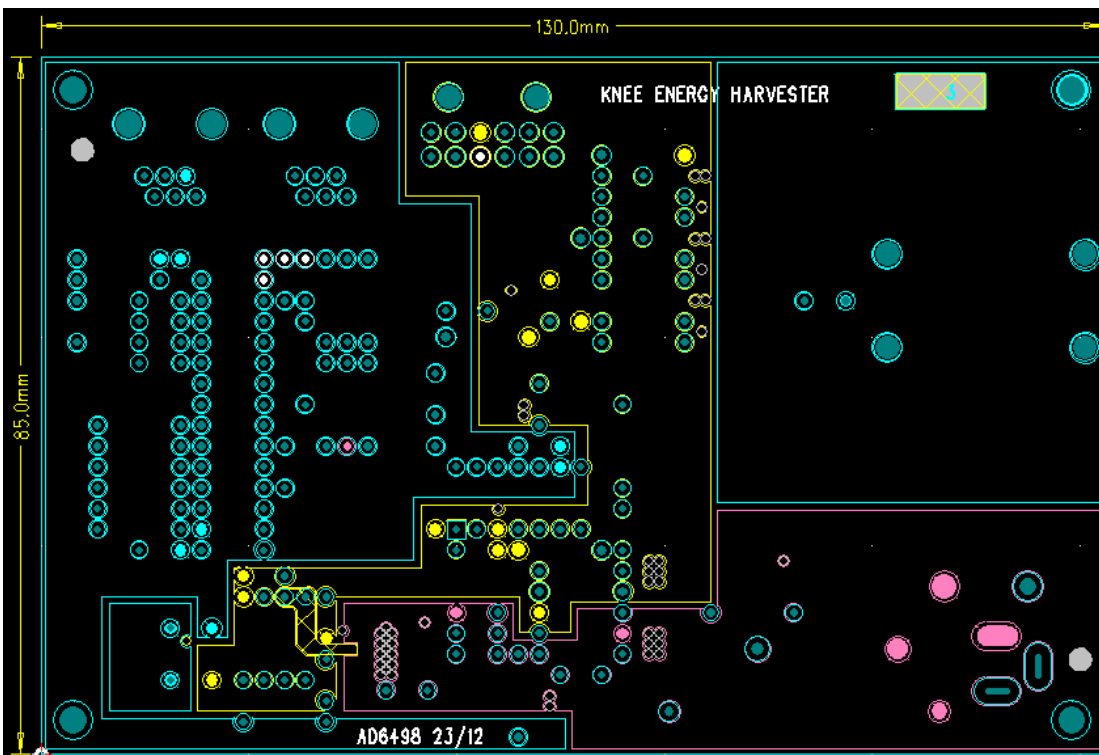
איור 18.10 – איור מיקום הרכיבים בכרטיס המערכת



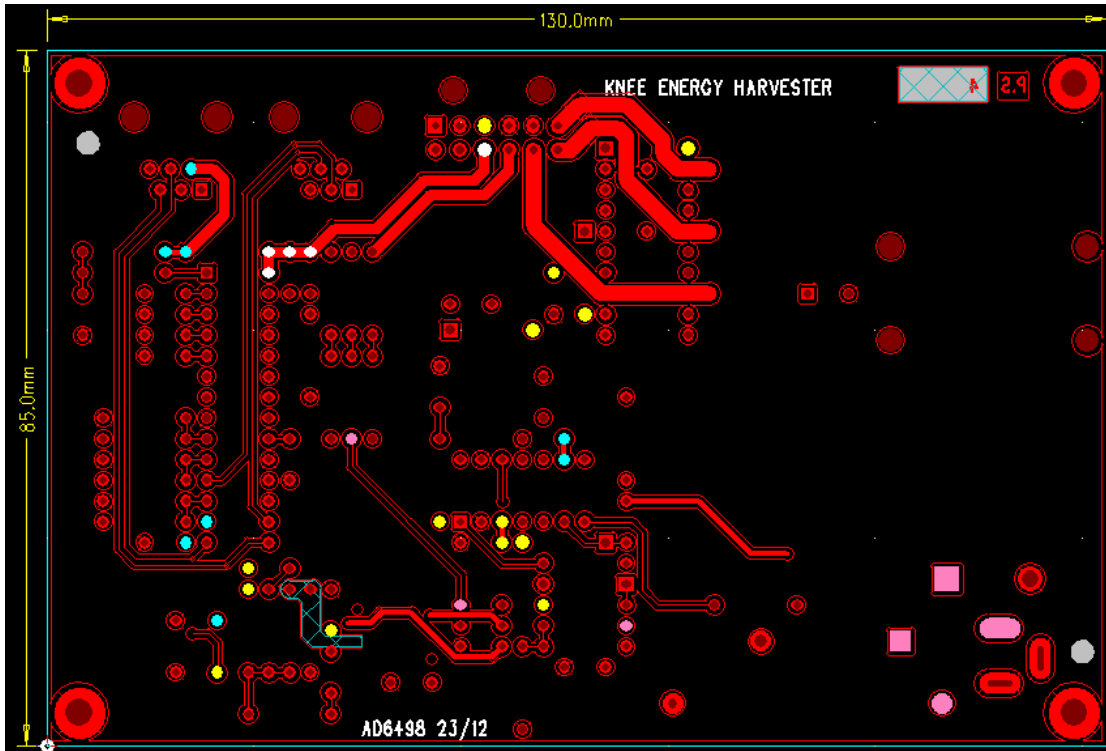
איור 19.10 – layout של שכבה 1 (שכבה חיצונית)



איור 20.10 – layout של שכבה 2 (שכבה פנימית)



איור 21.10 – layout של שכבה 3 (שכבה פנימית)



איור 22.10 – layout של שכבה 4 (שכבה חיצונית)

## **Abstract**

Portable appliances are an integral part of modern lifestyle. The energy source for most of these devices is batteries. Energy capacity of the battery limits the operating time between charges from the mains. In cases where continuous operation of the system is critical, the users are compelled to carry extra batteries. One of the solutions proposed to extend operation time utilizes user biomechanical energy to charge the battery.

This research presents a new biomechanical energy harvesting system based on the regenerative braking concept applied to the human natural motion. In previous studies the optimal braking profile was determined by an off-line procedure using an external load which was kept constant during a walking cycle. The new concept of this study optimizes the maximum amount of energy that can be extracted during human motion while minimizing the subject's effort. This is achieved by a harvesting system equipped with a programmable braking profile and a unique power extraction algorithm, which adaptively changes the braking profile to obtain the optimal ratio of energy to effort. These are facilitated by a BLDC generator that is connected to boost converter. A digital current programmed control of the boost converter enables adaptive torque variation according to bio and electrical feedbacks. This study focuses on the human knee joint as the energy source since the most of this joint work during level walking is negative (muscles are acting as breaks).

The concept presented in this research was verified by simulation model and experimental prototype. The operation of the energy harvester is demonstrated on a full-scale laboratory prototype based on a walking emulator. The results exhibit ultimate power extraction capabilities as well as adaptation to the walking pattern. The study was published by two articles in the most prestigious conferences in the field of power electronics.

BEN-GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV  
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

# Power Converter and Control for a Biomechanical Energy Harvesting System

THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE M.Sc DEGREE

By: Ze'ev Rubinshtein

Supervised by: Prof. Shmuel Ben-Yaakov  
Dr. Mor Peretz  
Dr. Raziel Riemer

Author: Ze'ev Rubinshtein  Date: 03.12.2013

Supervisor: Prof. Shmuel Ben-Yaakov  Date: 03.12.2013

Supervisor: Dr. Mor Peretz  Date: 03.12.2013

Supervisor: Dr. Raziel Riemer  Date: 03.12.2013

Chairman of Graduate Studies Committee:...  Date: 03.12.2013

December 2013

BEN-GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV  
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

# Power Converter and Control for a Biomechanical Energy Harvesting System

THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE M.Sc DEGREE

By: Ze'ev Rubinshtein

December 2013