

Generic Gate Driver

IGBTs, CoolSiC, USiC

EVALUATION OF

Infiniteon EiceDRIVER

חורף תשפ"ה

ספר פרויקט - 8034

מבצעים: מאור ושחר

מנחה: אריק

תודות

ילנה (ומנשה) –

עם המון סבלנות, עזרו לבחון ולבחור בפתרונות. כמובן גם לחבר ולנתק ולספק את העזרים הנדרשים.

לידור (ותום) –

עם התעניינות, שאלות קטנות במעבדה, עזרה במדידות ועבודה עם מכשירים.

אריק –

שהקשיב לנו, הבין אותנו, עזר, דחף קדימה וגם שחרר כשהיה צריך. הכל בצורה נעימה ועם חיוך.

תוכן עניינים

4.....	רשימת איורים.....
5.....	1. תקציר.....
6.....	2. רשימת קיצורים.....
6.....	3. מבוא
7.....	3.1. הגדרות ושפה משותפת.....
7.....	3.2. עבודות קודמות.....
8.....	3.3. מבנה העבודה – שלבים.....
9.....	4. תיאור כללי של הכרטיס והמערכת.....
11.....	4.1. מיקרו-בקר (Arduino Uno R3)
12.....	4.2. אספקת המתח במעגל.....
12.....	4.3. תשתית חיבור ובקרה
12.....	5. רכיבים מרכזיים במערכת
12.....	5.1. הדרייבר – Infineon 1ED3321MC12N.....
13.....	5.2. טרנזיסטור IGBT - Infineon IKW40N120H3
13.....	5.3. טרנזיסטור SiC MOSFET - UnitedSiC UJ4C075018K3S
14.....	6. פירוט תהליך הפיתוח ושלבי העבודה
14.....	6.1. שלב ראשוני – הפעלה בסיסית של הכרטיס.....
15.....	6.2. הפעלה עם מתח גבוה ובדיקות עומס
15.....	6.3. החלפת הטרנזיסטורים והגדרת התאמות.....
16.....	6.4. שיקולים נוספים ותכנון מבנה גנרי.....
16.....	7. ניתוח תוצאות
17.....	8. מסקנות והמלצות.....
17.....	8.1. מסקנות עיקריות.....
17.....	8.2. אתגרים שעלו.....
17.....	8.3. המלצות להמשך.....
19.....	9. נספחים.....
19.....	9.1. בדיקות ותוצאות.....
19.....	9.2. קוד בקר ארדואינו.....
19.....	9.3. פתרון אלטרנטיבי - מעגל תומך
20.....	9.4. הוראות הפעלה

20.....	9.5. קישורים - לינקים
21.....	10. רשימת מקורות

רשימת איורים

7.....	Figure 1 איור - Infineon Eval-1ED3321MC12N
8.....	Figure 2 איור - דיאגרמת בלוקים של שלבי העבודה
9.....	Figure 3 איור - דיאגרמת החיבורים
10.....	Figure 4 איור - טרנזיסטור עליון HS פתוח להולכה
10.....	Figure 5 איור - טרנזיסטור תחתון LS פתוח להולכה
11.....	Figure 6 איור - טבלת מצבי ההפעלה
11.....	Figure 7 איור - מיקרו-בקר ארדואינו, המחשה של זמן מת
13.....	Figure 8 איור - דרייבר Infineon 1ED3321MC12N
13.....	Figure 9 איור - טרנזיסטור IGBT - Infineon IKW40N120H3
14.....	Figure 10 איור - טרנזיסטור SiC MOSFET - UnitedSiC UJ4C075018K3S
14.....	Figure 11 איור - PWM גל משלים מהמיקרו בקר
15.....	Figure 12 איור - סכימת חיבור נגדי העומס בצד המתח הגבוה
19.....	Figure 13 איור - פתרון אלטרנטיבי מעגל תומך
20.....	Figure 14 איור - פתרון אלטרנטיבי חיבור למעגל הקיים

1. תקציר

במסגרת פרויקט זה נבחן ואופיין כרטיס אב-טיפוס של חברת Infineon דגם Eval-1ED3321MC12N, המשמש כדרייבר מבודד להפעלת טרנזיסטורים מסוג IGBT בתצורת Half-Bridge. המטרה המרכזית של הפרויקט הייתה לאפשר שימוש גמיש בכרטיס, כך שיתאים גם לטרנזיסטורים מסוג SiC MOSFET (Silicon Carbide), ובכך להרחיב את השימושיות שלו לטובת פרויקטים עתידיים במעבדת הספק.

במסגרת העבודה נותח מבנה הכרטיס והוגדרו ההתאמות הנדרשות להחלפת סוג הטרנזיסטורים, תוך התחשבות בשוני בין הטכנולוגיות מבחינת מאפייני מיתוג, דרישות מתח ובטיחות. פותח סט-אפ ניסיוני הכולל מיקרו-בקר ליצירת אותות PWM מותאמים, ונבחנו מדידות מייצגות למתחים השונים V_{GE} , V_{CE} , V_{GS} , V_{DS} על-גבי שני סוגי הטרנזיסטורים.

התוצר הוא תשתית גנרית להפעלת טרנזיסטורים בתצורת Half-Bridge, שתאפשר שימוש חוזר, בטוח וגמיש בכרטיסים קיימים במעבדה לצרכים ניסיוניים מגוונים.

Abstract

This project focuses on the evaluation and adaptation of Infineon's Eval-1ED3321MC12N evaluation board, originally designed as a dual-channel isolated gate driver for IGBT transistors in a Half-Bridge configuration. The main objective was to enable flexible use of the board with additional transistor types—specifically, SiC MOSFETs (Silicon Carbide)—thereby extending its applicability for future power electronics experiments in the lab. The internal structure of the board was analyzed, and the necessary adjustments for replacing the original IGBTs were defined, with attention to differences in switching behavior, voltage requirements, and safety considerations across technologies.

A dedicated experimental setup was developed using a microcontroller to generate complementary PWM signals with appropriate dead time, and representative measurements of V_{ge} , V_{ce} , V_{gs} , and V_{ds} were performed for both transistor types.

The result is a generic, lab-grade Half-Bridge gate driver platform that enables safe, reusable, and flexible testing of various power transistors using the same evaluation board.

2. רשימת קיצורים

Evaluation Board כרטיס בדיקה והערכה של רכיבים	Eval Board
Insulated Gate Bipolar Transistor	IGBT
Gate–Emitter Voltage Collector–Emitter Voltage	V_{GE} V_{CE}
Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor	MOSFET
Gate–Source Voltage Drain–Source Voltage	V_{GS} V_{DS}
Silicon Carbide	SiC
Pulse Width Modulation מיתוג באמצעות שינוי רוחב פולס	PWM
High Voltage – מתח גבוה	HV
Low-Side / High-Side צד עליון / צד תחתון	LS/HS
Printed Circuit Board מעגל מודפס	PCB

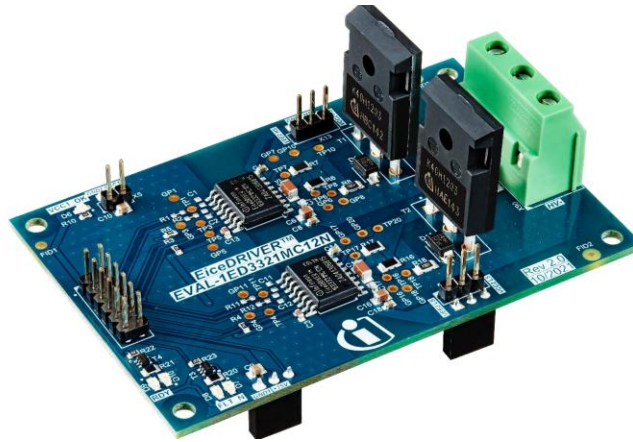
3. מבוא

במסגרת פרויקטים שונים המתבצעים במעבדת הספק, קיים צורך בתשתיות מודולריות להפעלת טרנזיסטורים מסוגים שונים, תוך תמיכה בטופולוגיות מיתוג מגוונות כגון Half-Bridge, Buck, Boost וכדומה.

השימוש בכרטיסים מוכנים מראש לצרכי ניסוי, פיתוח ואפיון, מאפשר חיסכון ניכר בזמן, עשוי למנוע שגיאות חיווט, ולתרום לסטנדרטיזציה של ניסויים.

תמונות הכרטיס שנבחר כבסיס לעבודה, Infineon Eval-1ED3321MC12N, מופיע באיור 1. הכרטיס תוכנן במקור עבור הפעלת טרנזיסטורים מסוג IGBT, אולם בפרויקט נבחנה האפשרות להרחיב את שימושם להפעלת טרנזיסטורים מסוג SiC MOSFET. טרנזיסטורים מתקדמים בעלי יתרונות בולטים במהירות מיתוג, עמידות תרמית, יעילות וכן היכרות טובה יותר של סטודנטים עם אופן הפעולה שלהם.

המוטיבציה לפרויקט נובעת מן הצורך לאפשר גמישות בניסויים עתידיים, מבלי להידרש לתכנון חומרה ייעודית לכל טכנולוגיה מחדש.



Infineon Eval-1ED3321MC12N - Figure 1 איור

3.1. הגדרות ושפה משותפת

Gate Driver – רכיב המשמש לשליטה ישירה על שערי טרנזיסטורים, תוך התאמת מתחים, בקורות הפעלה והגנות.

IGBT / SiC MOSFET – טכנולוגיות טרנזיסטור שונות, כל אחת בעלת מאפיינים ייחודיים מבחינת מתחי הפעלה, קצב מיתוג, עמידות לרעש ועוד.

Dead Time – מרווח זמן בין כיבוי של טרנזיסטור אחד להפעלת השני בצד הנגדי של Half-Bridge, שנועד למנוע מצב של shoot-through וסיכון הרכיבים.

DESAT Protection – מנגנון הגנה מפני זרמי יתר, באמצעות זיהוי עלייה חדה במתח V_{CE} .

3.2. עבודות קודמות

כרטיס ההערכה Infineon Eval-1ED3321MC12N פותח לצורך הדגמת הביצועים של הדרייבר ED3321MC12N1, עם יישומים עבור טרנזיסטורים מסוג IGBT. בדפי הנתונים של הכרטיס מופיעה גם אפשרות לעבודה עם טרנזיסטורים מסוג MOSFET CoolSiC™, לרבות תרשימים לדוגמה ותצורות בדיקה.

עם זאת, בתצורתו המקורית הכרטיס תוכנן לשימוש עם זוג רכיבים קבועים, ללא אפשרות החלפה פשוטה או שילוב של סוגים שונים של טרנזיסטורים באותו סט-אפ ניסויי. בנוסף, לא סופקה תשתית גנרית לשילוב עם מיקרו-בקר חיצוני (כגון Arduino), ולא תועד תהליך אינטגרציה גמיש התואם לתרחישים מעבדתיים מגוונים.

הפרויקט הנוכחי נועד להשלים את הפער הזה – באמצעות תכנון מערכת פתוחה, מודולרית, המאפשרת עבודה עם טרנזיסטורים מסוגים שונים תוך התאמות מבוקרות של המתח, בקרת זמן מת, ובדיקת תנאי מיתוג.

3.3. מבנה העבודה – שלבים

באיור 2 מוצגת דיאגרמת בלוקים המסכמת את תהליך הפיתוח.

- ניתוח מבנה הכרטיס והבנת מנגנוני ההפעלה.
- PWM מהבקר לצורך יצירת אותות לשערי הטרנזיסטורים, כולל זמן מת שנדרש כדי למנוע מצב בו שני הטרנזיסטורים מוליכים בו-זמנית.
- חיבורים מהבקר אל הכרטיס - הזנת אותות הדרייבר וחיבורי ספקי הכוח למתחי השערים.
- אימות זרימת האותות מהבקר אל הדרייברים ולבסוף אל שערי הטרנזיסטורים, ללא שגיאות (מתחי שער נוצרו בהצלחה).
- חיבור ספק כוח במתח גבוה, להזנת מתח Vce בטרנזיסטורים, תוך שימוש בנגדים המאפשרים נתיב זרם.
- ביצוע בדיקות עם הטרנזיסטורים מקוריים (IGBT) לאימות תקינות.
- ביצוע מדידות על הטרנזיסטורים מקוריים (IGBT) כאשר הם מחוברים דרך מחברי בורג (Terminal Blocks).
- בדיקות צורך ויישום התאמות של הגנות ובקרה בהחלפת הטרנזיסטורים, כגון זמן מת וערכי Gate Resistor.
- החלפת הטרנזיסטורים ל-SiC MOSFET והרצת בדיקות.
- גיבוש המלצות לתצורה גנרית של הכרטיס עבור שימושים עתידיים במעבדה.

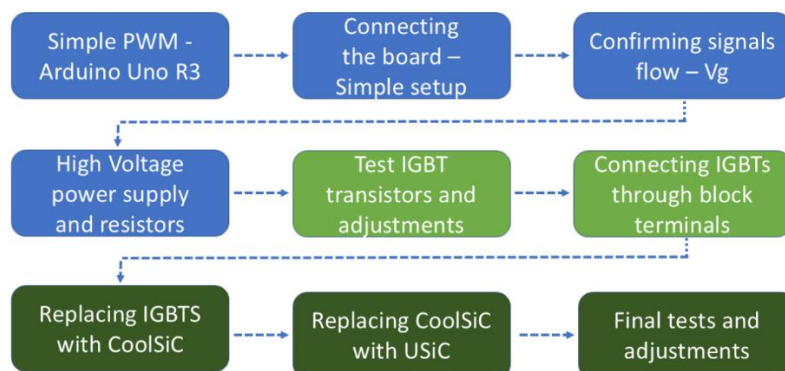


Figure 2 איור – דיאגרמת בלוקים של שלבי העבודה

4. תיאור כללי של הכרטיס והמערכת

בפרק זה נפרט את מבנה הכרטיס, אופן פעולתו, ונסביר את אופן החיבור שלו למערכת הבדיקה. באיור 3 מופיע דיאגרמת החיבורים.

הפרויקט מבוסס על כרטיס ההערכה Infineon Eval-1ED3321MC12N, אשר נועד להדגים את תפקודו של הדרייבר המבודד ED3321MC12N1, בתצורת Half-Bridge. הכרטיס כולל שני ערוצי דרייבר עם בידוד גליוני מלא ביניהם, כאשר כל דרייבר מסוגל להפעיל טרנזיסטור ב-HS או LS בהתאם למתחי ההזנה.

המערכת כוללת שתי קבוצות הזנה נפרדות (בידוד מגליון) עבור כל דרייבר:

- HS: VCC2_HS, GND2_HS, VEE2_HS עבור הדרייבר העליון

- LS: VCC2_LS, GND2_LS, VEE2_LS עבור התחתון

בנוסף, קיימת כניסת בקרה לוגית, הכוללת חיבורים כגון:

- VCC1 – כניסת מתח לוגי (V5)

- INPH / INPL – כניסות הפעלה (High/Low)

- RST_N – כניסת איפוס

- RDY / FLT_N – פלטים למצב הכרטיס

הכרטיס מופעל באמצעות מיקרו-בקר (Arduino Uno) המייצר אותות PWM, ומחובר לכניסות של הדרייברים (INPH→IN+ / INPL→IN-). יציאות הדרייבר (OUTL/OUTH) מקושרות אל שערי הטרנזיסטורים, וכוללות רכיבי הגנה פנימיים (כגון דחיפת המתח, CLAMP, DESAT).

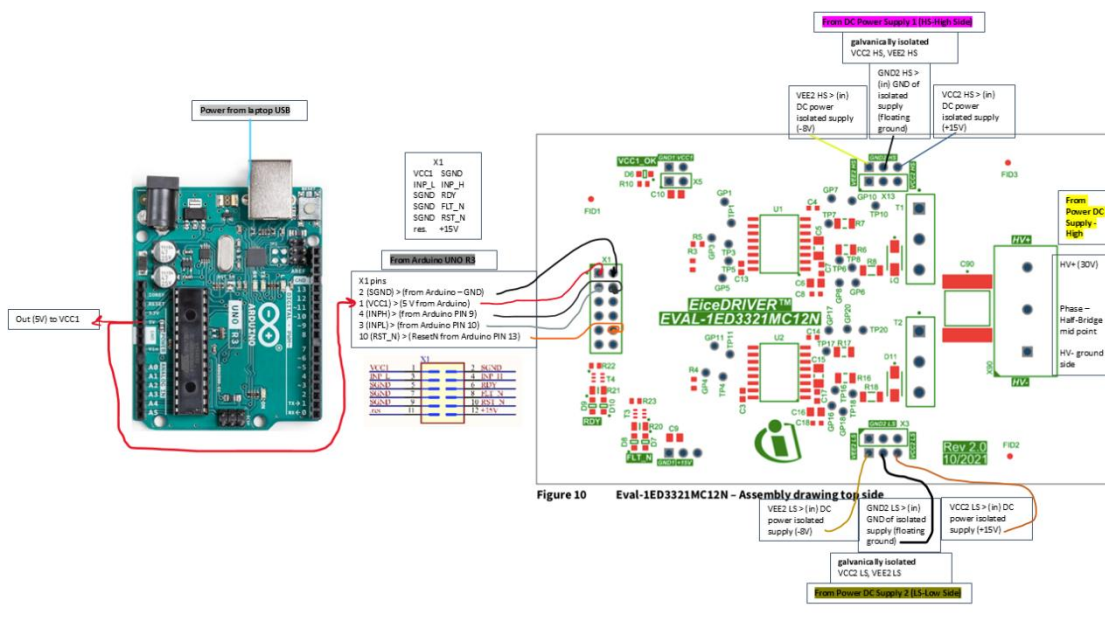


Figure 3 איור - דיאגרמת החיבורים

GENERIC GATE DRIVER

צורת העבודה העיקרית של המערכת היא ע"י שליטה בכניסות הבאות: RST_N, IN_L, INP_H. לשם המחשה ניתן לראות באיורים 4, 5 דוגמאות להשפעת הכניסות על מתחי הדרייברים והמשך על מתחי השערים. ניתן לשים לב כי הכניסות INP_H, INP_L מחוברות לכניסות הפוכות של הדרייברים ובכך גורמות לפתיחה/סגירה לסירוגין. בנוסף, כניסת האיפוס RST_N פעילה "בנמוך", כפי שמופיע בטבלת המצבים באיור 6.

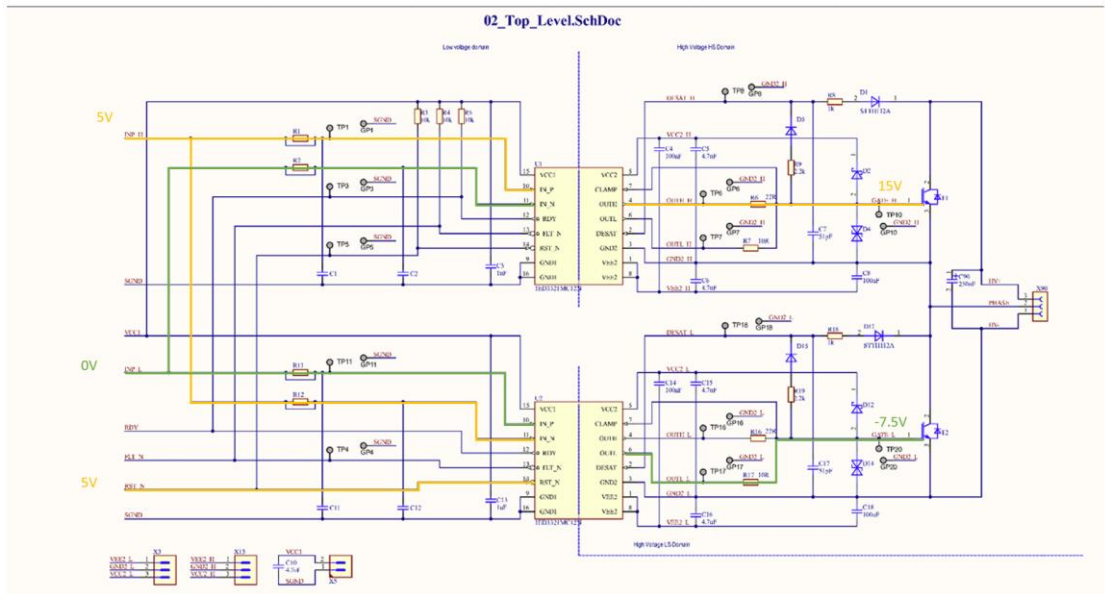


Figure 4 איור – טרנזיסטור עליון HS פתוח להולכה

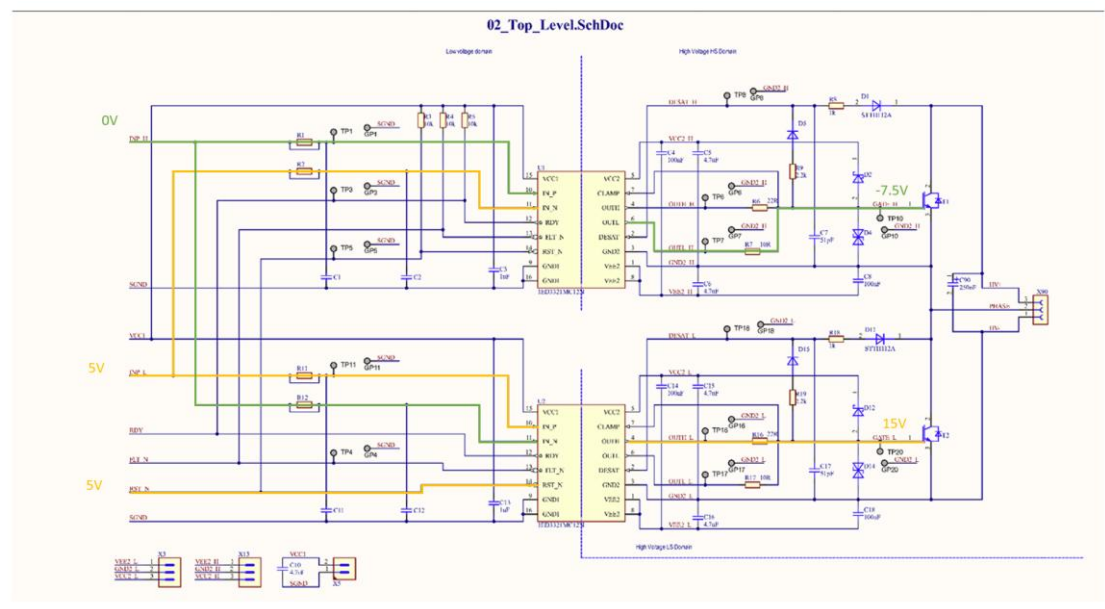


Figure 5 איור - טרנזיסטור תחתון LS פתוח להולכה

GENERIC GATE DRIVER

/RTS	IN-	IN+	OUTH	OUTL
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	1	0	1
0	0	0	0	1
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1

Figure 6 איור – טבלת מצבי ההפעלה

4.1. מיקרו-בקר (Arduino Uno R3)

לצורך שליטה על כניסות הדרייבר, חובר לכרטיס מיקרו-בקר מסוג - Arduino Uno R3. הבקר הופעל באמצעות קוד ייעודי אשר מייצר זוג אותות PWM משלימים עם זמן מת (Dead-Time) מתואם, בתדר של 1kHz שניתן לשינוי. החיבורים בין הבקר לכרטיס כללו את יציאות הכניסות הבאים:

- אותות PWM: D9 (INPH) \rightarrow IN+ ; D10 (INPL) \rightarrow IN-
 - איפוס: D13 (RST_N) \rightarrow /RST
 - הזנת צד לוגי: 5V (VCC1) \rightarrow VCC1 ; GND (SGND) \rightarrow GND1
- ניתן למצוא מספר קבצי קוד שנצרכו על בקר הארדואינו בפרוייקט Git, הקישור מופיע בנספחים.

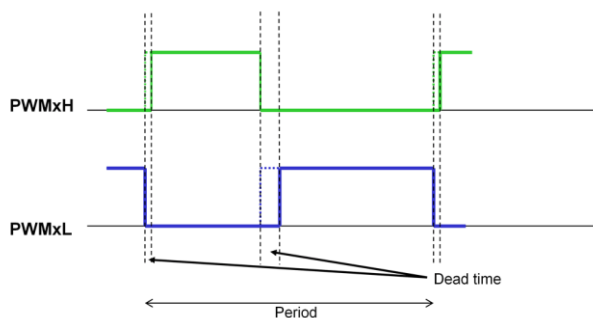


Figure 7 איור - מיקרו-בקר ארדואינו, המחשה של זמן מת

הערה חשובה:

במהלך העבודה נבחנו שני סוגי מימוש לקוד ה-PWM של הבקר: קוד פשוט (מבוסס לולאות תוכנה) – ממומש באמצעות `delayMicroseconds()` או לולאות `loop`, הקוד מאפשר זמן מת דרצדדי, אך מוגבל לזמנים ארוכים יחסית, בסדר גודל של מיקרו-שניות - מיתוג איטי יחסית. קוד מתקדם (מבוסס חומרת שעון פנימי - Timer1) –

מנצל את יכולות ההשוואה והחומרה של Timer1, מאפשר יצירת אותות מדויקים וזמן מת קצר בסדר גודל של ננו־שניות. עם זאת, הזמן המת הנתמך הוא **חד-צדדי** בלבד (בין HS ל־LS, אך לא בכיוון ההפוך), דבר שעלול לסכן את המעגל. פתרונות חלופיים מופיעים בהמלצות להמשך.

4.2. אספקת המתח במעגל

לצורך הפעלת הדרייברים, סופק מתח משני ספקי כוח נפרדים **כאשר הערכים נקבעו לפי סוג הטרנזיסטורים שחוברו:**

עבור טרנזיסטור מסוג IGBT (IKW40N120H3), חובר ספק מתח מבודד עבור ה־HS עם הערכים: $+15/-7.5V$, ספק נוסף עבור ה־LS עם אותם ערכים. בנוסף, סופק מתח גבוה של 30V למעגל המיתוג עצמו (HV+ / HV-), במטרה ליצור מתחי V_{CE} / V_{DS} מתאימים לטרנזיסטורים ולבחון את תפקוד המערכת במיתוג ממשי. בספק המתח הגבוה, הזרם הוגבל לערך של 1.5A. עבור טרנזיסטורים: CoolSiC (IMW120R045M1), USiC (UJ4C075018K3S) ערכי המתח בספקים היו HS\LS : $+15/-2V$. כלומר השינוי המהותי בהחלפת הטרנזיסטורים הוא מתח שער נמוך $VEE = -2V$.

4.3. תשתית חיבור ובקרה

מערך החיבורים כלל תכנון מבוקר לשם מניעת נזק לטרנזיסטורים, בפרט הושם דגש על: אדמות צפות בין הדרייברים, שימוש בפרובים בצורה דיפרנציאלית למדידות, שילוב נגדי עומס ליצירת נתיב זרם ברור.

5. רכיבים מרכזיים במערכת

5.1. הדרייבר – Infineon 1ED3321MC12N

הרכיב ED3321MC12N1 הוא דרייבר שער מבודד מסדרת EiceDRIVER™ של חברת Infineon. דרייבר זה מתאים במיוחד להפעלת טרנזיסטורים בתצורות Half-Bridge ומאפשר מיתוג מהיר, הגנה מפני זרמי יתר, תמיכה בטווח רחב של מתחי הזנה בשער, הפעלה באמצעות אותות לוגיים ואותות סטטוס. בכרטיס משולבים שני דרייברים כאלה, מבודדים זה מזה, עם ממשקי הפעלה ברורים ונקודות מדידה מוגדרות מראש, דבר שמאפשר שליטה גמישה בעת שימוש בבקר.

GENERIC GATE DRIVER

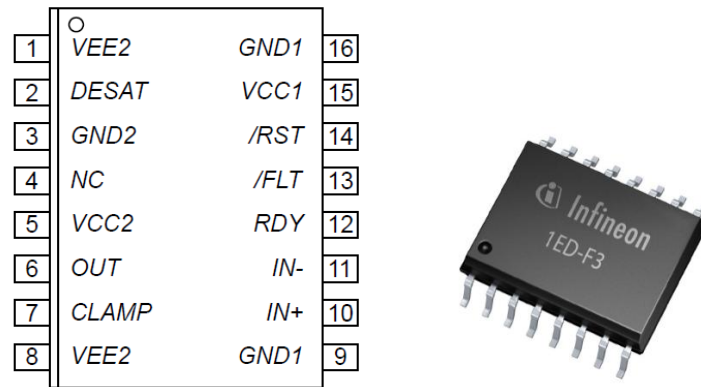


Figure 8 איור - 1ED3321MC12N אינפיון

5.2. טרנזיסטור IGBT - Infineon IKW40N120H3

רכיב זה שייך לסדרת TRENCHSTOP™ IGBT4, והוא מיועד למתחיל עבודה של עד 1200V וזרמים של עד 80 A. תכונות עיקריות:

- כולל דיודה אנטי-פרללית לפליטת זרמים חופשיים
 - רמות הפסד נמוכות במצבים סטטיים ודינמיים
 - מתאים ליישומים עם תדרי מיתוג בינוניים עד 20kHz~
 - רגישות נמוכה ל-dv/dt בהשוואה ל-MOSFET
- ה-IGBT מספק עמידות ויציבות, אך מגיב באופן איטי יותר בשער בהשוואה ל-SiC MOSFET, מה שמצריך זמן מת משמעותי יותר.

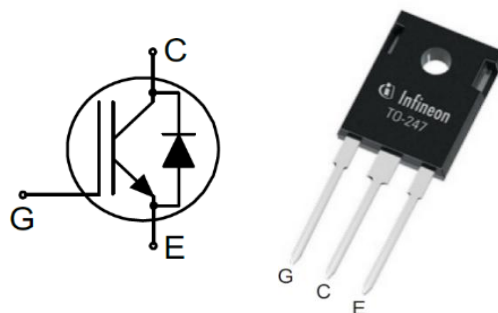


Figure 9 איור - טרנזיסטור IGBT - Infineon IKW40N120H3

5.3. טרנזיסטור SiC MOSFET - UnitedSiC UJ4C075018K3S

רכיב זה מבוסס טכנולוגיית Silicon Carbide, ומיועד לזרמים גבוהים עם מיתוג מהיר מאוד.

תכונות עיקריות:

- מתח עבודה עד 750V וזרם עד 60 A
- זמני עלייה וירידה בסדר גודל של 20ns

- עמידות תרמית גבוהה
- רגישות גבוהה ל- dV/dt , לכן נדרש לוודא Gate Resistor תואם
- מתאים ליישומי מיתוג מהיר $\sim 100\text{kHz}$ ומערכות הדורשות יעילות גבוהה
- בפרויקט, השימוש ברכיב זה דרש שיקולים בתכנון זמן מת, בדיקת תופעות צלצולים, Overshoot, יצירת נתיב זרם מסודר להימנע מנזק וכמובן הגבלת זרם.

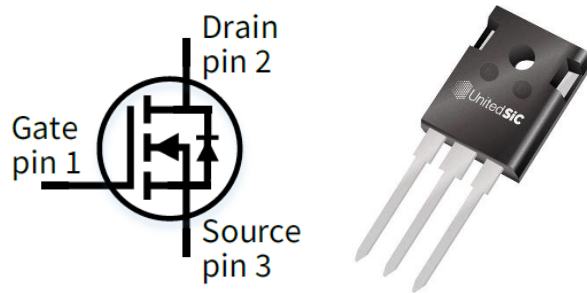


Figure 10 איור - טרנזיסטור SiC MOSFET - UnitedSiC UJ4C075018K3S

בנוסף לאלה, חובר ונבדק גם טרנזיסטור CoolSiC של Infineon. ניתן למצוא את דפי הנתונים המלאים באינטרנט או יחד עם שאר הקבצים בפרויקט ה-Git.

6. פירוט תהליך הפיתוח ושלבי העבודה

בקבצי הפרויקט מצורפים מסמכי בדיקה עבור כל אחד מסוגי הטרנזיסטורים, הכוללים את אופן הבדיקה, תוצאות המדידה, וצילומי מסך של גלי הסקופ (תחת התיקיה: Measurements_and_Tests). **מומלץ לעיין בהם.**

6.1. שלב ראשוני – הפעלה בסיסית של הכרטיס

השלב הראשון כלל חיבור הדרייבר למיקרו־בקר מסוג Arduino Uno R3, פיתוח קוד ראשוני ליצירת אותות PWM משלימים בתדר 1kHz , ובדיקה של תגובת הדרייבר. ניתן לראות באיור 11 המחשה של האות המשלים לדוגמה.

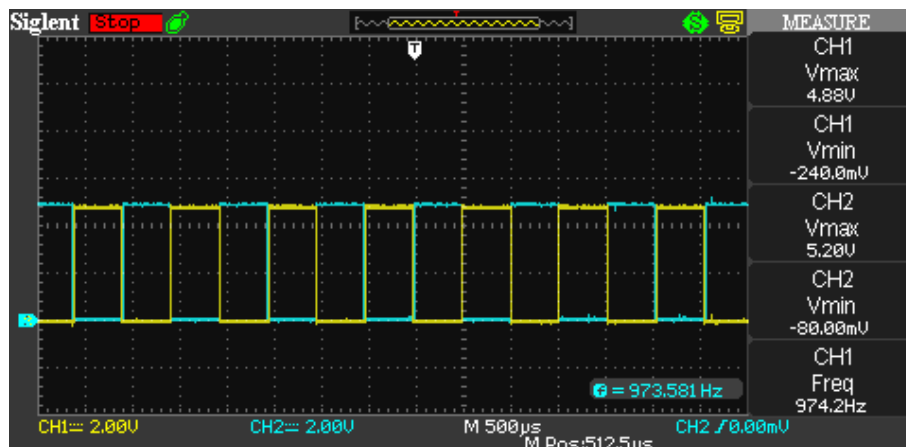


Figure 11 איור - PWM גל משלים מהמיקרו בקר

בהמשך בוצעה בדיקת תקינות הדרייבר ללא מתח גבוה, תוך שימוש במדידה דיפרנציאלית לקבלת V_{ge} בטרנזיסטורים העליון והתחתון (HS ו-LS). התקבלו אותות תקינים, המאשרים פעולה תקינה של הדרייבר בשלב זה.

6.2. הפעלה עם מתח גבוה ובדיקות עומס

בוצעו ניסויים עם ספק מתח גבוה 30V שהוגבל לזרם של 1.5A, הניסוי החל ללא עומס, ובהמשך חוברו נגדי עומס בהתאם לתרשים באיור 12. נמדדו מתחי V_{ce} תקינים עבור שני הטרנזיסטורים, דבר המעיד על תפקוד תקין של תהליך מיתוג.

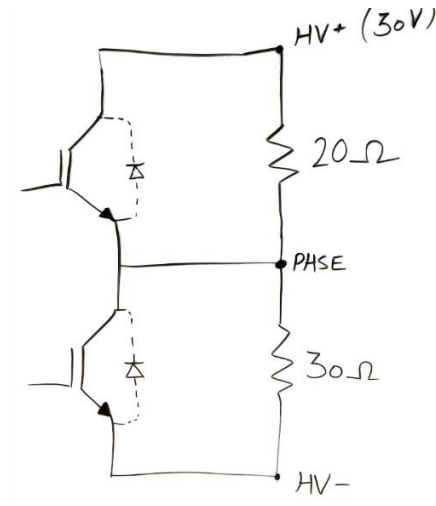


Figure 12 איור -סכימת חיבור נגדי העומס בצד המתח הגבוה

6.3. החלפת הטרנזיסטורים והגדרת התאמות

לאחר אימות תקינות המעגל עם הטרנזיסטורים המקוריים (IGBT), נשקלו פתרונות להחלפה מהירה של טרנזיסטורים ללא צורך בהלחמה. הוחלט להשתמש במחברי Terminal Block (TB003V-500 מתוצרת Same-Key), התואמים למתח ולזרם הנדרשים. זאת על מנת לאפשר מעבר מהיר בין סוגי הטרנזיסטורים ולאפשר חזרה על בדיקות, ללא צורך בסיכון הכרטיס ע"י ניתוקים והלחמות חוזרות. הטרנזיסטורים המקוריים (IGBT), חוברו מחדש באמצעות המחברים, והבדיקות עברו בהצלחה.

לפני החלפת הרכיבים ל-USiC MOSFET (דגם UJ4C075018K3S), נבדקו ההתנגדויות הקיימות בשערים לצמצום תופעות כמו overshoot-1 ringing. נמצא כי הנגדים המותקנים מספקים ערכים מתאימים, ולא נדרשו שינויים.

בנוסף, נבחן גם טרנזיסטור CoolSiC (IMW120R045M1), אשר נבדק ע"י החברה ומופיע במסגרת דפי הנתונים של הכרטיס, כאמצעי זהירות ובמטרה לאשר תחילה תפקוד תקין על גבי הפלטפורמה.

במדידות שבוצעו לאחר ההחלפה, נצפו מתחים תקינים של V_{ge} וכן V_{ce} , כאשר התנהגות המיתוג הייתה מהירה יותר אך גם רגישה יותר לשיבושים.

6.4. שיקולים נוספים ותכנון מבנה גנרי

במהלך הפרויקט נבחן רעיון למימוש לוח PCB גנרי אשר יכיל מספר זוגות של טרנזיסטורים מסוגים שונים. שליטת המיתוג תתבצע באמצעות רכיב דיקודר ומתגים דיגיטליים, כך שניתן יהיה לבחור זוג טרנזיסטורים אקטיבי לצורך ניסוי – מבלי להחליף רכיבים פיזית או להפעיל מחדש את המערכת. פיתוח הפתרון עזר לנו להבין טוב יותר את הדרישות ולבסוף נבחר פתרון חלופי. ניתן למצוא פירוט על כך בנספח – פתרון אלטרנטיבי.

7. ניתוח תוצאות

במהלך הפרויקט בוצעו סדרות בדיקה מסודרות עבור שלושה סוגי טרנזיסטורים: IGBT, CoolSiC ו-USiC. לכל טרנזיסטור נבחנו המדדים המרכזיים: $V_{ds} \setminus V_{eg}$, $V_{gs} \setminus V_{ge}$, התנהגות נקודת הפאזה (PHASE), זמן מת (Dead-Time) ויציבות תזמון לאורך זמן. הבדיקות בוצעו בתנאי הפעלה זהים: תדר PWM של 1kHz, זמן מת 4-8 μ s, מתח גבוה 30V, זרם מוגבל ל-1.5A. מדידה באמצעות אוסצילוסקופ 4 ערוצים.

ממצאים מרכזיים:

עבור IGBT, נצפו אותות שער תקינים (+15V/-7.5V), מיתוג יציב, וגלי פאזה חלקים ללא צלצולים חריגים. עבור CoolSiC, התקבל מיתוג חד ומהיר יותר, עם overshoot קל בשערים, אך במתח תקני. עבור USiC, המיתוג היה המהיר ביותר, אך גם הציג רגישות גבוהה יותר לאפקטים פרזיטיים והפרשי overshoot בין ערוצי הדרייבר. בשלושת המקרים, המערכת תפקדה בצורה תקינה והציגה שליטה יציבה על תהליך המיתוג.

זמן המת שנקבע בתוכנת הארדואינו שמר על רווח נדרש בין הפעלות, אם כי נצפו הבדלים בין כיוון HS→LS לבין LS→HS – תופעה שקשורה למימוש ה-PWM ומגבלות הבקר.

מזכיר שבקבצי הפרויקט מצורפים מסמכי בדיקה מפורטים עבור כל אחד מסוגי הטרנזיסטורים, הכוללים את אופן הבדיקה, תוצאות המדידה, וצילומי מסך של גלי הסקופ (תחת התיקיה: Measurements_and_Tests).

8. מסקנות והמלצות

8.1. מסקנות עיקריות

במהלך העבודה הושגה מטרה מרכזית של פיתוח תצורה גנרית להפעלת טרנזיסטורים שונים באמצעות כרטיס Eval-1ED3321MC12N. הכרטיס פעל בהצלחה עם IGBT, CoolSiC ו-USiC, תוך שמירה על מתחי שער מתאימים, זמן מת תקני ומיתוג יציב. השילוב עם בקר Arduino אפשר הפעלה פשוטה ונוחה, כולל בקרה מדויקת יחסית על זמני המיתוג והתאמה בין הערוצים. בנוסף, שילוב מחברי Terminal Block סיפק פתרון ונתן מענה יעיל להחלפה מהירה של רכיבים, ללא צורך בהלחמות חוזרות. עם זאת, ייתכן שהשימוש במחברים אלה פגע במידת מה בדיוק האותות ובאמינות המדידה.

8.2. אתגרים שעלו

הושג זמן מת בטוח, אך לא סימטרי, בשל מגבלות חומרה של הבקר, התאפשרו שני מצבים. האחד התקבל ע"י מימוש פשוט ונתן זמן מת גדול יחסית (מיקרו-שניות) ולא סימטרי. השני, כאשר נעשה שימוש ב-PWM מבוסס חומרה. במקרה זה התקבל זמן מת קצר (בסדר גודל של ננו-שניות), אך רק בצד אחד – דבר שיצר סיכון ממשי ל-shoot-through. נצפו אפקטים של overshoot ו-undershoot במתחים בעיקר ב-SiC, בסדרי גודל של עד 15%. אנו מעריכים שתופעות אלה הן תוצאה של ממיתוג מהיר, היעדר snubber ואפקטים פריזיטיים הקשורים לחיבור הטרנזיסטורים באמצעות מחברים ולא באופן ישיר.

נדרשה זהירות במדידה, בעיקר במדידות דיפרנציאליות של V_{ge} עבור הצד העליון והצד התחתון (HS ו-LS) בו זמנית. כאשר במקרים מסוימים נדרשה חישוביות (פונקציית Math בסקופ) מהערוצים לצורך קבלת V_{ge} . עובדה זו עשויה להשפיע על דיוק התוצאות שנמדדו בפועל.

8.3. המלצות להמשך

קיצור זמן המת לסדרי גודל של 200ns, במיוחד עבור טרנזיסטורים מסוג SiC, בכפוף לאימות מיתוג תקין. לקבלת דיוק ושליטה טובים יותר. פתרונות אפשריים עבור PWM: שימוש בבקר מתקדם יותר (כגון STM32) המאפשר שליטה מלאה בשני ערוצי PWM עם זמן מת דו-צדדי חומרתי. שימוש במכולל אותות מקצועי (Function Generator) עם תמיכה באותות

משלימים ושליטה בזמן מת.
שילוב רכיב ייעודי למיתוג (Driver IC) עם שליטה פנימית על זמן מת.
שילוב סליל בעומס יאפשר בחינת המיתוג בתצורת Half-Bridge מלאה, בדומה ליישום מעשי.
תכנון והדפסת PCB עבור כל זוג טרנזיסטורים (IGBT, CoolSiC, USiC) יאפשר חיבור נוח, קבוע ובטוח, תוך ארגון טוב יותר של הכניסות והיציאות.
שילוב ההתקן בתוך טופולוגיית ממיר שלמה, לשם בדיקה של תפקוד המערכת תחת עומס ולשם אימות שליטה מלאה במיתוג בפועל.

9. נספחים

הנספחים מופעים בקבצי הפרויקט שנמצאים ב-git :

https://github.com/shaharTechGit/Generic_Gate_Driver

9.1. בדיקות ותוצאות

קיימים בקבצי הפרויקט מסמכי בדיקות מפורטים לכל סוג טרנזיסטור (בפורמת word). איך לבדוק, מה התוצאות המצופות, מה קיבלנו בפועל והסברים. הקבצים מכילים בדיקות בסיסיות בסדר כרונולוגי, והמלצות לבדיקות המשך יותר מורכבות.

(תיקיית Measurements_and_Tests)

9.2. קוד בקר ארדואינו

קיימים בקבצי הפרויקט מספר אפשרויות, הקבצים בעלי שמות אינפורמטיביים והערות מפורטות על תוכן הקוד ואפשרויות לשינויים (במידת האפשר).

(תיקיית Arduino_Uno_R3_PWM_Code)

9.3. פתרון אלטרנטיבי - מעגל תומך

אחת הדרישות בפרויקט הייתה לתת מענה לדרישה להפעיל סוגים שונים של טרנזיסטורים ע"י אותו המעגל. הרעיון שהוצע הוא מעגל המכיל זוג מפענחים, רכיב דוחף אשר מספק הספק גבוה יותר במוצא מההספק המסופק מהמפענחים שבעזרתו ניתן יהיה לשלוט על המתחים המכניים אשר בעזרתם נוכל לחבר את זוגות הטרנזיסטורים בנפרד האחד מהשני למעגל. בכניסה לכל טרנזיסטור מחוברות דיודות זנר אשר תפקידן הגבלת המתח ב-gate של הטרנזיסטורים. הרעיון הכללי היה שע"י שליטה במפענחים נוכל בכל פעם לבחור אילו מתגים נסגרים ובכך עם איזה זוג של טרנזיסטורים יעבוד המעגל.

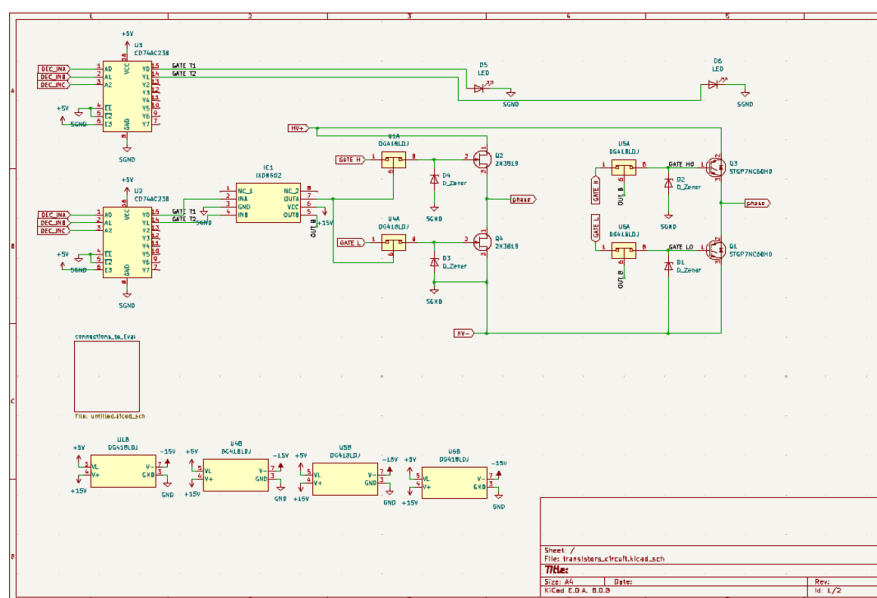


Figure 13 איור - פתרון אלטרנטיבי מעגל תומך

GENERIC GATE DRIVER

רעיון זה לא התקדם עקב מגבלות אשר קיימות במתגים, ואשר עלולים להרע לפעולה מיטבית של הטרנזיסטורים, לכן להמשכו של הפרויקט יבנה מעגל אשר יקח את צורת העבודה של המעגל הקיים ובצורה פרטנית תיבנה מעטפת אשר תספק שימוש מיטבי עם הטרנזיסטורים. ניתן לראות פירוט נוסף במצגת הפרויקט.

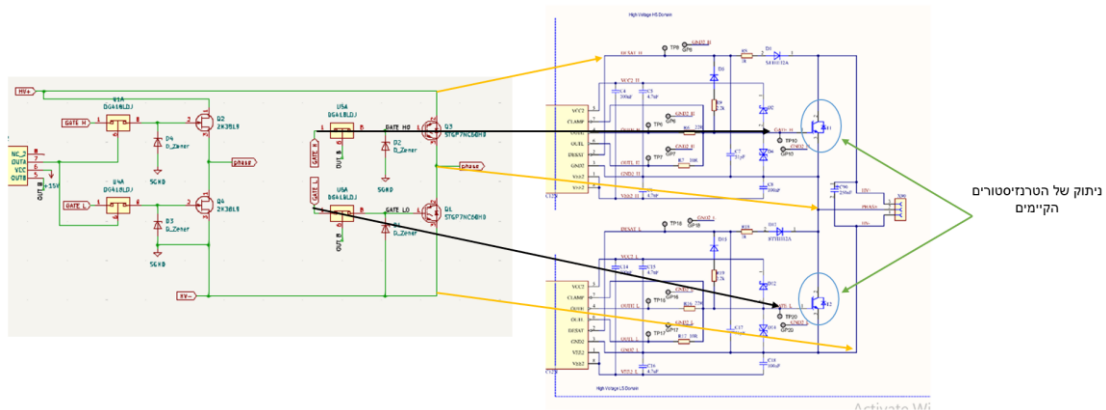


Figure 14 איור – פתרון אלטרנטיבי חיבור למעגל הקיים

9.4. הוראות הפעלה

הוראות הפעלה מקוצרות נמצאות ב-git (ReadMe), יחד עם סרטון הפעלה לדוגמה.

9.5. קישורים - לינקים

Git – https://github.com/shaharTechGit/Generic_Gate_Driver

קישור לדרייב טכניוני (גישה מוגבלת – ניתן לבקש הרשאה) –

<https://technionmail->

my.sharepoint.com/:f:/r/personal/xzamir_campus_technion_ac_il/Documents/Project%20-%20GENERIC%20GATE%20DRIVER?csf=1&web=1&e=VPK1vo

10. רשימת מקורות

Arduino Uno R3:

<https://docs.arduino.cc/tutorials/uno-rev3/getting-started/>

Eval-1ED3321MC12N - Evaluation board:

<https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval-1ed3321mc12n/>

Infineon-1ED332xMC12N – EiceDriver:

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1ED332xMC12N-DataSheet-v01_03-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7ddc01d7017e49e76a311599

EVAL-PSIR2085:

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-UG-2021-33_EVAL-PSIR2085-UserManual-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7c5627e7017c6fe78b1d0879

Infineon-IKW40N120H3 – IGBT Transistor:

<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-discretes/ikw40n120h3/>

Infineon-IMW120R045M1 – CoolSiC Transistor:

<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/discretes/imw120r045m1/>

Silicon Carbide (SiC) – USiC Transistor:

<https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/uj4c075018k3s-d.pdf>