

Power Electronics and  
Renewable Energy Lab  
PEARL

תיעוד מהלך הפרויקט

18 דצמבר 2024

קישור לדף הכרטיס

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

half bridge

שימושי לעשות טופולוגיות שונות

המטרה הכללית-  
שיהיו במעבדה כרטיסים עם טופולוגיות שונות כדי לחסוך זמן בפרויקטים

הכרטיס -

4 כניסות מתח

15V

Vcc 5V or 3.3V

עוד ???

המבנה הוא של שני gate , אחד low השני high

אחד דוחף את הטרנזיסטור ש.. ??

והשני ??

איך אפשר לאפיין ?

ע"י שימוש בכרטיס למשל בטופולגיה של boost בתור half bridge

עם הטרנזיסטורים כרגע אפשר לעבוד לאט

בהמשך אם נחליף אותם תתאפשר עבודה מהירה יותר

הערה כללית אריק  
אם רוצים להספיק לקבל ציון עד אפריל צריך להגיש עד תחילת אפריל.

בנוסף כדי להתקדם צריך עבודה אינטנסיבית – עדיפות בין סוף ינואר עד סוף מרץ שאז אריק זמין.

25 דצמבר 2024

מטרת הפרויקט - ??

31 דצמבר 2024

שאלות לאריק

* איך לחבר את המוצא של הכרטיס לשנאי\מעגל עם הממיר ? (ספציפית הנקודה הצפה בין הקבלים)  
  **תשובה** **>>** **זה באמת משהו שצריך להבין – אולי נחבר קבלים בעצמנו ואז נחבר כמו המבנה המוכר**
* איך נפעיל את הכרטיס, גל פשוט או איזה כרטיס אחר שייתן את הערכים ל-x1  - (כמו RST\_N , RDY   וכו)   
  **תשובה >> עם מיקרו קונטרולר - כרטיס ארדואינו  
  יש כבר קוד ל – PWM צריך את שאר הסיגנלים לכתוב בעצמנו.**

2 ינואר 2025

מה עשינו עד עכשיו -

ערכנו קוד פשוט לתפעול ראשוני של המיקרו-קונטרולר (ארדואינו).

הצלחנו לחבר את הכרטיס לארדואינו.

כולל חיבור הצד העיקרי והצד המשני.

נראה שעובד טוב.

**הערה חשובה של אריק על מדידה עם אדמה-צפה כדי לא לשרוף את הטרנזיסטורים או המעגל – שלא ינסו לדחוף יחד!**

משימות להמשך:

לקרוא ולהבין בדיוק איך הטרנזיסטורים עובדים IGBT, אין ממש מתח darain-source יש emitter-collector צריך להבין מי נגד מי לפני שמחברים.

להפעיל את הדרייברים כדי לראות שהסיגנל בשער של הטרנזיסטורים אכן כמו שאנחנו רוצים.  
חיבור המתח הגבוה – רק אחרי שנראה שיש גל עם מתח מתאים בשער הטרנזיסטורים (לוודא שהמתח אכן מספיק לIGBT שלנו)

**! להבין טוב את ההערה של אריק על האדמה הצפה במדידה של הטרנזיסטורים כדי שלא נשרוף משהו !**

לסדר טבלת חיבורים נוחה לעין מהספק\מחשב אל הארדואינו אל הכרטיס, עם ערכים וכו..

ללכת לילנה (קומה 3 פשיבך או קומה 5 מאייר) לבקש חיבורים מתאימים לנו.

8 ינואר פגשיה אריק –

לא דיברנו על משהו חדש –   
רק שהמטרה כרגע היא לחבר את הכרטיס, את הארדואינו, להריץ PWM ולראות את מה שמצפים מגיע לשערים של הטרנזיסטורים.

9 ינואר

ישיבה במעבדה

ניסיון להפעיל את הכרטיס

יש מצגת מסודרת עם מה שהשגנו עד עכשיו

30 בינואר 2025

* הרכיב שנשרף הוחלף והכרטיס תוקן – נבדק והכל נראה תקין
* הפעלה ללא מתח גבוה עבדה טוב, PWM דרך הארדואינו עובד בסדר, בתדר אחד קילו, עם זמן מת 12 מיקרו בערך.   
  (בקוד אפשר לשנות תדר ו-duty cycle די בקלות).

**חיבור מתח גבוה כדי לבדוק מה קורה במוצא המערכת:**

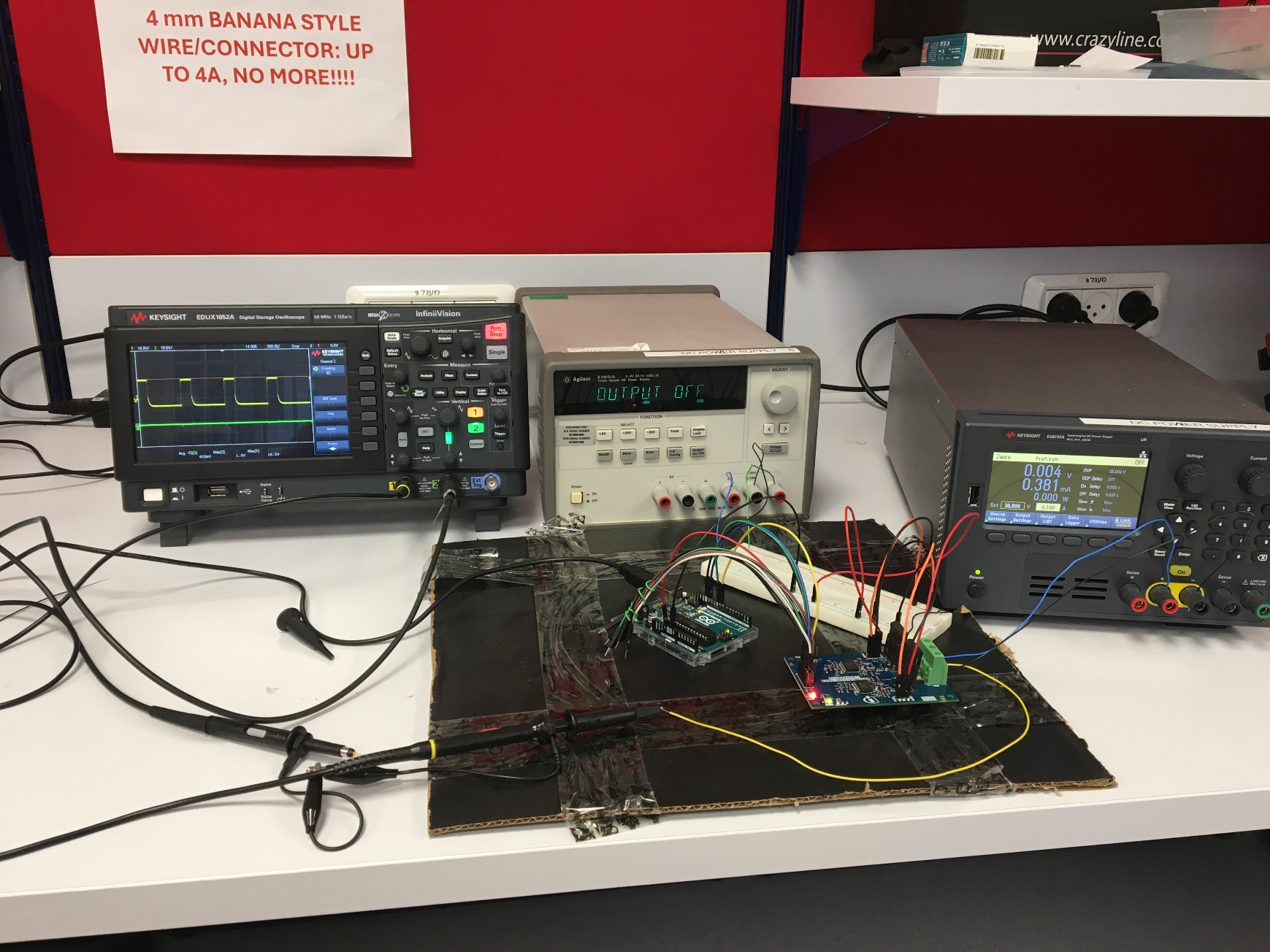
30 וולט, 100 מילי אמפר - לא החזיק מתח (נראה שהזרם לא מספיק לו)

30 וולט, 0.1 אמפר, קצת יותר טוב אבל עדין לא הספיק

30 וולט, 1.5 אמפר נתן מתח 6 וולט, זה נחמד, אבל עדין לא מספיק

מה קורה? צריך לחבר קבל במקביל – לפי הדאטה שיט צריך קבל של 100 מיקרו במקביל להדקים של ה-HV.   
חיברנו.. כאשר רק הקבל מחובר, נראה שהוא מצליח לשמור על מתח (כלומר כאשר ספק המתח הגבוה מחובר רק לקבל הוא מחזיק את המתח).  
אבל, כאשר מחברים את המעגל, הספק הגדול לא מצליח להחזיק את מתח..  
מדוע?  
אז ככה הכניסה – היא 5 וולט ורואים 2.4 וולט מקסימום במדידה בין הפאזה (האמצעי של HV) לבין האדמה. שזה טוב כי הדיוטי סייקל 50% אז זה מנחית בחצי את האמפליטודה.

השלב החשוב הבא הוא להיכנס לעניינים של IGBT,   
לקרוא על הדפי הנתונים, לצייר גרפים של זרם-מתח ולמצוא את נקודת העבודה. אולי כמובן כבר יש אותה בדפי הנתונים.  
\*\* בסוף ראינו שכנראה צריך לעבוד בזרמים ממש גבוהים או שאנחנו מפספסים משהו... אריק הציעה להוסיף נגד כלשהו איפשהו..

תמונות של החיבורים:

31 במרץ 2025

ישיבה קצרה אחרי פגרת מבחנים.

סוכם להכין מצגת אמצע עם מה שעשינו עד עכשיו, מה הבעיות וכו..  
סוכם לנסות לתת פוש החודש ולסיים, כי במאי יוצא למילואים..

6 אפריל 2025

החיבורים עובדים טוב, הצלחנו לראות את המתחים של השערים וה Vce

אבל המתח Vce לא מגיע ל-30V זה מאחר שאין לזרם לאן ללכת אין ממש מיתוג ?  
אז צריך לחבר נגד או סליל בסוף..  
לפי דפי הנתונים הדוגמה שלהם עבור מתחים מאוד גדולים 600V ולקחו סליל של 200uH, אנחנו עובדים עם 30V לכן

אריק נתן סליל, כדי למדוד את ההשראות שלו בעזרת LCR:  
מדליקים, לוחצים PRI עד שמגיעים להשראות L , לוחצים FREQ עד שמגיעים ל100 קילו הרץ. אז מחברים את הקצוות לסליל וזו ההשראות, אם זה מינוס חיברנו הפוך.  
קיבלנו בערך 800uH

נתן גם שנאי, מדדנו צד אחד שלו וקיבלנו 6.7mH. אפשר לחשב את הצד שני (כי יש את המתח בצד אחד ובצד השני) או למדוד.

המערך נגדים שאריק נתן הוא בערך 3.5 אום. כל נגד בערך 10 אום..  
אם רוצים להגביל את הזרם צריך לבחור התנגדות בהתאם:

בנוסף צריך לוודא שהנגד עומס בהספק כך שיתקיים:

7 אפריל 2025

מצגת אמצע – הערות  
הדיודה בטרנזיסטור IGBT כדי לאפשר בי-פולריות כמו mosfet, לעדכן יותר טוב את ההסבר במצגת...

לא עבר חלק, תכלס אנחנו במצב שעוד אין מעגל ואין זרם ואין מיתוג ולא יודעים אם הטרנזיסטורים עובדים..  
אריק אמר להתחיל לתת פוש, לשאול אנשים, לברר באינטרנט, להבין איך ומה לחבר במוצא כדי לראות את הטרנזיסטורים מתמתגים..  
זה פרדוקס – אנחנו רוצים לחבר משהו כדי שנוכל להבין איך זה עובד, לנתק ולחבר משהו אחר...

\*\*\*!!! תובנה חשובה –   
שינוי מהותי בחיבורים: היינו צריכים עוד ספק.  
כלומר עבור: VCC2 HS, GND2 HS, VEE2 HS ספק אחד (+15V, com, -8V),  
וספק **אחר** (עם אדמה שונה...) עבור:  
VCC2 LS, GND2 LS, VEE2 LS (+15V, com, -8V).  
בנוסף צריך לשים לב! -  
כשאדמות הפרובים מחוברות לאדמות שונות זה עושה ברדק.. לכן למשל כשמודדים Vge של טרנזיסטור אחד אי אפשר למדוד Vce של הטרנזיסטור השני, מאחר שנקודה e לא זהה עבורם (אולי זה מכיוון שבסקופ האדמות מחוברות?).

חיברנו נגדים:  
20 אום במקביל ל HV+ ול PHASE  
30 אום במקביל ל PHASE ולנקודה HV-

עכשיו המדידות עובדות בצורה תקינה!  
מדידות:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Infineon IGBT IKW40N120H3 (Direct Mounting) | | |
| Vge HS (High Side): CH1: TP10 to Phase  Vge = 15 to -6 V (blue in the scope) | Vce HS : CH2: HV+ to Phase  Vce = 26 to 2 V  (yellow in the scope) |  |
| Vge LS (Low Side): CH1: TP20 to HV- Vge = 15 to -8  (blue in the scope) | Vce LS : CH2: Phase to HV- Vce = 26 to 2 V  (yellow in the scope) |  |

למה ציפינו ומה קיבלנו:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Comment | Measured | Expected | Signal |
| למה לא עד מינוס 8? יש איזו נפילה קונסיסטנטית של 2 וולט לאורך המדידה הזו.. | ~ +15 to -6 V | +15 to -6 V | Vge HS |
| נראה תקין. הסבר לאי הגעה לקצוות? | ~ +26 to +2 V | HV+ (~+30) to +2 V | Vce HS |
| נראה תקין, כאשר בחלק התחתון אכן מגיעים למתח נמוך מינוס 8 וולט | ~ +15 to -8 V | +15 to -8 V | Vge LS |
| נראה תקין | ~ +26 to +2 V | HV+ (~+30) to +2 V | Vce LS |

בע"פ דובר עם אריק שצריך לחשוב בעצמנו לאן לקחת את הפרויקט, זה הפרויקט שלנו. הוא כיוון שניצור gate-driver שיהיה גנרי לשימוש במעבדה..  
לא ברור אם באמת יש סיכוי להגיע לזה.. זה מרגיש מאוד מורכב..

8 אפריל 2025

~~זמני- תכנון גייט דרייבר גרני בעזרת הצ'אט שיעבוד עם MOSFET מתחים 30 וולט זרמים 3 אמפר.~~

~~להוסיף דיאגרמה:  
זו לא הייתה הכוונה – חוזל"ש~~

9 אפריל 2025

מסתבר שאריק רוצה שנשתמש בבורד עצמו בתור ה-generic gate driver,  
ולא נתכנן גייט דברייבר או נשתמש רק בגייט דרייבר שעל הבורד..  
לכן הסטאפ שלנו טוב, נישאר להבין מה ההתאמות שיש לעשות כדי להחליף טרנזיסטורים, ספציפית SiC (שנקרא גם SiC MOSFET).

SiC (Silicon Carbide) MOSFET –

SiC (Silicon Carbide) is a wide bandgap semiconductor with a larger bandgap, higher breakdown field, superior thermal conductivity, and faster saturated electron velocity than standard silicon, making it ideal for high-voltage and high-temperature applications.

A SiC MOSFET leverages these properties to offer faster switching, lower conduction losses, better efficiency at high frequencies, and higher temperature tolerance compared to traditional silicon MOSFETs, though typically at a higher cost.

אז השלבים הבאים:  
- להבין מה בדיוק צריך כדי שנוכל להחליף את הטרנזיסטורים, אריק נתן מה שיש במעבדה (SiC MOSFET UJ4C075018K3S).  
- להבין האם קיימת תושבת (mount) כזו שניתן להחליף טרנזיסטורים בקלות שליפה ידנית במקום הלחמה.. לשאול אולי את ילנה..  
- ~~להוסיף נגד שער (Gate Resistor), בערך 10 אום, איפה בין היציאה מגייט דרייבר OUTH/L אל הכניסה לשער..~~ אבל תכלס כבר יש כאלה R6,R7,R16,R17  
זה אמור לאזן את מהירות המיתוג והצלצולים (ringing/EMI).  
Too small → fast switching, ringing, EMI  
Too large → slow switching, heat, increased losses  
- אולי להוסיף סנבר (RC snubber), כי השינויים במתח מהירים וזה יכול לגרום לצלצולים במיתוג. להוסיף ביןdrain-source , כלומר בין PHASE ובין HV- .

- אחרי החיבור, ולפני המתח הגבוה, צריך לוודא שמתח השער לא עם צלצולים חזקים מדי שעולים על אמפליטודה 20 וולט..  
- ~~לוודא שמספיק זמן מת, משהו כמו 100 ננו ?~~ כרגע מוגדר בקוד 6.25 מיקרו אז אנחנו סבבה (צריך לוודא את זה במדידות!!)

הערות לקוד PWM  
זמן מת כרגע:

Dead Time: dead\_time = 100 → at 1 kHz (ICR1=8000), this corresponds to 6.25 µs, which is more than enough…  
100 “ticks” in 16MHz clk of the Arduino Uno R3 →   
100\*6.25ns = 6250ns = 6.25 µs  
1 tick = 6.25ns (from where??)

מרכוז זמן מת:

This approach centers the dead time, which is good,   
**but it is important to make sure**:  
The total OCR1B - OCR1A doesn’t exceed the full PWM period (ICR1).  
There's no overlap, i.e., INPH goes LOW before INPL goes HIGH.

בטיחות:

We might want to set D9 and D10 LOW in stopPWM() to fully shut off the driver:  
digitalWrite(INPH, LOW);

digitalWrite(INPL, LOW);

|  |  |
| --- | --- |
| הערות כלליות: | |
| * PCB (Printed Circuit Board) * SMD (Surface-Mount Devices) | |
| הטרנזיסטורים שיש לנו, גם המקוריים וגם אלה שאריק נתן הם תקן (צורה): TO-247 (Transistor Outline 247, JEDEC) (או TO-247 through-hole IGBTs) | A black and white electronic device  AI-generated content may be incorrect. |

השלב הבא -   
להתחיל מקפיצה אל ילנה להתייעצות על החיבור הגנרי.. שיתאים לזרמים ומתחים גבוהים יחסית (50 וולט 5 אמפר?)  
אם יש אז לבקש התקנה, אם אין אז להזמין..  
אחר כך לחשוב האם אפשר פשוט להפעיל, איזה בדיקות רוצים להריץ ומה מכניסים לספר פרויקט.

מתאם במקום הטרנזיסטורים על הכרטיס (TERMINAL BLOCK):

|  |  |
| --- | --- |
|  | <https://www.mouser.co.il/ProductDetail/Same-Sky/TB003V-500-P03BE?qs=vLWxofP3U2zbMDcRknzmIQ%3D%3D&countryCode=US&currencyCode=USD> |
| <https://www.mouser.co.il/datasheet/2/1628/tb003v_500-3511242.pdf> |

10 אפריל 2025

ילנה ומנשה נתנו פתרון אפשרי, אבל לא בטוח שיש להם את החלק המתאים.  
גם כן החיבור יהיה רק אחרי פסח..  
אריק אומר שזה לא בטוח יעבוד ללא הלחמה, אבל לנסות להוציא את IGBT ולשים את המחברים הכחולים, ואז לחבר את ה- IGBT ולראות אם זה עובד תקין. גם נתן הערה שלא להוציא את ה-IGBT עד שאנחנו חושבים שאנחנו לא צריכים אותם יותר כי ההוצאה זה בחום מאוד גבוה ויכולה לחסל אותם.. בנוסף אחרי שנוציא את ה- IGBT לא יישארו הרבה רגליים כי הן חתוכות..  
אז חשבתי לנסות להזמין שניים ליתר ביטחון, וגם את הטרנזיסטורים SiC של Infineon כדי לנסות איתם קודם.. (הערה לגבי חשבוניות ואיסור קניה ללא החזרה מהפקולטה..).

לגבי סדר הרגליים של הטרנזיסטורים והאם הפתרון שחשבנו להחלפה מהירה תופס.

|  |  |
| --- | --- |
| הטרנזיטזור הקיים על הכרטיס Infineo IGBT IKW40N120H3 | A black and white electronic device  AI-generated content may be incorrect. |
| הטרנזיסטור הקיים במעבדה UnitedSiC USiC MOSFET UJ4C075018K3S | A black and silver electronic device  AI-generated content may be incorrect. A diagram of a circuit  AI-generated content may be incorrect. |
| הטרנזיסטור שנבדק על הכרטיס (המקורי) Infineon CoolSiC MOSFET IMW120R045M1 | A close-up of a microchip  AI-generated content may be incorrect. A diagram of a gate and source pin  AI-generated content may be incorrect. |
| כלומר כולם עם חיבורים בסדר מתאים  Gate, Collector/Drain, Emmiter/Source | |

שינויים שצריך\רצוי\אפשר לעשות כשמחליפים בין הטרנזיסטורים (תיאוריה):

|  |  |
| --- | --- |
| 🡪 USiC MOSFET (UJ4C075018K3S) | Iinfineon IGBT 🡪 Infineon CoolSiC MOSFET |
|  | שינוי המתחים  +15V , -2V |
|  | Gate Resistance  (Require Physical Changes) כנראה מה שיש מספיק טוב. באופן כללי: IGBTs are slower and tolerate higher gate charges. SiC MOSFETs switch faster and are more sensitive to ringing and dV/dt issues. Therefore we may need to **increase** the gate resistor to slow down switching a bit and reduce voltage overshoot/ringing. We can start with 10–20 Ω, then optimize experimentally.  The values now are:  R6,R16=22Ω ?? and R7,R17=10Ω ?? ? These are used for gate drive paths:  One resistor for gate pull-up (source),  One for gate pull-down (sink) (faster = lower resistance ;  slower = higher). |
|  | Desaturation Protection (DESAT) (Require Physical Changes) IGBT - detects collector-emitter overvoltage. SiC MOSFET - drain-source voltage rise under fault can be faster and sharper. The original setup supports ~2V?? The MOSFET needs support ~0.8V?? ?? We think that when the transistor are open, the voltage is low, and DESAT is low(off), then the transistor closes and the voltage increase, so if it increases to fast DESAT may won’t rise fast enough to protect the gate. Which means there is a need to change the capacitors C7/C17 to a lower values, for faster response. Or intirely remove them, by removing them, the DESAT short-circuit protection time is reduced to a minimum allowed by the circuit. In our case we should not get those high currents and may not need changes?? In section 2.5 in the Eval data sheet there is an example of work without DESAT capacitors. There are others tricks for faster reactions.. |
|  | Switching Behavior & Layout Gate Loop Inductance Gate Resistor + Ferrite Bead Power Loop Inductance Improve PCB Copper Paths High-voltage decoupling Thermal management Shielding & Isolation |
|  | Dead-Time If the dead-time is too long, we may get unwilling effects from the body diode on the SiC MOSFET. If too short, shoot-through is possible. 1. SiC devices switch extremely fast (e.g. 20ns rise/fall time).  2. Long dead-times cause the body diode of the opposing MOSFET to conduct:  - This adds reverse recovery losses (which SiC is good at, but still not free).  - Creates extra voltage spikes and EMI.  - Increases switching losses.  Shorter dead-time 🡪 less body diode conduction 🡪 more efficient and cooler system.  **But:**  Too short 🡪 risk of shoot-through 🡪 catastrophic failure!  For the SiC dead-time should be ~200ns. For the IGBT we have used |

14 אפריל 2025

לא ברור אם צריך לעשות עוד שינויים מלבד שינוי המתחים כדי שהכל יעבוד בצורה תקינה אחרי החלפת הטרנזיסטורים.

יש כיוון לסטאפ שמאפשר בחירה בין טרנזיסטורים שונים. הדפסה של לוח PCB שיש עליו למשל 4 זוגות של טרנזיסטורים שונים. חיבורי המתח והכניסות מהארדואינו יהיו מרוכזות (למנוע את הסירבול בחיבורים). כדי שהמתח מהגייט דרייבר ילך לשער של לזוג ספציפי, ניעזר בדיקודר (שנשלוט עליו מהארדואינו), ואז רכיב עזר מתג (Biliteral Switch) , ואז בפר שייתן את המתח שצריך...

21 אפריל 2025

העברנו לילנה את הכרטיס והמחברים לניסיון הלחמה.  
**! הערה**: במחברים שהזמנו המרווח בין הרגליים הוא 5.08mm בעוד שהמרווחים בין הרגליים של טרנזיסטורים הוא 5.44mm.  
נקווה שזה עדין יצליח להיכנס ויעבוד..

בנוסף קידמנו את הספר פרוייקט, בהמשך צריך התאמות ושינויים כמובן.

להמשיך:  
- לאסוף את הכרטיס מילנה 1030.. ולנסות לבדוק אם עובד..  
- לערוך את הקוד של הPWM שיתאים, יש כבר תשתית.  
- להמשיך את הספר פרויקט  
- לקבוע עם אריק הצגה\הגשה?

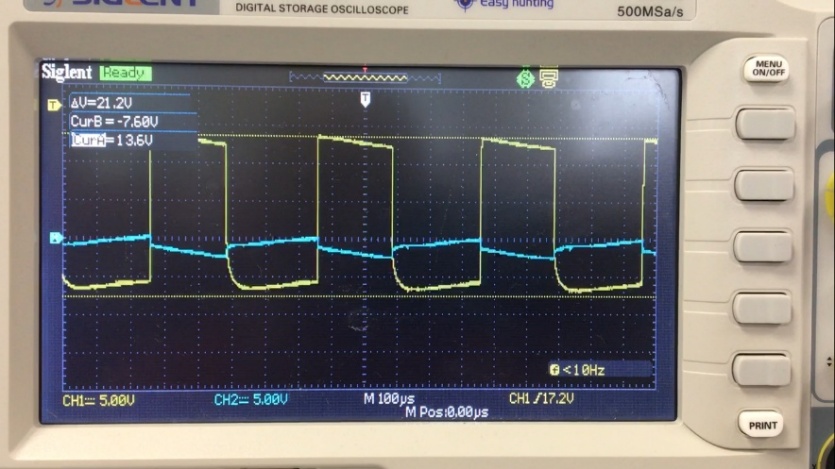
22 אפריל 2025

קידום ספר

קידום PCB ומצגת, לנסות לקבוע ליום חמישי עם אריק להראות לו

בדיקת הלחמות

החיבורים מגיבים..   
1 -   
(פרוב 1 הלך ל-TP10 , פרוב 2 הלך ל-PHASE , אדמות פרובים מחוברות)   
ללא מתח גבוה, בדיקת מתח שער טרנזיסטור עליון נתנה:  
max 14.8V וכן min -6.2V , כלומר נראה טוב??  
אבל יש נדנוד למעלה ולמטה של כל הגל הריבועי.. לא חושב שהיה לנו את זה קודם..



2 -   
(פרוב 1 הלך ל-TP20 , פרוב 2 הלך ל-HV מינוס , אדמות פרובים מחוברות)   
ללא מתח גבוה, בדיקת מתח שער טרנזיסטור תחתון נתנה:  
max 14V וכן min -9.8V , כלומר נראה טוב??  
גם כאן יש נדנודים של כל הגל..

A screen with a graph on it

AI-generated content may be incorrect.

חיבור מתח גבוה: נראה שלא תקין, אין שינוי במתח Vce... יש שינוי אבל מאוד קטן ולא דומה למה שקיבלנו כשהטרנזיסטורים היו מחוברים כמו שצריך :)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Infineon IGBT IKW40N120H3 (With Connectors!) Bad results – no Vce | | |
| Vge HS (High Side): CH1: TP10 to Phase  Vge = 16 to -4.4 V (yellow in the scope) | Vce HS : CH2: HV+ to Phase  Vce = 0.5 to -0.25 V  (blue in the scope) |  |
| Vge LS (Low Side): CH1: TP20 to HV- Vge = 15.2 to -8.2 V  (yellow in the scope) | Vce LS : CH2: Phase to HV- Vce = 0.4 to -0.8 V  (blue in the scope) | A screen with a graph on it  AI-generated content may be incorrect. |

להמשיך מלהבין האם הטרנזיסטורים תקינים, אולי הלכו במהלך ההחלפה..  
יש אחד חדש מההזמנה האחרונה..  
או שהחיבורים פשוט לא עובדים וצריך פתרון אחר לחיבור הגנרי..  
מבדיקה עם הפלוק,  
בין הקולקטור לאמיטר, בטרנזיסטור העליון יש 21 אום, בתחתון 31 אום, כשהם מחוברים למעגל עם הקונקטורים... אז תכלס לא בטוח שזה אומר משהו על הטרנזסיטורים..  
בין בשער לקולקטור, בטרנזיסטור העליון יש קילו אומים וממשיך לטפס, כנ"ל בתחתון..

הסט-אפ שלנו:

Setup:  
The arduino is powed by usb from a laptop.  
From arduino to X1 ports of the board.  
2 DC power supplies, first with +15 GND -8 to VEE2\_HS etc. the second with same values to VEE2\_LS etc.  
Then high voltage DC power supply 30V to HV+, and its minus port to HV- .  
Between HV+ and PHASE there is a resistor of 20Ω,   
between PHASE to HV- there is a resistor of 30Ω.

~~אולי D2,D12 הלכו?~~ ~~רקטפיירים..~~

חשוב!!  
דרך פשוטה למדידת Vge ישירות:

Recommended Safe Way to Measure Vge of HS IGBT:  
Use 1 probe only:  
Tip on TP10 (GATE\_H)  
Ground on GP10 (GND2\_H)  
That gives you Vge\_HS directly, safely, and avoids floating reference issues.

Measured Vge\_HS with a single probe:  
Tip on TP10 (GATE\_H) , Ground on GP10 (GND2\_H)  
then for Vge\_LS:  
Tip on TP20 (GATE\_H) , Ground on GP20 (GND2\_H)

~~מדידת Vce עם Differential Probe: (לא צלח..)~~

~~HS: HV+ 🡪 PHASE~~

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| בדיקת חיבוריות עם המולטימטר: | | |
| From 🡪 To | Should be Ω | Actual Ω |
| HV+ 🡪 PHASE | ~20 | 20 |
| PHASE 🡪 HV- | ~30 | 30 |
| TP10 🡪 HS gate (1st pin) | ~0 | ~0 |
| TP20 🡪 LS gate (1st pin) | ~0 | ~0 |
| HV+ 🡪 HS collector (2nd pin) | ~0 | ~0 |
| PHASE 🡪 LS collector (2nd pin) | ~0 | ~0 |
| PHASE 🡪 HS emitter (3rd pin) | ~0 | ~0 |
| HV- 🡪 LS emitter (3rd pin) | ~0 | ~0 |

~~אוקיי מסתמן שהחיבורים לא טובים עבור:  
LS: Collector, Emitter  
צריך להבין אם זה ההלחמה או החיבור עם בין הטרנזיסטור לקונקטור.  
היה 30, אחרי נקיון אחד ירד ל-4 והשני קפץ לאינסוף..~~

החיבורים טובים :), הקונקטורים מראים ערכים נכונים ללא הטרנזיסטורים.  
לאחר חיבור הטרנזיסטורים גם יש חיבוריות תקינה.  
הרצה זהה לזו שעשינו כשהטרנזיסטורים היו מחוברים ישירות, נתנה תוצאות זהות :)

24 אפריל

אחרי הרבה בדיקות משחקים, המעגל עובד עם הטרנזיסטורים IGBT על הקונקטורים:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Infineon IGBT IKW40N120H3 (With Connectors!) | | |
| Vge HS (High Side): CH1: TP10 to Phase  Vge = (yellow in the scope) | Vce HS : CH2: HV+ to Phase  Vce =  (blue in the scope) |  |
| Vge LS (Low Side): CH1: TP20 to HV- Vge =  (yellow in the scope) | Vce LS : CH2: Phase to HV- Vce =  (blue in the scope) |  |

בהתחלה אריק לא התלהב, אבל אחרי הסבר הוא היה בסדר עם הרעיון והמימוש של ה-PCB :)  
כדאי לשבת יחד איתו לוודא שהכל בסדר ואז אפשר לרוץ.

השלב הבא, שינוי המתחים, שיינוי זמן מת, שינוי נגד שער?  
חיבור הטרנזיסטורים של infenion דגם SiC ונסיונות בזהירות...

סיכום שינויים למעבר ל-SiC:

Gate voltage +15 V / −2 V Replace −8 V or add clamp  
Dead-time Reduce (e.g., to 200–300 ns) Adjust in Arduino code  
DESAT cap Optional: lower or remove Faster fault response  
Gate resistors Optional: raise to 15–22 Ω Prevent overshoot if needed  
Current limit 1 A is fine safe with both devices

טבלת ווידוא שנויים לפני הפעלה   
מעבר מIGBT לCoolSiC MSOFET:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **איפה** | **מה** | **בוצע?** |
| מתחים בשערים | 15V and -2V | V |
| שינוי קוד ארדואינו זמן מת (תכלס רצוי גם תדר גבוה יותר) | 250ns | V |
| צריבה קוד ארדואינו! |  | V |
| נגד שער ?? |  | X |

הערה Arduino :  
כשצורבים צריך חיבור USB מקורי ולא דרך מתאמים למחשב...  
הערה SIGLENT SDS 1052DL Oscilloscope:  
כדי שהתפריט לא יעלם כל כמה שניות:  
Display🡪Menu display🡪Infinite

תוצאות לאחר חיבור Infineon CoolSiC MOSFET עם הקונקטורים:  
הגל של מתח שער עליון נראה בסדר (TP10 to GND2\_HS), **אבל** נותן מתחים של 15.2V to 0.4V (בתדירות 2 קילו), המתח הנמוך 0.4 לא מסתדר עם התיאוריה, מצפים למשהו כמו -2V , משהו לא מאפשר למתח להימשך למטה עד הערך המצופה. כנראה ששיטת המדידה שגויה!  
מתח שער תחתון נראה טוב (TP20 to GND2\_LS),   
נותן מתחים של 15.4V to -2.2V (בתדירות 2 קילו).  
במקרה זה המתח הנמוך טוב.

להמשיך מקריאה של ההערה האחרונה של הצ'אט ומהבנה גם מההסבר של אריק..

27 אפריל 2025

בדיקה עם הטרנזיסטורים של Infineon (CoolSiC MOSFET) מחוברים על הקונטורים עברה טוב. התוצאות מתאימות לשינויים: זמן מת קטן מאוד, שינוי המתחים, תדר?? מה שרואים בסקופ זה כנראה התדר של הארדואינו...

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Infineon CoolSiC MOSFET IMW120R045M1 (With Connectors..) | | |
| Vgs HS (High Side): CH1: TP10 to Phase  Vgs = (yellow in the scope) | Vds HS : CH2: HV+ to Phase  Vds =  (blue in the scope) |  |
| Vgs LS (Low Side): CH1: TP20 to HV- Vgs =  (yellow in the scope) | Vds LS : CH2: Phase to HV- Vds =  (blue in the scope) |  |

עברנו לבדיקה של הטרנזיסטורים של המעבדה USiC MOSET

טבלת ווידוא שנויים לפני הפעלה  
מעבר מCoolSiC MOSFET לUSiC MOSFET:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **איפה** | **מה** | **בוצע?** |
| מתחים בשערים | זהה תופס  15V and -2V | V |
| שינוי קוד ארדואינו זמן מת (תכלס רצוי גם תדר גבוה יותר) | זהה תופס  250ns | V |
| צריבה קוד ארדואינו! | זהה | V |
| נגד שער ?? | לא התשנה | V |
| הגבלת זרם בספק מתח גבוה | היה 1A העלנו ל-1.5A כי הספק לא "החזיק" את המתח | V |

בדיקה בסיסית עברה חלק!  
הערה חשובה: התמונות למטה זה עבור הגבלה של 1A בספק מתח הגדול..  
לכן הערכים הנמוכים, מאוחר יותר העלנו את ההגבלה ל-1.5A וזה הסתדר.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| UnitedSiC USiC MOSFET UJ4C075018K3S  (With Connectors..) | | |
| Vgs HS (High Side): CH1: TP10 to Phase  Vgs = (yellow in the scope) | Vds HS : CH2: HV+ to Phase  Vds =  (blue in the scope) |  |
| Vgs LS (Low Side): CH1: TP20 to HV- Vgs =  (yellow in the scope) | Vds LS : CH2: Phase to HV- Vds =  (blue in the scope) |  |

צריך לנסות להבין למה היה צורך בשינוי הגבלת הזרם, האם זה קשור לנגדים שמחוברים? למה זה עבד טוב עם ה-CoolSiC ??  
רעיונות לסיבה שבגללה הגדלת הגבלת הזרם עבדה:

When switching, especially at fast edge rates, the gate charge, output capacitance, and snubber (if present) **momentarily pull more current**.

SiC devices like UJ4C are **extremely fast**, so even **small capacitive elements** (like cable capacitance or board capacitance) cause **higher inrush pulses**.

If your supply was clamped at 1A, it might have hit the limit and caused unstable or weak startup.

Allowing **1.5A** gave it enough breathing room, avoiding early limiting.

**פגישה אריק:**

הצגת מצגת סוף נקבעה לתאריך 11 במאי בבוקר, כולל הצגה במעבדה.  
צריכה לכלול:  
- תהליך הפרויקט  
- באיזה בעיות נתקלנו איך התמדדנו  
למשל, ששרפנו את הדרייבר.. איך.. החלפנו מהר..  
למשל, הרעיון שלנו של הPCB שהכרטיס מתיישב עליו ובורר טרנזיסטורים.. הסתבר שזה פתרון קצת עדין כי יש קו תמסורת שיכול לגרום לבעיות? בעוד שאנחנו חותרים למשהו מדויק שאפשר לעבוד איתו בביטחון (אז ההצעה של אריק - הפתרון היקר, לכל סוג טרנזיסטורים כרטיס משלו..)

- שרטוט חווטים, מה כל חלק במעגל עושה  
- סגנון של הרבה גרפים מעט מילים (סדר גודל 30 שקפים)  
- דמו עם בדיקות במעבדה..

בספר פרויקט –   
הרעיון העיקרי הוא שעבור מישהו שלא מכיר כלום, מה צריך כדי להשתמש בכלי ועבור מה.   
- תכלית הספר אם מישהו רוצה להשתמש איך הוא עושה את זה

חלוקת עבודה:

**מאור –**

- איך המעגל עובד

- הסבר על הפתרון שהצענו PCB, למה בחרנו בפתרון אלטרנטיבי יותר נכון.

- להתחיל לעבוד על המעגל שהולך להיות (הרעיון של אריק – לכל סוג טרנזיסטורים כרטיס משלו שבעצם כמעט העתק של הכרטיס המקורי).

**שחר –**

- סידור מצגת קצת, ספר פרוייקט קצת, סדר בבדיקות!! ואולי אפילו ביצעו שלהן :), לנסות לאסוף גרפים, עדיף איכותיים מהדפסה של הסקופ..

דברים שכדאי להכניס לספר, אולי גם למצגת:

1. למה שני ספקי מתח מבודדים לחלק העליון והחלק התחתון:

You properly separated supplies for high-side and low-side drivers, which is very important to avoid disturbances.

1. למה קריטי לעבוד עם זמן מת:

You inserted dead time at the Arduino level between D9 and D10, ensuring no shoot-through.

בהתחלה עבדנו עם זמן מת גדול עבור IGBT כדי שנוכל לזהות אותו בקלות במהלך המדידות. לאחר מכן הקטנו בשביל SiC מדוע חשוב?

1. למה השתמשנו בסט-אפ פשוט עם נגדים וללא סלילים

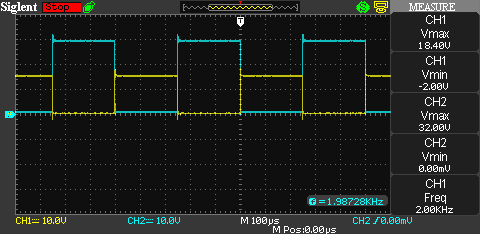
Load setup is resistive, which is safe for first tests without inductive spikes.

1. במתחי הזנה לשערים, השתמשנו במתח -8V בעוד שבדפי הנתונים מבקשים -7.5V ... לא ברור למה, כנראה טעות שלנו..

הערה:  
כדי לחלץ מהסקופ תמונות איכותיות אפשר להכניס USB ולעשות PRINT, זה שומר כקובץ מסוג מסוים (תמונה).  
אפשר גם להתחבר עם כבל ?? כמו מדפסת?? ואז יש תוכנה?

28 אפריל 2025

בדיקה של חילוץ תוצאות סקופ:



תחילת בדיקות.  
החלפנו חזרה לIGBT מחובר כמובן דרך הקונטורים.

טבלת ווידוא שנויים לפני הפעלה   
מעבר מSiC ל IGBT:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **איפה** | **מה** | **בוצע?** |
| מתחים בשערים | 15V and -7.5V | V |
| שינוי קוד ארדואינו זמן מת |  | V |
| צריבה קוד ארדואינו! |  | V |

אולי יתבהר בהמשך:  
GND2\_HS is tied to the floating potential

עוד משהו שאפשר להוסיף למצגת:  
בעיית מדידת Vge של HS וגם LS באותו הזמן, מאחר שהקליפסים של הפרובים מחוברים לאדמות שונות והן מקוצרות דרך הסקופ.. אז יוצרים קצר   
(ground loop → effectively shorting GND2\_HS to HV− via the oscilloscope)  
רעיונות לפתרון –   
1. אחד הפרובים דיפרציאלי, והשני רגיל  
2. רעיון נוסף יש מוצא לסקופ שיכול להטריג סקופ נוסף. ואז פרוב אחד עם סקופ אחד, טריגר אל הסקופ השני והפרוב השני גם בסקופ השני.  
3. סקופ עם יותר ערוצים, ואז לחבר את כל האדמות לאותו מקום, לקחת 3 פרובים לכל הנקודות שרוצים ולעשות math..  
  
להמשיך מלנסות להבין איך והאם צריך להתמודד עם הזמן המת של סימטרי בגלל הארדואינו..

29 אפריל 2025

לא הצלחנו לערוך את הקוד של הארדואינו כדי לסדר את הזמן המת במעבר LS אל HS. הבעיה תמונה בדרך שבה PWM הפנימי של האדואינו עובד. בסוף המחזור הסיגנלים חוזרים למצב LOW במקרה שלנו D9 הולך למטה וגם D10 הולך למעלה (למטה אבל הוא בהיפוך). ואז יוצא מצב שלא משנה איך מגדירים את הזמן המת, הוא תקף רק למעבר אחד.  
נסינו להזיז את הפולסים, לשנות duty cycle, לכפות על הסיגנלים מצב מסוים, אבל שום דבר לא פתר..  
לכן יצרנו קוד PWM ללא הכלי המובנה של ארדואינו.. "ידנית".  
זה בסדר, אבל כדי ליצור קוד נוח לשינויים מהירים בין הפרמטרים: תדירות, זמן מת, duty cycle, זה מסתבך..

חזרה לבדיקות מול הכרטיס..

להמשיך בבדיקות – בדיקה 5  
שאלה – האם לחזור על הבדיקות הקודמות או לערבב משהו ?? זה יהיה מתיש..

4 מאי 2025

המשך לבדיקה 5, ואחרי זה אולי לחזור על הבדיקות הקודמות עם הPWM החדש, או אפילו לסדר את הזמן המת או לשנות תדר וכו..  
עשיתי כמה בדיקות עם זמן מת של 1 מיקרו, ההתנהגות סבירה.  
אבל כשרוצים לעבור לזמן מת בסדר גודל של ננו-שניות בשביל הSiC, הארדואינו לא תומך בזה בדרך שבה עבדנו בשביל מיקרו-שניות..  
אז שוב צריך לערוך את הPWM....   
מסתמן שאין פתרון עם הארדואינו שלנו.. צריך מיקרו-קונטרולר יותר משוכלל או מכולל PWM אנלוגי??

This is a known and unavoidable hardware limitation of ATmega328P:  
You can delay OC1B (D10, inverted) relative to OC1A (D9), but  
You cannot delay OC1A relative to OC1B — because only one compare register (OCR1A) drives the start of the cycle.  
In short:  
The leading edge of D9 (non-inverted) is always the start of the cycle, so there's no way to "delay" it past D10’s falling edge using just hardware.

אז המשכנו בדיקות עם זה..

5 מאי 2025

המשך בדיקות על CoolSiC עם PWM **לא** תקין, זמן מת רק בצד אחד.

לשים לב, שאין Reset בקוד PWM החדש של CoolSiC...

לפני ההחלפה לטרנזיסטורים של אריק USiC, הוספנו ריסט לPWM..

מאחר שיש כמה דברים לא ברורים שקורים עם הUSiC  
ניסינו לצרוב את הPWM הפשוט כמו שהיה לIGBT כלומר שני צדדים זמן מת אבל זמן מת ארוך של 1us ... זה גם לא עובד..   
בפועל מקבלים ~5us זמן מת.. זו מגבלה של הארדואינו..  
הסיבה:

micros() Resolution  
On Arduino Uno (ATmega328P), micros() has 4 µs resolution, meaning delays less than that may be rounded up or imprecise  
delayMicroseconds() Overhead  
It adds a few instruction cycles (~1–2 µs typical), so delayMicroseconds(1) can easily turn into 4–5 µs depending on context  
Loop jitter  
Because this PWM code runs in loop(), there’s also software latency in managing the timing cycle  
Signal slope and scope trigger  
Transition edges might not be perfectly sharp — scope delta might measure from midpoint voltage instead of logic threshold

אז אנחנו בבעיה,  
מצד אחד כל הבדיקות עוברות אבל זה עם זמן מת מאוד גדול.. וזה אולי לא אינדיקציה לכך שהמעגל עובד בצורה תקינה..

6 מאי 2025

לקדם מצגת סוף ולנסות לדבר עם אריק על מכולל PWM אחר.. אם זה משהו פשוט אז שווה לנסות ולעשות שוב את הבדיקות..

אריק אומר שלא להתעסק אם הזמן מת הגדול, זה בסדר לסדר גודל של התדר ואפשר להציע פתרונות במצגת.

להוסיף את ההסבר לסיבה שהמתח בשער של HS לא מגיע למתח הנמוך, אלא 2 וולט יותר (לכל סוגי הטרנזיסטורים).  
יש בצ'אט:

Gate Clamping via Protection Diodes or Zeners  
Series Gate Resistor + Internal Impedance  
Evaluation Board Layout Effects

להמשיך עם המצגת קודם כל ולהתאמן על ההצגה והדמו במעבדה..  
אם יש פנאי – git  
אם יש עוד פנאי – ספר פרוייקט

6 מאי 2025

תבנית מצגת מלאה עם תוספות ושיפורים.. תוך כדי

**להמשיך** מסגירה סופית של המצגת, תכנון והתכוננות להצגה (חלוקה כל אחד חצי בערך..)  
ואז תכנון הדמו במעבדה, וניסיון כדי לוודא תקינות מלאה..

7 מאי 2025

סיום מצגת

Gate Clamping –

Gate clamping is a protection method that limits the gate voltage of a transistor to a safe range using diodes (often Zener).  
It prevents damage from voltage spikes during fast switching by clamping the gate-source voltage above or below specific thresholds.  
This is especially important for sensitive devices like SiC MOSFETs.

How It’s Implemented

Positive Clamping:  
Zener diode (e.g., 18 V) between Gate and Source → prevents Vgs > 18 V

Negative Clamping:  
Zener (or fast diode) between Gate and Source in reverse polarity → prevents Vgs < −2 V

Sometimes integrated into the gate driver IC or placed externally near the transistor

נישארו ממש פינישים אחרונים ואולי פרמול הדמו..  
והקצבת שקופיות לכל אחד ותזמון שלא חורג מחצי שעה..

10 מאי 2025

הועלו קבצים לגיט,  
נישאר:  
- להעלות ספר פרויקט  
- להעלות מסמך דוקיומנטציה  
- ~~לערוך ריד-מי~~- להקליט סרטון להעלות ולהוסיף קישור

\*\* בסופ"ש ובראשון – ספר פרוייקט וגיט  
\*\*\* שני בבוקר – הגשה מלאה לעיון ראשוני