



המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרונית

מבוא לתכנון כרטיסים (Board Design)

מטלת סוף

בשארה חביב

פרנסיס עבוד

מריה נחלה

טטיאננה אבו שקראה

שם המרצה: נורברטו אדריאן צ'

תאריך: 9/8/2025

תוכן עניינים

1. מטרת המעגל
2. הצגת תכנון וסימולציה
3. מימוש המעגל בשיטת Wire-Warp
4. הפרעות ורעים
5. תיקון ההפרעות והרעים
6. עיריכת המעגל
7. סיכום ומסקנות

סעיף 1: מטרת המעגל

בפרק זה יש להציג את הצורך שהמעגל אמור לספק, מה הבעה ההנדסית ומהו הפתרון המוצע.

• תיאור הבעה:

במערכות ספרתיות רבות יש צורך לעקוב אחר רצף מסויים של אותות או תדרים, ולבצע פעולה מוגדרת כאשר מתקיים תנאי כלשהו – לדוגמה, כאשר מתקבל מספר מסוים של פולסים או כאשר יש תדר מסוים שנדרש ליזיוי או חלוקה. הבעה ההנדסית היא כיצד ליזוחות או לחלק תדרים גבוהים (מעל 30 MHz) בזרה מדעית, תוך שימוש ברכיבים לוגיים זמינים, ולהתמודד עם בעיות של יציבות, סינכרון והפרעות.

• מטרות הפרויקט:

- לתכנן מעגל דיגיטלי שיבצע חלוקת תדר מבוססת על קלט שעון מהיר (מעל 30 MHz).
- להשוות בין שלוש גישות מימוש עיקריות:
 1. שימוש ברכיב מונה SN74LS90.
 2. שימוש ברכיב מונה DM74LS90.
 3. שימוש בFlip-D Flip-Flop GD74LS74 לבניית מחלק תדר בהתאם אישית.
- לבדוק את התנהלות המעגל בתדרים גבוהים ולנתח אילו רכיבים מספקים חלוקה מדעית, יציבה ואמינה יותר.
- ליזוח נקודות תורפה במעגל (כגון רעשים, קפיצות תדר jitter וכו') ולהציג פתרונות לשיפור הביצועים.

• דרישות עיקריות מהמערכת:

- שעון קלט בתדר מעל (30 MHz) נבחר ממבחן הרכיבים.
- יכולת חלוקת תדר (למשל $2 \div 10, \div 100$ וכו') באופן מדוקן.
- יציאת אותן דיגיטלי ברור, סינכרוני, ונטול רעשים ככל האפשר.
- אפשרות לבחינת תפקוד המעגל בסימולציה וגם בבנייה אבטיפוס פיזי (wire-wrap).
- התיקיחסות להפרעות והשפעתן – ובבנייה אמצעי מגנן/תיקון בהתאם.
- השוואת ביצועים בין רכיבים שונים מבחינות זמן תגובה, גודל, מרכיבות וסיבוכיות מימוש.

איך זה עובד:

1. אותן שעון מהיר מוזן למעגל (מו"מ clock).
2. המונה או ה-Flip-Flop מבצעים חלוקת תדר על פי עיצוב הלוגיקה הפנימית שלהם.
3. התוצאה היא תדר נמוך יותר, המשמש ליזיוי "רצף" קבוע של פולסים/זמן.
4. רכיב ההשוואה בין גישות שונות מאפשר ליזוח את הפתרון האופטימלי ליישומים מהירים.

סעיף 2 : הצגת תכנון וסימולציה

סכמת המעגל

בתמונה הבאה מוצג המעגל אשר נבנה לצורך השוואה בין שתי שיטות לביצוע חלוקת תדר:

1. **שיטה פלייפ-פלופים – (Flip-Flop Chain)** (Flip-Flop Chain) שרשרת של ארבעה רכיבי Flip-Flop, כאשר כל רכיב מחולק את התדר בחצי לעומת קודמו.
2. **מונייה** – רכיב מוניה אסינכרוני אשר מקבל את אותן השעון ישירות מהקלט הראשי, ומוגדר לבצע חלוקה של התדר ביחס של 1 ל-4.

הדגמת פעולת המעגל

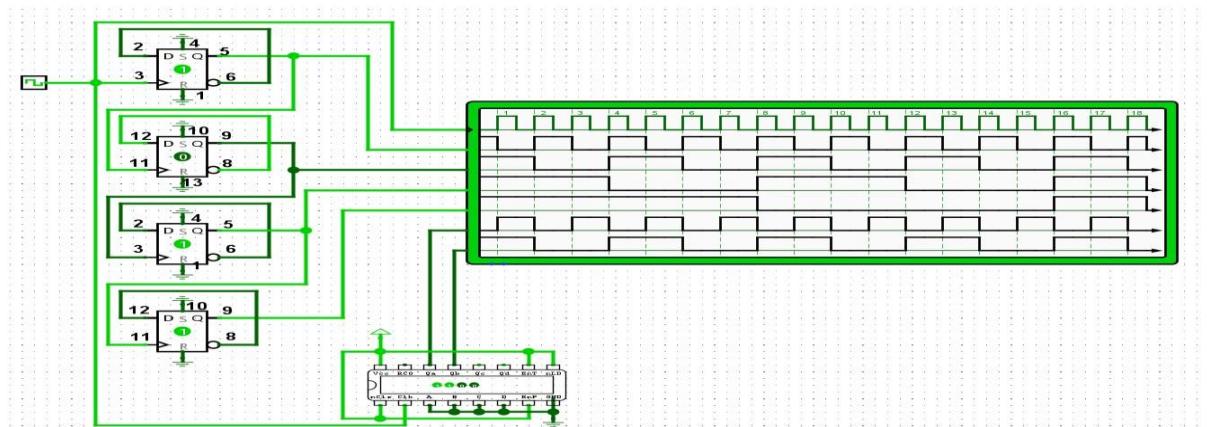
הסכמה מלאה בתרשים תזמון (Timing Diagram) אשר מראה את הפלט של כל אחד מהשלבים:

- ניתן לראות את חלוקת התדר המתבצעת בשרשראת ה-Flip-Flops : כל שלב מחולק את התדר ב-2.
- במקביל, מוצג הפלט של המוניה לאחר חלוקה ב-4 של אותן הקלטים.

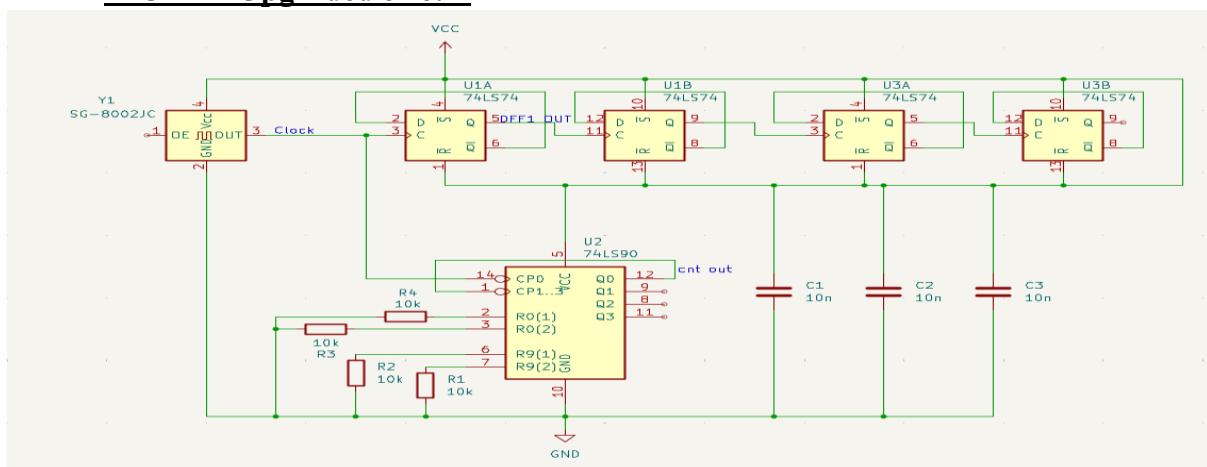
סימולציה ובדיקה הfonקציונליות

הסימולציה הדיגיטלית בוצעה באמצעות אוסילוסkop לוגי אשר מדמה את תגובת המעגל לתדר גבוה ($>30MHz$). נבדקה אמינותו, יציבותו ודיקוק הפלט.

LOGISIM

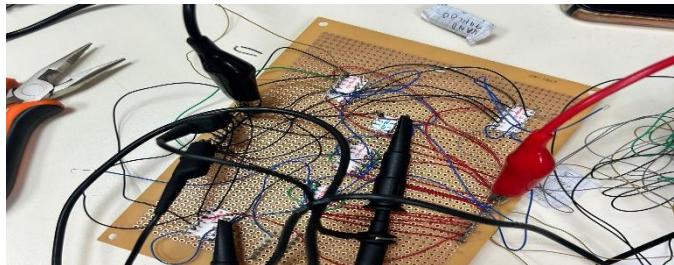


KiCAD – Upgraded circuit



סעיף 3: מימוש המעגל בשיטת Wire-Wrap

בשלב זה תיעדנו את תהליכי הבנייה הפיזית של המעגל באמצעות לוח פרוטוборוד ושיטת חיוט-D Flip (Wire-Wrap). המעגל כלל את כל הרכיבים שתוכנו בסכמת הסימולציה: שני-Flops, ו שני מוניהם, וכן רכיב שעון בתדר של 60 MHz ואות שעון יציב.

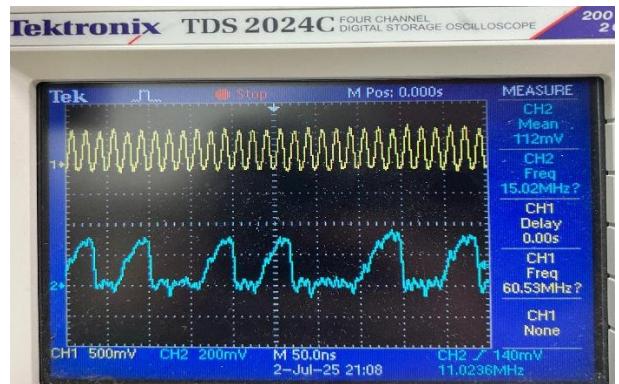
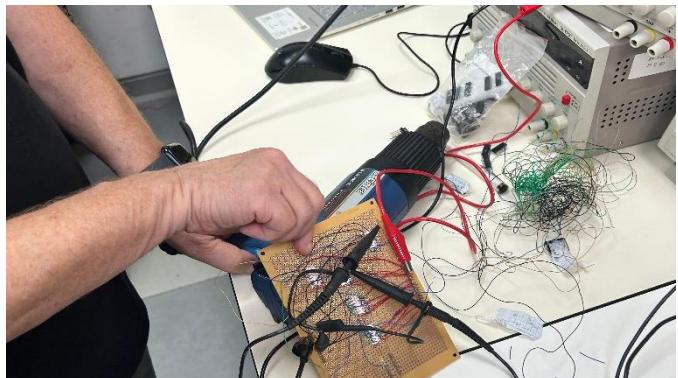


הרכבת המעגל על לוח פרוטוborוד

בצלום ניתן לראות את הרכיבים המרכזיים:

- רכיב השעון (במרכז)
- שני הפליפ-פלופים המתחברים בשרשרת DM74LS90, ומוניהם SN74LS90.

בדיקות המעגל באמצעות אוסצילוסקופ



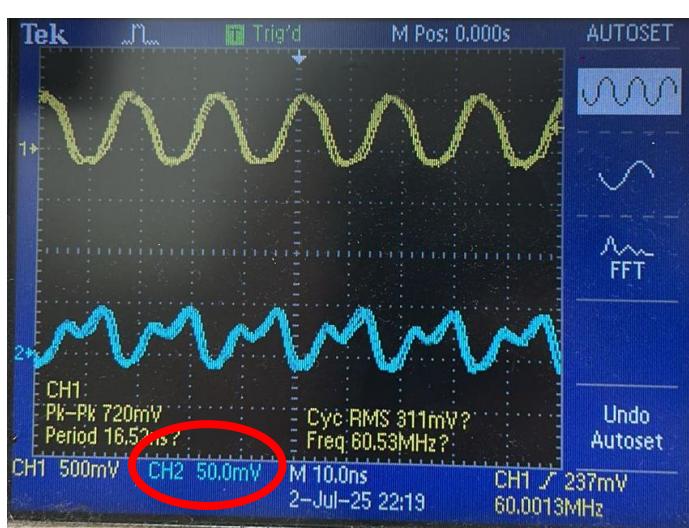
בשלב זה חיבורנו את המעגל למקור מתח ולמדידת האותות ביציאות הרכיבים השונים. האות החזוב מציג את אות השעון (Clock input), והאות הכהול מציג את הפלטים מהפליפ-פלופים מחולק פי 4.

לאחר שה לחברנו את רכיב המוניהם SN74LS90, ובנוסף גם את DM74LS90 (לצורך השוואתם בין הדגמים), ביצענו מדידות על פלט החלוקת של שניהם. בשני המקרים שמננו לב להזעת רעשיות באות הפלט (noise), בעיקר בקצבות העלייה והירידה של הגל. מדידות עם האוסצילוסקופ הראו שהרעש הופיע באופן עקבי בשני המוניהם גם ב-SN וגם ב-DM בעוצמה של כ-50mV.

בתמונה הבאה ניתן לראות את האות החזוב (קלט השעון) לעומת האות הכהול (פלט המונה), כאשר ניתן לראות רעש מסווג Crosstalk, ככל מריר השרה הדזית בין חוטים סמוכים בלווח שגורמת לתנודות בלתי רצויות באוט הדיגיטלי:

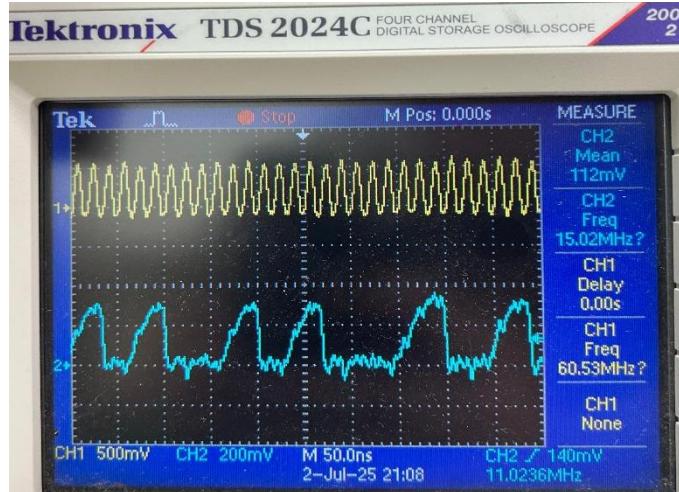
למרות שה-DM74LS90 פועל בצורה דומה ל-SN74LS90, בחרנו להמשיך את שלבי האופטימיזציה עם ה-SN74LS90 בלבד, לשם פישוט המערכת והתרכזות בפתרונו הביניה. ברמות מתח דיגיטליות ובמיוחד בתדרים גבוהים (60MHz), גם רעש של 50 mV עלול לגרום לטעויות בזיהוי לוגי (glitches), תזמון לא תקין או חוסר יציבות.

במהלך השיעור הצגנו את התופעה בפני המרצה, והוא זיהה את מקור הרעש כ- Crosstalk אופייני לחישוט ב częיפות גבוהה. המלצותו הייתה למקד את המשך הפרויקט בניתוח מקורות ההפרעה ובפיתוח שיפורים להפחיתת ההשפעה של רעים אלו כדי לראות שיפורים מדיד וניכר בפלט המעגל.



סעיף 4: הפרעות ורעשים

בעת בדיקת הפלט של המוגלים בתדר גבוהה (60MHz), זיהינו הפרעות חשמליות בשני חלקים שונים בمعالג – הן בשרשרת ה- Flip-Flops והן במונה SN74LS90. בעזרת מדידות מדוקאות עם אוסциילוסקופ ובשילוב הסבר המרצה, ביצעו אבחון של סוג הרעשים, כפי ש谟ց בខמץ.



רעש בפלט הפליפ-פלופים

באיור זה ניתן לראות את האות הצהוב (פלט השעון בתדר ~60Hz) ואת האות הכחול, שהוא פלט של אחד מרכיבי ה- Flip-Flop בשרשרת.

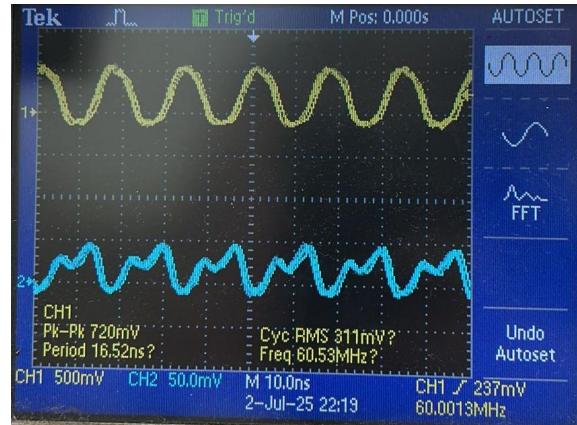
ניתן להבחן שהתדר הכהול (Channel 2) עומד על כ- 15MHz, מה שمعد על חלוקה תקינה $(\frac{1}{4})$, אך הגל אינו ריבועי מושלם אלא מעוגל ומלא תנודות, בעיקר סביב הקצוות.

הרעש כאן ככל הנראה נובע מ:

- מעבר איטי מדי בין רמות לוגיות (slope).
- קיובל פרזיטי בין פינים קרובים בלוח.
- שימוש בחוטים ארוכים או לא מסודרים בשיטת Wire-Wrap, מה שעלול ליצור התנגדות או השראות מיותרות ולהשפיע על חidot הגל.

אמנם מדובר ב- Noise מסוג "רץ" יחסית ולא רפלקטיבי, אך אם לא יטופל, הוא עלול להקשות על רכיבים אחרים לזהות את הרמה הלוגית בצורה אמינה.

רעש מסווג Crosstalk בפלט המונה



כאן ניתן לראות את האות השעון בצהוב (60.5MHz) ואת פלט המונה בכחול (בחלוקת $\frac{1}{4} \rightarrow 15$ MHz). הפלט הכהול מציג תנודות חריגות חדות בשני כיווני המתח, כולל קפיצות קצרות (spikes) שאינן תואמות את התדר הצפווי.

לאחר ניתוח ודיוון בכיתה, זיהינו שההופעה נובעת מ- : Crosstalk

- השראה הדדית בין חוטים מקבילים בمعالג.
- צפיפות גבוהה של חוטים ללא סידור נכון של GND.
- חוסר בשכבת הפרדה בין קווי אוטות מהיריים.

ה- Crosstalk בולט במיוחד כי עוצמתו מגיעה ל- $50mV$ ואף יותר, מה שעלול לגרום לשגיאות קריאה, ביצוע כפול, או התנהגות לא יציבה של רכיבי המונה.

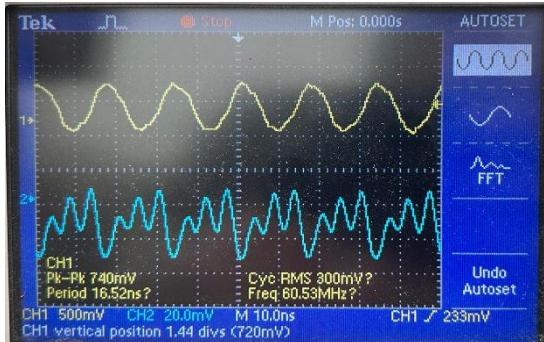
סיכום ראשון

- הרעש ב- Flip-Flops הוא מתון ודק, ומופיע בעיקר כתוצאה צורת הגל.
- הרעש במונה הוא חמוץ יותר וחד, מזוהה בבירור כ- Crosstalk ויש לטפל בו במידות.

לאחר התיעצות עם המרצה, הוחלט להתמקד בהמשך העבודה בפתרון בעיית ה- Crosstalk, בשל השפעתו הישירה והקריטית על תפקוד המمعالג.

סעיף 5: תיקון הפערות והרעשים ועריכת המעגל

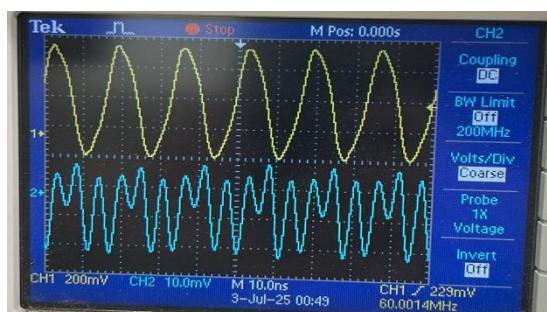
בஹמץ להמלצת המרצה, התמקדנו בזיהוי וטיפול בಗורם המרכזי לרעש Crosstalk בין החוטים בלוח. בוצעו מספר שיפורים מבניים ואלקטרוניים, ובכל שלב נמדדה ההשפעה באמצעות אוטצילוסקופ. המטרה הייתה לצמצם את הרעש ככל האפשר ולהציג אותו נקי ויציב.



שלב ראשון: הוספה שלושה קבלים במקביל

הוספנו שלושה קבלים באזורי אסטרטגיים במעגל בין מתח הזנה לאדמה, ובסימון לרכיב המונח. תפקיד הקבלים היה לסנן רעש AC ולהקטין קפיצות במהלך אותן.

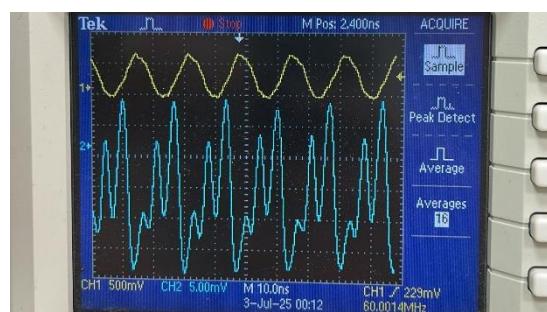
- תוצאה: עוצמת הרעש ירדה מכ- 50 mV ל- 20 mV
- גוף האות הכהול (Channel 2) נעשה חלק יותר, עם פחות עיוותים חדים.
- תדר האות נותר תקין, אך שולי הגל שופרו משמעותית.



שלב שני: קיצור אורץ חוטי ה-Wire-Wrap

בשלב זה בוצע סידור מחדש של החוטים – צמצום אורכם, קיבועם בזוויתן חדות פחות, והרחקת חוטי אותן מהירם אחד מהשני.

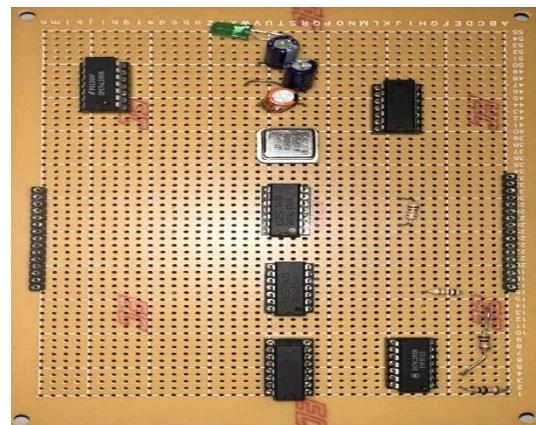
- תוצאה: הרעש ירד מ- 20 mV ל- 10 mV
- הגלים הכהולים (פלט הדיגיטלי) הפכו חדים יותר.
- והופחתו תנודות ביןיהם בין רמותalogיות.
- ניתן לראות שיפור גם בזמן העלייה/ירידה של הגל.



שלב שלישי: הוספה נגדי Pull-Down

הוספנו ארבעה נגדי Pull-Down לפינים רגיסטרים במונח ובקווי כניסה – כדי לסייע את רמות המתח במצבים לא מוגדרים ולמנוע רגישות לרעש.

- תוצאה: הרעש ירד מ- 10 mV ל- 5 mV
- הגוף נעשה חד, יציב וסימטרי. לא נראה קפיצות או "רפאים" בתדר.
- אותן הפלט שמר על צורתו לאורך זמן, גם בשעון מהיר של 60 MHz .



תצוגת המעגל הסופי לאחר כל השיפורים

לבסוף, לאחר יישום כל התוספות, בנוינו את המעגל הסופי על לוח Wire-Wrap, עם קבלים, חיווט קצר, ונגדי Pull-Down.

- אותן שנמדד היה חד, ללא עיוותים, ועוצמת הרעש ירדה ל- 5 mV בלבד
- לא נראה השפעות הדדיות בין קוים סמוכים (Crosstalk)
- תדר הפלט נשמר על $\sim 15 \text{ MHz}$ (חלוקת תקינה של השעון)

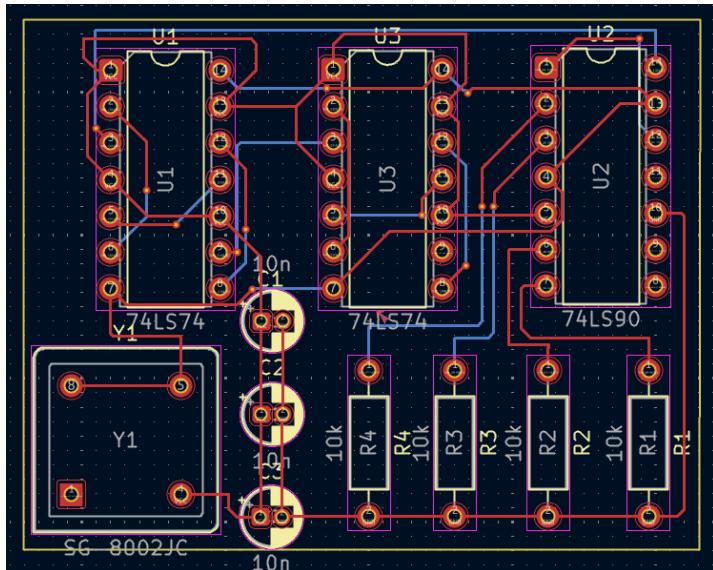
מסקנה בינויים:

באמצעות שלושה צעדים פשוטים אך מודוזים הצליחנו להפחית את רעש ה-Crosstalk – פי 10 ולשפר באופן משמעותי את אמינות ויציבות המערכת.

סעיף 6: תכנון PCB (בונוס)

לאחר שלב הבדיקות והאופטימיזציה בשיטת Wire-Wrap עברנו לשלב התכנון של מעגל מודפס (PCB) במטרה לשפר את האמינות, להפחית רעשים ולהבטיח מבנה קומפקטי ומסודר. המודפס תוכנן בתוכנת KiCad, תוך שילוב כל הרכיבים שנבחרו בשלב הקודם – שני RCBI-Flip D Flop מדגם SN74LS74, מונה SN74LS90, נגדי Pull-Down, קבלים לסינון רעשים, ורכיב השעון הקристלי.

תכנון מקומות וחיבורים



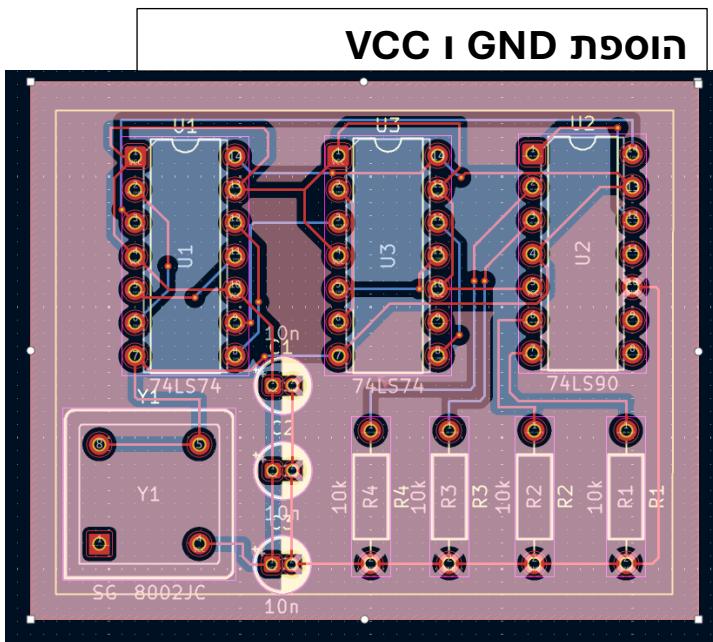
שלבי התכנון:

מיקום הרכיבים: (Placement)

הרכיבים הונחו באופן שמאפשר אורך המוליכים בין שלבי המודפס, תוך שימירה על קווי נתיב ישירים ככל האפשר בין רכיבי השעון, ה-Flip-Flops והמונה. הקבלים הוצבו בסמוך ל쿄י ה-VCC GND של הרכיבים הקרייטיים לצורך סינון מקומי.

ניתוב: (Routing)

בוצעניתוב דו-צדדי, כאשר רוב קווי האוטות בתדר גובה תוכנו בשכבה העליונה והחיבורים להארקה ומתח בשכבה התחתונה. נעשה שימוש במוליכים רחבים יותר לקווי ההזנה (Power Traces) לשיפור היציבות החשמלית. הקפדו להרחיק קווי אותן מהיררים אחד מהשני לצמצום תופעת Crosstalk שאוירה בשלב ה-Wire-Wrap.



פוליגון הארקה: (Ground Plane)

נוספה שכבת פוליגון GND רציפה בכל שטח הלוח, המשמשת כהארקה איחודית ומקטינה הרשאות בין קווי אותן. שכבת הארץ זו מספקת גם שיכון נוספת לרעשים ומסייעת בהגנה מפני הפרעות אלקטромגנטיות.

שילוב פתرونנות להפחית רעש:

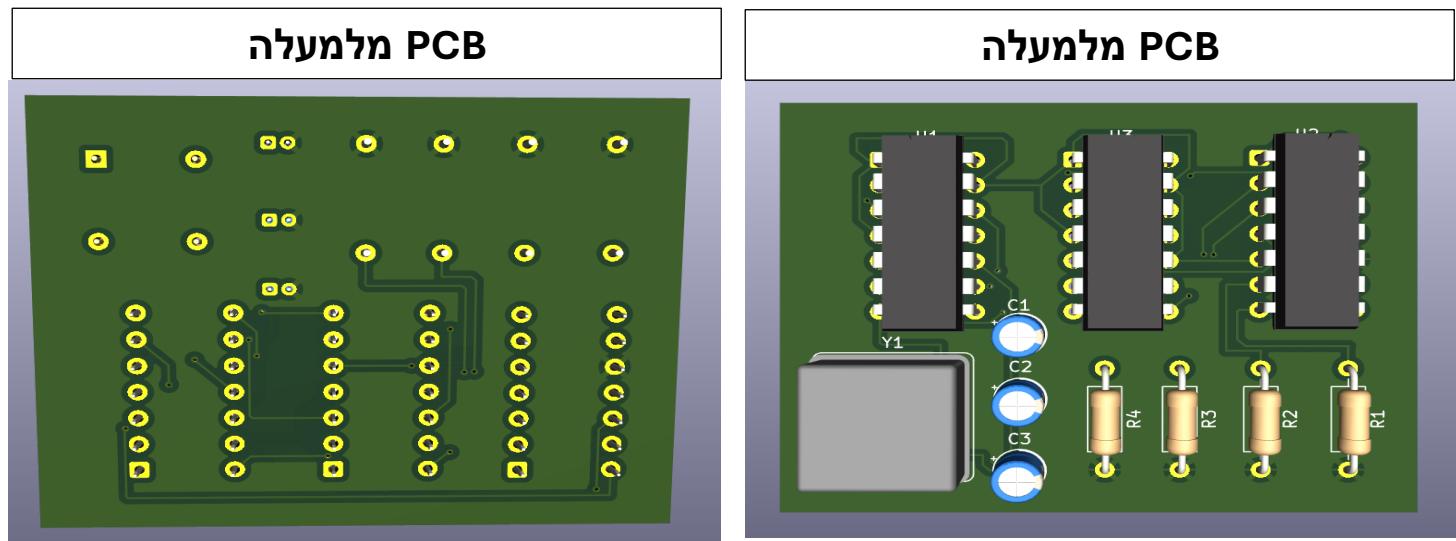
שלושת הקבלים שנוסףו בשלב הקודם שובצו ישרות ב-PCB, יחד עם ארבעת נגדי Pull-Down, כחלק אינטגרלי מהעיציב. מיקומים נבחר כך שייפלו ביעילות המרבית מול הפינים הרגיסטים ברכיבים.

המחשה חזותית:

בתמונות המצורפות ניתן לראות את מיקום הרכיבים על הלוח, את הניתוב שבוצע בו הפינים, ואת מראה הלוח בתצוגה תלת-ממדית (3D View). ניתן לראות בבירור את הפחית הצפיפות בהשוואה למימוש ה-Wire-Wrap.

יתרונות המעבר ל- PCB :

הפחיתה רעשים והשראות פרזיטיות בזכות מבנה קומפקטי ושבbet הארקה.
SHIPFOR אמינות בזכות חיבורים קצרים ומוליכים ברוחב מותאם.
אפשרות שכפול ייצור זהה ואחדיד ללא תלות באיכות החיווט הידני.
שילוב מובנה של רכיבי הסינון והיצוב שתוכננו בשלב האופטימיזציה.



סעיף 7 : סיכום ומסקנות

במהלך הפרויקט בחנו באופן שיטתי את האתגרים הטכניים הכרוכים בIMPLEMENTATION של תדרים בתדר גובה (מעל MHz 30) תוך שימוש ברכיבי לוגיקה STANDARD. מטרתנו הייתה לתכנן, לממש ולבדוק מעגל אמין שיבצע חלוקה מדוקנת של אות שעון מהיר, תוך זהה וטיפול בעיות של יציבות, סינכרון ורעשים.

תחילה בוצעה השוואה בין שלוש גישות IMPLEMENTATION : שני רכיבי מונה (SN74LS90, DM74LS90) וIMPLEMENTATION של שרשראות Flip-Flops מדגם GD74LS74. מצאנו כי למרות שכל הגישות הפיקו חלוקה תקינה של התדר, הופיעו הפרעות חמימות בתדרים הגבוהים, בעיקר מסוג Crosstalk.

תהליך האבחון והבדיקה באמצעות אוסциולוסkop אפשר לנו לאתר את מקורות הרעש ולזהות הבדלים בין עיונותים "רכיבים" של פלייפ-פלופים לבין קפיצות חדות ובלי Ci ציפויות במוצא המונח. זיהינו כי ציפויות גבוהה, חוסר בשיכון ובידוד אותן, וכן אוורך חוטים לא מבוקר מהווים את הסיבה העיקרית לרעש שימושי שלול לשבש את פעולה המעגל.

בעקבות המלצה המרצה, ביצענו סדרת שיפורים הדרגתית שכלה:

- הוספת קבלים לסינון רעשים פרזיטיים.
- קיצור ואריגון החיווט בלוח.
- הוספה נגד Pull-Down ליצוב רמות לוגיות.

בכל שלב תועדה ירידת מדידה בرمות הרעש מ- 50 mV בתחילת -V מ- 5 בלבד בסיום. תצורת המעגל הסופית הפיקה אותן דיגיטלי יציב, חד וברור, תוך שמירה על תדר חלוקה תקני (~MHz15), גם בעת הפעלת שעון בתדר Hz 60.

מסקנות עיקריות:

- רוש בתרדים גבוהים הוא אתגר קריטי בתכנון מעגלים ספרתיים, במיוחד כאשר משתמשים בשיטת חיווט ידנית כמו Wire-Wrap.
- שילוב בין פתרונות פסיביים (כמו קבלים ונגדים) לבין תכנון מבני נכון (סידור חוטים) מהו אסטרטגייה יעילה להפחחת רעש.
- אמצעים פשוטים אך מדויקים מאפשרים שיפור משמעות באמינות, דיקוק וסינכרון של המערכת.
- החשיבות של מדידה בזמן אמת (באמצעות אוטומטיקו) קריטית להבנת תופעות שאינן נראות בסימולציה בלבד.

מסקנות מתכנון ה- PCB :

- המעבר ממימוש בשיטת Wire-Wrap לתכנון PCB מאפשר הפחטה נוספת ומשמעותית של רעשים, בזכות קיצור מסלולי המוליכים והפרדה טובה יותר בין קווי האותות.
- שילוב שכבת פוליגון GND רציפה סינלק הארקה איחוד, שיכון הפרעות והפחטה השפעות Crosstalk שניצפו בגרסה הידנית.
- מיקום הרכיבים ב- PCB בוצע באופן שמצוצם אורך מסלולים בין שלבים קריטיים, ומשפר את יציבות האותות בתדרים גבוהים.
- שילוב מובנה של הקבלים ונגדי ה- Pull-Down בעיצוב הלוח הבטיח סינון וייצוב רציפים חלק אינטגרלי מהמערכת.
- התכנון המודפס מספק מבנה קומפקטי, אחיד ואמין יותר, המאפשר שכפול קל בייצור סדרתי ושמירה על ביצועים עקבאים בין יחידות.

מבט לעתיד :

הפרויקט הדגים הלה מעשה את המעבר מהתיאוריה לפרקтика, ואת חשיבותו התכנון, המדידה והאינטגרציה המלאה בין תחומים שונים בהנדסת חשמל.