

מנגנון אלקטרוני לפתיחת כספת אלקטרונית

מוגש ע"י:

אדר שמיר

ת.ז. : 211717533

אסובאלאו בלאיי

ת.ז. : 328681952

אחראיים אקדמיים: יאיר חסיד וחגי פרץ

תקציר

במסגרת פרויקט זה תוכננה ונבנתה מערכת אלקטרונית חכמה לפתיחה ונעילת כספת, המתאימה לשימוש ביתי או מוסדי.

מטרת הפרויקט הינה ליישם את הידע שנרכש במהלך התואר לשימוש מעשי, חשיבה מחוץ לקופסא ותכנון מקדים שיכין אותנו לתעשייה ולפרויקט סיום התואר בשנה הבאה.

המערכת כוללת מס' מערכות עיקריות: ממשק קלט דיגיטלי להזנת קוד, מנגנון נעילה אלקטרומכני, ומעגל בקרה ושליטה המנהל את תהליך הפתיחה והנעילה. המערכות מומשו בעיקר באמצעות שערים לוגים, רכיבים סינכרוניים ואוגר הזזה.

לצורך הגברת האבטחה, שולבו במערכת מנגנוני הגנה חכמים, ביניהם תצוגת מספר הניסיונות הכושלים ובפרט התראה אוטומטית לאחר שלושה ניסיונות כושלים - חיווי חזותי וקולי להתרעה ואפשרות לסגירה אוטומטית בלחיצה על 2 מקשים ספציפיים.

במהלך הפיתוח הושם דגש על פשטות הרכבה, צריכת אנרגיה נמוכה, ומספר רכיבים נמוך. כמו כן, נתקלנו בבעיות טכניות שהגיעו בעיקר בבדיקת התכנון על המטריצה כגון בעיית מרוצים אשר הפריעה לפעילות תקינה של המערכת שאחראית על בדיקת הקוד התקין לכספת.

בעקבות הפרויקט, הגענו למסקנה שיש צורך בבדיקה של כל רכיבי הפרויקט ללא יוצא מן הכלל – אפילו מומלץ תוך כדי התכנון התיאורטי בתוכנות הסימולציה, בין אם זה בדיקת המטריצה ועד הרכיבים האלקטרוניים, חשוב לעבוד מסודר ונקי מה שמקל על מציאת בעיות באופן מהיר יותר במיוחד במערכות מורכבות המכילות הרבה רכיבים וחוטי קצר.

מערכת זו מהווה פתרון לדרישות אופן פעולת הכספת ובעלת פוטנציאל לפיתוח עתידי, והיא מדגימה את השילוב שבין תכנון הנדסי מעשי לבין יישום עקרונות חשמל ואלקטרוניקה.

הכרת תודה

ברצוננו להביע את תודתנו והערכתנו העמוקה למנחים היקרים, מר יאיר חסיד ומר חגי פרץ, אשר ליוו את הפרויקט לכל אורכו במסירות, ידע רחב ונכונות אמיתית לעזור בכל שלב. ההנחיה המקצועית, ההכוונה המדויקת, והיכולת לראות את התמונה המלאה לצד הפרטים הקטנים – היו עבורנו מקור להשראה, והובילו אותנו להתמודדות הנדסית איכותית עם אתגרים מורכבים.

אנו מודים על התמיכה הרציפה, על הפידבק המהיר והענייני, ועל הסבלנות שגיליתם גם בזמנים של חוסר ודאות. לא פחות חשוב מכך – תודתנו על הפתיחות המחשבתית שאפשרה לנו לפתח גישה עצמאית ויצירתית לפתרון בעיות. בזכות הליווי שלכם הצלחנו ליהנות מהדרך ולא רק מהתוצאה הסופית, ולהפיק מהפרויקט חוויה לימודית ומשמעותית.

כמו כן, נרצה להודות לחברינו ללימודים על הסיוע, שיתוף הפעולה וההתייעצויות המקצועיות לאורך התהליך. לא אחת, שיחה קצרה או רעיון משותף הובילו אותנו לפתרונות יעילים יותר ולמחשבה רחבה ומעמיקה יותר. ההירתמות, הנכונות לעזור וההבנה ההדדית הפכו את הדרך למאתגרת, אך גם מפרה ומהנה.

לכולם – תודה על הליווי, האמון והידע, שהפכו את הפרויקט הזה להרבה מעבר למשימה אקדמית.

תוכן עניינים

5	1. מבוא	5
5	1.1. התפתחות הכספות	5
8	1.2. כספת אלקטרונית	8
9	1.3. הצורך	9
10	2. רכיבים בפרויקט - רקע	10
10	2.1. טיימר 555	10
12	2.2. רכיב 7 Segment	12
13	2.3. BCD to 7-segment	13
14	2.4. שער NOT	14
14	2.5. דלגלג D	14
15	2.6. מונה בינארי	15
16	2.7. אוגר הזזה	16
19	2.11 קודן חשמלי	19
19	2.12 ארדואינו	19
21	3. מטרת הפרויקט	21
21	3.1. תנאי התכנון	21
21	3.2. דרישות המערכת	21
22	4. תכנון המערכת	22
22	4.1. הסבר כללי על המערכת:	22
23	4.2. תת מערכת זיהוי קוד תקין	23
24	4.3. תת מערכת מנעול – פתיחה וסגירה	24
27	5. מימוש המערכת	27
28	5.1 מערכת 1 – זיהוי קוד תקין	28
30	5.2 מערכת 2 – מנעול – פתיחה וסגירה	30
32	5.3 מערכת 3 – זיהוי קוד שגוי	32
34	5.4 מערכת 4 – זיהוי 3 ניסיונות קוד שגוי	34
36	6. ניסויים ובדיקות	36
36	6.1. מערך הניסוי	36
37	6.2. מכשירי המדידה	37
37	6.3. רכיבי המערכת	37
38	6.4. בדיקת רכיבי המערכת	38
38	6.4.1. בדיקת לוח מקשים	38
39	6.4.2. בדיקת מערכת קוד תקין	39
40	6.4.3. בדיקת זיהוי קוד שגוי	40
41	6.4.4. בדיקת מערכת ספירה לאחור	41
42	6.4.5. בדיקת תגובת המערכת לקוד שגוי	42
43	7. תוצאות ומסקנות	43
43	7.1. תוצאות תאורטיות	43
43	7.1.1. תוצאות בדיקת לוח המקשים	43
44	7.1.2. תוצאות בדיקת מערכת קוד תקין	44
45	7.1.3. תוצאות בדיקת מערכת קוד שגוי	45
46	7.2. תוצאות מעשיות	46
46	7.2.1. תוצאות בדיקת לוח מקשים	46
47	7.2.2. תוצאות בדיקת קוד שגוי	47
48	7.2.3. תוצאות תקינות הבאזר	48

49	תוצאות בדיקת תקינות מערכת המנעול	7.2.4
50	תוצאות בדיקת מערכת ספירה לאחר	7.2.5
51	תוצאות בדיקת מערכת הטיימר 555 במצב סטבילי	7.2.6
52	8. בעיות תקלות ופתרונות	
52	8.1 בעיות מתח צף בלוח מקשים	
52	8.1.1 פתרון מתח צף בלוח מקשים	
52	8.2 בעיות ריטוטים בלחיצה	
53	8.2.1 פתרון ריטוטים בלחיצה	
54	8.3 בעיית מירוצים בדלגלג D	
54	8.3.1 פתרון בעיית מירוצים בדלגלג D	
54	8.4 בעיית טריגר קצר בטיימר 555	
54	8.4.1 פתרון בעיית טריגר קצר בטיימר 555	
55	9 . ארדואינו	
55	9.1 תכנון הארדואינו	
55	9.2 מימוש הארדואינו	
56	9.3 תוצאות הארדואינו	
57	9.4 קוד ארדואינו	
57	9.5 הגדרות ראשוניות של המערכת	
57	9.6 הגדרות התחלתיות של המערכת	
58	9.7 תנאים לסגירת הכספת	
59	9.8 ספירה לאחר של 5 שניות כאשר הכספת נפתחת	
59	9.9 קריאת קוד מהמשתמש	
60	9.10 טיפול בקוד תקין	
60	9.11 טיפול בקוד שגוי כללי	
60	9.11.1 טיפול בקוד שגוי כול פעם	
60	9.11.2 טיפול 3 פעמים קוד שגוי	
62	10 . שרטוט PCB	
63	11 נספחים	
64	12 רשימות	
64	12.1 רשימת איורים	
65	12.2 רשימת טבלאות	
65	12.3 רשימת נוסחאות	
65	12.4 רשימת מקורות	

1. מבוא

עם התפתחות החברה האנושית והמעבר לעולם דיגיטלי ותעשייתי, עלתה הדרישה לאמצעים שיבטיחו שמירה על פריטים חשובים ורגישים – הן ברמה האישית והן ברמה העסקית. הצורך בהגנה על נכסים, מידע וחפצים יקרי ערך הוליד פתרונות מגוונים, ששילבו עם השנים ידע טכנולוגי והנדסי. מערכות הנעילה המסורתיות, שהתבססו בעיקר על מפתחות ומנגנונים מכניים, פינו את מקומן לטכנולוגיות חדשניות שמבוססות על אלקטרוניקה, לוגיקה דיגיטלית וחיישנים חכמים. מערכות אלו מציעות לא רק אבטחה משופרת, אלא גם גמישות תפעולית ונוחות שימוש גבוהה יותר. הכספת האלקטרונית מהווה דוגמה ברורה לשילוב מוצלח בין צורך בסיסי להגנה, לבין פתרון טכנולוגי עכשווי. בפרק זה נסקור את הרקע הכללי שהוביל לפיתוחים מסוג זה, נעמוד על ההבדלים בין גישות האבטחה השונות לאורך השנים, ונתמקד באופן שבו המערכת שלנו מהווה חוליה נוספת בשרשרת ההתקדמות בתחום.

1.1 התפתחות הכספות

התקופה הקדומה וימי הביניים

השימוש המתועד הראשון בכספת מתוארך למאה ה-13 לפני הספירה, ונמצא על ידי ארכיאולוגים בקברו של פרעה רעמסס השני. הכספת הייתה עשויה מעץ וכללה פינים נעים שנפלו לתוך חורים כדי לנעול את הכספת – מנגנון דומה מאוד לזה הקיים בכספות מודרניות. במהלך תקופת הברונזה, כספות אלו ככל הנראה שימשו גם כאובייקטים למסחר, שכן גם האשורים פיתחו מנעול דומה לזה של המצרים לפני קריסת תקופת הברונזה. הכספות הללו נשמרו במקומות מוגנים במיוחד – לא רק כדי להגן מפני גנבים, אלא גם מפני שריפות. הרומאים החלו להשתמש בחומרי ברזל לחיזוק הכספות שלהם מפני אש וגניבה. הם השתמשו במנעולים למטרות מסחר, כדי להגן על סחורות, ופיתחו מנגנוני נעילה עם בליטות קבועות וחורי מפתח בעלי חריצים ייחודיים, כך שכל מנעול דרש מפתח מותאם אישית. במהלך ימי הביניים, הכספות ותיבות הנעילה היו עשויות לרוב מעץ וממתכת מחוזקת. אף שהיו דקורטיביות מאוד, רוב שיטות האבטחה התבססו על הטעיה והסחת דעת – מפתחות מורכבים, מנעולים מזויפים, מנעולים נסתרים ומנגנונים מרובים כיסו את חלקן החיצוני של רוב תיבות הנעילה כדי לבלבל פותחי מנעולים. עם זאת, מאחר והן היו עשויות מעץ, היה ניתן לפרוץ אותן בכוח פיזי פשוט יחסית.

המאה ה-18 ועד המאה ה-19 - עידן התעשייה

רק בעידן הנאורות החלו להופיע מתכתנים מקצועיים שהחליפו את נפחי הברזל המקומיים, והחלו לפתח חומרים חדשים ועמידים יותר. פלדה מחוזקת אפשרה ייצור כספות עמידות יותר בפני שריפות, לחות וגניבה.

עם זאת, רוב הבנקים, האוצרות והטירות שמרו מסמכים יקרי ערך בחדרים ממוגנים עם דלתות ברזל וקירות עבים, ולא בכספות פלדה – עקב נדירות החומר. השימוש הנרחב בפלדה החל רק באמצע המאה ה-19, כשיכולת הייצור ההמוני הפכה את הפלדה לחומר זמין יותר.

ב-1834, הממציא הבריטי ויליאם מאר תכנן את הכספת העמידה בפני אש הראשונה, עם קירות כפולים עשויים פלדה ושכבת בידוד בין הקירות שהורכבה משיש מרוסק, חימר ופורצלן. בן זמנו האנגלי תומאס מילנר שיפר את העיצוב על ידי שימוש באלום ובמלחים אלקליים שיצרו שכבת קיטור מבודדת בזמן חימום.

זו הייתה ההתפתחות המבנית הראשונה מאז תקופת רעמסס השני, ולא מנגנון נעילה מתוחכם. בשוודיה, התעשיין סמית פטר ראסמוסן החל לעסוק בנעילה ב-1847, ויורשו אדווין אלברט רוזנגרן הפך לאחד מיצרני הכספות המובילים באירופה בשנות ה-90 של המאה ה-19. בארה"ב, גוסטב מוסלר ופרד באהמן הקימו את חברת Mosler, Bahmann & Company שבסופו של דבר התפצלה לחברת Mosler Safe Company הידועה. גם האחים צ'ארלס וג'רמיה צ'אב (Chubb) קיבלו פטנט על כספת עמידה בפני פריצה והחלו בייצור סדרתי של כספות.

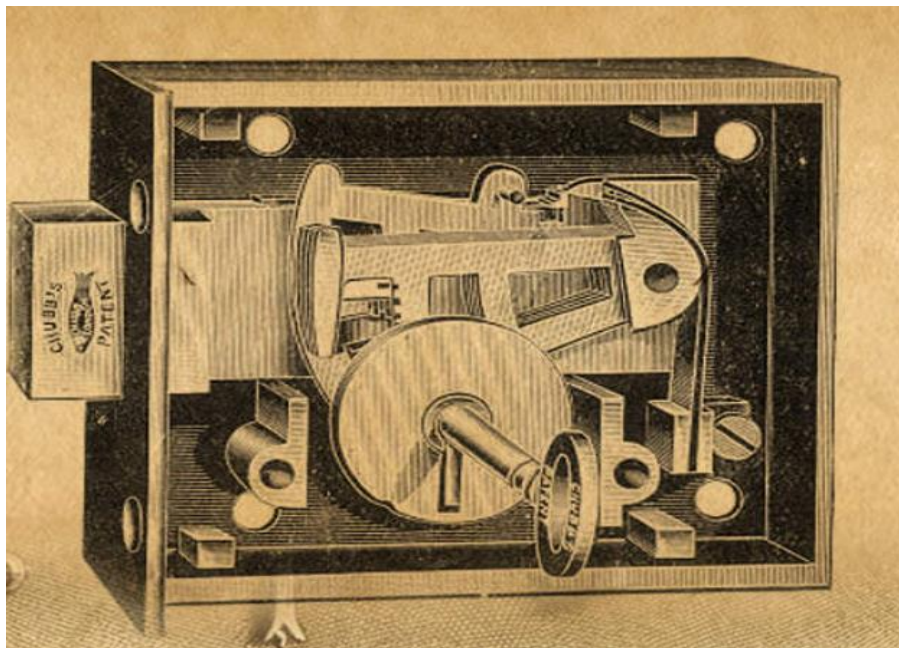
כמו כן, המהנדס האמריקאי אלי וויטני פיתח את הכספת עם מנגנון נעילה חדשני, שאפשר להן להיות עמידות יותר בפני פריצות. באותה תקופה, הכספות השתדרגו גם בעמידותן בפני אש, והיו שכבות בידוד של חומרים כמו אספלט ושעווה, שנועדו לשמור על חום החפצים שמאוחסנים בתוכן.

הקפיצה הטכנולוגית הבאה התרחשה בשנת 1917, כאשר ארגון Underwriters Laboratories (UL) פיתח מבחני תקינה ראשוניים לכספות. מבחנים אלו הובילו לשיפור משמעותי – בידוד טוב יותר, מנעולים מורכבים יותר, והבנה מדעית של מה מגן טוב יותר על תכולת הכספות. כספות בנקים מודרניות כוללות קירות בטון בעובי של יותר מ-30 ס"מ ומערכות נעילה מרובות. חברת Mosler אפילו שיווקה את מוצריה כעמידים בפני פיצוץ גרעיני, לאחר שכספת מתוצרתה שרדה את הפצצת הירושימה בבנק Teikoku - ארבע כספות של חברת Mosler שנמצאו במרתף הרוס של הבנק ממש סמוך למוקד הפיצוץ — נמצאו כשהתכולה שלהן נותרה שלמה לחלוטין.



איור 1 שרידי כספת שנבנתה ע"י חברת Mosler

ניסויי גרעיני שערכה ועדת האנרגיה האטומית האמריקאית בשנת 1957 באתר הניסויים הגרעיניים Frenchman Flat שבנבדה. הניסוי נועד לבדוק האם כספת תוכל לשרוד פיצוץ גרעיני. המבנה החלוד והניצב הוא דלת הכספת עצמה- ששרדה את הפיצוץ.



איור 2 מנגנון נעילה חכם קדום

שנרשם כפטנט בשנת 1818 ע"י ג'רמיה צ'אב מהסיבה שזיהה את ניסיון הפריצה. המפתח מרים כל אחת מהזרועות לגובה מדויק. אם אחת מהן מורמת יותר מדי, המנעול ננעל אוטומטית ומשוחרר רק באמצעות המפתח המקורי.

המאה ה-20 – פריצת דרך עם מנגנוני נעילה מתקדמים

בעוד שהכספות התחזקו מבחינת מבנה לאורך השנים, ההתקדמות המרשימה ביותר התרחשה דווקא בתחום המנעולים. כספות עם מנגנון קומבינציה (שילוב מספרים) החלו בהדרגה להפוך לכספות עם לוח מקשים במהלך המאה ה-20. כספות אלו אפשרו הזנה נוחה הרבה יותר של קוד מספרי, והיו עמידות לחלוטין בפני שיטות פריצה מסורתיות. אולם במאה ה-21, הכספות התקדמו אף יותר. כיום ניתן לרכוש כספות ביומטריות לבית, שנפתחות באמצעות טביעת אצבע, או כספות אלחוטיות שנפתחות דרך הטלפון הנייד.

1.2 כספת אלקטרונית

הכספת האלקטרונית הראשונה פותחה בשנת 1979 על ידי חברת Elsafe הנורווגית, במטרה לספק פתרון בטוח ונוח לשמירת חפצי ערך לאורחי מלונות. הכספת הראשונה כללה לוח מקשים להזנת קוד אישי – חידוש באותה תקופה – ונבנתה ממעטפת מתכת חזקה בשילוב רכיבים אלקטרוניים בסיסיים לשליטה על מנגנון הנעילה. רעיון זה התבסס על ההמצאה המוקדמת של טור סורנס ב-1975 – מנעול כרטיס מכני למלונות – שיצר את הבסיס למעבר לטכנולוגיות חכמות יותר. עם השנים התפתחו הכספות האלקטרוניות והחלו לכלול אמצעים כמו כרטיסים מגנטיים, RFID – טכנולוגיה לזיהוי אלחוטי של עצמים באמצעות גלי רדיו, מערכות ביומטריות, ואפשרות לניהול מרחוק באמצעות אפליקציות, לצד שיפורים בחומרה כמו מנגנוני נעילה מתקדמים, סוללות ארוכות טווח והתממשקות עם מערכות אבטחה חכמות. כיום, הכספות האלקטרוניות הן חלק בלתי נפרד ממערך האבטחה המודרני, לא רק בבתי מלון אלא גם בבתי פרטיים, עסקים ובמוסדות פיננסיים, כשהן מציעות שילוב בין בטיחות, נוחות ושליטה חכמה. כספת אלקטרונית טיפוסית בנויה מקופסה עשויה פלדה עבה מאוד ודלת עבה עוד יותר. הדלת ננעלת באמצעות בריח פלדה שמופעל על ידי מנגנון מכני – לרוב ידית סיבובית. מנגנון זה בנוי כך שסיבוב הידית בכיוון ההפוך לא יפתח את הכספת אם לא הוזן קוד נכון מראש. בין הרכיבים עיקריים המרכיבים את הכספות היום:

- **מקלדת** - להזנת קוד הפתיחה.
- **נוריות חיווי** - לדיווח על מצב הכספת – קוד שגוי, סוללה חלשה, פתיחה מוצלחת וכו'.
- **מפתח חירום** לגישה כאשר הקוד נשכח או הסוללה התרוקנה.
- **מיקרו-בקר** ליבת המערכת, מקבל את הקלט מהמקלדת, בודק אם הקוד נכון, ומפעיל את המנוע לפתיחה או נעילה של הבריח.
- **מנוע** - DC motor קטן או סולנואיד (סליל אלקטרומגנטי) שמזיז את הבריח מבפנים כאשר הקוד נכון כדי לסובב את המנגנון הפנימי שמזיז את הבריח.
- **חיישן אופטי** - בודק האם הדלת פתוחה או סגורה.
- **סוללה** - מספקת חשמל למערכת. נורית סוללה מתריעה כשהיא מתרוקנת.



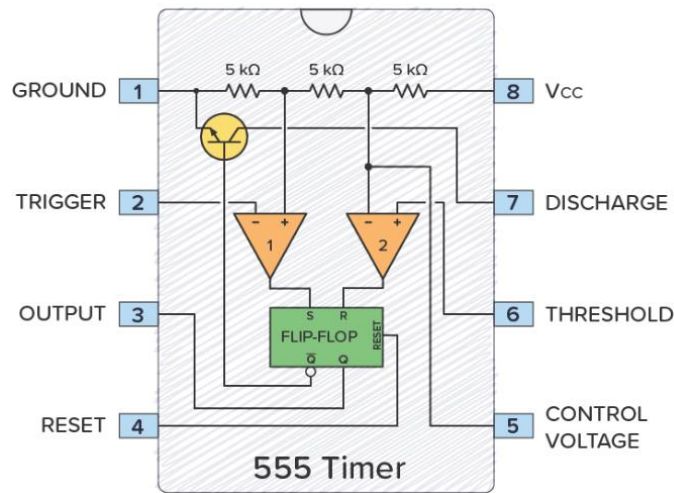
איור 3 - הכספת האלקטרונית הראשונה של חברת Elsafe שהוצגה בשנת 1979

1.3. הצורך

כיום רוב הכספות האלקטרוניות פועלות על מיקרו בקרים שמתוכנתים לתפעל את הכספת באמצעות ממשק תכנות. לעומת זאת, המערכת הנבנית במסגרת הקדם פרויקט הינה כספת אלקטרונית המכילה רכיבים אלקטרוניים פשוטים המחוברים ביניהם ליצירת תפעול הכספת הבקרה ושליטתה. היתרונות במערכת כספת אלקטרונית שאינה מבוססת על מיקרו-בקר אלא על מעגלים אלקטרוניים פשוטים הם רבים ומשמעותיים – מערכת כזו מתאפיינת באמינות גבוהה מאוד לאורך זמן כי אין בה תוכנה שיכולה לקרוס, אין באגים או בעיות תכנות ואין צורך באתחול או עדכונים. המערכת זולה בהרבה ממערכת מבוססת בקר, כי לא צריך לקנות מיקרו-בקר, לתכנת אותו או לנהל תהליך ייצור מסובך – כל ההתנהגות שלה מוגדרת ישירות לפי החיבורים במעגל, כך שהיא גם קלה יותר לאיתור תקלות ולתחזוקה. לעומת זאת, בכספות שפועלות כיום עם מיקרו-בקר, ישנם חסרונות כגון סיכון לתקלות בתוכנה שעלולות למנוע פתיחה גם אם הוזן הקוד הנכון, חשש מפריצות דרך ממשק התכנות או גישה לזיכרון פנימי, תהליך הפעלה מורכב יותר שדורש כתיבה של קוד ותיעוד, ולעיתים גם תלות בשפה מסוימת או בספק מסוים. גם מבחינת עלויות, כספת כזו דורשת רכיבים יקרים יותר וזמן פיתוח ארוך יותר, דבר שפוגע ביעילות ובפשטות של מערכת שאמורה להיות קודם כל אמינה ובטוחה.

2. רכיבים בפרויקט - רקע

2.1. טיימר 555



איור 4 – זמן 555

זמן (טיימר) הוא רכיב אלקטרוני שיוצר השהיה או פולסים לפי תזמון קבוע מראש. הרכיבים הפנימיים בטיימר 555 כוללים שלושה משוויים שמשווים את מתח הקבל לערכי ייחוס, פליפ-פלופ מסוג SR ששומר את מצב היציאה (דלוק או כבוי), טרנזיסטור פריקה שמרוקן את הקבל כשהמעגל דורש את זה, ורשת של נגדים פנימיים שמחלקת את המתח לצורך השוואה. כל אלה יחד יוצרים מעגל שמגיב לטעינה ולפריקה של הקבל, וכך קובע מתי לשנות את מצב היציאה.

רגל 1: הארקה.

רגל 2: מפעילה את המחזור כשהמתח בה יורד מתחת לסף מסוים.

רגל 3: מוצא הרכיב אחראי מוציא את הפולס.

רגל 4: איפוס הרכיב.

רגל 5: מאפשרת שליטה פנימית.

רגל 6: מסמנת מתי המחזור מסתיים לפי מתח הקבל.

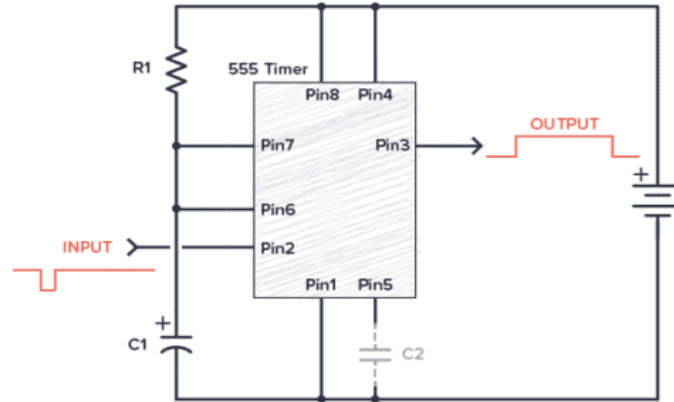
רגל 7: אחראית לפרוק את הקבל כדי להתחיל מחזור חדש.

רגל 8: מתח אספקה חיובי של הרכיב.

לזמן 555 יש 2 מצבים שונים הנקבעים לפי חיבוריו:

מצב מונוסטבילי – פולס חד פעמי (Monostable)

במצב הזה, הטיימר נותן פולס אחד בכל פעם שמתקבל טריגר. אחרי שהפולס מסתיים, הוא חוזר למצב ההתחלתי עד לטריגר הבא.



איור 5 – זמן 555 במצב מונוסטבילי

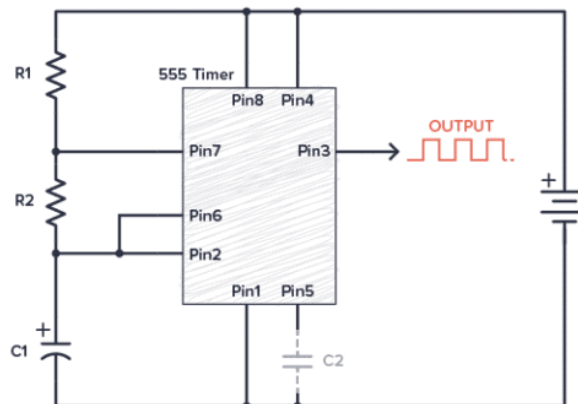
משך זמן הפולס מתואר ע"י הנוסחה הבאה :

משוואה 1 משך זמן הפולס במצב מונוסטבילי

$$(1) T = C1 \cdot R1 \cdot 1.1$$

מצב אסטבילי – גל ריבועי מתמשך (Astable)

במצב הזה, הטיימר מייצר גל ריבועי קבוע (דופק עולה ויורד לסירוגין), ללא צורך בטרנזיסטור חיצוני – רק טריגר אחד חד פעמי.



איור 6 – זמן 555 במצב אסטבילי

משך זמן פולס במצב גבוה מתואר ע"י הנוסחה הבאה :

$$(2) T_{HIGH} = C \cdot (R1 + R2) \cdot 0.693$$

משוואה 2 משך זמן הפולס במצב גבוה אסטבילי

משך זמן פולס במצב נמוך מתואר ע"י הנוסחה הבאה :

$$(3) T_{LOW} = C \cdot R2 \cdot 0.693$$

משוואה 3 משך זמן בפולס במצב נמוך אסטבילי

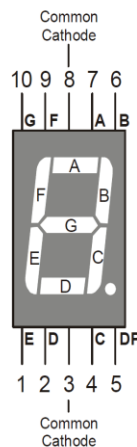
תדר האות במצב אסטבילי נקבע ע"י הנוסחה הבאה :

$$(4) f = \frac{1.44}{c \cdot (R1 + 2R2)}$$

משוואה 4 תדר אות המוצא של הזמנ במצב אסטבילי

במערכת שלנו, רוב תתי המערכות מכילות זמנ במצב מונוסטבילי בהתאם לדרישות המערכת, מלבד חלק המערכת הנדרש לספור לאחר את זמן פתיחת המנעול, במצב זה הזמנ שחובר חובר בתצורת אסטבילי בתדר של 1Hz כלומר פולס אחד בכל שניה.

2.2 רכיב 7 Segment



איור 7-7 segment

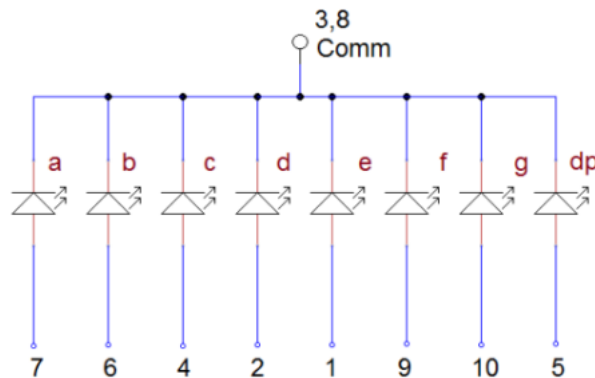
תצוגת 7-segment היא רכיב אלקטרוני שמציג ספרות (0-9) בצורה חזותית, בעזרת שבע נורות LED קטנות שמסודרות בצורת הספרה 8. כל "פס" (סגמנט) מסומן באותיות a עד g ואפשר להדליק כל אחד

מהם בנפרד. כדי להציג ספרה מסוימת – מדליקים רק את הפסים שצריך. למשל, בשביל להציג את הספרה 3 מדליקים את הסגמנטים a, b, c, d, g. יש שני סוגים של תצוגות כאלה:

- **Common Cathode** – כל ה-LEDs מחוברים יחד לקתודה (שלילי)

- **Common Anode** – כולם מחוברים לאנודה (חיובי)

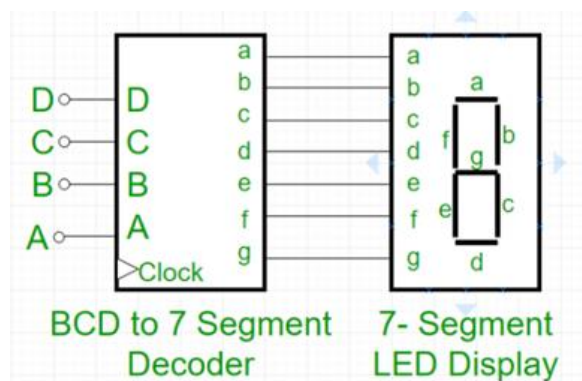
במערכת שלנו נעשה שימוש ב- **Common Cathode**.



איור 8 - חיבור הלדים ב-7-segment בשיטת Common Cathode

2.3 BCD to 7-segment

מפענח הוא רכיב דיגיטלי המורכב מ- n כניסות ו- n^2 יציאות. הרכיב מקבל קלט דיגיטלי בפורמט BCD (מספרים מ-0 עד 9 בקוד בינארי), וממיר אותו לפלט שמדליק את הפסים הנכונים בתצוגת 7-segment.



איור 9 - חיבור בין יציאות המפענח לכניסות 7-segment כדי לקבל את תצוגת המספרים.

טבלה 1 טבלת אמת לרכיב BCD to 7 segment

INPUT CODE				OUTPUT STATE							DISPLAY
A	B	C	D	a	b	c	d	e	f	g	
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	6
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	9

2.4. שער NOT

הפלט של הרכיב יהיה היפוך של הכניסה שלו.

טבלה 2 טבלת אמת של שער NOT

INPUT	OUTPUT
A	
0	1
1	0

2.5. דלגלג D

דלגלג הינו רכיב המסוגל לשמור סיבית אחת ומושפע מעליית שער. דלגלג D הוא רכיב זיכרון דיגיטלי ששומר את הערך שנמצא בקלט D ברגע שמתקבלת עליית שער.

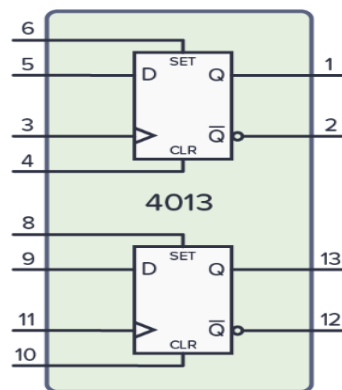
אם $D = 1$ בדיוק כשהשער עולה אז Q יהפוך ל-1

אם $D = 0$ כשהשער עולה Q יהפוך ל-0

עד שהשער יעלה שוב – הפלט Q יישאר קבוע, גם אם D משתנה. וזה מה שהופך את הרכיב לרכיב שומר זיכרון.

טבלה 3 טבלת האמת של דגלג D

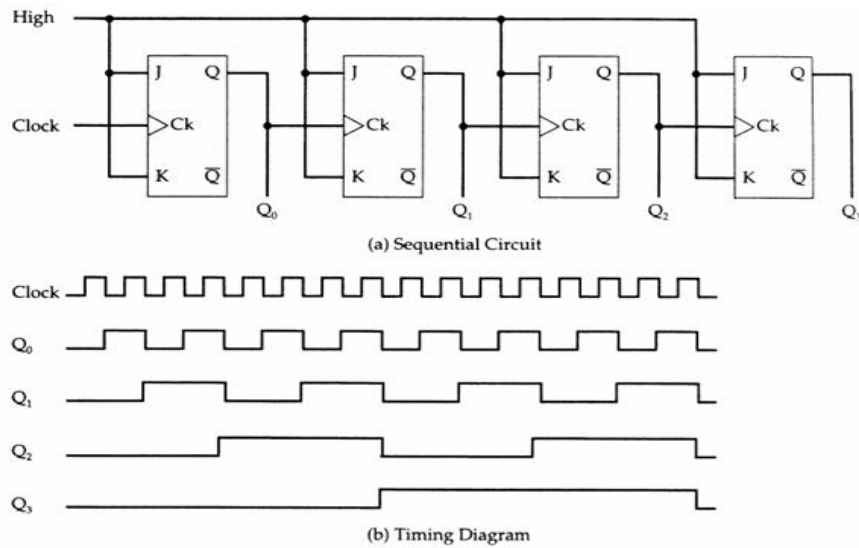
Clk	Q(t-1)	D	Q(t)
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1



איור 10 - רכיב CD4013 מכיל 2 דלגלגי D נפרדים

2.6. מונה בינארי

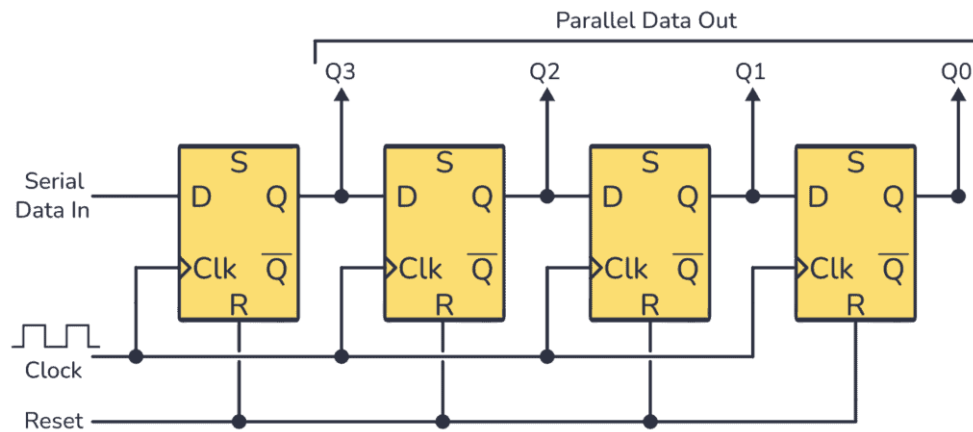
מעגל דיגיטלי שסופר בפורמט בינארי – כלומר, הוא מעלה את הערך שלו באחד בכל פעימת שעון. מונה בינארי בנוי מכמה דלגלגים, שכל אחד מהם שומר ביט אחד. כל פעם שמגיע אות שעון – הדלגלגים משנים את מצבם בצורה מסודרת כדי לספור קדימה בבינארי. ניתן לתכנן את המונה לספור מלמעלה או מלמטה וכן להתחיל ממספר מסוים.



איור 11 - שרטוט מעגל פנימי במונה בינארי ואותות המוצא שלו

2.7. אוגר הזזה

אוגר הזזה הוא מעגל דיגיטלי שמורכב ממספר דלגלגים (בדרך כלל מסוג D) שמסודרים בטור. הוא משמש להעברת ביטים (0 או 1) מצד אחד של המעגל לשני. כל פעם שמגיע אות שעון, כל ביט זז מקום אחד – מה שנמצא בקלט נכנס פנימה, והביט האחרון יוצא החוצה. כך אפשר להזיז מידע בתוך המעגל.

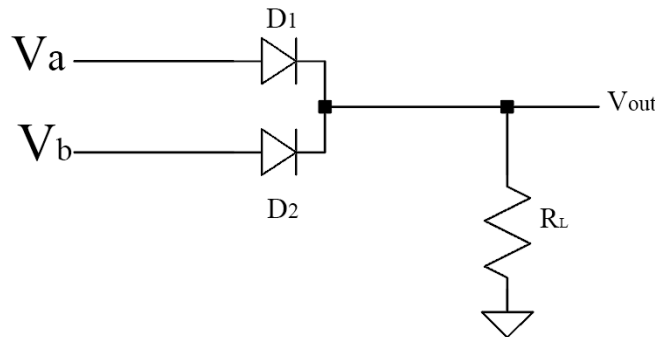


איור 12 - מבנה פנימי של אוגר הזזה

2.9 שער OR מדיודות

שער OR הוא שער לוגי שמחזיר 1 אם לפחות אחד מהקלטות הוא 1. רק אם כל הקלטים הם 0, הפלט יהיה 0.

לכן אם ניקח לפחות 2 דיודות ונחבר בין המוצאים שלהם לנקודה משותפת, הנקודה הזו תהווה את המוצא של השער הלוגי OR. הדבר נובע מהסיבה שגם אם אחת מהדיודות תוליך זרם, הזרם יגיע לאותה נקודה כי היה מקור שממנו הוא יוכל להגיע אליה.

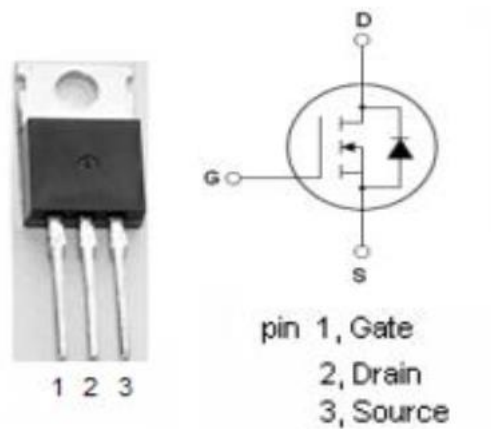


איור 13 - שער לוגי OR כאשר המוצא של השער הוא החיבור בין הנגד למוצא הדיודות

2.10 טרנזיסטור MOSFET

ה-MOSFET (ראשי תיבות של Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) הוא רכיב אלקטרוני מבוסס שדה חשמלי, המשמש באלקטרוניקה לשליטה בזרם. הוא בנוי משלושה חיבורים עיקריים: Gate, Drain ו-Source. כאשר מופעל מתח על ה-Gate, נוצר שדה חשמלי שמאפשר או מונע זרימת זרם מה-Drain ל-Source. קיימים שני סוגים עיקריים של MOSFET: NMOS, שנפתח במתח גבוה, ו-PMOS, שנפתח במתח נמוך. השימושים ב-MOSFET מגוונים מאוד – החל ממתגים אלקטרוניים במעגלים ועד מגברי אות בעקבות יכולתו לעבוד ביעילות גבוהה ובמהירויות גבוהות. בניסוי זה נשתמש בטרנזיסטור הספק - IRFB7546 מסוג NMOS. מה שמיוחד בו הוא שהוא יכול להכיל עד 75A של זרם ו-60V של מתח מבלי להישרף. רגלי הטרנזיסטור:

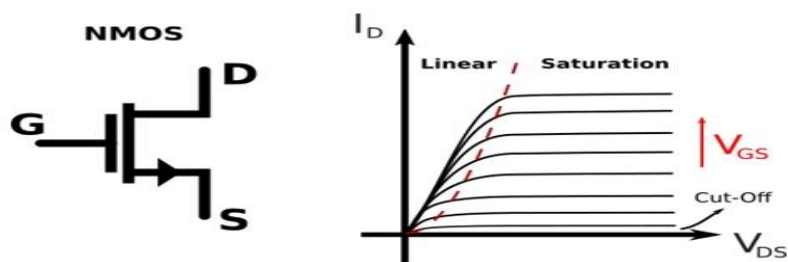
- Gate (G): כניסת הבקרה – שליטה על מצב ההולכה של הטרנזיסטור.
- Drain (D): יציאה – דרכה זורם הזרם מהעומס.
- Source (S): כניסת הזרם – מחוברת לרוב לאדמה במעגלים סטנדרטיים.



איור 14 – טרנזיסטור הספק IRFB7546

טבלה 4 – תחומי פעולה של NMOS

Operation Mode	Type	Condition	Equation
Cut-Off	NMOS	$V_{GS} < V_{TH}$	$I_D = 0$
	PMOS	$ V_{GS} < V_{TH} $	$I_D = 0$
Linear	NMOS	$V_{GS} \geq V_{TH}$ $V_{DS} \leq V_{GS} - V_{TH}$	$I_D = K_n(2(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - V_{DS}^2)$
	PMOS	$ V_{GS} \geq V_{TH} $ $ V_{DS} \leq V_{GS} - V_{TH} $	$I_D = K_p(2(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - V_{DS}^2)$
Saturation	NMOS	$V_{GS} \geq V_{TH}$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$	$I_D = K_n(V_{GS} - V_{TH})^2(1 - \lambda V_{DS})$
	PMOS	$ V_{GS} \geq V_{TH} $ $ V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH} $	$I_D = K_p(V_{GS} - V_{TH})^2(1 - \lambda V_{DS})$



איור 15 – גרף עבודה של טרנזיסטור NMOS

2.11 קודן חשמלי

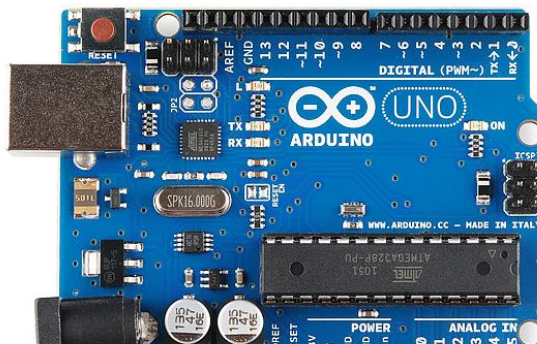
הקודן בו נעשה שימוש בפרויקט הוא קודן חשמלי מסוג 3x4 כלומר בעל ארבע שורות ושלוש עמודות, בסך הכול 12 מקשים – הכוללים את הספרות 0 עד 9 וכן את התווים "*" ו"#". מדובר בקודן ייחודי מסוגו, אשר כולל 13 פינים: אחד להזנת מתח (VCC) ועוד 12 פינים, שכל אחד מהם משויך ישירות לאחד מהמקשים. כל מקש פועל כלחצן עצמאי – כך שלחיצה עליו מפעילה את הפין המתאים ומוציאה ממנו מתח גבוה (HIGH) לרוב 5 וולט.



איור 13 - קודן חשמלי 3x4

2.12 ארדואינו

Arduino היא פלטפורמה אלקטרונית פתוחה המיועדת לפיתוח מערכות משובצות מחשב תוך שילוב בין חומרה לתוכנה. הפלטפורמה מבוססת על לוח אלקטרוני הכולל מיקרו-בקר ממשפחת ATmega ובנוסף חיבור USB כניסות ויציאות דיגיטליות ואנלוגיות, וכן אפשרות לחיבור רכיבים חיצוניים כגון חיישנים, לדים, ממסרים, מנועים ועוד. לצד הלוח הפיזי קיימת סביבת פיתוח תוכנה פשוטה המאפשרת כתיבת קוד בשפה המבוססת על ++C והעלאתו אל הלוח בצורה מהירה ונוחה. השימוש בארדואינו נפוץ במיוחד באקדמיה ובתעשייה לצורך פיתוח אבי-טיפוס, פרויקטים לימודיים ומערכות אוטונומיות, בזכות פשטות השימוש, זמינות רחבה של רכיבים תואמים, קהילה תומכת, וקוד פתוח. בפרויקטים המשלבים בקרה דיגיטלית, הארדואינו משמש כיחידת בקרה מרכזית, אשר קוראת נתונים מרכיבי קלט, מבצעת עיבוד בהתאם ללוגיקה המתוכנתת מראש, ושולטת ברכיבי הפלט בהתאם למצב המערכת.



איור 17 - כרטיס של הארדואינו

רשימת ציוד

טבלה 4 רשימת ציוד

כמויות	קבלים	כמויות	נגדים	כמויות	רכיבים	
8	100nF	24	220Ω	4	TIMER	555
3	100μF	22	10kΩ	2	D-FF x2	4013
1	47μF	1	47kΩ	1	x2 אוגר הזזה	4015
1	4.8μF	1	4.8kΩ	1	AND x4	4081
1	4.7μF	1	30kΩ	1	מונה בינארי	4516
		1	12kΩ	1	7-segment decoder	4543
				1	טרנזיסטור הספק	IRFB7546
				16	דיודה	1N4001
				1	NOT x6	4049
				6	LED	
				1	7-segment	
				1	BUZZER	
				1	קודן 3X4	
				1	מטריצה	
					חוטי קצר	

3. מטרת הפרויקט

לפרויקט כמה מטרות. ראשית, לתכנן ולבנות מערכת נעילה אלקטרונית מאובטחת לכספת, שתספק רמת הגנה ותאפשר שליטה נוחה ונגישה על פתיחה ונעילה של הכספת. כמו כן, הפרויקט נועד עבורנו הסטודנטים, ליישום של החומר הלימודי בפועל, לפתח יכולות תכנון הנדסי, להתנסות בעבודת צוות ובהצגת פרויקט בצורה מקצועית על מנת לבצע הכנה לתעשייה ולראיונות עתידיים.

3.1 תנאי התכנון

תנאי הפרויקט התבצעו בהתאם להגבלות המכשור במעבדה והרכיבים האלקטרוניים הקיימים בה למימוש המערכת. כמו כן, המערכת הוגבלה לתכנון של עד 15 רכיבים אלקטרוניים ומרחב עבודה על גבי מטריצה בגודל סופי דרש מאיתנו להתנהל בצורה יעילה ומוגבלת. בנוסף, נדרשנו להגיש את הפרויקט במגבלת הזמן של הסמסטר.

3.2 דרישות המערכת

הכספת תפתח רק כאשר הוזן קוד בעל שלוש ספרות נכונות שאלו הן 3 הספרות האחרונות של הת"ז של אחד מבני הזוג.

ניתן להניח שנלחץ על מספר אחד בלבד בכל לחיצה.

מערכת 1 – כאשר הוקש קוד נכון:

- הכספת תפתח

- יידלק LED 1 למשך 5 שניות

מערכת 2 – המנעול :

- עובד על 12V ו-1A

- הכספת תינעל באמצעות לחיצה על אחד המקשים "*" או "#" במקלדת (גם אם דלת הכספת פתוחה)

- הכספת תינעל לאחר 5 שניות – אם פתחו את דלת הכספת

- יש להציג ספירה לאחר של 5 שניות עד לנעילת הכספת

מערכת 3 – כאשר הוקש קוד שגוי:

- הכספת לא תפתח

- יידלק LED 2 למשך שניה

מערכת 4 : במידה ונלחץ 3 פעמים קוד שגוי:

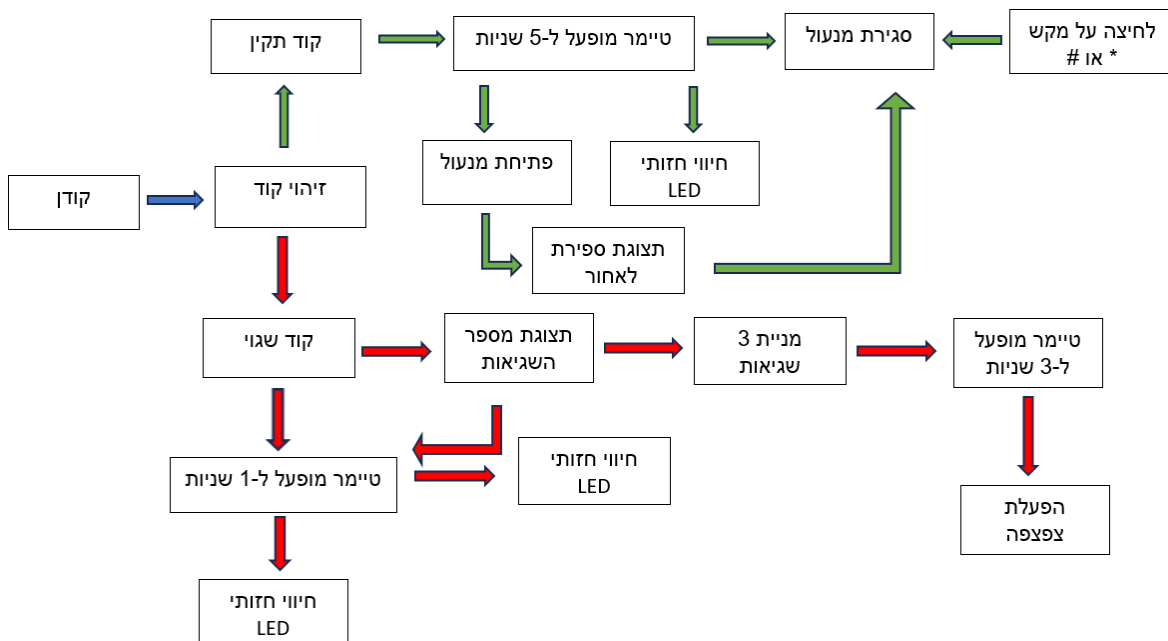
- תדלק צפצפה למשך 3 שניות

- LED 3 תלך למשך שניה

- יש להציג את מספר הפעמים שנלחץ קוד שגוי

4. תכנון המערכת

להלן סכמת בלוקים המתארת את תכנון המערכת :



איור 14 - סכמת בלוקים של כלל המערכת

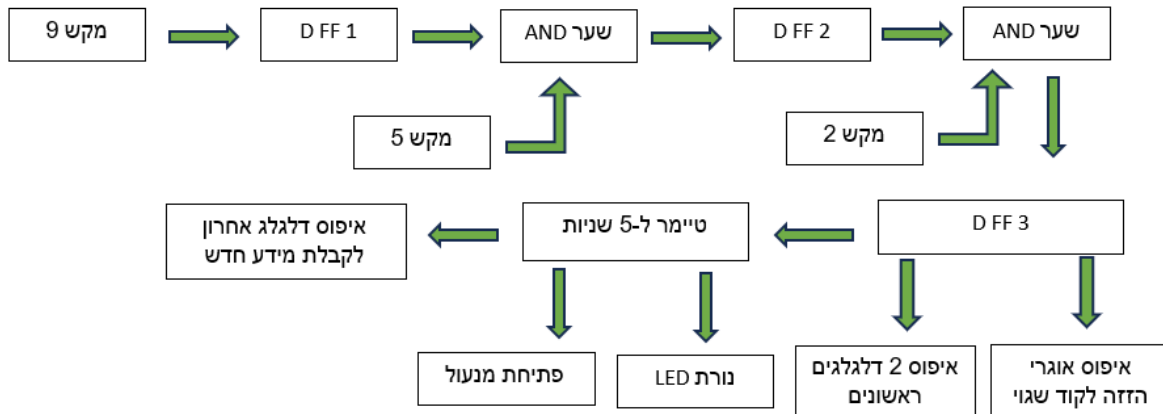
כפי שניתן לראות הכספת מקבלת את הקוד מהמשתמש דרך הקודן, באמצעות מעגלים אלקטרוניים פשוטים המערכת קובעת האם הקוד תקין או לא ולפי כך מבצעת פעולות על המנעול, חיווי חזותי (נורות, תצוגת מספרים) וקולי (צפצפה).

4.1 הסבר כללי על המערכת:

המערכת שתוכננה היא מערכת כספת אלקטרונית פשוטה, המחולקת לשלושה חלקים : קלט, עיבוד ופלט. המשתמש מזין קוד דרך הקודן, עבור הזנת קוד תקין כל לחיצה מפעילה דלגלג D. שערים לוגיים מחוברים בין הדלגלגים ומשווים את הקלט לקוד התקין שנקבע מראש. הקוד התקין מדליק נורה לחיווי חזותי והכספת נפתחת ל-5 שניות עם תצוגת ספירה לאחור. לחיצה על כפתור מיוחד ("*" או "#") מאפשרת סגירה מוקדמת של המנעול.

במקרה של הזנת קוד שגוי, לחיצות המקשים נשמרות באוגר הזזה, שמדליק נורת אזהרה. שלוש הזנות רצופות של קוד שגוי נשמרות באוגר נוסף שאחראי על הפעלת אזעקה ונעילה זמנית של המערכת. לאחר כל ניסיון – תקין או שגוי – המערכת מתאפסת ומוכנה לקלט חדש.

4.2 תת מערכת זיהוי קוד תקין



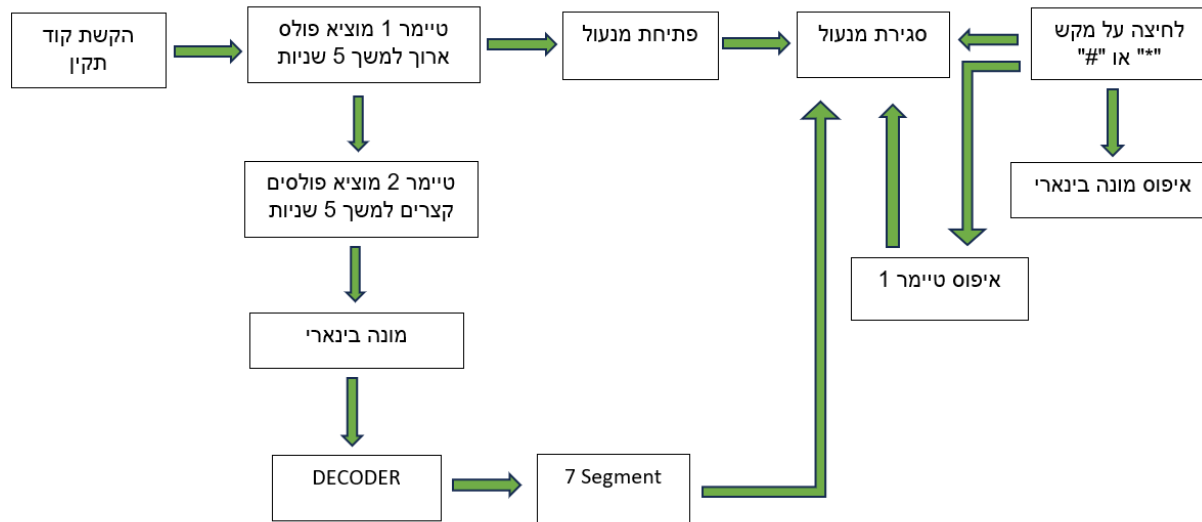
איור 15 סכמת בלוקים מערכת קוד תקין

תת מערכת זו אחראית על זיהוי של 3 ספרות בסדר הבא $2 \rightarrow 5 \rightarrow 9$ והיא בנויה משרשר של דלגלי D עם שערי AND. דלגלי D מקבלים מתח קבוע בכניסה לקלט D כך שהיציאה שלהם נשלטת על סמך עליית השעון שהם מקבלים מהמקשים. זיהוי הקשת הקוד הנכון בסדר הנכון מתבצע כך:

מקש הספרה 9 מחובר לשעון של הדלגלג הראשון, כך שבלחיצה על המקש 9 הדלגלג יוציא 1 במוצא. הדלגלג הראשון מחובר לכניסה לשער AND ביחד עם המוצא של מקש הספרה 5. היציאה של השער הלוגי מחובר לשעון של דלגלג שני נוסף שהמוצא שלו יעלה ל-1 לוגי רק כאשר נלחץ על הספרה 5 אחרי הספרה 9. המוצא של הדלגלג השני מחובר לכניסה לשער AND נוסף ביחד עם היציאה של מקש הספרה 2, היציאה של השער הלוגי מחובר לשעון של דלגלג שלישי ואחרון שהמוצא שלו יעלה ל-1 לוגי רק כאשר נלחץ על הספרה 2 אחרי הספרה 5. מוצא הדלגלג השלישי מאפס את אוגרי ההזזה כך שהמערכת תדע שמדובר בקוד תקין ומפעיל את הטיימר שמחובר כך שיפעל 5 שניות. בנוסף מאפס את שני הדלגלגים הראשונים שיוכלו לקבל מידע חדש. הטיימר מחובר למנעול ולנורת ה-LED כך שברגע שהוא פועל, המנעול נפתח והנורה נדלקת. סיום פעולת הטיימר מביאה לאיפוס הדלגלג האחרון לקבלת מידע חדש מהמשתמש.

בצורה הזו אנו מבטיחים הקשה של הספרות הנכונות בסדר הנכון בהכרח, כדי שכל התהליך יושלם ונקבל 1 לוגי במוצא הדלגלג האחרון שיפעיל לנו את שרשרת הפעולות המתקבלות מהזנת קוד תקין (חיווי חזותי, פתיחת הכספת וכו')

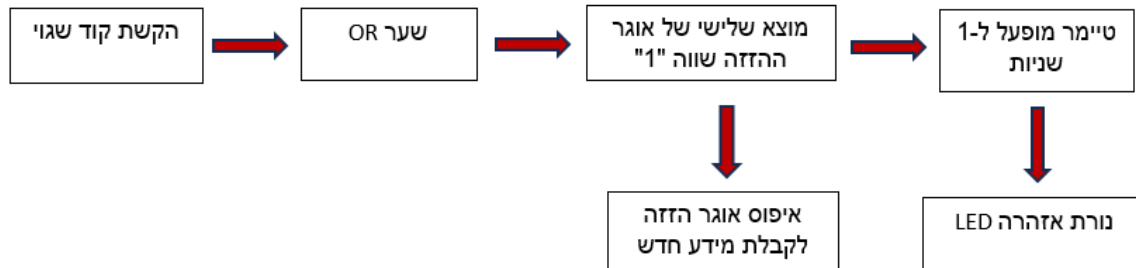
4.3 תת מערכת מנעול – פתיחה וסגירה



איור 16 - סכמת בלוקים לתת מערכת המנעול

תת מערכת זו אחראית על התנאים לפתיחה וסגירה של המנעול במערכת. החלק של פתיחת המנעול מתבצע לאחר שהוזן קוד תקין. הכספת נפתחת למשך 5 שניות באמצעות הפעלת טיימר שמוציא פולס רציף שמופעל מתת מערכת קוד תקין. הטיימר הזה מפעיל טיימר נוסף, שאחראי להוציא פולסים קצרים בודדים במשך 5 שניות. הפולסים הללו מפעילים את המונה הבינארי שמבצע את הספירה לאחור מהספרה 5 בייצוג בינארי. המוצאים של המונה מחוברים לכניסות של מפענח, שבהתאם למוצאי המונה המתקבלים בספירה, מוציא "1" לוגי בחלק מיציאותיו, שמחוברות לכניסות רכיב 7 segment. בהתאם לכניסות הללו מתבצעת הארה של נורות LED ברכיב שמרכיבות את תצוגת המספר. בהתאם לדרישות המערכת נוספה אופציה לסגירה ידנית של המנעול כאשר הוא פתוח, באמצעות לחיצה על המקשים "*" או "#". לכן במידה והמשתמש בוחר לסגור ידנית את הכספת מבלי לחכות לסגירה האוטומטית, עליו לחוץ באחד מהמקשים הללו שיגרמו בעזרת שערים לוגים, לאיפוס של הטיימר השולט על פתיחת המנעול, והמונה ששולט על הספירה לאחור של רכיב 7 segment. ובמצב זה המנעול ייסגר ותצוגת הספירה לאחור תחזור לתצוגת "0". באמצעות תת מערכת זו המשתמש יודע מתי המנעול נסגר ויכול לשלוט על סגירתו.

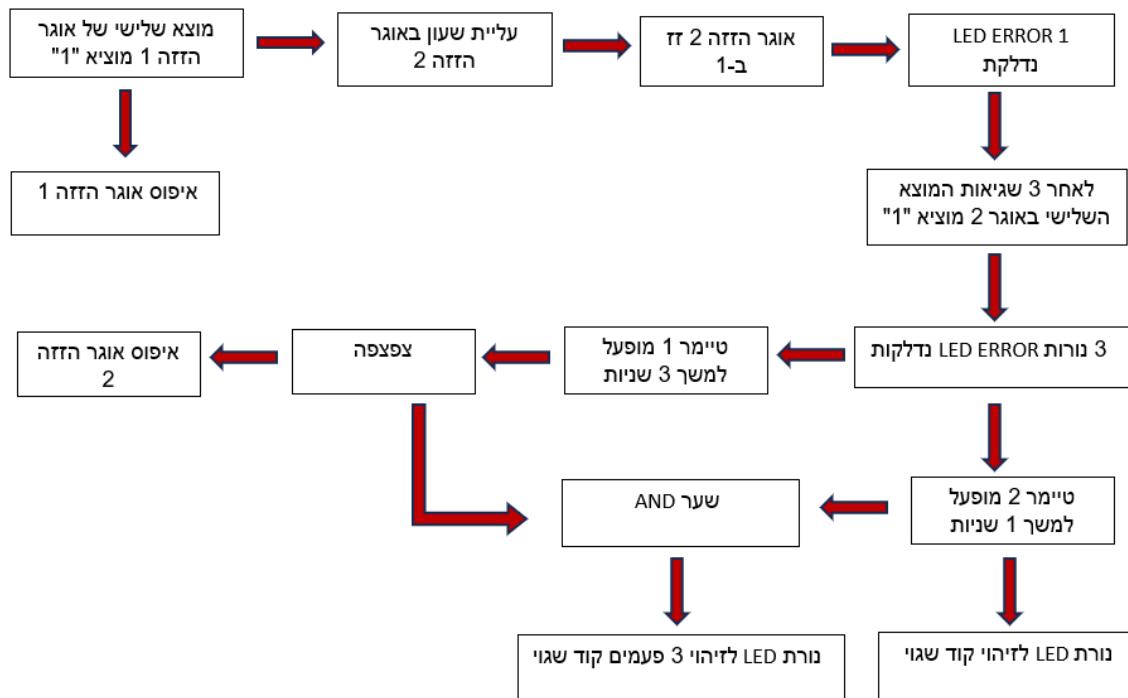
4.4 תת מערכת זיהוי קוד שגוי



איור 17 סכמת בלוקים לתת מערכת זיהוי קוד שגוי

תת מערכת זו אחראית לזיהוי הקשת קוד שגוי ע"י המשתמש. כל המקשים מחוברים לכניסות של שער לוגי OR (איור 13) ומוצא השער מחובר לשעון של רכיב אוגר ההזזה (איור 12). כניסת המידע של אוגר ההזזה מחוברת לספק כוח כך שהשער הוא זה ששולט על פלט האוגר. המשתמש מזין קוד שגוי בכניסה לשער הלוגי, כך שעבור כל ספרה שהוזנה בקוד, השער הלוגי מוציא "1" לוגי במוצא, שגורם לפלט "1" לוגי שמוזז באוגר הזזה עד שמגיע למוצא השלישי באוגר. המוצא השלישי מחובר לטיימר (איור 1) הפועל שניה אחת ומפעיל נורת LED לאזהרה על הזנת קוד שגוי למשתמש. כמו כן המוצא השלישי באוגר מחובר לרגל איפוס האוגר כדי לאפשר קבלת מידע חדש מהמשתמש. באמצעות תת מערכת זו המשתמש יודע שהזין קוד לא תקין ומקבל הזדמנות נוספת להזנת קוד חדש.

4.5 תת מערכת 3 פעמים קוד שגוי

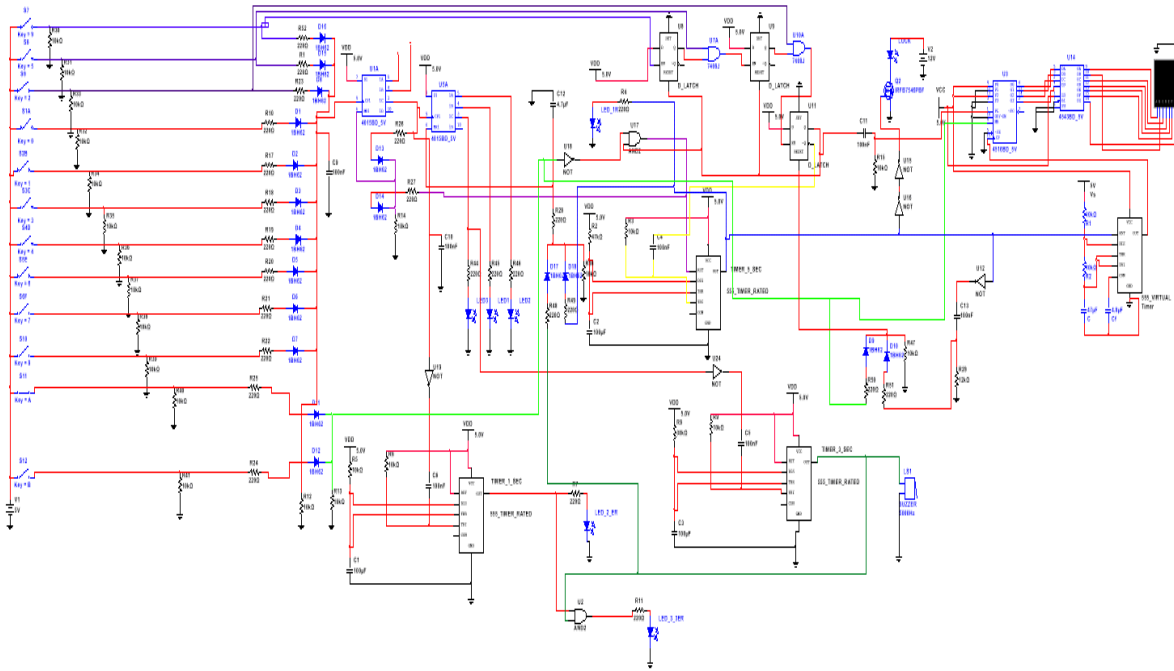


איור 18 סכמת בלוקים לתת מערכת זיהוי 3 נסיונות קוד שגוי

תת מערכת זו אחראית על זיהוי והתראה של שלושה ניסיונות הזנת קוד שגוי. המערכת מתחילה את פעולתה כאשר המשתמש הזין קוד שגוי שגרם למוצא השלישי של אוגר ההזזה הראשון, שאחראי על זיהוי קוד שגוי, פלט של "1" לוגי. כתוצאה מכך האוגר מאפס את עצמו לקבלת מידע חדש מהמשתמש ומעביר את הפלט להפעלת השעון באוגר הזזה השני, שאחראי על זיהוי 3 ניסיונות שגויים. כניסת המידע של אוגר ההזזה השני מחוברת לספק כוח כך שהוא מוציא מידע בפלט ברגע שמקבל מידע מכניסת השעון שלו. מוצא האוגר השני מוציא פלט של "1" לוגי שמוזז בין מוצאיו עבור כל צירוף של קוד שגוי, שמוזן ע"י המשתמש. ולכן, כדי להציג את מספר הניסיונות השגויים של המשתמש השתמשנו ב-3 נורות LED שמחוברות לכל אחד משלושת המוצאים של האוגר השני. הנורה שמחוברת למוצא השלישי של האוגר השני, מייצגת 3 שגיאות בהזנת הקוד, מחוברת לטיימר שמוציא פולס אחיד במשך 3 שניות שמפעיל את הצפצפה. בעת הפעלת הצפצפה נשלח אות לשער לוגי שגורם להדלקת הנורה לזיהוי 3 השגיאות. נורה לזיהוי קוד שגוי מחוברת כמתואר בתת מערכת לזיהוי קוד שגוי ולכן נדלקת בכל מקרה למשך שניה עבור כל הזנה של קוד שגוי.

5. מימוש המערכת

להלן מימוש המערכת בתוכנת Multisim :

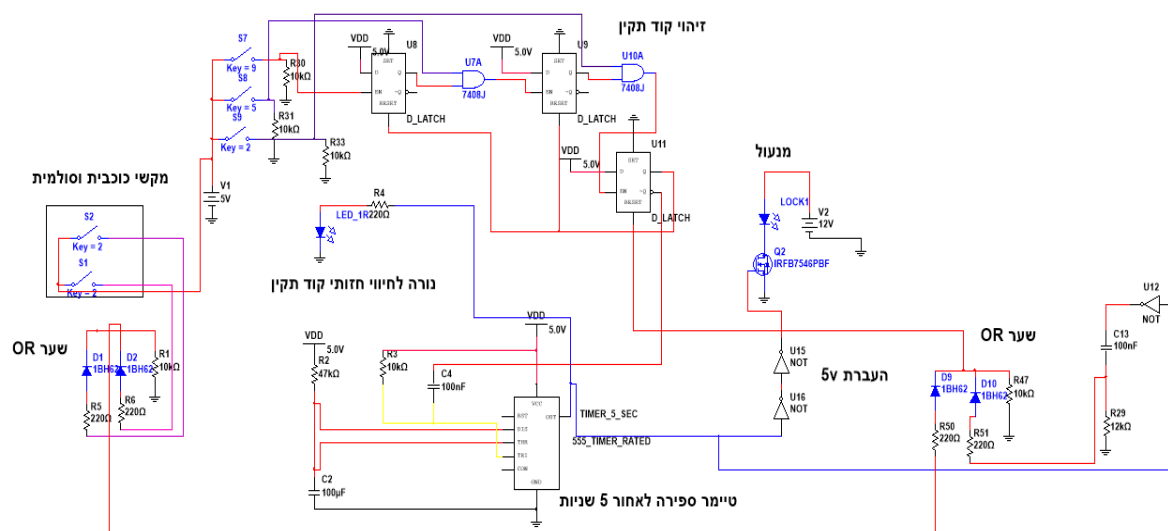


איור 19 סימולציה של כל המערכת ב-Multisim

חלק זה של הפרויקט התמקד במימוש ובניית התכנון של כספת אלקטרונית על גבי תוכנת סימולציה ולאחר מכן מטריצת חיבורים המבוססת על שילוב של ארבע תת-מערכות עיקריות : מערכת קלט (לוח מקשים), מערכת עיבוד (הכוללת מעגל לוגי ורכיבים אלקטרוניים), מערכת בקרה ותצוגה (לד/צפצפה), ומערכת נעילה (מנעול).

המערכת כולה נבנתה על גבי מטריצת חיבורים תוך שימוש ברכיבים אלקטרוניים בסיסיים. כל תת-מערכת תוכננה כך שתעבוד באופן עצמאי אך גם תשתלב בצורה הרמונית עם שאר החלקים, ליצירת כספת שפועלת באופן אמין ומגיבה באופן נכון לקוד הקלט. במהלך העבודה הושם דגש על תגובתיות והתאמה למגבלות החומרה והדרישות שהוגדרו מראש.

5.1 מערכת 1 – זיהוי קוד תקין



איור 20 תת מערכת לזיהוי קוד תקין ב-Multisim

תת המערכת הזו אחראית על זיהוי רצף ספרות תקין של 2-5-9 בסדר הזה, המערכת בנויה מדלגלי D משורשרים המופעלים בצורה שתוודא גם את המקשים הנכונים וגם את הסדר הנכון כפי שמתואר בתכנון המערכת.

כדי שלא יהיה בעיה של "מתח צף" במערכת הנובע ממתח לא מוגדר - כאשר הלחצן לא לחוץ רעשים יכולים לגרום לשגיאות קריאה של הרכיבים הלוגיים, מחוברים נגדים לאדמה כדי להבטיח שכאשר הלחצנים לא לחוצים המתח הוא אפס בכניסה לרכיבים וכאשר הלחצן לחוץ הוא מעביר את המתח מהספק כי ההתנגדות של הנגד גדולה מכדי שיזרום זרם. לשם כך השתמשנו בנגדים של $10k\Omega$ המחוברים לכל מקש.

בנוסף הוספנו לפני כל דיודה נגד של 220Ω כדי להגביל עליה את הזרם - לקבל זרם של בערך $10mA$ ולמנוע שריפה של הדיודה. ערך הנגד נקבע בצורה הבאה:

$$(5) V_{supply} - V_{LED} = V_R$$

נוסחא 5 – חישוב המתח על הנגד

המתח אליו זקוקה הנורה כדי להידלק הוא $2V$, והמתח שמסופק מהספק הוא $5V$ לכן המתח הנופל על הנגד יהיה $3V$. זרם של $13mA$ הוא זרם בטווח שיכול לזרום בדיודה שלא תישרף לכן לפי חוק אוהם:

$$(6) R = \frac{V}{I}$$

נוסחא 6 – חישוב התנגדות הנגד המוצב לפני הדיודה

מכאן נקבע התנגדות של 220Ω .

עבור הטיימר השתמשנו בערכי נגד וקבל הנותנים קבוע זמן משך הפולס שיוצא מהטיימר בהתאם לדרישות.
הדרישה עבור תת מערכת קוד תקין, שהנורה והמנעול יופעלו למשך 5 שניות. לכן השתמשנו בנגד וקבל עם הערכים הבאים :

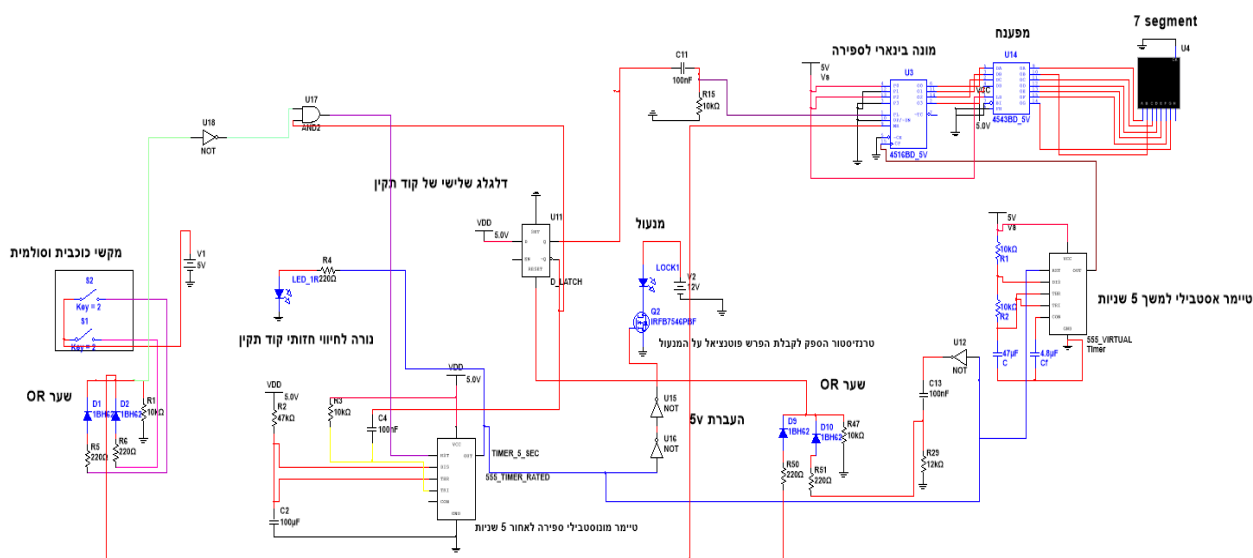
$$C2 = 100\mu, R2 = 47k\Omega$$

$$(3) \tau = R2 \cdot C2 \cdot 1.1 = 5.17 \text{ sec}$$

נוסחא 3 – משך זמן הפולס בטיימר מונוסטבילי

בנוסף אליהם חוברו נגד וקבל לרגל הטריגר של הזמן כדי למנוע רעשים – R3 ו-C4, שנקבעו בהתאם לדפי הנתונים.
המערכת הזו מבצעת בדיקה לספרות של הקוד התקין ולסדר הקוד התקין בהתאם לחיבורי הדלגלגים עם שערי ה-AND כאשר הדלגלג השלישי מעביר את האישור לקוד התקין דרך המוצא ההפוך שלו לטיימר – כי הטיימר פועל בנמוך, הטיימר מופעל ומעביר מתח לנורת החיווי.
הדלגלג השלישי אחראי על איפוס שני הדלגלגים הראשונים בעת שמוציא במוצאו "1" לוגי, ומוצא הטיימר והנעילה הידנית של המערכת שולטים על איפוס הדלגלג האחרון. כשהטיימר שמשויד לקוד התקין לא מוציא פולס - הדלגלג האחרון מאופס.

5.2 מערכת 2 – מנעול – פתיחה וסגירה



איור 21 תת מערכת למנעול ב-Multisim

כפי שניתן לראות בסימולציה, לחלק במערכת של תצוגת הספירה לאחר מחובר טיימר במצב אסטבילי. במצב אסטבילי, טיימר 555 מייצר אות ריבועי מחזורי באופן רציף. הקבל C שבמקרה שלנו ערכו $47\mu F$ נטען דרך שני הנגדים R1 ו-R2, וכשהמתח עליו מגיע ל- $\frac{2}{3}V_{cc}$ ממתח ההפעלה (V_{cc}), הטיימר משנה את מצב היציאה ל-Low ופורק את מטענו דרך הנגד R2 בלבד. כשהמתח יורד ל- $\frac{1}{3}V_{cc}$, היציאה שוב הופכת ל-HIGH, והקבל מתחיל להיטען מחדש. זמן המחזור תלוי בערכים של הנגדים והקבל C לפי הנוסחה:

$$(2) T = C \cdot (R1 + 2R2) \cdot 0.693$$

נוסחא 2 – משך זמן פולס במצב HIGH בטיימר אסטבילי

במעגל שלנו, עם ערכים של $R1 = 10k\Omega$, $R2 = 10k\Omega$, $C = 47\mu F$ מתקבל: $T = 0.98 \text{ sec}$. לכן, זמן המחזור של הטיימר במעגל הוא כ-0.98 שניות. שמופעלים למשך 5 שניות בעקבות חיבור לטיימר שמוציא פולס רציף במשך 5 שניות וכך מתאפשרת ספירה של 5 שניות עד לסגירת המנעול מרגע פתיחתו.

לפי הגדרות היצרן, המנעול נפתח כאשר נופל עליו הפרש פוטנציאלים של 12V בזרם של 1A. לכן חיברנו אליו טרנזיסטור הספק שיכול להכיל זרמים גבוהים ולשלוט בפתיחת המנעול. עד להזנת קוד תקין הטרנזיסטור בקיטעון כי לא מקבל מתח מהטיימר שלא פעיל, אין הפרש פוטנציאלים על המנעול ולכן הוא סגור.

פתיחת המנעול מתרחש כאשר הוון קוד תקין, הדלגלג השלישי בשרשור הדלגלגים מפעיל את הטיימר המונוסטבילי שפועל למשך 5 שניות. מאחר והטיימר מבזבז חלק מההספק שמקבל הוא לא מוציא מתח של 5v ביציאה אלא 3.5v, שלא מספיקים לפתיחת התעלה בטרנזיסטור ולפתיחת המנעול.

לכן אחרי המוצא של הטיימר ולפני ה-gate בטרנזיסטור הכנסנו שער לוגי שלא משנה מה המתח שנכנס אליו הוא יוציא את מתח ההזנה שלו – 5v. מאחר ובציפ של השער לוגי NOT קיימים 6 שערים בחרנו להשתמש בשני שערי NOT משורשרים כדי לקבל "1" לוגי ב-gate של הטרנזיסטור כלומר מתח של 5v. כאשר המנעול נפתח הטיימר המונוסטבילי שאחראי על הנורה והמנעול שולח פולס של "1" לוגי לרגל ה-RESET של הטיימר האסטבילי ששולט על תצוגת הספירה לאחור ובגלל שטיימרים פועלים ב"נמוך", הטיימר האסטבילי מתחיל לפעול ולשלוח פולסים קצרים לשעון של המונה הבינארי.

המונה הבינארי מקבל פולס קצר לרגל PL שנשלטת ע"י נגד וקבל, רגל זו קובעת מאיפה המונה מתחיל את הספירה לפי רגלי הכניסה שלו. ברגלי הכניסה של המונה הכנסנו את התוצאה 5 בייצוג בינארי והגדרנו ברגל DOWN/UP של המונה (רגל 10) שמונה יספור למטה, ולכן המונה התחיל ספירה מ-5 ומטה, המספרים בייצוג בינארי עברו למפענח שהעביר את המידע ל-segment 7 וכך הוצגה הספירה לאחר למשך 5 שניות של המנעול.

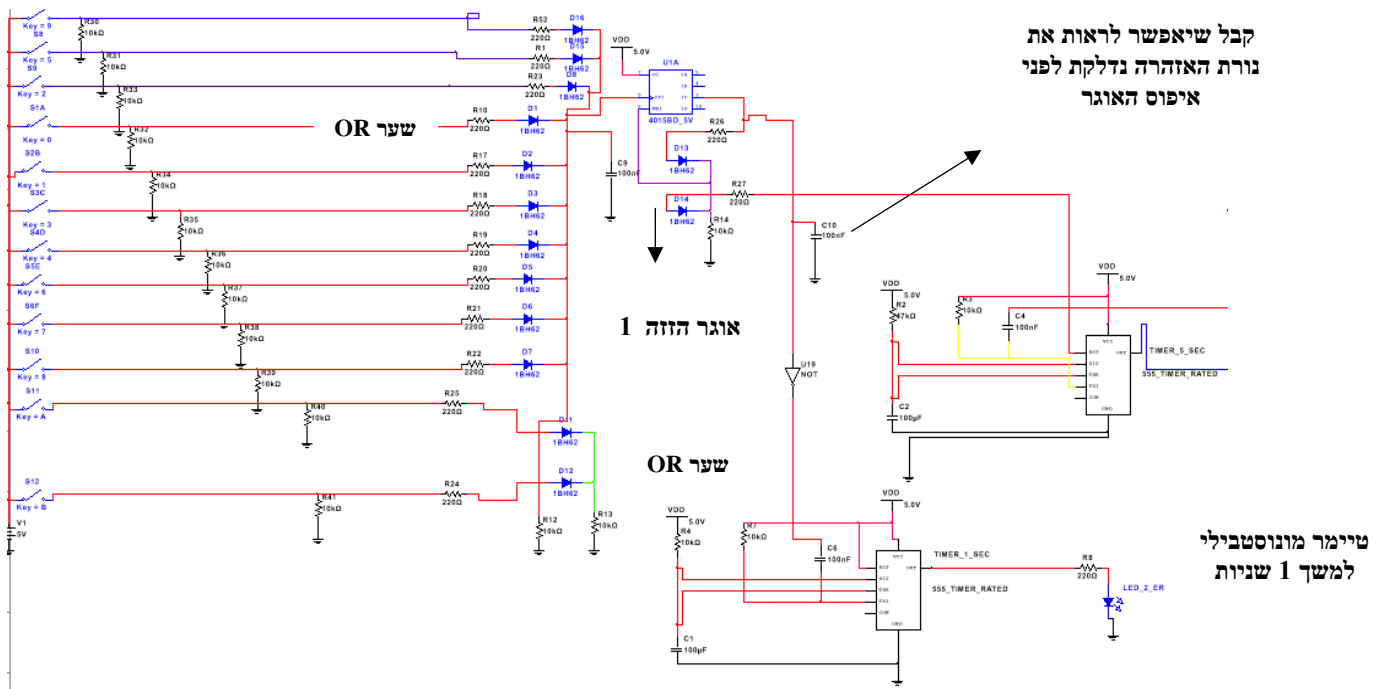
בסיום 5 שניות, הטיימר המונוסטבילי יורד למצב "LOW" מה שגורם ל-RESET בטיימר האסטבילי ששולט על תצוגת המספרים ומפסיק את שליחת הפולסים לשעון של המונה וכך הספירה לאחור מפסיקה.

נעילה ידנית ע"י המשתמש הינה חלק מדרישות המערכת ומבוצעת ע"י לחיצה על מקש "*" או "#". המקשים הללו מחוברים לכניסות של שער OR שחובר מדיודות, המוצא של השער מתחבר לשער לוגי NOT שמוצאו מחובר לכניסת שער AND ביחד עם מוצא הדלגלג השלישי של הקוד התקין. המוצא של שער לוגי AND מחובר לרגל RESET של הטיימר המונוסטבילי שפעיל בנמוך.

המטרה של חיבור זה היא שכאשר הקוד תקין והכספת נפתחה, המוצא של שער AND יהיה "1" לוגי כי שני הכניסות הינן "1" לוגי רגל ה-RESET של הטיימר פעילה בנמוך ולכן הטיימר יעבור כרגיל. בלחיצה על אחד המקשים שער NOT יוציא "0" לוגי שיגרום גם לשער AND להוציא "0" לוגי ולא יפוס של הטיימר המונוסטבילי שיפסיק להעביר מתח לטרנזיסטור, יכניס אותו לקיטעון ויגרום לסגירת המנעול.

כך בצורת חיבור זו, אנחנו מביאים לידי ביטוי את הדרישות לפתיחה וסגירה של המנעול המשמשים לבקרה של המשתמש על הכספת – מתי נסגרת הכספת ואפשרות לסגירה ידנית.

5.3 מערכת 3 – זיהוי קוד שגוי



איור 22 תת מערכת לזיהוי קוד שגוי ב-Multisim

ניתן לראות מהסימולציה את תכנון המערכת שתואר קודם לכן, כל המקשים מחוברים לשער OR שמורכב מדיודות והמוצא של השער מחובר לרגל השעון של רכיב אוגר ההזזה, רגל המידע של אוגר ההזזה מחוברת למתח קבוע מספק הכוח לכן המקשים הם אלה השולטים במוצא האוגר, ברגע שיש עליית שעון האוגר מוציא "1" לוגי שמוזז בין מוצאיו בכל עליית שעון. כאשר המוצא השלישי של האוגר מקבל "1" לוגי כלומר הזון קוד בעל 3 ספרות שהוא שגוי, המידע מועבר לשני ערוצים:

1. חיווי חזותי לזיהוי הקוד השגוי - שער NOT שמוצאו מחובר לטריגר של טיימר מונוסטבילי למשך שניה אחת (פעיל בנמוך) ובמוצא הטיימר נמצאת נורת האזהרה שנדלקת כחיווי חזותי לקוד שגוי.
2. איפוס אוגר ההזזה לקבלת מידע חדש שמוזן מהמשתמש - במקרה הזה כל קוד, גם קוד תקין וגם קוד שגוי יביא לפלט של "1" לוגי במוצא השלישי של אוגר ההזזה שמפעיל את הטיימר של נורת האזהרה שנדלקת בעת הזנת קוד שגוי. לכן ביצענו איפוס של האוגר מהדלגלג השלישי בשרשרת הדלגלים בקוד התקין כדי שהמערכת תדע שמדובר בקוד תקין. האוגר מספיק להתאפס לפני שהמידע ממנו עובר לטיימר של נורת הקוד השגוי. לאחר שהאוגר מוציא "1" לוגי במוצא השלישי שלו, הוא נכנס לכניסה של שער OR ביחד עם המוצא של הדלגלג השלישי בקוד התקין. מוצא השער הלוגי מחובר לרגל ה-RESET של אוגר ההזזה. ביציאה מהאוגר הוספנו קבל שיעכב את איפוס האוגר כדי שיהיה אפשר לראות את ההדלקה של הנורה.

ובתצורה הזאת נבטיח איפוס של האוגר בשני המקרים – קבלת קוד תקין והזנה מחודשת של המשתמש בקודן.

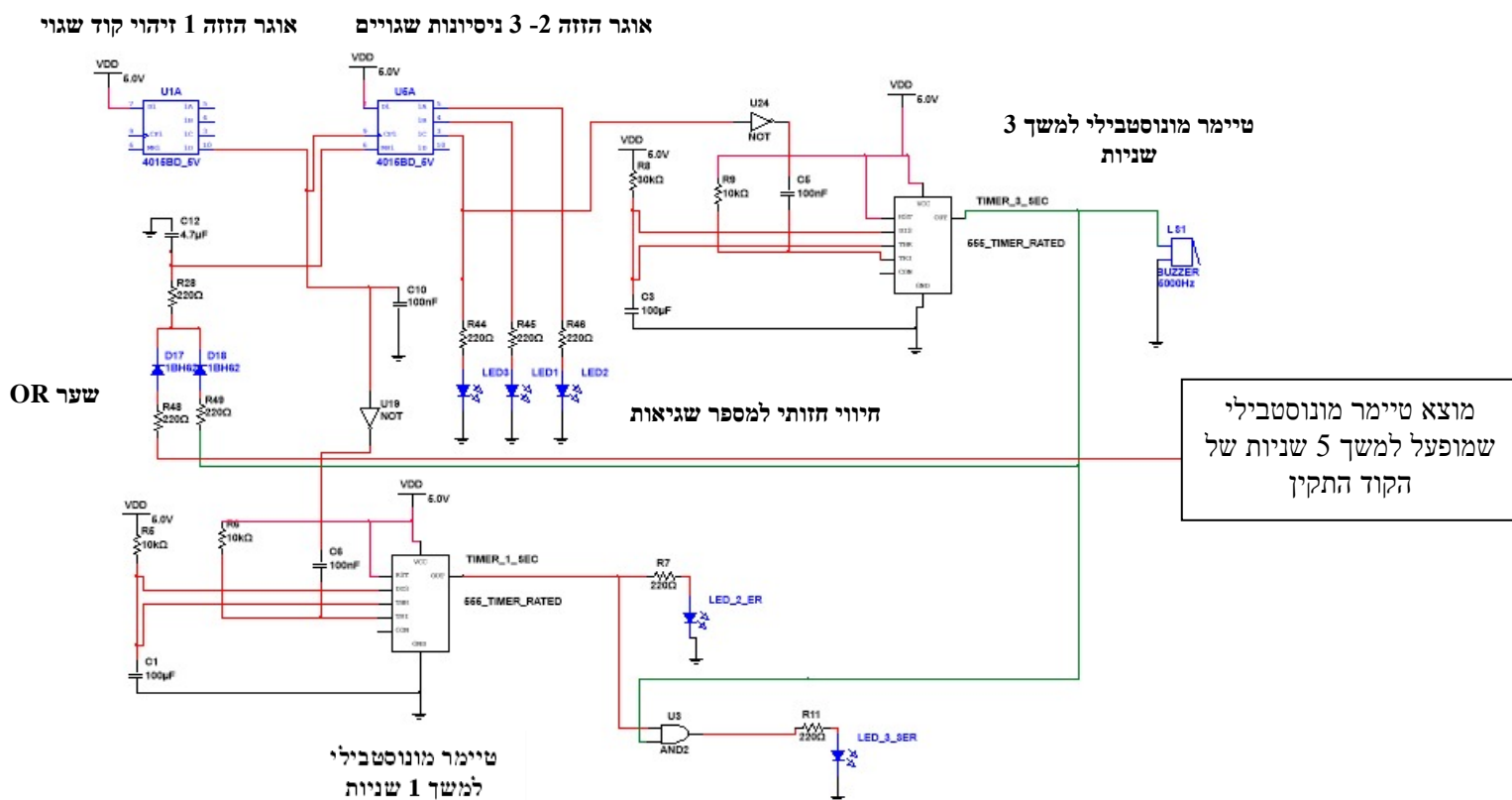
הטיימר המונוסטבילי בתת מערכת הזו מחובר באותה תצורה בדיוק כמו הטיימר הנמצא בקוד התקין רק שהפעם ערכי הנגד והקבל מותאמים לקבוע זמן של שניה אחת שקובע את זמן הפולס :

$$C1 = 100\mu, R5 = 10k\Omega$$

$$(3) \tau = R5 \cdot C1 \cdot 1.1 = 1.1 \text{ sec}$$

נוסחא 3 – משך זמן הפולס בטיימר מונוסטבילי

5.4 מערכת 4 – זיהוי 3 ניסיונות קוד שגוי



איור 23 תת מערכת לזיהוי 3 ניסיונות קוד שגוי ב-Multisim

תת מערכת זו נשענת על תת מערכת לזיהוי קוד שגוי, כאשר נעשה שימוש באוגר הזזה נוסף. אוגר ההזזה השני מתחבר ברגל השעון שלו למוצא השלישי של אוגר ההזזה הראשון וכניסת המידע מחוברת למתח קבוע מספק כוח כך שמוצאו של האוגר השני נקבע לפני קבלת קוד שגוי מהמשתמש שגורם לפלט של "1" לוגי במוצא השלישי של האוגר הראשון. כל קוד שגוי מביא לפלט של "1" לוגי במוצא האוגר השני שמוזז עבור כל שלוש ההזנות השגויות – 3 מוצאים. כל מוצא של האוגר השני מחובר לנורת LED שמייצגת את כמות הניסיונות השגויים בהם הזין המשתמש קוד שגוי. המוצא השלישי של האוגר השני – כלומר 3 ניסיונות שגויים, מתחבר לשער NOT שמוצאו מחובר לטריגר (פעיל בנמוך) בטיימר מונוסטבילי של 3 שניות כאשר מוצא הטיימר מחובר לצפצפה ומפעיל אותה. תת המערכת של זיהוי קוד שגוי עובדת כרגיל גם בניסיון השלישי – כלומר מפעילה את נורת האזהרה ומאפסת את האוגר הראשון כרגיל בכל הזנה. מוצא הטיימר של הצפצפה, מחובר לכניסה של שער AND ביחד עם המוצא של הטיימר המונוסטבילי שפועל למשך שניה אחת, ומוצא השער הלוגי מחובר לנורת אזהרה נוספת המייצגת חיווי חזותי ל-3 ניסיונות שגויים כחלק מדרישות המערכת.

הנורה תדלק למשך שניה מאחר ואחת הכניסות של השער AND מכניס "1" לוגי לשער למשך שניה. כך גם נורת החיווי הזו תדלק למשך שניה וגם היא תדלק בזמן הנכון – מתי שנדלקת הצפצפה, בעת הקשת 3 ניסיונות שגויים.

איפוס האוגר השני נעשה באמצעות שער OR שכניסותיו הם מוצא הטיימר שמפעיל את הצפצפה, כך שיוכל לקבל מידע חדש ישר אחרי קבלת 3 ניסיונות שגויים. והכניסה השנייה של השער הינה ממוצא הטיימר שמפעיל את הנורה של הקוד התקין, אם הטיימר הזה מופעל סימן שהמשתמש הזין קוד תקין וצריך לאפס את האוגרים שהמערכת תדע שמדובר בקוד תקין. במוצא השער הלוגי, מחובר גם קבל שנועד כדי לבצע השהייה קצרה לאיפוס האוגר על מנת שנוכל להבחין בהדלקת הנורה השלישית – של הניסיון השלישי השגוי לפני איפוס האוגר. לתת מערכת זו נוסף טיימר שקבוע הזמן המחושב שלו הוא 3 שניות להלן החישוב וקביעת ערכי הנגד והקבל:

$$C3 = 100\mu, R8 = 30k\Omega$$

$$(3) \tau = R8 \cdot C3 \cdot 1.1 = 3.3 \text{ sec}$$

נוסחא 3 – משך זמן הפולס בטיימר מונוסטבילי

6. ניסויים ובדיקות

לצורך בחינת תפקוד המערכת ולאימות אמינותה, בוצעו סדרת ניסויים מבוקרים בסימולציה ובמטריצה אשר כל אחד מהם תוכנן לבחון תת מערכת נפרדת ולאמת את תפקודה ביחס לדרישות ההנדסיות והעקרונות התיאורטיים שנקבעו בשלבי התכנון. מטרת הניסויים הייתה לוודא כי התנהגות המערכת במצבים שונים – רגילים, גבוליים וחריגים – תואמת את הציפיות הן בסימולציה והן במטריצה, וכי הרכיבים המשולבים פועלים בסנכרון מלא.

תהליך הבדיקה בוצע באופן הדרגתי. בתחילה נבדקו רכיבים בודדים, כגון טיימר 555 במצב מונוסטבילי ולדגל'ג מסוג D, כדי לאשר את תקינותם ותגובתם לפולסים לוגיים. לאחר מכן בוצעו בדיקות לתתי מערכות קריטיות, כמו אוגר זיהוי שגיאות, מנגנון איפוס, לוגיקת זיהוי קוד נכון, וזיהוי קוד שגוי. לבסוף, בוצעה הרכבה מלאה של כל רכיבי המערכת, ונערכה סדרת ניסויים המדמה את הפעלת הכספת בפועל – כולל זיהוי רצף לחיצות תקני, טיפול בשגיאות, הצגת אינדיקציה ויזואלית והתמודדות עם איפוס אוטומטי.

בכל אחד מהשלבים נמדדו ערכי מתח, זמנים ותגובות לוגיות, ונערכה השוואה בין התוצאות בפועל לבין ערכים מחושבים ותחזיות מהסימולציה. כך הובטחה רמת דיוק גבוהה בתפקוד הכולל של המערכת.

בפועל – כולל זיהוי רצף לחיצות תקני, טיפול בשגיאות, הצגת אינדיקציה ויזואלית והתמודדות עם איפוס אוטומטי.

בכל אחד מהשלבים נמדדו ערכי מתח, זמנים ותגובות לוגיות, ונערכה השוואה בין התוצאות בפועל לבין ערכים מחושבים ותחזיות מהסימולציה. כך הובטחה רמת דיוק גבוהה בתפקוד הכולל של המערכת.

6.1 מערך הניסוי

המערכת הורכבה על גבי מטריצה, תוך חלוקה לתת מערכות שנבדקו בנפרד ולאחר מכן שולבו לכדי מערכת שלמה. ההרכבה כללה את כלל הרכיבים: אוגרי הזזה, דלגלים, שערים לוגיים, טיימר 555, מקודד, דיודות, קבלים, נגדים, מקלדת לחצנים ולדים.

המערכת הופעלה באמצעות ספק V5, ונבדקה בתרחישים שונים: הקשת קוד תקין, קודים שגויים, הצטברות שגיאות ואיפוס. לדים חוברו לנקודות קריטיות (כגון יציאות אוגרים ודלגלים) לצורך תצפית בזמן אמת על תגובת המעגל. תצפיות אלו שימשו לאימות ערכים לוגיים ולאיתור שגיאות תפקוד. בוצעו מדידות של מתחי טעינה ופריקה במעגלי RC, בעיקר בכניסות רגישות כגון TRIG של 555 ומעגלי איפוס. ערכי נגדים וקבלים נבדקו בפועל, והותאמו במידת הצורך כדי לשפר את דיוק התזמון ביחס לחישוב התיאורטי.

לצורך מדידת אותות משתנים ותופעות קצרות בזמן, בוצעו מדידות באמצעות אוסצילוסקופ, בעיקר בסביבת שער XOR ובמעגל ההשהיה, לשם איתור מרוצי אותות ותזמונים לא יציבים.

6.2. מכשירי המדידה

מערכת בדיקות ודיאגנוסטיקה חוברה בהתאם לאיור המערכת, וכללה את הכלים הדרושים לבחינת המצבים הלוגיים, זמני התגובה, והאמינות החשמלית של המעגל. הבדיקות בוצעו הן בשלבים מוקדמים (של רכיבים ותתי מערכות), והן לאחר ההרכבה הסופית, במטרה לאמת את ההתנהגות בפועל ביחס לתכנון התיאורטי. הציוד שבו נעשה שימוש כלל:

- ספק כוח מעבדתי יציב בהספק של 5V/2A
 - מולטימטר דיגיטלי למדידת מתחים, קיבול והתנגדות לאימות ערכי קבלים ונגדים קריטיים במעגלי תזמון
 - אוסצילוסקופ דו ערוצי לבחינת פולסים משתנים, תופעות רגעיות ומרוצי אותות
 - תוכנת Multisim לביצוע סימולציות השוואתיות טרם הרכבה פיזית
 - לדים תצפיתיים שחוברו לנקודות קריטיות לאורך המעגל
- המכשירים שימשו ככלי תמיכה חשובים לאימות תפקוד לוגי, לבדיקת תגובות המערכת לאירועי קלט, ולכיוון תזמונים באזורים רגישים מבחינת השהיה או תזמון כניסה/יציאה.

6.3. רכיבי המערכת

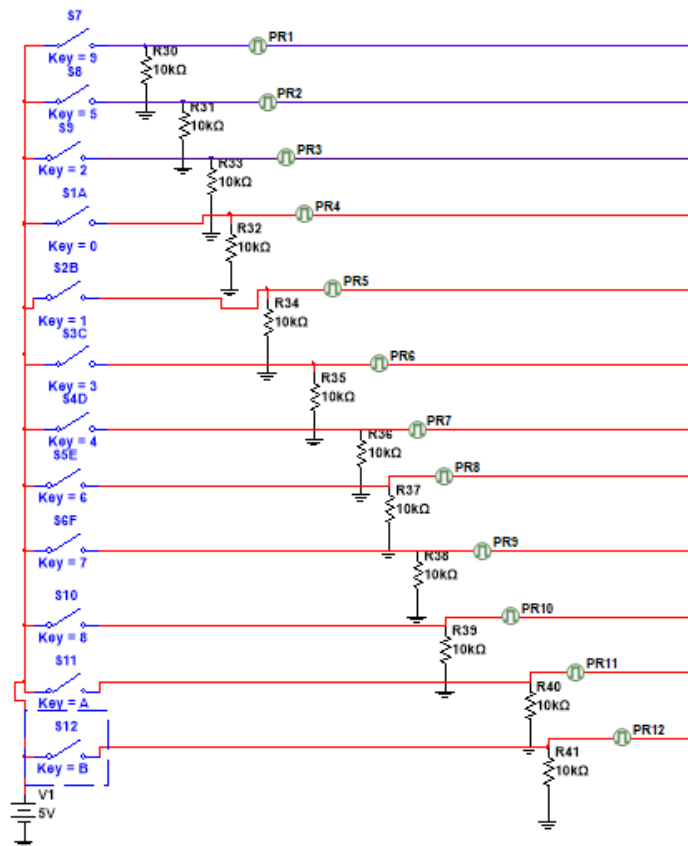
חלקי המערכת שנבדקו כוללים את כלל הרכיבים המרכזיים אשר שולבו במערכת הכספת האלקטרונית. הרכיבים נבדקו תחילה בנפרד, ולאחר מכן כחלק ממערכת שלמה, לצורך אימות תקינותם, תגובתם לאירועי קלט, והתאמתם לעקרונות הפעולה שתוכננו מראש. הרכיבים שנבדקו בפועל כוללים:

- אוגרי הזזה CD4015 - נבדקה קליטת פולסים רציפים, שמירת ערכים, וזיהוי רצפים באמצעות תצפית על היציאות.
- דלגלים CD4013 - נבחנה תגובתם לפולסי שעון, שמירת ערך לוגי במוצא, ותפקוד האיפוס.
- שערים לוגיים – (AND, OR, NOT, XOR) נבדקה פעולה לוגית תקינה בכל צירוף קלטים, ושילובם בתנאי פתיחה/שגיאה.
- טיימר 555 במצב מונוסטבילי – נבדקה יצירת פולס לזמן מדויק לאחר טריגר, על בסיס ערכי RC שונים.
- ממיר BCD ל-7 סגמנט 4543 – נבדקה הצגה תקינה של ספירה לאחור והצגת הספרות בזמן
- לדים – שימשו לבקרת יציאות קריטיות ואימות תגובה בזמן אמת למצבי פתיחה, שגיאה ואיפוס.
- דיודות - שימשו לבניית שערי OR ולכן נבדקה תקינותם ואומת תפקידם כשער OR
- מקלדת לחצנים – נבדקה יציבות ההקשה והעברת המידע הלוגי למעגלי הזיהוי.

6.4. בדיקת רכיבי המערכת

בשלב מקדים להרכבה הפיזית, בוצעה סימולציה של רכיבי המערכת המרכזיים באמצעות תוכנת Multisim. מטרת הסימולציה הייתה לוודא את תקינות הלוגיקה, את תגובת הרכיבים לפולסים ואת זמני ההשהיה, תוך זיהוי מוקדם של כשלים אפשריים, ולאחר מכן בוצע בדיקה על המערכת באופן מעשי לאחר שהורכבה על מטריצה.

6.4.1. בדיקת לוח מקשים



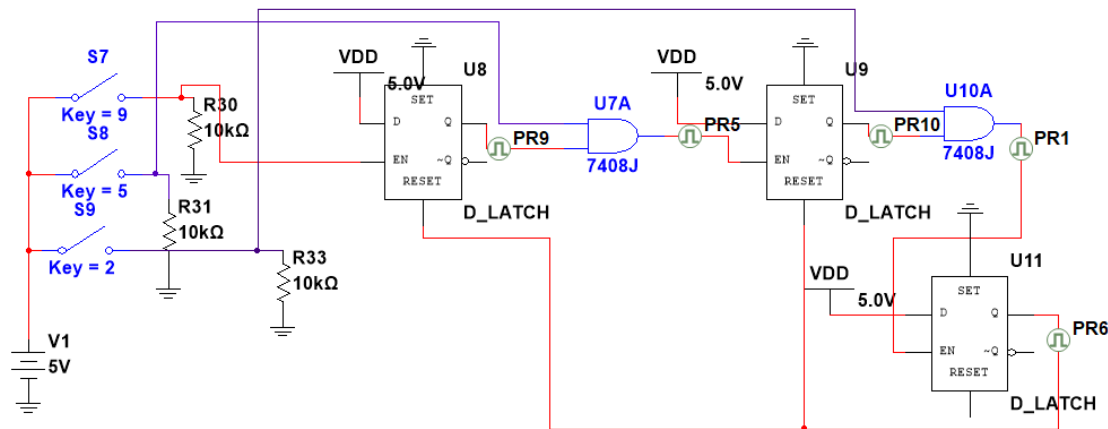
איור 24 לוח מקשים

לוח המקשים נמדד באמצעות חיבור כל מקש למקור מתח דרך לחצן, ובמקביל לנגד pull-down לערך לוגי אפס במצב מנוחה. היציאה מכל מקש חוברה לפרוב למדידה (PR1–PR12) על־מנת לבחון את תגובתו בעת לחיצה. הבדיקה כללה:

- מדידת שינוי המתח ביציאת כל מקש בעת לחיצה.

- וידוא שלחיצה על כל מקש יוצרת שינוי לוגי ברור מ'0' ל'1'.
- נבדק כי אין תופעות של קפיצות מגע (Bounce) או ערכים לא יציבים.
- נמדדה תגובת ה' pull-down באמצעות נגדים של $10k\Omega$ בכל קו.

6.4.2. בדיקת מערכת קוד תקין



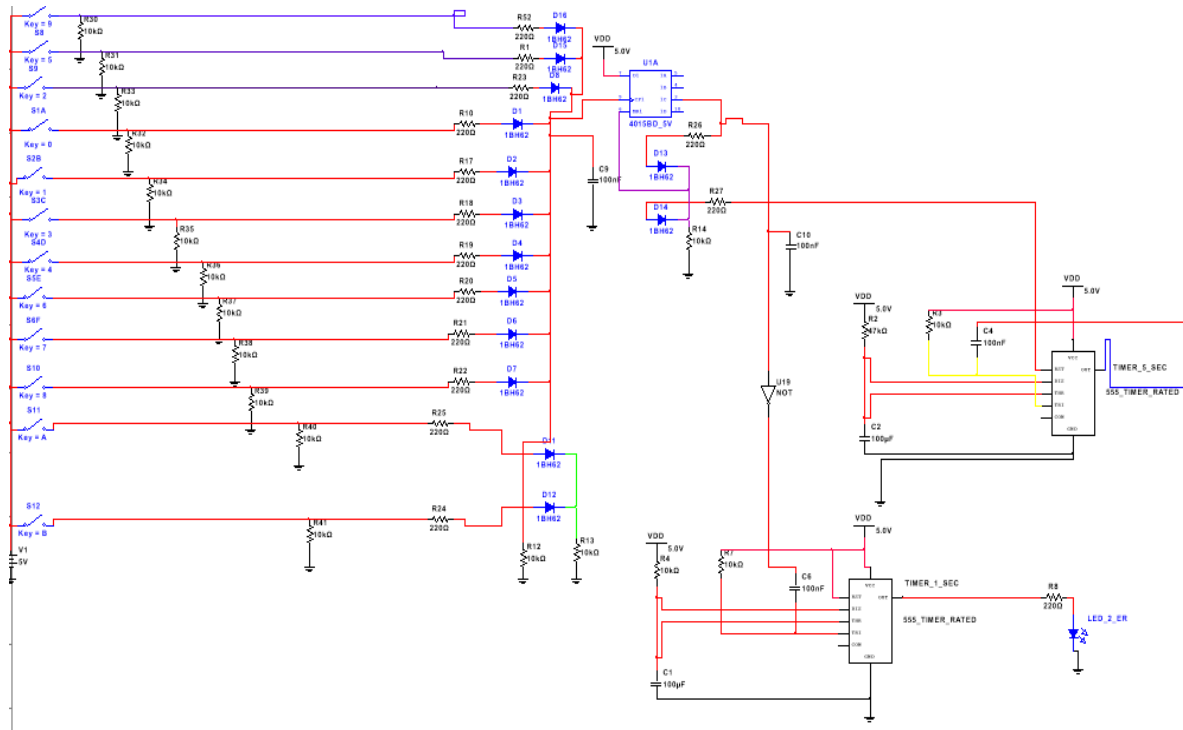
איור 25 בדיקת מערכת קוד תקין

בדיקה זו נועדה לוודא שהמערכת מזהה קוד כניסה תקין, המורכב מרצף לחיצות מוגדר מראש במקרה זה (2 → 5 → 9), ומפעילה את פלט ה' Q הסופי רק לאחר השלמת הרצף הנכון.

המערכת נבנתה כך שלחיצה על כל מקש מתקבלת באמצעות פולס, אשר מוזן לדלגלים מסוג D. היציאות של הדלגלים מחוברות דרך שערי AND כך שרק אם הרצף כולו מדויק, הפלט הסופי יעבור לרמה לוגית גבוהה כדי למנוע מירוצים הכניסה D חובר למתח קבוע והשעון חובר לכניסת מידע. במהלך הסימולציה נבדקו התנאים הבאים:

- כל מקש בלחיצה מייצר פולס ברור, וה' D מאחסן את הערך בהתאם לשעון.
 - כל שלב ברצף תלוי בהשלמת השלב הקודם – כלומר: אין מעבר אם סדר הלחיצות שגוי.
 - הפלט הסופי (PR1) עובר לרמה לוגית גבוהה רק אם כל שלושת השלבים בוצעו בסדר הנכון.
 - בוצעה תצפית על יציאות הביניים (PR9, PR5, PR10) לאימות הלוגיקה בכל שלב.
 - במקרה של הקשה שגויה, הרצף מופסק ולא מתקבל אישור ב' PR1 או PR6.
- הסימולציה אישרה כי הלוגיקה פועלת בהתאם לתכנון, וכי המערכת מזהה קוד תקין באופן מהימן ומדויק.

6.4.3. בדיקת זיהוי קוד שגוי



איור 26 בדיקת מערכת קוד שגוי

מנגנון זיהוי הקוד השגוי נועד לאתר כל סטייה מרצף הקוד התקין ולספור את מספר ההקשות השגויות, באופן שמאפשר ניתוח מצב בזמן אמת והפעלת אמצעי תגובה בהתאם. תהליך הזיהוי מבוסס על השוואה לוגית בין הקלט המצופה לבין הקלט בפועל. כאשר הוקש קוד מסויים הוא עובר לאוגר הזזה וכול טעות בעלת סדרה של 3 מספרים תעבור לאוגר ההזזה השני שתפקידו לספור כמה פעמים הוקש קוד שגוי ותפקידו של האוגר הראשון הוא לספור לחיצות וכאשר הוקש קוד שגוי אז לד 2 ידלק למשך שניה, כדי לבדוק מערכת זו חוברו פרובים למוצאי האוגר הראשון ונצפו ערכיהם כאשר המקשים נלחצו.

.6.4.4



7- סגמנט.

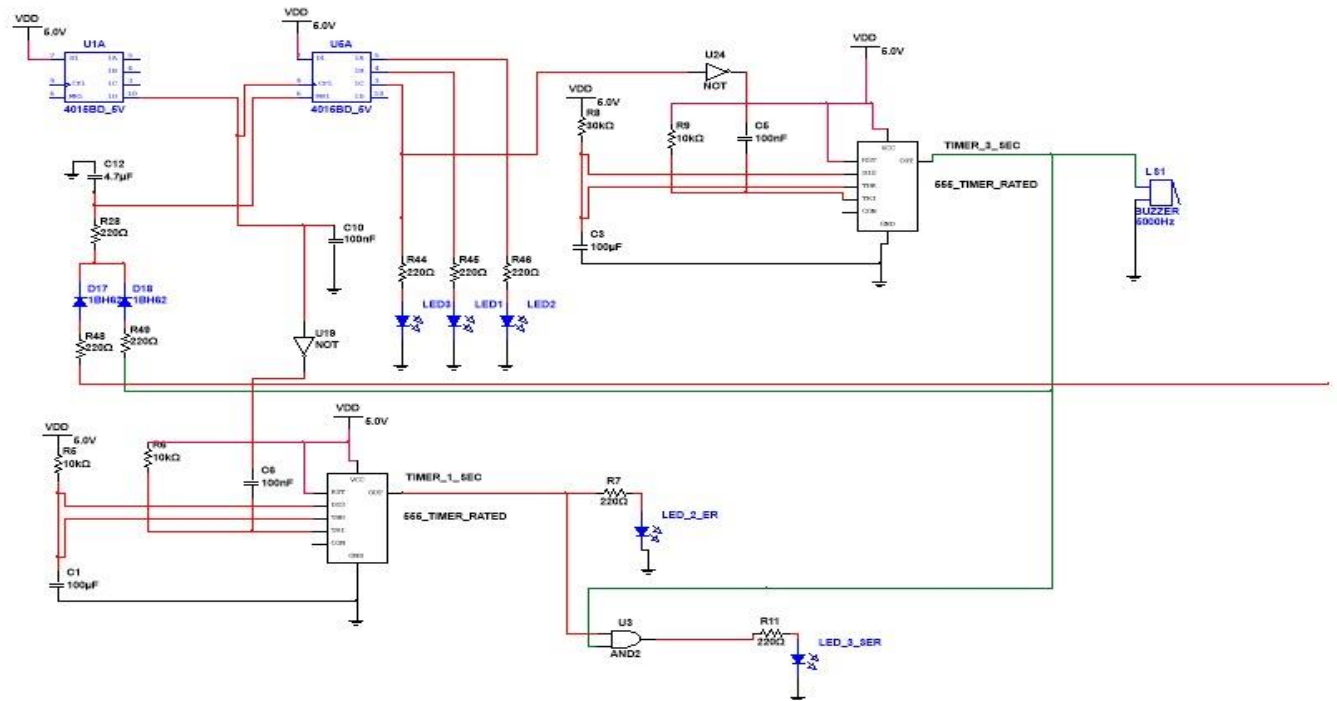
המערכת מבוססת על מונה יורד מסוג 4516, המחובר לממיר BCD לתצוגה מסוג 4543 ולתצוגה אנלוגית (U4) מקור השעון הוא טיימר 555 המוגדר לפולס יציב בקצב של 1 Hz. מנגנון הספירה פועל כך :

- בעת הפעלת כניסת, START הדלגלג שומר את הפקודה, מפעיל את מונה ה־4516 ומאפס את הספירה ל־5 קונפיגורציה דרך כניסות LOAD
- כל פולס מה־555 מקדם את המונה בספירה יורדת ($0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$)
- כל שלב במונה עובר דרך רכיב 4543 ומוצג בספרה אחת על גבי 7 סגמנט.
- עם הגעה לאפס, שער NOR מזהה את התנאי ומכבה את הדלגלג, תוך עצירת הספירה.

הבדיקה כללה :

- אימות שהספירה מתחילה מהמספר 5 בדיוק בעת טריגר.
- תצפית על כל פלט ביניים מהמוני 4516 (Q0–Q3) ועד התצוגה.
- בדיקה של קצב הספירה ע"י שינוי ערכי R ו- C בטיימר 555, לוודא תזמון של 1 שנייה לכל צעד.
- בדיקת התנהגות בעת לחיצה כפולה או חידוש – לוודא שאין קפיצות או שיבושים.

המערכת פעלה באופן מדויק, עם ספירה אחידה, תצוגה יציבה, והפסקה אוטומטית עם סיום הזמן.



איור 28 חייוי קולי וחזותי של המערכת לקוד שגוי

6.4.5 בדיקת תגובת המערכת לקוד שגוי

למערכת מנגנון התרעה דו-שלבי לזיהוי הקשת קוד שגוי:

- **שגיאה בודדת** - זיהוי שגיאה בודדת מבוצע באמצעות שער NOT שמפעיל טיימר 555 במצב מונוסטבילי. הטיימר מפעיל LED למשך שנייה, באמצעות רכיבי RC לקביעת משך ההשהיה.
- **שלוש שגיאות** - כאשר נרשמות שלוש טעויות, מופעל טיימר נוסף ל-3 שניות, המפעיל באופן משולב LED נוסף וצפצפה (Buzzer) דרך לוגיקת AND המאמתת את תנאי החריגה.

הבדיקה כללה:

- בחינת תגובת הטיימרים לפולסים משערי NOT
- מדידת זמני ההפעלה של לדים וצפצפה
- אימות לוגיקת AND למניעת שגיאות חיוביות

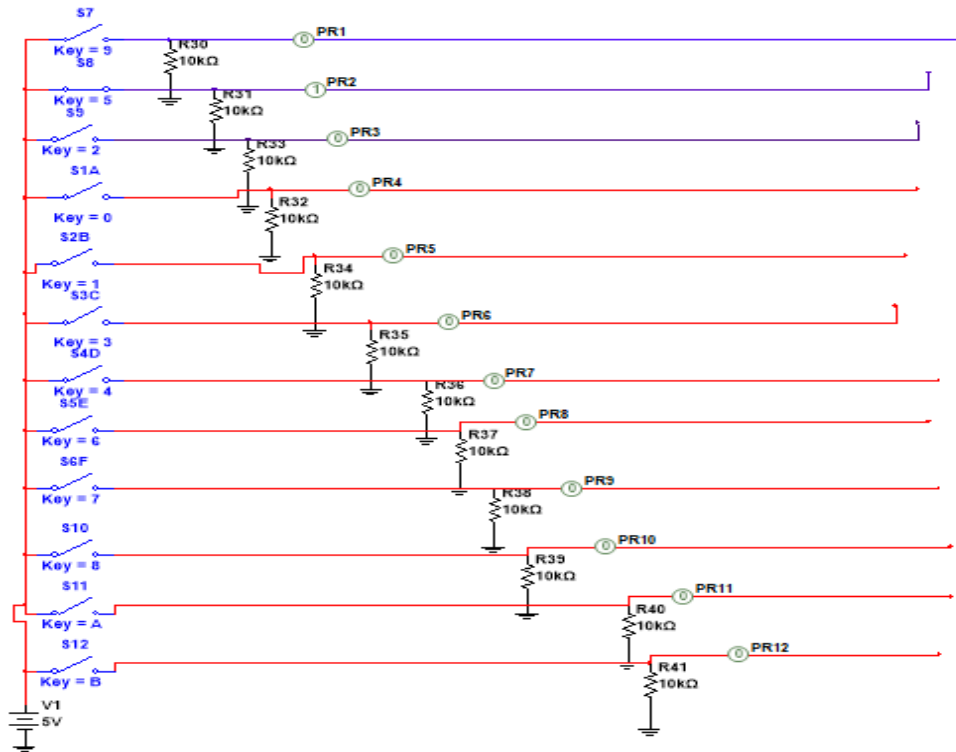
7. תוצאות ומסקנות

7.1. תוצאות תאורטיות

7.1.1. תוצאות בדיקת לוח המקשים

בבדיקה שנערכה ללוח המקשים, נמצא כי כל מקש (0-9, *, #) מגיב באופן תקין, מייצר פולס חד-משמעי ונקלט בצורה יציבה במערכת. נמדדה רמת מתח תקנית של 5V וולט במעבר מ-LOW ל-HIGH ונצפה שאין תופעות של ריטוטים Bounce או קפיצות מגע בלחיצה. המערכת הצליחה לזהות כל הקשה בנפרד, ולהעביר את האות הלאה לרכיבי הקידוד והאוגרים ללא שיבוש או עיכוב. התצורה של נגדי Pull-down לכל מקש התבררה כיעילה לשמירת מצב לוגי ברור במנוחה.

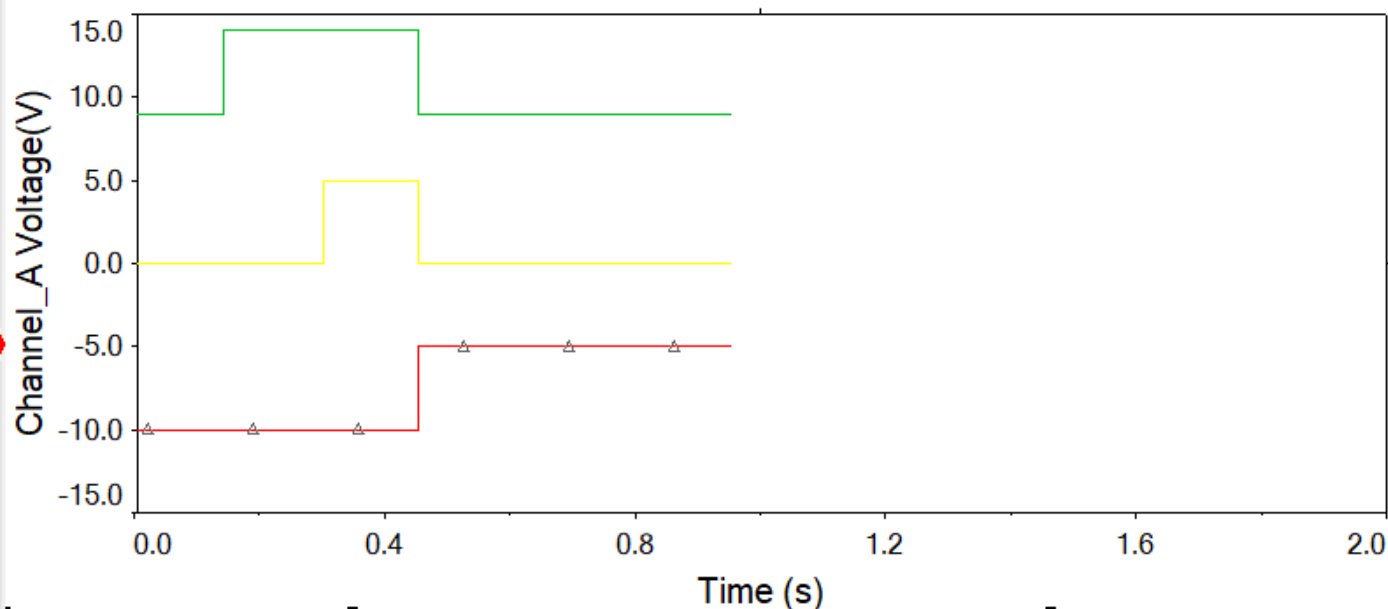
ולהלן תוצאות מדידה של לחיצה על הספרה 5 (כמו כן בדיקה זו נעשתה על שאר המקשים):



איור 29 תוצאות לחיצה על הספרה 5

7.1.2. תוצאות בדיקת מערכת קוד תקין

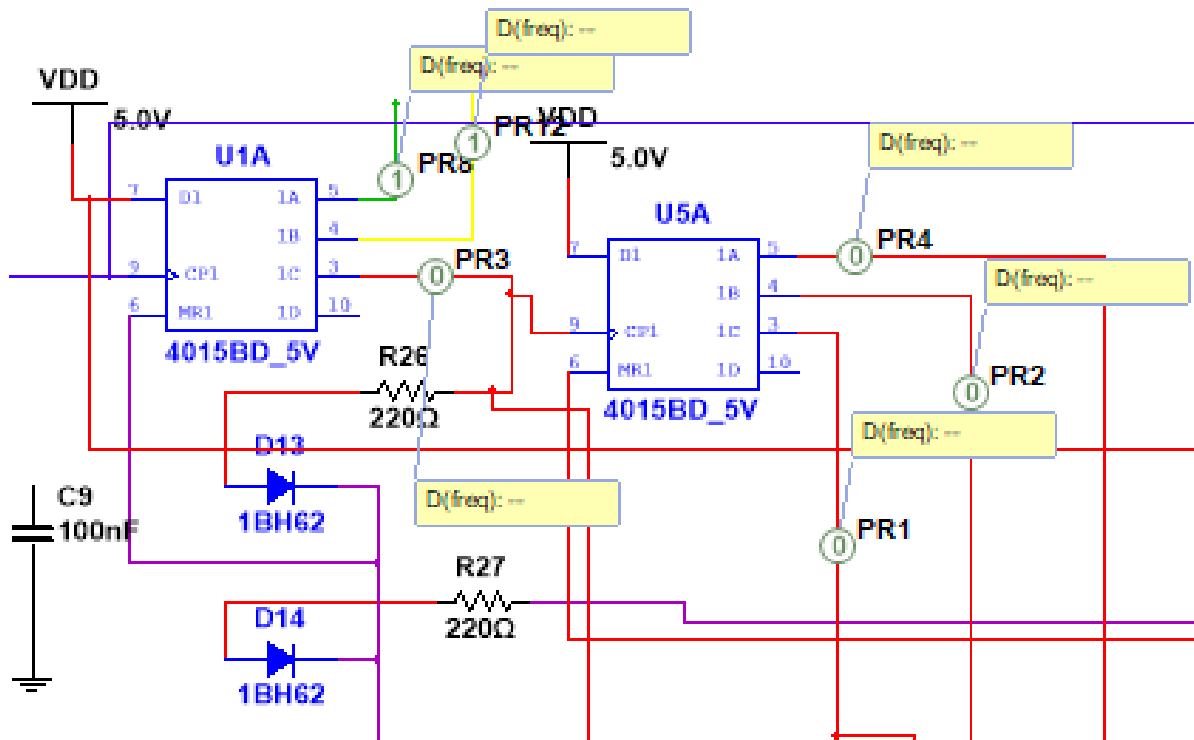
בדיקת קוד תקין



איור 30 תגובת דגלג' D לקוד תקין

בהקשת הקוד התקין (2 → 5 → 9) בוצעה מדידת תגובת המערכת באמצעות אוסצילוסקופ, לצורך ניתוח תפקוד הדגלג מסוג D. הגרף מציג שלושה ערוצים מרכזיים: ערוץ 1 (ירוק) מייצג את אות מוצא הדגלג הראשון; ערוץ 2 (צהוב) מוצא הדגלג השני. אשר נשמר ברמה גבוהה לאורך כל זמן הפולס; ערוץ 3 (אדום) מציג את פלט הדגלג השלישי. ניתן לראות בקלות שכאשר סדר הקוד התקין הוקש כראוי אז מוצא הדגלג השלישי יהיה 1 לוגי ויפעיל את המערכת של הקוד תקין ואם הסדר לא כראוי או שהוקש קוד שגוי מוצא הדגלג השלישי לא יפלוט 1 לוגי. מכלול התגובות מעיד על תפקוד תקין של שרשרת הלחצנים, הדגלגים ושערי הבקרה, תוך שמירה על יציבות, ללא רעשי מעבר או קפיצות מיותרות. המערכת מזהה באופן מדויק את סדר ההקשות, והפלט נשמר עד איפוס – בהתאם להגדרת לוגיקת הזיכרון בפרויקט.

7.1.3. תוצאות בדיקת מערכת קוד שגוי



איור 31 תגובת האוגרים להקשה של קוד שגוי

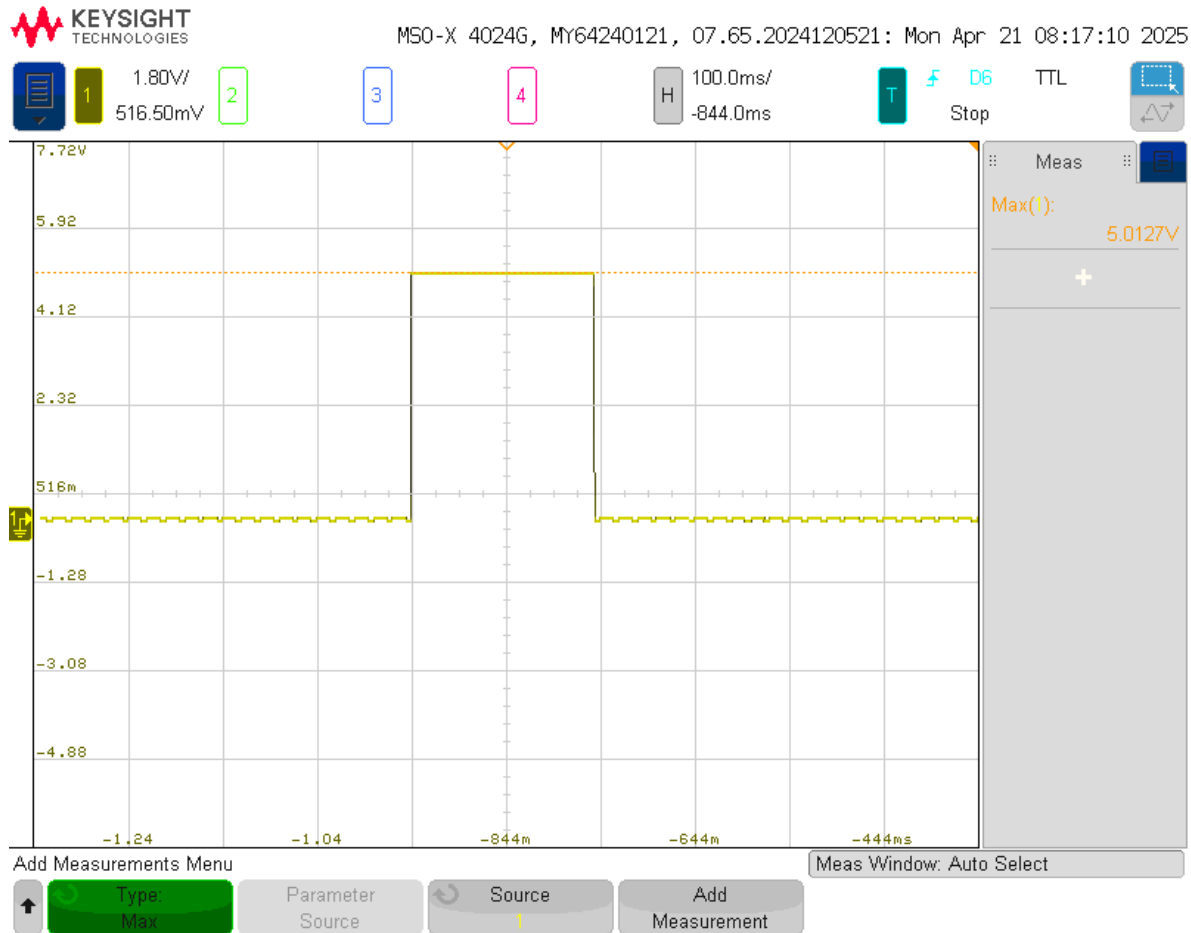
במהלך בדיקה זו נבחנה תקינות פעולת אוגר ההזזה הראשון, אשר אחראי על זיהוי לחיצות תקינות של המשתמש ושמירתן כתצוגת ביטים. נצפתה תגובה תקינה לפעולת לחיצה בודדת, אשר הובילה להחלקת ביט פנימה אל תוך האוגר. בהמשך, נבדקה התקדמות תקינה של הביטים לאורך האוגר עם כל לחיצה נוספת, כהתנהגות צפויה בתהליך הזנת קוד.

במצב שבו הוזן קוד שגוי, התקבל מעבר של ביט אל הכניסה של אוגר ההזזה השני, אשר יועד לשמירת ניסיונות שגויים. כך נשמרה כל הקשה שגויה כרצף נפרד, תוך הפרדה ברורה בין תהליך קליטת קוד תקין לבין תיעוד ניסיונות שגויים. התנהגות זו אוששה הן באמצעות צפייה ישירה בלדים והן באמצעות סימולציה ממוחשבת.

7.2. תוצאות מעשיות

בחלק זה נמדדו רכיבי ומערכות הפרוייקט באופן מעשי לאחר שהמערכת נבנתה על מטריצה.

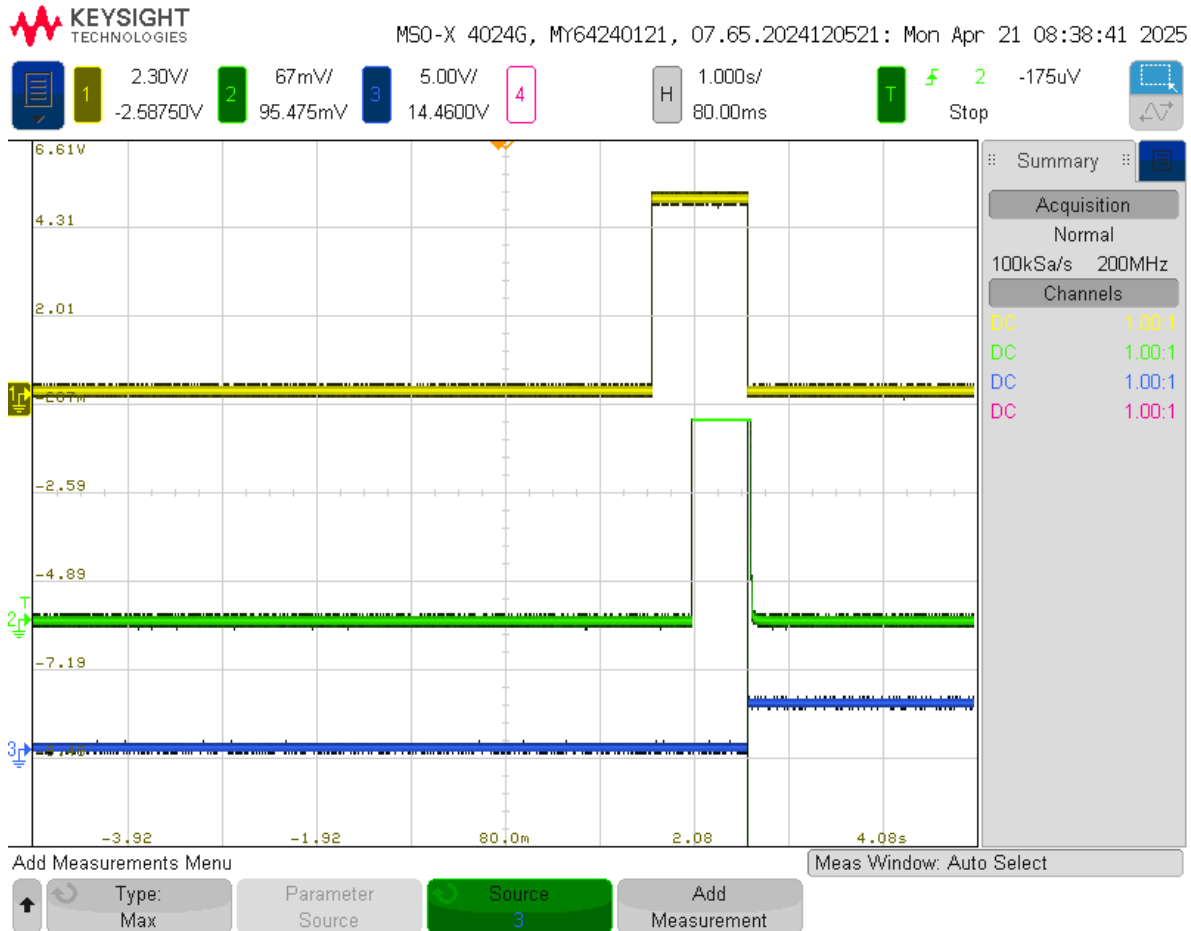
7.2.1. תוצאות בדיקת לוח מקשים



איור 32 לחיצה על הספרה 5 בלוח מקשים

התרשים המוצג להלן מתאר את תגובת המערכת בעת לחיצה על הספרה 5 בלוח המקשים. ניתן להבחין בעליית מתח חדה ונקייה, המגיעה לרמה של כ-5 וולט, ללא נוכחות של תנודות או ריטוטים (bounce) מה שמעיד על פעולה יציבה ואמינה של המעגל. כחלק מהבדיקה בוצעו מדידות גם על שאר המקשים בלוח, ונמצא כי כולם מפיקים תגובת קלט דומה – נקייה, יציבה וללא ריטוטים. ממצא זה מחזק את תקינות תת-המערכת האחראית על קליטת הקלט מהמשתמש, ומעיד על תכנון נכון של רשת ההתנגדויות בממשק הלחצנים.

7.2.2 תוצאות בדיקת קוד שגוי



איור 33 תוצאות בדיקת קוד שגוי מוצאי האוגר המונה לחיצות

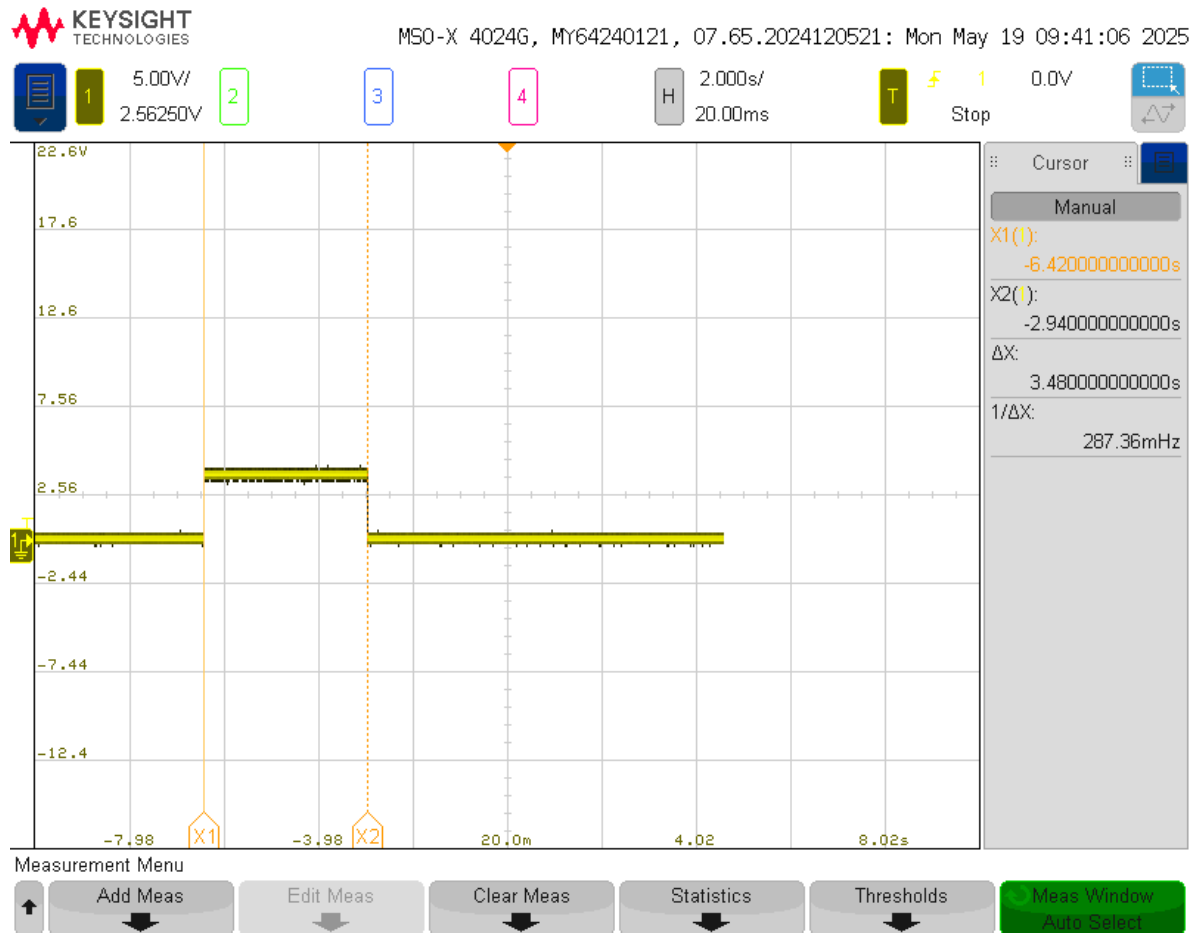
התרשים המוצג להלן מציג את תגובת אוגר ההזזה לאחר שלוש לחיצות עוקבות של קוד שגוי. הבדיקה התבצעה באמצעות שלושה ערוצי מדידה מקבילים באוסצילוסקופ לצורך תצפית בו-זמנית על שלושת הפלטים הראשונים של האוגר:

- הערוץ הצהוב (CH1) מייצג את הפלט Q0 ניתן לראות בו פולס קצר המופיע ראשון בזמן, המעיד על החלקת הביט הראשון לתוך האוגר.
- הערוץ הירוק (CH2) מייצג את הפלט Q1 מגיב מעט מאוחר יותר, לאחר שהביט נדחף פנימה במהלך הלחיצה השנייה.
- הערוץ הכחול (CH3) מייצג את הפלט Q2 נדלק לאחר הלחיצה השלישית, מה שמעיד על כך שהביטים נדחפים בהדרגה קדימה בתוך האוגר, בהתאם למבנה של אוגר הזזה סינכרוני.

המעבר הברור של הביטים באוגר, בזמן ובסדר הנכון, מאשר את תקינות פעולת רכיב האחסון, כמו גם את הלוגיקה המובילה לכניסת הנתונים.

תופעה זו מאששת את תפקודו התקין של מנגנון ניהול הקלט במערכת ומדגישה את אמינות תהליך זיהוי הקוד התקין ברמת החומרה.

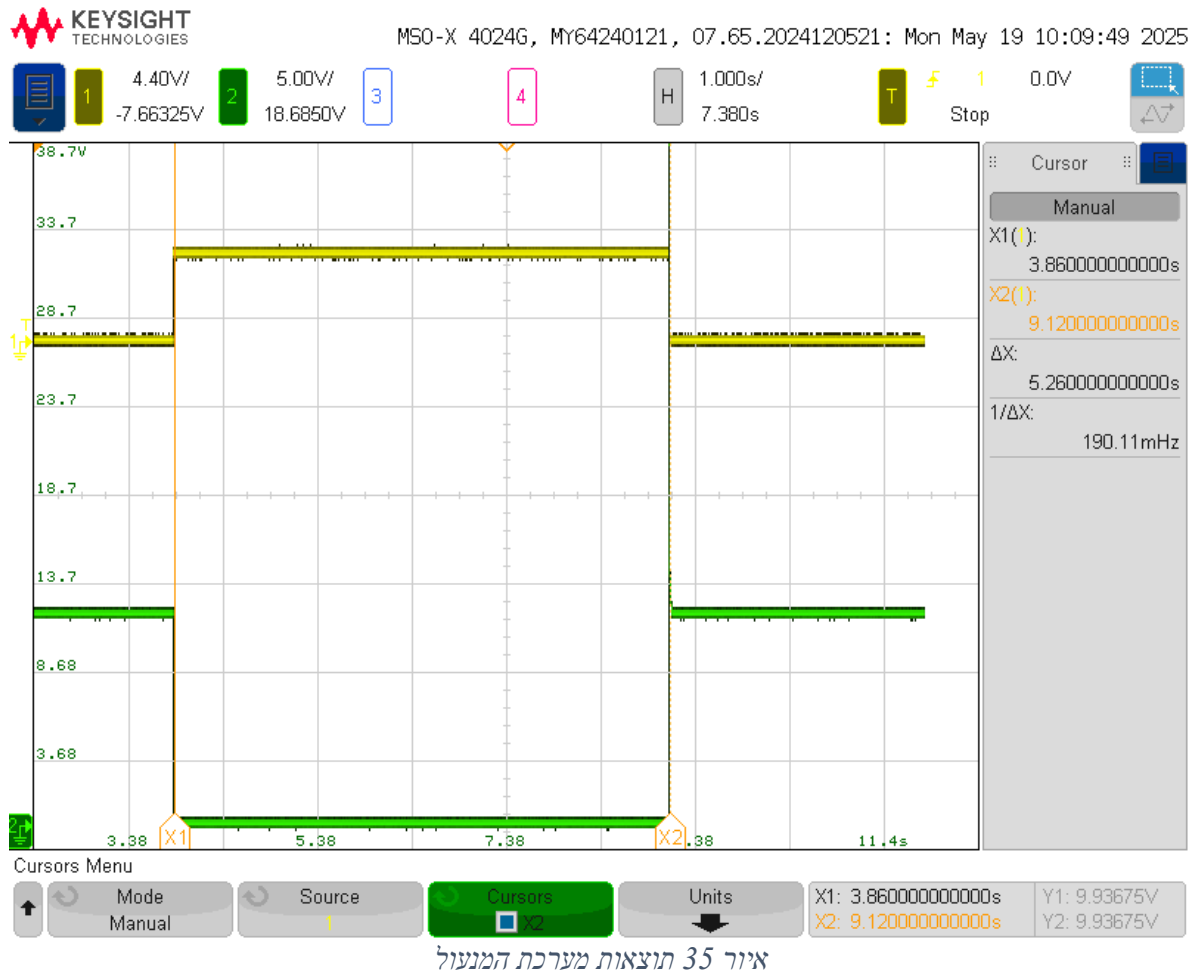
7.2.3. תוצאות תקינות הבאזר



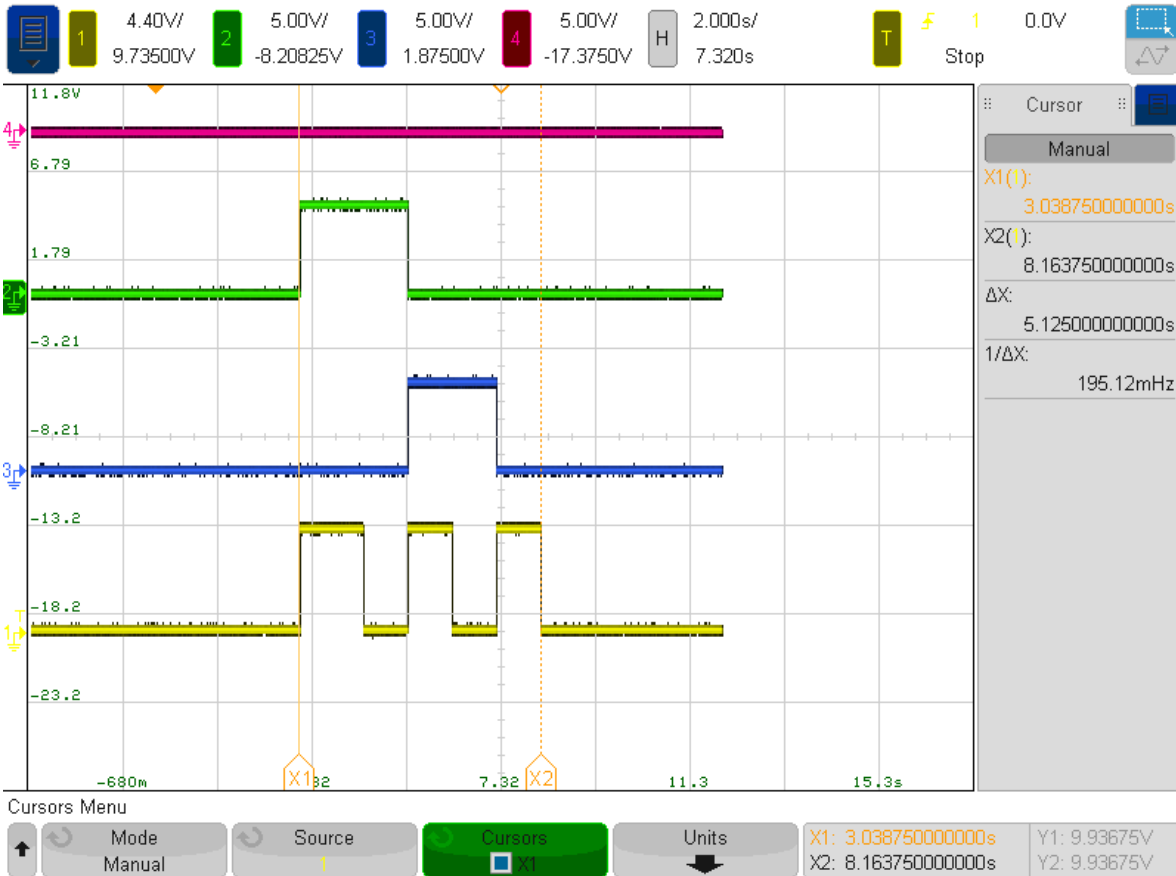
איור 34 תוצאות תקינות הבאזר

התרשים מציג את תגובת הצפצפה לאחר שלוש הקשות של קוד שגוי. נמדד פרק זמן של בערך 3 שניות שבו הצפצפה פעלה באופן רציף, בהתאם לדרישות המערכת. הפולס המופיע בתרשים הוא יציב ונקי, ומעיד על תפקוד תקין של מעגל ההשהיה וההפעלה. תוצאה זו מאשרת את עמידת המערכת בדרישת ההתרעה לאחר שלוש טעויות קלט.

7.2.4. תוצאות בדיקת תקינות מערכת המנעול



התרשים מציג את תגובת מערכת המנעול לאחר הזנת קוד תקין. ניתן לראות שהמוצא למנעול נותר במצב פעיל במשך 5.26 שניות, בהתאם למנגנון ההשהיה שתוכנן לפתיחה זמנית של הכספת. הפעולה החלקה והיציבה של הפולס מצביעה על תפקוד תקין של טיימר הפתיחה, ועל כך שהמנעול משתחרר ומפסיק לפעול בדיוק בהתאם לחלון הזמן שנקבע מראש, וניתן לראות בקלות את סנכרון הפעולות בין מוצא הקוד תקין לבין המנעול.



איור 36 תגובת מערכת ספירה לאחור

7.2.5 תוצאות בדיקת מערכת ספירה לאחור

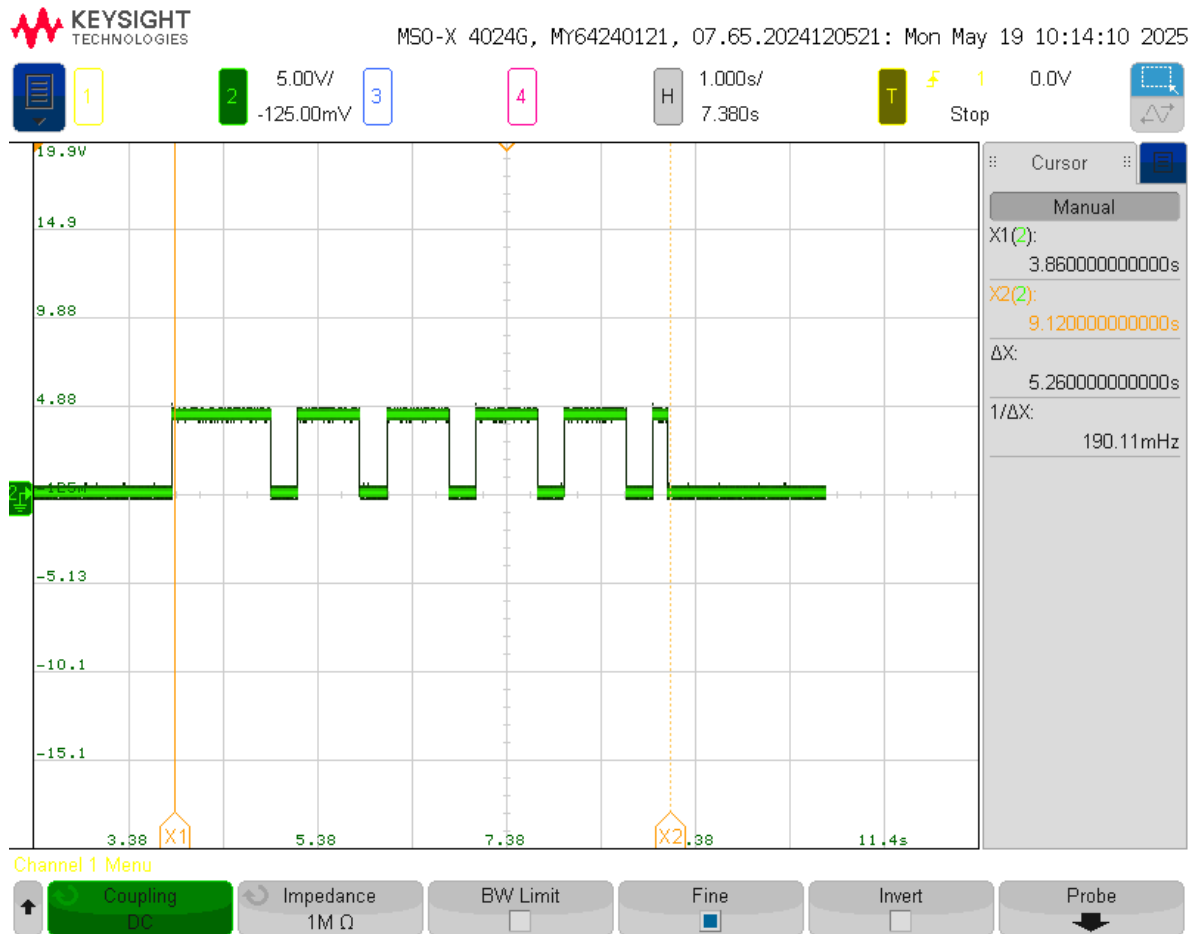
סגול- יציאה 3 של המונה, ירוק- יציאה 2 של המונה, כחול- יציאה 1 של המונה, צהוב- יציאה 0 של המונה. כאשר הגרף העליון זה MSB והגרף התחתון זה LSB.

התרשים מציג את תגובת מערכת המונה לאחר הזנת קוד תקין, כאשר טיימר מסוג 555 מופעל במצב פולסים (astable mode) הטיימר מפיק רצף של פולסים למשך זמן כולל של כ-5 שניות, בהתאם לערכים שנבחרו לרכיבי ההתזמון (נגד וקבל).

רצף הפולסים מועבר אל כניסת השעון של המונה, ומאפשר לו לבצע ספירה עוקבת במהלך זמן הפעלת הטיימר. בתרשים ניתן לזהות את הפולסים הסדרתיים בערוץ הרלוונטי ואת תגובת המונה ביציאות

השונויות בהתאם להתקדמות הספירה. התנהגות זו מאשרת תפקוד תקין של מעגל יצירת הפולסים ושל יחידת הספירה במערכת.

7.2.6 תוצאות בדיקת מערכת הטיימר 555 במצב סטבילי



איור 37 תוצאות בדיקת מערכת הטיימר 555 במצב סטבילי

התרשים מציג את תגובת מערכת הטיימר 555 הפועל במצב פולסים (astable) ניתן לראות כי הטיימר מפיק רצף פולסים אחיד לאורך זמן של כ-5.26 שניות, בקצב קבוע וללא סטיות. הפולסים מוצגים בצורה נקייה וברורה, עם זמני מחזור יציבים, מה שמעיד על תפקוד תקין של מעגל ההשהיה והאוסצילציה. פעולה זו נועדה להפעיל את המונה ולאפשר לו להתקדם בספירה במהלך חלון הזמן שנקבע, בהתאם לתכנון המערכת.

8. בעיות תקלות ופתרונות

במהלך שלבי התכנון, הסימולציה, ההרכבה והבדיקות של המערכת, התעוררו מספר בעיות הנדסיות ולוגיות אשר חייבו חזרה לתכנון, התאמות בזמן אמת, ובחינה חוזרת של רכיבים ותצורות חיבור. בין האתגרים ניתן למנות תקלות במעבר אותות בין רכיבים, תגובות לא צפויות של רכיבי לוגיקה, קשיים בתזמון מדויק של פעולות, אי יציבות בכניסות עקב רעשים, והתנהגות שונה של רכיבים פיזיים לעומת תפקודם בסימולציה. בעיות אלו דרשו ביצוע ניסויים חוזרים, מדידות מדויקות, תיעוד שיטתי, ודיוקים ברמת תכנון תת מערכות. התהליך כלל התמודדות עם מורכבות לוגית ועם הצורך בהתאמות הנדסיות לאורך שלבי הפיתוח.

8.1 בעיות מתח צף בלוח מקשים

במהלך חיבור לוח המקשים למערכת, זוהתה בעיה בתגובת הכניסות הלוגיות בעת לחיצה על לחצן. עם הפעלת הלחצן, המתח על הקו עלה כמצופה, אך עם שחרורו לא חזרה הרמה הלוגית מידית ל-0 וולט. במקום זאת, נצפתה ירידה איטית או תנודתית במתח, שגרמה לאותות שגויים או להפעלה לא יציבה של הרכיבים הלוגיים.

8.1.1 פתרון מתח צף בלוח מקשים

התופעה נבעה מהיעדר נתיב פריקה מוגדר לקו הקלט, כלומר – חוסר בנגד משיכה לאדמה. ללא נגד זה, הקו נשאר במצב ביניים (מתח "צף"), ולעיתים נשמרה רמה לוגית גבוהה גם לאחר שחרור הלחצן. לצורך ייצוב המתח, שולבו נגדי פול דאון בעלי ערך טיפוסי של עשרה קילו אוהם, אשר חיברו כל קו קלט לאדמה במצב מנוחה. הוספתם הבטיחה פריקה מיידיה של המתח לאחר כל לחיצה, ומנעה קפיצות או רעידות אות בלוגיקת הקלט.

8.2 בעיות ריטוטים בלחיצה

תופעת הריטוטים בלחצן נגרמת כתוצאה מהמנגנון המכני הפנימי של הלחצן, אשר בעת הלחיצה מבצע מספר ניתוקים ומעברים מהירים לפני שהמגע מתייצב. תופעה זו יוצרת תנודות מהירות במתח, במקום מעבר חד וברור, ועלולה לגרום לכך שהמערכת תזהה מספר לחיצות שגויות במקום לחיצה אחת תקינה.

8.2.1 פתרון ריטוטים בלחיצה

לפתרון בעיה זו חובר קבל קטן בין רגל הלחצן לבין האדמה. הקבל סופג את התנודות ומייצב את המתח, כך שבכניסה מתקבל אות נקי וחד. פעולה זו מונעת את הרישום של מספר לחיצות שגויות ומשפרת את אמינות קליטת האות במערכת.

ולהלן גרף המתאר את בעיית הריטוטים בלחיצה:



איור 38 ריטוטים בלחיצה על הספרה 5

8.3 בעיית מירוצים בדלגלג D

במהלך חיבור הדלגלג מסוג D נוצר מצב בו רגלי השעון והנתונים קוצרו יחד וחוברו ללחצן אחד. כתוצאה מכך, בעת הלחיצה התקבלו שינויים בוזמניים בשני הקווים, מה שגרם לדלגלג לקרוא ערך לא יציב או אקראי, תופעה הידועה כמרוץ. הפלט שהתקבל לא היה עקבי ולעיתים לא שיקף את הפעולה הרצויה.

8.3.1 פתרון בעיית מירוצים בדלגלג D

כדי לפתור בעיה זאת, הופרדו הקווים: רגל הנתונים חוברת למתח קבוע כדי לקבוע ערך יציב מראש, ורק רגל השעון חוברת ללחצן, כך שכל לחיצה יוצרת קצה עולה ברור ומוגדר. פתרון זה הבטיח שהדלגלג ישמור ערך נכון ויציב בכל הפעלה.

8.4 בעיית טריגר קצר בטיימר 555

במהלך חיבור רכיב התזמון מסוג 555 במצב מונוסטבילי, התברר כי הוא נדרש לפעול כתוצאה מטריגר חד-פעמי קצר, על-מנת לייצר פולס למשך זמן קצוב. בפועל, יציאות האוגרים והדלגלגים אשר שימשו כמקור לטריגר, סיפקו רמה לוגית קבועה ולא פולס רגעי. מצב זה גרם לכך שרכיב ה-555 לא הופעל כנדרש, שכן כניסת הטריגר שלו רגישה לירידה חדה בלבד, ואינה מגיבה לשינויים איטיים או למתח קבוע.

8.4.1 פתרון בעיית טריגר קצר בטיימר 555

כדי לפתור בעיה זו, נוסף קבל קטן בין היציאה הלוגית לבין רגל הטריגר של רכיב ה-555. הקבל יצר מעבר קצר לרמה נמוכה ברגע שינוי המתח, פעולה שדימתה טריגר מידי ויחיד. פתרון זה אפשר הפעלה תקינה של רכיב התזמון גם כאשר המקור שלו אינו מספק פולס קצר באופן טבעי.

9 . ארדואינו

9.1 תכנון הארדואינו

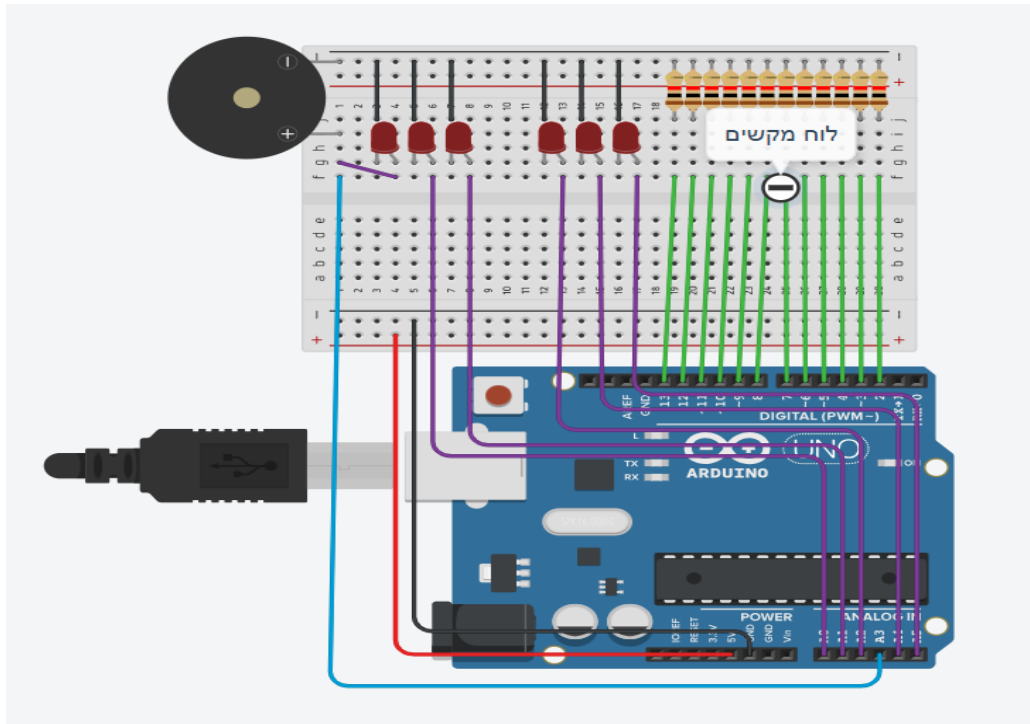
בפרויקט זה שולב רכיב Arduino Uno כיחידת הבקרה המרכזית של מערכת הכספת האלקטרונית. מטרת הארדואינו היא לנהל את תהליך זיהוי הקוד שהוזן, לבצע את הלוגיקה הדרושה לבדיקת נכונותו, ולשלוט באמצעי הפלט בהתאם לתוצאת הבדיקה. הארדואינו קולט קלט מלוח מקשים מטריציוני, המחובר אל הפינים דיגיטליים D2 עד D13 באמצעות קריאה סדורה של שורות ועמודות, מזהה הארדואינו את המקשים שנלחצו. כמו כן, הפינים האנלוגיים A0 עד A5 משמשים כיציאות דיגיטליות המחוברות לאמצעי הפלט: חמישה לדים וצפצפה אחת (באזר). כל לחיצה על מקש מזוהה בזמן אמת, מוזנת לתוך מבנה נתונים זמני, ומשווה מול קוד סודי שהוגדר מראש בתוכנה. במידה והקוד תקין, ניתנת פקודה להדלקת לד ירוק ופתיחת המנעול (בפלט חיצוני). אם הקוד שגוי, נדלקות נורות שגיאה והצפצפה מופעלת בהתאם. תכנון זה מאפשר מימוש מערכת אמינה, פשוטה ונגישה, תוך שמירה על מספר רכיבים מינימלי וניצול יעיל של משאבי הארדואינו.

9.2 מימוש הארדואינו

במימוש המעשי חוברו כלל הרכיבים למיקרו בקר זה תוך שימוש בכניסות וביציאות דיגיטליות ואנלוגיות לפי הפונקציונליות הנדרשת בכל רכיב. חיבורי המערכת מבוצעים מטריצת חיבורים באופן הבא:

- **לוח המקשים (Keypad)** מחובר לפינים דיגיטליים D2 עד D13 כאשר כל אחד מ־12 הלחצנים מחובר ישירות לארדואינו. וכול לחצן מחובר דרך נגד Pull-down המחובר לשורת המינוס של לוח במטריצה.
- **מערך הלדים** כולל חמישה לדים המחוברים ליציאות A0 עד A5 לד A0 מדמה פתיחת כספת תקינה, בעוד הלדים A1–A5 מדמים ספירה לאחר או חיווי שגיאות בהתאם למצב.
- **צפצפה (Buzzer)** מחוברת ליציאה A3 ומפועלת כאשר מתרחשות שלוש טעויות בהזנת קוד.
- **כלל האדמות (GND)** של הרכיבים מחוברים לשורת המינוס המרכזית של לוח המטריצה, אשר מחוברת לאדמת הארדואינו.
- **קו מתח של 5 וולט מהארדואינו** מחובר לשורת הפלוס של לוח המטריצה, לטובת הזנת רכיבים.

מערכת זו פועלת בהתאם לקוד שהוזן בארדואינו, ומגיבה באופן לוגי על סמך קלט מהמשתמש (דרך לוח המקשים), תוך שליטה מדויקת בפלטים (לדים, באזר) באמצעות לוגיקת תוכנה מבוססת C++.



איור 39 חיבורי המערכת בעזרת הארדואינו

9.3 תוצאות הארדואינו

המערכת פעלה בהתאם לדרישות הפרויקט והגיבה כמצופה לכל אחד מהתרחישים:

- בעת הקשת קוד תקין 952 נדלק לד A0 למשך 5 שניות המדמה פתיחת כספת. במקביל, נדלקים הלדים A1 עד A5 בהדרגה בכל שנייה, תוך יצירת חיווי ויזואלי של ספירה לאחור. בתום 5 שניות כל הלדים כבים והמערכת מתאפסת.
- אם הוזן קוד שגוי, נדלק לד A1 למשך שנייה אחת. לאחר שלוש טעויות ברצף, נדלקים הלדים A1–A2 והצפצפה מופעלת למשך 3 שניות. לאחר מכן כל הלדים נכבים ומספר הטעויות מתאפס.
- בעת פתיחת הכספת, אם המשתמש לוחץ על **כוכבית** או **סולמית** מתבצעת סגירה מיידית של הכספת והלדים כבים בהתאם, ללא קשר למצב הספירה.
- לחיצות מזוהות במדויק מכל המקשים בלוח, ונרשמות בפלט הסריאלי של הארדואינו. ניתן היה לראות שהמערכת מזוהה גם לחיצות חוזרות ומגיבה אליהן בהתאם.

התנהגות זו מעידה על מימוש תקין של הלוגיקה שתוכנתה בארדואינו, בשילוב של רכיבי קלט (Keypad) פלטים ויזואליים (לדים) ופלט קול (צפצפה), והוכיחה שהמערכת יציבה ופועלת בהתאם למפרט הדרוש.

9.4 קוד ארדואינו

9.5 הגדרות ראשוניות של המערכת

```
// מיפוי הפינים של המקשים
const int numKeys = 12;
const int keyPins[numKeys] = {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13};
char keyMap[numKeys] = {'*', '7', '4', '1', '0', '8', '5', '2', '#', '9', '6', '3'};

// פינים של לדים ובזזר
const int led1Pin = A0; // קוד תקין (לד כספת פתוחה)
const int led2Pin = A1; // ספירה לאחור - שלב 1
const int led3Pin = A2; // ספירה לאחור - שלב 2
const int buzzerPin = A3; // צפצפה באזעקה
const int ledErr1 = A4; // ספירה לאחור - שלב 3 / טעות 1
const int ledErr2 = A5; // ספירה לאחור - שלב 4 / טעות 2

String inputCode = "";
const String correctCode = "952";
int wrongAttempts = 0;
bool wasPressed[numKeys] = {false};

bool isOpen = false;
unsigned long openStartTime = 0;
const unsigned long openDuration = 5000;

// delay משתנים עבור הדלקת לדים מדורגת ללא
int ledStage = 0;
unsigned long lastLedUpdate = 0;
const unsigned long ledInterval = 1000;
```

9.6 הגדרות התחלתיות של המערכת

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    for (int i = 0; i < numKeys; i++) {
        pinMode(keyPins[i], INPUT);
    }
    pinMode(led1Pin, OUTPUT);
}
```

```

pinMode(led2Pin, OUTPUT);
pinMode(led3Pin, OUTPUT);
pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
pinMode(ledErr1, OUTPUT);
pinMode(ledErr2, OUTPUT);
Serial.println("הזן קוד בן 3 ספרות");
}

```

9.7 תנאים לסגירת הכספת

```

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    //  סגירה אוטומטית לאחר 5 שניות
    if (isOpen && currentMillis - openStartTime >= openDuration) {
        Serial.println("⏰ סגירה אוטומטית לאחר 5 שניות");
        digitalWrite(led1Pin, LOW);
        digitalWrite(led2Pin, LOW);
        digitalWrite(led3Pin, LOW);
        digitalWrite(ledErr1, LOW);
        digitalWrite(ledErr2, LOW);
        isOpen = false;
        ledStage = 0;
    }

    //  סגירה מיידית אם נלחץ * או # בזמן פתיחה
    if (isOpen) {
        for (int i = 0; i < numKeys; i++) {
            bool isPressed = digitalRead(keyPins[i]) == HIGH;
            if (isPressed && !wasPressed[i]) {
                char key = keyMap[i];
                if (key == '*' || key == '#') {
                    Serial.println("🔒 סגירה מיידית במהלך פתיחה");
                    digitalWrite(led1Pin, LOW);
                    digitalWrite(led2Pin, LOW);
                    digitalWrite(led3Pin, LOW);
                    digitalWrite(ledErr1, LOW);
                    digitalWrite(ledErr2, LOW);
                    isOpen = false;
                    ledStage = 0;
                    break;
                }
            }
        }
        wasPressed[i] = digitalRead(keyPins[i]) == HIGH;
    }
}

```

9.8 ספירה לאחור של 5 שניות כאשר הכספת נפתחת

```
// ⏳ הדלקת לדים מדורגת ליצורך ספירה לאחור
if (isOpen && currentMillis - lastLedUpdate >= ledInterval) {
    lastLedUpdate = currentMillis;
    ledStage++;
    if (ledStage == 1) digitalWrite(led2Pin, HIGH); // שלב 1
    if (ledStage == 2) digitalWrite(led3Pin, HIGH); // שלב 2
    if (ledStage == 3) digitalWrite(ledErr1, HIGH); // שלב 3
    if (ledStage == 4) digitalWrite(ledErr2, HIGH); // שלב 4
}
```

9.9 קריאת קוד מהמשתמש

```
for (int i = 0; i < numKeys; i++) {
    bool isPressed = digitalRead(keyPins[i]) == HIGH;

    if (isPressed && !wasPressed[i]) {
        char key = keyMap[i];
        Serial.print("הוקשה ספרה: ");
        Serial.println(key);

        if ((key == '*' || key == '#') && isOpen) {
            Serial.println("🔒 סגירה מיידית – כוכבית או סולמית");
            digitalWrite(led1Pin, LOW);
            digitalWrite(led2Pin, LOW);
            digitalWrite(led3Pin, LOW);
            digitalWrite(ledErr1, LOW);
            digitalWrite(ledErr2, LOW);
            isOpen = false;
            ledStage = 0;
            continue;
        }

        if (key != '*' && key != '#') {
            inputCode += key;
        }

        if (inputCode.length() == 3) {
            if (inputCode == correctCode) {
                handleCorrectCode();
            } else {

```

```

        handleWrongCode();
    }
    inputCode = "";
}
}
wasPressed[i] = isPressed;
}
}

```

9.10 טיפול בקוד תקין

```

void handleCorrectCode() {
    Serial.println("✓ קוד תקין – הכספת נפתחת");
    digitalWrite(led1Pin, HIGH);
    isOpen = true;
    openStartTime = millis();
    lastLedUpdate = millis();
    ledStage = 0;
    wrongAttempts = 0;
}

```

9.11 טיפול בקוד שגוי כללי

```

void handleWrongCode() {
    wrongAttempts++;
    Serial.print("✗ קוד שגוי – נסיון ");
    Serial.println(wrongAttempts);
}

```

9.11.1 טיפול בקוד שגוי כול פעם

```

if (wrongAttempts == 1) {
    digitalWrite(led2Pin, HIGH);
    digitalWrite(ledErr1, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(led2Pin, LOW);
} else if (wrongAttempts == 2) {
    digitalWrite(led2Pin, HIGH);
    digitalWrite(ledErr2, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(led2Pin, LOW);
}

```

9.11.2 טיפול 3 פעמים קוד שגוי

```

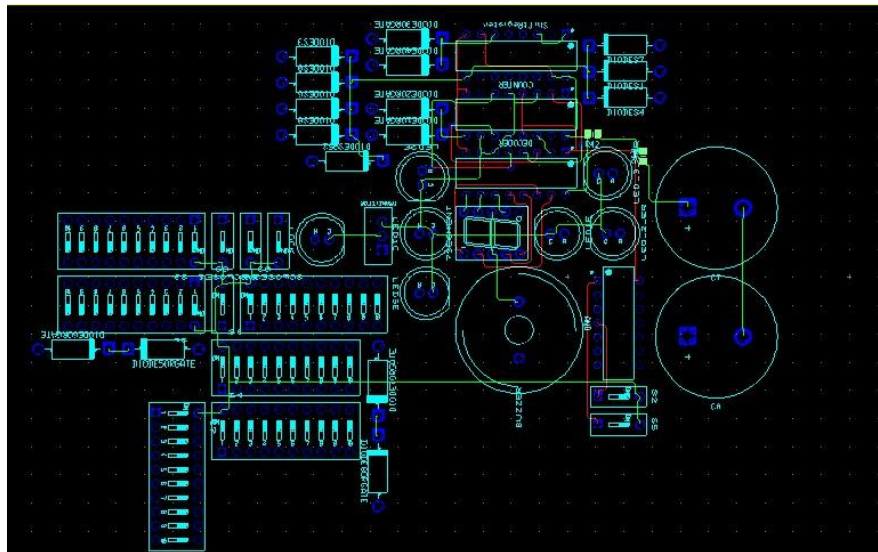
if (wrongAttempts >= 3) {
    Serial.println("⚠ 3 הפעלת אזעקה – ניסיונות שגויים");
    digitalWrite(led2Pin, HIGH);
    digitalWrite(led3Pin, HIGH);
    digitalWrite(buzzerPin, HIGH);
}

```

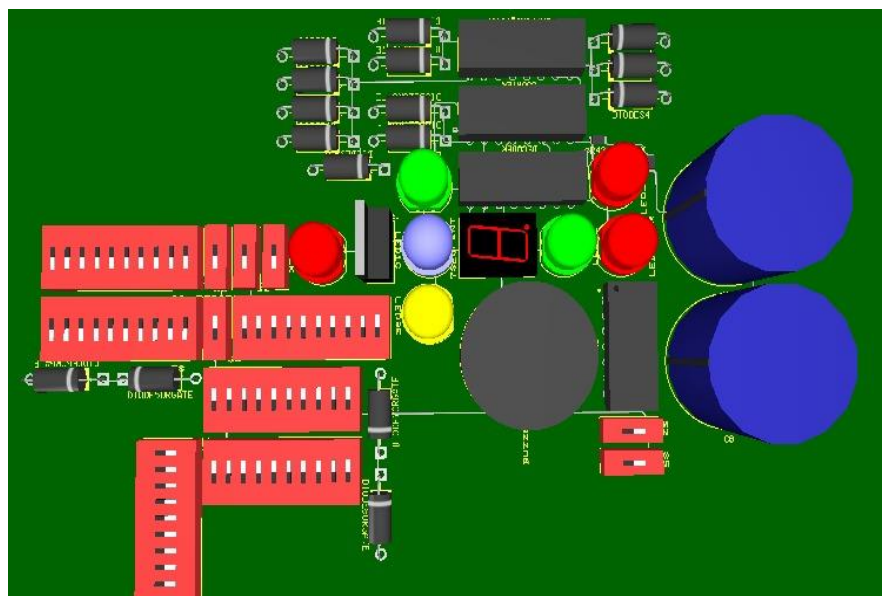
```
delay(1000);  
digitalWrite(led2Pin, LOW);  
digitalWrite(led3Pin, LOW);  
delay(2000);  
digitalWrite(buzzerPin, LOW);  
digitalWrite(ledErr1, LOW);  
digitalWrite(ledErr2, LOW);  
wrongAttempts = 0; }}
```

10. שרטוט PCB

Printed Circuit Board PCB - כרטיס אלקטרוני שמאפשר חיבור מסודר וקבוע של רכיבים במעגל חשמלי, באמצעות מסלולי נחושת מודפסים על גבי לוח מבודד. הוא נדרש כדי להפוך מעגל ניסיוני למערכת אמינה, מקצועית וקומפקטית. במקום חיבורים זמניים שעלולים לזוז או להתנתק, ה־PCB מאפשר הלחמה קבועה של הרכיבים, מפחית תקלות, תורם ליציבות המערכת, ומתאים לשילוב במוצר סופי. תכנון הכרטיס מוצג במבט דרממדי לתכנון המסלולים ובתלת־ממד להמחשת המערכת המורכבת. משמעותיות מהמעבר מהתיאוריה ליישום בפועל.

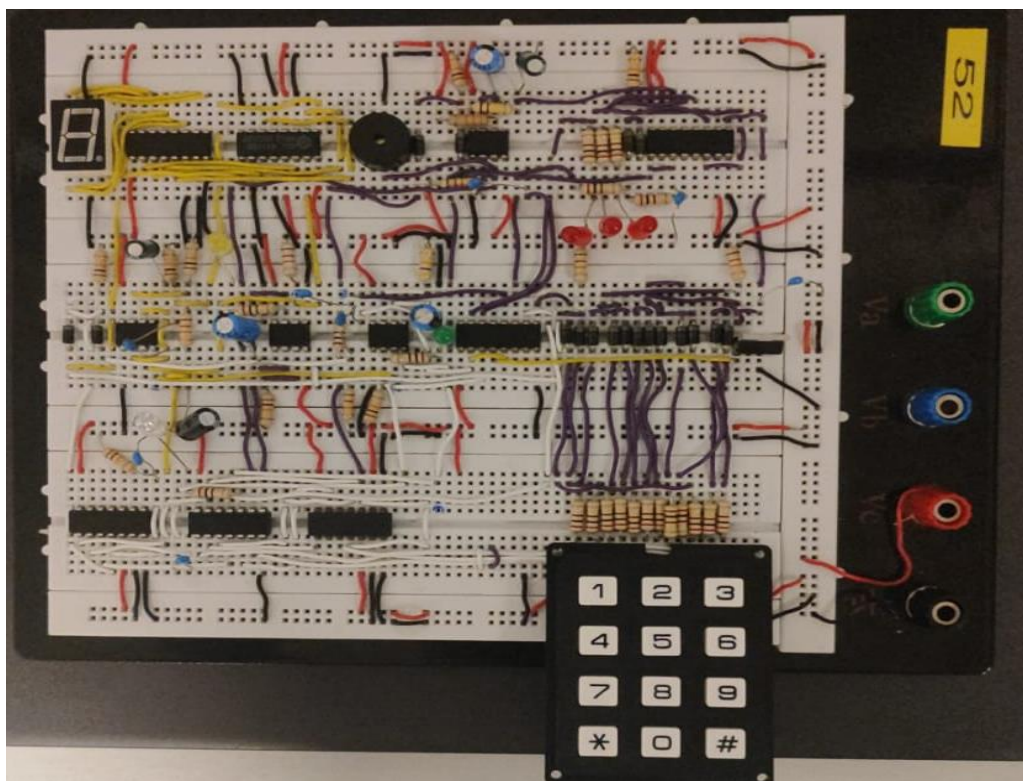


איור 40 PCB של המערכת בדו מימד

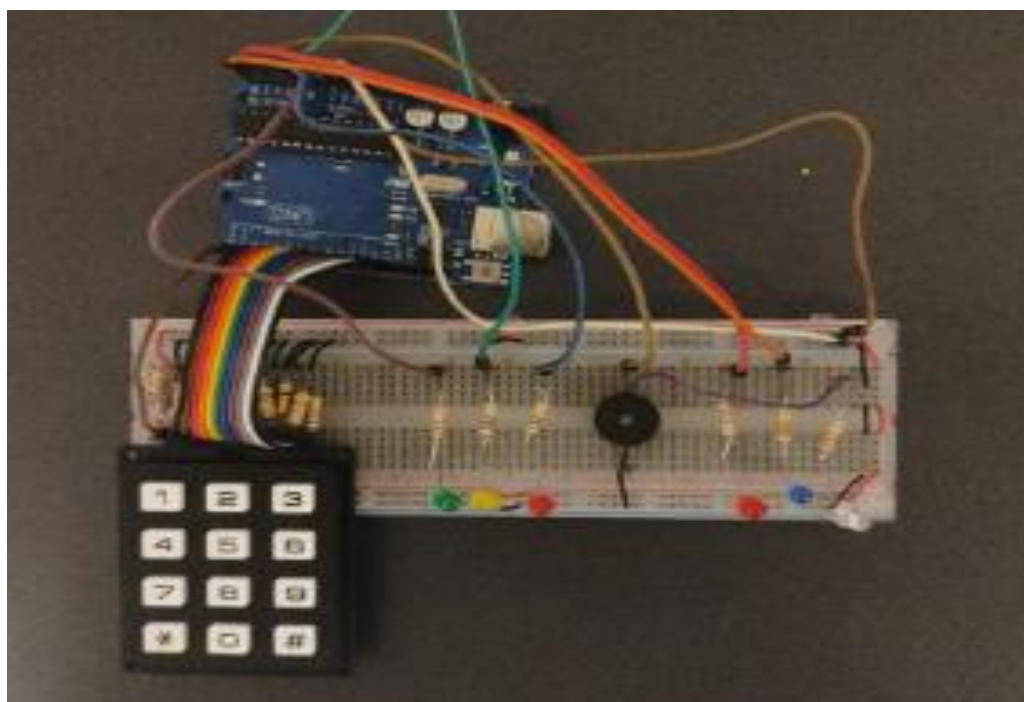


איור 41 PCB של המערכת בתלת מימד

11 נספחים



איור 42 המערכת על גבי מטריצת חיבורים



איור 43 המערכת על גבי מיקרו בקר ארדואינו

12 רשימות

12.1 רשימת איורים

7	איור 1 שרידי כספת שנבנתה ע"י חברת Mosler
7	איור 2 מנגנון נעילה חכם קדום
9	איור 3 - הכספת האלקטרונית הראשונה של חברת Elsafe שהוצגה בשנת 1979
10	איור 4 - זמן 555
11	איור 5 - זמן 555 במצב מונוסטבילי
11	איור 6 - זמן 555 במצב אסטבילי
12	איור 7-7 segment
13	איור 8 - חיבור הלדים ב-7 segment בשיטת Common Cathode
13	איור 9 - חיבור בין יציאות המפענח לכניסות 7 segment כדי לקבל את תצוגת המספרים
15	איור 10 - רכיב CD4013 מכיל 2 דלגלי D נפרדים
16	איור 11 - שרטוט מעגל פנימי במונה בינארי ואותות המוצא שלו
16	איור 12 - מבנה פנימי של אוגר הזזה
19	איור 13 - קודן חשמלי 3X4
22	איור 14 - סכמת בלוקים של כלל המערכת
23	איור 15 סכמת בלוקים מערכת קוד תקין
24	איור 16 - סכמת בלוקים לתת מערכת המנעול
25	איור 17 סכמת בלוקים לתת מערכת זיהוי קוד שגוי
26	איור 18 סכמת בלוקים לתת מערכת זיהוי 3 נסיונות קוד שגוי
27	איור 19 סימולציה של כל המערכת ב-Multisim
28	איור 20 תת מערכת לזיהוי קוד תקין ב-Multisim
30	איור 21 תת מערכת למנעול ב-Multisim
32	איור 22 תת מערכת לזיהוי קוד שגוי ב-Multisim
34	איור 23 תת מערכת לזיהוי 3 ניסיונות קוד שגוי ב-Multisim
38	איור 24 לוח מקשים
39	איור 25 בדיקת מערכת קוד תקין
40	איור 26 בדיקת מערכת קוד שגוי
41	איור 27 מערכת ספירה לאחר
42	איור 28 חייווי קולי וחזותי של המערכת לקוד שגוי
43	איור 29 תוצאות לחיצה על הספרה 5
44	איור 30 תגובת דלגלי D לקוד תקין
45	איור 31 תגובת האוגרים להקשה של קוד שגוי
46	איור 34 לחיצה על הספרה 5 בלוח מקשים
47	איור 35 תוצאות בדיקת קוד שגוי מוצאי האוגר המונה לחיצות
48	איור 36 תוצאות תקינות הבאזר
49	איור 37 תוצאות מערכת המנעול
50	איור 38 תגובת מערכת ספירה לאחר
51	איור 39 תוצאות בדיקת מערכת הטיימר 555 במצב סטבילי
53	איור 40 ריטוטים בלחיצה על הספרה 5
56	איור 41 חיבורי המערכת בעזרת הארדואינו
62	איור 42 PCB של המערכת בדו מימד
62	איור 43 PCB של המערכת בתלת מימד
63	איור 44 המערכת על גבי מטריצת חיבורים
63	איור 45 המערכת על גבי מיקרו בקר ארדואינו

12.2 רשימת טבלאות

14	טבלה 1 טבלת אמת לרכיב BCD to 7 segment
14	טבלה 2 טבלת אמת של שער NOT
15	טבלה 3 טבלת האמת של דגלג D
20	טבלה 4 רשימת ציוד

12.3 רשימת נוסחאות

11	משוואה 1 משך זמן הפולס במצב מונוסטבילי
12	משוואה 2 משך זמן הפולס במצב גבוה אסטבילי
12	משוואה 3 משך זמן בפולס במצב נמוך אסטבילי
12	משוואה 4 תדר אות המוצא של הזמן במצב אסטבילי

12.4 רשימת מקורות

- [1] "A History of Safes" 9 10 2020 .Available: <https://www.csuguk.com/post/a-history-of-safes>.
- [2] "A Brief History of Safes ",Available: <https://metrolockandsafe.com/blog/history-safes/>.
- [3] "Rusting museum of our attempted suicide survives in the desert" 22 8 2004
Available: <https://www.sfgate.com/opinion/article/Rusting-museum-of-our-attempted-suicide-survives-2699862.php>.
- [4] "Chubb Detector Lock: The Lock That Challenged and Changed Security" 13 1 2024 .
Available: <https://historyofsafes.com/chubb-detector-lock/>.
- [5] "Designing an electronic safe," 2 8 2010 .[מקוון]. Available:
<https://www.embedded.com/designing-an-electronic-safe/>.
- [6] "Safecracking: Open a Safe with Drained Internal Batteries," 28 5 2022 .[מקוון] .
Available: <https://ericdraken.com/elsafe/>.