מחברים מסוננים בשירות הבטחון

אייל רונן, RF Immunity

ההתפתחות הטכנולוגית המואצת בשנים האחרונות, הנגזרת מפיתוחים בתעשייה ובמוצרי הצריכה, משפיעה גם על הפיתוחים בתעשיות הביטחוניות, במערכות הנשק, ההגנה, התצפית והעקיבה. עם הקידמה, קיימת דאגה רבה בהטמעת רכיבים תעשייתיים או רכיבים המיועדים לשוק האזרחי, במערכות הנמצאות בסביבת קרב מרובת הפרעות אלקטרומגנטיות ובנוסף ניזונות ממקורות מתח לא מהימנים. בסוגיה זו, מחברים מסוננים מוכיחים עצמם כפתרון יעיל ומעשי בכל יישום.

אין ספק כי כולנו קוצרים את פירות הקידמה בכל תחום בחיינו, ברפואה, בתקשורת, בציוד הנדסי, בטיחות התחבורה ובקרת התנועה, מערכות בידוריות ועוד. גם השוק הביטחוני נהנה מריבוי הטכנולוגיות במובנים רבים:

א. טכנולוגיות ורכיבים, שאמינותם ויעילותם הוכחו במסגרות תעשיתיות, מוחדרים אט אט למערכות צבאיות כפריטים זולים וזמינים "מהמדף" (CoTS) בניגוד לרכיבים המוגדרים כרכיבים המיועדים לתעשייה הבטחונית, שהוכחת כשירותם יקרה.

ב. התחרות על היוקרה בין היצרנים הגדולים בעולם יצרה קרקע פורה לתחליפים רבים, המבטיחים אופק יציב בייצור והספקות המערכות ללא חשש מסיום חיי הרכיב של יצרן ייחודי.

ג. מיזעור הרכיבים מאפשר את מיזעור המעגלים ומכאן, גם את מיזעור המערכות לטובת יישומים ניידים ו/או מוטסים. בכך נחסך משקל רב ונפח המארזים קטן משמעותית.

ד. יצרנים רבים מייצרים ממירי DC/DC ומודולים לסינון, תואמי תקן צבאי, החוסכים צורך בפיתוח.

ה. הקצבים של האותות עלו, תגובות המערכות בזמן אמת השתפרו והתקצרו. פרוטוקולי תקשורת מהירה נמצאים בשימוש נרחב באמצעי התצפית וההגנה ובמערכות בקרה ושליטה.

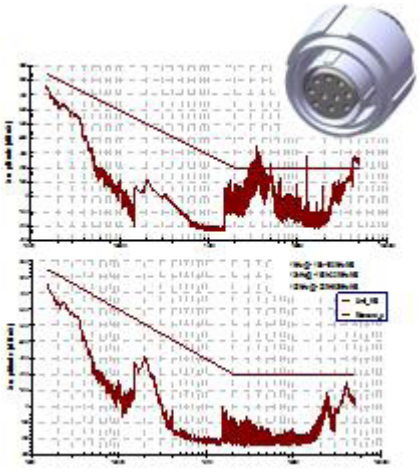
למרות הקשחת תתי-המערכות והרכיבים, קיימת סכנה גדולה של חשיפה ל"איומים" בזמן "פעילות מבצעית" בנקודות קריטיות לתיפקוד המערכת. שוק הרכיבים מציע עמידה בתקנים ובתנאי סביבה אך אלה אינם מבטיחים אינטגרציה מושלמת (חיים בצוותא) עם המערכות וההפרעות הסובבות. בנוסף, מזעור המערכות מצריך שימוש במספר מצומצם של מחברי כניסה בעלי צפיפות מגעים גבוהה. ריבוי האותות

דרך כבל יחיד או דרך מחבר כניסה יחיד מעלה את הסיכויים להפרעות.
ניסיונם המר של מהנדסי פיתוח רבים הוכיח כי הצלחת המערכת בבדיקות התאלמ"ג (תאימות אלקטרו-מגנטית) כיחידה עצמאית וללא ממשק מלא לעולם החיצון, עלולה להתגלות ככשלון בשטח וברמת הפלטפורמה, וחריגות עלולות להחשף בשלבים מאוחרים של הפרוייקט. בעיות מסוג זה הפכו לנחלת הכלל, אך ייתכן שהן ניתנות למיזעור עד כדי מניעה.

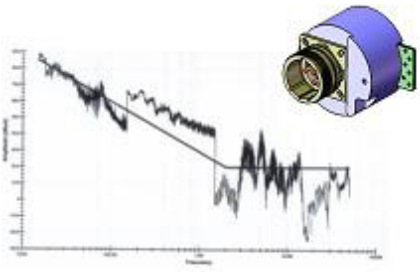
אבני הדרך בפרויקט

שלב א. מחקר ופיתוח

בתחילת כל פרוייקט יש להבין מהו הייעוד והיעד של המערכת. הבנת סביבות העבודה האפשריות כבר בשלבי המחקר, תקל על הפיתוח, תחסוך שינויים לשיפור ותוביל לתכנון מיטבי של המוצר. לעיתים, גם התכנון השקול והמחושב ביותר, עלול להיות פגיע או עלול ליצור הפרעות בעקבות נתון כלשהו שלא נלקח בחשבון או שלא הובא לידיעת המתכננים.
לשם כך, על שני הצדדים, הלקוח הרוכש והיצרן המפתח, להגדיר במפרטים טכניים מדוייקים ככל שאפשר את המטרות, האתגרים וההגנות הנחוצות למערכת כדי לצלוח את בחינות התאלמ"ג, לפעול כראוי בסביבת היעד ולקיים חיים בצוותא עם מערכות ידידיתיות בשכנות.
במערך ההגנות ניתן למנות את הסיכוך ובידוד המעגלים הרגישים ו/או המעגלים היוצרים הפרעות אלמ"ג (אלקטרו-מגנטיות), ומסננים המופיעים במספר תצורות שביניהן:
א. מסנן פרוס על פני המעגל המודפס – יתרונו בגמישות לשינוי המסנן במעבדות הפיתוח. חסרונו בגזילת זמן פיתוח, שטח עריכה, ונדרש ידע ובקיאות בתכנון מסננים למניעת תופעות עקיפה ו-Crosstalk.
ב. מסנני מדף לקווי מתח – יתרונם בתחומי התדר הנמוך, בו הם מציגים ביצועי סינון טובים. חסרונם, שרובם אינם יעילים בתחום שמעל 10MHz ולעיתים מסורבלים מעבר לנדרש.
ג. מסננים במחברי המערכת – יתרונותיהם רבים: נפח המסנן נכלל בנפח המחבר, יכולים להחליף (Retrofit) מחבר פשוט בשלבים מאוחרים כאשר אינם חלק מהתכנון המקורי, יעילים ממאות קילו-הרצים ועד תחום הגיגה-הרצים. החסרונות מתבטאים במחירם מול מחבר פשוט ולא מסונן, בזמני האספקה הארוכים יחסית של מספר יצרנים. חסרון נוסף נעוץ בכך שלאחר הכללת הפילטר לתוך המחבר, לא תמיד ניתן יהיה לבצע שינויים על אותו מחבר ויהיה צורך להצטייד במחבר חדש.



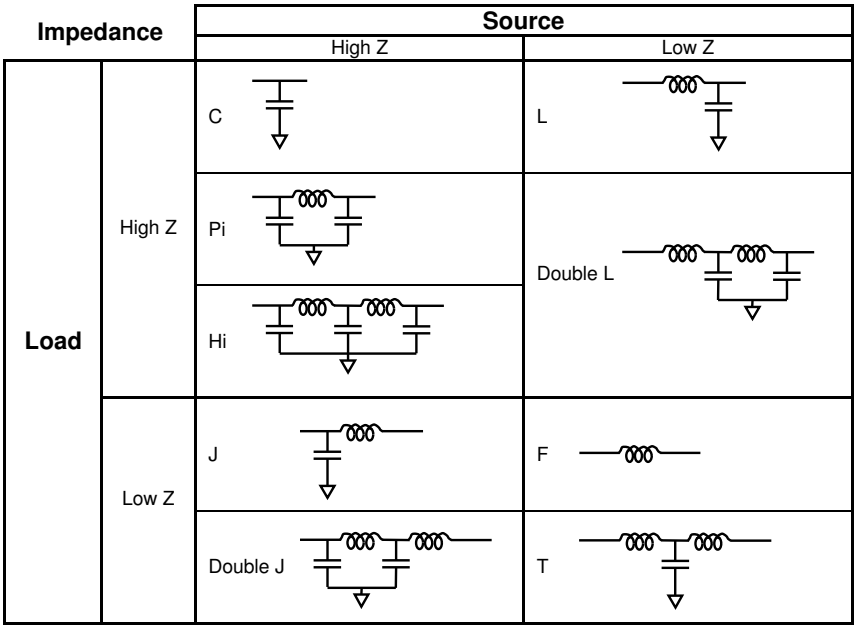
איור 1: חריגה על קווי אספקת המתח שנפתרה באמצאות הוספת פלאג מסונן על הכבל מאחר ולא היה ניתן לשנות את פנים המערכת.



איור 2: מחבר מסונן למערכת אווירית המוזנת מגנרטור מטוס 115VAC/400Hz. המחבר בעל יכולות סינון החל מ-1kHz ומבנה ייחודי בהתאם למגבלות הלקוח.

שלב ב. בדיקות תאלמ"ג

כל ציוד חשמלי או ציוד אלקטרוני נדרש להוכיח כי הוא חסין בפני סביבת הפרעות מולכות (CS) או מוקרנות (RS), המוגדרות ע"פ תקן. כמו-כן, על היצרן להוכיח כי הציוד אינו יוצר הפרעות בהולכה (CE) או בקרינה (RE).
התקן המוביל בתעשייה הצבאית הוא MIL-STD-461 בגרסאותיו השונות (למרות שגרסה F תוקננה, גרסאות C, D ו-E עדיין בשימוש בהתאם לדרישת הלקוחות). על תקן זה מבוססים תקנים מקבילים, כגון תקן רפ"ט (רשות פיתוח טנקים) ותקן וחי"ק (חיל הקשר). בנוסף לתקינה הצבאית האמריקאית קיימים תקנים אזרחיים הכוללים את תקני EN



איור 3. סוג המסנן בתלות בעכבות הכניסה והמוצא

ו-CISPR ותקן RTCA/DO-160, המיועד למערכות מוטסות ושימושי להגדרת רמת ברקים בהזרקה (Injection) ובצימוד לכבל (Cable Bundle). קיימים תקנים נוספים ממדינות שונות, כגון רוסיה, גרמניה ומזרח אסיה, הדומים לתקנים האמריקאים והאירופאים, אך הם אינם בשימוש בישראל.

תקנים נוספים מגדירים את אופי מתחי האספקה המותרים בפלטפורמות שונות, ביניהם חשוב לציין את:

א. MIL-STD-1275, המגדיר רמות מתח ישר ברכב קרקעי.

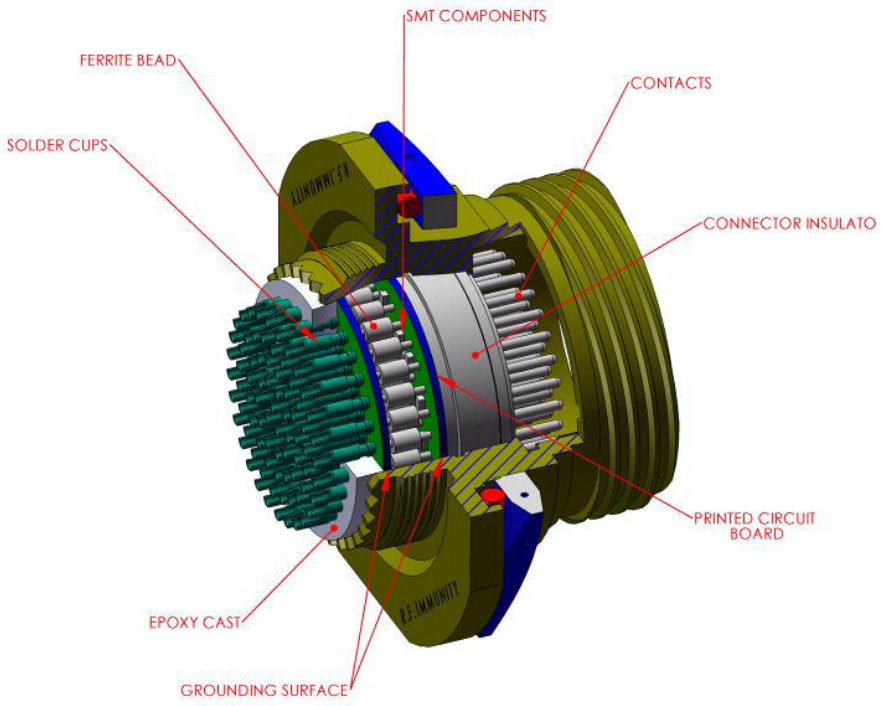
ב. MIL-STD-704 ו-RTCA/DO-160 Sec 16, המגדירים רמות מתח ישר וחילופין בכלי טייס.

ג. MIL-STD-1399, המגדיר רמות מתח חילופין מגנראטור של כלי שייט.

כהכנה לבדיקות, מהנדסים רבים מצטיידים בערכות הנחתת רעשים, המופיעות כליבות מגנטיות ונכרכות סביב כבלי ההזנה והתקשורת למערכת במהלך בדיקות התאלמ"ג. פתרונות אלה מסייעים להנחית את רמות הרעש הנפלטות מהמערכת או חודרות אל תוכה, אולם אינם מכסים את כל תחומי התדרים, ונקודות התורפה של המערכת לא מאותרות ומטופלות כראוי. במקרים רבים יוחלף הפתרון בסיכוך הכבלים – דבר שיסייע מול הפרעות מוקרנות, אך לא יועיל מול הפרעות מולכות. בעיות משקל גורמות ליצרנים להרתע מסיכוך או סיכוך כפול, ובדומה הוספת "גושי חומר בולע הפרעות" על הכבל. בנוסף, הסירבול המכאני עלול להזיק לכבל ולהכביד על נושא הציוד, אדם או כלי טיס. מחבר מסונן על קווי מתח ההזנה וקווי התקשורת יכול למזער את רמות הפליטה ולהוות פתרון מעשי המוכלל במחברי המערכת ללא צורך בפיתוח נוסף, בד"כ ללא גדילה במימדי המחבר וללא עיכוב סיום הפרויקט.

שלב ג. בחינה מעשית בסביבת היעד

"שיריון נפח" לפתרונות סינון והגנה החל משלב הפיתוח יקל וישתלם בשלבי הבחינה המעשית. שיתוף פעולה מוצלח של יצרני המערכות והלקוחות הסופיים יכלול את בחינת התכן החשמלי והאלקטרוני של האותות בנקודות הממשק, בחינת התכן המכאני של המחברים והכבלים והוכחת כושר מוצר בייצור אב-טיפוס לבדיקות אינטגרציה ועמידה בתנאי סביבת היעד של המערכת.



איור 4. מסנן המוחדר לגוף המחבר היושב על מעטפת המערכת (Enclosure), יוצר כלוב אופטימלי לרעשים הנפלטים מהמערכת ולרעשים החודרים אל תוכה.

המפגש בין המערכת לבין המערכות השכנות לה עלול להיות "אגרסיבי". מלבד מערכות "עוויינות" היוזמות הפרעות, מערכות "ידידותיות" מתגלות כאיום שקט אך ממשי, התוקף תחת תנאים הקשים לחיזוי במעבדת הפיתוח או בבדיקות התאלמ"ג.

טכנולוגיות לסינון מחברים

שוק המחברים המסוננים פעיל בתחומי התקשורת, הרפואה (מחברי D-Sub ומסנני מעבר מחיצה מסוג Feed-Through) ובתחום התעשייה הביטחונית. הביקוש לסינון המחברים נובע משיקולי נפח ומשקל. בשל הרגישות לייעוד המוצר, מספר יצרני מחברים מסוננים בעולם מקשים ודורשים לדעת מהו היישום ומיהו הלקוח הסופי ומטילים מגבלות קשות בעיקר על התעשייה הביטחונית בישראל. דרישה זו לנתוני יישום ולקוח סופי אינה נדרשת ע"י יצרניות מחברים מסוננים מקומיות כדוגמת RF Immunity.

קיימות מספר טכנולוגיות לסינון מחברים:

א. Tubular – סינון באמצעות מגעים הנושאים מסננים. יתרון השיטה בגמישות בחירת הסינון לכל מגע. חסרונה ברגישות גבוהה ללחצים מכאניים בהרכבת המחבר וברגישות לשינויי חום כתוצאה מהלחמת המגעים. בשל כך, יצרני המחברים ממעיטים ליישמה.

ב. Planar – סינון באמצעות מצע קרמי, המותאם לסידור מגעי המחבר, ובו מערך קבלים. יתרון השיטה הוא ברמות הביצועים בתחום תדר שמעל 500MHz. חסרונה ברגישות להרכבה ולהלחמה, חוסר

"מחבר מסונן על קווי מתח ההזנה וקווי התקשורת יכול למזער את רמות הפליטה ולהוות פתרון מעשי המוכלל במחברי המערכת ללא צורך בפיתוח נוסף, בד"כ ללא גדילה במימדי המחבר וללא עיכוב סיום הפרויקט"

גמישות בצורות הסינון, מספר מצומצם של יצרני הקבלים, ובעקבות כך זמני אספקה ארוכים לייצור ומחירים גבוהים.

ג.רכיבי SMD – סינון באמצעות רכיבים בדידים על גבי מעגל מודפס. יתרונות השיטה בגמישות בבחירת סוגי הסינון, זמינות הרכיבים מקצרת את זמן הייצור. חסרון השיטה הוא ברמות הביצועים בתחום תדר שמעל 500MHz. הטכנולוגיה מוכרת גם כ-Chip on board.

עד לפני מספר שנים, הטכנולוגיה הנפוצה לסינון מחברים היתה הטכנולוגיה הפלאנרית (Planar), אך טכנולוגיית הרכיבים הבדידים (SMD) משתרשת כמובילה במחברים מסוננים הכוללים רכיבי הגנה נגד תופעות מעבר (Transients) בעלי הספקים גבוהים. הטכנולוגיה מקנה זמינות ומחירים נוחים לצד גמישות בבחירת סוגי הסינון וההגנות הניתנים להכללה למחבר יחיד.

בין סוגי הסינון ניתן למצוא:

- F Filter
- C Filter
- L/J Filter
- Pi Filter (π Filter)
- T Filter
- Hi Filter (2x π Filter)

המסנן הנפוץ ביותר הוא מסנן מסוג π הכולל שלוש דרגות סינון (קבל-סליל-קבל) ומציג ביצועים מרשימים בבדיקת ניחות בעכבת כניסה ומוצא של 50Ω וללא עומס. אך לא תמיד מסנן π יתאים לאופי עכבות המעגלים. יש חשיבות גבוהה לבחירת טופולוגיית הסינון בהתאם לעכבת הכניסה ולעכבת המוצא של המסנן. בחירה לא נכונה עלולה לשבש את ביצועי המסנן עד כדי ניטרולו. (איור מס 3)

בנוסף לסינוני המגעים כקו בודד (Single Ended), קמה בשנים האחרונות מודעות ודרישה לסינון קווי תקשורת דיפרנציאליים כדוגמת Ethernet, LVDS RS422, CAN-Bus ועוד באמצעות סלילי CMC (Common Mode Choke). מסננים אלה משיגים ניחות יחסי לאדמת המערכת ללא פגיעה באופי האות מאחר וערכי ההשראות עולים אך רמת הקיבול נמוכה ואינה פוגעת באחידות האות (Signal Integrity) (ראה איור 6).

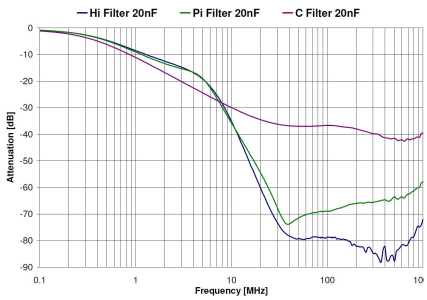
הגנות בפני תופעות מעבר

תופעות המעבר הן מכשול נוסף בשילוב המערכת על הפלטפורמה. תופעות מעבר נובעות ממיתוגים, מעומסים בעלי אופי השראי, מפריקות אלקטרו-סטטיות (ESD) ומברקים. התקנים מגדירים מהן רמות המתח המותרות והאפשריות על סוגי הפלטפורמות ומהי רמת אנרגיית הברקים הנבחרת, בהתאם לייעוד ומיקום המערכת. רוב התקנים מתארים ומבדילים בין שני סוגי פולסים: סינוס מתרסן ואקספוננט כפול (איור 8-7).

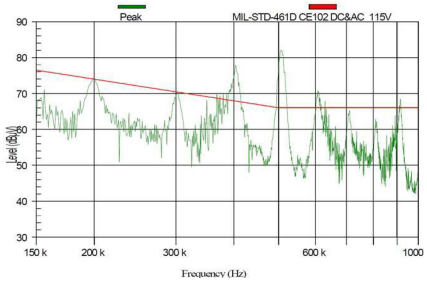
התפיסה הרווחת היא מיקום רכיבי הגנה, כגון TVS (Transient Voltage Suppressors), בספקי המתח או בקרבת הרכיבים הרגישים לתופעות מעבר. למרות שתכנון זה נפוץ, במיקרים רבים אין הוא מוכיח את הצדקתו. בד"כ, המתכננים מגדירים רכיבים בעלי הספק גבוה מנדרש לקווי המתח ורכיבים בעלי הספק נמוך, המתאימים להגנה בפני רמות אנרגיה נמוכות בלבד, על קווי התקשורת בשל בעיות בגודל המארזים, רמות הקיבול ומתח הקטימה המוצעות בשוק. ככלל, על המתכנן לקחת בחשבון את ערכי הקיבול הטפילי (Parasitic Capacitance) הנובע מרכיב ההגנה הנבחר ביחס לערך הקיבול המרבי הנדרש לאות – כך שמהימנות האות תשמר. כמו-כן, עריכת מעגל לא נכונה עלולה להפחית את יעילות קטימת המתח. לעומת זאת, הרכבת רכיבי הגנה על קווי המתח ועל קווי התקשורת בכניסה למערכת נמצאה יותר יעילה. כך רמות המתח בכניסת ספקי המתח ייקטמו, ורכיבי התקשורת הרגישים יוגנו ע"פ רמת האיום. פתרון זה ניתן למימוש בעזרת כרטיס לרכיבי ההגנה בזנב מחבר הכניסה או שילוב מעגל ההגנה בפנים המחבר המסונן.

יצרני מערכות רבים בתעשייה הנדרשים לשפר את יכולות המוצר בשל בעיות אלמ"ג, בשל שינוי אופי המוצר או בשל מיקום גאוגרפי שונה של הלקוח הסופי, נעזרים בסינון והגנת המוצר דרך מחבר הכניסה. זאת כדי לחסוך בפיתוח כרטיסים, לחסוך בנפח המוצר ולקבל את כל פתרונות הסינון וההגנה מגורם אחד. מגמה זו קידמה מאוד את שילובם של מחברים מסוננים ומחברים משולבי הגנת טרנזיינטים בפרוייקטים צבאיים שונים. כמו-כן, הדבר תרם לזמינות המחברים ולמחירים האטרקטיבי.

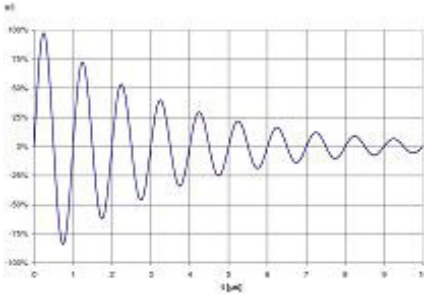
*הכותב אייל רונן הינו ראש צוות אלקטרוניקה בחברת RF Immunity



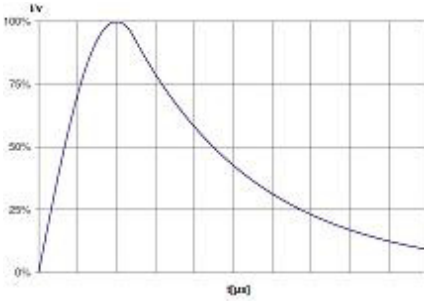
איור 5. השוואה בין שלוש צורות סינון שונות:
•קו סגול – C Filter
•קו ירוק - Pi Filter
•קו כחול - Hi Filter



איור 6. חריגות על קווי המתח נובעות מתדרי מיתוג ספקים ומהפרעות תקשורת דיפרנציאלית



איור 7. צורת גל סינוס מתרסן.



איור 8. צורת גל אקספוננט כפול.