

## כבלים וחוטאים חשמליים לשימוש דינאמי

◀ יואל כהן, ניסן אוויאשן בע"מ



יום במוצרים רבים נדרש להתחבר חשמלית לחלקים ומערכות שנמצאים מדי פעם בתנועה או נמצאים בתנועה מתמדת.

כולנו מכירים את המחשב הנישא שבו המסך מחובר לבסיס בכבלים שמדי פעם נעים כאשר סוגרים או פותחים אותו. אנחנו מכירים פחות את מנגנון ה-Steering wheel Rotary Couplers - SRC שבתוך הגה הרכב המאפשר לרכב לעשות מספר סיבובים כאשר מערכת ה-Airbag נשארת פעילה, אנחנו יכולים כל העת לצפור, להחליף תחנות ברדיו, לשלוט במערכת הניווט, לדבר בטלפון הנייד ורשימת המשימות הנשלטות מההגה מתארכת כל שנה. מכלל כבלים במרכז ההגה מאפשר כל זאת.

מאמר זה יעסוק בחוטאים וכבלים שמאפשרים תנועה ראשית, הסבר לגבי שני מושגים חשובים שרבים מבלבלים ביניהם כי בעברית אומרים בדרך כלל "גמישות" לשניהם-

**Flexibility:** גמישות, כאן מדובר במומנט הנדרש לכופף את החוט/כבל.

**Flex life:** אורך חיים לכפיפה, כמה פעמים אפשר לכופף כבל חשמלי (ברדיוס כיפוף נתון) עד לכשל - שבר חוט.

אלו מושגים שונים מאוד. לדוגמא, הכבלים

של רובוטים תעשייתיים גדולים וכבדים ונדרש מומנט גדול לכופף אותם מה שאינו מהווה בעיה בגלל המנועים הגדולים של הרובוט. אבל אורך החיים שלהם לכפיפה ארוך מאוד ונמדד במיליונים רבים של מחזורים. זאת לעומת החוטאים והכבלים המחברים ראש ביות של טיל, שם המנועים קטנים ונדרש מומנט כפיפה קטן ככל האפשר אבל אורך החיים אינו קריטי כיוון שהטיל פועל דקות ספורות בלבד. במערכות ראייה אופטרוניות ליום ולילה נדרשים שניהם, מומנט כפיפה נמוך בגלל מנועי צעד קטנים ואורך חיים גדול לחיסכון בתחזוקה.

### ממכלול הכבלים הטוב בהגה הרכב ועד למכלול TWIST CAPSULE למערכת מכ"ם ומערכות אופטרוניות ולוויינים. מכללים דומים אבל מאוד שונים:

תעשיית הרכב מאופיינת ברכיבים ברמה גבוהה עם אמינות גבוהה מאוד, מחיר נמוך מאוד וכמויות ענקיות. אותו מכלל סובב שמעביר את האותות החשמליים מהרכב להגה הסובב צריך לבצע מיליוני תנועות ועדיין מחירו צריך להיות נמוך

מאוד.

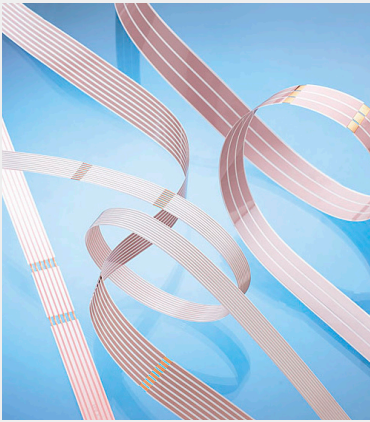
מכלול כזה כולל בתוכו כבלי Flexible Flat Cable - FFC אלו כבלים עם מוליכים שטוחים, באורך 2-3 מטר במעטה מבדד מפוליאסטר. הכבל השטוח מגולגל בצורת קפיץ שעון ונפתח ונסגר עם סיבוב ההגה. כל המכלול הזה ארוז "בבית" עשוי בהזרקת פלסטיק זולה ומחירו כ-15 יורו (ראו תמונה 1).

מכלול לשימוש דומה משמש במערכות מכ"ם קטנות ובמערכות אופטיות סובבות כאשר משתמשים בטכניקה דומה אבל הכבלים השטוחים בנויים מחוטי High Flex בבידוד גומי סיליקוני או טפלון דק. אפשרי שילוב כבלי RF או כבלים להעברת נתונים וסיבים אופטיים. לפעמים משתמשים בצבר חוטים (bundle) לא מהודקים שעושים אותה תנועה, תנועת קפיץ שעון אבל בורגית. המכלול כולו ארוז "בבית" מתכתי מחמרן עם ציפוי טפלון פנימי למניעת חיכוך.

מכלולים אלו נמכרים באלפי יורו אבל בכמויות קטנות (ראו תמונה 2).

כבלי FFC, שכבר הזכרנו למעלה, הם כבלים שטוחים וזולים המשמשים בדרך כלל לחיבור בין שני מעגלים מודפסים בתוך כמעט כל מכשיר כיום. בקצה הכבל המוליכים חשופים, מה שממשש כמחבר

תמונה 3



ומספר הכפיפות האפשרי עובר את המיליון, תלוי בקוטר (ראו תמונה 6).

### כבלי COAX ו-RF גמישים:

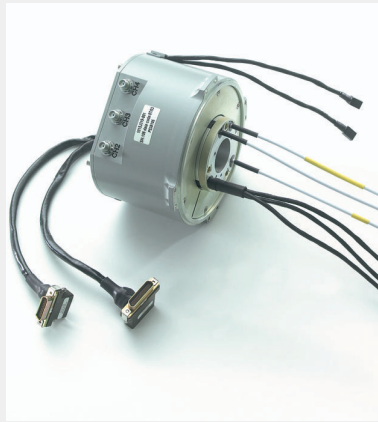
כאן האתגר גדול בהרבה. מטבעם, בגלל המבנה של מוליך מרכזי, בידוד, סיכוך ב-Foil, סיכוך שזור ומעטה חיצוני, מומנט האינרציה של החתך גדול והכבל לא גמיש - קשה מאוד לכופף אותו. בנוסף, בתנועה דינאמית רציפה העומסים על הסיכוך גדולים והוא נוטה להתפרק ראשון. החוטים ייכשלו הרבה יותר מאוחר אבל לכבל אין ערך עם סיכוך פגום. הגמשת כבלי ה-RF לכפיפה ולאורך חיים גדול יותר דורשת שינויים בחומרים ובמבנה ובדרך כלל ויתור מסוים של הביצועים החשמליים.

המוליך המרכזי מיוצר מסגסוגת נחושת לחוזק ואורך חיים גדול יותר.

בידוד המוליך מהסיכוך שבכבלי RF הוא מלכתחילה עשוי מטפלון סלולרי כלומר טפלון שמכיל תאי אוויר בתוכו אשר משפרים את הביצועים החשמליים וכן את הגמישות בהשוואה לטפלון רגיל. חברת W.L.GORE התפרסמה בהמצאת המוצר הראשון ה-GORE-TEX שעם הזמן השימוש בו גלש לתחומי חיים רבים כולל ביגוד ונעלי ספורט. חברות אחרות פיתחו מוצרים אחרים כדי לעקוף את הפטנט שלהם. בצרפת פיתחה חברת AXON מוצר שונה לאותה מטרה שנקרא CELLOFLON מטפלון תאי שבו היא משתמשת כבר עשרות שנים.

שיפור נוסף הוא בידוד ELVAOLAR שבו

תמונה 2



ל-1, 7 או 19 גידים בחוט סטנדרטי וכן בבידוד חיצוני גמיש למשל טפלון FEP דק ל-200V או גומי סיליקוני עבה יותר אבל יותר גמיש.

קיימים בעולם יצרנים מעטים מאוד לחוטים גמישים מאוד. בארה"ב אני מכיר 4 ספקים, ניו אינגלנד שהוא יצרן המקור בארה"ב ובנוסף חברות שעוסקות במכללים גמישים, מתכנות מאפיינות ומספקות חוטים גמישים והן בעיקר Unique, DCX-NewVac, ו-C. Coil, לכולן לקוחות בארץ. לחוטים אלו יש במקרים רבים דרישה לרישיונות ייצוא מארה"ב. לכן חברת Axon פתחה בצרפת קו ייצור דומה - FW, Flexible Wires, אשר פטור מרישיונות ייצוא. חוטים גמישים מבודדי גומי סיליקוני מיוצרים רק בארה"ב.

חוטי FW קיימים בגרסה של מוליך נחושת (עם או בלי ציפוי) שהוא גמיש יותר מסגסוגת נחושת אבל הסגסוגת בעלת אורך חיים לכפיפה גדול בהרבה. חוטים אלו מיוצרים בדרך כלל בקטרים קטנים, מ-22 עד 34AWG (ראו תמונה 5).

להעברת זרמים גבוהים משמשים חוטים מסוג FLEXFORCE ודומיו שזה חוט נחושת רב גידי מבודד. הבידוד הוא טפלון FEP או פולימרים ייחודיים לכל חברה.

חוטים אלו משמשים גם במערכות דינמיות אבל כאשר קוטר המוליך גדול מ-6 מ"מ הגמישות דרושה גם בהתקנות סטטיות כדי לנתב את החוט בתוך תיבות זיווד או מערכות. החוטים קיימים בקוטרי מוליך מ-4.5 ועד 20 מ"מ. מדובר בזרמים מ-100 ועד 800 אמפר.

בחוטים אלו מספר הגידים מגיע לאלפים

תמונה 1



זכר כך שנדרש רק מחבר הנקבה הנגדי, שמולחם על המעגל המודפס.

כבלים אלו קיימים גם בגרסאות של גמישים, גמישים מאוד, ואולטרה גמישים כאשר ההבדל בניהם הוא בעובי מוליך הנחושת השטוח. ההבדלים בין אורך חיים לכפיפה לכבל סטנדרטי ולאולטרה גמיש מגיעה לפי 10,000. כבלים גמישים כאלו מצויים בכל סורק משרדי אבל גם בהרבה ציוד רפואי שמשמש לסריקת גוף האדם תוך בדיקות קרינה ואחרות (ראו תמונה 3)

כבלים שטוחים FLEXTRACK, מורכבים ויקרים בהרבה, משמשים בשולחנות X או X-Y של מכונות בדיקה וייצור בתעשיית הרכיבים האלקטרוניים ומעגלים מודפסים. כאן משתמשים בקבוצות מוליכים עגולים שמכילים סוגים שונים של חוטים כאשר הקבוצות השונות מאוגדות לכבל שטוח אחד על ידי הוספת בידוד חיצוני מ-Celloflon (טפלון PTFE סלולרי) באקסטרוזיה. כבלים אלו מקבלים כיפוף ברדיוס קטן מאוד מבצעים מיליוני תנועות. ניתנים לשימוש בחדרים נקיים וחדרי ואקום, וכל כבל נבנה על פי מפרט לקוח ואין כאן סטנדרט. מחירים גבוה בהשוואה ל-FFC (ראו תמונה 4).

### חוטים גמישים FW לזרמים זעירים ועד FLEXFORCE למאות אמפרים:

כל כבל גמיש מתחיל בחוט גמיש. חוטי High flex גמישים מתאפיינים בעיקר במספר גידים גדול מאוד ובידוד גמיש. למשל, 115 גידים לחוט 30AWG בהשוואה

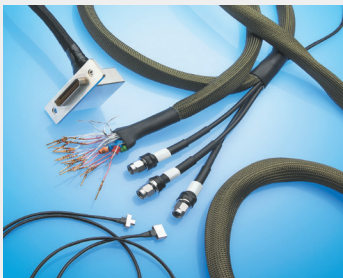
תמונה 5



תמונה 4



תמונה 7



תמונה 6



בידוד הטפלוון הסלולרי המכיל בתוכו "צינורות" אויר המגדילים את הגמישות, מורידים משקל ובעיקר משפרים את הביצועים החשמליים.

לכבלים כאלו סיכוך FOIL לא בא בחשבון בגלל קשיחותו ושבירותו הרבה ואפשר לשפר את אורך החיים של הסיכוך במעבר לשיזור הסיכוך עם חוטים מסגסוגת נחושת בקוטר קטן יותר ומתח שיזור נמוך יותר.

למעטה החיצונית חשיבות רבה. כי בגלל קוטרו הגדול יחסית הוא תורם רבות להקשחת הכבל (מומנט אינרציה של החתך גדל עם הקוטר בחזקה). המעטה מגן על הכבל מכנית לכן חשיבותו רבה. בדרך כלל משתמשים במעטה מטפלוון אבל לכבלים דינמיים מרבים להשתמש במעטה אלסטומרי כגון פוליאורטן גמיש או אפילו גומי סיליקוני (ראו תמונה 7)

הצילומים באדיבות חברת Axon Cable SAS