

כבלים קואקסיאליים - למה דווקא 50 אום?

נכתב ע"י אבנר דרורי 4X1GE

באחת מההרצאות בנושא קווי תמסורת, שנערכה במועדון האגודה, נשאלה השאלה: "למה דווקא 50 אום?" שלפתי מיד את התשובה שזכרתי מהעבר אבל, ככול זאת, החלטתי לרענן את הזיכרון ע"י בדיקת הנושא ולהבין באמת מה עומד מאחר "תקן טכני/מדעי" זה.

למרות שהתשובה ניתנה כבר באותו מקום, עלו במוחי שאלות נוספות: למה יש כבלים גם בעכבה של 75 אום ולמה יש מספר ערכים לכבלים הן בקבוצת ה-75 אום והן בקבוצת ה-50 אום?

העכבה, של כבלים קואקסיאליים, מחושבת לפי המקדם הדיאלקטרי של חומר הבידוד, בין המוליכים, ולפי יחס הקוטרים של הכבל והכוונה ליחס בין הקוטר החיצוני של המוליך הפנימי (גיד מוצק או צינור) ובין הקוטר הפנימי של המעטה המוליך (חוטים שזורים או צינור). ראה תרשים ונוסחה:

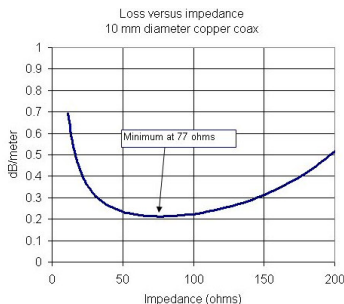


$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log \frac{d_1}{d_2}$$

Where,

- Z_0 = Characteristic impedance of line
- d_1 = Inside diameter of outer conductor
- d_2 = Outside diameter of inner conductor
- k = Relative permittivity of insulation between conductors

הכבלים הקואקסיאליים הראשונים היו עם בידוד אוויר שהמקדם הדיאלקטרי שלו הוא 1 ובהמשך אתייחס לכבלים מסוג זה בלבד.



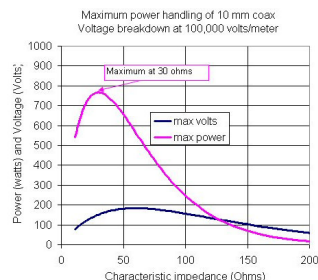
למעשה אפשר ליצר כבלים קואקסיאליים ככול ערכי העכבות האפשריים אבל באופן מעשי התחילו בעכבה שערכה בסביבות 75 אום וחשוב לדעת למה דווקא ערך זה.

במחשבה ראשונה אפשר להגיד כי עכבה זו תואמת את עכבת הכניסה התיאורטית של אנטנת דיפול, המזונת במרכז והנמצאת גבוה מעל פני הקרקע, ולכן העברת הספק (הזעיר) תהיה הטובה ביותר. לאחר לימוד מסתבר שישנם גם גורמים נוספים בעלי השפעה.

המצב טוב כול עוד אנחנו עוסקים בתדרים גבוהים (HF) אבל הוא הולך ומחמיר ככול שעולים בתדר וכאשר מגיעים לתדרי מכ"מ המצב ממש גרוע. מסתבר שלעכבה, כלומר ליחס בין קוטר המוליכים, יש השפעה על ההפסדים. ניתן לחשב, בעזרת נוסחאות, את העכבה הרצויה וע"י כך למזער את ההפסדים בקו.

הפלא ופלא, הערך שהגיעו אליו גם הוא היה בסביבות 77 אום. את הערך הזה ניתן להשיג בכבלים בעלי יחס קוטרים של 3.6 ולא משנה באיזה יחידות מדידה נשתמש. ראה תרשים לעומת העכבה.

אחת ההמצאות הגדולות, של מלחמת העולם השנייה, הוא המכ"מ שתחילתו בתדרי תג"מ-תא"ג וסופו בתדרי מיקרוגל. למעשה מדובר ב-מקמ"ש המשתמש באותה אנטנה ובאותו כבל הזנה הן לשידור והן לקליטה.



המכ"מ משדר פולסים צרים, בעוצמה גבוהה מאוד, וקולט הדים בעצמה נמוכה מאוד הקרובה אפילו לרמת הרעש. עכבה, של 75 אום, מתאימה לקליטת אותות אבל הרסנית עבור האותות המשודרים. ביחס הקוטרים, של 3.6, נוצר שדה חשמלי חזק מאוד ליד המוליך הפנימי והתוצאה היא פריצות חשמליות (קורונה).

חישובי השדה החשמלי הביאו למסקנה כי יחס קוטרים של 1.65 נותן את התוצאה הטובה ביותר לגבי העברת הספקים גבוהים בקו אבל העכבה שמתקבלת היא כ-30 אום בלבד ראה תרשים. ערך נמוך זה טוב מאוד להספקים גדולים אבל גרוע מאוד כאשר מדובר על קליטת אותות ברמה נמוכה.

הפתרון היה ממש גאוני, **עושים פשרה**. קובעים, כסטנדרד, את הערך הממוצע של (בערך) 50 אום המושג ע"י יחס קוטרים של 2.3. (הערה - בארצות אירופה מקובל להשתמש גם בכבלים של 60 אום כאשר יחס הקטרים הוא 2.7).

מסתבר שאפילו אם נקבע ערך של 50 אום, אז למה ישנם גם כבלים בעכבות של 52 אום?

לעתים קרובות אנחנו נתקלים ב-"סטנדרטים טכניים בעלי חשיבות" שכול מה שעומד מאחריהם אלה לא יותר מאשר בחירות מקריות או שרירותיות שנעשו במועד מסוים מטעמי נוחיות בלבד. הרי כולנו יודעים לפי מה נקבע המרווח בין פסי מסילות הברזל...

חזרתי לעיין בספרים עתיקים, שלמדתי מהם לפני 50 שנה, ובעזרת "גוגל" הגעתי גם למאמרים חדשים שפורסמו לאחרונה באינטרנט. מסתבר ששאלת ה-50 אום נשאלת עד היום אלא שלאחר כ-70 שנים שוכחים את התשובה הנכונה. למה דווקא 70 שנה? הרמז הוא "מלחמה" ועל כך בהמשך.

בעולם המודרני אי אפשר להיות בלי תקנים (סטנדרטים) אבל, באותה מידה, גם לא תמיד יודעים מה מקור התקן. תקנים היו קיימים כבר בעולם העתיק אבל הם השתנו ממקום למקום. נפוליון, שהשתלט על חלק גדול מאירופה, נתקל בבעיה ארגונית/לוגיסטית/כלכלית והפתרון היה אימוץ יחידת מידה חדשה, שנקבעה בשנת 1791 על ידי האקדמיה הצרפתית למדעים ושגזרו ממנה גם מידות נוספות הקשורות לשטח, נפח ומשקל. כך נולד ה-"מטר" ונקבעה השיטה עשרונית.

האנגלים לא אהבו את נפוליון ושיטותיו ולכן דבקו בשיטתם הישנה של שימוש באינצ'ים. זאת מבלי להתייחס בכלל למערכת המשקלים והמטבעות שנשארו לא עשרוניות. כמובן שהיו גם מדינות נוספות שלא קבלו את המטר והמשיכו להשתמש במידה התקנית הנקראת באנגלית "אינצ'" או, בגרמנית, "צול" שנהוג לסמן אותן ב-"(גרשיים).

למרות הקלות בפעולות החשבוניות של השיטה העשרונית, כול שוכני הקיסרות הבריטית, כולל אפילו ארה"ב שפרשה מהקשר לבריטניה, לא קבלו את השיטה המטרית במה שקשור לתקנים של מידות פיזיות. במשך השנים האימפריה הבריטית, או מה שנשאר ממנה, עברה לשיטה המטרית העשרונית אבל ארה"ב, שהיא השמרנית מכולן, עדיין שומרת על האינצ'ים והמידות הנגזרות האחרות. היא גם שומרת עדיין על ה-"גלונים" למרות שאפילו אנגליה עברה לאחרונה ל-"ליטרים".

אחד החסרונות, של השיטה העשרונית, שהמספר 10 מתחלק "נקי" רק ל-2 ו-5. אפילו "תריסר" יותר טוב ממנו, הוא מתחלק ל-2, 3, 4 ו-6. ישנה שיטה נוספת, המקובלת באינצ'ים בלבד, והיא חלוקה ל-128 חלקים. שיטה זו הייתה מסומנת, בניגוד לשיטה העשרונית, בשברים פשוטים. נוצרו ממדים תקינים של $1/2$, $1/4$, $3/4$ אבל גם ערכים "יצירתיים" של $7/8$ ו- $5/64$ שממש תענוג לטפל בהם...

למרות ששיטת האינצ'ים לא הייתה קיימת בארץ, לפחות לא באופן רשמי, במשך שנים רבות היו בשימוש מוצרים ותיעוד הכוללים ממדים בחלוקה ל-128 של אינצ'. בצעירותי קניתי מד-זחיה (קליבר) מעולה שצד אחד היה ב-"מ"מ והשני, אינצ', בחלקים של $1/128$. עד היום הוא נמצא בשימוש ואפילו היו פעמים בהם השתמשתי בחלקי אינצ'ים. אני מוכרח לציין כי כאשר מודדים קוטרי ברגים או עובי מעגלים מודפסים (בהם עד היום הם משתמשים בשיטה העגולה של אינצ'ים). מסתבר שזה די נוח.

השיטה המטרית העשרונית מקובלת היום כמעט בכל העולם אבל ישנם גם חריגים אפילו אצלנו. כולנו מכירים ומשתמשים בבורגי הויטבורט (BSW) של $1/8$, $1/4$, $3/8$ ו- $1/2$ אינצ' וזאת כאשר אנגליה כולה עברה כבר מזמן לשיטה המטרית. מסתבר שהשיטה נוחה מאוד כול עוד שזה לא נוגע לחישובים מתמטיים.

אנחנו ומדינות אחרות נמצאים עדיין בתקופה של סטנדרטים מקבילים שונים. לכאורה הכול אצלנו מטרי אבל ברגים וצנרת המים נמדדים עדיין ביחידות של "צול". גם רוסיה הגדולה עברה לשימוש טוטלי בשיטה המטרית למעט צינורות מים שגם הם עדיין מודדים אותם ב-"צול". דווקא נושא הצינורות מעניין אותנו מכיוון שיש לו משמעות רבה בקביעת תקני העכבה של קווי תמסורת, בכלל, וה-50 אום בפרט.

עכשיו חייבים להתייחס לכלל הנקרא בשם "כלל המידות העגולות". משמעות הכלל, בשפה פשוטה, היא: אם יש צורך בקביעת מידה כול שהיא ואין אילוץ למידה מסוימת, תבחר תמיד מידה "עגולה". לדוגמה: אם אנחנו צריכים מדרף לארון נתון, נמדוד את הרווח בין שני הקירות התומכים ונזמין את המדרף בהתאם למרווח זה. לעומת זאת, אם נחפש מדרף מוכן בחנות, נמצא רק מדרפים באורכים "עגולים" של 40 ס"מ, 50 ס"מ וככה הלאה. לפעמים תמצאו גם מדרפים של 76.2 ס"מ וכאן נשאלת השאלה: "למה בחרו ערך כזה שלכאורה איננו עגול"? הערך הוא דווקא כן עגול, זה מדרף של 30 אינצ'. המידה העגולה נקבעת בארץ המוצא ולא דווקא בארץ אליה מגיע המוצר וכדאי לזכור את הכלל הזה.

לארה"ב הייתה, במשך שנים רבות, מדיניות של בדלנות. היא הצטרפה לשתי מלחמות העולם רק כאשר, למעשה, תקפו אותה. אבל לאמריקה יש גם תכונה נוספת, כאשר היא נכנסת למשהו היא עושה זאת בגדול וזה מה שהיה במלחמת העולם השנייה. במלחמה זו היו מהפכות טכנולוגיות רבות אבל אמריקה לא ויתרה על ה-אינצ'י, אבל, לפחות. היא נאלצה לוותר על השברים הפשוטים לטובת השברים העשרוניים. כול זה ארע "רק" לפני כ-70 שנה.

נכון שגם היום ישנם אנשים הרגילים עדיין לדבר בשפת השברים הפשוטים ואנחנו לא יוצאים מהכלל. המשפט "תביא לי בורג שלוש שמיניות..." נשמע עד היום בחנויות המוכרות ברגים.

עכשיו הזמן לחזור לנושא הצינורות שמהם ניתן ליצר כבלים קואקסיאליים ובמיוחד לכל של 50 אום. מערכות המכ"מ, מאז ועד היום, משתמשות בצינורות נחושת בהם קיים השילוב המצליח של איכות ומחיר. כפי שהוזכר מקודם, יחס הקוטרים הנדרש הוא 2.3 וצריך לחפש איזה צינורות תקינים עונים לדרישה זו.

צינורות נחושת הם מוצר תקני וזול, במיוחד ב-ארה"ב, וחשוב לדעת איזה צינורות נחושת קיימים, כלומר את קוטרם הפנימי ואת קוטרם החיצוני. צינורות, המשמשים להובלת נוזלים, מוגדרים תמיד לפי קוטרם הפנימי וב-ארה"ב נהוג ליצר אותם בהפרשים של $1/8$ " כאשר עובי הדופן היא $1/16$ ". אי לכך, הקוטר החיצוני יהיה תמיד גדול ב- $1/8$ " מהקוטר הפנימי. צריך לזכור זאת מכיוון ואנו צריכים להשתמש במידת הקוטר החיצוני, של המוליך הפנימי, ובמידת הקוטר הפנימי של המוליך החיצוני.

מ- $1/4$ " עד 3 " ישנם כ-17 ערכים מתוכם יש לבחור שילוב, בין הקוטר החיצוני של הצינור הפנימי ובין הקוטר הפנימי של הצינור החיצוני, שיתן יחס קוטר של 2.3 ואכן נמצאו 4 זוגות העונים על הדרישה. בטבלה הבאה אפרט רק את הצינורות הישימים (המידות באינצ'ים) כאשר חישבו העכבה נעשתה לפי הנוסחה המופיעה בראש המאמר:

Z_0 Ohm	יחס d2/d1	קוטר חיצוני כפול 2.3	קוטר חיצוני עשרוני d1	קוטר פנימי עשרוני d2	קוטר חיצוני d1	ערך נומינאלי/ קוטר פנימי d2
	2.333	0.8625 #	0.375	0.250	3/8	1/4 #
	2.400	1.4375 *	0.625	0.500	5/8	1/2 *
	2.333	1.725 @	0.750	0.625	3/4	5/8 @
50.77994	2.333	2.3000	1.000	0.875 #	1	7/8 #
	2.222	2.5875 &	1.125	1.000	1 1/8	1 &
52.46915	2.400	3.7375	1.625	1.500 *	1 5/8	1 1/2 *
50.77994	2.333	4.3125	1.875	1.750 @	1 7/8	1 3/4 @
47.85607	2.222	6.0375	2.625	2.500 &	2 5/8	2 1/2 &

נכון שהמידות העשרוניות, הרשומות בשלושת העמודות השמאליות, נראות אמנם "לא עגולות" אבל שתי העמודות הימניות הן מידות עגולות וכשרות לכול דבר ועניין.

ארבעת השילובים הנ"ל נמצאים בשימוש כאשר הצינורות הדקים משמשים להספקי שידור קטנים והעבים יותר להספקי שידור גדולים. תוצאות חישבו העכבות אכן מניבות פיזור של ערכים, סביב 50 אבל, לפי "כלל המידות העגולות", נהוג ליישר קו לערך של 50 אום.

כך נקבע תקן "מדעי" נוסף שהתבסס, הפעם, על מידות של צינורות נחושת שהיו זמינים בשוק.

למרות זאת, כנראה שהשילוב של צינורות $1/2$ " ו- $1 1/2$ " היה נפוץ והוא גרם לכך שיהיו גם כבלים גמישים בערכים של 52 אום.

האמריקאים, שהתאהבו בערך זה, ישמו אותו גם לכבלים קואקסיאליים גמישים לשימוש כללי כאשר קיים חריג של שימוש ב-75 אום לטלוויזיה ואינטרנט בכבלים וזאת בעיקר מכיוון שלצורך העברת האותות החלשים ולמרחקים גדולים נדרשים כבלים בעלי הפסדים נמוכים.

סיפור פיקנטו השייך לנושא – אם תיקחו כבל עם בידוד אוויר, של 75 אום, ותמלאו אותו עם פוליאטילן תקבלו כבל בעכבה של 50 אום. זאת עובדה פיסיקלית אבל אין לה כול קשר עם ההחלטה על שימוש אחד ב-50 אום.

מי שמתעניין בנושא יוכל להיעזר במידע שעמד לרשותי באתרים הבאים באינטרנט:

http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Jun07/HFE0607_Editorial.pdf

<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/why50ohms.cfm>

http://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial_cable

http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/cx_line_e.htm

* * * * *