

## דרגת ההספק במשדרי ת"ג

מאת: פרופ' יוסי פנחסי 4Z1VC

E-mail: [yosip@ariel.ac.il](mailto:yosip@ariel.ac.il)

Web site: [www.ariel.ac.il/sites/yosip/](http://www.ariel.ac.il/sites/yosip/)

חובבי הרדיו מייחסים בדרך כלל חשיבות מיוחדת להספק השידור, ולעיתים מציינים אותו במהלך ה-QSO. מעולם לא שמענו שחובבי יציין את רגישות המקלט, למרות שזו משפיעה על יכולתו לקלוט תשדורות מתחנות DX. אנו מתייחסים בכבוד מיוחד לדרגת ההספק במשדר שלנו, מה גם שהיא זו שגורמת לצריכת הזרם הגבוהה מספק הכוח ומפזרת את מרב החום.

דרגת ההספק אחראית על הזנת האנטנה באנרגיה הדרושה להפיכת האות לגל אלקטרומגנטי המשודר למרחב. באמצעותה מוגבר אות ה-RF לרמת המתח הדרושה להזרמת הזרם באנטנה בהתאם להספק השידור, אשר ערכו השיאי נקוב על ידי ה-Peak Envelope Power או בקיצור PEP. ערך זה נקבע על ידי המשרעת המתח המקסימלית  $V_{max}$  שמסוגל המשדר לפתח על העומס (האנטנה) והוא נתון על ידי:

$$PEP = \frac{V_{max}^2}{2 \cdot Z_L}$$

כאשר  $Z_L$  היא עכבת האנטנה, בדרך כלל  $Z_L = 50 \Omega$ . לדוגמא, משדר בעל הספק שיאי של  $PEP = 100W$ , מפתח בהדקי האנטנה משרעת מתח מקסימלית של:

$$V_{max} = \sqrt{2 \cdot Z_L \cdot PEP} = \sqrt{2 \cdot 50 \cdot 100} = 100V$$

מהחישוב האחרון ניכר שהמתח שיש להעביר לאנטנה גבוה הרבה יותר מזה שמספק ספק הכוח להזנת המקמ"ש, שהוא בסך הכל  $V_{CC} = 13.8V$ . כלומר, יש להעלות את משרעת המתח לערך הדרוש על פני האנטנה. זאת עושים באמצעות שני תיאום במוצא דרגת ההספק, אשר יחס ההשגאה שלו הוא:

$$n = \frac{V_{max}}{V_{cc}} = \frac{100}{13.8} \cong 7$$

כלומר השנאי מעלה את המתח פי 7. הקורא החרוץ מוזמן לחזור על החישובים עבור מגבר לינארי שהספקו השיאי הוא 1.5KW, ולהוכיח שמשרעת המתח בהדקי האנטנה היא גבוהה ומסוכנת.

נציין שלא כל ההספק הנצרך מספק הכוח מועבר לאנטנה והופך לאנרגיה אלקטרומגנטית המשודרת למרחב. נצילותה של דרגת ההספק היא לא יותר מ-50% ולכן כמחצית מההספק החשמלי הנצרך מספק הכוח לא מועבר לאנטנה ולמעשה הופך לחום שמפזרת דרגת ההספק. שידור RF בהספק שיאי של  $PEP = 100W$ , מצריך הספק חשמלי של בערך פי שניים. כלומר על ספק הכוח לספק כ-  $P_{cc} = 200W$ . בעת השידור, צריכת הזרם מספק הכוח במקרה זה תהיה:

$$I = \frac{P_{cc}}{V_{cc}} = \frac{200}{13.8} \cong 15A$$

הדרגות הסופיות של המקמ"שים מבוססות כיום רובן ככולן על טרנזיסטורי הספק. המעבר מדרגות ההספק השפופרתיות למעגלים שהם על טהרת הטרנזיסטורים התרחש בשנות ה-80 של המאה הקודמת. אם בשנות ה-60 וה-70, המקמ"שים היו במבנה כלאיים (Hybrid), שם רוב המקמ"ש היה בנוי ממוליכים למחצה ורק הדרגה הסופית של השידור הייתה שפופרתית, הרי שבשנים הבאות הוחלפו השפופרות בטרנזיסטורי הספק. התפתחות טכנולוגית והוזלה בעלות הטרנזיסטורים, אפשרה את המעבר הזה, כאשר בשלב הראשון נעשה שימוש בטרנזיסטורים ב-פולריים ובהמשך נכנסו לשימוש טרנזיסטורי הספק מסוג MOSFET, הפשוטים יותר לייצור. התפתחות חשובה זו ביטלה את הצורך במתחי ספק גבוהים של מאות וולטים, הדרושים להזנת האנודה של השפופרות. מי שיעיין בתוכנית החשמלית שלהם יגלה שבכל משדרי הת"ג, שני טרנזיסטורי ההספק מחוברים בתצורת דחסף (Push pull). תצורה זו מאפשרת השגת נצילות מירבית משום שבמחצית מחזור אות ה-RF מוליך טרנזיסטור אחד והשני בקיטעון, ובמחצית הבאה הם מתחלפים בתפקידיהם.

לא כאן המקום להיכנס למבנה ולעקרונות הפיזיקליים לפיהם פועלים הטרנזיסטורים, אך נציין שלמעט העובדה שלשני סוגי הטרנזיסטורים שלוש רגליים, הרי ששני קרני פועלתם שונה לחלוטין. בטרנזיסטור ביפולרי, **זרם** הכניסה לבסיס (Base) מבקר את זרם המוצא בקולט (Collector) בעוד שבטרנזיסטור מסוג MOSFET, **מתח** הכניסה לשער (Gate) מבקר את זרם המוצא במפק (Drain). מבחינה זו דומה

טרנזיסטור מסוג MOSFET לשופרת רדיו בה מתח הכניסה בסריג (Grid) מבקר את זרם המוצא באנודה (Anode). ההבדלים בין ההתקנים מסוכמים בטבלה 1.

טבלה 1: שופרות וטרנזיסטורים בדרגת ההספק של המשדר.

	Vacuum tube	Bipolar transistor	FET transistor
Supply voltage:	Many hundreds of Volts	Ten to few tens of Volts	Ten to few tens of Volts
Type of operation:	Input <b>voltage</b> controls output current	Input <b>current</b> controls output current	Input <b>voltage</b> controls output current
Input resistivity:	Very high	Low	Very high
Output impedance:	High [K $\Omega$ ]	Low [ $\Omega$ ]	Low [ $\Omega$ ]
Output Power:	Watts to tens of KW	Watts to hundreds of Watts	Watts to hundreds of Watts
Current consumption:	Tens of mA up to Amperes	Amperes up to Tens of Amperes	Amperes up to Tens of Amperes
Matching network to load:	Narrow band	Broadband	Broadband
Tuning:	Need tune	No tune	No tune
Thermal behavior:		Thermal runaway	Stable
Harmonics:	Very low because of input output resonant tanks.	High – need low pass filter	High – need low pass filter

איור 1.a מציג שרטוט חשמלי של מגבר הספק שתכננתי ובניתי לתחום ה-HF. המגבר, מבוסס כולו על טרנזיסטורים מסוג MOSFET, מאפשר הגברה של אותות בהספק נמוך של מיליוואטים להספק של כ-50-100W. הדרגה הראשונה היא הטרנזיסטור הפשוט (והזול מאד) BS170, המגביר את אות הכניסה ומעבירו לדרגה דוחפת (Driver) בתצורת דחף המבוססת על צמד הטרנזיסטורים (באריזה משותפת) מסוג MRF136Y. מתח ההזנה לשתי הדרגות האלה הוא 24V, והוא מתקבל ממעגל מיצב טורי המבוסס על הטרנזיסטור MJE3055. את הזרם בנקודת העבודה מכוונים לכ-20mA (לשני הטרנזיסטורים ביחד) באמצעות נגד הטרימר המחובר לשני השערים.

הדרגה הסופית מבוססת על זוג הטרנזיסטורים MRF150 (שאינם זולים...), גם הם בתצורת דחף, ומוזנים מספק כוח שמתחו  $V_{CC} = 50V$ . טרנזיסטורים אלה פותחו במקור על ידי חברת מוטורולה לשמש במגברי הספק למאות וואטים. על מנת לא לצרוך זרם רב מידי מספק הכוח, תוכננו הטרנזיסטורים לעבוד במתח של 50V. הם נפוצים במגברי הספק לינאריים טרנזיסטוריים המיוצרים באופן מסחרי וגם בכמה מקמ"שים המצוידים בספק כוח מתאים. נקודת העבודה של כל אחד מהטרנזיסטורים מכוונת על ידי שני טרימרים נפרדים, כך שזרם השקט ללא אות בכל אחד ביניהם יהיה 100mA. הדיודות המחוברות לטרימרים הן לצורך הגנה על הטרנזיסטורים במקרה שהבידוד לשער של אחד מהם 'נפרץ', ומתח גבוה זולג לכניסה. הדיודה חוסמת את מעבר המתח לטרנזיסטור השני ומונעת בכך הגדלת הנוק.

במוצא דרגת ההספק ניתן להבחין בשנאי המבצע תיאום לעומס. השנאי מבוסס על ליבת פריט מוארכת בעלת שני חורים (Binocular core) המקובלת ב-Balun. על מנת שהשנאי יהיה רחב סרט, ויכסה את כל תחום הת"ג בצורה יעילה, יש לוודא שההיגב ההשראי וההיגב הקיבולי של ליפופי השנאי יהיה נמוכים. לכן נדרש שהפרמאביליות של הליבה תהיה גבוהה ומספר הליפופים יהיה קטן. במקרה שלנו יחס ההשנאה הוא 1:3. שלושה ליפופים של תיל מבודד מושחלים לתוך 'ליפוף' אחד של צינור נחושת המושחל לתוך הליבה המהווה את הראשוני של השנאי.

את המגבר, שתמונתו נראית באיור 1.b סיימתי לבנות לפני מספר חודשים. החיבורים אליו תואמים את החיבורים לדרגת השידור השופרתית, שתוארה בגיליון 405 של "הגל". שנאי הכוח הוא למתח של  $36V_{RMS}$  בהספק של כ-200VA. המתח שמתקבל אחרי היישור והסינון הוא של 50V. מומלץ להגדיל את ערכו של קבל הסינון האלקטרוליטי, שכן בעת שידור מובחנת נפילה של מתח ספק הכוח. היות שהמגבר מכסה את כל תדרי הת"ג, חשוב לבנות ולהתקין מסנן מעביר נמוכים המותאם לפס התדרים הנבחר ושתפקידו להנחית את ההרמוניות הגבוהות באות השידור. כמו כן יש למקם את טרנזיסטורי ההספק על מפזר חום יעיל בשל פיזור החום הרב בעת השידור. מומלץ מאד לעשות שימוש במאוורר.

