

טכניקות מעשיות בתכנון מגברי ת"ר ומיקרוגל חלק 4 : מגברי הספק – מבוא

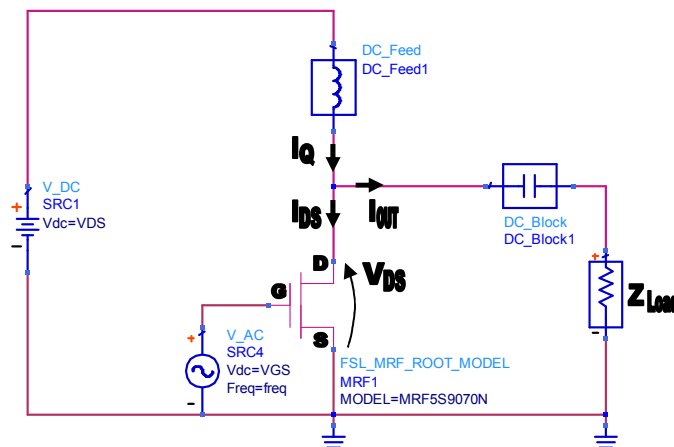
מגברי הספק **Power Amplifiers** משמשים כחוליית הגברה אחרונה בשרשרת שידור. הטכניקות המנוחות פיתוח של מגבר הספק שונות מאלו המנוחות פיתוח מגברי **Small Signal** או **LNA**.

מאמר זה הוא הרביעי בסדרת המאמרים העוסקת בטכניקות המעשיות לתכנון מגברים שונים. המאמר יעסוק בשאלות התיאורטיות והמעשיות הנוגעות לאפיון ותיאום העכבות במגברי הספק.

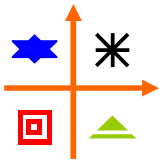
1. מבוא

המושג "מגבר הספק" אינו מתייחס רק לעובדה שהמגבר מספק גבוה לעומס, אחרת על פי הגדרה זו מהו הגבול המבדיל בין מגבר להספק גבוה או נמוך? האם מגבר של **100W** הוא אכן מגבר הספק ולעומתו מגבר של **1W** אינו? המשמעות המעשית של מגבר הספק נוגעת ליכולת של הרכיב האקטיבי לייצר מתחים וזרמים במוצאו הנמצאים באותו סדר גודל של מתחי אספקת המתחים של הרכיב. כלומר, על פי ההגדרה הזו, גם מגבר **LNA** יכנס לקטגוריית ההספק הגבוה כאשר הוא נדחס במובן מתחי מוצא.

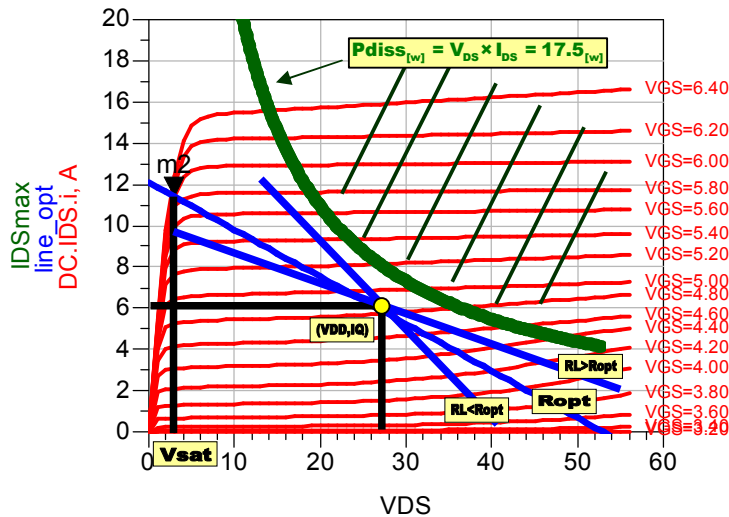
נתאר מבנה עקרוני של מגבר הספק המבוסס טרנזיסטור **LDMOS FET** של חברת מוטורולה **MRF5S9070** ממנו נדרוש לפתח הספק של **70W** על פני העומס בתדר **900MHz**. הטרנזיסטור בעל המאפיינים הבאים: פיזור הספק מקסימאלי של **Pdiss=219W**, מתח פריצת **VDSmax=68v**, תדר מקסימאלי של **1000MHz**. המעגל כולל מתח הזנה **V_{DD}** של **28V** ומזון באות מבוא הרמוני **V_{in}=v_gcos(w₀t)**, ראה איור 4-1. אנו מוסיפים קבל **DC Block** וסליל **RF Chock** על מנת להביא לחציצה בין מסלול ה-**RF** לבין מסלול ה-**DC** כך שלא תהיה העמסה הדדית בין השניים.



איור 4-1 : מבנה עקרוני של מגבר הספק מבוסס FET

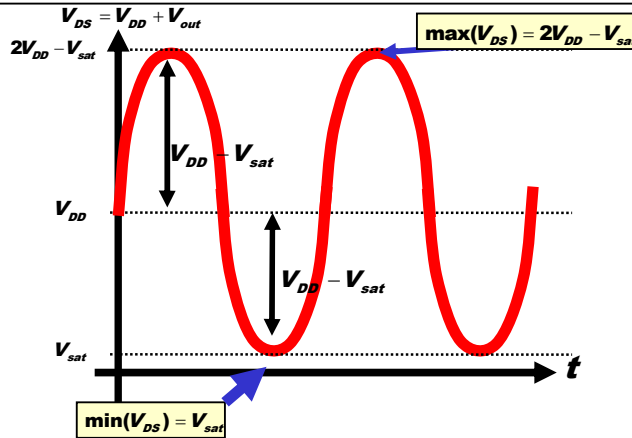
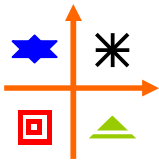


בשלב זה מקובל כשלב מקדים לתכנון המגבר לבחון את היענות זרם-מתח של הרכיב במובן עקומות $I_{DS}-V_{DS}$ של מגבר ה-FET. ניתן לבחון עקומות אלו באמצעות צב"ד מתאים ו/או תוכנות סימולציה, ראה איור 4-2. איור זה מתאר את עקומות הזרם I_{DS} עבור רמות V_{GS} שונות במבוא. הספק הפיזור העצמי P_{diss} (Pdiss) של רכיב מוגדר כהספק הרגעי שהרכיב נדרש לפזר בצורה של חום, כלומר $I_{DS} \times V_{DS}$. עבור כל רכיב, יכולת פיזור ההספק מוגבלת וחרוגה מעבר לסף המוגדר על ידי היצרן (219W) עלולה להביא לנוק לרכיב. הקו הירוק מתאר את עקומת הספק $I_{DS} = 219_{[W]}/V_{DS}$. כאשר נבוא ונתכנן את קו העבודה של המגבר יחד עם נקודת העבודה, יש למנוע כניסה של הרכיב לאזור ההספקים הגבוהים.



איור 4-2 : עקומות $I_{DS}-V_{DS}$ של טרנזיסטור MRF5S9070 כפונקציה של מתח מבוא V_{GS} .

המושג הבא אותו נכיר הוא מושג נקודת העבודה (Quiescent Point). האות ההרמוני במוצא הטרנזיסטור רוכב סביב נקודת מתח-זרם DC המוגדרת כנקודת ה-DC של הטרנזיסטור, ראה איור 4-3. במגברי הספק משיקולי וצילות אנו ממקמים סליל RF Chock בין הדקי הטרנזיסטור לבין ספק הכוח ועל כן מבחינת מתח ה-DC ניתן לומר כי $V_{DS} = V_{DD}$. על כן אם הרמה הממוצעת של האות היא V_{DD} , המשמעות היא כי בחציו השלילי האות מסוגל לרדת למתח תיאורטית של 0v (בפועל הוא ירד לרמת רוויה V_{sat}). ירידה זו טוענת את סליל ה-RF Chock באנרגיה המאפשרת למתח המוצא להגיע בחציו החיובי לרמות הגבוהות ממתח המקור, $2V_{DD} - V_{sat}$. נקודה זו מאוד חשובה במגברי הספק היות וקיים סף מתח מקסימאלי V_{DSmax} אשר הרכיב מסוגל לעמוד בו (עבור הרכיב הנ"ל $V_{DSmax} = 68V$). כאשר נמקם את קו העבודה על גבי עקומת ה-I-V יחד עם נקודת העבודה, ניקח בחשבון את הכפלת המתח.



איור 4-3 : מתח הטרוניסטור V_{DS} במישור הזמן. נשים לב לרמת המתח הגבוהה העולה את מתח הספק V_{DD} . כמו כן המתח המינימאלי אינו 0V כי אם מתח הרוויה של הרכיב V_{sat} .

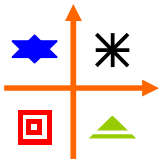
קביעת נקודת העבודה למגבר אינה מקרית ונלקחים בחשבון מספר דברים. נקודת העבודה מביאה לצריכת הספק קבועה ועל כן מהווה שיקול משמעותי במערכות בהן נדרשת נצילות גבוהה. בצורה דומה, עבור מערכות עם נצילות נמוכה, נדרשת יכולת פיזור החום גבוהה יותר המביאה למכלולי **Heat Sink** גדולים יותר. כמו כן, על מנת להביא לליניאריות גבוהה ממקמים את נקודת העבודה באזורים בהם מוליכות הרכיב **Gm** יחסית קבוע (נגזרת הזרם I_{DS} לפי המתח V_{GS}). מקובל לסווג את המגבר למשפחה (**CLASS**) המאופיינת בהתאם לנקודת העבודה. למשל, עבור **CLASS A** נקודת העבודה ממוקמת במרכז קו העבודה בעוד עבור **CLASS B** נקודת העבודה ממוקמת בקצה התחתון של קו העבודה. בנושא זה נעסוק רבות במאמרים הבאים.

2. מושג קו העבודה – Load Line

אם נרכיב משוואת חוגים במוצא נמצא את הקשר שבין זרם I_{DS} למתח V_{DS} של הטרוניסטור. קשר זה מתואר במשוואה (4-1) כקו ליניארי אשר מוגדר כ"קו העבודה" של המגבר, ראה איור 4-2. זרם I_Q הוא הזרם הקבוע הנצרך מספק הכוח (קבוע כל עוד לא מתקיימת דחיסה), R_L הוא התנגדות העומס. בהינתן עומס R_L הקו מתאר את הקשר החוקי היחיד שבין מתח וזרם ברכיב, לא ייתכנו צירופים אשר אינם על הקו עבור עומס נתון. נשים לב לחשיבות הרבה של התנגדות העומס על שיפוע קו העבודה. קו העבודה עובר בין שתי נקודות קיצון, כאשר הזרם $I_{DS}=0A$ המתח הוא מקסימאלי (כולל אפקט הכפלת המתח) בעוד כאשר המתח V_{DS} מינימאלי, I_{DS} מקסימאלי אשר יקבע על פי יכולות הרכיב.

$$(4-1) \quad I_{ds} = I_Q - \frac{V_{DS} - V_{DD}}{R_L}$$

הספק אות ה-**RF** המתפתח על פני העומס במוצא מתואר במשוואה 4-2 (עבור מגבר **CLASS A** עבורו נקודת העבודה ממוקמת במרכז קו העבודה). ברור שעל מנת לייצר הספק מקסימאלי בעומס עבור נקודת **DC** מוגדרת, עלינו להביא לאמפליטודת מתח וזרם מקסימאליות. אולם, משיקולים של ליניאריות לא מאפשרים למתח/זרם להיכנס לאזור הברך בעקומת ה-**I-V** של הרכיב (אזור מתח **VDS** הנמוכים בהם הזרם אינו קבוע ומשתנה בצורה ליניארית). בקביעה של גבולות קו העבודה, אנו



מגדירים את סף הרוויה (סמן $m2$ באיור 4-2) אשר יקבע את אמפליטודת המתח המינימאלית ואמפליטודת הזרם המקסימאלית. ככל שנוקבע סף הרוויה נמוך יותר ההספק אשר יתפתח על העומס והנצילות יהיו גבוהים יותר.

$$(4-2) \quad P_{Rf [W]} = \frac{1}{2} (V_{DD} - V_{sat}) (I_{DSmax} / 2)$$

היות וקו העבודה מייצג את יחס זרם-מתח הטרנזיסטור, שיפוע קו העבודה באזור ליניארי זה מייצג את העומס האופטימאלי R_{opt} אשר יביא להיסט מתח זרם מקסימאליים (ראה איור 4-2, משוואה 4-3). המשמעות היא כי על מנת לפתח הספק מקסימאלי על העומס, עלינו לתאם את מוצא הטרנזיסטור להתנגדות R_{opt} הייחודית. תיאום להתנגדות נמוכה יותר לא תפתח מתח מקסימאלי וההספק יהיה נמוך (**Voltage Limited**) בעוד תיאום להתנגדות גבוהה יותר תביא לזרם נמוך (**Current Limited**). עבור קו העבודה המתואר באיור 4-2 ניתן לראות כי נקבע מתח מינימאלי $V_{DD} = 28V$, $V_{sat} = 3V$ זרם מקסימאלי בנקודת הרוויה של $11.4A$. תוך שימוש במשוואה 4-3 או למדים כי נדרש לתאם את המוצא של הרכיב עם נגד של 4.38 אום, כל התנגדות אחרת לא תפתח הספק גבוה. ההספק שיתפתח במצב זה יחושב על פי משוואה 4-2 ויעמוד על כ- $71W$.

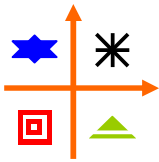
$$(4-3) \quad R_{opt[\Omega]} = \frac{2(V_{DD} - V_{sat})}{I_{DSmax}}$$

3. תיאום עכבות (תיאום צמוד לעומת תיאום קו עבודה)

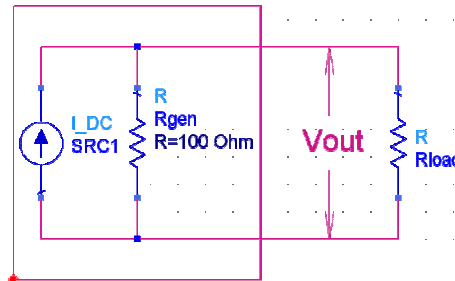
על מנת לקבל הגבר מקסימאלי, אנו יודעים כי נדרש לתאם את מבוא המגבר ומוצאו לעכבה צמודה קומפלקסית (**Conjugate Match**). אם נבחן את מוצא המגבר, תיאום זה יביא להעברת הספק מלאה בין מוצא הטרנזיסטור לבין העומס המחובר אליו. יש לזכור כי היכולת לפתח את ההספק הגבוה על העומס תלוי בצורה ישירה לזמינות אספקת מתחי ה-**DC**. כפי שנראה תיאום צמוד קומפלקסי יביא לרווית מתח בשלב מוקדם יותר.

נבחן לדוגמא טרנזיסטור המוזן במתח אספקה של $10v$ ומזרים במוצאו זרם מקסימאלי של $1A$ עם התנגדות פנימית של 100 אום, כפי שמתואר באיור 4-4(a). נזכור כי עבור מתח V_{DD} של $10v$, המתח המקסימאלי שיכול להתפתח על הטרנזיסטור הוא $20v$. על פי גישת התיאום הצמוד, אם נתאם את מוצא הרכיב בנוגד עומס של 100 אום הרי שעבור זרם מקסימאלי של $1A$ המתח אשר יתפתח על פני העומס המשוקלל (50 אום) יגיע ל- $50v$. היות והמתח המקסימאלי הוא לכול היותר $20v$ ניתן לקבוע בוודאות כי המגבר יכנס לרווית מתח כבר בזרמים נמוכים וההספק הגבוה ביותר שיתפתח על פני העומס יעמוד על $2.5W$ ($34 dBm$).

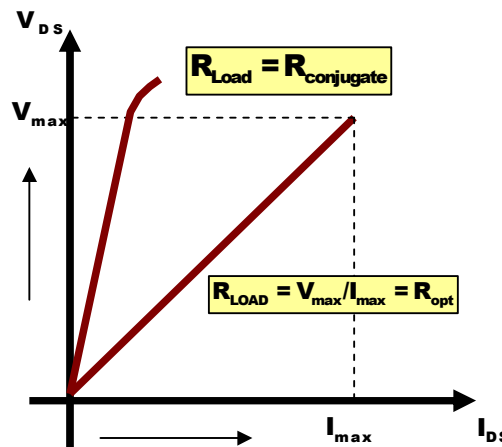
נעת נבחן את ההספק המתפתח על פני העומס עבור תיאום לפי קו העבודה. עבור מתח מקסימאלי של $20v$ זרם מקסימאלי של $1A$ (לשם פשטות נניח $V_{sat}=0v$), התנגדות העומס המשוקלל האופטימאלית לתיאום תעמוד על 20 אום ($\Delta V/\Delta I$). כלומר נגד עומס של 25 אום במקביל להתנגדות



הפנימית של המרנוזיסטור 100 אום יביא לעומס המשוקלל הנדרש. אם נחשב את זרם העומס באמצעות מחלק זרם ניווכח כי ההספק אשר יתפתח על העומס עומד על $16W$ (36 dBm). כלומר מתקבל הספק הגבוה ב-2dB מההספק אשר יתואם על פי התיאום הצמוד. תיאור גרפי של ההיענות מתואר באיור 4-4(b).



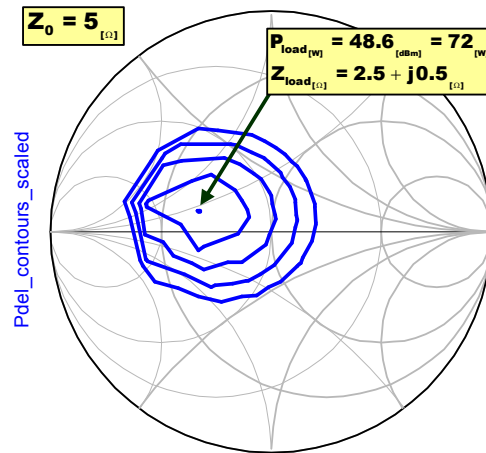
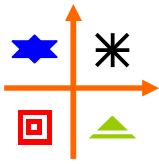
איור 4-3(a) : מודל זרם למרנוזיסטור עם התנגדות מוצא של 100 אום המחובר לעומס לא ידוע .Load



איור 4-3(b) : מודל זרם למרנוזיסטור עם התנגדות מוצא של 100 אום המחובר לעומס לא ידוע .Load

4. עקומות Load Pull

עד כה ראינו כי ההתנגדות האופטימלית לתיאום מגבר הספק מוגדרת כהתנגדות ממשיית R_{opt} והיא זו שתביא להספק מקסימאלי אשר יתפתח על העומס. הניתוח שנעשה הזניח את ההיענות הפאראזיטית במוצא הרכיב, השפעת צבירת הפאזה במוליכים והשפעות המארז ותופעות לא ליניאריות. ניתן להראות כי כל עוד התוספות הפאראזיטיות הן היגביות וחסרות הפסד, ההספק המקסימאלי שחושב יתפתח אולם עבור עומס קומפלקסי ולא ממשי כמו R_{opt} . על ידי העמסה של דרגת מוצא המגבר – **Load Pulling** בעכבות שונות (באמצעות **Tuner** מכאני/חשמלי או ברמת הסימולציה הממוחשבת) ומדידת הספק המוצא, ניתן להגדיר עקומות שוות הספק (**Load Pull Contours**), ראה איור 4-4.



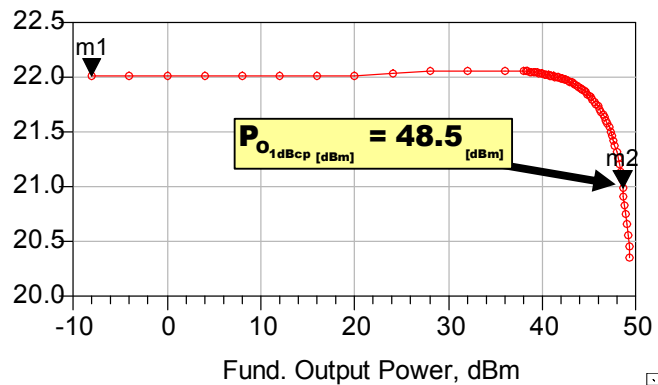
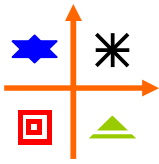
איור 4-4 : עקומות Load Pull : $P_{Lmax}=72W$ עבור עומס של $Z_L=2.5+j0.5 \text{ Ohm}$. העקומות מייצגות מרווחי הספק של 0.5dB . הדיאגרמה מנורמלת לעכבה אופיינית של 5 אום .

על פי איור 4-4 אנו רואים כי ההספק הרצוי מתקבל עבור עכבה מרוכבת השונה מהתנגדות קו העבודה שחושב. בשלבי תכנון המגבר מקובל להשתמש בקו העבודה כמדד ראשוני להערכה של מידת ההתנגדות הנדרשת במוצא, אולם התכנון הסופי של העכבה יבוצע על ידי עקומות ה- Load Pull. ככל שהיענות המגבר תהה יותר ליניארית ופחות פאראזיטי (תדר נמוך), כך ניתוח קו העבודה יהיה נאמן יותר למדידות מעשיות. חשוב לשים לב כי כל נקודה על העקומה תייצג הספק שווה אשר יתפתח על פני העומס. היות ומדובר בעקומה סגורה, קיימות מספר נקודות אפשריות לתיאום, אך משיקולים מעשיים אנו נעדיף את הנקודות הנמצאות באזורי הגרדיאנט הנמוך (צד ימין של העקומה באיור 4-4). הסיבה לכך נובעת עקב הסמיות המעשיות בערכי הרכיבים ו/או הדפסת קווי התמסורת אשר תביא לשגיאה במיקום מקדם ההחזרה ועל כן השינוי בהספק באזור הגרדיאנט הנמוך יהיה מינימאלי.

5. תאום מבוא המגבר וניתוח סופי

עד כה התייחסנו למוצא המגבר בלבד ללא כל התייחסות למבוא המגבר. ראינו כי על מנת לפתח הספק מקסימאלי על פני העומס יש לתאם לעכבת קו העבודה ולא לעכבה צמודה כפי שמקובל במגברים לאות קטן. על מנת להעריך את העכבה הנדרשת, ניתן להשתמש בעקרון קו העבודה ו/או שיטות העמסה של Load Pulling מנת להעריך את התנגדות העומס הנדרשת. המטודולוגיה המנחה תכנון מגברי הספק היא ראשית תיאום מוצא המגבר לקביעת הספק מקסימאלי ורק לאחר מכן תיאום המבוא לעכבה צמודה על מנת להשלים להגבר גבוה ככל שניתן.

עבור המגבר שהוצג, בוצעה אופטימיזציה לעכבת המוצא אשר תביא להספק דחיסה של 48.6dBm (הספק רצוי של $72W$) העומדת על ערך של $2.5+j0.5$, זרם המוצא צומצם לרמה של $IDS=2.5A$ ($VGS=4.25V$). בשלב הבא עכבת מבוא המגבר נמדדה ועבורה תואמה עכבה צמודה ($Zs=0.5-j0.3$). ההיענות המתקבלת מובאת באיור 4-5. בגיליון הבא נציג תכנון מקיף על כל שיקוליו של מגבר הספק.



איור 4-5 : היענות דחיסה של מגבר לתדר 900MHz. מתקבל הספק דחיסה במוצא של 48.6dBm.

6. מראי מקום

- [1] Guillermo Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design, Second Edition, Prentice –Hall, 1997.
- [2] Less Besser, Practical RF Circuit Design For Modern Wireless Systems, Volume II, Active Circuits and Systems, Artech House, 2003.
- [3] Peter B.Kenington, High Linearity Power Amplifier Design, Artech House, 2000.
- [4] Steve C.Cripps , RF Power Amplifiers For Wireless Communications, Artech House, 1999.