

דו"ח סיכום פרויקט: א'

תכנון מתנד ומגבר דל רעש

בתדר RF

RF Frequency Low Noise Amplifier and Oscillator Design

מבצע:

Anil Zaher

אניל זאהר

Alexander Hodisan

מנחה: אלכסנדר הודיסן

סמסטר רישום: אביב תשפ"ד

תאריך הגשה: אוגוסט, 2024

Project ID : 7819

תודות

ברצוני להודות למשפחתי היקרה, שתמכה בי לאורך כל הדרך גם ברגעים הקשים ובנוסף עזרו לי בפרויקט זה. למנחה הפרויקט אלכסנדר הודיסן על ההנחיה והזמן שהקדיש במהלך פרויקט זה. על תרומתו ועזרתו להבאת הפרויקט לסיומו.

לאנשי הסגל והמרצים על הנתונה וההשקעה לאורך כל התאור .

תודה רבה על השקעתכם ותרומתכם.

תוכן עניינים

1	סקירה ספרותית	1
1	חזרה על דיגרמט סמית ועקרונות תיאום	1.1
6	טרנזיסטור <i>BJT</i>	1.2
8	תכן מגבירים	1.3
11	תכן מתנידים	1.4
14	תכנון מגבר דל הרעש ה-LNA	2
14	שלבי תכנון ה-LNA	2.1
34	סיכום תוצאות תכנון ה-LNA	2.2
35	תכנון המתנד	3
35	שלבי תכנון המתנד	3.1
39	סיכום תוצאות תכנון המתנד	3.2
40	סיכום	4
41	רשימת מקורות	

תקציר

הפרויקט עוסק בתכנון מתנד ומגבר דל רעש בתדר RF , התכנון יכלול תכנון המגבר באות קטן בנקודת העבודה ותכנון המתנד בנקודת העבודה באות קטן וגדול.

המתנד והמגבר דל הרעש בעלי חשיבות רבה במערכות קליטה מודרניות, שבהן נדרשת רגישות קליטה גבוהה ולרכיבים הנ"ל יש השפעה ישירה, לכן בפרויקט הכרתי שיטות תכנון שסייעו לי לשפר הביצועים של הרכיבים הנ"ל.

בפרויקט יוצגו שלבי והסברי התכנון שנלקחו בחשבון בעת תכנון המתנד והמגבר דל הרעש, תוך עמידה בדרישות והקריטריונים שהוגדרו מראש. ולאחר תכנון הרכיבים בוצעה סימולציה מקיפה בעזרת התוכנה AWR שבוחנת את הביצועים של הרכיבים ועמידה בקריטריונים.

Abstract

The project focuses on designing a low-noise RF frequency oscillator and amplifier. It includes designing an amplifier with a small signal at the operating point and an oscillator at the operating point with both small and large signals.

Low-noise oscillators and amplifiers are crucial in modern reception systems, where high sensitivity is essential. These components have a direct impact on performance.

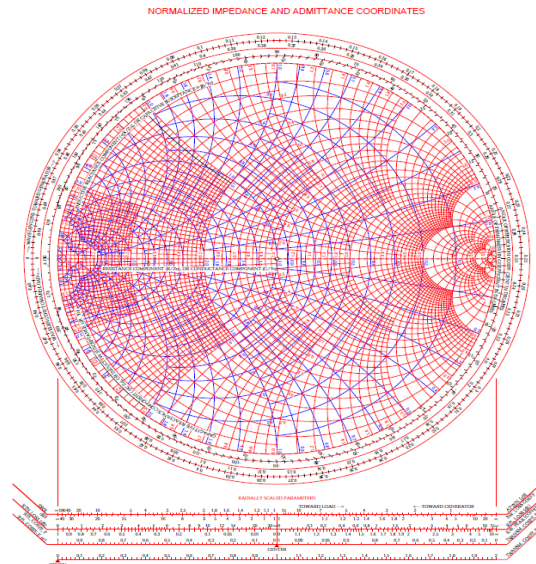
In this project, I explored design methods that enhanced the performance of these components. The project will outline the stages and considerations involved in designing the low-noise oscillator and amplifier, ensuring they meet predefined requirements and criteria. After the design phase, comprehensive simulations using AWR were conducted to evaluate the performance of the components and verify their adherence to the criteria.

1. סקירה ספרותית

1.1. חזרה על דיאגרמת סמית ועקרונות תיאום

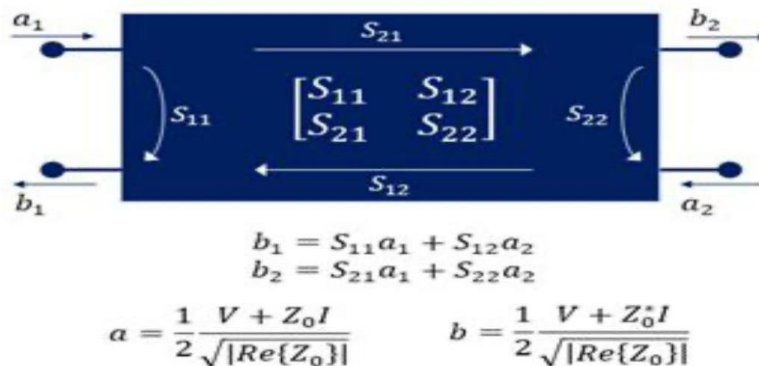
1.1.1. חזרה על דיאגרמת סמית ופרמטרי הפיזור S – parameters:

- תחילה עשיתי חזרה על דיאגרמת סמית המלאה שמכילה מעלי שווי התנגדות ומיתירות, שבה עברתי על הגדרתה ואופן השימוש בה ומאפייניה, ולדיאגרמת סמית יש חשיבות רבה בנושא של תכן מגברים דלי רעש ומתנדנים בתחום המיקרוגלים.



איור 1. דיאגרמת סמית המלאה

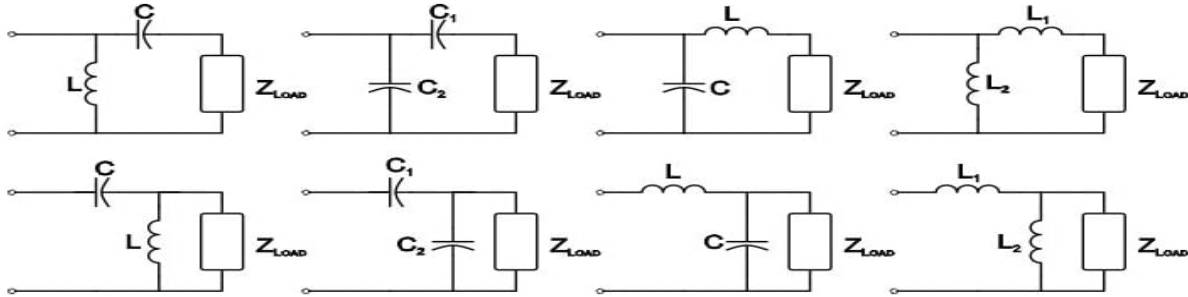
- פרמטרי הפיזור או בלעז S – parameters מייצגים ההתנהגות החשמלית של מערכת חשמלית לינארית במצב יציב, ובמערכת עם שני מחברים הפרמטר S_{11} מייצג את מקדם ההחזרה בכניסה לרשת, S_{12} מייצג מקדם ההעברה האחורי (ההגבר האחורי או ההפסדים), S_{21} מייצג מקדם ההעברה הקדמי ו S_{22} מייצג את מקדם ההחזרה בכניסה לרשת.



איור 2. פרמטרי הפיזור (S – parameters) של רשת לינארית עם שני מחברים

1.1.2. רשתות תיאום בסיסים :

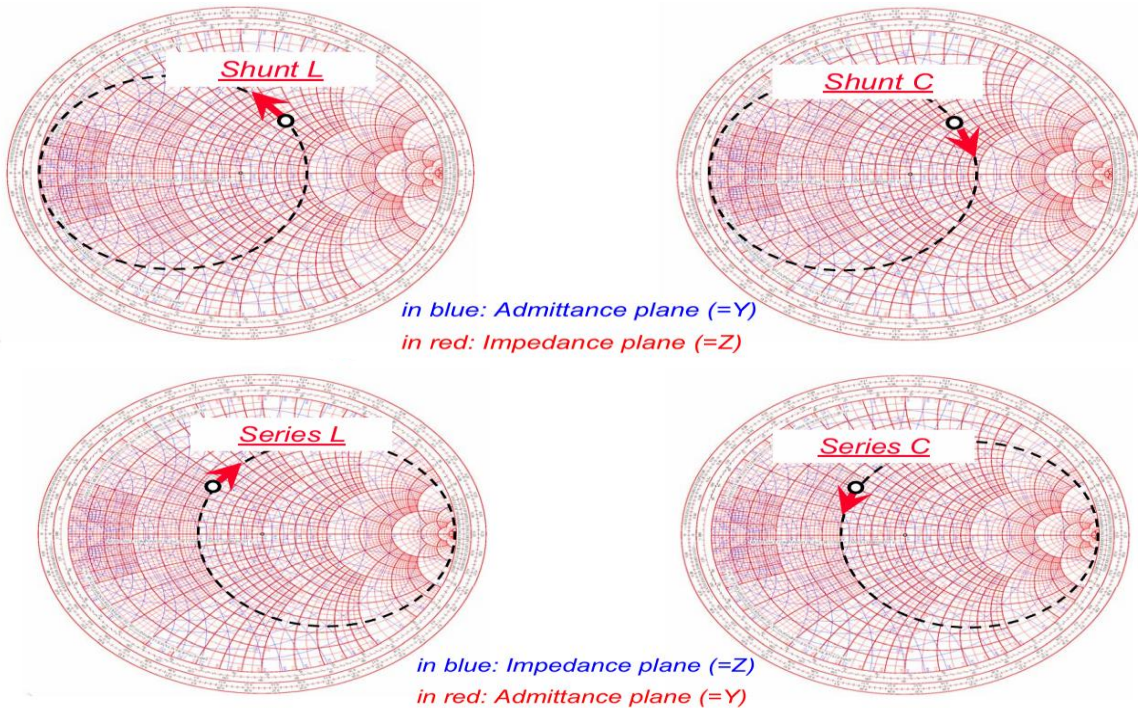
- שיטת תיאום האימפדנסים הבסיסית ביותר שנקראת $L - sections$ שממומשת על ידי רכבים פסיביים כגון קבלים וסלילים, כאשר מחברים קבלוסליל במקביל או בטור לאימפדנס הכניסה ולאימפדנס והעומס מחברים קבלוסליל באופן הפוך לחיבור אימפדנס הכניסה כלומר אם חובר הקבלוסליל במקביל לאימפדנס הכניסה, נחבר הרכיב באופן טורי לעומס ולהפך, ובכך נקבל שמונה קונפיגרציות אפשריות.



איור 3. רשתות תיאום L-sections

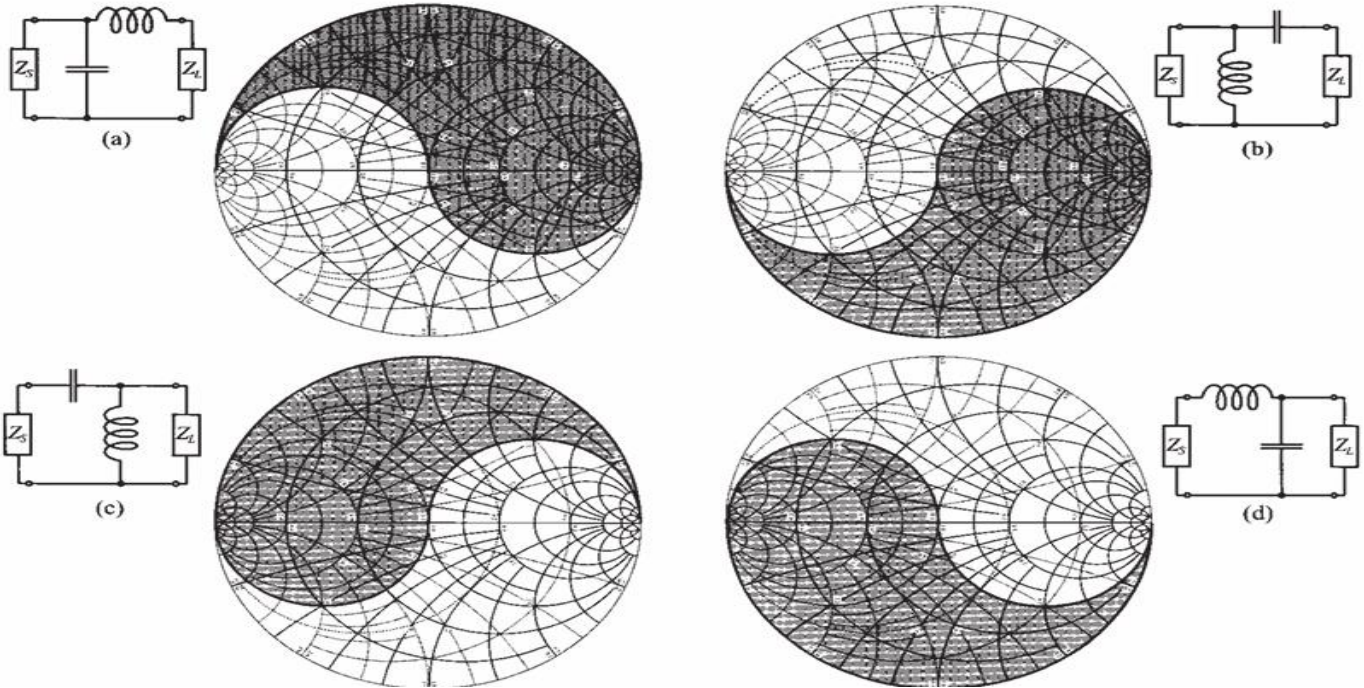
- על מנת למצוא את קיבולוהשראות הקבלוהסליל הדרוש צריך שיתקיים שהאימפדנס שהעומס "רואה" שווה לצמוד הקומפלקסי כלומר צריכים לקיים תיאום אימפדנסים, וניתן לקבל ערך זה על ידי פתרון אנליטי שהוא מסובך ודורש הרבה חישובים או על ידי שימוש בדיאגרמת סמית.

- מציאת ההשראות והקיבול הדרושים דרך דיאגרמת סמית מתבצע בכמה שלבים קודם מנרמלים את אימפדנס הצמוד הקומפלקסי של אימפדנס העומס ואימפדנס הכניסה, ולאחר מכן מסרטטים את מעגלי שווי ההתנגדות והמוליכות (מטירות) שעוברים בנקודות, ומסמנים את נקודות החיתוך בין המגלים ובוחרים במסלול על פי אופן חיבור הקבל והסליל ועל ידי שימוש בכללי חיבור מקבלי וטורי של קבלים וסלילים על דיאגרמת סמית.



איור 4. התקדמות על דיאגרמת סמית עבור חיבור טורי/מקבילי של קבל/סליל

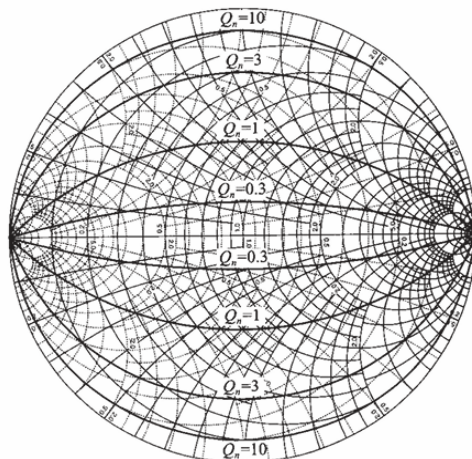
- יש אימפדנס כניסה שעבורם לא ניתן לבצע להם תיאום אימפדנסים בכל קונפיגורציה מהשמונה האפשריות למשל עבור $Z_s = Z_0 = 50 [\Omega]$ יש שיטות תיאום לא מתאימות עבור כל עומס ויש אזורים אסורים שבהם לא יהיה ניתן לבצע תיאום עבור עומס שנמצא באזור זה דיאגרמת סמית.



איור 5. האזורים האסורים שבהם לא יהיה ניתן לבצע תיאום עבור עומס שנמצא באזור הכהה עבור אימפדנס מקור של $Z_s = 50 [\Omega]$ בשיטות L - section שמוצגות באיור

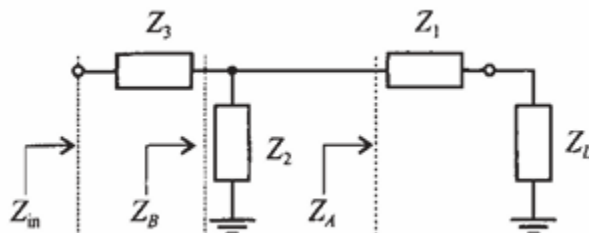
- מקדם הטיב של המערכת Q_L הוא תדר הנתהודה f_0 של המערכת חלקי רוחב הסרט של המעגל BW , לרוב חישוב Q_L הוא מסובך וקשה לביצוע, לכן מעריכים אותו על ידי חישוב מקדם הטיב בצמתי המעגל Q_n ולקיחת הערך המקסימלי מבניהם ובמקרה הפרטי של רשת תיאום L - type מתקיים $Q_L = \frac{Q_n}{2}$.

- ועל מנת להקל בתכנון ניתן לצייר על דיאגרמת סמית עקומי שווי Q_n ולתכנן את רשת התיאום בתוך העקומים על מנת להבטיח שמקדים הטיב של המערכת בתחום הנדרש למשל עבור מגבר נדרוש מקדם טיב קטן ככל האפשר על מנת שנקבל רוחב סרט גדול ועבור מתנד נדרוש מקדם טיב גדול על מנת לקבל עבודה בתחום התדרים הריצויים כלומר רוחב סרט קטן.



איור 6. עקומי שווי מקדם הטיב Q שמוצגים על דיאגרמת סמית

- שיטת התיאום $T - type$ מאפשרת לנו לבצע תיאום אימפדנסים וגם להתאים את מקדם הטיב של המעגל (בקירוב) על ידי סימון נקודת אימפדנס הכניסה ואימפדנס העומס על דיאגרמת סמית, לאחר מכן מתקדמים מנקודת אימפדנס הכניסה על מעגל שווי ההתנגדות (חיבור טורי) לכיוון עקום שווי ה- Q_n הדרוש, ומשם מתקדמים על מעגל שווי מוליכות (חיבור מקבילי) עד שחותכים את המעגל שווי ההתנגדות של אימפדנס העומס (חיבור טורי) ומנקודות החיתוך של המעגלים מקבלים את ערכי הקבלים והסלילים הדרושים.

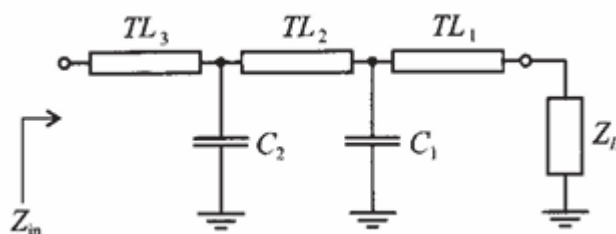


איור 7. רשת תיאום T-type

- שיטת התיאום $Pi - type$ מאפשרת לנו לבצע תיאום אימפדנסים וגם להתאים את מקדם הטיב של המעגל (בקירוב) לערך המינימאלי האפשרי שנקבע על ידי אימפדנס הכניסה והעומס, על ידי סימון נקודת אימפדנס הכניסה ואימפדנס העומס על דיאגרמת סמית, לאחר מכן מתקדמים מנקודת אימפדנס הכניסה על מעגל שווי מוליכות (חיבור מקבילי) לכיוון עקום שווי ה- Q_n המינימלי, ומשם מתקדמים על מעגל שווי ההתנגדות (חיבור טורי) עד שחותכים את המעגל שווי המוליכות של אימפדנס העומס (חיבור מקבילי) ומנקודות החיתוך של המעגלים מקבלים את ערכי הקבלים והסלילים הדרושים.

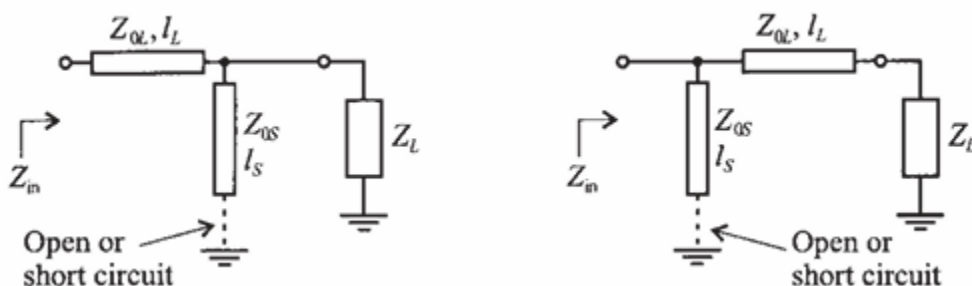
1.1.3. תיאום בעזרת קווי תמסורת :

- תיאום על ידי שימוש בקווי תמסורת וקבלים מתקבל על ידי הצבת הקבל בנקודה מסוימת בין שני קווי תמסורת כאשר ההדק השני של הקבל באדמה, על ידי קביעת אורכי קווי התמסורת וקיבול הקבל ניתן לקבל תיאום בין אימפדנס המקור לאימפדנס המוצא. וזה מתבצע על סימון נקודת אימפדנס הכניסה ואימפדנס העומס על דיאגרמת סמית מתקדמים על מעגל שווי מקדם ההחזרה Γ של אימפדנס העומס אז מנקודה שרירותית על המעגל עוברים למעגל שווי ה- Γ של המעגל שווי המוליכות של הנקודה ומשם מתקדמים לנקודת המוצא ומוצאים את אורכי הקווים וערכי הקבל הדרוש.



איור 8. רשת תיאום משולבת של קבלים וקווי תמסורת

- תיאום על ידי שימוש בקו תמסורת וגדם אחד, כאשר מחברים גדם במקביל לאימפדנס הכניסה ובטור לקו תמסורת או קו תמסורת בטור לאימפדנס הכניסה ובמקביל לגדם, וזה מתבצע על סימון נקודת אימפדנס הכניסה ואימפדנס העומס על דיאגרמת סמית ומסמנים את מעגל שווי מקדם ההחזרה Γ של האימפדנס שמחובר בטור לקו התמסורת ומסמנים את מעגל שווי המוליכות של האימפדנס במקביל לגדם ומוצאים נקודת החיתוך ביניהם ומשם מקבלים את אורך הגדם הדרוש על ידי נקודת החיתוך וסוג הגדם ומתקדמים על קו התמסורת בטור עד שמוצאים את אורך קו התמסורת הדרוש.



איור 9. רשתות תיאום של קו תמסורת וגדם אחד

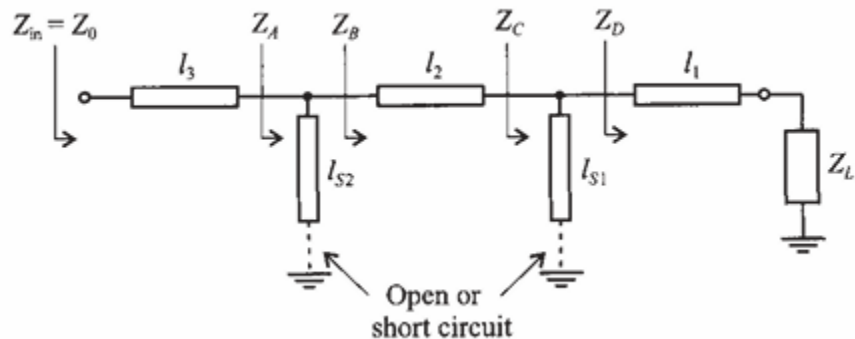
- תיאום ידי שימוש בקו תמסורת וגדם אחד על ידי שינוי את ההתנגדות האופיינית של קו התמסורת, למשל עבור קו תמסורת שהוא שני רבע אורך גל בטור לעומס מקבלים שההתנגדות האופיינית של קו התמסורת צריכה להיות

$$Z_{0L} = \sqrt{\frac{R_L}{G_{in}}}, \text{ ושההתנגדות האופיינית של הגדם היא } Z_{0S} = \pm \frac{1}{\frac{X_L}{Z_{0L}} - B_{in}}$$

והמינוס הוא קצר, וניתן לבצע אותו תיאום על ידי שימוש בשני גדמים במקביל על מנת לקבל מעגל מאוזן אבל על

מנת לקבל תיאום נכון צריכים לשנות אורכי הגדמים ל- $l_{SB} = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(2^{\pm 1} \frac{2\pi l_S}{\lambda} \right)$ כאשר סימן הפלוס כאשר הגדם הוא נתק והמינוס הוא קצר.

- תיאום על ידי שימוש ברשת תיאום של קווי תמסורת ושני גדמים, כאשר אורכי שלושת קווי התמסורת קבועים והאורכים הקבועים המקובלים הם שמנית, שלוש שמיניות וחמש שניות אורך גל, וזה מתבצע על ידי סימון נקודת אימפדנס הכניסה ואימפדנס העומס על דיאגרמת סמית ואז מקדמים את אדמיטנס העומס על מעגל שווי מקדם ההחזרה Γ באורך קו התמסורת בטור לעומס (לשים לב שיש תחום אזור שעבורו אדמיטנס הנקודה לא יכול להימצא בו ובמידה וכן נוסף קו תמסורת של רבע אורך גל) ואז מתקדמים על המעגל שווי המוליכות של הנקודה המתקבל עד שחותכים את מעגל שווי המוליכות $g = 1$ שמוזו באורך קו התמסורת שמחובר לאימפדנס הכניסה ומנקודת החיתוך מוצאים את אורך הגדם הימני (שקרוב לעומס) ואז מקדמים את נקודת החיתוך על מעגל שווי מקדם ההחזרה Γ באורך הקו התמסורת האמצעית ואז מהנקודה ניתן לקבוע את אורך הגדם שקרוב לאימפדנס הכניסה.

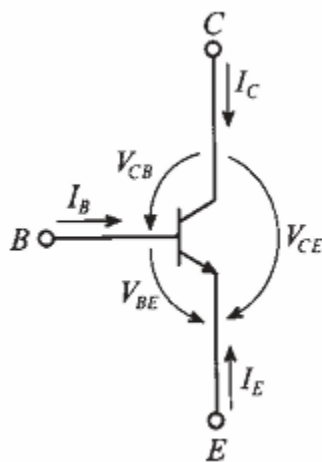


איור 10. רשת תיאום של קווי תמסורת ושני גדמים

1.2. טרנזיסטור BJT

1.2.1. המאפיינים של טרנזיסטור ה-BJT :

- טרנזיסטור ה-BJT הוא רכיב בעל חשיבות רבה במעגלים בתדרים גבוהים RF לטרנזיסטור ה-BJT יש שני סוגים PNP And NPN וההבדל ביניהם הוא הסימום של המוליך למחצה שצומת P-N עשויה ממנה ולטרנזיסטור BJT יש שלושה חלקים: emitter, base, collector כאשר ה-emitter בעל הסימום הגבוה וה-base בעל הסימום הנמוך.



איור 11. סימבול טרנזיסטור ה-BJT

1.2.2. מצבי ההולכה של טרנזיסטור ה-BJT :

- לטרנזיסטור ה-BJT יש שלושה מצבי הולכה, הראשון פעיל קדמי שבו צומת ה-PN בין ה-emitter וה-base היא בממתח קדמי וצומת ה-PN בין ה-base וה-collector היא בממתח אחורי, והיחס בין הזרם שזורם ב-collector וב-base מסומן ב- β_F וקוראים לו הגבר הזרם והיחס בין הזרם שזורם ב-collector וב-emitter (בסימן הפוך) מסומן ב- α_F . ומצב הפעולה השני הוא פעיל אחורי שבו צומת ה-PN בין ה-collector וה-base היא בממתח קדמי וצומת ה-PN בין ה-base וה-emitter היא בממתח אחורי. המתב השלישי הוא הולכה ברוויה שבו שתי צמתי ה-PN בממתח קדמי שבו זורם ב-base זרם של מצב הפעולה של הפעיל קדמי ומצב הפעולה של פעיל אחורי.

1.2.3. תגובת התדר של טרנזיסטור ה-BJT :

- בתגובת התדר של טרנזיסטור ה-BJT בוחנים מה התדר המעבר שעבורו הגבר הזרם במעגל בהדקים מקוצרים הטרנזיסטור בקונפיגורציה של common emitter יורד להגבר יחידה, ותדר המעבר מסונן ב- $f_T = \frac{1}{\tau}$ כאשר τ הוא הזמן שלוקח לנושא המטען לעבור מה-emitter ל-collector והוא מורכב מזמן ההשהיה שלוקח לנושא המטען לעבור דרך ה-emitter, base, collector, ואחת הדרכים להגדיל את תדר המעבר הוא בלהגדיל את הזרם דרך ה-collector כל עוד הנושא הטען המוזרק ל-base קטנים מריכוז הסימום בו, וניתן להגדיל את תדר המעבר על ידי הגדלת רמת הסימום והקיצור ה-base.

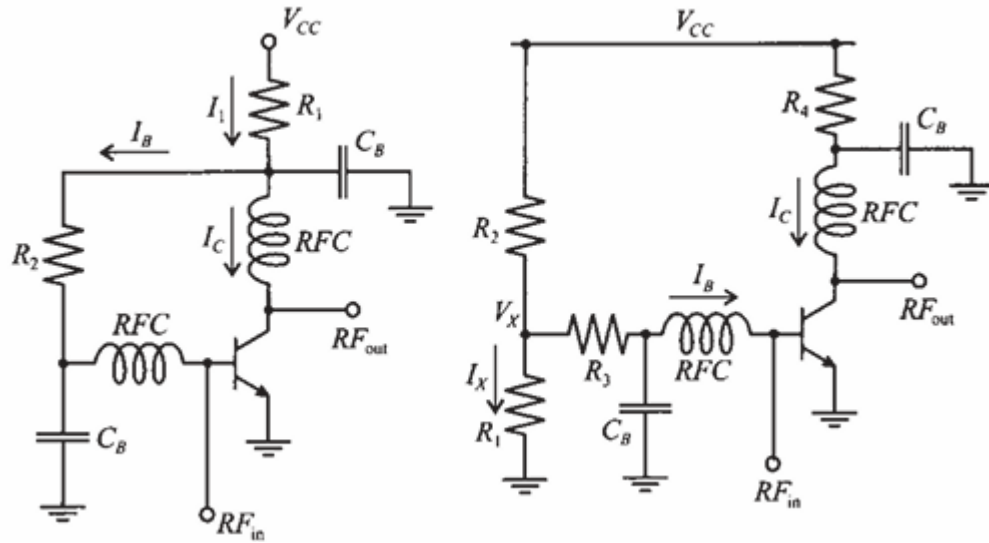
1.2.4. השפעת החום על טרנזיסטור ה-BJT ומצבי עובדה אי תקינה :

- לטמפרטורה יש השפעה רבה על טרנזיסטור ה-BJT, למשל הגבר הזרם גדל עם עליית הטמפרטורה בצומת הטרנזיסטור, אבל צריך לשמור על הטרנזיסטור בתחום טמפרטורות נתון על ידי היצרן על מנת שהרכיב יפעל כרצוי ובלי לגרום לו נזק, לכן יש תכנון את הכיסוי המשטח הקירור כך שישמרו את הרכיב בטמפרטורות עבודה רצויות.
- לטרנזיסטור ה-BJT יש מקרים שבהם הוא מפסיק לפעול בצורה תקינה למשל אם מפעילים את הרכיב מחוץ לתחום שנקרא SOAR שמבטיח עבודה תקינה של הרכיב עלולים לגרום לרכיב נזק, למשל אם צפיפות הזרם ב-collector בעלת פילוג לא אחיד יכולה לגרום לטמפרטורה לעלות באזור ובכך להקטין את התנגדות האזור ובכך לגרום נזק למבנה הגבישי של הטרנזיסטור. וגם עליית הטמפרטורה בצומת ה-base, collector עקב הגדל הזרם דרכה יכולה להגדיל את ריכוז נושא המטען האנרגטי בצומת עד שישתווה לריכוז הסימום ב-collector וכתוצאה מכך התנגדות הצומת יורדת והזרם גדל והמשוב החיובי יגרום להיתוך הצומת.

1.2.5. רשתות ה-bias של טרנזיסטור ה-BJT :

- לרשת ה-bias של טרנזיסטור ה-BJT יש חשיבות רבה בתכן מעגלים אקטיביים כי היא עוזרת לייצב את נקודת העבודה של הטרנזיסטור שמושפעת ע"י טמפרטורה, והיא יכולה להיות מורכבת מרכיבים פסיביים כגון נגדים, קבלים וסלילים והחיסרון של שיטות תיאום אלו שהן רגישות לפרמטרי היצור של הטרנזיסטור, ועל מנת לקבוע את ערכי הנגדים הדרושים בוחרים את נקודת העבודה (המתחים וזרמים בטרנזיסטור) ומשם מקבלים הערכים הדרושים על ידי שימוש בחוק אוהם והגבר הזרם בטרנזיסטור, ורשת ה-bias יכולה להיות בעלת רכיבים אקטיביים שבה משתמשים בטרנזיסטור שפועל בתדר נמוך (ניתן גם להוסיף דיודות במקביל לצומת base-emitter של הטרנזיסטור על מנת לקבל מפל מתח קבוע בצומת) על מנת לקבוע את נקודת

העבודה של טרנזיסטור ה- RF . נציין שהקונפיגורציה של הטרנזיסטור ב- RF תלויה בקונפיגורציה ב- DC והיא עלולה להיות שונה בתדרים שונים (RF ו- DC).



איור 12. רשתות bias פסיביות

- בשתי רשתות ה- $bias$ שמוצגות באיור 12 יש משוב ששמור על נקודת עבודה יציבה וניתן לראות זאת ברשת ה- $bias$ השמאלית שמוצגת באיור, עבור גדליה מסוימת בזרם הקוליקטור המתח על הנגד R_1 גדל וכתוצאה מכך המתח על הטרנזיסטור יקטן מה שיגרום לזרם בחוג הסיס לקטון, לכן גם הזרם דרך הקוליקטור יקטן כי שני הזרמים תלויים דרך הגבר הזרם של הטרנזיסטור ובכך נקבל שיש משוב שמייצב את הטרנזיסטור בנקודת העבודה

1.3. תכן מגברים

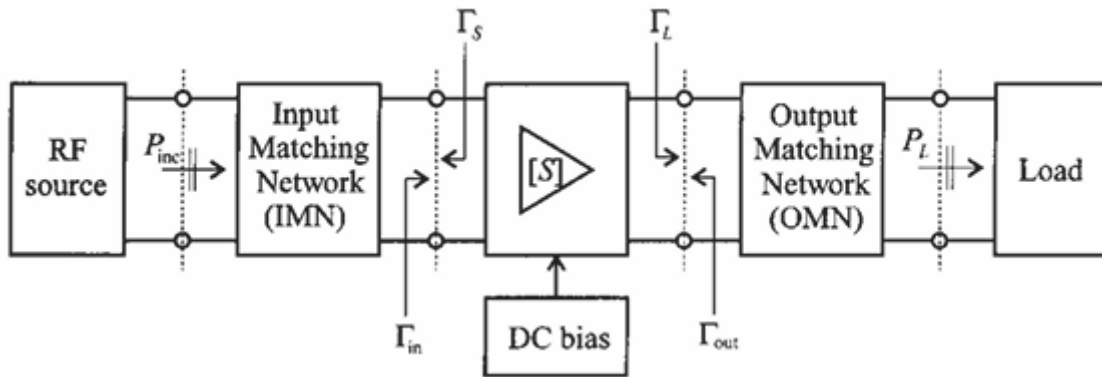
1.3.1. מאפייני המגבר :

- הפרמטרי שהמגבר נמדד לפיהם הם : ההגבר (וכמה אופייני ההגבר שטוח), רוחב הסרט ותדרי העבודה, הספק המוצא, הספק הדרוש בכניסה, מקדמי ההחזרה מהכניסה והמוצא, ואופייני הרעש!!!.
- הגבר ההספק המועבר הוא ההספק שמגיע לעומס חלקי ההספק הזמין מהמקור ומסומן ב- G_T אם מתעלמים מהמשוב הקיים במעגל כלומר מניחים ש- $S_{12} = 0$, מגדירים הגבר ההספק המועבר החד צדדי שמסומן ב- G_{TU} שמהווה קירוב טוב ל- G_T בחלק מהמקרים, ומגדירים את הגבר ההספק הזמין בתור ההספק הזמין מהמגבר חלקי ההספק הזמין מהמקור ומסומן ב- G_A , והגבר ההספק של המגבר מוגדר בתור ההספק שסופק לעומס חלקי ההספק שסופק למגבר ומסומן ב- G . ועל ידי ידיעת פרמטרי S של הרשת נוכל לחשב את הגדלים הנ"ל.

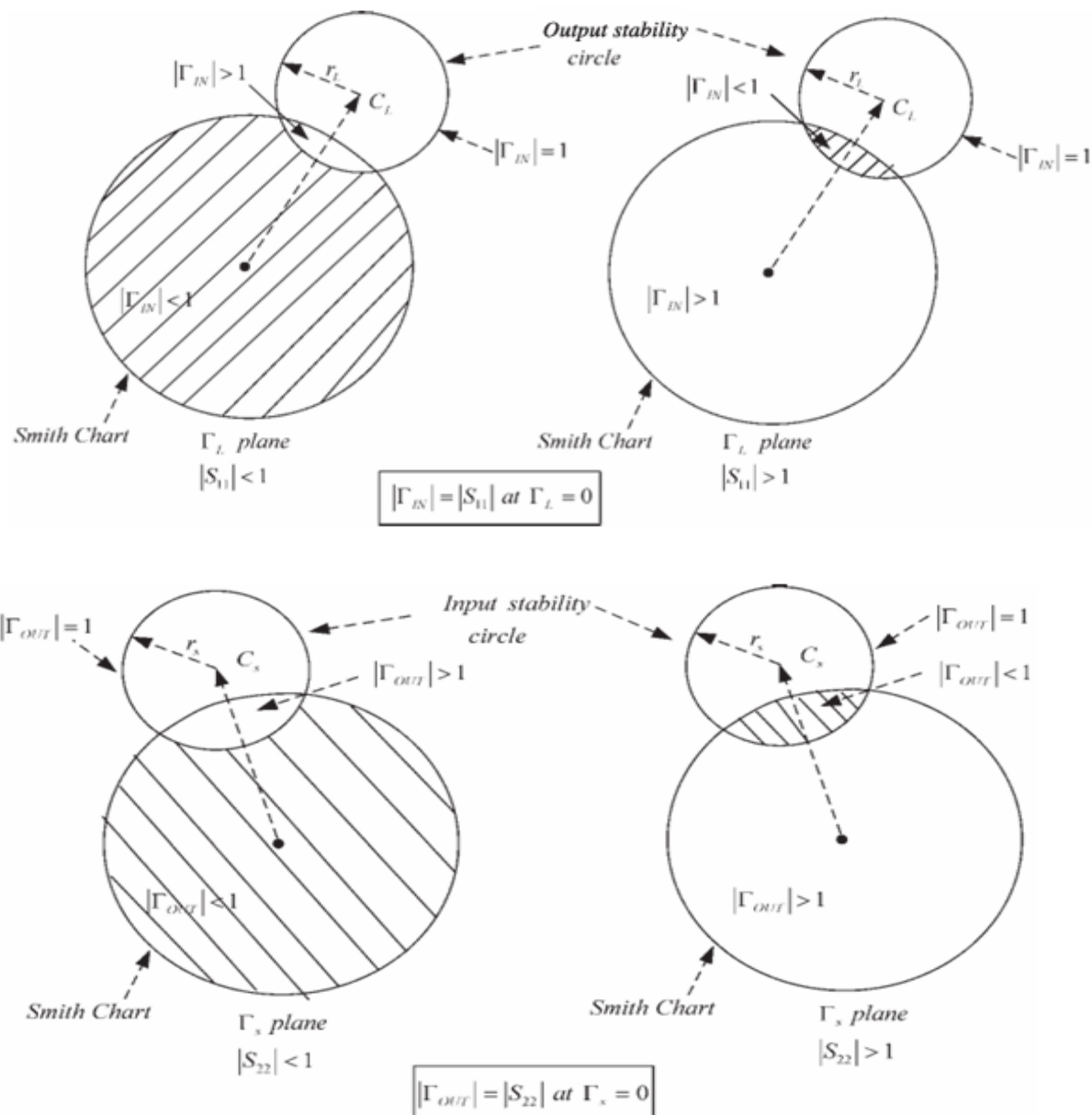
1.3.2. יציבות המגבר :

- יציבות המערכת ניתן נקבעת על ידי הערכים של מקדמי ההחזרה $\Gamma_L, \Gamma_S, \Gamma_{out}, \Gamma_{in}$ שהם מקדמי ההחזרה של רשת בעלת שני מחברים (Two Port Network) ואם הערכים הנייל קטנים מ 1 בערכם המוחלט אז מובטח שאין משוב חיובי במעגל והמעגל יציב, לכן משרטטים מעגלי היציבות שהם ממפים הערכים של $\Gamma_{out}, \Gamma_{in}$ לדיאגרמות סמית במישור Γ_L, Γ_S בהתאמה ובוחנים את מצב המעגל לפי פרמטרי S של המערכת באות קטן. ועל מנת לקבל יציבות בלי התניה בערכי הפרמטרים של המערכת (פרמטרי ה S) צריך להתקיים ש-

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} > 1 \text{ and } |\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| < 1$$
 ובמידה והמעגל לא יציב ניתן לייצב אותו על ידי הוספת התנגדות טורית או מוליכות מקבילית בכניסה או במוצא של הטרנזיסטור אבל אז תיאום האימפדנסים יכול להיפגע.



איור 13. סכמת מגבר כללית



איור 14. מעגלי היציבות של רשת עם שני מחברים, כאשר האזורים הכהים בדיגרמות סמית הם האזורים היציבים

1.3.3. הגבר המגבר וספרת הרעש :

- במעגל שלנו נרצה שההגבר יהי קבוע, לכן עבור מעגל (חד צדדי כלומר שבו מזניחים את המשוב) ניתן לקבל את מעגלי שווי ההגבר במוצא ובכניסה (מניחים שאין בניהם תלות כי המעגל חד צדדי) מפרמטרי המערכת. ועבור מעגל שבו קיים משוב במעגל אבל בשלב התכנון מתעלמים ממנו וניתן להעריך את השגיאה המתקבל על ידי חישוב

$$U = \frac{|S_{12}||S_{21}||S_{11}||S_{22}|}{(1-|S_{11}|^2)(1-|S_{22}|^2)}$$

על ידי $(1+U)^{-2} \leq error \leq$

$(1-U)^{-2}$. עבור מעגל שבו לא מזניחים את המשוב ניתן לחשב את מקדמי ההחזרה וההעברה מפרמטרי המעגל (פרמטרי S) ואז לחשב את G_T ועל מנת לקבל את הגבר ההספק הדרוש (של המעבר) G נשרטט את מעגל שווי ההגבר ונבחר את מקדם ההחזרה של העומס בתור נקודות החיתוך עם מעגל שווי ההגבר ובאותו אופן ניתן לקבל את הגבר ההספק הזמין G_A באותו אופן על ידי שרטוט את מעגל שווי ההגבר המתאים.

- ובמקרים רבים על מנת לבחון את הגבר המגבר באות קטן בוחנים האמפליטודה של הפרמטר S_{21} שנותן מדד קרוב להגבר המגבר G_T .
- עקב פלקצואציות של האלקטרוניס בחומר, נוצר לנו רעש במוצא לכן, נרצה לתכנן את המעגל שלנו בצורה שממזער את השפעת הרעש על המוצא. לכן המדד לכך היא ספרת הרעש של המגבר כאשר ספרת הרעש המינימאלית ומקדם ההחזרה האופטימאלי לרוב נתון על ידי הייצרן וניתן לצייר מעגלים שווי ספרת רעש ובכך נוכל להתאים את ספרת הרעש שלנו ל המגבר הדרוש.
- בהרבה מקרים יחס הגלים העומדים בכניסה וביציאה של המגבר צריך להיות בטווח ערכים מסוים לכן ניתן לצייר מעגלים שווי $VSWR$ ובכך נוכל להתאים את יחס הגלים או ה- $Return Loss$ העומדים לספרת הרעש הדרושה.

1.4. תכנ מתנדים

1.4.1. רעש פאזה במתנדים :

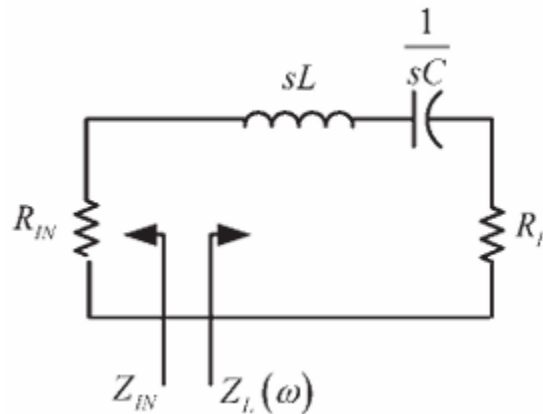
- אחד הפרמטרים החשובים בתכנון מתנד דל רעש הוא רעש הפאזה, כי נתן להתייחס למתנד בתור מחולל רעש שעבר סינון והפאזה של הרעש היא מפולגת באחידות .
- ניתן למדל את המתנד בתור מגבר בעל משוב חיובי, ובמקרה זה רעש הפאזה בכניסה למגבר הוא בעל רוחב סרט שמוגבל שנקבע על ידי מקדם הטיב Q של המהוד שמחובר בחוג המשוב של המגבר והמהוד מהווה מסנן מעביר נמוכים.
- והמשוואה שמתארת את רעש הפאזה במתנד היא משוואת לייסון, ומשתמשים בה על מנת למזער את הגורמים לרעש במתנד.
- על מנת למזער את רעש הפאזה במתנד יש למקסם את מקדם הטיב Q של המהוד ולהעביר את האנרגיה דרכו, למקסם ההספק במעגל ולא לעבור את מחתי הסף וההספק המקסימאלי של הרכבים ויש להשתמש ברכבים אקטיביים בעלי ספרת רעש נמוכה ויחס אות לרעש גבוה.

1.4.2. תכנ מתנד בשיטת ההתנגדות השלילית :

- ניתן לתכנן מתנד בשיטת ההתנגדות השלילית או בלעז Negative-Resistance Method, שבה ממדלים את הרכיב האקטיבי (במקרה שלנו הוא הטרנזיסטור) בתור אימפדנס בעל התנגדות שלילית ועל מנת לקבל תנודות צריך להתקיים שההתנגדות הכוללת במעגל היא שלילית ובמקרה זה האמפליטודה של הזרם במעגל תגדל עד תגיע למצב שהאימפדנס הכולל בתדר התנודות מגיע לאפס ובאופן שקול ניתן לנתח את המעגל במושגי מתח ומיתירות (עבור חיבור מקבילי) .

- ובמקרה שבו ניתן לקרב את התנגדות הכניסה בתור פונקציה של האמפליטודה של הזרם במעגל $R_{IN}(A, \omega) \cong$
 $R_{IN}(A) = -R_0 \left(1 - \frac{A}{A_M}\right)$ כאשר $-R_0 = R_{IN}(A = 0)$ ו A_M האמפליטודה המקסימלית של הזרם, דרך
פרקטית לתכנן את R_L היא בתור ההתנגדות שנותן לנו את הכוח המקסימאלי של המתנד ומתקבל
עבור: $A_{o,max} = \frac{2}{3} A_M$ and $R_{IN}(A_{o,max}) = -\frac{R_0}{3}$
ועל מנת לקבל תנודות יציבות במוצא צריכים לעמוד בתנאי קרוקווא .

- למשל עבור מעגל RLC טורי ורכיב אקטיבי שממדלים אותו בתור נגד בעל ערך שלילי R_{IN} מקבלים תנודות
כאשר המעגל הוא LC טהור כלומר $R_{IN} + R_L + R_R = 0$ כאשר R_R היא התנגדות הסליל, לכן מקבלים
מקדם טיב במעגל Q ששואף לאינסוף לכן מקבלים מתנד .



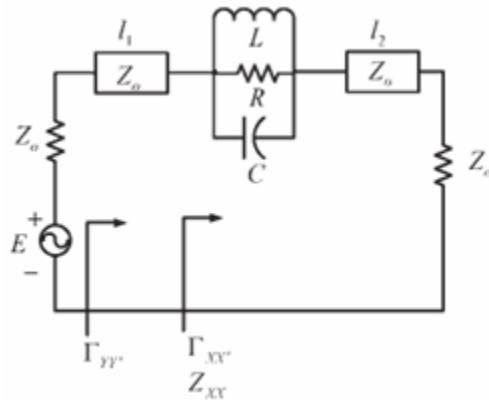
איור 15. סכמת מעגל RLC טורי עם רכיב אקטיבי שממדלים אותו בטור התנגדות שלילית

- עבור מעגלים עם רכיבים אקטיביים וקבלים וסלילים בניתוח מעגל נדרוש שהתנגדות הכוללת במעגל תהיה
אפס ובכך נקבל ריאקטיבי טהור שמתנדנד.
- אז עשינו חזרה על קווי תמסורית ופרמטרי הפיזור וניתוח מעגלים בעלי שני פורטים מבחינת יציבות באופן
דומה לניתוח שבצענו בתכן מגברים פרקים 1.3.2 .
- 1.4.3 תכנן מתנד בשיטת ההתנגדות השלילית בעזרת משוב חיובי :
 - ובמעגלי משוב הגבר החוג הוא $\Gamma_{IN}(j\omega)\Gamma_L(j\omega)$ לכן ניתן לנתח את יציבות העגל על ידי ניתוח הגבר החוג
למשל על ידי דיאגרמת נייקויסט שנותן לנו אינדיקציה לכמה קטבים לא יציב יש במערכת בחוג הסגור, כי
בתכנון המתנד נרצה שהמעגל לא יהיה יציב על מנת לקבל תנודות.
 - על מנת לתכנן מתנד בעל שתי נקודות חיבור יש לתכנן את רשת התיאום ורשת סיום (Termination network)
ונבצע זאת על ידי בחירת טרנזיסטור ומשוב שיגרום למעגל להיות לא יציב בתדר הדרוש לאחר מכן נבחר את
הרשת הסיום בצורה שתתן לנו $|\Gamma_{IN}| > 1$ ואז נתכנן את רשת העומס בצורה שתהווה מהוד ל Z_{IN} כלומר
 $Z_L(\omega_0) = -X_{IN}(\omega_0)$ and $R_L = \frac{|R_{IN}(0,\omega)|}{3}$ ו Z_{IN} הוא העומס שמשחק מהטרנזיסטור

- על מנת לבחון את הביצועים של המתנד צריך גם לבצע ניתוח למעגל באות גדול כלומר משתמשים בכלים לא ליניאריים לניתוח מתנד על ידי עירור .

1.4.4. תכנון מתנד בעזרת מהוד דיאלקטרי :

- בתכנון מעלי RF משתמשים בשני סוגים של מהוד דיאלקטרי אחת פועל באופן TEM והשני פועל באופן TE .
- מהוד שפועל עם אופן TEM משתמשים בו על מנת לממש השראות עם מקדם טיב Q גבוה . והמהודים הדיאלקטרים מגיעים בשתי צורות אחת עם מהוד רבע אורך גל עם קצר בקצהו, והשנייה מהוד חצי אורך גל עם נתק , מהוד רבע אורך גל מתנהג כמו מעגל RLC מקבילי .
- מהוד שפועל עם אופן TE ממדלים אותו בתור מעל RLC מקבילי שנמצא בנקודה מסוימת XX' בין שני קווי תמסורת ובנקודה זו ניתן לקבל מאפייני המעגל על ידי ידיעת את מקדם ההחזרה בנקודה ומשם נתכנן המעגל הדרוש על מנת לקבל שחלק המדומה של אדמיטנס המהוד והטרנזיסטור הכלול מתאפס והמעגל בעל התנגדות שלילית טהורה.



איור 16. מידול מהוד ה- TE על ידי מגל RLC מקבילי בנקודה XX'

2. תכנון מגבר דל הרעש ה-LNA

מפרט ה-LNA :

לצורך המימוש השתמשתי בטרנזיסטור BPF740 של חברת Infineon :

נקודת העבודה היא : $V_{CE} = 3 [V]$, $I_C = 6 [mA]$

תחום התדר : $5.6 - 5.4 [GHz]$

הגבר מינימאלי בתחום התדר של : $G > 12 [dB]$

ספרת רעש מקסימאלית בתחום התדר של : $NF < 1.3 [dB]$

ה-Return Loss של ה-LNA : $RL < -10 [dB]$

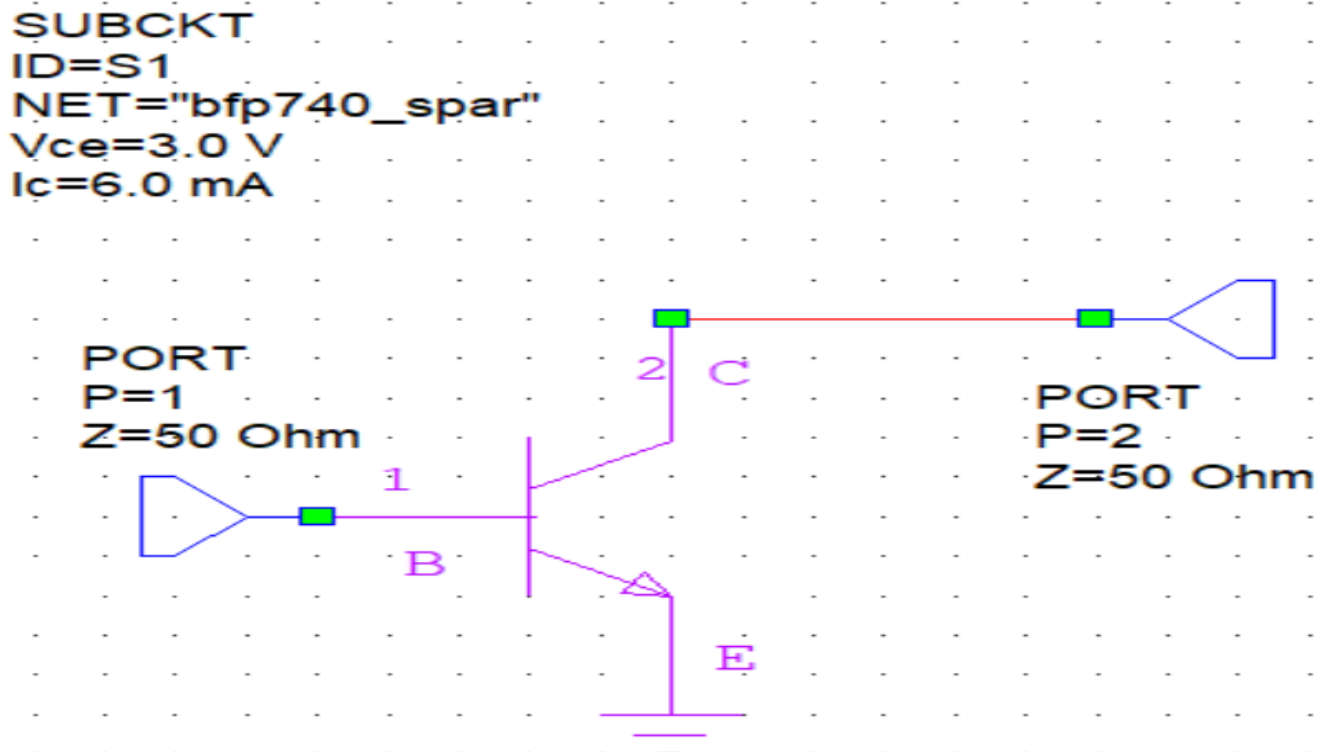
2.1. שלבי תכנון ה-LNA

שלבי תכנון ה-LNA :

בשלב ראשון חקרתי את הביצועים של המודל הלינארי של הטרנזיסטור (שמשמש ב- $S - parameters$ של הרכיבים

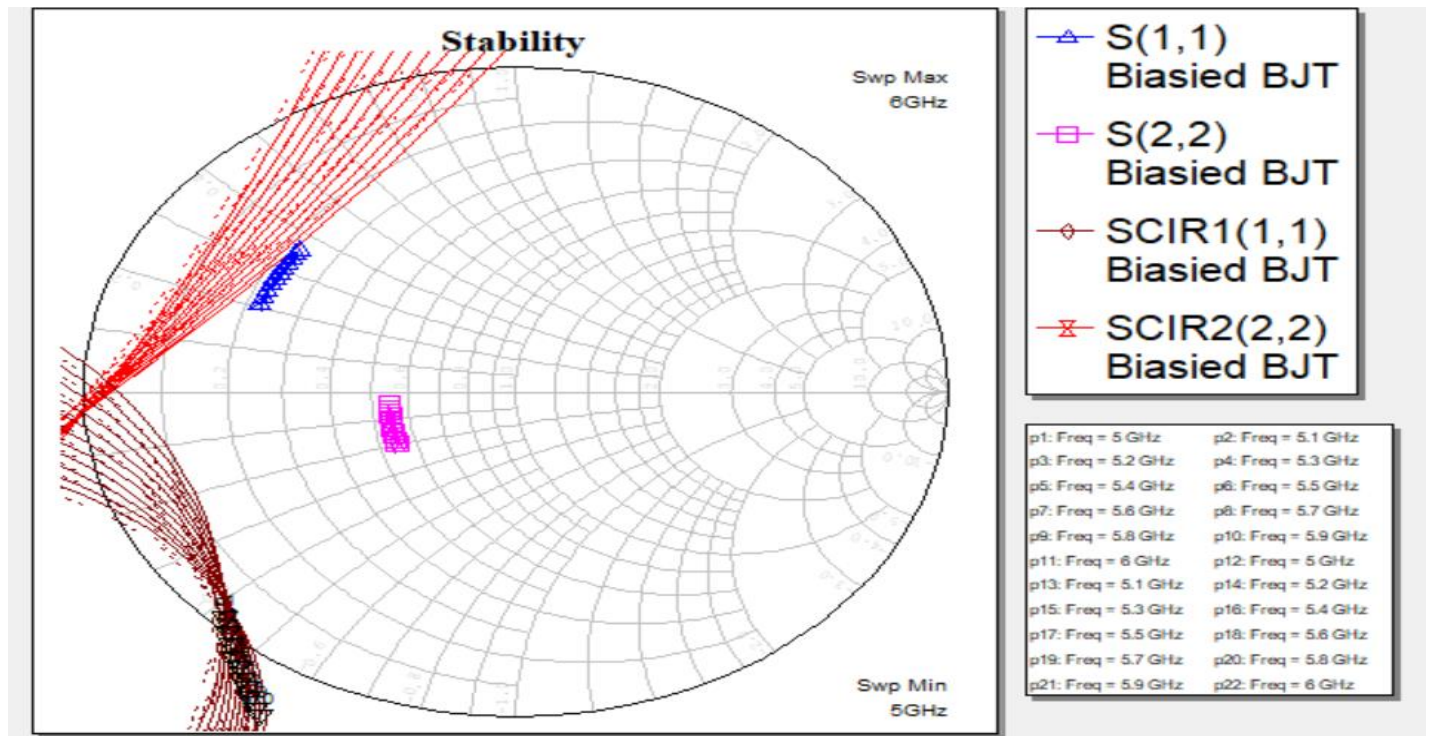
שמסופקים על ידי היצרן) הנתון בנקודת העבודה $V_{CE} = 3 [V]$, $I_C = 6 [mA]$.

סכמת המעגל :



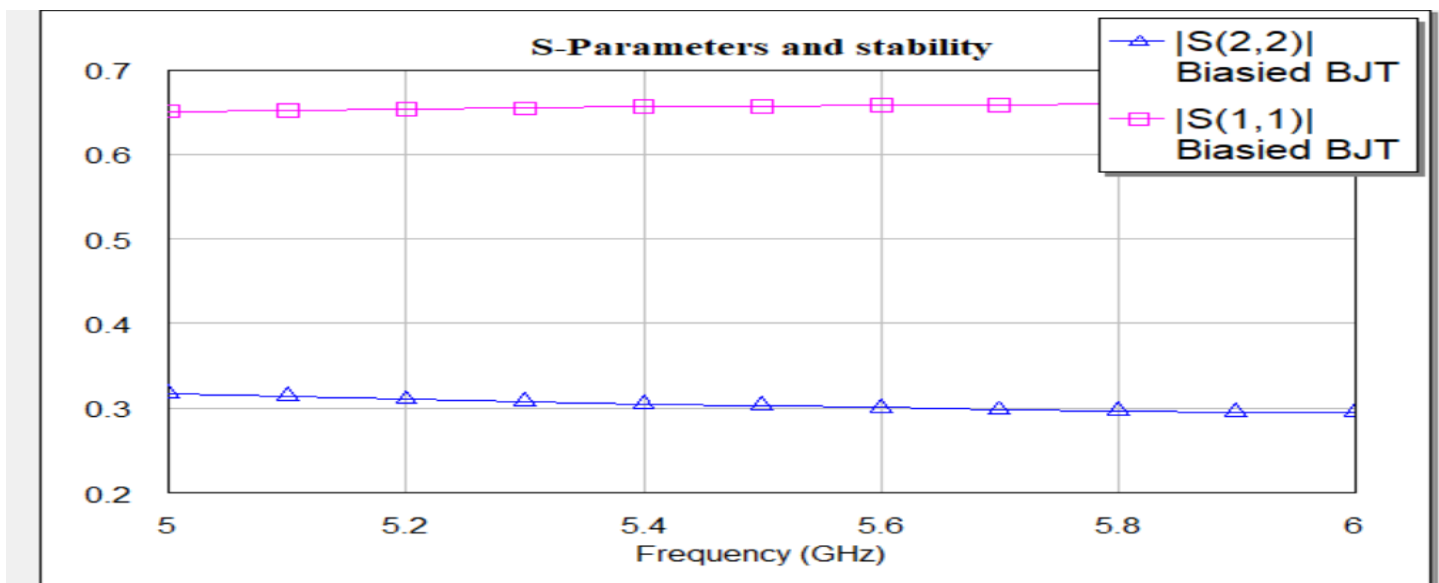
איור 17. סכמת המעגל של הטרנזיסטור בנקודת העבודה $V_{CE} = 3 [V]$, $I_C = 6 [mA]$

בצעתי בדיקת יציבות לטרנזיסטור בנקודות העבודה ובתחום התדרים $5.4 - 5.6$ GHz, שרטטתי את מעגלי היציבות של המעגל בתחום תדרי העבודה ואת הערכים המוחלטים של S_{11}, S_{22} (S – Parameters).
הגרפים המתקבלים :
מעגלי היציבות :



איור 18. דיאגרמת סמית שמציגה את מעגלי היציבות וה- S – Parameters של הכניסה והיציאה של הטרנזיסטור

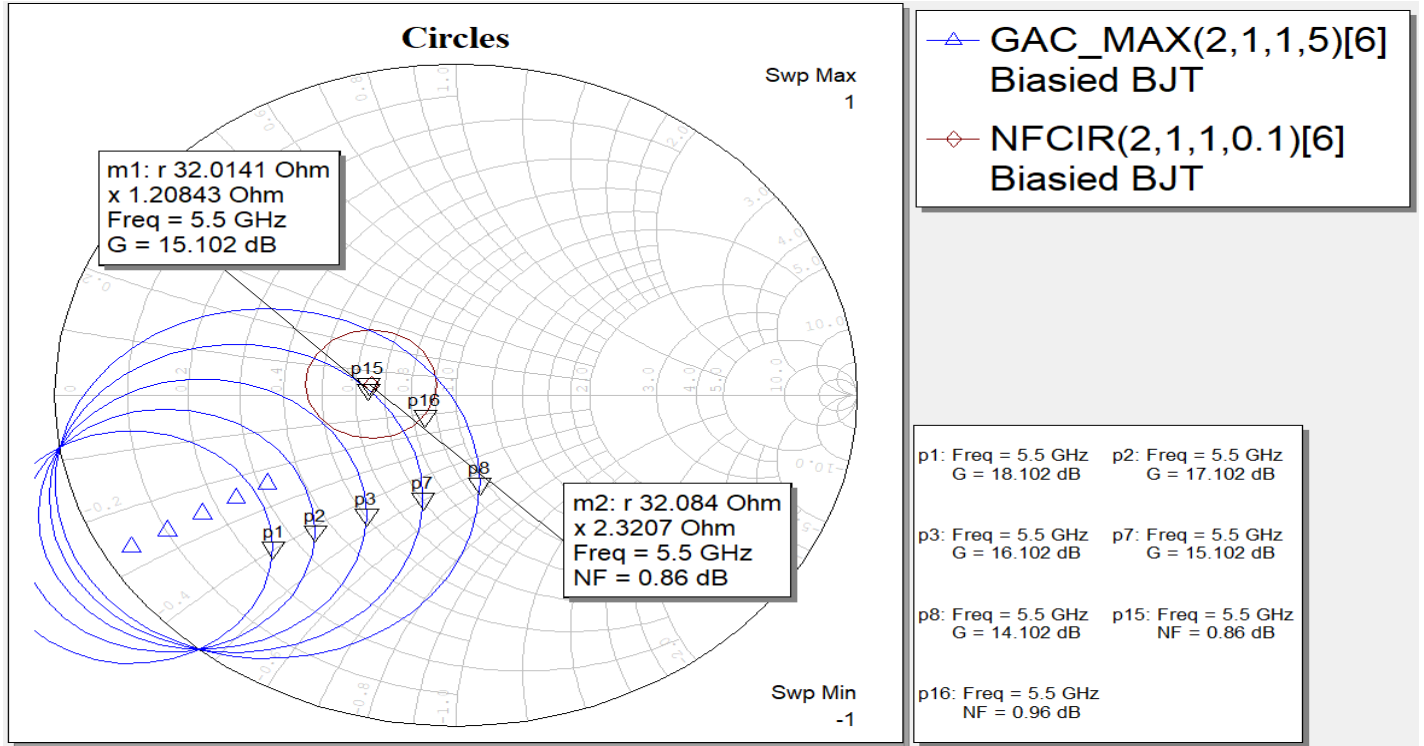
ערכי ה- S – parameters של הכניסה והיציאה :



איור 19. הגרף מכיל את הערכים המוחלטים של ה- S – Parameters של הכניסה והיציאה של הטרנזיסטור

נשים לב שבתחום התדרים $5.4 - 5.6$ [GHz] הערכים המוחלטים של ה- S - Parameters בכניסה וביציאה של המערכת קטנים מ-1 בערכם המוחלט ($|S_{11}|, |S_{22}| < 1$), לכן הנקודות $\Gamma_{out}, \Gamma_{in} = 0$ הן יציבות לכן התחום היציב הוא התחום מימין למעגלי היציבות שבתוך דיאגרמת סמית שמכיל את שתי הנקודות.

לאחר מכן שרטטתי את מעגלי שווי ההגבר וספרת הרעש בתדר האמצעי של תחום תדרי העבודה:



איור 20. דיאגרמת סמית שמכילה את מעלי שווי ההגבר וספרת הרעש בתדר $f=5.5$ [GHz]

ניתן לראות מהגרף שספרת הרעש המינימאלית של הטרנזיסטור היא $NF = 0.86$ [dB], לכן בחרתי את אימפדנס הכניסה בצורה שהוא האימפדנס שנמצא על שמעגל שווי ההגבר של $G = 15.1$ [dB] ומתלכדת עם אימפדנס הכניסה שנותן לנו את ספרת הרעש המינימאלית (כי ספרת הרעש מושפעת רק מאימפדנס הכניסה) שהוא $Z_s = 32 + 2j$ [Ω].

$$\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} = 0.221 \angle 171^\circ$$

ומקדם ההחזרה המתאים לנקודה זו הוא:

ופרמטרי ה- S של הטרנזיסטור בנקודות העבודה הנתונה הם (שמופקים על ידי היצרן):

$$S_{11} = 0.656 \angle 146^\circ, S_{21} = 4.793 \angle 27^\circ, S_{12} = 0.0742 \angle -15^\circ, S_{22} = 0.302 \angle -161^\circ$$

ומקדם ההחזרה של המוצא שמתאים ל- $\Gamma_s = 0.221 \angle 171^\circ$ הוא:

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s} = 0.385 \angle -168^\circ$$

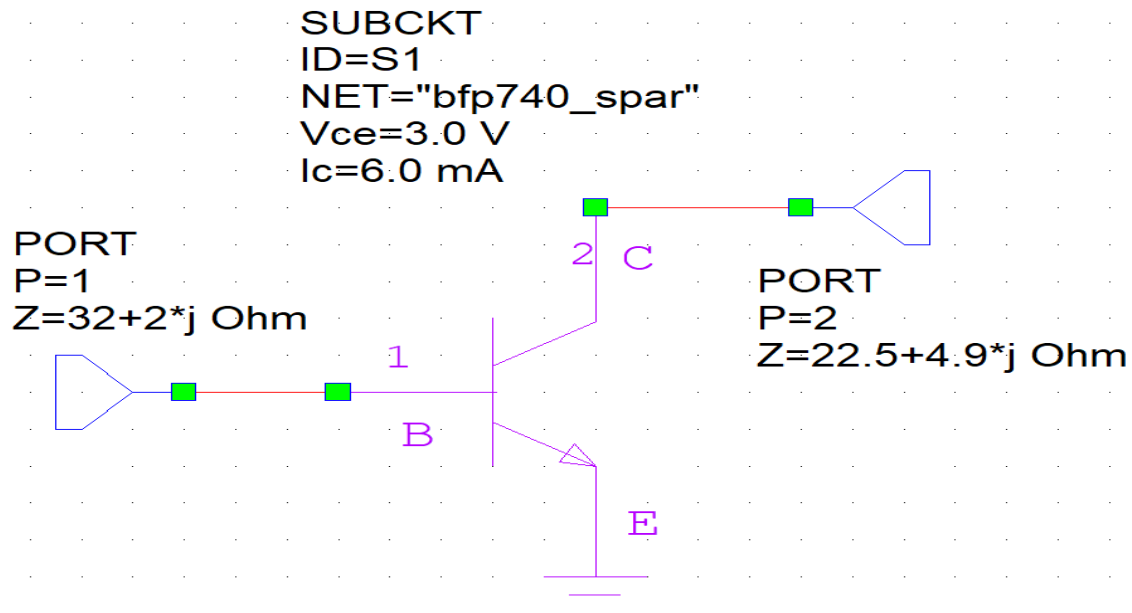
לכן נבחר אימפדנס העומס בתור העומס שמקיים תיאום אימפדנסים כלומר:

$$\Gamma_L = \Gamma_{out}^* = 0.385 \angle 168^\circ \rightarrow Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} = 22.5 + 4.95j$$

ונשים לב שהנקודות שבחרנו הם בתוך התחום היציב של הטרנזיסטור.

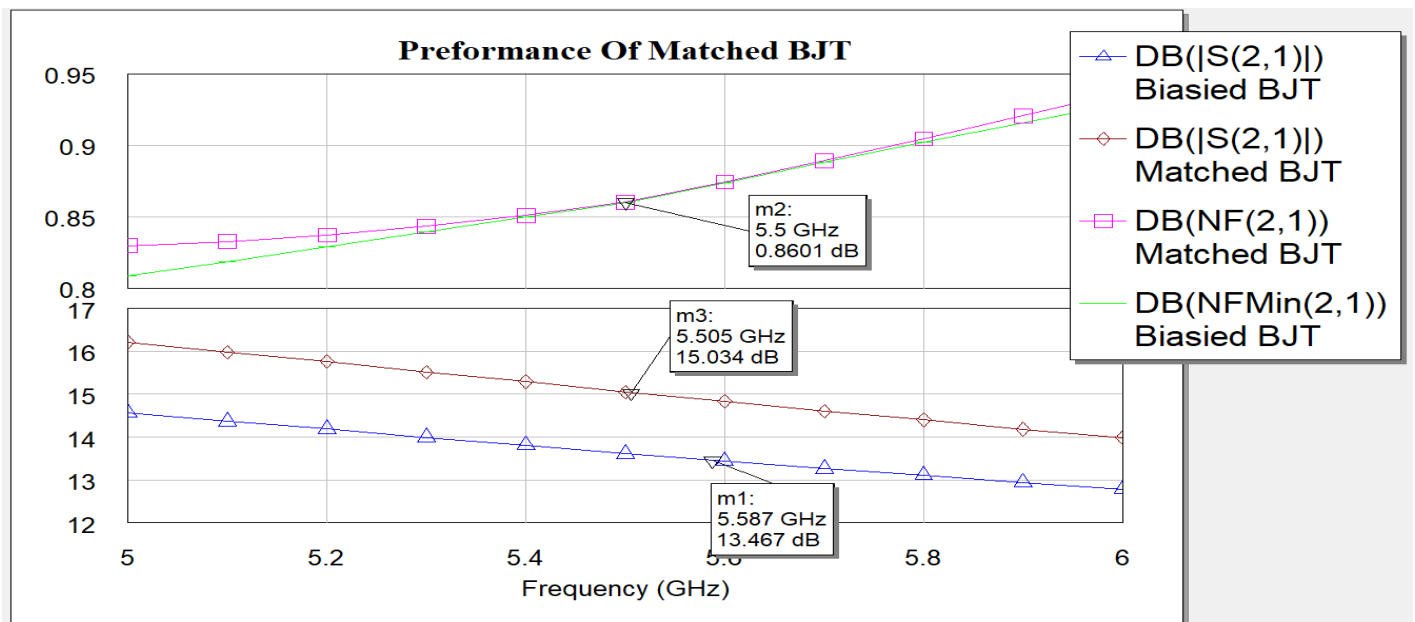
לאחר בחירת האימפדנסים שצריכים להשתקף בכניסה ובמוצא של הטרנזיסטור הצבתי אותם בתור האימפדנס של המחברים.

סכמת המעגל המתואם:



איור 21. סכמת המעגל של הטרנזיסטור בנקודת העבודה עם המחברים המתואמים

וקיבלתי שהביצועים של הטרנזיסטור עם האימפדנסים המתואמים הם:

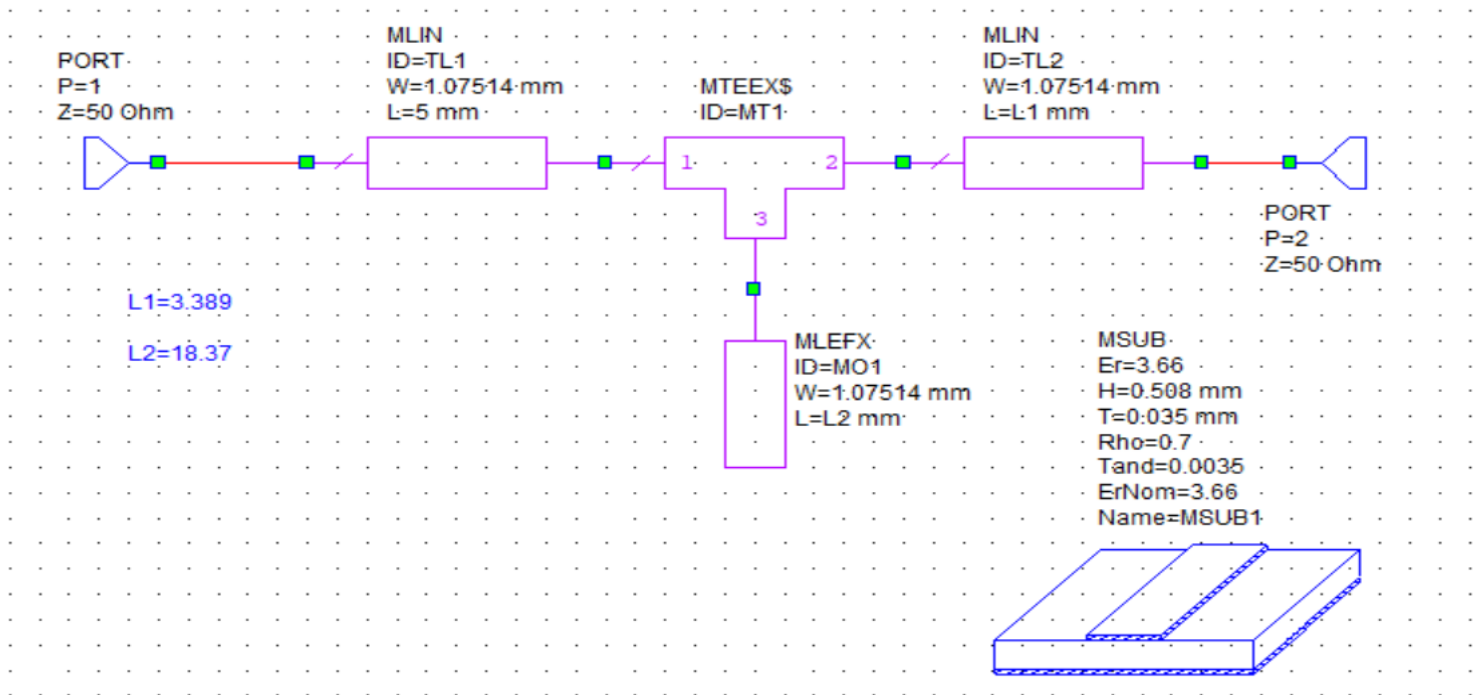


איור 22. הגרף העליון מציג את ערכי ספרת הרעש של הטרנזיסטור המתואם ואת ספרת הרעש המינימאלית כתלות בתדר, והגרף התחתון מציג ההגבר של הטרנזיסטור המתואם תלות בתדר.

ניתן לראות שקבלנו ערכים קרובים לערכים שהציגו בגרף שמציג את מעגלי שווי ההגבר וספרת הרעש כמצופה .

לכן נשאר לתכנן רשתות התיאום שממירות אימפדנס של $50 [\Omega]$ לאימפדנס הרצוי בכניסה וביציאה של הטרנזיסטור. ובתכנון רשתות התיאום בחרתי להשתמש ב- T - section של קווי תמסורת כלומר שני קווי תמסורת וגדם ביניהם כאשר ההתנגדות האופיינית שלהם היא $Z_0 = 50[\Omega]$. קבעתי את מאפייני הקווים בהתאם לדרישות ובצעתי סינתזה לעובי שלהם (באמצעות התוכנה) על מנת לקבל שההתנגדות האופיינית שלהם היא $Z_0 = 50[\Omega]$.

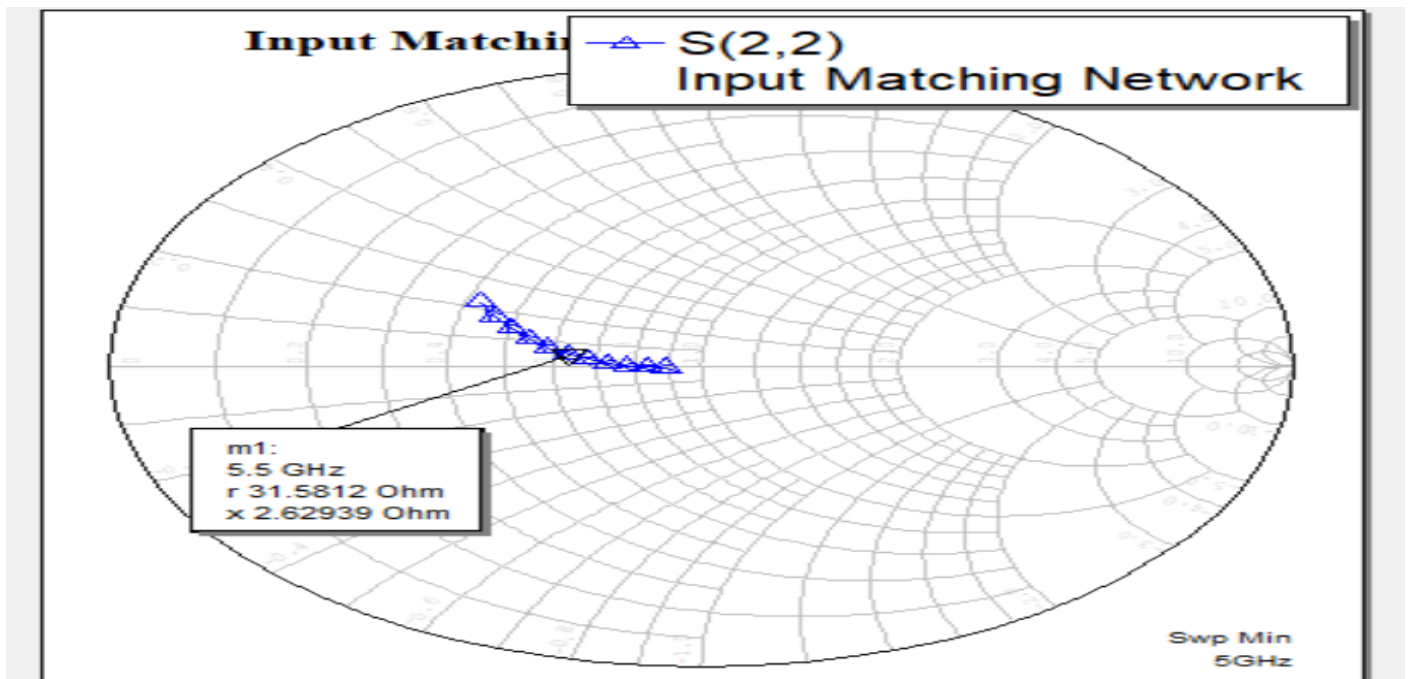
רשת תיאום הכניסה :



איור 23. סכמת רשת תיאום הכניסה

בתכנון רשת תיאום הכניסה קבעתי את האורכים של קווי התמסורת והגדם ל- $5 [mm]$ הגדרתי את האורך של קווי התמסורת שמחובר לכניסה של הטרנזיסטור והאורך של הגדם בתור משתנים, ואז שרטטתי על גבי דיאגרמת סמית את S_{22} של רשת תיאום הכניסה, ושמתי סמן על נקודת התדר של $f = 5.5 [GHz]$ שבו מוצגים ערכי האימפדנס שמשתקפים לכניסה של הטרנזיסטור (כי מציירים S_{22}) ועל ידי שינוי האורכים של קווי התמסורת והגדם באמצעות ה- *Tuner* של התוכנה קבעתי את האימפדנס שמשתקף לכניסה של הטרנזיסטור להיות : $Z_s = 31.5 + 2.5j [\Omega]$

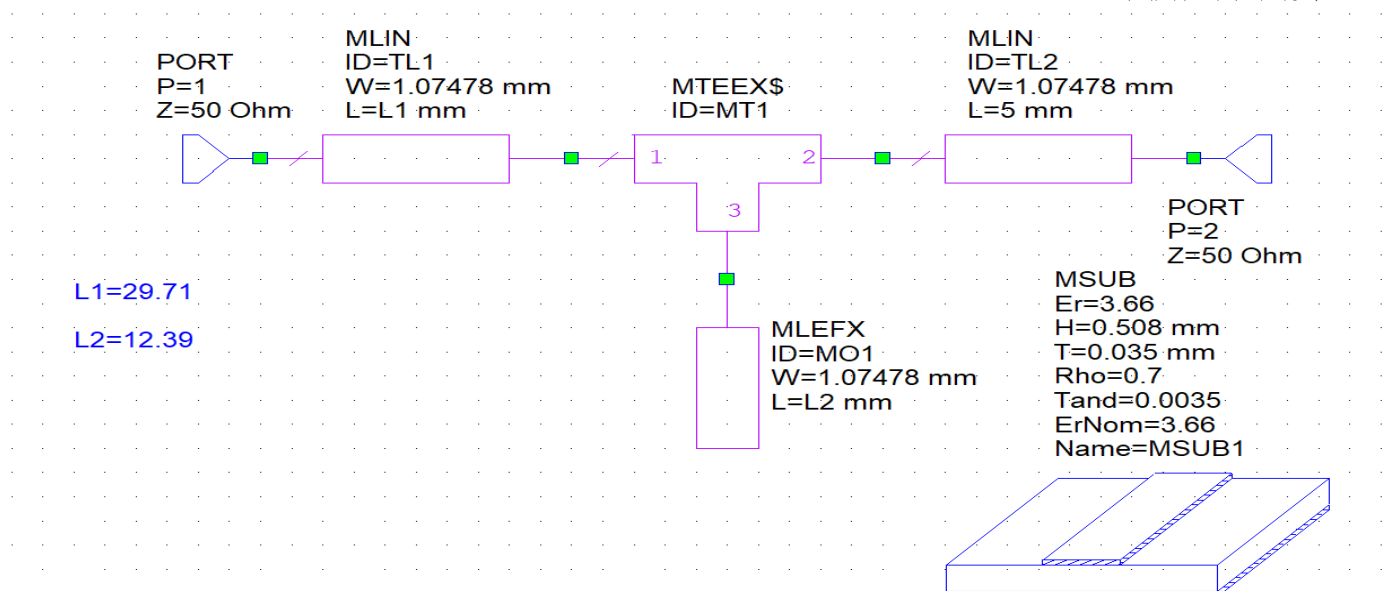
והגרף המתקבל :



איור 24. דיאגרמת סמית שמציגה את S_{22} של רשת התיאום של הכניסה וערך האימפדנס שמשתקף מהכניסה של הטרנזיסטור

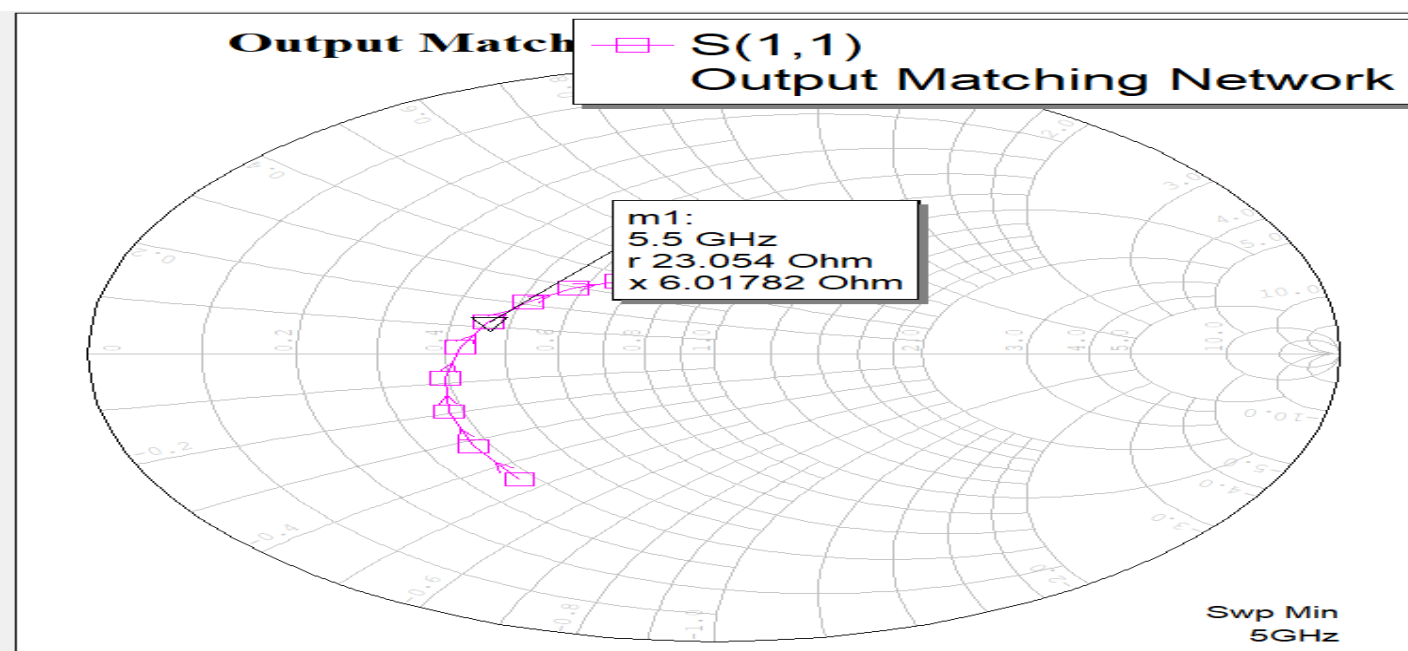
וניתן לראות שהערך שמשתקף מהכניסה של הטרנזיסטור הוא $Z_s = 31.5 + 2.5j [\Omega]$ שהוא קרוב לערך הרצוי שהוא $Z_s = 32 + 2j [\Omega]$.

רשת תיאום המוצא :



איור 25. סכמת רשת תיאום המוצא

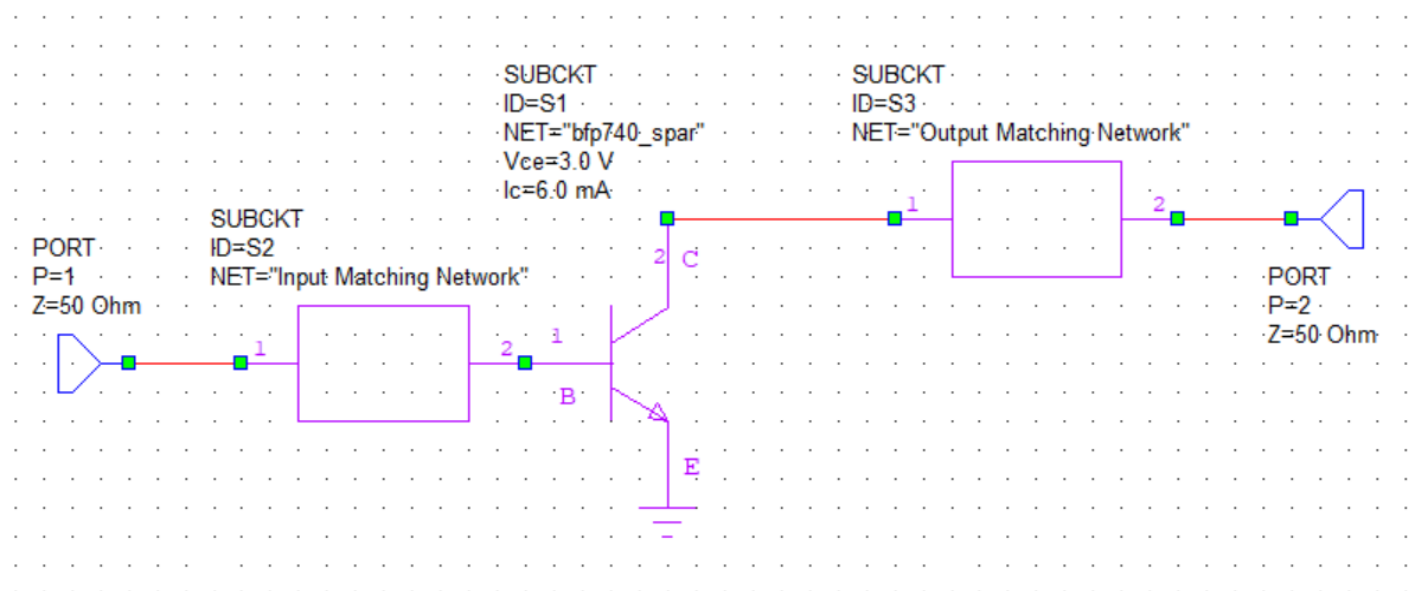
תכנון רשת תיאום המוצא בוצע באותה אופן לתכנון רשת תיאום הכניסה .



איור 26. דיאגרמת סמית שמציגה את S_{11} של רשת התיאום של המוצא וערך האימפדנס שמשתקף מהמוצא של הטרנזיסטור

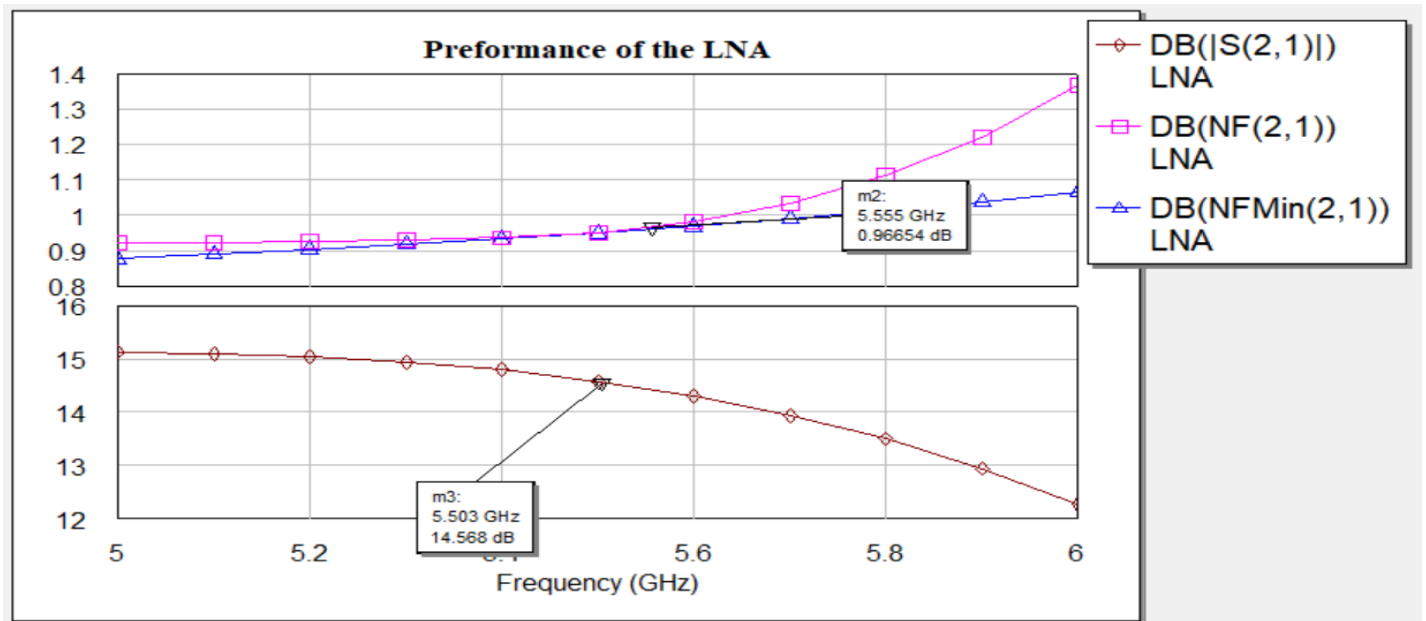
וניתן לראות שהערך שמשתקף מהמוצא של הטרנזיסטור הוא $Z_L = 23 + 6j[\Omega]$ שהוא קרוב לערך הרצוי שהוא $22.5 + 4.95j[\Omega]$.

סכמת המעגל השלם (ה- LNA) :



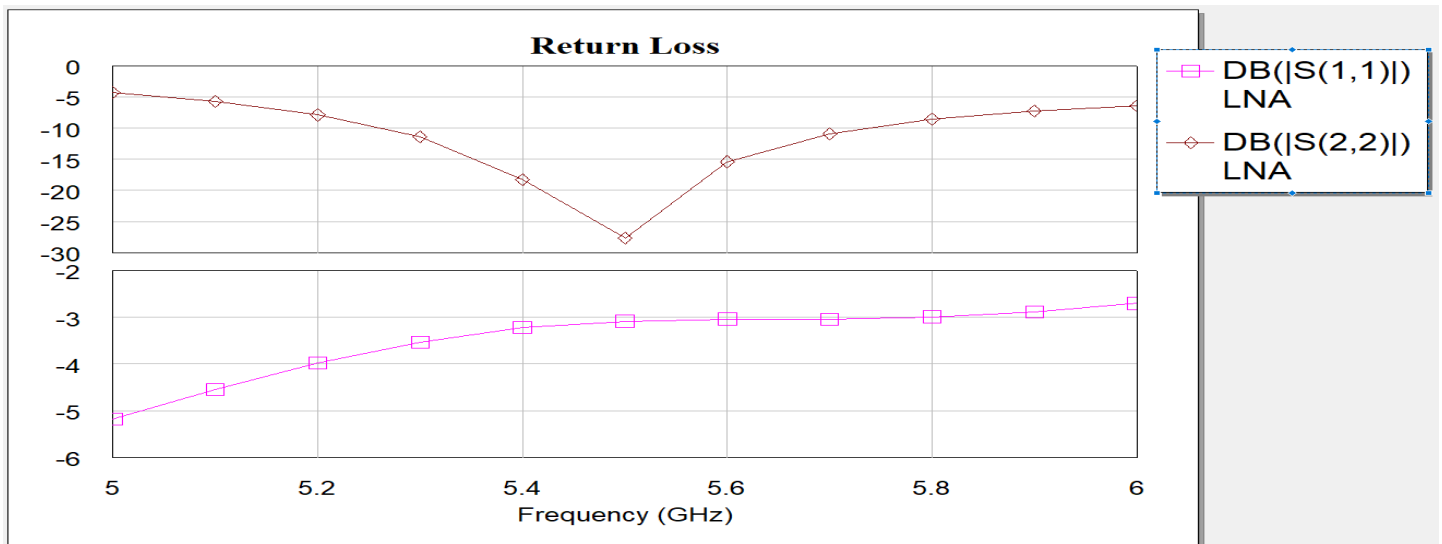
איור 27. סכמת המעגל השלם (ה- LNA)

קבלתי שהמגבר דל הרעש עונה על דרישת ההגבר וספרת הרעש אציג זאת על ידי הגרף הבא :



איור 28. הגרף העליון מציג את ערכי ספרת הרעש של המגבר ואת ספרת הרעש המינימאלית כתלות בתדר, והגרף התחתון מציג את ספרת הרעש של המגבר כתלות בתדר

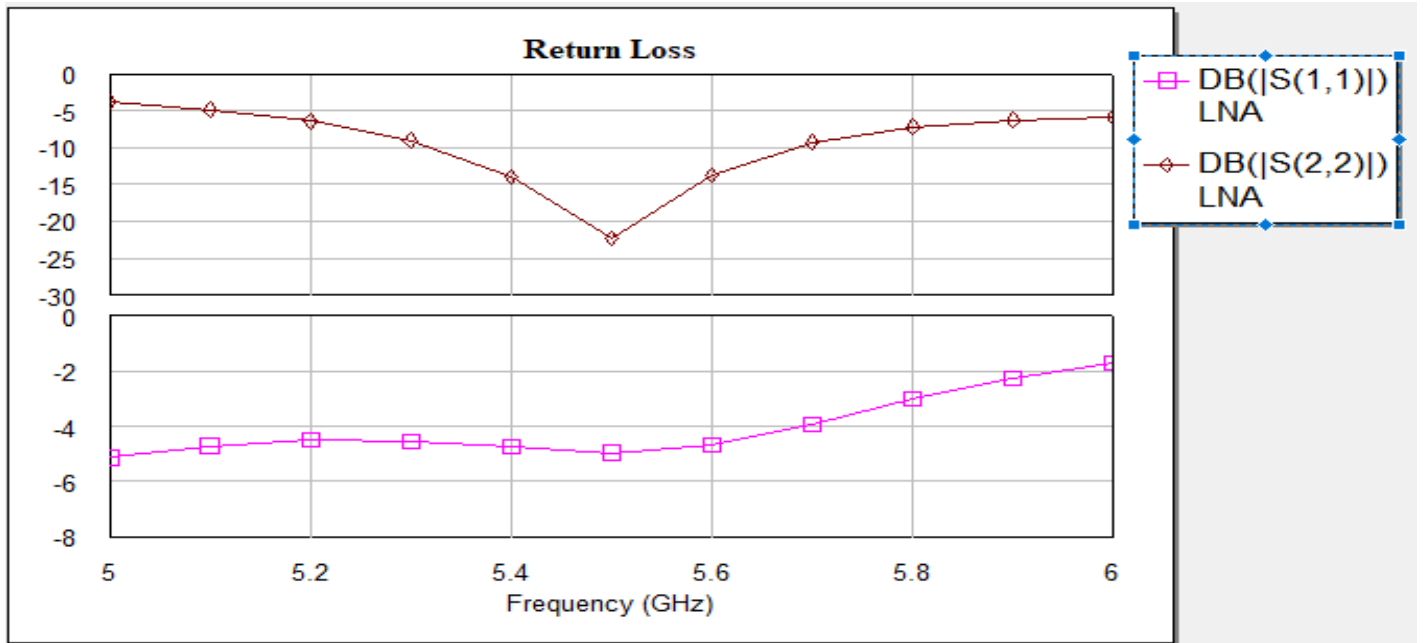
וקבלתי שה- $Return Loss$ של ה- LNA במוצא קטן מ- $10 [dB]$ בתדרי העבודה של המגבר בהתאם לדרישה, אבל בכניסה לא (ראו הגרף המצורף) :



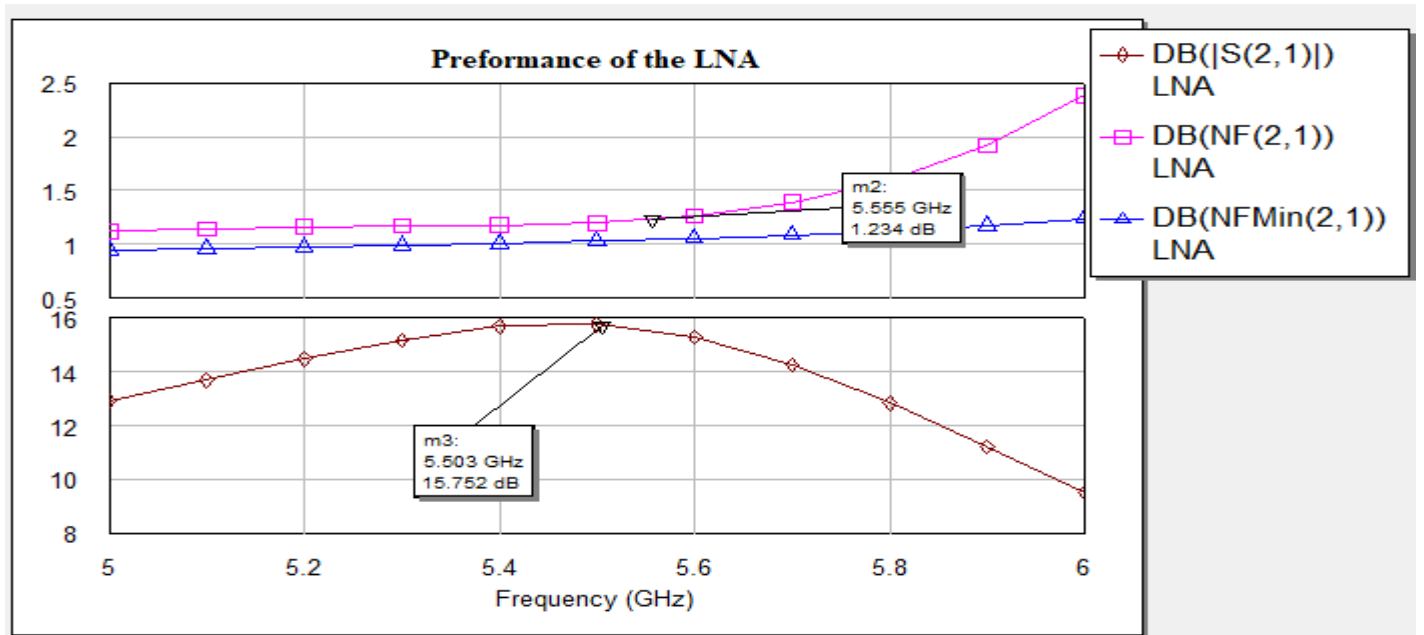
איור 29. הגרף העליון מציג את הפסדי ההחזרה של רשת תיאום המוצא, הגרף התחתון מציג את הפסדי ההחזרה של רשת תיאום הכניסה

לכן על ידי השימוש ב- $Tuner$ ניסיתי להתפשר בספרת הרעש על ידי שינוי רשת תיאום הכניסה על מנת לשפר את ה- $Return Loss$ בכניסה ל- LNA .

והגרפים המתקבלים :



איור 30. הגרף העליון מציג את הפסדי ההחזרה של רשת תיאום המוצא, הגרף התחתון מציג את הפסדי ההחזרה של רשת תיאום הכניסה לאחר שיפור ה- *Return Loss*



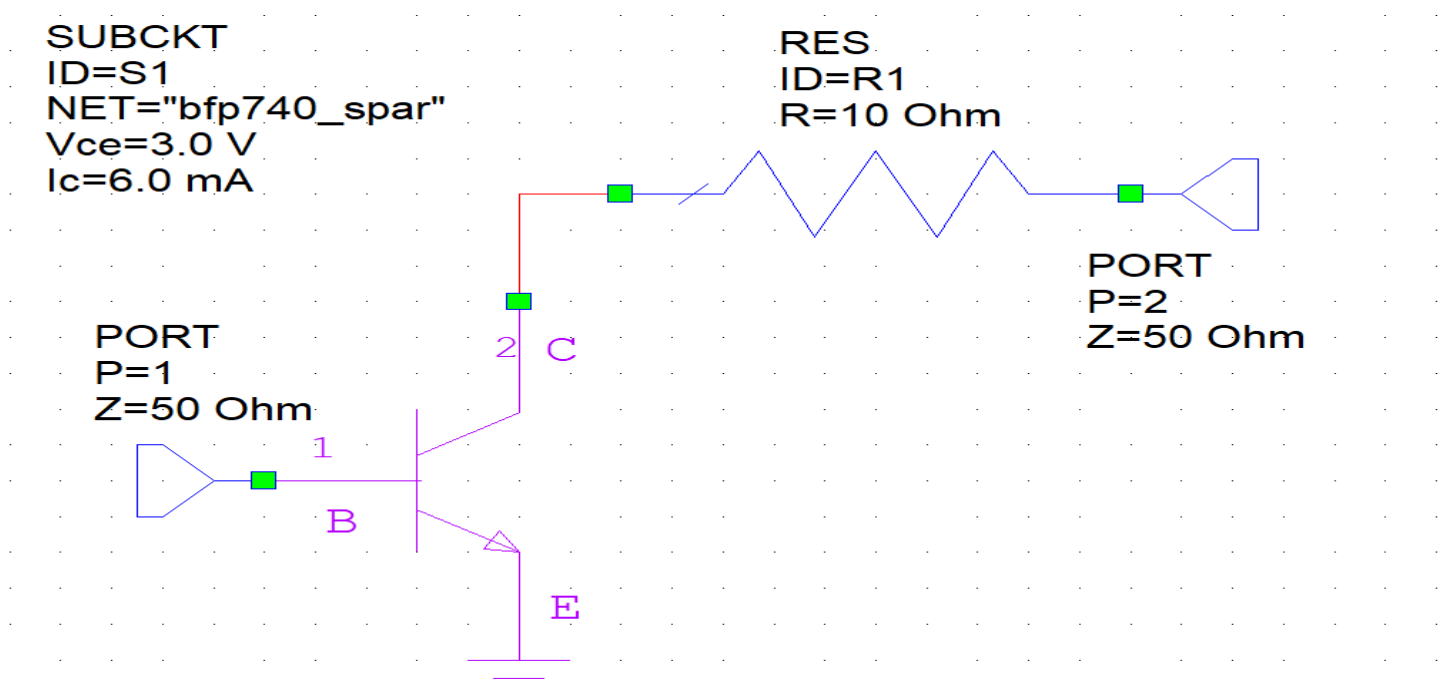
איור 31. הגרף העליון מציג את ערכי ספרת הרעש של המגבר ואת ספרת הרעש המינימאלית כתלות בתדר, והגרף התחתון מציג ההגבר של המגבר כתלות בתדר לאחר שיפור ה- *Return Loss*

ניתן לראות שספרת הרעש באמצע תחום תדרי העבודה של המגבר היא $NF = 1.23 [dB]$, וההגבר של המגבר הוא $G = 15.75 [dB]$ וה- $Return Loss$ של הכניסה הוא $|S_{11}| = -5 [dB]$ ובמוצא $|S_{22}| = -20 [dB]$ באמצע תחום תדרי העבודה.

לכן קבלתי שהמגבר עומד בדרישת ההגבר וספרת הרעש אבל קבלתי שה- $Return Loss$ גבוה מהערך הדרוש, ולפי דעתי זה המפרט האופטימאלי עבור הקונפיגורציה הנ"ל.

הוספתי נגד של 10 אוהם בטור לקוליקטור (ל מוצא) של הטרנזיסטור כדי לנסות לשפר את התיאום במוצא, והוספתי הנגד למוצא הטרנזיסטור כדי לפגוע כמה שפחות בספרת הרעש, כי ספרת הרעש מושפעת הכי הרבה מאימפדנס הכניסה.

בשלב ראשון חקרתי את הביצועים של הטרנזיסטור עם הנגד במוצא בנקודת העבודה. סכמת המעגל:

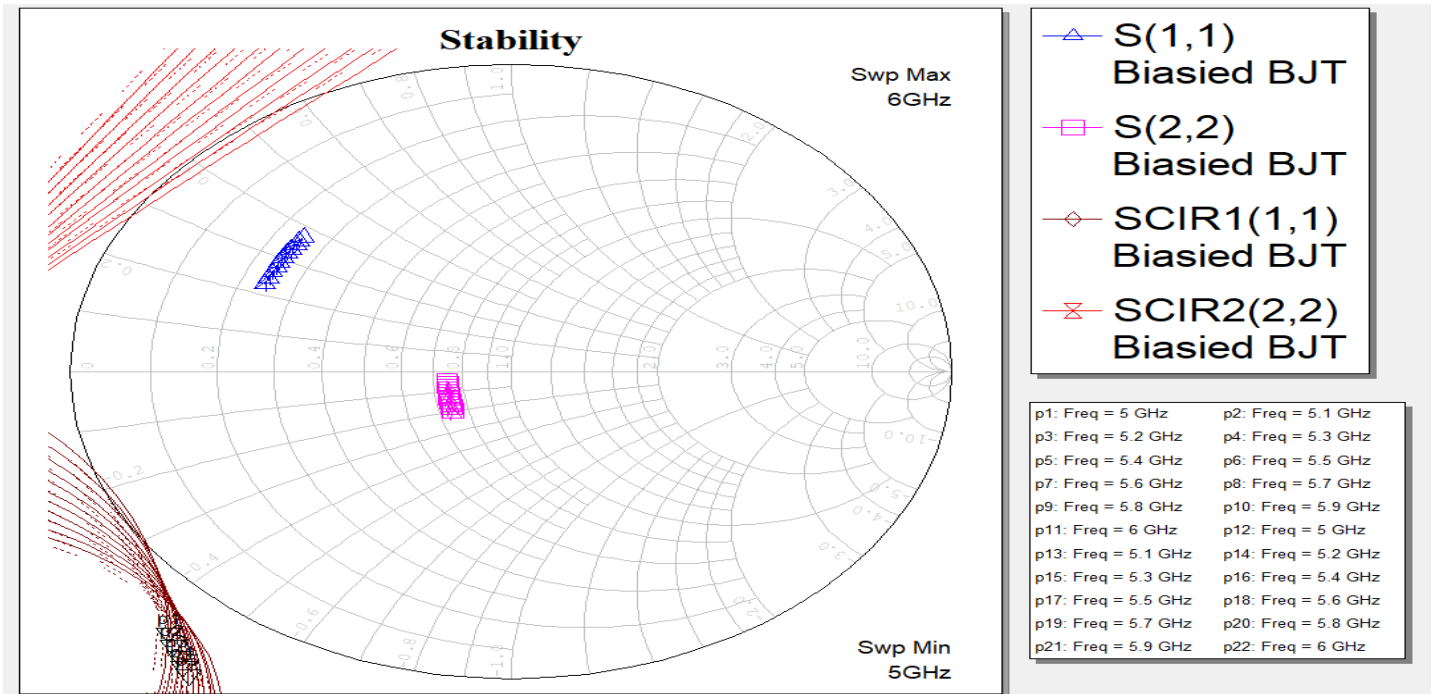


איור 32. סכמת המעגל של הטרנזיסטור בנקודת העבודה $V_{CE} = 3 [V]$, $I_C = 6 [mA]$

בצעתי בדיקת יציבות לטרנזיסטור בנקודת העבודה ובתחום התדרים, שרטטתי את מעגלי היציבות של המעגל בתחום תדרי העבודה ואת הערכים המוחלטים של S_{11}, S_{22} (S - Parameters).

הגרפים המתקבלים :

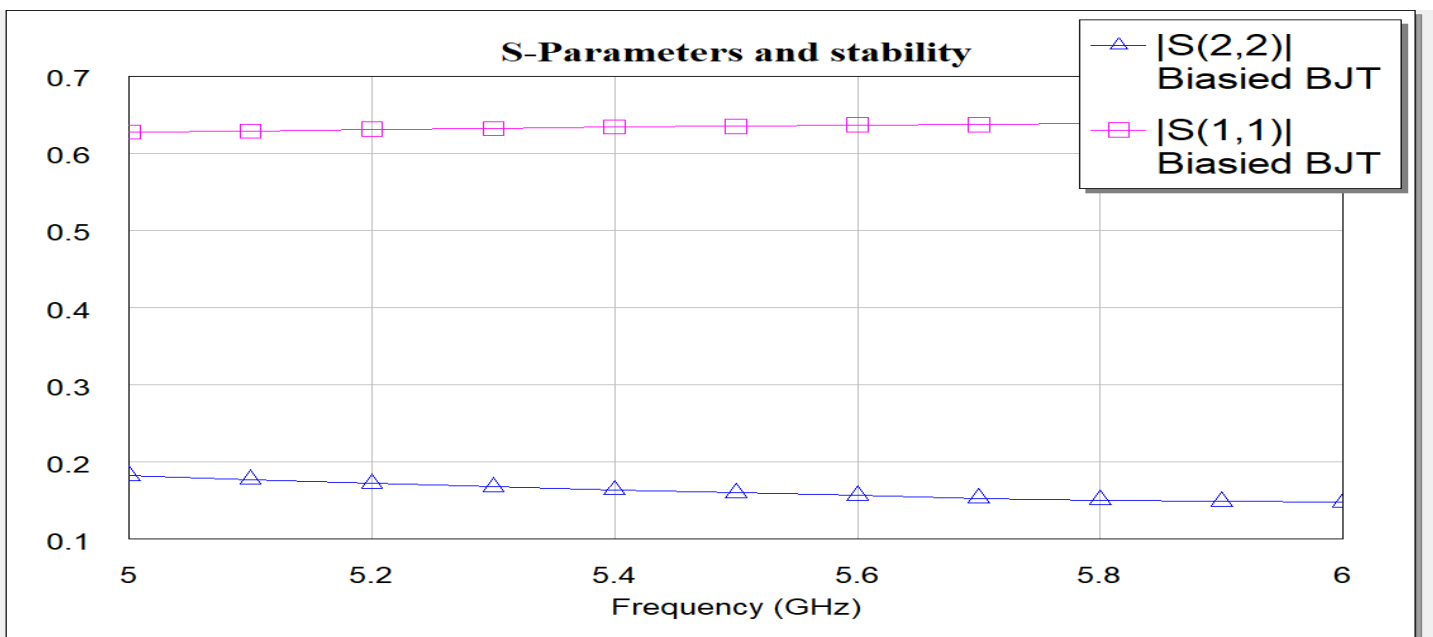
מעגלי היציבות :



איור 33. דיאגרמת סמית שמציגה את מעגלי היציבות וה- S - Parameters של הטרנזיסטור עם הנגד

נבחין שמעגלי היציבות מחוץ הדיאגרמה וזה מעיד על יציבות הטרנזיסטור

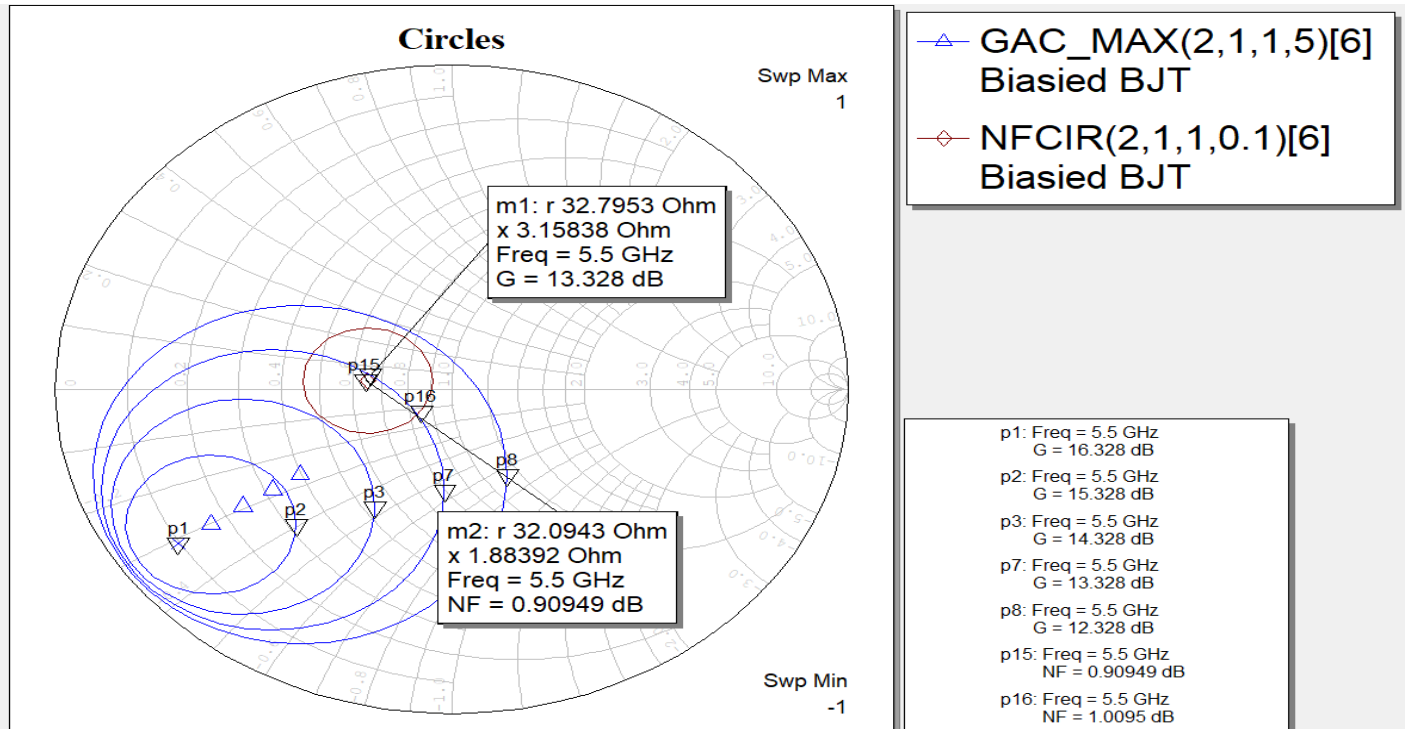
ערכי ה- S - parameters של הכניסה והיציאה :



איור 34. הגרף מכיל את הערכים המוחלטים של ה- S - Parameters של הכניסה והיציאה של הטרנזיסטור עם הנגד

נשים לב שבתחום התדרים $5.4 - 5.6 \text{ [GHz]}$ הערכים המוחלטים של ה- S - Parameters בכניסה וביציאה של המערכת קטנים מ-1 בערכם המוחלט ($|S_{11}|, |S_{22}| < 1$), לכן הנקודות $\Gamma_{out}, \Gamma_{in} = 0$ הן יציבות לכן התחום היציב הוא התחום מימין למעגלי היציבות שבתוך דיאגרמת סמית שמכיל את שתי הנקודות.

לאחר מכן שרטטתי את מעגלי שווי ההגבר וספרת הרעש בתדר האמצעי של תחום תדרי העבודה:



איור 35. דיאגרמת סמית שמכילה את מעלי שווי ההגבר וספרת הרעש בתדר $f = 5.5 \text{ [GHz]}$ של הטרנזיסטור עם הנגד

ניתן לראות מהגרף שספרת הרעש המינימאלית של הטרנזיסטור היא $NF = 0.9 \text{ [dB]}$, לכן בחרתי את אימפדנס הכניסה בצורה שהוא האימפדנס שנמצא על שמעגל שווי ההגבר של $G = 13.3 \text{ [dB]}$ ומתלכדת עם אימפדנס הכניסה שנותן לנו את ספרת הרעש המינימאלית (כי ספרת הרעש מושפעת רק מאימפדנס הכניסה) שהוא $Z_s = 32 + 2j \text{ [\Omega]}$.

ומקדם ההחזרה המתאים לנקודה זו הוא: $\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} = 0.22 \angle 172^\circ$.

ופרמטרי ה- S של הטרנזיסטור עם המגד במוצא בנקודות העבודה הנתונה הם :

Frequency (GHz)	S(1,1) Biased BJT Unitless data (Real)	S(1,1) Biased BJT Unitless data (Imag)	S(1,2) Biased BJT Unitless data (Real)	S(1,2) Biased BJT Unitless data (Imag)	S(2,1) Biased BJT Unitless data (Real)	S(2,1) Biased BJT Unitless data (Imag)	S(2,2) Biased BJT Unitless data (Real)	S(2,2) Biased BJT Unitless data (Imag)
5	-0.55871	0.2855	0.066162	-0.015054	3.8633	2.7538	-0.1313	-0.12665
5.1	-0.55007	0.30461	0.065626	-0.015696	3.8544	2.5753	-0.13391	-0.11628
5.2	-0.54188	0.32422	0.064888	-0.016035	3.8478	2.4155	-0.13595	-0.10539
5.3	-0.53256	0.34058	0.064233	-0.016756	3.8244	2.2509	-0.13767	-0.09599
5.4	-0.52458	0.35672	0.063689	-0.017373	3.8036	2.1034	-0.13917	-0.086216
5.5	-0.51544	0.37086	0.063257	-0.017897	3.7735	1.9478	-0.14043	-0.076967
5.6	-0.50687	0.3856	0.062685	-0.018251	3.7512	1.8107	-0.14164	-0.066976
5.7	-0.49727	0.39828	0.062202	-0.018627	3.7199	1.6741	-0.14188	-0.057305
5.8	-0.48713	0.41356	0.061712	-0.018994	3.7011	1.5401	-0.14297	-0.04755
5.9	-0.47943	0.42522	0.061353	-0.018933	3.664	1.4175	-0.14376	-0.03864
6	-0.46955	0.43808	0.06108	-0.019479	3.6368	1.2959	-0.14503	-0.029021

איור 36. פרמטרי ה- S של הטרנזיסטור עם הנגד בנקודת העבודה.

פרמטרי ה- S של הטרנזיסטור עם הנגד בתדר $f = 5.5 [GHz]$

$$S_{11} = -0.514 + 0.37j, S_{21} = 3.77 + 1.94j, S_{12} = 0.063 - 0.017j, S_{22} = -0.14 - 0.077j$$

ומקדם ההחזרה של המוצא שמתאים ל- $\Gamma_s = 0.221 \angle 172^\circ$ הוא :

$$\frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1-S_{11}\Gamma_s} = 0.22 \angle -160^\circ$$

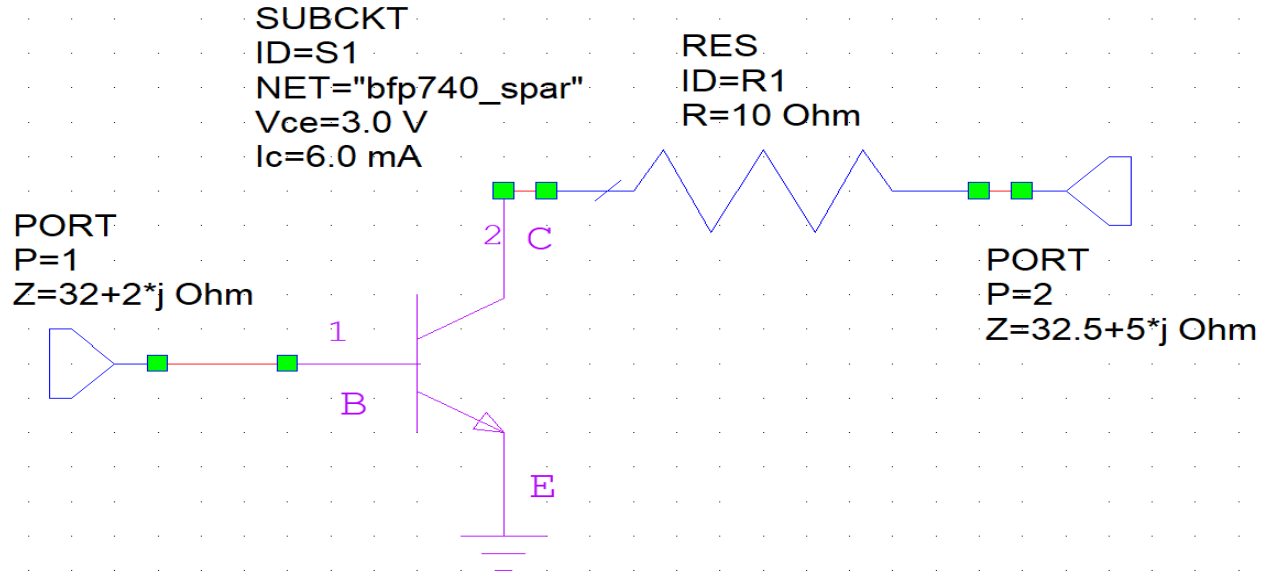
לכן נבחר אימפדנס העומס בתור העומס שמקיים תיאום אימפדנסים כלומר :

$$\Gamma_L = \Gamma_{out}^* = 0.22 \angle 160^\circ \rightarrow Z_L = Z_0 \frac{1+\Gamma_L}{1-\Gamma_L} = 32.5 + 5j [\Omega]$$

ונשים לב שהנקודות שבחרנו הם בתוך התחום היציב של הטרנזיסטור.

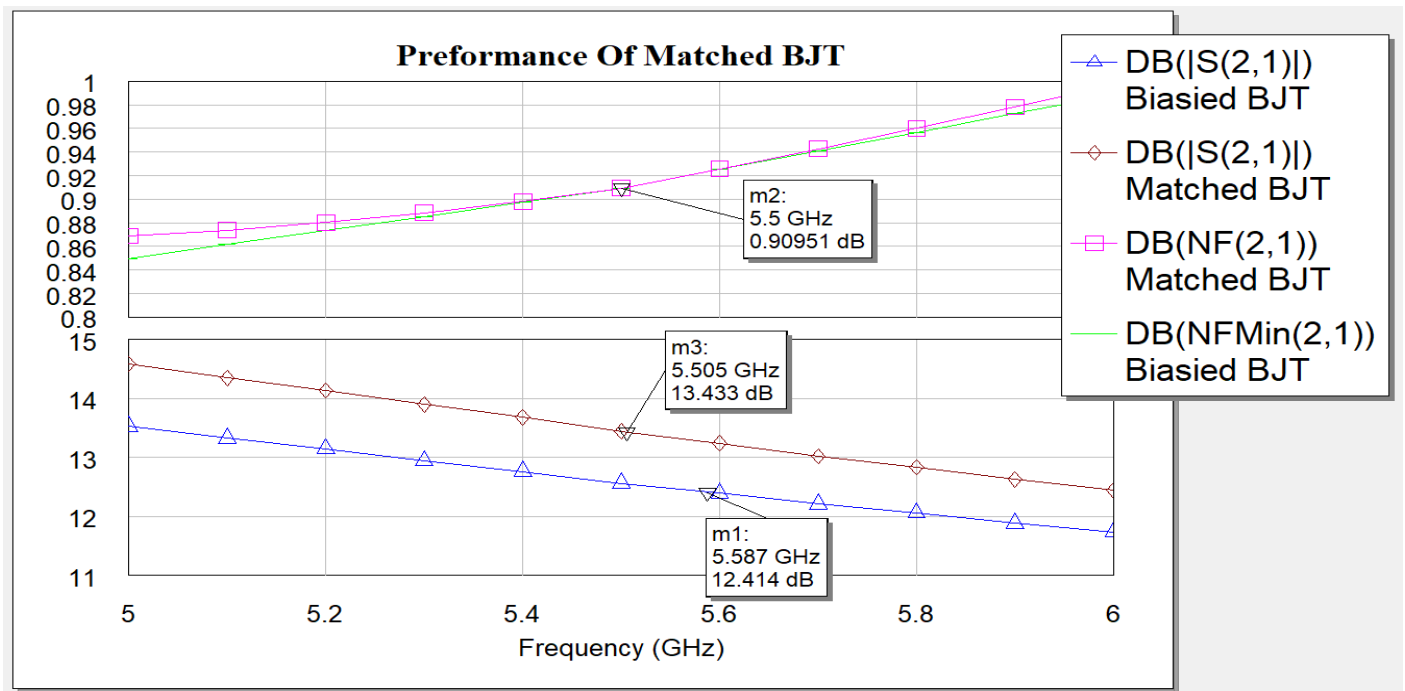
לאחר בחירת האימפדנסים שצריכים להשתקף בכניסה ובמוצא של הטרנזיסטור הצבתי אותם בתור האימפדנס של המחברים .

סכמת המעגל המתואם :



איור 37. סכמת המעגל של הטרנזיסטור עם הנגד בנקודת העבודה עם המחברים המתואמים

וקיבלתי שהביצועים של הטרנזיסטור עם האימפדנסים המתואמים הם :

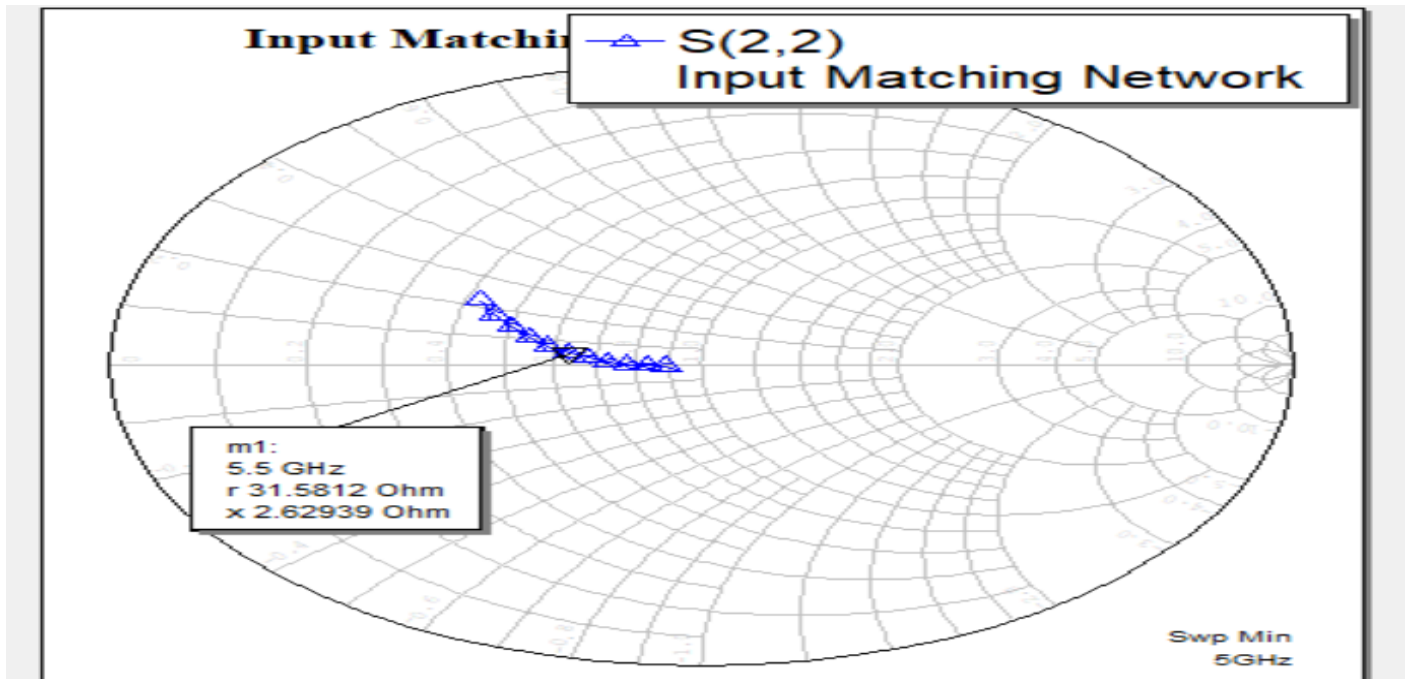


איור 38. הגרף העליון מציג את ערכי ספרת הרעש של הטרנזיסטור עם הנגד המתואם ואת ספרת הרעש המינימאלית כתלות בתדר, והגרף התחתון מציג ההגבר של הטרנזיסטור המתואם תלות בתדר.

ניתן לראות שקבלנו ערכים קרובים לערכים שהציגו בגרף שמציג את מעגלי שווי ההגבר וספרת הרעש כמצופה .

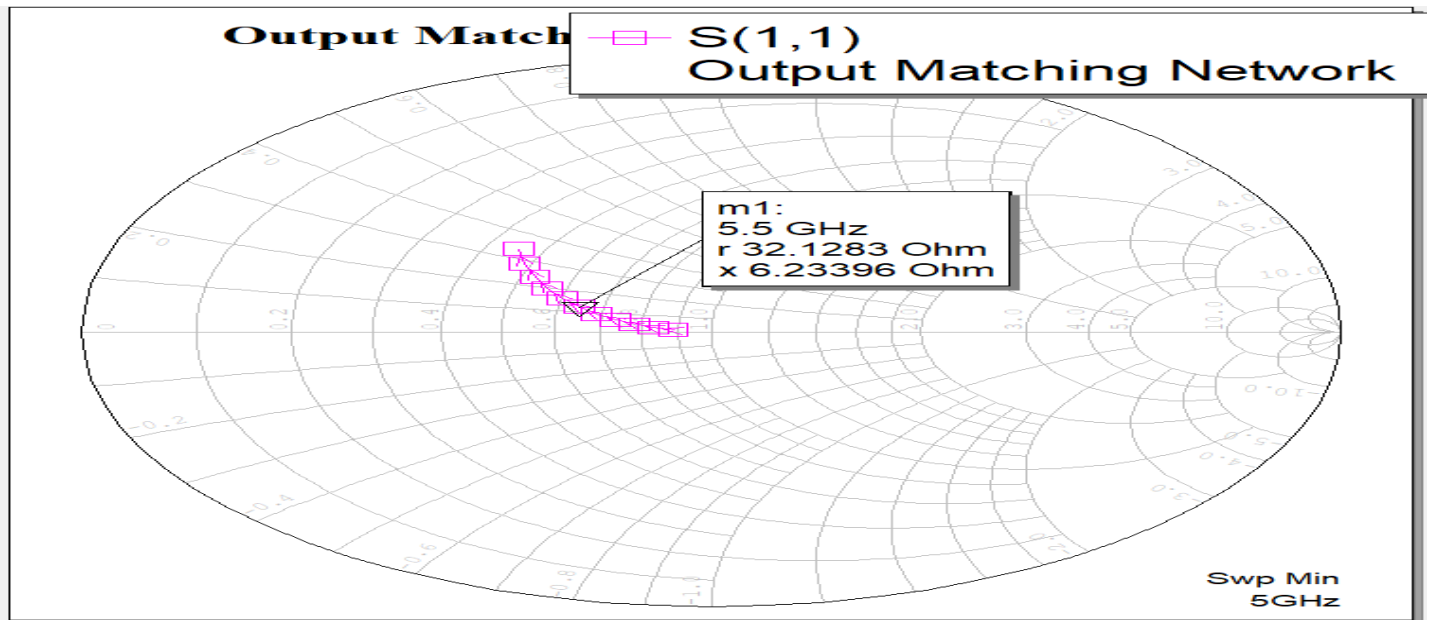
לאחר מכן תכננתי את רשתות התיאום באותה אופן שתכננתי אותן עבור הטרנזיסטור בלי הנגד .

והגרפים המקבלים המתקבלים :



איור 39. דיאגרמת סמית שמציגה את S_{22} של רשת התיאום של הכניסה וערך האימפדנס שמשתקף מהכניסה של הטרנזיסטור עם הנגד

וניתן לראות שהערך שמשתקף מהכניסה של הטרנזיסטור עם הנגד הוא $Z_s = 31.5 + 2.5j [\Omega]$ שהוא קרוב לערך הרצוי שהוא $Z_s = 32 + 2j [\Omega]$.

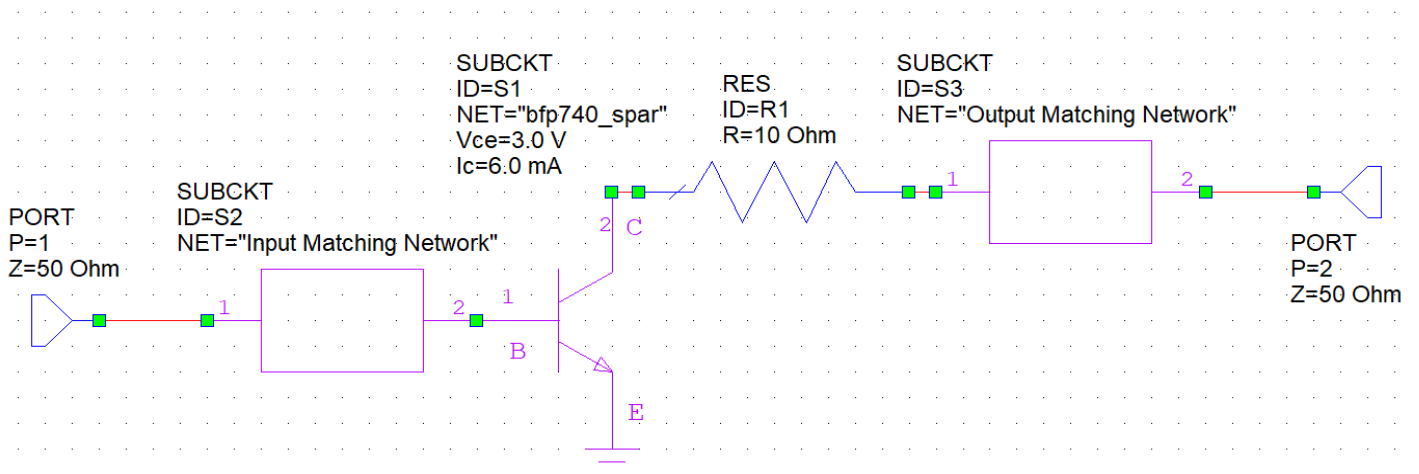


איור 26- דיאגרמת סמית שמציגה את S_{11} של רשת התיאום של המוצא וערך האימפדנס שמשתקף מהמוצא של הטרנזיסטור עם הנגד

וניתן לראות שהערך שמשתקף מהמוצא של הטרנזיסטור עם הנגד הוא $Z_L = 32 + 6j [\Omega]$ שהוא קרוב לערך הרצוי

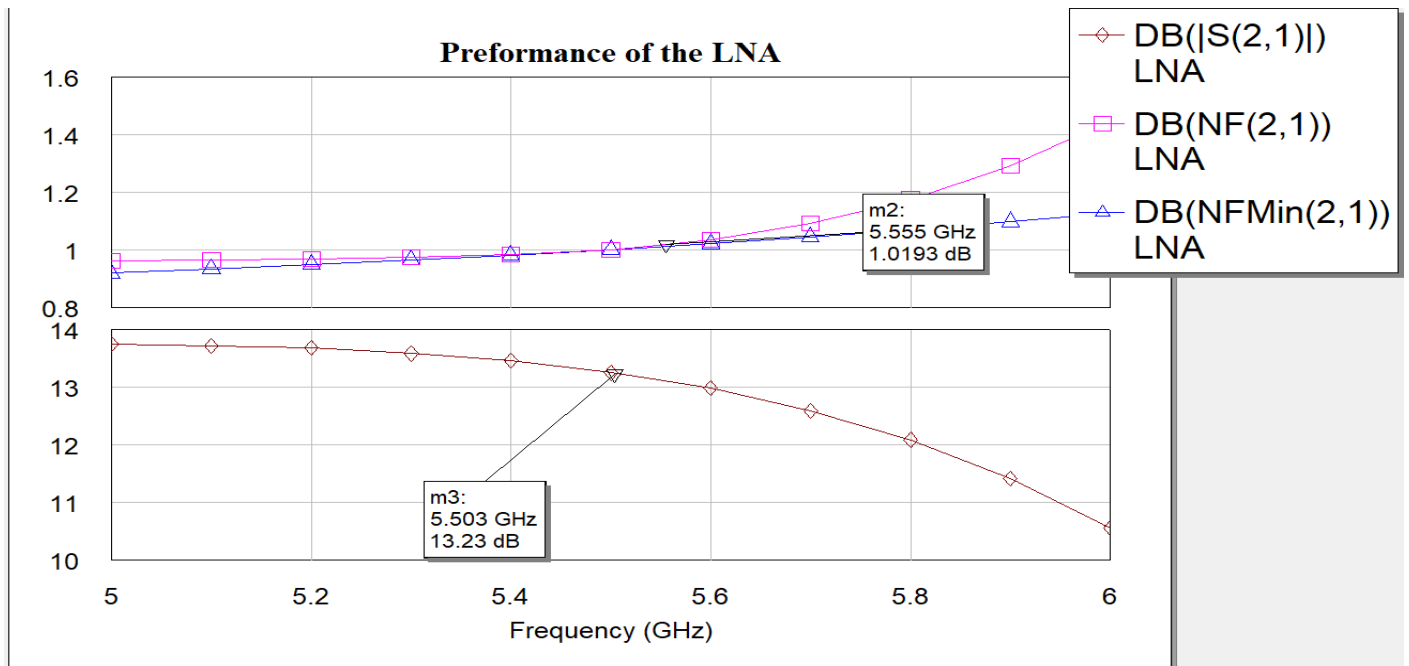
שהוא $Z_L = 32.5 + 5j [\Omega]$.

סכמת המעגל השלם (ה- LNA) :



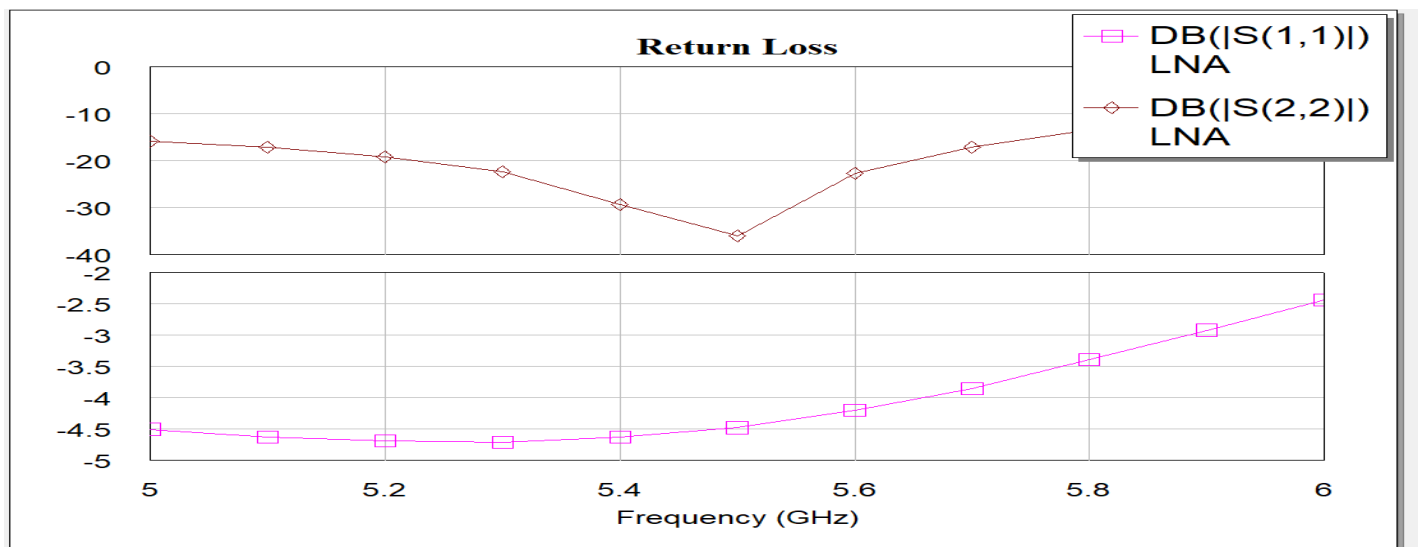
איור 40. סכמת המעגל השלם של ה- LNA עם הנגד

קבלתי שהמגבר דל הרעש עם תוספת נגד למוצא של הטרנזיסטור עונה על דרישת ההגבר וספרת הרעש אציג זאת על ידי הגרף הבא :



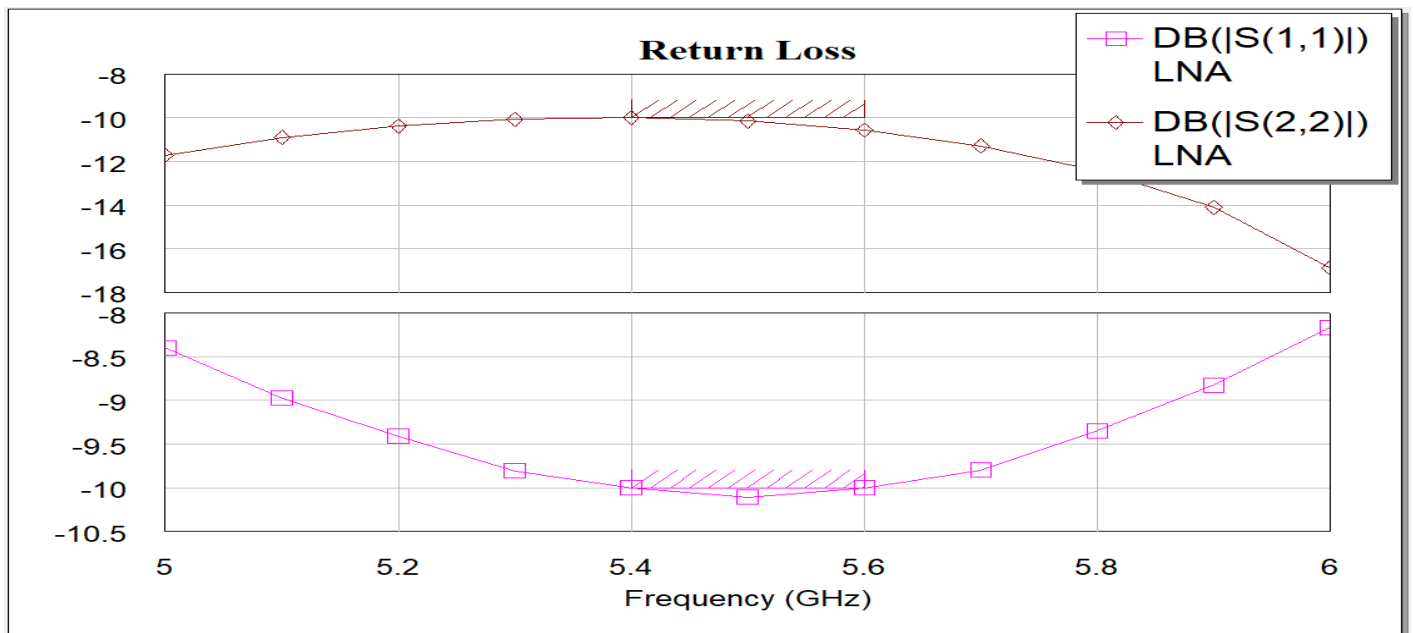
איור 41. הגרף העליון מציג את ערכי ספרת הרעש של המגבר ואת ספרת הרעש המינימלית כתלות בתדר, והגרף התחתון מציג את ספרת התאבדות של המגבר כתלות בתדר.

וקיבלתי ש- $Return Loss$ של ה- LNA החדש במוצא קטן מ- $-10 [dB]$ בתדרי העבודה של המגבר בהתאם לדרישה, אבל בכניסה לא (ראו הגרף המצורף) :

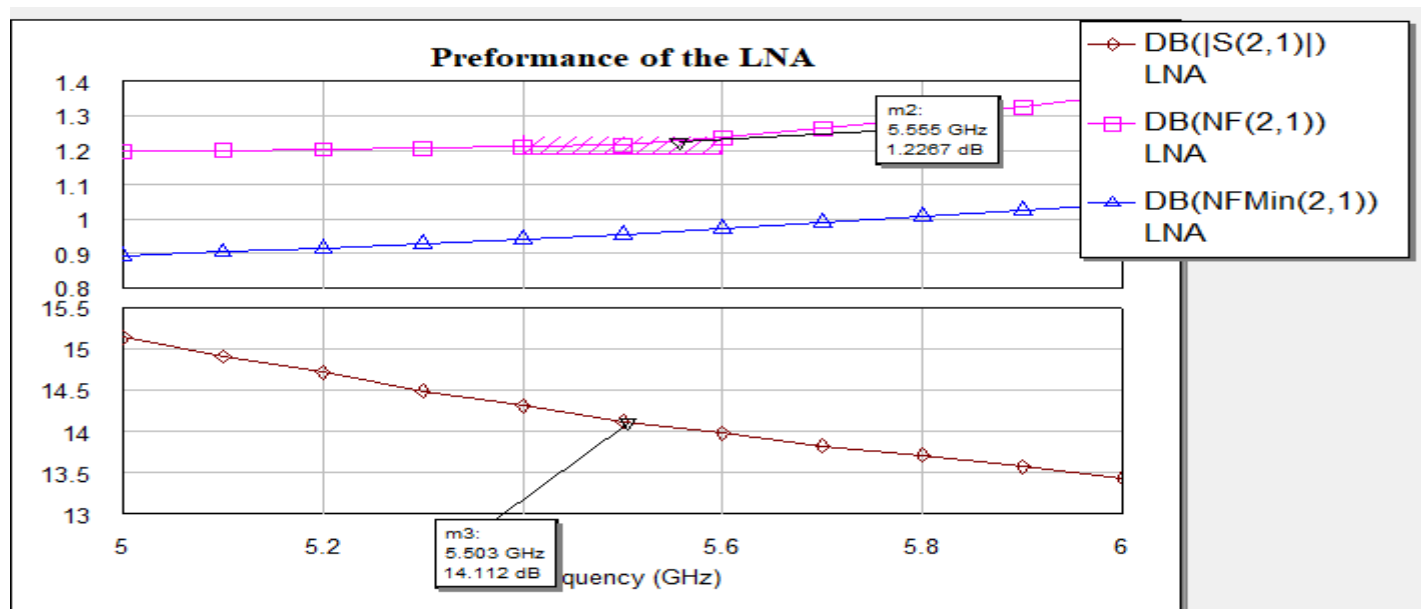


איור 42. הגרף העליון מציג את ה- $Return Loss$ של המוצא, הגרף התחתון מציג ה- $Return Loss$ של הכניסה.

לכן על ידי השימוש ב- *Tuner* וב- *Optimizer* ניסינו להתפשר בספרת הרעש ובהגבר על ידי שינוי רשת תיאום הכניסה והמוצא על מנת לשפר את ה- *Return Loss* בכניסה ל-LNA. והגרפים המתקבלים :



איור 43. הגרף העליון מציג את ה- *Return Loss* של המוצא, הגרף התחתון מציג ה- *Return Loss* של הכניסה (לאחר שיפור ה- *Return Loss*)

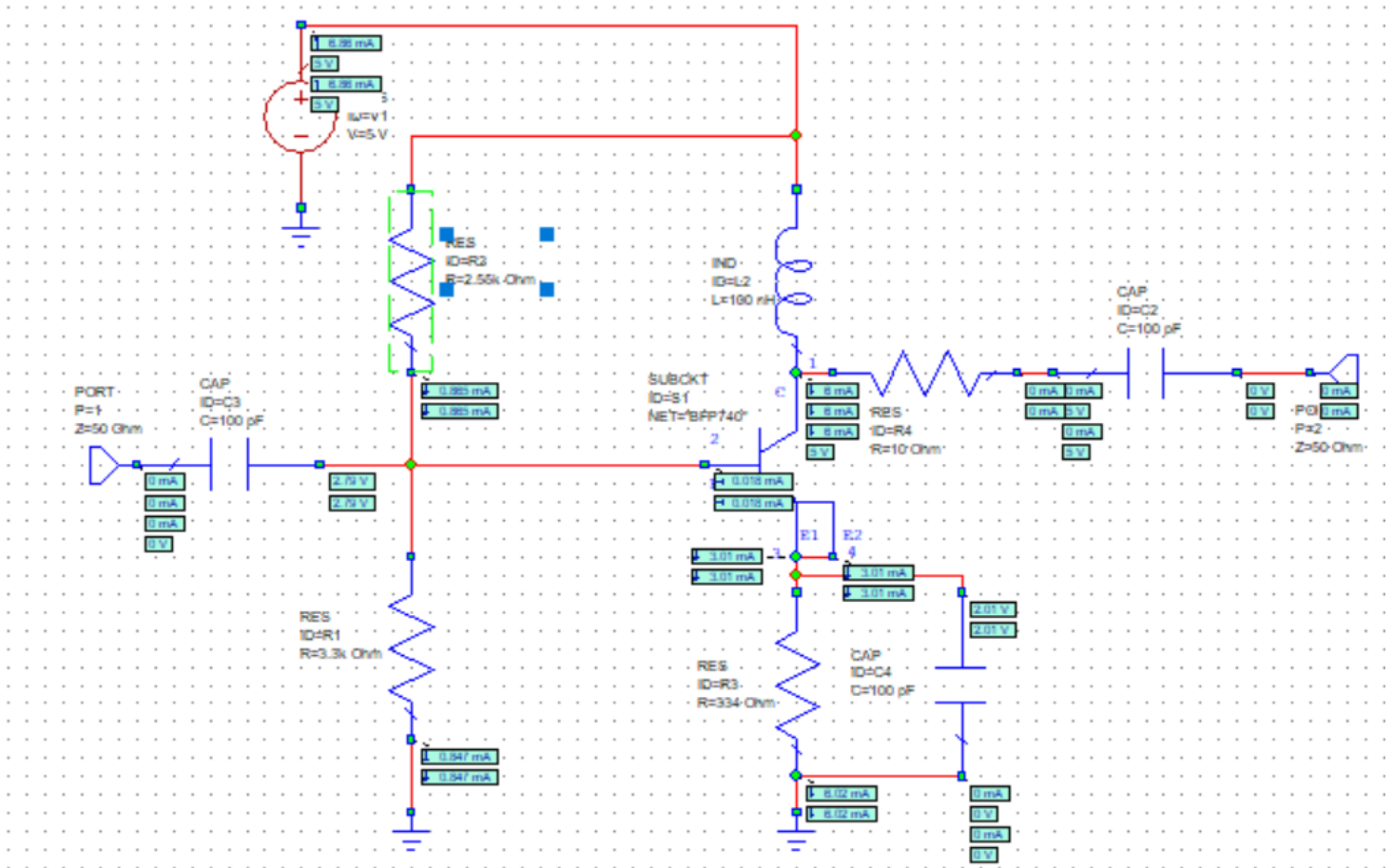


איור 44. הגרף העליון מציג את ערכי ספרת הרעש של המגבר ואת ספרת הרעש המינימאלית כתלות בתדר, והגרף התחתון מציג ההגבר של המגבר כתלות בתדר לאחר שיפור ה- *Return Loss*.

ניתן לראות שספרת הרעש באמצע תחום תדרי העבודה של המגבר היא $NF = 1.22[dB]$, וההגבר של המגבר הוא $G = 14.4[dB]$ וה- $Return Loss$ של הכניסה קטן מ- $-10[dB]$ ומוצא $|S_{11}| < -10[dB]$ ובמוצא $|S_{22}| < -10[dB]$ באמצע תחום תדרי העבודה.
לכן קבלתי שהמגבר עומד בכל הקריטריונים שנקבעו.

המודל הלא ליניארי :

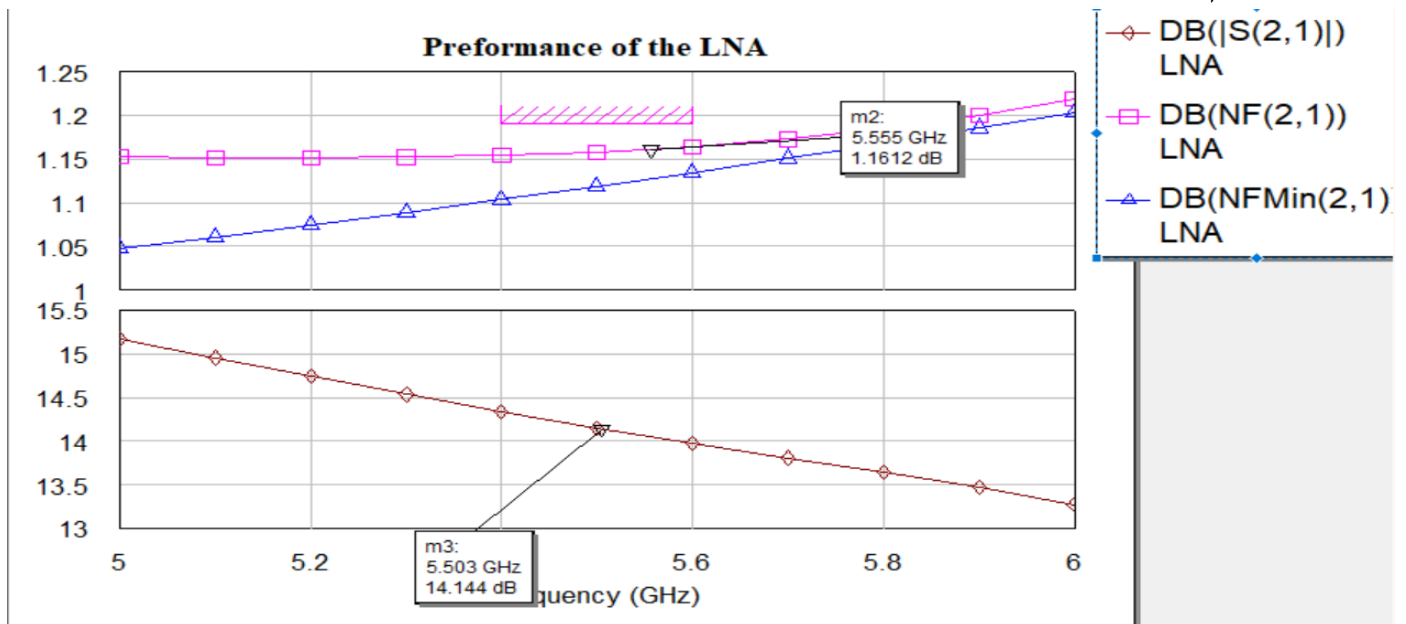
תכננתי רשת לתיאום נקודת העבודה וקיבלתי הסכמה הבאה :



איור 45. סכמת המעגל של הטרנזיסטור ורשת התיאום לנקודת העבודה $V_{CE} = 3[V]$, $I_C = 6[mA]$

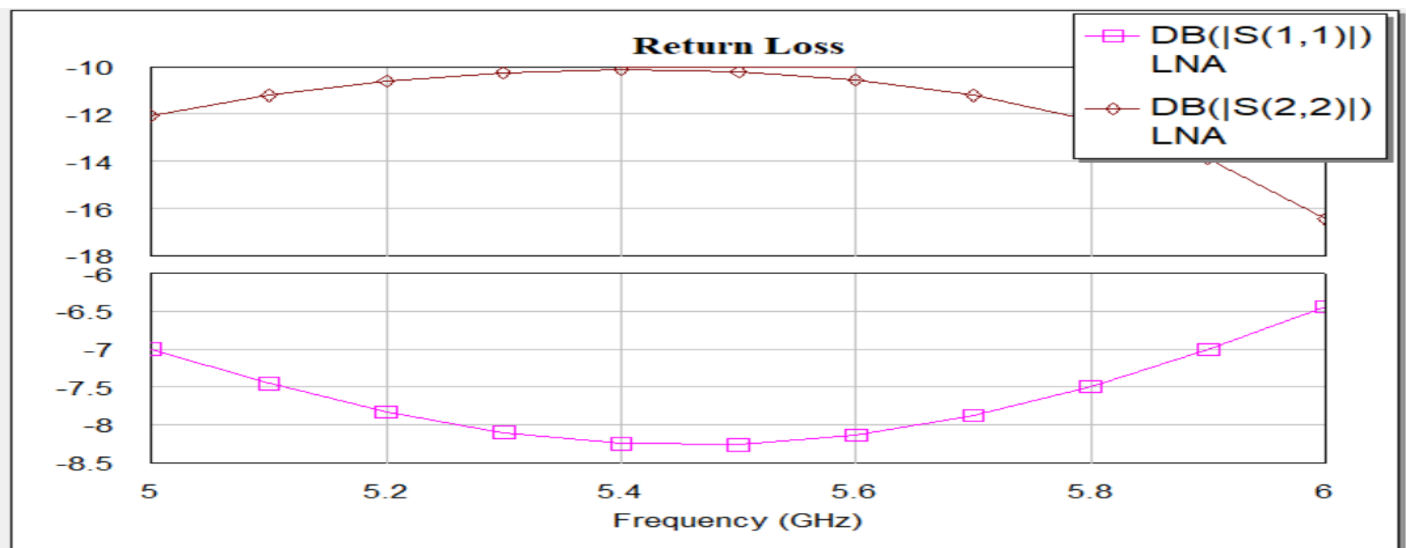
אכן קבלתי שהזרם בקולקטור הוא $I_C = 6[mA]$ והמתח בין הקולקטור לאימטר הוא בקירוב $V_{ce} = 3[V]$.

לאחר מכן הצבתי את הטרנזיסטור עם רשת תיאום נקודת העבודה במקום הטרנזיסטור והגדל בסכמה מאיור 39, קבלתי שהמגבר דל הרעש עונה על דרישת ההגבר וספרת הרעש כאשר השתמשתי במודל הלא ליניארי של הטרנזיסטור אציג זאת על ידי הגרף הבא :



איור 46. הגרף העליון מציג את ערכי ספרת הרעש של המגבר ואת ספרת הרעש המינימאלית כתלות בתדר, והגרף התחתון מציג ההגבר של המגבר כתלות בתדר

וקיבלתי שה- $Return Loss$ של ה-LNA במוצא קטן מ- -10 [dB] בתדרי העבודה של המגבר בהתאם לדרישה, אבל בכניסה בכניסה ה- $Return Loss$ עקב השימוש במודל הלא ליניארי של הטרנזיסטור (ראו הגרף המצורף) :



איור 47. הגרף העליון מציג את ה- $Return Loss$ של המוצא, הגרף התחתון מציג ה- $Return Loss$ של הכניסה

2.2. סיכום תוצאות תיכנון ה-LNA

עבור המודל הלינארי בלי הנגד בטור לקוליקטור :

קבלתי שספרת הרעש באמצע תחום תדרי העבודה של המגבר היא $NF = 1.16[dB]$, וההגבר של המגבר הוא $G = 15.75[dB]$ וה- $Return Loss$ של הכניסה הוא $|S_{11}| = -5[dB]$ ובמוצא $|S_{22}| = -20[dB]$ באמצע תחום תדרי העבודה.

לכן קבלתי שהמגבר עומד בדרישת ההגבר וספרת הרעש אבל קבלתי שה- $Return Loss$ גבוה מהערך הדרוש, ולפי דעתי זה המפרט האופטימאלי עבור הקונפיגורציה הנ"ל.

עבור המודל הלינארי עם הנגד בטור לקוליקטור :

קבלתי שספרת הרעש באמצע תחום תדרי העבודה של המגבר היא $NF = 1.22[dB]$, וההגבר של המגבר הוא $G = 14.4[dB]$ וה- $Return Loss$ של הכניסה קטן מ- $|S_{11}| < -10[dB]$ ובמוצא $|S_{22}| < -10[dB]$ בתחום תדרי העבודה.

לכן קבלתי שהמגבר עומד בכל הקריטריונים שנקבעו.

עבור המודל הלא לינארי עם הנגד בטור לקוליקטור :

עבור רשתות התיאום של המודל הלינארי עם הנגד במוצא קבלתי שספרת הרעש באמצע תחום תדרי העבודה של המגבר היא $NF = 1.23[dB]$, וההגבר של המגבר הוא $G = 14.1[dB]$ וה- $Return Loss$ של הכניסה בערך $|S_{11}| = -8.25[dB]$ ובמוצא $|S_{22}| < -10[dB]$ באמצע תחום תדרי העבודה. לכן קבלתי התאמה איכותית בין התכנון של המודל הלינארי והלא לינארי כצפוי!.

3. תכנון המתנד

מפרט המתנד :

לצורך המימוש השתמשתי בטרנזיסטור BPF740 של חברת Infineon :

נקודת העבודה היא : $V_{CE} = 3 [V]$, $I_C = 15 [mA]$

תדר העבודה : $5.5 [GHz]$

הספק המוצא בתדר העבודה : $P_{first\ harm} > 5 [dBm]$

מהוד דיאלקטרי ממודל על ידי מעגל RLC מקבילי :

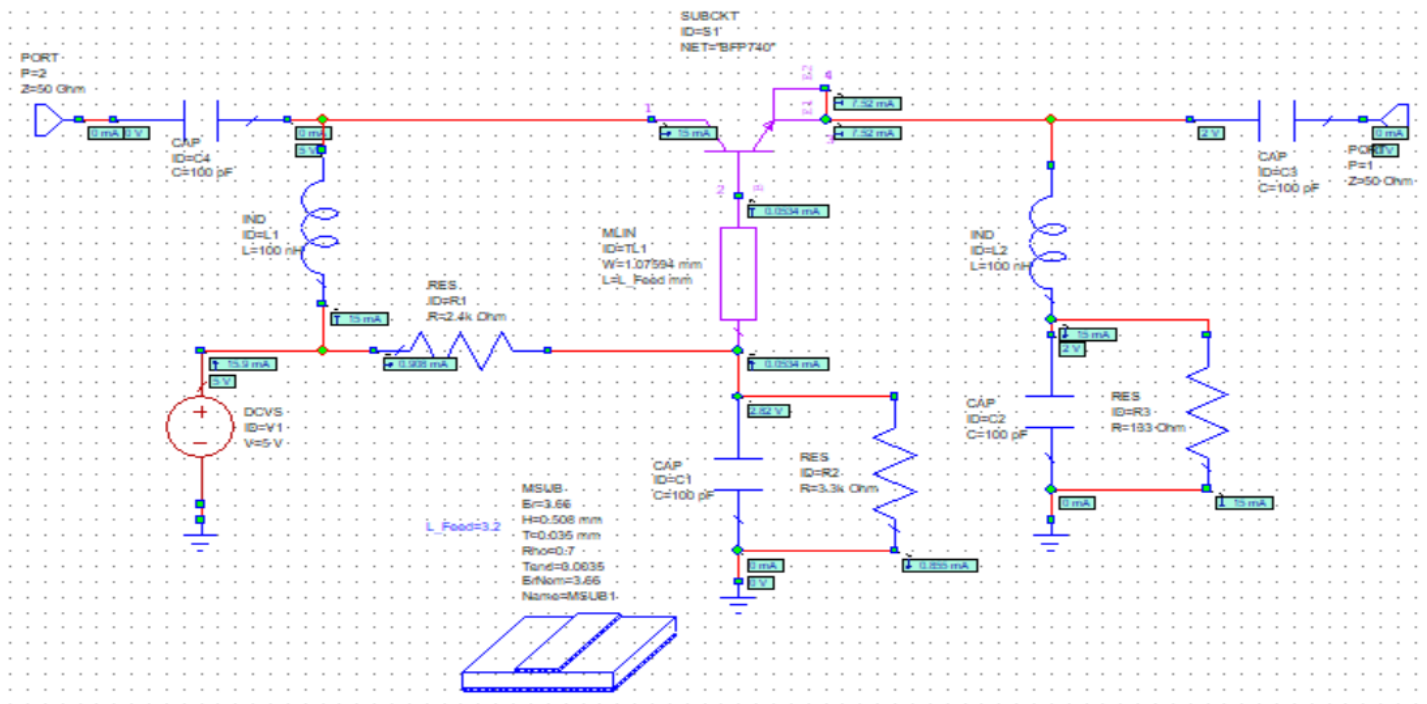
$$R = 1000 [\Omega], L = 1 \cdot 10^{-4} [nH], C = 8373.65 [pF]$$

3.1. שלבי תכנון המתנד

בשלב ראשון חקרתי את הביצועים של המודל הלא לינארי של הטרנזיסטור הנתון בנקודת העבודה $V_{CE} = 3 [V]$, $I_C = 15 [mA]$

$15 [mA]$

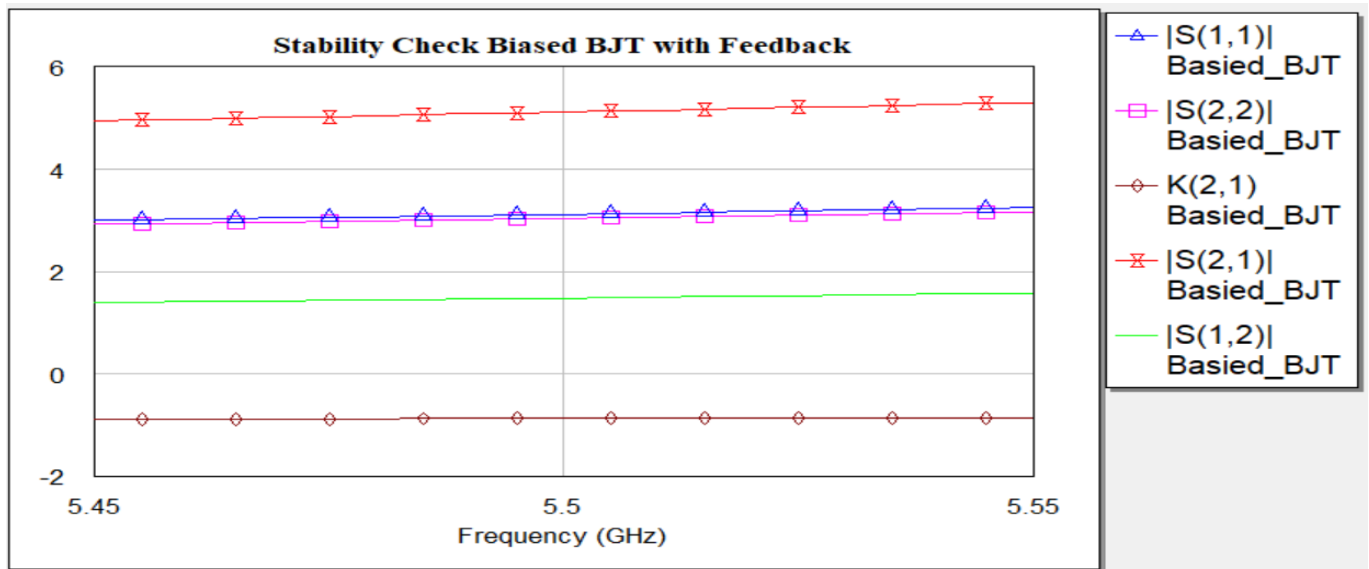
תכננתי רשת תיאום נקודת העבודה וקיבלתי הסכמה הבאה :



איור 4.8 סכמת המעגל של הטרנזיסטור ורשת התיאום לנקודת העבודה $V_{CE} = 3 [V]$, $I_C = 15 [mA]$

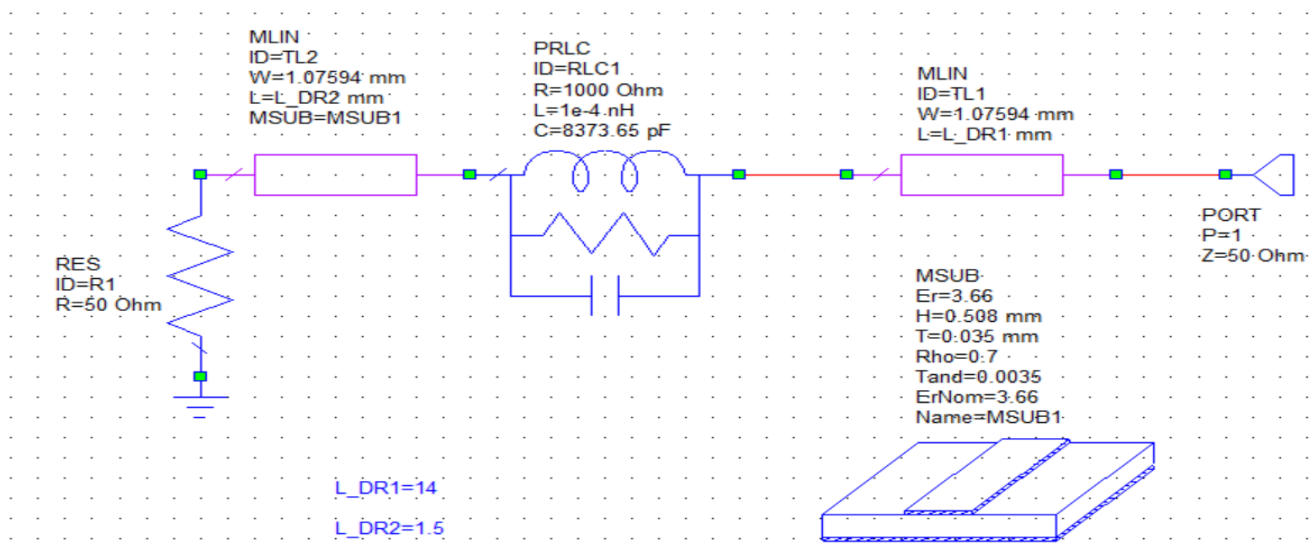
אכן קבלתי שהזרם בקולקטור הוא $I_C = 15 [mA]$ והמתח בין הקולקטור לאימטר הוא $V_{ce} = 3 [V]$

שיניתי אורך קו התמסורת המחובר לבסיס של הטרנזיסטור על מנת לקבל שמקדם ההחזרה שנכנס לטרנזיסטור בנקודת העבודה גדול מאפס בערכו המוחלט $|\Gamma_{in}| > 1$ ובמקרה זה מקדם ההחזרה הוא $S_{11} = \Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_T}{1-S_{11}\Gamma_T}$ כי בפורט 2 יש לנו רק המחבר עם התנגדות של $50 [\Omega]$ כלומר $\Gamma_T = 0$.
ולאחר קביעת אורך קו התמסורת ל- $L = 3.2 [mm]$ קבלתי ש- $|S_{11}| > 0$:



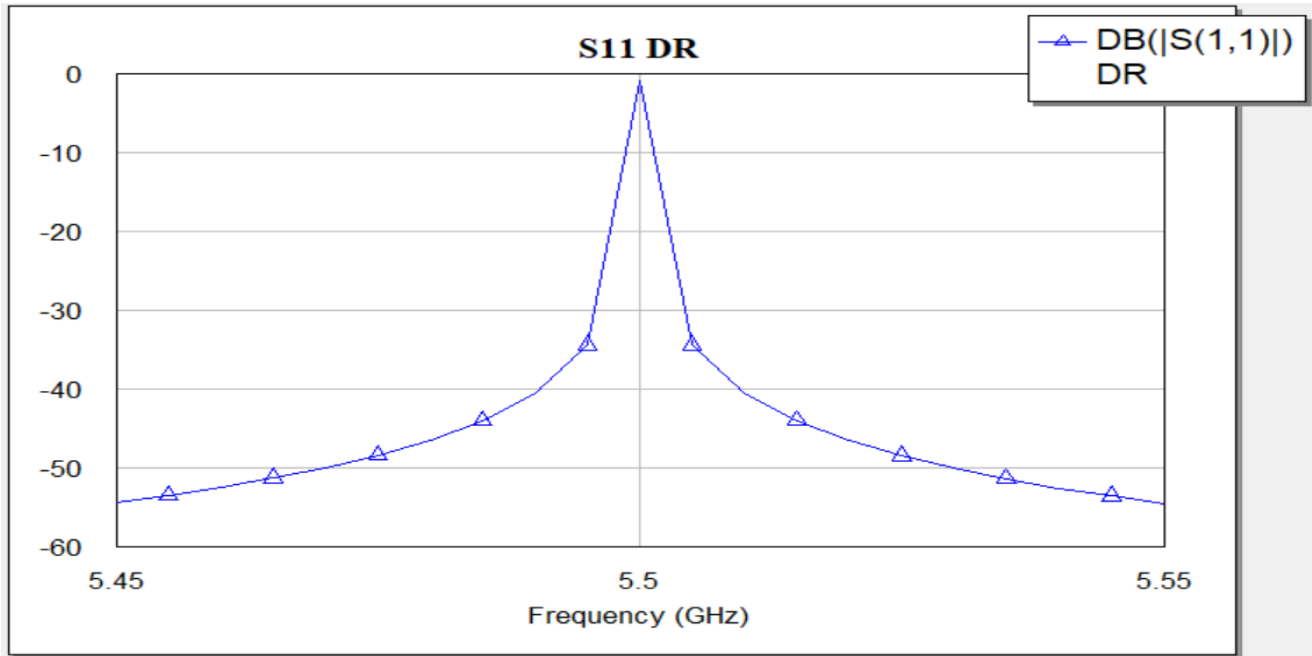
איור 49. הגרף מכיל את הערכים המוחלטים של ה- S - Parameters של הטרנזיסטור

לאחר הוצאת הטרנזיסטור מיציבות בניתי המהוד הבא :



איור 50. סכמת מעגל המהוד

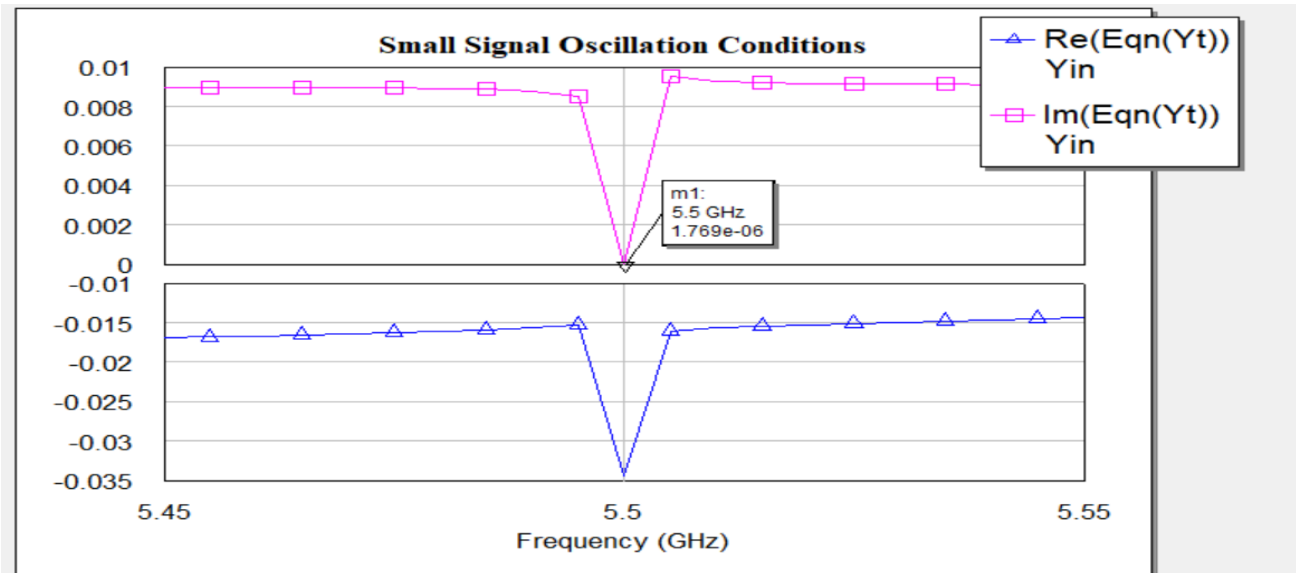
לאחר מכן בדקתי את תדר העבודה של המהוד :



איור 51. הגרף מציג את S_{11} של המהוד כתלות בתדר

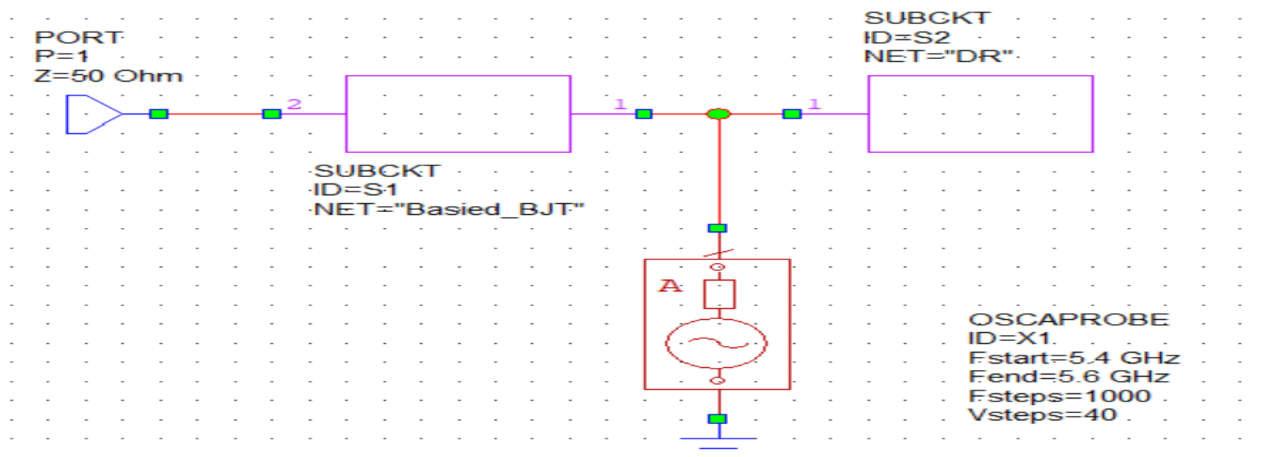
אכן קבלנו ש- S_{11} מקבל מקסימום בתדר העבודה שהוא $f = 5.5 \text{ [GHz]}$.

לאחר מכן הצגתי את סכום המתירות של הטרנזיסטור בפורט 1 והמתירות של המהוד ובאמצעות ה- *Tuner* קבעתי את אורך קווי התמסורת של המהוד (שנמצא בין המוצא של המהוד לבין מעגל ה- *RLC* המקבילי) כך שהחלק המדומה של המתירות הכוללת (של הטרנזיסטור והמהוד) הוא אפס וחלק ממשי שלילי (ראו גרף מצורף) :



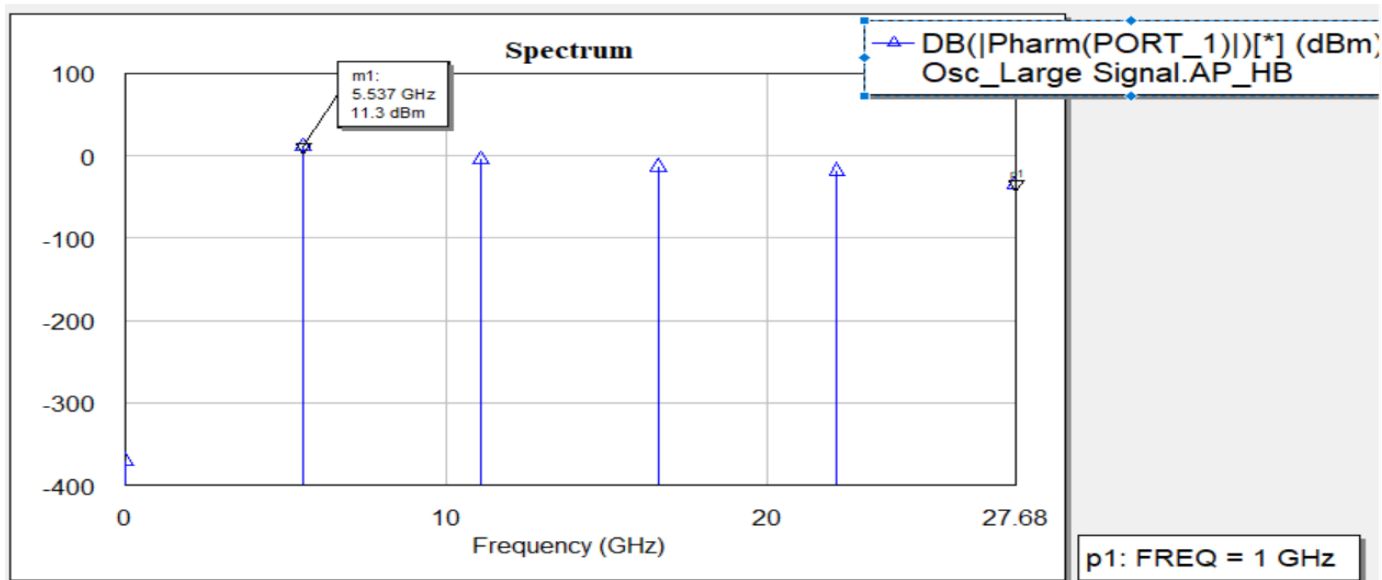
איור 52. הגרף העליון מציג החלק המדומה של המתירות הכוללת והגרף התחתון מציג החלק הממשי של המתירות הכוללת

לאחר מכן עוררתי המעגל עם הרכיב *OSCPROBE*, סכמת המעגל :



איור 53. סכמת המעגל השלם עם הרכיב *OSCPROBE*

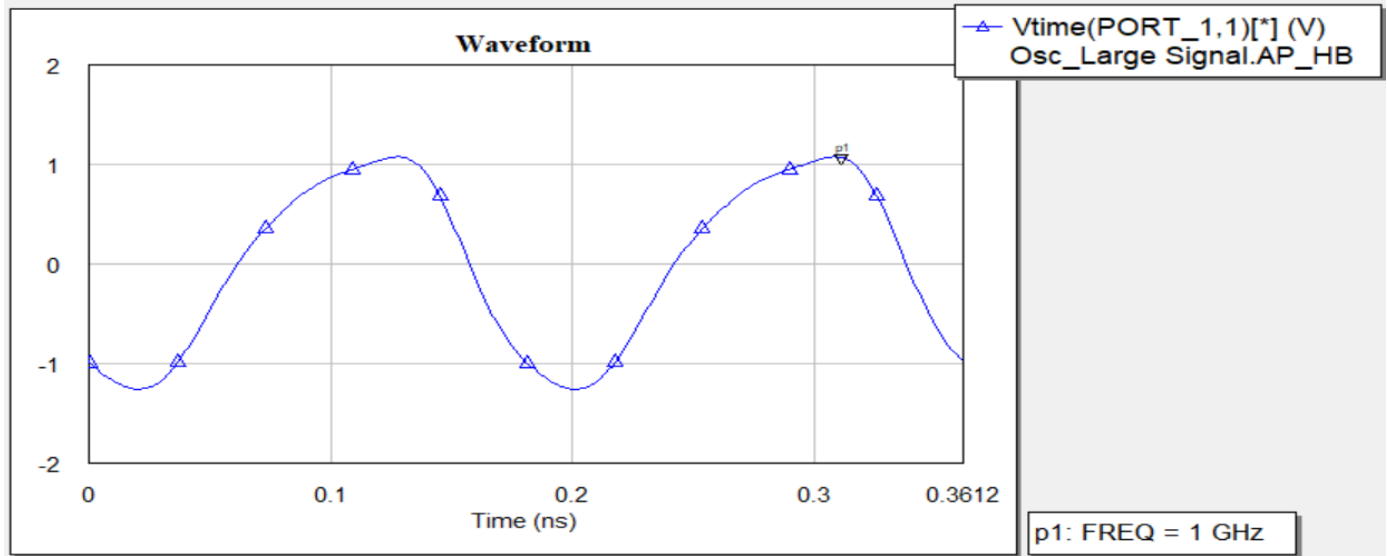
וקבלתי שהמתנד עונה על דרישת ההספק המוצא אציג זאת על ידי הגרף הבא :



איור 54. הגרף מציג את הספק המוצא בהרמוניות השונות

נשים לב שההרמוניה הראשונה של המתנד היא בקירוב $f = 5.5 [GHz]$.

והמוצא של המעגל (התנודות):



איור 55. הגרף מציג את התנודות של המעגל

לכן קבלתי שהמתנד מתנדנד בתדר קרוב ל- $f = 5.5 \text{ [GHz]}$ עם הספק מוצא של $P_{first\ harm} = 11.3 \text{ [dBm]}$.

3.2. סיכום תוצאות תיכנון המתנד

קבלתי שתדר העבודה במהוד הדיאלקטרי הוא $f = 5.5 \text{ [Ghz]}$ וההתנגדות הכוללת במעגל היא שלילית טהורה (לפני

העיור), והמתנד מתנדנד בתדר קרוב ל- $f = 5.5 \text{ [GHz]}$ עם הספק מוצא של $P_{first\ harm} = 11.3 \text{ [dBm]}$.

לכן קבלתי שהמתנד עומד בכל הקריטריונים שנקבעו.

4. סיכום

הפרויקט עוסק בתכנון מתנד ומגבר דל רעש בתדר RF , במהלך הפרויקט הכרתי שיטות תכנון שסייעו לי לשפר הביצועים של הרכיבים הנ"ל והצגתי ותיעדתי את שלבי והסברי התכנון שנלקחו בחשבון בעת תכנון המתנד והמגבר דל הרעש.

תוצאות ומסקנות :

- מגבר דל הרעש שתכננתי בעזרת המודל הלינארי של הטרנזיסטור עם נגד בטור למוצא עומד בדרישות והקריטריונים שנקבעו, וגם קיבלתי התאמה איכותית בין התכנון של המודל הלינארי והלא לינארי .
- המתנד שתכננתי בעל תדר עבודה שתואם לתדר הדרוש והספק מוצא בהרמוניה הראשונה גבוה ותנודות יציבות במוצא .
- לסיכום קבלתי שהמגבר והמתנד עומדים בכל הדרישות והקריטריונים שנקבעו.

רשימת מקורות

- [1] Gonzalez, G. (n.d.). *Foundations of Oscillator Circuit Design*.
- [2] Reinhold, L., & Pavel, B. (2000). *RF Circuit Design: Theory and Applications* (3rd, illustrated ed., Vol. 1). Prentice Hall.