

פרויקט 2 בקורס תמסורת גלים

תשובות לשאלות נוספות לפרויקט

1. צורת הגרף בסעיף B:

הגרף של סעיף B מתאר את גודלו של מקדם ההחזרה כתלות בתדר. כפי שניתן לראות מצורת הגרף, מקדם ההחזרה הינו מינימאלי בתדר עבורו ביצענו את ההתאמה בסעיף A. ✓

בנוסף, בתדר זה מקבל מתקדם החזרה השואף לאפס כמצופה, שהרי מטרת ההתאמה הייתה לגרום לתיאום אימפדנסים ומתוך הנוסחה $\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_C}{Z_{in} + Z_C}$ ברור כי כאשר האימפדנסים מתואמים, מקדם החזרה אפסי. ✓

יש לציין שבפועל מקדם ההחזרה שהתקבל אינו אפס והמינימום מתקבל בקירוב בתדר 3 ולא בדיוק ב-3.00, אנו מעריכים שהמקור לשגיאות אלו הינו אופן מציאת פרמטרי ההתאמה. כיוון שהחישובים מתבצעים ידנית ולא על ידי אלגוריתם מדויק הגיוני וסביר לצבור שגיאות בלתי נמנעות במהלך החישובים על גבי דיאגרמת סמית. ✓

בתהליך התיאום, הבענו את D במונחי λ ולפי יחס זה קבענו את זווית הסיבוב על גבי דיאגרמת סמית בסעיף A. אבל התלות בתדר מוכלת ב- λ אורך הגל. כלומר, שינוי התדר משנה את אורך הגל ומשנה את זווית הסיבוב לפיה אנחנו מחשבים את הפרמטרים הדרושים להתאמה.

לפי הסבר זה אפשר להבין את המקור לעליה בגודלו המוחלט של מקדם ההחזרה סביב התדר המרכזי לפיו תיאמנו, שהרי ההפרש בין אורך הגל המקורי לבין λ_0 הוא המקור לשגיאה בתאום, וככל שמתרחקים מתנאי התיאום אימפדנס הכניסה "מתרחק" מערכו של Z_C מה שגורם להפרש $Z_{in} - Z_C$ לגדול בערך מוחלט. והרי זה גורם לגדילתו של מקדם ההחזרה בערכו המולט. ✓

2. מדוע מתקבל תיאום עבור הארכת ה-stub ב- $\frac{\lambda_0}{2}$:

כפי שניתן לראות מהגרף של סעיף C, הארכת stub בחצי אורך גל עדיין מניבה תיאום בתדר המרכזי. ההסבר נובע ישירות מסמית, כידוע $\frac{\lambda_0}{2}$ שקול לסיבוב של 360° על גבי הדיאגרמה כלומר חסר השפעה על החישובים להתאמה בתדר המרכזי. לכן החישוב שביצענו כדי לקבל את ההתאמה בתדר המרכזי לא מושפע מכפולות שלמות של $\frac{\lambda_0}{2}$ ובפרט עבור $\frac{\lambda_0}{2}$. ✓

3. השפעת אורך ה-stub על התאום:

קיים קשר ישיר בין אורך הגדם לבין "רגישות" לשינויים בתדר. ✓
נביט בנוסחה:

$$\Gamma_{in} = \Gamma_L \cdot e^{-j\beta d} = \Gamma_L \cdot e^{-\frac{j\omega d}{v}}$$

מנוסחה זו אפשר לראות שכל שהמרחק d גדול יותר, הרגישות של מקדם ההחזרה בכניסה כתוצאה משינוי בתדר הינה גדולה יותר. ✓
נביט בשני הגרפים בסעיף B, ניתן להבחין כי באופציה בה אורכי הגדמים ארוכים יותר, מתקבל שיפוע חד יותר ולמעשה התרחקות קיצונית יותר ממצב התיאום סביב התדר המרכזי. ✓
ההבדל באורכים גם בא לידי ביטוי בגרף ההספקים עבור שתי האופציות:
כאשר הקווים ארוכים יותר, ההספק שמתבזז כתוצאה מההחזרות הינו משמעותי ואף גדול מההספק שמגיע לעומס בחלק מהתדרים הסמוכים לתדר התיאום.
לעומת זאת, כשאר התיאום נעשה בעזרת הקווים הקצרים יותר, ההספק המגיע אל העומס הינו כמעט מלוא ההספק שנכנס למערכת גם בתדרים הסמוכים לתדר התיאום.

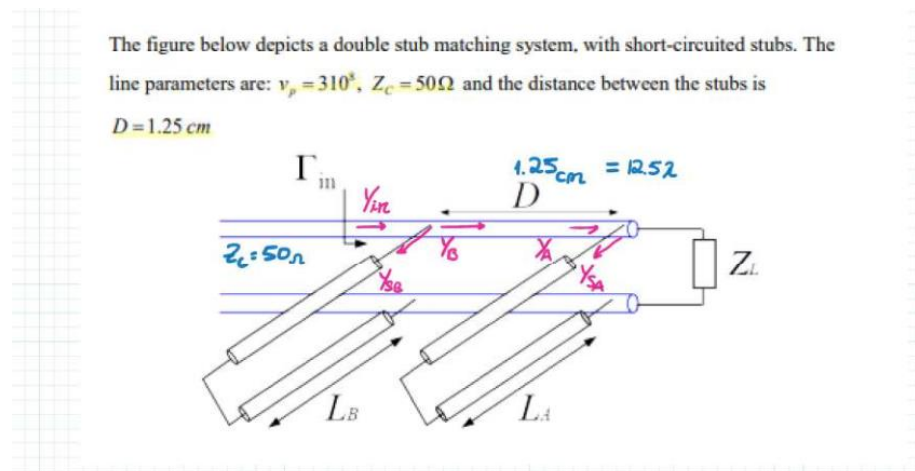
ההספק המבוזז הינו קטן יחסית לקווים הארוכים וברוב התדרים ההספק שמגיע אל העומס גדול מהספק המבוזז.

לסיכום, ככל שהקווים קצרים יותר, רוחב סרט התיאום רחב יותר. ✓

4. הסבר מדוע התוצאה בסעיף D מתאימה לשאר התוצאות: ✓
לפי התוצאות של סעיף זה ניתן לראות שההספק המירבי שמגיע אל העומס הינו בתדר המרכזי. ✓
עובדה זו תואמת את התוצאות מכיוון שבתדר המרכזי מקדם ההחזרה הינו מינימלי, אין החזרות, ותחת ההנחה שהקו חסר הפסדים, כל ההספק שנכנס אל הקו מועבר אל העומס. ✓
כשאר מקדם ההחזרה אינו אפסי, נוצרים דהדודים על גבי הקו. ✓
דהדודים אלה גורמים לכך שחלק מהזרם אינו מועבר אל העומס אלא יוחזרו מהעומס לכיוון המקור. ✓
תופעה זו גורמת לבזבז של הספק שהרי חלק מההספק לא מועבר לעומס, והוא חוזר למקור. ✓

סעיף א':

סכימת השאלה, וסימונים שלנו:



ערך סכום ת.ז. ומעבר באופרטור mod10 מניב:

$$X = (204783161 + 204356315) \bmod 10 = 6$$

הערה: ראינו לאחר פתרון כל התרגיל שהתכוונו לסכום הספרות עצמן. אך אנחנו מניחים שזה בסדר..
לכן: סכום ספרות! ש

$$Z_L = 100 + 60j$$

נחשב את אדמיטנס (באופן הכי פשוט באמצעות כלי חישובי לדוגמא wolfram alpha):

$$Y_L = 0.37 - 0.22j \quad \checkmark$$

נחשב את אורך הגל מהנתונים, ואז את היחס בין המרחק D לאורך גל בודד:

$$\lambda_0 = \frac{v}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 0.1 [m]$$

$$D = 0.0125 = \frac{\lambda_0}{8} \quad \checkmark$$

דרישת התיאום:

$$Z_{in} = Z_c = 50 \Omega$$

$$\bar{Y}_{in} = 1 \quad \checkmark$$

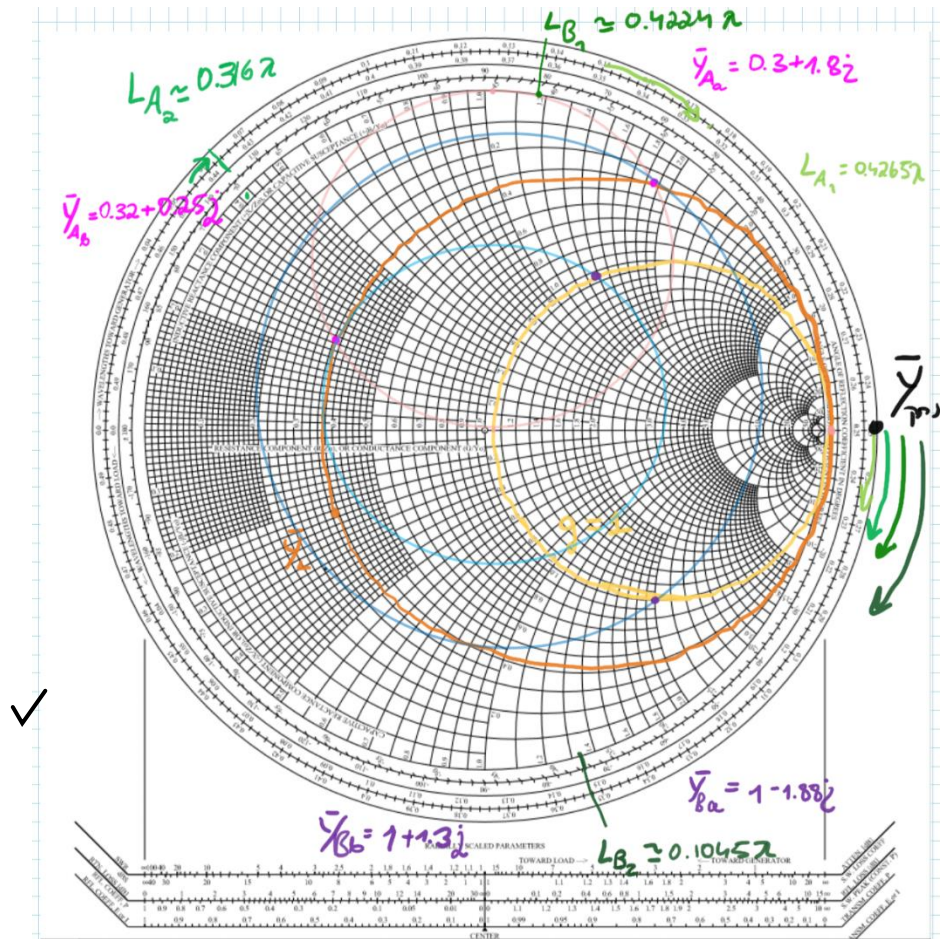
חיבור במקביל הוא סכום של אדמיטנסים, ולכן:

$$\bar{Y}_{in} = 1 = \bar{Y}_{SB} + \bar{Y}_B$$

נזכור שהגדם לא צורך אנרגיה, והעכבה שלו מדומה טהורה. לכן נסיק ש- \bar{Y}_B נמצא על המעגל ברדיוס $|\Gamma_L| = 1$ בדיאגרמת סמית'. נשרטטו – מעגל **צהוב** באיור מטה. \checkmark

הקשר בין \bar{Y}_B לבין \bar{Y}_A הוא תזוזה של מרחק D בכיוון העומס, כלומר תזוזה של רבע מעגל ($D = \frac{\lambda_0}{8}$) נגד כיוון השעון על מנת לקבל מעגל שיתאר את ערכי \bar{Y}_A האפשריים. זהו המעגל **הורוד**.

כעת נמקם את הערך הממשי של העומס $Y_L = 0.37 - 0.22j$ בדיאגרמת סמית'. נעיר שבשלב זה אנו לא יודעים מה הערך המדומה כי הערך המדומה של \bar{Y}_A הוא סכום הערכים המדומים של העומס ושל הגדם B – כמו שלמדנו בתרגול. זהו המעגל **הכתום**. \checkmark



נקודות החיתוך בין שני המעגלים ה**כתום** ה**הורוד** הם ערכי \bar{Y}_A האפשריים, מהדיאגרמה נשלוף:

$$\bar{Y}_{A,1} = 0.3 + 1.8j \rightarrow \bar{Y}_{sA,1} = 1.8j - (-0.22j) = 2.02j$$

$$\bar{Y}_{A,2} = 0.3 + 0.25j \rightarrow \bar{Y}_{sA,2} = 0.25j - (-0.22j) = 0.47j$$

נחשב את אורכי הגדמים לפי הטכניקה שלמדנו (ראו דיאגרמה):

$$L_{A,1} = 0.4265 \cdot \lambda_0$$

$$L_{A,2} = 0.316 \cdot \lambda_0$$

חישוב גדם B: נבצע "הזזה" של נקודות $\bar{Y}_{A,2}, \bar{Y}_{A,1}$ לכיוון המקור באורך D , כלומר הפעם רבע מעגל עם כיוון השעון (או לחילופין עם סרגל זווית של 90 מעלות ביחס למרכז הדיאגרמה). ונקבל:

$$\bar{Y}_{B,1} = 1 - 1.88j \rightarrow \bar{Y}_{sB,1} = 1.88j$$

$$\bar{Y}_{B,2} = 1 + 1.3j \rightarrow \bar{Y}_{sB,2} = -1.3j$$

נחשב את אורכי הגדמים לפי הטכניקה שלמדנו (ראו דיאגרמה):

$$L_{B,1} = 0.4224 \cdot \lambda_0$$

$$L_{B,2} = 0.1045 \cdot \lambda_0$$

אם היינו נדרשים לממש בפועל עבור מערכת פיזית את התיאום, היינו בוחרים באורכים הקצרים יותר, כלומר באפשרות 2:

אמנם?

$$L_A = 0.316 \cdot \lambda_0$$

$$L_B = 0.1045 \cdot \lambda_0$$

סעיף ב':

חישבנו באמצעות הפונקציה stub2 שבספרייה Electromagnetic Waves & Antennas Toolbox במטלב את אורך הגדמים לתיאום. בדקנו שספרייה זו אכן מחשבת את אורך הגדמים באופן אנליטי¹.

התוצאות שהתקבלו:

אפשרות 1:

$$L_{A1} = 0.425 \cdot \lambda_0, L_{B1} = 0.4539 \cdot \lambda_0$$

אפשרות 2:

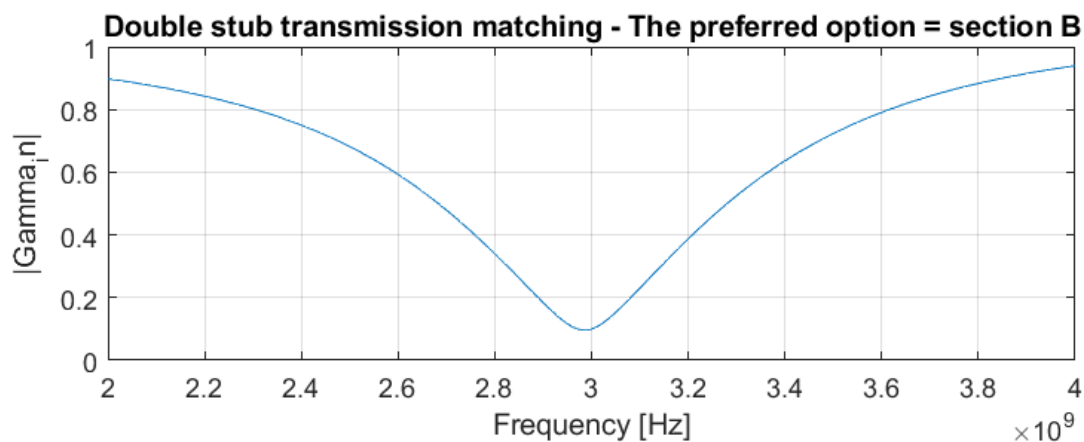
$$L_{A2} = 0.3269 \cdot \lambda_0, L_{B2} = 0.101 \cdot \lambda_0$$

אשר קרובות לתוצאות שקיבלנו בסעיף א' (פחות מ-10% שגיאה יחסית). על מנת למנוע שגיאה נגררת כתוצאה מחישוב בדיאגרמת סמית' ולהגברת הדיוק בסעיפים הבאים, השתמשנו בערכים שחושבו באמצעות הפונקציה המובנית. ✓ כן יצרנו מאגר נתונים קטן של תוצאות חישוביות...
סיון ב-2013, אילנה שמש זכתה...

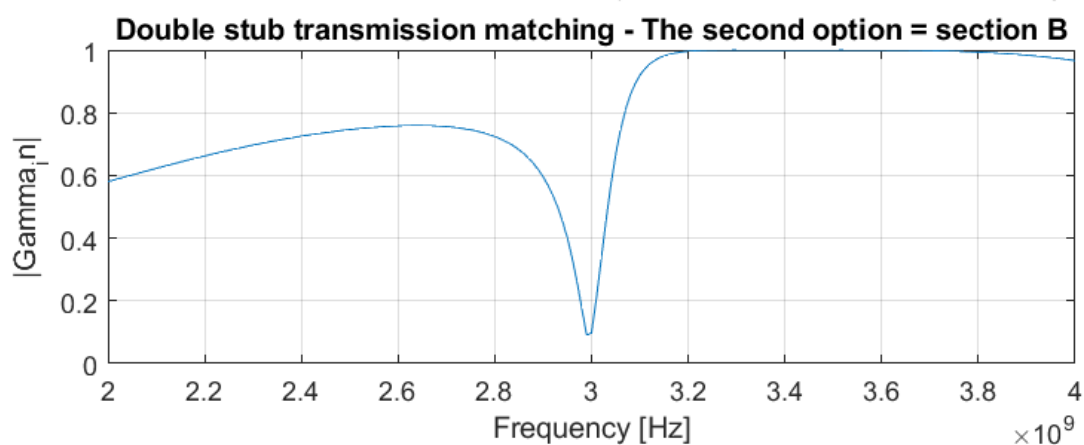
לאחר מכן ביצענו חישוב של מקדם ההחזרה בכניסה על פי הנוסחאות שפותרו בכיתה (ראו פונקציה simulate), והרצנו את החישוב עבור שני זוגות אורכי הגדמים. ✓

להלן התוצאות שהתקבלו עבור 2 האפשרויות:

¹ <http://ecweb1.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch13.pdf> page 17



✓



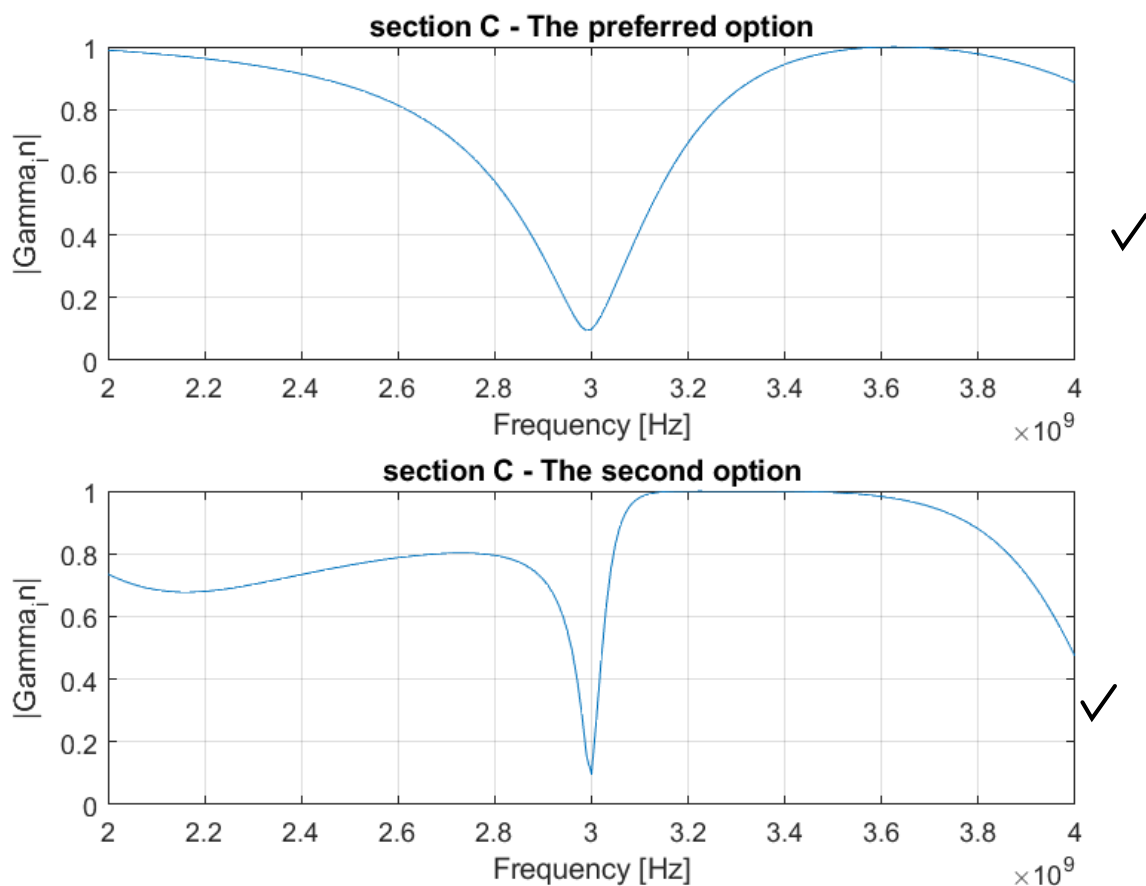
✓

כאשר כפי שניתן לראות, עבור שתי האפשרויות מתקבלת Γ_{IN} מינימלית עבור $f_0 = 3 \text{ GHz}$.

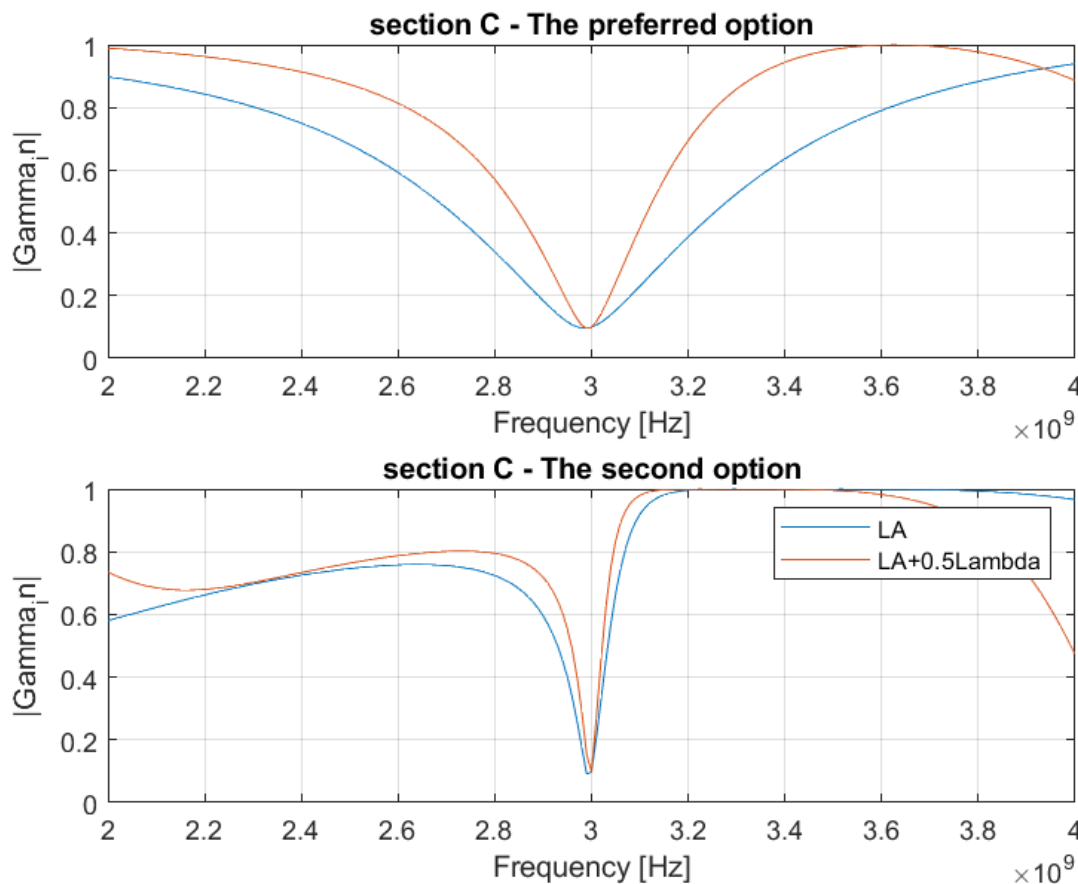
[סעיף ג':](#)

נחזור על הסעיף רק שכעת נציב $L_A = L_A + \frac{\lambda_0}{2}$.

להלן התוצאות שהתקבלו עבור 2 האפשרויות:



✓. $f_0 = 3 \text{ GHz}$ מינימלית עבור Γ_{IN} מתקבל שתי האפשרויות מתקבלות, עבור שני האפשרויות מתקבל Γ_{IN} מינימלית עבור $f_0 = 3 \text{ GHz}$.
 השוואה לתוצאות מסעיף B: כעת נציג את תוצאות הגרפים מסעיפים B ו-C באותו גרף עבור כל אחת מהאפשרויות
 בנפרד:



כפי שניתן לראות, הגרפים שונים זה מזה, פרט לתדר המרכזי.

הסבר מדוע המקדם ההחזרה נשאר זהה לאחר הארכת הקווים:

הארכת הstub בחצי אורך גל עדיין מניבה תיאום בתדר המרכזי.

ההסבר נובע ישירות מגרף סמית, כידוע $\frac{\lambda_0}{2}$ שקול לסיבוב של 360° על גבי הדיאגרמה כלומר חסר השפעה על החישובים להתאמה בתדר המרכזי. לכן החישוב שביצענו כדי לקבל את ההתאמה בתדר המרכזי לא מושפע מכפולות שלמות של $\frac{\lambda_0}{2}$ ובפרט עבור $\frac{\lambda_0}{2}$.

ההסבר לשוני במקדם ההחזרה (פרט לתדר המרכזי) כתוצאה מהארכת הקווים:

אינטואיטיבית, ניתן להסביר את השוני מתוך שיקולי הספק.

כפי שלמדנו, ככל שהקווים ארוכים יותר, ההספק ה"מבוזבז" גדל. כלומר לא יתכן שנאריך את הקווים ללא הפסד הספק, מכאן שמקדם ההחזרה מוכרח לגדול בקרבת תדר ההתאמה.

הסבר נוסף נובע מהעובדה שהארכת קווים מגדילה את ה"רגישות" של מקדם ההחזרה לשינויים בתדר.

נביט בנוסחה:

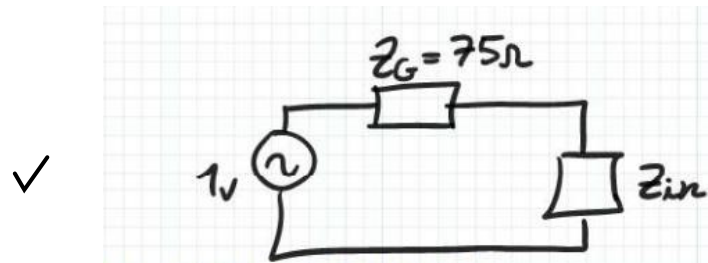
$$\Gamma_{in} = \Gamma_L \cdot e^{-j\beta d} = \Gamma_L \cdot e^{-\frac{j\omega d}{v}}$$

מנוסחה זו אפשר לראות שכלל שהמרחק d גדול יותר, הרגישות של מקדם ההחזרה בכניסה כתוצאה משינוי בתדר הינה גדולה יותר. ✓
ואכן מההבדלים שרואים בגרפים של סעיף זה, ניתן להבחין כי באופציה בה אורכי הגדמים ארוכים יותר, מתקבל שיפוע חד יותר ולמעשה התרחקות קיצונית יותר ממצב התיאום סביב התדר המרכזי.

שאלה 8!

סעיף ד':

סכימת המעגל החדש:



נמצא את ההספק הנספג בעומס בעזרת השלבים הבאים:

1. נמצא את אימפדנס הכניסה כתלות בתדר. מכיוון שמקדמי ההחזרה כתלות בתדר כבר בידינו (מסעיף ב) נוכל להשתמש בנוסחה:

$$Z_{in} = Z_c \cdot \frac{1 + \Gamma_{IN}}{1 - \Gamma_{IN}} \quad \checkmark$$

2. נמצא את המתח בכניסה לקו באמצעות מחלק מתח בין התנגדות המקור לבין אימפדנס הקניסה שמצאנו בשלב הקודם:

$$V_{in} = V_G \cdot \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_G} \quad \checkmark$$

3. נמצא את המתח בכניסה הנובע מהגל המתקדם לכיוון העומס באמצעות הנוסחה:

$$V_{in}^+ = \frac{V_{in}}{1 + \Gamma_{IN}} \quad \checkmark$$

4. נמצא את ההספק של הנכנס למערכת, אשר מהווה למעשה את ההספק הכולל:

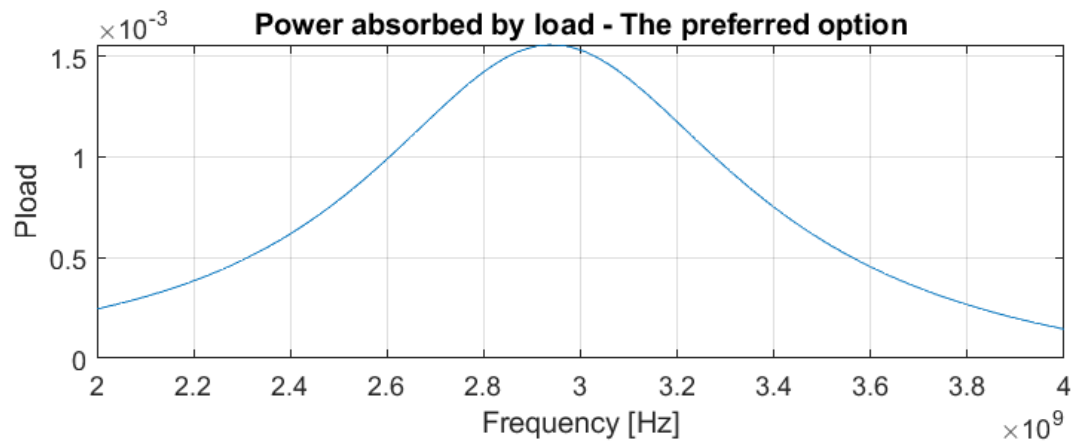
$$P^+ = \frac{1}{2} \cdot \frac{|V_{in}^+|^2}{Z_c} \quad \checkmark$$

5. נמצא את ההספק שנספג על ידי העומס בעזרת הנוסחה:

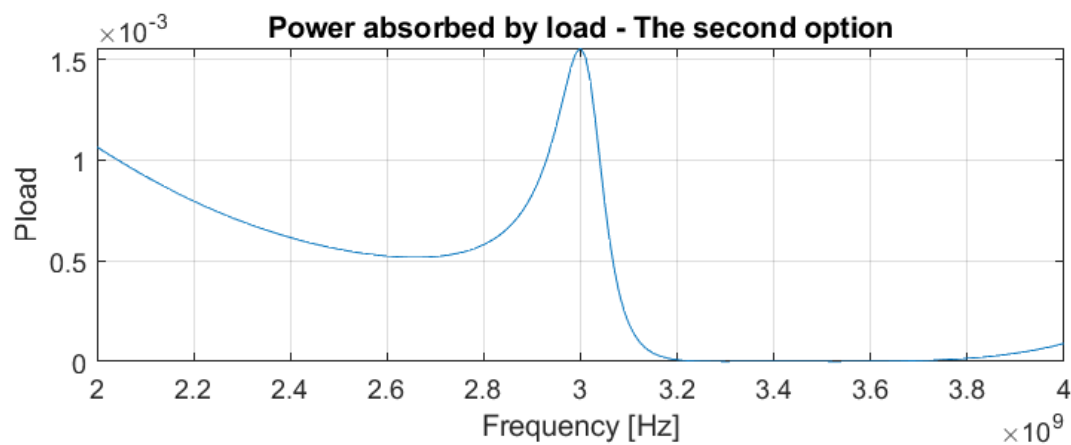
$$P_{load} = P^+ \cdot (1 - |\Gamma_{IN}|^2)$$

✓

להלן גרף ההספק בעומס שהתקבל:

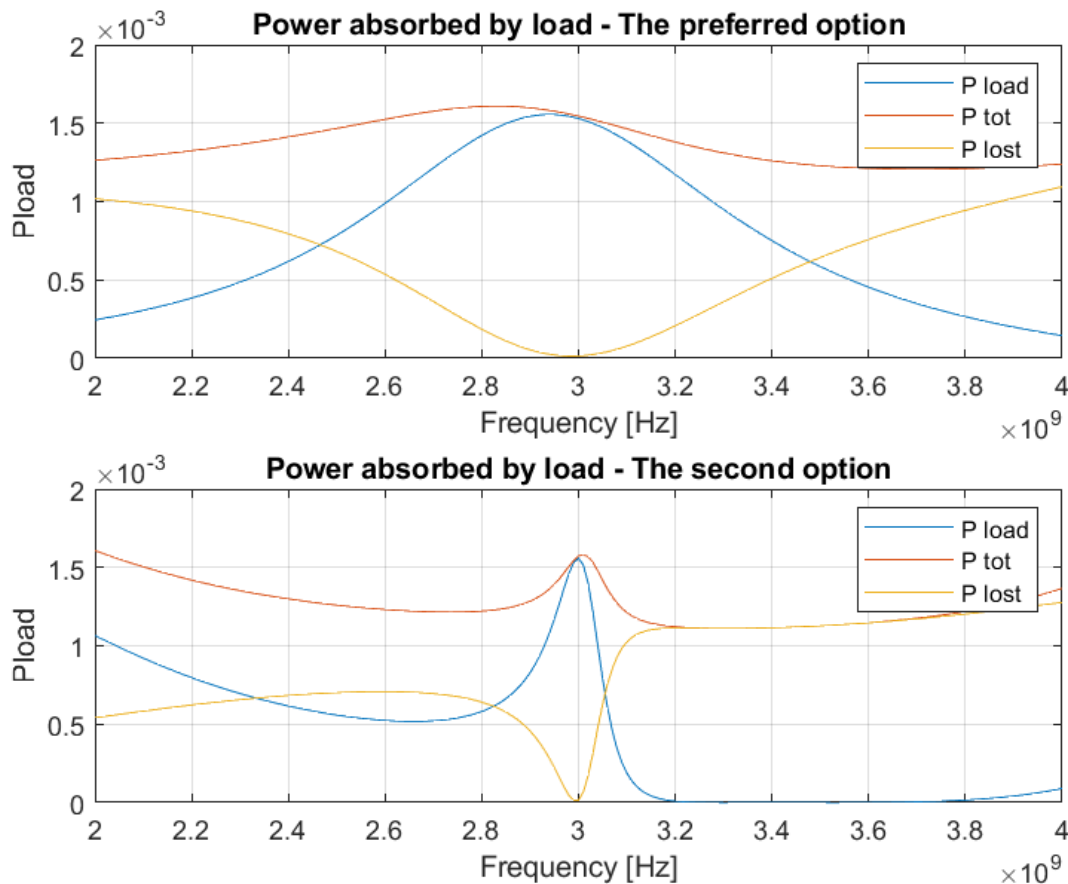


✓



✓

כדי לפשט את התוצאות שקיבלנו צירפנו גרף נוסף המתאר את שלושת ההספקים בקו: ההספק העומס, ההספק על Z_G וההספק הכולל:



מגרף זה ניתן לראות שההספק הכולל שנכנס למערכת משתווה להספק הנספג בעומס בדיוק בתדר התיאום, כמצופה.

שהרי לפי ההגדרה, תיאום משמה כל ההספק מגיע אל העומס.

אפשר לראות שאך ורק בתדר התיאום ההספק המתבזבז כתוצאה מהחזרות הינו אפס כמצופה. ✓

הקשר לתוצאות בסעיף B:

מאופן חישוב ההספק שהצגנו לעיל, אפשר לראות בברור בנוסחה של שלב 5, כי ההספק שמגיע אל העומס תלוי במקדם ההחזרה בערך מוחלט, כל שכלל שמקדם ההחזרה גדול יותר, פחות הספק מגיע אל העומס.

מכאן, אפשר לראות בברור כי בתדרים בהם הערכים בגרף של סעיף B גדולים יותר, ההספק שמגיע אל העומס נמוך יותר. ✓

לענוה!

נספח: קוד Matlab:

```
clc;
clear all;
close all;
%% check our results
zL=2+1.6*1i;
dl2= stub2(zL,1/8,'ss');

%% Section A
zC = 50;
Vp = 3*(10^8); %m/s
f = 2*(10^9):10*(10^6):4*(10^9); %frequency range
f0=3*(10^9);
D = 0.0125; %m
zL = 100+1j*60; %ohm

Lambda = Vp./f; %f %m
lambda0=Vp/f0; %central wavelength

beta = (2*pi)./Lambda;
beta0 = (2*pi)/lambda0;

%Option1
L_B1 = 0.4224*lambda0; %OUR ANSWER IS: 0.4224
L_B1 = 0.4539*lambda0; %STUB2 ANSWER IS: 0.4539

L_A1 = 0.4265*lambda0; %OUR ANSWER IS: 0.4265
L_A1 = 0.425*lambda0; %STUB2 ANSWER IS: 0.425

%Option2
L_B2 = 0.1045*lambda0;%OUR ANSWER IS: 0.1045
L_B2 = 0.101*lambda0; %STUB2 ANSWER IS: 0.101

L_A2 = 0.316*lambda0;
L_A2 = 0.3269*lambda0; %STUB2 ANSWER IS: 0.3269

%% Section B

GamaIn_1=simulate(zC,zL,beta,beta0,D, L_A1, L_B1);
GamaIn_2=simulate(zC,zL,beta,beta0,D,L_A2,L_B2);

figure('Name','Section B','NumberTitle','off');
subplot(2,1,2);
plot(f,abs(GamaIn_1));
grid on
ylabel('|Gamma_in|');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('Double stub transmission matching - The second option = section B');

subplot(2,1,1);
plot(f,abs(GamaIn_2));
grid on
ylabel('|Gamma_in|');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('Double stub transmission matching - The preferred option = section B');

%% Section C

GamaIn_1C=simulate(zC,zL,beta,beta0,D, L_A1+0.5*lambda0, L_B1);
GamaIn_2C=simulate(zC,zL,beta,beta0,D, L_A2+0.5*lambda0, L_B2);

figure('Name','Section C','NumberTitle','off');
subplot(2,1,2);
%plot(f,abs(GamaIn_1));
%hold on
plot(f,abs(GamaIn_1C));
grid on
%legend('LA','LA+0.5Lambda');
ylabel('|Gamma_in|');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('section C - The second option');
subplot(2,1,1);
%plot(f,abs(GamaIn_2));
```

```
%hold on
plot(f,abs(GamaIn_2C));
grid on
%legend('LA', 'LA+0.5Lambda');
ylabel('|Gamma_in|');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('section C - The preferred option');

%% Section D

[Pload1,Pin1]=calcPower(zC,GamaIn_1);
[Pload2, Pin2]=calcPower(zC,GamaIn_2);

figure('Name','Section D','NumberTitle','off');
subplot(2,1,2);
plot(f,Pload1);
grid on
ylabel('Pload');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('Power absorbed by load - The second option');
subplot(2,1,1);
plot(f,Pload2);
grid on
ylabel('Pload');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('Power absorbed by load - The preferred option');

%% Section D- explanation

figure('Name','Section D- exp','NumberTitle','off');
subplot(2,1,2);
plot(f,Pload1);
hold on
plot(f,Pin1);
hold on
plot(f,Pin1-Pload1);
legend('P load','P tot','P lost');
grid on
ylabel('Pload');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('Power absorbed by load - The second option');
subplot(2,1,1);
plot(f,Pload2);
hold on
plot(f,Pin2);
hold on
plot(f,Pin2-Pload2);
legend('P load','P tot','P lost');
grid on
ylabel('Pload');
xlabel('Frequency [Hz]');
title('Power absorbed by load - The preferred option');

function [Pload,Ptot]=calcPower(zC,GamaIn)
    VG=1; %Volt
    ZG=75; %ohm

    Zin = zC.*(1+GamaIn)./(1-GamaIn);
    Vin = VG.*(Zin./(ZG+Zin)); % voltage divider
    Vin_plus = Vin./(1+GamaIn);
    P_plus = 0.5.*(1./zC).*(abs(Vin_plus).^2); % this is the power that "enters" the transmissiion line
    Pload = P_plus.*(1- abs(GamaIn).^2);
    Ptot = P_plus;
end

function GamaIn=simulate(zC,zL,beta,beta0,D,L_A,L_B)

    YL = 1./zL;
    YsA = 1./(1j*zC*tan(beta.*L_A));
    YA = YsA+YL;
    Z_A = 1./YA;
    GamaA = (Z_A-zC)./(Z_A+zC);

    %calculate YinB
    Z_B = zC*((1+GamaA.*exp(-2.*1j.*beta.*D))./(1-GamaA.*exp(-2.*1j.*beta.*D)));
    YB = (1./Z_B); % Y3

    %calculate Yin
    YsB = 1./(1j*zC*tan(beta.*L_B));
    Yin = YsB + YB;
```

204356315 אור בהרי
204783161 מיכל קרן

```
Zin = 1./Yin;  
GamaIn = (Zin-zC)./(Zin+zC); % Gama In Calculation  
end
```