

פרויקט פיספייס

טבלת דרישות תכנון:

$Gain - A_v$	$f_{3db,Low}$	$f_{3db,High}$	M_1	M_2	R_{in}	R_{out}	R_{load}
62 [db]	18 [Khz]	1.8 [Mhz]	40	-20	52 [KΩ]	52 [KΩ]	56 Ω

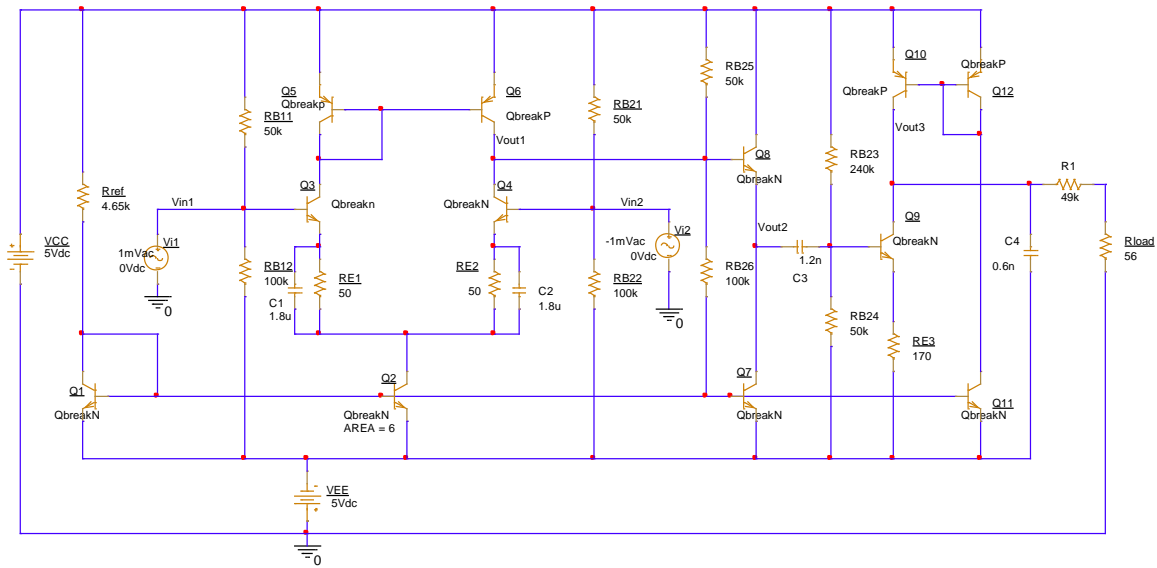
טבלה 2- דרישות תכנון

לפי הטבלה של דרישות התכנון נוכל לחשב את ההגבר המקסימאלי הנדרש:

$$20\log_{10}|A_M| = 40 \rightarrow A_M = 10^{\frac{40}{20}} = 1259 [-]$$

ניתוח בניית המגבר על ידי חיבור דרגות :

- **ראי הזרם:** ראי הזרם שלי בנוי בעזרת שני טרנזיסטורי NPN Q_1, Q_2 ונגד R_{ref} שבעזרתו נוכל לשלוט על הזרם, בנוסף במאפיינים של הטרנזיסטור Q_2 שנמצא מתחת לדרגה הדיפרנציאלית הוגדר $AREA=6$ כך שבעזרת השינוי הזה יכולתי לדחוף זרם פי 6 מהזרם של טרנזיסטור Q_1 .
- **הדרגה הראשונה:** הדרגה הראשונה הינה דרגה דיפרנציאלית (מגבר הפרש) עם עומס אקטיבי מסוג common emitter, עם נגדי ניוון באמיטר שבמקביל אליהן מחוברים הקבלים C_1, C_2 כדי להגדיל את ההגבר בתדרי ביניים וכדי להוסיף קוטב בתדרים נמוכים, בנוסף יש לי את נגדי ממתח $R_{B11}, R_{B12}, R_{B21}, R_{B22}$ כדי שנוכל לקבוע נקודת עבודה לדרגה, העומס האקטיבי נוסף בצורת ראי זרם פשוט כדי שנוכל להעביר את כל הזרם שהדרגה מקבלת לצד הימני שלה ובכך נקבל את כל ההגבר של דרגת common emitter ולא רק חצי ממנה כפי שלמדנו בהרצאות.
- **הדרגה השנייה:** הדרגה השנייה הינה פשוט דרגת common collector שמהווה באפר מתח היות והתנגדות הדרגה הראשונה גדולה בגלל העומס האקטיבי רציתי להוסיף באפר מתח שגם מחובר עם ראי הזרם כדי שנוכל לקבוע את נקודת עבודתו בצורה יותר קלה ולנצל את ההתנגדות הגדולה של הטרנזיסטור Q_7 כדי לקבל את מירב המתח מהדרגה הקודמת וגם את התנגדות מוצאו הקטנה כדי להעביר את מירב המתח לדרגה הבאה ושני נגדי ממתח כדי לעזור בקביעת נקודת עבודתי R_{B25}, R_{B26} , בנוסף בין הדרגה השנייה והשלישית הוספתי קבל C_3 כדי שאוכל להוסיף עוד קוטב בתדרים נמוכים.
- **הדרגה השלישית :** הדרגה השלישית הינה פשוט דרגת common emitter עם נגדי ממתח R_{B23}, R_{B24} כדי שנוכל לקבוע נקודת עבודה, ונגד ניוון כדי לשמור על נקודת עבודה יציבה וכדי שנוכל לשלוט על ההגבר לפי טבלת דרישות התכנון, בנוסף מחובר עומס אקטיבי בחיבור ראי זרם כדי להוציא הגבר מקסימאלי שנשלט העיקר על ידי נגד הניוון לפי טבלה מס. 2, והוספתי במוצא הדרגה קבל קטן C_4 כדי להוסיף קוטב בתדרים גבוהים שיהרוג את ההגבר בתדר שרוצים לפי טבלה מס. 2.



בניית המעגל המתואר

שרטוט המעגל המתואר:

$$R_{total} = 4.65 K\Omega + 4 \times 50 K\Omega + 3 \times 100 K\Omega + 240 K\Omega + 170\Omega + 2 \times 50\Omega \\ \approx 745 [K\Omega] < 5 [M\Omega]$$

$$C_{total} = 2 \times 1.8 \mu F + 1.2 nF + 0.6 nF \ll 1[mF]$$

ניתוח DC של המעגל:

נניח קודם כל פעיל קדמי עבור כל הטרנזיסטורים כלומר:

$$V_{BE} \approx 0.7 [V]$$

נתחיל בראי הזרם:

KVL:

$$V_{CC} - R_{ref}I_{C1} - V_{BE1} - V_{EE} = 0 \rightarrow I_{C1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{EE}}{R_{ref}} = 2 [mA]$$

היות וחוז' מטרנזיסטור מס.9 הכל מחובר לראי הזרם נוכל להסיק:

$$\rightarrow I_{C2} = 12 [mA] \rightarrow I_{C3} = I_{C4} = I_{C5} = I_{C6} = 6 [mA]$$

$$\rightarrow I_{C7,8,10,11,12} = 2 [mA]$$

נחשב את נקודת העבודה של טרנזיסטור Q_9 :

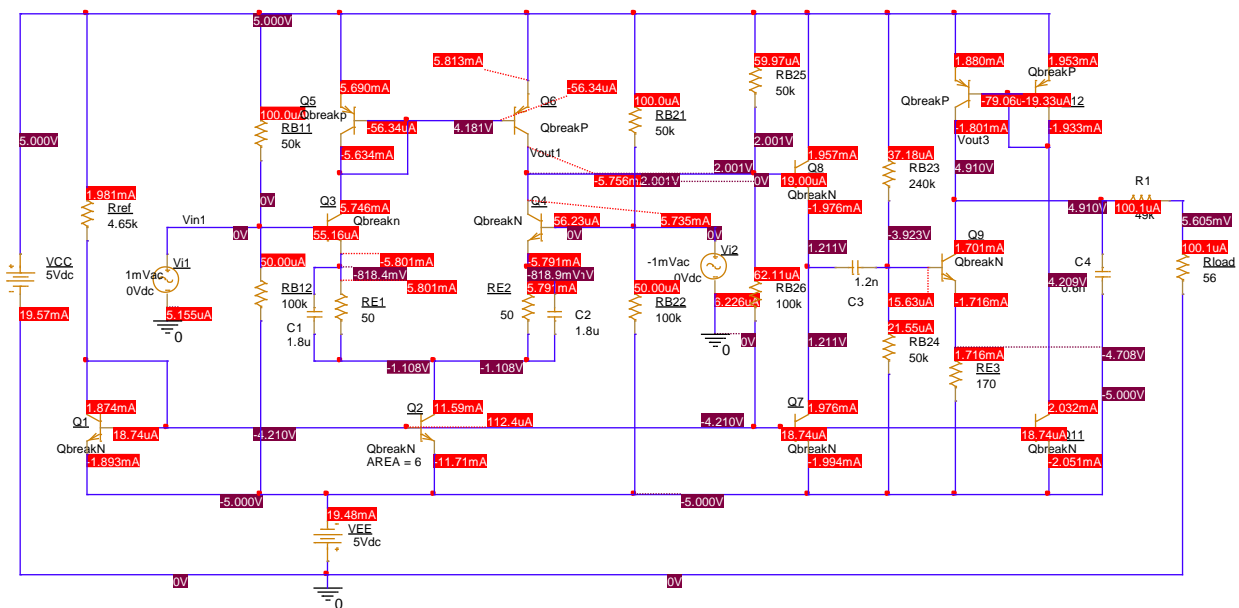
$$V_{BB3} = -(V_{CC} - V_{EE}) \cdot \frac{R_{B24}}{R_{B24} + R_{B23}} \approx -4 [v]$$

כך שסימן המינוס נובע מכיוון זרם בסיס הטרנזיסטור.

KVL:

$$V_{BB3} - V_{BE3} - I_{C3}R_{E3} - V_{EE} = 0 \rightarrow I_{C3} = \frac{V_{BB3} - V_{BE3} - V_{EE}}{R_{E3}} = 1.76 \text{ m}[A]$$

עכשיו נבצע סימולציית Bias ונבדוק את דיוק החישוב שלנו :



תוצאות סימולציית Bias

לפי תוצאות הסימולציה נבנה את הטבלה הבאה:

שגיאה [%]	סימולציה	תיאוריה	
6.5%	1.87 [mA]	2 [mA]	I_{C1}
11%	0.79 [V]	0.7 [V]	V_{BE1}
3.4%	11.59 [mA]	12 [mA]	I_{C2}
11%	0.79 [V]	0.7 [V]	V_{BE2}
4.1%	5.75 [mA]	6 [mA]	I_{C3}
14.6%	0.82 [V]	0.7 [V]	V_{BE3}
3.5%	5.79 [mA]	6 [mA]	I_{C4}
14%	0.82 [V]	0.7 [V]	V_{BE4}
5.1%	5.69 [mA]	6 [mA]	I_{C5}
14.6%	0.82 [V]	0.7 [V]	V_{BE5}
3.1%	5.81 [mA]	6 [mA]	I_{C6}
14.6%	0.82 [V]	0.7 [V]	V_{BE6}
1%	1.98 [mA]	2 [mA]	I_{C7}
11%	0.79 [V]	0.7 [V]	V_{BE7}
3.5%	1.96 [mA]	2 [mA]	I_{C8}
11%	0.79 [V]	0.7 [V]	V_{BE8}
2.2%	1.72 [mA]	1.76 [mA]	I_{C9}
11%	0.79 [V]	0.7 [V]	V_{BE9}
1%	1.8 [mA]	2 [mA]	I_{C10}

11%	0.79 [v]	0.7 [v]	V_{EB10}
1.6%	2.032 [mA]	2 [mA]	I_{C11}
11%	0.79 [v]	0.7 [v]	V_{BE11}
2.5%	1.95 [mA]	2 [mA]	I_{C12}
11%	0.79 [v]	0.7 [v]	V_{EB12}

טבלה 3: השוואת סימולציית Bias לחישוב הידני

אפשר לראות שבחלק מהתוצאות קיבלנו ערכים שמאוד קרובים לעומת כמה פעמים שקיבלנו שגיאה שהיא קצת מעל 10%, זה נובע מאי שימוש בשיטת אטרקציות והזנחת זרמי הבסיסים והיות Pspice עובד עם טמפרטורת חדר של 27° , דברים אלו השפיעו כמובן על תוצאות החישוב הידני.

נשתמש בתוצאות הסימולציה כדי לחשב את פרמטרי האות הקטן :

פרמטר	ערך
g_{m1}	$0.075 [\Omega^{-1}]$
$r_{\pi1}$	$1.33 [K\Omega]$
r_{e1}	$13.33 [\Omega]$
r_{o1}	$54.48 [K\Omega]$
g_{m2}	$0.46 [\Omega^{-1}]$
$r_{\pi2}$	$0.22 [K\Omega]$
r_{e2}	$2.17 [\Omega]$
r_{o2}	$8.63 [K\Omega]$
g_{m3}	$0.23 [\Omega^{-1}]$
$r_{\pi3}$	$0.435 [K\Omega]$
r_{e3}	$4.35 [\Omega]$

17.39 [K Ω]	r_{o3}
0.23 [Ω^{-1}]	g_{m4}
0.434 [K Ω]	$r_{\pi4}$
4.35 [Ω]	r_{e4}
17.39 [K Ω]	r_{o4}
0.23 [Ω^{-1}]	g_{m5}
0.434 [K Ω]	$r_{\pi5}$
4.35 [Ω]	r_{e5}
17.39 [K Ω]	r_{o5}
0.23 [Ω^{-1}]	g_{m6}
0.434 [K Ω]	$r_{\pi6}$
4.35 [Ω]	r_{e6}
17.39 [K Ω]	r_{o6}
0.079 [Ω^{-1}]	g_{m7}
1.266 [K Ω]	$r_{\pi7}$
12.66 [Ω]	r_{e7}
50.51 [K Ω]	r_{o7}
0.079 [Ω^{-1}]	g_{m8}
1.266 [K Ω]	$r_{\pi8}$
12.66 [Ω]	r_{e8}
52.02 [K Ω]	r_{o8}
0.069 [Ω^{-1}]	g_{m9}
1.454 [K Ω]	$r_{\pi9}$
14.54 [Ω]	r_{e9}
58.14 [K Ω]	r_{o9}
0.08 [Ω^{-1}]	g_{m10}
1.25 [K Ω]	$r_{\pi10}$
12.5 [Ω]	r_{e10}
47.39 [K Ω]	r_{o10}
0.08 [Ω^{-1}]	g_{m11}
1.25 [K Ω]	$r_{\pi11}$
12.5 [Ω]	r_{e11}

49.21 [KΩ]	r_{o11}
0.08 [Ω ⁻¹]	g_{m12}
1.25 [KΩ]	$r_{\pi12}$
12.5 [Ω]	r_{e12}
49.7 [KΩ]	r_{o12}

טבלה 4- פרמטרי אות קטן

חישוב הגברים בתדר ביניים:

• דרגה ראשונה:

$$R_{in1} = 2\tilde{R}_{in1} = 2(r_{\pi1} + R_{B21} || R_{B22} + (\beta + 1)r_{e1}) = 2 \times 27046 = 54.1 [K\Omega]$$

$$R_{out1} \approx r_{o6} || r_{o4} = 8.61 [K\Omega]$$

$$A_{V,dif} = g_{m4}(r_{o6} || r_{o4}) = 1992.03 [-]$$

• דרגה שנייה:

$$R_{in2} = (R_{B25} || R_{B26}) || (r_{\pi8} + (\beta + 1)(r_{e8} + r_{o7})) \approx 33.121 [K\Omega]$$

$$R_{out2} = r_{e8} = 12.66 [\Omega]$$

$$A_{V,2} = \frac{g_{m8}r_{o7}}{1 + g_{m8}r_{o7}} \approx 1 [-]$$

• דרגה שלישית:

$$R_{in3} = (R_{B23} || R_{B24}) || (r_{\pi9} + (\beta + 1)(r_{e9} + R_{E3} + \frac{r_{o10}}{1 + g_{m9}r_{o9}})) \approx 41.11 [K\Omega]$$

$$R_{out3} = r_{o10} || (r_{o9} + (1 + g_{m9}r_{o9})(R_{E3} + \frac{r_{\pi9} + (R_{B23} || R_{B24})}{\beta + 1})) || R_1 \approx 50 [K\Omega]$$

$$A_{V,3} = \frac{g_{m8}(r_{o9} || r_{o10})}{1 + g_{m8}(R_{E3} + \frac{r_{\pi9} + (R_{B23} || R_{B24})}{\beta + 1})} \approx 0.77 [-]$$

• הגבר כולל:

$$A_V = A_{V,dif} \cdot \frac{R_{in2}}{R_{out1} + R_{in2}} \cdot A_{V2} \cdot \frac{R_{in3}}{R_{out2} + R_{in3}} \cdot A_{V3} \cdot \frac{R_{load}}{R_{out3} + R_{load}} = 1216.6 [-]$$

בעזרת תוצאות אלו נסכם בטבלה הבאה:

שגיאה [%]	סימולציה	תיאוריה	
0.132%	1973	1994.6	הגבר דרגה 1
0.1%	0.999	1	הגבר דרגה 2
4.8%	0.81	0.77	הגבר דרגה 3
0.37%	1220.06	1216.6	הגבר כולל

טבלה 5- סיכום הגברים

שגיאה [%]	תוצאות	דרישות תכנון	
-----------	--------	--------------	--

3.6%	54.1 [KΩ]	52 [KΩ]	התנגדות כניסה
5.5%	49.1 [KΩ]	52 [KΩ]	התנגדות מוצא
1%	61.37	62	הגבר db

טבלה 6- השוואה בין דרישות תכנון לתוצאות

תגובת התדר של המעגל:

• תדר ברך נמוך:

נמצא את $f_{3db,High}$ בעזרת שיטת קבועי זמן:

ההתנגדות שרואה קבל C_3 הינה:

$$R_{C3} = (r_{o7} || r_{o8}) || (R_{B23} || R_{B24}) || (\beta + 1) \left(\frac{r_{o10}}{1 + g_{m9} r_{o9}} + R_{E3} + r_{e3} \right) + r_{\pi} \approx 26.1 [K\Omega]$$

ההתנגדות שרואה הקבלים C_1, C_2 הינה:

$$R_{C1,2} = \frac{((R_{B21} || R_{B22}) + r_{\pi4})}{\beta + 1} + r_{e4} \approx 5.62 [\Omega]$$

$$\rightarrow f_{3db,Low} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{C3} \cdot C_3} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{C1,2} \cdot C_{1,2}} \approx 15.72 [KHz] + 2193.49 [KHz]$$

$$= 17913 [KHz]$$

• תדר ברך גבוה:

נמצא את $f_{3db,High}$ בעזרת שיטת קבועי זמן, ההתנגדות שרואה קבל C_4 הינה:

$$R_{C4} = r_{o10} || R_L + R_1 || r_{o9} || \left(\frac{1}{\beta + 1} \times (1 + g_{m10} r_{o10}) \right) \approx 149.8 [\Omega]$$

$$\rightarrow f_{3db,High} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{C4} \cdot C_4} = 1.77 [MHz]$$

נוכל לסכם את מה שקיבלנו בטבלה הבאה:

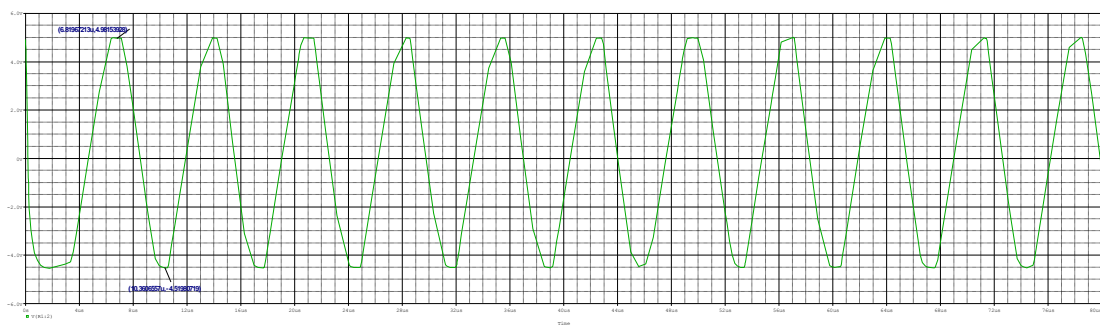
שגיאה [%]	סימולציה	תיאוריה	
0.84%	18.06 [KHz]	17.91 [KHz]	$f_{3db,Low}$
1.83%	1.803 [MHz]	1.77 [MHz]	$f_{3db,High}$
2.2%	1.79 [MHz]	1.75 [MHz]	Bandwidth

טבלה 7- סיכום תגובת תדר

בדיקת התנגדות המוצא:

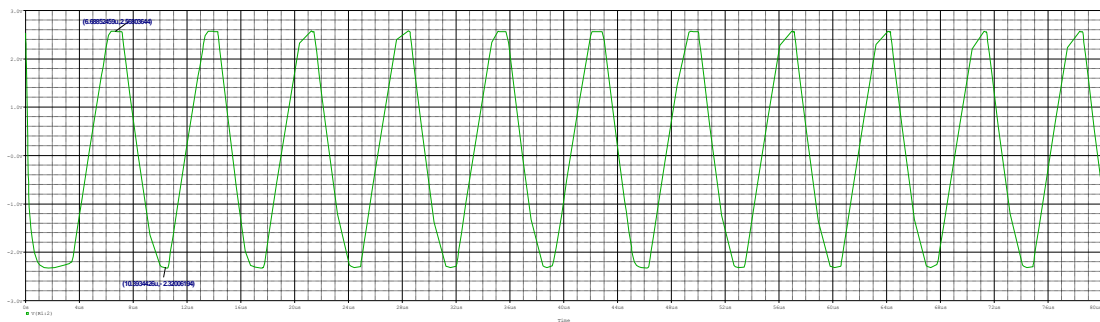
הגרפים הבאים התקבלו עבור מקור מתח סינוסידאלי בעל אמפליטודה של 0.1 מילי אמפר בתדירות 140 קילו הרץ:

- עבור עומס אינסופי (נגד בגודל $R_L = 500 [G\Omega]$) התקבל הגרף הבא :



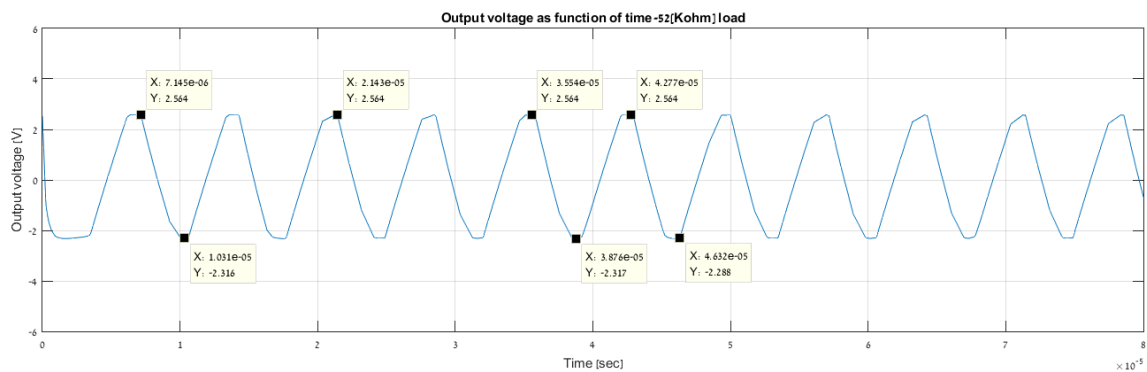
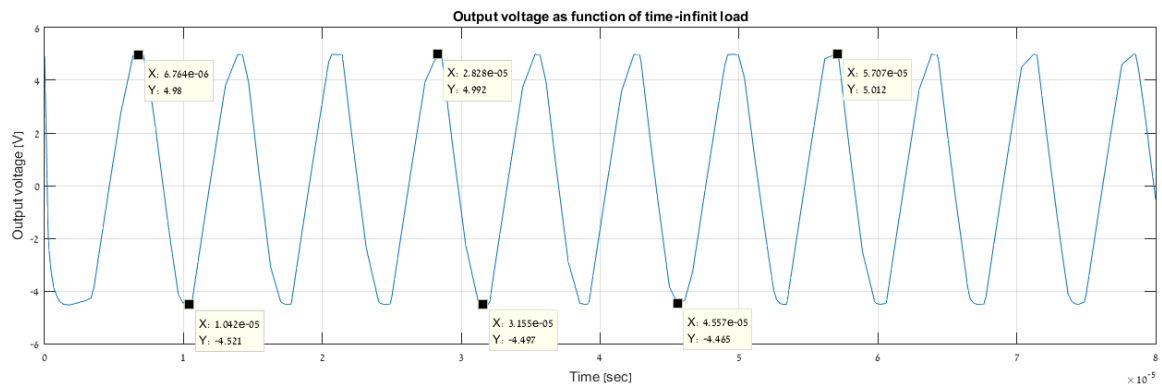
כותרת: מתח המוצא כפונקציה של הזמן עבור עומס אינסופי.
צירים: ציר x : זמן בשניות, ציר y : מתח בוולט.

- עבור עומס ששווה ל $R_L = 52 [K\Omega]$ התקבל הגרף הבא:



כותרת: מתח המוצא כפונקציה של הזמן עבור עומס של 52 קילו אוהם.
צירים: ציר X: זמן בשניות, ציר Y: מתח בוולט.

וכמובן בעזרת MATLAB נקבל :



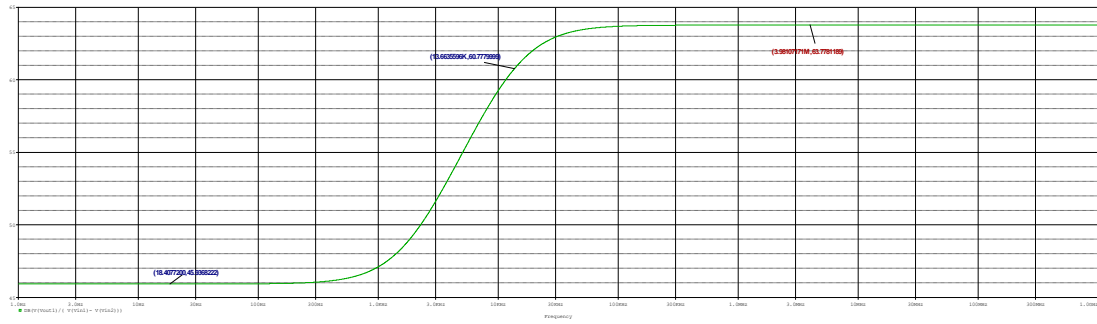
הסבר:

אפשר לראות מתוצאות הסימולציה שהתקבל עבור התנגדות עומס של $R_L = 52 [K\Omega]$ אמפליטודת מתח במוצא ששווה ל 2.56 וולט שהינה בקירוב שווה לחצי מאמפליטודת מתח המוצא עבור עומס אינסופי כלומר חתי מההגבר עבורו משמע שקיבלנו את מה שרצינו והתנגדות המוצא הינה אכן 52 קילו אוהם.

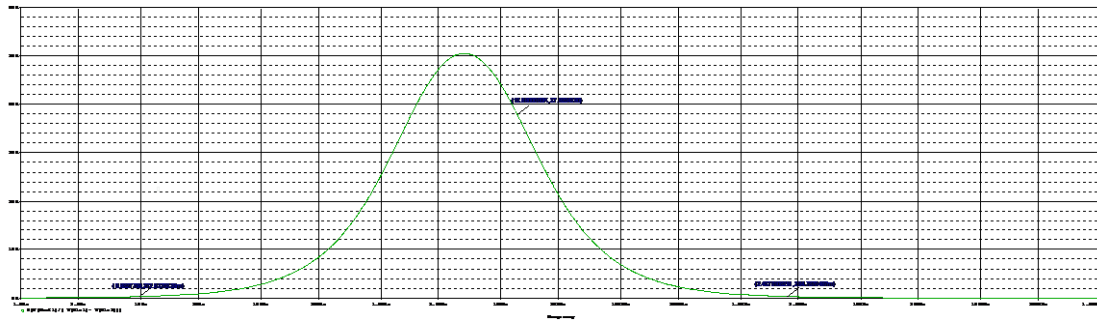
תוצאות סימולציה:

❖ הדרגה הראשונה:

• בעזרת Pspice:

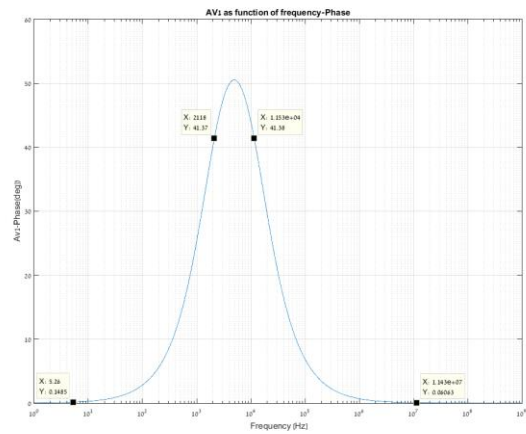
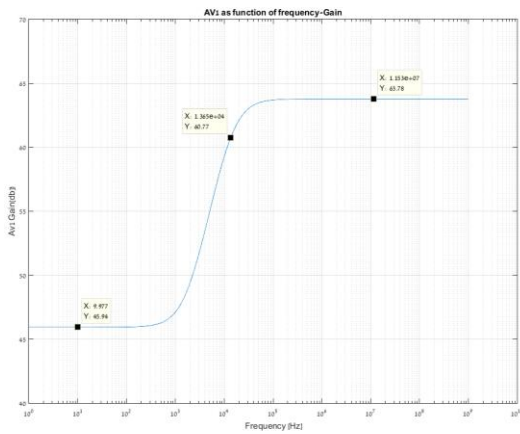


כותרת: הגבר הדרגה הראשונה כתלות בתדר (אמפליטודה).
צירים: ציר x : תדר Hz , ציר y : אמפליטודת הגבר db .



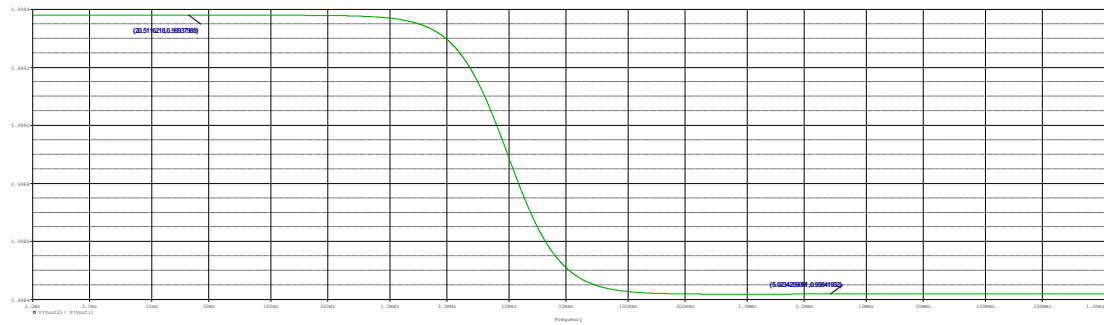
כותרת: הגבר הדרגה הראשונה כתלות בתדר (פאזה).
צירים: ציר x : תדר Hz , ציר y : פאזה הגבר במעלות.

• נציג גם בעזרת MATLAB (ברור יותר):

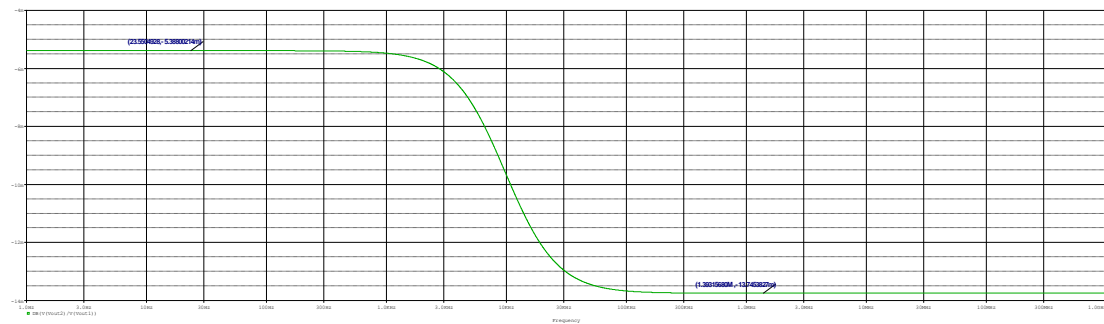


❖ הדרגה השנייה:

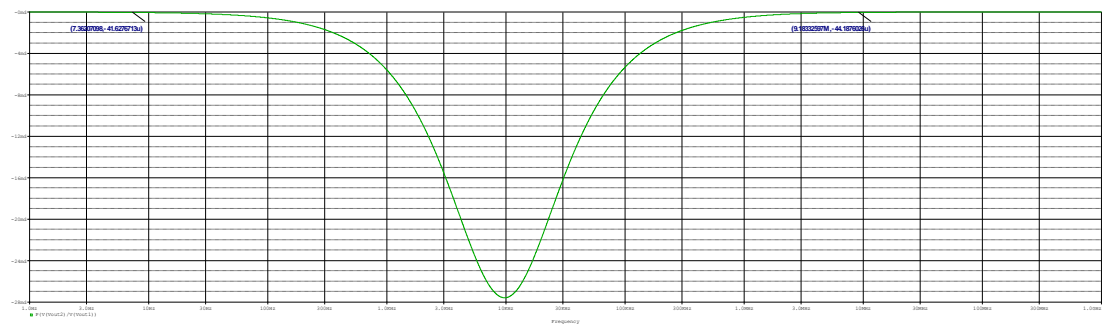
• בעזרת Pspice:



כותרת: הגבר הדרגה השנייה כתלות בתדר (אמפליטודה).
צירים: ציר x : תדר Hz , ציר y : אמפליטודת הגבר בוולט לוולט.

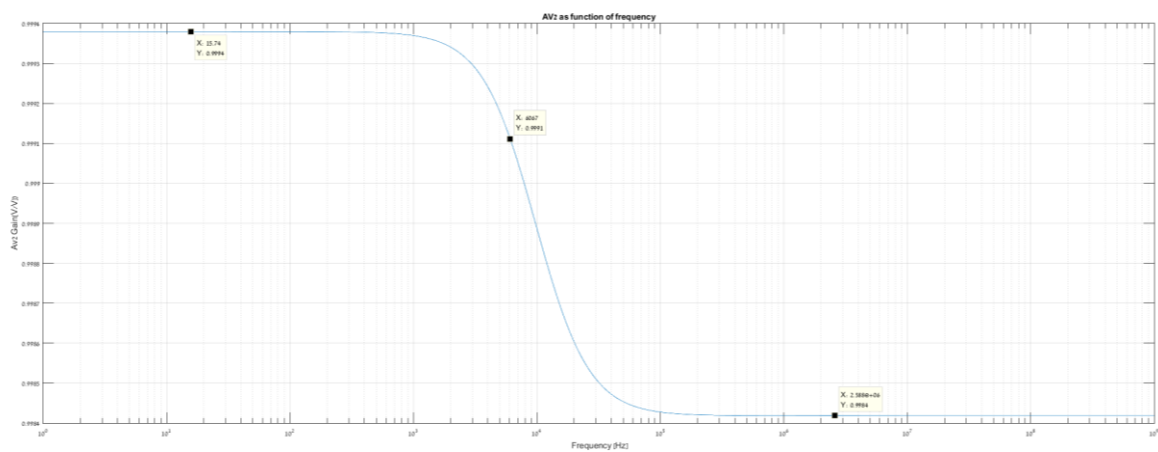
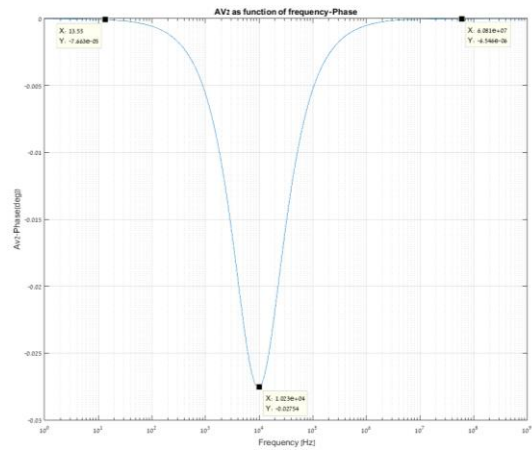
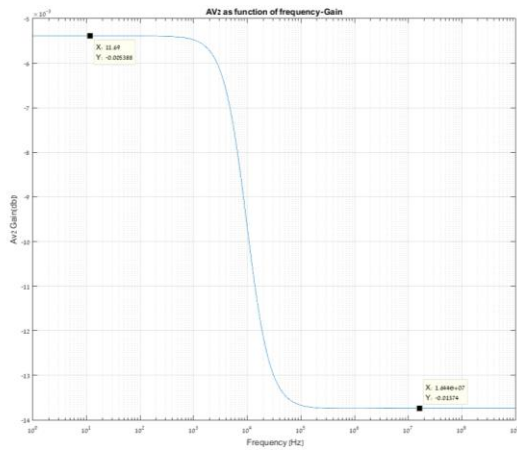


כותרת: הגבר הדרגה השנייה כתלות בתדר (אמפליטודה).
צירים: ציר x : תדר Hz , ציר y : אמפליטודת הגבר ב db .



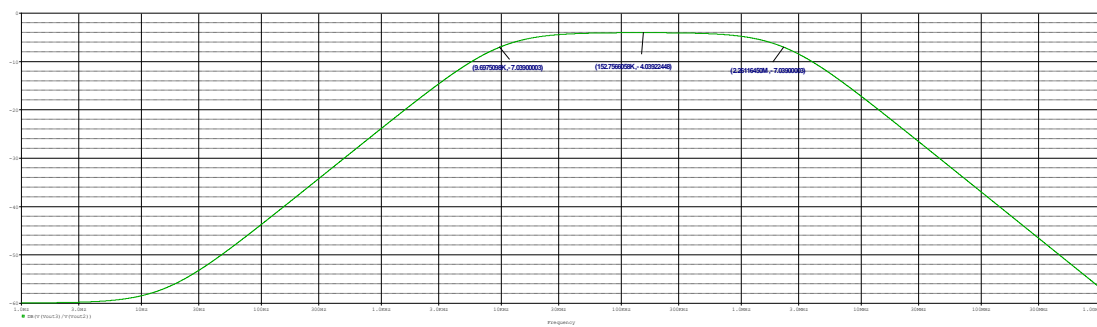
כותרת: הגבר הדרגה השנייה כתלות בתדר (פאזה).
צירים: ציר x : תדר Hz , ציר y : פאזה הגבר במעלות

- נציג גם בעזרת MATLAB (ברור יותר):

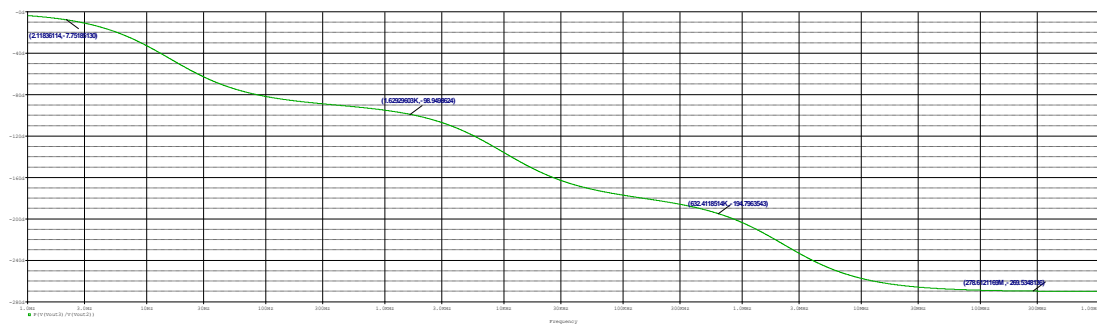


❖ הדרגה השלישית:

• בעזרת Pspice:

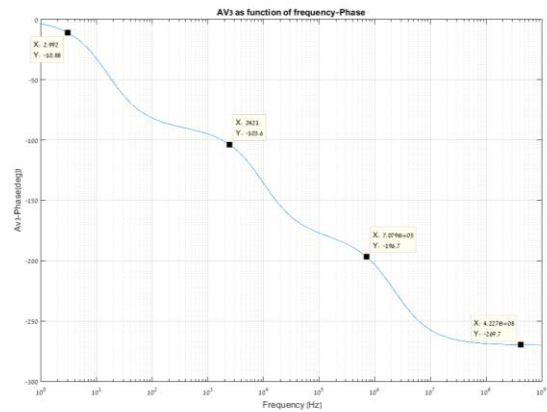
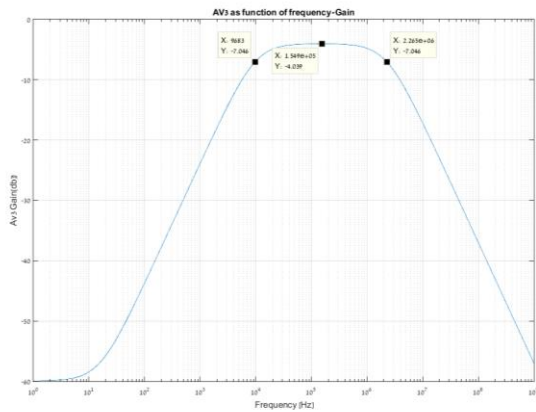


כותרת: הגבר הדרגה השלישית כתלות בתדר (אמפליטודות).
צירים: ציר x : תדר Hz , ציר y : אמפליטודות הגבר ב db .



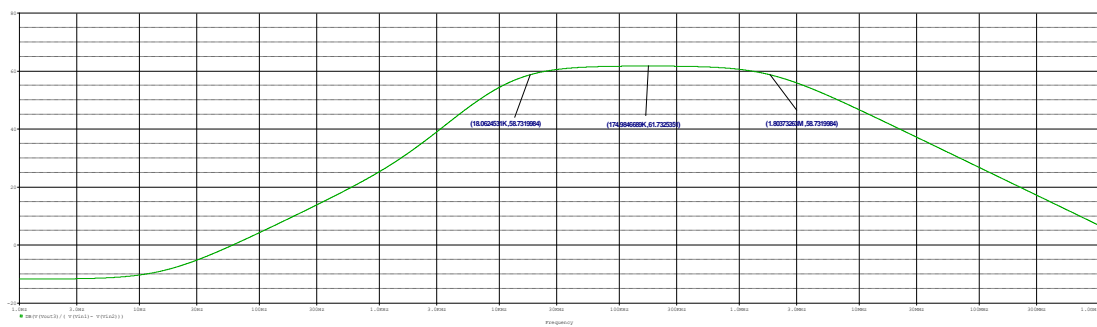
כותרת: הגבר הדרגה השלישית כתלות בתדר (פאזה).
צירים: ציר x : תדר Hz , ציר y : פאזה הגבר במעלות.

• נציג גם בעזרת MATLAB (ברור יותר):

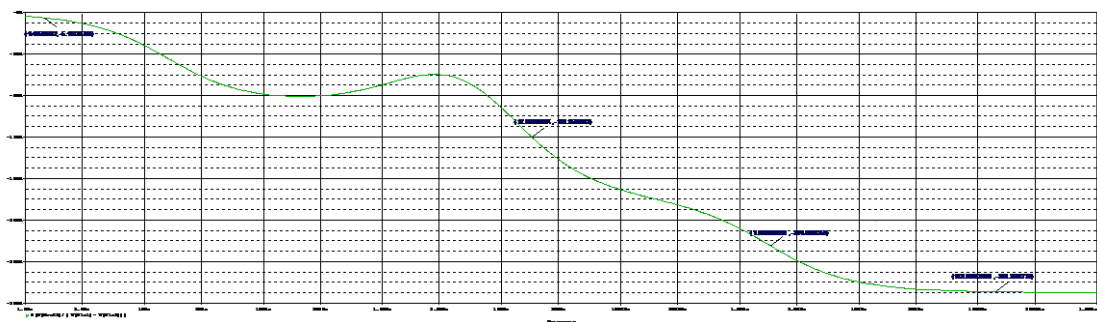


❖ הגבר כולל:

• בעזרת Pspice:



כותרת הגבר כולל כתלות בתדר (אמפליטודה).
צירים: ציר X: תדר Hz, ציר Y: אמפליטודת הגבר בdB.



כותרת. הגבר כולל כתלות בתדר (פאזה).
 צירים. ציר X : תדר Hz , ציר Y : פאזה הגבר במעלות.

• נציג גם בעזרת MATLAB (ברור יותר):

