



دانشگاه تهران  
پردیس دانشکده های فنی  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



# الكترونيک ۱

دکتر سنائی

پروژه نهایی

تقویت‌کننده ترانزیستوری سه طبقه

سروش مس فروش مشهد

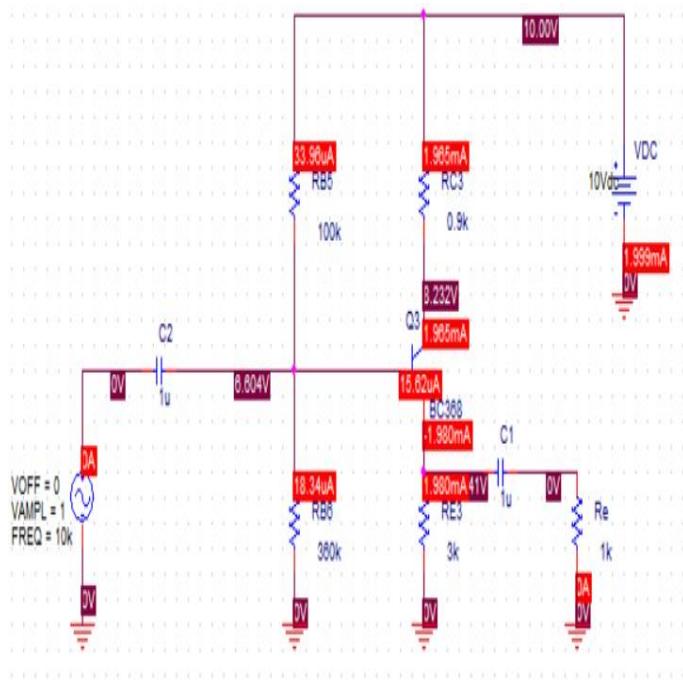
ش.د: ۱۹۸۴۷۲۰

تیر ° °

# ۱ بخش اول

## ۱.۱ پرسش ۱

در اینجا مقادیر مقاومت‌های شناور را به طور دلخواه به صورت زیر اختیار می‌کنیم.  
 $R_e = 1k\Omega$ ,  $R_{B_5} = 100k\Omega$



شکل ۱ : Bias Point simulation

با توجه به مقادیر به دست آمده برای جریان کلکتور و بیس، خواهیم داشت:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \rightarrow \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1965mA}{1562\mu A} \approx 126, \quad \beta = 126$$

سپس با کمک  $KVL$  در مسیر بیس-امیتر خواهیم داشت:

$$V_{th} = R_{th}I_B + V_{BE} + R_{E_r}I_C \xrightarrow{\text{چگنایی مقادیر}} 7.826 = 78.26 \times 15.62 \times 10^{-3} + V_{BE_{on}} + 3 \times 1965$$

$$\rightarrow V_{BE_{on}} = 0.708V$$

## ۲.۱ پرسش ۲

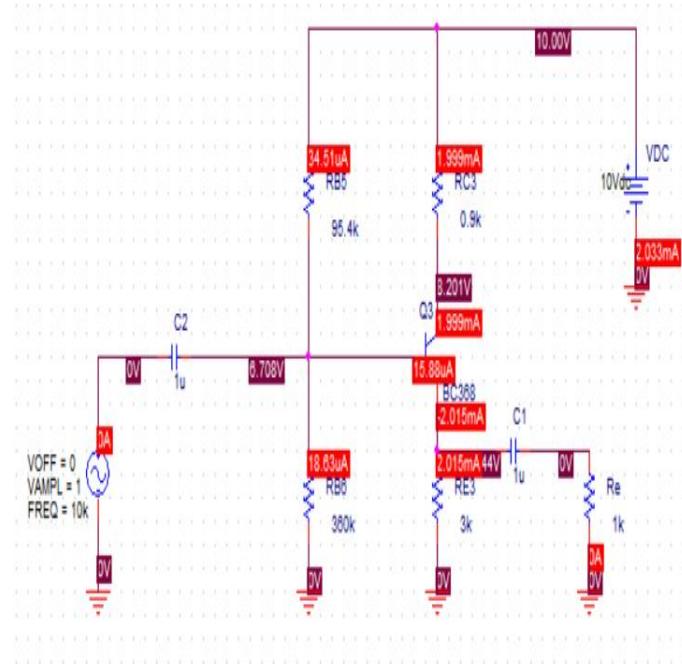
با استفاده از مقادیر به دست آمده در قسمت قبل طوری  $R_{B\Delta}$  را به دست می‌آوریم تا  $I_C = 2mA$  برای این منظور داریم:

$$V_{th} = R_{th}I_B + V_{BE} + R_{E\tau}I_C \xrightarrow{\frac{V_{th} = 36^\circ}{R_{th} = \frac{36^\circ R_{B\Delta}}{36^\circ + R_{B\Delta}}}} \frac{36^\circ}{36^\circ + R_{B\Delta}} = \frac{36^\circ R_{B\Delta}}{36^\circ + R_{B\Delta}} \times \frac{2}{126} + V_{BE_{on}} + 3 \times 2$$

$$\rightarrow \frac{36^\circ}{36^\circ + R_{B\Delta}} - \frac{72^\circ R_{B\Delta}}{126(36^\circ + R_{B\Delta})} = 670\lambda \rightarrow 453600 - 72^\circ R_{B\Delta} = 670\lambda(45360 + 126R_{B\Delta})$$

$$453600 - 304274.88 = (72^\circ + 845/20\lambda)R_{B\Delta} \rightarrow R_{B\Delta} = 95.4k\Omega$$

با شبیه‌سازی به صحت رقم به دست آمده پی می‌بریم.



شکل ۲: Collector Current

### ۳.۱ پرسش

می‌دانیم که در ترکیب کلکتور مشترک مقاومت ورودی به صورت زیر حادث می‌شود.

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel (r_\pi + (\beta + 1)r_o \parallel R_E) \xrightarrow{\text{صرف نظر از ارلی}} R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel (r_\pi + (\beta + 1)R_E)$$

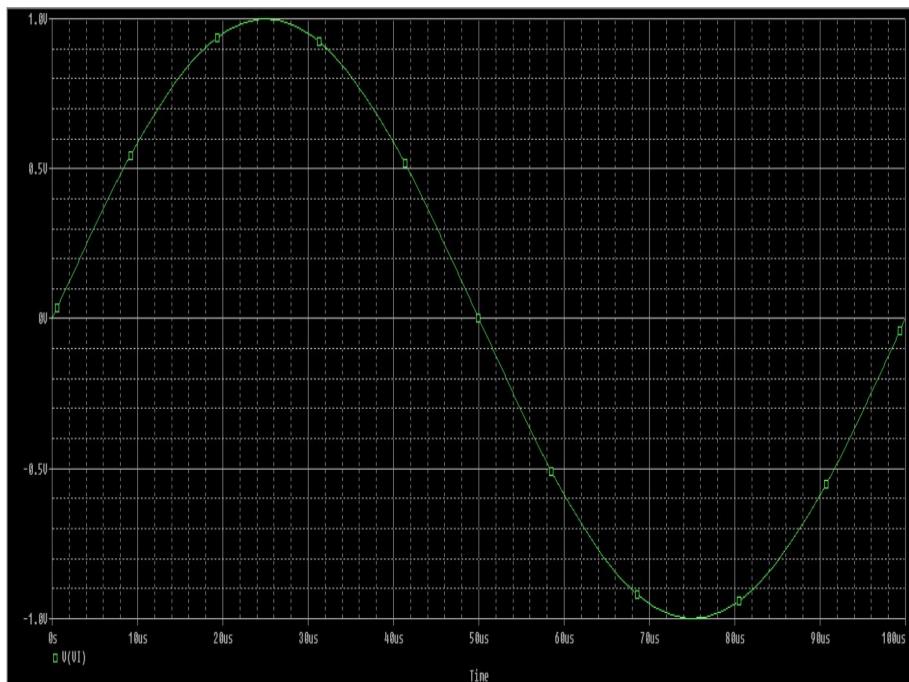
$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{2}{0.026} = 76.92 mS, \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{126}{76.92} = 1638 k\Omega$$

$$R_{in} = 95.4 \parallel 36^\circ \parallel (1638 + 127 \times R_E) \rightarrow 75.41 \parallel (\alpha) = 50 k\Omega \rightarrow \frac{75.41\alpha}{75.41 + \alpha} = 5^\circ$$

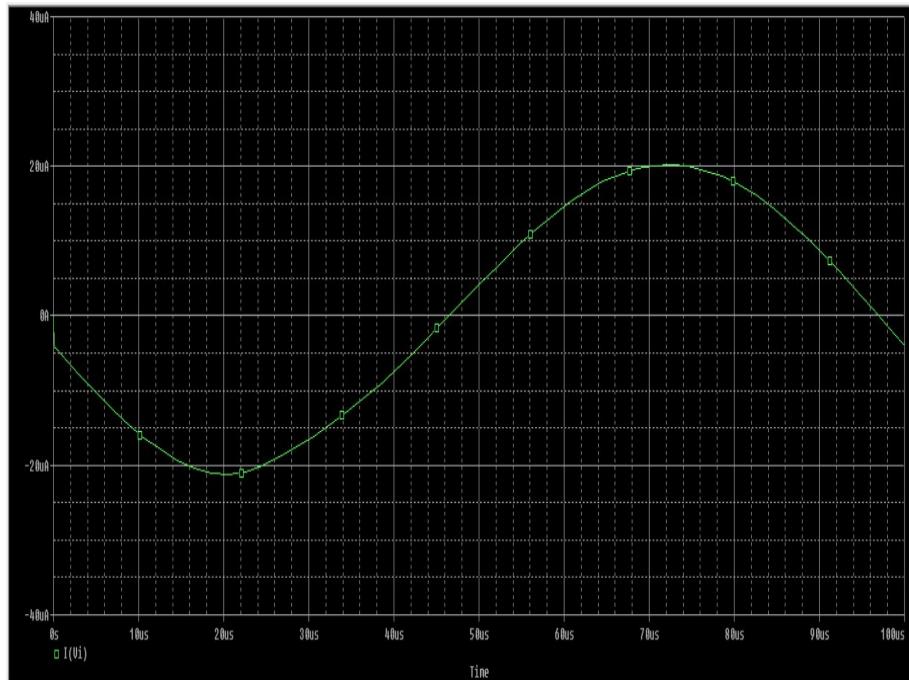
$$25.41\alpha = 3620.5 \rightarrow \alpha = 142.483 \rightarrow R_E = \frac{140.845}{127} = 1.1 k\Omega$$

$$R_E = R_e \parallel 3 \rightarrow \frac{3R_e}{3 + R_e} = 1.1 \rightarrow R_e = 1736 k\Omega$$

با شبیه‌سازی نتایج زیر به دست خواهد آمد.



Input Voltage : ۳ شکل



شکل ۴ : Input Current

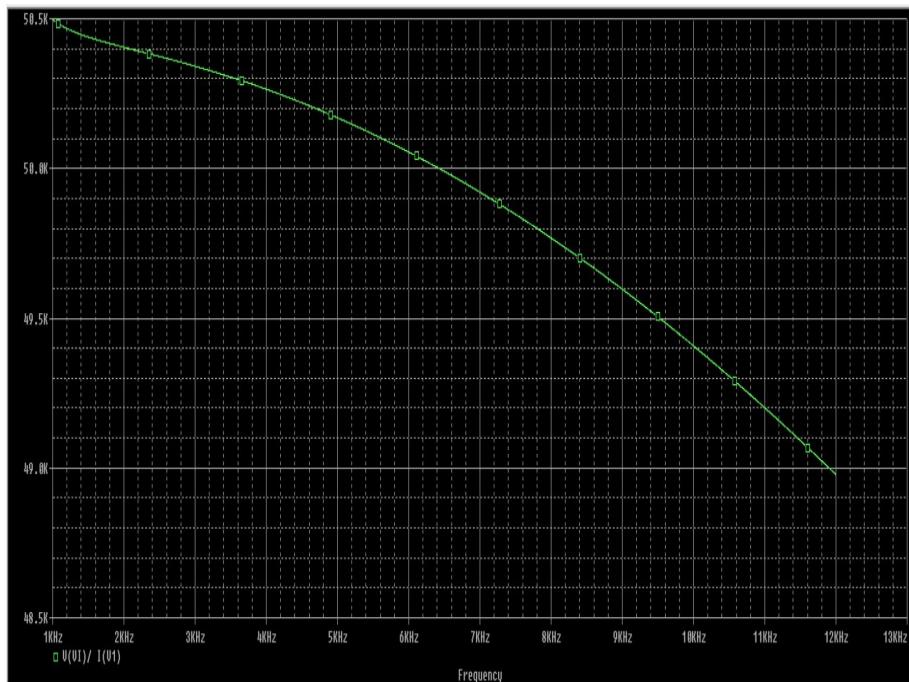
با مقایسه Peak to Peak ولتاژ ورودی و جریان گذرنده از منبع ورودی خواهیم داشت:

$$R_{in} = \frac{V_{InPPK}}{I_{InPPK}} = \frac{1}{20 \times 10^{-6}} = 50 k\Omega$$

یک راه دیگر سوئیپ فرکانسی میباشد که در صفحه بعد به آن میپردازیم.

### ۱.۳.۱ شبیه‌سازی با سوئیپ فرکانسی

در این قسمت با استفاده از AC Sweep/Noise داریم:



شکل ۵:  $R_{In}$

مشاهده می‌شود که در فرکانس حدود  $10\text{ kHz}$  که در آن کار می‌کنیم مقاومت مورد نظر را به ما می‌دهد.

## ۴.۱ پرسش ۴

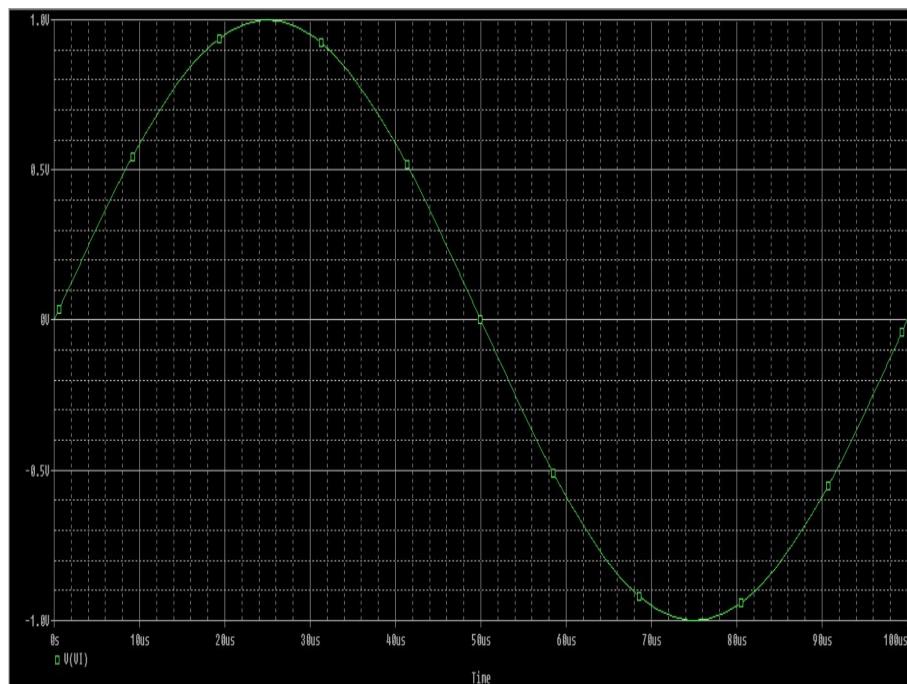
### ۱.۴.۱ محاسبه تئوری بهره

محاسبات تئوری به صورت زیر است.

$$A_V = \frac{R_E \parallel r_o}{R_E \parallel r_o + \frac{1}{g_m}} \xrightarrow{\text{صرف نظر از ارلی}} A_V = \frac{R_E}{R_E + \frac{1}{g_m}}$$
$$Av = \frac{11}{11 + 0.13} = 0.98$$

### ۲.۴.۱ شبیه‌سازی

با شبیه‌سازی نتایج زیر به دست خواهد آمد.



شکل ۶: Input Voltage



شكل ٧ Output Voltage :

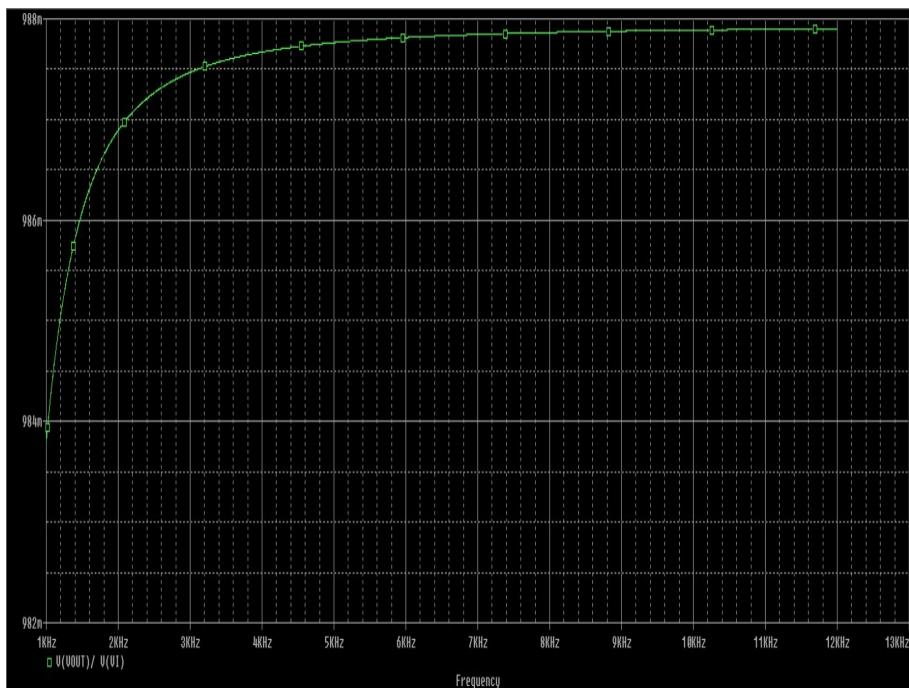
با مقایسه Peak to Peak ولتاژ ورودی و خروجی از منبع ورودی خواهیم داشت:

$$R_{in} = \frac{V_{OutPPK}}{V_{InPPK}} = \frac{0.98}{0.02} = 49$$

مشاهده می شود که کار با دقت بسیار خوبی انجام شده است.  
یک راه دیگر سوئیپ فرکانسی می باشد که در صفحه بعد به آن می پردازیم.

### ۳.۴.۱ شبیه‌سازی با سوئیپ فرکانسی

در این قسمت با استفاده از AC Sweep/Noise داریم:



شکل ۸:  $A_V$

مشاهده می‌شود که در فرکانس حدود  $10\text{ kHz}$  که در آن کار می‌کنیم مقاومت مورد نظر را به ما می‌دهد.

## ۵.۱ پرسش

### ۱.۵.۱ محاسبه تئوری سوئینگ

ابتدا به صورت تئوری به حل مساله می‌پردازیم.

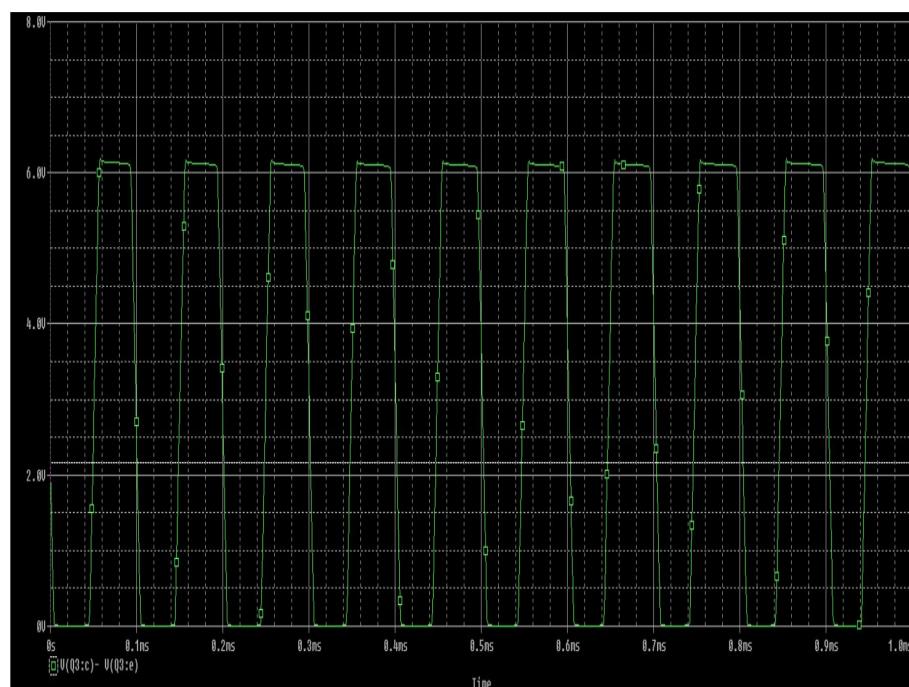
$$V_{DC} = \alpha A I_{CQ} + V_{CEQ} + \beta I_C \xrightarrow{I_C=1} V_{CEQ} = 2.2V$$

$$\Delta_1 = V_{CEQ} - V_{CE_{Sat}} = 2V, \quad \Delta_2 = R_{ac} I_{CQ} = 2 \times (0.9 + 3 \parallel 1/36) \approx 4V$$

$$\Delta V_{CE} = \text{Min}(\Delta_1, \Delta_2) = 2V$$

### ۲.۵.۱ شبیه‌سازی

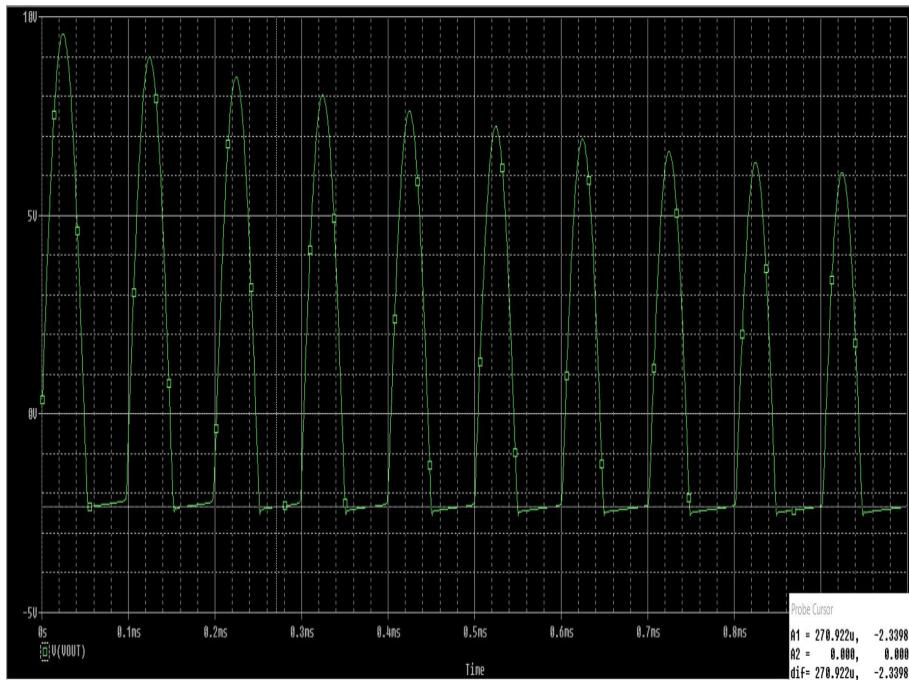
با شبیه‌سازی نتیجه زیر به دست می‌آید که دقیقاً با نتایج دستی ما همخوانی دارد.



شکل ۹:  $V_{CE}$  Swing

## ۶.۱ پرسش ۶

سوینگ از جهت مثبت سقف نخواهد داشت، برای توجیه این موضوع به جریان امیر باید دقت کنیم که نباید منفی باشد و در حدود  $2mA$  باشد، از یک طرف می‌تواند تا صفر کم شود، ولی از طرفی دیگر ترانزیستور می‌تواند وارد ناحیه اشباع شده و همینطور جریان بالا رود، پس سوینگ از جهت مثبت سقفی نخواهد داشت. با شبیه‌سازی نتیجه زیر حادث می‌شود.



شكل ۱۰  $V_{Out}$  Swing :

با توجه به شبیه‌سازی فوق از بالا که سقف نداریم اما از پایین مقدار ۲۳۴ داریم.

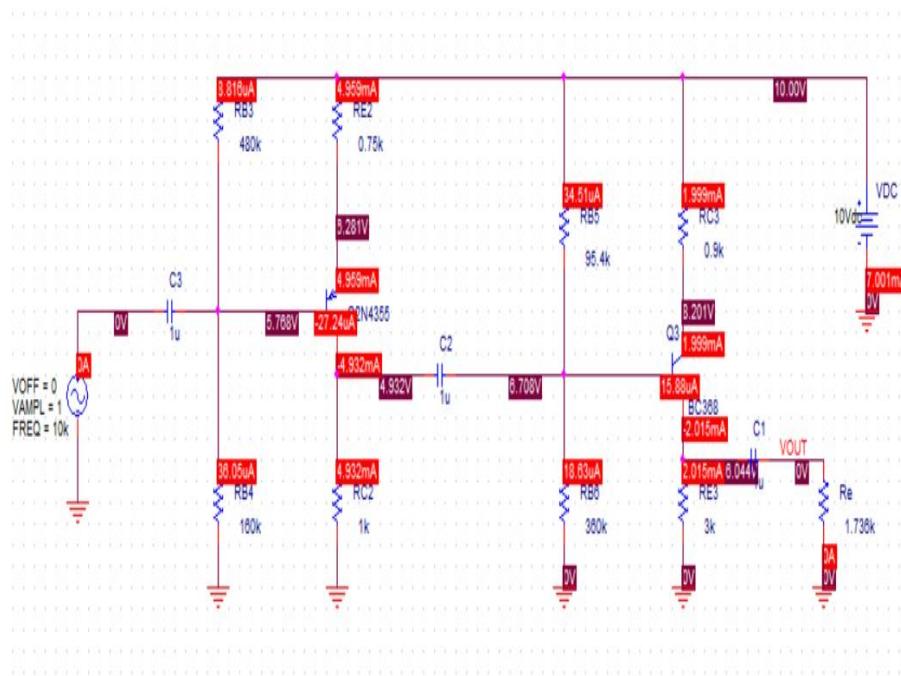
## ۷.۱ پرسش ۷

برای به دست آوردن سوینگ ورودی به صورت زیر عمل می‌کنیم.

$$\frac{V_{Out}}{V_{In}} \rightarrow \frac{\Delta V_{Out}}{\Delta V_{In}} = A_V \rightarrow \text{Max} \Delta V_{In} = \frac{234}{0.98} = 24V$$

## ۲ بخش دوم

ابتدا به مثابه قسمت اول مقدار عددی  $\beta$  و  $V_{EB}$  را به دست می‌وریم.



شكل ۱۱ Bias Point simulation :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \rightarrow \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{4.932mA}{27.24\mu A} \approx 181, \quad \beta = 181$$

سپس با کمک KVL در مسیر بیس-امیتر خواهیم داشت:

$$V_{CC} = R_E I_C + V_{EB} + R_{th} \frac{I_C}{\beta} + V_{th} \xrightarrow{\text{جایگذاری مقادیر}} 10 = 0.75 \times 4.932 + V_{EB_{on}} + 12 \times \frac{4.932}{181} + 2.5$$

$$\rightarrow V_{EB_{on}} = 0.53V$$

## ۱.۲ پرسش ۱

با انجام محاسبات دستی برای طبقه دوم در حالت DC به نتایج زیر می‌رسیم:

$$V_{CC} = R_{E\gamma} I_C + V_{EB} + R_{th} \frac{I_C}{\beta} + V_{th} \xrightarrow{\text{چاگداری مقادیر}} ۱۰ = ۰.۷۵ \times I_C + ۰.۵۳ + ۱۲۰ \times \frac{I_C}{۱۸۱} + ۲.۵$$

$$\rightarrow I_C = ۴.۹V$$

همانگونه که ملاحظه می‌شود نتیجه با شبیه‌سازی یکی حادث می‌گردد.

## ۲.۲ پرسش ۲

با استفاده از شرط ماکسیمم سوینگ و روابط مربوطه کار را جلو می‌بریم:

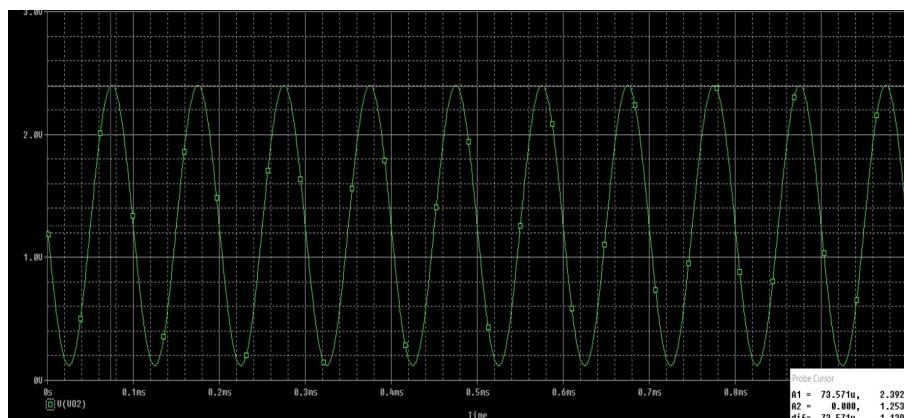
$$\Delta_1 = \Delta_2 \rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{EC_{Sat}}}{R_{ac} + R_{dc}} \xrightarrow[R_{ac}=R_{C\gamma} \parallel ۰.۵ + ۰.۷۵]{R_{dc}=۰.۷۵+R_{C\gamma}} \frac{۹.۸}{R_{ac} + R_{dc}} = ۴۹.۳۲$$

$$R_{C\gamma} = ۰.۷۵k\Omega$$

$$\Delta_{I_C} = \Delta V_{EC} \rightarrow Max VO_2 Swing = ۵۰ \parallel ۰.۷۵ \times \Delta_{I_C} = ۰.۷۵ \times ۴۹.۳۲ = ۱.۲۳۳V$$

## ۳.۲ پرسش ۳

مطابق راهنمایی سوال با بزرگ کردن ورودی از مقادیر اندک، به یک جایی می‌رسیم که اگر ورودی را از آن بیشتر کنیم، خروجی طبقه دوم معوج خواهد شد. (۳.۳V) شکل شبیه‌سازی شده نیز به صورت زیر است که با پیش‌بینی ما تطابق دارد.



شکل ۱۲:  $V_{O_2}$  Swing

## ۴.۲ پرسش ۴

### ۱.۴.۲ محاسبات تئوری

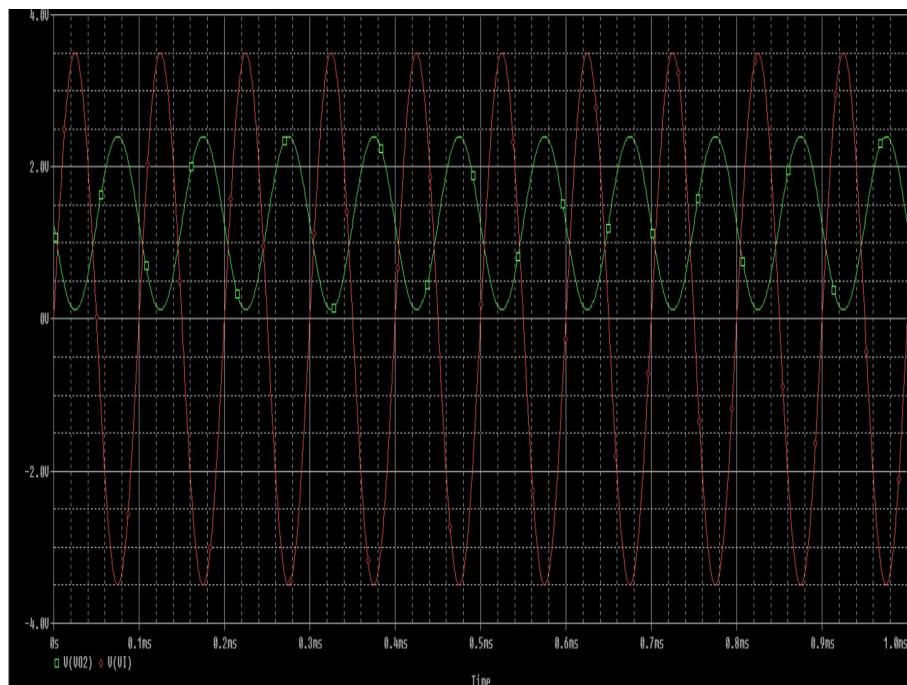
در این قسمت به محاسبه تئوری بهره و مقاومت ورودی می‌پردازیم

$$A_V = -\frac{R_{C_{tot}}}{\frac{1}{g_m} + R_E} = \frac{0.25}{0.75 + \frac{0.026}{4932}} \rightarrow A_v = -0.33$$

$$R_{In} = R_{B_r} \parallel R_{B_f} \parallel ((r_\pi + (\beta + 1)R_E) = 160 \parallel 480 \parallel (\frac{181}{190} + 182 \times 0.75)$$

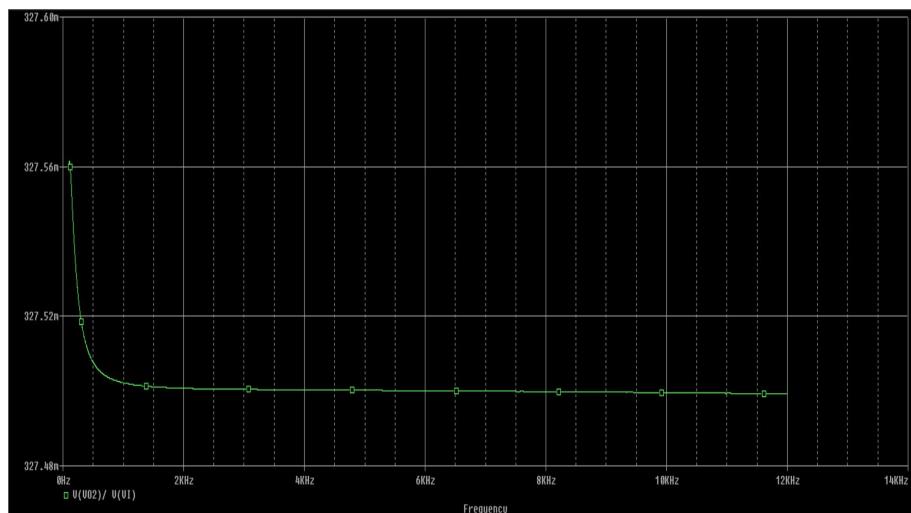
$$120 \parallel 137/45 = 64k\Omega$$

### ۲.۴.۲ شبیه‌سازی

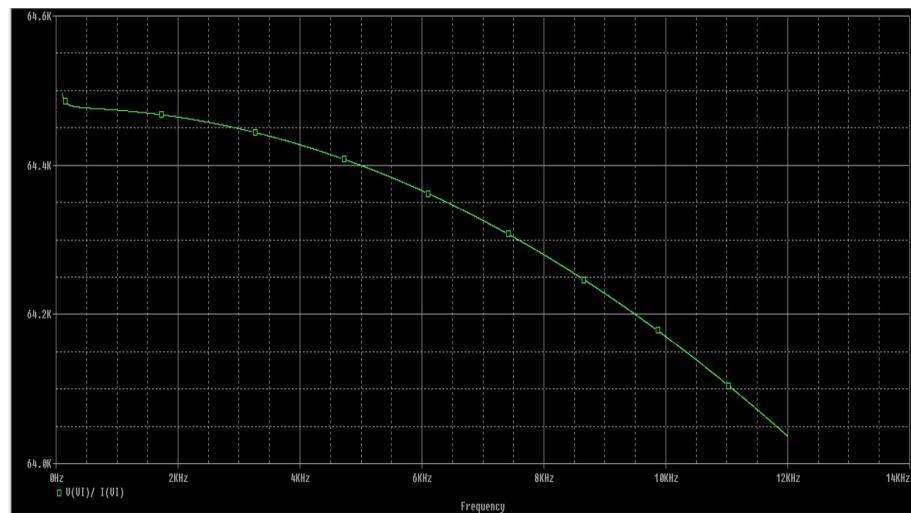


I/O Voltage : ۱۳ شکل

### ۳.۴.۲ شبیه‌سازی با سوئیپ فرکانسی



شکل ۱۴ :  $A_V$



شکل ۱۵ :  $R_{In}$

مشاهده می‌کنیم که نتایج محاسبات تئوری و نرم‌افزاری با تقریب مناسبی یکی است.

### ۳ بخش سوم

#### ۱.۳ پرسشن ۱

به این صورت جلو می رویم که با دانستن مقاومت ورودی، مقدار  $\frac{1}{g_m}$  را به دست می آوریم و از روی آن جریان کلکتور را به دست اورده سپس با تحلیل dc مدار مقدار مقاومت مجهول را پیدا می کنیم.

$$R_{In} = \frac{1}{g_m} \parallel R_E, \quad R_{In} = 100\Omega \xrightarrow{\frac{1}{g_m} = \alpha} \frac{50\alpha}{50 + \alpha} = 100$$

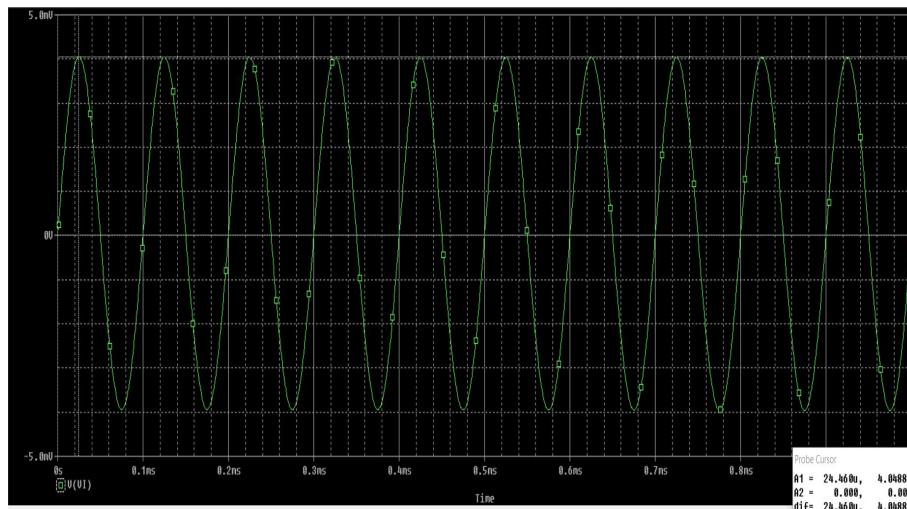
$$\alpha = 125\Omega \rightarrow g_m = \lambda mS \rightarrow I_C = 0.20\lambda mA$$

$$V_{th} = R_{th}I_B + V_{BE} + R_{E\backslash}I_C \xrightarrow[R_{th}=\frac{50R_{B_V}}{50+R_{B_V}}]{V_{th}=\frac{10R_{B_V}}{50+R_{B_V}}} \frac{10R_{B_V}}{50 + R_{B_V}} = \frac{50R_{B_V}}{50 + R_{B_V}} \times \frac{0.20\lambda}{125} + V_{BE_{on}} + 0.5 \times 0.20\lambda$$

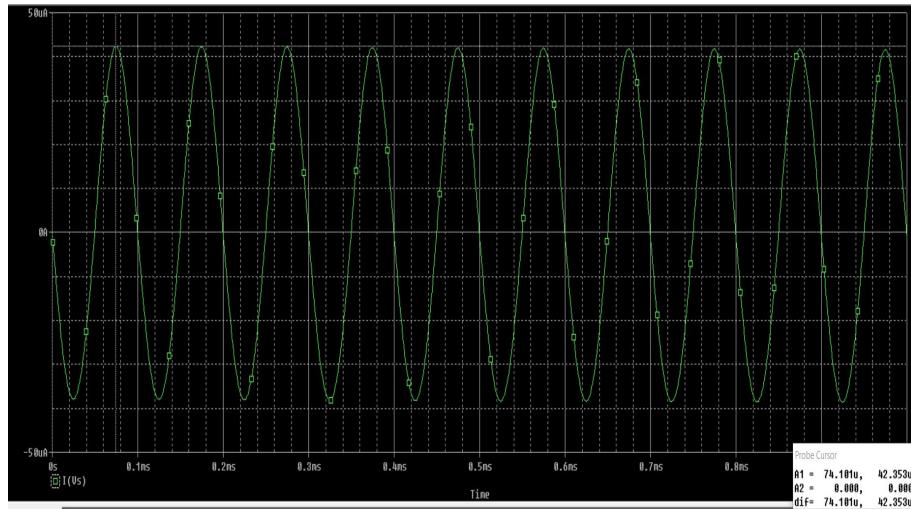
$$\rightarrow \frac{10R_{B_V}}{50 + R_{B_V}} - \frac{R_{B_V}}{20(50 + R_{B_V})} = 0.712 \rightarrow 18276R_{B_V} = 712 \rightarrow R_{B_V} = \frac{712}{18276} = 39k\Omega$$

#### ۱.۱.۳ شبیه‌سازی

با شبیه‌سازی نرم افزاری نتایج زیر به دست می آیند.



شکل ۱۶:  $V_I$

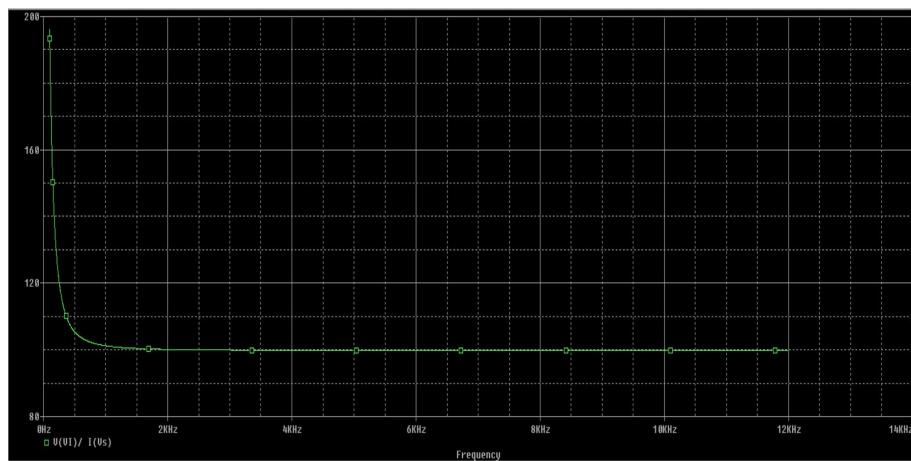


شکل ۱۷:  $I_{V_I}$

که با دقت نظر به امواج به دست آمده می‌توان دید که مقاومت حدود  $100\Omega$  است.

### ۲.۱.۳ شبیه‌سازی با سوئیپ فرکانسی

در این قسمت با استفاده از AC Sweep/Noise داریم:



شکل ۱۸:  $R_{In}$

## ۲.۳ پرسش ۲

در این قسمت به کمک فرمول بهره یک سیستم بیس مشترک به محاسبه حداقل مقدار  $R_{C_1}$  می‌پردازیم.

$$A_V = g_m R_{C_{Tot}} = g_m R_{C_1} \parallel R_{In_1} = \Lambda \times R_{C_1} \parallel 64$$

$$\xrightarrow{A_V=16^\circ} R_{C_1} \parallel 64 = 2^\circ \longrightarrow R_{C_1 \text{ Min}} \approx 29 k\Omega$$

جهت حصول اطمینان، مقداری مقاومت را از  $29 k\Omega$  بیشتر در نظر می‌گیریم.  
حال به محاسبه  $A_{V_{IS}}$  و سپس بهره کل می‌پردازیم.

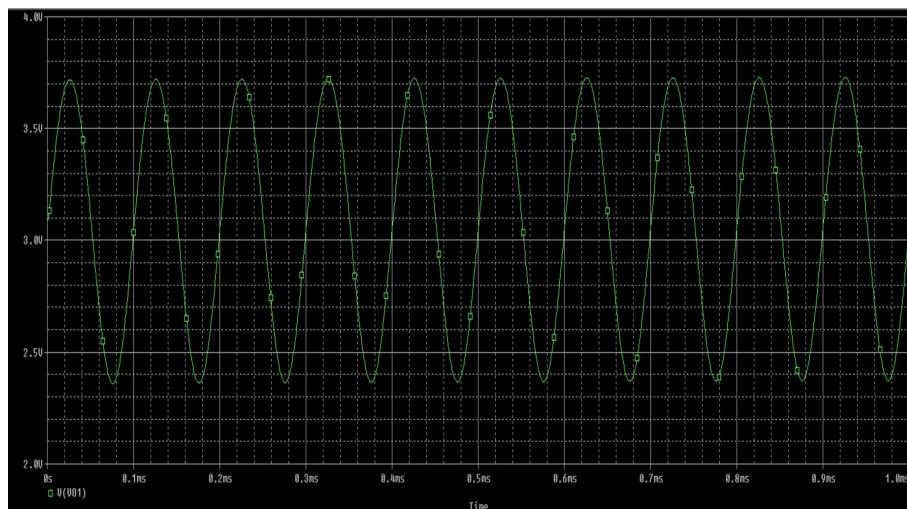
$$A_{V_{IS}} = \frac{R_{in}}{R_{In} + R_S} A_{V_1} = \frac{100}{125} \times 17^\circ = 136$$

$$A_{V_{Tot}} = \prod_{i=1}^3 A_{V_i} = 17^\circ \times 0.33 \times 0.98 = 54978$$

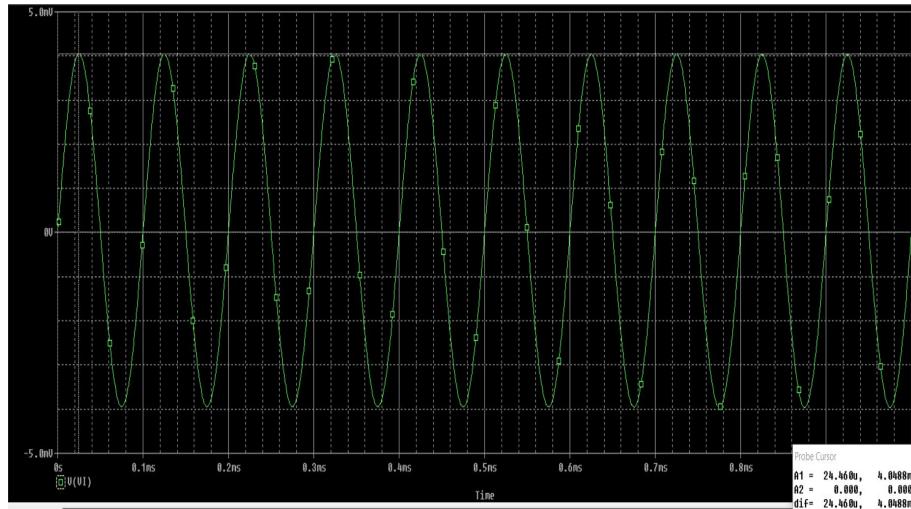
$$A_{V_{STot}} = \frac{4}{5} A_{V_{Tot}} = 439824$$

## ۱.۲.۳ شبیه‌سازی

با شبیه‌سازی نرم‌افزاری نتایج زیر به دست می‌آیند.



شکل ۱۹ :  $V_{O_1}$

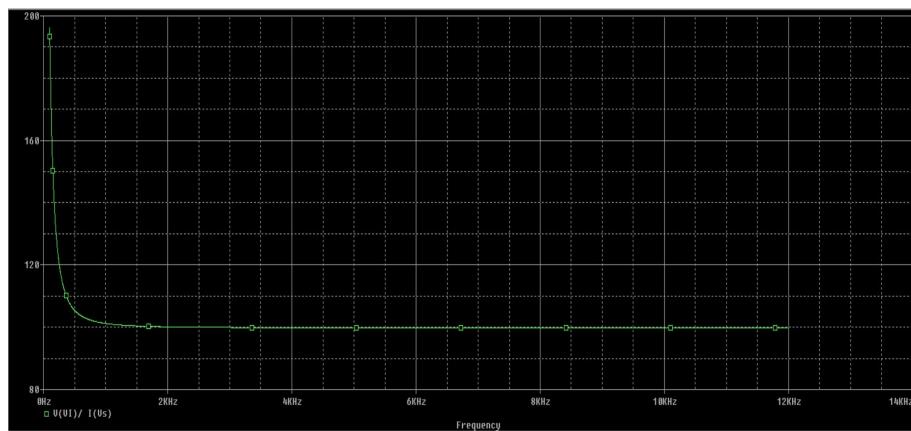


شکل ۲۰:  $V_I$

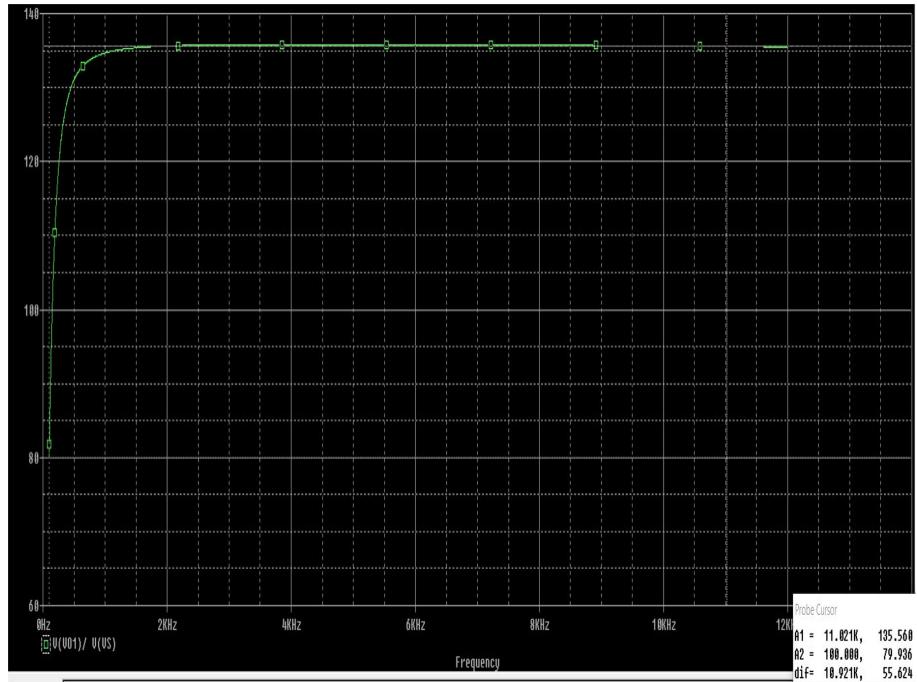
که با دقت نظر به این اشکال می‌بینیم بهره طبقه اول بیش از  $160$  است. همچنین چون نسبت بین پیک ولتاژ‌های  $V_I V_S$  با  $\frac{R_{In}}{R_{In} + R_S}$  یکی است پس  $A_{V_S}$  نیز صحیح به دست می‌آید.

### ۲.۲.۳ شبیه‌سازی با سوئیپ فرکانسی

در این قسمت با استفاده از AC Sweep/Noise داریم:



$R_{In}$  : ۲۱



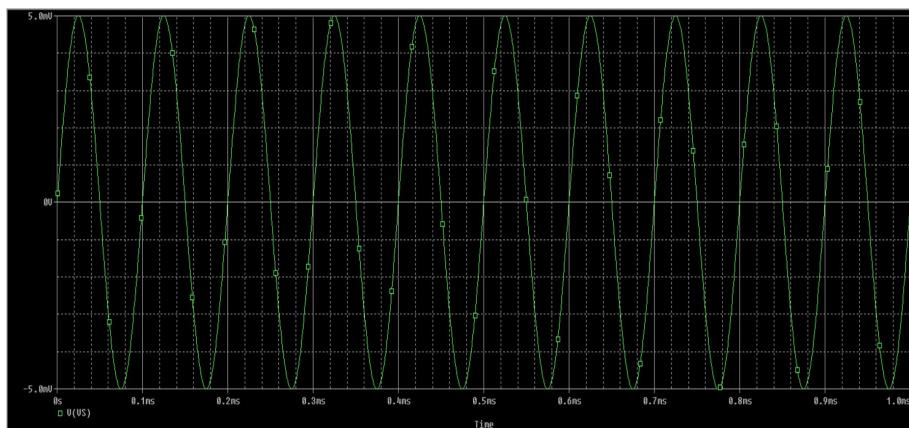
شکل ۲۲:  $A_{V_{S_1}}$

مشاهده می شود که نتایج دقیقا با تئوری یکی است.

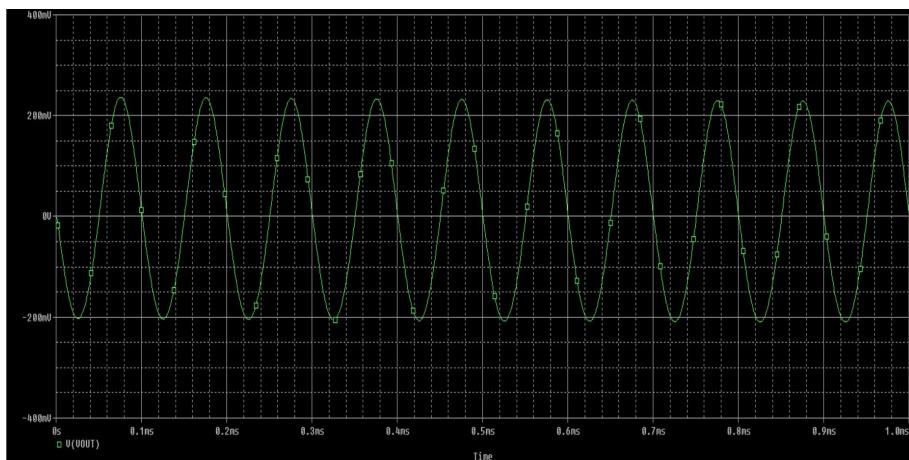
### ۳.۳ پرسش ۳

در این قسمت به شبیه‌سازی بهره خروجی می‌پردازیم و آن را با مقدار تئوری قیاس می‌کنیم.

#### ۱.۳.۳ شبیه‌سازی



شکل ۲۳:  $V_S$



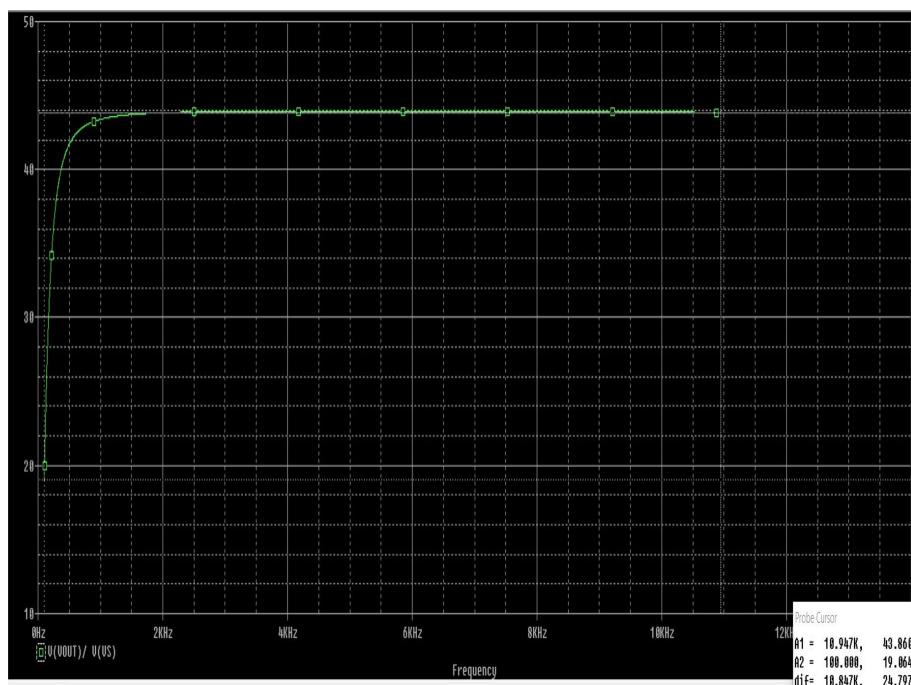
شکل ۲۴:  $V_{Out}$

با دقت نظر به اشکال روبرو مشاهده می‌گردد که:

$$A_{V_S} = \frac{220}{5} = 44$$

### ۲.۳.۳ شبیه‌سازی با سوئیپ فرکانسی

در این قسمت با استفاده از AC Sweep/Noise داریم:



شکل ۲۵:  $A_{V_{S_{Tot}}}$

مشاهده می‌شود که نتیجه با محاسبات دستی ما یکسان حادث گردیده است.

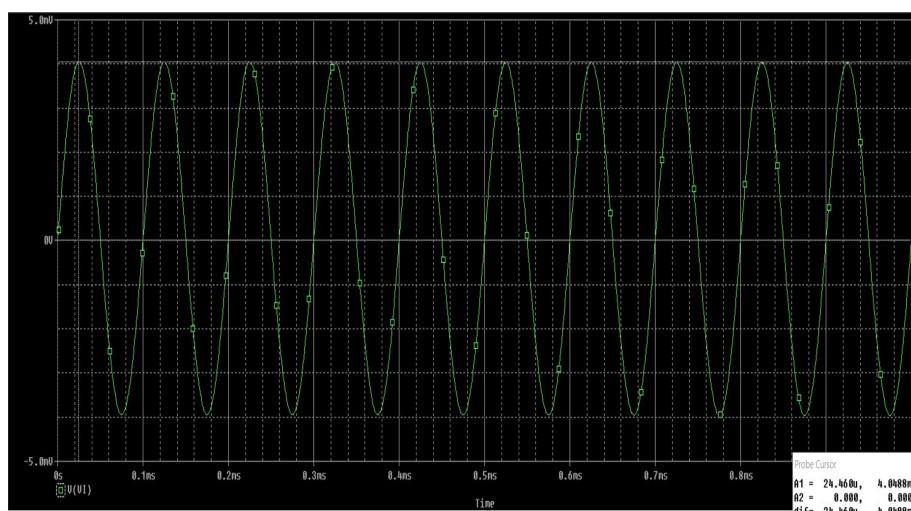
## ۴.۳ پرسش ۴

### مقاومت ورودی

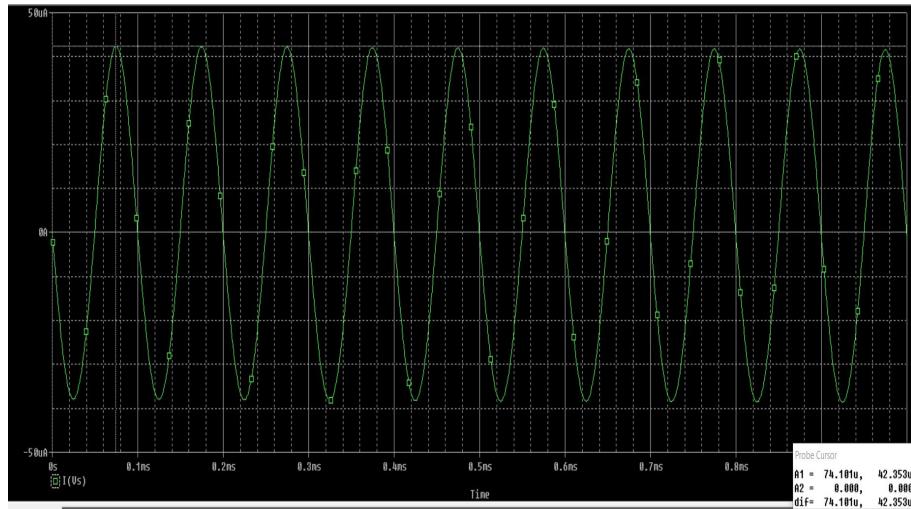
می‌دانیم که مقاومت ورودی کل ما همین مقاومت ورودی طبقه اول می‌باشد، که شبیه‌سازی مربوطه به دو روش Transient و سوئیپ فرکانسی در بخش‌های قبل انجام شد، روش کار در شبیه‌سازی فرکانسی آن است که نسبت  $\frac{V_L}{I_I}$  در یک بازه فرکانسی محاسبه گردیده و ما آن را در فرکانس  $10\text{ kHZ}$  قرائت می‌کنیم، برای روش اول نیز شکل موج‌ها را به تفکیک رسم کرده و با دقت نظر به آن‌ها مقاومت را به دست می‌آوریم.

### ۱.۴.۳ شبیه‌سازی

با شبیه‌سازی نرم‌افزاری نتایج زیر به دست می‌آیند.



شکل ۲۶:  $V_I$

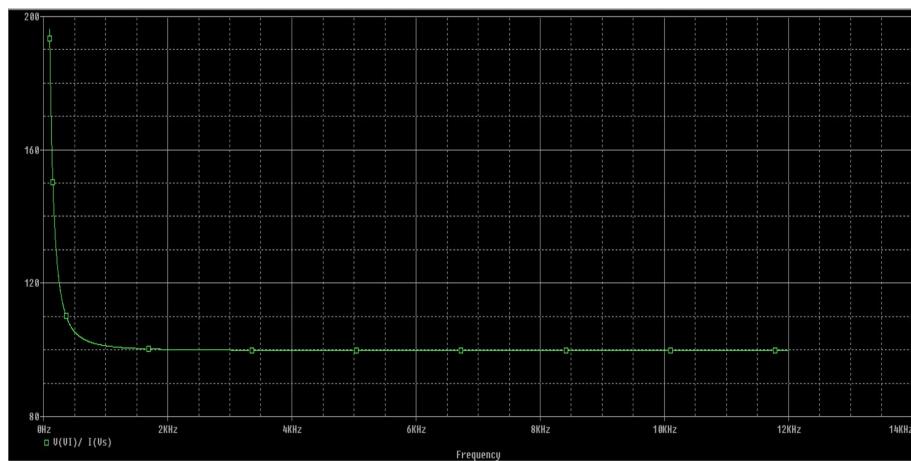


شکل ۲۷:  $I_{V_I}$

که با دقت نظر به امواج به دست آمده می‌توان دید که مقاومت حدود  $100\Omega$  است.

#### ۲.۴.۳ شبیه‌سازی با سوئیپ فرکانسی

در این قسمت با استفاده از AC Sweep/Noise داریم:



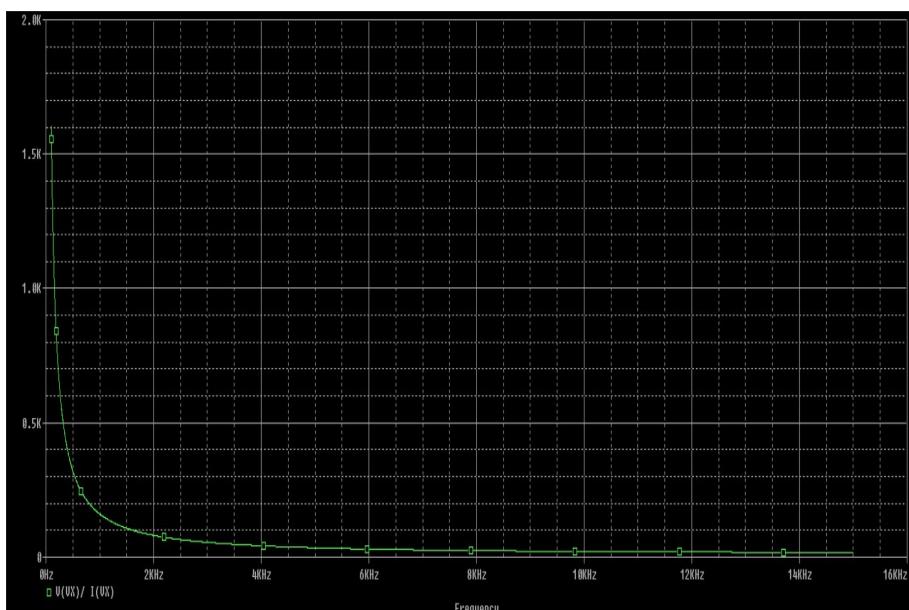
شکل ۲۸:  $R_{In}$

### مقاومت خروجی

می‌دانیم مقاومت خروجی همان مقاومت خروجی دیده شده از طبقه سوم می‌باشد، برای به دست آوردن آن در مدار یک منبع در محل خروجی قرار داده و منبع در محل ورودی را زمین کرده، سایر مراحل مشابه بخش قبل است.

$$R_{Out} = R_{E_r} \parallel \left( \frac{1}{g_m} + \frac{R_{B_r}}{\beta + 1} \right) = 3 \parallel \left( \frac{1}{78.6} + \frac{95/4 \parallel 360 \parallel 0/25}{127} \right) \approx 15\Omega$$

با شبیه‌سازی خواهیم داشت:



شکل ۲۹ :  $R_{In}$

### ۵.۳ پرسش ۵

برای پاسخ‌دهی به این سوال مجدد سراغ سوئینگ و بهره طبقه دوم می‌رویم، طبق آنچه در قسمت‌های قبل ارائه شد داریم:

$$MaxVO2Swing = 1.233V \xrightarrow{AV_r = -0.33V} InputSwing = 3.73V$$

می بینیم که این مقدار سوئینگ ورودی مقدار زیادی خواهد بود، همچنین باید دقت کنیم که در طبقه  $CB$  برای این که بفهمیم خروجی چقدر است مسیر  $CB$  را طی می کنیم، همچنین چون  $R_C$  مقدار زیادی دارد می شود نگران سوئینگ ورودی نبود.

### ۶.۳ پرسش ۶

همانطور که در درس نیز به این موضوع اشاره گردید، وجود خازن‌ها از این جهت است که بتوانیم مدار  $ac$  را آنطور که نیاز داریم استفاده کنیم، یعنی چون خازن در شرایط  $ac$  اتصال کوتاه است مدار  $ac$  ما را درست می کند.