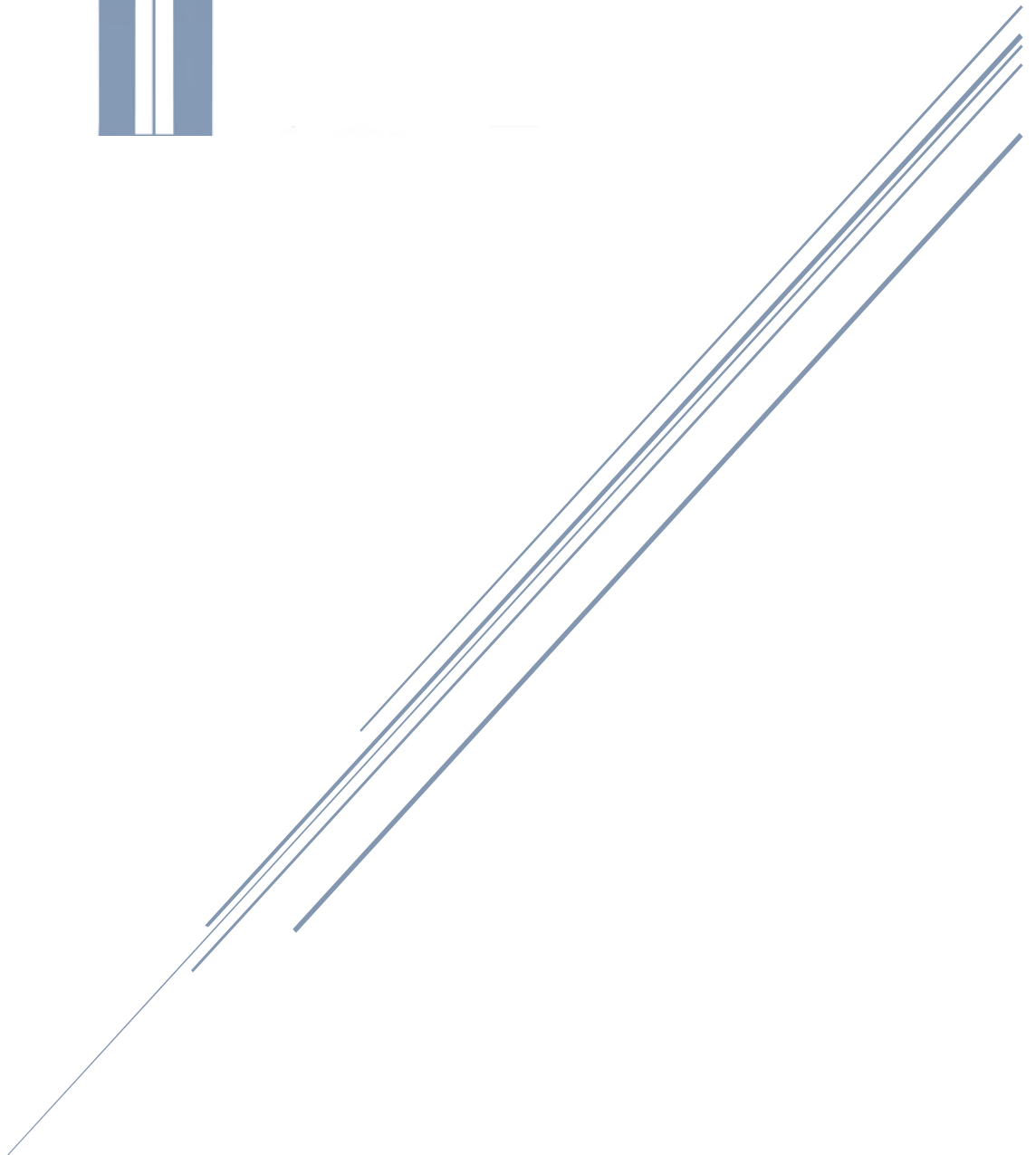


# جزوه LT-SPICE

زیر نظر دکتر محمد رشتیان

نویسنده : مهدی شاه پسندی



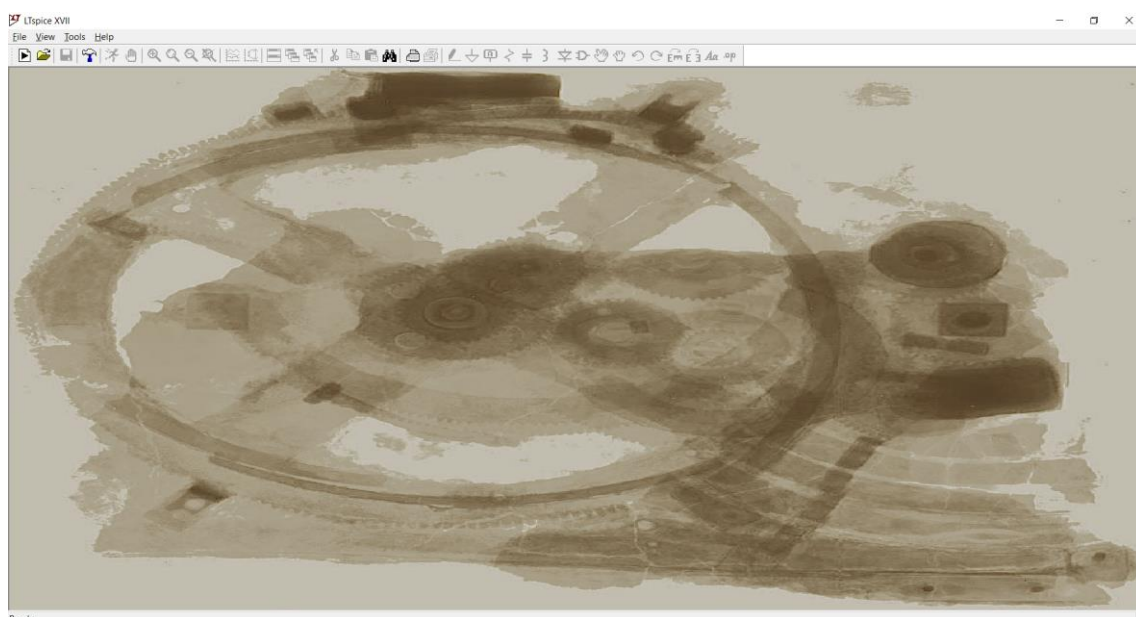
دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

مقدمه : امروزه تحلیل و آنالیز نرم افزار مدارات الکترونیکی جزء جدانشدنی طراحی الکترونیک است. نرم افزار LTspice یکی از آن نرم افزار های کارآمد است. LTspice یک نرم افزار رایگان است که در شبیه سازی مدارات الکتریکی دقت بسیار بالایی دارد.

معرفی اولیه محیط نرم افزار :

اکنون قصد داریم روش کار با این نرم افزار را شرح دهیم :

۱- زمانی که نرم افزار را باز می کنید ، با صفحه زیر مواجه می شود



۲- بعد از آن به قسمت File رفته و گزینه New schematic را انتخاب می کنیم. همچنین در قسمت File اگر مدار

آماده ای داشته باشیم می توانیم با کلیک کردن گزینه Open مدار خود را در نرم افزار باز کنیم.

۳- اکنون در محیط زیر نرم افزار آماده شبیه سازی مدارات الکتریکی می باشد.

معرفی محیط فضای کار

همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است می توانیم از بالا صفحه قطعات مورد نیاز برای شبیه سازی مدارمان انتخاب کنیم.

۱- برای رسم سیم های مدار از آن استفاده می کنیم.(Wire)

۲- زمین(Ground)

۳- نام گذاری گره یا نقاطی از مدار(Label net)

۴- مقاومت الکتریکی (Resistor)

۵- خازن (Capacitor)

۶- سلف (Inductor)

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
 جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

۷- دیود (Diode)

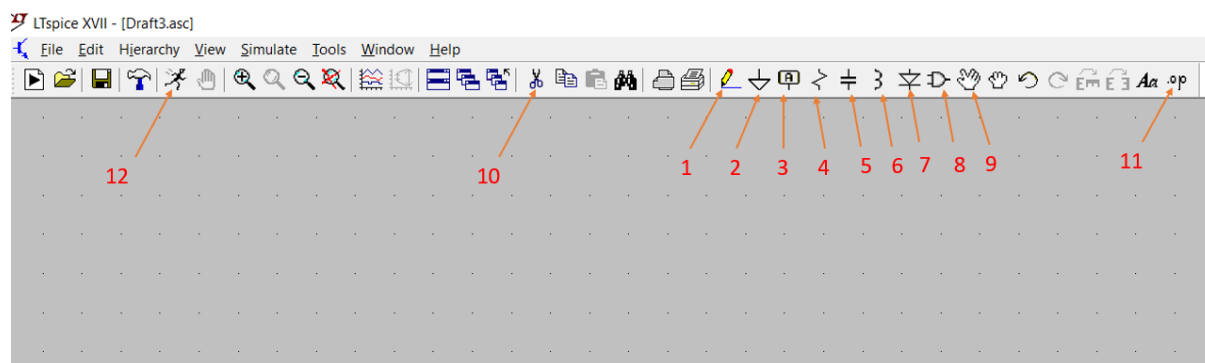
۸- قطعات دیگر (Component)

۹- حرکت دادن و انتخاب قطعات الکتریکی استفاده شده (Move)

۱۰- حذف قطعات و یا مدار رسم شده در محیط کار (Cut)

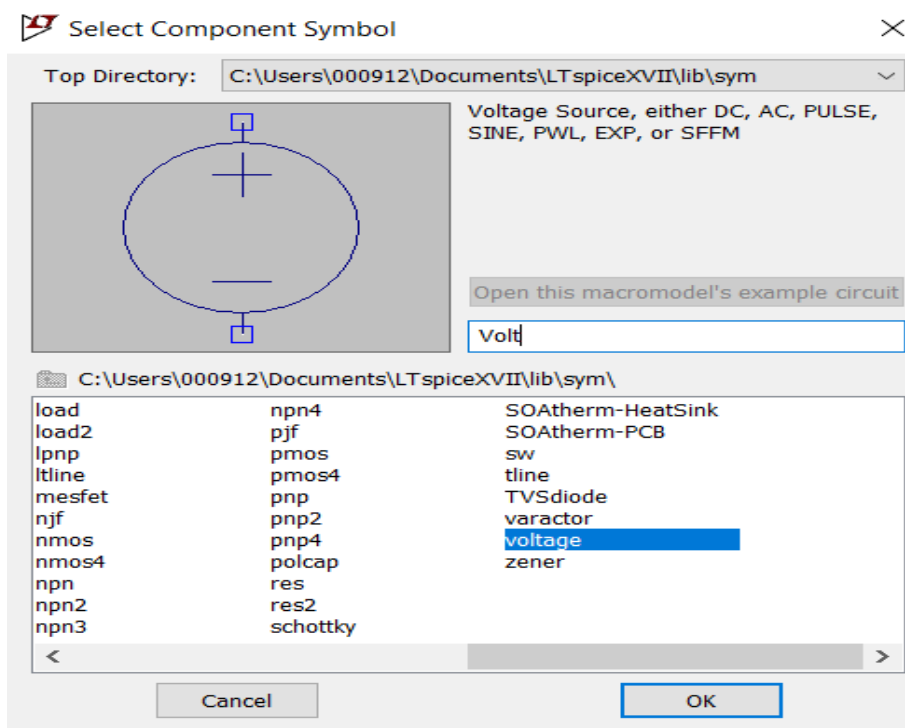
۱۱- تعیین خواسته ما برای شبیه سازی (Spice directive)

۱۲- انجام شبیه سازی (Run)



**نکته ۱:** برای تغییر جهت قطعات خود در صفحه کار نرم افزار از  $ctrl+R$  استفاده می کنیم.

**نکته ۲:** به عنوان مثال ما نیاز به منبع ولتاژ داریم ، برای پیدا کردن منبع ولتاژ ابتدا به Component رفته سپس عبارت Volt را جست و جو می کنیم که نتیجه جست و جو باید Voltage باشد.



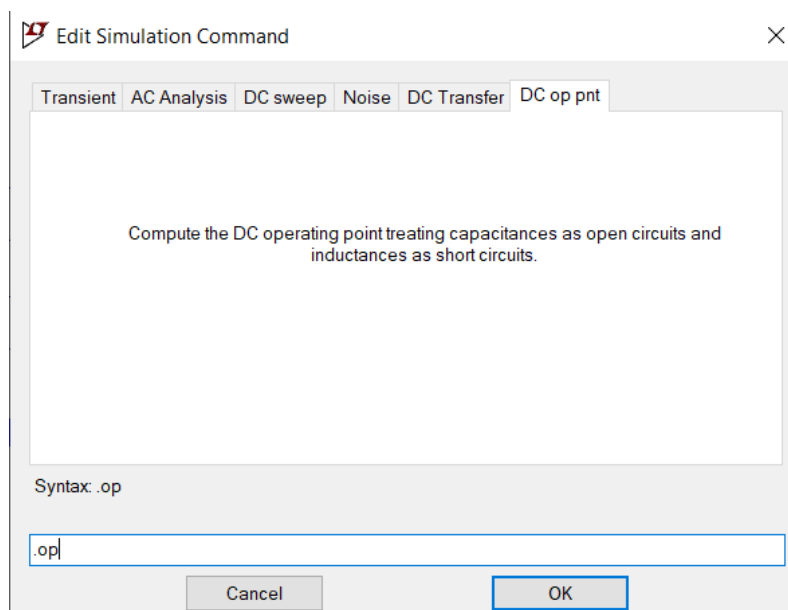
دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

**نکته ۳ :** همانند نکته قبل برای پیدا کردن منبع جریان ابتدا به Component رفته سپس عبارت Current را جست و جو می کنیم که نتیجه جست و جو باید Current باشد.

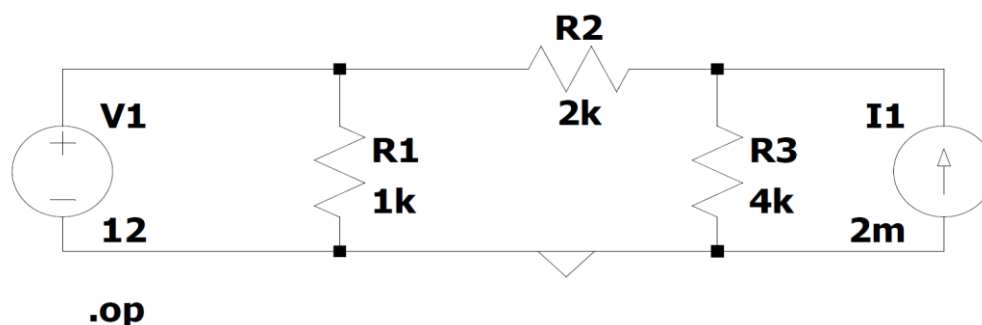
**نکته 4 :** برای دادن مقادیر به مقاومت یا منبع ولتاژ و ..... با کلیک راست کردن بر روی قطعه الکتریکی می توانیم مقادیر مناسب را وارد کنیم. زمانی که از کیلو بخواهیم استفاده کنیم باید از K استفاده کرد (بزرگ یا کوچک بودن آن اهمیت خاصی ندارد) برای واحد میکرو از کلمه u استفاده می کنیم، برای واحد پیکو از کلمه P استفاده می کنیم، برای واحد میلی از m استفاده می کنیم، و برای واحد مگا از Meg استفاده می کنیم، برای واحد گیگا از g استفاده می کنیم.

**مثال اول :** تحلیل DC مدار زیر را انجام دهید.

ابتدا مدار خود را با استفاده از سه مقاومت و یک منبع ولتاژ و منبع جریان رسم می کنیم ، باید توجه کرد که ground مدار را هم رسم کرده باشیم. حالا برای تعیین خواسته ما از شبیه سازی از قسمت toolbar به Simulate رفته و Edit simulation CMD را انتخاب می کنیم. حال در صفحه باز شده می توانیم خواسته خود را به نرم افزار اعلام کنیم، ما در اینجا قصد داریم نقطه کار (تحلیل DC) را انجام بدهیم. پس عبارت .op را می نویسیم.



حال اکنون باید در فضای کار خود شکل زیر را داشته باشیم.



- حال Run را انجام می‌دهیم تا تحلیل DC را انجام بدهد.
- می‌توان تحلیل DC انجام شده را در شکل زیر مشاهده کنیم.

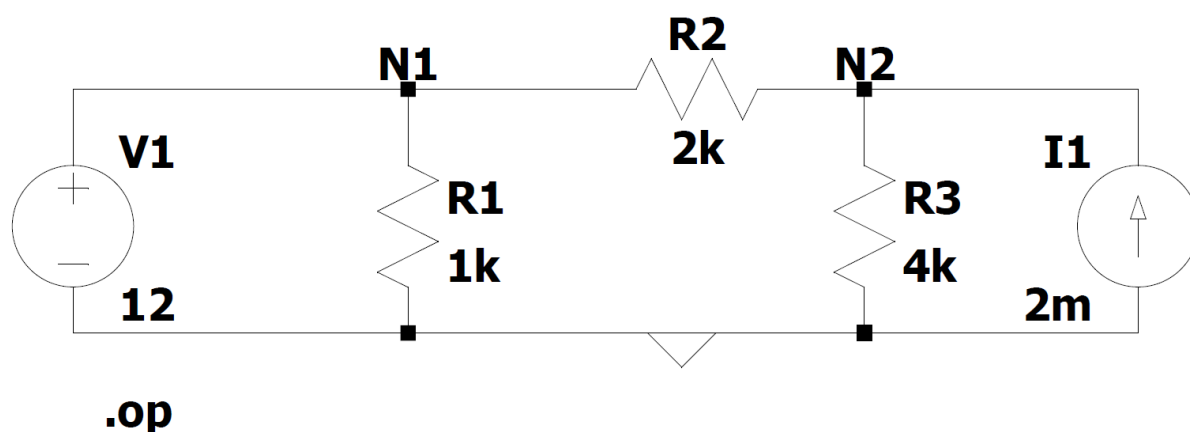
\* C:\Users\000912\Documents\LTSpiceXVII\Draft3.asc


---

--- Operating Point ---

V(n001) :	12	voltage
V(n002) :	10.6667	voltage
I(I1) :	0.002	device_current
I(R3) :	0.00266667	device_current
I(R2) :	-0.000666667	device_current
I(R1) :	0.012	device_current
I(V1) :	-0.0126667	device_current

همچنین برای تشخیص مقدار ولتاژ هر نقطه از مدار می‌توانیم از Label net استفاده کنیم. همانند شکل های زیر :

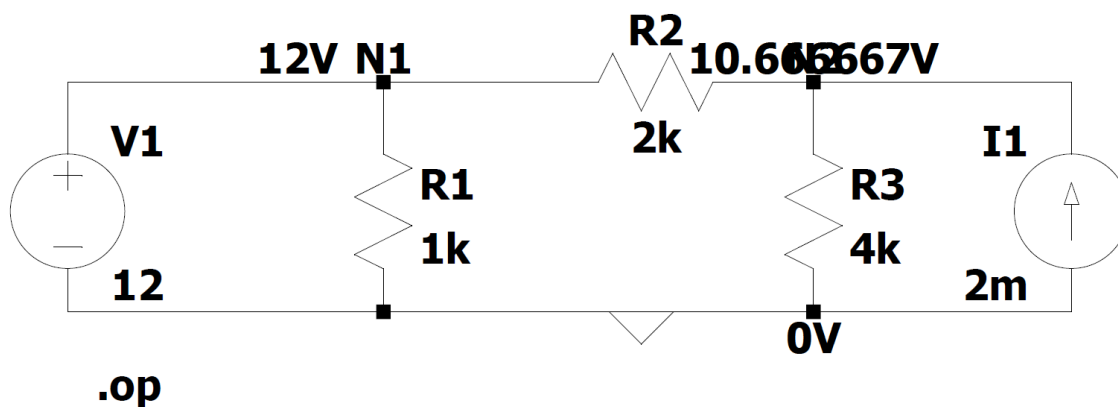


 \* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc

--- Operating Point ---

V(n1) :	12	voltage
V(n2) :	10.6667	voltage
I(I1) :	0.002	device_current
I(R3) :	0.00266667	device_current
I(R2) :	-0.000666667	device_current
I(R1) :	0.012	device_current
I(V1) :	-0.0126667	device_current

همچنین اگر پس از انجام شبیه ساز و تحلیل آن در فضای کار در هر نقطه ای از مدار دو بار کلیک کنیم مقدار ولتاژ آن نقطه را نشان میدهد.



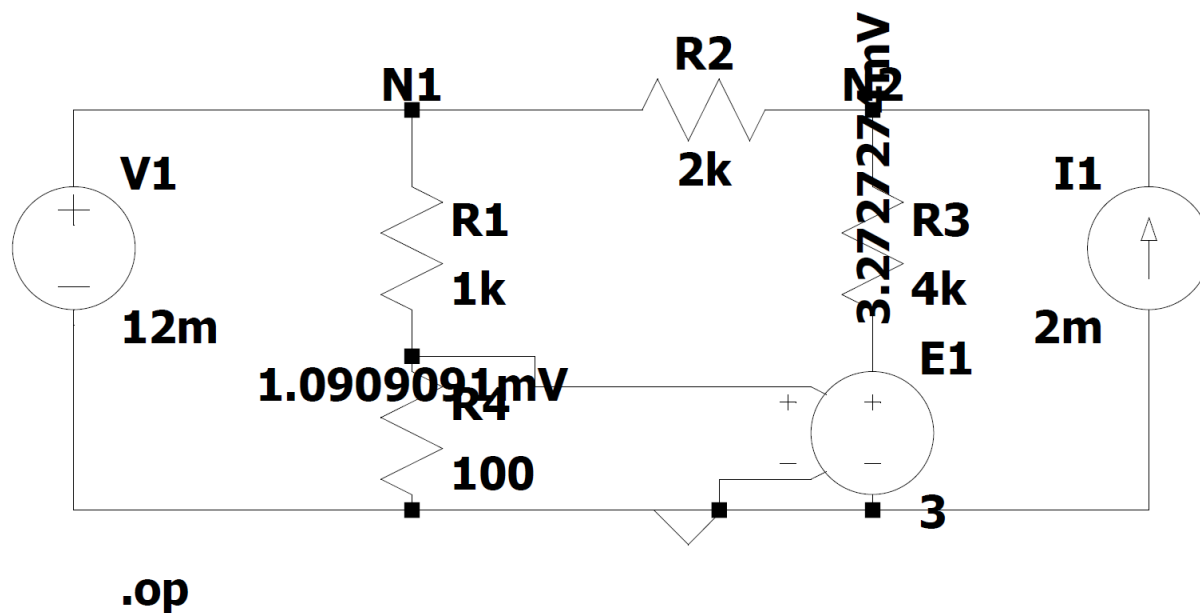
**نکته :** اگر با استفاده از label net دو نقطه از مدار را یک اسم بدهیم ، مقدار ولتاژ وارد بر گره اول در گره دوم هم وارد میشود و به هم وصل می شوند، این کار به ما کمک میکند در مدارهای پیچیده استفاده از منابع ولتاژ و پیچیدگی درک مدار را کاهش دهد.

معرفی منابع وابسته :

ما چهار نوع منابع وابسته داریم که همه آنها را در LTspice معرفی خواهیم کرد.

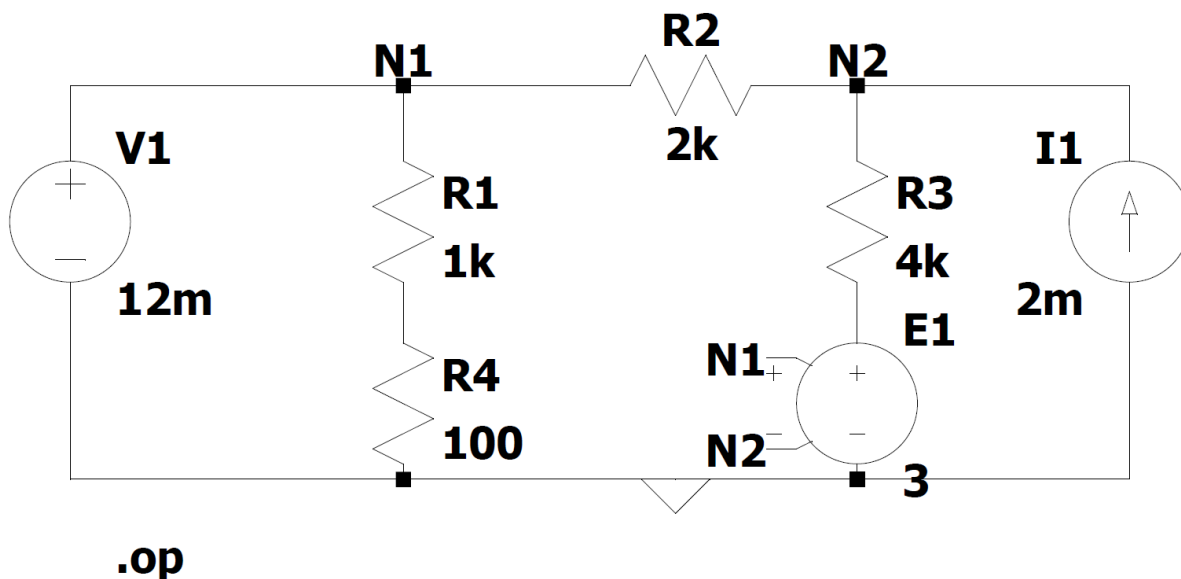
۱- منبع وابسته ولتاژ - ولتاژ : ابتدا به component رفته و عبارت e را سرچ می کنیم، بعد از وصل کردن منبع وابسته به مدار کلیک راست بر روی منبع وابسته انجام می دهیم و در Value به عنوان مثال ۳ را وارد می کنیم. به این معنا است که سه برابر ولتاژی که دو سر آن را برای منبع وابسته ولتاژ انتخاب کرده بودیم را می توانیم داشته باشیم.

برای شفاف تر شدن ماجرا می‌توانیم مثال زیر را انجام دهیم.



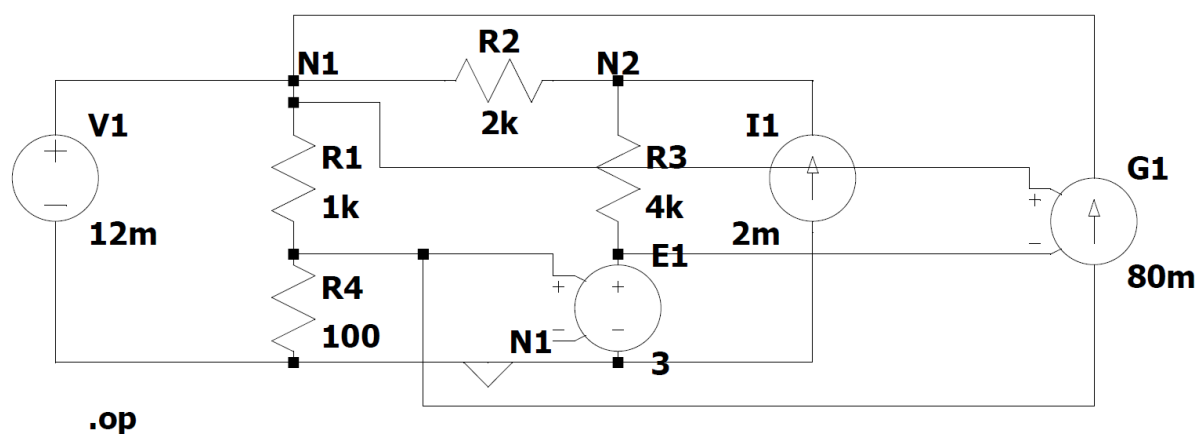
همانطور که در شکل مشاهده می‌کنیم ولتاژ سه برابر شده است.

مثال دیگر برای منبع وابسته ولتاژ-ولتاژ با کاهش سیم :



2-منبع جریان - ولتاژ: ابتدا به component رفته و عبارت  $g$  را سرچ می‌کنیم، بعد از وصل کردن منبع وابسته به مدار کلیک راست بر روی منبع وابسته در Value به عنوان مثال 80m را وارد می‌کنیم. به این معنا است که سه 80m ولتاژی که دو سر آن را برای منبع وابسته جریان-ولتاژ انتخاب کرده بودیم را می‌توانیم به شکل جریان داشته باشیم.

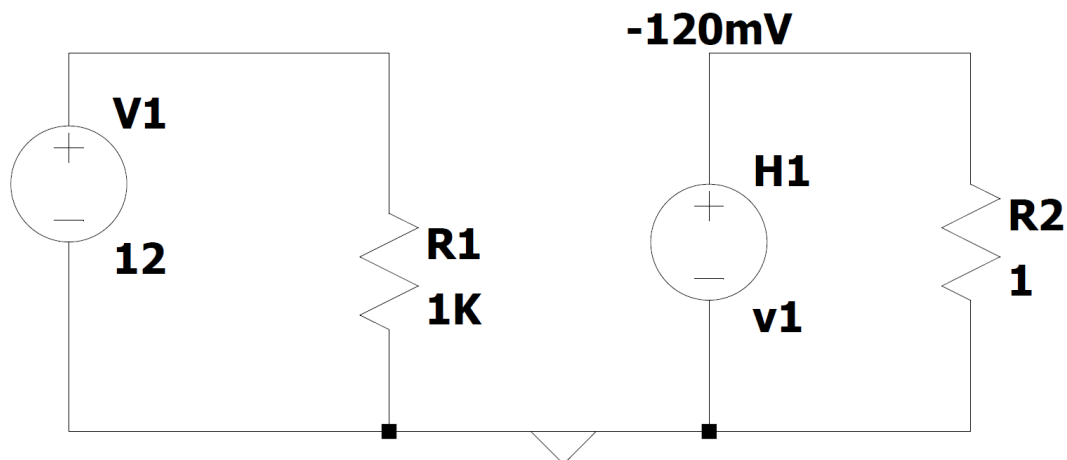
مثال برای منبع وابسته جریان - ولتاژ:



```
* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc
--- Operating Point ---
V(n1) :          0.012          voltage
V(n001) :        0.0167162     voltage
V(n2) :          2.67938      voltage
V(n002) :        0.0141485     voltage
I(I1) :          0.002         device_current
I(R4) :          0.000167162   device_current
I(R3) :          0.000666309   device_current
I(R2) :          0.00133369    device_current
I(R1) :          -4.71616e-006  device_current
I(G1) :          -0.000171878   device_current
I(E1) :          0.000666309   device_current
I(V1) :          0.00116653    device_current
```

3-منبع جریان - ولتاژ: ابتدا به component رفته و عبارت  $h$  را سرچ می‌کنیم، بعد از وصل کردن منبع وابسته به مدار کلیک راست بر روی منبع وابسته در Value منبع ولتاژ مورد نظرمان را انتخاب می‌کنیم و در Value2 عنوان مثال ۱۰ را وارد می‌کنیم. به این معنا است که ده برابر جریان آن منبع ولتاژ انتخاب شده ولتاژ خواهیم داشت.





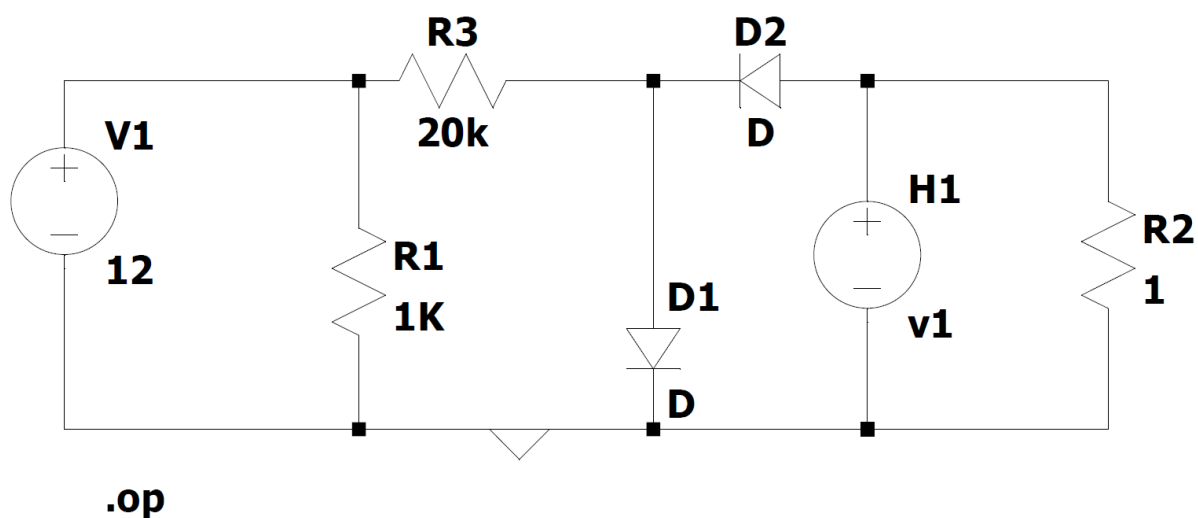
**.op**

\* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc

--- Operating Point ---

V(n001) :	12	voltage
V(n002) :	-0.12	voltage
I(H1) :	0.12	device_current
I(R2) :	-0.12	device_current
I(R1) :	0.012	device_current
I(V1) :	-0.012	device_current

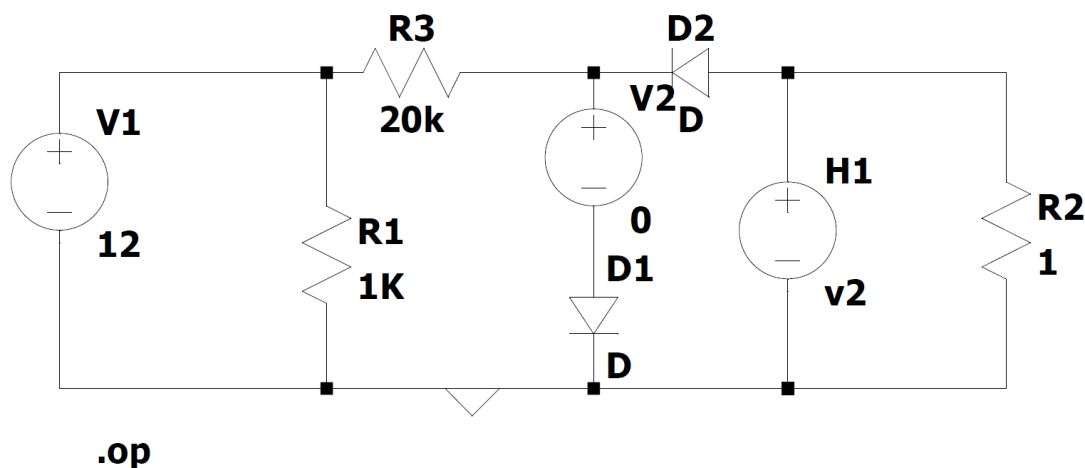
مثال : می خواهیم در مدار زیر ولتاژ منبع وابسته H1 ما برابر  $I_{D1} \cdot 100$  بشود ، چه کاری باید ما انجام بدهیم ؟



**.op**

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

حال برای آنکه منبع وابسته را به جریان دیود یک ربط بدهیم، از یک منبع ولتاژ صفر ولت سری شده با دیود استفاده می‌کنیم، در واقع انگار این منبع ولتاژ که صفر ولت است یک سیم می‌باشد. اکنون مدار ما به شکل زیر رسم می‌شود.



که مشخصات شبیه سازی ما به شکل زیر می باشد.

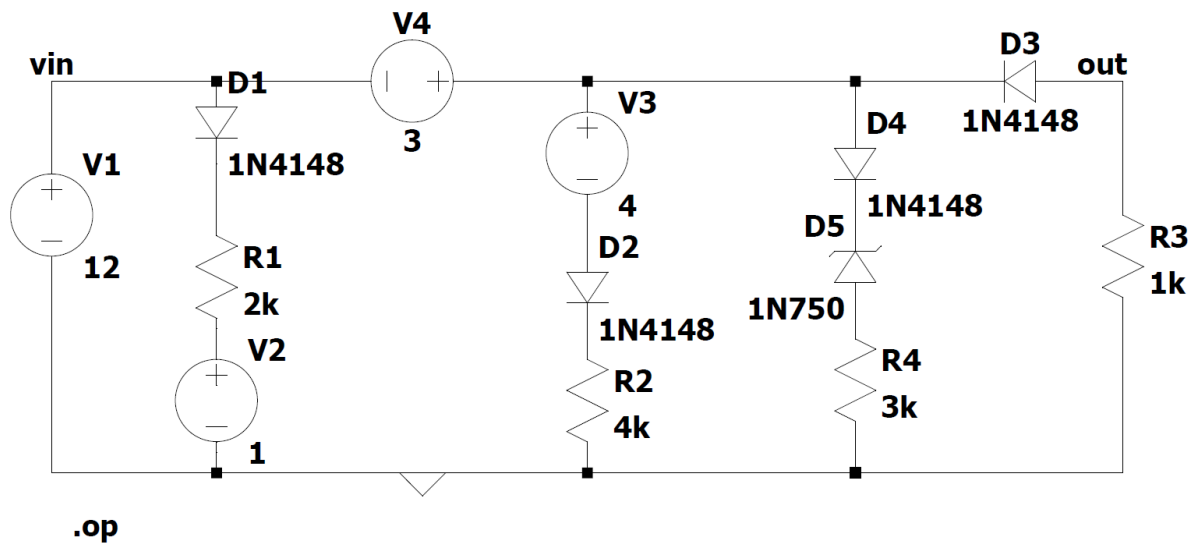
\* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc

--- Operating Point ---

```
V(n001) :      12          voltage
V(n003) :      1.30952    voltage
V(n002) :      0.662093   voltage
V(n004) :      0.662093   voltage
I(H1) :       -1.31026    device_current
I(D2) :        0.00074262  device_current
I(D1) :        0.00130952  device_current
I(R3) :       -0.000566895  device_current
I(R2) :        1.30952     device_current
I(R1) :         0.012      device_current
I(V2) :        0.00130952  device_current
I(V1) :       -0.0125669   device_current
```

بدست آوردن منحنی مشخصه :

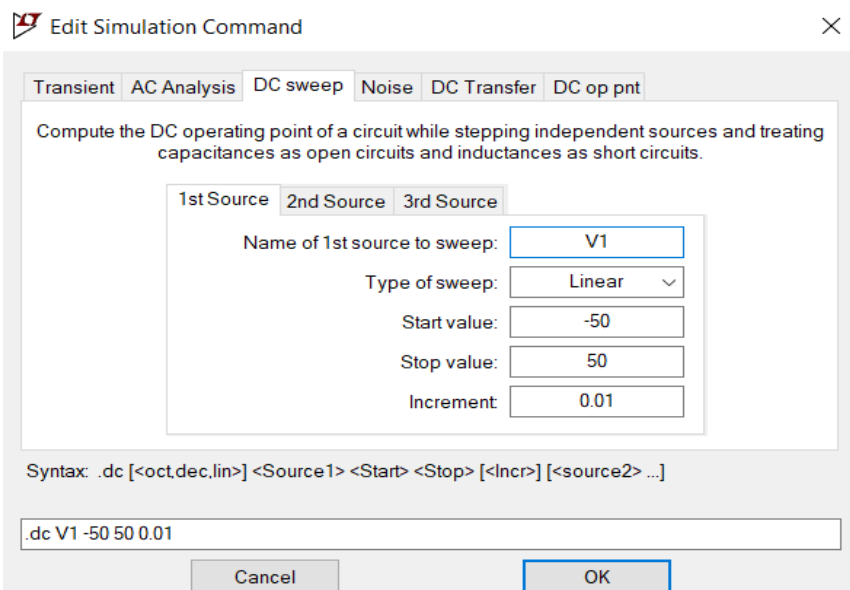
ابتدا مدار پیچیده زیر را در نظر می‌گیریم، در این مدار قصد داریم منحنی مشخصه out را بر حسب  $V_{in}$  با استفاده از شبیه ساز بدست آوریم.



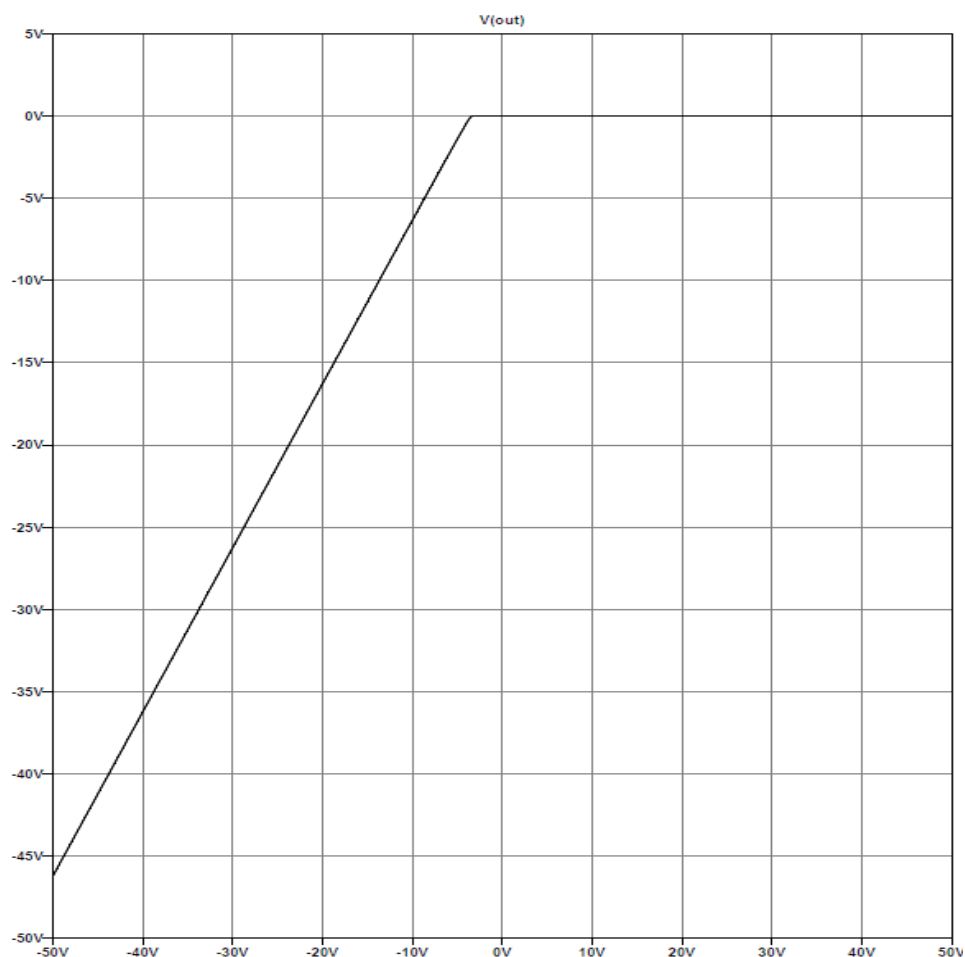
**نکته:** زمانی که بر روی دیود کلیک راست کنیم، با زدن Pick New Diode انواع دیودها را مشاهده خواهیم کرد، در این مثال ما دیود 1N4148 را انتخاب کرده‌ایم.

همانند قدم های قبل برای دیود زینر مدل 1N750 را انتخاب می‌کنیم.

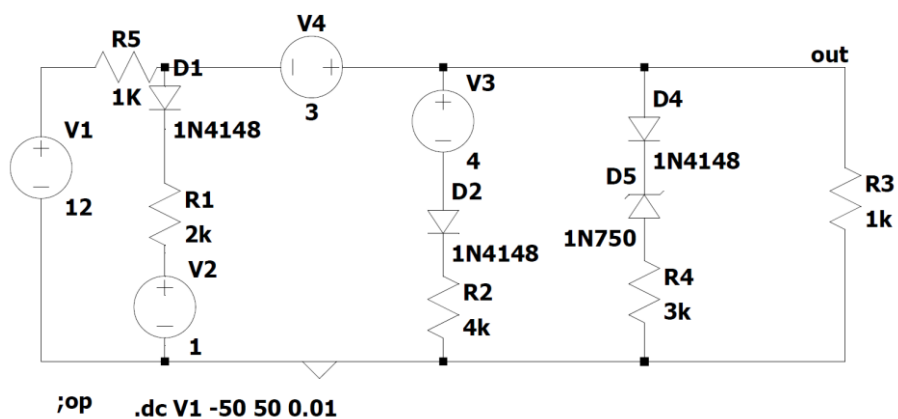
حال برای رسم منحنی مشخصه ابتدا به Simulate رفته و Edit simulation CMD را انتخاب می‌کنیم. و بعد از آن DC sweep را انتخاب می‌کنیم. اکنون باید صفحه زیر را داشته باشیم. که ابتدا باید اول آن چیزی که قصد داریم sweep را انتخاب کنیم، در این مثال ما قصد داریم V1 را sweep کنیم. و بعد از آن ما قصد داریم به شکل linear انجام بدهیم را انتخاب می‌کنیم. بعد از آن از چه مقداری را تا چه مقداری قصد sweep داریم را مشخص می‌کنیم، در این مثال ما از -50 تا 50+ را انتخاب می‌کنیم. در یخس مقدار چند صدم چند صدم که افزایش پیدا کند را مشخص می‌کنیم. اکنون برای درک بیشتر به شکل زیر توجه کنید.



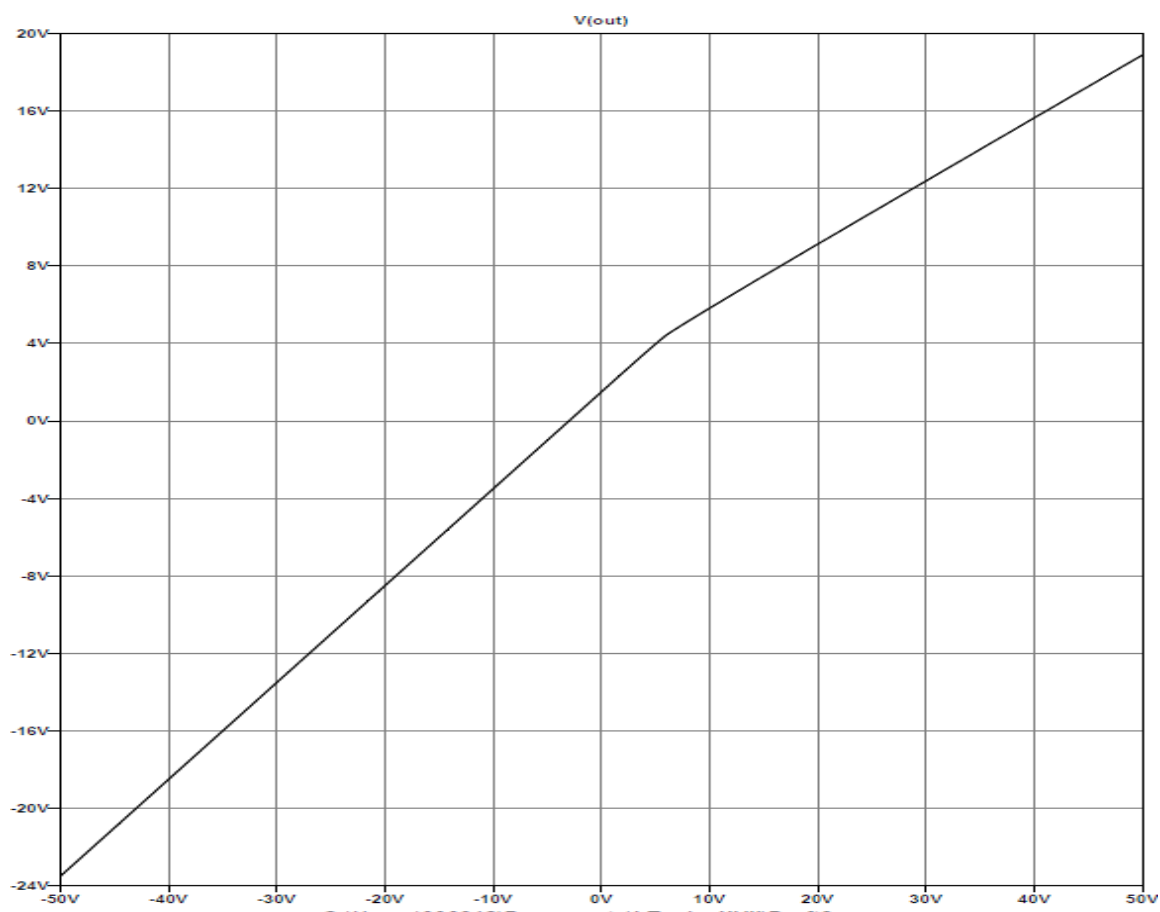
حال اکنون بعد از Run کردن ، می توانیم با مشخص کردن هر گره یا جریان منحنی مشخصه آن گره یا جریان را نسبت به  $V_1$  را داشته باشیم. اکنون ما منحنی مشخصه خروجی به ورودی که در مدار مشخص کرده ایم را شبیه سازی می کنیم. که منحنی مشخصه ما در شکل زیر رسم شده است



حال اکنون بار دیگر مدار را به شکل زیر در نظر می گیریم، دیود سه را حذف کرده و یک مقاومت با ورودی  $V_1$  اضافه می کنیم.

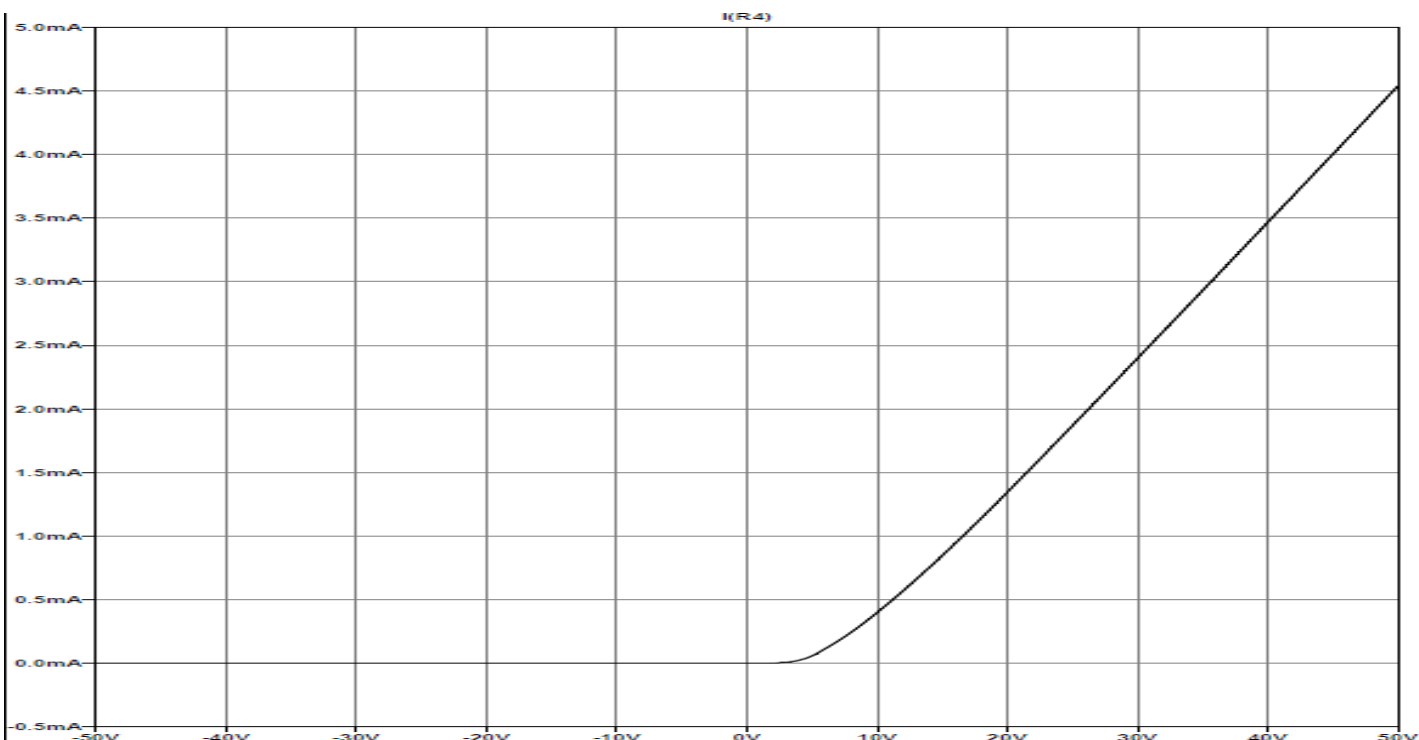


حال پس از Run کردیم منحنی مشخصه ما به شکل زیر است، در اینجا یک شکست ۴.۷ ولت دارد که بخاطر دوید زینر ما می باشد.



می توانیم با تغییرات دیگر در مدار منحنی مشخصه های مختلف دیگر را بدست آوریم.

حال اکنون در همان مدار اصلاح شده بالا ما منحنی مشخصه جریان R4 را رسم می کنیم که به شکل زیر است.

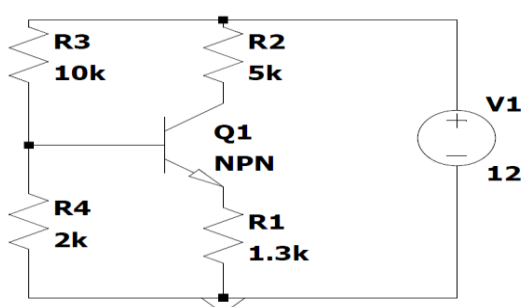


همانطور که مشاهده کردیم انواع منحنی مشخصه ها را می توانیم رسم کنیم.

نکته : می توانیم در نرم افزار زمانی که منحنی را رسم کردیم با کلیک بر روی  $V(out)$  مقادیر مختلف را مشاهده کنیم. اگر نقاط مختلف دیگر را هم همراه با نقطه اول بخواهیم داشته باشیم با دوباره کلیک کردن بر روی  $V(out)$  می توانیم داشته باشیم.

### بستن مدارات ترانزیستور bjt :

برای داشتن ترانزیستور ابتدا باید در Component در قسمت جست و جو کلمه NPN یا PNP را وارد کنیم. (برای داشتن ترانزیستور های CMOS می توانیم کلمه nmos یا pmos را براساس نیازمان جست و جو کنیم)  
 حال به عنوان مثال مدار زیر را در محیط شبیه ساز می بندیم.



حال ابتدا تحلیل DC را انجام می‌دهیم. (.op) که نتایج را در شکل زیر می‌توان دید.

```
* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc

--- Operating Point ---

V(n002) :          7.38294      voltage
V(n003) :          1.98461      voltage
V(n004) :          1.21244      voltage
V(n001) :          12          voltage
Ic(Q1) :          0.00092342    device_current
Ib(Q1) :          9.23419e-006  device_current
Ie(Q1) :          -0.000932654  device_current
I(R4) :           0.000992305    device_current
I(R3) :           0.00100154    device_current
I(R2) :           0.000923411    device_current
I(R1) :           0.000932646    device_current
I(V1) :           -0.00192495    device_current
```

حال برای اصلاح مدار که جریان کلکتور ما ۱ میلی آمپر شود، ابتدا مدل ترانزیستور خود را 2N2222 انتخاب می‌کنیم. اکنون می‌توان با استفاده از شبیه ساز جریان تقریباً ۱ میلی آمپر را در کلکتور ترانزیستور خود داشته باشیم.

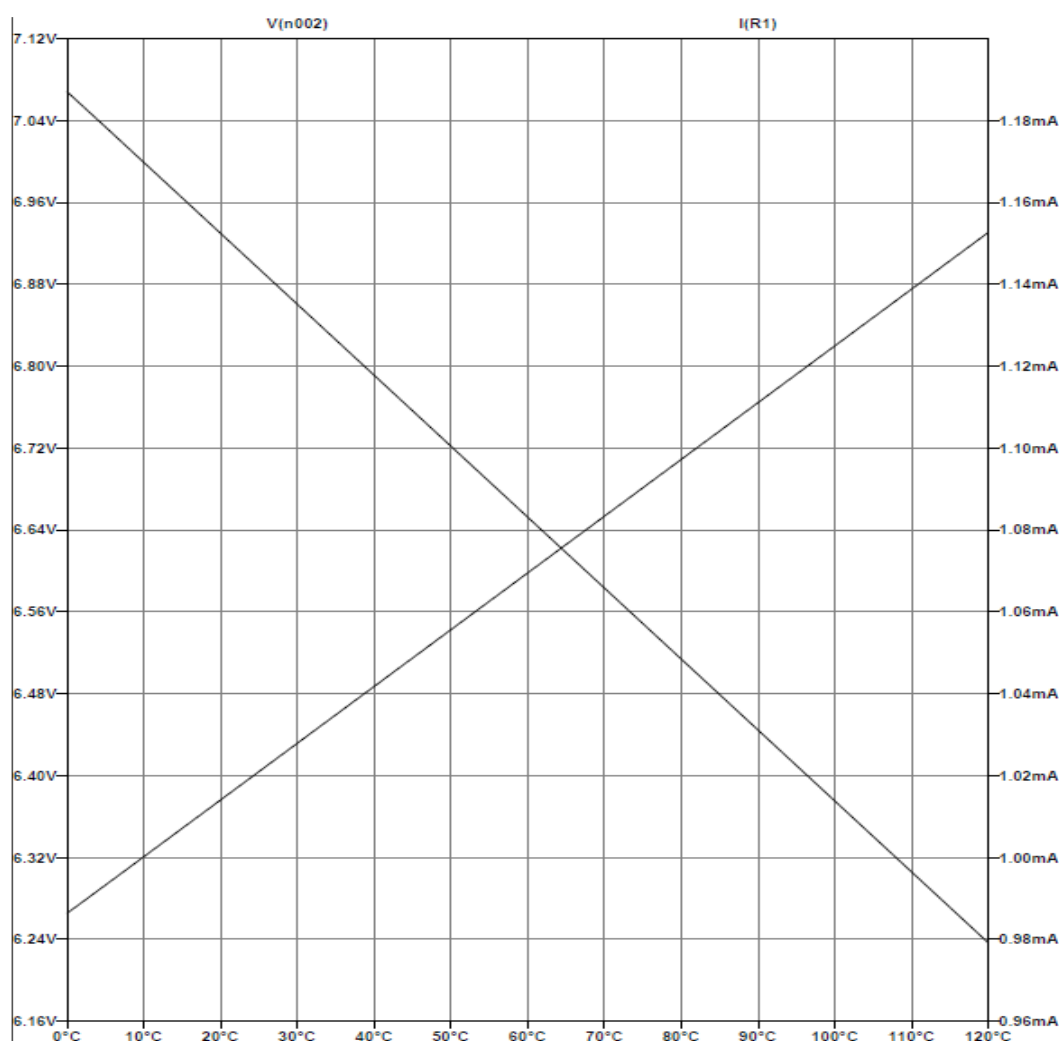
```
* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc

--- Operating Point ---

V(n002) :          6.88211      voltage
V(n003) :          1.99184      voltage
V(n004) :          1.33702      voltage
V(n001) :          12          voltage
Ic(Q1) :          0.00102358    device_current
Ib(Q1) :          4.89516e-006  device_current
Ie(Q1) :          -0.00102847    device_current
I(R4) :           0.000995921    device_current
I(R3) :           0.00100082    device_current
I(R2) :           0.00102358    device_current
I(R1) :           0.00102847    device_current
I(V1) :           -0.00202439    device_current
```

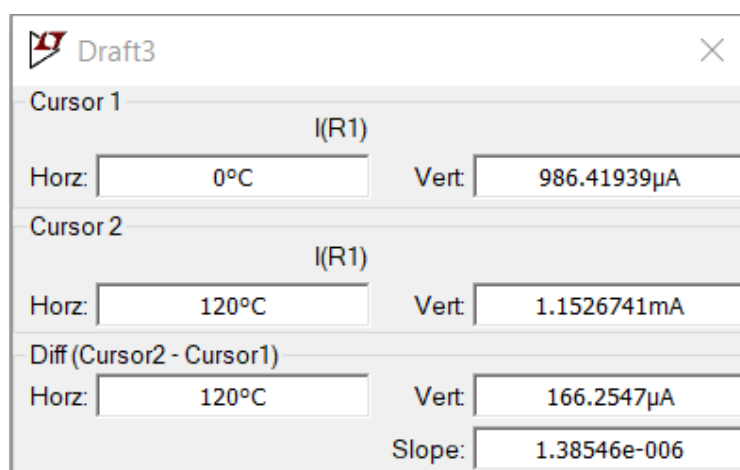
### سوئیچ دما:

اکنون قصد داریم سوئیچ دما را انجام دهیم، که ببینیم دما بر مدار ما چه اثری دارد، همانطور که می‌دانیم باید مدارات ما مستقل از دما باشند. دستور آن `temp 5 0 120` می‌باشد، از سمت چپ به راست عدد ۵ یعنی ۵ درجه عدد دوم و سوم یعنی از صفر درجه تا ۱۲۰ درجه را بهم وصل می‌کند و نمودار را به ما تحویل می‌دهد. حال همان مدار مثال قبل را شبیه سازی می‌کنیم. حال اگر نمودار بدست آمده را بررسی کنیم، خواهیم دید جریان کلکتور ما با افزایش دما افزایش می‌یابد. اما ولتاژ کلکتور کاهش پیدا می‌کند.

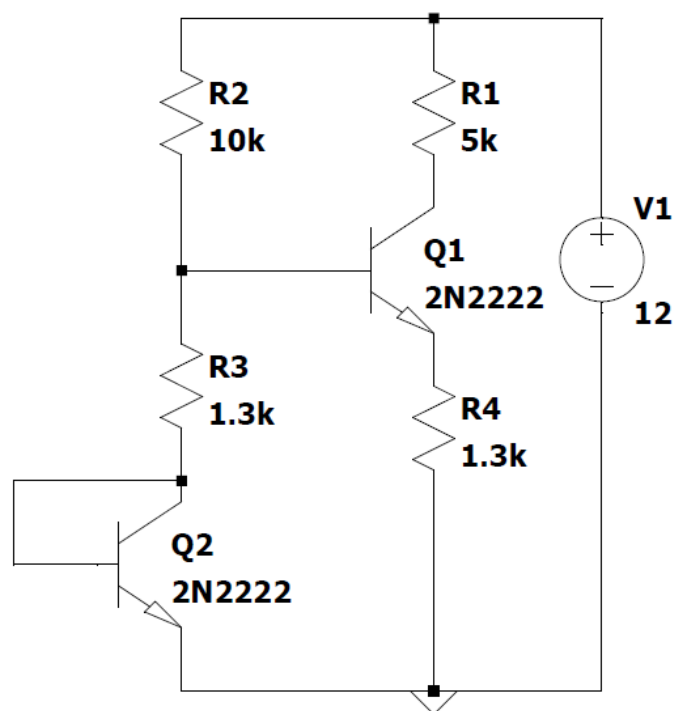


حال قصد داریم مقدار تغییرات جریان برحسب افزایش دما را بدست آوریم. که با کمک شبیه ساز خواهیم دید تغییرات ما ۱۶۶ میکرو آمپر خواهد بود. که تقریباً ۱۶ درصد تغییرات داشته‌ایم.

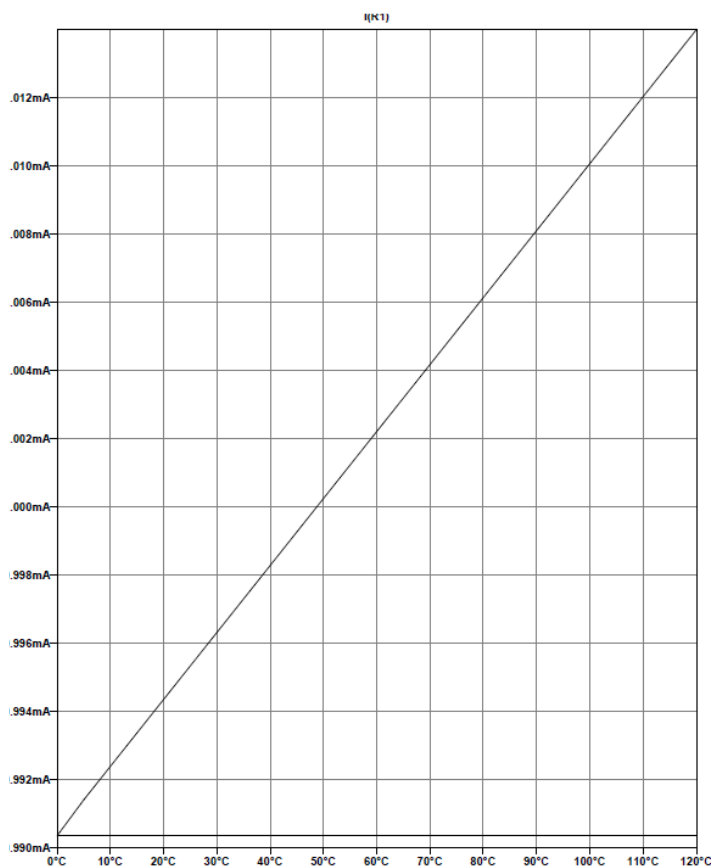




و اما راهکار ما برای رفع این مشکل رسم مدار زیر می‌باشد. (قرار دادن دیود همجنس به شکل سری با مقاومت R4) و برای آنکه به جریان ۱ میلی آمپر در کلکتور برسیم مقاومت R4 را به ۱.۳ کیلو اهم کاهش می‌دهیم. حال مدار زیر را خواهیم داشت.



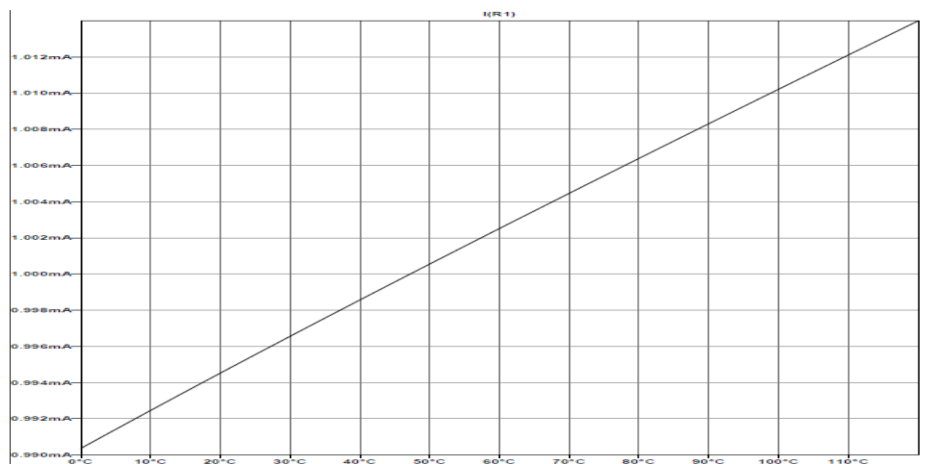
حال همانند قبل میتوان دید که تغییرات ما به ۲۳ میکرو آمپر رسیده است. که نتیجه نمودار شبیه ساز جریان بر حسب دما در زیر نشان داده شده است



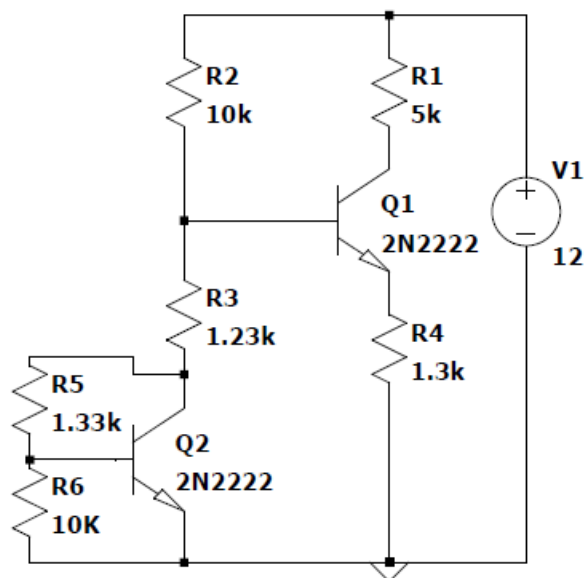
اگر بخواهیم مقادیر خاصی را در دمای خاصی بدست آوریم باید از دستور `temp X` استفاده کنیم.  $X$  مقدار متغیر دمای ما می‌باشد.

برای سوئیچ دما باید از دستور `step temp 0 120 0.1` که از سمت چپ به راست عدد اول و دوم یعنی بازه دمای ما  $0$  درجه تا  $120$  درجه است و عدد سوم یعنی  $0.1$  درجه  $0.1$  درجه افزایش یابد

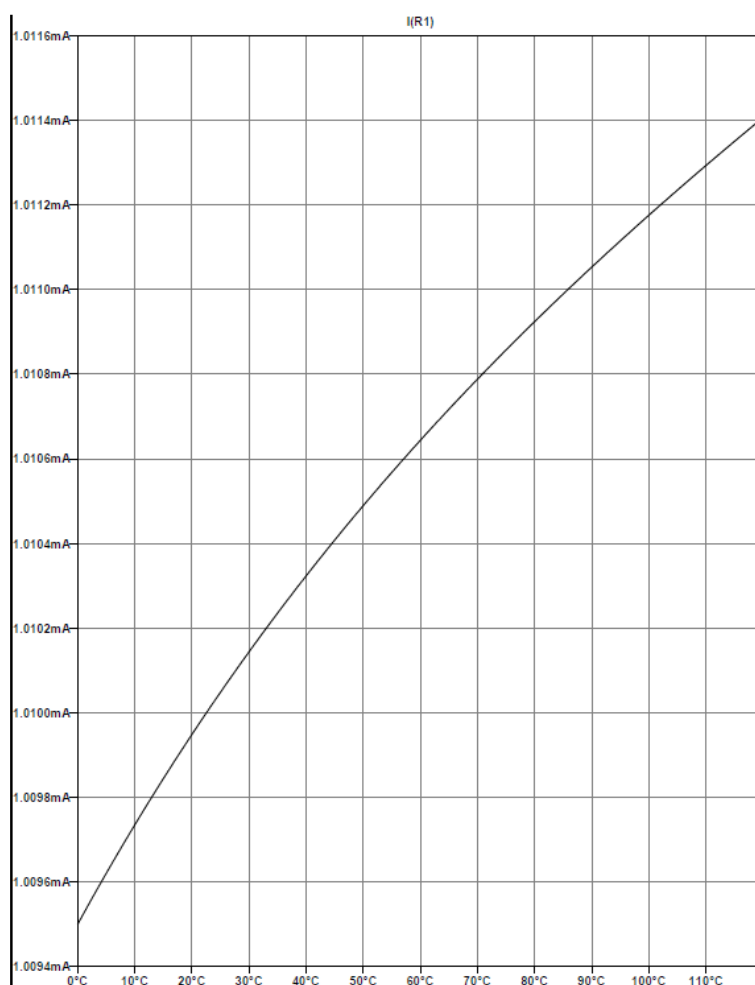
اکنون می‌توانیم با شبیه ساز برای مدار اصلاح شده مثال قبل نمودار مورد نظرمان را برای جریان کلکتور ترانزیستور بدست آوریم.



برای بهتر شدن عدم تاثیر دما بر روی مدارمان ، با اضافه کردن مقاومت، مدار زیر را بدست می آورديم.



۱.۹ نانو آمپر



تغییرات آن در حد  
می‌باشد.

**تحلیل transient:** یعنی محور من محور زمان می‌باشد، مثلاً بیان می‌کند که ولتاژ کلکتور در این لحظه از زمان چقدر است. هم ac دارد و هم DC.

**نکته:** در LTspice منبع ولتاژ ac و dc تفاوتی با یکدیگر ندارند.

حال مدار زیر را برای تحلیل مان در نظر می‌گیریم.

**نکته:** برای انتخاب منبع ولتاژ به همان شکل ابتدا volt را سرچ کرده و انتخاب کرده و سپس بر روی آن کلیک راست می‌کنیم، اکنون به بخش Advanced رفته حال می‌تونیم منبع سینوسی را انتخاب کنیم. حال مقادیر مورد نظرمان را وارد می‌کنیم. (وقتی مقداری نگذاریم یعنی صفر است)

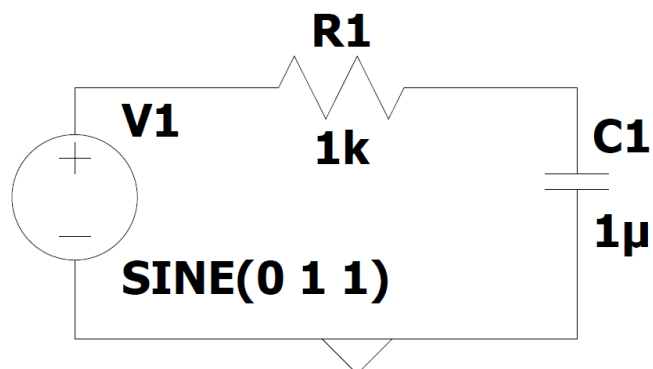
اکنون در edit simulation cmd بخش transient را انتخاب می‌کنیم.

Stop time یعنی تا کجا قرار است تحلیل را انجام دهیم.

Time to start saving data یعنی از کجا تحلیل را شروع کنیم.

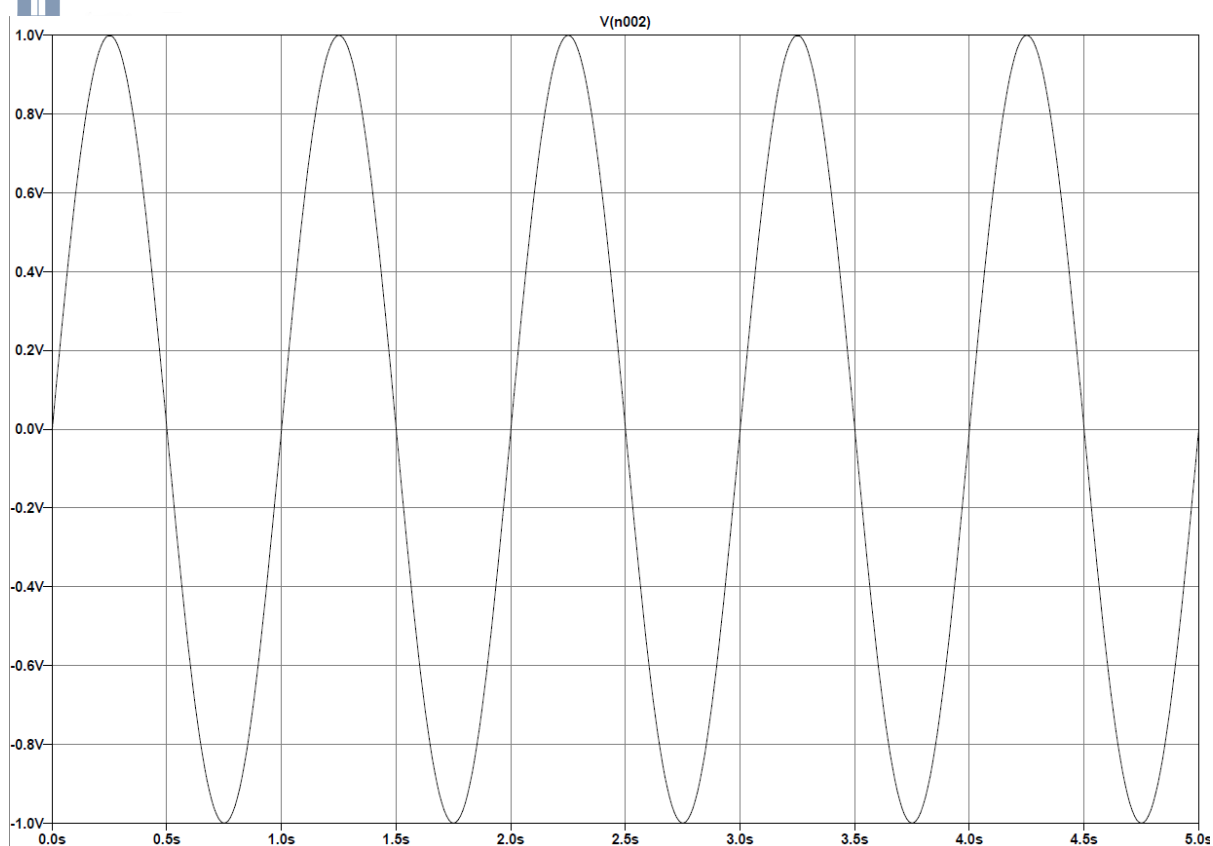
Maximum timestep یعنی مثلا چند میلی ثانیه چند میلی ثانیه این شبیه ساز را نمونه برداری را انجام دهیم ( نباید زیاد کوچک بگیریم باعث طولانی شدن و کند شدن و ارورهای خاص شبیه ساز می شود).

حال مثلا مدار زیر را در نظر می گیریم.

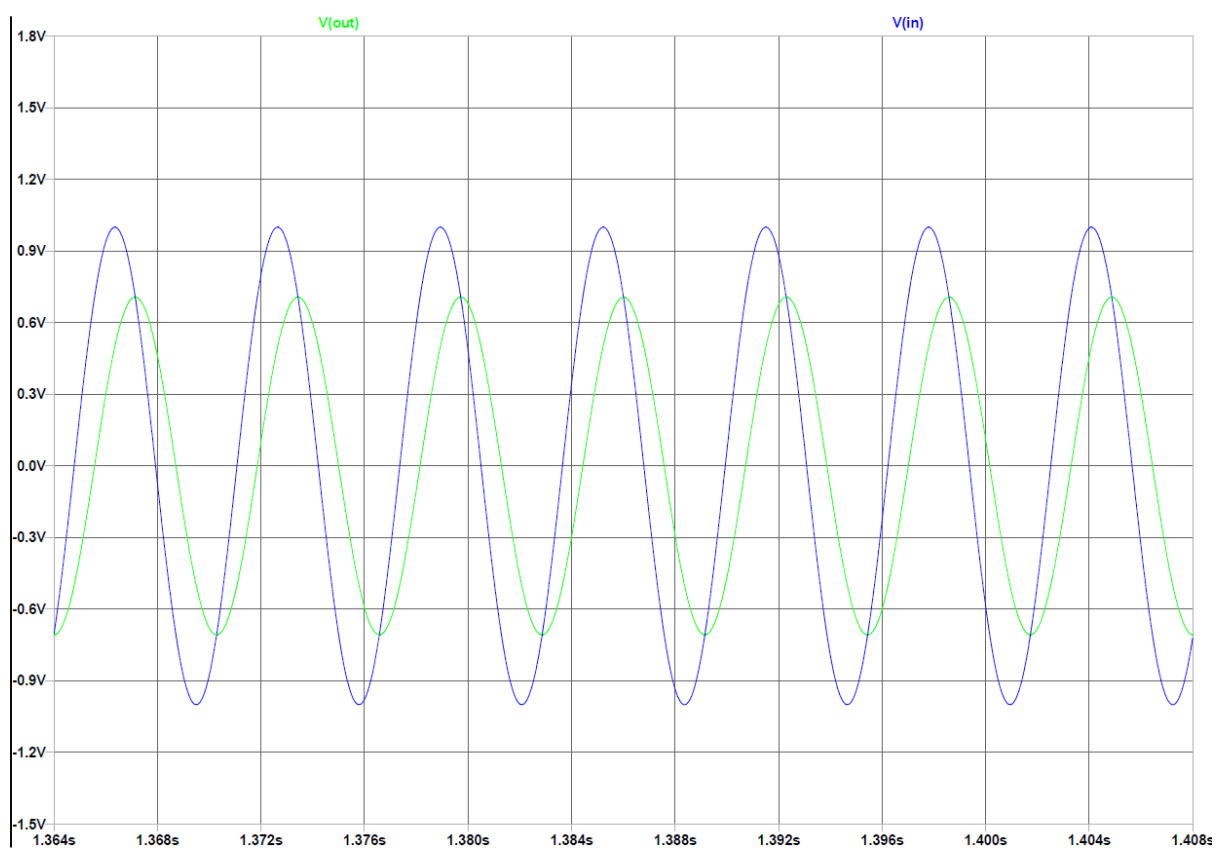


تحلیل transient ما برای ولتاژ خازن به شکل زیر در می آید. که همان سیگنال ورودی ما می باشد، چون فرکانس ۱ هرتز است و انگار آن خازن اتصال باز است.

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان



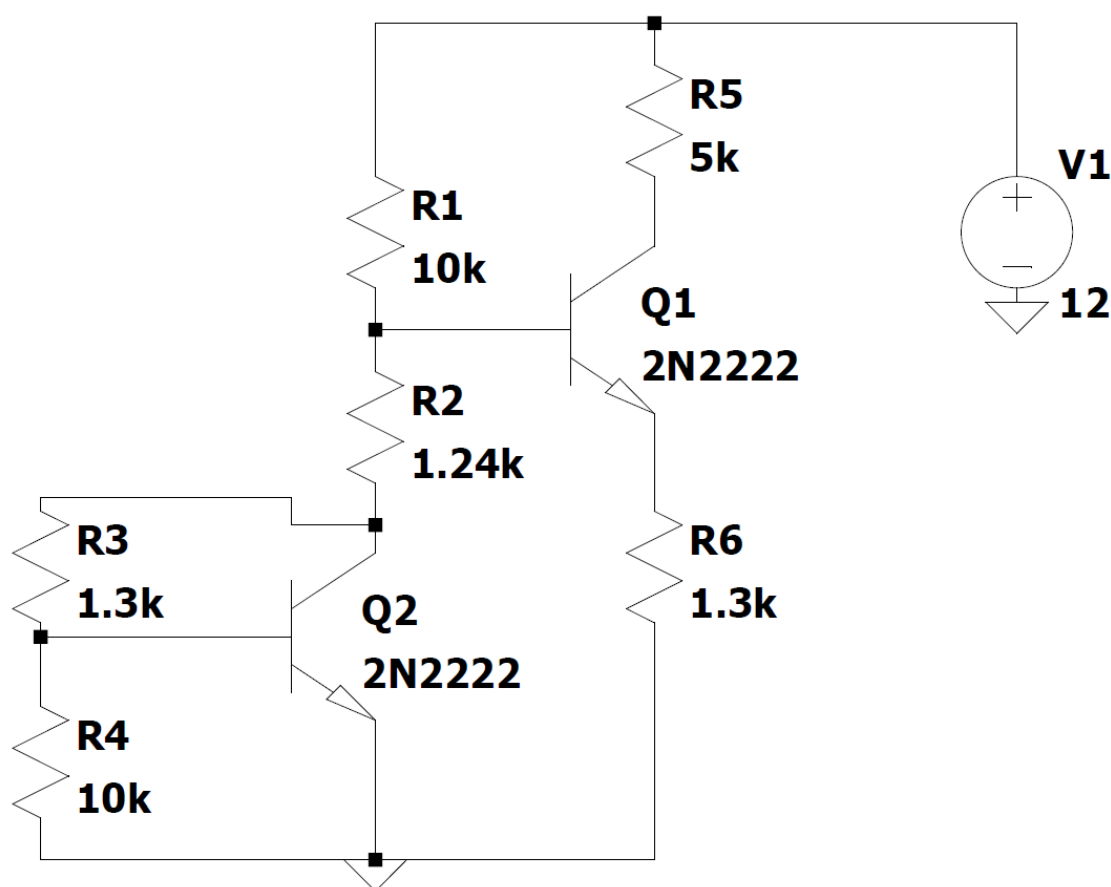
حال مثلا مدار را در ۱۵۹ هرتز شبیه ساز می کنیم که نتیجه آن به شکل زیر می شود.



**نکته:** در pulse هم همانند مقادیر sine باید انتخاب کنیم که دارای کف و بالا دارد و همچنین دارای تاخیر می باشد که در آینده آشنا خواهیم شد.

### :Step param

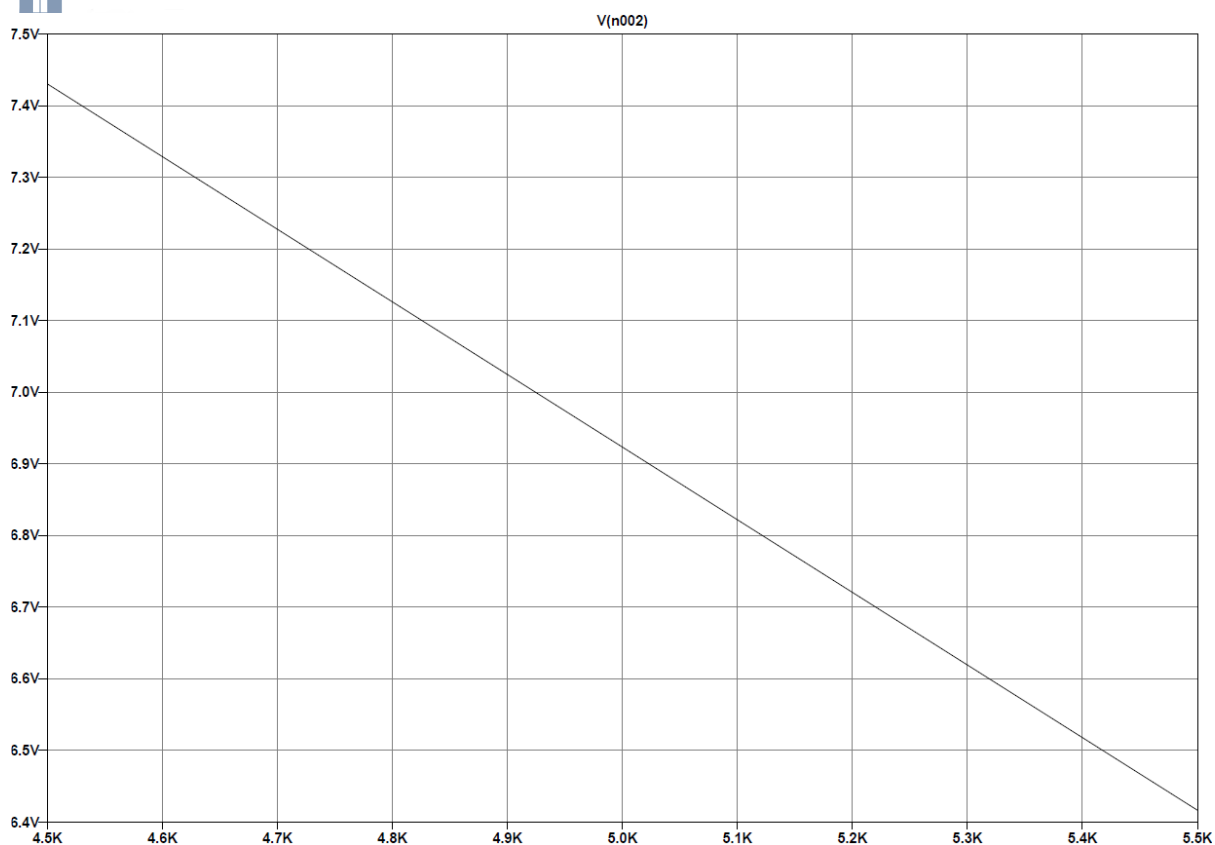
قصد داریم در یک مداری بهترین مقدار مقاومت را داشته باشیم. در این صورت باید از دستور step param استفاده کنیم، حال به عنوان مثال در مدار زیر داریم.



حال دستور را در spice directive را به این شکل وارد می کنیم  $\text{step param x } 4.5\text{k } 5.5\text{k } 0.1\text{k}$

یعنی مقاومت X که ما در اینجا مقاومت ۵ کیلو اهم کلکتور را در نظر می گیریم به شکل ۴.۵ کیلو تا ۵.۵ کیلو با پله های ۰.۱ کیلو تحلیل کند. حال مقاومت ۵ کیلو را مقادیرش را به شکل {X} وارد می کنیم. حال با استفاده از شبیه ساز نمودار ولتاژ بر مقاومت را بدست می آوریم و می توانیم تشخیص دهیم که مقاومت مورد نیاز ما چقدر است.

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان



براساس نمودار بالا اگر بخواهیم خروجی ما ۷ ولت باشد، مقاومت ۴.۹۲ کیلو را انتخاب می‌کنیم.

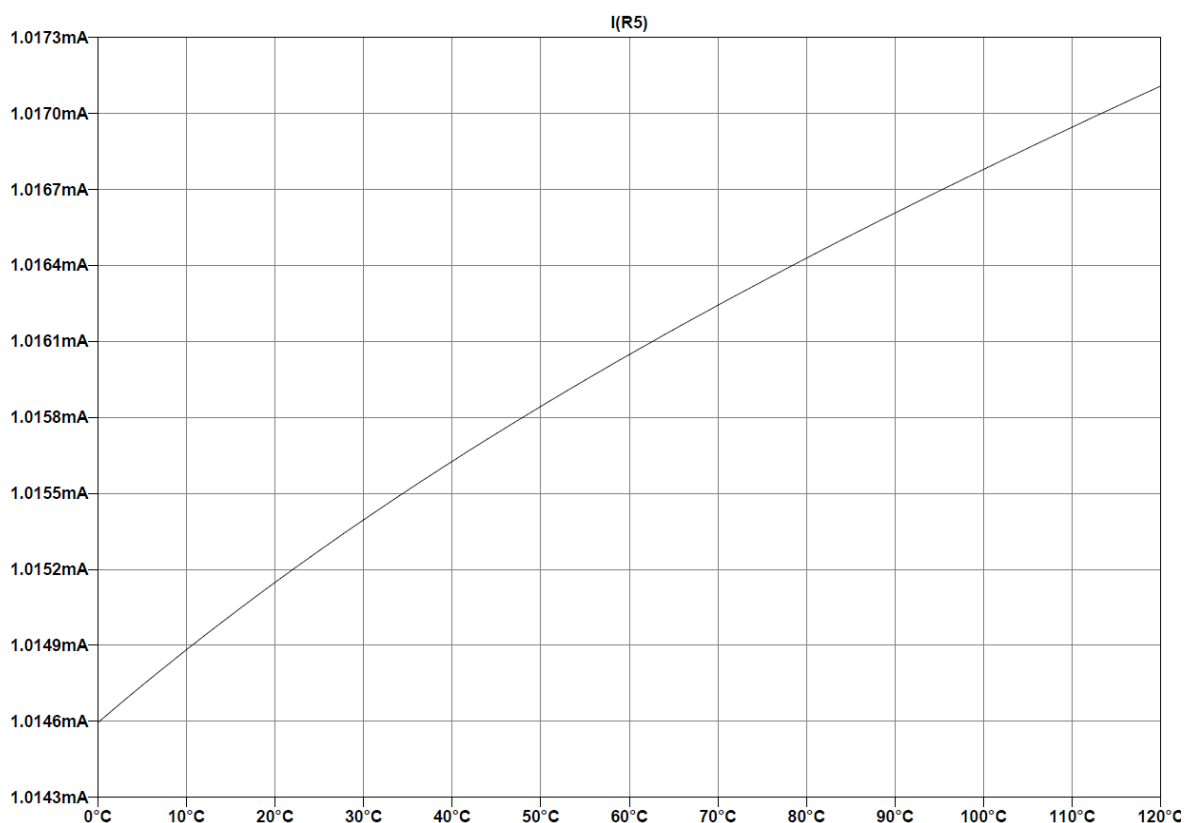
**نکته:** اگر قبل از هر دستوری ستاره قرار دهیم، آن دستور دیگر اجرا نمی‌شود. مثلا `.step param x 4.5k 5.5k 0.1k` \*

حال قصد داریم در همین مدار بهترین مقدار مقاومت  $R3$  را که بهترین منحنی مشخصه را به ما میدهد را پیدا کنیم. یعنی باید جریان خروجی و ولتاژ خروجی مستقل از دما باشد.

ابتدا دستور `.step temp 0 120 1` که با وارد کردن این دستور نمودار جریان خروجی ما به شکل زیر در می‌آید.

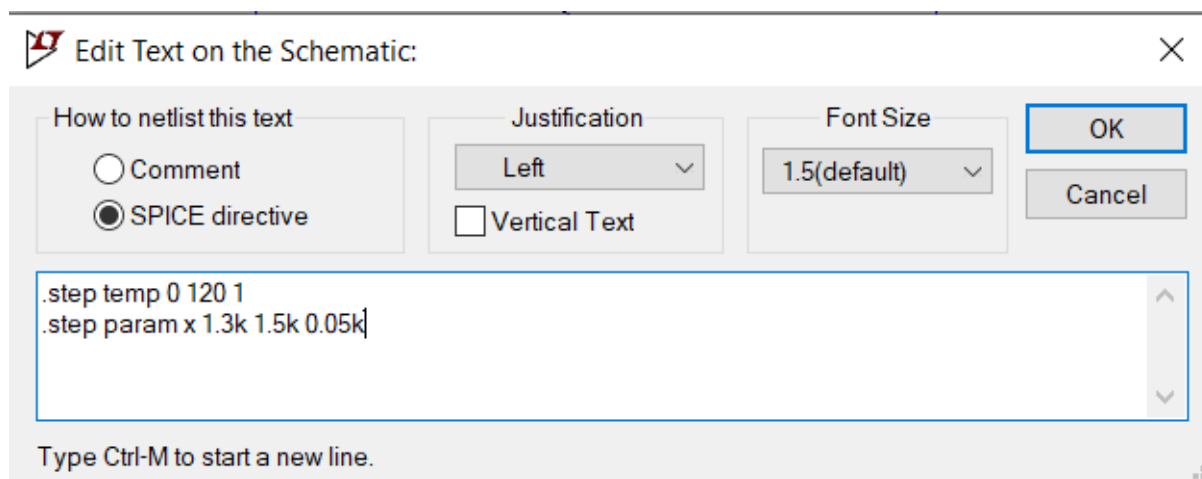
که ۳ میکرو آمپر تغییرات داشته‌ایم.





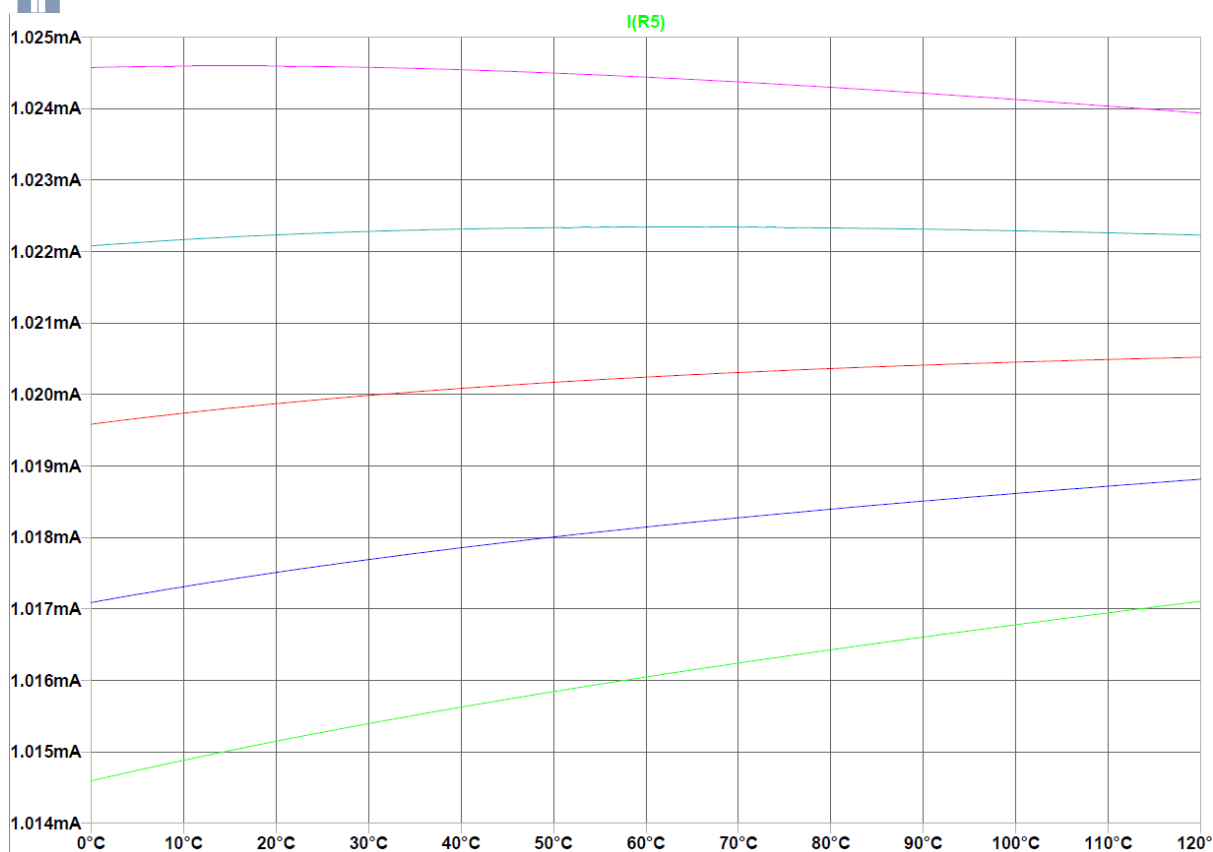
اکنون برای یافتن مقدار مناسب مقاومت R3 دو دستور `step temp 0 120 1` و `step param x 1.3k 1.5k 0.05k`.

را در یک دستور خواهیم نوشت (برای رفتن به سطر جدید از `ctrl+M` استفاده می‌کنیم)



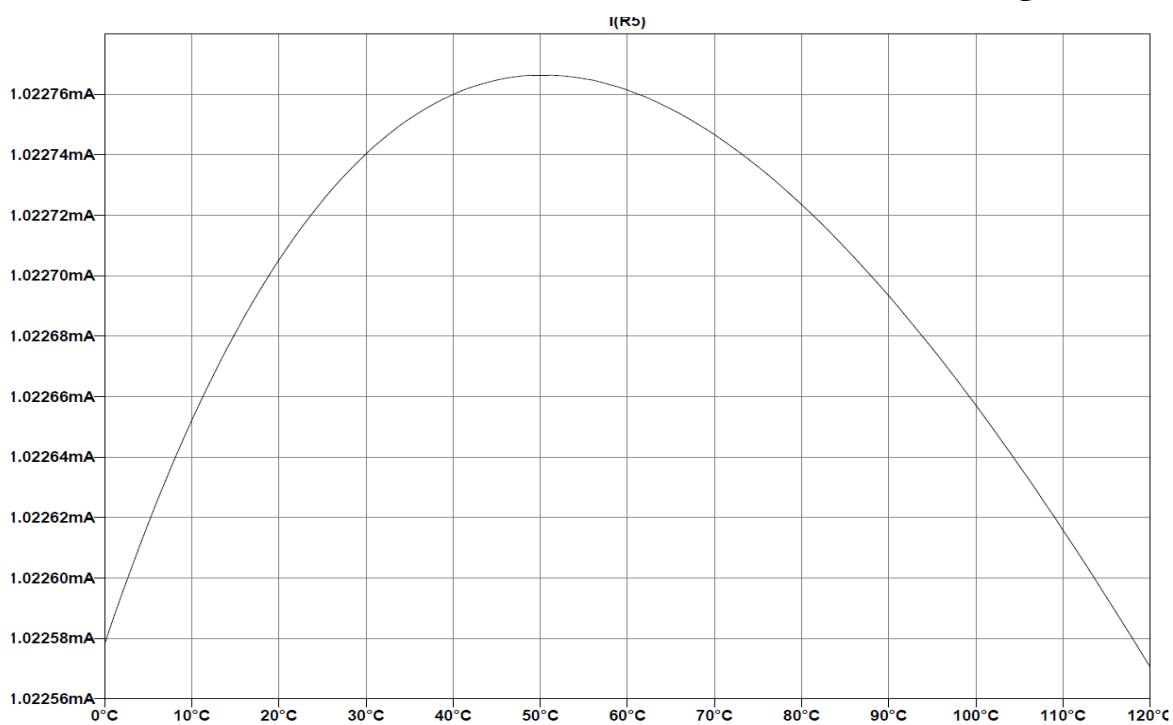
حال با انجام شبیه ساز نمودار زیر را خواهیم داشت.

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
 جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان



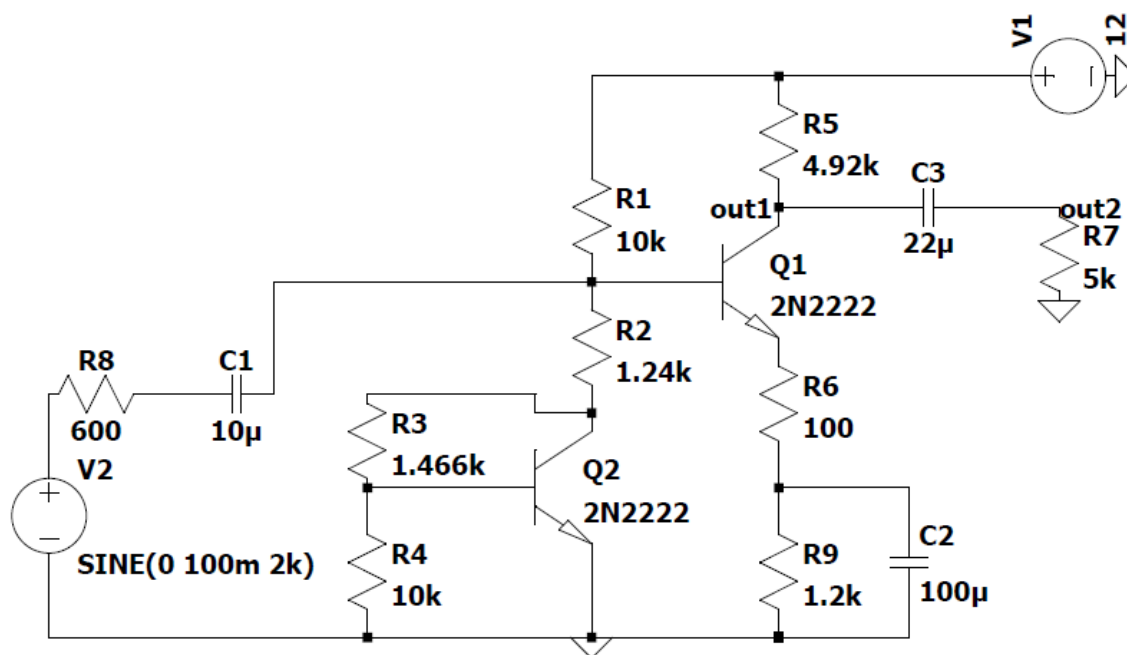
بر اساس نمودار می توان فهمید ۱.۴۵ کیلو تقریباً مقاومت مناسبی است ( خط آبی کمرنگ را نگاه کنید)

می توان با تغییرات در دستورات جزییات بیشتر را هم یافت. که خواهیم دید مقاومت مناسب ما ۱.۴۶ کیلو اهم است. در آخر نمودار جریان خروجی ما برحسب دما به شکل زیر است ، که نشان میدهد مدار ما مستقل از دما شده است.



ادامه تحلیل transient :

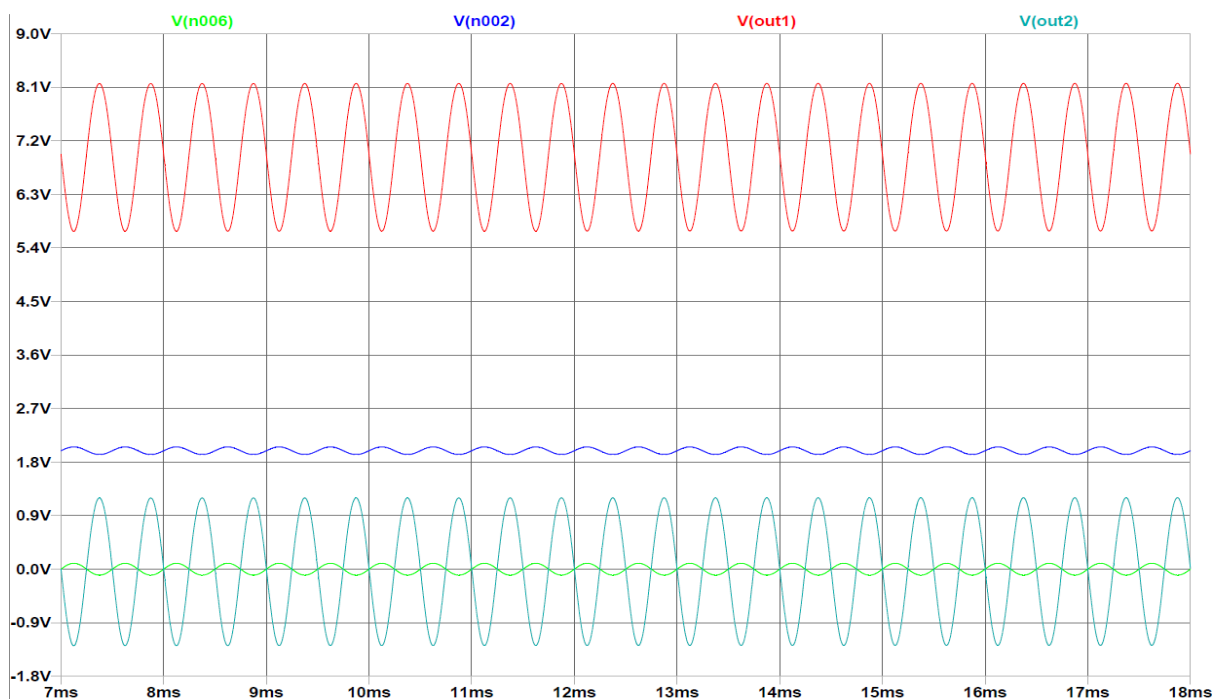
ابتدا به مدار مثال قبل خازن هایی را اضافه می کنیم. شکل مدار ما همانند شکل زیر می شود.



```

;op      .tran 0 50m 0 1u
    
```

اکنون دستور transient که آشنا شده بودیم را در شبیه ساز قرار می دهیم. (.tran 0 50m 0 1u).

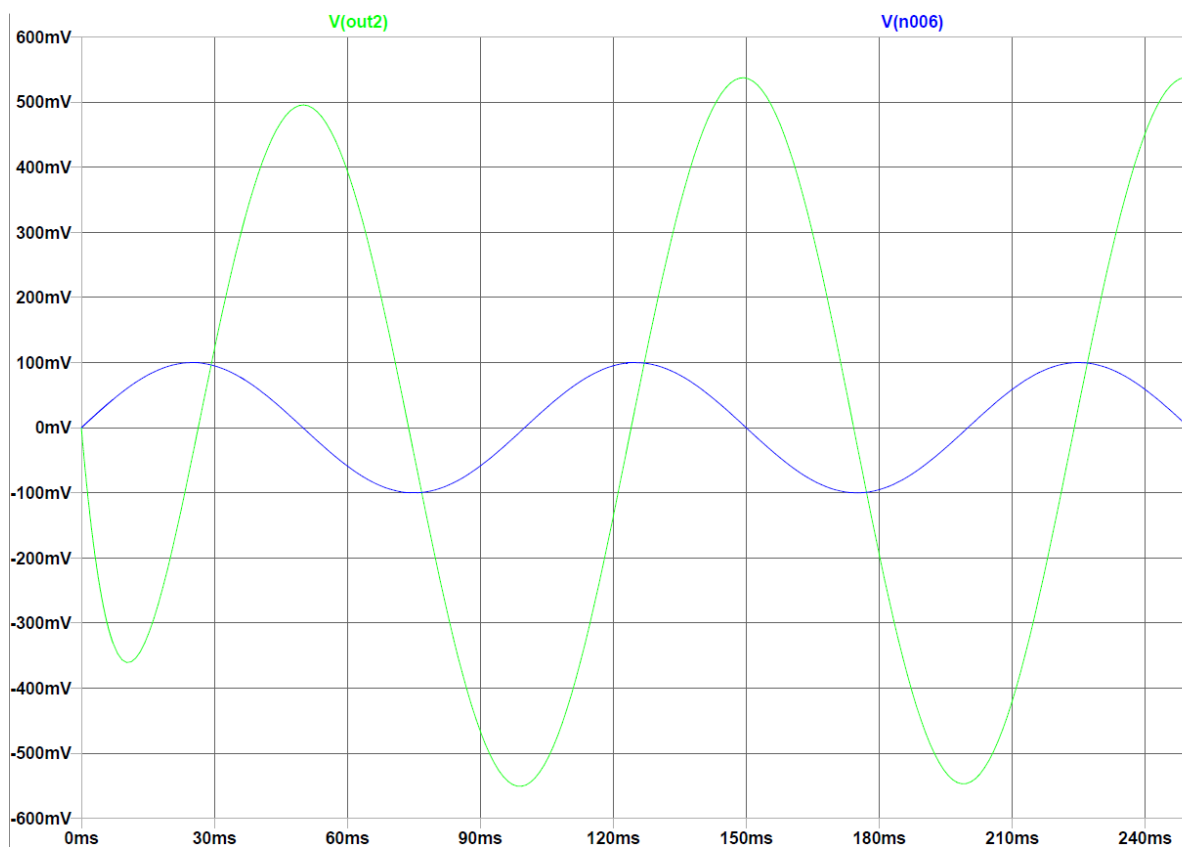


دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

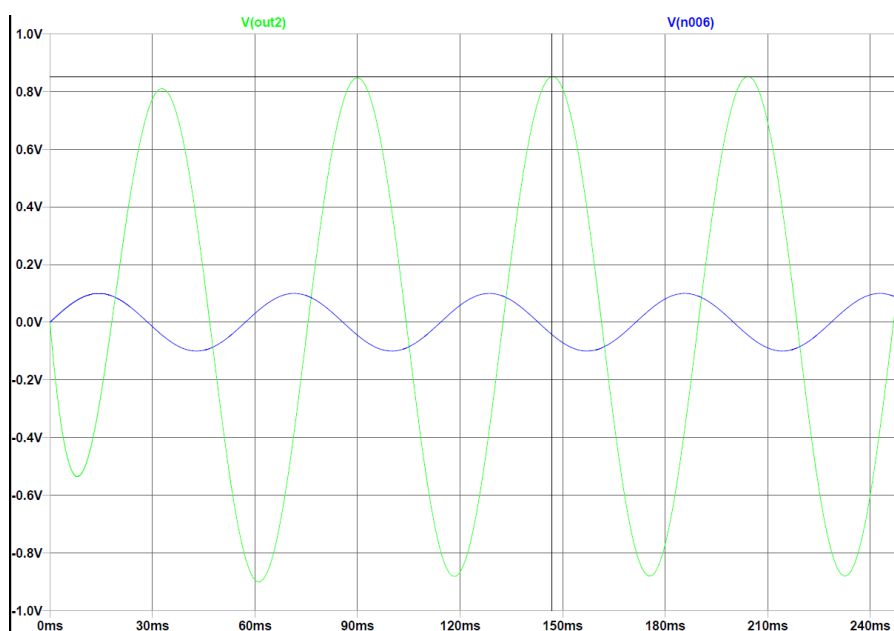
نمودار شبیه ساز ما به شکل کامل در بالا رسم شده است.

براساس نمودار گین مدار ما ۱۲.۴ است.

همچنین با فرکانس ۱۰ هرتز نمودار خروجی و ورودی ما برحسب زمان به شکل زیر است.

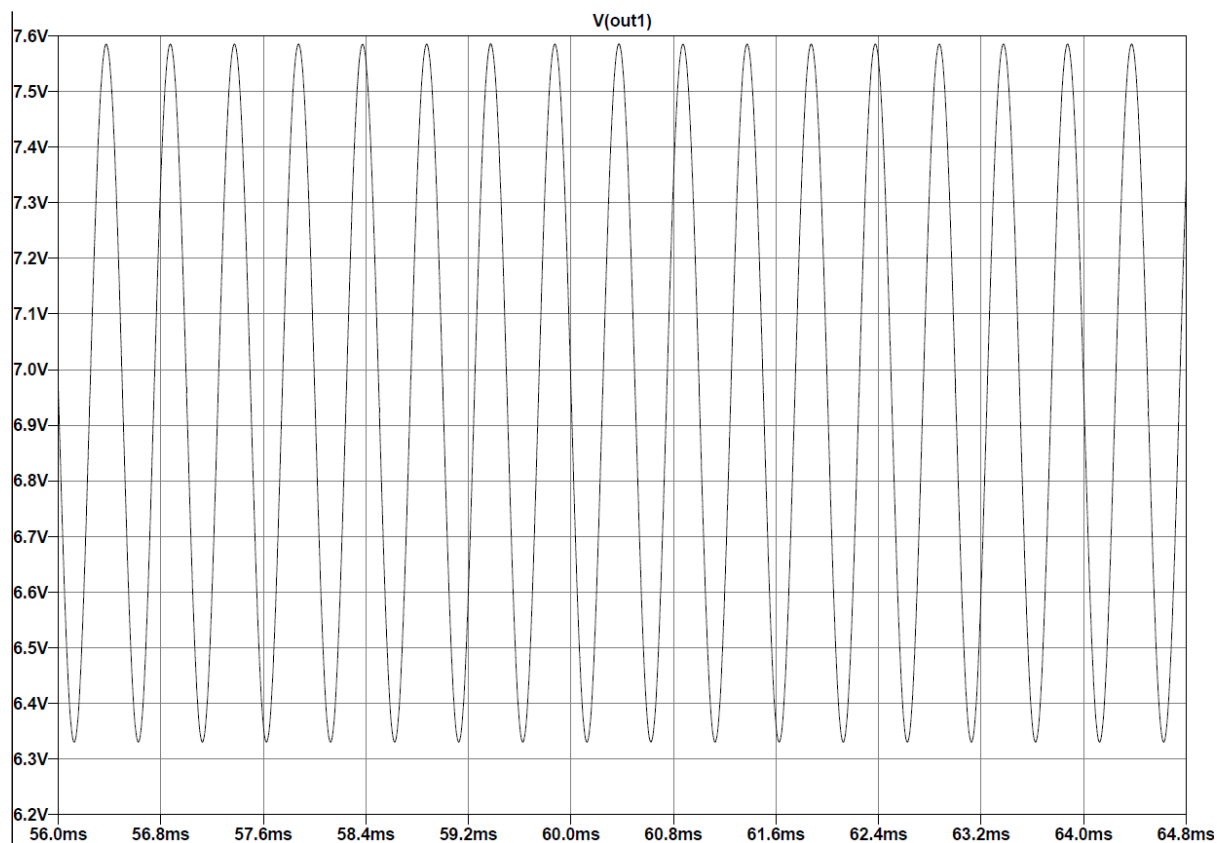


اگر فرکانس را ۱۷.۵ هرتز قرار بدهیم ، ۸۵۰ میلی ولت خروجی خواهیم داشت ، در نتیجه فرکانس قطع ما ۱۷.۵ هرتز می باشد.

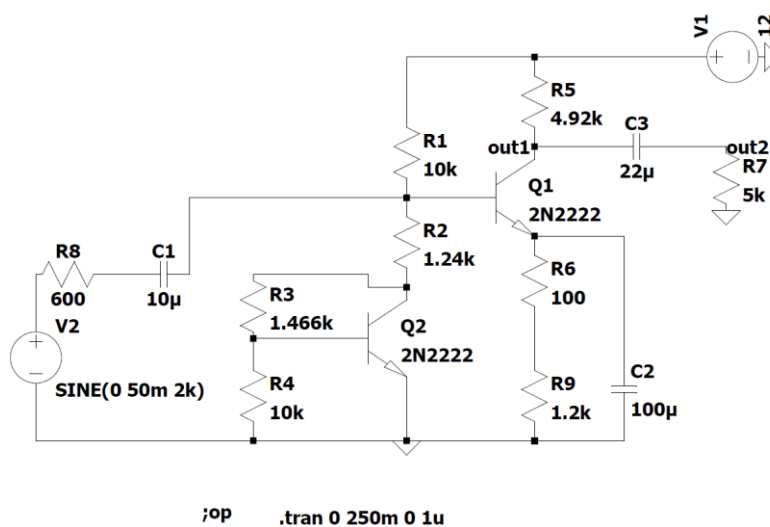


دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
 جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

حال منبع ولتاژ سینوسی خود را تغییر میدهیم دامنه آن را ۵۰ میلی ولت و فرکانس آن را ۲ کیلو هرتز در نظر می گیریم. نتیجه شبیه ساز ما در خروجی کلکتور در شکل زیر نشان داده شده است.

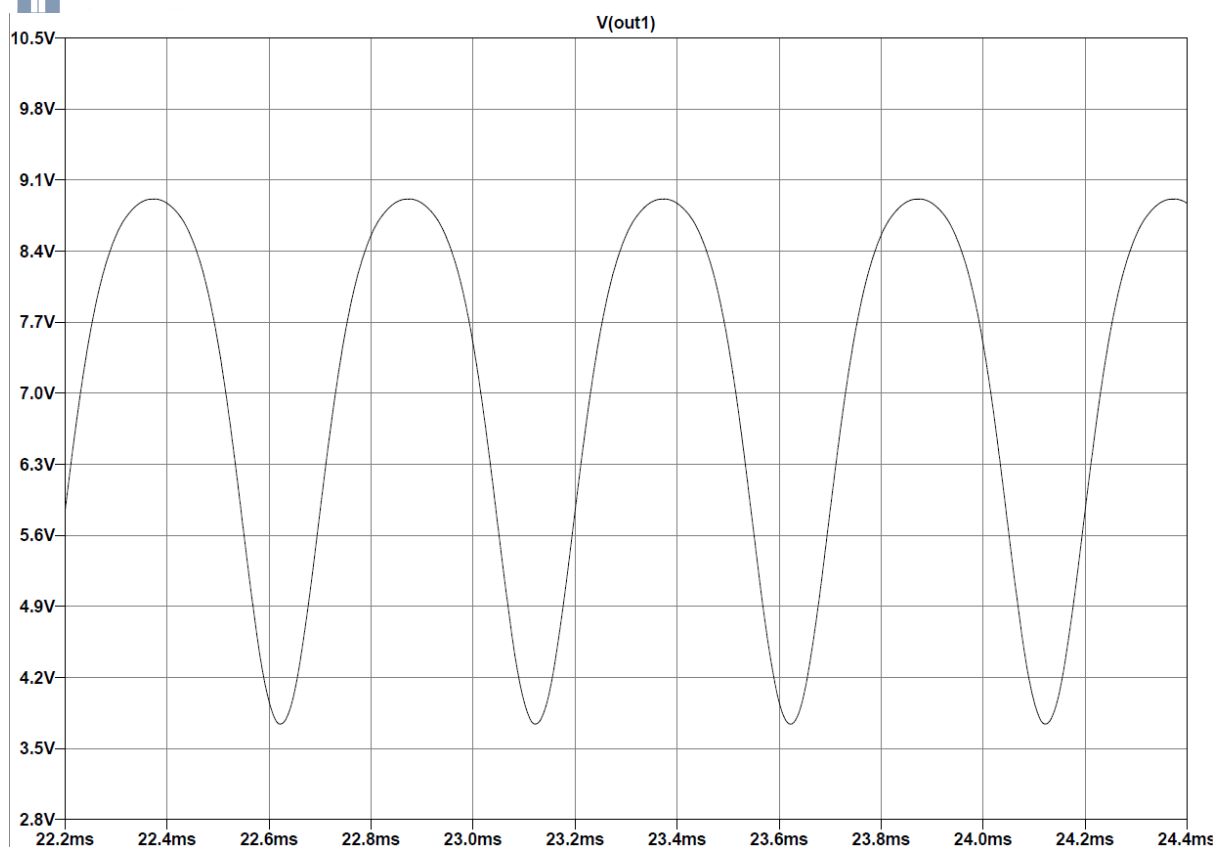


اکنون تغییراتی را در مدار ایجاد می کنیم که عبارتند از وصل کردن خازن به امیتر تا گین مدار افزایش پیدا کند.



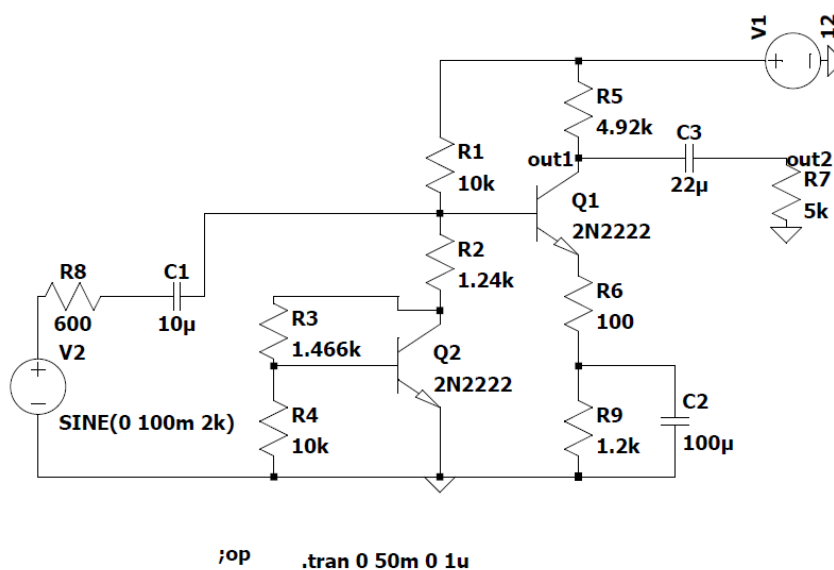
حال نتیجه شبیه ساز خود را اگر ببینیم باعث افزایش گین می شود.

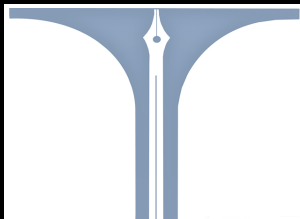
دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
 جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان



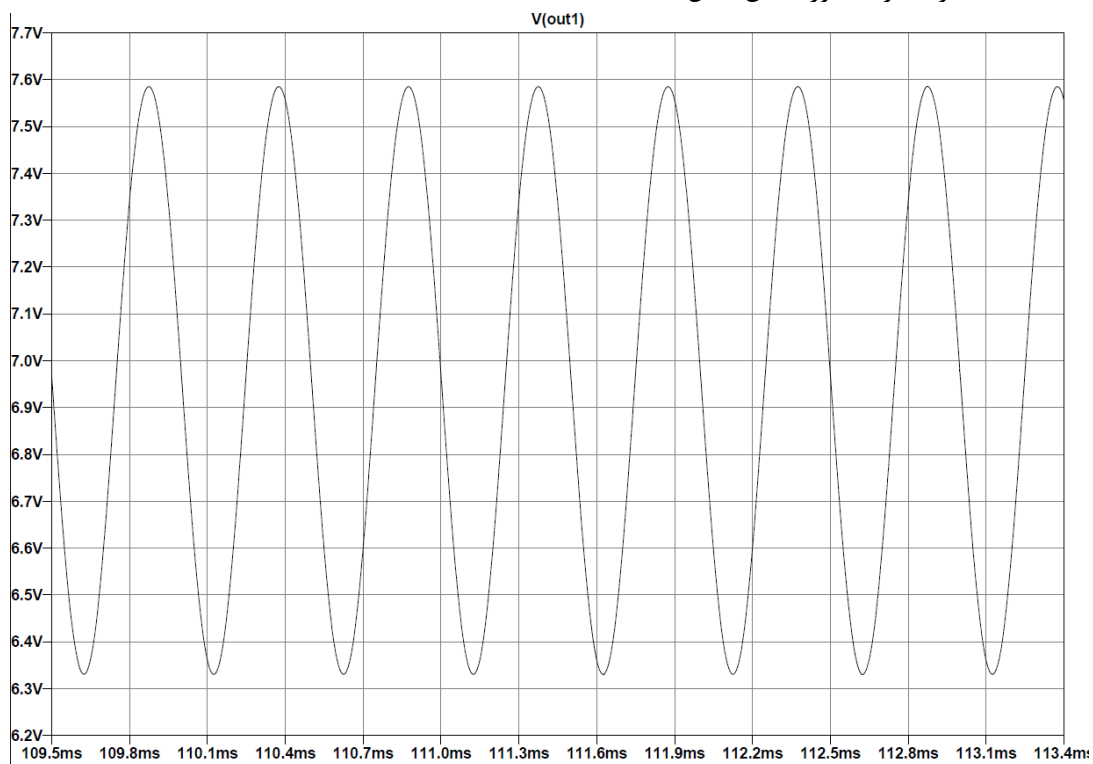
بدلیل غیر خطی بودن ترانزیستور شکل بالا حالت گنبدی خود را از دست داده است.

حال مدار را به همان حالت اولیه که بود قرار می‌دهیم تا حالت مطلوبی را داشته باشیم. (تاثیر مقاومت آمیتر در مدار بسیار مهم است)

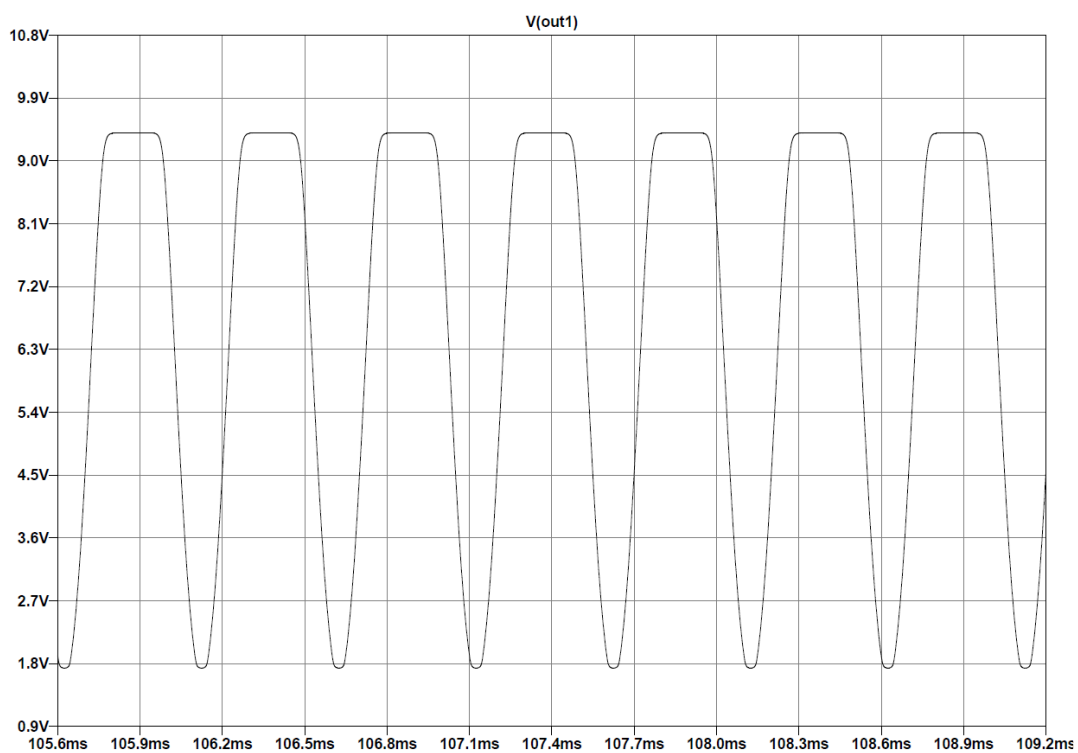




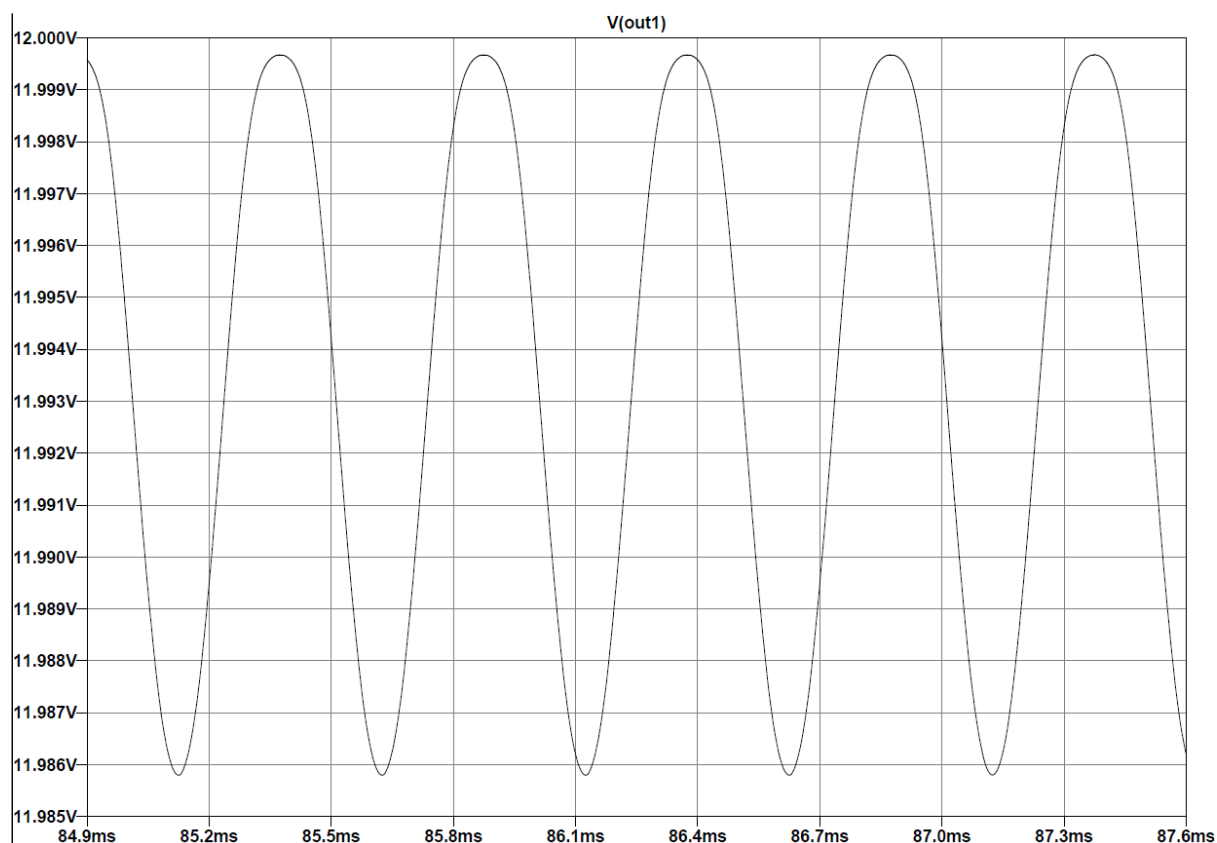
نتیجه شبیه ساز ما در کلکتور به این شکل است.



اکنون دامنه ورودی را ۵۰۰ میلی ولت در نظر می گیریم نتیجه شبیه ساز ما در شکل زیر رسم شده است. برش را در بالا و پایین سیگنال خروجی را می توانیم مشاهده کنیم.

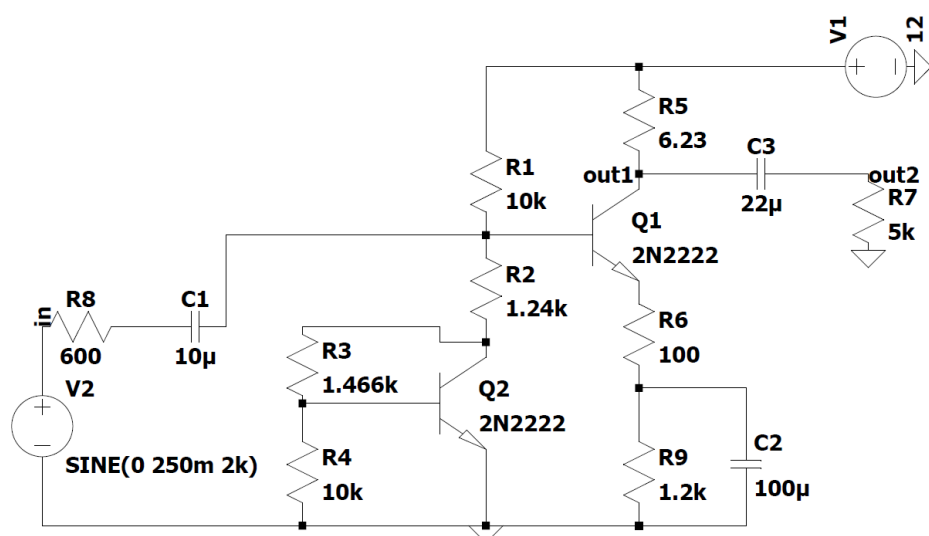


حال برای بهینه شدن سوئینگ و شکل سیگنال خروجی مقاومت R5 را ۶.۲۳ کیلو و دامنه ورودی را ۲۵۰ میلی ولت در نظر می‌گیریم، در نتیجه داریم :



همانطور که مشاهده می‌کنیم شکل خروجی مدار ما بسیار بهتر شده است.

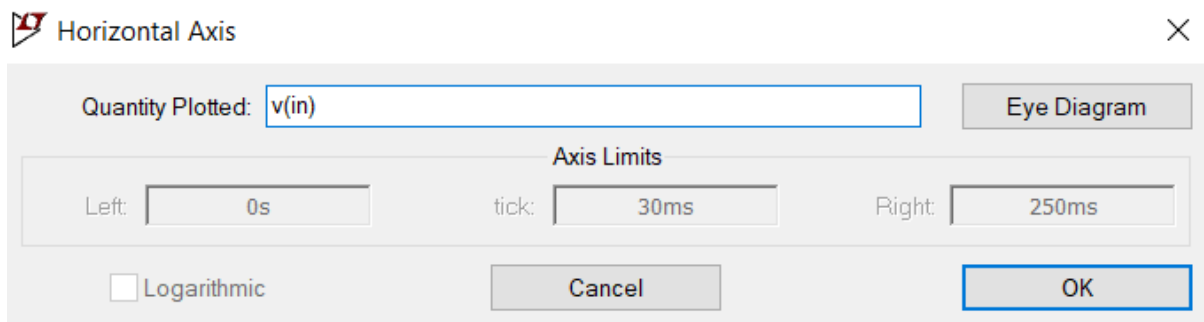
بدست آوردن منحنی مشخصه مثال قبل :



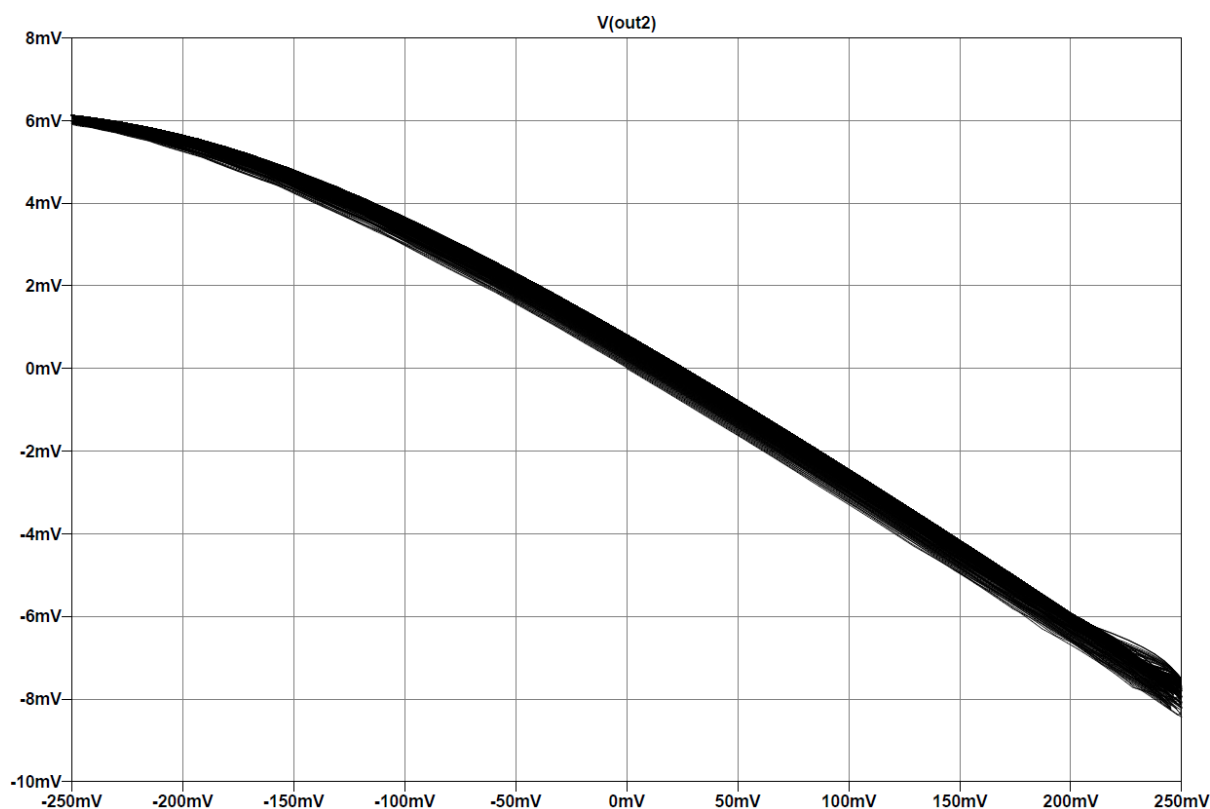


دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

زمانی که ما خروجی را رسم کردیم، با زدن کلیک راست بر محور افقی و وارد کردن ولتاژ خروجی به جای زمان، میتوانیم منحنی مشخصه را داشته باشیم

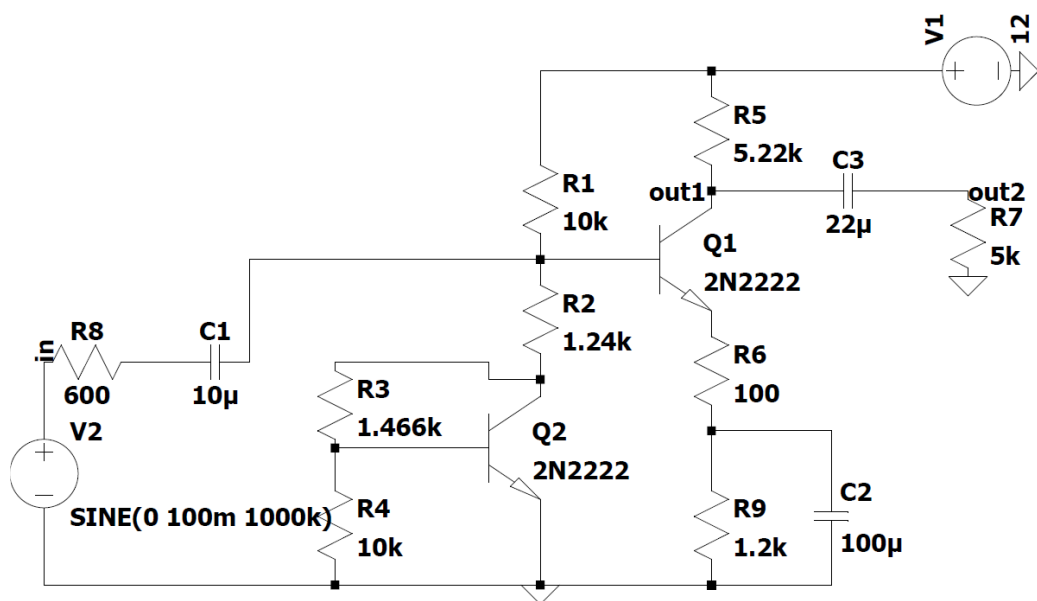


همچنین منحنی مشخصه ما در شکل زیر نشان داده شده است.



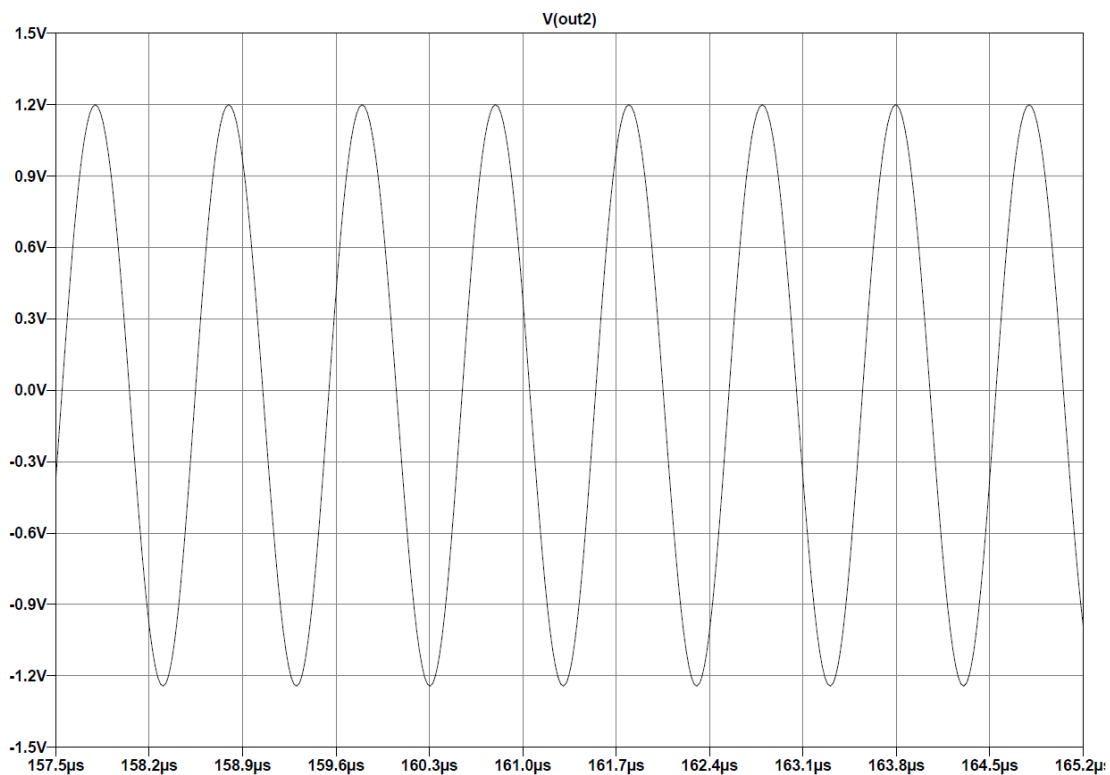
حال تاثیر افزایش فرکانس بر منحنی مشخصه را می‌خواهیم بررسی کنیم.

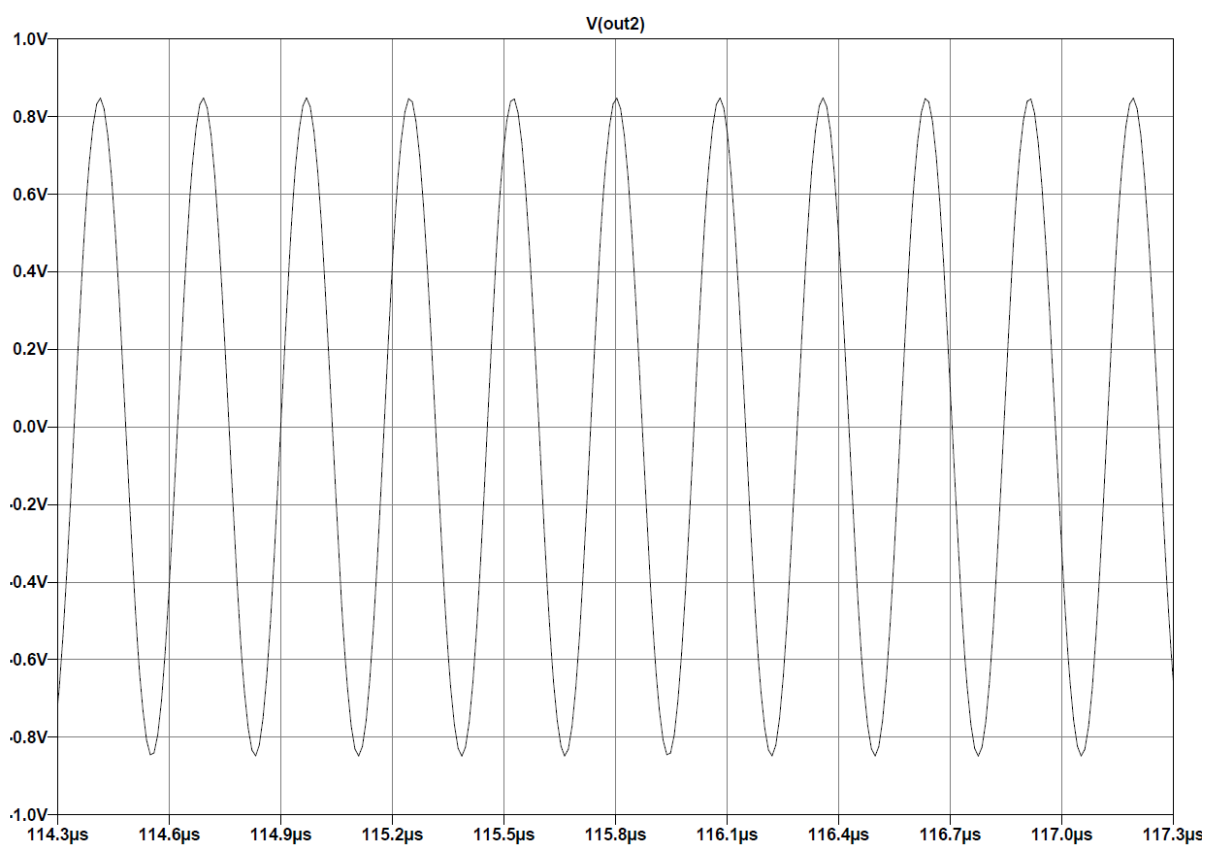
تغییرات را در مدار اعمال می‌کنیم.



```
.tran 0 50m 49.5m 0.01u ;op
```

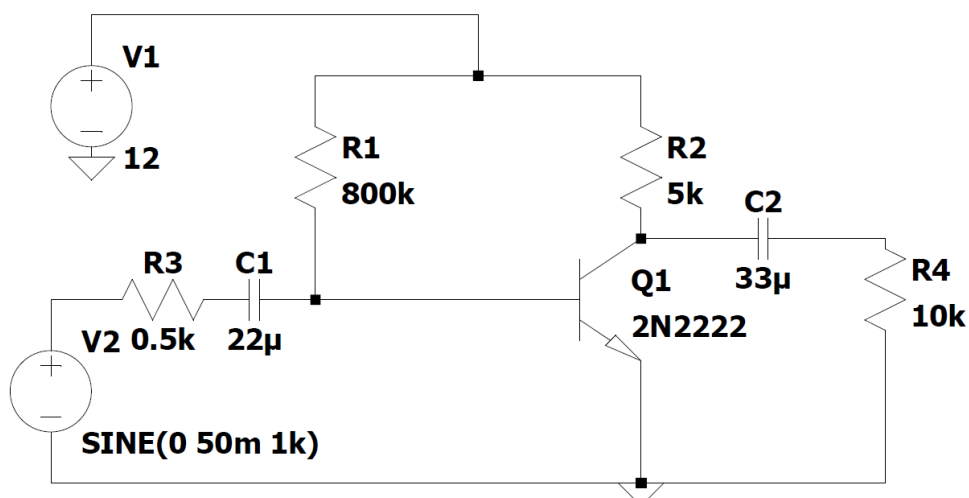
نتیجه خروجی out2 ما در شکل زیر نشان داده شده است، که نشان می‌دهد فرکانس قطع هنوز رخ نداده است در نتیجه فرکانس را به 3.6 Meg افزایش می‌دهیم.






**FFT** : تبدیل فوریه سریع می باشد.

ابتدا مدار زیر را به عنوان مثال در نظر می گیریم.



 \* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc


--- Operating Point ---

```

V(n001) :      12          voltage
V(n005) :      0.678477   voltage
V(n002) :      0.154901   voltage
V(n004) :      0          voltage
V(p001) :      7.46325e-015 voltage
V(n003) :      5.11174e-014 voltage
Ic(Q1) :      0.00236902   device_current
Ib(Q1) :      1.41519e-005   device_current
Ie(Q1) :      -0.00238317   device_current
I(C2) :      -5.11174e-018   device_current
I(C1) :      1.49265e-017   device_current
I(R4) :      5.11174e-018   device_current
I(R3) :      1.49265e-017   device_current
I(R2) :      0.00236902   device_current
I(R1) :      1.41519e-005   device_current
I(V2) :      1.49265e-017   device_current
I(V1) :      -0.00238317   device_current

```

اطلاعات DC ما در جدول بالا نشان داده شده است که ترانزیستور ما وارد ناحیه اشباع شده است. در نتیجه مقاومت R1 را ۱۷۰۰ کیلو اهم در نظر می‌گیریم. همانطور که نشان داده شده است ولتاژ کلکتور ما ۵ ولت است.

 \* C:\Users\000912\Documents\LTspiceXVII\Draft3.asc

--- Operating Point ---

```

V(n001) :      12          voltage
V(n005) :      0.662914   voltage
V(n002) :      5.06805    voltage
V(n004) :      0          voltage
V(p001) :      7.29205e-015 voltage
V(n003) :      1.67246e-012 voltage
Ic(Q1) :      0.00138639   device_current
Ib(Q1) :      6.66887e-006   device_current
Ie(Q1) :      -0.00139306   device_current
I(C2) :      -1.67246e-016   device_current
I(C1) :      1.45841e-017   device_current
I(R4) :      1.67246e-016   device_current
I(R3) :      1.45841e-017   device_current
I(R2) :      0.00138639   device_current
I(R1) :      6.66887e-006   device_current
I(V2) :      1.45841e-017   device_current
I(V1) :      -0.00139306   device_current

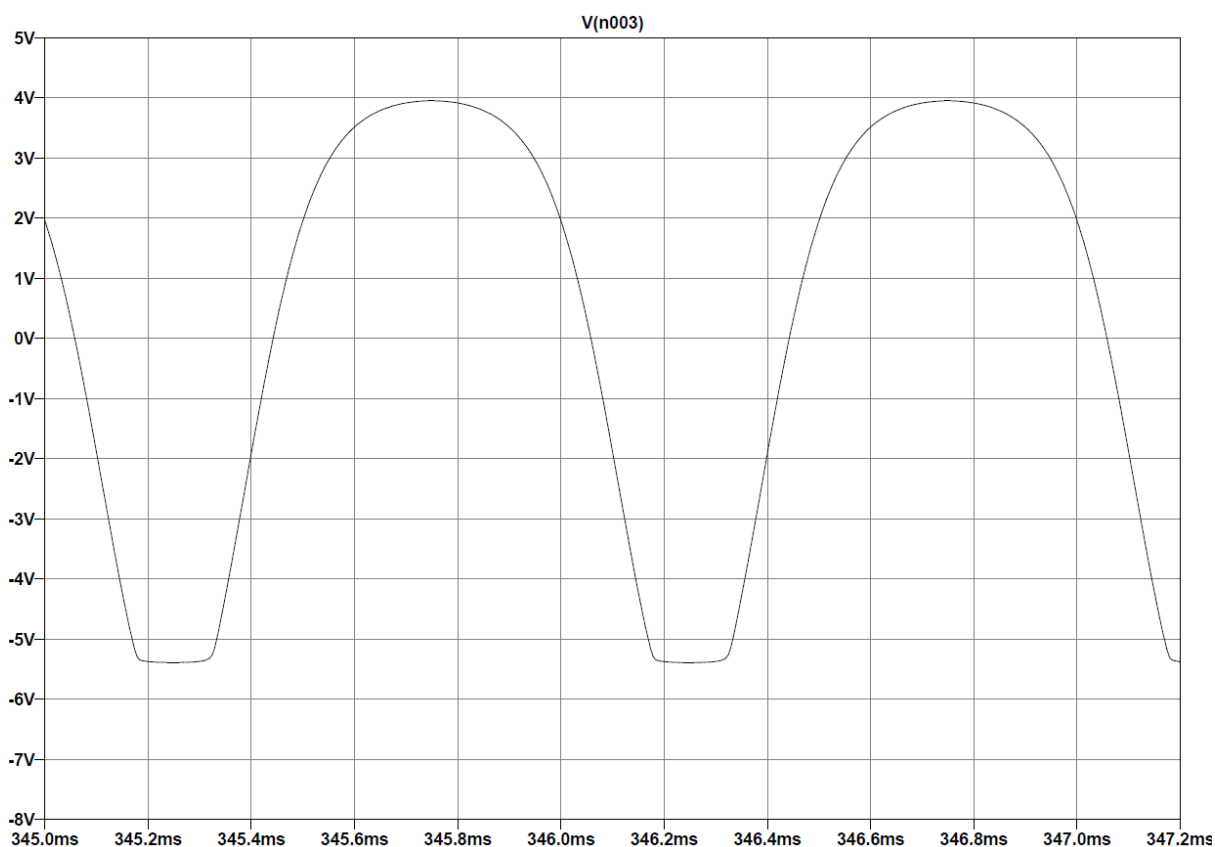
```

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

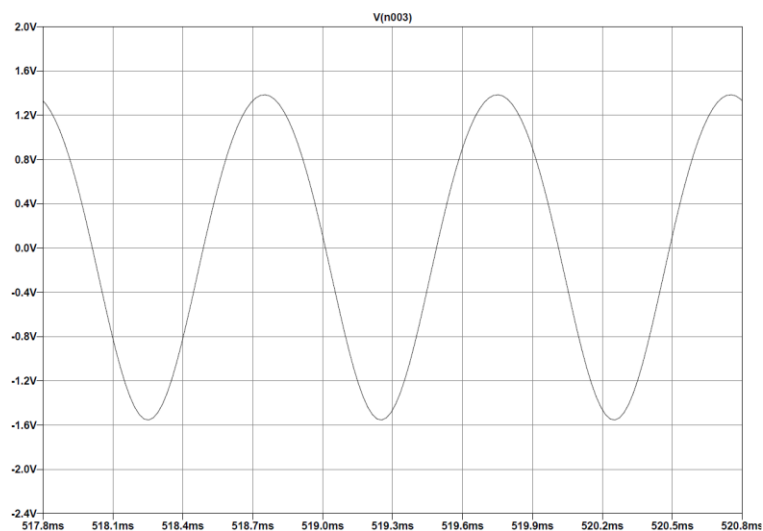
اکنون تحلیل transient را انجام می‌دهیم. (.tran 0 10 10u)

برای گرفتن FFT باید زمان قابل قبولی را داشته باشیم. در نتیجه در انتخاب زمان باید دقت کرد. هر چقدر بیشتر باشد نسبت زمان ما مقدار FFT دقیق تر خواهد بود.

حال خروجی را بر روی مقاومت R4 قرار می‌دهیم. همانطور که می‌بینیم وارد اشباع شده است. در نتیجه دامنه را به ۱۰ میلی ولت کاهش می‌دهیم

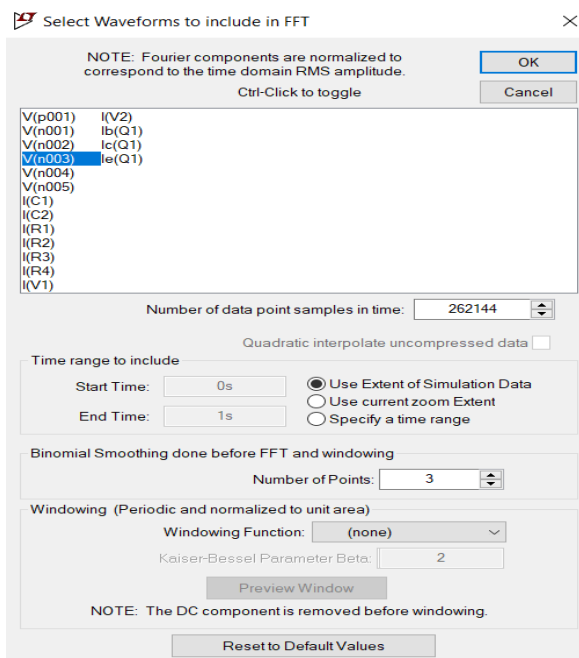
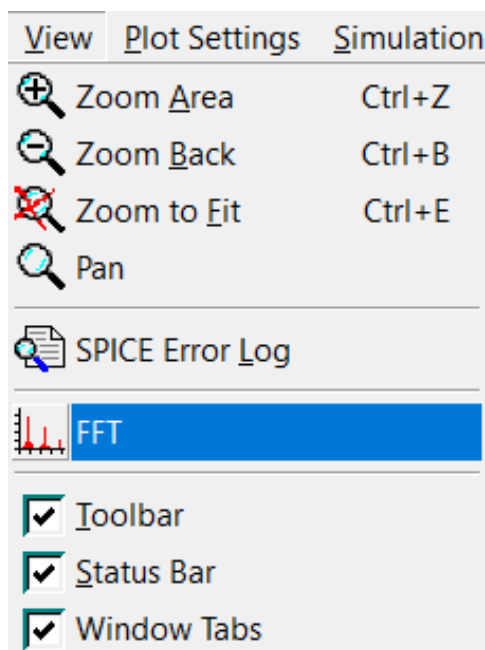


حال خروجی را دوباره بررسی می‌کنیم، همانطور که می‌بینیم سینوسی قابل قبولی را داریم.



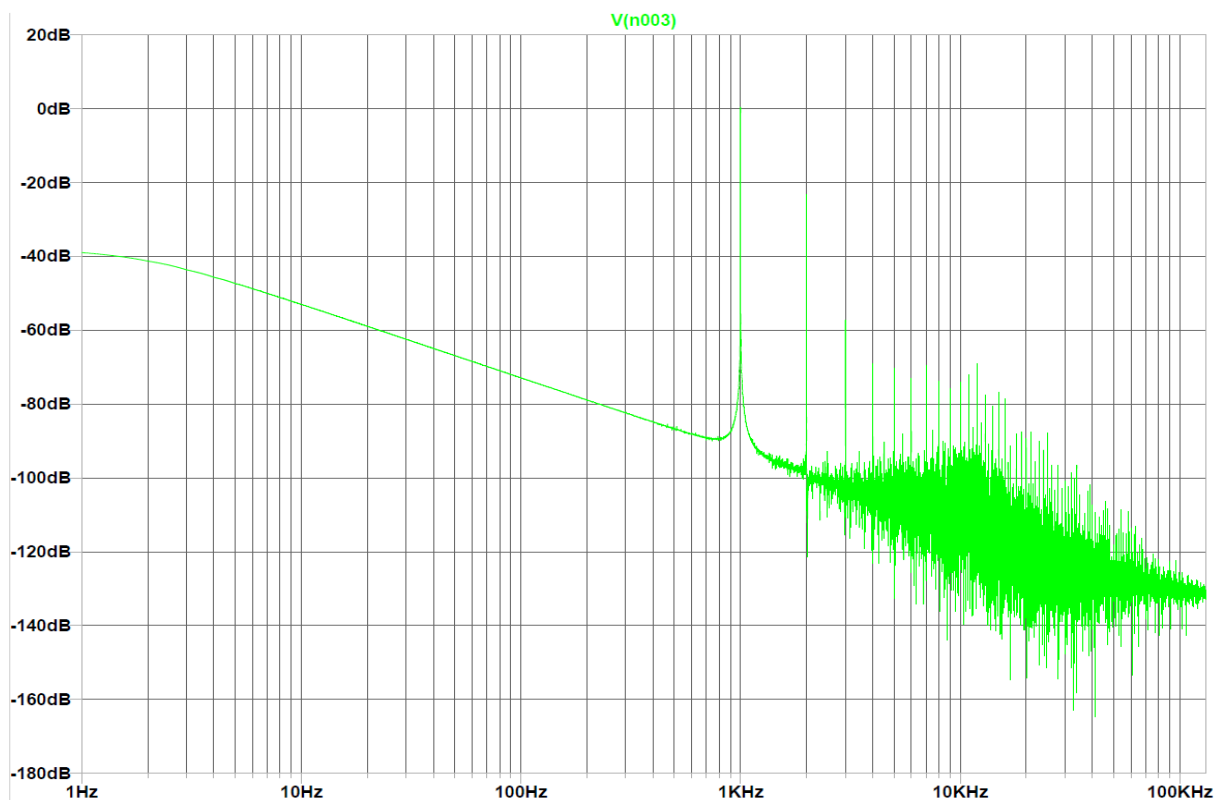
دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

برای گرفتن FFT ( طیف فرکانسی) خروجی ابتدا در قسمت tollbar به view رفته و سپس FFT را کلیک می‌کنیم. سپس باید طیف فرکانسی جایی را که می‌خواهیم را باید مشخص کنیم. که در این مثال خروجی ما V(n003) می‌باشد.

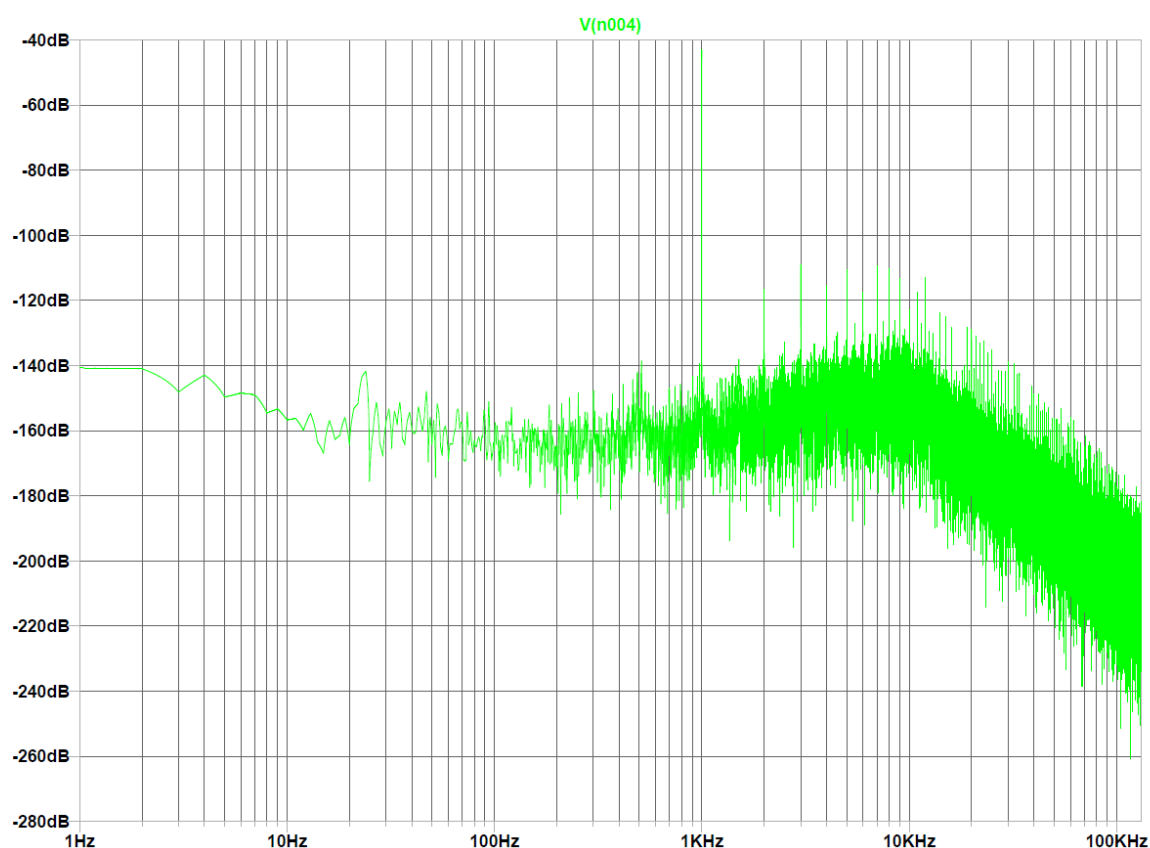


نکته: برای آنکه دقت ما بالاتر برود، step های آن را بیشتر می‌کنیم به عنوان مثال در اینجا ۲ میکرو ثانیه انتخاب می‌کنیم.

اکنون با زدن FFT و شبیه سازی خروجی داریم :



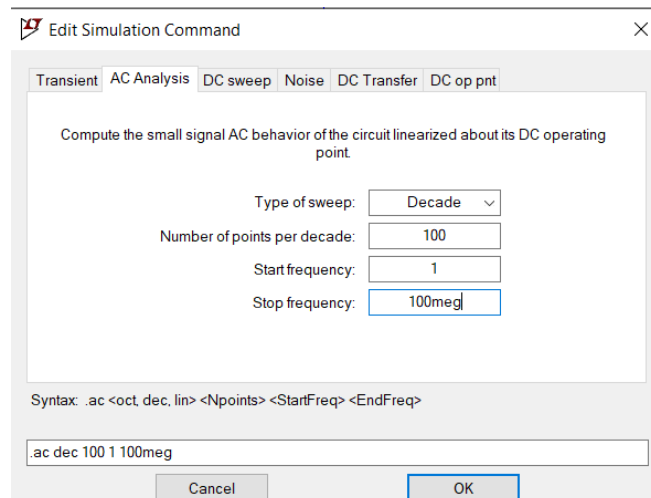
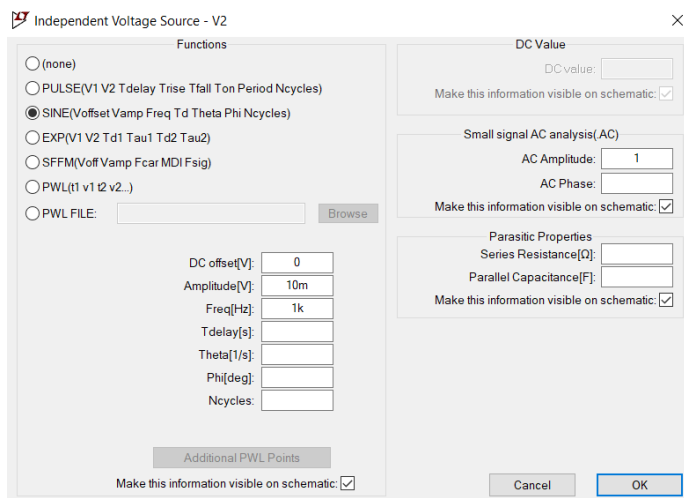
اکنون اگر از ورودی FFT بگیریم داریم :



**نکته:** باید دقت کرد با افزایش زمان دقت نمودار ما بالاتر می‌رود اما زمان تحلیل آن طولانی‌تر می‌شود.

**تحلیل AC:** ابتدا بر روی منبع ولتاژ مورد نظر کلیک راست کرده سپس در قسمت **small signal AC analysis(AC)** در قسمت **AC Amplitude** همیشه یک ولت را وارد می‌کنیم تا گین ما همان خروجی باشد. **AC phase** را صفر قرار می‌دهیم. سپس به بخش **edit simulation CMD** رفته و **AC Analysis** را انتخاب می‌کنیم، اکنون نوع سوئیچ را انتخاب می‌کنیم که معمولاً **Decede** را انتخاب می‌کنیم، سپس در **number of points per decade** تعداد نمونه‌هایمان را مشخص می‌کنیم که معمولاً ۲۰ تا ۱۰۰ انتخاب می‌کنیم. اگر ۱۰۰ تا انتخاب شود عالی است. اکنون شروع فرکانس را باید انتخاب کنیم، باید دقت کرد که در این بخش نمیتوان صفر گذاشت، معمولاً یک قرار می‌دهیم. در آخر فرکانس قطع را می‌گذاریم که در این مثال ۱۰۰ meg قرار می‌دهیم. اکنون باید همانند دو شکل پایین برای مدارمان تنظیم کنیم.

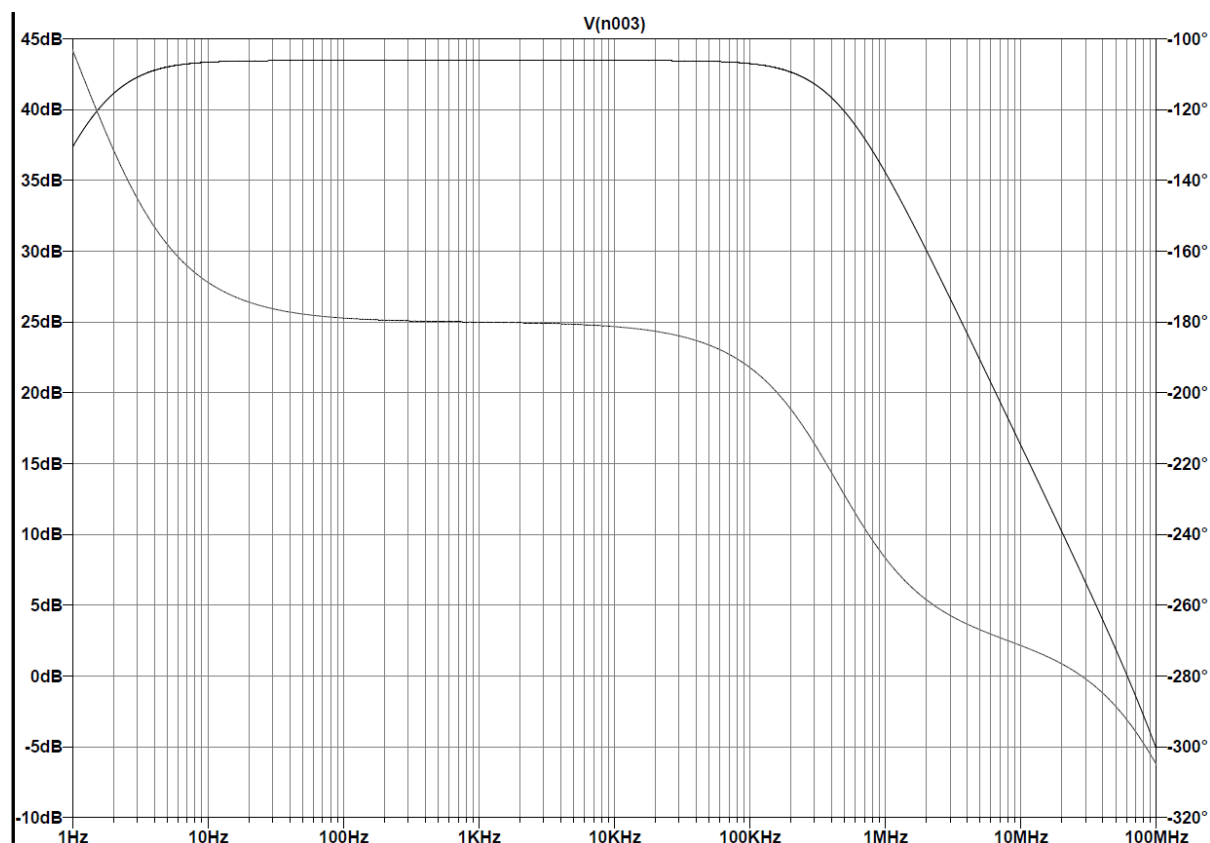
دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان



اکنون با زدن Run تحلیل AC را انجام می دهد. ولتاژ خروجی ما در تحلیل AC به شکل زیر بدست می آید.

**نکته:** منحنی فاز مدار ما خط نقطه چین می شود و آن خط کامل منحنی دامنه می شود.

**نکته:** در واقع نمودار بود را رسم کرده است



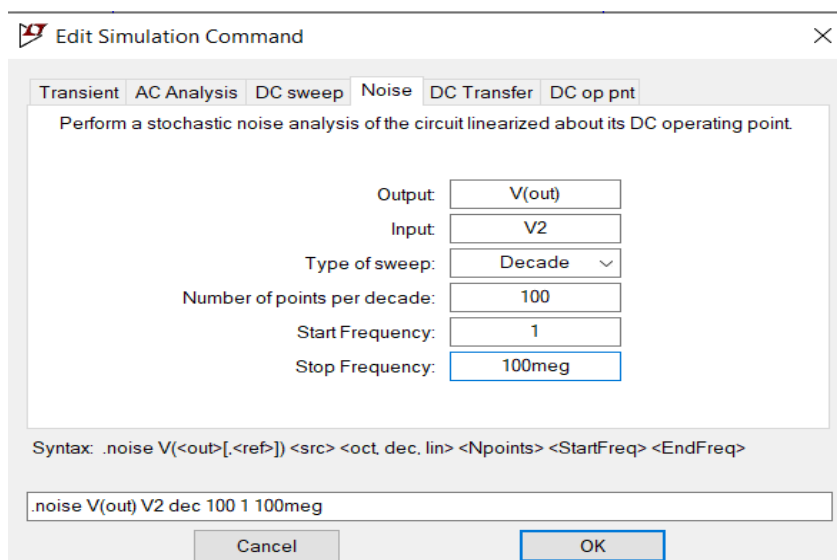


## تحلیل نویز:

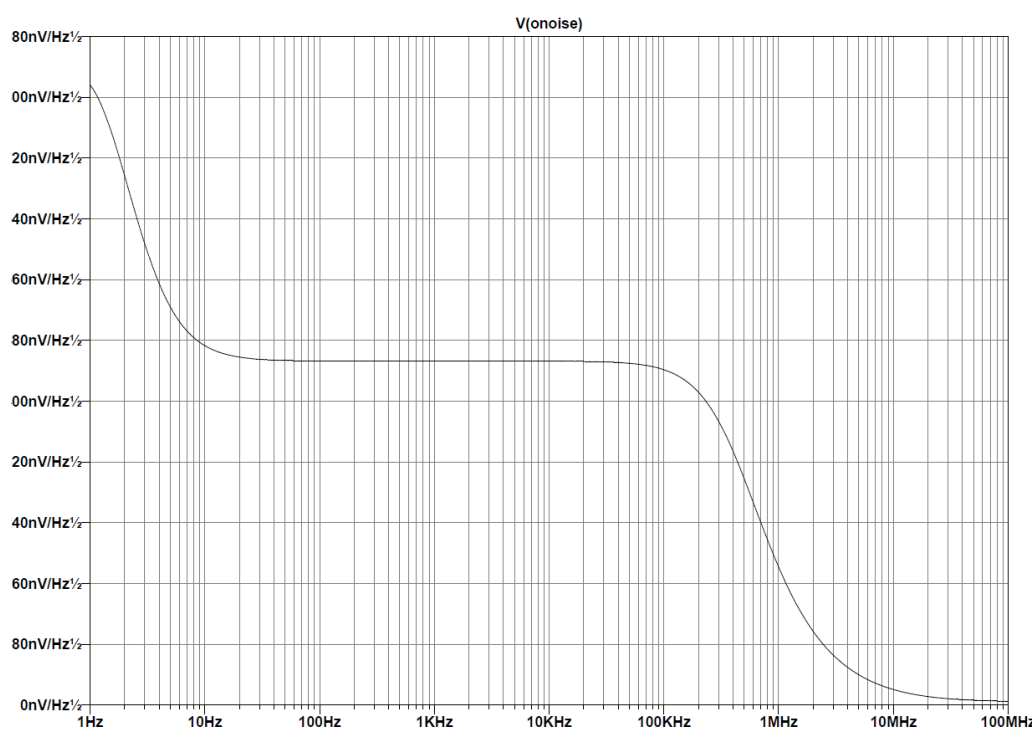
هر مداری نویز دارد. در واقع منبع ولتاژی را مثل آفست با منبع ولتاژ ورودی سری قرار میدهد و مقدار نویز را بدست می آورد.

در واقع در اینجا input referred noise را بدست می آوریم.

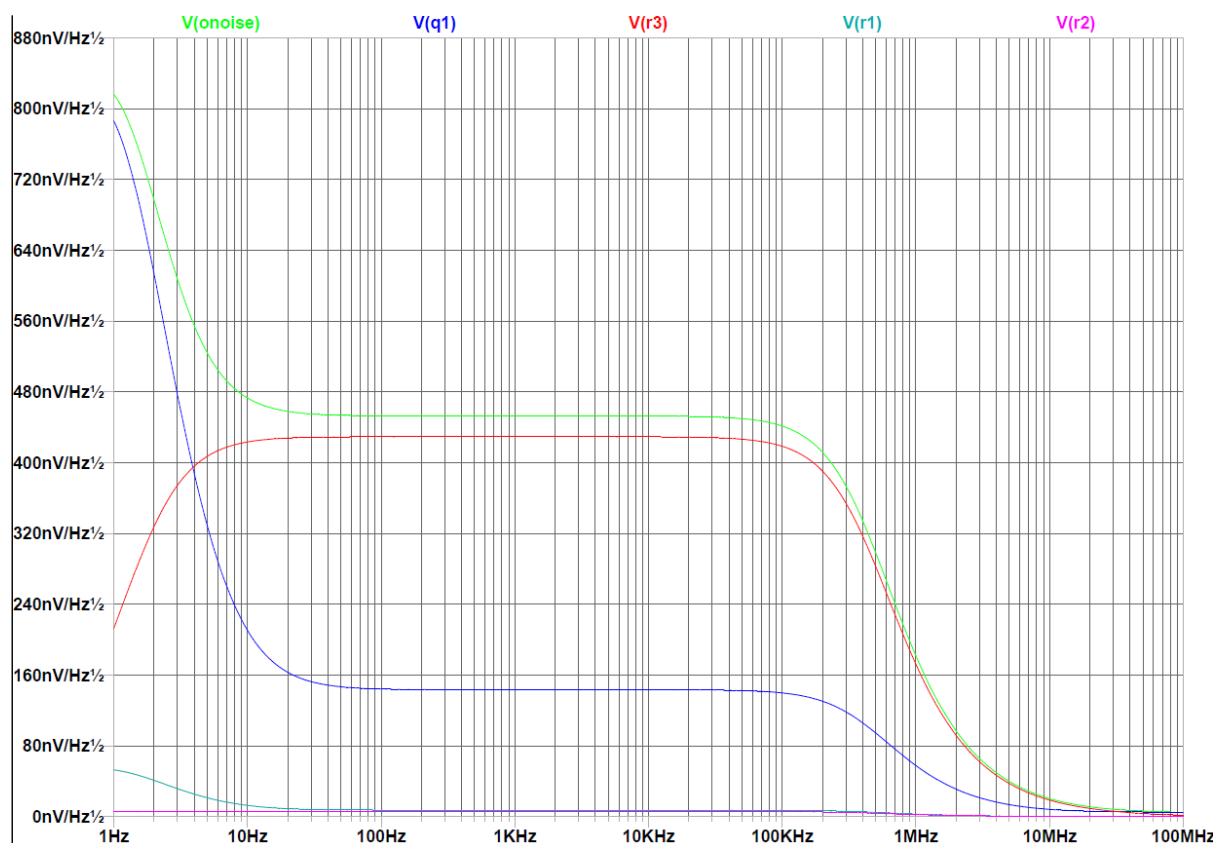
برای انجام این تحلیل ابتدا به بخش edit simulation CMD رفته و Noise را انتخاب می کنیم. ابتدا output را مشخص می کنیم که بهتر است از label برای آن استفاده کنیم. در بخش input هم منبع ورودی را انتخاب می کنیم.



اکنون تحلیل نویز را در خروجی انجام می دهیم که منبع نویز خروجی ما در ورودی می باشد.



نویز تک تک قطعات مدار را هم در شکل زیر با استفاده از شبیه ساز نویز بدست می آوریم که نشان می دهد بیشتر نویز بخاطر مقاومت R3 می باشد.



**نکته:** برای انتخاب مدل که خودمان مشخصات nmos یا pmos را تعیین کنیم باید در قسمت component عبارت nmos یا pmos را سرچ می کنیم اما pmos4 را انتخاب می کنیم. که با کلیک راست کردن بر روی آن ابتدا اسم مدل مورد نظر را براساس آنچه که داریم مشخص می کنیم سپس بخش های دیگر را براساس نیازمان مشخص می کنیم.  
 به عنوان مثال یک مدل CMOSN Nmos را داریم :

```
.MODEL CMOSN NMOS ( LEVEL = 49
+VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 4.4E-9
+XJ = 1E-7 NCH = 2.3549E17 VTH0 = 0.2929754
+K1 = 0.5670331 K2 = -0.0408747 K3 = 1E-3
+K3B = 5.0154961 W0 = 1E-7 NLX = 2.146644E-7
+DVT0W = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0
+DVT0 = 0.793714 DVT1 = 0.2903596 DVT2 = -0.2525402
+U0 = 264.6124742 UA = -1.628997E-9 UB = 2.896628E-18
+UC = 6.175974E-11 VSAT = 1.037767E5 A0 = 1.0118965
+AGS = 0.2367674 B0 = 2.325707E-8 B1 = 2.380793E-6
```



+KETA = -5.309975E-3 A1 = 6.421872E-3 A2 = 0.6215437  
+RDSW = 150 PRWG = 0.3688819 PRWB = -0.1802137  
+WR = 1 WINT = 8.15834E-9 LINT = 2.257929E-8  
+DWG = 4.865126E-9 DWB = 1.427222E-8 VOFF = -0.0844824  
+NFACTOR = 2.0913791 CIT = 0 CDSC = 2.4E-4  
+CDSCD = 0 CDSCB = 0 ETA0 = 2.480699E-3  
+ETAB = -2.421326E-3 DSUB = 3.316106E-3 PCLM = 2.0392734  
+PDIBLC1 = 0 PDIBLC2 = 7.382146E-3 PDIBLCB = -0.1  
+DROUT = 0.6738626 PSCBE1 = 2.088126E9 PSCBE2 = 5E-10  
+PVAG = 1.677581E-4 DELTA = 0.01 RSH = 6.2  
+MOBMOD = 1 PRT = 0 UTE = -1.5  
+KT1 = -0.11 KT1L = 0 KT2 = 0.022  
+UA1 = 4.31E-9 UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11  
+AT = 3.3E4 WL = 0 WLN = 1  
+WW = 0 WWN = 1 WWL = 0  
+LL = 0 LLN = 1 LW = 0  
+LWN = 1 LWL = 0 CAPMOD = 2  
+XPART = 0.5 CGDO = 5E-10 CGSO = 5E-10  
+CGBO = 1E-12 CJ = 9.532234E-4 PB = 0.8808606  
+MJ = 0.6502559 CJSW = 2.081752E-10 PBSW = 0.8  
+MJSW = 0.5868392 CJSWG = 3.3E-10 PBSWG = 0.8  
+MJSWG = 0.5868392 CF = 0 PVTH0 = -3.262531E-3  
+PRDSW = 2.3281133 PK2 = 3.259038E-3 WKETA = -1.354115E-3  
+LKETA = 5.858408E-3 PU0 = -3.5382297 PUA = -3.58051E-11  
+PUB = 9.014101E-22 PVSAT = 1.324881E3 PETA0 = 1E-4  
+PKETA = -3.789169E-3 )

\*

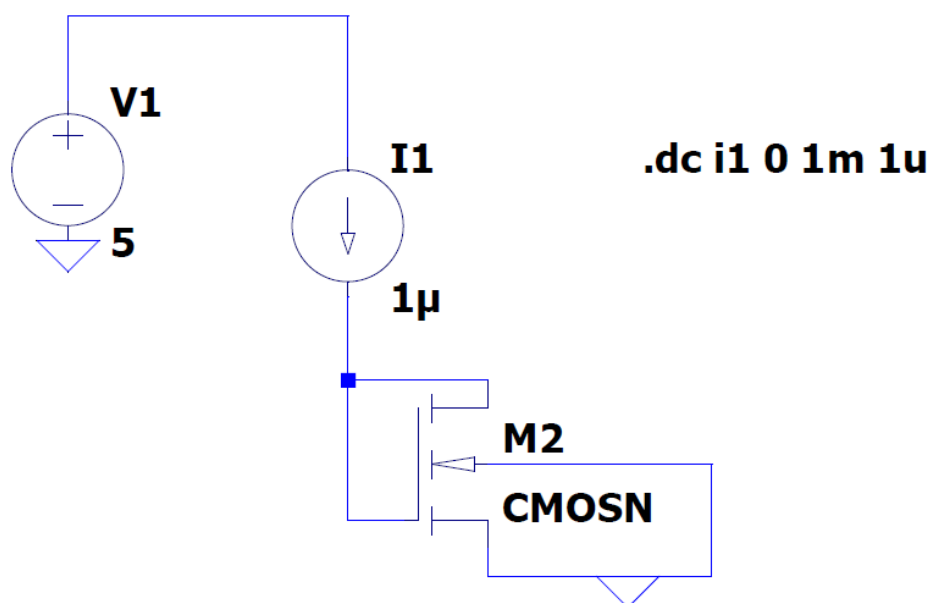
.MODEL CMOS PMOS ( LEVEL = 49  
+VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 4.4E-9  
+XJ = 1E-7 NCH = 4.1589E17 VTH0 = -0.4178679  
+K1 = 0.601973 K2 = -3.357549E-6 K3 = 0.0822657  
+K3B = 19.7280245 W0 = 1E-6 NLX = 3.262391E-8  
+DVT0W = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0  
+DVT0 = 1.0766515 DVT1 = 0.8929005 DVT2 = -0.3  
+U0 = 120.8041905 UA = 1.664842E-9 UB = 1.04643E-21  
+UC = -1E-10 VSAT = 1.489285E5 A0 = 1.08016  
+AGS = 0.2643826 B0 = 1.824146E-6 B1 = 5E-6  
+KETA = 0.0212558 A1 = 4.506045E-4 A2 = 1  
+RDSW = 1.418816E3 PRWG = -0.3036114 PRWB = -0.3238277  
+WR = 1 WINT = 0 LINT = 3.474444E-8  
+DWG = -2.635558E-8 DWB = -7.727161E-9 VOFF = -0.1454463  
+NFACTOR = 1.1179103 CIT = 0 CDSC = 2.4E-4  
+CDSCD = 0 CDSCB = 0 ETA0 = 0  
+ETAB = -2.534338E-3 DSUB = 4.765306E-3 PCLM = 0.9505138  
+PDIBLC1 = 0.1232269 PDIBLC2 = 0.0197777 PDIBLCB = 2.010947E-3  
+DROUT = 0.7634636 PSCBE1 = 1.084615E8 PSCBE2 = 5E-10  
+PVAG = 0.0288746 DELTA = 0.01 RSH = 6

```

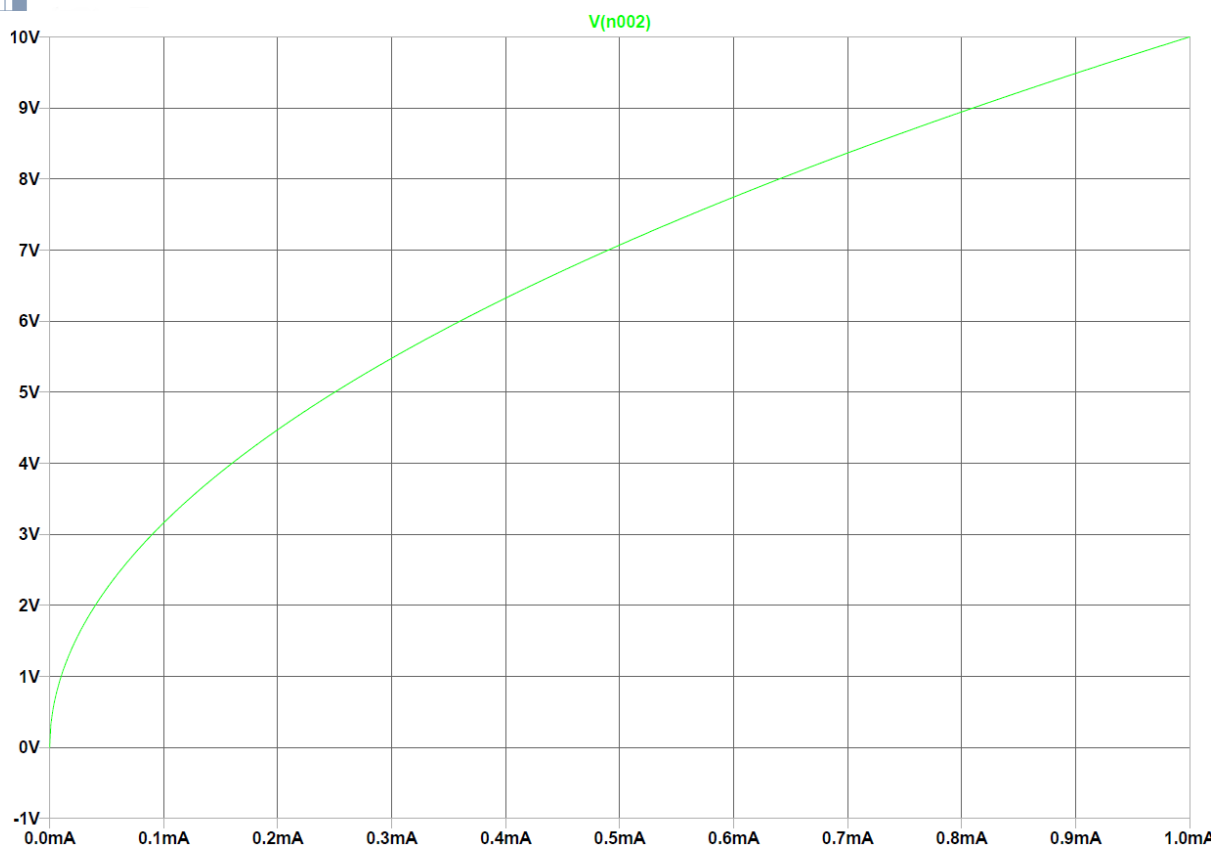
+MOBMOD = 1 PRT = 0 UTE = -1.5
+KT1 = -0.11 KT1L = 0 KT2 = 0.022
+UA1 = 4.31E-9 UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11
+AT = 3.3E4 WL = 0 WLN = 1
+WW = 0 WWN = 1 WWL = 0
+LL = 0 LLN = 1 LW = 0
+LWN = 1 LWL = 0 CAPMOD = 2
+XPART = 0.5 CGDO = 5E-10 CGSO = 5E-10
+CGBO = 1E-12 CJ = 1.168111E-3 PB = 0.8213332
+MJ = 0.4392868 CJSW = 1.118369E-10 PBSW = 0.98901
+MJSW = 0.1001 CJSWG = 4.22E-10 PBSWG = 0.98901
+MJSWG = 0.1001 CF = 0 PVTH0 = -7.024486E-5
+PRDSW = -5 PK2 = -3.603562E-5 WKETA = 0.0341952
+LKETA = -0.010925 PU0 = 14.3599138 PUA = 6.525859E-10
+PUB = 0 PVSAT = 50 PETA0 = 1E-4
+PKETA = -5.817098E-3 )
*

```

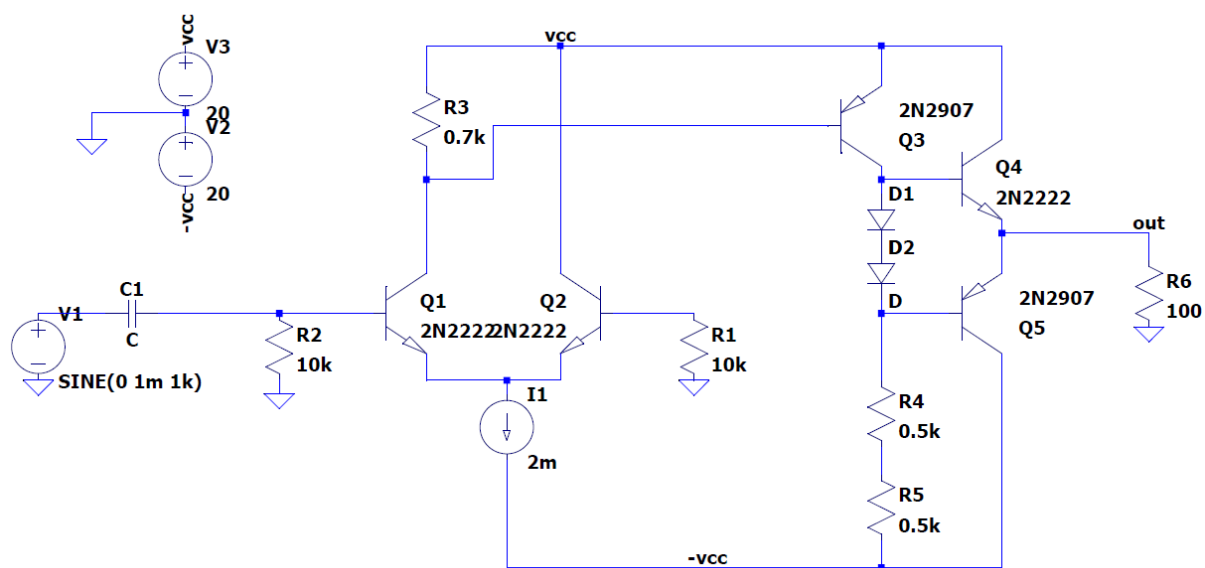
به عنوان مثال مدل طراحی شده ما به این شکل است



• حال ولتاژ گیت درین را رسم میکنیم.

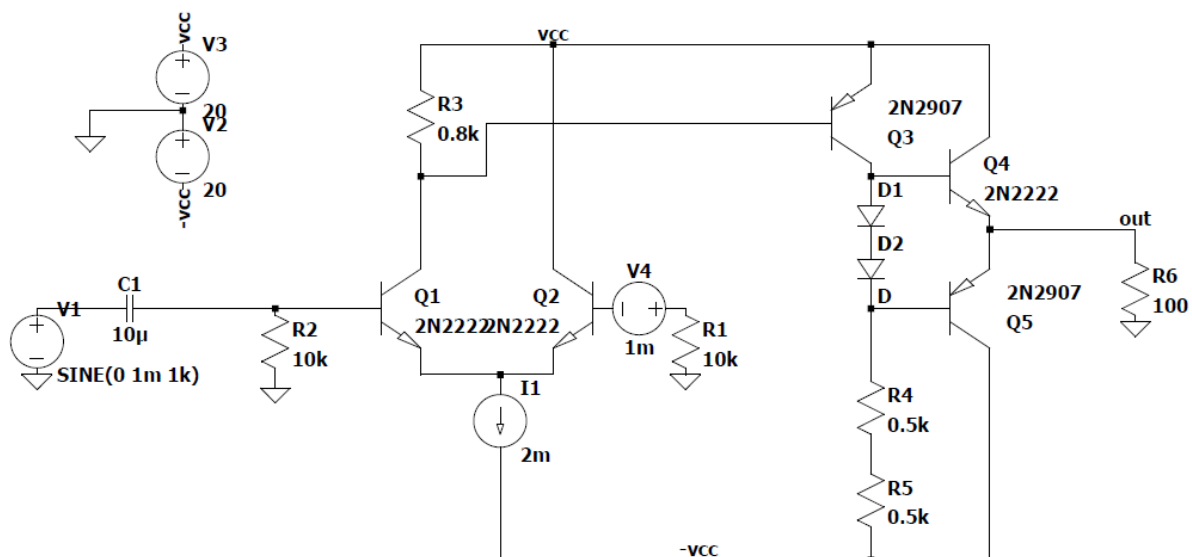


رسم مدار تفاضلی :

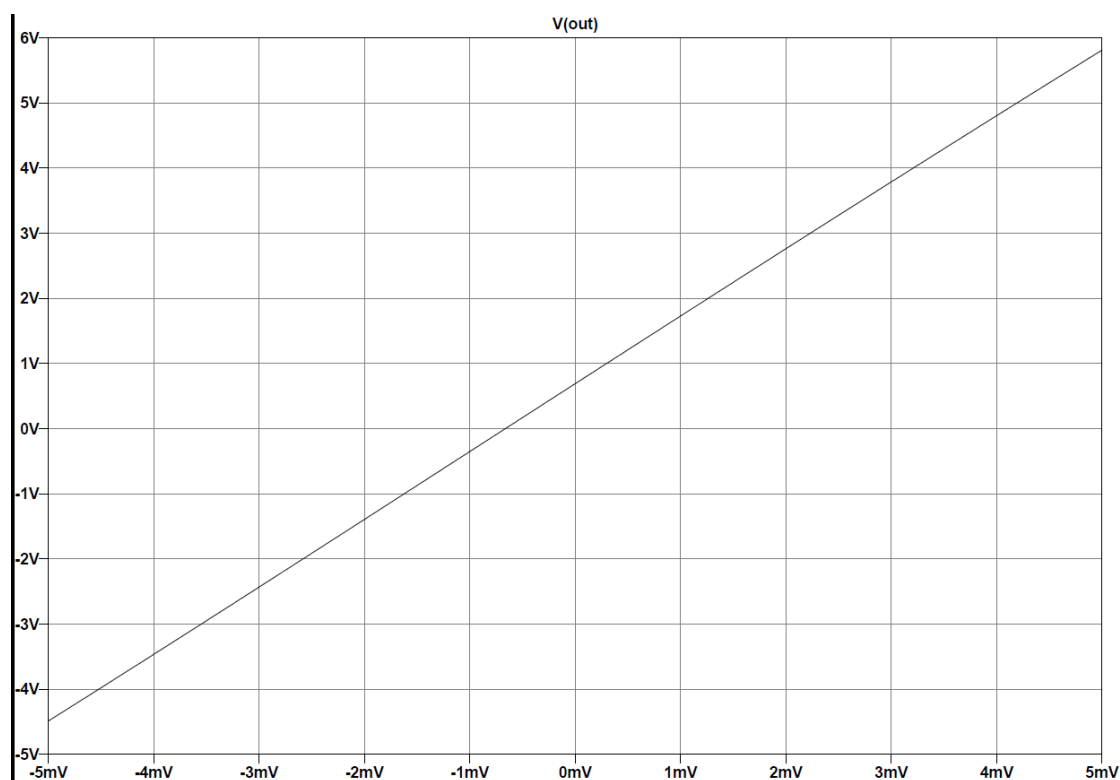


دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

با استفاده از دستور Op مقدار خروجی 14.33- ولت بدست می آید. در اینجا نمیشود مقدار گین را بدست آورد... در نتیج بک ولتاژ آفست باید اضافه کنیم. (منبع یک میلی ولت) حال منبع آفست را سوئیچ می کنیم تا خروجی از اشباع خارج شود. همچنین مقاومت R3 را هم اصلاح می کنیم. مدار اصلاح شده ما در شکل زیر رسم شده است.



حال پس از سوئیچ خروجی مدار ما در شکل زیر رسم شده است.

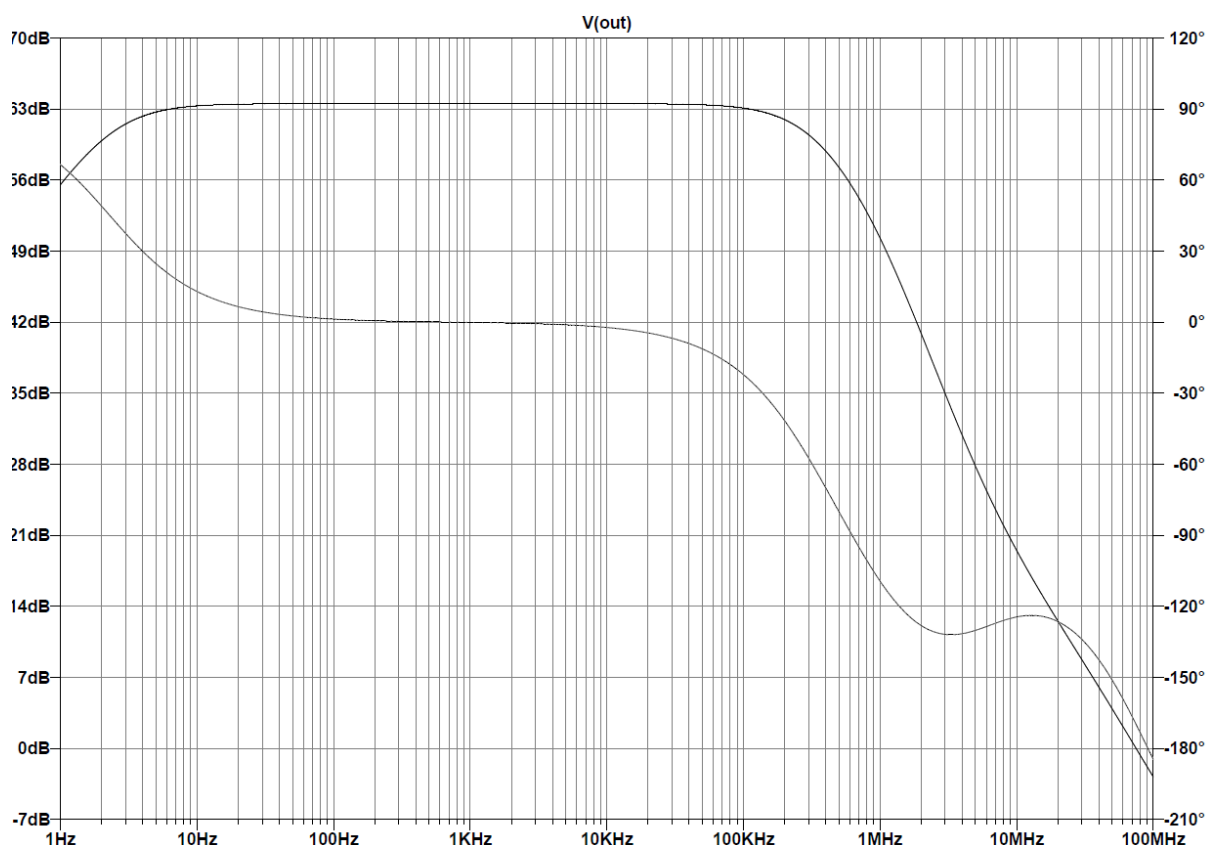


دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
 جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

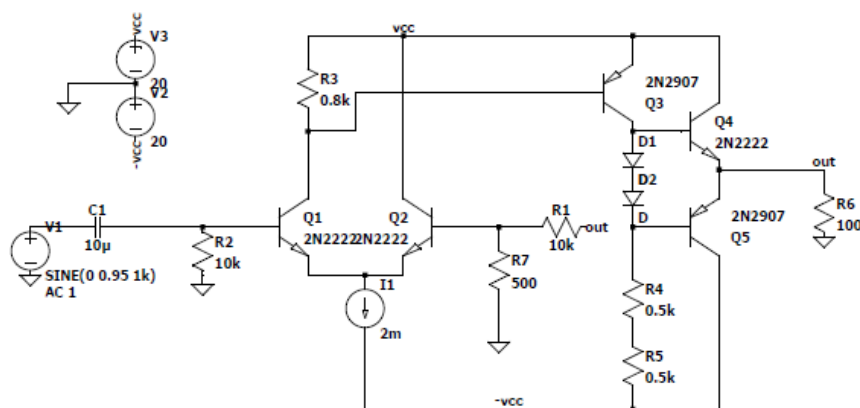
براساس شکل بالا زمانی که ورودی ما ۶۶۰ میکرو ولت بشود، خروجی ما تقریباً صفر می‌شود. حال ولتاژ آفست را ۶۶۰ میکرو ولت در نظر می‌گیریم. همچنین سوئیچ DC را هم حذف می‌کنیم.

اکنون دستور OP را اجرا می‌کنیم که خروجی بدست می‌آید ۲.۷۶ ولت.

اکنون مدار ما کاملاً استاندارد است و می‌توانیم تحلیل AC را هم انجام دهیم. نتیجه آن در شکل زیر رسم شده است



بستن فیدبک برای مدار تفاضلی مثال قبل :



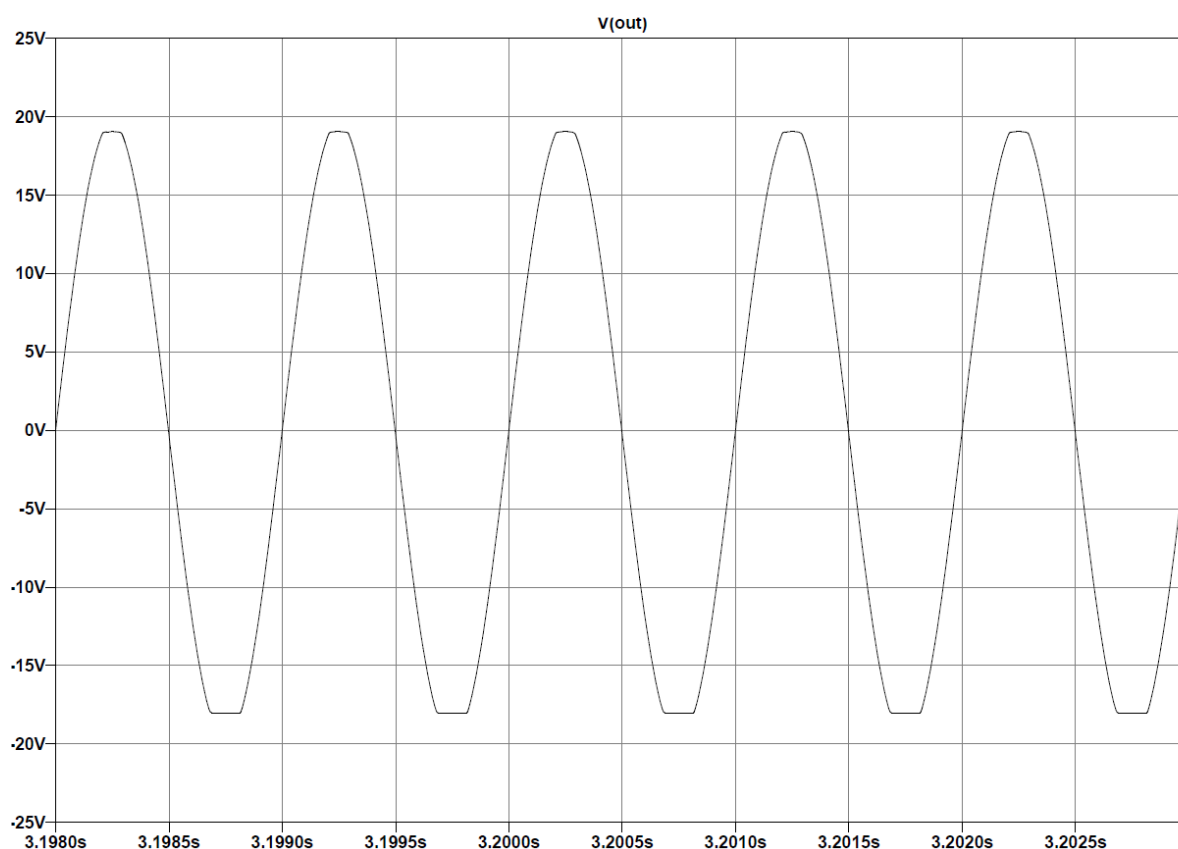
دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

در اینجا خروجی ما 808- میلی ولت می شود.

حال با اضافه کردن خازن قصد داریم اوضاع را بهتر کنیم چون دیگر گین دی سی نداریم.

با اضافه کردن خازن خروجی 600 میلی ولت می شود.

اکنون تحلیل transient انجام می دهیم.

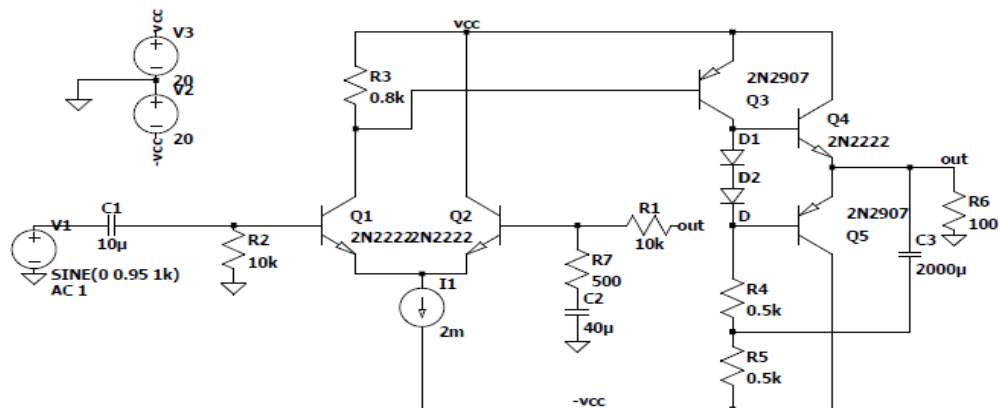


نکته : همچنین می توانیم با کاهش دامنه مثلا 0.9 ولت جلوی برش سقف سیگنال خروجی را بگیریم.



دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

حال با اضافه کردن خازن بوتس تراپ می توانیم مدار را اصلاح کنیم.



دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

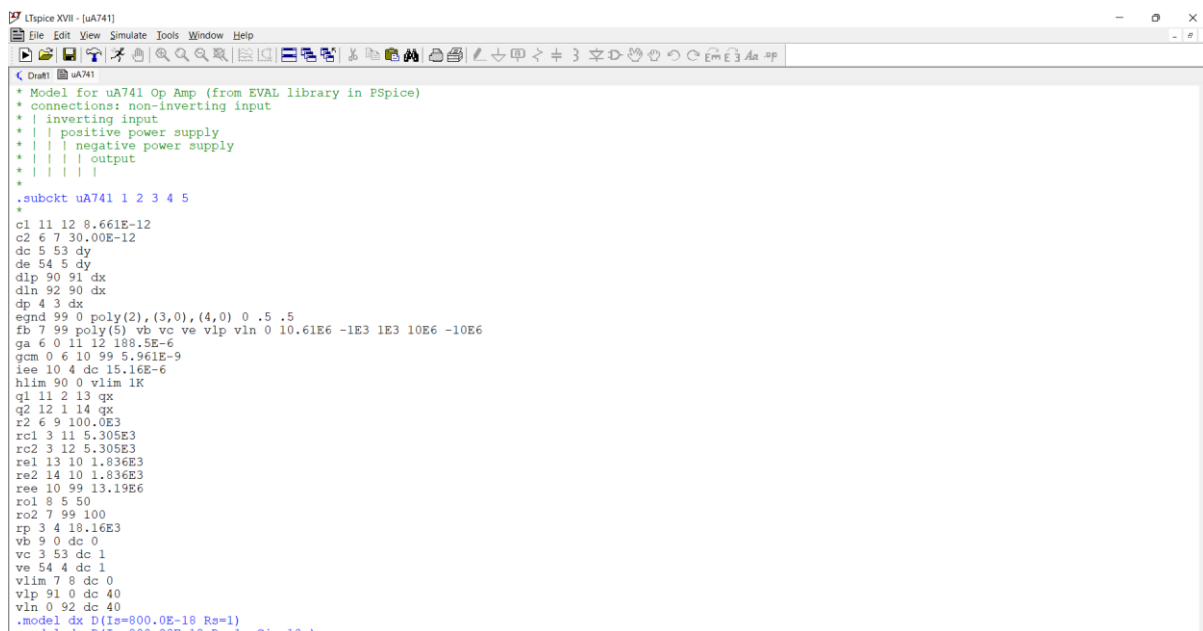
## نحوه وارد کردن IC به LTspice

ابتدا باید مدل IC خود را پیدا کرده و از قسمت toolbar نرم افزار، توسط Open مدل IC را اجرا می‌کنیم. اکنون قصد داریم که آپ امپ LM741 را به LTspice اضافه کنیم.

ابتدا مدل LM741 را از اینترنت دانلود می‌کنیم، مدل LM741 را می‌توان از لینک زیر دانلود کرد:

<https://gist.github.com/s-estay/693b8471bdf4b02f9b6021e102de0bf2#file-ua741-sub>

پس از دانلود آن را در LTspice اجرا می‌کنیم. اکنون باید همانند صفحه زیر مدل IC ما تعریف شده باشد.



```

LTspice XVII - [ua741]
File Edit View Simulate Tools Window Help
< Draft1 ua741
* Model for uA741 Op Amp (from EVAL library in PSpice)
* connections: non-inverting input
* | | inverting input
* | | positive power supply
* | | negative power supply
* | | | output
* | | | |
*
.subckt ua741 1 2 3 4 5
*
c1 11 12 8.661E-12
c2 6 7 30.00E-12
dc 5 53 dy
de 54 5 dy
dip 90 91 dx
din 92 90 dx
dp 4 3 dx
egnd 99 0 poly(2), (3,0), (4,0) 0 .5 .5
fb 7 99 poly(5) vb vc ve vlp vin 0 10.61E6 -1E3 1E3 10E6 -10E6
ga 6 0 11 12 188.5E-6
gcm 0 6 10 99 5.961E-9
iee 10 4 dc 15.16E-6
hlim 90 0 vlim 1K
q1 11 2 13 qx
q2 12 1 14 qx
r2 6 9 100.0E3
rc1 3 11 5.305E3
rc2 3 12 5.305E3
re1 13 10 1.836E3
re2 14 10 1.836E3
ree 10 99 13.19E6
rol 8 5 50
ro2 7 99 100
rp 3 4 18.16E3
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc 1
ve 54 4 dc 1
vlim 7 8 dc 0
vlp 91 0 dc 40
vln 0 92 dc 40
.model dx D(Is=800.0E-18 Rs=1)
.model dv D(Is=800.00E-18 Rs=1 Cj=10n)

```

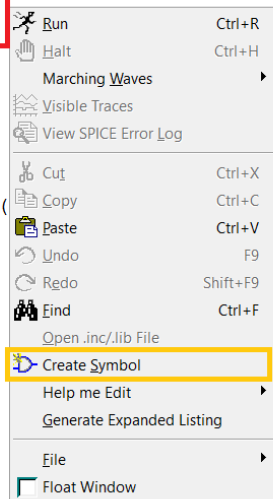
اکنون با کلیک راست کردن بر روی نام مدل ، گزینه Create Symbol را انتخاب می‌کنیم.

دقت شود که حتما بر روی نام مدل کلیک راست انجام شود وگرنه گزینه Create Symbol برای شما غیرفعال خواهد بود.

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
 جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

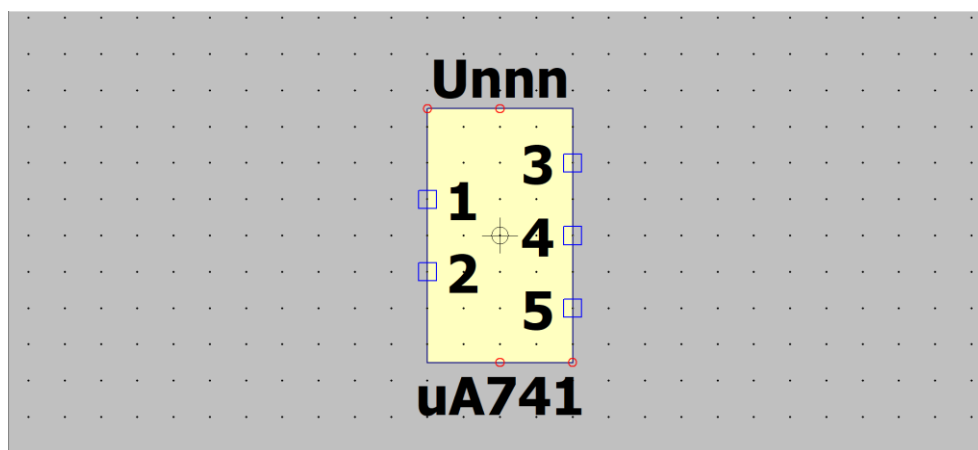
```

LTSpice XVII - [uA741]
File Edit View Simulate Tools Window Help
Draft1 uA741
* Model for uA741 Op Amp (from EVAL library in PSpice)
* connections: non-inverting input
* | inverting input
* | | positive power supply
* | | | negative power supply
* | | | | output
* | | | | |
*
.subckt uA741 1 2 3 4 5
*
c1 11 12 8.661E-12
c2 6 7 30.00E-12
dc 5 53 dy
de 54 5 dy
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp 4 3 dx
egnd 99 0 poly(2), (3,0), (
fb 7 99 poly(5) vb vc ve
ga 6 0 11 12 188.5E-6
gcm 0 6 10 99 5.961E-9
iee 10 4 dc 15.16E-6
hlim 90 0 vlim 1K
q1 11 2 13 qx
q2 12 1 14 qx
r2 6 9 100.0E3
rc1 3 11 5.305E3
rc2 3 12 5.305E3
rel 13 10 1.836E3
re2 14 10 1.836E3
ree 10 99 13.19E6
rol 8 5 50
ro2 7 99 100
rp 3 4 18.16E3
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc 1
ve 54 4 dc 1
vlim 7 8 dc 0
vlp 91 0 dc 40
vln 0 92 dc 40
.model dx D(Is=800.0E-18 Rs=1)
.model dy D(Is=800.0E-18 Rs=1m Cio=10n)
    
```



1E3 10E6 -10E6

اکنون با اجرای درست تمامی مراحل ذکر شده IC ما (مدل LM741) به نرم افزار اضافه شده است.

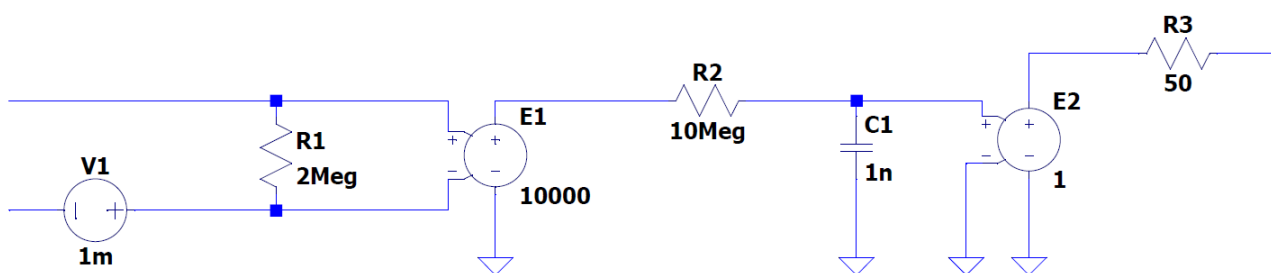


## : Subcircuits

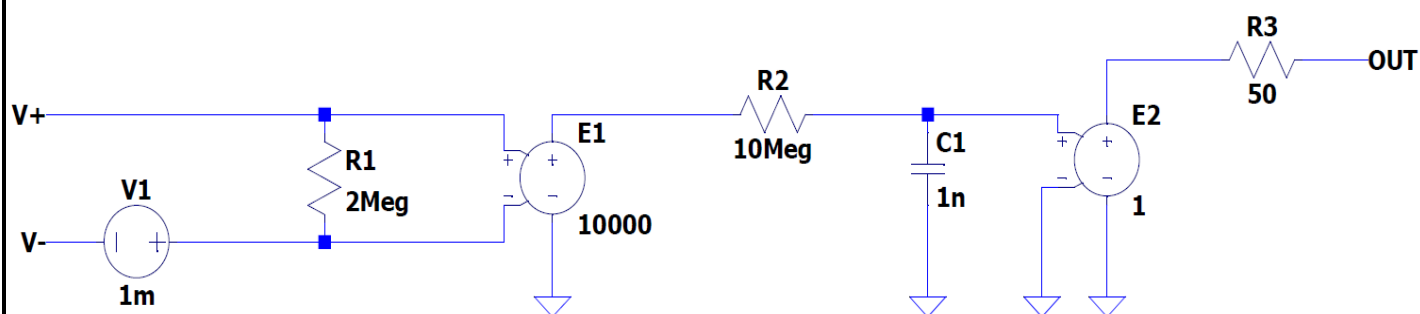
در مرحله اول باید تعریف کنیم که منظور از Subcircuits در نرم افزار LTspice چیست. Subcircuits در واقع به طراحی یک مدل که به کتابخانه قطعات نرم افزار اضافه و مکرراً می‌توانیم از آن استفاده نماییم، گفته می‌شود.

مزیت انجام این کار در طراحی با وضوح و درک بیشتر از نقشه شماتیک مدارمان است. به طور خلاصه در واقع ما یک مدار را با ورودی و خروجی های مشخص در یک مدل قرار می‌دهیم، هرگاه نماد آن مدل طراحی شده را استفاده کنیم، در واقع تمام مدار را تعریف کرده ایم اکنون مراحل انجام را با یک مثال توضیح می‌دهیم:

به عنوان مثال ابتدا مدار داخلی op amp را در LTspice رسم می‌کنیم.



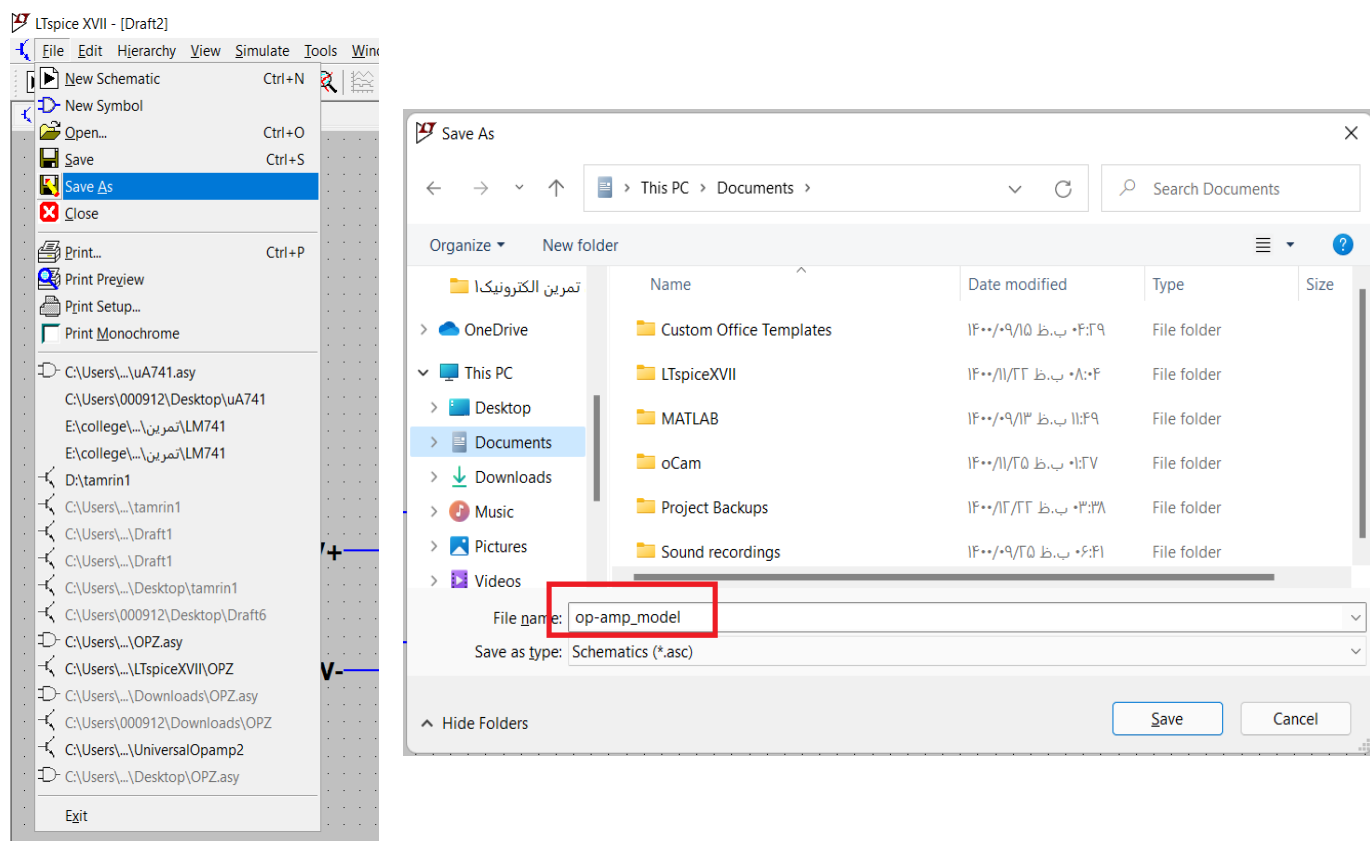
حال باید در مدار شکل ورودی و خروجی را با کمک Label در نرم افزار LTspice مشخص کنیم.



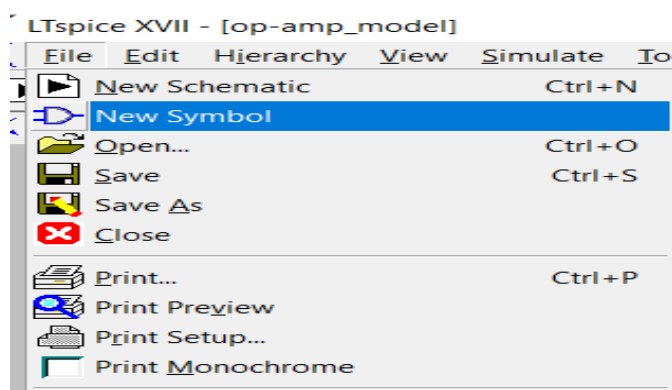
اکنون مدار ما کامل شده است و باید همانند شکل بالا باشد.

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

نیاز داریم که یک مدل برای مدار طراحی شده تعریف کنیم. قبل از آن ابتدا باید شماتیک مدار را سیو کنیم. دقت شود که اسم فایل خود را پس از ذخیره سازی فراموش نکنیم. به عنوان مثال ما در اینجا اسم فایل را op-amp\_model می گذاریم.

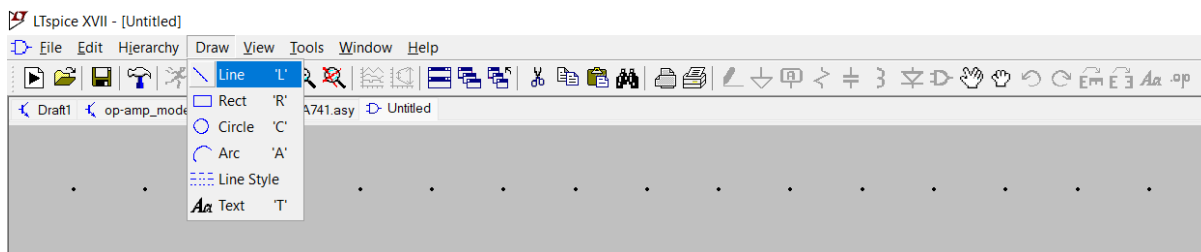


بعد از ذخیره سازی به قسمت Toolbar نرم افزار رفته و File را انتخاب کرده و سپس New Symbol را انتخاب می کنیم.

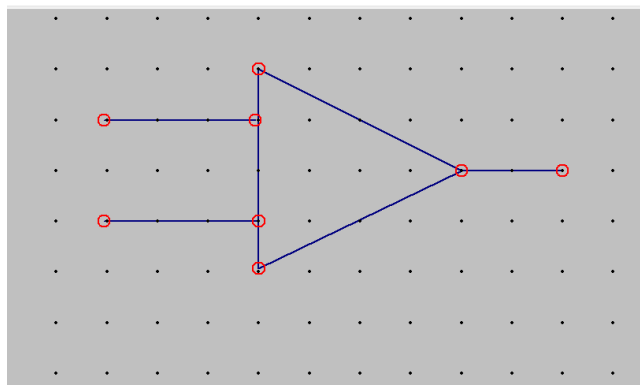


دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
 جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

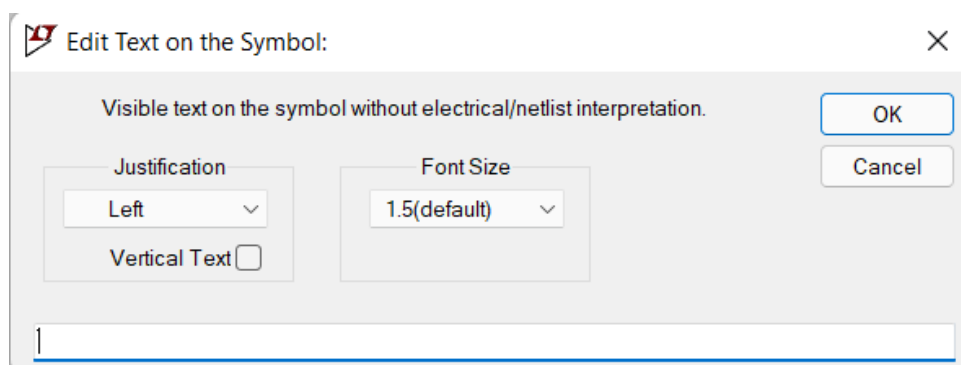
اکنون صفحه ای برای ما باز می شود که می توانیم مدل خود را در آنجا طراحی کنیم.  
 در این صفحه هر شکلی را که بخواهیم می توانیم برای مدل مدارمان رسم کنیم.  
 ولی در اینجا چون یک op amp داریم مدل خود را از شکل مثلث استفاده می کنیم.  
 اکنون از قسمت Tollbar نرم افزار در گزینه Draw ما Line را انتخاب می کنیم.



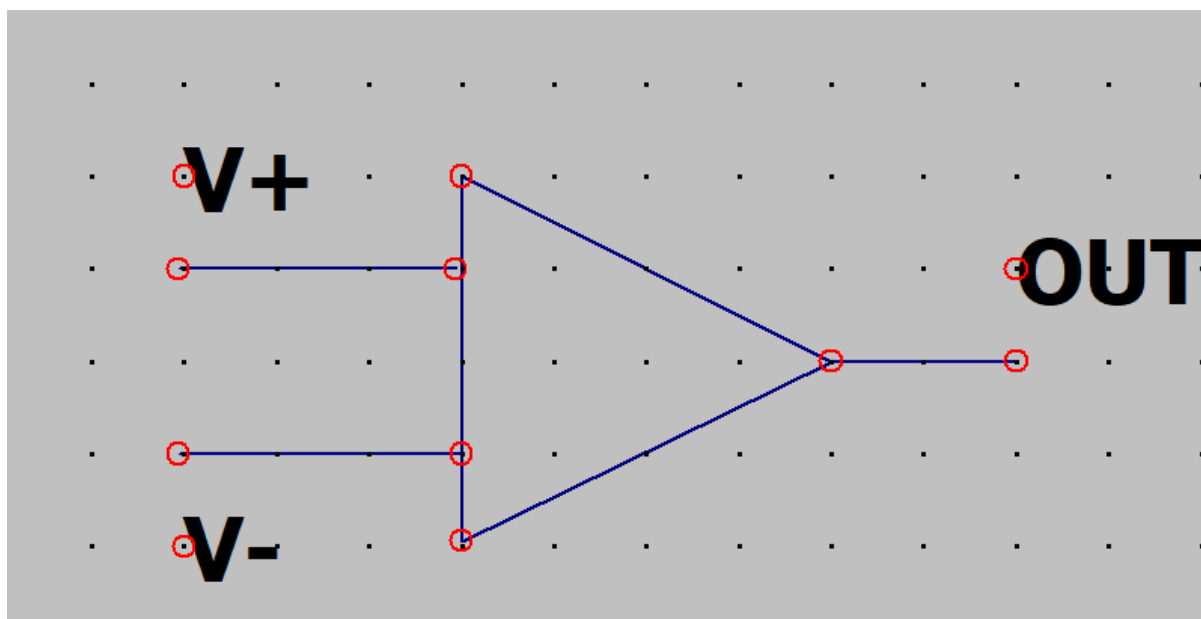
اکنون مدل خود را همانند شکل زیر طراحی می کنیم.  
 دقت شود که در طراحی خود اتصالات به درستی برقرار شده باشند.



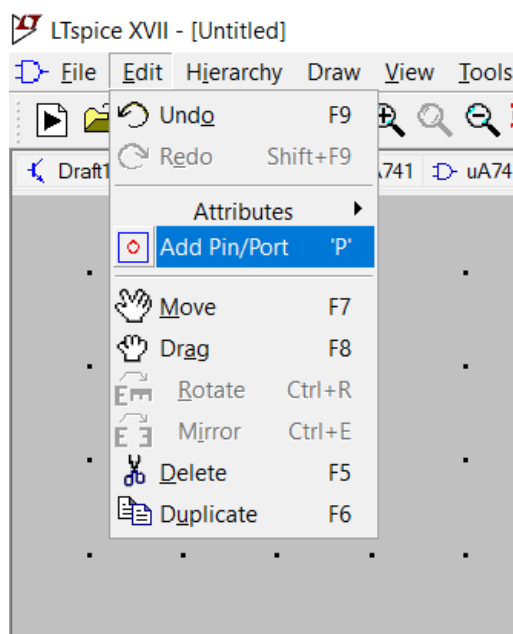
اکنون باید ورودی و خروجی که در مدار اولیه نام گذاری شده بود را در این مدل مشخص کنیم.  
 برای این کار ابتدا همانند قبل در Tollbar نرم افزار در قسمت File گزینه draw را انتخاب کرده و سپس Text را انتخاب می کنیم. حال باید صفحه زیر را داشته باشیم.



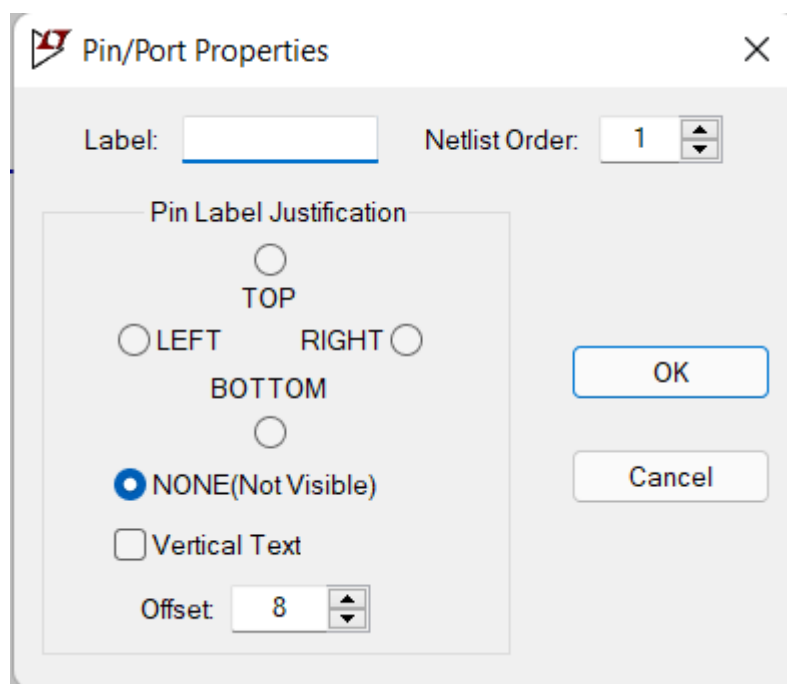
اکنون ورودی و خروجی ها را نوشته و همانند شکل زیر نام گذاری می کنیم.



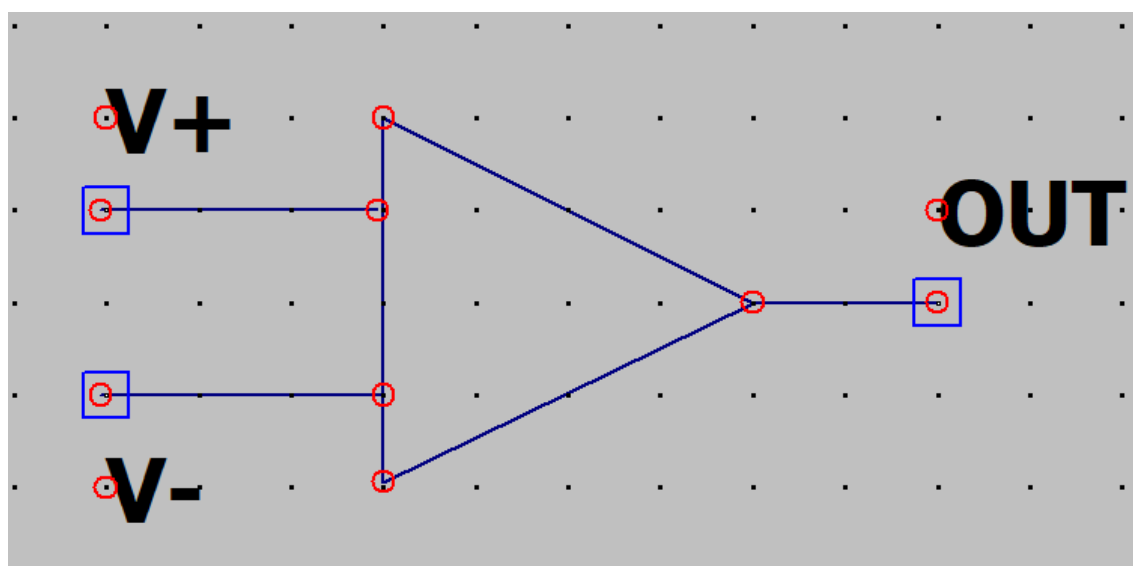
اکنون پورت هایی را برای مدل طراحی شده تعیین می کنیم. برای اینکار ابتدا از قسمت Tollbar نرم افزار edit را انتخاب کرده و سپس گزینه Add pin/port را انتخاب می کنیم.



پس از انتخاب Add pin/port باید صفحه زیر برای ما باز شده باشد.



دقت شود که در قسمت Label باید دقیقا اسم Label های مدار اولیه را وارد کنیم پس از وارد کردن اسامی، پورت ها را در سر ورودی و خروجی مدار قرار می دهیم.



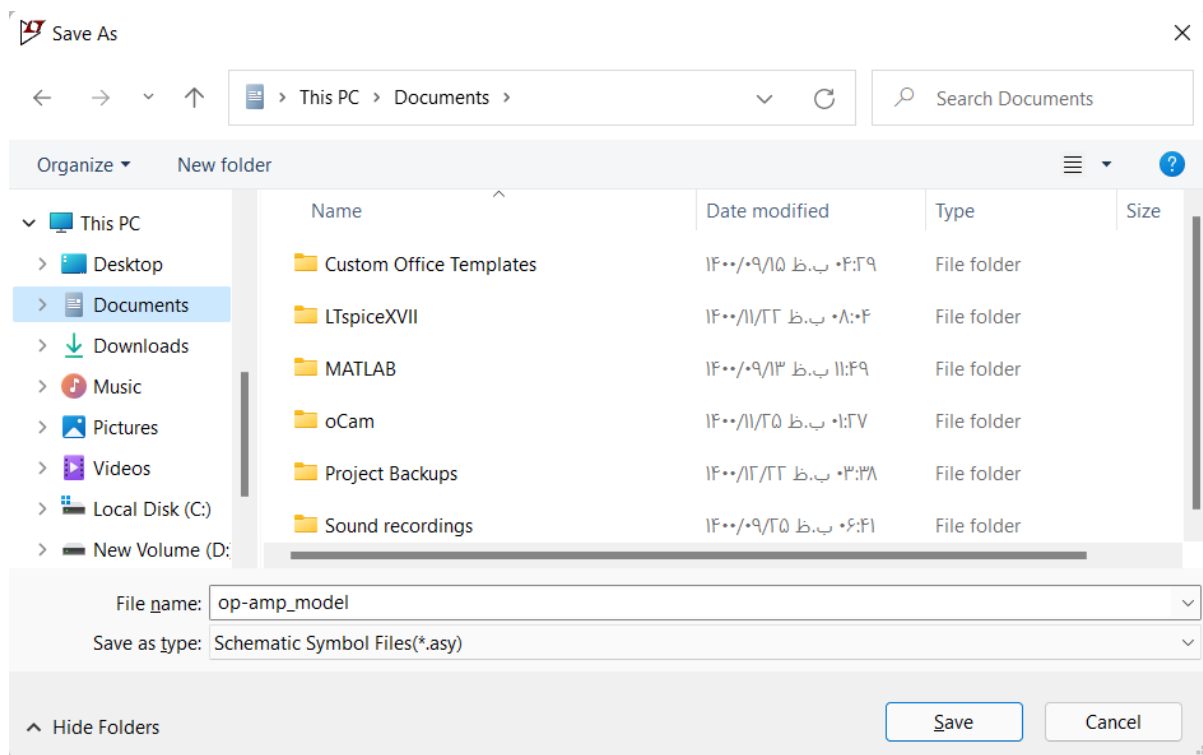


دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان

مدل طراحی شده ما اکنون کامل است. تنها باید دقت کرد که مدل خود را در همان جایی که مدار اولیه را سیو کرده‌ایم، ذخیره بکنیم.

همچنین باید اسم فایل مدل را هم مثل فایل مدار اولیه بگذاریم.

فرمت فایل مدل ما باید **asy** باشد.



مراحل **subcircuit** ما به اتمام رسید و مدل آپ امپ جدید ما طراحی شد.

اکنون برای تست آن، یک صفحه شماتیک جدید باز می‌کنیم. شماتیک جدید خود را در همان مسیر قبلی سیو می‌کنیم.

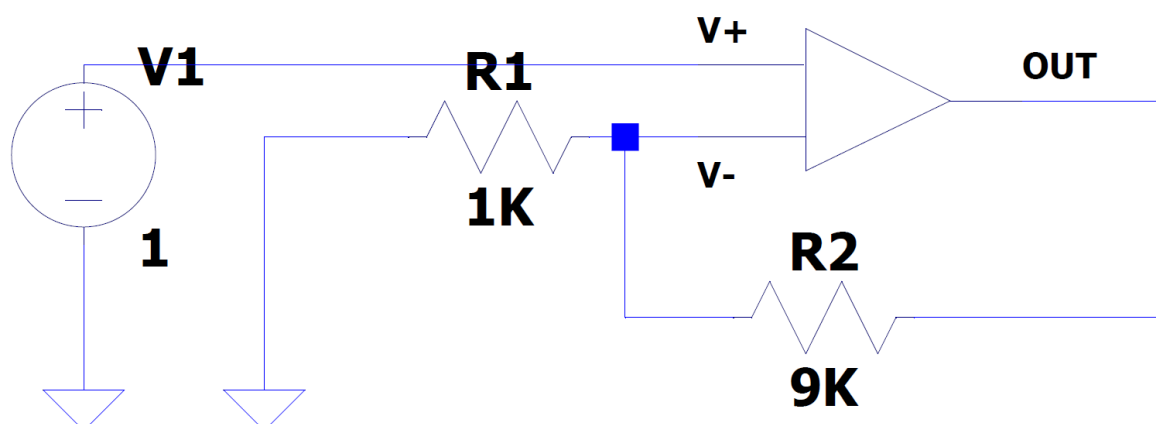
حالا مدل طراحی شده جدیدمان را می‌توانیم در قسمت **Component** پیدا کنیم.

زمانی که **Component** را باز می‌کنیم باید مسیر **directory** را تغییر دهیم و همانطور که مشاهده می‌کنید مدل **op amp** طراحی شده توسط ما به قطعات **LTspice** اضافه شده است.


اکنون مثالی را با **op amp** طراحی شده انجام می‌دهیم.

مدار زیر را فرض می‌کنیم:

دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری  
جزوه LT-Spice دکتر محمد رشتیان



حال با دستور .op. نتیجه تحلیل DC ما به شکل زیر می باشد:

 \* C:\Users\000912\Desktop\opamp.asc

--- Operating Point ---

V(n001) :	1	voltage
V(out) :	9.97997	voltage
V(n002) :	0.997997	voltage
I(R2) :	0.000997997	device_current
I(R1) :	0.000997997	device_current
I(V1) :	-5.01493e-010	device_current
Ix(x1:V+) :	5.01493e-010	subckt_current
Ix(x1:V-) :	-5.01493e-010	subckt_current
Ix(x1:OUT) :	-0.000997997	subckt_current