



دانشگاه کردستان
University of Kurdistan
زانکۆی کوردستان

شبیه‌ساز مدار الکترونیکی

 **Circuit Simulator** © MR

راهنمای دانشجو

جهت استفاده در درس الکترونیک ۱

تهیه کننده:

دکتر محمد رزاقی
هیات علمی گروه مهندسی برق (الکترونیک و مخابرات)

فهرست مطالب

۱	۱ این برنامه چه می کند
۱	۲ اجرای برنامه
۲	۳ آشنایی با محیط
۳	۴ نوشتن نت لیست
۶	۵ مدل قطعه ها
۹	۶ چهار نوع تحلیل
۱۲	۷ خواندن نتایج
۱۶	۸ نمای شماتیک
۱۸	۹ مدارهای آماده برنامه
۱۸	۱۰ تمرین ها
۲۴	۱۱ خطاهای رایج و راه حل آن ها
۲۶	۱۲ فرض ها و محدودیت ها
۲۷	۱۳ مرجع یک صفحه ای

۱ این برنامه چه می‌کند

این برنامه یک شبیه‌ساز مدار است که به‌طور ویژه برای درس الکترونیک ۱ طراحی شده است. کاربر مدار را با چند سطر متن توصیف می‌کند و برنامه ولتاژها، جریان‌ها، شکل موج‌ها و پاسخ فرکانسی را محاسبه می‌کند؛ افزون بر این، معادله‌ای را که برای محاسبه هر مقدار به کار برده است نیز نمایش می‌دهد.

موتور محاسباتی این برنامه همانند شبیه‌سازهای حرفه‌ای (مانند SPICE و ngspice) عمل می‌کند: قانون جریان کیرشهف را برای گره‌ها اعمال می‌کند و از آنجا که دیود و ترانزیستور عناصری غیرخطی‌اند، دستگاه معادلات را به روش تکراری نیوتن-رافسون حل می‌کند. تفاوت اصلی در این است که این برنامه برای اهداف آموزشی طراحی شده است، نه برای طراحی صنعتی:

- معادله هر قطعه همان معادله‌ای است که در کلاس درس معرفی شده است — نمایی شاکی برای دیود، ابرز-مول برای ترانزیستور دوقطبی، قانون مربعی برای MOS.
- در گزارش نقطه کار، فرمول محاسبه هر مقدار در کنار آن درج شده است.
- ولتاژ حرارتی به‌طور پیش‌فرض $V_T = 26 \text{ mV}$ در نظر گرفته شده است تا نتایج با مثال‌های حل‌شده کتاب مطابقت داشته باشد.
- پیام‌های خطا به زبانی ساده و روشن بیان می‌شوند و شماره سطر دارای اشکال را مشخص می‌کنند.
- برنامه مدار را به‌صورت نقشه مدار (شماتیک) نیز ترسیم می‌کند تا کاربر اطمینان یابد مدار توصیف‌شده همان مدار مورد نظر اوست.

چرا نتلیست به‌جای ترسیم مدار با ماوس؟

نتلیست زبان مشترک تمامی شبیه‌سازهای مدار است. هر ابزاری که در ادامه تحصیل یا در صنعت از آن استفاده کنید — LTspice، HSPICE، Cadence — همین قالب را می‌پذیرد. یادگیری آن تنها حدود ده دقیقه زمان می‌برد و مهارتی ماندگار است. در مقابل، ترسیم شماتیک به‌طور خودکار توسط برنامه انجام می‌شود.

۲ اجرای برنامه

برنامه تنها از یک فایل تشکیل شده است: circuit-simulator.html. این برنامه به نصب و اتصال به اینترنت نیازی ندارد و هیچ فایلی را روی رایانه ایجاد نمی‌کند.

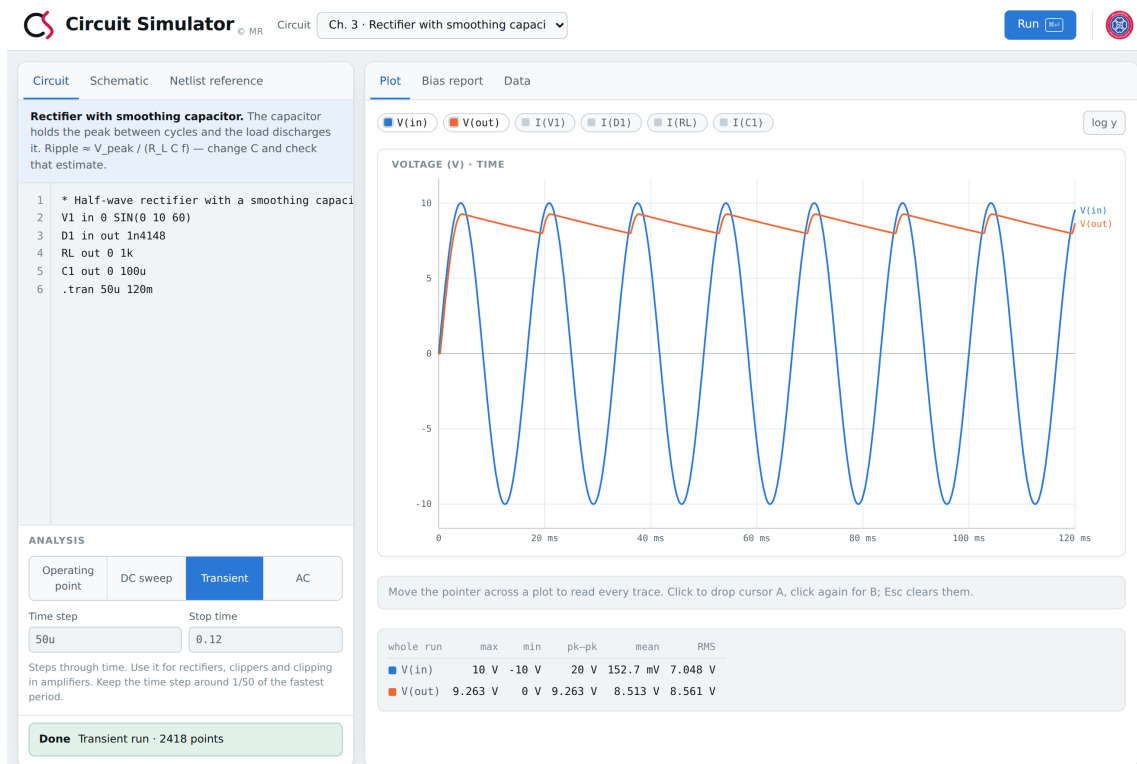
۱. فایل را در رایانه خود (روی میز کار، حافظه فلش یا هر پوشه دلخواه) کپی کنید.
۲. روی آن دوبار کلیک کنید تا در مرورگر باز شود؛ مرورگرهای Chrome، Edge، Firefox و Safari همگی پشتیبانی می‌شوند.
۳. بدین ترتیب برنامه آماده استفاده است؛ یک مدار نمونه از پیش بارگذاری شده و نتیجه آن نمایش داده می‌شود.



چند نکته عملی

- برنامه بدون اتصال به اینترنت نیز کار می‌کند. تنها چیزی که برنامه از اینترنت دریافت می‌کند، فایل فونت (شکل ظاهری حروف) است؛ در صورت نبود اتصال، برنامه به‌جای آن از فونت پیش‌فرض رایانه شما استفاده می‌کند. فقط شکل حروف کمی تغییر می‌کند و نتیجه محاسبات هیچ تفاوتی نخواهد داشت.
- کار شما در مرورگر ذخیره می‌شود. اگر پنجره را ببندید و دوباره باز کنید، آخرین نت لیست نوشته‌شده حفظ شده است. با این حال، این حافظه به همان مرورگر و همان رایانه محدود است؛ بنابراین در رایانه‌های آزمایشگاه که حساب کاربری مشترک دارند به آن اتکا نکنید و نت لیست تمرین‌های خود را در محل دیگری ذخیره کنید.
- انتخاب یک مدار آماده دیگر، نوشته‌های شما را پاک می‌کند. پیش از تغییر مدار از فهرست بالای صفحه، نت لیست نوشته‌شده را در جای دیگری کپی کنید.
- برنامه روی تلفن همراه نیز اجرا می‌شود، اما صفحه‌کلید و اندازه نمودار برای کار جدی مناسب نیست؛ توصیه می‌شود تمرین‌ها را با رایانه انجام دهید.

۳ آشنایی با محیط



شکل ۱ — نمای کلی. در سمت چپ مدار توصیف می‌شود و در سمت راست نتایج نمایش داده می‌شوند.

پنجره برنامه از سه بخش تشکیل شده است:

بخش	کاربرد
نوار بالا	نام برنامه، فهرست Circuit برای انتخاب یکی از مدارهای آماده (یا «مدار خودم»)، و دکمه Run. کلید میان‌بر: Enter + Ctrl (در مک Enter + ⌘).
پنل چپ	سه زبانه: Circuit (ویرایشگر نت‌لیست + تنظیم تحلیل + پیام‌ها)، Schematic (نقشه مدار)، Netlist reference (مرجع دستورها).
پنل راست	سه زبانه: Plot (نمودار، کرسرها و جدول اندازه‌گیری)، Bias report (گزارش نقطه کار)، Data (جدول اعداد و کپی به‌صورت CSV).

نیازی نیست هر بار دکمه Run را فشار دهید: برنامه نیم ثانیه پس از توقف تایپ، مدار را به‌طور خودکار دوباره حل می‌کند.

واژه‌نامه رابط

رابط کاربری برنامه به زبان انگلیسی است. معادل فارسی اصطلاحات به کار رفته در آن به شرح زیر است:

معنی	در برنامه
نقطه کار (بایاس) — حل DC	Operating point
جاروب DC: تغییر پله‌پله یک منبع	DC sweep
تحلیل گذرا (در حوزه زمان)	Transient
تحلیل سیگنال کوچک در حوزه فرکانس	AC
گزارش نقطه کار	Bias report
منبع جاروب / از / تا / گام	Sweep source / From / To / Step
گام زمانی / زمان پایان	Time step / Stop time
تعداد نقطه در هر دهگان فرکانسی	Points/decade
ناحیه کار قطعه (قطع، فعال، اشباع، ...)	Region
محور عمودی لگاریتمی	log y
کپی داده‌ها برای استفاده در اکسل	Copy as CSV
انجام شد / هشدار / سطر ۳ ایراد دارد	Done / Check / Line 3

۴ نوشتن نت‌لیست

نت‌لیست به معنای «فهرست اتصال‌ها» است: هر سطر یک قطعه را معرفی می‌کند و مشخص می‌کند که آن قطعه بین کدام گره‌ها قرار گرفته و مقدار آن چقدر است.

```
* Half-wave rectifier
V1 in 0 SIN(0 10 60)
D1 in out 1n4148
RL out 0 1k
.tran 50u 50m
```

مفهوم این پنج سطر چنین است: یک منبع سینوسی ۱۰ ولتی ۶۰ هرتزی بین گره in و زمین؛ یک دیود 1n4148 از in به out؛ یک مقاومت ۱ کیلو اهمی از out به زمین؛ و دستور شبیه‌سازی مدار در حوزه زمان به مدت ۵۰ میلی ثانیه.

۱.۴ قاعده سطر

<نام> <گره ۱> <گره ۲> برای قطعه‌های دوسر (مقاومت، خازن، سلف، منبع، دیود)
<مقدار>

<نام> <گره ۱> <گره ۲> <گره ۳> برای ترانزیستورها (سه پایه)
<مدل>

- حرف اول نام، نوع قطعه را تعیین می‌کند: R مقاومت، C خازن، L سلف، V منبع ولتاژ، I منبع جریان، D دیود، Q ترانزیستور دوقطبی، M ترانزیستور MOS. باقی نام اختیاری است: R1، RC، Rload همه درست‌اند.
- نام گره‌ها به انتخاب کاربر است — in، out، b، vcc، n5. بزرگی و کوچکی حروف تفاوتی ایجاد نمی‌کند.
- گره 0 همیشه زمین است (gnd هم پذیرفته می‌شود). هر مداری باید زمین داشته باشد.
- سطری که با * آغاز شود توضیح محسوب می‌شود؛ نخستین توضیح، عنوان مدار در نظر گرفته می‌شود.
- سطری که با . آغاز شود یک دستور است، نه قطعه (مانند .tran، .model).

۲.۴ پیشوندهای واحد

پیشوند	ضریب	مثال	پیشوند	ضریب	مثال
f	10^{-15}	2f	k	10^3	4.7k
p	10^{-12}	2p	meg	10^6	1meg
n	10^{-9}	10n	g	10^9	1g
u	10^{-6}	100u	t	10^{12}	1t
m	10^{-3}	10m	نمایش علمی نیز پذیرفته می‌شود: 1e-14		

خطای رایج: m به معنای میلی و meg به معنای مگا

این قاعده از SPICE گرفته شده و از خطاهای رایج کاربران است. 1M به معنای یک میلی است، نه یک مگا. برای یک مگا اهم بنویسید 1meg یا 1e6. حروف اضافه پس از پیشوند نادیده گرفته می‌شوند؛ بنابراین 2.2k و 2.2kohm یکسان‌اند.

۳.۴ قطعه‌ها

معنی	سطر
مقاومت ۲/۲ کیلو اهم بین a و b	R1 a b 2.2k
خازن ۱۰۰ میکروفاراد — در DC مدار باز	C1 a b 100u
همان خازن، با ولتاژ اولیه ۵ ولت در $t = 0$	C1 a b 100u IC=5
سلف ۱۰ میلی‌هانری — در DC اتصال کوتاه	L1 a b 10m
منبع ولتاژ ۵ ولت؛ a مثبت نسبت به b	V1 a b DC 5
منبع جریان ۱ میلی‌آمپر؛ جریان درون منبع از a به b جاری است، یعنی به گره b تزریق می‌شود	I1 a b 1m
دیود؛ گره اول آند، گره دوم کاتد	D1 an ka 1n4148
ترانزیستور دوقطبی: کلکتور، بیس، امیتر — به همین ترتیب	Q1 c b e 2n3904
ترانزیستور MOS: درین، گیت، سورس (بدنه به سورس وصل است)	M1 d g s nmos W=20u L=1u
منبع ولتاژ وابسته به ولتاژ، بهره ۱۰	E1 a b c d 10
منبع جریان وابسته به ولتاژ، ۱ میلی‌آمپر بر ولت	G1 a b c d 1m

به ترتیب پایه‌ها دقت کنید

در Q1 c b e اول کلکتور است و در M1 d g s اول درین. اگر جای بیس و کلکتور جابه‌جا شود، برنامه خطایی گزارش نمی‌کند؛ زیرا مدار نوشته شده از نظر ساختاری معتبر است، هرچند مدار مورد نظر شما نیست. زبانه **Schematic** بهترین ابزار برای یافتن این اشتباه است.

۴.۴ منبع‌ها و شکل موج‌ها

معنی	سطر
ولتاژ ثابت ۱۲ ولت	V1 a 0 DC 12
سینوسی: مقدار offset = ۰، دامنه = ۱۰ ولت (نه دامنه مؤثر)، فرکانس = ۶۰ هرتز	V1 a 0 SIN(0 10 60)
پالس: سطح پایین، سطح بالا، تأخیر، زمان صعود، زمان نزول، مدت پالس، دوره تناوب	V1 a 0 PULSE(0 5 0 1u 1u 1m 2m)
خط شکسته: زوج‌های (زمان، ولتاژ)	V1 a 0 PWL(0 0 1m 5 2m 0)
سیگنال کوچک ۱ ولتی برای تحلیل AC؛ در DC صفر است	V1 a 0 DC 0 AC 1

مقدار AC تنها در تحلیل AC اعمال می‌شود و مقدار DC یا شکل موج تنها در تحلیل نقطه کار و تحلیل گذرا. می‌توان هر دو را برای یک منبع تعریف کرد.

```

1 * ok
2 V1 in 0 SIN(0 10 60)
3 D1 in out 1n4148
4 RL out 0 1k
5 .tran 50u 50m
    
```

شکل ۲ — ویرایشگر. شماره سطر دارای اشکال به رنگ قرمز نمایش داده می‌شود.

۵ مدل قطعه‌ها

دیود و ترانزیستور، برخلاف مقاومت، با یک «مقدار» واحد توصیف نمی‌شوند، بلکه چندین پارامتر دارند که مجموعه آن‌ها مدل نامیده می‌شود. برنامه شامل چند مدل آماده است:

مدل‌های آماده	نوع
D (دیود ایده‌آل درسی)، 1n4001، 1n4148، zener3v3، zener5v1، zener9v1	دیود
2n3906، 2n3904، 2n2222 (درسی)، npn، pnp	دوقطبی
pmos، nmos	MOS

۱.۵ معادله‌های مورد استفاده

دیود — رابطه شاکی، به همراه مقاومت سری پیوند و شاخه شکست معکوس:

$$I_D = I_S (e^{V_D/(nV_T)} - 1)$$

جریان

$$r_d = nV_T/I_D$$

مقاومت دینامیکی

ترانزیستور دوقطبی — ابرز-مول با اثر ارلی:



$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} (1 + V_{CE}/V_A)$$

جریان کلکتور

$$I_B = I_C/\beta$$

جریان بیس

$$g_m = I_C/V_T \quad r_\pi = \beta/g_m \quad r_O \approx V_A/I_C$$

پارامترهای سیگنال کوچک

ترانزیستور MOS — قانون مربعی با مدولاسیون طول کانال:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

ناحیه اشباع

$$I_D = \mu C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2]$$

ناحیه خطی

$$g_m = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) = 2I_D / (V_{GS} - V_{TH})$$

ترانسانایی

۲.۵ تعریف مدل دلخواه

```
.model mydiode D(IS=1e-15 N=1.05)
.model mybjt NPN(IS=5e-16 BF=150 VAF=60)
.model mynmos NMOS(VTH=0.5 KP=250u LAMBDA=0.05)
```

نوع	پارامترها
دیود	IS جریان اشباع، N ضریب ایده‌آلی، RS مقاومت سری، BV ولتاژ شکست، IBV جریان در نقطه شکست، CJO ظرفیت پیوند
دوقطبی	IS، BF بهره جریان مستقیم (β)، BR بهره معکوس، VAF ولتاژ ارلی، CJC، CJE
MOS	VTH ولتاژ آستانه، KP همان μC_{ox} ، LAMBDA، CGS، CGD، و W و L روی خط خود قطعه

۳.۵ سه روش برای تغییر یک پارامتر

مثال: فرض کنید می‌خواهیم I_S دیود را تغییر دهیم.

۱. تعریف یک مدل جدید و نسبت دادن دیود به آن

```
D1 p 0 mydiode
.model mydiode D(IS=1e-18 N=1.05)
```

۲. بازتعریف مدل آماده موجود — سطر دیود بدون تغییر باقی می‌ماند



```
D1 p 0 D
.model D D (IS=1e-18)
```

۳. درج پارامتر در سطر خود قطعه — سریع‌ترین روش

```
D1 p 0 D IS=1e-18
Q1 c b e npn BF=150 VAF=60
M1 d g 0 nmos W=20u L=1u VTH=0.6
```

دو خطا که در اغلب شبیه‌سازها بدون هشدار باقی می‌مانند

نخست: نام مدل در سطر قطعه باید دقیقاً با نام درج‌شده در سطر `.model` یکسان باشد. اگر بنویسید `D1 p 0 D` اما مدل را `mydiode` نام‌گذاری کنید، دیود از همان مدل آماده `D` استفاده می‌کند و مقدار I_S تعریف‌شده هرگز به کار نمی‌رود.

دوم: در اطراف علامت `=` فاصله قرار ندهید. عبارت $I_S = 1e-18$ نادرست و $I_S=1e-18$ درست است. این برنامه هر دو مورد را گزارش می‌کند (شکل ۳)، اما توصیه می‌شود خودتان نیز آن‌ها را بررسی کنید، زیرا سایر نسخه‌های SPICE در این موارد هشدار می‌دهند.

Check The model "mydiode" is defined but no device uses it. Check the model name on the device line — a device that names a model you have not defined quietly falls back to the built-in one.

شکل ۳ — هشدار: «مدل `mydiode` تعریف شده اما هیچ قطعه‌ای از آن استفاده نمی‌کند.»

روش مطمئن برای اطلاع از مقداری که واقعاً به کار رفته، مراجعه به زبانه `Bias report` و سطر I_S همان دیود است.



۶ چهار نوع تحلیل

هر تحلیل را می‌توان به دو روش تعریف کرد: نوشتن دستور آن در نت‌لیست، یا تکمیل فرم زیر ویرایشگر. این دو روش معادل‌اند و یکدیگر را به‌روز می‌کنند؛ برای مثال، اگر در نت‌لیست tran نوشته شود، دکمه Transient به‌طور خودکار فعال می‌شود.

ANALYSIS

Operating point

DC sweep

Transient

AC

Time step

Stop time

20u

0.005

Steps through time. Use it for rectifiers, clippers and clipping in amplifiers. Keep the time step around 1/50 of the fastest period.

Done

Transient run · 254 points

شکل ۴ — پنل تحلیل. هر دکمه فیلدهای مربوط به خود را نمایش می‌دهد و در زیر آن توضیح کوتاهی آمده است.

۱.۶ نقطه کار — op.

این تحلیل تنها حل DC را انجام می‌دهد: منابع در مقدار ثابت خود، خازن‌ها به‌صورت مدار باز و سلف‌ها به‌صورت اتصال کوتاه در نظر گرفته می‌شوند. این تحلیل نموداری ندارد و تمامی نتایج در زبانه Bias report نمایش داده می‌شوند. نخستین گام در بررسی هر مدار تقویت‌کننده همین تحلیل است: تا زمانی که نقطه کار درست نباشد، بهره معنایی ندارد.



۲.۶ جاروب DC — .dc

```
.dc V1 0 5 0.01
.dc VDS 0 3 0.02 VGS 0.6 1.4 0.2
```

سطر نخست یک منبع را از ۰ تا ۵ ولت با گام ۱۰ میلی‌ولت جاروب می‌کند. سطر دوم شامل دو منبع است و خانواده‌ای از منحنی‌ها را تولید می‌کند: V_{DS} محور افقی، و برای هر مقدار V_{GS} یک منحنی جدا.

حالت دوم، ابزار اصلی رسم مشخصه‌های قطعه است: منبع اول محور افقی را تشکیل می‌دهد و منبع دوم به ازای هر مقدار خود یک منحنی مجزا ایجاد می‌کند؛ دقیقاً مشابه شکل‌های فصل‌های ۴ و ۶ کتاب.



شکل ۵ — مشخصه خروجی ترانزیستور دوقطبی: I_C بر حسب V_{CE} ، برای پنج مقدار I_B .

۳.۶ تحلیل گذرا — .tran

```
.tran 20u 5m
```

عدد اول گام زمانی است (۲۰ میکروثانیه) و عدد دوم زمان پایان (۵ میلی‌ثانیه).



این تحلیل برای بررسی یکسوساز، محدودکننده و مشاهده بریده شدن قله سیگنال در تقویت کننده به کار می‌رود. عددی که وارد می‌کنید بیشترین گام زمانی است، نه گام ثابت: برنامه برای کنترل خطا گام را به‌طور خودکار کوچک می‌کند و در لحظه‌های شکست شکل موج (لبه پالس) دقیقاً متوقف می‌شود. به‌عنوان یک قاعده تجربی، گام زمانی را حدود یک‌پنجاهم کوتاه‌ترین دوره تناوب مدار انتخاب کنید.

۴.۶ تحلیل AC — .ac

```
.ac dec 20 1 10meg
```

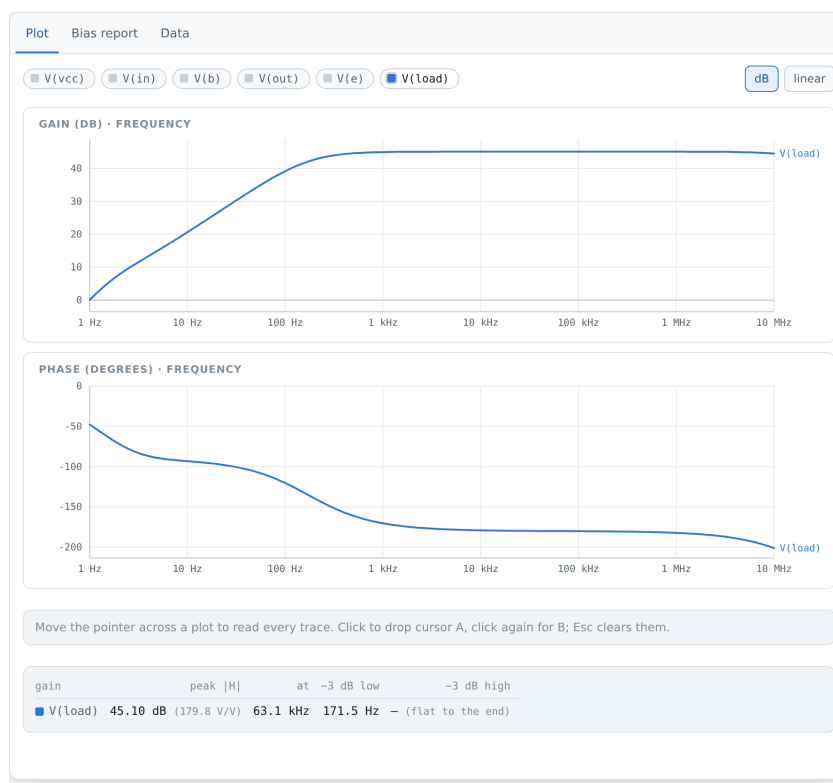
این دستور به معنای بیست نقطه در هر دهگان فرکانسی، از ۱ هرتز تا ۱۰ مگاهرتز است. با جایگزینی dec با lin، فاصله نقاط خطی می‌شود.

برنامه ابتدا نقطه کار را محاسبه می‌کند، سپس مدار را حول آن **خطی‌سازی** می‌کند و در پایان فرکانس را جاروب می‌کند. نتیجه شامل دو نمودار دامنه و فاز است.

چرا خروجی «بهره» خوانده می‌شود

از آنجا که نتیجه یک نسبت است، اگر برای منبع ورودی 1 AC تعریف شود، ولتاژ هر گره مستقیماً برابر با بهره ورودی تا آن گره خواهد بود. به همین دلیل، در مدارهای آماده برنامه همواره 1 AC درج شده است.

فاز به‌صورت پیوسته رسم می‌شود؛ یک طبقه معکوس کننده اختلاف فاز ۱۸۰ درجه ایجاد می‌کند و نمودار بین ۱۸۰+ و ۱۸۰- جهش نمی‌کند.



شکل ۵ب — تحلیل AC تقویت‌کننده امپتر مشترک: دامنه، فاز، و جدول اندازه‌گیری که بهره بیشینه و فرکانس‌های قطع را ارائه می‌کند.

کاربرد	دستور
فقط نقطه کار	.op
جاروب یک منبع	.dc V1 0 5 0.01
جاروب دوگانه (خانواده منحنی)	.dc V1 0 5 0.01 V2 0 2 0.5
حوزه زمان	.tran 20u 5m
حوزه فرکانس (لگاریتمی)	.ac dec 20 1 10meg
حوزه فرکانس (خطی)	.ac lin 200 1k 50k
تغییر ولتاژ حرارتی	.options vt=25.85m
تعیین دما به سلسیوس	.options temp=27

۷ خواندن نتایج

۱.۷ نمودار

- برای هر سیگنال یک دکمه گرد در بالای نمودار وجود دارد که با کلیک روی آن، نمایش سیگنال فعال یا غیرفعال می‌شود. $V(out)$ به معنای ولتاژ گره out، $I(R1)$ جریان مقاومت، $IC(Q1)$ جریان کلکتور،

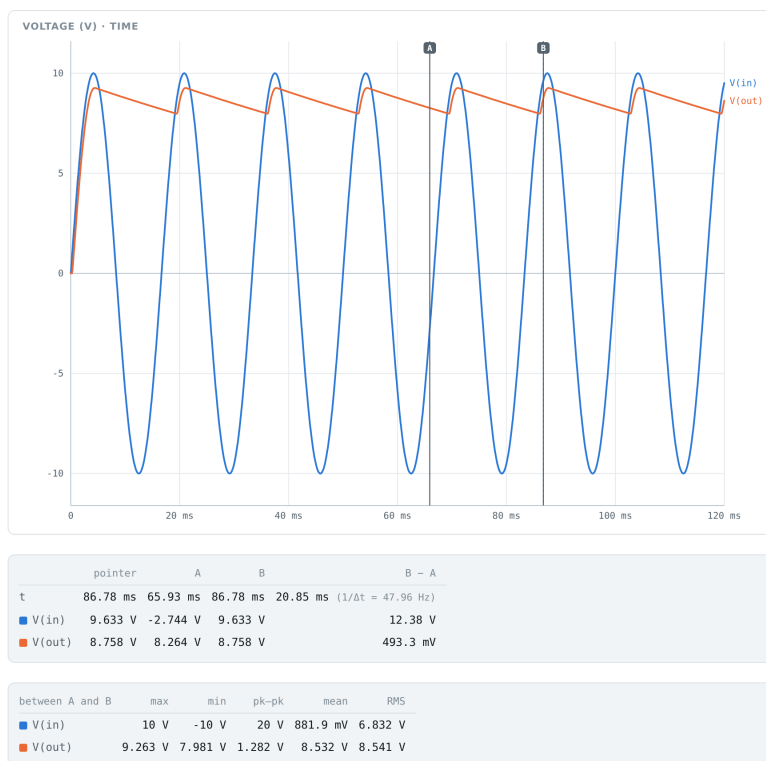
(M1) ID جریان درین.

- ولتاژ و جریان در دو نمودار مجزا رسم می‌شوند، زیرا مقیاس آن‌ها یکسان نیست. این طراحی آگاهانه است: برای هر کمیت یک محور مستقل.
- $\log y$ محور عمودی را لگاریتمی می‌کند؛ این گزینه برای بررسی مشخصه دیود ضروری است.
- در تحلیل AC می‌توان نمایش را بین dB و نسبت خطی تغییر داد.

۲.۷ کرسرها و اندازه‌گیری

این بخش اندازه‌گیری‌هایی را که پیش‌تر با خط‌کش روی نمودار انجام می‌شد، به‌صورت عددی و دقیق ارائه می‌کند.

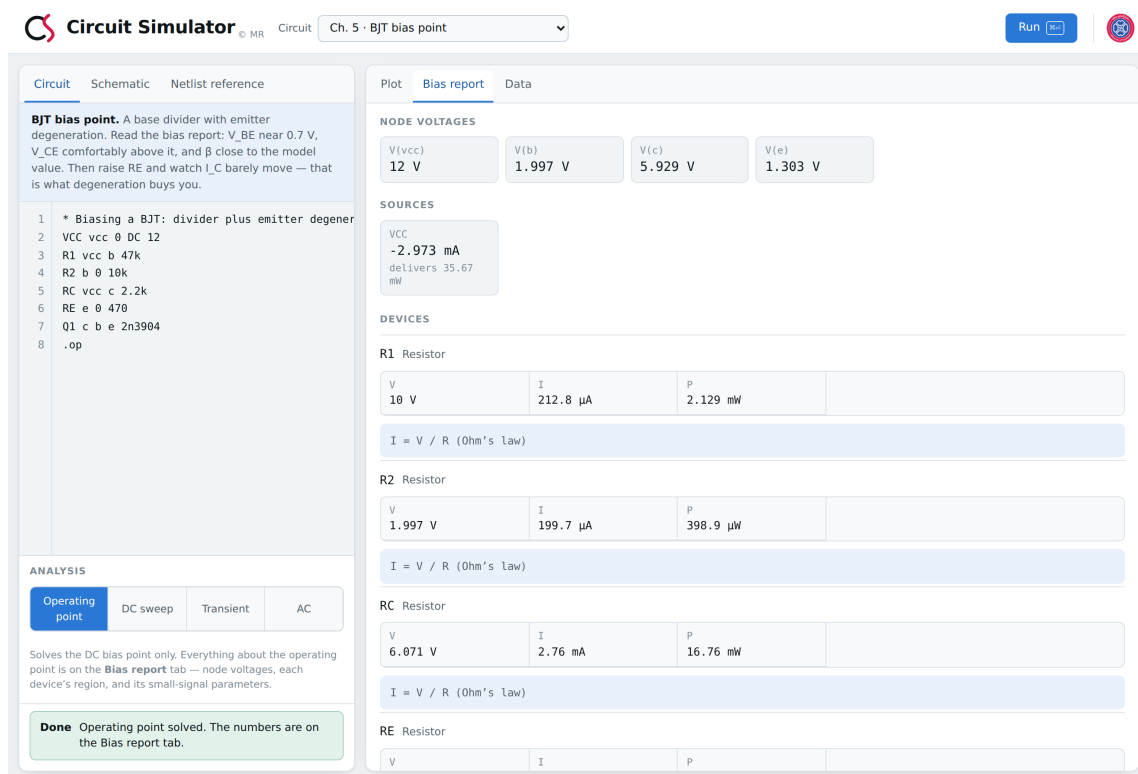
- با حرکت ماوس روی نمودار، ستون pointer مقدار تمامی سیگنال‌ها را در آن لحظه نمایش می‌دهد.
- با کلیک نخست کرسر A و با کلیک دوم کرسر B قرار می‌گیرد. ستون $B - A$ اختلاف دو نقطه را نشان می‌دهد؛ در محور زمان، مقدار $1/\Delta t$ نیز نمایش داده می‌شود و بدین ترتیب دوره تناوب مستقیماً به فرکانس تبدیل می‌شود.
- کلید Esc کرسرها را حذف می‌کند.
- جدول پایین، مقادیر بیشینه، کمینه، دامنه قله‌تاقله، میانگین و مقدار مؤثر (RMS) را ارائه می‌کند. در صورت قرار دادن دو کرسر، تمامی این مقادیر تنها برای بازه بین A و B محاسبه می‌شوند؛ این روش صحیح اندازه‌گیری ریبیل است که باید پس از پایان حالت گذرای اولیه انجام شود.
- در تحلیل AC، همین جدول بهره بیشینه، فرکانس متناظر با آن و فرکانس‌های قطع ۳ دسی‌بل را ارائه می‌کند.



شکل ۶ — دو کرسر روی خروجی یکسوساز، جدول اختلاف، و اندازه‌گیری‌های بازه A تا B.

۳.۷ گزارش نقطه کار

این زبانه مهم‌ترین بخش برنامه برای این درس است و سه قسمت دارد: ولتاژ تمامی گره‌ها، جریان و توان منابع، و یک کارت اطلاعات برای هر قطعه.



شکل ۷ — کارت ترانزیستور: ناحیه کار، مقادیر نقطه کار، پارامترهای سیگنال کوچک، و معادله‌هایی که به کار رفته‌اند.

برچسب رنگی بالای هر کارت، ناحیه کار قطعه را نشان می‌دهد و نخستین موردی است که باید بررسی شود:

برچسب	معنی	در صورت غیرمنتظره بودن
forward active	فعال مستقیم — ناحیه تقویت	مطلوب است
saturation (دوقطبی)	اشباع: V_{CE} بسیار کاهش یافته است	R_C را کاهش دهید یا بایاس بیس را پایین‌تر ببرید
cutoff	قطع — جریانی برقرار نیست	بایاس بیس / گیت کافی نیست
(MOS) saturation	اشباع: ناحیه تقویت MOS	مطلوب است
triode (linear)	ناحیه خطی — رفتاری مشابه مقاومت	V_{DS} کم است؛ R_D را کاهش دهید
reverse / forward (on) (off)	دیود روشن / خاموش	—
reverse breakdown	دیود در ناحیه شکست (کار زنر)	—

پارامترهای سیگنال کوچک همان پارامترهایی هستند که برای مدار معادل مورد نیاز است:



ترانسانایی — شیب منحنی خروجی نسبت به ورودی	g_m
مقاومت ورودی بیس در مدار معادل هیبرید- π	r_π
مقاومت خروجی قطعه (از اثر آرلی یا مدولاسیون طول کانال)	r_O
مقاومت دینامیکی دیود در نقطه کار	r_d
نسبت I_C به I_B در همان نقطه کار	β

جهت جریان‌ها

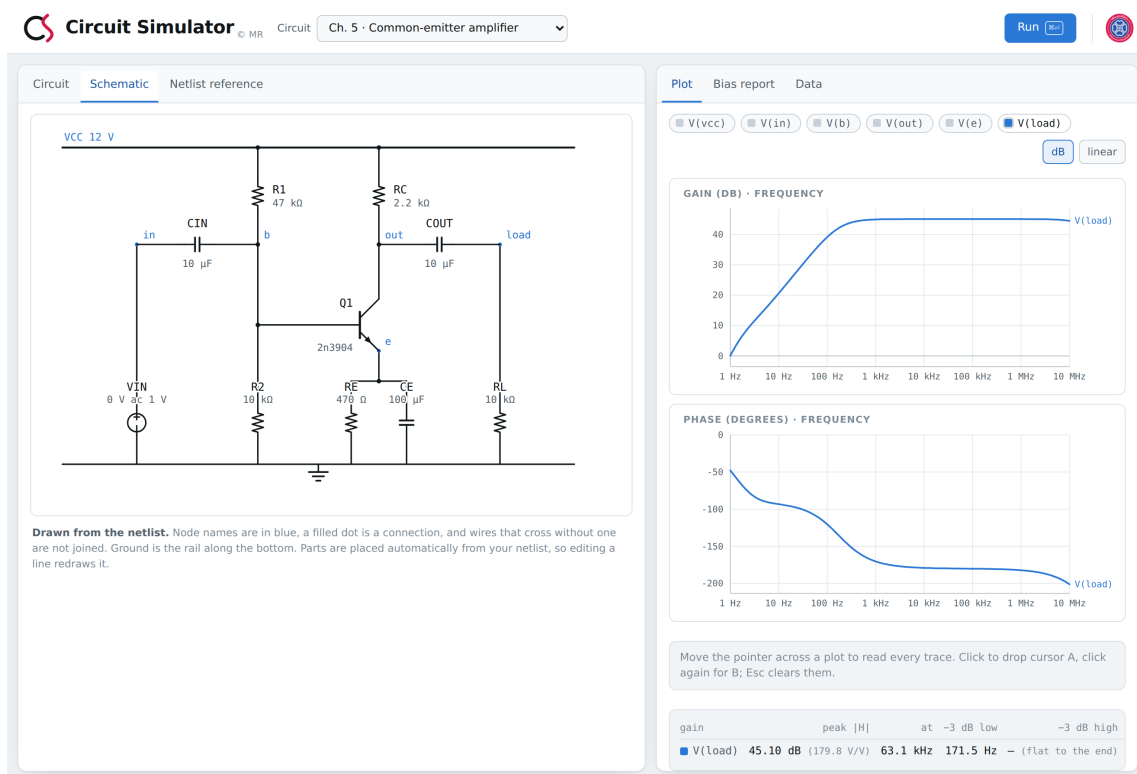
جریان‌ها مطابق قرارداد کتاب درسی گزارش می‌شوند، نه قرارداد SPICE: برای یک ترانزیستور PNP یا PMOS که در حال هدایت است، I_C و I_D عددی مثبت می‌شوند. بنابراین جریان هر قطعه روشن، مثبت گزارش می‌شود.

۴.۷ زبانه Data

این زبانه داده‌های عددی سازنده نمودار را به صورت جدول نمایش می‌دهد. دکمه Copy as CSV تمامی داده‌ها را در حافظه کپی می‌کند تا بتوان آن‌ها را در اکسل یا متلب وارد کرد؛ این قابلیت برای تهیه گزارش‌های آزمایشگاه مفید است.

۸ نمای شماتیک

زبانه Schematic نقشه مدار توصیف‌شده را ترسیم می‌کند. این نقشه مستقیماً از نت لیست ساخته می‌شود؛ بنابراین اگر بخشی از نقشه نادرست به نظر برسد، اشکال در نت لیست است، نه در نقشه. این سریع‌ترین روش برای یافتن گره‌ای است که نام آن اشتباه تایپ شده است.



شکل ۸ — تقویت‌کننده امیتر مشترک، همان‌گونه که برنامه از روی نتلیست ترسیم کرده است.

قواعد خواندن نقشه

- ریل تغذیه بالا، زمین پایین. منبع DC ثابتی که نام آن مشابه نام تغذیه باشد (VSS, VEE, VDD, VCC) به جای دایره منبع، یک خط افقی برچسب‌دار در بالای نقشه می‌شود. منبعی که جاروب می‌شود (مانند VDS) همچنان به شکل منبع ترسیم می‌شود.
- نام گره‌ها به رنگ آبی و در بالای سیم مربوط نوشته می‌شود.
- نقطه توپر نشانگر اتصال است. دو سیمی که بدون نقطه از روی یکدیگر عبور می‌کنند به هم متصل نیستند؛ این همان قرارداد کتاب است.
- جهت پیکان، نوع قطعه را مشخص می‌کند: در NPN پیکان روی امیتر و رو به بیرون و در PNP رو به داخل است؛ PMOS و PNP با امیتر/سورس به سمت بالا کشیده می‌شوند.
- مسیر سیگنال از چپ به راست است: ورودی، ترانزیستور و بار.

چیدمان خودکار است

برنامه محل قرارگیری قطعه‌ها را به‌طور خودکار تعیین می‌کند. برای مدارهای درسی، نتیجه تقریباً مشابه شکل‌های کتاب است، اما در مدارهای پیچیده‌تر ممکن است یک سیم مسیر طولانی‌تری را طی کند. این موضوع تنها جنبه ظاهری دارد و اتصال‌ها همواره مطابق نتلیست هستند.

۹ مدارهای آماده برنامه

این مدارها از فهرست Circuit در نوار بالا انتخاب می‌شوند. هر یک یادداشت کوتاهی دارد که نکات قابل توجه را بیان می‌کند. گزینه نخست، Write my own circuit، ویرایشگر را با یک قالب خالی باز می‌کند.

فصل	مدار	آنچه نشان می‌دهد
۱	تقسیم‌کننده مقاومتی	صحت عملکرد برنامه؛ نمودار کاملاً خطی است، زیرا هیچ عنصر غیرخطی وجود ندارد
۱	پاسخ پله RC	ثابت زمانی؛ در $t = \tau$ خازن به ۶۳٪ رسیده است
۳-۲	مشخصه دیود	نمایی شاگلی؛ هر ۶۰ میلی‌ولت، یک دهگان جریان
۳	یکسوساز نیم‌موج	خروجی = ورودی منهای یک افت دیود، و صفر در نیم‌سیکل منفی
۳	یکسوساز با خازن صافی	نگهداری قله و ریپل؛ مقایسه با $V_p/(R_L C_f)$
۳	پل تمام‌موج	هر دو نیم‌سیکل به بار می‌رسد، فرکانس ریپل دو برابر، دو افت دیود
۳	محدودکننده دیودی	بریده شدن تدریجی قله، زیرا دیود کلید ایده‌آل نیست
۳	تثبیت‌کننده زنر	ثابت ماندن خروجی پس از رسیدن به ولتاژ شکست
۴	مشخصه خروجی دوقطبی	نواحی اشباع و فعال، و شیب ملایم اثر آرلی
۵	نقطه کار دوقطبی	بایاس با تقسیم‌کننده و مقاومت آمیتر
۵	تقویت‌کننده آمیتر مشترک	بهره میان‌باند و افت بهره در فرکانس پایین از خازن‌های کوپلاژ
۵	امیتر مشترک، سیگنال بزرگ	همان مدار در حوزه زمان؛ مرز اعتبار تحلیل سیگنال کوچک
۵	امیتر فالوور	بهره نزدیک یک؛ مزیت اصلی آن در امپدانس است، نه در بهره
۶	مشخصه خروجی NMOS	مرز ناحیه خطی و اشباع در $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$
۶	مشخصه انتقالی NMOS	قانون مربعی؛ ریشه جریان، خطی می‌شود
۷-۶	تقویت‌کننده سورس مشترک	بهره $-g_m(R_D r_O)$ و پهنای باند از خازن بار

۱۰ تمرین‌ها

این تمرین‌ها به ترتیب فصل‌های درس تنظیم شده‌اند. هر تمرین با یکی از مدارهای آماده برنامه آغاز می‌شود و وظیفه شما تغییر مدار، اندازه‌گیری و مقایسه نتیجه شبیه‌سازی با مقدار محاسبه‌شده دستی است. هدف اصلی تمرین‌ها همین مقایسه است، نه صرفاً انجام شبیه‌سازی.

روش کار در همه تمرین‌ها

- ابتدا محاسبات دستی را انجام دهید و نتیجه را یادداشت کنید. (۲) سپس شبیه‌سازی را اجرا کنید.
- اگر اختلاف دو مقدار بیش از چند درصد بود، علت آن را بیابید؛ تقریباً همواره یک فرض ساده‌کننده در محاسبات دستی وجود دارد که برنامه آن را به کار نبرده است. تبیین همین اختلاف، مهم‌ترین بخش پاسخ شما است.



divider • RC step

تمرین ۱

۱. مدار Resistive divider را باز کنید. با $R_1 = 1k$ و $R_2 = 3k$ ولتاژ out را با دست حساب کنید و با گزارش نقطه کار مقایسه کنید.
۲. R_2 را به $1k$ تغییر دهید. شیب نمودار جاروب چقدر می‌شود؟ رابطه شیب با $R_2/(R_1 + R_2)$ را بنویسید.
۳. در گزارش نقطه کار، توان مصرفی هر مقاومت و توان تحویلی منبع را ببینید و تراز توان را بررسی کنید.
۴. مدار RC step response را باز کنید. کرسر را روی $t = 100 \mu s$ بگذارید و ولتاژ را بخوانید. آن را با $1 - e^{-1} = 0.632$ مقایسه کنید. سپس C1 را ده برابر کنید و پیش‌بینی کنید پاسخ چقدر کندتر می‌شود، سپس آن را آزمایش کنید.

گزارش کنید: جدول مقایسه نتایج دستی و شبیه‌سازی برای چهار مورد فوق.

diode-iv

 تمرین ۲ — استخراج I_S و n از منحنی

۱. مدار Diode I-V curve را باز کنید و $\log y$ را روشن کنید. منحنی در ناحیه بایاس مستقیم باید به خط راست تبدیل شود. علت چیست؟
۲. دو کرسر روی دو نقطه با فاصله ۶۰ میلی‌ولت بگذارید و نسبت جریان‌ها را از ستون اختلاف بخوانید. چرا این نسبت برابر ۱۰ است؟ رابطه آن را از معادله شاکی استخراج کنید.
۳. از دو نقطه دلخواه روی منحنی، n و I_S را حساب کنید. پاسخ را با سطرهای I_S و n در گزارش نقطه کار بسنجید.
۴. اکنون مدل دیود را به 1n4148 تغییر دهید و همین مراحل را تکرار کنید. کدام پارامترها تغییر کرده‌اند؟

گزارش کنید: مقدار استخراج‌شده I_S و n ، و درصد خطا نسبت به مقدار واقعی مدل.



diode-iv

تمرین ۳ — فرض «افت ۰/۷ ولت» تا چه حد معتبر است؟

۱. با مدار زیر، ولتاژ دیود را در چند جریان مختلف اندازه بگیرید (با تغییر مقدار R_1 ، جریان را تغییر دهید):

```
* diode drop
V1 a 0 DC 5
R1 a p 4.3k
D1 p 0 1n4148
.op
```

۲. جدولی از V_D در جریان‌های ۱/۱۰، ۱، ۱۰ و ۲۰ میلی‌آمپر بسازید.

۳. در جریان ۲۰ میلی‌آمپر، کارت دیود در گزارش نقطه کار سطر R_S را نشان می‌دهد. چه کسری از افت ولتاژ کل بر روی مقاومت سری و چه کسری بر روی پیوند است؟

۴. نتیجه‌گیری: فرض «دیود روشن = ۰/۷ ولت» در چه محدوده‌ای از جریان قابل قبول است؟

گزارش کنید: جدول چهار سطری و یک جمله نتیجه‌گیری درباره اعتبار مدل ۰/۷ ولتی.

peakdet

تمرین ۴ — یکسوساز و خازن صافی

۱. مدار Rectifier with smoothing capacitor را باز کنید. ولتاژ قله خروجی را اندازه بگیرید و با $V_p - V_D$ مقایسه کنید.

۲. دو کرسر را بعد از گذرای اولیه (مثلاً بین ۸۰ و ۱۲۰ میلی‌ثانیه) بگذارید و ریزل را از ستون pk-pk بخوانید.

۳. ریزل را با تقریب کلاسیک $V_r \approx V_p / (R_L C f)$ مقایسه کنید. مقدار تقریبی باید اندکی بزرگ‌تر از نتیجه شبیه‌سازی باشد. علت چیست؟ (راهنمایی: این رابطه فرض می‌کند خازن در تمام دوره در حال تخلیه است.)

۴. خازن را به ۴۷u و سپس ۲۲۰u تغییر دهید. آیا ریزل با $1/C$ متناسب است؟ نمودار ریزل بر حسب $1/C$ را رسم کنید.

۵. جریان دیود $I(D1)$ را رسم کنید. چرا این جریان به صورت پالس‌های باریک است و قله آن چند برابر جریان متوسط بار است؟ این نکته در انتخاب دیود چه اهمیتی دارد؟

گزارش کنید: جدول ریزل برای سه مقدار خازن، نمودار ریزل بر حسب $1/C$ ، و توضیح شکل جریان دیود.

تمرین ۵ — محدودکننده و زنر

clipper • zener

۱. در مدار Diode limiter، سطح بریده شدن قله را اندازه بگیرید. اگر دو دیود به صورت سری قرار گیرند، چه تغییری رخ می‌دهد؟ (یک دیود دیگر اضافه کرده و نتیجه را بررسی کنید.)
۲. دامنه ورودی را از ۵ به ۰/۵ ولت کاهش دهید. آیا مدار همچنان عمل محدودسازی را انجام می‌دهد؟ علت را توضیح دهید.
۳. در مدار Zener shunt regulator، خروجی را بر حسب ورودی رسم کنید و «نقطه شروع تثبیت» را پیدا کنید.
۴. تنظیم خط (line regulation) را حساب کنید: تغییر خروجی تقسیم بر تغییر ورودی، در ناحیه تثبیت. از دو کرسر و ستون اختلاف استفاده کنید.
۵. R_L را از 1k به 200 تغییر دهید. آیا تثبیت حفظ می‌شود؟ جریان زنر را بررسی و نتیجه را تحلیل کنید.

گزارش کنید: عدد تنظیم خط با واحد، و توضیح رفتار مدار در بار سنگین.

 تمرین ۶ — β ، اثر ارلی و r_O

bjt-out

۱. مدار BJT output characteristics را باز کنید. روی منحنی $I_B = 25 \mu A$ ، در $V_{CE} = 5 V$ ، مقدار I_C را بخوانید و β را حساب کنید.
۲. اکنون همین کار را در $V_{CE} = 1 V$ انجام دهید. مقدار β تغییر کرده است؛ علت چیست؟ نشان دهید که با $\beta = BF(1 + V_{CE}/V_A)$ مطابقت دارد.
۳. با دو کرسر، شیب منحنی در ناحیه فعال را حساب کنید و از آن $r_O = \Delta V_{CE}/\Delta I_C$ را به دست آورید. آن را با سطر r_O در گزارش نقطه کار و با V_A/I_C مقایسه کنید.
۴. ولتاژ ارلی مدل را تغییر دهید: VAF=25 npn VAF=25. شیب منحنی‌ها چه تغییری می‌کند؟ نتیجه‌گیری درباره رابطه r_O و V_A بنویسید.
۵. مرز اشباع کجاست؟ با کمک کرسر تعیین کنید که در چه V_{CE} ی، برچسب کارت ترانزیستور از saturation به forward active تغییر می‌کند.

گزارش کنید: دو مقدار β در دو V_{CE} ، مقدار استخراج‌شده r_O و V_A ، و مقدار V_{CE} در مرز اشباع.

bjt-bias
تمرین ۷ — پایداری نقطه کار

۱. مدار BJT bias point را باز کنید و I_C و V_{CE} را یادداشت کنید. همچنین آن‌ها را به صورت دستی محاسبه کنید (با فرض $V_{BE} = 0.7\text{ V}$) و مقایسه کنید.
۲. ترانزیستور را به 2n2222 که β متفاوتی دارد تغییر دهید. I_C چند درصد تغییر کرد؟
۳. اکنون RE را از 470 به 47 کاهش دهید و بند ۲ را تکرار کنید. در این حالت، I_C با تغییر ترانزیستور چند درصد تغییر می‌کند؟
۴. توضیح دهید چرا مقاومت امیتر، حساسیت نقطه کار به β را کاهش می‌دهد. (این همان اثر پس‌خورد منفی است.)
۵. با $RE = 470$ ، بیشترین مقدار RC را که ترانزیستور را وارد ناحیه اشباع نمی‌کند، بیابید.

گزارش کنید: جدول حساسیت I_C به β برای دو مقدار RE، و مقدار بیشینه RC.

ce-amp · ce-tran
تمرین ۸ — بهره امیتر مشترک و مرز سیگنال کوچک

۱. در مدار Common-emitter amplifier مقدار g_m را از گزارش نقطه کار استخراج کنید و $-g_m(R_C \parallel R_L)$ را حساب کنید.
۲. بهره میان‌بند را از جدول اندازه‌گیری تحلیل AC بخوانید. مقدار شبیه‌سازی اندکی کمتر از محاسبه دستی است؛ با در نظر گرفتن r_o علت آن را نشان دهید.
۳. فرکانس قطع پایین را بخوانید. اکنون C_{IN} را ده برابر کنید؛ چه تغییری مشاهده می‌شود؟ کدام خازن قطب غالب فرکانس پایین را ایجاد می‌کند؟
۴. خازن CE را حذف کنید (سطر آن را با * غیرفعال کنید). بهره چقدر کاهش می‌یابد؟ نشان دهید که با $-R_C/(R_E + 1/g_m)$ مطابقت دارد.
۵. مدار Common-emitter, large signal را باز کنید. دامنه ورودی را از ۱۰ میلی‌ولت به ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌ولت افزایش دهید و در هر مرحله خروجی را بررسی کنید. از چه دامنه‌ای به بعد اعوجاج خروجی محسوس می‌شود؟
۶. در دامنه ۲۰۰ میلی‌ولت، با کرسر بیشینه و کمینه خروجی را بخوانید. آیا دو نیم‌سیکل متقارن‌اند؟ توضیح دهید کدام نیم‌سیکل زودتر دچار اعوجاج می‌شود و چرا (به ناحیه کار در گزارش نقطه کار نگاه کنید).

گزارش کنید: مقایسه بهره دستی و شبیه‌سازی، بهره بدون CE، و دامنه‌ای از ورودی که پس از آن تحلیل سیگنال کوچک اعتبار ندارد.



تمرین ۹ — امیتر فالوور

follower

۱. بهره ولتاژ را با دو کرسر (اختلاف ورودی و خروجی) اندازه بگیرید. چرا اندکی کمتر از یک است؟
۲. اختلاف DC بین ورودی و خروجی را بخوانید و با V_{BE} در گزارش نقطه کار بسنجید.
۳. RE را از 1k به 100 کم کنید. بهره چقدر تغییر کرد؟ همین آزمایش را برای تقویت کننده امیتر مشترک تمرین ۸ انجام دهید (RL را از 10k به 1k) و دو نتیجه را مقایسه کنید.
۴. نتیجه گیری: چرا این طبقه «بافر» نامیده می شود؟ مقاومت خروجی تقریبی آن را از $1/g_m$ حساب کنید.

گزارش کنید: بهره در دو مقدار RE، مقدار $1/g_m$ ، و توضیح تفاوت رفتار دو طبقه در برابر بار سنگین.

 تمرین ۱۰ — استخراج V_{TH} و μC_{ox}

mos-transfer

۱. مدار NMOS square-law transfer curve را باز کنید. با کرسر، I_D را در چند V_{GS} بخوانید و جدول بسازید.
۲. در اکسل (با استفاده از Copy as CSV) ستون $\sqrt{I_D}$ را حساب کنید و بر حسب V_{GS} رسم کنید. نتیجه باید یک خط راست باشد؛ این همان روش استاندارد اندازه گیری V_{TH} است.
۳. از محل تقاطع این خط با محور افقی، V_{TH} را تعیین کنید. از شیب خط، مقدار $\mu C_{ox}(W/L)$ و سپس μC_{ox} را به دست آورید (نسبت W/L را از خط M1 می دانید).
۴. پاسخ را با پارامترهای مدل بسنجید: مدل پیش فرض nmos دارای $V_{TH}=0.4$ و $KP=200u$ است.
۵. اکنون W را دو برابر کنید. کدامیک از دو پارامتر استخراج شده تغییر می کند و کدام ثابت می ماند؟ چرا؟

گزارش کنید: نمودار $\sqrt{I_D}$ بر حسب V_{GS} ، مقادیر استخراج شده، و درصد خطا.

تمرین ۱۱ — نواحی کار و سورس مشترک

mos-out · cs-amp

۱. در مدار NMOS output characteristics، برای منحنی $V_{GS} = 1.2\text{ V}$ ، مرز ناحیه خطی و اشباع را با کرسر پیدا کنید و با $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$ مقایسه کنید.
۲. در ناحیه خطی و در V_{DS} ی کوچک، از نسبت V_{DS}/I_D مقاومت کانال را حساب کنید. با افزایش V_{GS} این مقاومت چه تغییری می‌کند؟ (این اصل، مبنای کاربرد MOS به‌عنوان کلید است.)
۳. مدار Common-source amplifier را باز کنید. از گزارش نقطه کار I_D و $V_{GS} - V_{TH}$ را استخراج کنید و $g_m = 2I_D/(V_{GS} - V_{TH})$ را حساب کنید. با سطر g_m مقایسه کنید.
۴. بهره میان‌باند را از جدول اندازه‌گیری بخوانید و با $-g_m R_D$ بسنجید.
۵. فرکانس قطع بالا را بخوانید و با $1/(2\pi R_D C_L)$ مقایسه کنید. سپس CL را دو برابر کنید و بررسی کنید که آیا پهنای باند نصف می‌شود.
۶. W را دو برابر کنید. بهره و پهنای باند هر یک چه تغییری می‌کنند؟ حاصل ضرب بهره در پهنای باند چه تغییری می‌کند؟

گزارش کنید: مقایسه g_m ، بهره و پهنای باند با روابط دستی، و یک جمله درباره معاوضه بهره و پهنای باند.

تمرین ۱۲ — طراحی (پروژه کوچک)

یک تقویت‌کننده امیتر مشترک با ترانزیستور 2n3904 و تغذیه $V_{CC} = 10\text{ V}$ طراحی کنید که:

۱. جریان نقطه کار $I_C \approx 1\text{ mA}$ باشد،
۲. ولتاژ کلکتور در میانه بازه باشد تا بیشترین دامنه خروجی ممکن شود،
۳. بهره میان‌باند بین ۵۰ و ۶۰ باشد،
۴. فرکانس قطع پایین کمتر از ۱۰۰ هرتز باشد،
۵. نقطه کار با عوض شدن ترانزیستور به 2n2222 بیش از ۱۰٪ جابه‌جا نشود.

گزارش کنید: نتلیست نهایی، محاسبات دستی طراحی، و پنج نتیجه شبیه‌سازی که برآورده شدن هر پنج شرط را نشان دهد، به‌همراه تصویر نمای Schematic مدار.

۱۱ خطاهای رایج و راه‌حل آن‌ها

پیام‌ها در زیر ویرایشگر نمایش داده می‌شوند: رنگ قرمز نشانگر خطا (شبیه‌سازی انجام نشده)، رنگ نارنجی نشانگر هشدار (شبیه‌سازی انجام شده، اما موردی مشکوک وجود دارد) و رنگ سبز نشانگر اجرای موفق است.



Line 3 R1 needs two nodes and a value — R1 in out

شکل ۹ — پیام خطا، همراه با شماره سطر و متن همان سطر.

Done Transient run · 1004 points

شکل ۱۰ — انجام شد: نوع تحلیل و تعداد نقاط.

پیام	مفهوم و راه حل
R1 needs two nodes and a value	سطر ناقص است؛ مقدار یا یکی از گره‌ها از قلم افتاده است.
unknown element "Z9"	حرف اول نام، قطعه شناخته شده‌ای نیست. قطعه‌ها با R C L V I D Q M شروع می‌شوند. E G
cannot read the value "100k"	در مقدار، به جای رقم از حرف استفاده شده است (حرف ا به جای صفر) یا پیشوند ناشناخته است.
do not know what "IS" means here	در اطراف = فاصله قرار داده شده است. بنویسید IS=1e-16.
asks for the model "...", which is not defined	نام مدل در سطر قطعه با هیچ یک از تعریف‌های model. یا مدل‌های آماده مطابقت ندارد. برنامه از مدل پیش فرض استفاده کرده است.
model "..." is defined but no device uses it	مدلی تعریف شده اما هیچ قطعه‌ای از آن استفاده نمی‌کند؛ بنابراین تغییرات مدل بی‌اثر است. نام مدل را در سطر قطعه درج کنید.
No DC path to ground at node ...	این گره تنها از طریق خازن یا گیت MOS به سایر بخش‌های مدار متصل است و در DC شناور باقی می‌ماند. برنامه برای حل مدار یک مقاومت ۱ گیگا اهمی قرار داده است، اما بایاس این گره واقعی نیست : یک مسیر بایاس ایجاد کنید (برای مثال، تقسیم کننده مقاومتی روی گیت).
The matrix is singular	مدار حل پذیر نیست: بخشی از مدار جدا مانده، یا دو منبع ولتاژ متفاوت به صورت موازی بسته شده‌اند، یا حلقه‌ای از منابع ولتاژ ایجاد شده است.
Newton-Raphson did not converge	حل گر به پاسخ همگرا نشد. دامنه منابع را کاهش دهید، یا یک مقاومت سری کوچک (برای مثال RS=0.5) به دیود اضافه کنید، یا گام زمانی را کوچک‌تر کنید.
That run asks for ... time points	نسبت زمان پایان به گام زمانی بیش از حد بزرگ است. گام را بزرگ‌تر یا زمان پایان را کوتاه‌تر انتخاب کنید.

اشتباه‌هایی که پیامی ایجاد نمی‌کند

این اشتباه‌ها مداری معتبر ایجاد می‌کنند که با مدار مورد نظر شما متفاوت است؛ تنها راه شناسایی آن‌ها بررسی نقشه مدار و گزارش نقطه کار است:

- **جابه‌جایی پایه‌های ترانزیستور** (نوشتن b e c Q1 با ترتیبی دیگر). نشانه: ناحیه کار غیرعادی و بهره نزدیک به صفر.
- **اتصال معکوس دیود**. نشانه: خروجی یکسوساز صفر یا منفی است.
- **اشتباه تاییپی در نام گره** (out در یک سطر و out1 در سطر دیگر)؛ در این حالت دو گره مجزا ایجاد شده است. نشانه: گره‌ای که در نقشه بدون اتصال باقی مانده است.
- **توضیح دارای فاصله در ابتدای سطر**: comment * درست است، اما سطری که با فاصله آغاز شود و سپس * بیاید، ممکن است قطعه تلقی شود.

۱۲ فرض‌ها و محدودیت‌ها

دقت هر شبیه‌سازی به دقت مدل‌های آن وابسته است. این برنامه برای فصل‌های ۱ تا ۶ طراحی شده و موارد زیر را پوشش نمی‌دهد؛ آگاهی از آن‌ها از سردرگمی هنگام مشاهده اختلاف نتایج با برگه اطلاعات (دیتاشیت) یا نتایج آزمایشگاه جلوگیری می‌کند:

موضوع	وضعیت در این برنامه
ولتاژ حرارتی	$V_T = 26 \text{ mV}$ به صورت پیش‌فرض، برای مطابقت با مثال‌های کتاب. با options. $v_t = \text{temp}$ یا options قابل تغییر است.
دما	پارامترهای مدل با دما تغییر نمی‌کنند؛ تنها V_T تغییر می‌کند.
دوقطبی	ابرز-مول با اثر ارلی. مقاومت بیس در نظر گرفته نشده است؛ ظرفیت‌های پیوند ثابت‌اند و با ولتاژ تغییر نمی‌کنند.
MOS	قانون مربعی. اثر بدنه، جریان زیرآستانه و اشباع سرعت در نظر گرفته نشده‌اند؛ ظرفیت‌های C_{GS} و C_{GD} ثابت‌اند.
پاسخ فرکانسی بالا	چون ظرفیت‌های داخلی ساده‌اند، فرکانس قطع بالای یک تقویت‌کننده تقریبی است. این دقت برای فصل‌های ۱ تا ۶ کافی است، اما برای طراحی در فرکانس‌های بالا مناسب نیست.
نوفه و تلرانس	در نظر گرفته نشده است. تمامی قطعه‌ها دقیقاً مقدار اسمی خود را دارند.
تقویت‌کننده عملیاتی	مدل آماده‌ای برای آن وجود ندارد (موضوع فصل‌های بعدی درس).

یک عادت مهندسی

هنگامی که نتایج شبیه‌سازی و محاسبات دستی با یکدیگر مطابقت ندارند، پیش از تردید در صحت شبیه‌ساز، سه مورد را بررسی کنید: ناحیه کار قطعه‌ها (در گزارش نقطه کار)، نقشه مدار (برای اطمینان از درستی مدار) و فرض‌های ساده‌کننده محاسبات دستی. تقریباً همواره اشکال در یکی از این سه مورد است.



۱۳ مرجع یک صفحه‌ای

توصیه می‌شود این صفحه را جداگانه چاپ کرده و در کنار رایانه قرار دهید.

قطعه‌ها

```
R1 a b 2.2k
C1 a b 100u
C1 a b 100u IC=5
L1 a b 10m
V1 a 0 DC 12
I1 a 0 1m
D1 anode cathode 1n4148
Q1 c b e 2n3904
M1 d g s nmos W=20u L=1u
```

تحلیل‌ها

```
.op
.dc V1 0 5 0.01
.dc VDS 0 3 0.02 VGS 0.6 1.4 0.2
.tran 20u 5m
.ac dec 20 1 10meg
.options vt=26m
```

مدل‌ها

```
.model mydiode D(IS=1e-15 N=1.05)
.model mybjt NPN(IS=5e-16 BF=150 VAF=60)
.model mymos NMOS(VTH=0.5 KP=250u)
D1 p 0 D IS=1e-18
```

شکل موج‌ها

```
SIN(offset amp freq)
PULSE(lo hi td tr tf pw per)
PWL(t1 v1 t2 v2 ...)
DC 0 AC 1
```

در سطر آخر، پارامتر در سطر خود قطعه تعریف شده است.

پیشوندها

```
f p n u m k meg g t
```

m به معنای میلی و meg به معنای مگا است.

میان‌برها

Ctrl + Enter

اجرا

کلیک روی نمودار

کرسر A، سپس B

Esc

برداشتن کرسرها

روابط پرکاربرد

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) \quad r_d = nV_T/I_D$$

دیود

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} (1 + V_{CE}/V_A)$$

دوقطبی

$$g_m = I_C/V_T \quad r_\pi = \beta/g_m \quad r_O \approx V_A/I_C$$

سیگنال کوچک دوقطبی

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

MOS در اشباع

$$g_m = 2I_D/(V_{GS} - V_{TH})$$

ترانزیستور MOS

$$A_v = -g_m (R_C \parallel R_L \parallel r_O)$$

امپتر مشترک

$$A_v = -R_C/(R_E + 1/g_m)$$

امپتر مشترک بدون بای‌پس

$$A_v = -g_m (R_D \parallel r_O)$$

سورس مشترک

$$V_{ripple} \approx V_p/(R_L C f)$$

ریپل یکسوساز

$$\tau = RC \quad f_{3dB} = 1/(2\pi RC)$$

مدار RC