

# تحلیل و طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ

(ویراست دوم)

جلد اول  
(ترانزیستورهای Bipolar)

مهرداد شریف بختیار

نیاز دانش

## پیش‌گفتار

شاید آنچه دانش الکترونیک را از بعضی علوم مهندسی دیگر متمایز می‌نماید آن است که تحلیل و طراحی مدارهای الکترونیک مستلزم دو توانایی و قابلیت متفاوت اما همزمان و الزامی می‌باشد، اول درک رفتار مدار و عملکرد آن براساس بررسی و مشاهده چگونگی ساختار و شکل‌گیری آن می‌باشد و دوم توانایی تحلیل مدار با استفاده از روش‌های تئوری مدارها و ابزار ریاضی. این دو توانایی کاملاً متفاوت بوده اما لازم و ملزم یکدیگر می‌باشند.

مدارهای الکترونیک بسته به عملکرد مورد انتظار از آنها می‌توانند بسیار پیچیده باشند که یک نگرش تحلیلی براساس روش‌های صرفاً ریاضی تنها منجر به تعداد زیادی معادلات می‌گردد که اگرچه حل آنها شاید غیرممکن نباشد اما نباید از نتیجه آن انتظار کسب یک بصیرت واقعی نسبت به رفتار مدار داشت. همین پیچیدگی باعث می‌شود که یک مهندس الکترونیک ناچار باشد با روش‌های مهندسی و استفاده از بصیرت کلی نسبت به رفتار مدار و براساس ساختار آن، عملکرد مدار و چگونگی رابطه قسمت‌های مختلف مدار با هم را تخمین زده و پیش‌بینی نماید و همین بصیرت کلی هست که می‌تواند در حل معادلات مداری و ساده‌سازی آنها کارساز باشد و نتایج حاصل از حل معادلات را معنی دار نماید. از طرف دیگر تخمین رفتار و عملکرد مدار براساس درک کلی مدار بطور تجربی در بسیاری از مدارهای امروزی کافی نبوده و برای تحلیل و طراحی مدارهایی که مهندسین امروزی با آن سر و کار دارند توانایی استفاده از تکنیک‌های مداری و قابلیت نوشتمن معادلات مدار و حل آنها الزامی می‌باشد. در حقیقت هیچ یک از دو روش به تنها‌ی برای بررسی موفق مدارهای الکترونیک امروزی کافی نمی‌باشند.

در نوشن کتاب حاضر نیز سعی شده که هردوی این قابلیت‌ها به خواننده منتقل گردد. در ارائه مطالب سعی شده که درک کلی رفتار مدار همراه با استفاده از تکنیک‌ها و ابزار تحلیل مدار ریاضی مورد بحث واقع شود.

در هر حال این تاکید لازم است که تبحر در هریک از این روش‌ها و دانش مهندسی الکترونیک نیازمند پشتکار و تمرین زیاد می‌باشد و به همین دلیل است که در انتهای هر فصل تمرین‌های متناسب

برای مرور مطالب درس ارائه شده که حل این تمرینات برای درک مطالب اهمیت زیادی را دارا می‌باشد.

کتاب حاضر عمدتاً برای استفاده در دروس دانشگاهی الکترونیک (الکترونیک ۱ و ۲ و ۳) با این فرض تالیف شده است که خواننده با مقدمات الکترونیک و مفاهیمی نظری ضریب تقویت و یا مدارهای مقدماتی دیود و مقاومت آشنا بوده و البته دروس مقدماتی تئوری مدار را گذرانده است.

نحوه ارائه مطالب متناسب با سیستم آموزشی کشور بوده و سعی شده که تصویر ایجاد شده در ذهن خواننده به تدریج تکمیل شده و علت ارائه هر مطلب و نیاز به داشتن آن بطور طبیعی احساس شود. عنوان مثال اگرچه فیزیک ترانزیستور و رفتار فرکانس پائین آن در فصل اول ارائه شده اما فیزیک مربوط به رفتار فرکانس بالا در فصل ۹ و قبل از فصول مربوط به رفتار فرکانسی مدارهای الکترونیک یعنی در جایی که نیاز به آن است آورده شده است.

در ارائه مطالب نیز سعی شده که علاوه بر بیان یک روش سیستماتیک برای تحلیل مدارهای الکترونیک نحوه عملکرد مدار و چگونگی کار بصورت کیفی توضیح داده شود تا خواننده مدارهای الکترونیک را فقط بصورت مجموعه‌ای از معادلات مداری مشاهده نکند بلکه بتواند با کسب بصیرت نسبت به چگونگی عملکرد مدارهای الکترونیک نه تنها روش‌های سیستماتیک برای تحلیل مدار را بطور مؤثر بکار گیرد بلکه بتواند مقدمتاً رفتار مدارها را براساس ساختارشان پیش‌بینی نماید و بدین ترتیب یادگیری آن را با لذت و هیجان دنبال نماید.

کتاب در تمام فصول محدود به تکنولوژی Bipolar می‌باشد و در آن از مطرح کردن هم زمان مدارهای CMOS اجتناب شده، چرا که، بر اساس تجربه مولف، آموزش همزمان مدارهای مربوط به این دو تکنولوژی باعث سردرگمی و عدم ایجاد یک تصویر واضح از نحوه کاربرد هر دو تکنولوژی می‌باشد، به همین دلیل تجزیه و تحلیل مدار در تکنولوژی‌های دیگر به جلد دوم کتاب موکول شده است. اگرچه بسیاری از روش‌هایی که در کتاب بیان شده عمومی بوده و برای تحلیل مدارهایی با تکنولوژی‌های دیگر نظری CMOS نیز مستقیماً قابل استفاده می‌باشد.

در اینجا لازم است از کمک‌های دانشجویانی که در آماده‌سازی و تهیه شکل‌های کتاب و نیز غلطگیری متون همکاری داشته‌اند علی‌الخصوص خانم ساغر عباسزاده تشکر کنم. همچنین شاید آماده‌سازی و چاپ این کتاب بدون زحمات خانم محبوبه کامرانی که تایپ و تصحیحات کتاب را با حوصله و دقت فراوان انجام دادند غیر ممکن می‌بود که از زحمات ایشان قدردانی و تشکر می‌نمایم.

مهرداد شریف بختیار

دانشکده برق - دانشگاه صنعتی شریف

۱۳۹۴ مداد ماه

# فهرست مطالب

۱۳-	فیزیک ترانزیستور دوقطبی و مدل آن	فصل ۱
۱۳-	۱-۱ هادی- عایق- نیمههادی	
۱۴-	۱-۱-۱ نیمههادی نوع (N) و نیمههادی نوع (P)	
۱۷-	۲-۱ اتصال (P-N)	
۲۰-	۱-۲-۱ یک سو سازی جریان الکتریکی توسط اتصال N-P یا دیود	
۲۲-	۲-۲-۱ رابطه ولتاژ- جریان دیود	
۲۵-	۳-۱ ساختار ترانزیستور دو قطبی (Bipolar)	
۲۶-	۱-۳-۱ نحوه بایاس کردن ترانزیستور دو قطبی	
۲۷-	۲-۳-۱ نحوه عملکرد ترانزیستور دو قطبی	
۲۹-	۳-۳-۱ رابطه ورودی- خروجی ترانزیستور دو قطبی	
۳۲-	۴-۳-۱ رابطه جریان و ولتاژ خروجی ترانزیستور دو قطبی	
۳۷-	۴-۱ ترانزیستور به عنوان تقویت‌کننده ولتاژ	
۴۱-	۵-۱ مدار معادل AC	
۴۲-	۶-۱ مدل سیگنال کوچک ترانزیستور دو قطبی	
۴۷-	۷-۱ محاسبه پارامترهای مدل $h-\pi$	
۵۲-	مسائل فصل ۱	



## فصل ۲

## تقویت‌کننده‌های یک طبقه

۵۹	تقویت‌کننده‌های یک طبقه
۶۰	۱-۲ تقویت‌کننده یک طبقه امیتر مشترک
۶۰	۱-۱-۲ نحوه بایاس کردن تقویت‌کننده امیتر مشترک
۶۶	۲-۱-۲ محاسبه ضریب تقویت ولتاژ تقویت‌کننده امیتر مشترک
۶۹	۳-۱-۲ مقاومت ورودی مدار امیتر مشترک
۷۰	۴-۱-۲ مقاومت خروجی مدار امیتر مشترک
۷۱	۵-۱-۲ حداکثر دامنه خروجی (maximum output swing) در مدار امیتر مشترک
۷۶	۶-۱-۲ طراحی تقویت‌کننده امیتر مشترک با بایاس از نوع تشییت جریان کالکتور (self-bias)
۸۵	۲-۲ تقویت‌کننده یک طبقه کالکتور مشترک (Common Collector)
۸۵	۱-۲-۲ نحوه بایاس کردن تقویت‌کننده کالکتور مشترک
۸۸	۲-۲-۲ ضریب تقویت ولتاژ مدار کالکتور مشترک
۹۶	۳-۲ تقویت‌کننده بیس مشترک
۹۷	۱-۳-۲ محاسبه ضریب تقویت ولتاژ
۹۹	۲-۳-۲ مقاومت ورودی
۱۰۰	۳-۳-۲ مقاومت خروجی
۱۰۲	۴-۳-۲ مدار معادل ترانزیستور در ساختار بیس مشترک
۱۰۴	۴-۲ طبقه تقویت‌کننده امیتر مشترک-بیس مشترک (Cascode)
۱۰۵	۱-۴-۲ ضریب تقویت ولتاژ طبقه Cascode
۱۰۶	۲-۴-۲ محاسبه ضریب تقویت ولتاژ مدار Cascode
۱۰۸	۳-۴-۲ مقاومت ورودی و مقاومت خروجی مدار Cascode
۱۰۹	۴-۴-۲ حداکثر تغییرات دامنه خروجی (maximum output swing) مدار
۱۱۱	مسائل فصل ۲



## فصل ۳

## تقویت‌کننده‌های چندطبقه

۱۱۹

مسائل فصل ۳

۱۳۶

## ۲

## فصل

۱۴۳	طبقه تقویت‌کننده دیفرانسیلی
۱۴۴	۱-۴ ساختار مدار طبقه دیفرانسیلی
۱۴۷	۲-۴ بایاس و نقطه کار طبقه دیفرانسیلی
۱۴۸	۳-۴ ضریب تقویت ولتاژ طبقه دیفرانسیلی
۱۵۳	۱-۳-۴ محاسبه ضریب تقویت ولتاژ مشترک (Common mode voltage gain)
۱۵۵	۲-۳-۴ محاسبه ضریب تقویت ولتاژ دیفرانسیلی
۱۶۰	۴-۴ محاسبه خروجی مدار تقویت‌کننده دیفرانسیلی به ازای ورودی‌های دلخواه
۱۶۵	۵-۴ راه حل ساده برای محاسبه ضریب تقویت طبقه دیفرانسیلی
۱۶۵	۱-۵-۴ یک راه ساده و میان بر برای محاسبه ضریب تقویت دیفرانسیلی
۱۶۸	۲-۵-۴ یک راه ساده و میان بر برای محاسبه ضریب تقویت مشترک
۱۷۱	۶-۴ یک تعریف مفید به نام CMRR یا میزان حذف سیگنال مشترک
۱۷۱	۷-۴ حداقل تغییرات ولتاژ خروجی طبقه دیفرانسیلی
۱۷۲	۸-۴ محدوده تغییرات سیگنال مشترک در ورودی
۱۷۶	۹-۴ طبقه تقویت‌کننده دیفرانسیلی با استفاده از مدار Cascode
۱۸۱	۱۰-۴ مقاومت ورودی طبقه دیفرانسیلی
۱۸۲	۱-۱۰-۴ مقاومت ورودی دیفرانسیلی مدار
۱۸۳	۲-۱۰-۴ مقاومت ورودی حالت مشترک مدار
۱۸۹	مسائل فصل ۴

## ۵

## فصل

۱۹۷	منابع جریان و بار اکتیو
۱۹۷	۱-۵ یک منبع جریان ساده
۲۰۰	۲-۵ منابع جریان با استفاده از آینه جریان
۲۰۳	۳-۵ منبع جریان و آینه جریان با مقاومت در امپیتر
۲۰۷	۴-۵ منبع جریان Cascode
۲۱۲	۵-۵ منبع جریان Wilson
۲۱۳	۶-۵ طبقه تقویت با بار اکتیو
۲۱۸	۷-۵ تقویت‌کننده دیفرانسیلی با بار اکتیو
۲۱۹	۱-۷-۵ بررسی ضریب تقویت ولتاژ در تقویت‌کننده دیفرانسیلی با بار اکتیو (یک بررسی کیفی)

۲۲۲.....	۲-۷-۵ محاسبه ضریب تقویت دیفرانسیلی تقویت کننده دیفرانسیلی با بار اکتیو
۲۲۳.....	۸-۵ تقویت کننده دیفرانسیلی کسکود با بار اکتیو
۲۲۵.....	۹-۵ بررسی نقطه کار تقویت کننده با بار اکتیو
۲۲۸.....	۱-۹-۵ بدست آوردن نقطه کار تقویت کننده با بار اکتیو به روش ترسیمی
۲۳۷.....	مسائل فصل ۵

## ۶ فصل طبقات خروجی

۲۴۳.....	۱-۶ جلوگیری از اثر بار روی طبقات تقویت
۲۴۵.....	۲-۶ تأمین جریان بار
۲۵۳.....	۳-۶ طبقه خروجی پوش-پول
۲۵۸.....	۱-۳-۶ اثر dead Zone روی شکل موج خروجی
۲۶۰.....	۲-۳-۶ نحوه بایاس کردن مدار پوش-پول
۲۶۳.....	۳-۳-۶ بایاس مدار پوش-پول برای مشخصه نزدیک به ایده‌آل
۲۶۴.....	۴-۳-۶ ضریب تقویت مدار پوش-پول
۲۷۰.....	۴-۶ راندمان یا بهره‌دهی در طبقات خروجی
۲۷۰.....	۱-۴-۶ محاسبه راندمان مدار کالکتور مشترک
۲۷۴.....	۲-۴-۶ محاسبه راندمان مدار پوش-پول
۲۷۶.....	۳-۴-۶ راندمان بعضی دیگر از انواع طبقه خروجی
۲۷۸.....	مسائل فصل ۶

## ۷ فصل فیدبک

۲۸۵.....	۱-۷ شبکه دوقطبی معادل
۲۸۶.....	۲-۷ معادلات شبکه دوقطبی
۲۸۶.....	۱-۲-۷ مدل Z برای شبکه دوقطبی معادل
۲۹۱.....	۲-۲-۷ مدل Y برای شبکه دوقطبی معادل
۲۹۳.....	۳-۲-۷ شبکه دوقطبی هایبرید (hybrid)
۲۹۵.....	۳-۷ ساختار شبکه عمومی فیدبک
۲۹۶.....	۱-۳-۷ معادلات شبکه عمومی فیدبک
۳۰۰.....	۴-۷ مدل کردن مدارهای فیدبک توسط شبکه‌های دوقطبی

۳۰۲.....	۱-۴-۷ فیدبک نوع "موازی - موازی"
۳۰۶.....	۲-۴-۷ فیدبک نوع "موازی - سری"
۳۱۰.....	۳-۴-۷ فیدبک نوع "سری - سری"
۳۱۳.....	۴-۴-۷ فیدبک نوع "سری - موازی"
۳۱۶.....	۵-۷ فیدبک واقعی و اثر بارگذاری مدار فیدبک
۳۱۷.....	۱-۵-۷ فیدبک موازی - موازی
۳۲۹.....	۲-۵-۷ فیدبک موازی - سری
۳۳۹.....	۳-۵-۷ فیدبک سری - سری
۳۵۰.....	۴-۵-۷ فیدبک سری - موازی
۳۶۰.....	۶-۷ بررسی مدار امیتر مشترک با مقاومت در امیتر توسط روش فیدبک
۳۶۳.....	۷-۷ بازنگری در محاسبه مقاومت خروجی برای فیدبک سری در خروجی
۳۶۸.....	مسائل فصل ۷



## فصل A تقویت‌کننده‌های عملیاتی (Operational Amplifiers)

۳۷۵.....	۱-۸ پارامترهای تعیین‌کننده مشخصات op amp
۳۸۱.....	۲-۸ تعداد طبقات در ساختار تقویت‌کننده عملیاتی
۳۸۲.....	۳-۸ طبقه ورودی
۳۸۲.....	۱-۳-۸ طبقه ورودی تلسکوپی
۳۸۴.....	۲-۳-۸ طبقه ورودی کسکود تا شده (folded cascode)
۳۹۰.....	۳-۳-۸ ورودی rail-to-rail برای مدار folded cascode
۳۹۴.....	۴-۳-۸ طبقه دیفرانسیل ورودی از نوع کالکتور مشترک - بیس مشترک
۴۰۵.....	۴-۸ طبقه دوم تقویت
۴۰۵.....	۱-۴-۸ تعیین ولتاژ DC گره خروجی طبقه اول
۴۱۰.....	۲-۴-۸ تعیین حداقل تغییرات دامنه خروجی توسط طبقه دوم تقویت
۴۱۱.....	۵-۸ طبقه خروجی
۴۱۱.....	۱-۵-۸ طبقه پوش - پول کالکتور مشترک
۴۱۵.....	۲-۵-۸ طبقه پوش - پول امیتر مشترک
۴۱۸.....	۶-۸ مدارهای مرجع جریان بایاس
۴۲۰.....	۱-۶-۸ ایجاد جریان مرجع مستقل از منبع تغذیه
۴۲۳.....	۷-۸ مدارهای حفاظت

۴۲۳	۱-۷-۸ حفاظت طبقه خروجی پوش-پول کالکتور مشترک
۴۲۴	۲-۷-۸ حفاظت طبقه خروجی پوش-پول امیر مشترک
۴۲۵	۸-۸ ولتاژ آفست (offset)
۴۲۵	۱-۸-۸ ولتاژ آفست ساختاری
۴۲۶	۲-۸-۸ آفست در اثر عدم تشابه و انحراف از مقدار ایدهآل قطعات مدار یا آفست اتفاقی
۴۳۱	۳-۸-۸ مدل کردن ولتاژ offset در هر طبقه از تقویت کننده
۴۳۳	۴-۸-۸ ولتاژ آفست ورودی طبقه دیفرانسیلی
۴۳۷	۵-۸-۸ تغییر ولتاژ آفست با درجه حرارت (offset voltage drift) در طبقه دیفرانسیلی
۴۳۸	۶-۸-۸ ولتاژ آفست ورودی برای طبقه دیفرانسیلی با بار اکتیو
۴۴۰	۷-۸-۸ جریان آفست ورودی طبقه دیفرانسیلی (input offset current)
۴۴۲	ضمیمه
۴۴۲	۱-۸ تحلیل مدار تقویت کننده عملیاتی 741
۴۴۶	محاسبه ضریب تقویت ولتاژ
۴۴۹	مدارهای حفاظت
۴۵۱	مسائل فصل ۸

## ۹ فصل مدل فرکانسی ترانزیستور

۴۵۷	۱-۹ خازن فضای بار
۴۵۷	۱-۱-۹ خازن اتصال P-N در بایاس معکوس
۴۵۸	۲-۱-۹ خازن اتصال P-N در بایاس مستقیم
۴۵۹	۳-۱-۹ ترانزیستور دوقطبی همراه با خازن های اتصال
۴۶۰	۲-۹ خازن دیفیوژن یا خازن بیس
۴۶۱	۳-۹ خازن اتصال کالکتور به سیلیکان پایه (collector-substrate)
۴۶۳	۴-۹ مدل $h-\pi$ فرکانس بالا
۴۶۴	۵-۹ یک معیار برای ارزیابی رفتار فرکانس بالای ترانزیستور
۴۶۵	۶-۹ استفاده از $\omega$ برای درک رفتار فرکانس بالای ترانزیستور
۴۶۹	۷-۹ رفتار فرکانسی ترانزیستورهای PNP
۴۷۱	مسائل فصل ۹
۴۷۳	

۴۷۵

رفتار فرکانسی

فصل

۱-۱۰	بررسی رفتار فرکانسی تقویت‌کننده امیر مشترک
۱-۱-۱۰	بررسی کیفی رفتار مدار
۲-۱-۱۰	محاسبه ضریب تقویت ولتاژ مدار امیر مشترک بر حسب فرکانس
۳-۱-۱۰	مدار امیر مشترک و قضیه میلر
۴-۱-۱۰	امپانس ورودی و خروجی مدار امیر مشترک
۲-۱۰	بررسی رفتار فرکانسی مدار کالکتور مشترک
۱-۲-۱۰	ضریب تقویت ولتاژ در مدار کالکتور مشترک
۲-۲-۱۰	امپانس ورودی مدار کالکتور مشترک
۳-۲-۱۰	امپانس خروجی مدار کالکتور مشترک
۳-۱۰	بررسی رفتار فرکانسی طبقه بیس مشترک
۴-۱۰	بررسی رفتار فرکانسی طبقه کسکود
۵-۱۰	بررسی رفتار فرکانسی طبقه کالکتور مشترک- بیس مشترک
۵-۰-۱۰	بررسی کیفی رفتار طبقه کالکتور مشترک- بیس مشترک
۵-۰-۱۰	تحلیل دقیق رفتار مدار
۶-۱۰	بررسی رفتار فرکانسی طبقه دیفرانسیلی
۱-۶-۱۰	طبقه دیفرانسیلی با بار مقاومتی و ورودی‌های دیفرانسیلی
۲-۶-۱۰	ضریب تقویت طبقه دیفرانسیلی با بار مقاومتی و ورودی مشترک
۳-۶-۱۰	طبقه دیفرانسیلی کسکود با بار اکتیو
۷-۱۰	رفتار فرکانسی مدارهای چند طبقه
۸-۱۰	روش ثابت زمانی
۱۰	مسائل فصل

۵۴۹

پایداری و پایدارسازی

فصل

۱-۱۱	پایداری و ناپایداری در حلقه فیدبک
۱-۱-۱۱	تقویت‌کننده تک قطبی در حلقه فیدبک
۲-۱-۱۱	تقویت‌کننده با دو قطب در حلقه فیدبک
۳-۱-۱۱	تقویت‌کننده با سه قطب یا بیشتر در حلقه فیدبک

۵۵۴.....	۲-۱۱ برسی پایداری و معیار پایداری
۵۵۴.....	۱-۲-۱۱ علت ناپایداری
۵۵۶.....	۲-۲-۱۱ معیار پایداری
۵۵۸.....	۳-۲-۱۱ اندازهگیری ضریب تقویت حلقه از روی دیاگرام دامنه و فاز
۵۶۳.....	۳-۱۱ پایدارسازی
۵۷۲.....	۱-۳-۱۱ روش مداری برای پائین آوردن قطب اول
۵۷۵.....	۲-۳-۱۱ استفاده از پدیده میلر برای خازن پایدارسازی
۵۸۰.....	۴-۱۱ سرعت تغییر خروجی slew rate
۵۸۶.....	۱-۴-۱۱ مدلسازی برای slew rate
۵۹۰.....	۲-۴-۱۱ اثر محدودیت slew rate روی رفتار مدار برای ورودی سینوسی بزرگ
۵۹۱.....	۵-۱۱ انتخاب جریان بایاس طبقات تقویت
۵۹۳.....	ضمیمه پایدارسازی توسط ایجاد صفر در حلقه فیدبک
۵۹۶.....	مسائل فصل ۱۱

## ۱۲

## فصل نویز

۶۰۱.....	۱-۱۲ انواع نویز در مدارهای الکترونیکی
۶۰۶.....	۲-۱۲ مدل نویز
۶۰۷.....	۱-۲-۱۲ مدل نویز قطعات غیر اکتیو
۶۰۷.....	۲-۲-۱۲ مدل نویز قطعات اکتیو
۶۰۸.....	۳-۱۲ محاسبه نویز در خروجی مدار
۶۱۸.....	۴-۱۲ منابع نویز معادل در ورودی
۶۲۰.....	۱-۴-۱۲ منابع معادل نویز ورودی برای یک ترانزیستور bipolar
۶۲۴.....	۵-۱۲ رفتار نویز در طبقه تقویت‌کننده دیفرانسیلی
۶۲۷.....	۶-۱۲ نویز معادل ورودی در تقویت‌کننده‌های چند طبقه
۶۲۹.....	مسائل فصل ۱۲

نمایه

۶۳۳