



## الکترونیک (۲)

مؤلف:

احمدعلی اشرفیان

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

## بسمه تعالی

سرشناسه	: اشرفیان، احمدعلی، ۱۳۴۰
عنوان و نام پدیدآور	: الکترونیک (۲) / مؤلف احمدعلی اشرفیان
مشخصات نشر	: تهران؛ سازمان بسیج دانشجویی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، بسیج دانشجویی، مرکز خدمات آموزشی نصیر، ۱۳۹۰
مشخصات ظاهری	: [۶۸۸] ص: مصور
شابک	: ۹۷۸-۹۶۴-۸۲۹۰-۵۹-۲-۲ / ۱۵۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: چاپ اول
موضوع	: الکترونیک -- راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	: الکترونیک -- مسائل، تمرین ها و غیره (عالی)
موضوع	: دانشگاه ها و مدارس عالی -- ایران -- آزمون ها
شناسه افزوده	: سازمان بسیج دانشجویی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۰ ۷ الف ۵۷ الف / TK ۷۸۶۰
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۸۱۰۷۶
شماره کتاب شناسی ملی	: ۲۴۳۱۳۸۴
تاریخ درخواست	: ۱۳۹۰/۰۵/۱۰
تاریخ پاسخگویی:	: ۱۳۹۰/۰۵/۱۷
کد پیگیری	: ۲۴۲۹۵۵۳

نام کتاب	: الکترونیک (۲)
مؤلف	: احمدعلی اشرفیان
ناشر	: سازمان بسیج دانشجویی
با همکاری	: مرکز خدمات آموزشی نصیر
نوبت چاپ	: اول
سال و محل نشر	: تهران، ۱۳۹۰
ناظر فنی چاپ	: دکتر امیر جعفرقلی، مهندس حمید ذوالفقاری
چاپ، لیتوگرافی و صحافی: شادرنگ	
صفحه آرایی	: علی اکبر هدایتی
تایپست	: محمدرضا فرتاش
تیراژ	: ۲۰۰۰ جلد
قیمت	: ۱۵۰۰۰ تومان
شابک	: ISBN ۹۷۸-۹۶۴-۸۲۹۰-۵۹-۲

\* هرگونه چاپ و تکثیر از این اثر ممنوع و به موجب بند ۵ ماده ۲ قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان پیگرد قانونی دارد.  
نشانی: خیابان شریعتی، نرسیده به پل سید خندان، دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مرکز خدمات آموزشی نصیر  
تلفن: ۸۸۴۶۶۷۸۰-۸۸۴۶۶۳۵

### مقدمه مؤلف:

خداوند را سپاس می‌گویم که به من توفیق و توانایی نگارش این کتاب را عطا فرمود. الکترونیک ۲ یکی از دروس پایه در مجموعه‌ی مهندسی برق است که مطالب و مفاهیم آن نقش بسیار مهمی در یادگیری دروس تخصصی دارد و از اینرو فراگیری هر چه دقیق‌تر اصول و مبانی آن می‌تواند زمینه‌ساز موفقیت روزافزون دانشجویان عزیز در کلیه مقاطع تحصیلی این رشته باشد.

آگاهی از نیاز دانشجویان به پاسخگویی مسائل و مطالب این درس در امتحانات دوره کارشناسی به صورت تشریحی و لزوم استفاده مطلوب از این توانایی‌ها در حل تست‌های آزمون‌های ورودی مقاطع بالاتر و استقبال زیادی که از کتاب الکترونیک ۱ شده است مرا بر آن داشت تا از تجربه سال‌ها تدریس در دانشگاه و کلاس‌های آمادگی آزمون کارشناسی ارشد بهره بگیرم و به تألیف این کتاب بپردازم.

مطالب این کتاب ادامه مباحث مطرح شده در کتاب الکترونیک ۱ است که بر اساس سرفصل‌های شورایعالی برنامه‌ریزی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری به نگارش درآمده و در پنج فصل با حل مسائل متعددی به همراه حل تشریحی آن‌ها برای نتیجه‌گیری بهتر و درک بیش‌تر و راحت‌تر مفاهیم آن تدوین شده است. در این کتاب تلاش کرده‌ام ضمن تشریح دقیق و کامل مفاهیم، نکات تستی مربوطه همراه با مثال‌های مناسب با نظمی اصولی ارائه گردد تا برای همه عزیزان قابل استفاده باشد.

آنچه در این کتاب می‌خوانید:

در فصل ششم ابتدا معرفی تقویت‌کننده‌های تفاضلی و تحلیل آن‌ها با روش نیم‌مدار صورت گرفته است و سپس چگونگی استفاده از منبع جریان در آمیتر و بار فعال آینه‌ایی در کلکتور آن‌ها جهت افزایش گین حالت تفاضلی، کاهش گین حالت مشترک و به طور کلی افزایش CMRR بررسی شده است. در ادامه به تحلیل DC مدار، روش محاسبه حداکثر دامنه‌ی نوسان متقارن و بدون اعوجاج در خروجی و روش جبران‌سازی زوج دیفرانسیل در صورتی که مشخصات ترانزیستورهای آن‌ها یکسان نباشد پرداخته‌ام و در پایان تجزیه و تحلیل سیگنال بزرگ و سیگنال کوچک زوج تفاضلی با ترانزیستورهای BJT، JFET و MOSFET آمده است.

فصل هفتم ابتدا با معرفی تقویت‌کننده‌های قدرت کلاس A و B و AB شروع می‌شود سپس راهکارهایی جهت افزایش راندمان کلاس A مانند استفاده از منبع جریان و سلف یا ترانسفورماتور در خروجی ارائه می‌گردد و از آن‌جا که برای افزایش بیش‌تر راندمان لازم است ترانزیستور تقویت‌کننده بایاس نشود سراغ تقویت‌کننده‌های پوش‌پول کلاس B می‌رویم که با مشکل اعوجاج عبور از صفر در خروجی روبه‌رو می‌شویم. برای رفع این مشکل لازم است ترانزیستورها را در آستانه روشن شدن بایاس کنیم که اصطلاحاً گفته می‌شود تقویت‌کننده در کلاس AB کار می‌کند. در ادامه راهکارهایی جهت افزایش راندمان و افزایش مقاومت ورودی کلاس AB از قبیل استفاده از منبع جریان، روش بوت‌استرپ و اتصال بار به منبع تغذیه پیشنهاد می‌شود و در انتها مدارهای محدودکننده جریان جهت حفاظت از ترانزیستورهای قدرت بررسی شده است.

در فصل هشتم ابتدا تقویت‌کننده‌های فیدبک دار با علامت منفی و مثبت معرفی و مزایا و معایب آن‌ها بررسی شده است. سپس نحوه‌ی تشخیص علامت و نوع فیدبک شناسایی شبکه فیدبک و اثر بارگذاری آن روی تقویت‌کننده اصلی و چگونگی تحلیل هر چهار نوع تقویت‌کننده فیدبک دار ولتاژ-سری، ولتاژ-موازی، جریان-سری و جریان موازی مورد بحث قرار می‌گیرد.

در فصل نهم ابتدا شماتیک کلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی معرفی شده است و سپس به تحلیل کامل DC و AC

تقویت کننده عملیاتی 741 پرداخته‌ام در ادامه کاربردهای خطی (جمع کننده، تقویت کننده تفاضلی مبدل امپدانس، انتگرال گیر، مشتق گیر، آنالوگ کامپیوتر و ...) و غیرخطی (یکسو کننده‌های نیم موج و تمام موج دقیق، لگاریتم گیر، آنتی لگاریتم گیر، ضرب کننده، تقسیم کننده، اشمیت تریگر ...) تقویت کننده‌های عملیاتی بررسی شده است.

فصل دهم با تثبیت کننده‌های ولتاژ ساده شروع می‌شود و با ارائه راهکارهایی جهت بهبود عملکرد آن‌ها ادامه می‌یابد نهایتاً به تثبیت کننده‌های ولتاژ پیشرفته می‌رسیم که در ساختار آن‌ها از فیدبک منفی استفاده شده است. سپس مداراتی جهت ایجاد ولتاژ مرجع با پایداری حرارتی مناسب و روش‌هایی جهت تحلیل مدار تثبیت کننده‌های ولتاژ، طرز استفاده از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها تثبیت کننده‌های ولتاژ کلیدی اولیه و ثانویه معرفی شده‌اند و با روش‌های تجزیه و تحلیل آن‌ها آشنا می‌شوید. مزیت این تثبیت کننده‌ها داشتن راندمان بالا است حتی وقتی اختلاف ولتاژ بین ورودی و خروجی زیاد می‌باشد.

در اینجا لازم می‌دانم مراتب سپاس و تشکر قلبی خود را نسبت به همسر عزیزم خانم رویا گذشتی و پسرم آرش ابراز کنم که با صبر و بردباری فراوان در به مقصد رساندن این بار سنگین یاریم کردند و تحمل دشواری‌های این راه را برایم آسان نمودند به ویژه که همسرم مسئولیت ویرایش ادبی کتاب را نیز به عهده گرفت.

و در انتها از آقایان هدایتی و فرتاش که زحمت تایپ و صفحه‌آرایی آن را به عهده داشتند صمیمانه تشکر می‌کنم. ضمن اعتراف به کاستی‌های کتاب، سپاسگزار استادان و خوانندگانی خواهم بود که با پیشنهادهایشان زمینه چاپ‌های بهتر این کتاب را در آینده فراهم می‌سازند و همچنین تلاش مسئولین محترم مؤسسه فرهنگی انتشاراتی نصیر و حمایت‌هایی را که در راستای چاپ این کتاب داشته‌اند قدر می‌نهمم و آرزو دارم که در ارائه خدمات آموزشی و فرهنگی خود بیش از پیش موفق باشند.

تابستان ۱۳۹۰

احمدعلی اشرفیان

ahmadaliashrafian@yahoo.com

## مقدمه ناشر

کتاب الکترونیک (۲) اولین کتاب «دروس مهندسی برق» از مجموعه کتاب‌های کارشناسی ارشد نصیر است که با تلاش فراوان به قلم توانای استاد گرانقدر و فرهیخته جناب آقای احمدعلی اشرفیان نگاشته شده است.

«مرکز خدمات آموزشی نصیر» وابسته به بسیج دانشجویی دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، اولین مرکز آموزشی در حیطه‌ی آمادگی آزمون‌های کارشناسی ارشد در کشور است که از شروع فعالیت‌های آن قریب به بیست سال می‌گذرد. این مرکز که در سال ۱۳۷۱ توسط دانشجویان بسیجی دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی راه‌اندازی شد در طی این سال‌ها همواره در حال رشد، ترقی و تعالی بوده است و علاوه بر توسعه حیطه فعالیت‌ها و گسترش کمی مخاطبان، کیفیت آموزش و سطح علمی آن همواره روند رو به رشدی را داشته است. با توجه به این که این مرکز زیرمجموعه بسیج دانشجویی می‌باشد، اصلی‌ترین هدف خود را خدمت‌رسانی، عدالت آموزشی و ارتقاء علمی دانشجویان قرار داده است و از این جهت شاخص‌ترین مرکز آموزشی در میان مؤسسات مشابه است. این حقیقت فراتر از یک ادعا می‌باشد؛ از این‌رو همواره به‌عنوان مرکزی خوش‌نام و موفق در میان اساتید و دانشجویان محترم مطرح بوده است. بعلاوه چون مسئولین و کادر این مرکز خود نیز اغلب از دانشجویان دانشگاه‌های تهران هستند؛ بیشترین ارتباط را با دانشجویان مخاطب دارند و همواره از نقطه‌نظرات آنان استفاده می‌کنند. در زیر نکاتی برای آشنایی بیشتر شما مخاطب گرامی با این مرکز ذکر می‌شود:

- ۱) استفاده از اساتید مجرب و طراز اول دانشگاه‌های تهران که به‌لحاظ علمی جزو سرآمدترین اساتید کشور می‌باشند؛ از اصلی‌ترین نقاط قوت این مرکز است. اعتقاد ما این است که به این هدف مقدس و والا و این موفقیت هرگز نائل نمی‌شدیم مگر با مساعدت و تلاش و همکاری صادقانه اساتید گران‌قدر که در این راه، تمامی پتانسیل و انگیزه‌ی خود را سرلوحه‌ی فعالیت‌های مرکز قرار داده‌اند.
- ۲) رویکرد ما همواره افزایش سطح کیفی فعالیت‌ها در عین ارائه آن با کمترین هزینه می‌باشد که با تحقق آن هدف اصلی ما که خدمت‌رسانی و ارتقاء هرچه بیشتر علمی دانشجویان این مرز و بوم در کنار عدالت آموزشی می‌باشد محقق می‌شود و در این میان از حجم فعالیت‌های مؤسسات سودمحوری که با تبلیغات رنگارنگ جیب مخاطبان را خالی می‌کنند، می‌کاهد.
- ۳) با توجه به برگزاری ۲۰ سال کلاس‌های آموزشی و ۱۰ سال آزمون‌های آزمایشی، تجربه‌ی گران‌بهای اندوخته‌ایم که یکی از عوامل اصلی موفقیت روزافزون ما است. این تجربیات که سایر مؤسسات نیز در پاره‌ای از موارد از آن استفاده کرده و الگو گرفته‌اند، همواره مرکز خدمات آموزشی نصیر را در جایگاه پیشروترین مؤسسه آموزشی کارشناسی ارشد قرار داده است.
- ۴) با توجه به وابستگی این مرکز به بسیج دانشجویی و با توجه به اهداف مذکور هزینه خدمات ارائه شده کمترین مقدار را در میان تمامی مؤسسات مشابه دارا می‌باشد، که این اختلاف عمیق بعضاً باعث تعجب و ایجاد سؤال برای مخاطبانی که تازه با این مرکز آشنا شده‌اند ولی پس از آشنایی بیشتر با این مجموعه پاسخ سؤال خود را دریافت نموده‌اند.

با عطف به سابقه درخشان این مرکز در طی این سال‌ها و ضعف موجود در زمینه‌ی کتاب‌های کارشناسی ارشد به لحاظ کیفی، این مجموعه تصمیم گرفت که در این زمینه نیز وارد شده و افتخاری دیگر به افتخارات خود بیفزاید.

«مجموعه کتاب‌های کارشناسی ارشد نصیر» که از این پس به تدریج در اختیار علاقمندان قرار خواهد گرفت، مجموعه‌ای بی‌نظیر با رویکردی نوین و ویژگی‌های منحصربه‌فرد به‌طوری که داوطلبان بعد از مراجعه به آن نیازی به استفاده از منابع دیگر نخواهند داشت. نظر به همکاری اساتید گران‌قدری که با خود کوله‌باری از تجربه ارزشمند علمی در سطح دانشگاه‌ها و کلاس‌های مرکز خدمات آموزشی نصیر را دارند و رعایت بالاترین کیفیت در صفحه‌آرایی و چاپ، دانشجویان عزیز لذت واقعی یادگیری را خواهند چشید. در این جا لازم است از زحمات فراوان استاد گران‌قدر جناب آقای احمدعلی اشرفیان در تألیف این اثر ارزشمند کمال قدردانی را بنماییم.

در پایان اجر معنوی فعالیت‌هایی این مرکز را تقدیم می‌کنیم به شهدای دفاع مقدس، این شمع‌های همیشه فروزان بشریت که با مقاومت مردانه خود حماسه‌ی جاوید آفرینند.

مرکز خدمات آموزشی نصیر

## فهرست

۱	فصل ششم : تقویت کننده های تفاضلی .....
۱	مقدمه .....
۱	۱-۱-۶- اصول کار زوج تفاضلی BJT .....
۴	۱-۱-۶- تقویت کننده تفاضلی در حالت مشترک .....
۶	- بهره ولتاژ حالت مشترک .....
۶	- مقاومت ورودی حالت مشترک .....
۷	۲-۱-۶- تقویت کننده در حالت تفاضلی .....
۸	- بهره ولتاژ حالت تفاضلی .....
۱۱	- مقاومت ورودی حالت تفاضلی .....
۱۱	۳-۱-۶- نسبت حذف حالت مشترک ( CMRR ) .....
۱۲	۲-۶- منابع جریان .....
۱۲	۱-۲-۶- منبع جریان آینه ای .....
۱۶	۲-۲-۶- منبع جریان آینه ای بهبود یافته .....
۱۸	۳-۲-۶- منبع جریان ویدلر .....
۲۰	۴-۲-۶- منبع جریان کاسکود .....
۲۱	۵-۲-۶- منبع جریان ویلسون .....
۲۳	۶-۲-۶- منبع جریان کاسکود با MOS .....
۲۴	۷-۲-۶- منبع جریان ویلسون با MOS .....
۲۵	۳-۶- محاسبه حداکثر دامنه نوسان متقارن بدون اعوجاج در خروجی زوج دیفرانسیل .....
۳۰	۴-۶- تقویت کننده تفاضلی با ترانزیستورهای غیریکسان .....
۳۳	۵-۶- تقویت کننده با بار فعال .....
۳۵	۶-۶- تقویت کننده تفاضلی با بار فعال .....
۴۰	۷-۶- تجزیه و تحلیل سیگنال بزرگ تقویت کننده تفاضلی با BJT .....
۴۶	۸-۶- تقویت کننده تفاضلی با استفاده از ترانزیستورهای FET (JFET و MOSFET) .....
۴۷	۱-۸-۶- تجزیه و تحلیل سیگنال بزرگ تقویت کننده تفاضلی با JFET .....
۴۹	۲-۸-۶- تجزیه و تحلیل سیگنال بزرگ تقویت کننده تفاضلی با ترانزیستورهای MOSFET .....
۵۲	۳-۸-۶- تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک تقویت کننده تفاضلی با ترانزیستورهای JFET و MOSFET .....
۵۳	- مقایسه تقویت کننده های تفاضلی با ترانزیستورهای JFET و BJT .....
۵۷	تست های تقویت کننده های تفاضلی با پاسخ تشریحی .....
۸۰	پاسخ تشریحی تست های تقویت کننده های تفاضلی .....
۱۰۶	تست های تقویت کننده های تفاضلی با کلید .....
۱۲۲	کلید تست های تقویت کننده های تفاضلی .....
۱۲۳	فصل هفتم : تقویت کننده های قدرت .....
۱۲۳	۱-۷- دسته بندی طبقه های خروجی .....
۱۲۵	۲-۷- طبقه خروجی کلاس A .....
۱۲۸	۱-۲-۷- استفاده از منبع جریان در تقویت کننده کلاس A .....
۱۳۰	۲-۲-۷- استفاده از سلف در تقویت کننده کلاس A .....
۱۳۱	- بررسی محدودیت های توان، جریان و ولتاژ ترانزیستور توان .....
۱۳۳	۲-۲-۷- استفاده از ترانسفورماتور در تقویت کننده کلاس A .....
۱۳۵	۳-۷- تقویت کننده کلاس B .....

۱۳۵	۱-۳-۷- تقویت کننده پوش پول کلاس B با ترانسفورماتور
۱۳۸	۲-۳-۷- توان مصرفی در هر ترانزیستور کلاس B
۱۴۰	۴-۷- تقویت کننده پوش پول کلاس AB
۱۴۱	۱-۴-۷- اضافه کردن مقاومت در امیتر ترانزیستورهای کلاس AB
۱۴۲	۲-۴-۷- تقویت کننده پوش پول کلاس AB بدون ترانسفورماتور
۱۴۶	۳-۴-۷- تقویت کننده پوش پول کلاس AB با استفاده از ترانزیستورهای مکمل
۱۶۴	۵-۷- افزایش مقاومت ورودی تقویت کننده های پوش پول کلاس AB
۱۶۴	۱-۵-۷- استفاده از امیتر فالوئر به جای دیودهای بایاس
۱۶۵	۲-۵-۷- مدار پوش پول با استفاده از روش بوت استرپ
۱۶۶	۳-۵-۷- اتصال مقاومت بار به منبع تغذیه
۱۶۷	۶-۷- مدار محدود کننده جریان
۱۶۹	۷-۷- حفاظت حرارتی
۱۷۰	۸-۷- ترانزیستورهای پُر توان
۱۷۴	۹-۷- ناحیه‌ی عملکرد مطمئن BJT
۱۷۵	۱۰-۷- مقدار پارامترهای ترانزیستورهای پُر توان
۱۷۵	۱۱-۷- ماسفت‌های پُر توان
۱۷۷	۱۲-۷- مقایسه MOSFET با BJT
۱۷۷	۱۳-۷- اعوجاج در تقویت کننده‌های قدرت
۱۷۷	۱-۱۳-۷- اعوجاج در طبقه‌ی امیتر مشترک کلاس A
۱۸۲	۲-۱۳-۷- اعوجاج در طبقه‌ی کلکتور مشترک کلاس A
۱۸۶	تست‌های تقویت کننده‌های قدرت با پاسخ تشریحی
۲۰۴	پاسخ تشریحی تست‌های تقویت کننده‌های قدرت
۲۱۵	تست‌های تقویت کننده‌های قدرت با کلید
۲۳۰	کلید تست‌های تقویت کننده‌های قدرت
۲۳۱	<b>فصل هشتم : فیدبک</b>
۲۳۱	مقدمه
۲۳۲	۱-۸- ساختار اساسی فیدبک
۲۳۴	۲-۸- خواص فیدبک منفی
۲۳۴	۱-۲-۸- کاهش حساسیت بهره
۲۳۴	۲-۲-۸- کاهش اعوجاج غیرخطی
۲۳۵	۳-۲-۸- افزایش پهنای باند فرکانسی
۲۳۶	۴-۲-۸- کاهش نویز
۲۳۸	۵-۲-۸- افزایش یا کاهش مقاومت‌های ورودی و خروجی تقویت کننده با توجه به نوع استفاده از آن
۲۳۸	۳-۸- چهار آرایش اصلی فیدبک
۲۳۹	۱-۳-۸- تقویت کننده ولتاژ با فیدبک سری- موازی
۲۴۸	۲-۳-۸- تقویت کننده جریان با فیدبک موازی- سری
۲۵۸	۳-۳-۸- تقویت کننده هدایت انتقالی با فیدبک سری- سری
۲۶۸	۴-۳-۸- تقویت کننده مقاومت انتقالی با فیدبک موازی- موازی
۲۷۷	۴-۸- روش‌های تشخیص نوع فیدبک منفی
۲۸۰	۵-۸- فیدبک مثبت
۲۸۱	جدول (۱-۸) : نتایج خلاصه شده‌ی چهار نوع فیدبک منفی

۲۸۲.....	تست‌های فیدبک با پاسخ تشریحی.....
۳۰۲.....	پاسخ تشریحی تست‌های فیدبک.....
۳۲۵.....	تست‌های فیدبک با کلید.....
۳۴۲.....	کلید تست‌های فیدبک.....
۳۴۳.....	<b>فصل نهم: تقویت‌کننده عملیاتی.....</b>
۳۴۴.....	۱-۹-۱- طبقات مختلف یک OP-AMP.....
۳۴۴.....	۱-۱-۹-۱- طبقه ورودی.....
۳۴۵.....	۱-۹-۲- طبقه افزایش ضریب تقویت.....
۳۴۶.....	۱-۹-۳- تغییر سطح دهنده.....
۳۴۶.....	۱-۹-۴- طبقه خروجی.....
۳۴۷.....	۲-۹-۲- تحلیل تقویت‌کننده عملیاتی 741.....
۳۴۸.....	۱-۲-۹-۱- توصیف کیفی عملکرد مدار 741.....
۳۵۰.....	۲-۲-۹-۲- تحلیل DC تقویت‌کننده عملیاتی 741.....
۳۵۴.....	۲-۲-۹-۳- تحلیل سیگنال کوچک تقویت‌کننده عملیاتی 741.....
۳۶۱.....	۳-۹-۳- تقویت‌کننده عملیاتی ایده‌آل.....
۳۶۲.....	۴-۹-۴- کاربردهای خطی تقویت‌کننده عملیاتی.....
۳۶۲.....	۱-۴-۹-۱- تقویت‌کننده با بهره منفی.....
۳۶۳.....	۲-۴-۹-۲- تقویت‌کننده با بهره مثبت.....
۳۶۴.....	۳-۴-۹-۳- تقویت‌کننده تفاضلی.....
۳۶۷.....	۴-۴-۹-۴- مدار جمع‌کننده.....
۳۶۸.....	۴-۹-۵- مدار انتگرال‌گیر.....
۳۷۰.....	۴-۹-۶- مدار مشتق‌گیر.....
۳۷۰.....	۴-۹-۷- میدل امپدانس منفی.....
۳۷۲.....	۴-۹-۸- منبع جریان ایده‌آل.....
۳۷۳.....	۴-۹-۹- مدار انتگرال‌گیر مثبت.....
۳۷۴.....	۴-۹-۱۰- میدل جریان به ولتاژ.....
۳۷۴.....	۴-۹-۱۱- مدار میدل امپدانس (GIC).....
۳۷۶.....	۴-۹-۱۲- کامپیوتر آنالوگ.....
۳۷۹.....	۵-۹-۵- کاربردهای غیرخطی تقویت‌کننده‌های عملیاتی.....
۳۸۰.....	۱-۵-۹-۱- دیود ایده‌آل.....
۳۸۵.....	۲-۵-۹-۲- مدار برش‌دهنده (محدودکننده).....
۳۹۰.....	۳-۵-۹-۳- آشکارساز پیک فعال.....
۳۹۱.....	۴-۵-۹-۴- تقویت‌کننده لگاریتمی.....
۳۹۴.....	۵-۵-۹-۵- تقویت‌کننده آنتی لگاریتمی.....
۳۹۴.....	۶-۵-۹-۶- ضرب‌کننده آنالوگ.....
۳۹۶.....	۷-۵-۹-۷- مقایسه‌کننده.....
۳۹۸.....	۸-۵-۹-۸- آشکارساز عبور از صفر.....
۳۹۸.....	۹-۵-۹-۹- تریگر اشمیت.....
۴۰۰.....	۶-۹-۶- عملکرد تقویت‌کننده عملیاتی واقعی.....
۴۰۶.....	۱-۶-۹-۱- ولتاژ انحراف از میزان خروجی.....
۴۰۷.....	۲-۶-۹-۲- ولتاژ انحراف از میزان ورودی ( $V_{i_0}$ ).....



۴۰۹	.....	۳-۶-۹- جریان بایاس ورودی ( $I_B$ )
۴۰۹	.....	۴-۶-۹- جریان انحراف از میزان ورودی ( $I_{i0}$ )
۴۱۰	.....	۵-۶-۹- بهره ولتاژ حلقه باز ( $A_o$ )
۴۱۱	.....	۶-۶-۹- پهنای باند بهره واحد ( $f_T$ )
۴۱۳	.....	۷-۶-۹- سرعت تغییرات خروجی یا سرعت چرخش (SR)
۴۱۴	.....	۸-۶-۹- پهنای باند توان کامل ( $f_M$ )
۴۱۵	.....	۹-۶-۹- CMRR
۴۱۸	.....	۱۰-۶-۹- مقاومت‌های خروجی و ورودی
۴۲۲	.....	۱۱-۶-۹- رانش حرارتی ولتاژ انحراف از میزان $\left(\frac{\Delta V_{i0}}{\Delta T}\right)$
۴۲۲	.....	۱۲-۶-۹- رانش حرارتی جریان انحراف از میزان $\left(\frac{\Delta I_{i0}}{\Delta T}\right)$
۴۲۲	.....	۱۳-۶-۹- محدوده‌ی ولتاژ مشترک ورودی
۴۲۲	.....	۱۴-۶-۹- محدوده ولتاژ ورودی تفاضلی
۴۲۲	.....	۱۵-۶-۹- دامنه حداکثر تغییرات ولتاژ خروجی ( $V_{om}$ )
۴۲۲	.....	۱۶-۶-۹- میزان وابستگی به ولتاژ تغذیه (PSRR)
۴۲۳	.....	تست‌های تقویت‌کننده عملیاتی با پاسخ تشریحی
۴۴۵	.....	پاسخ تشریحی تست‌های تقویت‌کننده عملیاتی
۴۷۲	.....	تست‌های تقویت‌کننده عملیاتی با کلید
۴۹۵	.....	کلید تست‌های تقویت‌کننده عملیاتی
۴۹۷	.....	<b>فصل دهم: تثبیت‌کننده‌های ولتاژ</b>
۴۹۸	.....	۱-۱۰- تثبیت ولتاژ
۵۰۰	.....	۲-۱۰- تثبیت‌کننده‌های ولتاژ ساده
۵۰۳	.....	- محدودیت تثبیت‌کننده ساده
۵۰۵	.....	۳-۱۰- نمودار کلی و اجزاء یک تثبیت‌کننده ولتاژ پیشرفته
۵۰۶	.....	۱-۳-۱۰- مدار نمونه‌بردار
۵۰۶	.....	۲-۳-۱۰- مدار مقایسه‌کننده
۵۰۶	.....	۳-۳-۱۰- مدار کنترل
۵۰۷	.....	۴-۳-۱۰- مدار ولتاژ مرجع
۵۱۰	.....	۴-۱۰- تثبیت‌کننده‌های ولتاژ پیشرفته
۵۱۹	.....	- کاربردهای ویژه
۵۲۱	.....	۵-۱۰- مدار محدودکننده جریان
۵۲۶	.....	۶-۱۰- تثبیت‌کننده‌های ولتاژ مدار مجتمع
۵۲۶	.....	۱-۶-۱۰- تثبیت‌کننده‌های ولتاژ مدار مجتمع با خروجی ثابت
۵۲۸	.....	۲-۶-۱۰- تثبیت‌کننده‌های ولتاژ مدار مجتمع با ولتاژ خروجی قابل تنظیم
۵۳۰	.....	۷-۱۰- تثبیت‌کننده‌های ولتاژ کلیدی
۵۳۸	.....	تست‌های تثبیت‌کننده‌های ولتاژ با پاسخ تشریحی
۵۴۸	.....	پاسخ تشریحی تست‌های تثبیت‌کننده‌های ولتاژ
۵۵۹	.....	تست‌های تثبیت‌کننده‌های ولتاژ با کلید
۵۷۱	.....	کلید تست‌های تثبیت‌کننده‌های ولتاژ
۵۷۲	.....	مراجع



[www.ControlMakers.ir](http://www.ControlMakers.ir)

## فصل ششم

### ۶- تقویت کننده‌های تفاضلی<sup>۱</sup>

#### مقدمه

از مزایای عمده‌ی تقویت کننده‌های تفاضلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- تقویت کننده‌ای است که فرکانس‌های خیلی کم تا صفر (DC) را تقویت می‌کند. چون در آن از خازن بای‌پس<sup>۲</sup> استفاده نمی‌شود و طبقات مختلف این تقویت کننده بدون نیاز به خازن کوپلار قابل اتصال به یکدیگر هستند.
- ۲- در این تقویت کننده چون اختلاف دو سیگنالی که به ورودی‌های آن داده می‌شود تقویت و اشتراک آن‌ها تضعیف می‌گردد، بنابراین نویزی که همراه سیگنال به ورودی‌های تقویت کننده وارد می‌شود حالت اشتراک دارد و در نتیجه تضعیف می‌گردد.
- ۳- مقاومت ورودی نسبتاً بزرگی دارد.
- ۴- از پایداری بایاس مطلوبی برخوردار است.
- ۵- بهره ولتاژ قابل توجهی دارد.

با توجه به مزایای مذکور، تقویت کننده‌های تفاضلی در بسیاری از مدارهای الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند از جمله تقویت کننده‌های فرکانس پائین و فرکانس بالا، مدولاتورها حتی گیت‌های منطقی، در طبقه ورودی کلیه تقویت کننده‌های عملیاتی و مدارهای مجتمع.

در این فصل تقویت کننده‌های تفاضلی ساخته شده با BJT، JFET و MOSFET را بررسی خواهیم کرد.

#### ۶-۱- اصول کار زوج تفاضلی BJT

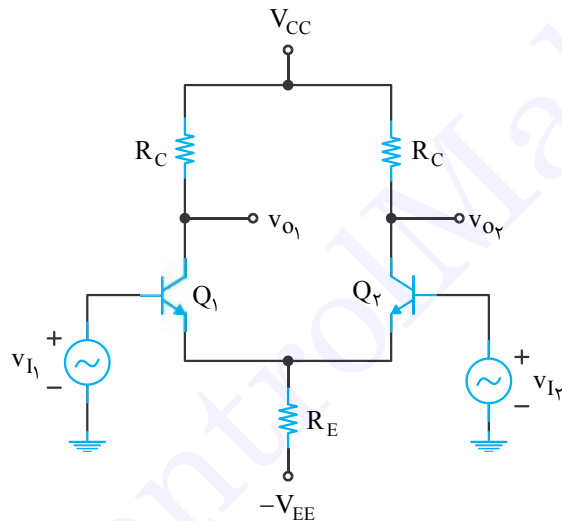
در تقویت کننده‌های تک ترانزیستوری برای مثال در آرایش امیتر-مشترک، برای دستیابی به پایداری جریان بایاس از مقاومتی در امیتر ترانزیستور استفاده می‌شود که باعث کاهش بهره‌ی ولتاژ مدار می‌گردد. با موازی کردن خازن بای‌پس با مقاومت  $R_E$  هم می‌توانیم پایداری نقطه‌ی کار را پابرجا نگه داریم و هم از کاهش بهره‌ی ولتاژ جلوگیری کنیم، اما خازن بای‌پس در فرکانس‌های خیلی کم انتظار ما را برآورده نمی‌کند و در ضمن در مدارهای مجتمع به دلیل سطح زیادی که بر روی تراشه اشغال می‌کند، مطلوب نیست. در یک تقویت کننده

1- Differential Amplifiers

2 - bypass

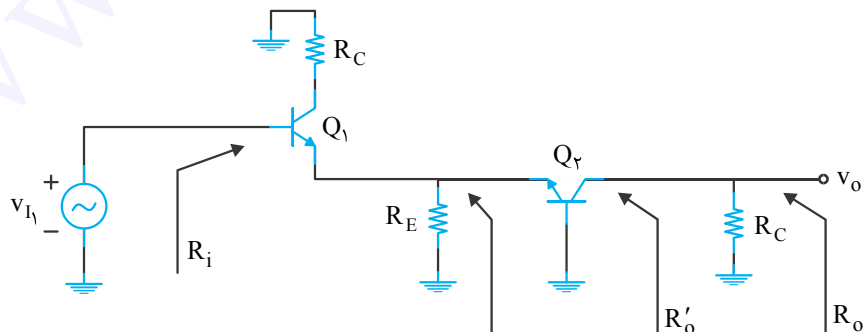
۲ ۱-۶- اصول کلی زوج تفاضلی با BJT

تفاضلی به جای خازن بای‌پس، مسیر سیگنال از طریق بیس-امیتر یک ترانزیستور دیگر به زمین بسته می‌شود. شکل (۱-۶) آرایش اصلی زوج تفاضلی BJT را نشان می‌دهد. این آرایش از دو ترانزیستور  $Q_1$  و  $Q_2$  با مشخصات یکسان تشکیل شده است که امیترهایشان به هم بسته شده و با یک مقاومت  $R_E$  به منبع تغذیه  $-V_{EE}$  متصل شده‌اند و جریان بایاس ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  را فراهم می‌کند. همچنین هر دو کلکتور از طریق مقاومت  $R_C$  به منبع تغذیه  $V_{CC}$  متصل شده‌اند؛ این نحوه‌ی اتصال برای زوج تفاضلی ضروری نیست، یعنی برای مثال ممکن است کلکتور  $Q_1$  مستقیماً به  $V_{CC}$  متصل شود و خروجی از کلکتور  $Q_2$  گرفته شده باشد یا در بعضی از کاربردها دو کلکتور به جای بارهای مقاومتی به ترانزیستورهای دیگری متصل باشند. البته مدارهای متصل به کلکتور  $Q_1$  و  $Q_2$  باید به شکلی قرار بگیرند که  $Q_1$  و  $Q_2$  هیچ‌گاه به ناحیه‌ی اشباع وارد نشوند.



شکل (۱-۶): آرایش تقویت‌کننده تفاضلی با ترانزیستور BJT

در مدار شکل (۱-۶) در صورتی که  $v_{I2} = 0$  باشد و خروجی مدار برای مثال  $v_{O2}$  در نظر گرفته شود. تحلیل سیگنال کوچک مدار و محاسبه مقاومت ورودی، مقاومت خروجی و بهره ولتاژ با روش سریع که در بخش تقویت‌کننده‌های زنجیره‌ای فصل ۳- جلد I بررسی شد براحتی قابل انجام است.



شکل (۲-۶): مدار معادل سیگنال کوچک

تقویت‌کننده‌های تفاضلی ۳

ابتدا مدار معادل سیگنال کوچک شکل (۱-۶) را رسم می‌کنیم. مدار شکل (۲-۶) به دست می‌آید که از دو طبقه کلکتور مشترک ( $Q_1$ ) و بیس مشترک ( $Q_2$ ) تشکیل شده است. سپس می‌توان به راحتی تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک را برای مدار انجام داد. برای محاسبه مقاومت ورودی ( $R_i$ ) داریم:

$$R_i = [r_{e_1} \parallel R_E + r_{e_2}] (1 + \beta_1) \quad (1-6)$$

و برای محاسبه مقاومت خروجی  $R'_o$  با استفاده از رابطه‌ی (۳-۵) جلد I می‌توان نوشت.

$$R'_o = \frac{1}{h_{oe_2}} \left[ 1 + \frac{\beta_2 r_{E_2}}{r_{E_2} + h_{ie_2} + r_{B_2}} \right] \quad (2-6)$$

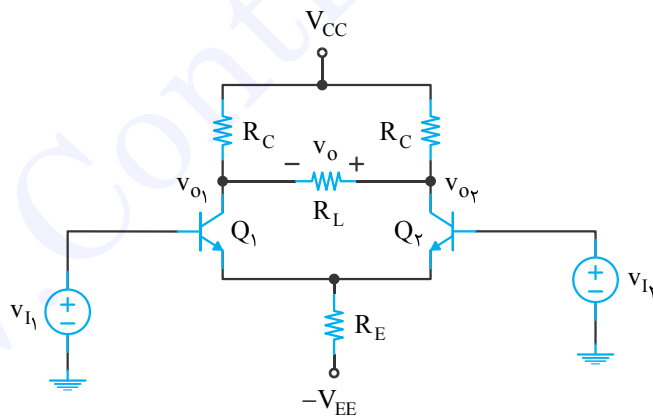
که در رابطه (۲-۶)  $r_{B_2} = 0$  و  $r_{E_2} = r_{e_1} \parallel R_E$  می‌باشد.

و برای محاسبه بهره ولتاژ داریم:

$$G_{v_i} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{c_2}} \cdot \frac{v_{c_2}}{v_{e_2}} \cdot \frac{v_{e_2}}{v_{e_1}} \cdot \frac{v_{e_1}}{v_i}$$

$$G_{v_i} = \frac{\alpha_2 R_C}{r_{e_2}} \cdot \frac{r_{e_1} \parallel R_E}{r_{e_2} \parallel R_E + r_{e_1}} \quad (3-6)$$

اگر تقویت‌کننده تفاضلی شامل هر دو ورودی  $v_{I_1}$  و  $v_{I_2}$  باشد و خروجی از دو سر مقاومت  $R_L$  مطابق شکل (۳-۶) گرفته شود، تجزیه تحلیل سیگنال کوچک مدار به روش قبل ساده نیست و به روش زیر انجام می‌شود.



شکل (۳-۶): مدار تقویت‌کننده تفاضلی متقارن با دو منبع ورودی فعال

از تقویت‌کننده‌ی تفاضلی انتظار می‌رود که فقط تفاضل دو سیگنال ورودی را تقویت و مقدار متوسط دو سیگنال ورودی را تضعیف کرده و به خروجی منتقل کند؛ لذا ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  استفاده شده در آن باید از مشخصات یکسانی برخوردار باشند.

در مدار تقویت‌کننده تفاضلی متقارن شکل (۳-۶) که ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  و مقاومت‌های کلکتور آنها مشابه

۴ ————— ۶-۱-۱- تقویت‌کننده تفاضلی در حالت مشترک

هم هستند، تفاضل دو سیگنال ورودی  $v_{I_1}$  و  $v_{I_2}$  را سیگنال حالت تفاضلی<sup>۱</sup> نامیده و با  $v_{Id}$  نمایش می‌دهند.

$$v_{Id} = v_{I_1} - v_{I_2} \quad (۴-۶)$$

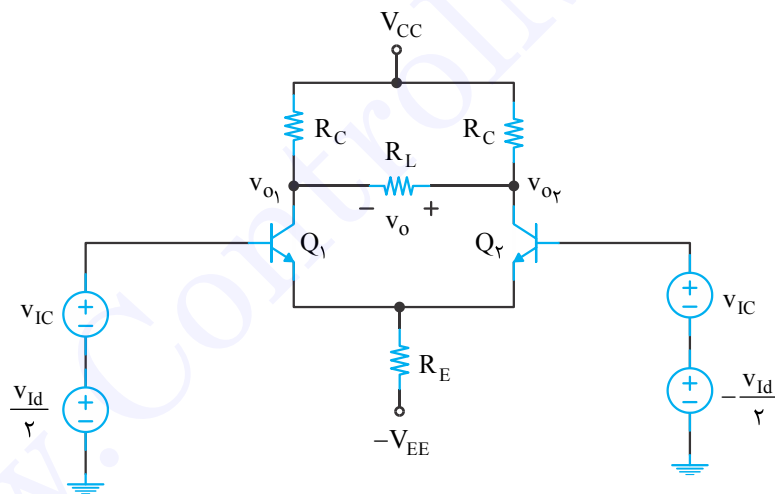
و مقدار متوسط دو سیگنال ورودی را سیگنال حالت مشترک<sup>۲</sup> ورودی‌ها می‌نامند و با  $v_{Ic}$  نمایش می‌دهند.

$$v_{Ic} = \frac{v_{I_1} + v_{I_2}}{2} \quad (۵-۶)$$

با استفاده از روابط (۴-۶) و (۵-۶) می‌توان ورودی‌های  $v_{I_1}$  و  $v_{I_2}$  تقویت‌کننده تفاضلی را برحسب سیگنال‌های حالت تفاضل و حالت مشترک بیان نمود.

$$\left. \begin{aligned} v_{I_1} - v_{I_2} &= v_{Id} \\ v_{I_1} + v_{I_2} &= 2v_{Ic} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} v_{I_1} = v_{Ic} + \frac{v_{Id}}{2} & (۶-۶) \\ v_{I_2} = v_{Ic} - \frac{v_{Id}}{2} & (۷-۶) \end{cases}$$

با قرار دادن به جای منبع  $v_{I_1}$  و  $v_{I_2}$  برحسب سیگنال‌های حالت تفاضلی و حالت مشترک، مدار شکل (۴-۶) به دست می‌آید.

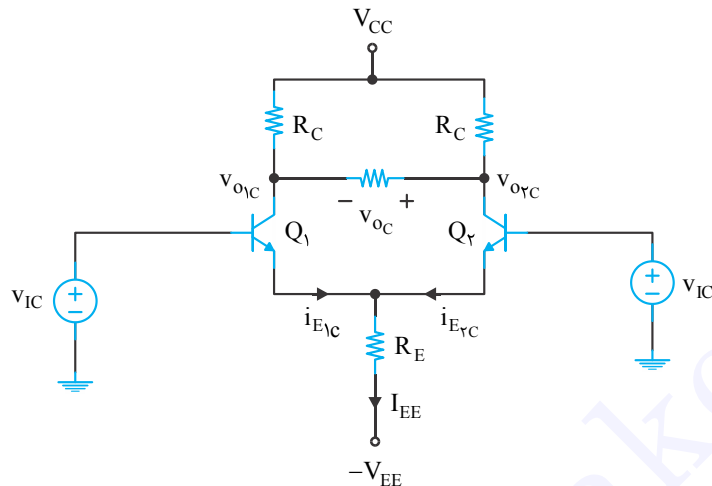


شکل (۴-۶): نمایش مدار تقویت‌کننده تفاضلی برحسب سیگنال‌های حالت تفاضلی و حالت مشترک

### ۶-۱-۱- تقویت‌کننده تفاضلی در حالت مشترک

با استفاده از روش جمع آثار ابتدا سیگنال‌های حالت مشترک را مطابق شکل (۵-۶) فعال و سیگنال‌های حالت تفاضلی را بی‌اثر در نظر می‌گیریم و مدار را در حالت مشترک بررسی می‌کنیم.

- 
- 1 - difference- Mode signal
  - 2 - common-Mode signal



شکل (۵-۶): مدار تقویت‌کننده‌ی تفاضلی با فعال در نظر گرفتن سیگنال‌های حالت مشترک

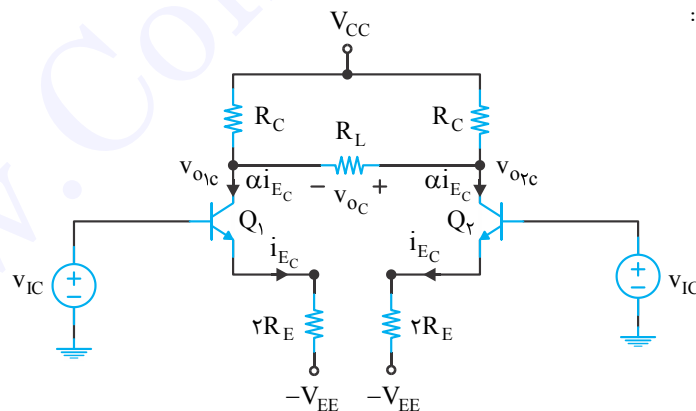
با توجه به شکل (۵-۶) چون  $Q_1$  و  $Q_2$  مشابه‌اند و مدار در امیتر ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  کاملاً یکسان و متقارن است، بنابراین جریان امیتر  $Q_1$  و  $Q_2$  در حالت مشترک با هم برابر است و مجموع آن‌ها وارد مقاومت  $R_E$  می‌شود.

$$i_{E_{1C}} = i_{E_{2C}} = i_{E_C} \quad (۸-۶)$$

$$i_{EE} = i_{E_{1C}} + i_{E_{2C}} = 2i_{E_C} \quad (۹-۶)$$

لازم به ذکر است که مساوی بودن  $i_{E_{1C}} = i_{E_{2C}}$  و در نتیجه مساوی بودن جریان کلکتور  $Q_1$  و  $Q_2$  در حالت مشترک  $(i_{C_{1C}} = i_{C_{2C}})$  به یکسان و متقارن بودن مدار در امیتر ترانزیستورها وابسته است.

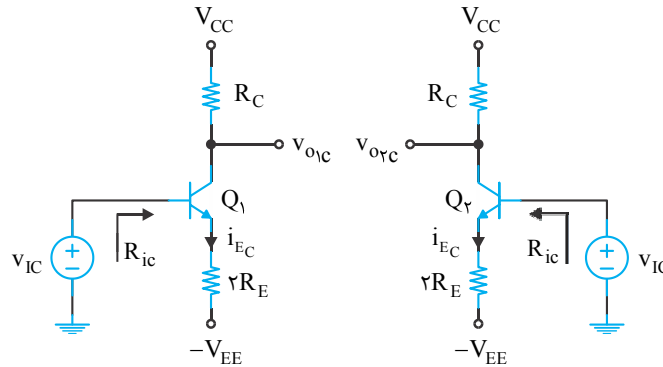
با توجه به روابط (۸-۶) و (۹-۶) می‌توان مدار شکل (۵-۶) را با مدار معادل آن در امیتر به صورت مدار شکل (۶-۶) نمایش داد:



شکل (۶-۶): نمایش تقویت‌کننده‌ی تفاضلی در حالت مشترک با مدار معادل آن در امیتر

چون  $i_{C_{1C}} = i_{C_{2C}}$  است اگر مدار مطابق شکل (۶-۶) در کلکتور نیز یکسان و متقارن باشد، داریم:  $v_{O_{1C}} = v_{O_{2C}}$ . در نتیجه جریانی عبوری از مقاومت  $R_L$  در حالت مشترک صفر است و می‌توان مقاومت  $R_L$  را مدار باز در نظر گرفت و مدار را به صورت شکل (۷-۶) به دو نیم‌مدار کاملاً یکسان در آرایش امیتر مشترک ساده کرد.

۶ ۱-۱-۶ تقویت‌کننده تفاضلی در حالت مشترک



شکل (۶-۷): نیم‌مدار تقویت‌کننده تفاضلی در حالت مشترک

#### - بهره ولتاژ حالت مشترک

با توجه به مدار ساده شده‌ی شکل (۶-۷) و تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک مدار، بهره ولتاژ حالت مشترک با

فرض  $h_{oe} = 0$   $\left( \frac{1}{h_{oe}} \approx r_o = \infty \right)$  برابر است با:

$$A_{v_{ic}} = \frac{v_{o_{1c}}}{v_{i_c}} = \frac{v_{o_{2c}}}{v_{i_c}} = \frac{-\alpha R_C}{r_e + 2R_E} \quad (۱۰-۶)$$

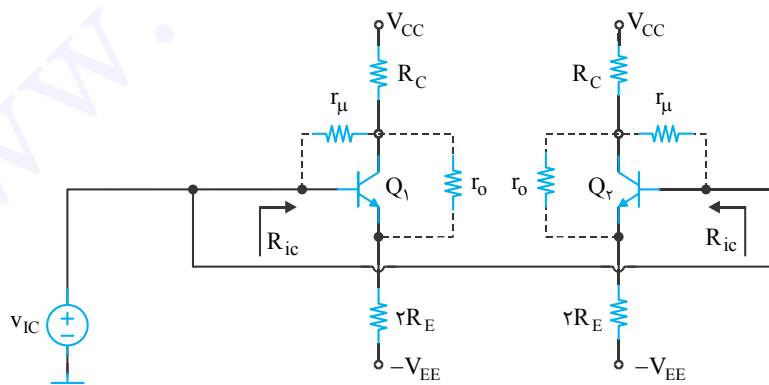
$$v_{o_{1c}} = v_{o_{2c}} = -\frac{\alpha R_C}{r_e + 2R_E} v_{i_c} \quad (۱۱-۶)$$

و ولتاژ دو سر مقاومت  $R_L$  در حالت مشترک صفر می‌باشد.

$$v_{o_c} = v_{o_{1c}} - v_{o_{2c}} = 0 \quad (۱۲-۶)$$

#### - مقاومت ورودی حالت مشترک

با توجه به مدار شکل (۶-۷) مقاومت ورودی در حالت مشترک ( $R_{ic}$ ) از دید ac به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل (۶-۸): نیم‌مدار تقویت‌کننده تفاضلی برای محاسبه مقاومت ورودی در حالت مشترک



تقویت کننده‌های تفاضلی \_\_\_\_\_ ۶-۱-۲- تقویت کننده در حالت تفاضلی \_\_\_\_\_ ۷

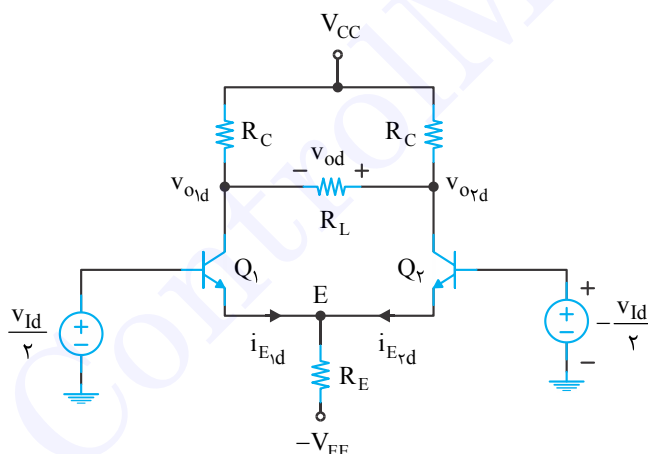
$$R_{ic} = (\beta R_E + r_e)(1 + \beta) \quad (۱۳-۶)$$

دو نیم مدار ساده شده‌ی حالت مشترک شکل (۷-۶) را می‌توان مانند شکل (۸-۶) نیز نمایش داد. چون مقاومت ورودی حالت مشترک معمولاً خیلی بزرگ است، مقاومت‌های  $r_o$  و  $r_{\mu}$  ترانزیستور بر مقدار آن تأثیر می‌گذارند و نمی‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد. بنابراین، این مقاومت‌ها در نیم‌مدار معادل حالت مشترک شکل (۸-۶) به صورت نقطه‌چین مشخص شده است. با توجه به اینکه بهره‌ی ولتاژ حالت مشترک معمولاً خیلی کوچک است پس سیگنال ولتاژ کلکتور هم بسیار کوچک خواهد بود و می‌توان با فرض صفر بودن سیگنال ولتاژ کلکتور، یعنی متصل کردن آن به زمین، نیم‌مدار را بسیار ساده‌تر نمود. در این شرایط با در نظر گرفتن مقاومت‌های  $r_o$  و  $r_{\mu}$  برای مقاومت ورودی در حالت مشترک می‌توان نوشت:

$$R_{ic} = [(\beta R_E \parallel r_o + r_e)(1 + \beta) \parallel r_{\mu}] \quad (۱۴-۶)$$

### ۶-۱-۲- تقویت کننده در حالت تفاضلی

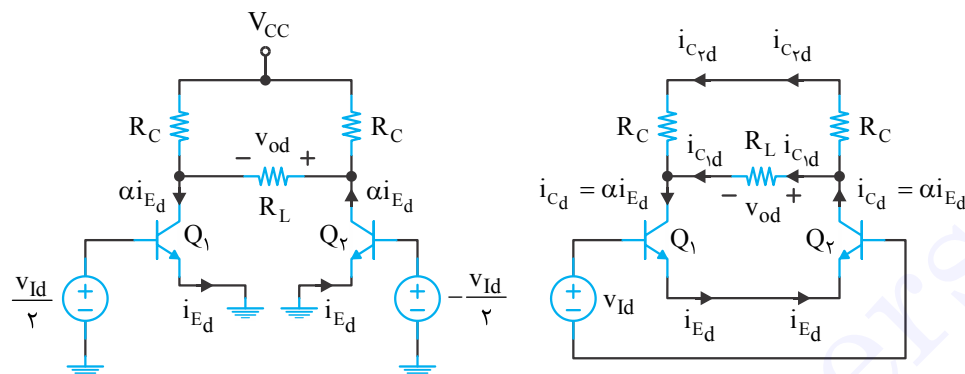
برای تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک مدار در حالت تفاضلی، سیگنال‌های حالت مشترک شکل (۴-۶) را بی‌اثر و سیگنال‌های حالت تفاضلی را مطابق شکل (۸-۶) فعال در نظر می‌گیریم.



شکل (۸-۶): مدار تقویت کننده‌ی تفاضلی جهت تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک در حالت تفاضلی

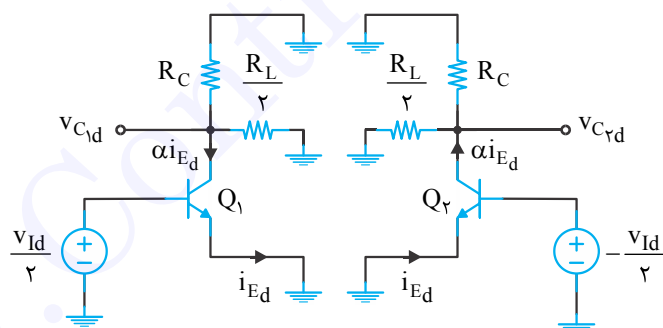
با توجه به شکل (۸-۶) چون  $Q_1$  و  $Q_2$  مشابه‌اند، مدار در امیتر ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  کاملاً یکسان و متقارن است و سیگنال‌های ورودی در حالت تفاضلی قرینه می‌باشند. بنابراین جریان امیتر  $Q_1$  و  $Q_2$  مساوی و قرینه هم هستند  $(i_{E1d} = -i_{E2d} = i_{Ed})$  به طوری که جریانی وارد مقاومت  $R_E$  نمی‌شود. به عبارت دیگر ولتاژ امیتر ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  در حالت تفاضلی صفر است. پس برای محاسبه جریان امیتر  $Q_1$  و  $Q_2$  در حالت تفاضلی می‌توان به دو طریق عمل کرد.

- ۱- چون جریانی وارد مقاومت امیتر ( $R_E$ ) نمی‌شود آن را مطابق شکل (۹-۶-الف) مدار باز در نظر می‌گیریم.
- ۲- چون ولتاژ امیتر ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  در حالت تفاضلی صفر است می‌توان امیتر  $Q_1$  و  $Q_2$  را مطابق شکل (۹-۶-ب) زمین فرض کرد.



شکل (۹-۶) الف. مدار معادل از دید جریانی در حالت تفاضلی ب. از دید ولتاژی در حالت تفاضلی

جریان کلکتور  $Q_1$  و  $Q_2$  در صورت یکسان بودن مشخصات ترانزیستورها، مساوی و قرینه هستند. در نتیجه هر جریانی وارد مقاومت  $R_C$  در کلکتور  $Q_2$  شود همان مقدار جریان از  $R_C$  واقع در کلکتور  $Q_1$  خارج می‌گردد به طوری که می‌توان منبع تغذیه  $V_{CC}$  را مطابق شکل (۹-۶-الف) مدار باز در نظر گرفت. اگر مدار در کلکتور ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  متقارن باشد چون ولتاژ کلکتور  $Q_1$  و  $Q_2$  در حالت تفاضلی قرینه هستند هر نقطه از مدار که خط تقارن را قطع کند دارای ولتاژ صفر است و می‌توان مطابق شکل (۱۰-۶) زمین فرض کرد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید مدار در حالت تفاضلی به دو نیم‌مدار ساده می‌شود.



شکل (۱۰-۶): نیم‌مدار تقویت‌کننده تفاضلی در حالت تفاضلی در صورتی که مدار در امیتر و کلکتور ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  متقارن باشد.

### - بهره ولتاژ حالت تفاضلی

بهره‌ی ولتاژ حالت تفاضلی را می‌توان به دو طریق محاسبه کرد:

۱- از دید جریانی و با استفاده از مدار معادل شکل (۹-۶-الف) که در این حالت برای  $v_{Od}$  داریم:

$$v_{Od} = \alpha i_{Ed} (\gamma R_C \parallel R_L) \quad (۱۵-۶)$$

و با استفاده از KVL در ورودی می‌توان نوشت:

تقویت‌کننده‌های تفاضلی \_\_\_\_\_ ۹

$$V_{Id} = 2r_e i_{Ed} \quad (16-6)$$

از تقسیم دو رابطه‌ی (۱۴-۶) و (۱۵-۶) بهره ولتاژ در حالت تفاضلی برابر است با:

$$A_d = \frac{v_{od}}{V_{Id}} = \frac{\alpha(2R_C \parallel R_L)}{2r_e} \quad (17-6)$$

با توجه به رابطه‌ی (۱۷-۶) برای محاسبه بهره ولتاژ حالت تفاضلی کافی است مقاومت معادل ac بین کلکتورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  را به مقاومت معادل ac در امیترهای  $Q_1$  و  $Q_2$  تقسیم کرد. البته لازم به توضیح است که بهره‌ی ولتاژ حالت تفاضلی را تا زمانی می‌توان از رابطه‌ی (۱۷-۶) به دست آورد که خروجی از بین کلکتورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  گرفته شده باشد.

۲- از دید ولتاژی و با استفاده از مدار معادل شکل (۱۰-۶) که در این حالت ولتاژ کلکتور  $Q_1$  و  $Q_2$  در حالت تفاضلی به ترتیب برابر است با:

$$v_{c_{rd}} = \alpha i_{Ed} \left( R_C \parallel \frac{R_L}{2} \right) \quad (18-6)$$

$$v_{c_{rd}} = -\alpha i_{Ed} \left( R_C \parallel \frac{R_L}{2} \right) \quad (19-6)$$

و برای ولتاژ خروجی در حالت تفاضلی داریم:

$$v_{od} = v_{c_{rd}} - v_{c_{rd}} = 2\alpha i_{Ed} \left( R_C \parallel \frac{R_L}{2} \right) \quad (20-6)$$

با استفاده از KVL در ورودی  $Q_1$  می‌توان نوشت:

$$\frac{V_{Id}}{2} = r_e i_{Ed} \Rightarrow V_{Id} = 2r_e i_{Ed} \quad (21-6)$$

از تقسیم دو رابطه‌ی (۲۰-۶) و (۲۱-۶) بهره ولتاژ در حالت تفاضلی به دست می‌آید:

$$A_d = \frac{v_{od}}{V_{Id}} = \frac{\alpha \left( R_C \parallel \frac{R_L}{2} \right)}{r_e} \quad (22-6)$$

به راحتی می‌توان نشان داد که دو رابطه‌ی (۱۷-۶) و (۲۲-۶) با هم مساوی هستند. و اگر خروجی از کلکتور  $Q_2$  گرفته شده باشد با استفاده از نیم‌مدار در حالت تفاضلی شکل (۱۰-۶) بهره ولتاژ برابر است با:

$$\frac{v_{c_{rd}}}{-\frac{V_{Id}}{2}} = \frac{-\alpha \left( R_C \parallel \frac{R_L}{2} \right)}{r_e} \Rightarrow A_{rd} = \frac{v_{c_{rd}}}{V_{Id}} = \frac{\alpha \left( R_C \parallel \frac{R_L}{2} \right)}{2r_e} \quad (23-6)$$

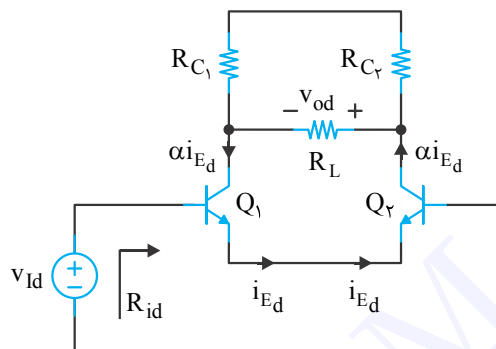
و همچنین اگر خروجی از کلکتور  $Q_1$  گرفته شود. برای بهره ولتاژ آن در حالت تفاضلی داریم:

$$A_{rd} = \frac{v_{c_{rd}}}{V_{Id}} = \frac{-\alpha \left( R_C \parallel \frac{R_L}{2} \right)}{2r_e} \quad (24-6)$$

۱۰ ————— ۶-۱-۲- تقویت کننده در حالت تفاضلی

و اگر مدار در کلکتور ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  متقارن نباشد، یعنی  $R_{C_1} \neq R_{C_2}$  و خروجی از بین دو کلکتور  $Q_1$  و  $Q_2$  گرفته شده باشد با استفاده از مدار معادلی که در شکل (۶-۱۱) از دید جریان رسم شده است می توان بهره و ولتاژ حالت تفاضلی را به دست آورد که برابر است با:

$$A_d = \frac{\alpha [R_L \parallel (R_{C_1} + R_{C_2})]}{2r_e} \quad (۶-۲۵)$$



شکل (۶-۱۱): مدار معادل تقویت کننده از دید جریانی در حالت تفاضلی وقتی مقاومت های در کلکتور  $Q_1$  و  $Q_2$  مساوی نیستند.

و اگر خروجی از کلکتور  $Q_1$  یا  $Q_2$  گرفته شده باشد با استفاده از دو نیم مدار رسم شده در شکل (۶-۱۲) بهره و ولتاژ حالت تفاضلی با روش سریع براحتی محاسبه می شود. برای مثال اگر خروجی از کلکتور  $Q_2$  گرفته شده باشد بهره و ولتاژ برابر است با:

$$\frac{v_{c_{2d}}}{-\frac{v_{Id}}{2}} = \frac{-\alpha [R_{L_2} \parallel R_{C_2}]}{r_e} \Rightarrow A_{vd} = \frac{v_{c_{2d}}}{v_{Id}} = \frac{\alpha (R_{L_2} \parallel R_{C_2})}{2r_e} \quad (۶-۲۶)$$

که مقاومت  $R_{L_2}$  در رابطه ی (۶-۲۶) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R_{L_1} + R_{L_2} = R_L \quad (۶-۲۷)$$

$$v_{od} \left( \frac{R_{L_2}}{R_{L_1} + R_{L_2}} \right) = v_{od} \frac{R_{C_2}}{R_{C_1} + R_{C_2}} \quad (۶-۲۸)$$

با قرار دادن رابطه ی (۶-۲۷) در رابطه ی (۶-۲۸) برای  $R_{L_1}$  و  $R_{L_2}$  به دست می آید:

$$R_{L_2} = \left( \frac{R_{C_2}}{R_{C_1} + R_{C_2}} \right) R_L \quad (۶-۲۹)$$

$$R_{L_1} = \left( \frac{R_{C_1}}{R_{C_1} + R_{C_2}} \right) R_L \quad (۶-۳۰)$$