

تحلیل و طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ

(ویراست دوم)

جلد اول

(ترانزیستورهای Bipolar)

www.ketab.ir

مهرداد شریف بختیار

نیاز دانش

سرشناسه	: شریف بختیار، مهرداد، ۱۳۳۲.
عنوان و نام پدیدآور	: تحلیل و طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ/مهرداد شریف بختیار.
وضعیت ویراست	: ویراست ۲.
مشخصات نشر	: تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	: ج: مصور، جدول، نمودار
شابک	: دوره: ۱-23-7724-600-978؛ ج: ۱: 9-59-8906-600-978
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا.
مندرجات	: ج: ۱. ترانزیستورهای Bipolar.
موضوع	: مدارهای مجتمع خطی -- طراحی به کمک کامپیوتر
	Linear integrated circuits -- Computer - aided design
موضوع	: نیمه هادی‌های اکسید فلزی -- طراحی به کمک کامپیوتر
	Metal oxide semiconductors -- Computer - aided design
موضوع	: ترانزیستورهای دوقطبی -- طراحی به کمک کامپیوتر
	Bipolar transistors -- Computer-aided design
رده‌بندی کنگره	: TKY۸۷۴
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۸۱۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۵۸۷۷۹۸۲



نام کتاب	: تحلیل و طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ/ترانزیستورهای Bipolar/جلد اول
ویراست	: ویراست دوم
مؤلف	: مهرداد شریف بختیار
مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ	: حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس
ناشر	: نیاز دانش
صفحه‌آرا	: واحد تولید انتشارات نیاز دانش
نوبت چاپ	: دوم (ویراست دوم) - ۱۴۰۲
شمارگان	: ۱۰۰ نسخه
قیمت	: ۴۲۰۰۰۰۰ ریال

ISBN:978-600-8906-59-9

شابک (جلد ۱): ۹-۵۹-۸۹۰۶-۶۰۰-۹۷۸

ISBN:978-600-7724-23-1

شابک (دوره): ۱-۲۳-۷۷۲۴-۶۰۰-۹۷۸

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه‌ی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۲۱

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲-۲۱۰۶۷۰۹

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 ملزوم 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 معنی‌دار 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 مهندسين امروزی با آن سر و کار دارند توانایی استفاده از تکنیک‌های مداری و قابلیت نوشتن معادلات مدار و حل آنها الزامی می‌باشد. در حقیقت هیچ یک از دو روش به تنهایی برای بررسی موفق مدارهای الکترونیک امروزی کافی نمی‌باشند.

در نوشتن کتاب حاضر نیز سعی شده که هر دوی 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 تألیف شده است که خواننده با مقدمات الکترونیک و مفاهیمی نظیر 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. بعنوان 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 متدماً 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 نظیر 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

مرداد ماه ۱۳۹۴

فهرست مطالب

۱۳	فصل ۱ فیزیک ترانزیستور دو قطبی و مدل آن
۱۳	۱-۱ هادی-عایق-نیمه هادی
۱۴	۱-۱-۱ نیمه هادی نوع (N) و نیمه هادی نوع (P)
۱۷	۲-۱ اتصال (P-N)
۲۰	۱-۲-۱ یک سو سازی جریان الکتریکی توسط اتصال P-N 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 تقویت کننده 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

۴۲۳	۱-۷-۸	حفاظت طبقه خروجی پوش-پول کالکتور مشترک
۴۲۴	۲-۷-۸	حفاظت طبقه خروجی پوش-پول امیتر مشترک
۴۲۵	۸-۸	ولتاژ آفست (offset)
۴۲۵	۱-۸-۸	ولتاژ آفست ساختاری
۴۳۰	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 تقویت‌کننده
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 تقویت‌کننده عملیاتی 741
۴۴۶		محاسبه ضریب تقویت ولتاژ
۴۴۹		مدارهای حفاظت
۴۵۱		مسائل فصل ۸

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

۴۷۵	رفتار فرکانسی	۱۰ فصل
۴۷۶	۱-۱۰ بررسی رفتار فرکانسی تقویت کننده امپتر مشترک	
۴۷۶	۱-۱-۱۰ بررسی کیفی رفتار مدار	
۴۸۱	۲-۱-۱۰ محاسبه ضریب تقویت ولتاژ مدار امپتر مشترک بر حسب فرکانس	
۴۸۹	۳-۱-۱۰ مدار امپتر مشترک و قضیه میلر	
۴۹۶	۴-۱-۱۰ امپدانس ورودی و خروجی مدار امپتر مشترک	
۴۹۸	۲-۱۰ بررسی رفتار فرکانسی مدار کالکتور مشترک	
۴۹۸	۱-۲-۱۰ ضریب تقویت ولتاژ در مدار کالکتور مشترک	
۵۰۵	۲-۲-۱۰ امپدانس ورودی مدار کالکتور مشترک	
۵۰۶	۳-۲-۱۰ امپدانس خروجی مدار کالکتور مشترک	
۵۰۹	۳-۱۰ بررسی رفتار فرکانسی طبقه بیس مشترک	
۵۱۲	۴-۱۰ بررسی رفتار فرکانسی طبقه کسکود	
۵۱۴	۵-۱۰ بررسی رفتار فرکانسی طبقه کالکتور مشترک-بیس مشترک	
۵۱۵	۱-۵-۱۰ بررسی کیفی رفتار طبقه کالکتور مشترک-بیس مشترک	
۵۱۷	۲-۵-۱۰ تحلیل دقیق رفتار مدار	
۵۱۹	۶-۱۰ بررسی رفتار فرکانسی طبقه دیفرانسیلی	
۵۱۹	۱-۶-۱۰ طبقه دیفرانسیلی با بار مقاومتی و ورودی های دیفرانسیلی	
۵۲۱	۲-۶-۱۰ ضریب تقویت طبقه دیفرانسیلی با بار مقاومتی و ورودی مشترک	
۵۲۲	۳-۶-۱۰ طبقه دیفرانسیلی کسکود با بار اکتیو	
۵۲۹	۷-۱۰ رفتار فرکانسی مدارهای چند طبقه	
۵۳۳	۸-۱۰ روش ثابت زمانی	
۵۴۲	مسائل فصل ۱۰	

۵۴۹	پایداری و پایداری سازی	۱۱ فصل
۵۴۹	۱-۱۱ پایداری و ناپایداری در حلقه فیدبک	
۵۴۹	۱-۱-۱۱ تقویت کننده تک قطبی در حلقه فیدبک	
۵۵۱	۲-۱-۱۱ تقویت کننده با دو قطب در حلقه فیدبک	
۵۵۲	۳-۱-۱۱ تقویت کننده با سه قطب یا بیشتر در حلقه فیدبک	

۵۵۴	۲-۱۱ بررسی 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
۵۹۳	پایدارسازی توسط ایجاد صفر در حلقه فیدبک
۵۹۶	مسائل فصل ۱۱

فصل ۱۲ نویز ۶۰۱

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

۶۳۳ نمایه