مبانی طراحی مدارهای الکترونیکی

الکترونیک ۳

دکتر محمدحسن نشاطی

دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

نیاز دانش

پیشگفتار مؤلف

عناصر نیمه‌هادی اساس طراحی و ساخت مدارهای مجتمع و فناوری مدرن الکترونیک هستند. مطالعه، شناخت مشخصات و هم‌چنین کاربرد این عناصر خصوصاً ترانزیستورها بخش مهمی از برنامه درسی دانشجویان دوره کارشناسی مهندسی برق است که عمدتاً در درس‌های الکترونیک ۱ و ۲ بحث و بررسی می‌شوند. هم‌چنین رفتار عناصر فعال در فرکانس‌های بالا و بررسی پاسخ فرکانس تقویت‌کننده‌ها از مباحث مهم در طراحی و ساخت این مدارها است. هم‌چنین روش‌های بایاس در مدارهای مجتمع و ساختمان داخلی تقویت‌کننده‌ها از سایر مباحث مهم در طرح تقویت‌کننده‌ها در مدارهای مجتمع است. کمبود مرجع جامع در مورد خصوصیات و مشخصات ترانزیستورها در فرکانس‌های بالا و بررسی پاسخ فرکانس تقویت‌کننده‌ها، نویسنده را بر آن داشت که مطالب مورد نیاز در درس الکترونیک ۳ دوره کارشناسی مهندسی الکترونیک و مخابرات را با بهره‌گیری از جدیدترین روش‌ها و مراجع علمی و با تکیه‌بر تجربیات تدریس خود، عرضه نماید.

این کتاب بر اساس سرفصل‌های تنظیم یافته در شورای عالی برنامه‌ریزی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری برای تدریس در یک نیمسال تحصیلی و در دو بخش مجزا تدوین یافته است. در بخش اول محاسبات فرکانس بالای تقویت‌کننده‌ها و با اهداف زیر تنظیم شده است.

- ارائه مدل‌ها و مدارهای معادل مختلف انواع ترانزیستور در فرکانس‌های بالا
- معرفی روش‌های بررسی پاسخ فرکانس و طراحی تقویت‌کننده‌ها
- ارائه اصول تقویت‌کننده‌های فیدبک و طراحی تقویت‌کننده‌های فیدبک پهن‌باند
- بررسی ایجاد نوسان و معرفی نوسان‌سازهای سینوسی

بخش دوم کتاب با هدف آشنایی با اصول طراحی مدارهای مجتمع و تقویت‌کننده‌های عملیاتی، شامل مباحث زیر است.

- روش‌های بایاس مدارهای مجتمع

- تقویت‌کننده با بار فعال
- ساختمان داخلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی

هر فصل از کتاب حاوی مسائل حل شده زیادی است که به جهت آشنایی خوانندگان با مفاهیم ارائه شده متن، در نظر گرفته شده است. هم‌چنین بخشی از مسائل مهم که در آزمون‌های کارشناسی ارشد سال‌های اخیر مطرح شده به‌صورت موضوعی نیز در انتهای هر فصل حل شده تا دانشجویان با نکات خاص و روش حل این آزمون‌ها آشنایی پیدا نمایند. حل کلیه مسائل کتاب نیز همراه با پیوست‌های لازم در لوح فشرده به‌همراه کتاب تهیه و عرضه شده است. امید است این اثر ناچیز مورد رضای حق‌تعالی و مورد استفاده دانشجویان و دانش‌پژوهان قرار گیرد. از مسئولین انتشارات نیاز دانش آقایان شمس و شیرازی که مقدمات چاپ کتاب را فراهم نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌کنم. از سرکار خانم رفیعی به جهت صفحه‌آرایی این اثر سپاسگزاری می‌کنم.

در فصل اول مدارهای معادل عناصر فرکانس بالا ارائه می‌شود. برای عناصر دوقطبی مدار معادل هایبرید pi که اولین بار توسط گیاکلتو (Giacolletto) ارائه شده، معرفی می‌شود. این مدار بر اساس واقعیت‌های فیزیکی که در داخل ترانزیستور اتفاق می‌افتد، استوار است. هم‌چنین رابطه عناصر مدار معادل با پارامترهای مدار هایبرید h استخراج شده و خازن‌های مدار هایبرید pi به‌دقت بررسی می‌شوند. علاوه‌بر آن مدار معادل ترانزیستورهای اثر میدان و انواع مختلف آن مطرح و مقایسه می‌شوند. مدار معادل عناصر فعال که در نرم‌افزار Spice استفاده می‌شود مطرح و روش استخراج مدار معادل با استفاده از کتاب‌های اطلاعاتی نیز ارائه خواهد شد.

فصل دوم کتاب در مورد پاسخ فرکانس پایین تقویت‌کننده‌ها و تعیین فرکانس قطع پایین یک مدار است. مهم‌تر از آن طراحی خازن‌های تزویج و کنارگذر در این فصل به‌تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در مورد مدارهای ساده شامل یک خازن تعیین تابع انتقال و محاسبه دقیق فرکانس قطع پایین مطرح خواهد شد. در مدارهای پیچیده‌تر شامل دو و یا تعدادی بیشتر خازن، تعیین تابع انتقال و محاسبه فرکانس قطع با دشواری‌هایی همراه است. در این موارد و خصوصاً در طرح خازن‌های مدار، ساده‌تر است که از روش ثابت زمانی اتصال کوتاه استفاده شود. این روش معرفی و مثال‌های متعددی جهت محاسبات خازن‌ها ارائه می‌شود.

در فصل سوم پاسخ فرکانس تقویت‌کننده‌های چند طبقه مطرح می‌شود. در این مدارها با توجه به افزایش تعداد خازن‌ها، محاسبات تابع انتقال به‌روش معمول کار ساده‌ای نیست. حتی چنانچه تابع انتقال به‌دست آید، حل معادله مشخصه و تعیین قطب‌ها و صفرهای کار ساده‌ای نیست. بررسی پاسخ فرکانس این تقویت‌کننده‌ها و محاسبه فرکانس قطع بالا مبتنی بر محاسبات ثابت زمانی اتصال باز است. این روش برای تعدادی از تقویت‌کننده‌های چندطبقه بررسی و نشان داده می‌شود که با محاسبات ساده و با تقریب مناسب، پاسخ فرکانس مدار مشخص می‌شود. هم‌چنین روش ثابت زمانی اتصال کوتاه برای محاسبات فرکانس پایین معرفی می‌شود.

بهره یک تقویت‌کننده در اثر تغییرات پارامترهای عناصر فعال با عواملی مانند درجه حرارت و نقطه‌ی کار دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای است. برای کاهش این تغییرات و کاهش حساسیت تقویت‌کننده به پارامترهای ترانزیستور، از فیدبک منفی استفاده می‌شود. در تقویت‌کننده‌های فیدبک بخشی از سیگنال خروجی به ورودی برگشت شده و از منبع ورودی کم می‌شود. اگرچه این کار باعث کاهش بهره مدار خواهد شد؛ اما عدم حساسیت به تغییرات مهم‌ترین مزیتی است که استفاده از فیدبک به‌همراه دارد. در مورد اهمیت استفاده از فیدبک باید گفت امروزه مدار الکترونیکی که در آن به نحوی از فیدبک استفاده نشده باشد، قابل تصور نیست. علاوه بر آن امروزه کاربرد فیدبک در سایر رشته‌های مهندسی و غیر مهندسی تعمیم یافته و متداول شده است.

فصل سوم کتاب در مورد فیدبک و انواع آن در تقویت‌کننده‌ها است. ابتدا اصول اساسی و طرح‌واره مدارهای فیدبک ارائه و مزایا و معایب آن معرفی می‌شود. سپس انواع تقویت‌کننده مطرح و فیدبک‌های مختلفی که می‌توان در هر مورد بکار برد ارائه و محاسبات بهره مدار با فیدبک بررسی خواهد شد. هم‌چنین نشان داده می‌شود استفاده از فیدبک باعث تغییرات مهمی در مقاومت ورودی و خروجی می‌شود.

علیرغم مزایای مناسب و مهمی که با فیدبک در تقویت‌کننده‌ها به‌دست می‌آید، دو اِشکال مهم و اساسی در تقویت‌کننده‌ها، کاهش بهره و مسئله ناپایداری است. کاهش بهره را می‌توان با افزایش تعداد طبقات مدار برای دست‌یابی به بهره مورد نظر جبران کرد؛ اما پاسخ فرکانس عناصر فعال در فرکانس‌های بالا باعث می‌شود، فیدبک به‌کار رفته در بعضی از فرکانس‌ها به فیدبک مثبت تبدیل شود. این وضعیت باعث ناپایداری و ایجاد نوسان در تقویت‌کننده می‌شود؛ به‌طوریکه بدون اعمال سیگنال ورودی، مدار دارای خروجی در فرکانسی مشخص و دامنه قابل ملاحظه خواهد بود. اصطلاحاً گفته می‌شود تقویت‌کننده به نوسان‌ساز تبدیل شده است. فصل پنجم در مورد پایداری تقویت‌کننده‌های فیدبک و روش‌های بررسی آن با استفاده از مکان هندسی ریشه‌های تقویت‌کننده فیدبک در صفحه مختلط s با تغییر ضریب فیدبک است. به ازای مقداری خاص از فیدبک که حداکثر فیدبک قابل اعمال به مدار است، مکان هندسی قطب‌ها محور موهومی را قطع می‌کند. این نقطه مرز ناپایداری نام دارد. ناپایداری تقویت‌کننده‌های فیدبک را با استفاده از مفاهیم حاشیه فاز و حاشیه بهره می‌توان در میدان فرکانس بررسی کرد که در ادامه فصل پنجم ارائه می‌شود.

در فصل ششم، روش‌های مختلف جبران تقویت‌کننده‌های فیدبک با استفاده از مکان هندسی قطب‌ها بررسی و معرفی می‌شوند. ابتدا توابع انتقالی که دارای پاسخ فرکانس تخت هستند، توابع انتقال باتروورث، معرفی و معیارهای طرح تقویت‌کننده برای به‌دست آوردن حداکثر پهنای باند تخت استخراج می‌شوند. اصلاح مدار فیدبک، اصلاح تقویت‌کننده و اصلاح همزمان دو مدار فیدبک و تقویت‌کننده اصلی مهم‌ترین روش‌های جبران تقویت‌کننده با استفاده از مکان هندسی قطب‌ها است.

فصل هفتم کتاب در مورد جبران پاسخ فرکانس تقویت‌کننده در حوزه فرکانس است. این روش با استفاده از اندازه‌گیری پاسخ فرکانس تقویت‌کننده اصلی انجام می‌شود. جبران با فیدبک مقاومتی، جبران‌کننده پیش فاز و جبران قطب مؤثر، مهم‌ترین روش‌های جبران تقویت‌کننده‌ها در میدان فرکانس است. در مقایسه با روش مکان هندسی قطب‌ها باید گفت، اگرچه جبران در میدان فرکانس از دقت کافی برخوردار نیست؛ اما محاسبات آن به‌سادگی قابل انجام است. در روش مکان هندسی قطب‌ها لازم، است محل قطب‌های تقویت‌کننده اصلی مشخص باشند؛ اما تعیین آن‌ها خصوصاً برای تقویت‌کننده‌های چندطبقه کار ساده‌ای نیست. درحالی‌که پاسخ فرکانس تقویت‌کننده قابل اندازه‌گیری است.

فصل هشتم کتاب در مورد نوسان‌سازهای سینوسی است. نوسان‌ساز مداری است که بدون سیگنال ورودی، دارای خروجی است. با استفاده از مطالب فصل پنجم در مورد ناپایداری تقویت‌کننده‌ها، می‌توان شرایط ایجاد نوسان در یک نوسان‌ساز را بررسی کرد. در این فصل مدارهای مختلف نوسان‌ساز با استفاده از تقویت‌کننده‌های عملیاتی و نوسان‌سازهای LC که در فرکانس‌های بالا کاربرد دارند، معرفی و بررسی می‌شوند.

بخش دوم کتاب با فصل نهم در مورد روش‌های بایاس مدارهای مجتمع آغاز می‌شود. ساخت مقاومت و خازن بزرگ در مدارهای مجتمع عملی نیست و فضای زیادی از تراشه را اشغال می‌کند. بر این اساس لازم است نکات خاصی را در نظر گرفت که در این فصل بررسی می‌شوند. منابع جریان با عناصر دوقطبی و با عناصر مختلف FET بررسی و مشخصات مهم و کاربرد آن‌ها در شرایط خاص ارائه می‌شود.

تقویت‌کننده‌های معمولی مانند تقویت‌کننده امیتر مشترک با بار اهمی، بهره کمی دارند. با استفاده از منابع جریان به‌عنوان بار تقویت‌کننده، می‌توان تقویت‌کننده‌ای با بار فعال به‌دست آورد که بهره زیادی را تأمین می‌کنند. بحث فصل دهم کتاب در مورد این نوع تقویت‌کننده‌ها است. طبقه تفاضلی با استفاده از عناصر BJT و FET از سایر بخش‌های مهم این فصل است.

آخرین فصل کتاب در مورد ساختمان داخلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی و معرفی نسل‌های مختلف آن‌ها است. در نسل اول این مدارها از تقویت‌کننده با بار اهمی استفاده شده است که بهره کم و مقاومت ورودی کمی دارند. با استفاده از تقویت‌کننده با بار فعال تا حد زیادی این مشکلات حل شده و تقویت‌کننده‌ای با بهره زیاد و مقاومت وردی بزرگ طراحی و ساخته شده‌اند. مهم‌ترین نمونه این نسل از تقویت‌کننده‌های عملیاتی، مدار ۷۴۱ است که مدار داخلی آن به‌تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته و مشخصات آن محاسبه می‌شود. در تقویت‌کننده‌های عملیاتی نسل سوم با ترکیب عناصر BJT و FET از مشخصات خوب این عناصر استفاده شده و مدارهای مجتمع با مشخصات مناسبی طراحی شده‌اند که در ادامه بحث تعدادی از این مدارها معرفی می‌شوند. همچنین معرفی تعدادی تقویت‌کننده عملیاتی پیشرفته، از سایر مطالب این فصل است.

این کتاب بر اساس جزوات درسی تهیه شده برای دانشجویان دوره کارشناسی مهندسی برق دانشگاه‌های سیستان و بلوچستان و شهید باهنر کرمان تدوین شده است. لازم است مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشجویان این دانشگاه‌ها که با طرح سؤالات و حل مسائل در بهبود کیفیت کتاب نقش بسزایی داشته‌اند، ابراز دارم. از آقای مهندس علی شهرکی مقدم به جهت حل مسائل با نرم‌افزار Spice و سرکار خانم‌ها مهندس لاله مهماندوست و مهندس شعله یاسینی که در تایپ و رسم شکل‌ها همکاری داشته‌اند تشکر می‌کنم. از فرزندم مهندس محمدمحسن نشاطی که در نمونه‌خوانی، رفع اشکالات تایپی، جمع‌آوری حل مسائل و تدوین لوح فشرده حل مسائل تلاش مجدانه‌ای داشته است، تشکر و قدردانی می‌کنم. از همسر و فرزندم الهه به جهت صبر و شکیبایی در طول تهیه این اثر سپاسگزارم.

محمدحسن نشاطی

مشهد مقدس– دانشگاه فردوسی مشهد

زمستان ۹۴

فهرست مطالب

فصل ۱ مدار معادل عناصر فعال در فرکانس‌های بالا ---- ۱۱

مقدمه ---- ۱۱
۱-۱ مدار معادل هایبرید π ترانزیستورهای دوقطبی ---- ۱۱
۱-۱-۱ تفسیر عناصر مدار معادل هایبرید π ---- ۱۲
۱-۱-۲ محاسبه عناصر مدار معادل هایبرید π ---- ۱۳
۱-۱-۳ خازن‌های مدار معادل هایبرید π ---- ۱۸
۱-۱-۴ تغییرات عناصر هایبرید π ---- ۱۹
۱-۱-۵ مدار معادل ساده شده هایبرید π ---- ۲۰
۱-۲ پاسخ فرکانس ترانزیستورهای BJT ---- ۲۱
۱-۲-۱ بهره جریان ترانزیستور در فرکانس‌های بالا ---- ۲۱
۱-۲-۲ اعتبار مدار معادل هایبرید π ---- ۲۳
۱-۳ مدار معادل هایبرید π در نرم‌افزار Spice ---- ۲۶
۱-۳-۱ تغییرات عناصر مدار معادل هایبرید π در نرم‌افزار Spice ---- ۲۸
۱-۴ مدار معادل ترانزیستورهای اثر میدان در فرکانس‌های بالا ---- ۳۰
۱-۴-۱ مشخصات ادمیتانس اتصال کوتاه شبکه‌های دو قطبی ---- ۳۳
مسائل فصل اول ---- ۳۵

فصل ۲ پاسخ فرکانس تقویت‌کننده‌های یک طبقه ---- ۳۹

مقدمه ---- ۳۹
۲-۱ مشخصات تقویت‌کننده‌ها ---- ۳۹
۲-۱-۱ طبقه‌بندی تقویت کننده‌ها ---- ۳۹
۲-۱-۲ اعوجاج در تقویت‌کننده‌ها ---- ۴۰
۲-۱-۳ تقسیم‌بندی باند فرکانسی تقویت‌کننده‌ها ---- ۴۲
۲-۱-۴ مدار معادل تقویت‌کننده در باندهای مختلف فرکانسی ---- ۴۲
۲-۱-۵ پاسخ سیگنال پله تقویت‌کننده‌ها ---- ۴۴
۲-۱-۶ پاسخ سیگنال مربعی تقویت‌کننده‌ها ---- ۴۶
۲-۱-۷ آزمایش تقویت کننده با سیگنال مربعی ---- ۴۶
۲-۲ پاسخ فرکانس تقویت‌کننده‌های یک طبقه ---- ۴۷
۲-۲-۱ مدار معادل تقویت‌کننده در باندهای فرکانسی مختلف ---- ۴۸
۲-۳ پاسخ فرکانس بالای تقویت‌کننده‌های یک طبقه ---- ۴۸
۲-۳-۱ تقویت‌کننده امیتر مشترک ---- ۴۹
۲-۴ نکاتی در مورد طرح مدار و انتخاب ترانزیستور ---- ۵۹
۲-۵ پاسخ فرکانس کامل تقویت‌کننده امیتر مشترک ---- ۶۲
۲-۶ پاسخ فرکانس بالای تقویت‌کننده سورس مشترک ---- ۶۶
مسائل فصل دوم ---- ۷۱

فصل ۳ پاسخ فرکانس تقویت‌کننده‌های چند طبقه ---- ۸۳

مقدمه ---- ۸۳
۳-۱ تابع انتقال تقویت‌کننده چندطبقه ---- ۸۳
۳-۱-۱ تابع انتقال فرکانس پایین ---- ۸۴
۳-۱-۲ تابع انتقال فرکانس بالا ---- ۸۴
۳-۱-۳ تعداد قطب‌ها و صفرهای تابع انتقال ---- ۸۴
۳-۲ تقریب‌های محاسبه فرکانس قطع ---- ۸۵
۳-۲-۱ تقریب قطب مؤثر فرکانس قطع بالا ---- ۸۵
۳-۲-۲ تقریب فرکانس قطع بالا به روش ثابت زمانی اتصال باز ---- ۸۷
۳-۲-۳ تقریب فرکانس قطع پایین به روش ثابت زمانی اتصال کوتاه ---- ۸۸
۳-۳ تقویت‌کننده دوطبقه سری امیتر مشترک ---- ۸۸

۳-۴ تقویت‌کننده کاسکود ۹۳
۳-۴-۱ بهره باند میانی ۹۳
۳-۴-۲ محاسبه فرکانس قطع بالا ۹۵
۳-۴-۳ محاسبات مدار بایاس تقویت‌کننده کاسکود ۱۰۰
۳-۴-۴ انتخاب خازن‌های تزویج و کنارگذر مدار کاسکود ۱۰۲
۳-۵ تقویت‌کننده سری کلکتور مشترک- امیتر مشترک ۱۰۷
۳-۶ تقویت‌کننده تفاضلی ۱۱۲
۳-۶-۱ طبقه دیفرانسیل با ورودی متقارن ۱۱۳
۳-۶-۲ طبقه دیفرانسیل با ورودی نامتقارن ۱۱۴
۳-۶-۳ اثر مقاومت امیتر در تقویت‌کننده تفاضلی ۱۱۶
۳-۶-۴ پاسخ فرکانس ضریب حذف سیگنال وجه مشترک ۱۱۹
۳-۶-۵ تقویت‌کننده دوطبقه سری کلکتور مشترک و بیس مشترک ۱۲۳
۳-۷ طراحی کامل تقویت‌کننده‌ها ۱۲۴
۳-۸ طرح تقویت‌کننده با بهره حداقل ۷۰۰۰ و پهنای باند ۳ MHz ۱۳۲
۳-۹ انتخاب خازن‌های کنارگذر ۱۳۹
۳-۱۰ رابطه فرکانس قطع و ضرایب معادله مشخصه ۱۴۲
۳-۱۰-۱ فرکانس قطع بالا و ضرایب معادله مشخصه ۱۴۲
۳-۱۰-۲ روش ثابت زمانی مدار باز برای محاسبه‌ی فرکانس قطع بالا ۱۴۳
۳-۱۰-۳ روش ثابت زمانی اتصال کوتاه برای محاسبه‌ی فرکانس قطع پایین ۱۴۷
مسائل فصل سوم ۱۴۸

فصل ۴ تقویت‌کننده‌های فیدبک در باند میانی ۱۶۳

مقدمه ۱۶۳
۴-۱ مفاهیم اساسی فیدبک ۱۶۴
۴-۱-۱ ساختار تقویت‌کننده‌های فیدبک ۱۶۴
۴-۱-۲ عدم حساسیت ۱۶۵
۴-۱-۳ کاهش بهره ۱۶۶
۴-۱-۴ افزایش پهنای باند ۱۶۶
۴-۱-۵ تغییرات امپدانس ورودی و خروجی ۱۶۷
۴-۱-۶ سایر مزایای فیدبک ۱۶۷
۴-۱-۷ ناپایداری در تقویت‌کننده فیدبک ۱۶۷
۴-۲ انواع تقویت‌کننده‌ها و فیدبک ۱۶۸
۴-۲-۱ تقویت‌کننده ولتاژ و فیدبک ولتاژ سری ۱۶۸
۴-۲-۲ تقویت‌کننده جریان ۱۷۰
۴-۲-۳ تقویت‌کننده هدایت انتقالی ۱۷۱
۴-۲-۴ تقویت‌کننده مقاومت انتقالی ۱۷۲
۴-۳ بررسی دقیق تقویت‌کننده‌های فیدبک ۱۷۲
۴-۳-۱ بررسی دقیق فیدبک ولتاژ ـ موازی ۱۷۳
۴-۳-۲ بررسی دقیق فیدبک جریان- سری ۱۸۱
۴-۳-۳ بررسی دقیق فیدبک ولتاژ- سری ۱۸۶
۴-۳-۴ بررسی دقیق فیدبک جریان- موازی ۱۸۹
۴-۴ طراحی تقویت‌کننده‌های فیدبک در باند میانی ۱۹۱
مسائل فصل چهارم ۱۹۸

فصل ۵ ناپایداری تقویت‌کننده‌های فیدبک ۲۱۱

مقدمه ۲۱۱
۵-۱ ناپایداری تقویت‌کننده‌های فیدبک ۲۱۱
۵-۱-۱ تقویت‌کننده اصلی با یک قطب ۲۱۲
۵-۱-۲ تقویت‌کننده اصلی با دو قطب ۲۱۴
۵-۱-۳ تقویت‌کننده اصلی با سه قطب ۲۱۶
۵-۲ مکان هندسی ریشه‌ها با تغییر فیدبک ۲۱۶
۵-۲-۱ قواعد رسم مکان هندسی ۲۱۷
۵-۳ بررسی ناپایداری در میدان فرکانس ۲۲۴
۵-۴ معیارهای پایداری در میدان فرکانس ۲۲۷
۵-۴-۱ حاشیه‌ی بهره ۲۲۷
۵-۴-۲ حاشیه‌ی فاز ۲۲۷
۵-۵ ارتباط بهره حلقه با پاسخ تقویت‌کننده در حوزه زمان و فرکانس ۲۳۱
مسائل فصل پنجم ۲۳۴

فصل ۶ جبران تقویت‌کننده‌های فیدبک با مکان هندسی ریشه‌ها ۲۴۳

مقدمه ۲۴۳
۶-۱ بررسی مشخصات سیستم درجه دو ۲۴۴
۶-۱-۱ پاسخ پله سیستم درجه‌ی دو ۲۴۵
۶-۱-۲ پاسخ فرکانس سیستم درجه دو ۲۴۶
۶-۱-۳ پهنای باند سیستم‌های درجه دو ۲۴۷
۶-۲ توابع انتقال باتروث ۲۴۸
۶-۲-۱ تابع انتقال باتروث درجه یک ۲۴۹
۶-۲-۲ تابع انتقال باتروث درجه دو ۲۵۰
۶-۲-۳ پهنای باند توابع انتقال باتروث ۲۵۱
۶-۲-۴ پاسخ پله تابع انتقال باتروث ۲۵۱
۶-۳ طراحی تقویت‌کننده با حداکثر پهنای باند تخت ۲۵۱
۶-۴ جبران تقویت‌کننده‌ها با مکان هندسی ریشه‌ها ۲۵۶
۶-۴-۱ جبران تقویت‌کننده با اصلاح مدار فیدبک ۲۵۶
۶-۴-۲ جبران تقویت‌کننده با اصلاح تقویت‌کننده اصلی ۲۶۷
۶-۴-۳ جبران تقویت‌کننده اصلی با اضافه کردن خازن بزرگ ۲۶۷
۶-۴-۴ اصلاح تقویت‌کننده اصلی با اضافه کردن صفر ۲۷۱
۶-۴-۵ جبران با اصلاح هم‌زمان تقویت‌کننده اصلی و مدار فیدبک ۲۷۳
۶-۵ روند طراحی تقویت‌کننده به روش مکان هندسی ریشه‌ها ۲۷۶
مسائل فصل ششم ۲۸۱

فصل ۷ جبران تقویت‌کننده‌های فیدبک در میدان فرکانس ۲۹۱

مقدمه ۲۹۱
۷-۱ معیارهای پاسخ مناسب در میدان فرکانس ۲۹۱
۷-۱-۱ تقویت‌کننده اصلی یک‌قطبی ۲۹۲
۷-۱-۲ تقویت‌کننده اصلی دوقطبی ۲۹۳
۷-۲ روش‌های جبران تقویت‌کننده‌ها در میدان فرکانس ۲۹۴
۷-۲-۱ جبران با فیدبک مقاومتی ۲۹۴
۷-۲-۲ جبران‌کننده پیش‌فاز ۳۰۰
۷-۲-۳ جبران قطب مؤثر ۳۰۴
۷-۳ ناپایداری در فرکانس‌های پایین ۳۱۴
مسائل فصل هفتم ۳۱۹

فصل ۸ نوسان‌سازهای سینوسی ۳۳۱

مقدمه ۳۳۱
۸-۱ اصول نوسان در نوسان‌سازها ۳۳۲
۸-۱-۱ شرایط نوسان ۳۳۲
۸-۱-۲ چگونگی ایجاد نوسان در نوسان‌سازها ۳۳۳
۸-۱-۳ پایداری فرکانس نوسان ۳۳۵
۸-۱-۴ پایداری دامنه نوسانات ۳۳۵
۸-۲ نوسان‌سازهای انتقال فاز ۳۳۶
۸-۲-۱ نوسان‌ساز انتقال فاز با تقویت‌کننده عملیاتی ۳۳۶
۸-۲-۲ محدود کردن دامنه نوسان ۳۳۸
۸-۲-۳ نوسان‌ساز متعامد ۳۴۱
۸-۲-۴ نوسان‌ساز سه فاز ۳۴۲
۸-۲-۵ نوسان‌ساز پل وین ۳۴۳
۸-۳ نوسان‌سازهای LC ۳۴۷
۸-۳-۱ نوسان‌ساز کولپیتس با تقویت‌کننده عملیاتی ۳۴۸
۸-۳-۲ نوسان‌ساز کولپیتس با ترانزیستور BJT ۳۵۰
۸-۳-۳ نوسان‌ساز هارتلی ۳۵۱
۸-۳-۴ نوسان‌ساز پل میچم ۳۵۲
۸-۴ نوسان‌سازهای کریستالی ۳۵۴
۸-۴-۱ نوسان‌ساز کریستالی کولپیتس ۳۵۶
مسائل فصل هشتم ۳۵۸

فصل ۹ منابع جریان و روش‌های بایاس مدارهای مجتمع ۳۶۳

مقدمه ۳۶۳
۹-۱ منابع جریان با ترانزیستورهای دوقطبی ۳۶۳
۹-۱-۱ منبع جریان با دو ترانزیستور دوقطبی ۳۶۳
۹-۱-۲ منبع جریان با ترانزیستورهای pnp ۳۶۷
۸-۱-۳ منبع جریان با ترانزیستورهای غیرمشابه دوقطبی ۳۶۷
۹-۱-۴ تکرارکننده جریان ۳۷۰
۹-۱-۵ منبع جریان با سه ترانزیستور دوقطبی ۳۷۱
۹-۱-۶ منبع جریان ویدلر ۳۷۲

۹-۱-۷ منبع جریان کاسکود----۳۷۶
۹-۱-۸ منبع جریان ویلسون----۳۷۸
۹-۲ منابع جریان با عناصر ماسفت----۳۸۴
۹-۲-۱ مدار ساده منبع جریان با عناصر ماسفت----۳۸۴
۹-۲-۲ منبع جریان کاسکود با عناصر ماسفت----۳۸۷
۹-۲-۳ منبع جریان ویلسون با عناصر ماسفت----۳۹۰
۹-۲-۴ منبع جریان مستقل از ولتاژ تغذیه----۳۹۱
۹-۳ فناوری ساخت ترانزیستورهای در مدارهای مجتمع ۳۹۴
۹-۳-۱ ترانزیستورهای ماسفت----۳۹۴
۹-۳-۲ ترانزیستورهای دو قطبی----۳۹۸
۹-۳-۳ مقایسه عناصر دو قطبی . ماسفت----۳۹۹
مسائل فصل نهم----۴۰۱

فصل ۱۰ تقویت‌کننده‌ها با بار فعال----۴۰۷

مقدمه ----۴۰۷
۱۰-۱ تقویت‌کننده امیتر مشترک با بار اهمی----۴۰۷
۱۰-۲ تقویت‌کننده با بار فعال----۴۰۸
۱۰-۲-۱ تقویت‌کننده امیتر مشترک با بار فعال----۴۰۸
۱۰-۲-۲ خط بار تقویت‌کننده با بار فعال----۴۱۰
۱۰-۲-۳ تقویت‌کننده سورس مشترک با بار فعال----۴۱۰
۱۰-۳ تقویت‌کننده تفاضلی با بار فعال----۴۱۴
۱۰-۳-۱ تقویت‌کننده تفاضلی با بار فعال با عناصر دو قطبی----۴۱۴
۱۰-۳-۲ پاسخ فرکانس تقویت‌کننده تفاضلی با بار فعال با عناصر دوقطبی----۴۱۶
۱۰-۳-۳ تقویت‌کننده تفاضلی با بار فعال با عناصر فت-۴۲۳
۱۰-۳-۴ تقویت‌کننده تفاضلی با عناصر ماسفت و بار کاسکود----۴۲۹
۱۰-۴ مدارهای ترکیبی با عناصر دوقطبی و فت----۴۳۱
۱۰-۴-۱ زوج دارلینگتون با عناصر دوقطبی و فت----۴۳۱
۱۰-۴-۲ تقویت‌کننده کاسکود با عناصر BJT و FET--۴۳۲
۱۰-۴-۳ تقویت‌کننده کاسکود تاشده----۴۳۳
۱۰-۴-۴ تقویت‌کننده کاسکود تاشده با عناصر دوقطبی-۴۳۵
۱۰-۵ ولتاژ افست تقویت‌کننده تفاضلی بار فعال----۴۳۷
۱۰-۶ مدارهای تغییر سطح dc----۴۴۰
مسائل فصل دهم----۴۴۲

فصل ۱۱ ساختمان داخلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی----۴۵۵

مقدمه ----۴۵۵
۱۱-۱ تقویت‌کننده‌های عملیاتی نسل اول----۴۵۵
۱۱-۱-۱ تقویت‌کننده عملیاتی MC1530----۴۵۵
۱۱-۲ تقویت‌کننده‌های عملیاتی نسل دوم----۴۶۴
۱۱-۲-۱ تقویت‌کننده عملیاتی LM741----۴۶۵
۱۱-۲-۲ تقویت‌کننده عملیاتی دو طبقه CMOS----۴۸۵
۱۱-۲-۳ تقویت‌کننده عملیاتی MC14573----۴۸۶
۱۱-۳ تقویت‌کننده‌های عملیاتی نسل سوم----۴۸۸
۱۱-۳-۱ تقویت‌کننده عملیاتی CA3140----۴۸۸
۱۱-۳-۲ تقویت‌کننده‌های عملیاتی سری LF155----۴۹۳
۱۱-۴ تقویت‌کننده‌های عملیاتی پیشرفته----۴۹۴
۱۱-۴-۱ تقویت‌کننده عملیاتی کاسکود تاشده CMOS----۴۹۵
۱۱-۴-۲ افزایش محدوده سیگنال وجه مشترک مدار کاسکود تاشده----۴۹۹
۱۱-۴-۳ تقویت‌کننده‌های عملیاتی سری OP30X----۵۰۰
۱۱-۴-۴ تقویت‌کننده‌های عملیاتی سری AD818 و AD8021----۵۰۳
مسائل فصل یازدهم----۵۰۷

پیوست: رسم نمودار بُد----۵۱۷
مراجع----۵۲۳
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی----۵۲۵
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی----۵۳۱