

دانشگاه زنجان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره ی کارشناسی مهندسی برق

## طراحی و ساخت تقویت کننده RF در باند فرکانسی ۱۰۰KHz تا ۱۵۰ MHz

نگارش:

حامد مهاجری

سید سینا ترابی

استاد راهنما:

حبیب الله زلفخانی

تابستان ۱۳۹۰

تقدیم به آنانکه وجودمان برایشان همه رنج بود و

وجودشان برایمان همه مهر

آنانکه توانشان رفت تا به توان برسیم و مویشان نسپید

گشت تا رویمان نسپید بماند آنانکه راستی قامتشان در

شکستگی قامت کسان بقاء یافت

# تشکر و قدردانی

مراعه‌دی بست با جانان که تا جان در بدن دارم

هواداران کویش را چو جان خویشان دارم

از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر حبیب‌الله زلفخانی، به‌خاطر

راهنمایی‌های ارزنده ایشان و به‌خاطر انتقال تجارب گرانقدرشان به

اینجانبان در طول دوران تحصیل، کمال تشکر و قدردانی را داریم که

افزون بر مسیر علم، مسیر زندگی را نیز بر اینجانبان روشن و میسر

نمودند.

سینا ترابی، حامد مهاجری

تابستان ۱۳۹۰

## چکیده

عناصر نیمه هادی اساس مدارهای مجتمع و فناوری مدرن الکترونیک هستند. مطالعه و شناخت مشخصات و همچنین کاربرد این عناصر از مهم ترین مباحث الکترونیک در دوره کارشناسی مهندسی برق است. هم چنین رفتار عناصر فعال در فرکانسهای بالا و بررسی پاسخ فرکانسی تقویت کننده ها از مباحث مهم در طراحی و ساخت این مدارها است.

برای عناصر BJT مدار معادل هایبرید  $\pi$  که اولین بار توسط گیاکلتور (Giacolletto) ارائه شد این مدار معادل براساس واقعیت های فیزیکی که در داخل ترانزیستور اتفاق می افتد استوار است. مدار معادل مشخصات ادمیتانس اتصال کوتاه ترانزیستور های BJT که عموماً در بررسی و طراحی تقویت کننده های فرکانس رادیویی (Radio Frequency) مورد استفاده قرار می گیرند.

بررسی پاسخ فرکانسی تقویت کننده های یک طبقه و چند طبقه و محاسبات خازن های کوپلاژ بای پس برای محاسبات فرکانس قطع پایین، محاسبات تابع انتقال مدار و بدست آوردن محل قطب ها و صفر ها، محاسبات ثابت زمانی برای محاسبه فرکانس قطع بالا از دیگر کار های مهمی است که باید در طراحی لحاظ شود.

استفاده از فیدبک در باند میانی از دیگر مباحث مهم است که تغییرات مهمی در مدار ایجاد می کند و برای اهداف مختلف در طراحی می توان عناصر مختلف آن را محاسبه و طراحی نمود. فیدبک خواص مفید زیادی دارد به همین خاطر استفاده از آن در مدار های الکترونیکی مختلف برای کاربر های مختلف رایج است. باید توجه داشته باشیم که به کار بردن فیدبک ممکن است باعث ناپایداری مدار در بعضی از فرکانسها شود، برای کنترل این حالت باید از جبران سازی و عناصر جبران ساز مختلف در مدار خود بهره بگیریم.

تقویت کننده عملیاتی از دیگر قطعه های مهم اند که معمولاً برای کاربرد های مختلف به صورت استاندارد ساخته شده و می توان از آنها برای بسیاری از کاربردها بهره برد.

در طراحی و ساخت تقویت کننده ها می توان با استفاده از تقویت کننده های چند طبقه یک طبقه کسکد و دیگر مدار ها و طراحی و تنظیم عناصر مختلف با توجه به امکانات موجود به خواسته های خود از مدار دست یابیم. استفاده از تقویت کننده های عملیاتی نیز در مدارها از دیگر کارهای است که می تواند طراحی و ساخت مدار را آسان نماید. در فصل آخر این پروژه در مورد ساخت تقویت کننده ها و مسائلی که در طی طراحی و ساخت پیش می آید بحث شده است.

**کلید واژه:** مدار های الکترونیکی، تقویت کننده فرکانس بالا، پاسخ فرکانسی، ترانزیستور

## فهرست مطالب

### عنوان ..... صفحه

#### فصل ۱- تحلیل فرکانسی ترانزیستور .....

۱-۱- مدار معادل هایبرید ترانزیستور های دو قطبی .....

۱-۲-۱- خازنهای مدار معادل هایبرید .....

۱-۲-۱- خازن دیود بیس-امیتر .....

۱-۲-۲-۱- خازن پیوند .....

۱-۲-۲-۱- خازن دیود کلکتور-بیس .....

۱-۳-۱- پاسخ فرکانسی ترانزیستور های BJT .....

۱-۳-۱- فرکانس قطع  $f_{\beta}$  .....

۱-۳-۲-۱- فرکانس گذر  $f_T$  .....

#### فصل ۲- بررسی پاسخ فرکانسی تقویت کننده ها .....

۱-۲- طبقه بندی تقویت کننده ها .....

۲-۲- اعوجاج در تقویت کننده ها .....

۱-۲-۲- اعوجاج غیرخطی .....

۲-۲-۲- اعوجاج دامنه وفاز .....

۲-۳- تقسیم بندی باند فرکانس تقویت کننده ها .....

۲-۴- مدار معادل تقویت کننده در باند های فرکانسی مختلف .....

۲-۵- پاسخ پله و پاسخ سیگنال مربعی تقویت کننده ها .....

۲-۵-۱- پاسخ سیگنال مربعی .....

۲-۵-۲- آزمایش تقویت کننده با سیگنال مربعی .....

۲-۶- پاسخ فرکانس تقویت کننده های یک طبقه .....

۲-۷- پاسخ فرکانس پایین تقویت کننده ها .....

۲-۷-۱- انتخاب خازن کوپلاژ .....

۲-۷-۲- انتخاب خازن های بای پس .....

۲-۷-۳- انتخاب خازنهای کوپلاژ و بایپس .....

۲-۸- پاسخ فرکانس بالای تقویت کننده های یک طبقه .....

۲-۹- نکاتی در مورد طرح مدار و انتخاب ترانزیستور .....

۲-۱۰- پاسخ فرکانس کامل تقویت کننده امیتر مشترک .....

۲-۱۱- پاسخ فرکانس بالای تقویت کننده سورس مشترک .....

۲-۱۲- تابع انتقال تقویت کننده چند طبقه .....

۲-۱۲-۱- تقریب قطب موثر تابع انتقال فرکانس بالا .....

۱۳-۲- رابطه فرکانس قطع و ضرایب معادله مشخصه..... ۳۷

۱-۱۳-۲- فرکانس قطع بالا و ثابت زمانی مدار باز..... ۴۱

۲-۱۳-۲- فرکانس قطع پایین و ثابت زمانی اتصال کوتاه..... ۴۱

۱۴-۲- تقویت کننده سری امیتر مشترک..... ۴۲

۱۵-۲- تقویت کننده کاسکود cascode..... ۴۵

۱-۱۵-۲- محاسبات فرکانس بالا..... ۴۶

۲-۱۵-۲- روش ثابت زمانی مدار باز در محاسبه فرکانس قطع بالا..... ۴۷

۱۶-۲- تقویت کننده های عملیاتی..... ۴۹

### فصل ۳- بررسی تقویت کننده های فرکانس بالا..... ۵۰

۱-۳- مقدمه..... ۵۰

۲-۳- وابستگی فرکانسی پارامتر  $(h_{fe})\beta$  ترانزیستور..... ۵۰

۳-۳- تقویت کننده گی در فرکانسهای بالا..... ۵۲

### فصل ۴- PCB در فرکانس های بالا..... ۵۸

۱-۴- مقدمه..... ۵۸

۲-۴- خط انتقال..... ۵۹

۳-۴- مشخصه امپدانس..... ۶۰

۴-۴- واکنش (انعکاس) و تطبیق امپدانس..... ۶۳

۵-۴- تحلیل های پایانی..... ۶۴

۶-۴- کوپلینگ و تداخل..... ۶۵

### فصل ۵- طراحی و ساخت..... ۶۸

۱-۵- مدار اول..... ۶۸

۲-۵- مدار دوم..... ۷۰

۳-۵- مدار سوم..... ۷۸

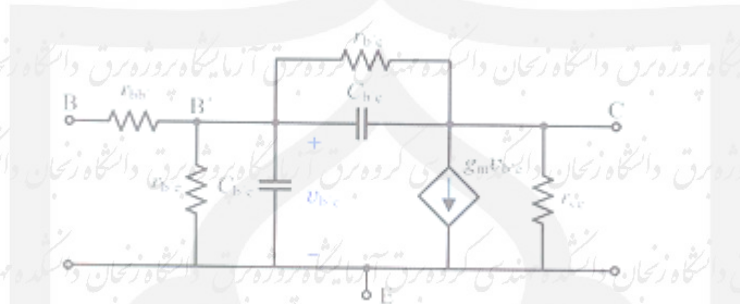
۴-۵- بررسی برخی از مشکلات ساخت..... ۸۰

### فهرست مراجع..... ۸۲

## فصل ۱ - تحلیل فرکانسی ترانزیستور

### ۱-۱- مدار معادل هایبرید ترانزیستور های دو قطبی

مهمترین تقویت کننده های ترانزیستوری که در عمل کاربرد زیادی دارد تقویت کننده امیتر مشترک است. بر این اساس مدار معادل ترانزیستور های BJT در حالت امیتر مشترک و در فرکانس های بالا معرفی می شود. این مدار در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. بررسی و طراحی تقویت کننده ها با این مدار خیلی مشکل نیست و نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مدار ها با آن با تقریب خوب منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است. مهمترین خصوصیت این مدار معادل آن است که عناصر آن مستقل از فرکانس اند. بنابراین می توان از آن در بررسی پاسخ فرکانسی تقویت کننده ها با پهنای باند وسیع استفاده نمود. لازم به ذکر است عناصر مدار معادل ممکن است در اثر بعضی عوامل مثل نقطه کار و درجه حرارت تغییر نمایند.



شکل ۱-۱: مدار معادل هایبرید  $\pi$

### ۱-۴- خازنهای مدار معادل هایبرید $\pi$

مدار معادل هایبرید  $\pi$  ترانزیستور های BJT شامل دو خازن است که در شکل (۱-۲) نشان داده شده اند.

#### ۱-۴-۱- خازن دیود بیس-امیتر

پیوند امیتر ترانزیستور BJT در تقویت کننده ها در گرایش مستقیم قرار دارد و خازن مربوط به آن شامل دو بخش خازن پیوند و خازن انتشار می باشد:

$$C_{be} = C_{je} + C_d$$

معادله ۱-۱

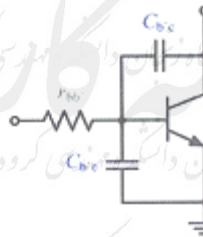
در بایاس مستقیم دیود بیس-امیتر، حاملهای جریان از امیتر وارد بیس شده و مدت کوتاهی در ناحیه بیس برون ترکیب باقی مانده و ذخیره می شوند. این تجمع بار در ناحیه بیس توسط خازن انتشار  $C_d$  که خازن شارژ ناحیه بیس<sup>۱</sup> نیز نامیده می شود معرفی می شود. واضح است هر چه نقطه ی کار مدار بیشتر

<sup>1</sup> base charging capacitance

باشد میزان بار ذخیره شده بیشتر و در نتیجه ظرفیت خازن مربوطه بزرگتر خواهد بود. چنانچه تغییرات بار ذخیره شده در ناحیه بیس با  $q_h$  (در اثر ولتاژ  $v_{be}$  دو سربیس - امیتر) نشان داده شود، مقدار خازن  $C_d$

$$C_d = \frac{q_h}{v_{be}}$$

معادله ۲-۱



شکل ۲-۱: خازنهای مدار هایبرید  $\pi$

انتقال یک حامل اقلیت از ناحیه امیتر به کلکتور و عبور از ناحیه بیس به مدت زمان هر چند کوتاه نیاز دارد. این مدت زمان عموماً زمان گذر از بیس<sup>۱</sup> نامیده شده و یک کمیت آماری با مقدار متوسط  $\tau_F$  است

بطوریکه:

$$\tau_F = \frac{Q_h}{I_{CQ}}$$

معادله ۳-۱

مقدار بار ذخیره شده در جریان نقطه کار  $I_{CQ}$  است. در حالت سیگنال کوچک و برای تغییرات مشخص ولتاژ بیس امیتر  $v_{be}$  (حول نقطه کار)، مقدار بار اضافی  $q_h$ :

$$q_h = \tau_F i_c$$

معادله ۴-۱

است و بنا براین خازن انتشار  $C_d$ :

$$C_d = \frac{q_h}{v_{be}} = \frac{\tau_F i_c}{v_{be}} = \tau_F g_m$$

معادله ۵-۱

ملاحظه می شود که خازن انتشار  $C_d$  متناسب با جریان نقطه ی کار  $I_{CQ}$  و متوسط زمان گذر  $\tau_F$  است. مقدار  $\tau_F$  در ترانزیستورهای فرکانس بالا حدود چند نانو ثانیه است.

<sup>1</sup> base transit time



## فهرست مراجع

- [۱] امیر عشقی، سید علی، مبانی الکترونیک (جلد دوم)، ناشر شیخ بهایی، چاپ چهارم، سال ۱۳۸۳.
- [۲] نشاطی، محمدحسن، تحلیل و طراحی قطعات و مدارهای الکترونیک، ناشر نص، چاپ دوم، سال ۱۳۸۷.
- [۳] ساموئل، وای لیائو، تحلیل مداری و طراحی تقویت کننده‌های ماکروویو، ناشر دانشگاه آزاد واحد جنوب، چاپ اول، سال ۱۳۷۹.
- [4] The design engineers search engine, Mini-Circuits, [www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com).
- [5] Datasheets for electronics components, [www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com).