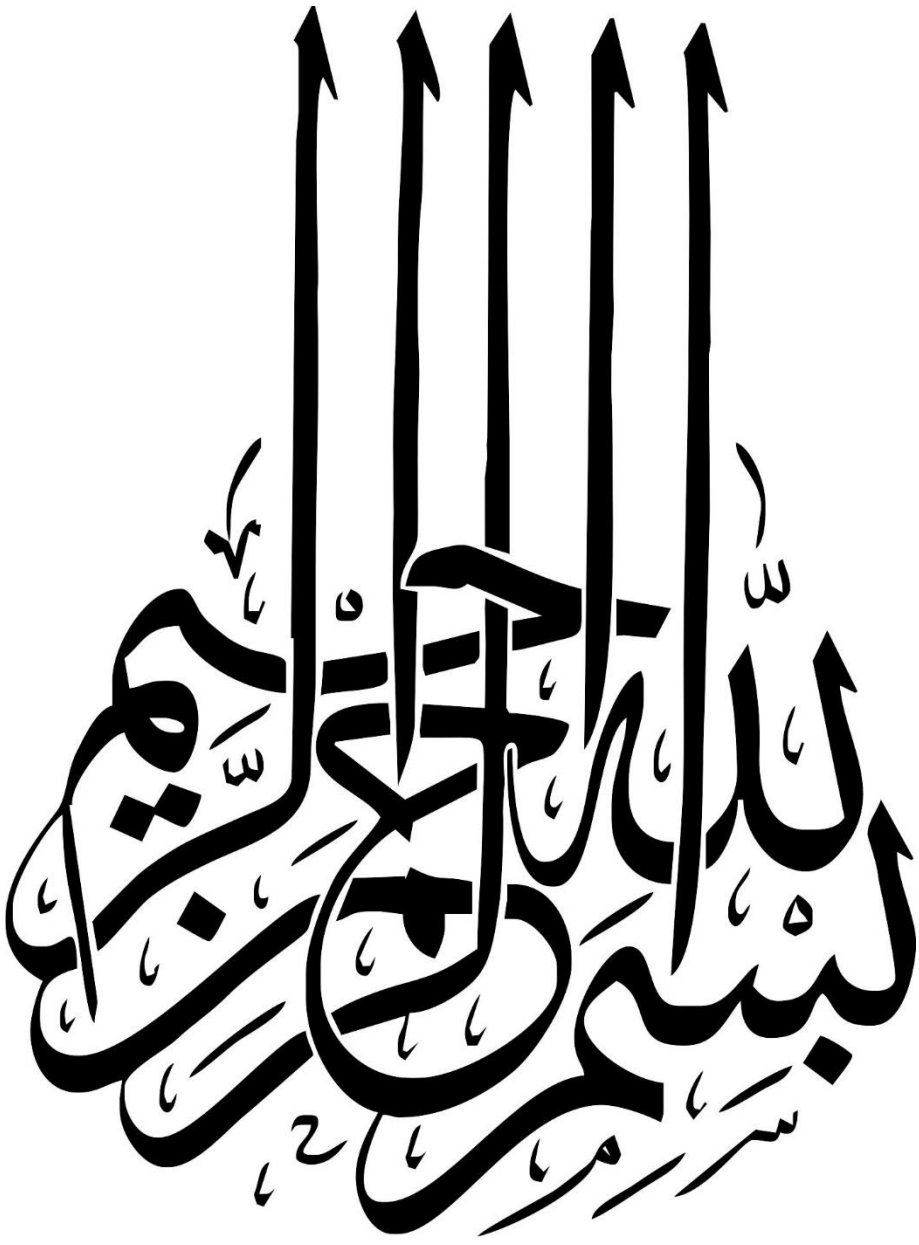
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده برق و رباتیک

رشته برق گرایش الکترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی و شبیه‌سازی تقسیم‌کننده فرکانسی تزریق-قفل با نویزفاز کم با استفاده از نوسان‌سازهای کلاس C

نگارنده: حبیب اله نجفی

استاد راهنما

دکتر عماد ابراهیمی

بهمن ۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: برق و رباتیک

گروه: الکترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **حبیب اله نجفی** به شماره دانشجویی: **۹۳۱۷۳۲۴**

تحت عنوان: **طراحی و شبیه‌سازی تقسیم‌کننده فرکانسی تزریق-قفل با نویزفاز کم با استفاده از نوسان‌سازهای کلاس C**

در تاریخ **۹۵/۱۱/۲۰** تو سط کمیته تخ ص صی زیر جهت اخذ مدرک کار شنا سی ار شد **مهند سی برق-الکترونیک** مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی: **عماد ابراهیمی**		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی: **محمدرضا اشرف**		نام و نام خانوادگی: **احسان رحیمی**	
نام و نام خانوادگی: **علی فتاح**			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

تقدیم به:

پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

تشکر و قدردانی:

با سپاس فراوان از زحمات استاد محترم و گرانقدر جناب آقای **دکتر ابراهیمی** که از ابتدای راه و در طی انجام این پژوهش، با راهنمائی‌های خود مرا در نگارش این پایان‌نامه یاری نمودند.

تعهد نامه

اینجانب **حبیب اله نجفی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **برق- الکترونیک** دانشکده **برق و رباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **طراحی و شبیه‌سازی تقسیم‌کننده فرکانسی تزریق-قفل با نویزفاز کم با استفاده از نوسان‌سازهای کلاس C** تحت راهنمائی **دکتر عماد ابراهیمی** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در سال‌های اخیر مخابرات بیسیم، نقشی اساسی در زندگی روزمره مردم ایفا کرده است. امروزه تقاضا برای وسایل الکترونیکی با هزینه کم، توان مصرفی پایین، فرکانس کاری بالا و... به طور چشمگیری افزایش یافته است.

سنتزکننده فرکانسی یکی از بخش‌های اساسی در سیستم‌های فرستنده و گیرنده می‌باشد. سنتزکننده‌های فرکانسی، توانایی تولید سیگنال‌هایی در بازه‌ی فرکانسی مطلوب را دارا می‌باشند و از بخش‌هایی مانند تقسیم‌کننده فرکانسی و آشکارساز فاز تشکیل شده است. در واقع یکی از بلوک‌های اساسی در سنتزکننده‌های فرکانسی، تقسیم‌کننده فرکانس می‌باشد که وظیفه‌ی آن تقسیم فرکانس سیگنال ورودی بر یک ضریب دلخواه است. تقسیم‌کننده‌های فرکانسی به دو دسته‌ی دیجیتال و آنالوگ تقسیم می‌شوند. تقسیم‌کننده‌های دیجیتالی متداول چندان برای عمل تقسیم در فرکانس بالا مناسب نمی‌باشند؛ زیرا اولا توان مصرفی بالایی دارند، ثانیا عملکرد آن‌ها در فرکانس‌های بالا دچار اختلال می‌شود. از این رو در فرکانس‌های بالا از تقسیم‌کننده‌های آنالوگ استفاده می‌شود که تقسیم‌کننده‌ی فرکانسی تزریق- قفل(ILFD) مبتنی بر نوسان‌سازهای LC یکی از مهم‌ترین تقسیم‌کننده‌های آنالوگ به شمار می‌رود. ILFDهای LC دارای دو مزیت توان مصرفی نسبتا کم و عملکرد صحیح در فرکانس‌های بسیار بالا می‌باشند. معمولا این تقسیم‌کننده‌ها قابلیت تقسیم فرکانس بر ضرایب صحیح زوج و فرد را دارا هستند. تاکنون روش‌های مختلفی برای تقسیم با نسبت‌های دو و سه ارائه شده است که از آن میان می‌توان به روش تزریق مستقیم و تزریق غیرمستقیم برای انجام عمل تقسیم بر دو و روش‌های تزریق سری، تزریق موازی و تزریق مستقیم برای انجام عمل تقسیم بر سه اشاره نمود.

در این پایان‌نامه نیز با به کارگیری نوسان‌سازهای کلاس C همچون کولپیتس، که از نویزفاز بهتری برخوردارند دو مقسم فرکانس جدید ارائه شده است. در دو روش پیشنهادی از هیچ المان اضافه‌ای برای تزریق استفاده نشده است و در عوض از زیرلایه و گره میانی خازن‌ها برای تزریق بهره گرفته شده

است. بدین ترتیب منابع نویز و مصرف توان در مدار تا حدی زیادی کاهش یافته است. همچنین با توجه به عدم وجود معیار دقیقی برای تشخیص قفل‌شدگی تقسیم‌کننده، در این پایان‌نامه معیار جدیدی مبتنی بر دیاگرام‌های چشمی جهت تشخیص بهتر قفل‌شدگی ILFD ارائه گردیده است. در اولین مدار پیشنهادی، تزریق از طریق زیرلایه انجام شده است که در ولتاژ تغذیه‌ی 1.6 V، توان مصرفی برابر 2.69 mW دارد، همچنین در توان تزریقی 0 dBm بازه‌ی قفل 3.78 GHz (۲۲/۱۱٪) و نویزفاز ILFD در آفست فرکانسی 1 MHz از فرکانس مرکزی 5.61 GHz برابر با 128.63 dBc/Hz- می‌باشد. در دومین مدار پیشنهادی، تزریق از طریق خازن‌های کولپیتس صورت پذیرفته است که توان مصرفی 2.49mW، بازه‌ی قفل ILFD بین 10.56GHz -5.7 GHz (۲۳/۲۱٪) و نویزفاز تقسیم‌کننده در آفست فرکانسی 1 MHz از فرکانس مرکزی 5.61 GHz برابر با 128.69 dBc/Hz- می‌باشد. قابل ذکر است تمامی مدارهای پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار ADS در تکنولوژی TSMC 0.18µm RF-CMOS شبیه‌سازی شده‌اند.

کلمات کلیدی: سنتزکننده فرکانسی، تقسیم‌کننده دیجیتال و آنالوگ، تقسیم‌کننده فرکانسی تزریق-قفل، کولپیتس، قفل‌شدگی تزریق

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: پیشگفتار

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱-۲ ساختار تحقیق..... ۵

فصل دوم: انواع تقسیم‌کننده‌های فرکانسی

۲-۱ مقدمه..... ۸

۲-۲ دسته‌بندی انواع تقسیم‌کننده‌ها..... ۸

۲-۲-۱ تقسیم‌کننده دیجیتال ۹

۲-۲-۱-۱ تقسیم‌کننده‌های فرکانسی استاتیک ۱۰

۲-۲-۱-۲ تقسیم‌کننده‌های فرکانسی دینامیک ۱۳

۲-۲-۲ تقسیم‌کننده آنالوگ ۱۶

۲-۲-۲-۱ تقسیم‌کننده‌ی فرکانسی میلر(رژنراتیو)..... ۱۷

۲-۲-۲-۲ تقسیم‌کننده‌های فرکانسی تزریق-قفل..... ۱۹

فصل سوم: *LC-ILFD* و تکنیک‌های تزریق سیگنال

۳-۱ مقدمه..... ۲۶

۲-۳ نوسان‌سازهای LC..... ۲۷

۳-۳ نوسان‌ساز کولپیتس..... ۳۰

۴-۳ پارامترهای اصلی در طراحی LC-ILFD..... ۳۲

۳-۴-۱ فرکانس نوسان ۳۳

۳-۴-۲ نویزفاز ۳۳

۳-۴-۳ ضریب کیفیت(Q)..... ۳۶

۳-۴-۴ توان مصرفی ۳۷

۳-۴-۵ بازه‌ی قفل ۳۸

۳-۴-۶ معیار شایستگی (FOM) ۳۹

۵-۳ تکنیک‌های تزریق سیگنال در LC-ILFD..... ۴۱

۳-۵-۱ تکنیک‌های تزریق سیگنال در LC-ILFDها با نسبت تقسیم دو..... ۴۲

۳-۵-۱-۱ تکنیک تزریق غیرمستقیم..... ۴۲

۳-۵-۱-۲ تکنیک تزریق مستقیم..... ۴۳

۳-۵-۲ تکنیک‌های تزریق سیگنال در LC-ILFDها با نسبت تقسیم سه..... ۴۴

۳-۵-۲-۱ تکنیک تزریق سری..... ۴۵

۳-۵-۲-۲ تکنیک تزریق موازی..... ۴۶

۳-۵-۲-۳ تکنیک تزریق از طریق بالک..... ۵۱

۳-۵-۲-۴ تکنیک تزریق مستقیم.....۵۲

فصل چهارم: تقسیم‌کننده‌های فرکانسی پیشنهادی مبتنی بر نوسان‌ساز کولپیتس و معیار تزریق—قفل

۴-۱ مقدمه.....۵۶

۴-۲ معیارهایی برای تشخیص قفل شدن ILFD.....۵۷

۴-۲-۱ معیار اول: با استفاده از شکل موج‌های تزریقی و خروجی مدار.....۵۷

۴-۲-۲ معیار دوم: با استفاده از طیف خروجی ILFD.....۵۹

۴-۲-۳ معیار سوم: معیار پیشنهادی مبتنی بر لیساژر ورودی-خروجی.....۶۰

۴-۲-۳-۱ منحنی لیساژر.....۶۱

۴-۲-۳-۲ توصیف معیار پیشنهادی.....۶۲

۴-۳ تقسیم‌کننده‌های تزریق-قفل پیشنهادی.....۶۹

۴-۳-۱ ILFD پیشنهادی اول با قابلیت تقسیم بر سه: تزریق از طریق بالک ترانزیستورهای اتصال-ضربدری.....۷۰

۴-۳-۱-۱ تحلیل نظری تقسیم‌کننده‌ی پیشنهادی.....۷۲

۴-۳-۱-۲ نتایج شبیه‌سازی.....۷۵

۴-۳-۲ ILFD پیشنهادی دوم با قابلیت تقسیم بر دو: تزریق از طریق گره‌ی میانی خازن‌های کولپیتس.....۸۲

۴-۳-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی.....۸۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری.....۹۲

۵-۲ پیشنهادهایی برای ادامه کار.....۹۳

مراجع.....۹۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

فصل اول

شکل۱-۱. بلوک دیاگرام ساده سنتزکننده فرکانس.....۳

فصل دوم

شکل۲-۱. دسته‌بندی تقسیم‌کننده‌های فرکانسی.....۹

شکل ۲-۲. یک تقسیم‌کننده‌ی فرکانسی دیجیتال با نسبت تقسیم دو. (الف) شماتیک تقسیم‌کننده (ب) ساختار لچ استفاده شده (ج) شکل‌موج‌ها.....۱۲

شکل۲-۳. تقسیم‌کننده‌ی فرکانسی دینامیک: (الف) شبه-NMOS دوکلاکه (ب) ساعت‌دهی تکفاز واقعی(TSPC).....۱۴

شکل۲-۴. عملکرد یک تقسیم‌کننده‌ی فرکانسی رژنراتیو با نسبت تقسیم بر دو.....۱۷

شکل۲-۵. مدار تقسیم‌کننده‌ی فرکانسی رژنراتیو با نسبت تقسیم بر دو.....۱۸

شکل۲-۶. اساس پدیده‌ی تزریق-قفل (الف) نوسان‌ساز با نوسان آزاد (ب) نوسان‌ساز قفل شده.....۲۰

شکل۲-۷. تقسیم‌کننده‌ی فرکانسی تزریق-قفل (الف) تقسیم‌کننده مبتنی بر نوسان‌سازهای LC با نسبت تقسیم دو (ب) تقسیم‌کننده مبتنی برنوسان‌ساز حلقوی با نسبت تقسیم سه.....۲۱

فصل سوم

شکل ۳-۱. بلوک دیاگرام ساده یک نوسان‌ساز LC.....۲۸

شکل۳-۲. انواع نوسان‌سازهای LC: (الف) نوسان‌ساز LC ساده (ب) نوسان‌ساز LC مکمل.....۲۹

شکل ۳-۳. ساختار نوسان‌ساز کولپیتس تک-سر.....۳۱

شکل ۳ -۴. ساختار نوسان‌ساز کولپیتس تفاضلی ۳۲

شکل ۳-۵. مقایسه نویزفاز خروجی یک نوسان‌ساز ایده‌آل با یک نوسان‌ساز واقعی ۳۴

شکل ۳-۶. عملکرد نویزفاز تقسیم‌کننده فرکانسی در حالت تزریق-قفل ۳۵

شکل ۳-۷. تغییرات فاز مدار RLC با ضریب کیفیت(Q) ۳۶

شکل ۳-۸. ساختار یک LC-ILFD نسبت دو با روش تزریق غیرمستقیم ۴۳

شکل ۳-۹. ساختار یک LC-ILFD نسبت دو با روش تزریق مستقیم ۴۴

شکل ۳-۱۰. یک ILFD نسبت سه با ورودی/خروجی تک-سر ۴۵

شکل ۳-۱۱. ساختار یک LC-ILFD نسبت سه با روش تزریق سری ۴۶

شکل ۳-۱۲. ساختار یک LC-ILFD نسبت سه با روش تزریق موازی ۴۷

شکل ۳-۱۳. ساختار یک LC-ILFD نسبت سه با روش تزریق به بالک ۵۱

شکل ۳-۱۴. ساختار یک LC-ILFD نسبت سه با روش تزریق مستقیم ۵۲

فصل چهارم

شکل۴-۱. شکل موج خروجی ILFD (الف) با نسبت تقسیم سه (ب) با نسبت تقسیم دو در حوزه‌ی زمان ۵۸

شکل۴-۲. طیف خروجی ILFD (الف) با نسبت تقسیم دو (ب) با نسبت تقسیم دو ۵۹

شکل ۴-۳. طیف خروجی ILFD با نسبت تقسیم دو ۶۰

شکل ۴-۴. منحنی لیساژر برای زوایا و نسبت‌های a و b های مختلف ۶۲

شکل۴-۵. معیارهای قفل‌شدگی در حالت قفل توسط (الف) شکل موج زمانی خروجی و ورودی (ب) طیف فرکانس خروجی (ج) و معیار پیشنهادی(منحنی لیساژر) ۶۴

شکل۴-۶. معیارهای قفل‌شدگی در مرز قفل‌شدگی توسط (الف) شکل موج خروجی و ورودی در حوزه‌ی زمان (ب) طیف فرکانس خروجی (ج) و معیار پیشنهادی(منحنی لیساژر) ۶۵

شکل۴-۷. معیارهای قفل شدگی در حالت عدم قفل توسط (الف) شکل موج خروجی و ورودی در حوزه‌ی زمان (ب) طیف فرکانس خروجی (ج) و معیار پیشنهادی(لیساژر)..... ۶۶

شکل ۴-۸. ساختار مدار ILFD پیشنهادی..... ۶۹

شکل ۴-۹. بلوک دیاگرام ILFD با نسبت تقسیم سه..... ۷۱

شکل ۴-۱۰. ساختار مدار ILFD پیشنهادی با نسبت تقسیم سه..... ۷۲

شکل ۴-۱۱. تغییرات فرکانس نوسان بر حسب ولتاژ کنترل برای تقسیم‌کننده‌ی پیشنهادی..... ۷۶

شکل ۴-۱۲. شکل‌موج شبیه‌سازی شده خروجی ILFD پیشنهادی برای V_{dd}=1.6 V، V_{inj}=1.4 V و V_{tune}= 0.85 V..... ۷۷

شکل ۴-۱۳. شکل‌موج‌های خروجی ILFD پیشنهادی برای V_{dd}=1.6 V، V_{inj}=1.4 V و V_{tune}= 0.85 V..... ۷۸

شکل ۴-۱۴. رسم معیار قفل‌شدگی (الف) در حالت قفل (ب) در حالت عدم قفل..... ۷۸

شکل ۴-۱۵. طیف خروجی تقسیم‌کننده (الف) در حالت قفل (ب) در حالت عدم قفل..... ۷۹

شکل ۴-۱۶. نویزفاز ILFD پیشنهادی با نسبت تقسیم سه (V_{dd}=1.6V، V_{tune}=0.85V، V_{inj}=1.4V، P_{inj}=0dBm)..... ۷۹

شکل ۴-۱۷. حساسیت ورودی شبیه‌سازی شده برای تقسیم‌کننده پیشنهادی. V_{dd}=1.6 V، V_{inj}= 1.4 V، از راست به چپ، V_{tune}= 1.6~0 V. (الف) با پله‌های 0.1 V و (ب) با پله‌های 0.05 V..... ۸۰

شکل ۴-۱۸. بلوک دیاگرام ILFD با نسبت تقسیم دو..... ۸۲

شکل ۴-۱۹. ساختار مدار ILFD پیشنهادی با نسبت تقسیم دو..... ۸۴

شکل ۴-۲۰. تغییرات فرکانس نوسان بر حسب ولتاژ کنترل برای تقسیم‌کننده‌ی پیشنهادی..... ۸۵

شکل ۴-۲۱. شکل‌موج شبیه‌سازی شده خروجی ILFD پیشنهادی برای V_{dd}=1.6 V، V_{inj}=1.4 V و V_{tune}= 0.85 V..... ۸۵

شکل ۴-۲۲. شکل‌موج‌های خروجی ILFD پیشنهادی برای V_{dd}=1.6 V، V_{inj}=0.15 V و V_{tune}= 0.85 V..... ۸۶

شکل ۴-۲۳. رسم معیار قفل‌شدگی (الف) در حالت قفل (ب) در حالت عدم قفل..... ۸۷

شکل ۴-۲۴. طیف خروجی تقسیم‌کننده (الف) در حالت قفل (ب) در حالت عدم قفل.....۸۷

شکل ۴-۲۵. نویزفاز ILFD پیشنهادی با نسبت تقسیم دو (V_{dd}=1.6V، V_{tune}=0.85V، V_{inj}=0.15V، P_{inj}=0dBm).....۸۸

شکل ۴-۲۶. حساسیت ورودی اندازه‌گیری شده برای تقسیم‌کننده پیشنهادی. V_{dd}=1.6 V، V_{inj}= 0.15 V، از راست به چپ، V_{tune}= 1.6~0 V با پله‌های 0.1 V.....۸۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

فصل دوم

جدول۲-۱. مقایسه عملکرد دو فیلیپ فلاپ CML و TSPC ۱۶

جدول۲-۲. مقایسه تقسیم‌کننده‌های فرکانسی مختلف ۲۴

فصل چهارم

جدول ۴-۱. مقادیر پارامترهای تقسیم‌کننده‌ی پیشنهادی ۷۶

جدول ۴-۲. بازه‌ی قفل در گوشه‌های ساخت و دماهای مختلف ۸۱

جدول ۴-۳. خلاصه‌ی عملکرد و مقایسه بین ILFDهای مختلف در حالت تقسیم برسه ۸۲

جدول ۴-۴. بازه‌ی قفل در گوشه‌های ساخت و دماهای مختلف ۸۹

جدول ۴-۵. خلاصه‌ی عملکرد و مقایسه بین ILFDهای مختلف در حالت تقسیم بر دو ۹۰

فصل اول

پیشگفتار

۱–۱ مقدمه

امروزه یکی از مهمترین صنایع، صنایع ارتباطات و مخابرات است. در سال‌های اخیر رشد چشمگیر این صنعت بسیار قابل توجه بوده است و توسعه فناوری و نیاز روزافزون به وسایل ارتباطی از قبیل تلفن، موبایل، رادیو، تلویزیون، ماهواره و... منجر به تولید سیستم‌هایی با سرعت بیشتر، هزینه کمتر و مصرف توان پایین شده است. از این رو طراحی سیستم‌هایی که بتواند در فرکانس‌های بالا و سرعت زیاد به خوبی عمل کرده و در عین حال دارای مصرف توان کم، ولتاژ تغذیه پایین و عملکرد بالا باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با رشد تکنولوژی، سنتزکننده‌های فرکانسی[۱] بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سنتزکننده‌های فرکانسی برای تولید وسیعی از محدوده‌های فرکانسی در سیستم‌های الکترونیکی به کار برده می‌شوند. از این رو در تمام سیستم‌های الکترونیکی پیشرفته که در فرکانس‌های بالا کار می‌کنند به منظور تبدیل فرکانس یا تقسیم فرکانس به فرکانس‌های پایین‌تر، از سنتزکننده‌های فرکانس استفاده می‌شود. امروزه سنتزکننده‌ها کاربردهای وسیعی در سیستم‌های GPS [۲]، گیرنده‌های رادیویی، تلفن‌های بیسیم، تلفن-های ماهواره‌ای و... را یافته‌اند. سنتزکننده‌های فرکانسی توانایی تولید سیگنال‌هایی در بازه‌ی فرکانسی مطلوب را داشته و از بخش‌هایی مانند تقسیم‌کننده فرکانس، ضرب‌کننده فرکانس و میکسر فرکانسی

[۱] Frequency Synthesizer

[۲] Global Positioning System

(ب)