



دانشگاه صنعتی نوشیروانی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

موضوع

## تحلیل و بررسی نویز فاز در نوسان ساز هارتلی

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق گرایش الکترونیک

**استاد راهنما:**

دکتر غلامرضا اردشیر

**استاد مشاور:**

دکتر حسین میانرئیمی

**نگارش:**

صادق رئیسی اردلی

پاییز ۸۹

با تشکر از استادان گرانقدر دکتر اردشیر و دکتر میانرعیمی که انجام این تحقیق بدون کمک و

راهنمایی‌های این بزرگواران میسر نمی‌شد.

و قدردانی از تمامی استادانی که از کمک آنها برای بهتر شدن کارسود برده‌ام.

و سپاس و تشکر از تمامی دوستانی که از همراهی آنان همواره بهره‌مند بوده‌ام.

تقدیم به :

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که سنگینی حضور و حمایتشان تکیه گاه همیشگی من است و

تقدیم به دانشجویان پرتلاشی که مملکت ما در انتظار سازندگی ها و قدمهای موثر آنان است.

## چکیده

این رساله با بررسی تحلیلی ساختار نوسان‌ساز هارتلی، استخراج و محاسبه معادلات مربوط به آن در حالت خطی و در حالت کلی و تحلیل این روابط به روش‌های مختلف، سعی بر ارائه رابطه‌ای تحلیلی برای نویز فاز در مدار نوسان‌ساز هارتلی دارد. جهت برآورده شدن این هدف به پیاده‌سازی روش‌های مختلف برای تحلیل دامنه نوسان در این نوسان‌ساز پرداخته و از روی این روابط تحلیلی و عددی اعمال شده، روابطی تحلیلی برای نویز فاز ارائه می‌کند. برای تحلیل نوسان‌ساز هارتلی با هدف یافتن روشی برای بررسی نویز فاز در این مدار اسیلاتوری، سه روش مجزا برای بدست آوردن دامنه بکار برده شد. در روش اول که روشی عددی است دامنه نوسان را با دقتی بسیار خوب به کمک روش FDTD محاسبه کرده‌ایم. این روش دارای دقت بسیار خوبی است و از دو روش تحلیلی بعدی دقت بالاتری دارد. روش دوم، که روشی با رویکرد تحلیلی است، براساس کلاس کاری نوسان‌ساز به عنوان تقویت کننده و با استفاده از زاویه هدایت در این مدار بررسی شد و به جواب خوبی برای دامنه نوسان منجر شده است. روش سوم محاسبه دامنه نوسان، روشی تحلیلی و بر پایه فعالیت ترانزیستور در تمامی نواحی کاری خود قرار دارد و دامنه بدست آمده از این روش نیز دقت به نسبت خوبی دارد. در ادامه، با اعمال سه روش محاسبه نویز فاز در مدارات نوسان‌ساز، روابطی را برای نویز فاز در هارتلی بدست آورده و با هم مقایسه نمودیم. رابطه بدست آمده از تئوری خطی تغییرپذیر با زمان را به عنوان رابطه نویز فاز در نوسان‌ساز هارتلی معرفی کردیم. سپس نتایج حاصل را با شبیه‌سازی مدار به کمک ADS مقایسه کردیم. در نهایت از روی این مقایسه، بهترین رابطه در مقایسه با شبیه‌سازی را به عنوان رابطه نویز فاز در هارتلی مورد استفاده قرار می‌دهیم. در نهایت امر، تغییر نویز فاز بر حسب تغییر پارامترهای مدار مورد بررسی قرار داده و به مقادیر مناسب برای کم کردن نویز فاز در نوسان‌ساز هارتلی می‌رسیم. به منظور ارزیابی نتایج بدست آمده، یک نوسان‌ساز با فرکانسی در حدود ۲ گیگا هرتز با تکنولوژی TSMC CMOS 0.18 $\mu\text{m}$  و ولتاژ تغذیه ۱.۸ ولت طراحی شده که نتایج بدست آمده را تایید می‌کند.

## واژه‌های کلیدی:

نوسان‌ساز، نوسان‌ساز هارتلی، دامنه نوسان، فرکانس نوسان، نویز فاز، روش FDTD، زاویه هدایت

## **Abstract**

*This thesis presents some analytical and numerical approaches to extract the exact closed form equations for phase noise and amplitude oscillation in Hartley oscillator using an exact considering for Hartley structure and with extraction the equations describing the Hartley circuit. Therefore, the different approaches are applied in this circuit for oscillation amplitude analysis. Then using these analyses, the analytical equations for phase noise in hartley oscillator are presented. For circuit analysis to find an approach for consider phase noise, we use three approaches. In first approach that it is a numerical approach, the oscillation amplitude was calculated with a very good accuracy using FDTD method. This approach has more accuracy from the other approaches used in here. The second approach, that is a analytical method, based on the operation oscillator class as an amplifier and using the conduction angle in this circuit was considered. In third approach, the calculating for oscillation amplitude is analytical and is based on operating transistor in all regions such as saturation, triode and cutoff regions. The amplitude extraction by this approach has a good accuracy too. Then, with applying three approaches, present for phase noise analysis in oscillators, we can extract equations for phase noise in Hartley oscillator and then compare these equations with together. Finally, using LTV model we find the analytical equation for phase noise in Hartley oscillator. These results are compared with simulation by ADS software again. Now from these comparisons, the best equation was used for phase noise in Hartley oscillator. We consider the phase noise change versus circuit parameters changes and then we can arrive to the appropriate parameters for low phase noise oscillator. For the results assessment, an oscillator with 2GHz frequency using TSMC CMOS 0.18 $\mu$ m and with 1.8V power supply was designed. The result from this design has a good agreement with our extracted equations.*

## **Index Terms**

*Oscillator, Hartley oscillator, oscillation amplitude, oscillation frequency, phase noise, FDTD method, conduction angle*

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه ای بر نوسان سازها و نویز فاز

۱-۱- مقدمه.....	۱
۲-۱- نوسان سازها.....	۲
۳-۱- انواع نوسان سازها.....	۴
۱-۳-۱- نوسان سازهای حلقوی.....	۴
۲-۳-۱- مدار با وارونگرهای مقاومتی.....	۵
۳-۳-۱- مدار با وارونگر زوج تفاضلی.....	۶
۴-۳-۱- نوسان ساز با وارونگر <i>CMOS</i> .....	۷
۵-۳-۱- نوسان سازهای <i>LC</i> .....	۸
۴-۱- نویز.....	۹
۱-۴-۱- مشخصه های آماری نویز.....	۹
۲-۴-۱- طیف نویز.....	۱۰
۳-۴-۱- توزیع دامنه.....	۱۰
۴-۴-۱- منابع همبسته و ناهمبسته.....	۱۱
۵-۴-۱- منابع نویز.....	۱۱
۶-۴-۱- نویز حرارتی.....	۱۲
۷-۴-۱- نویز حرارتی مقاومت.....	۱۲
۸-۴-۱- نویز حرارتی در ماسفت.....	۱۳

- ۱۴-۹-۴-۱- شات نویز .....
- ۱۴-۱۰-۴-۱- نویز فلیکر .....
- ۱۵-۵-۱- نویز فاز .....
- ۱۶-۱-۵-۱- اصول ناپایداری فرکانس .....
- ۱۷-۱-۱-۵-۱- حوزه فرکانس .....
- ۱۸-۲-۱-۵-۱- حوزه ی زمان .....
- ۱۹-۲-۵-۱- تعریف نویز فاز .....
- ۲۳-۶-۱- خلاصه کار در این پایان نامه .....

## فصل دوم: نوسان ساز هارتلی

- ۲۶-۱-۲- شبکه‌های RLC .....
- ۲۶-۱-۱-۲- شبکه‌های RLC موازی .....
- ۲۷-۲-۱-۲- ضریب کیفیت .....
- ۲۸-۳-۱-۲- شبکه‌های RLC سری .....
- ۲۹-۲-۲- نوسان سازهای LC .....
- ۳۰-۱-۲-۲- نوسان سازهای قابل تنظیم LC .....
- ۳۰-۲-۲-۲- ساختارهای اصلی نوسان ساز LC .....
- ۳۴-۳-۲- تحلیل نوسان ساز هارتلی .....
- ۳۴-۱-۳-۲- تحلیل خطی نوسان ساز هارتلی .....
- ۳۷-۴-۲- معادلات کلی حاکم بر نوسان ساز هارتلی .....
- ۳۸-۱-۴-۲- معادلات مدار نوسان ساز هارتلی در حالت کلی .....

- ۳۹-۲-۴-۲- معادلات حاکم بر مدار در ناحیه اشباع ترانزیستور ..... ۳۹
- ۳۹-۳-۴-۲- معادلات حاکم بر مدار در ناحیه تریود ترانزیستور ..... ۳۹
- ۴۰-۴-۴-۲- معادلات حاکم بر مدار در ناحیه قطع ترانزیستور ..... ۴۰
- ۴۱-۵-۲- خلاصه فصل ..... ۴۱

### فصل سوم: محاسبه دامنه نوسان

- ۴۲-۱-۳- روش FDTD ..... ۴۲
- ۴۶-۲-۳- تطبیق معادلات حاکم بر مدار با روش FDTD ..... ۴۶
- ۴۶-۱-۲-۳- تطبیق معادلات نوسان ساز هارتلی با FDTD ..... ۴۶
- ۴۷-۳-۳- روش تحلیلی محاسبه دامنه نوسان به کمک زاویه هدایت ..... ۴۷
- ۴۹-۴-۳- تحلیل سیگنال بزرگ مدار ..... ۴۹
- ۵۰-۱-۴-۳- تحلیل مدار در حالت اشباع ترانزیستور ..... ۵۰
- ۵۱-۲-۴-۳- تحلیل مدار در حالت دوم ..... ۵۱
- ۵۳-۳-۴-۳- تحلیل مدار در حالت سوم ..... ۵۳
- ۵۵-۵-۳- خلاصه فصل ..... ۵۵

### فصل چهارم: روش‌های محاسبه نویز فاز در هارتلی

- ۵۷-۱-۴- اعمال روش لسن ..... ۵۷
- ۵۸-۱-۱-۴- محاسبه پارامترهای مورد نیاز ..... ۵۸
- ۵۸-الف. محاسبه نویز فاکتور  $F$  ..... ۵۸
- ۵۹-ب. محاسبه فرکانس گوشه  $\omega_{\frac{1}{F^3}}$  ..... ۵۹
- ۶۱-۲-۴- محاسبه نویز فاز به کمک تابع تبدیل ..... ۶۱



- ۶۲.....سیستم نوسانی خطی.....۱-۲-۴
- ۶۵.....تئوری نویز فاز خطی تغییر پذیر با زمان.....۳-۴
- ۶۹.....نویز فاز حاصل از نویز تصادفی ورودی.....۱-۳-۴
- ۷۱.....بدست آوردن دامنه نوسان.....۲-۳-۴
- ۷۱.....منابع نویز مدار.....۳-۳-۴
- ۷۱.....الف- منابع نویز سفید.....
- ۷۵.....ب- نویز فلیکر.....
- ۷۷.....۴-۴ خلاصه فصل.....

### فصل پنجم: نتایج و شبیه‌سازی مدار

- ۷۹.....۱-۵ نتایج و شبیه‌سازی‌های مدار.....
- ۷۹.....۱-۱-۵ نتایج حاصل از روش لسن.....
- ۸۲.....۲-۱-۵ نتایج حاصل از روش تابع تبدیل.....
- ۸۴.....۳-۱-۵ نتایج حاصل از روش حاجی میری.....
- ۹۸.....۲-۵ شبیه‌سازی‌های مدار.....
- ۱۰۵.....۳-۵ خلاصه فصل.....

### فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهاد

- ۱۰۷.....۱-۶ نتیجه‌گیری.....
- ۱۰۸.....۲-۶ پیشنهاد ادامه کار.....

مراجع

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه ای بر نوسان سازها و نویز فاز

- شکل ۱-۱: سیستم فیدبک دار..... ۳
- شکل ۲-۱: نمونه ای از مدارات نوسان ساز حلقوی..... ۵
- شکل ۳-۱: مدار فیدبکی سورس مشترک (الف) یک طبقه (ب) دو طبقه..... ۶
- شکل ۴-۱: مدار نوسان ساز وارون گر مقاومتی سه طبقه..... ۶
- شکل ۵-۱: پیاده سازی دیفرانسیلی نوسان ساز ۳ طبقه..... ۷
- شکل ۶-۱: نوسانگر حلقوی با چهار طبقه ی زوج دیفرانسیلی..... ۷
- شکل ۷-۱: یک طبقه ی مدار با اینورتر *CMOS*..... ۸
- شکل ۸-۱: یک نوسان ساز حلقوی با اینورتر *CMOS*..... ۸
- شکل ۹-۱: مدار نوسان ساز تانک LC..... ۹
- شکل ۱۰-۱: مدار معادل نویز حرارتی مقاومت..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱: پیوندهای آویزان در مرز اکسید سیلیکن..... ۱۵
- شکل ۱۲-۱: طیف یک نوسان ساز ایده آل و واقعی..... ۱۷
- شکل ۱۳-۱: اثر نویز فاز در حضور کانال مجاور قوی..... ۱۸
- شکل ۱۴-۱: اثر جیتر روی زمان های گذار..... ۱۸
- شکل ۱۵-۱: اثر جیتر روی مدار نمونه بردار و نگهدارنده..... ۱۹
- شکل ۱۶-۱: نویز فاز در پهنای باند واحد..... ۲۰
- شکل ۱۷-۱: طیف نویز فاز برای یک نوسان ساز..... ۲۰
- شکل ۱۸-۱: مدار نوعی نوسان ساز LC..... ۲۲

## فصل دوم: نوسان ساز هارتلی

- شکل ۱-۲: مدار تانک RLC موازی..... ۲۷
- شکل ۲-۲: تغییرات امپدانس حوالی فرکانس تشدید در RLC سری و موازی..... ۲۹
- شکل ۳-۲: فیدبک از (الف) درین به گیت (ب) درین به سورس..... ۳۱
- شکل ۴-۲: فیدبک مستقیم از کلکتور به امیتر..... ۳۱
- شکل ۵-۲: وارد کردن یک مبدل امپدانس به مدار..... ۳۲
- شکل ۶-۲: مبدل امپدانس به کمک ترانسفورماتور..... ۳۲
- شکل ۷-۲: مدار نوسان سازهای (الف) کولپیتس و (ب) هارتلی..... ۳۳
- شکل ۸-۲: (الف) نوسان ساز هارتلی (ب) مدل سیگنال کوچک نوسان ساز هارتلی..... ۳۵
- شکل ۹-۲: نوسان ساز هارتلی..... ۳۸

## فصل چهارم: روش‌های محاسبه نویز فاز در هارتلی

- شکل ۱-۴: طیف نویز فاز..... ۵۷
- شکل ۲-۴: تفاوت گوشه‌های  $\frac{1}{f^3}$  نویز فاز و  $\frac{1}{f}$  نویز افرازه بر حسب ضرایب  $C_n$ ..... ۶۰
- شکل ۳-۴: یک نوسان ساز LC نوعی..... ۶۱
- شکل ۴-۴: نوسان ساز با دو انتگرال‌گیر و  $Q=0$ ..... ۶۲
- شکل ۵-۴: سیستم نوسان سازی خطی..... ۶۲
- شکل ۶-۴: شکل نویز در نوسان ساز..... ۶۴
- شکل ۷-۴: سیستم نوسانی با بهره فیدبک مجزا..... ۶۵
- شکل ۸-۴: اعمال ضربه به مدار نوسان سازی ساده..... ۶۶
- شکل ۹-۴: اعمال ضربه به مدار در دو زمان متفاوت..... ۶۶

شکل ۴-۱۰: ISF برای نوسان سازهای (الف) حلقوی ۴ طبقه با اینورتر (ب) کولپیتس (ج) حلقوی

- ۵ طبقه با مقاومت ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۱: بلوک دیاگرام معادل پروسه کامل ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۲: بلوک دیاگرام معادل برای تجزیه تابع حساسیت ضربه ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۳: تبدیل نویز به اغتشاش فاز و باندهای کناری نویز فاز ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۴: تابع حساسیت ضربه برای نوسان ساز هارتلی ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۵: منابع نویز در نوسان ساز هارتلی ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۶: اعمال اثر سیکل ساکن بودن منبع نویز ترانزیستور بر تابع حساسیت ضربه ترانزیستور ..... ۷۵

### فصل پنجم: نتایج و شبیه‌سازی مدار

- شکل ۵-۱: مدار نوسان ساز هارتلی شبیه‌سازی شده در ADS ..... ۷۹
- شکل ۵-۲: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش لسن ..... ۸۰
- شکل ۵-۳: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش لسن در آفست‌های بالاتر ..... ۸۰
- شکل ۵-۴: طیف نویز فاز در آفست ۵۰۰ کیلو هرتز برای تغییرات مقاومت مدار تانک ..... ۸۱
- شکل ۵-۵: طیف نویز فاز در آفست ۵۰۰ کیلو هرتز برای تغییرات خازن مدار تانک ..... ۸۲
- شکل ۵-۶: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش رضوی (تابع تبدیل) ..... ۸۳
- شکل ۵-۷: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش تابع تبدیل برای آفست‌های کمتر ..... ۸۳
- شکل ۵-۸: مقایسه طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش تابع تبدیل و روش لسن ..... ۸۴
- شکل ۵-۹: تابع حساسیت ضربه محاسبه شده به دو روش مستقیم و روش تقریبی برای ترانزیستور ..... ۸۵
- شکل ۵-۱۰: مقایسه شکل خروجی بدست آمده از روش FDTD و شبیه‌سازی مدار ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۱: مقایسه شکل خروجی بدست آمده از روش FDTD و شبیه‌سازی مدار برای زمان دیگر ..... ۸۶

شکل ۵-۱۲: مقایسه شکل خروجی بدست آمده از روش FDTD و شبیه‌سازی مدار نوسان‌ساز کولپیتس.....۸۷

شکل ۵-۱۳: شکل خروجی بدست آمده از روش تحلیلی به کمک بسط جریان بر حسب زاویه هدایت.....۸۷

شکل ۵-۱۴: مقایسه شکل خروجی بدست آمده از روش FDTD، روش تحلیلی و شبیه‌سازی مدار.....۸۸

شکل ۵-۱۵: مقایسه شکل خروجی بدست آمده از روش FDTD، روش تحلیلی و شبیه‌سازی مدار

برای زمانی دیگر.....۸۸

شکل ۵-۱۶: مقایسه شکل خروجی بدست آمده از روش FDTD، روش تحلیلی با اضافه کردن

مقدار DC و شبیه‌سازی مدار.....۸۹

شکل ۵-۱۷: مقایسه شکل موج خروجی حاصل از معادله (۳-۴۶) و شبیه‌سازی مدار.....۹۰

شکل ۵-۱۸: مقایسه شکل موج خروجی حاصل از معادله (۳-۵۴) و شبیه‌سازی مدار.....۹۰

شکل ۵-۱۹: مقایسه شکل موج خروجی حاصل از معادله (۳-۶۳) و شبیه‌سازی مدار.....۹۱

شکل ۵-۲۰: مقدار ثابت در ولتاژ سورس بر حسب (الف) جریان بایاس (ب) ولتاژ بایاس.....۹۱

شکل ۵-۲۱: دامنه نوسان در ولتاژ خروجی در حالتی که ترانزیستور تنها در ناحیه اشباع وارد

می‌شود بر حسب (الف) نسبت تقسیم ولتاژ در سلف‌های مدار (ب) جریان بایاس.....۹۲

شکل ۵-۲۲: دامنه نوسان در ولتاژ خروجی در حالتی که ترانزیستور تنها در ناحیه اشباع و

قطع وارد می‌شود بر حسب (الف) جریان بایاس (ب) نسبت تقسیم ولتاژ در سلف‌های مدار.....۹۲

شکل ۵-۲۳: دامنه نوسان در ولتاژ خروجی در حالتی که ترانزیستور در هر سه ناحیه اشباع،

قطع و تریود وارد می‌شود بر حسب (الف) ولتاژ بایاس (ب) نسبت تقسیم ولتاژ در سلف‌های مدار.....۹۲

شکل ۵-۲۴: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری.....۹۳

شکل ۵-۲۵: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری در آفست کمتر.....۹۳

شکل ۵-۲۶: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری بر حسب مقادیر  $n$ .....۹۵

شکل ۵-۲۷: طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری بر حسب  $R$ .....۹۶

- شکل ۵-۲۸ : طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری بر حسب  $C_1$ .....۹۶
- شکل ۵-۲۹ : طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری بر حسب  $I_1$ .....۹۷
- شکل ۵-۳۰ : طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری بر حسب  $I_2$ .....۹۷
- شکل ۵-۳۱ : طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک روش حاجی‌میری بر حسب تغییرات  $I_B$ .....۹۸
- شکل ۵-۳۲ : شکل خروجی مدار نوسان‌ساز هارتلی.....۹۹
- شکل ۵-۳۳ : طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی مدار با ADS.....۱۰۰
- شکل ۵-۳۴ : طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی مدار با ADS در آفست کمتر.....۱۰۰
- شکل ۵-۳۵ : مقایسه طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی و روش LTV.....۱۰۱
- شکل ۵-۳۶ : مقایسه طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی و روش LTV با  
تعداد نقاط بیشتر شبیه‌سازی شده (الف) برای آفست‌های فرکانسی پایین‌تر (ب) برای آفست‌های بالاتر.....۱۰۱
- شکل ۵-۳۷ : مقایسه طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی و روش LTV و روش لسن.....۱۰۲
- شکل ۵-۳۸ : مقایسه طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی و روش LTV و روش لسن  
برای آفست کمتر.....۱۰۲
- شکل ۵-۳۹ : مقایسه طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی و روش LTV و روش لسن و  
روش تابع تبدیل رضوی.....۱۰۳
- شکل ۵-۴۰ : مقایسه طیف نویز فاز محاسبه شده به کمک شبیه‌سازی و روش LTV و روش لسن و  
روش تابع تبدیل رضوی برای آفست‌های پایین‌تر.....۱۰۳

## فصل اول

### مقدمه ای بر نوسان سازها و نویز فاز

#### ۱-۱- مقدمه

شناسایی نویز در مدارات الکترونیکی یکی از چالش‌های مهم در مدارات مجتمع است. کارایی این مدارات به طرق مختلف تحت تاثیر نویز قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، نویز الکترونیکی از فاکتورهای اساسی موثر بر ماکزیمم سرعت ممکن ارتباطی در سیستم‌های مخابراتی است. با توسعه‌ی تکنولوژی CMOS، این تکنولوژی علاقه زیادی به استفاده از مدارات مجتمع RF<sup>۱</sup> با نویز کم نشان داده است. اخیرا فرستنده گیرنده‌های مخابراتی با استفاده از تکنولوژی CMOS تحقق یافته و کاربرد وسیعی یافته‌اند [۱۳][۲۵][۳۰]. از بلوک‌های اساسی تشکیل دهنده‌ی این فرستنده گیرنده‌ها می‌توان به نوسان سازهای با نویز کم اشاره کرد. نوسان سازهای LC به دلیل داشتن تنها یک عنصر فعال دارای نویز اندکی در مدار خود هستند.

رشد نمایی اخیر در مخابرات بی‌سیم، تقاضا برای کانال‌های مخابراتی با امکان دسترسی بیشتر، را نیز زیادتیر کرده است. نویز فاز پارامتری است که این کارایی را تعریف و محدود می‌کند. به منظور برآورده نمودن تقاضای مذکور، نوسان سازهایی با نویز فاز کمتر مورد نیاز می‌باشند. در دنیای دیجیتال نویز فاز در قالب جیتر مطرح

---

۱. Radio Frequency

می‌شود و به طور مستقیم روی حاشیه‌های زمان بندی اثر گذاشته و کارایی سیستم را محدود می‌کند. از اینرو در نوسان سازهای دیجیتال نیاز به پالس با دقت فرکانسی بالا و جیتتر<sup>۱</sup> کم احساس می‌شود. در مدارات دیجیتال دقت زمان بندی پالس‌ها، بیشترین تعداد عملیات در یک واحد زمانی را مشخص کند، در میکروپروسورها و همزمان کننده‌ها نیز پالس‌های دقیق باید توسط نوسان سازها با مقدار جیتتر کم تولید و اعمال شوند.

تغییرات فاز و فرکانس یکی از موضوعات بسیار اساسی در مطالعات امروزی شده است [۲]، [۱۰]. اگر چه مدل‌های بسیاری برای نویز فاز نوسان سازها ارائه شده است، اما هر یک از این مدل‌ها با محدودیت‌ها و فرض‌های زیادی ارائه شده‌اند و بسیاری از این مدل‌های ارائه شده بر پایه خطی و تغییرناپذیر با زمان بودن سیستم نوسان-ساز ارائه شده‌اند [۴]، [۶]، [۱۴]. در بسیاری از روش‌های ارائه شده اندازه‌گیری‌های تجربی زیادی صورت گرفته که دارای محدودیت‌هایی برای تعریف نویزهای با فرکانس کم مثل نویز  $1/f$ ، هستند [۴]. هر نوسان ساز یک سیستم متغیر با زمان متناوب است و ذات متغیر با زمان بودن آن باید برای مدل کردن دقیق نویز فاز لحاظ گردد [۱].

در مخابرات بی سیم طیف فرکانسی یکی از پارامترهای با ارزش به حساب می‌آید. فرستنده گیرنده‌های مخابراتی به مبدل فرکانسی ساخته شده توسط نوسان سازها و نیز خلوص طیفی آنها توجه ویژه ای دارند و آن را به عنوان یک عامل محدود کننده برای تعداد کانال‌ها و کاربردهای مورد استفاده به حساب می‌آورند [۱]. به همین دلیل کارایی نوسان ساز مورد استفاده و بهینه بودن نویز فاز در مدار نوسان ساز امری ضروری تلقی می‌گردد.

در این فصل، ابتدا نوسان سازها و بلوک‌های اساسی آنها توضیح داده خواهد شد و در ادامه به معرفی نویز و اثر آن در مدارهای نوسان ساز پرداخته خواهد شد. در ادامه نیز نویز فاز معرفی می‌شود.

## ۱-۲- نوسان سازها

نوسان سازها بلوک‌های اساسی در بسیاری از سیستم‌های ارتباطی امروزی هستند. برای مثال در مدارات فرکانس رادیویی، نوسان سازها ترجمه کننده فرکانس از اطلاعات سیگنال بوده و نیز بمنظور انتخاب کانال به کار می‌روند. همچنین نوسان سازها در مدارات دیجیتال که برای همزمان‌سازی<sup>۲</sup> نیاز به یک مرجع زمانی مانند سیگنال کلاک می‌باشد، وجود دارند.

۱. Jitter

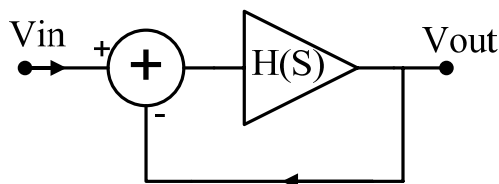
۲. Synchronization



نوسان سازها به طور گسترده‌ای در مدارهای فرستنده گیرنده نیز استفاده می شوند. به همین منظور هیچگاه از توجه نظر طراحان RF دور نمی‌مانند. کیفیت سیگنال نوسان سازهای محلی در مدارهای فرستنده گیرنده، کیفیت داده‌های دریافتی را تحت تاثیر قرار می دهد. بنابراین یکی از نگرانی‌های اصلی برای طراحان RF ، بدست آوردن یک سیگنال دقیق و پایدار بر روی تراشه است. نوسان سازهای حلقوی و نوسان سازهای تانک LC دو نمونه از نوسان سازهای پرکاربرد در این زمینه می‌باشند. یک نوسان ساز حلقوی را می توان در ابعاد کوچکتری نسبت به نوسان سازهای تانک LC ساخت، زیرا نوسان سازهای تانک LC برای پیاده سازی سلفهای روی تراشه به فضایی بیش از ترانزیستورها نیاز دارند. با توجه به مسائل شبیه سازی و اندازه گیری، عملکرد یک نوسان ساز حلقوی در مقایسه با عملکرد یک نوسان ساز تانک LC قابل پیش بینی‌تر است، زیرا مدلسازی نوسان ساز LC به دلیل دارا بودن چندین سلف و خازن دشوارتر به نظر می‌رسد.

برای توضیح اساس کار نوسان سازها، مدار با فیدبک منفی بهره‌ی واحد شکل (۱-۱) را در نظر بگیرید. در این مدار داریم:

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{H(s)}{1+H(s)} \quad (1-1)$$



شکل ۱-۱ : سیستم فیدبک دار

در صورتی که تقویت کننده در فرکانس‌های بالا اختلاف فازی ایجاد کند که فیدبک مثبت شود، آنگاه ممکن است نوسان رخ دهد. به عبارت دقیق‌تر اگر  $s=j\omega$  و به ازای  $\omega = \omega_c$ ،  $H(j\omega_c) = -1$  شود، بهره حلقه بسته در  $\omega_c$  به سمت بی‌نهایت می‌رود. در این شرایط، مدار مولفه‌های نویزی را در  $\omega_c$  بطور غیر قابل کنترلی، تقویت می‌کند. در واقع، مولفه نویز در فرکانس  $\omega_c$  بهره واحد ضرب شده و با اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه به صورت قرینه ورودی به تفریق کننده ورودی برمی‌گردد. بعد از تفریق شدن، سیگنال ورودی و بازخوردی اختلاف بیشتری خواهند یافت. بنابراین مدار با تقویت مجدد، مولفه نویز با فرکانس  $\omega_c$  را بزرگتر می‌کند. برای آنکه

نوسان شروع شود، بهره حلقه‌ی واحد یا بزرگتر از واحد مورد نیاز است. در نهایت اگر یک مدار فیدبک منفی، بهره‌ی حلقه‌ای داشته باشد که در دو شرط زیر صدق کند:

$$|H(j\omega.)| \geq 1 \quad (2-1)$$

$$\angle H(j\omega.) = 180^\circ \quad (3-1)$$

آنگاه مدار در فرکانس  $\omega$  می‌تواند نوسان کند. این شرایط که "شرایط بارکهاوزن" نامیده می‌شوند، شرایط لازم برای نوسان بوده ولی کافی نمی‌باشند [۹]. در بخش بعدی به معرفی ساختارهای مهمی می‌پردازیم که شرایط بالا را برآورده کرده و در مدار نوسان ایجاد می‌کنند.

### ۱-۳- انواع نوسان سازها

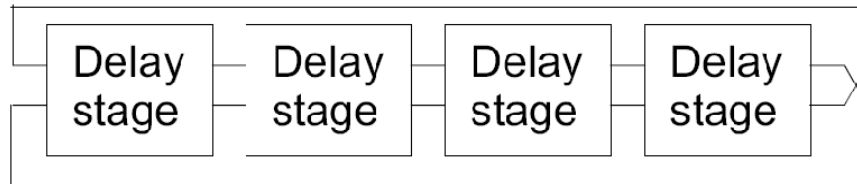
نوسان سازهای CMOS در فناوری امروزی، به صورت‌های مختلفی از جمله به صورت نوسان‌سازهای حلقوی<sup>۱</sup> و نوسان‌سازهای LC پیاده سازی می‌شوند.

#### ۱-۳-۱- نوسان سازهای حلقوی

نوسان‌ساز حلقوی، از حلقه‌ای تشکیل شده است که شامل تعدادی تقویت کننده می‌باشد. این مدارها، نمونه‌ای از مدارات کلاسیک نوسان سازی هستند. در صورتی که کل شیفت فاز در حلقه برابر  $360^\circ$  درجه گردد، مدار نوسان خواهد کرد. نمونه‌ای از نوسان سازهای حلقوی در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است. عیب اصلی این مدارها، مصرف توان زیاد و نویز فاز بالا می‌باشد. اخیراً مدارهای نوسان سازی حلقوی با نویز فاز مناسب طراحی شده‌اند. ولی مشکل مصرف توان بالای آنها نسبت به نوسان سازهای LC هنوز به طور کامل حل نشده است. [۱]، [۱۱]، [۱۲]، [۲۴]، [۲۵]

برای پیاده سازی این مدارهای نوسان سازی از ساختارهای مختلفی می‌توان استفاده کرد. در بخش بعدی بطور خلاصه به چند ساختار مدارهای نوسان ساز حلقوی اشاره می‌کنیم.

۱. Ring Oscillator



شکل ۱-۲: نمونه ای از مدارات نوسان ساز حلقوی [۹]

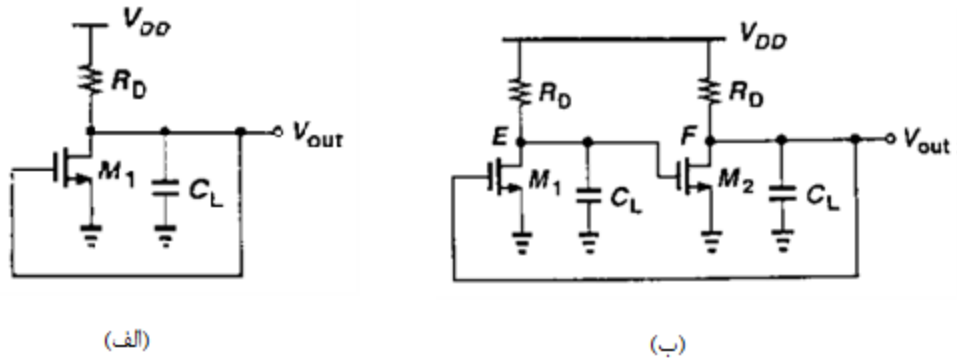
### ۱-۳-۲- مدار با وارونگرهای مقاومتی

در این ساختار تعدادی فرد و بزرگتر از یک، مدار معکوس گر<sup>۱</sup>، از نوع با بار مقاومتی، در یک حلقه قرار می‌گیرد. دلیل اینکه از یک طبقه و یا دو طبقه استفاده نمی‌شود این است که، توان ایجاد اختلاف فاز وابسته به فرکانس به اندازه کافی در این دو ساختار وجود ندارد. به عنوان مثال، ساختار ارائه شده در شکل (۱-۳-الف) را در نظر بگیرید. این ساختار یک طبقه سورس مشترک فقط یک قطب دارد، در نتیجه حداکثر اختلاف فاز ۹۰ درجه را در فرکانس بی‌نهایت می‌تواند ایجاد کند. با توجه به وارونگی سیگنال از گیت به درین و اختلاف فاز ۱۸۰ درجه بین این دو پایه ترانزیستور، در نهایت اختلاف فاز ۲۷۰ درجه را در کل حلقه داریم، که نمی‌تواند باعث رشد نوسانی در حلقه شود.

در ساختار با دو طبقه سورس مشترک شکل (۱-۳-ب) نیز مدار نوسانی نخواهد داشت. این ساختار با توجه به وارونگی سیگنال در هر طبقه سورس مشترک، فیدبک مثبت از خود نشان می‌دهد. در نتیجه به جای نوسان کردن، مدار قفل می‌کند. به این معنی که اگر ولتاژ نقطه E افزایش یابد، ولتاژ F کم شده و ترانزیستور  $M_1$  خاموش می‌شود. این عمل سبب می‌گردد که ولتاژ نقطه E دوباره زیاد شده و تا زمانی که به مقدار ولتاژ تغذیه در مدار برسد چرخه را ادامه می‌دهد [۹].

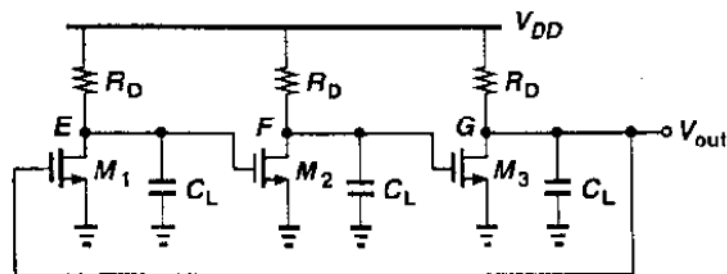
---

۱. Inverter



شکل ۳-۱: مدار فیدبکی سورس مشترک. (الف) یک طبقه (ب) دو طبقه [۹]

به این ترتیب ساختارهای حلقوی، برای نوسان به اختلاف فاز بیشتری در درون حلقه احتیاج دارند. به این منظور به سراغ مدار با سه طبقه سورس مشترک شکل (۴-۱) می‌رویم. با توجه به اینکه ساختار دو طبقه نتوانست اختلاف فاز وابسته به فرکانس لازم جهت نوسان را تولید کند، با افزودن یک طبقه دیگر می‌توان انتظار داشت که مدار به نوسان درآید. در این مدار کل اختلاف فاز حلقه با فرض یکسان بودن طبقات، به  $135^\circ$  درجه و در فرکانس بی نهایت به  $270^\circ$  درجه می‌رسد، در نتیجه اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه را در فرکانسی کوچکتر از بی نهایت خواهیم داشت که در آن بهره حلقه بزرگتر از یا مساوی با یک است. پس در صورت داشتن بهره حلقه کافی مدار واقعاً نوسان می‌کند.



شکل ۴-۱: مدار نوسان‌ساز وارون‌گر مقاومتی سه طبقه [۹]

### ۱-۳-۳- مدار با وارون‌گر زوج تفاضلی

نمونه ساده نوسان‌گر حلقوی به کمک زوج تفاضلی در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. نکته ای که می‌توان در مورد این شیوه پیاده سازی نوسان‌گر حلقوی بیان کرد، این است که تعداد طبقات در این ساختار برخلاف