



---

# طراحی حلقه های قفل فاز CMOS

از سطح مدار تا سطح معماری

---

جلد دوم  
(فصل ۸ تا ۱۵)

تألیف:

دکتر بهزاد رضوی

(استاد دانشگاه کالیفرنیا UCLA)

مترجمان:

مصطفی یارقلی

(دانشیار گروه برق دانشگاه زنجان)

محمد محمدی

(دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق دانشگاه زنجان)

سرشناسه : بهزاد رضوی .  
 عنوان و نام پدیدآور : طراحی حلقه های قفل فاز CMOS. از سطح مدار تا سطح معماری  
 نویسنده : بهزاد رضوی - مترجمان مصطفی یارقلی، محمد محمدی

مشخصات نشر : زنجان: دانشگاه زنجان، انتشارات، ۱۴۰۰.  
 مشخصات ظاهری : ۹۳۰ص: مصور، نمودار  
 شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۶۹۳۳-۲۶-۱  
 وضعیت فهرست نویسی : فیبا  
 یادداشت :  
 موضوع :  
 موضوع :  
 موضوع :  
 شناسه افزوده :  
 شناسه افزوده :  
 شناسه افزوده :  
 شناسه افزوده :  
 رده بندی کنگره :  
 رده بندی دیویی :  
 شماره کتابشناسی ملی :  
 وضعیت رکورد : فیبا



## طراحی حلقه های قفل فاز CMOS

از سطح مدار تا سطح معماری

مترجمان :

دکتر مصطفی یارقلی - محمد محمدی

ویراستار ادبی : دکتر محمد ابراهیم پور نمین

سال چاپ : ۱۴۰۰

نوبت چاپ: اول

قیمت : تومان

ناشر: انتشارات دانشگاه زنجان

صفحه آرای، طراحی جلد و چاپ : ماهان

شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۶۹۳۳-۲۶-۱

زنجان، کیلومتر ۵ جاده تبریز، دانشگاه زنجان، حوزه معاونت پژوهشی، واحد انتشارات.

تلفن: ۰۲۴-۳۳۰۵۲۶۴۱ فاکس: ۰۲۴-۳۲۲۸۳۰۷۷

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

## فهرست مطالب

|     |  |
|-----|--|
| ۴۲۹ | ..... فصل ۸: بررسی طراحی حلقه های قفل فاز                              |
| ۴۲۹ | ..... ۱-۸ بررسی بیشتر توابع تبدیل حلقه قفل فاز                         |
| ۴۳۶ | ..... ۱-۱-۸ محدودیت های تقریب زمان پیوسته                              |
| ۴۳۸ | ..... ۲-۸ مشکلات آشکار ساز فاز فرکانس                                  |
| ۴۳۹ | ..... ۳-۸ مشکلات پمپ بار   |
| ۴۳۹ | ..... ۱-۳-۸ چرخش بالا و پایین  |
| ۴۴۰ | ..... ۲-۳-۸ تبعیت ولتاژ و مدولاسیون کانال                              |
| ۴۴۴ | ..... ۳-۳-۸ عدم تطابق تصادفی   |
| ۴۴۵ | ..... ۴-۳-۸ تزریق بار و نشت ساعت                                       |
| ۴۴۷ | ..... ۵-۳-۸ دیگر اثرات غیر ایده آل پمپ بار                             |
| ۴۴۹ | ..... ۴-۸ پمپ های بار بهبود یافته                                      |
| ۴۵۲ | ..... ۵-۸ حلقه های قفل فاز با تنظیم گسسته نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ |
| ۴۵۴ | ..... ۶-۸ کاهش ریپل با فیلتر نمونه بردار                               |
| ۴۵۶ | ..... ۷-۸ نشتی فیلتر حلقه  |
| ۴۵۷ | ..... ۸-۸ کاهش خازن فیلتر  |
| ۴۵۹ | ..... ۹-۸ مصالحه بین پهنای باند و سطح مولفه ناخواسته                   |
| ۴۶۱ | ..... ۱۰-۸ نویز فاز در حلقه های قفل فاز                                |
| ۴۶۱ | ..... ۱-۱۰-۸ شکل دهی نویز فاز ورودی                                    |
| ۴۶۵ | ..... ۲-۱۰-۸ شکل دهی نویز فاز نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ             |
| ۴۷۱ | ..... ۳-۱۰-۸ نویز پمپ بار  |
| ۴۷۶ | ..... ۴-۱۰-۸ نویز فیلتر حلقه   |

|     |  |
|-----|--|
| ۴۷۸ | ..... ۵-۱۰-۸ نویز منبع                                 |
| ۴۸۵ | ..... <b>فصل ۹: بررسی طراحی حلقه قفل فاز</b>           |
| ۴۸۶ | ..... ۱-۹ فرایند طراحی                                 |
| ۴۸۸ | ..... ۲-۹ طراحی آشکارساز فاز/فرکانس                    |
| ۴۸۸ | ..... ۳-۹ طراحی پمپ بار                                |
| ۴۸۸ | ..... ۱-۳-۹ اولین طراحی پمپ بار                        |
| ۴۹۵ | ..... ۲-۳-۹ دومین طراحی پمپ بار                        |
| ۴۹۶ | ..... ۳-۳-۹ سومین طراحی پمپ بار                        |
| ۴۹۷ | ..... ۴-۳-۹ چهارمین طراحی پمپ بار                      |
| ۴۹۸ | ..... ۵-۳-۹ تداخل پمپ بار و آشکار ساز فاز / فرکانس     |
| ۵۰۲ | ..... ۴-۹ شبیه سازی‌های رفتاری حلقه قفل فاز            |
| ۵۰۲ | ..... ۱-۴-۹ ساده سازی حلقه                             |
| ۵۰۴ | ..... ۲-۴-۹ پویایی حلقه                                |
| ۵۰۶ | ..... ۳-۴-۹ اثر ریپل                                   |
| ۵۰۸ | ..... ۵-۹ شبیه سازی تابع تبدیل حلقه قفل فاز            |
| ۵۰۸ | ..... ۱-۵-۹ تقریب تک قطبی                              |
| ۵۰۹ | ..... ۲-۵-۹ استفاده از منبع مدولاسیون فرکانسی در ورودی |
| ۵۱۲ | ..... ۳-۵-۹ استفاده از مدولاسیون فازی تصادفی           |
| ۵۱۵ | ..... ۶-۹ اثر نویز فاز نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ    |
| ۵۱۵ | ..... ۱-۶-۹ مدل نویز فاز نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ  |
| ۵۱۶ | ..... ۲-۶-۹ کاهش نویز فاز نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ |

|     |  |
|-----|--|
| ۵۲۰ | ..... ۷-۹ نويز فيلتر حلقه                                |
| ۵۲۱ | ..... ۸-۹ دو برابر سازي فرکانس مرجع                      |
| ۵۲۱ | ..... ۱-۸-۹ طراحي دو برابر کننده                         |
| ۵۲۲ | ..... ۲-۸-۹ مشکلات دو برابر سازي فرکانس                  |
| ۵۲۴ | ..... ۳-۸-۹ طراحي مجدد حلقه قفل فاز با مرجع دو برابر شده |
| ۵۲۵ | ..... ۴-۸-۹ شبیه سازي های حلقه قفل فاز                   |
| ۵۲۶ | ..... ۹-۹ طراحي تقسيم کننده پس خورد                      |
| ۵۲۶ | ..... ۱-۹-۹ انتخاب توپولوژی                              |
| ۵۲۹ | ..... ۲-۹-۹ طراحي مدار تقسيم کننده                       |
| ۵۳۰ | ..... ۱۰-۹ استفاده از آشکارسازهای قفل برای کالیبراسيون   |
| ۵۳۵ | ..... ۱۱-۹ خلاصه طراحي                                   |
| ۵۴۱ | ..... <b>فصل ۱۰: حلقه های قفل فاز ديگيتال</b>            |
| ۵۴۱ | ..... ۱-۱۰ مفاهيم پایه                                   |
| ۵۴۴ | ..... ۲-۱۰ مباني تبديل آنالوگ به ديگيتال                 |
| ۵۴۴ | ..... ۱-۲-۱۰ کوانتيزه سازي                               |
| ۵۴۶ | ..... ۲-۲-۱۰ مبدل آنالوگ به ديگيتال نوري                 |
| ۵۴۹ | ..... ۳-۲-۱۰ درون يابی                                   |
| ۵۵۱ | ..... ۳-۱۰ تبديل زمان به ديگيتال                         |
| ۵۵۱ | ..... ۱-۳-۱۰ توپولوژی پایه مبدل زمان به ديگيتال          |
| ۵۵۷ | ..... ۲-۳-۱۰ اثر نويز کوانتيزه شونده                     |
| ۵۵۹ | ..... ۳-۳-۱۰ محدوده پويایی مبدل زمان به ديگيتال          |

|     |  |
|-----|--|
| ۵۶۱ | ..... ۴-۳-۱۰ نواقص مبدل زمان به دیجیتال                          |
| ۵۶۵ | ..... ۴-۱۰ طراحی مبدل زمان به دیجیتال در سطح ترانزیستوری         |
| ۵۷۱ | ..... ۵-۱۰ مبدل های زمان به ساعت بهبود یافته                     |
| ۵۷۱ | ..... ۱-۵-۱۰ مبدل زمان دیجیتال Vernier                           |
| ۵۷۴ | ..... ۲-۵-۱۰ مبدل های زمان به دیجیتال چند مسیره                  |
| ۵۷۸ | ..... ۶-۱۰ اتصال نوسان ساز و مبدل زمان به دیجیتال                |
| ۵۸۲ | ..... ۷-۱۰ نوسان سازهای کنترلی دیجیتالی                          |
| ۵۸۳ | ..... ۱-۷-۱۰ مشکل فرکانس های گسسته                               |
| ۵۸۶ | ..... ۲-۷-۱۰ اصول تبدیل دیجیتال به آنالوگ                        |
| ۵۹۱ | ..... ۳-۷-۱۰ ساختار ماتریسی                                      |
| ۵۹۵ | ..... ۴-۷-۱۰ مبدل های دیجیتال به آنالوگ درشت و ریز               |
| ۵۹۶ | ..... ۵-۷-۱۰ توپولوژی های نوسان ساز کنترل شونده دیجیتالی         |
| ۶۰۸ | ..... ۸-۱۰ پویایی حلقه   |
| ۶۰۸ | ..... ۱-۸-۱۰ پیاده سازی فیلتر دیجیتال                            |
| ۶۱۱ | ..... ۲-۸-۱۰ تناظر بین حلقه های قفل فاز آنالوگ و دیجیتال         |
| ۶۹۱ | ..... <b>فصل ۱۱: حلقه های قفل تأخیر</b>                          |
| ۶۱۹ | ..... ۱-۱۱ ایده پایه ای  |
| ۶۲۳ | ..... ۲-۱۱ پویایی حلقه   |
| ۶۲۶ | ..... ۳-۱۱ انتخاب تعداد طبقات تأخیر                              |
| ۶۲۷ | ..... ۴-۱۱ اثرات غیرایده آل                                      |
| ۶۲۷ | ..... ۱-۴-۱۱ غیر ایده آل های اتصال پمپ بار و آشکارساز فاز/فرکانس |

|     |   |
|-----|---|
| ۶۲۸ | ..... ۲-۴-۱۱ نویز منبع  |
| ۶۳۰ | ..... ۳-۴-۱۱ نویز فاز   |
| ۶۳۲ | ..... ۵-۱۱ ایجاد فازهای چندگانه                                 |
| ۶۳۷ | ..... ۶-۱۱ حلقه های قفل تأخیر ضرب فرکانسی                       |
| ۶۳۷ | ..... ۱-۶-۱۱ توپولوژی های پایه                                  |
| ۶۴۱ | ..... ۲-۶-۱۱ معایب طراحی  |
| ۶۴۴ | ..... ۳-۶-۱۱ استفاده از ضرب فرکانسی برای جستجوی قفل شدگی اشتباه |
| ۶۴۴ | ..... ۷-۱۱ حلقه های قفل فاز / قفل تأخیر دوگانه                  |
| ۶۴۸ | ..... ۸-۱۱ درون یابی فاز  |
| ۶۵۴ | ..... ۹-۱۱ طراحی آشکار ساز فاز سرعت بالا                        |
| ۶۵۶ | ..... ۱۰-۱۱ تصحیح چرخه کار                                      |
| ۶۶۳ | ..... <b>فصل ۱۲: ترکیب فرکانس رادیویی</b>                       |
| ۶۶۳ | ..... ۱-۱۲ ملزومات ترکیب فرکانس رادیویی                         |
| ۶۶۷ | ..... ۲-۱۲ ترکیب کننده های N-صحیح                               |
| ۶۷۰ | ..... ۳-۱۲ ترکیب کننده های N کسری                               |
| ۶۷۲ | ..... ۱-۳-۱۲ لزوم تصادفی سازی آهنگ                              |
| ۶۸۰ | ..... ۲-۳-۱۲ شکل گیری نویز                                      |
| ۶۸۶ | ..... ۳-۳-۱۲ مدل زمان گسسته                                     |
| ۶۹۱ | ..... ۴-۳-۱۲ ترکیب کننده های کسری $\Delta\Sigma$                |
| ۶۹۵ | ..... ۵-۳-۱۲ مدولاتورهای $\Delta\Sigma$ مرتبه بالاتر            |
| ۷۱۰ | ..... ۴-۱۲ اثرات غیر ایده حلقه های N کسری                       |

|     |  |
|-----|--|
| ۷۱۲ | ..... ۱-۴-۱۲ غیر خطینگی پمپ بار                          |
| ۷۱۷ | ..... ۲-۴-۱۲ رفتار استقرار پمپ بار                       |
| ۷۲۰ | ..... ۵-۱۲ کاهش نویز کوانتیزه شده                        |
| ۷۲۰ | ..... ۱-۵-۱۲ پیش خورد مبدل آنالوگ به دیجیتال             |
| ۷۲۵ | ..... ۲-۵-۱۲ از بین رفتن نویز توسط تبدیل دیجیتال به زمان |
| ۷۲۷ | ..... ۳-۵-۱۲ دوبرابر سازی فرکانس مرجع                    |
| ۷۳۵ | ..... <b>فصل ۱۳: مبانی بهبود داده و ساعت</b>             |
| ۷۳۵ | ..... ۱-۱۳ بررسی های کلی                                 |
| ۷۳۹ | ..... ۲-۱۳ ویژگی های داده دودویی تصادفی                  |
| ۷۴۰ | ..... ۱-۲-۱۳ طیف داده غیر برگشتی به صفر                  |
| ۷۴۳ | ..... ۳-۱۳ بهبود ساعت با آشکارسازی لبه                   |
| ۷۴۹ | ..... ۴-۱۳ بهبود ساعت با قفل فاز                         |
| ۷۵۰ | ..... ۱-۴-۱۳ آشکار ساز فاز Bang-Bang                     |
| ۷۶۰ | ..... ۲-۴-۱۳ آشکار ساز فاز Alexander                     |
| ۷۴۴ | ..... ۳-۴-۱۳ آشکار ساز فاز Hogge                         |
| ۷۸۰ | ..... ۵-۱۳ مشکل دامنه نوسانات داده                       |
| ۷۸۵ | ..... <b>فصل ۱۴: مبانی پیشرفته ساعت و بهبود داده</b>     |
| ۷۸۵ | ..... ۱-۱۴ آشکارسازهای فاز نیم رخ                        |
| ۷۸۶ | ..... ۱-۱-۱۴ آشکارسازهای فاز Bang-Bang نیم رخ            |
| ۷۹۰ | ..... ۲-۱-۱۴ آشکارسازهای خطی نیم رخ                      |
| ۷۹۵ | ..... ۲-۱۴ معماری های بهبود داده و ساعت بدون نوسان ساز   |



|     |   |
|-----|---|
| ۷۹۶ | ..... ۱-۲-۱۴ مدارهای بهبود داده و ساعت بر پایه حلقه قفل تأخیر |
| ۷۹۹ | ..... ۲-۲-۱۴ مدارهای بهبود داده و ساعت براساس PI              |
| ۸۰۲ | ..... ۳-۲-۱۴ مدارهای بهبود داده و ساعت دیجیتال                |
| ۸۱۴ | ..... ۳-۱۴ ردگیری فرکانسی                                     |
| ۸۱۸ | ..... ۴-۱۴ مشخصه های لرزش                                     |
| ۸۱۸ | ..... ۱-۴-۱۴ شکل گیری لرزش                                    |
| ۸۱۹ | ..... ۲-۴-۱۴ انتقال لرزش                                      |
| ۸۲۴ | ..... ۳-۴-۱۴ خطای لرزش  |
| ۸۳۷ | ..... <b>فصل ۱۵: تقسیم کننده های فرکانسی</b>                  |
| ۸۳۷ | ..... ۱-۱۵ بررسی کلی  |
| ۸۴۱ | ..... ۲-۱۵ روشهای طراحی لچ                                    |
| ۸۴۱ | ..... ۱-۲-۱۵ لچهای ایستا                                      |
| ۸۴۹ | ..... ۲-۲-۱۵ منطق های دینامیک                                 |
| ۸۶۱ | ..... ۳-۱۵ طراحی مدار تقسیم بر ۲                              |
| ۸۶۶ | ..... ۴-۱۵ پیش سنجها با ضریب دوگانه                           |
| ۸۷۶ | ..... ۵-۱۵ طراحی تقسیم کننده برای ترکیب فرکانس رادیویی        |
| ۸۷۷ | ..... ۱-۵-۱۵ تقسیم کننده جذب کننده پالس                       |
| ۸۸۰ | ..... ۲-۵-۱۵ تقسیم کننده Vaucher                              |
| ۸۸۵ | ..... ۶-۱۵ تقسیم کننده میلر                                   |
| ۸۸۸ | ..... ۷-۱۵ تقسیم کننده های تزریق قفل شده                      |
| ۸۹۳ | ..... ۸-۱۵ تقسیم کننده های کسری                               |

۸۹۸ ..... ۹-۱۵ تاخیر و نویز فاز تقسیم کننده

۹۰۵ ..... واژه نامه



## بررسی طراحی حلقه های قفل فاز

حلقه های قفل فاز پمپ بار که در فصل هفتم معرفی شد، در هنگامی که چندین چالش که از نواقص پدیدار می شود، باید بر اساس پارامترهای مشخصی طراحی شوند. همه بلوک های سازنده در حلقه، همانند ورودی، عملکرد سیستم را، با تغییر درجات، کاهش می دهند. این فصل، ابتدا به تابع تبدیل حلقه قفل فاز می پردازد، مشکلات آن را بیان می کند و در آخر روش های مداری را برای رفع آن ها ارائه می دهد. یکی از ویژگی های مهم تحلیل های ما این است که مشخص کنیم که کدام اثرات غیر ایده آل ها در یک عملکرد داده شده، جدی تر می شوند.

### ۸-۱ بررسی بیشتر توابع تبدیل حلقه قفل فاز

بررسی حلقه های ساده قفل فاز با پمپ بار، به توابع تبدیل حلقه-باز مختلف از نقاط مختلف به خروجی منتهی می شود. به طور خلاصه، فهمیدیم که (الف) تغییرات فاز ورودی، یک تابع تبدیل پایین گذر مرتبه دوم همراه با یک صفر دارد، (ب) نویز ولتاژها به صورت سری با بخش کنترلی یا منبع نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ، یک پاسخ میان گذر دارد. در ادامه، در این بخش، توابع تبدیل حلقه قفل فاز را بررسی می کنیم. تابع تبدیل ورودی/خروجی که توسط معادله ۷-۲۳ بیان شد، می تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

## فصل هشتم : بررسی طراحی حلقه های قفل فاز

$$H(S) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (۱-۸)$$

صفر در  $\omega_z = -\omega_n/(2\zeta)$  و قطبها در

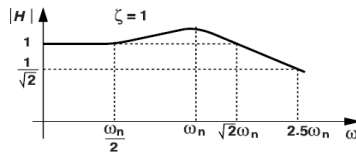
$$\omega_{p1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \quad (۲-۸)$$

قرار گرفته‌اند. برای  $\zeta=1$ ، داریم:  $\omega_z = -\omega_n/2$  و  $\omega_{p1,2} = -\omega_n$ . به عبارت دیگر، اگر  $\zeta^2 \gg 1$ ، در آن صورت  $\omega_z = -1/(2\zeta)$  و  $\omega_{p1,2} = \zeta [1 - 1/(2\zeta^2)] = \zeta - 1/(2\zeta)$  که حاصل می‌شود:

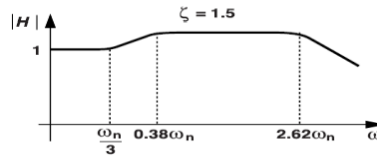
$$\omega_{p1} = \frac{-\omega_n}{2\zeta} = \frac{-1}{R_1 C_1} \quad (۳-۸)$$

$$\omega_{p2} = -2\zeta\omega_n = \frac{-R_1 I_p K_{VCO}}{2\pi} \quad (۴-۸)$$

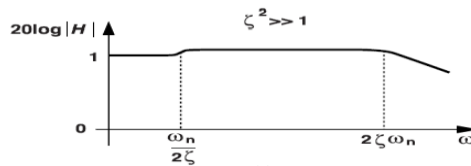
به ازای نسبت تقسیم پس‌خورد  $M$ ، باید در این نتیجه  $K_{VCO}/M$  را با جایگذاری کنیم. اکنون دو مورد را مشاهده می‌کنیم:  $\omega_{p1}$  اکنون در نزدیکی  $\omega_z$  است که تا حدودی اثر آن را از بین می‌برد.  $\omega_{p1}\omega_{p2} = \zeta^2 4 \gg 1$  (۲) بیانگر این است که تابع تبدیل تقریباً معادل با یک سیستم تک‌قطبی با فرکانس گوشه برابر با  $\omega_{p2} = (R_1 I_p K_{VCO})/(2\pi)$  است. شکل ۸-۱ اندازه  $H(S)$  را برای سه مقدار  $\zeta$  رسم می‌کند. توجه داشته باشید که اگر برای بعضی از فرکانس‌های لرزش،  $|H| > 1$ ، می‌گوییم که حلقه، افزایش پاسخ بسامدی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، نویز فاز ورودی را تقویت می‌کند. ما مقدار افزایش پاسخ بسامدی را در فصل ۱۴ محاسبه می‌کنیم. تقریب تک‌قطبی برای محاسبه پهنای باند مفید است، اما افزایش بسامد لرزش نیز همیشه مشهود است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۸ پاسخ حلقه قفل فاز حلقه بسته برای مقادیر مختلف  $\zeta$ .

پهنای باند -3 dB پاسخ‌های قبلی نیز موردنظر هستند. برای مثال، در بعضی موارد، می‌خواهیم مشخص کنیم که نویز فاز خروجی تا چه اندازه توسط حلقه قفل فاز فیلتر می‌شود. با قرار دادن  $|H(S=j\omega)|$  در معادله ۸-۱ برابر با  $1/\sqrt{2}$ ، به دست می‌آوریم:

$$\omega_{-3dB}^2 = [2\zeta^2 + 1 + \sqrt{1 + (2\zeta^2 + 1)^2}] \omega_n^2. \quad (۵-۸)$$

که به دست می‌آید:

$$\omega_{-3dB} = 2.5\omega_n, \zeta = 1 \quad \text{به ازای} \quad (۶-۸)$$

$$\omega_{-3dB} = 3.3\omega_n, \zeta = 1.5 \quad \text{به ازای} \quad (۷-۸)$$

$$\omega_{-3dB} = 2\zeta\omega_n, 1 \gg \zeta \quad \text{به ازای} \quad (۸-۸)$$

آخرین عبارت با تقریب تک‌قطبی نشان داده شده در شکل ۸-۱ (ج) مطابقت دارد. با بالاتر رفتن  $\zeta$  از  $1/\sqrt{2}$  به مقادیر بزرگ‌تر،  $\omega_{-3dB}$  از  $3\zeta\omega_n$  به  $2\zeta\omega_n$  تغییر می‌کند. به عبارت

## فصل هشتم : بررسی طراحی حلقه های قفل فاز

دیگر، زمان نشست به طور متناسب افزایش می یابد. علاوه بر پهنای باند حلقه بسته، به پهنای باند حلقه باز با بهره واحد،  $\omega_u$ ، نیز علاقه مند هستیم. از معادله ۷-۳۵ داریم:

$$\omega_u^2 = [2\zeta^2 + \sqrt{(4\zeta^4 + 1)}] \omega_n^2. \quad (5-8)$$

که به دست می آید:

$$\omega_u = 2.1 \omega_n, \quad \zeta = 1 \quad \text{به ازای} \quad (6-8)$$

$$\omega_u = 3 \omega_n, \quad \zeta = 1.5 \quad \text{به ازای} \quad (7-8)$$

$$\omega_u = 2 \zeta \omega_n, \quad 1 \gg 4\zeta^4 \quad \text{به ازای} \quad (8-8)$$

این نتایج با مثال ۷-۲۲ مطابقت دارد. مشاهده می کنیم که به ازای  $\zeta > 1$ ،  $\omega_u$  و  $\omega_{-3dB}$  به هم خیلی نزدیک هستند. به همین دلیل، عبارت پهنای باند حلقه برای هر دو به کار می رود.

### مثال ۸-۱

توضیح دهید که چرا برای مقادیر بزرگ  $\zeta$ ،  $\omega_u$  و  $\omega_{-3dB}$  مستقل از  $C_1$  هستند.

#### راه حل

به یاد داریم که تابع تبدیل حلقه باز داده شده، توسط رابطه  $[I_p/2\pi][R_1+1/(C_1S)][K_{VCO}/S]$  بیان می شود. برای فرکانس های خیلی پایین یا خیلی بالاتر از فرکانس صفر، این عبارت به ترتیب به  $[I_p/2\pi][R_1][K_{VCO}/S]$  و  $[I_p/2\pi][1/(C_1S)][K_{VCO}/S]$  کاهش می یابد (شکل ۸-۲). اگر  $\zeta$  به اندازه کافی بزرگ باشد و  $\omega_u$  با عبارت دوم مطابق باشد، می گوییم که  $C_1$  در فرکانس  $\omega_u$  به عنوان مدار اتصال کوتاه عمل می کند که نقش قابل توجهی در پهنای باند حلقه بازی نمی کند. همچنین مشاهده می کنیم که با "۱" قرار دادن عبارت  $\omega_u = [I_p][R_1][K_{VCO}/S]$  حاصل می شود. به دلیل این که حذف صفر و قطب به ما  $\omega_u = \omega_{-3dB} = 2 \zeta \omega_n$  را نتیجه می دهد، پهنای باند حلقه بسته نیز مستقل از  $C_1$  می شود.