

بسمه تعالی

**موضوع تحقیق درس مدار های مجتمع خطی: مدارهای سویچ  
خازنی (Switched-Capacitor Circuits)**

نام و نام خانوادگی: رحیم برومندی 9431023

استاد درس: جناب دکتر عباس ظریفکار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه شیراز

مقدمه: در این تحقیق ما می خواهیم به مباحث مدارهای سویچ خازنی بپردازیم. حقیقت امر این بود که در ابتدای امر اسم این مبحث (Switched-Capacitor Circuits) برای بنده عجیب بود و هیچ درکی از فلسفه ی مدار های سویچ خازنی نداشتم! سراغ کتاب رضوی رفتم و یک تکه از آن را به عنوان مقدمه این مبحث برگزیدم.

**ما در این درس با طراحی اپ امپ آشنا شدیم و متوجه شدیم که یک اپ امپ در اصل موضوع ایده ال به معنای واقعی کلمه نمی باشد، مثلاً مقاومت خروجی آن نزدیک صفر است نه خود صفر، مقاومت های تعبیه شده در مدار هم دارای خطا هستند، مقاومت ورودی اپ امپ ها واقعا بی نهایت مطلق نیست. گین حلقه باز اپ امپ ها بی نهایت واقعی نیست و در واقع چیزی در مقیاس  $10^6$  الی  $10^7$  می باشد. این یک طرف ماجرا بود. در یک جمله کلی ما با یک اپ امپ غیر ایده ال سروکار داریم.**

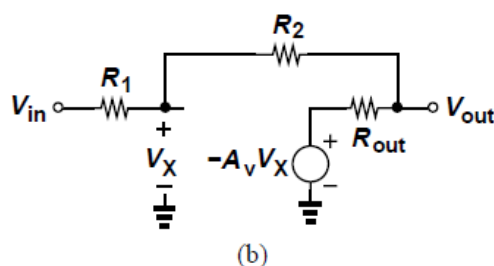
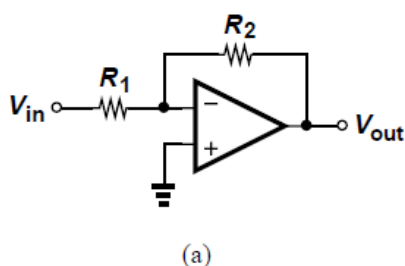
این درس اساس و پایه ای برای درک مدار های پیشرفته تر مثل فیلتر های پیشرفته، حلقه ی قفل شده ی فاز (PLL)، مدولاتور ها، میکسر ها و... می باشد. یک نکته ی مهم در مدارات پیشرفته و فرکانس بالا وجود دارد و آن این است که دقت بالایی در گین و پارامترهای دیگر احتیاج داریم در غیر این صورت مدارهای ما کارایی و بازده لازم را نخواهد داشت. یعنی بری طراحی یک مدولاتور، مقایسه گر، مبدل آنالوگ به دیجیتال و برعکس وقتی از یک اپ امپ حلقه بسته استفاده می کنیم، با اطمینان زیادی بتوان گفت گین ثابت می باشد.

ما در اینجا، با مدار های سرو کار داشتیم که وردی در حوزه ی زمان پیوسته بود و این ورودی را به یک سیستم پیوسته زمان می دادیم، که در نهایت خروجی هم پیوسته در زمان بود، به چنین سیستم هایی سیستم های پیوسته زمان گفته می شود. از طرف دیگر بسیاری از مدار ها هستند ورودی یک موج در یک دوره ی تناوب خاص تعریف شده است، و در زمان های دیگر صفر است، به یک سیستم می دهیم، و خروجی را می گیریم. به چنین سیستم هایی گسسته زمان خوانده می شود. در این مدارات، سیستم بر اساس نمونه برداری در هر لحظه، خروجی معتبر را بازسازی می کند.

مداری های پیوسته  
زمان (continuous-time)

مداری های گسسته  
زمان (discrete-time)

اگر ما مدار یک تقویت کننده وارونگر را در شکل (الف) در نظر بگیریم، می دانیم در الکترونیک 2 به ما گفته می شد، که گین آن برابر  $-R_2/R_1$  می باشد. این رابطه با فرض ایده ال بودن آپ امپ محاسبه شده بود. حال اگر مدل غیرایده الی آپ امپ را (شکل ب) در نظر بگیریم، گین را که محاسبه می کنیم، به نتایج جالبی می رسیم:

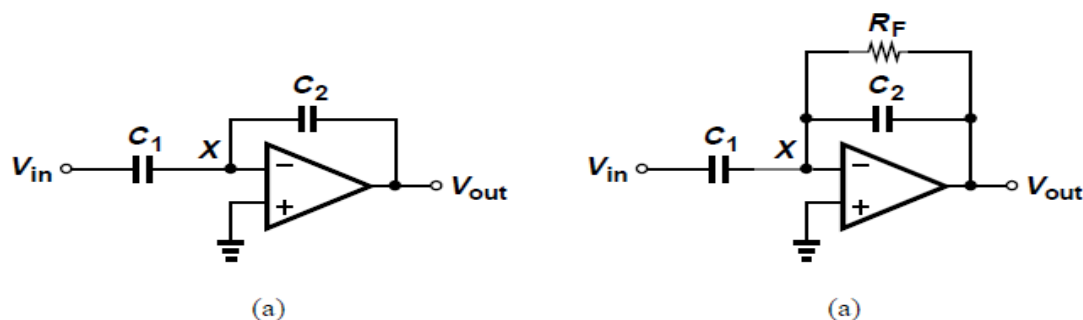


فرمول گین را که برای مدار شکل (ب) محاسبه می کنیم، به رابطه ی زیر می رسیم:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{A_v - \frac{R_{out}}{R_2}}{1 + \frac{R_{out}}{R_1} + A_v + \frac{R_2}{R_1}}$$

می بینیم گین محاسبه شده، در صورت و مخرج دقیق نبوده و نمی توان روی ثابت بودن گین آن حساب کرد. مثلاً مقاومت خروجی الان نقش زیادی در عدم دقیق بودن در صورت و مخرج ایفا می کند. حتی مقاومت  $R_2, R_1$  هم انقدر دقیق نمی باشد، و دارای خطا می باشد. پس آن طور که انتظار داشتیم، گین حلقه بسته نیاز ما را در مدارات پیشرفته برآورده نخواهد کرد. **برای داشتن گین ثابت چه تدبیری باید اندیشید؟**

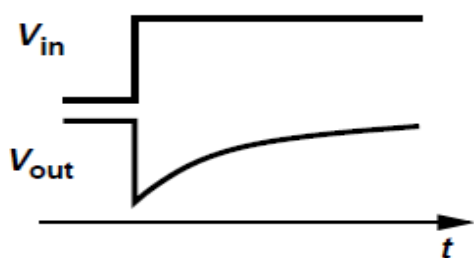
اینجا است که می خواهیم وارد بحث اصلی شدیم درست حدس زدید می خواهیم مدار تقویت کننده وارونگری بسازیم که به جای مقاومت از خازن های  $C_1, C_2$  استفاده کنیم. که مدار آن در شکل زیر آورده شده است:



اول می بینیم، که خازن ها به تنهایی برای بایاس مدار کافی نیست، برای رفع مشکل از مقاومت  $R_F$  استفاده کرده است. حال که آن را در حوزه لاپلاس برده و گین را محاسبه کرده به رابطه ی زیر می رسمیم.

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_{in}}(s) &\approx -\frac{R_F \frac{1}{C_2 s}}{R_F + \frac{1}{C_2 s}} \div \frac{1}{C_1 s} \\ &= -\frac{R_F C_1 s}{R_F C_2 s + 1}, \end{aligned}$$

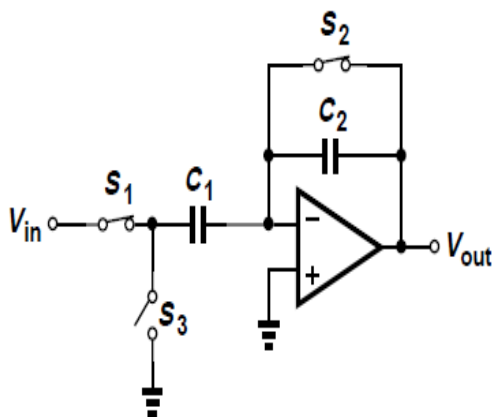
شکل موج خروجی به ورودی پالس هم چنین می شود:



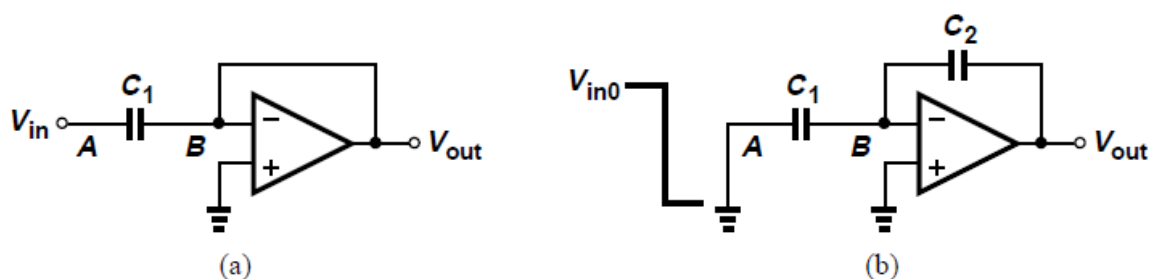
برای مدارات فرکانس بالا، ما به رابطه گین زیر می‌رسیم:

$$V_{out}/V_{in} \approx -C_1/C_2 \text{ only if } \omega \gg (R_F C_2)^{-1}.$$

در حقیقت رابطه ی گین نسبت به حالت قبل بهتر شده است، خوش فرم تر است، اما در صورتی این رابطه درست است که  $R_F, C_2$  مقدار خیلی بزرگی باشند، و این برای ما در طراحی مدار مجتمع جایز نیست پس باید به دنبال تدبیر دیگری بود. این جا است که ایده مدار های سویچ خازنی مطرح می شود. **حال برای داشتن گین ثابت ایده ی اصلی باید از خازن ها به عنوان سویچ استفاده کرد.**

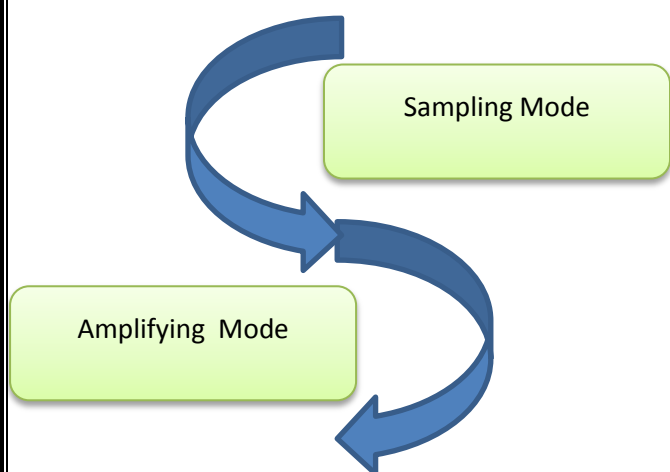


در کتاب های مرجع سویچ های خازنی را با S.C نشان می دهند. در مدار بالا  $S_1, S_2, S_3$  بیانگر سویچ های خازنی هستند. این سویچ ها در لحظه هایی از زمان باز و در لحظه هایی از زمان بسته خواهند بود. برای درک بهتر مدار، بازه ی زمانی کارکرد مدار را به الف و ب تقسیم کرده ایم. حالت اول  $S_1, S_2$  اتصال کوتاه،  $S_3$  این می باشد. حالت دوم،  $S_1, S_2$  این و  $S_3$  گرانند می باشد. مدار خلاصه شده ی این حالت را در شکل زیر می بینید:



اگر به حالت های الف و ب در شکل بالا نگاه کنیم: می بینیم اولاً این مدار یک مشخصه ی اصلی دارد:

1. وارد مد حلقه بسته نشده و گین اپ امپ همواره گین حلقه باز است که بی نهایت است. در حالت قبل گین حلق بسته بود.
2. دوم، این مدار کارکردش را از نظر دو حوزه ای زمانی می توان به دو دسته ی Sampling و Amplifying تقسیم بندی کرد. که اساس محاسبه گین آن هم همین نکته می باشد. که این دو مد به ترتیب با مدار های شکل الف و ب در شکل قبل متناسب است.



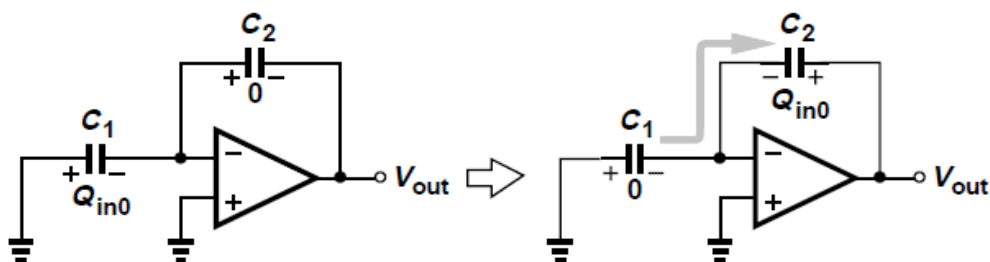
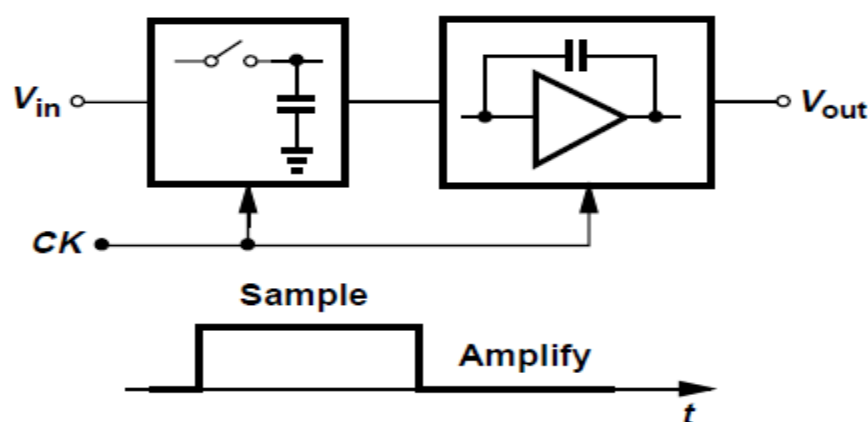


Figure 12.6. Transfer of charge from  $C_1$  to  $C_2$ .

در نهایت وقتی گین را محاسبه می کنیم براساس شارو دشارژخازن هم می بینیم، که با توجه به دو مرحله گفته شده گین برابر است با:

$$V_{in0}C_1/C_2.$$

همان طور که مشاهده می کنیم، در این حالت گین به عنوان یک ثابت دقیق تر است. در شکل زیر کاربرد سویچ های خازنی در مدارات امپلی فایر خلاصه وار بیان شده است.



لازم به ذکر است این فقط یک کاربرد S.C در مدارات تقویت کننده بود، واقعیت این است این تکنیک در مدارات دیگر شامل فیلتر، و غیره نیز به کار می رود. قبل از اینکه به مباحث دیگری بپردازیم می خواهیم کمی در مود سویچ های خازنی بحث کنیم.

نکته ی با اهمیت این است که ساختن سویچ های بحث شده در تکنولوژی CMOS راحت تر از سایر تکنولوژی ها می باشد. چون برای اینکه نمونه برداری خوبی داشته باشیم، باید امپدانس ورودی سویچ بالا باشد. بی جی تی مشکلی که دارند جریان بیس در ورودی اپ امپ می تواند در

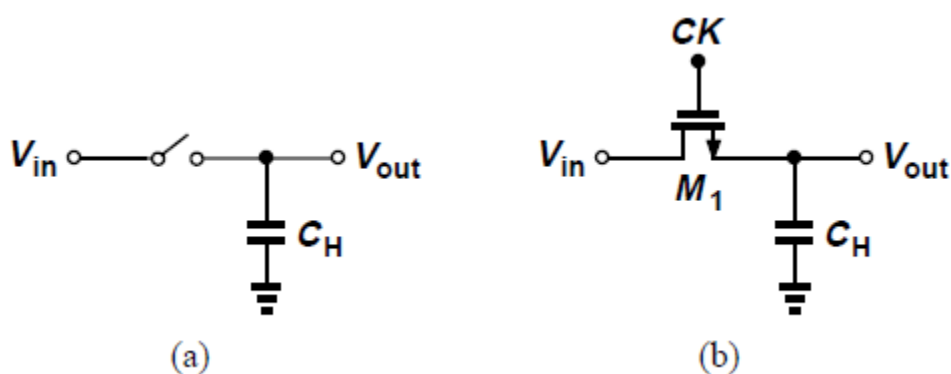
دقت اثر ولتاژ خروجی اثر بگذارد و این برای ما خوب نیست. پس ما برای سویچ سازی به سمت ماسفت ها خواهیم رفت.

### ماسفت به عنوان یک سویچ:

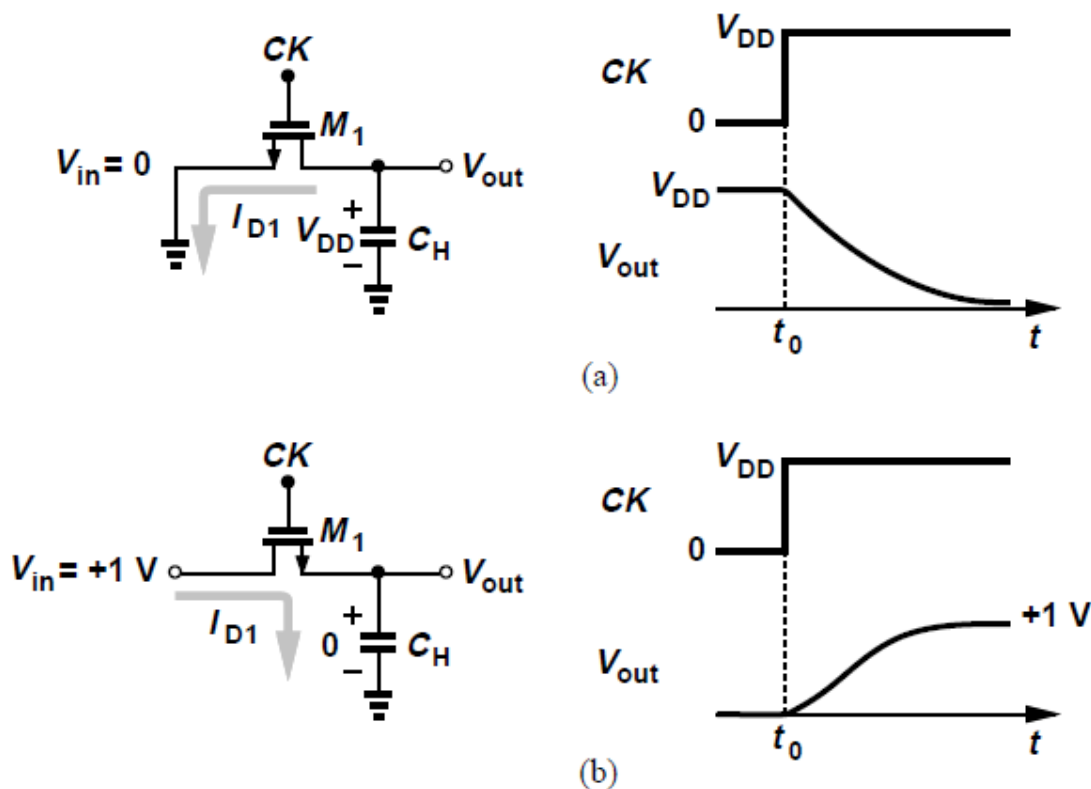
حال سوالی که مطرح می شود، این است که یک سویچ خوب چه ویژگی هایی دارد، و به بحث در مورد پارامتر های یک سویچ خوب خواهیم پرداخت.

یک سویچ خوب چه ویژگی های دارد؟؟؟؟؟

شکل زیر ماسفت به عنوان سویچ انتخابی ما را نشان می دهد.







شکل 8

1. یک سویچ خوب اولین ویژگی که باید داشته باشد، حالت این ان امپدانس بی نهایت داشته باشد، و حالت بسته ان امپدانس صفر داشته باشد.
2. یک سویچ خوب باید سرعت روشن و خاموش مناسبی بر حسب کاربرد ما داشته باشد.
3. باید سویچ برای ما دقت قابل قبولی داشته باشد.
4. باید کنسل کردن تزریق بار ان هم مناسب باشد.

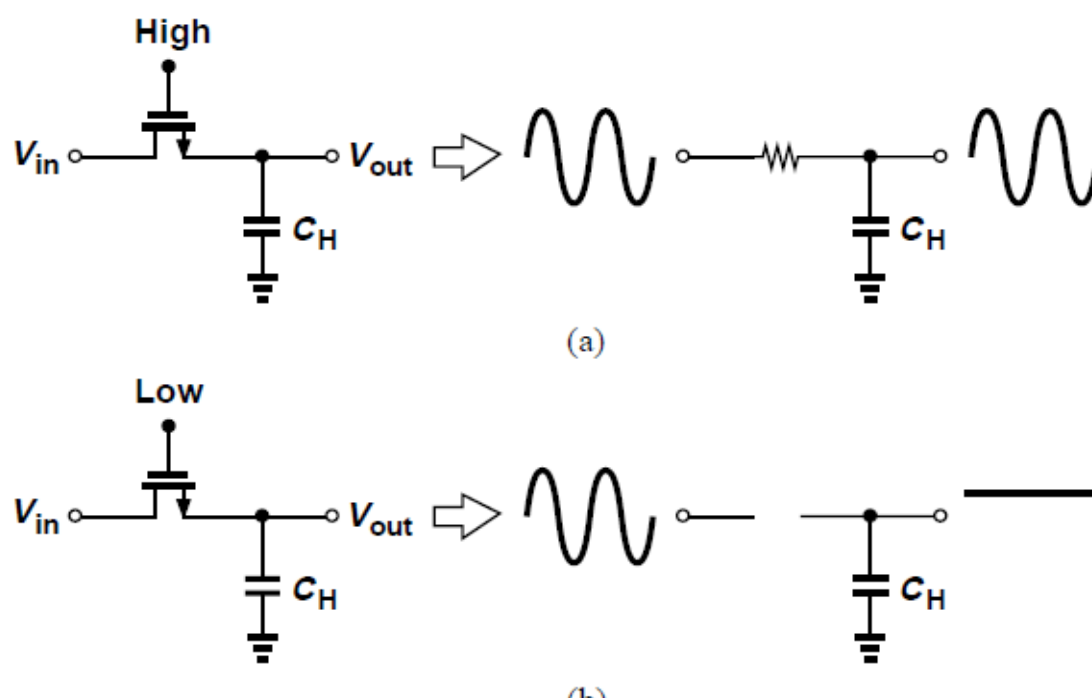
یک مدار نمونه برداری مناسب از یک سویچ و خازن تشکیل شده است. (شکل شماره 8 الف، ب) که ماسفت به عنوان یک سویچ خوب عمل می کند، به دلیل اینکه ان (سویچ) می تواند، روشن باشد بدون اینکه جریانی مصرف کند (جریان گیت صفر است). از طرف دیگر ولتاژ سورس و درین به ولتاژ گیت اصطلاحاً متصل نشده اند (pinned) یعنی اگر ولتاژ گیت تغییر کند، ولتاژ سورس و درین تغییر نخواهد کرد. برخلاف ماسفت، بی جی تی ها این مزایا را ندارند.

برای اینکه متوجه شویم در شکل (8 ب) ماسفت چگونه از ورودی نمونه برداری می کند، در حالت الف، پالس کلاک فعال است، و ماسفت به عنوان یک سویچ روشن است، ولتاژ ورودی هم که صفر می باشد، سورس و درین اتصال کوتاه شده (چون سویچ ما روشن می باشد) پس خازن که دارای ولتاژ اولیه  $V_{DD}$  بود شروع به دشارژ شدن می کند. در حالت ب، که

سوییچ روشن است، اما ولتاژ اولیه خازن صفر است، اما ولتاژ ورودی  $V_{DD}$  می باشد، خازن شروع به شارژ شدن می کنند که شکل های شارژ و دشارژ خازن را مشاهده می کنید.

همان طور که در شکل زیر می بینیم هنگامی که ولتاژ گیت یک (یک منطقی) باشد، بین سورس و درین ماسفت اتصال کوتاه و هنگامی که ولتاژ گیت صفر باشد (صفر منطقی)، بین سورس و درین ماسفت این می باشد.

بنا



بنابراین اصطلاحاً گفته می شود، وقتی که ولتاژ گیت یک است، ماسفت ورودی را track تعقیب می کند، وقتی که ولتاژ گیت صفر است، نمونه برداری را فریز (freeze) می کند.

اگر برای مدار شکل 8 الف ولتاژ خروجی را برحسب زمان محاسبه کنیم، در نهایت به رابطه ی زیر (برگرفته از کتاب بهزاد رضوی) می رسیم.

$$V_{out} = \frac{2(V_{DD} - V_{TH}) \exp[-(V_{DD} - V_{TH})\mu_n \frac{C_{ox}}{C_H} \cdot \frac{W}{L}(t - t_1)]}{1 + \exp[-(V_{DD} - V_{TH})\mu_n \frac{C_{ox}}{C_H} \cdot \frac{W}{L}(t - t_1)]}$$

که می بینیم ولتاژ خروجی انی به  $V_{DD}-V_{TH}$  نمی رسد، و در زمان بی نهایت  $t \rightarrow \infty$  به این مقدار می رسد.

از طرفی مقاومت بین سورس و درین در عمل صفر نیست و از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$R_{on1} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{DD} - V_{in} - V_{TH})}.$$

### ملاحظات سرعت:

از طرف دیگر یک PMOS هم می توان به عنوان سویچ به کاربرد، که منطق ان برعکس یک نوع NMOS می باشد. که در شکل زیر آورده شده است.

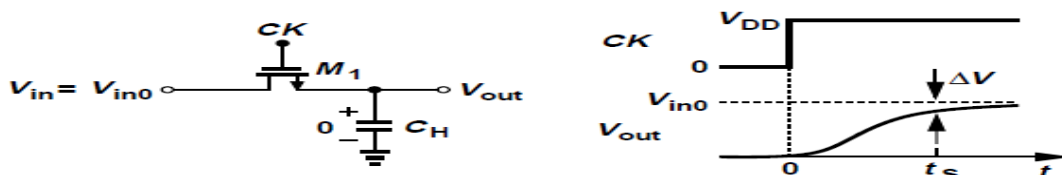
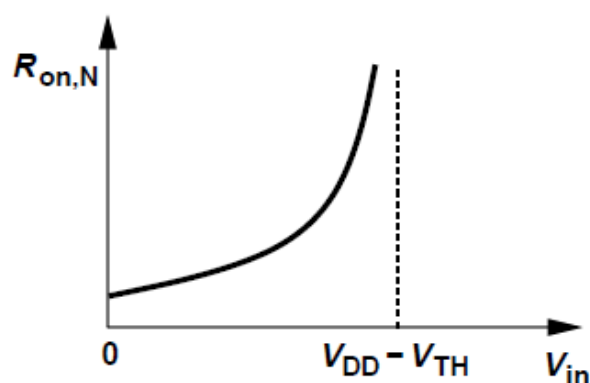


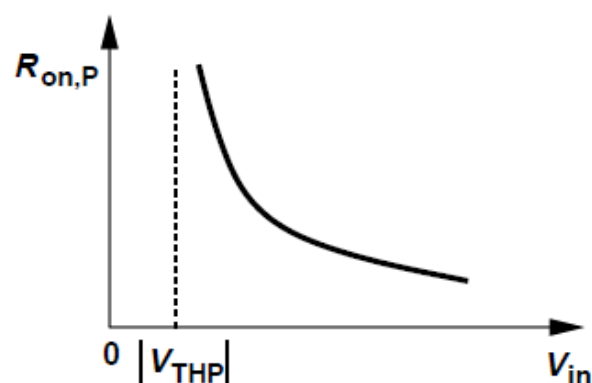
Figure 12.14. Definition of speed in a sampling circuit.

یکی از ملاحظات مهم، ماسفت از هر نوعی باشد، مثلاً نوع NMOS مقاومت ان در نزدیک ولتاژ استانه بی نهایت است، این ثابت زمانی برای شارژ و دشارژ خازن را افزایش می دهد، و این یعنی کاهش سرعت کار سویچ!!

همین داستان برای PMOS هم برقرار است.

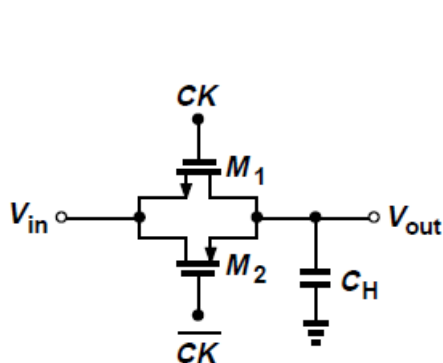


(a)

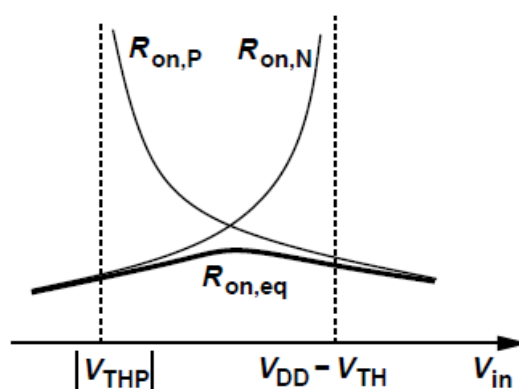


(b)

برای غلبه بر این موضوع می آیند دو نوع ترانزیستور را با هم موازی می کنند. که مقاومت حاصل در همه محدوده ی ولتاژی مقدار کوچکی دارد.



(a)



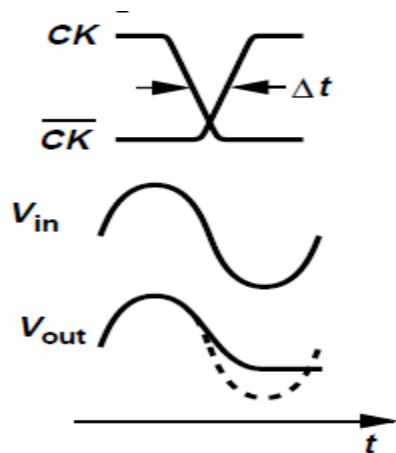
(b)

که در این حالت مقاومت  $R_{on}$  از رابطه ی زیر محاسبه می شود. نکته مهم در سوییچ های مرکب باید با هم خاموش و روشن شوند در غیر این صورت شکل موج خروجی را خراب می کند.

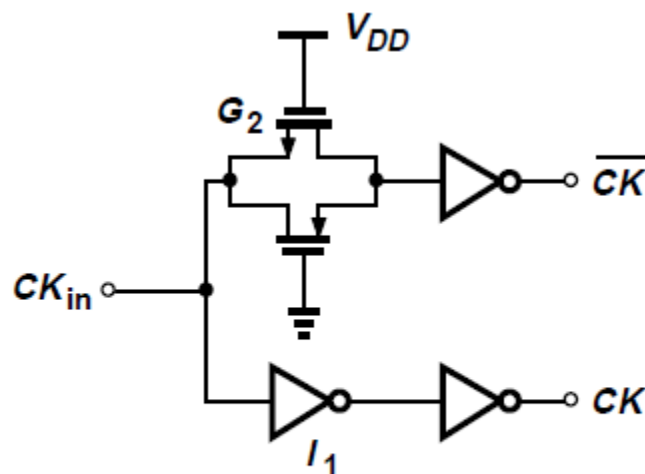
$$R_{on,eq} = R_{on,N} || R_{on,P} \quad (12.23)$$

$$= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_N (V_{DD} - V_{in} - V_{THN})} || \frac{1}{\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_P (V_{in} - |V_{THP}|)} \quad (12.24)$$

$$= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_N (V_{DD} - V_{THN}) - [\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_N - \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_P] V_{in} - \mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_P V_{THP}} \quad (12.25)$$



برای رفع این مشکل از مدار زیر کمک می گیریم.



Simple circuit generating complementary clocks.

### ملاحظات دقت:

اگر ما  $W/L$  را افزایش دهیم، این باعث کاهش خازن نمونه برداری و افزایش سرعت می شود، اما می توان نشان داد که این روش افزایش سرعت، دقت نمونه برداری از سیگنال را کاهش می دهد، پس چندان روی آن نمی توان حساب کرد.

می توان نشان داد که خطای نمونه برداری ان چنین می شود.

$$\Delta V = \frac{WLC_{ox}(V_{DD} - V_{in} - V_{TH})}{2C_H}.$$

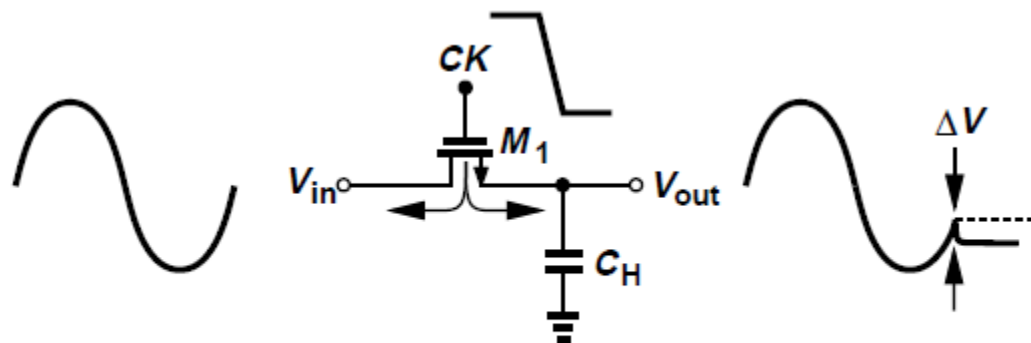
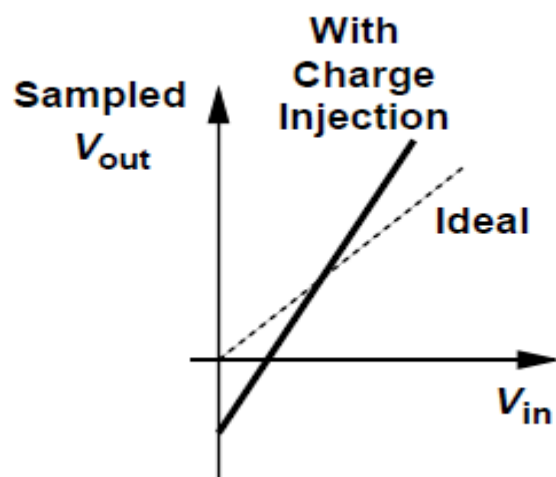
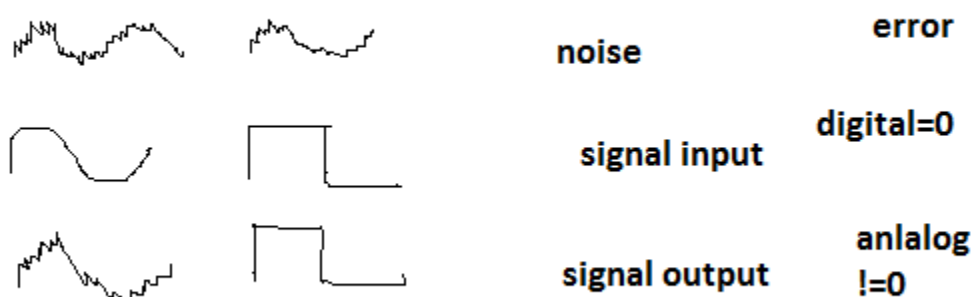


Figure 12.20. Effect of charge injection.

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{WLC_{ox}}{C_H} \right) - \frac{WLC_{ox}}{C_H} (V_{DD} - V_{TH}),$$



حال که بر روی مباحث مشخصه های یک سویچ بحث کردیم، اولاً بنا بر نظر بنده این مدارات شبیه مدارات الکترونیک دیجیتال که در یک بازه ی زمانی یک شقه از مدار روشن و در بازه های دیگر یک تکه دیگر روشن می شود. تا این جا ثابت کردیم این ایده که دقت خوبی به ما هدیه کرده است. یکی از دلایلی که امروزه به سمت مدارات سویچینگ یا دقیق تر بگم دیجیتال می روند ، دقت بهتر ان می باشد. من احساس می کنم، این فصل یک پیش زمینه بود برای اینکه اهمیت ورود به دید دیجیتالی را برای ما روشن کند. بی خود هم نیست که امروز اکثر ادوات مخابراتی فیلتر ها، میکسر ها و.. به سمت دیجیتال شدن پیش رفته اند. چون در دیجیتال به خاطر اینکه با منطق 0 و 1 کار می کنیم، نویز های ضعیف بر عملکرد مدار ما به هیچ عنوان اثری ندارند در حالی که در مدارات آنالوگ نویز بر روی سیگنال ما هر چند ضعیف سوار می شود. این شکل به خوبی این بحث را نشان می دهد. این شکل را خودم در پینت کشیدم انصافاً کشیدن خط راست با تاج پد لب تاپ کار سختی است!



قبل از اینکه کلاً در مورد سویچ های خازنی چیزی بنویسم سری به سایت [edaboard](http://edaboard.com) معروف زدم، یک تاپیک با عنوان ... باز کردم، که دوستان نظراتی دادند، که در تدوین این تحقیق خیلی برای بنده مفید بود. مهمترین نظرات ان ها با هم مروری می کنیم.

www.edaboard.com/thread349493.html#post1493244

**betwxt**  
Super Moderator  
Achievements:  
Awards:  
Join Date: Jul 2009  
Location: Aberdyfi, West Wales, UK  
Posts: 8,811  
Helped: 2745 / 2745  
Points: 52,283  
Level: 55

**Re: : what's a switch capacitor in analog circuit design?**

It could be several things but my guess is you are refering to switched capacitors in filter applications. The concept is to use fixed value capacitors because they are easy to fabricate, either on silicon or as discrete devices, then switch them in and out of circuit at high speed to make their value appear to be smaller. If you are creating a conference about them you should read up on "switched capacitor filters" for more information. The topic is too big to fully explain in a message system.

Switched capacitors can also be a reference to voltage multiplier circuits, AC power regulators and motor speed control systems.

Brian.

PLEASE - no friends requests or private emails, I simply don't have time to reply to them all. It's better to share your questions and answers on Edaboard so we can all benefit from each others experiences.

1 members found this post helpful.

15th January 2016, 12:55 #3

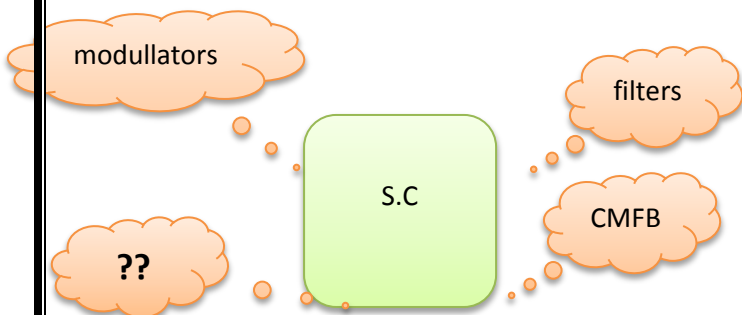
**Lvw**  
Advanced Member level 5  
Achievements:  
Join Date: May 2008  
Location: Germany  
Posts: 5,434  
Helped: 1613 / 1613

**Re: : what's a switch capacitor in analog circuit design?**

Back and forth (load/unload) switched capacitors can be used to replace resistors in analog systems (e.g. filters).

1 members found this post helpful.

حال به ادامه بحث خود می پردازیم، ایا کاربرد سویچ های خازنی فقط منحصر به تقویت کننده ها می باشد. اگر کمی دقیق تر به مسئله نگاه کنیم، می بینیم این ایده را برای سایر مدار ها مثل فیلتر ها و هم می توان تعمیم داد و این ایده منحصر به تقویت کننده گی نمی باشد. پس من در ادامه چندین مدار پرکاربرد که از این ایده استفاده می کند می اورم.





حال در ادامه بحث ما ساختار یک CMFB را تشریح می کنیم.