Active Filters Design and Analyze Using the Switched-Capacitors Circuits

Dr. Faek Mustafa Araaj*

(Received 5 / 8 / 2019. Accepted 10 / 3 / 2020)

□ ABSTRACT □

This research defines the basic concepts underlying the work of switching capacitors, and gives a simple idea of the importance of circuits with switching capacitors in the design of effective filters as well as their use in achieving integrated and versatile circuits familiar to undergraduate students in electronics. It also includes an explanation of the capacitive integrals of various kinds, such as the Summing, the Differential, the Lossy integrator, and its importance in designing effective filters. Specific examples of filter designs that include switching capacitors will be developed by showing the usefulness of modern switches for integrated IC switches in these two important electronic functions by developing appropriate mathematical relationships and then analyzing the results.

Keywords: Switched-Capacitors, Switched-capacitor integrator Active Filters, Summing integrator ,Differential integrator, Lossy integrator.

*Associate Professor, Department of Communications and Electronics Engineering, Faculty of Electric and Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

تصميم وتحليل المرشحات الفعالة باستخدام دارات المكثفات التبديلية

د. فائق مصطفى عراج*

(تاريخ الإيداع 5 / 8 / 2019. قُبِل للنشر في 10/ 3 / 2020)

□ ملخّص □

يحدد هذا البحث المفاهيم الأساسية التي يقوم عليها عمل المكثفات التبديلية، ويعطي فكرة بسيطة عن اهمية الدارات ذات المكثفات التبديلية في تصميم المرشحات الفعالة وكذلك استخدامها في تحقيق دارات مدمجة ومتعددة الاستخدامات ومألوفة لطلاب المرحلة الجامعية في الإلكترونيات. تتضمن ايضا شرح للمكاملات السعوية بمختلف انواعها مثل الجامع والطارح ومكامل الضياع وأهميتها في تصميم المرشحات الفعالة . وسيتم تطوير أمثلة محددة لتصاميم المرشحات التي تتضمن المكثفات التبديلية من خلال إظهار فائدة المبدلات الحديثة للمكثفات التبديلية المتكاملة IC في هاتين الوظيفتين الإلكترونيتين الهامتين من خلال تطوير العلاقات الرياضية المناسبة ثم تحليل النتائج.

الكلمات المفتاحية: المكثفة التبديلية، المكاملات السعوية التبديلية، المرشحات الفعالة، المكامل الجامع التبديلي، المكامل الطارح التبديلي، مكامل الضياع .

* أستاذ مساعد – قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مقدمة:

لقد تم تطوير تقنيات المكثفات التبديلي بالأساس من أجل السماح بالتكامل لكل الوظائف الرقمية والتشابهية على شريحة السيليكون الواحدة. ونظرًا لأن الدوائر المتكاملة عالية الاندماج (VLSI) تعتمد على ترانزستورات MOSومكثفات MOS من مرتبة البيكوفاراد، فإن أي تنفيذ للدوائر التشابهية على شريحة واحدة يجب أن تستخدم هذه العناصر.

وقبل الشرح التفصيلي لمبدأ عمل دارات المكثفات التبديلية، سيكون من المفيد فهم الدوافع والاهداف وراء هذه الدارات وتطبيقاتها.

تستخدم الدارات التشابهية التقليدية نسبة المقاومات لتعيين وضبط معاملات النقل الخاصة بالمكبرات، وتستخدم قيم المقاومات لتحديد عمل مبدلات التيار إلى جهد والجهد إلى التيار. و يتم استخدام قيم الثابت الزمني RC في المرشحات الفعالة ومولدات الإشارة لتحديد الاستجابة الترددية لتلك الدارات. بينما في الدارات ذات السعات التبديلية فيتم ضبط المعاملات عن طريق نسبة مكثفات فقط.

لقد أدى تطور تكنولوجيا الدارات المتكاملة ذات الحجوم الصغيرة مثل الرقاقة السيليكونية والتي تحقيق نفس الوظائف السابقة في مساحة اخفض بكثير إلى استخدام عناصر تقنية MOS و نلاحظ مايلي:

أولاً ، ان المفاتيح ذات المكثفات التبديلية تتمتع بسعات منخفضة و هي ملائمة للعمل مع المكبرات العملياتية و سهلة التنفيذ للغاية في تقنية MOS .

ثانياً ، يكون من الصعب للغاية الإسراف في الشريحة السيليكونة باستخدام نفس التقنية من أجل صنع المقاومات والمكثفات بالقيم وبالدقة المطلوبة في تطبيقات مكبرات الأجهزة الصوتية [2،3].

لقد تغلب المصممون على هذه الصعوبات من خلال استبدال المقاومات بمفاتيح نوع MOS وهي مكثفات MOS حيث يتم تشغيلها وإيقاف تشغيلها بسرعة بواسطة النبضات . وأما بالنسبة للثوابت الزمنية الناتجة عن هذه المحاكاة فيمكن أن تعطى على هيئة نسب بين السعات .

في الحقيقة أن نسب السعات هي التي تتحكم في الثوابت الزمنية ، وهذا يقود الى امكانية الاستفادة من التوافق الفائق Supper Matching بين السعات المصنعة على الكسرة السيليكون في تكنولوجيا الدارات المتكاملة ، وكذلك قدرتها على تتبع بعضها البعض مع درجة الحرارة.

إن هذه المزايا لتقنية الدارات المتكاملة تعتبر معروفة بالنسبة لمصمم VLSI ، ولكن ماذا نتوقع من تصميم الدوائر على مستوى الشريحة باستخدام تقنية المكثفات التبديلية ؟ سنرى لاحقاً انه ليس فقط الثوابت الزمنية لدارة المكثفة التبديلية هي الأهم بالموضوع ، ولكن الأهم هو قابلية هذه الثوابت الزمنية للتوليف من خلال وسيلة بسيطة لتغيير تردد نبضات الساعة التي تقود الدارة ، بالاضافة إلى ذلك تدعم الدوائر المتكاملة المتوفرة الآن عددًا من وظائف الترشيح وتتوفر ضمن دارة واحدة متكاملة ، مما تقلل وتوفر الحاجة لاستخدام لوحات مطبوعة اكبر مساحة لتحقيق مجموعة معينة من الوظائف التشابهية.

على الرغم من أن المكثفات التبديلية تم تطويرها من أجل تلبية الحاجة إلى دمج المرشحات التشابهية الفعالة على الشريحة السيليكونية الواحدة مع الوظائف الرقمية، إلا أنها وجدت العديد من الاستخدامات الأخرى [2]. ويشمل

ذلك، إلى جانب المرشحات، ومكبرات القياس، ومحولات الجهد إلى تردد، ومبدلات البيانات، ومصفوفات المكثفات القابلة للبرمجة، والمعدلات المتوازنة، وأجهزة كاشف القمة، والمهتزات ....الخ.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث الى توضيح كيف يمكن استخدام تقنية المكثفات التبديلية لتحقيق مجموعة واسعة من المرشحات الفعالة والمكاملات السعوية التي تتميز بميزات التجميع والتكامل على شريحة واحدة وقابلية التوافق والتوليف .

وعلى وجه الخصوص ولتوضيح ذلك سوف تستخدم بعض الشروحات العملية وبعض الأمثلة التصميمية مرفقة بالعلاقات الرياضية المناسبة والمستخدمة في تكنولوجيا الإلكترونيات التشابهية.

1- منهجية وطريقة البحث :

سيعرض البحث الموضوعات التالية:

أولا ، سيتم شرح الأفكار الأساسية وراء استخدام المكثفات التبديلية لتحل محل المقاومات في دوائر المرشحات الفعالة ودعمها بالعلاقات والامثلة الرياضية المناسبة.

ثانياً ، سيتم شرح استخدام المكثفات التبديلية لتنفيذ مكاملات تفاضلية عديمة الضياعات والمكاملات التفاضلية السعوية والمكامل الجامع السعوي التبديلي والمكامل العاكس وغير العاكس التبديلي ومكاملات الضياع ، والتي تعتبر العمود الفقري للعديد من دارات مرشحات المكثفات التبديلية [1].

2- ادوات البحث :

سيتم استخدام برنامج الماتلاب Matlab لنمذجة بعض العلاقات الرياضية لبعض الامثلة التصميمية للمرشحات الفعالة بتقنية المكثفات التبديلية .

3- المبدأ الأساسي لعمل المكثفة التبديلية :

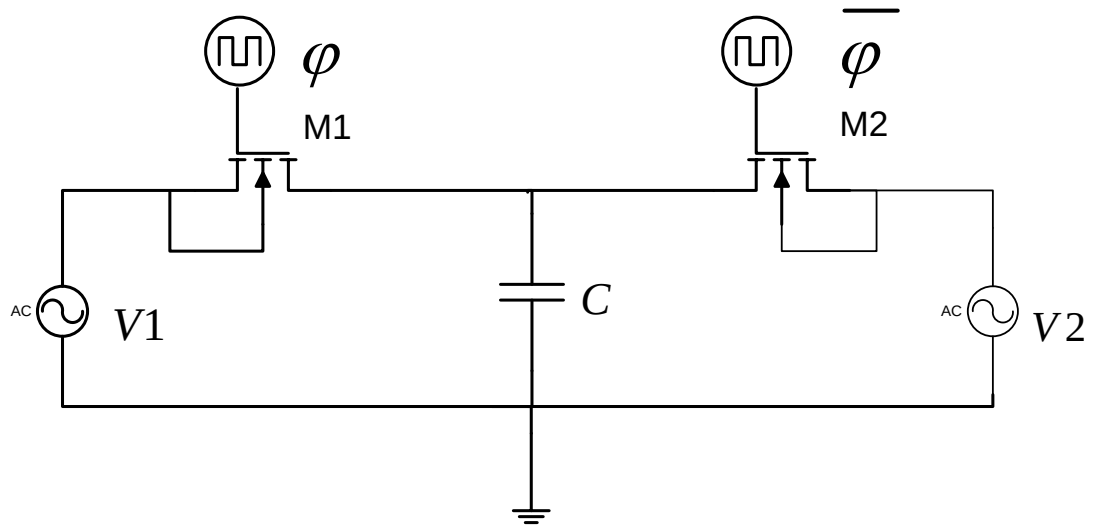
BASIC SWITCHED-CAPACITOR OPERATION

يعتمد مبدأ عمل المكثفات التبديلية على استخدام المفاتيح التشابهية لأداء نفس وظيفة المقاومة . تشكل هذه المقاومة مع المكبر العملياتي .Op Amp دارة المرشح الفعال . ولكن قبل التعمق في تصميمات المرشحات الفعالة باستخدام هذه العناصر، من المنطقي أن نسأل لماذا يجب استبدال المقاومات مع مجموعة معقدة من الأجزاء مثل المكثفات التبديلية ؟.

من الواضح أن المكثفات التبديلية بسبب كثرتها ستكون موجودة ضمن منطقة ذات كثافة عالية الاندماج ، وفي الواقع، بالنسبة إلى قيم المقاومات التي تدخل في تصميم المرشحات بشكل عام فهي ليست سهلة التحقيق . علاوة على ذلك، فان المكثفات التبديلية أكثر قابلية للتوليف الدقيق في المرشحات الفعالة من المقاومات المتغيرة.

يبين الشكل(1) البنية الأساسية للمكثفة التبديلية ، بما في ذلك اثنين من ترانزستورات تأثير المجال (الحقلية) بقناة نوع N و المصنوعة من أنصاف النواقل ذات البوابة المعدنية والأكسيد ونصف الناقل (NMOS) . يوجد طورين من نبضات الساعة $\varphi, \overline{\varphi}$ وهما غير متراكبين لقيادة الترانزستورين . سيكون أحد الترانزستورين MOSFET إما M1 أو M2 بحالة العمل On عندما يكون جهد البوابة عالي High ، والمقاومة المكافئة للقناة في هذه الحالة ستكون منخفضة $R_{on} = 1k\Omega \rightarrow 10k\Omega$. وعلى العكس ، عندما يذهب جهد البوابة إلى قيمة منخفضة Low، فإن مقاومة القناة تبدو عالية جداً من مرتبة $R_{off} = 10^{12}\Omega$. مع هذه النسبة العالية

للمقاومة بين حالتي off و on ،فإن كل ترانزستور MOSFET يمكن اعتباره مفتاح تبديلي جيد جدا . علاوة على ذلك ، عندما يكون الترانزستورين MOSFET مقادين من قبل نبضات ساعة غير متراكبة ، فإن M1 و M2 سيوصلان بالتناوب خلال نصف دور الاشارة.

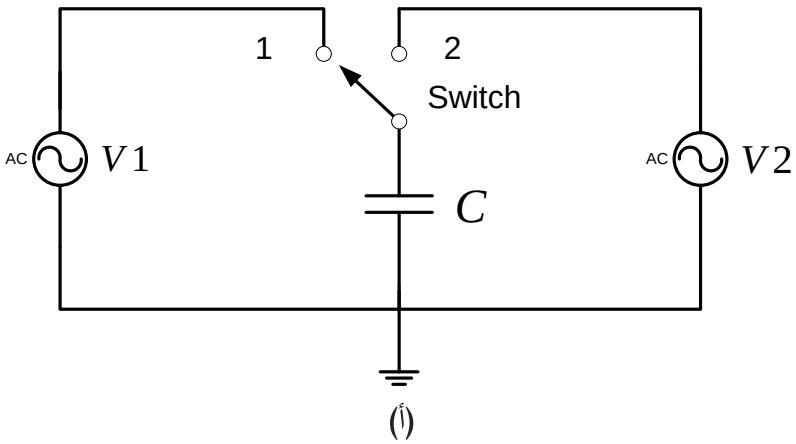


الشكل(1)– زوج من الترانزستورات نوع NMOSFET ، مقادة بالتناوب من قبل نبضات ساعة غير متراكبة وتشمل شبكة مكثفة تبديلية أساسية

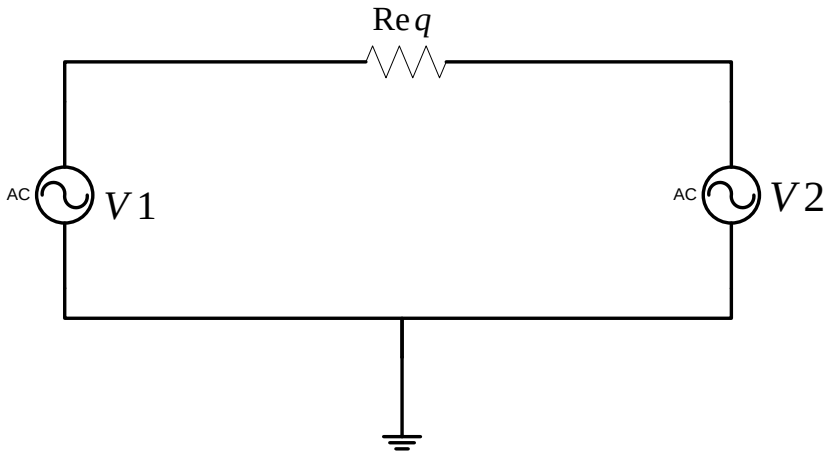
وهذا يجعل الترتيب الثنائي لترانزستورات MOSFET مشابهاً لمفتاح ثنائي الوضعية أحادي القطب (SPDT) single–pole, double–throw . يمكن الآن تمثيل الدارة باستخدام رمز المفتاح بدلا من الترانزستورات كما هو مبين في الشكل(2–أ).

إن عمل هذه الدارة هو على النحو التالي : عندما يتم وضع المفتاح على الوضعية (1) المفتاح إلى اليسار ، فإن المكثفة C سوف تقوم بالشحن إلى الجهد V_1. وعندما يتم وضع المفتاح إلى اليمين الوضعية (2) ، سوف يتم تغير شحنة المكثفة إلى الجهد V_2. ونتيجة لهذه الأحداث التبديلية المتتالية ، سيكون هناك نقل لشحنة صافية قيمتها:

$$\Delta Q = C \times \Delta V = C \times (V_1 - V_2), \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$



(أ)



(ب)

الشكل (2)– نموذج المقاومة المكافئة لدائرة مكثف التبديل في الشكل (1).

الآن ، إذا قمنا بقلب المفتاح أي التبديل ذهابًا وإيابًا بمعدل f_{CLK} هزة / ثانية ، فإن الشحنة المنقولة في ثانية واحدة هي :

$$f_{CLK} \times \Delta Q = C \times f_{CLK} \times (V_1 - V_2), \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

.يمكن القول أن متوسط التيار هو:

$$I_{AVG} = C \times f_{CLK} \times (V_1 - V_2), \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

إذا كان تردد النبضات او ما يسمى تردد اخذ العينات f_{CLK} أعلى بكثير من تردد موجة الجهدين المطبقين على المدخلين ، فإن عملية التبديل يمكن اعتبارها عملية مستمرة بدون حدوث اية ضياعات في الإشارات ، ويمكن نمذجة المكثفة التبديلية كمقاومة مكافئة ، كما هو موضح في الشكل (2– ب).

تحسب قيمة المقاومة المكافئة بالعلاقة التالية:

$$R_{eq} = \frac{(V_1 - V_2)}{I_{AVG}} = \frac{1}{C \times f_{CLK}}, \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

لذلك، يمكن استخدام هذه المقاومة المكافئة، بالاقتران مع المكثفات الأخرى مع المضخمات العملياتية Op–amp لتصميم وتركيب المرشحات الفعالة .

لقد أصبح من الواضح الآن من المعادلة (4) كيف يؤدي استخدام المكثف التبديلي إلى أمكانية توليف المرشحات الفعالة، عن طريق تغيير تردد نبضات الساعة.

تتميز هذه المقاومة المكافئة بميزات تجعلها مفيدة عندما تنفذ ضمن دارة متكاملة بما يلي:

1– يمكن تنفيذ المقاومات عالية القيمة في منطقة او مساحة صغيرة جداً من السليكون . على سبيل المثال يمكن تحقيق مقاومة $1M\Omega$ مع مكثف تبديلي $C_1 = 10\,pF$ بمعدل تردد ساعة يبلغ $100KHz$.

2– يمكن تحقيق ثوابت زمنية دقيقة للغاية ، لأن الثابت الزمني يتناسب طردا مع نسبة السعات، ويتناسب عكسياً مع تردد نبضات الساعة حسب العلاقة التالية:

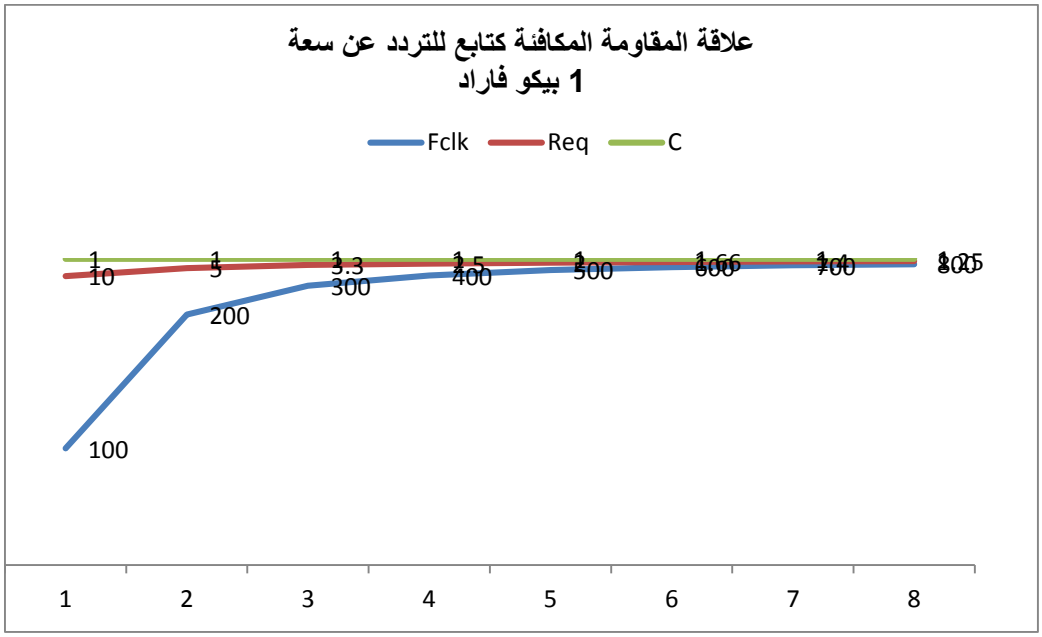
$$\tau_{eq} = R_{eq} \times C_1 = \frac{C_1}{C \times f_{CLK}} \text{,.....(5)}$$

تكون نسب المكثفات ، وخاصة في الدرات المتكاملة وحيد البللورة ثابتة للغاية ضد تغيرات درجة الحرارة أي مستقرة لاتتأثر بعوامل عدم الاستقرار المعروفة ، كما ويمكن التحكم بها بدقة من خلال تردد نبضات الساعة ، وهكذا تكون الثوابت الزمنية الدقيقة متاحة الآن في تكنولوجيا المكثفات التبديلية.

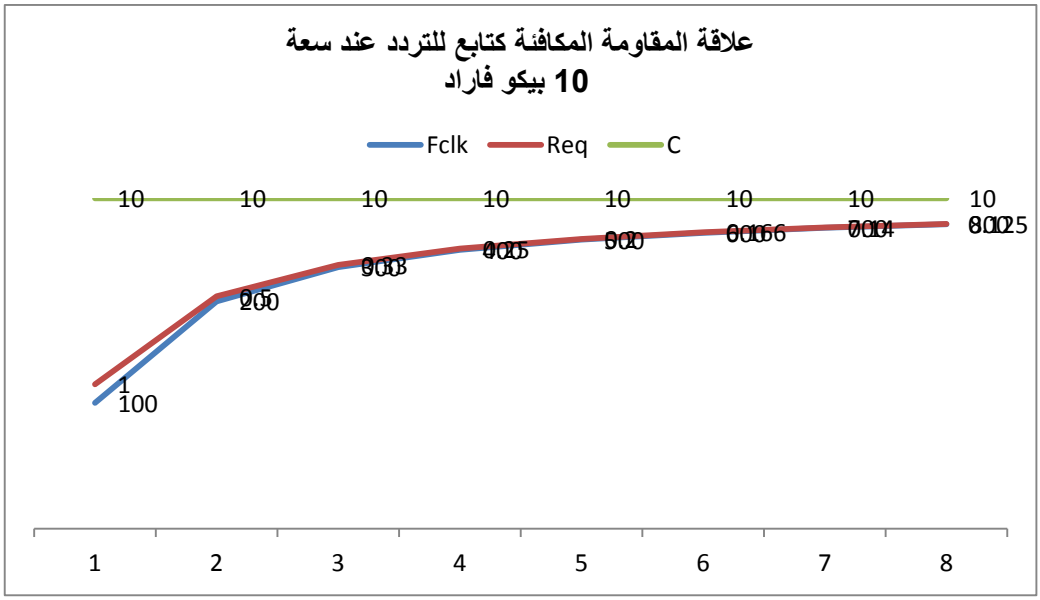
تبين الأشكال(3) رسم منحني تغيرات المقاومة المكافئة R_{eq} كتابع للتردد عند قيم عملية مختلفة لسعة مكثفة ال MOS .

ويمكن حساب الثابت الزمني للمرشح من أجل سعة $C_1 = 100\,pF$ وتردد تقطيع $f_{CLK} = 100KHz$

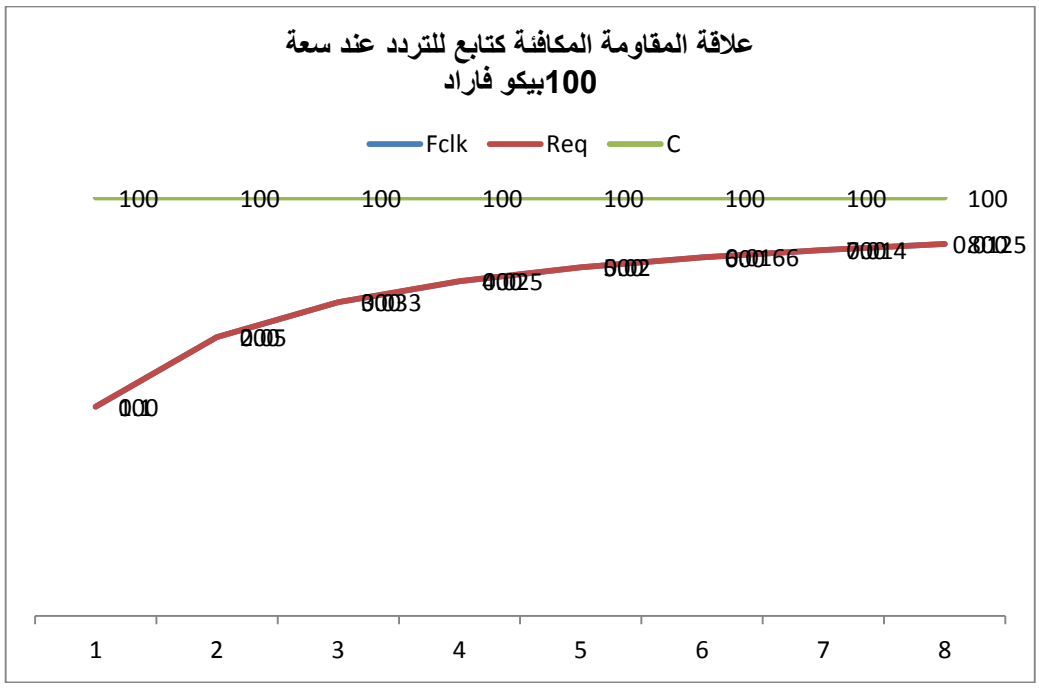
إن الشرط الرئيسي في استخدام المكثفات التبديلية هو نفس شرط نايكويست الموجود في جميع أنظمة آخذ العينات إذ يجب أن يكون تردد نبضات الساعة أعلى بكثير من التردد الحرج الذي يحدده الجداء RC في الدارة . بالإضافة الى ذلك فان المفاتيح التشابهية والتي تمثل الترانزستورات الحقلية MOSFET يجب أن تتمتع بمقاومات صفرية بين المنبع والمصرف وهي في حالة العمل On لكونها تعبر عن منبع للجهد.



الشكل(3-1) رسم منحني تغيرات المقاومة المكافئة R_{eq} كتابع للتردد عند مكثفة ال MOS 1 بيكو فاراد.



الشكل(3-2) رسم منحني تغيرات المقاومة المكافئة R_{eq} كتابع للتردد عند مكثفة ال MOS 10 بيكو فاراد.



الشكل(3-3) منحني تغيرات المقاومة المكافئة R_{eq} كتابع للتردد عند مكثفة ال MOS 100 بيكو فاراد.

هناك عدد من القيود الأخرى التي يجب أخذها بعين الاعتبار ضمن البحث:

1-لا يمكن استخدام المقاومة المكافئة التي تتشكل بفعل المكثف التبديلي لإغلاق مسار التغذية العكسية السالبة في المكبر العملياتي Op-Amp من تلقاء نفسه. و لضمان الاستقرار ، يجب إغلاق مسار التغذية العكسية في Op-Amp بشكل مستمر، في حين أن المكثفة التبديلية هي عبارة عن بنية آخذ عينات مكون من مقاومة، وبالتالي غير مستمر.

2–لا يمكن ترك عقد الدارة عائمة بسبب تراكم الشحنات التي تتطلب التفريغ في كل عملية تبديل . أي يجب أن يكون هناك دائمًا وجود لمسار مقاومة للأرض بحيث لا تتراكم الشحنة على صفائح المكثفة .

3–يجب توصيل الصفائح السفلية للمكثفات MOS بالأرض أو بمصدر الجهد الكهربائي . حيث يمكن ان تكون قيمة السعة الذاتية الطفيلية المرتبطة بصفيحة الجزء السفلي من مكثفة ال MOS تتراوح بين 5 ٪ و 20 ٪ من القيمة المرغوبة ، فتتصرف بشكل لا خطي مع الجهد ولذلك يجب توصيله بأرضية AC أو مصدر جهد حتى لا يؤثر هذا الجزء غير الخطي من السعة على الاستجابة الكلية لمرشح المكثفة التبديلي .

4–من الناحية العملية ، هذا يعني أن الجهود السعوية تقسم إلى ثلاث مكثفات أو أكثر ، ويتم استخدام دارات لتبديل طرفي المكثف بالتسلسل إلى مداخل المكبر العملياتي .

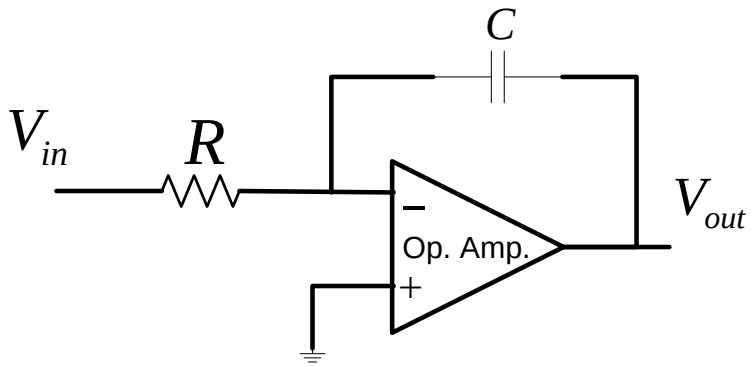
5–ينبغي الاحتفاظ بالقطب غير العاكس للمكبر العملياتي Op–Amp عند جهد ثابت. إذا كان هذا القطب متصلاً بالإشارة بطريقة ما ، فإن الدارة القصيرة الافتراضية بين مداخل المكبر العملياتي Op–Amp تعني أن المدخل العاكس لم يعد قطب ارضي افتراضي ، وبالتالي فإن يحصل تغيير غير مرغوب في استجابة المرشح بسبب السعة الطفيلية لمكثفة MOS .

4– المكاملات ذات المكثفات التبديلية:

SWITCHED CAPACITOR INTEGRATORS

تعتبر دارة المكامل السعوى التبديلي المكونة من المضخم العملياتي البنية الأكثر استخدامًا في المرشحات الفعالة ذات المكثفات التبديلية .

يبين الشكل (4) مكامل مكثفي تبديلي قياسي مكون من مقاومة ومكثفة R–C ويمكن إيجاد تحليله ووصفه في المرجع[4].



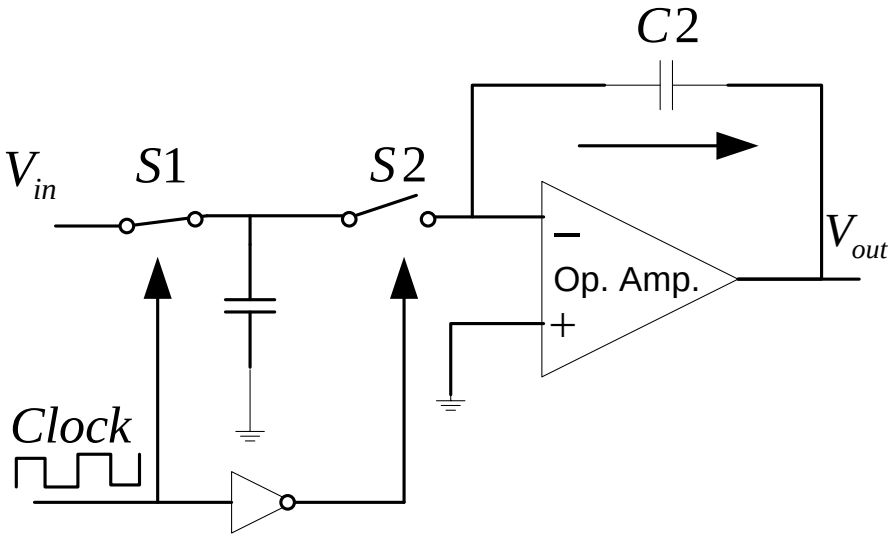
الشكل(4)– المكامل باستخدام المكبر العملياتي

يعطى تابع النقل لهذا المكامل بالعلاقة التالية:

$$H(f)=\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{-1}{j(\frac{f}{f_0})},.....(6)$$

حيث أن: $$f_0=\frac{1}{2\pi RC}$$

عند استبدال المقاومة R في الشكل(4) بالدارة المكافئة للمكثفة التبديلية كما هو مبين في الشكل(5) نحصل على المكامل السعوي التبديلي.



الشكل(5)–المكامل ذو المكثفة التبديلية.

باستخدام المعادلة (1) نحصل على تردد قطع المكامل وفق العلاقة التالية:

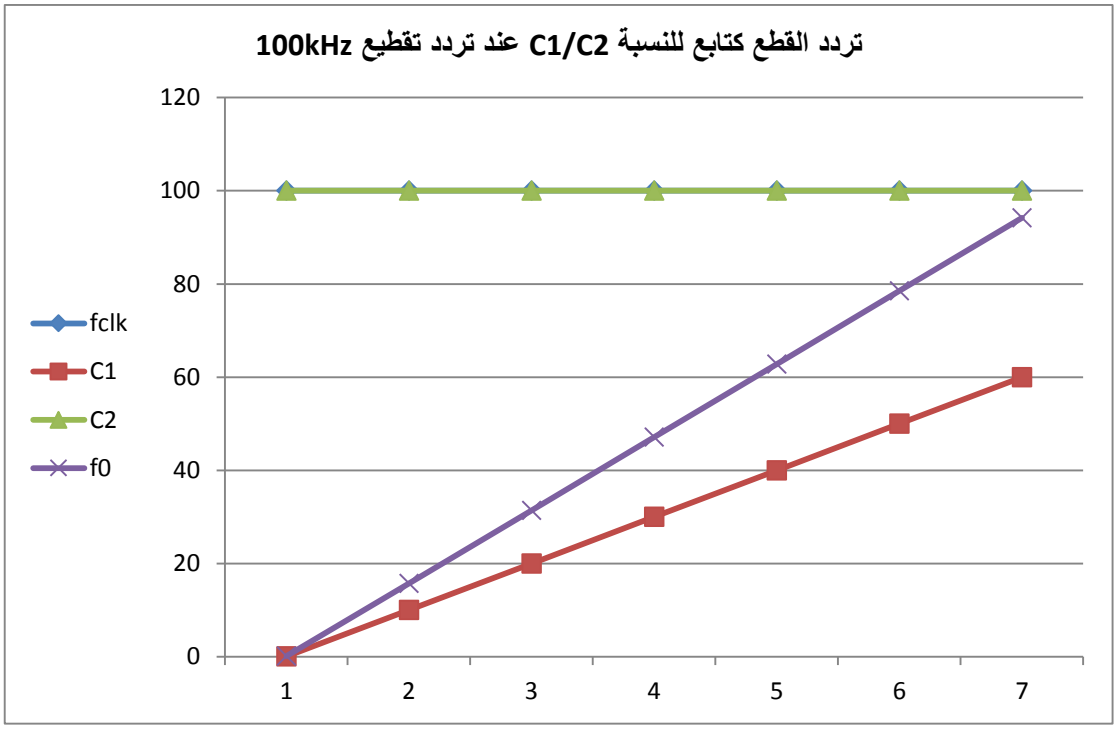
$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\frac{C_1}{C_2} f_{CLK}, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(7)$$

يلاحظ مما سبق أن هذا المكامل الجديد لا يحتوي على مقاومات ، والتي تأخذ مساحة كبيرة من الشريحة السيليكونية. أيضا ، فإن التردد $-3dB$ يعتمد على نسبة السعات وليس على الثابت الزمني RC وأن نسب التسامح تكون أسهل للضبط من الجداء RC.

وأخيرًا ، فإن الخواص الترددية للمكامل قابلة للتكيف مع تغيير بسيط في تردد نبضات الساعة .

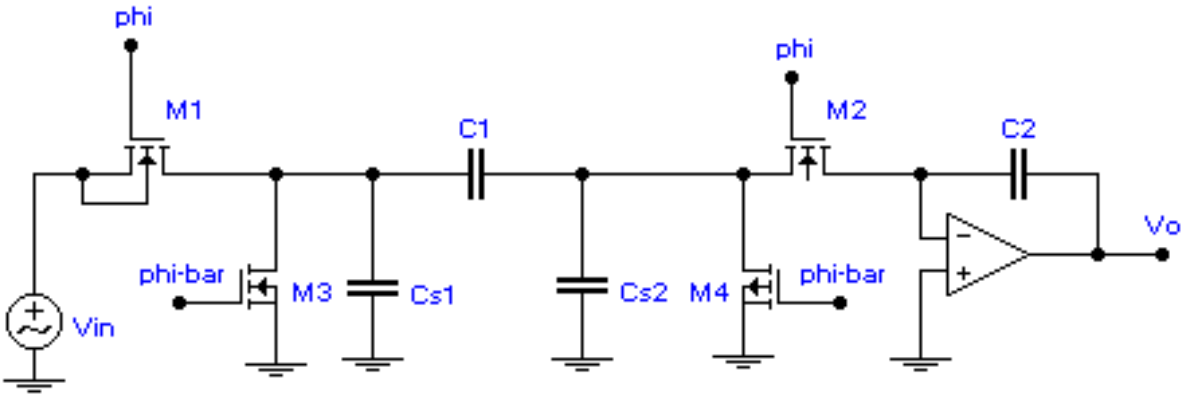
تتراوح القيم النموذجية للسعات المستخدمة في تكنولوجيا المكثفات التبديلية بين $0{,}1pF$ إلى $100\,pF$ وتعتبر هذه القيم منخفضة جداً بما فيه الكفاية بحيث أن السعات الشاردية Stray Capacitances للمفاتيح MOS والوصلات البينية و صفائح المكثفات التبديلية نفسها يمكن أن يكون لها تأثير كبير على الاستجابة الترددية للمرشحات المصممة مع هذه التقنية.

يوضح الشكل(6) رسم للعلاقة (7) وهي علاقة تردد القطع كتابع لنسبة المكثفات C_1/C_2 عند تردد تقطيع $f_{CLK} = 100kHz$



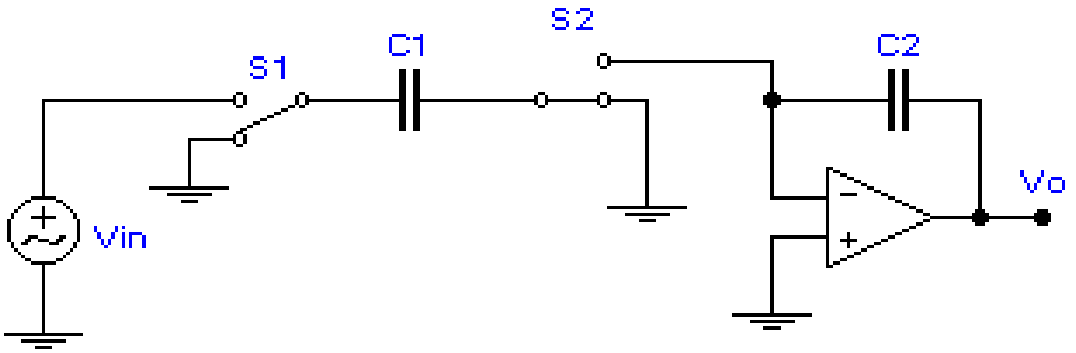
الشكل(6)– رسم بياني للعلاقة (7) تردد القطع كتابع للنسبة C_1/C_2

ولذلك لقد تم تخفيض أثر السعات الشاردة بشكل كبير من خلال البنية المفتاحية المضاعفة المعروفة [2 ، 7] المبينة في الشكل(7) والتي تسمى بالمكامل السعوي التبديلي غير الحساس للسعات الشاردة Insensitive to Stray Capacitances و نلاحظ من الشكل اطوار نبضات الساعة للمفاتيح MOS وهي $ph_1, ph_2, \overline{ph_1}, \overline{ph_2}$ التي تؤدي إلى الغاء نقل الشحنة العابرة من خلال السعات الشاردة، وأيضاً تم الإشارة إلى المكثفتين الشارديتين C_{S1} و C_{S2} ، كما هو موضح في الشكل ويتم بشكل أساسي نقل الشحنة فقط من خلال المكثفة C_1.

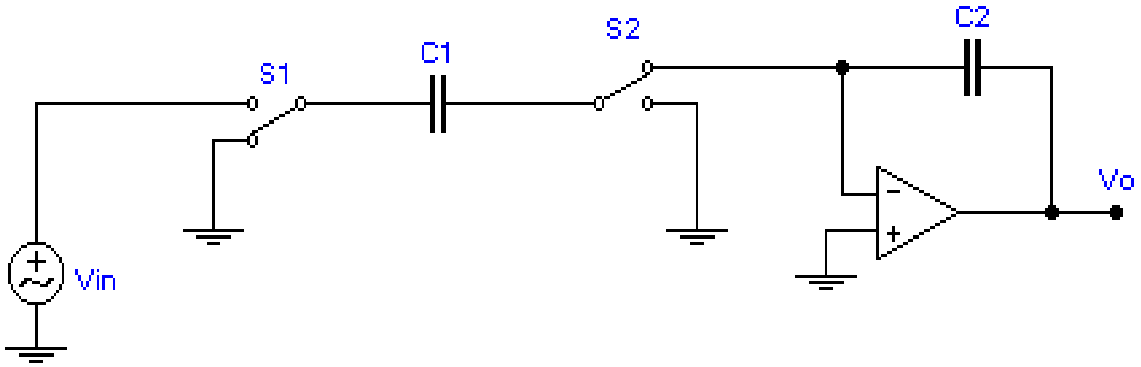


الشكل(7)– بنية المكامل السعوي التبديلي المقترحة بترانزستورات MOSFET اضافية مع إشارات اطوار الساعة لجعل المكثفة التبديلية غير حساس للسعات الطفيلية.

يوضح الشكلان (8- أ) و(8- ب) كل من المكامل العاكس والمكامل غير العاكس غير الحساس للسعات الطفيلية both the inverting and noninverting stray-insensitive integrator. ويتم الحصول على المكامل غير العاكس المذكور ببساطة عن طريق تبديل أطوار نبضات الساعة بين الترانزستورات M2 و.M4 .



الشكل(8- أ) – ضبط المفتاح التبديلي لتحقيق مكامل عاكس.



الشكل(8- ب) – ضبط المفتاح التبديلي لتحقيق مكامل غير عاكس.

نظرًا لأهمية المكامل في المرشحات السعوية التبديلية، فمن الضروري أن نكون على معرفة كاملة بأنواع المكاملات، وتشمل هذه الوسائل المكامل الجامع او المازج، والمكامل المفاضل او الطارح، والمكامل الفقد أو مكامل الضياع .

كل هذه المكاملات تلعب دورا رئيسيا في تصميم و تركيب المرشحات السعوية التبديلة.

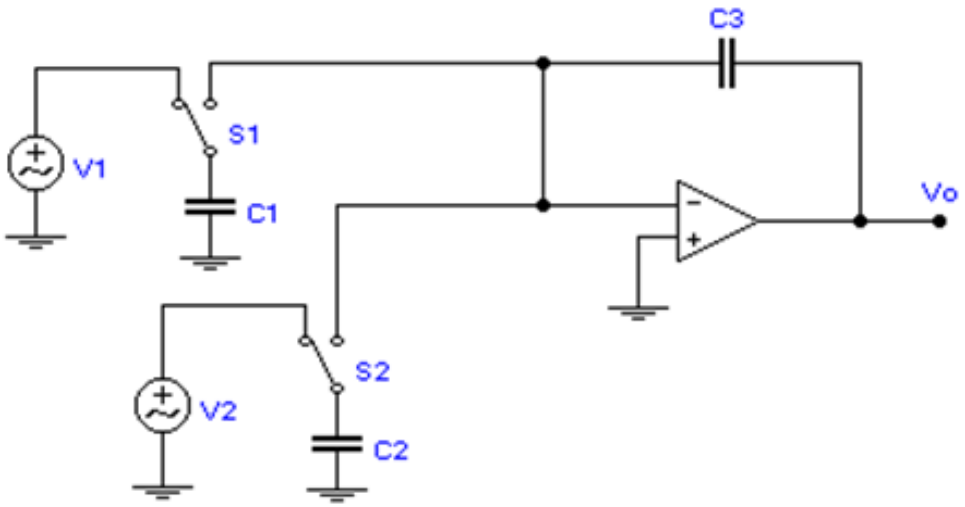
يبين الشكل(9) المكامل الجامع Summing integrator والذي يملك الاستجابة الترددية وفق العلاقة التالية:

$$V_O = \frac{-1}{j(\frac{f}{f_1})} \times V_1 - \frac{1}{j(\frac{f}{f_2})} \text{,.....(8)}$$

حيث أن:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\frac{C_1}{C_3} f_{CLK},.....(9)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi}\frac{C_2}{C_3} f_{CLK},.....(10)$$



الشكل(9)– المكامل الجامع

أما المكامل الطارح Differential integrator المبين في الشكل(10) فأسهل طريقة لفهم هذه الدارة هي النظر إلى ما يحدث للشحنة المتراكمة على المكثف C_1 عندما يتم نقل المفاتيح إلى جهة اليسار ، تشحن المكثف حتى قيمة $V_1 - V_2$. وعندما يتم نقل المفاتيح إلى جهة اليمين ، يتم انتقال الشحنة على عقدة الجمع للمكبر العملياتي op–amp. (هنا يعمل المكبر العملياتي دارة جامع بالمدخل العاكس) وبفرض أن معدل تردد الساعة عالي بما فيه الكفاية، يكون متوسط التيار في المدخل العاكس يعطى بالعلاقة التالية:

$$I_{AVG} = f_{CLK} \times C_1 \times (V_1 - V_2),.....(11)$$

ونحصل على جهد خرج غير حساس للسعات الطفيلية يعطى بالعلاقة التالية:

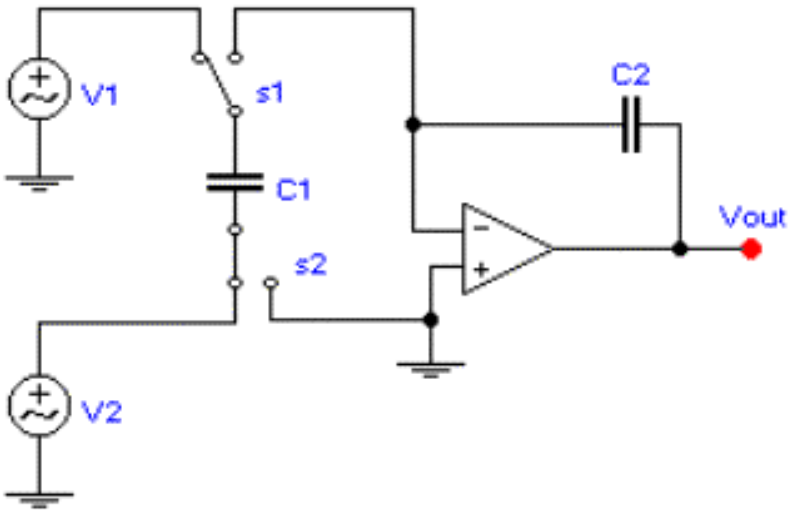
$$V_{out} = \frac{-I_{AVG}}{jwC_2} = -\frac{1}{jwC_2} f_{CLK} \times C_1 \times (V_1 - V_2),.....(12)$$

$$V_{out} = \frac{-I_{AVG}}{jwC_2} = -\frac{f_{CLK} \times C_1}{j(2\pi f)C_2} \times (V_1 - V_2),$$

$$V_{out} = + \frac{1}{j(\frac{f}{f_0})} \times (V_2 - V_1),$$

حيث ان:

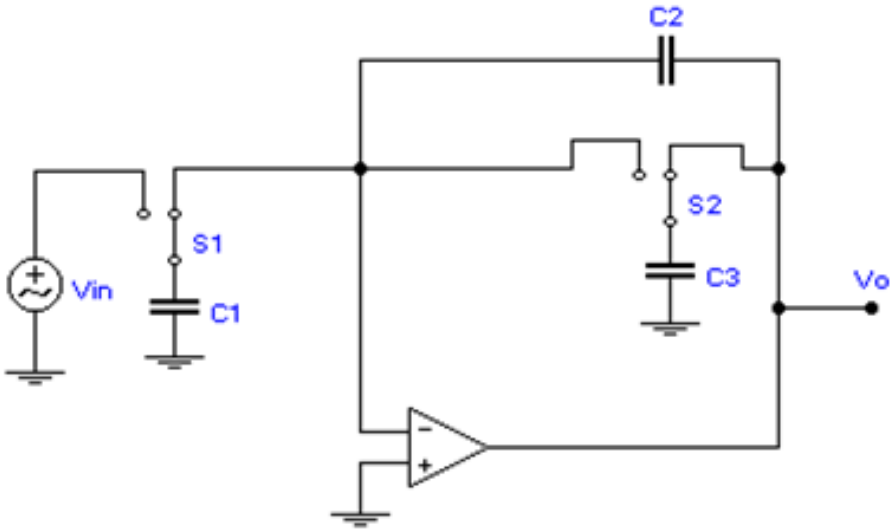
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{C_1}{C_2} f_{CLK}, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(13)$$



الشكل(10)–المكامل الطارح

ويبين الشكل(11) دارة المكامل الضياع Lossy integrator والذي يعطي استجابة ترددية لمرشح تمرير منخفض LPF من الدرجة الأولى مع وجود تضخيم Gain. تنفذ هذه الدارة باستبدال المكثفة على التفرع بمكثفة تغذية عكسية كما هو موضح على الشكل.

إن أسهل طريقة لتحليل استجابة دارات المكثفات التبديلية الأكثر تعقيدًا كما هو الان هو استبدال جميع المكثفات بمقاوماتها المكافئة . وبمجرد العثور على تابع النقل لدارة المقاومات (والمكثفات المنفصلة)، عندئذ يمكن إعادة تكافؤ المكثفات التبديلية للمقاومات حسب المعادلة رقم (1) حيث يمكن استبدالها مرة اخرى في تابع النقل للحصول على النتيجة النهائية.



الشكل(11)– بنية دارة المكامل الضياع

بالنسبة إلى المكامل الضياع يتم فيه فقد البيانات، فإن التحليل يتم على النحو التالي:

$$R_{eq1} = \frac{V_{in} - 0}{I_{AV1}} = \frac{1}{C_1 \times f_{CLK}} \text{,.....(14)}$$

$$R_{eq3} = \frac{V_{out} - 0}{I_{AV3}} = \frac{1}{C_3 \times f_{CLK}} \text{,.....(15)}$$

حيث يشير الصفر 0 في البسط إلى جهد الأرضي الظاهري أو الافتراضي عند المدخل العاكس للمكبر العملياتي Op–Amp.

ويعطى تابع النقل باستخدام هذه المقاومات المكافئة كما يلي:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_{eq3} // (1/jwC_2)}{R_{eq1}} = -\frac{R_{eq3}}{R_{eq1}(1 + jwC_2R_{eq3})} \text{,.....(16)}$$

الآن بتعويض مكافئات المكثفات التبديلية بالمقاومات حسب المعادلة رقم (1) نحصل على:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_1 f_{CLK}}{C_3 f_{CLK}} \frac{1}{[1 + (\frac{jwC_2}{C_3 f_{CLK}})]}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{C_1}{C_3} \times \frac{1}{1 + j(\frac{f}{f_0})} \text{,.....(17)}$$

حيث ان:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \times \frac{C_3}{C_2} \times f_{CLK}, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(18)$$

هو تردد الحرج ، أو تردد القطع عند $-3dB$ لمرشح التمرير المنخفض.

والمعادلة (17) هي عبارة عن معادلة مرشح تمرير منخفض فعال مضروبًا في الربح ويتناسب مع نسبة المكثفتين التبديليتين.

الاستنتاجات والتوصيات:

قدمت هذه الورقة أساسيات عمل شبكات المكثفات التبديلية، مع التركيز بشكل خاص على استخدامها في تصميم المرشحات الفعالة . ولقد قمنا بعرض اهم المرشحات الفعالة المستخدمة في معالجة الاشارة باستخدام المكثفات التبديلية وتم استخراج تابع النقل وترددات القطع لكل مرشح .

وبخلاف المرشحات الفعالة المستندة إلى op–amp التقليدي ، فالمرشح السعوي التبديلي له ترددات حرجة يسهل ضبطها و تثبيتها من خلال نسبة المكثفات . علاوة على ذلك ، فإنها تتطلب طاقة أقل من الشبكة التقليدية المعتمدة على op–amp بسبب اعتمادها على تقنية CMOS.

وبالنسبة للوظائف المتوفرة على شريحة واحدة ، فإنها تشغل مساحة أقل من الشريحة وتخفض من استهلاك الطاقة وتزيد من وثوقية العمل مع المرشحات الفعالة .

نأمل أن يتمكن الباحثون والمهندسون من استخدام المعلومات الواردة في هذه المقالة لتوسيع معرفتهم بالدوائر المتكاملة الحديثة.

References:

1. ***Introducing the MF-10: A Versatile Monolithic Active Filter Building Block***, by Tim Regan. National Semiconductor Application Note 307, August 2016.

2. ***Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits,*** by Sergio Franco. McGraw-Hill Book Company, New York, 2011. Chap. 13.

3. ***Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design,*** by A.B. Grebene. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York, 2014. Chap. 13, pp. 703-752.

4. ***Fundamentals of MOS Digital Integrated Circuits,*** by J.P. Uyemura. Addison-Wesley, Reading, MA, 2004. Chap. 8.

5. ***Electronic Devices, 5th Edition,*** by T. L. Floyd. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2015. Chap. 14.

6. ***Microelectronic circuits, 3rd Edition,*** by A. Sedra and K.C. Smith. Saunders College Publishing/HRW, Philadelphia, PA, 2006. Chap. 2.

7. **"Stray Capacitance Insensitive Switched Capacitor Filters,"** M. Hasler. Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2009.

8. ***Analog Filter Design,*** by M.E. Van Valkenburg. Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1999. Chap. 5.

9. ***Applications for a Switched-Capacitor Instrumentation Building Block,*** by Jim Williams. Linear Technology Application Note 3, July 2012.

10. ***CMOS Analog Circuit Design, 2nd Edition,*** by P. Allen and D. Holberg. Saunders College Publishing/HRW, Philadelphia, PA, 2013.

11. ***APLAC™ 7.0 User's Manual,*** Helsinki University of Technology, Circuit Theory Laboratory & Nokia Corporation Research Center, 2010. Available at http://www.aplac.hut.fi/

12. "Fast Analysis of Nonideal Switched-Capacitor Circuits using Convolution," H. Jokinen, M. Valtonen, and T. Veijola. 11th European Conference on Circuit Theory and Design, Davos, Switzerland, 2016.