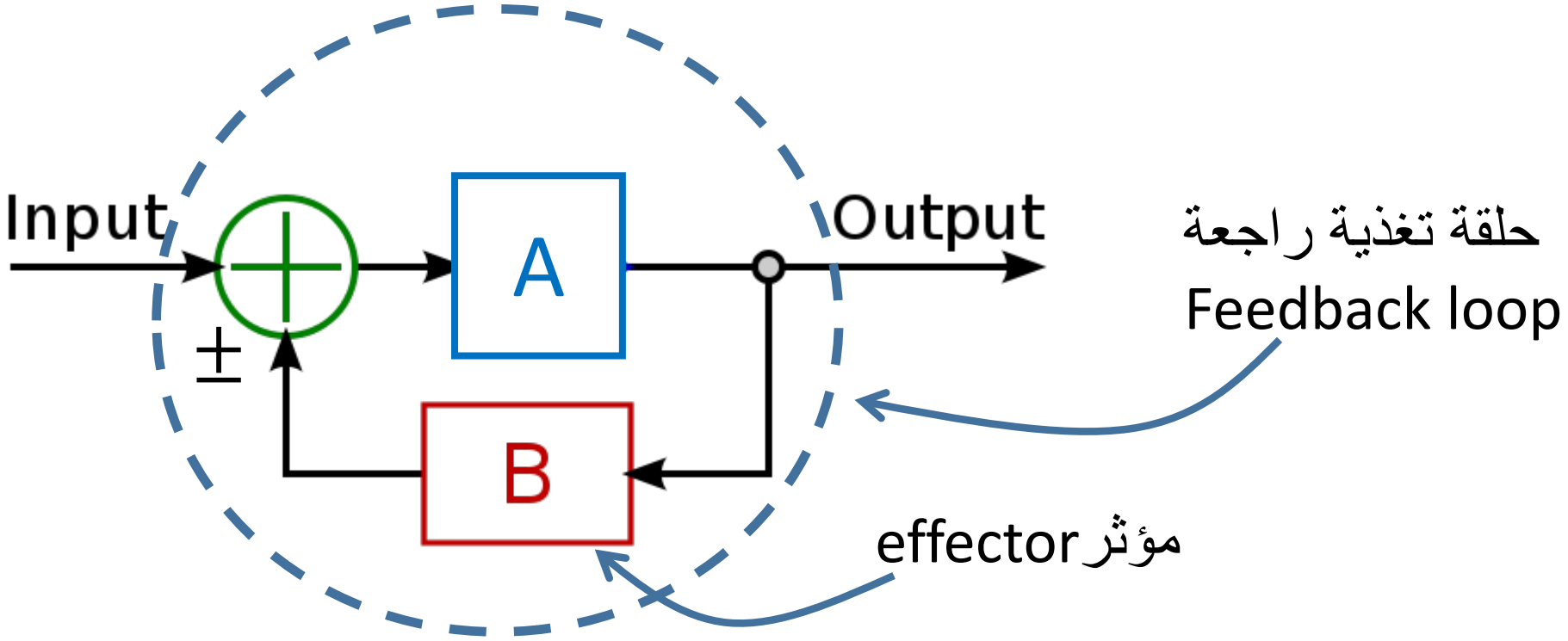
الدارات الإلكترونية 2

د. حاتم النجدي
الجامعة السورية الخاصة

التغذية الراجعة Feedback

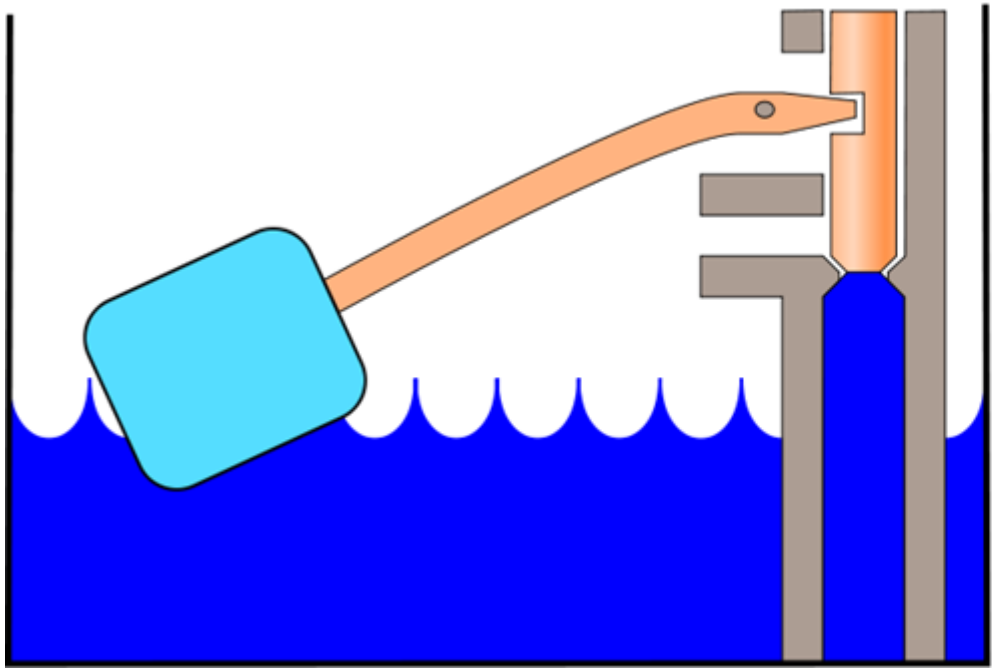
تعريف التغذية الراجعة:

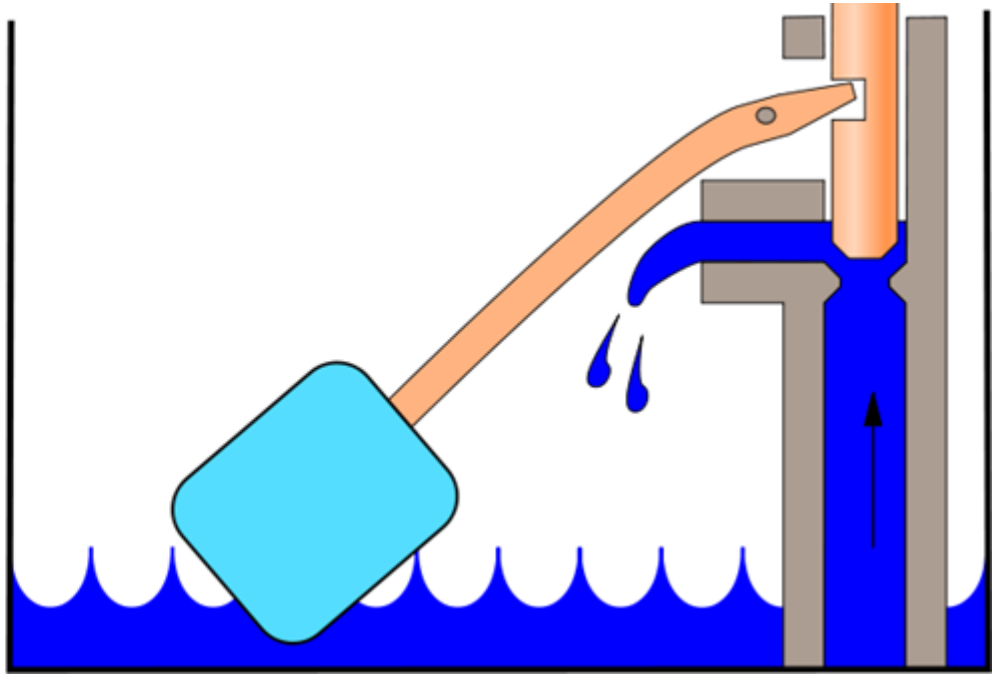
هي إعادة جزء من إشارة خرج النظام A إلى مدخله بعد تعديله بواسطة المؤثر B وجمعه جبريا مع إشارة الدخل الأصلية.



التغذية الراجعة Feedback

مثال للتغذية الراجعة: فواشة تنظيم مستوى الماء في خزان.





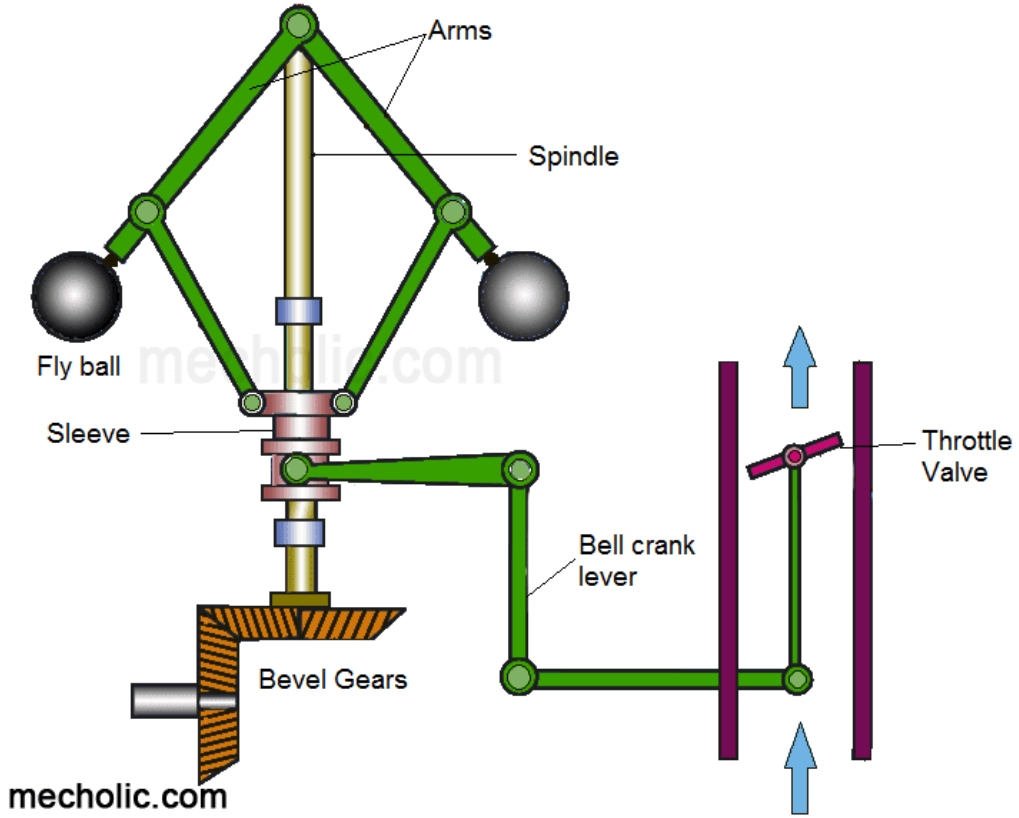
التغذية الراجعة Feedback

مثال للتغذية الراجعة: منظم درجة الحرارة.

منظم درجة حرارة محرك السيارة

التغذية الراجعة Feedback

مثال للتغذية الراجعة: منظم سرعة دوران محرك الاحتراق الداخلي (محرك السيارة).



منظم سرعة السيارة هو السائق نفسه

التغذية الراجعة Feedback

أمثلة للتغذية الراجعة:

- مستوى سكر الدم.
- دورة افتراس الطرائد.
- الدورات المناخية.
- أسواق الأوراق المالية.
- العرض والطلب.
- إلخ ...

التغذية الراجعة

تاريخ التغذية الراجعة:

- لم يكن مفهوم التغذية الراجعة معروفا قبل بداية القرن العشرين بالدقة التي يُعرف بها اليوم. لكن مفهوم الآلات الذاتية التنظيم كان معروفا منذ القدم.
- دخلت فكرة التغذية الراجعة (وليس اسمها) الاقتصاد البريطاني في القرن الثامن عشر.
- في عام 1909، أدخل الحائز على جائزة نوبل كارل فرديناند براون Karl Ferdinand Braun المصطلح Feedback للتعبير عن الترابط فير المرغوب فيه بين عناصر الدارة الكهربائية.
- في عام 1912، اكتشف باحثون كانوا يدرسون الصمام الإلكتروني أن التغذية الراجعة يمكن أن تكون مفيدة في تكبير الإشارات الكهربائية.

التغذية الراجعة

تاريخ التغذية الراجعة:

- دخل مفهوم التغذية الراجعة مختلف أنواع العلوم، من الميكانيك والكهرباء حتى الاقتصاد والبيولوجيا.
- في عام 1983، تم تعريف التغذية الراجعة بأنها ’معلومات عن الفرق بين المستوى الفعلي لظاهرة ما ومستوى مرجعي معين ما‘. ولا تصبح المعلومات تغذية راجعة ما لم تُترجم إلى إجراء معين.

التغذية الراجعة

أنواع التغذية الراجعة:

- التغذية الراجعة السالبة: تؤدي التغذية الراجعة السالبة إلى الحفاظ على مستوى خرج النظام بحيث يبقى مقاربا لمستوى مرجعي معين. ومن أمثلة ذلك مستوى السكر في الدم ودرجة الحرارة ومستوى الصوت في جهاز استقبال راديوي.

من أمثلة التغذية الراجعة السالبة كافة أنواع المنظِّمات الميكانيكية والكهربائية والبيولوجية والاقتصادية.

اخترع التغذية الراجعة السالبة مهندس الكهرباء الأمريكي هارولد ستيفن بلاك Harold Stephen Black في عام 1927 حين استعملها في المضخمات الإلكترونية، وسجلها براءة اختراع.

التغذية الراجعة

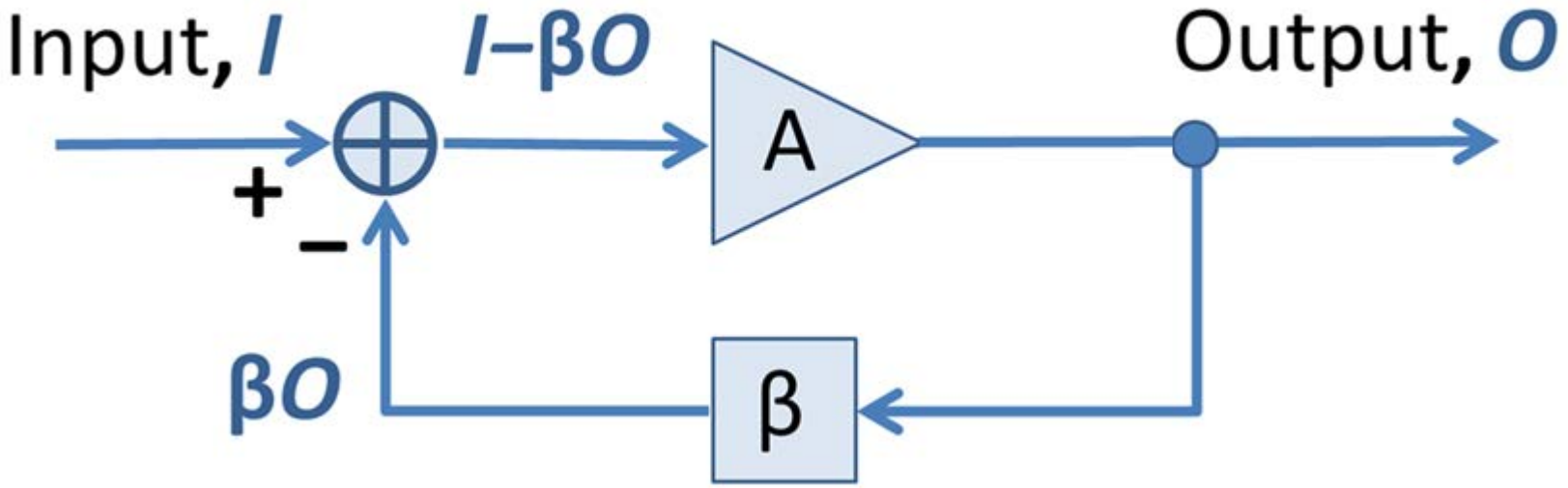
أنواع التغذية الراجعة:

- التغذية الراجعة الموجبة التي تؤدي إلى تضخيم مستوى الخرج بلا تناه. وحينئذ:
  - إما أن يصل مستوى الخرج إلى قيمة عظمى غير قابلة للتغيير، ويتوقف النظام عن العمل حينئذ. ومثال ذلك مضخم عمليات تم وصل خرجه مع دخله الموجب.
  - أو يضطرب النظام ويخرج عن السيطرة عليه، كما في حالة مريض السكري الذي لا يتوقف عن تناول السكريات.
  - أو يهتز بين حالتين: قصوى ودنيا. ومن أمثلة ذلك اضطرابات الأسواق المالية.

يمكن للتغذية الراجعة الموجبة التي تؤدي إلى الاهتزاز أن تكون مفيدة، وهي كثيرا ما تُستعمل في المهتزات الإلكترونية في نظم الاتصالات وغيرها.

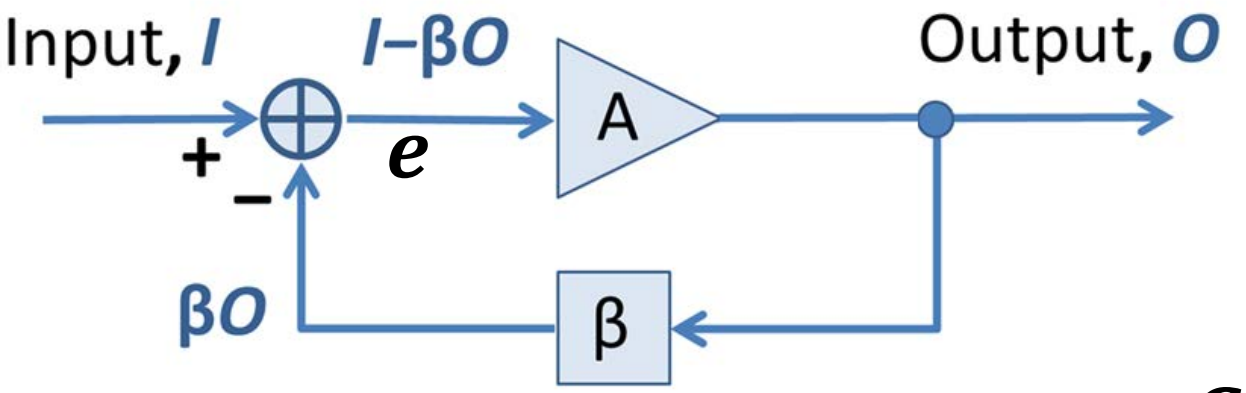
التغذية الراجعة

المضخم ذو التغذية الراجعة السالبة



التغذية الراجعة

المضخم ذو التغذية الراجعة السالبة



ربح المضخم:

$$G = \frac{O}{I} = \frac{(I - \beta O)A}{I} = A(1 - \beta G)$$

$$G = \frac{A}{1 + \beta A}$$

A: ربح الحلقة المفتوحة open loop gain

β: ربح التغذية الراجعة feedback gain

βA: ربح الحلقة المغلقة closed loop gain

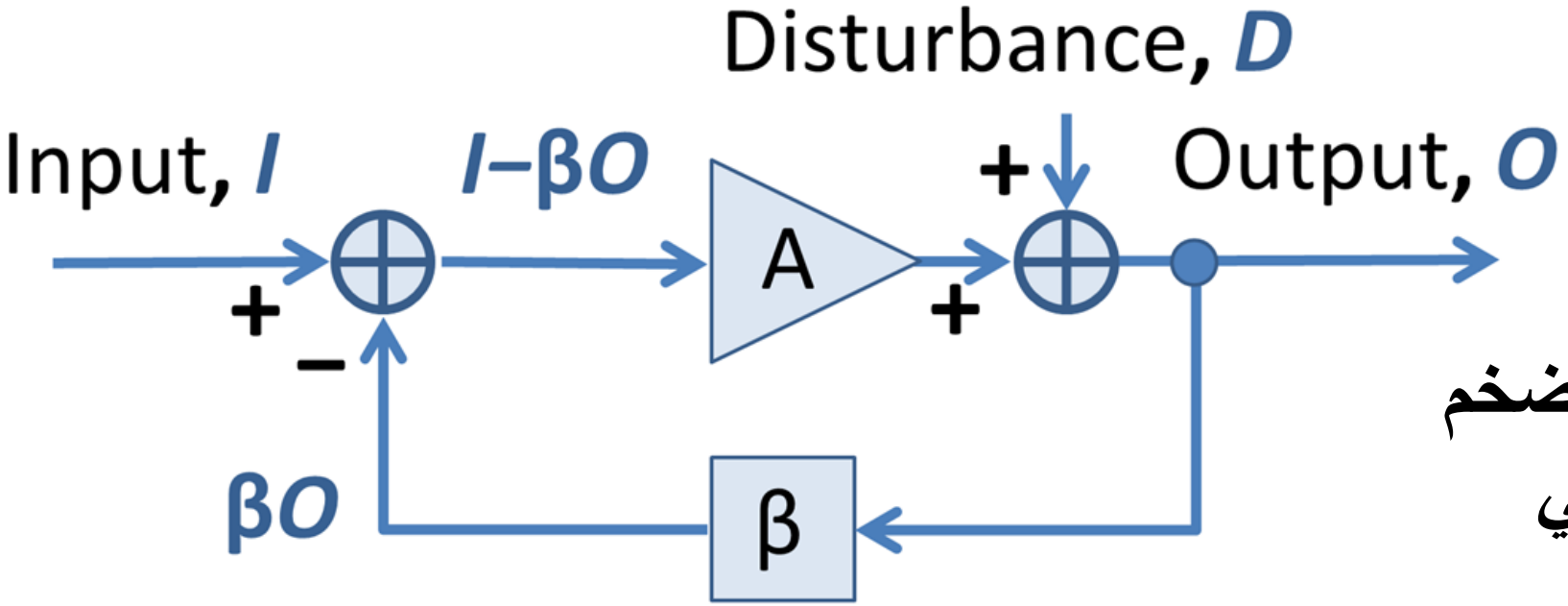
من أجل $\beta A \gg 1$: $G \approx \frac{1}{\beta}$

إشارة الخطأ:

$$e = I - \beta O = I(1 - \beta G)$$

التغذية الراجعة

الاضطراب في المضخم ذو التغذية الراجعة السالبة

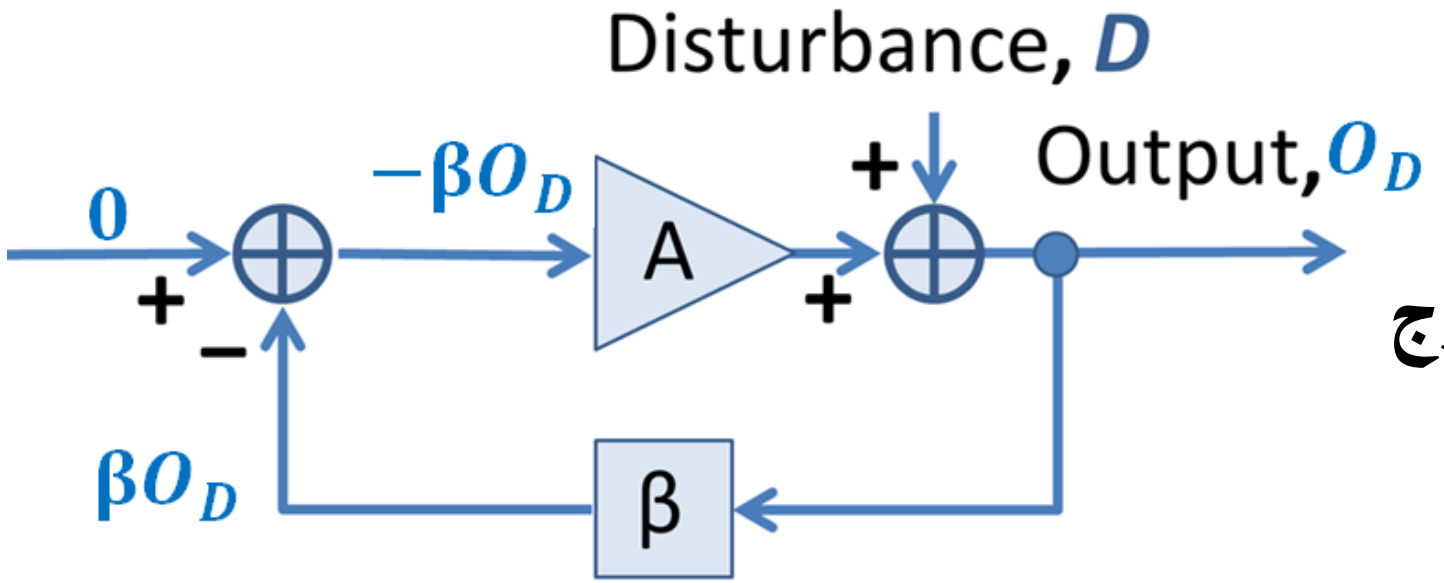


يحصل اضطراب D في خرج المضخم بسبب الضجيج والتشويه اللاخطي اللذين يُدخلهما في الإشارة.

ويتكون الخرج الكلي O من مركبة ناجمة عن الدخل I، ومركبة ناجمة عن الاضطراب D.
ونظرا إلى أن المضخم هو نظام خطي، يتكون الخرج من مجموع المركبتين.

التغذية الراجعة

الاضطراب في المضخم ذو التغذية الراجعة السالبة



لذا يمكن حساب مركبة الضجيج في الخرج بافتراض أن الدخل يساوي الصفر:

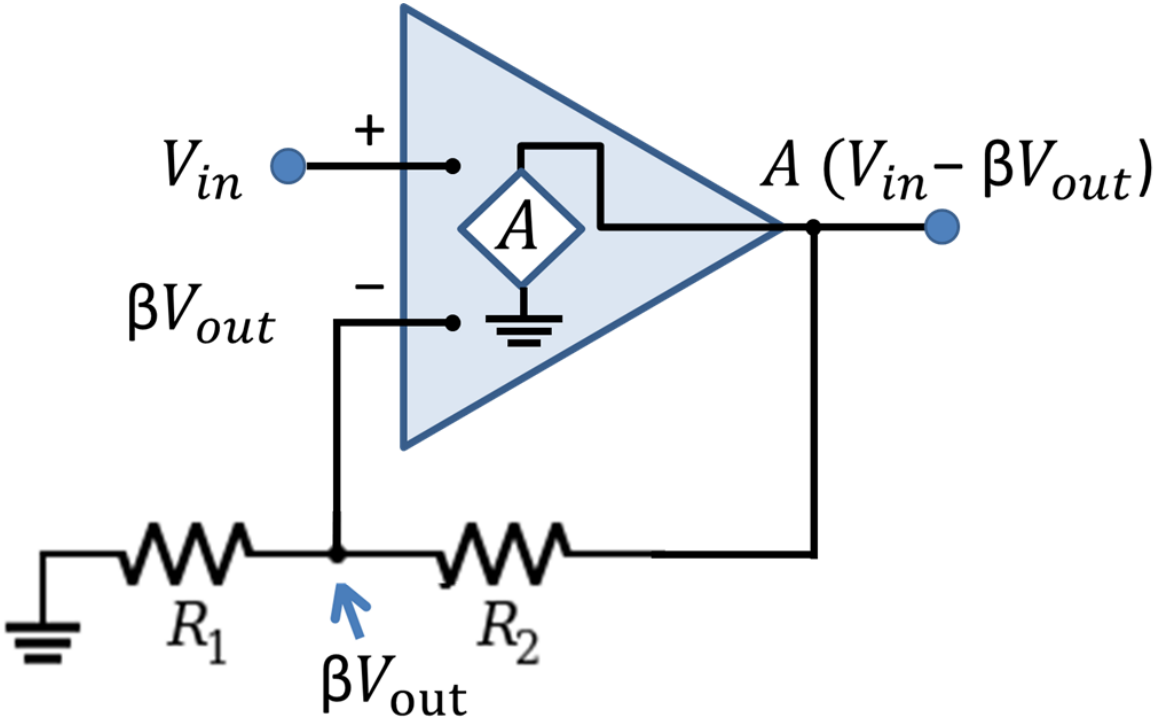
$$\beta O_D = -A\beta O_D + D$$

$$O_D = \frac{D}{\beta(1+A)}$$

أي إن حلقة التغذية الخلفية السالبة تخمد الاضطراب بنسبة $\frac{1}{\beta(1+A)}$

التغذية الراجعة

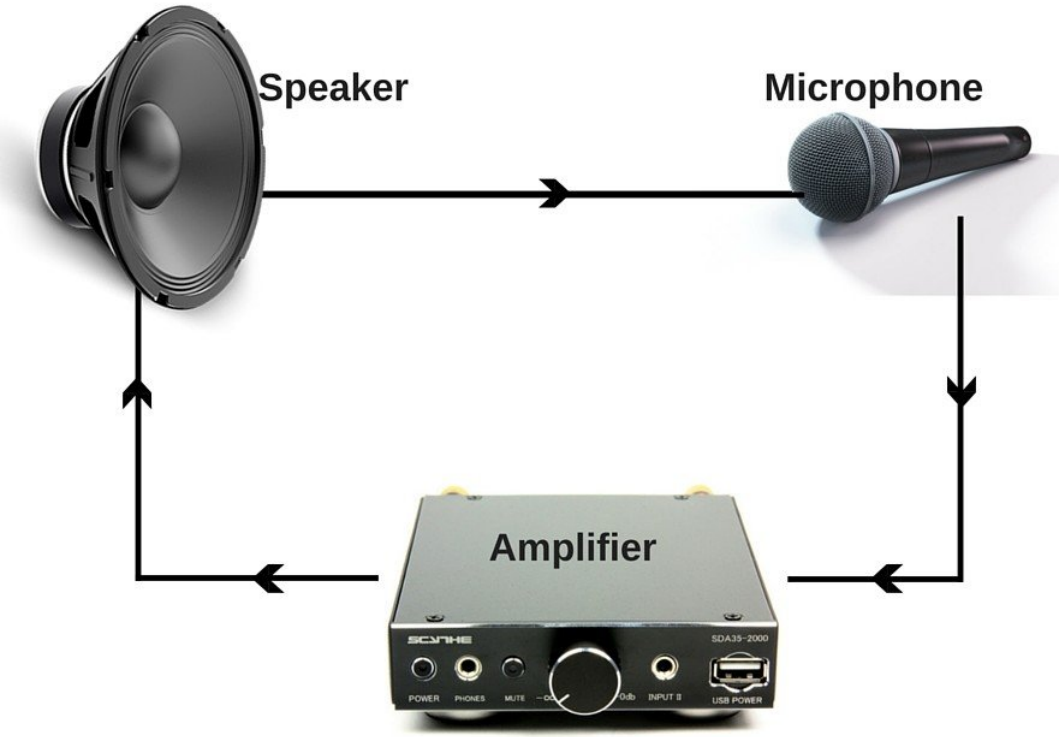
مضخم العمليات ذو التغذية الراجعة السالبة



باستعمال مجزئ الجهد المكون من المقاومتين R_1 و R_2 للتغذية الخلفية السالبة، ينتُج مضخم ربحه يعطى بـ:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

التغذية الراجعة



التغذية الراجعة الموجبة

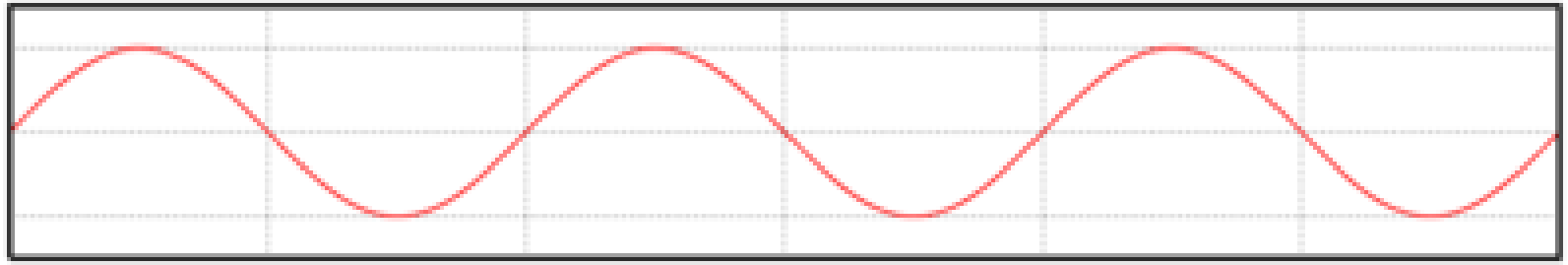
تحصل التغذية الراجعة الموجبة عندما يكون ربح الحلقة المغلقة موجبا. وحينئذ يؤدي أي اضطراب في النظام مهما كان ضئيلا إلى تفاقم ذلك الاضطراب إلى حده الأقصى.

من أشهر أمثلتها الصفير الذي يحصل حين وجود مكروفون ومجهار بالقرب من بعضهما.

المهتزات الإلكترونية Electronic Oscillators

تعريف

المهتز الإلكتروني هو دارة إلكترونية تولِّد إشارة إلكترونية مهتزة دورية، على شكل موجة جيبية أو مربعة غالبا. وهو من حيث المبدأ يحول التيار المستمر الوارد من وحدة تغذية مستمرة إلى إشارة تيار متناوب.



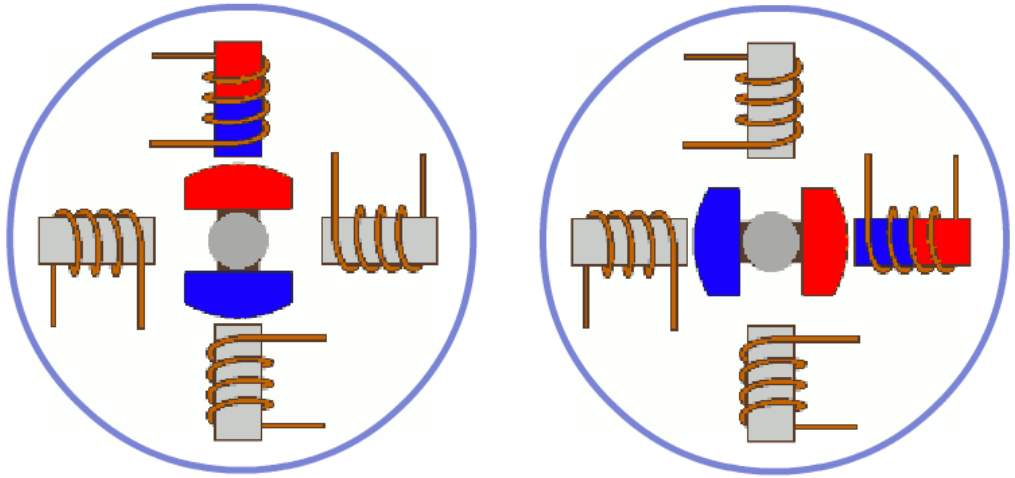
موجة جيبية sine wave

موجة مربعة square wave

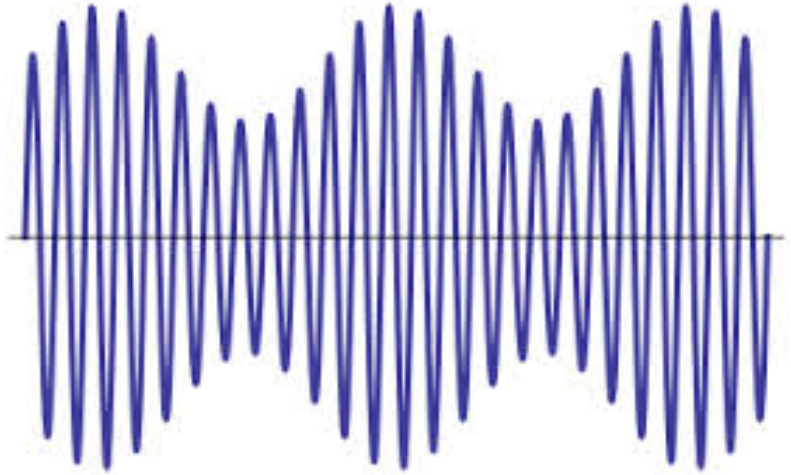
المهتزات الإلكترونية

تعريف

تُستعمل المهتزات الإلكترونية في تطبيقات مختلفة منها الترددات الحاملة اللاسلكية الإذاعية والتلفزيونية، وإشارات الساعة في النظم الرقمية، والإشارات التي تحرك محركات الساعات الزمنية، وإشارات الزمور في الألعاب الفيديوية .. إلخ.



محرك ساعة زمنية



موجة لاسلكية

المهتزات الإلكترونية

توصيف المهتزات

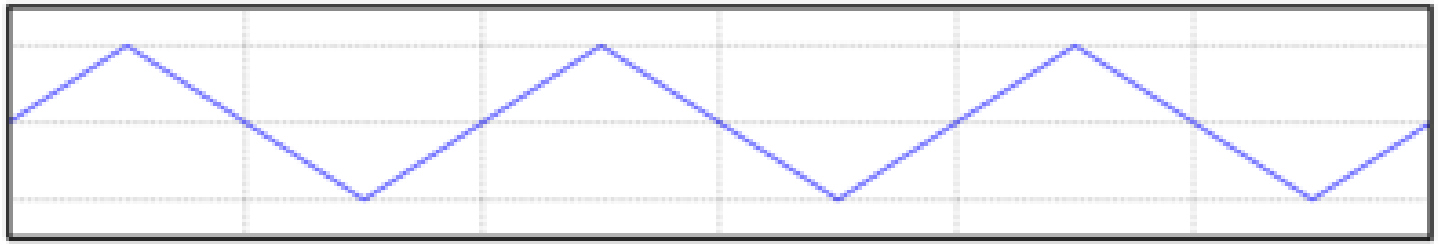
- مهتزات ترددات منخفضة: تحت 20 هرتز لاستعمالها في الإيقاع الموسيقي.
- مهتزات صوتية: من 16 هرتز حتى 20 كيلو هرتز لاستعمالها في النغمات الموسيقية.
- مهتزات ترددات راديوية: من 100 كيلو هرتز حتى 100 غيغا هرتز لاستعمالها في الاتصالات اللاسلكية.
- مهتزات مبدلات الطاقة العالية: لتحويل الجهد المستمر إلى جهد متناوب تردده يساوي 50 أو 60 هرتز.

المهتزات الإلكترونية

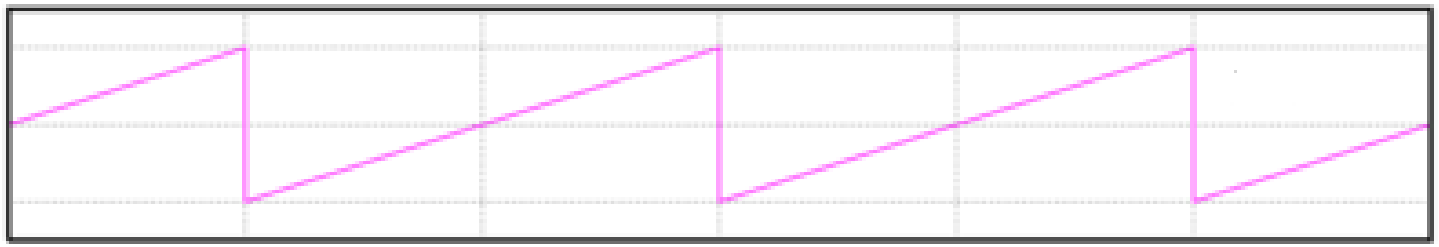
أنواع المهتزات

يوجد نوعان رئيسيان من المهتزات:

- المهتزات التوافقية Harmonic oscillator أو الخطية: تولِّد إشارات جيبية.
- مهتزات الاسترخاء Relaxation oscillator أو اللاخطية : تولِّد إشارات غير جيبية من مثل الموجات المربعة أو المثلثية أو موجة سن المنشار.



موجة مثلثية triangle wave



موجة سن المنشار Sawtooth wave

المهتز التوافقي

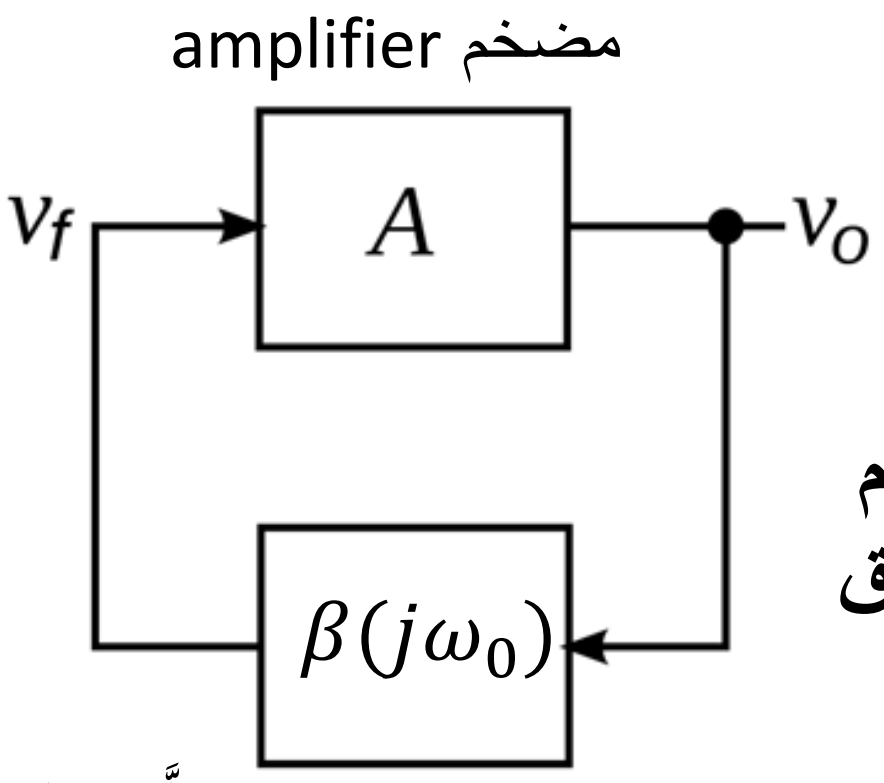
أنواع المهتز التوافقي:

- مهتز التغذية الراجعة الموجبة Feedback oscillator.
- مهتز المقاومة السالبة Negative-resistance oscillator .

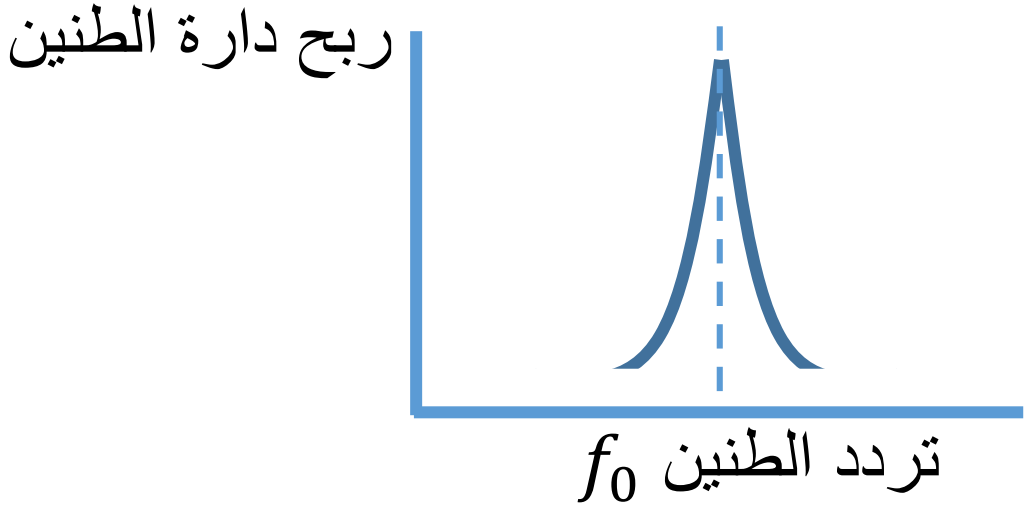
المهتزات الإلكترونية

مهتز التغذية الراجعة الموجبة

دارة مضخم إلكتروني من قبيل الترانزستور أو مضخم العمليات ذي تغذية خلفية موجبة عبر دارة مرشح ضيق الحزمة الترددية التي يقع التردد المولَّد المطلوب في مركزها f_0.



دارة تغذية راجعة موجبة مولَّفة على التردد المطلوب توليده $\omega_0 = 2\pi f_0$ (دارة طنين أو مرشح انتقائي)



دارة طنين resonance circuit

مرشح انتقائي selective filter

المهتزات الإلكترونية

أنواع مهتز التغذية الراجعة الموجبة

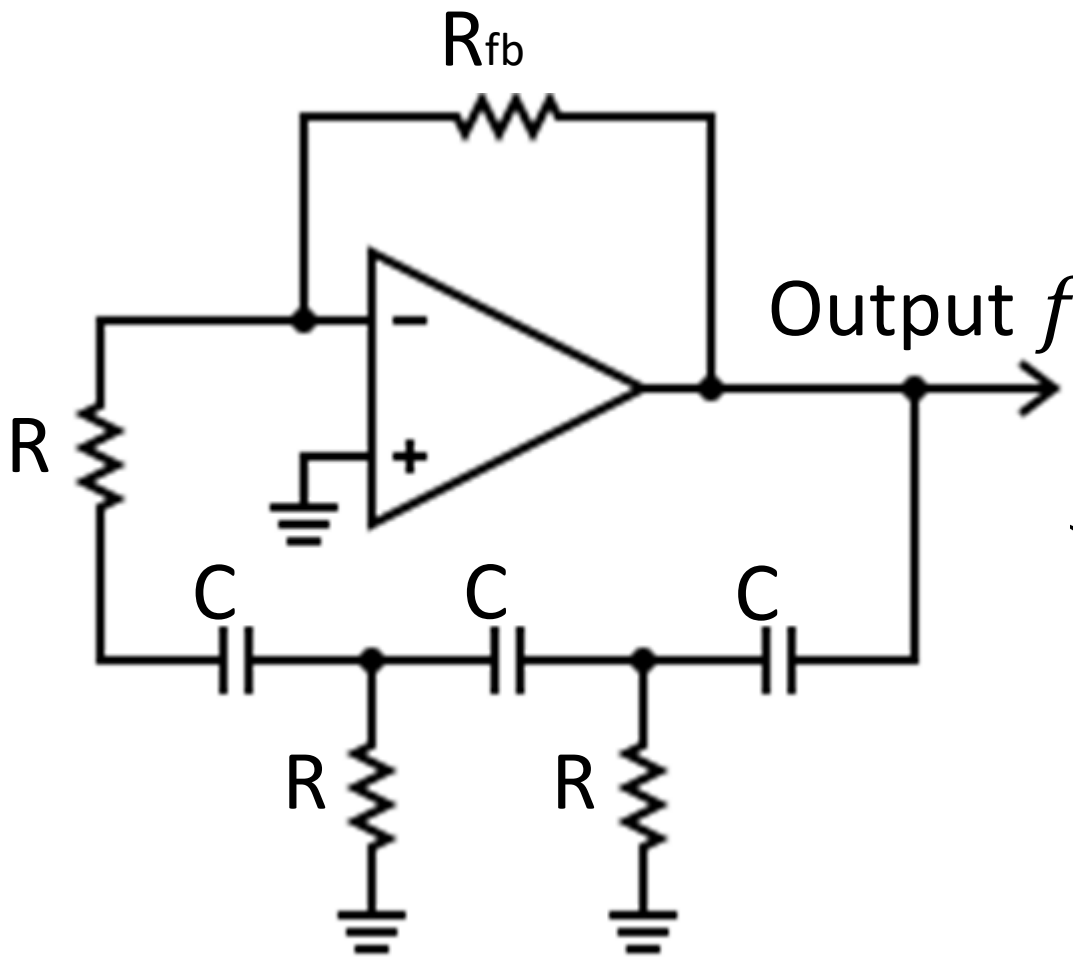
مهتز RC: تتكون دارة التغذية الراجعة فيه من مكثفة ومقاومة، ويُستعمل غالبا لتوليد ترددات صوتية.

أكثر أنواعه انتشارا:

مهتز إزاحة الطور phase shift oscillator

مهتز جسر فين Wien bridge oscillator

المهتزات الإلكترونية



مهتز إزاحة الطور

هو مهتز RC ذو تغذية راجعة سالبة للتيار المستمر بواسطة المقاومة R_{fb}، وتغذية راجعة موجبة عبر شبكة المقاومات والمكثفات R,C التي تقوم بإزاحة الطور. تردد الاهتزاز (الطنين) يساوي:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$$

شرط الطنين:

$$R_{fb} = 29\,R$$

حين وصل الدارة مع وحدة التغذية، يتولد ضجيج في المضخم سرعان ما يتحول إلى موجة جيبية ترددها هو f_0.

المهتزات الإلكترونية

مهتز جسر فين

نسبة إلى ماكس فين Max Wien الذي طوره في عام 1891.

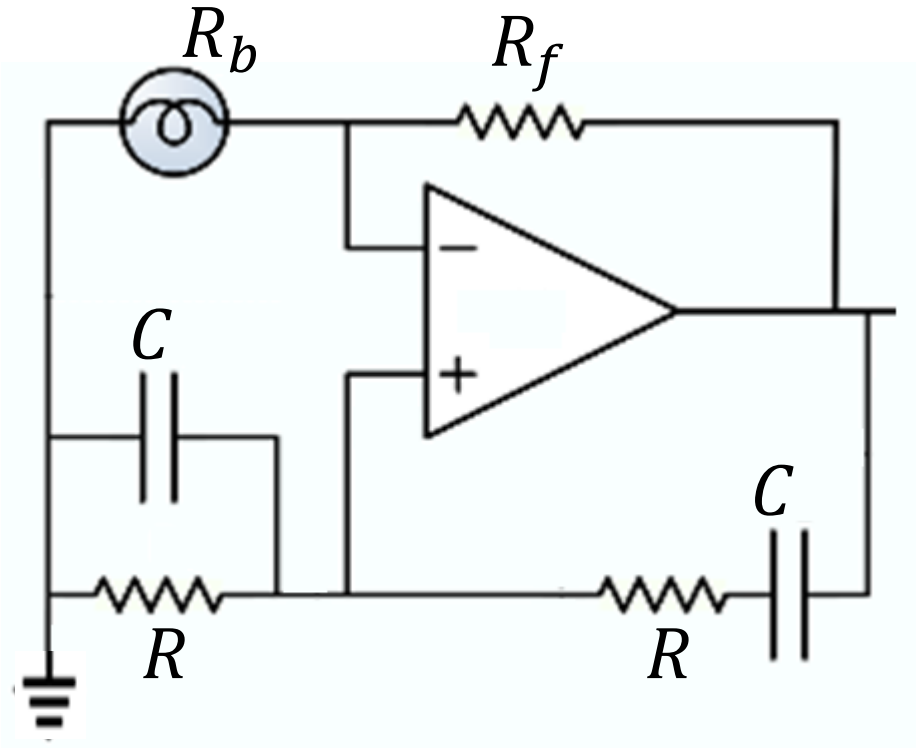
هو مهتز RC ذو تغذية راجعة سالبة للتيار المستمر بواسطة المقاومة R_f، وتغذية راجعة موجبة عبر شبكة المقاومات والمكثفات R,C التي تقوم بإزاحة الطور. تردد الاهتزاز (الطنين) يساوي:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

شرط الطنين المستقر:

$$R_b = \frac{R_f}{2}$$

R_b هي مصباح حراري
تحدد مقاومته ربح المضخم



حين وصل الدارة مع وحدة التغذية، يتولد ضجيج في المضخم سرعان ما يتحول إلى موجة جيبية ترددها هو f_0.

أنواع مهتز التغذية الراجعة الموجبة

مهتز LC: تتكون دارة التغذية الراجعة فيه من وشيعة تحريضية ومقاومة، ويُستعمل غالبا لتوليد الترددات الراديوية في مولدات الإشارة والترددين الحامل والمرجعي في المرسلات والمستقبلات الراديوية.

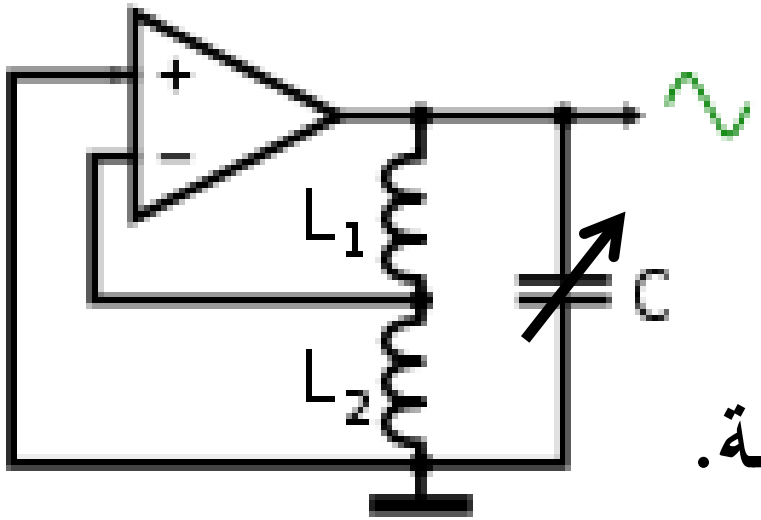
أكثر أنواعه انتشارا:

مهتز هارتلي Hartley oscillator

مهتز كولبيتس Colpitts oscillator

مهتز كْلَبّ Clapp oscillator

المهتزات الإلكترونية



يمكن ضبط التردد
بتغيير سعة المكثفة

مهتز هارتلي

هو مهتز LC ذو تغذية راجعة موجبة عبر شبكة الملفين والمكثفة.

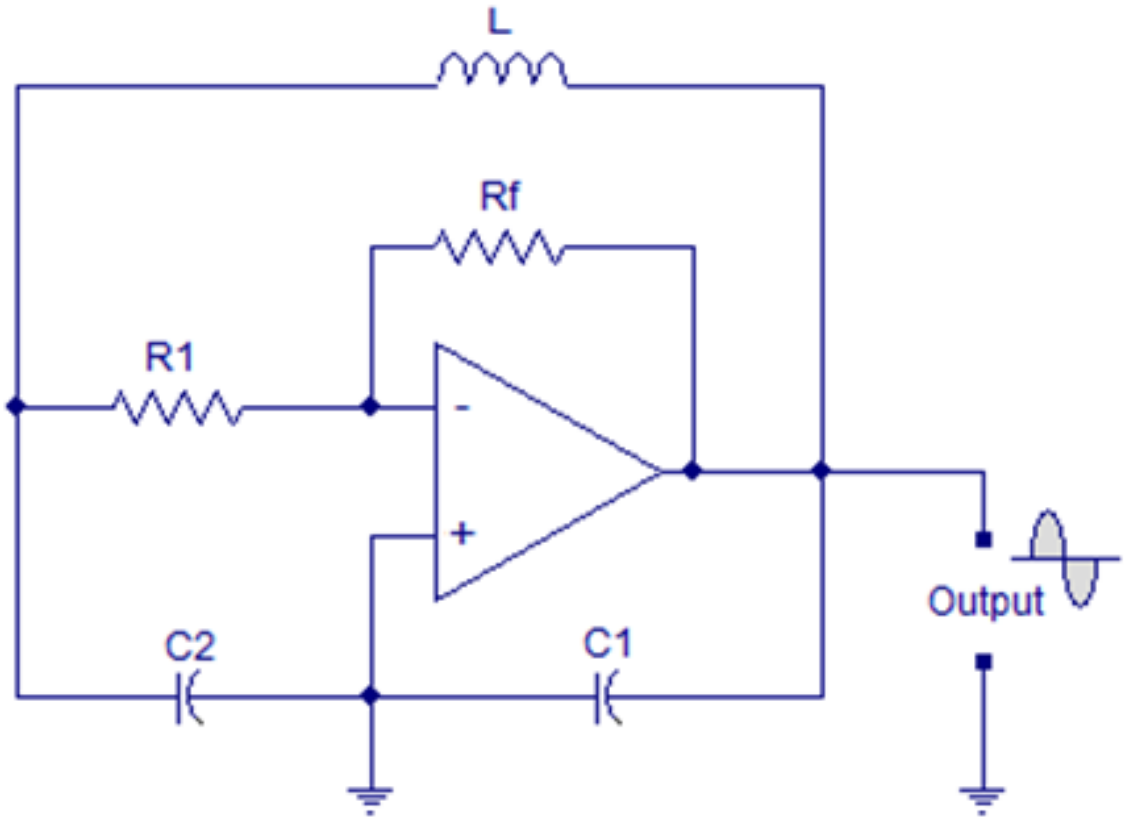
تردد الطنين يساوي:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$L = L_1 + L_2$ إذا كانت الوشيعتان غير مترابطتين مغنطيسيا (نواتان منفصلتان).

$L = L_1 + L_2 + k\sqrt{L_1 L_2}$ إذا كانت الوشيعتان مترابطتين مغنطيسيا (نواة واحدة. k هو التحريض المتبادل بين الوشيعتين).

المهتزات الإلكترونية



مهتز كولبيتس

هو مهتز LC ذو تغذية راجعة موجبة عبر شبكة الملف والمكثفتين. يتحدد ربح المضخم:

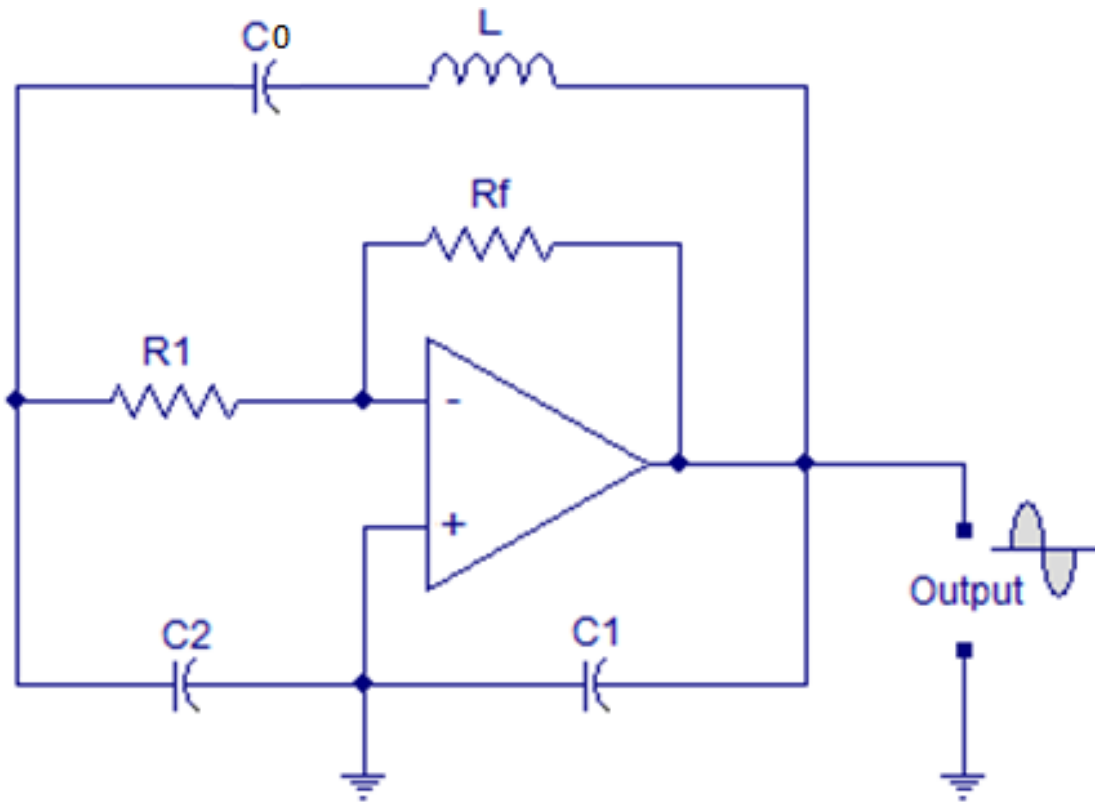
$$G = -\frac{R_f}{R_1}$$

تردد الطنين يساوي:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

حيث: $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$.

المهتزات الإلكترونية



مهتز كْلَبّ

هو مهتز LC مشابه لمهتز كولبيتس وُضعت فيه مكثفة ثالثة C_0 على التسلسل مع الملف. يتحدد ربح المضخم:

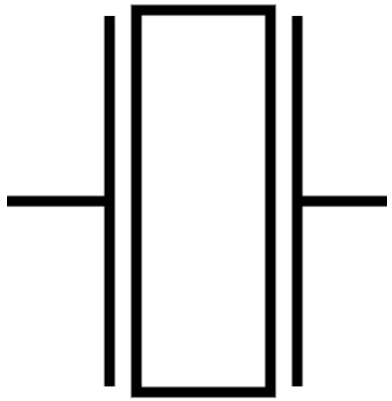
$$G = -\frac{R_f}{R_1}$$

تردد الطنين يساوي:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L}\left(\frac{1}{C_0}+\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}\right)}$$

C_1 و C_2 يجب أن تكونا أكبر من C_0 بنحو 40 مرة من أجعل المهتز أكثر استقرار من مهتز كولبيتس بـ 400 مرة.

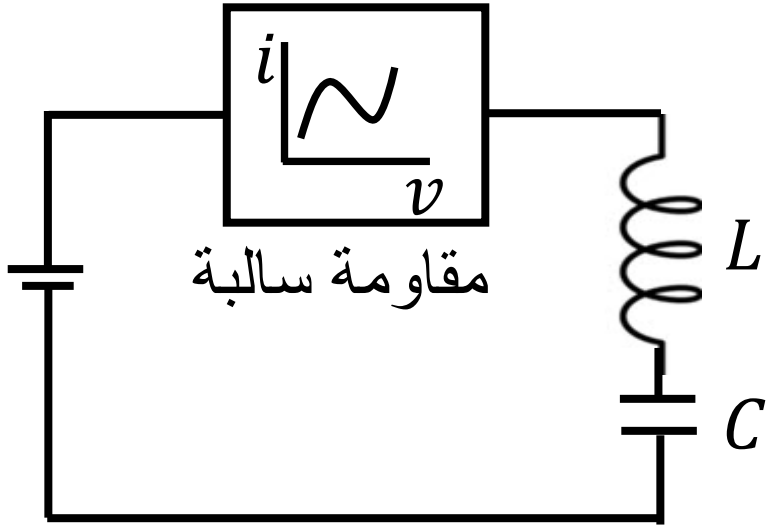
المهتزات الإلكترونية



المهتز الكريستالي crystal oscillator:

في هذا المهتز، المرشح أو دارة الطنين هي كريستالة كهرضغطية piezoelectric. تهتز هذه الكريستالة ميكانيكيا، ويحدد تردد اهتزازها تردد طنين المهتز. تتميز بانتقائية عالية للتردد، وباستقرار عال مع تغير درجة الحرارة مقارنة بمهتزات RC و LC. ويُستعمل هذا المهتز في كثير من التطبيقات أهمها الساعات الزمنية والنظم الرقمية. فهي التي تولد إشارة الساعة التي تعمل بها المعالجات والمتحكمات الرقمية microprosessors and microcontrollers

المهتزات الإلكترونية



مهتز المقاومة السالبة

يتألف مهتز المقاومة السالبة من دارة طنين LC وعنصر ذي مقاومة سالبة من قبيل الثنائي النفقي. والمقاومة السالبة تعني نقصان التيار مع زيادة الجهد.

من حيث المبدأ، الوشيعة والمكثفة هما دارة طنين، وإذا حصل تحريض لهما اهتزا وولَّدا إشارة جيبية. لكن نتيجة لوجود مقاومة كهربائية ضئيلة فيهما، يتخامد اهتزازهما. والمقاومة السالبة تُفني تلك المقاومة، فيستمر الاهتزاز.

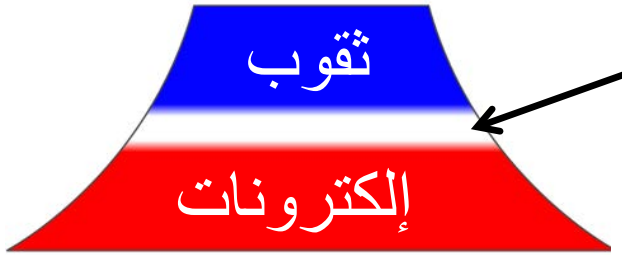
تُستعمل هذه المهتزات عادة في توليد الترددات العالية جدا والترددات المكروية. فالسعات الشاردة في مهتزات التغذية الراجعة تعرقل توليد تلك الترددات.

المهتز المتحكَّم فيه بالجهد voltage controlled oscillator (VCO)

خلافا للمهتزات السابقة التي يتحدد فيها تردد الاهتزاز بدارة طنينية عادية (LC) أو كريستالة، يحصل التحكم في قيمة التردد هنا بالجهد. ويُستعمل هذا النوع من المهتزات عموما في التعديل الزاوي (الترددي أو الطوري).

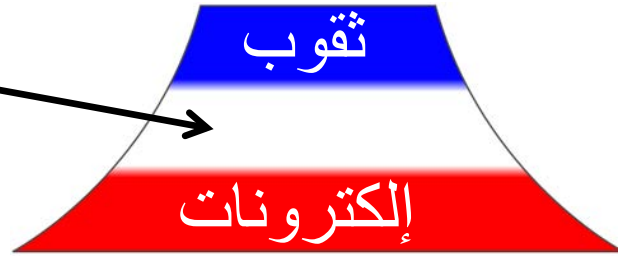
المهتز المتحكَّم فيه بالجهد voltage controlled oscillator (VCO)

في إحدى طرائق الـ VCO، تُستعمل مكثفة يحصل التحكم في سعتها بواسطة الجهد. وتوجد هذه المكثفات عادة في ثنائيات أنصاف النواقل التي يُطبق عليها جهد بالاتجاه المعاكس لمرور التيار reverse-biased. وتتغير قيمة سعة هذه المكثفة مع تغير قيمة الجهد العكسي المطبق. يُعرَف هذا الثنائي بالفاراكتور varactor أو الفاريكاب varicap.

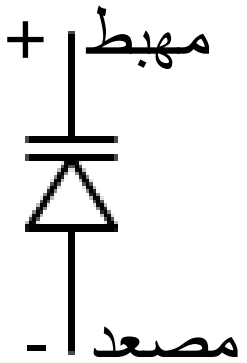


جهد عكسي منخفض يجعل المنطقة المنضبة أضيق والسعة أكبر

منطقة منضبة

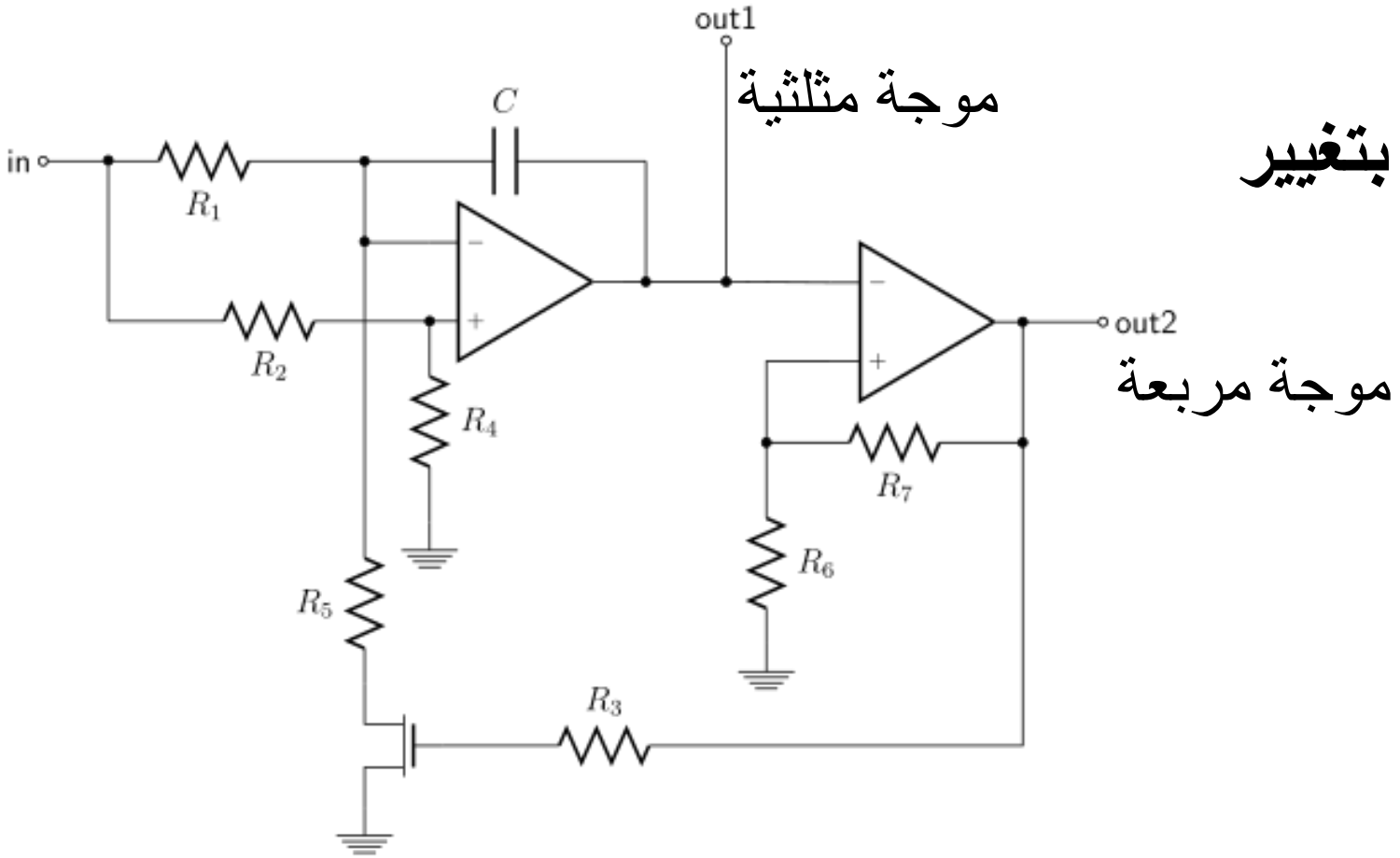


جهد عكسي عال يجعل المنطقة المنضبة أوسع والسعة أصغر



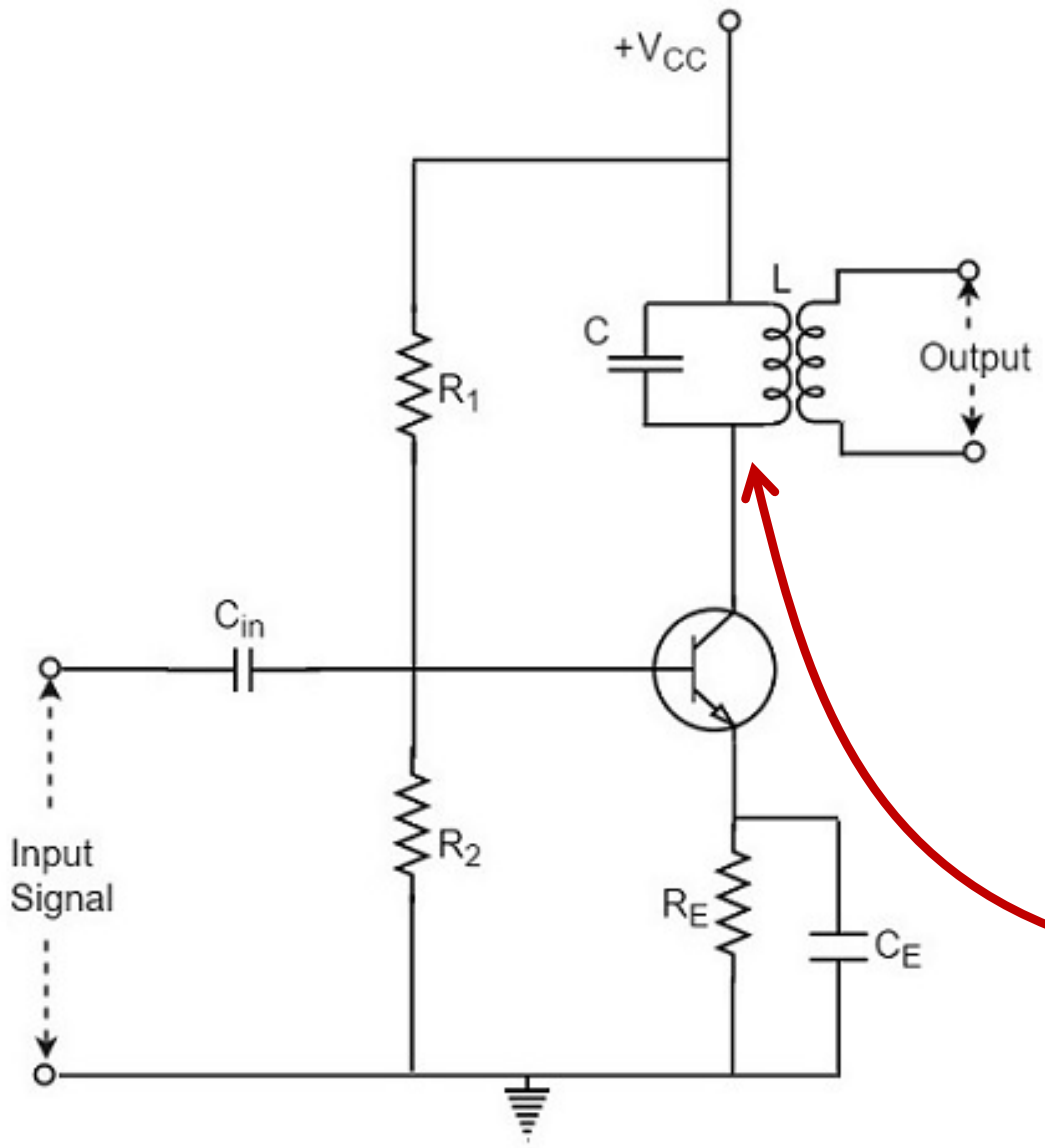
المهتزات الإلكترونية

المهتز المتحكَّم فيه بالجهد voltage controlled oscillator (VCO)



في طريقة أخرى، يجري تغيير التردد بتغيير معدل شحن مكثفة.

المضخمات المولَّفة Tuned amplifiers



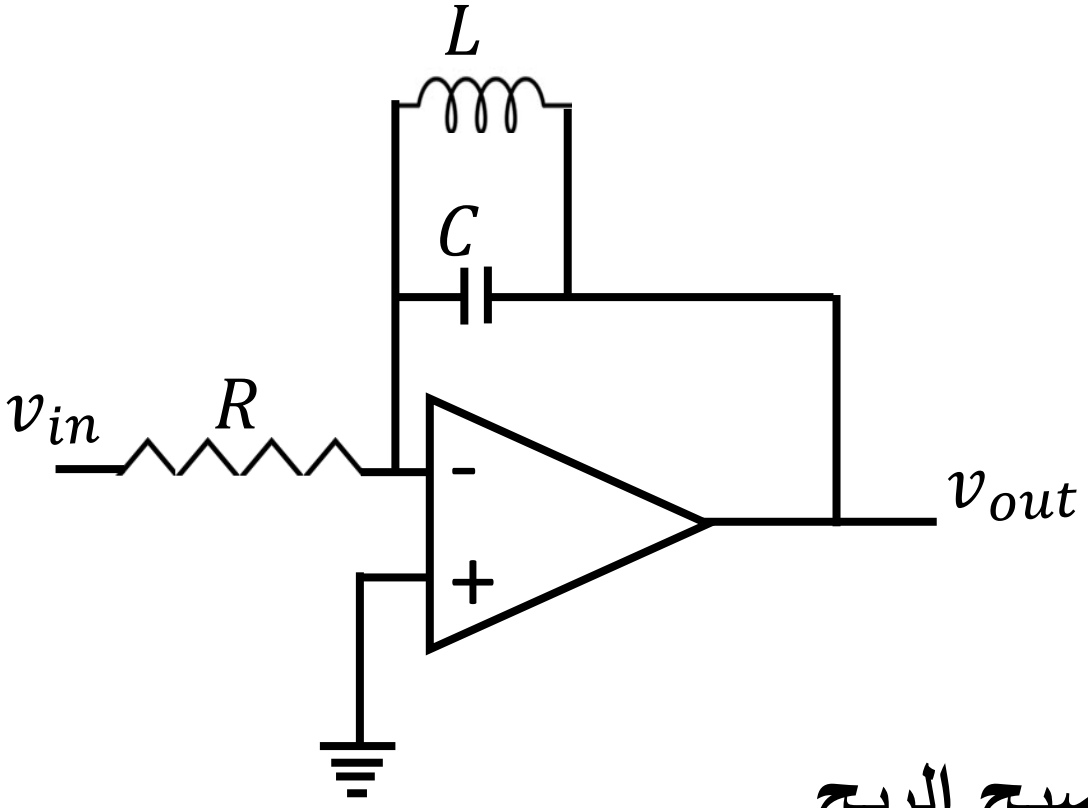
تعريف

المضخم المولَّف هو مضخم يحتوي على مرشح تمرير حزمة ضيقة ضمن دارة التضخيم. وهو يُستعمل في كافة أنواع الاتصالات الراديوية.

التوليف مع تردد معين هو انتقاؤه. ويُستعمل المضخم المولَّف لانتقاء تردد معين من بين مجموعة من الترددات المتوفرة، إذا كانت ثمة حاجة إلى ذلك التردد، مع رفض جميع الترددات الأخرى،.

حين استبدال حمل مضخم ما بدارة مولَّفة، ينتُج مضخم مولَّف.

المضخمات المولَّفة

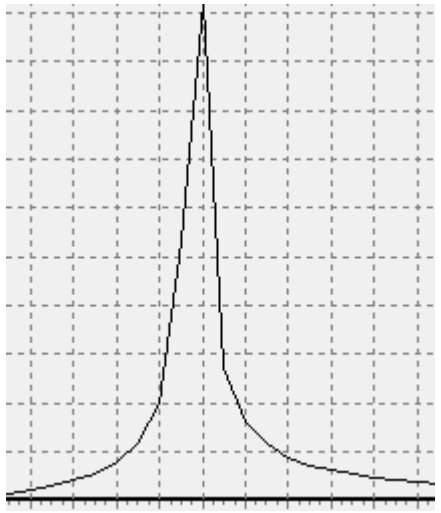


مثال: مضخم مولف

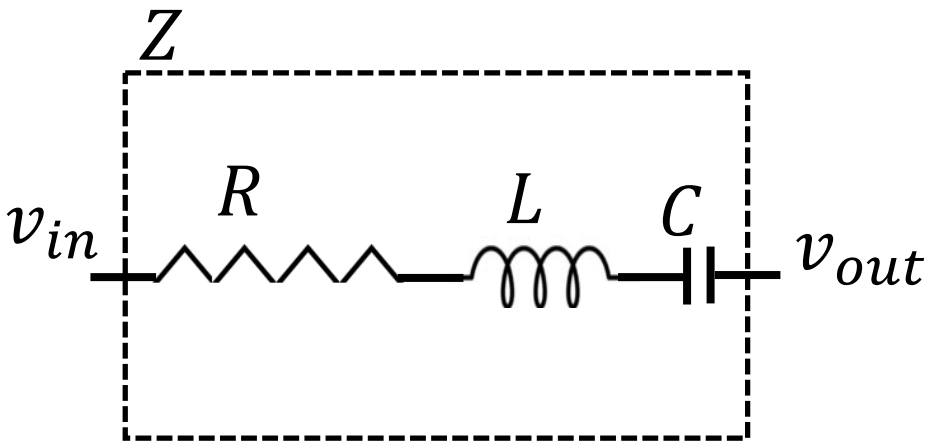
ربح المضخم يساوي:

$$G = \frac{j}{R}\left(\frac{\omega L}{1-\omega^2 LC}\right)$$

عندما $1 = \omega^2 LC$، أي عندما $\omega = 1/\sqrt{LC}$، يصبح الربح لانهائيا. وعندما تكون ω صغيرة، يتناسب الربح مع ω. وعندما تكون ω كبيرة، يتناسب الربح مع $1/\omega$.



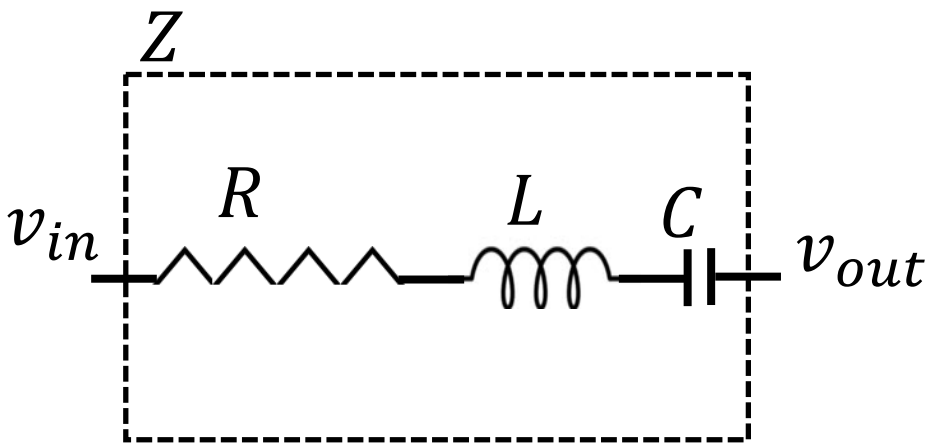
تسمى الدارة المكونة من الوشيعة والملف دارة طنينية.



أنواع الدارات الطنينية

الدارة الطنينية التسلسلية: تتكون الدارة الطنينية التسلسلية من مكثفة ووشيعة موصولتان تسلسليا. ونظرا لوجود مقاومة في كل منهما، وخاصة في الوشيعة، نمثل المقاومة الكلية للدارة بـ R، ونسميها مقاومة الأومية. ونطلق صفة الممانعة impedance على المقاومة التي تبديها الوشيعة أو المكثفة أو كل من المكثفة والوشيعة والمقاومة مجتمعين، ونرمز لها بـ Z.

المضخمات المولَّفة



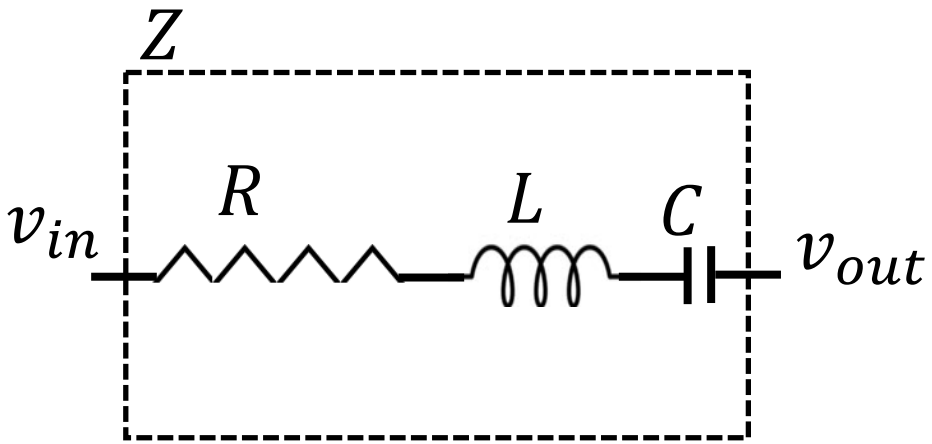
أنواع الدارات الطنينية

الدارة الطنينية التسلسلية

تعطى ممانعة الدارة الطنينية التسلسلية بـ:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

من الواضح أن ممانعة هذه الدارة عقدية، ويعطى جزؤها الحقيقة بالمقاومة R، ويعطى جزؤها التخيلي بـ $\omega L - \frac{1}{\omega C}$.

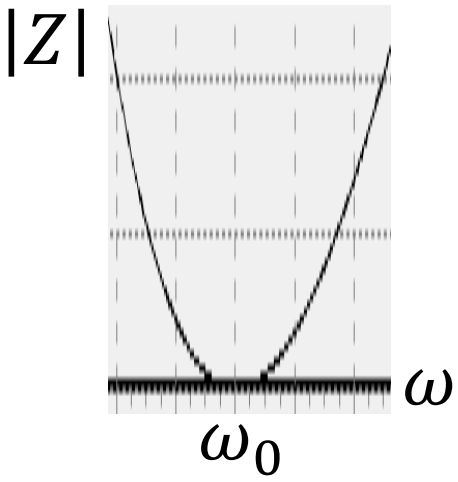


أنواع الدارات الطنينية

الدارة الطنينية التسلسلية

ينعدم الجزء التخيلي من ممانعة الدارة الطنينية التسلسلية عندما:

$\omega L = \frac{1}{\omega C}$، ونقول حينئذ أنها في حالة طنين، ويكون ذلك عند تردد الطنين:

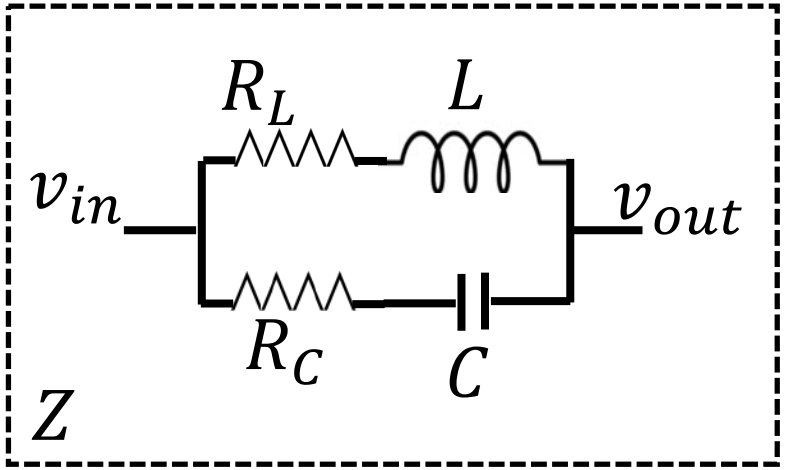


$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

وتعطى ممانعة الدارة حينئذ بالمقاومة R.

عند تردد الطنين، تكون ممانعة دارة الطنين التسلسلية أصغر ما يمكن.
وتكون عند الترددات الأصغر والأعلى كبيرة جدا.

المضخمات المولَّفة



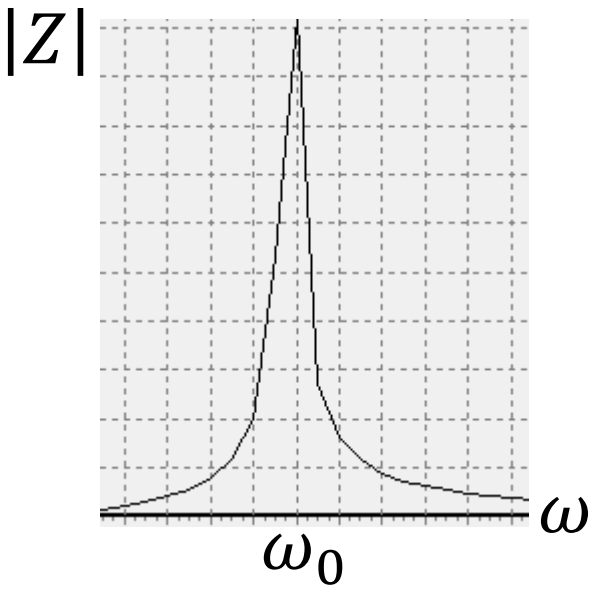
أنواع الدارات الطنينية

الدارة الطنينية التفرعية

تتكون الدارة الطنينية التفرعية من مكثفة ووشيعة موصولتان تفرعيا (على التوازي). وتوجد مقاومة داخلية للوشيعة هي R_L، ومقاومة داخلية للمكثفة هي R_C. والممانعة الكلية للدارة هي Z:

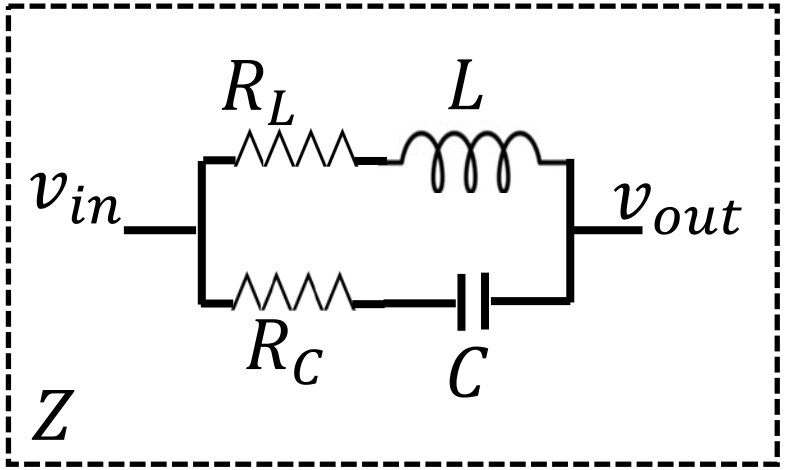
$$Z = \frac{(R_L + j\omega L)\left(R_C + \frac{1}{j\omega C}\right)}{(R_L + j\omega L) + \left(R_C + \frac{1}{j\omega C}\right)}$$

ويُعطى تردد طنين الدارة بـ: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$



عند الطنين تكون ممانعة الدارة أكبر ما يمكن

المضخمات المولَّفة



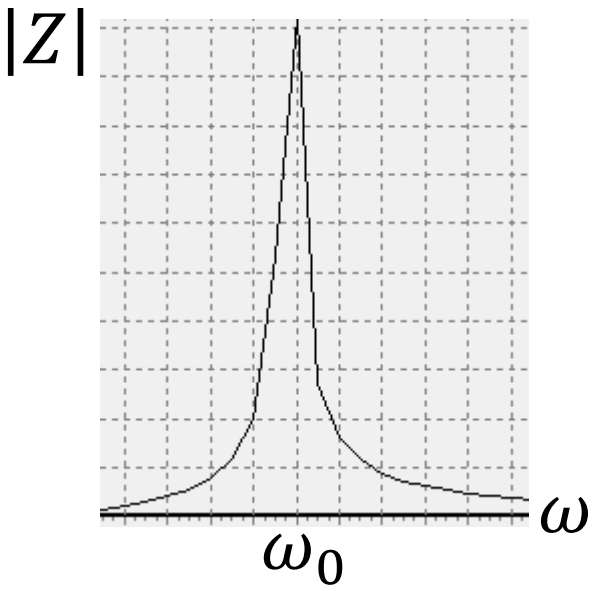
أنواع الدارات الطنينية

الدارة الطنينية التفرعية

عادة، تكون R_L و R_C صغيرتين، ولذا تقرب الممانعة بـ:

$$Z = j\left(\frac{\omega L}{1-\omega^2 LC}\right)$$

ويُعطى تردد طنين الدارة بـ: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$



عند الطنين تكون ممانعة الدارة أكبر ما يمكن

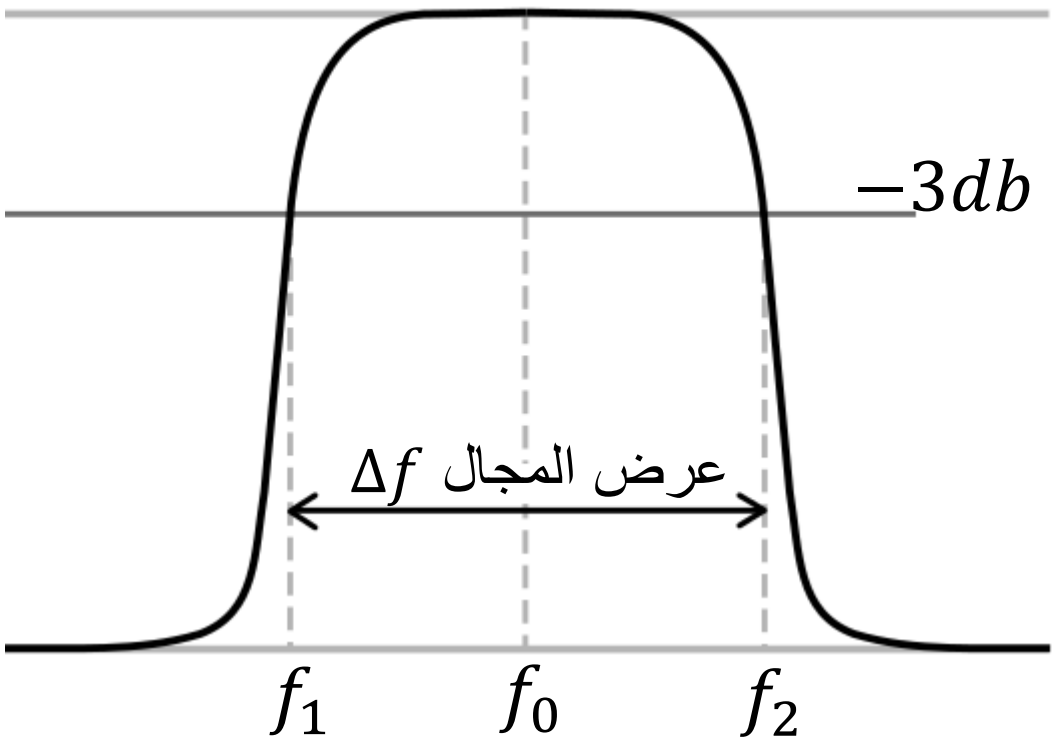
عامل الجودة في الدارات المولفة

عامل الجودة Q factor (Quality) هو مقدار يعبر عن التخامد الذي يتعرض له اهتزاز مهتز أو مرشح مولف أو دارة طنينية، ويعطى بنسبة تردد الطنين إلى عرض مجال الطنين للمهتز:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{\omega_0}{\Delta \omega}$$

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

كلما كان Q أكبر استمرت الدارة الطنينية بالطنين أكثر.



عامل الجودة في الدارات المولفة

يتغير عامل كثيرا من نظام إلى آخر تبعا لوظيفته:

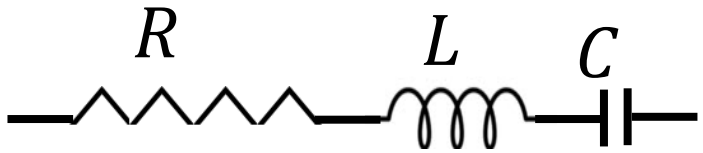
- في المهتزات التي من مثل الساعات والليزرات والشوكات الطنانة وما شابهها من النظم التي تحتاج إلى استقرار عال لتردد الطنين، يجب أن يكون Q عاليا جدا. يقع عامل جودة الشوكة الطنانة نحو **1000**. ويصل عامل جودة الساعات الذرية وفجوات الترددات المكروية الطنانة وبعض أنواع الليزر إلى 10^{11} أو أكثر.
- في المرشحات التي يجب ألا تهتز، يكون عامل الجودة عادة أصغر من $1/\sqrt{2}$.

عامل الجودة في الدارات المولفة

- في دارة الطنين التسلسلية المكونة من RLC في المستقبلات الراديوية:

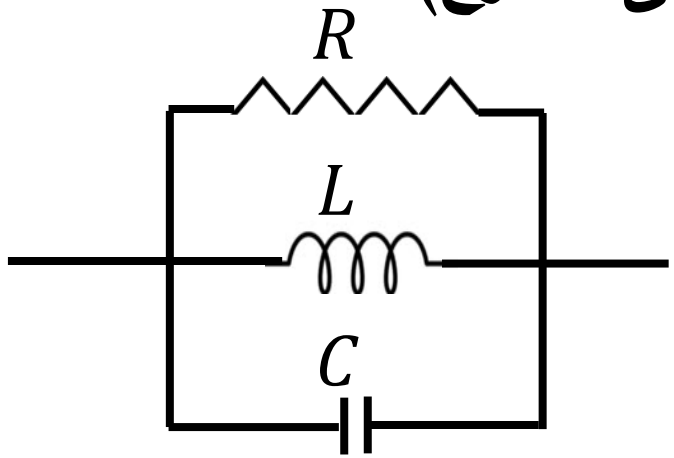
$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{\omega_0 L}{R}$$

كلما كانت R أكبر كان Q أصغر.



عامل الجودة في الدارات المولفة

- في دارة الطنين التفرعية المكونة من RLC يعطى عامل الجودة بمقلوب عامل جودة دارة الطنين التسلسلية (المقاومة والمكثفة والوشيعة كلها موصولة على التفرع):



$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} = \omega_0 RC = \frac{R}{\omega_0 L}$$

كلما كانت R أصغر، كان Q أصغر.

أما تأثير المقاومة الداخلية للوشيعة R_L (غير مبينة في الشكل) فهو كتأثير مقاومة الدارة التسلسلية.

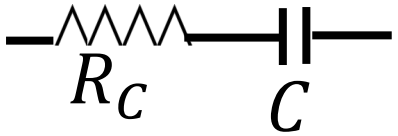
عامل الجودة في الدارات المولفة

- بالنسبة للوشيعة المنفردة:

$$Q_L = \frac{\omega_0 L}{R_L}$$

يجب أن تكون مقاومة الوشيعة الداخلية منخفضة من أجل عامل جودة عال للوشيعة.

- بالنسبة إلى المكثفة المنفردة:



$$Q_C = \frac{1}{\omega_0 C R_C}$$

يجب أن تكون مقاومة المكثفة التسلسلية منخفضة من أجل عامل جودة عال للمكثفة.

المضخمات العريضة الحزمة Wide band amplifier

تعريف المضخم العريض الحزمة

المضخم العريض الحزمة هو مضخم ذو ربح ثابت على مجال ترددي واسع يمكن أن يمتد من ترددات منخفضة جدا حتى ترددات عالية جدا (غيغا هرتز).

المضخمات العريضة الحزمة

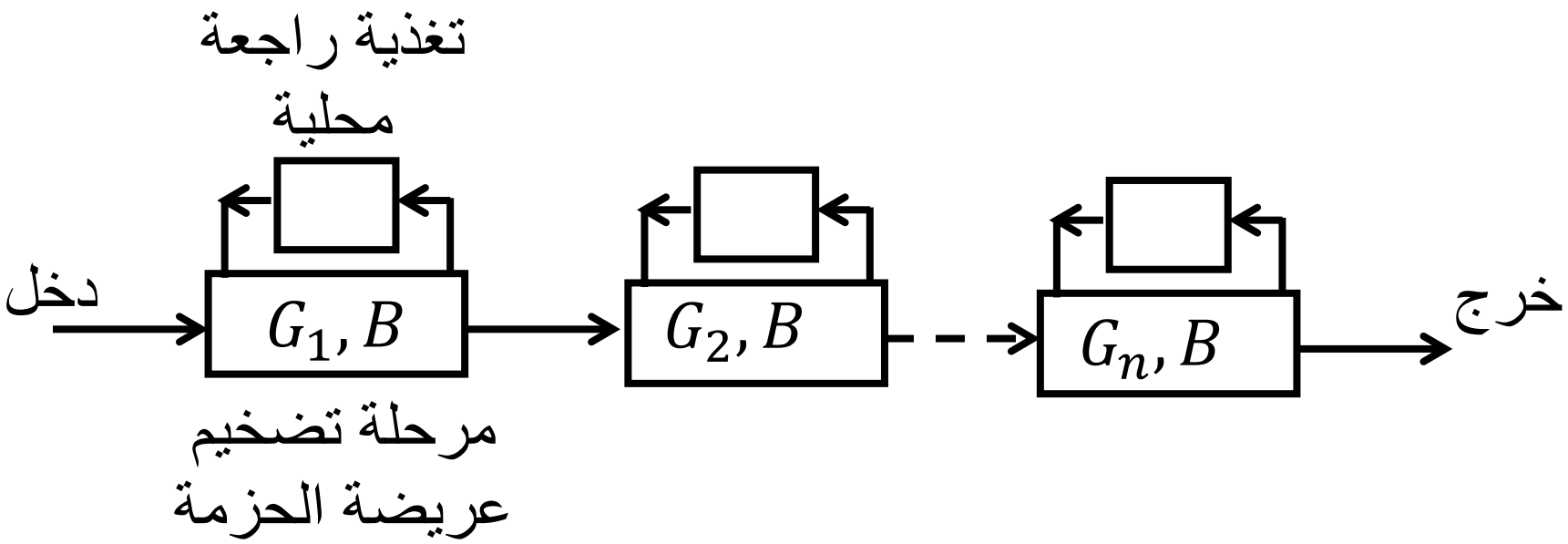
خصائص المضخم العريض الحزمة

تحقيق التضخيم على مجال ترددي عريض غير ممكن عمليا، لأنه يؤدي إلى الاهتزاز. لذا يتكون المضخم العريض الحزمة من عدد من مراحل التضخيم الموصولة معا على التتالي، والتي تتصف بما يلي:

- ربح كل مرحلة منفردة منخفض، مع مجال ترددي عريض.
- جداء الربح وعرض المجال الترددي لكل مرحلة يعتمد على العناصر المستعملة فيها.
- يتحقق ربح كل مرحلة بتغذية راجعة محلية ضمنها، لا بتغذية راجعة عامة من الخرج النهائي إلى الدخل الأولي. وهذا يضمن عدم الاهتزاز.
- يجب أن تكون كل مرحلة خطية ولا تسبب أي تشويه للإشارة.
- يجب أن تكون جميع ممانعات الدخل والخرج فيها متوافقة.

المضخمات العريضة الحزمة

المضخم العريض الحزمة

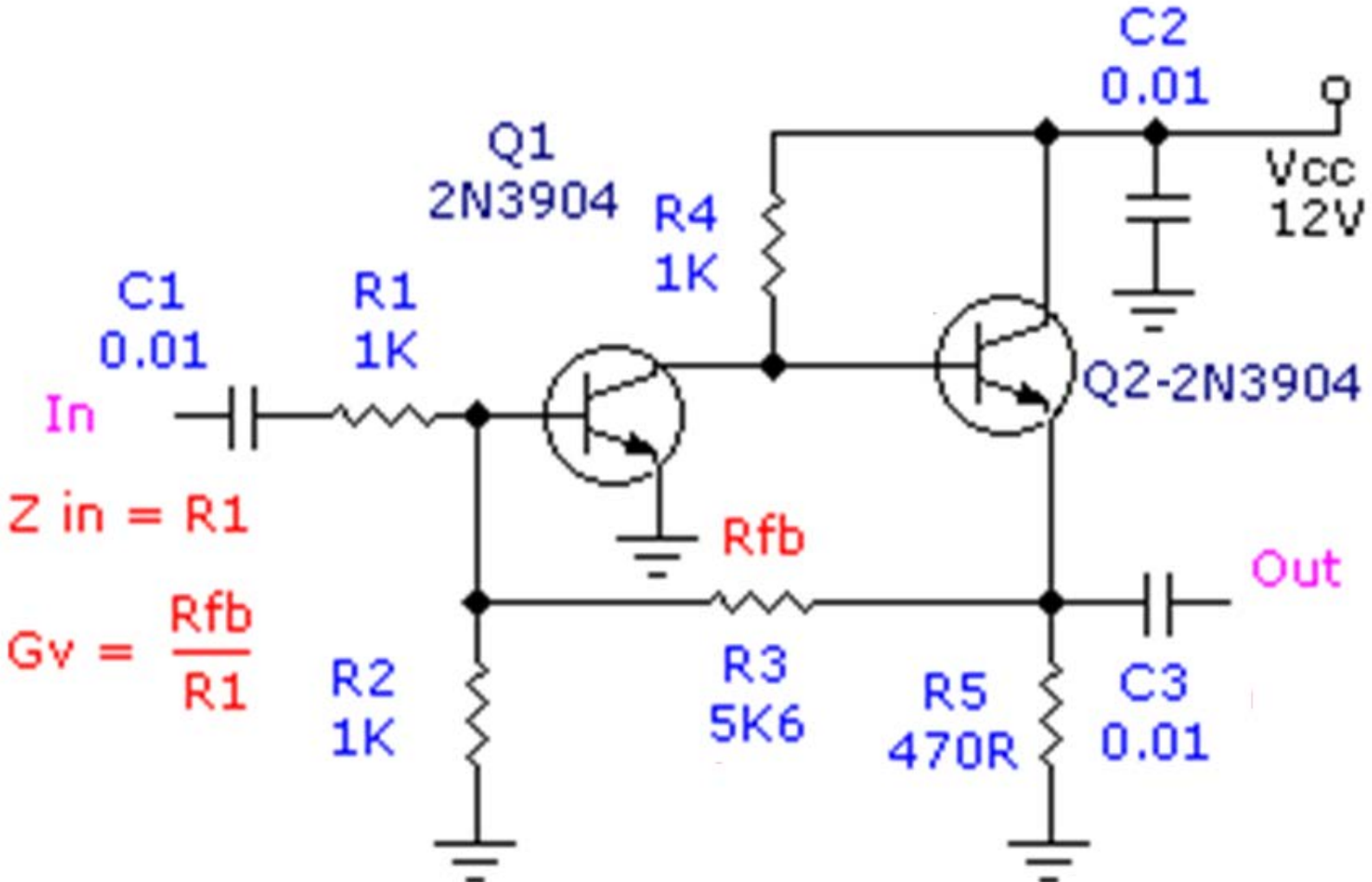


$$G = \prod_{i=1}^{n} G_i$$

المضخمات العريضة الحزمة

مثال لمرحلة تضخيم واحدة عريضة الحزمة

$$Z_{in} = R_1$$
$$Z_{out} \approx R_5$$
$$BW \approx 20MHz$$



يجب أن تكون الترانزستورات من النوع العريض الحزمة الترددية.

ربح المرحلة: $G_i = \frac{R_{fb}}{R_1}$

تصميم المضخمات العريضة الحزمة صعب عمليا، وخاصة عند الترددات المكروية. ولذا تُستعمل أدوات حاسوبية من مثل SPICE or Genesys

ضجيج المضخمات
Noise in amplifiers

الضجيج

الضجيج هو اضطراب غير مرغوب فيه يدخل في الإشارة الكهربائية. وتوجد أنواع كثيرة منه، خاصة في الاتصالات:

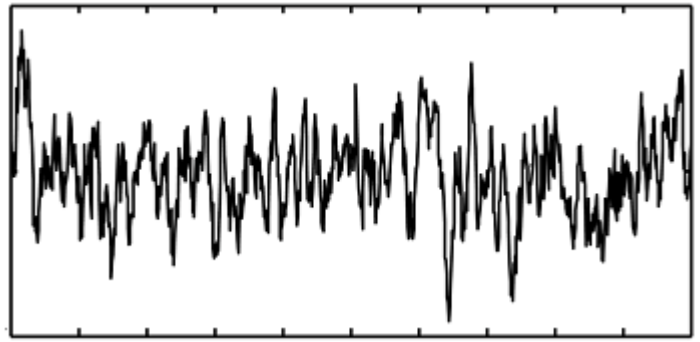
الضجيج الحراري، ضجيج التكميم، الضجيج الرشقي، الصدى، التسميع، التداخل، تعدد المسارات، الانزياح الترددي.

أثر الضجيج على الإشارة سيء جدا، فهو يقلل من جودتها ويمكن أن يجعلها غير مفيدة وغير قابلة للاستعمال. وفي الاتصالات يعيق كشف الإشارة ويؤدي إلى ظهور أخطاء فيها.

الضجيج الحراري

الضجيج الحراري، أو الضجيج الإلكتروني، هو واحد من أهم أنواع الضجيج، ويتولَّد في جميع المكونات الإلكترونية، الفعالة منها وغير الفعالة.

خلافا لأنواع الضجيج المختلفة التي تأتي من مصادر خارجية والتي يمكن الحد من تأثيرها بطرائق مختلفة أهمها التحجيب، يبقى الضجيج الحراري متأصلا في المكونات الكهربائية جميعا، وهو يتولد من حركة الإلكترونات ضمن العناصر الكهربائية وتصادماتها مع نوى الذرات.



ضجيج المضخمات

خصائص الضجيج الحراري

- الضجيج الحراري عشوائي مطلق، وقيمته اللحظية غير معروفة.
- نموذجه الرياضياتي معروف، وقيمه الإحصائية وتوزعه وتابع كثافة احتماله وخواصه الطيفية معروفة، وتمكِّن من التعامل معه بسهولة.
- يُعبَّر عنه من خلال مقارنة استطاعته باستطاعة الإشارة التي يدخل فيها:

نسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج:

$$SNR = \frac{signal\ power}{noise\ power}$$

$$\frac{\text{استطاعة الإشارة}}{\text{استطاعة الضجيج}}$$

كلما كانت نسبة الإشارة إلى الضجيج أعلى، كان أثر الضجيج أقل: يجب تعظيم هذه النسبة

خصائص الضجيج الحراري

من أجل تعظيم نسبة الإشارة إلى الضجيج، يمكن:

- زيادة استطاعة الإشارة، وهذا مكلف.
- تقليص استطاعة الضجيج:
  - بتقليص جهد التغذية من أجل تقليص التيارات في الدارة ومن ثم خفض درجة حرارتها.
  - بتبريد الدارة الإلكترونية

خصائص الضجيج الحراري

تابع كثافة احتمال الضجيج الحراري: غوصي

$$p(x|\mu,\sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

x: متغير عشوائي يعبر عن إشارة الضجيج

μ: قيمة إشارة الضجيج الوسطى، وغالبا ما تساوي الصفر.

σ^2: تباين المتغير العشوائي، ويعبِّر عن استطاعة الضجيج.

خصائص الضجيج الحراري

كثافة الاستطاعة الطيفية للضجيج:

$$S_x(f) = |X(f)|^2 = constant$$

$X(f)$: طيف الضجيج ويعطى بتحويل فورييه لإشارة الضجيج.

الضجيج الأبيض: هو الضجيج الذي يمتد طيفه من $-\infty$ إلى ∞. وهذا ضجيج مثالي.

الضجيج المحدود عرض المجال الترددي: هو الضجيج الواقعي.

خصائص الضجيج الحراري

ضجيج مقاومة R

كثافة الاستطاعة الطيفية لضجيج مقاومة R، أو تباين جهد إشارة الضجيج (القيمة التربيعية الوسطى)، لكل هرتز من عرض المجال الطيفي:

$$E[V^2] = 4k_B TR$$

k_B: ثابت بولتسمان $1.38064852 \times 10^{-23}\ \mathrm{j.k^{-1}}$

T: درجة حرارة المقاومة المطلقة بالكلفن

R: مقدار المقاومة بالأوم

$E[V^2]$: القيمة التربيعية الوسطى

خصائص الضجيج الحراري

مثال: القيمة الوسطى لجذر القيمة التربيعية الوسطى لضجيج مقاومة مقدارها 1 كيلو أوم عند درجة حرارة الغرفة (300 كلفن) للهرتز يساوي:

$$\sqrt{E[V^2]} = \sqrt{4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1000} \approx 4 \quad nano\ volt/\sqrt{Hz}$$

خصائص الضجيج الحراري

القيمة الوسطى لجذر القيمة التربيعية للضجيج الكلي للمقاومة على مجال ترددي عرضه يساوي Δf:

$$V = \sqrt{E[V^2]}\sqrt{\Delta f} = \sqrt{4k_B T R \Delta f}$$

الاستطاعة التي تتبدد في المقاومة على شكل حرارة:

$$P = \frac{V^2}{R} = 4k_B T \Delta f$$

وتنتشر هذه الحرارة عبر بقية مكونات الدارة.

ضجيج المضخمات

الضجيج الاضطرابي $1/f$ flicker noise

- هو جداء ضجيج إلكتروني ذو كثافة استطاعة طيفية متناسبة مع $1/f$.
- يظهر في جميع المكونات الإلكترونية تقريبا.
- يقترن بالتيار المستمر على الأغلب.
- ينجم عن التفاوتات التي تحصل في قيمة الجهد أو التيار نتيجة للتغيرات الحرارية التي تعمل على تغيير قيمة المقاومة.

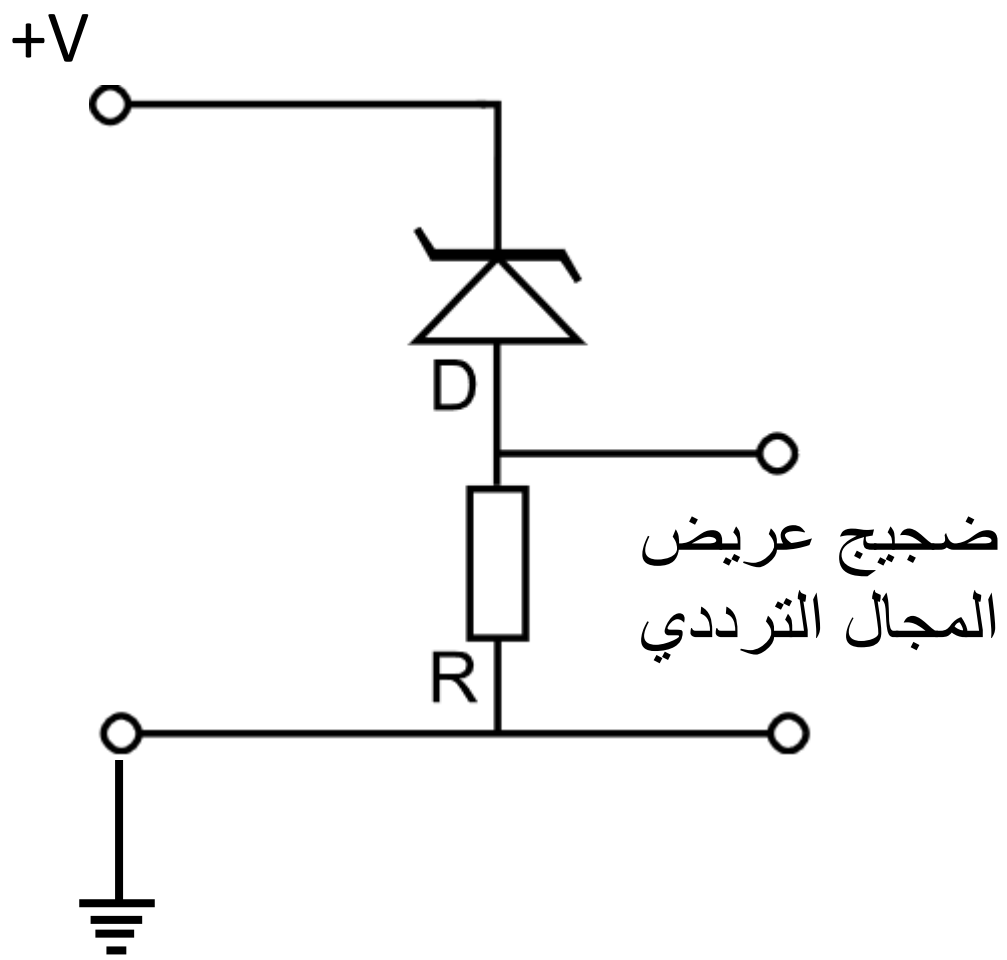
خصائص الضجيج الحراري

- لا تولِّد السعات ضجيجا، لكن المقاومة الداخلية للمكثفة تولد ضجيجا حراريا.
- لا تولِّد التحريضات ضجيجا، لكن المقاومة الداخلية للوشيعة تولد ضجيجا حراريا.

ضجيج المضخمات

الضجيج الحراري في أنصاف النواقل

- مشابه لضجيج المقاومات.
- يظهر بشكل خاص حين حقن ثنائي زنر عكسيا بالجهد. لذا يُستعمل هذا الثنائي في مولدات الضجيج.



ضجيج المضخمات

عامل الضجيج Noise Factor (F)

- معيار يعبِّر عن مدى تدهور نسبة الإشارة إلى الضجيج بسبب مكونات الدارة الإلكترونية. وبواسطته تتحدد جودة المضخم الإلكتروني أو المستقبل. فكلما كان أصغر كانت الجودة أعلى.
- يُعرَّف عامل الضجيج بالنسبة:

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

SNR_{in}: استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج في الدخل،

SNR_{out}: استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج في الخرج.

عامل الضجيج

يعطى عامل الضجيج الخاص بمكون إلكتروني عموما بـ:

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

حيث T_0 هي درجة حرارة الغرفة المعيارية: $T_0 = 290\ K$

T_e: هي درجة حرارة ضجيج المكوِّن الإلكتروني.

عامل الضجيج

يعطى عامل الضجيج لسلسلة من المكونات التي لكل منها رقم ضجيج F_i وربح G_i بعلاقة فريز Friis' formula:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \cdots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \cdots G_{n-1}},$$

ضجيج المضخمات

رقم الضجيج Noise Figure (NF)

رقم الضجيج هو عامل الضجيج مقدرا بالديسيبل:

$$NF\ \ db = 10\log_{10} F$$

تشويه المضخمات Amplifier Distortion

تعريف

- التشويه هو تغيير الشكل الأصلي للشيء (أو بعض خصائصه الأخرى).
- في الإلكترونيات والاتصالات هو تغيير شكل موجة الإشارة الحاملة للمعلومات، ومن أمثلتها الإشارات الصوتية والفيديوية.
- غير مرغوب فيه عادة، وإنْ كانت ثمة تطبيقات له من قبيل تكوين مؤثرات صوتية في الموسيقا.

التشويه

يُعبَّر عن مفعول أي نظام تمر فيه إشارة بشيء يسمى تابع التحويل transfer function يصف علاقة خرج النظام بدخله:

$$y(t) = F(x(t))$$

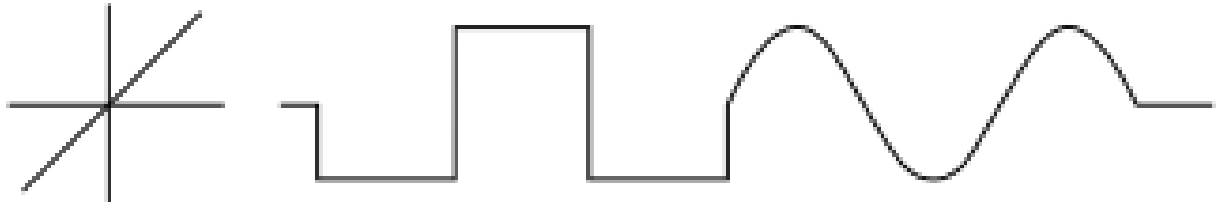
وعندما يقتصر مفعول النظام على ربح A للإشارة مع تأخير زمني t_0 فقط، أي عندما يكون:

$$y(t) = A\,x(t_0)$$

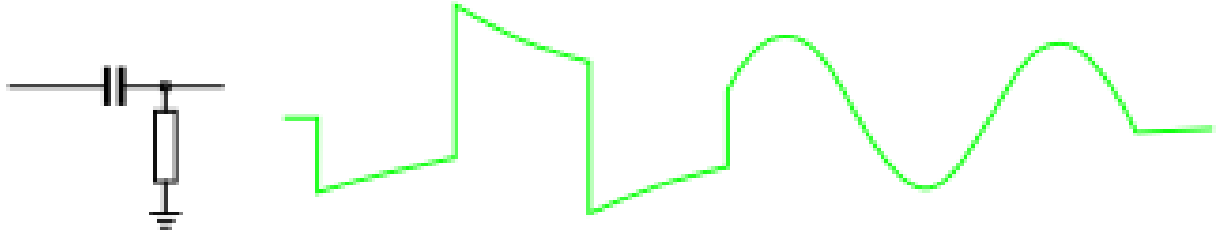
ولا يحصل تشويه حينئذ، ويكون تابع التحويل مثاليا.

تشويه المضخمات

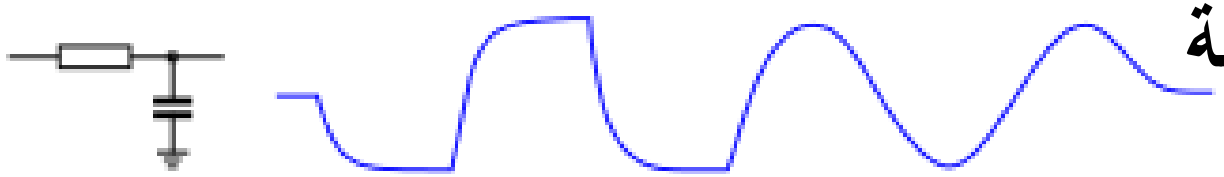
أمثلة للتشويه



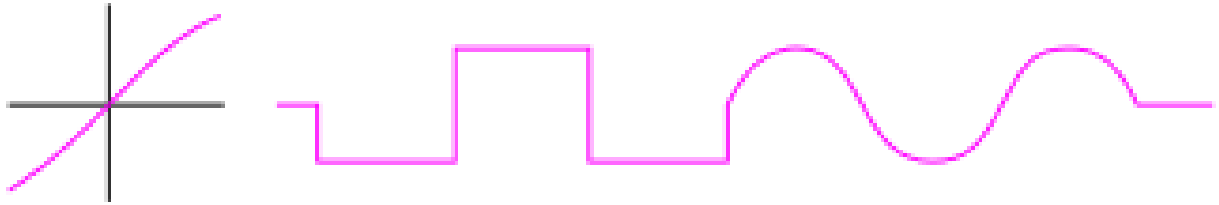
إشارة أصلية مربعة وجيبية



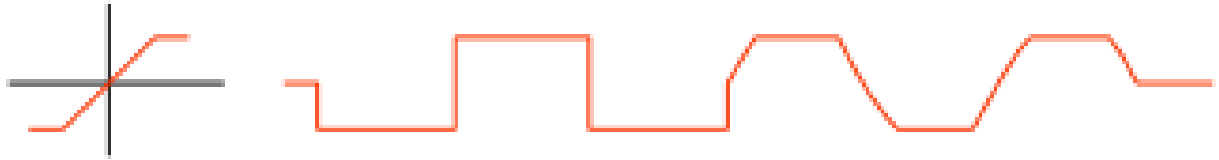
تشويه تمرير ترددات عالية



تشويه تمرير ترددات منخفضة



تشويه تابع تحويل لاخطي



تشويه قص (لاخطي)

تشويه المضخمات

التشويه

يعطى تابع تحويل المنظومة في الاتصالات ومعالجة الإشارة باستجابتها الترددية، أي بتحويل فورييه لاستجابتها الزمنية:

$$H(f) = |H(f)| \exp(j\theta(f))$$

$|H(f)|$: مطال تابع التحويل، ويُعبِّر عن مطالات الترددات المختلفة في الطيف.

$\theta(f)$: طور تابع التحويل، ويُعبِّر عن الأطوار التي يُدخِلها النظام في الإشارة. ويُعبِّر مشتق $\theta(f)$ عن تأخير زمني للمركبات الترددية:

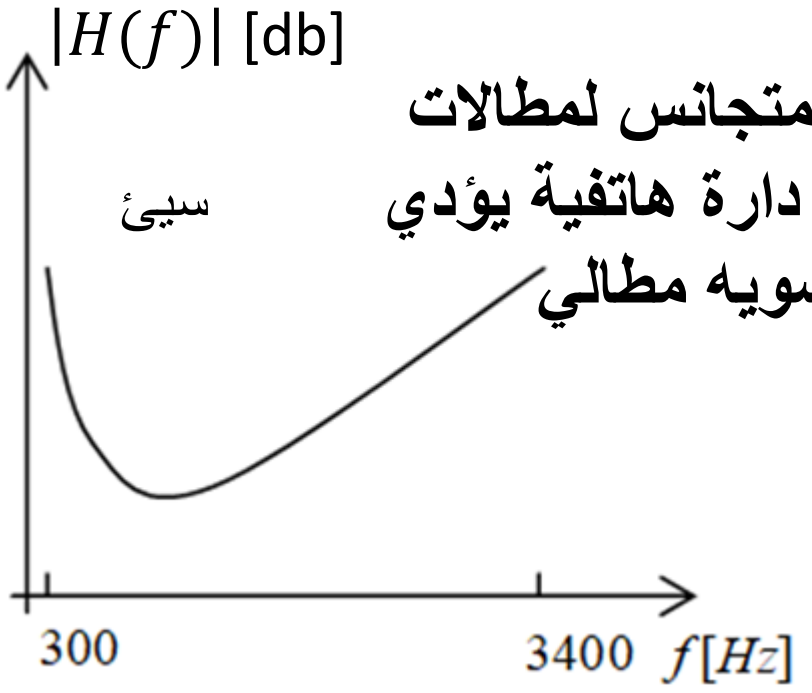
$$d(f) = \frac{d\theta}{df} \quad [ms]$$

تشويه المضخمات

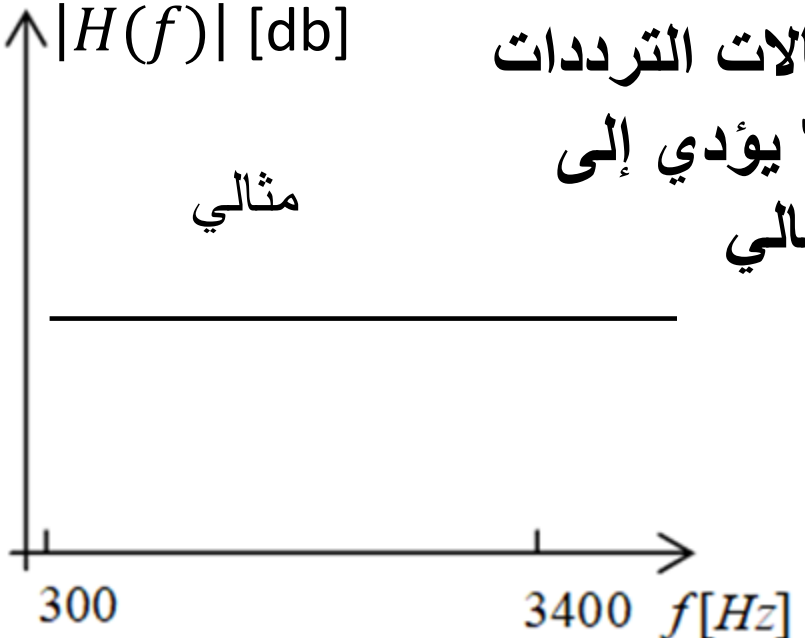
أنواع التشويه

التشويه المطالي:

- يحصل عندما يؤدي تابع تحويل النظام إلى تضخيم أو تخميد مطالات ترددات إشارة الدخل على نحو غير متجانس.
- لا يسمح باستعادة الإشارة الأصلية لأنه يمثل فقدا للمعلومات المتضمنة فيها.



تخميد غير متجانس لمطالات الترددات في دارة هاتفية يؤدي إلى تشويه مطالي



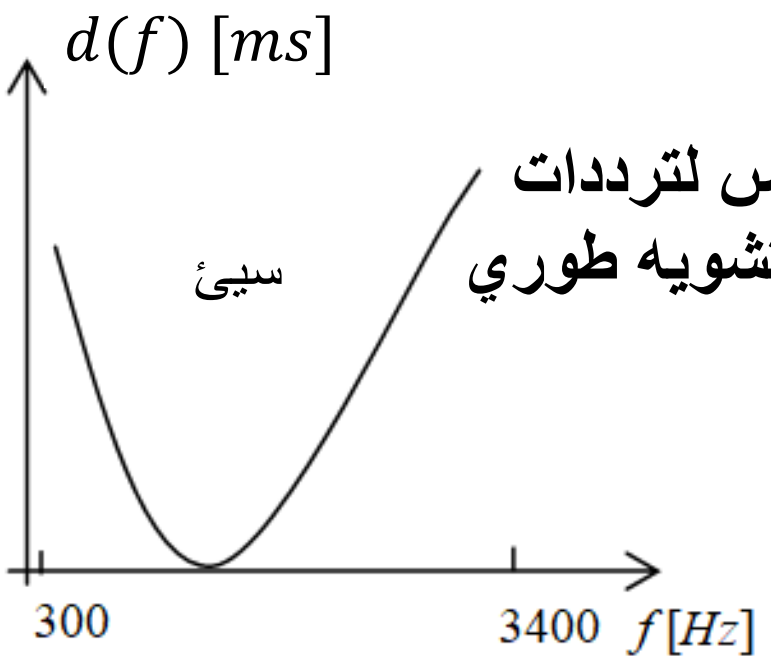
تخميد متجانس لمطالات الترددات في دارة هاتفية لا يؤدي إلى تشويه مطالي

تشويه المضخمات

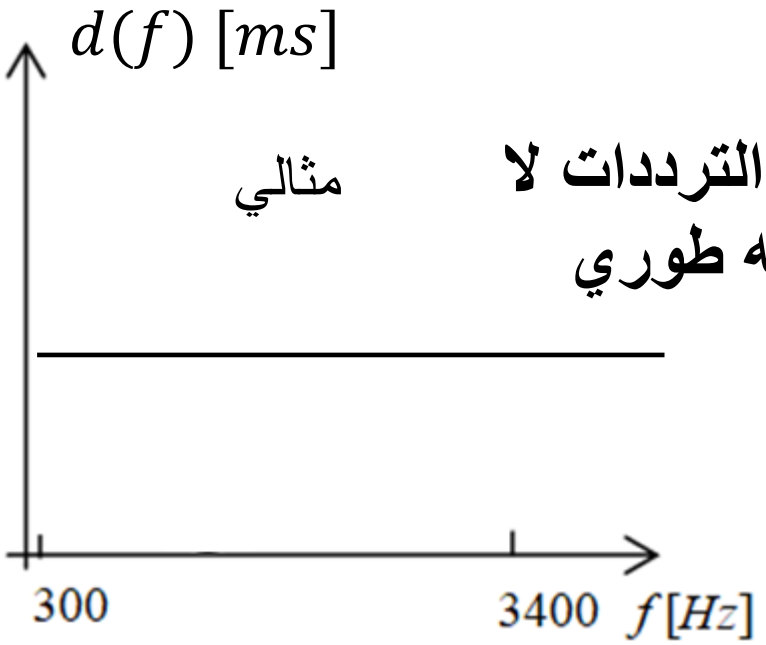
أنواع التشويه

التشويه الطوري:

- يحصل عندما يؤدي تابع تحويل النظام إلى تأخير المركبات الترددية بأطوار مختلفة على نحو غير خطي.
- لا يسمح باستعادة الإشارة الأصلية لأنه يمثل فقدا للمعلومات المتضمنة فيها.

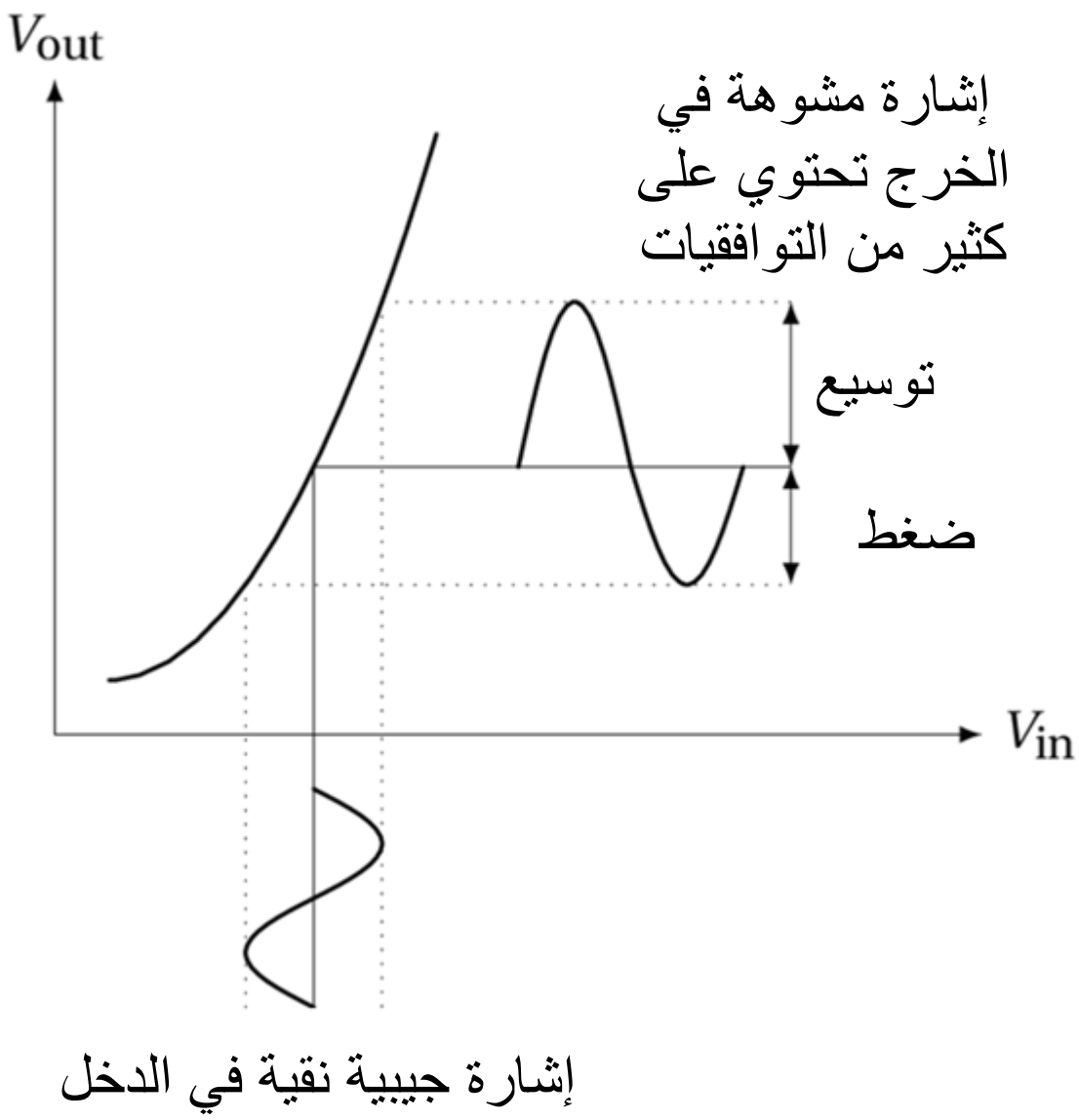


تأخير غير متجانس لترددات الإشارة يؤدي إلى تشويه طوري



تأخير ثابت لجميع الترددات لا يؤدي إلى تشويه طوري

تشويه المضخمات



أنواع التشويه

التشويه التوافقي:

- يحصل نتيجة للعلاقة غير الخطية بين جهدي دخل وخرج المكوِّن الإلكتروني (الترانزستور مثلا).
- يسمح باستعادة الإشارة الأصلية إذا أمكن تمرير الإشارة المشوهة في مكوِّن ذي تشويه غير خطي معاكس للتشويه الأول. ومثال ذلك قانوني A و μ المستعملين في رقمنة الإشارة الكلامية.

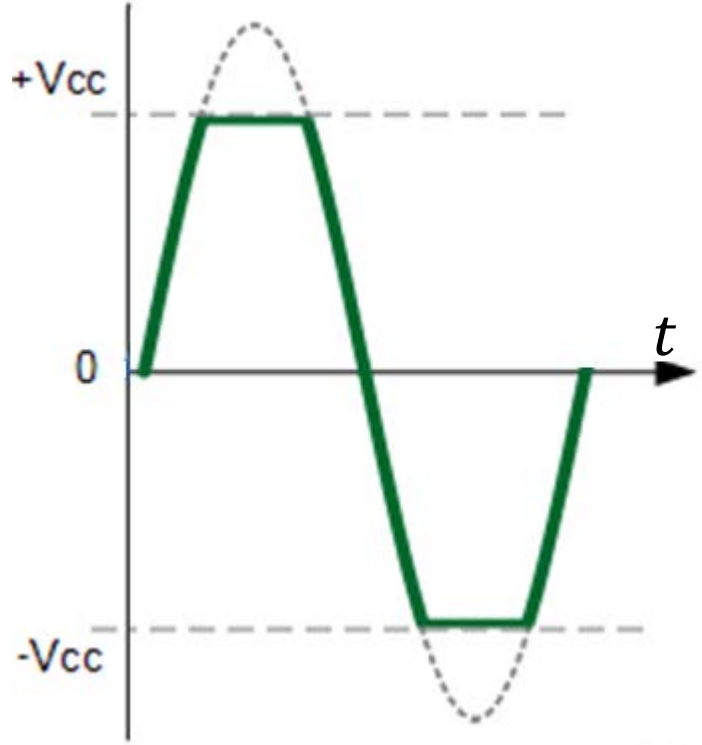
أنواع التشويه

تشويه القص:

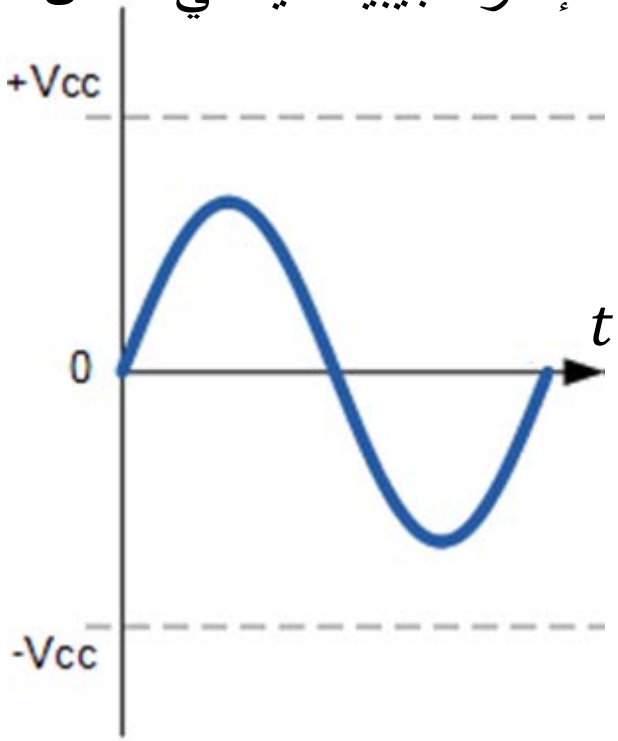
يحصل عادة في المضخمات عندما لا يستوعب المجال الديناميكي للمضخم إشارة الدخل بعد تضخيمها.

لا يمكن استرجاع الإشارة الأصلية لأن جزءا من معلوماتها يكون قد ضاع.

إشارة جيبية مقصوصة في الخرج



إشارة جيبية نقية في الدخل



المرشحات الفعالة Active filters

تعاريف

المرشح:

هو دارة إلكترونية مختصة بإزالة ترددات غير مرغوب فيها من الإشارة، أو بتحسين الإشارات المرغوب فيها، أو بكلا المهمتين.

المرشحات الفعالة Active filters

وظائف المرشح

1. إبعاد الضجيج الموجود خارج المجال الطيفي للإشارة:

بشكل عام، تمتلك الإشارات التماثلية المفيدة مجالا طيفيا محدودا، لكنها تترافق مع ضجيج يمتد طيفه بعيدا خارج مجالها. إن وجود هذا الضجيج يؤدي عمليا إلى انخفاض نسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج، ويمكن تحسين تلك النسبة بإزالة الضجيج الموجود خارج المجال الطيفي للإشارة. طبعا، لا يمكن إزالة الضجيج الموجود ضمن المجال الطيفي للإشارة بواسطة الترشيح لأنه يغير طيفها.

المرشحات الفعالة Active filters

وظائف المرشح

2. عزل الإشارات بعضا عن بعض:

في بعض الأحيان يمكن أن تحتوي الإشارة التماثلية على مجموعة من الإشارات المختلفة التي يمتلك كل منها مجالا طيفيا يختلف عن المجالات الطيفية للإشارات الأخرى. في مثل هذه الحالة يمكن فصل الإشارات بعضا عن بعض بالترشيح. من أمثلة ذلك أطياف الإشارات اللاسلكية. أما إذا كانت أطياف الإشارات متراكبة، فإن الترشيح لا يفيد في فصلها.

المرشحات الفعالة Active filters

وظائف المرشح

3. تشكيل طيف الإشارة:

أي إدخال تعديل على طيفها الأصلي. فعلى سبيل المثال، غالبا ما تكون الاستجابة الترددية للميكروفون في تطبيقات الإشارة الكلامية غير مستوية، أي غير متساوية من أجل الترددات المختلفة، كأنْ تكون ضعيفة عند الترددات المنخفضة وقوية عند الترددات العالية، ما يعني أن الميكروفون، أي الحساس، قد أدخل تشويها في المقدار الفيزيائي، وهو هنا الإشارة الكلامية. في مثل هذه الحالات يمكن استخدام ما يسمى بالمسوِّي Equalizer، أي الذي يعوض عن التشويه الذي يدخله الحساس. إن المسوي هو مرشح ذو استجابة ترددية متممة لاستجابة الحساس، ويمكن تطبيق التسوية على مطال الطيف أو على طوره أو على كليهما.

المرشحات الفعالة Active filters

وظائف المرشح

4. منع تداخل طيف الإشارة بعد تقطيعها:

سوف نرى في الفصل الثالث أن تحويل الإشارة التماثلية إلى رقمية يتطلب أن تكون ذات مجال طيفي محدود على نحو لا تتجاوز فيه قيمة أعلى تردد في الطيف نصف تردد التقطيع الذي يسبق عملية التبديل التماثلي الرقمي. ويجري تحقيق تحديد عرض المجال الترددي للإشارة بواسطة الترشيح. فيما يلي سنتطرق إلى التقنيات الأساسية في مجال ترشيح الإشارة التماثلية المستخدمة في الغالبية العظمى من التطبيقات.

المرشحات الفعالة Active filters

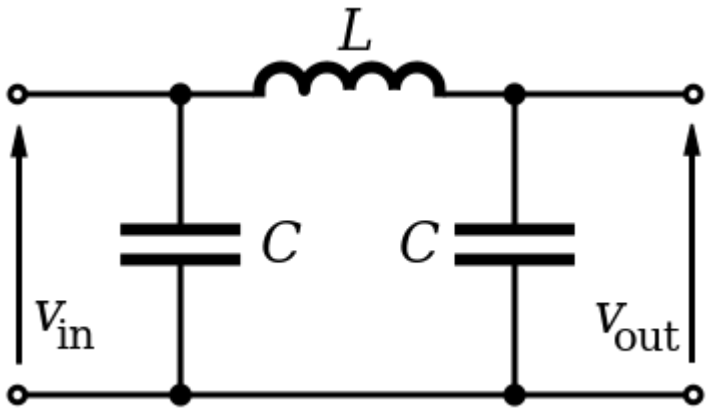
أنواع المرشحات بنيويا

يمكن للمرشح أن يكون:

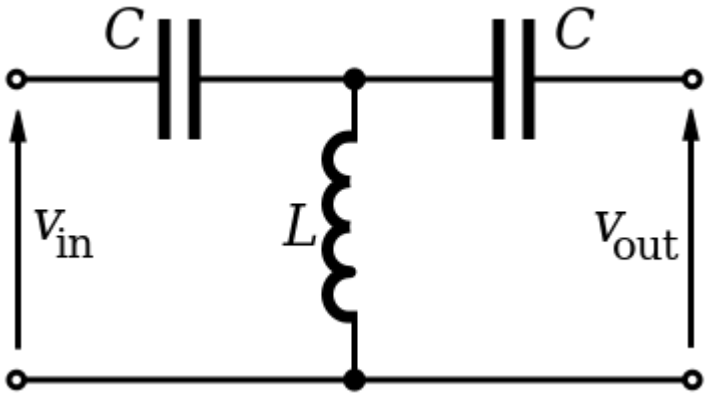
- غير فعَّال passive: أي يتألف من عناصر غير فعالة من مثل المقاومات والمكثفات والملفات،
- أو فعَّالا active: أي يتكون من عناصر غير فعالة ضمن دارة تحتوي على فعالة من مثل الترانزستورات ومضخمات العمليات.

المرشحات الفعالة

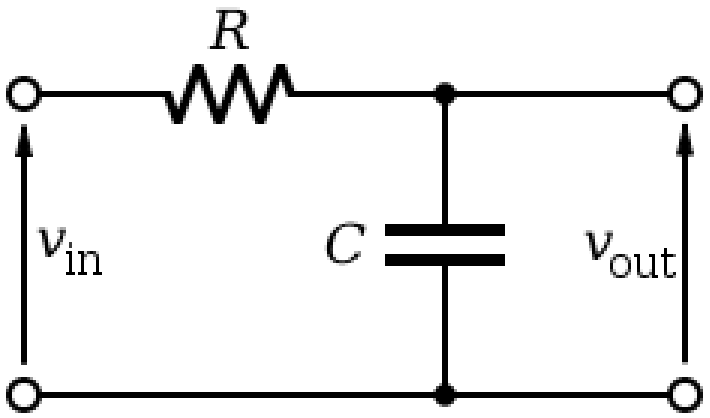
أمثلة لدارات مرشحات غير فعالة: تتكوَّن من عناصر فير فعالة فقط.



مرشح *LC*



مرشح *LC*

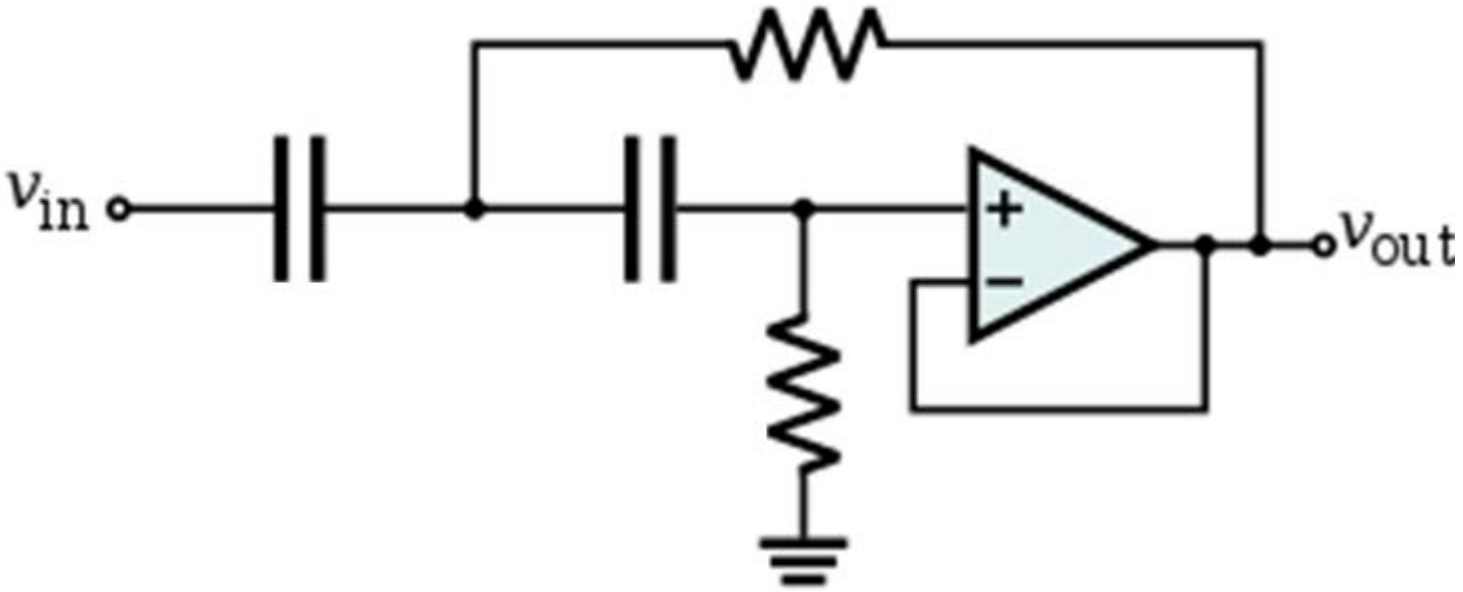


مرشح *RC*

المرشحات الفعالة

مثال لدارة مرشح فعال: يتألف من مضخم عمليات ومقاومتين ومكثفتين.

الميزة الرئيسية للمرشح الفعال هي إمكانية الاستغناء عن الوشائع في داراته. فالوشائع كبيرة الحجم وثقيلة عادة.

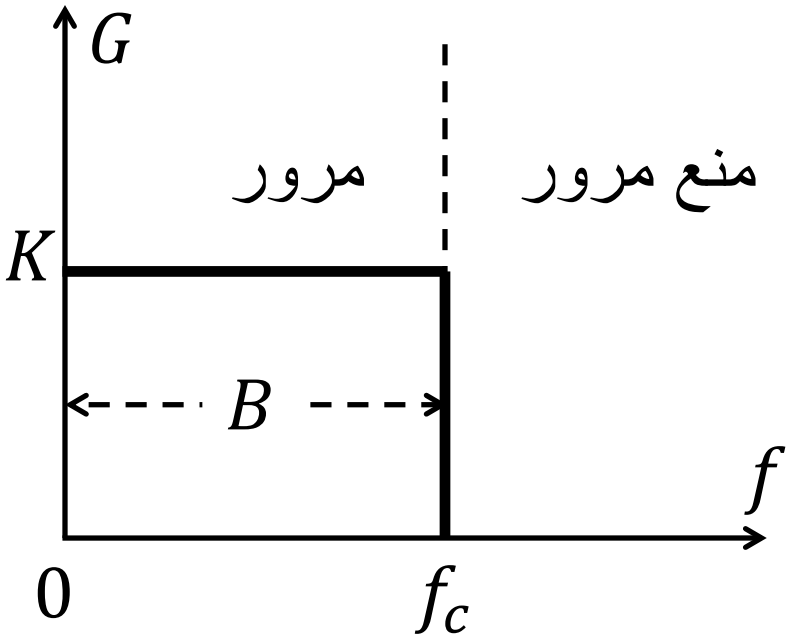


المرشحات الفعالة

أنواع المرشحات وظيفيا

مرشح تمرير ترددات منخفضة Low Pass Filter (LPF)
مرشح تمرير ترددات عالية High Pass Filter (HPF)
مرشح تمرير حزمة ترددية Band Pass Filter (BPF)
مرشح رفض حزمة ترددية Band Stop or Reject Filter (BSF or BRF)

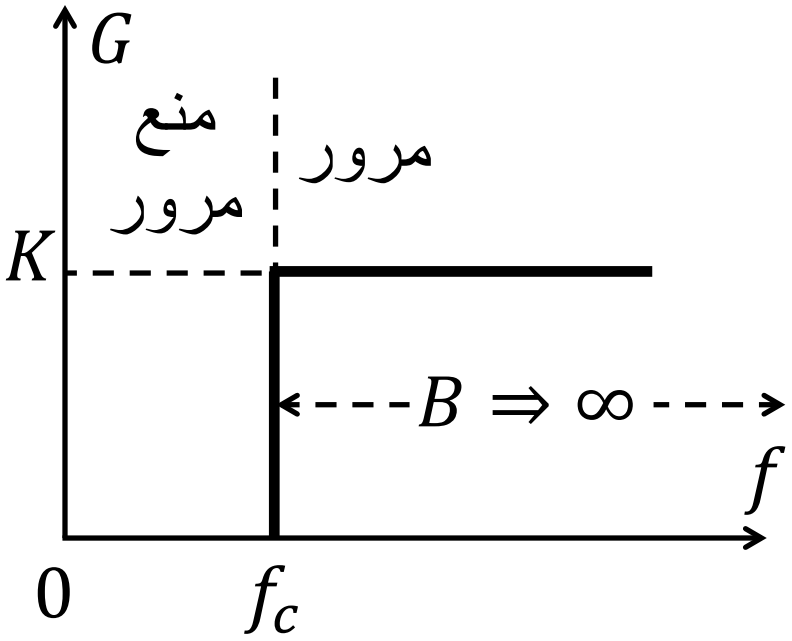
المرشحات الفعالة



مرشح تمرير الترددات المنخفضة المثالي

- يمرر الترددات من 0 حتى f_c.
- يساوي عرض مجال التمرير $B = f_c$.
- ربح المرشح في مجال التمرير ثابت K.

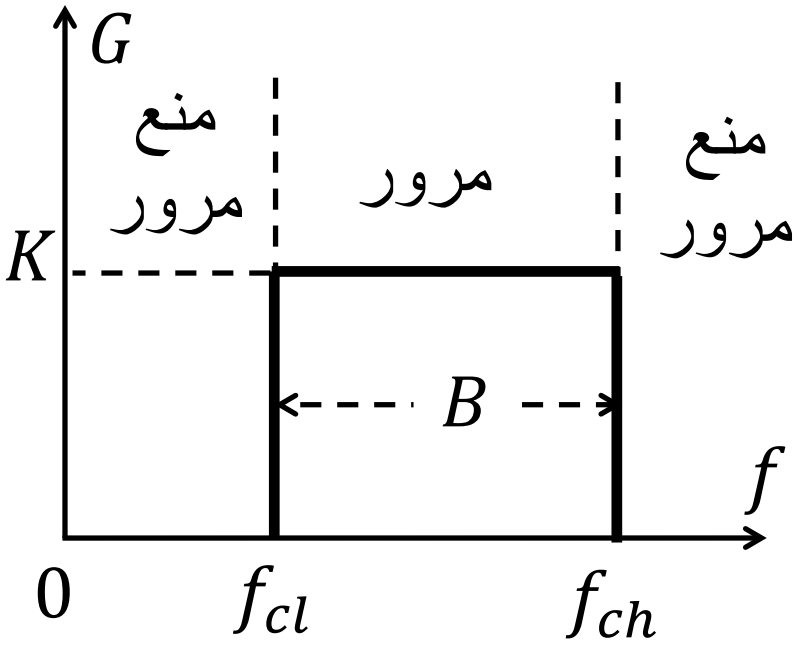
المرشحات الفعالة



مرشح تمرير الترددات العالية المثالي

- يمرر الترددات من f_c حتى اللانهاية.
- يساوي عرض مجال التمرير $B = \infty$.
- ربح المرشح في مجال التمرير ثابت K.

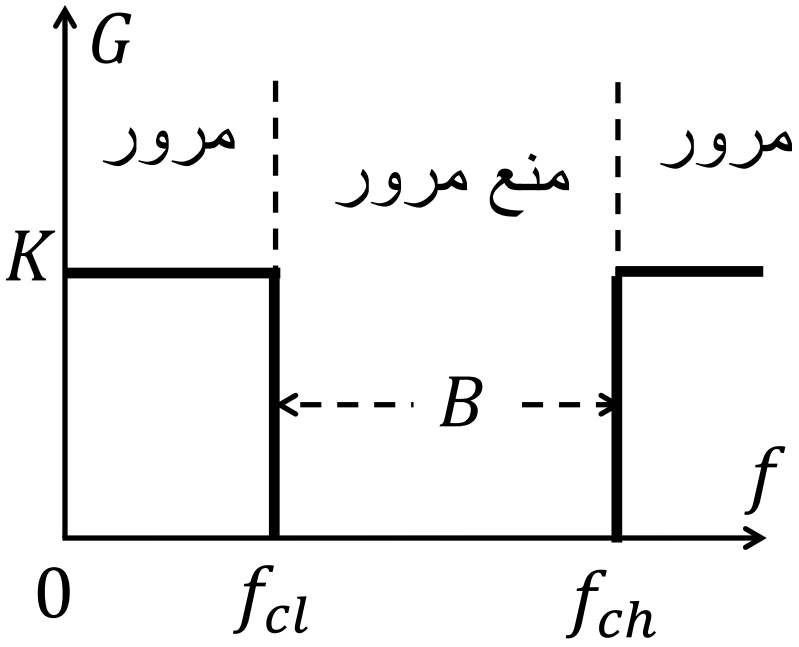
المرشحات الفعالة



مرشح تمرير الحزمة الترددية المثالي

- يمرر الترددات من f_{cl} حتى f_{ch}.
- يساوي عرض مجال التمرير B.
- ربح المرشح في مجال التمرير ثابت K.

المرشحات الفعالة



مرشح منع الحزمة الترددية المثالي

- يمنع الترددات من f_{cl} حتى f_{ch}.
- يساوي عرض مجال المنع B.
- ربح المرشح خارج مجال المنع ثابت K.

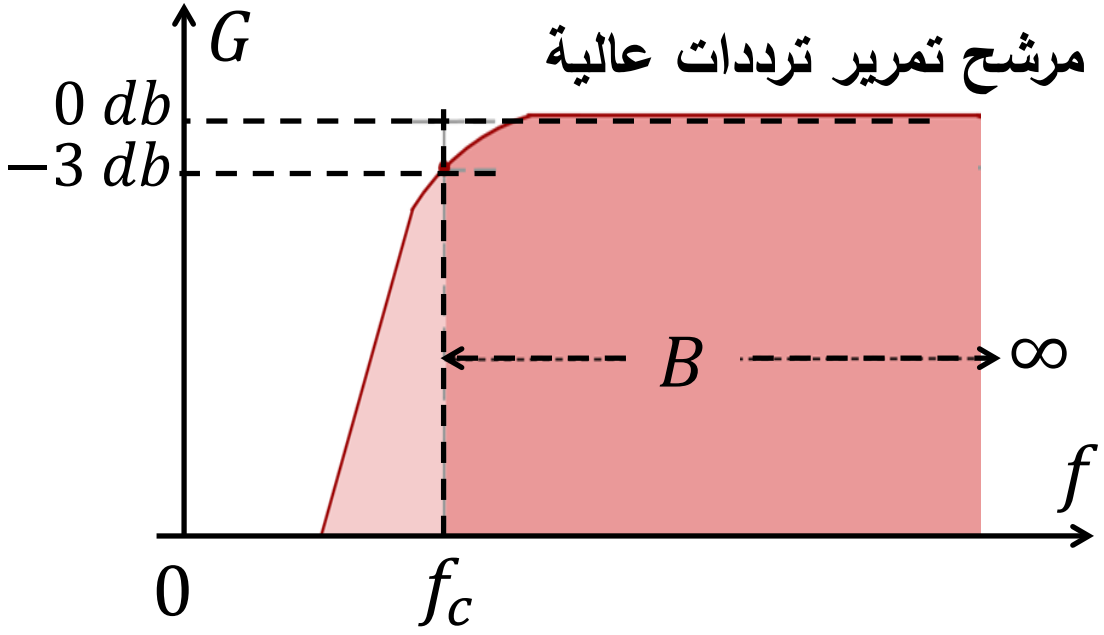
المرشحات الفعالة

المرشح الواقعي (غير المثالي)

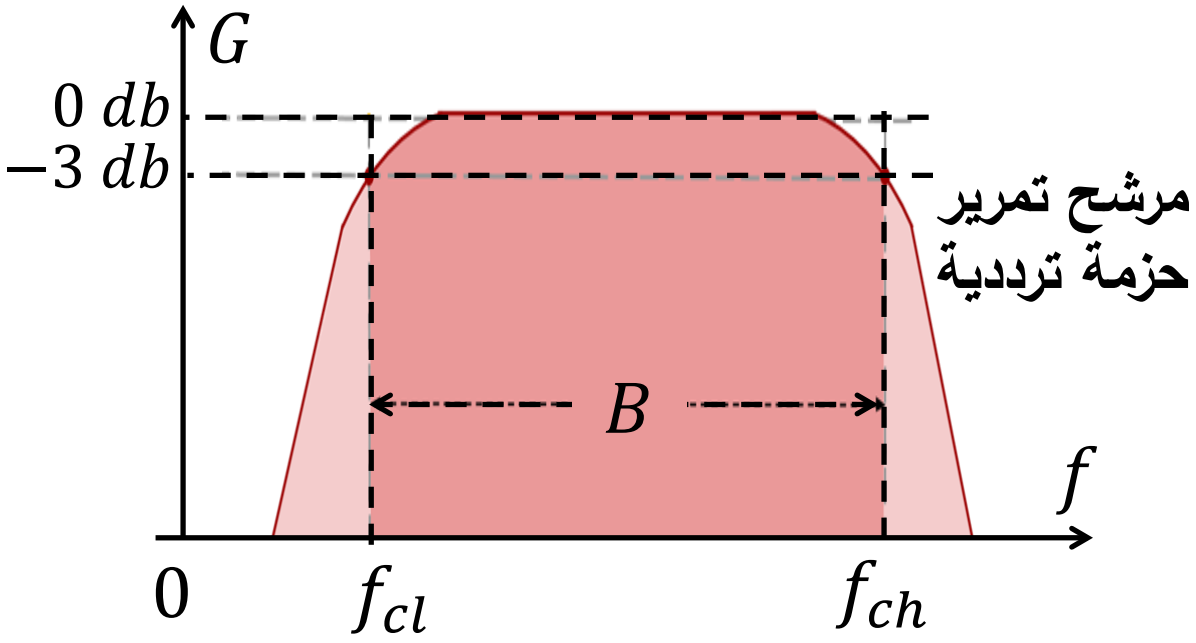
- لا يمكن تحقيق المرشح المثالي عمليا، لأنه لا يمكن تحقيق الانتقال من مجال المنع إلى مجال التمرير على نحو فوري. وما يحصل عمليا هو انتقال تدريجي.
- نعرِّف في المرشح الواقعي تردد القطع f_c بأنه التردد الذي ينخفض عنده ربح المرشح بمقدار $3\ db$ بالنسبة للربح في مجال التمرير، ونسمي تردد القطع أيضا بتردد الـ $-3\ db$. وهذا يكافئ انخفاض ربح الاستطاعة إلى النصف، أي ما يكافئ انخفاض ربح المطال بمقدار $1/\sqrt{2}$.
- يساوي عرض مجال التمرير B المجال الذي يكون الربح فيه أكبر من $-3\ db$ بالنسبة إلى الربح الأعظمي الذي يساوي $0\ db$.

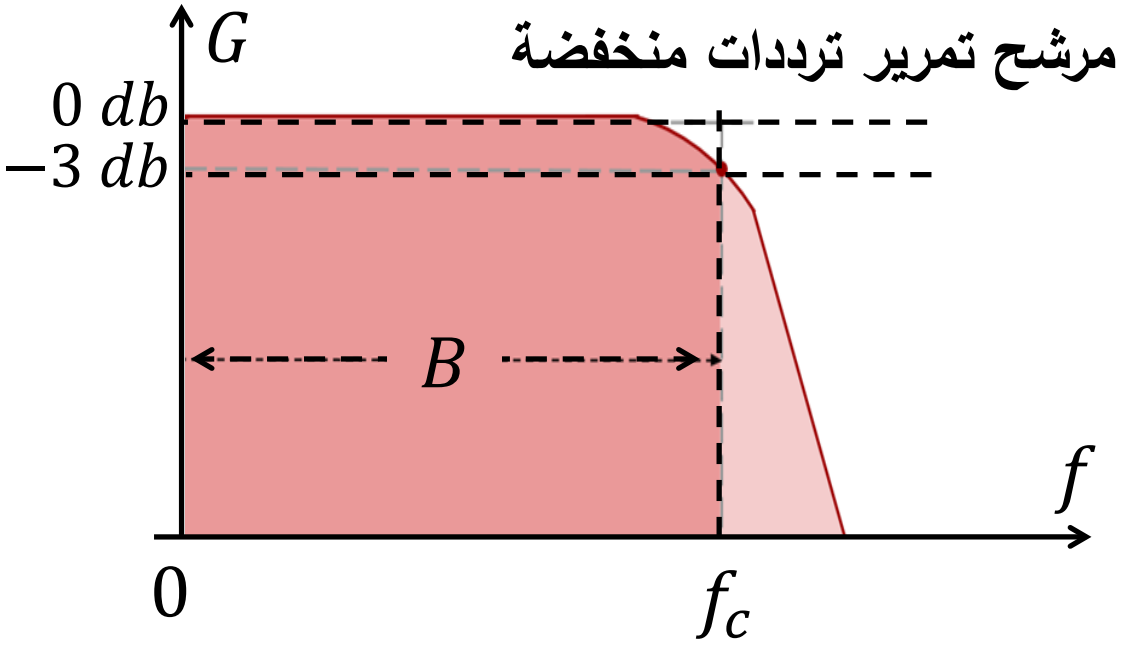
المرشحات الفعالة

المرشح الواقعي (غير المثالي)



$j\theta(f)$





المرشحات الفعالة

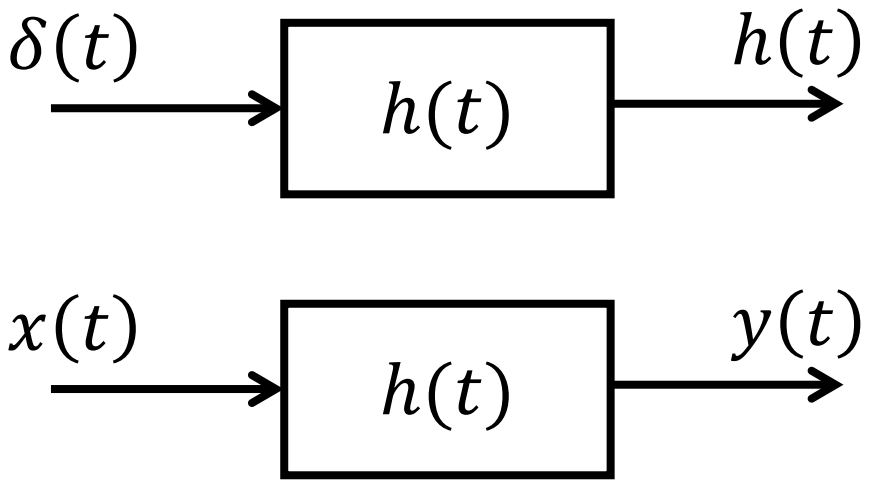
تابع ديراك

هو تابع رياضياتي افتراضي غير واقعي معرَّف بـ:

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)\, dx = 1$$

المرشحات الفعالة



استجابة المرشح

المرشح هو نظام خطي:

- إذا طُبِّقت على دخله نبضة ديراك $\delta(t)$، أعطى في خرجه **استجابة زمنية** $h(t)$.
- وإذا طُبِّقت على دخله إشارة $x(t)$، أعطى في خرجه إشارة $y(t)$ تعطى بالعلاقة:

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

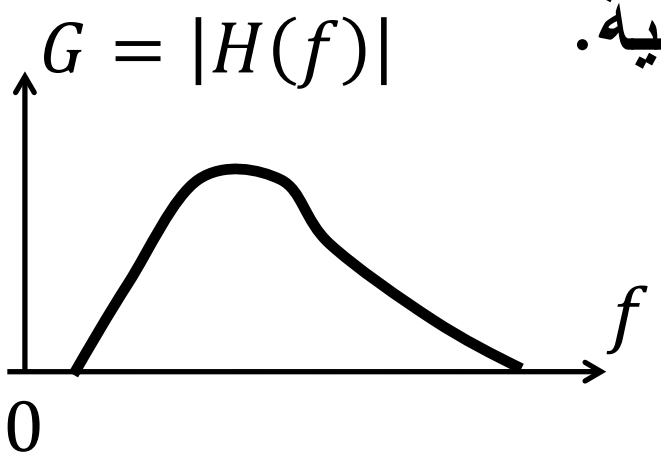
$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\, h(t-\tau)\, d\tau$$

تسمى هذه العملية تلاف أو طي **convolution**.

المرشحات الفعالة

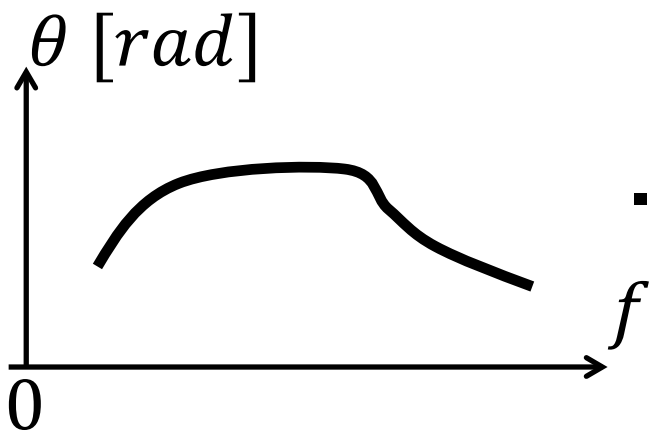
استجابة المرشح الترددية

- تعطى استجابة المرشح الترددية بتحويل فورييه لاستجابته الزمنية.
- تمثل تابع التحويل الخاص بالمرشح.
- تحدد وظيفة المرشح من حيث المجال الترددي الذي يمرره.



$$H(f) = F.T.[h(t)]$$

$$H(f) = |H(f)| \exp\big(j\theta(f)\big)$$



$|H(f)|$: مطال الاستجابة الترددية، ويُقدر عادة بالفولط أو الـ db.

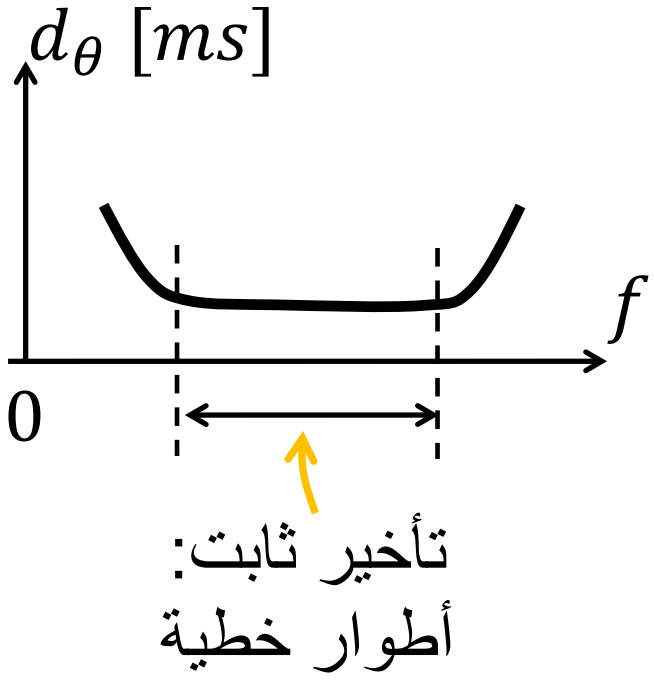
$\theta(f)$: أطوار ترددات الاستجابة الترددية، وتقدَّر بالراديان.

المرشحات الفعالة

التأخير في المرشح

تتأخر الإشارة في المرشح بسبب الزمن الذي تحتاجه للانتشار عبره.

تتأخر كل مركبة ترددية بمدة تتبع لقيمة تردد تلك المركبة: $d(f)$.



يعطى التأخير بمشتق $\theta(f)$ بالنسبة إلى التردد:

$$d(f) = \frac{d\,\theta(f)}{df}$$

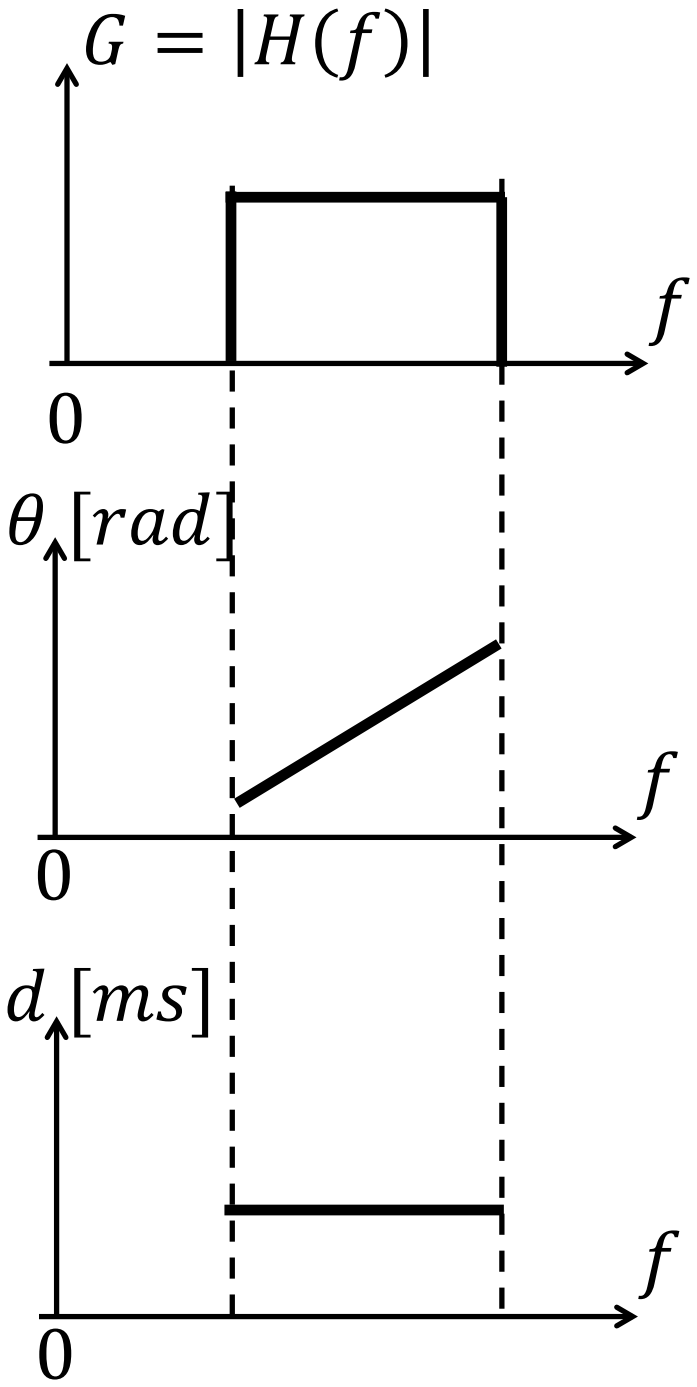
إذا كانت $\theta(f)$ تابعا خطيا للتردد، أي:

$$\theta(f) = \alpha f$$

كان تأخير جميع المركبات الترددية في الإشارة ثابتا واتخذ نفس القيمة α.

وإلا تأخرت كل مركبة ترددية بحسب علاقتها بترددها.

المرشحات الفعالة



استجابة المرشح المثالي:

في المرشح المثال:

ثابت $|H(f)| = A$

تابع خطي للتردد $\theta(f) = \alpha f$

ثابت $d(f) = \alpha$

المرشحات الفعالة

المرشح الفعال:

- لا يمكن تحقيق المرشح المثالي عمليا.
- المرشحات غير الفعالة تعطي استجابات بعيدة نسبيا عن استجابة المرشح المثالي.
- يمكن للمرشحات الفعالة أن تقترب بالقدر الذي نرغب فيه من المرشح المثالي من دون الوصول إليه.

المرشحات الفعالة

مزايا المرشحات الفعالة ومساوئها

- عند الترددات المنخفضة، تكون قيم السعات والتحريضات كبيرة في المرشحات غير الفعالة. وهذا يزيد الضياعات الحرارية في الدارة، ووزن الدارة وحجمها. أما في المرشحات الفعالة، فلا حاجة إلى الوشائع وتحريضاتها.
- عند الترددات العالية، تكون قيم السعات والتحريضات منخفضة، ويُكتفى بسعات وتحريضات خطوط الدارة المطبوعة عند الترددات المكروية، ولذا تفضل المرشحات غير الفعالة.
- تتصف المرشحات الفعالة بمجال تمرير متجانس نسبيا واستجابة طورية قريبة من الخطية.

المرشحات الفعالة

مزايا المرشحات الفعالة ومساوئها

- عرض مجال المكونات الفعالة الترددي يؤثر في خصائص المرشح.
- المكونات الفعالة بطيئة عند الترددات العالية عموما، وهذا يؤثر أيضا في خصائص المرشح.
- تتطلب المكونات الفعالة تغذية إضافية، ومن ثم تؤدي إلى مزيد من هدر الطاقة والتبديد الحراري في الدارة.

المرشحات الفعالة

تصميم المرشحات الفعالة

يجب أن يحقق تصميم المرشح:

- مجال تمرير متجانس قدر الإمكان.
- انتقالا سريعا من مجال التمرير إلى مجال المنع. لكن ذلك يتعارض مع مجال التمرير المتجانس.
- استجابة طورية أقرب ما تكون إلى الخطية من أجل تقليص التشويه الطوري للإشارة المرشحة.

المرشحات الفعالة

تصميم المرشحات الفعالة – مرشح تمرير الترددات المنخفضة

تعطى الاستجابة الترددية لمرشح تمرير الترددات المنخفضة بالعلاقة:

$$H(\omega) = \frac{G}{P_n\ (\omega)}$$

$\omega = 2\pi f$: التردد الزاوي

G: عامل ربح المرشح، ويمثل قيمة $|H(\omega)|$ عند $\omega = 0$.

$P_n\ (\omega)$: كثير حدود في ω من الدرجة n. وهو يحقق: $P_n\ (0) = 1$.

المرشحات الفعالة

تصميم المرشحات الفعالة: مرشح بَتَرْوورث Butterworth filter

في مرشح بتروورث لتمرير الترددات المنخفضة:

$$H(f) = \frac{G}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}}$$

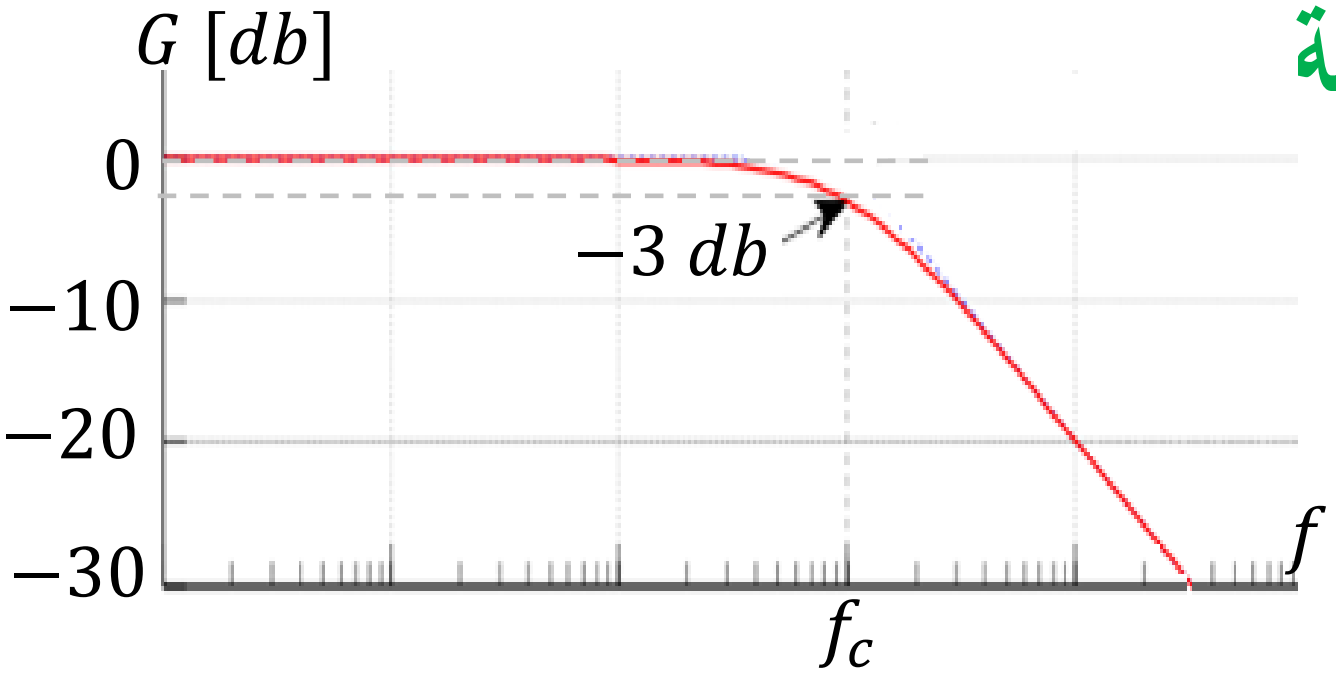
عندما $f = 0$ يكون $H(f) = G$،

عندما $f = f_c$ يكون $H(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

f_c هو تردد القطع، أو تردد الـ $-3db$.

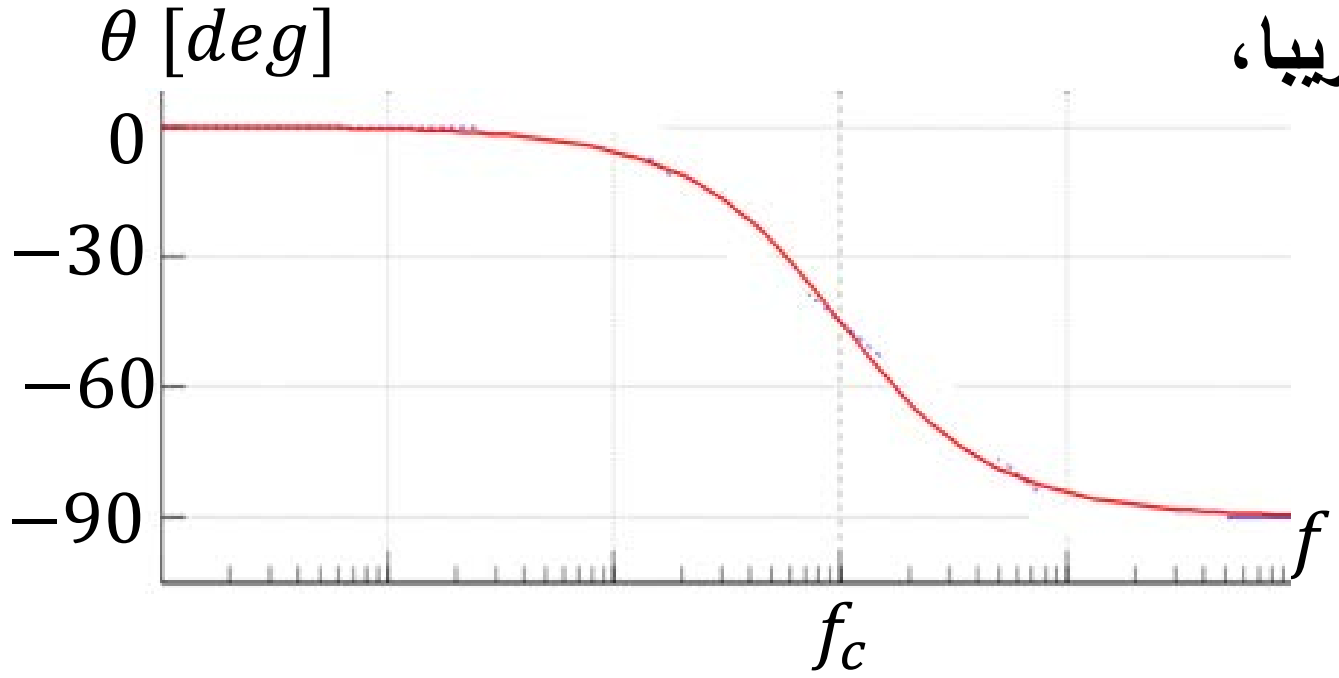
المرشحات الفعالة

مرشح بَتَرْوورث لتمرير الترددات المنخفضة من الدرجة الأولى



الاستجابة المطالية الترددية لمرشح بتروورث من الدرجة الأولى

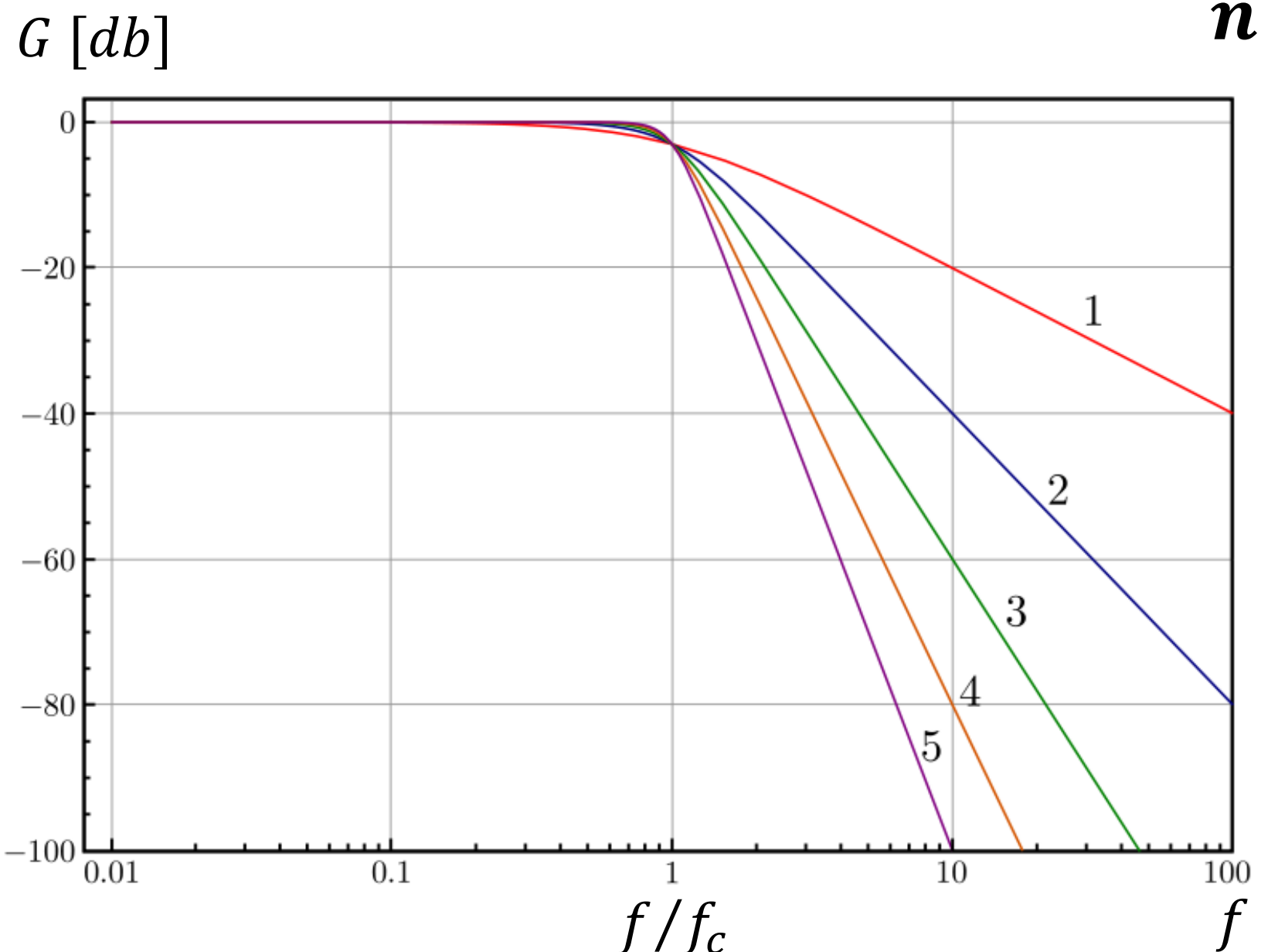
في مجال التمرير، ربح المرشح ثابت تقريبا، وإزاحاته الطورية تساوي الصفر تقريبا.



الاستجابة الطورية الترددية لمرشح بتروورث من الدرجة الأولى

المرشحات الفعالة

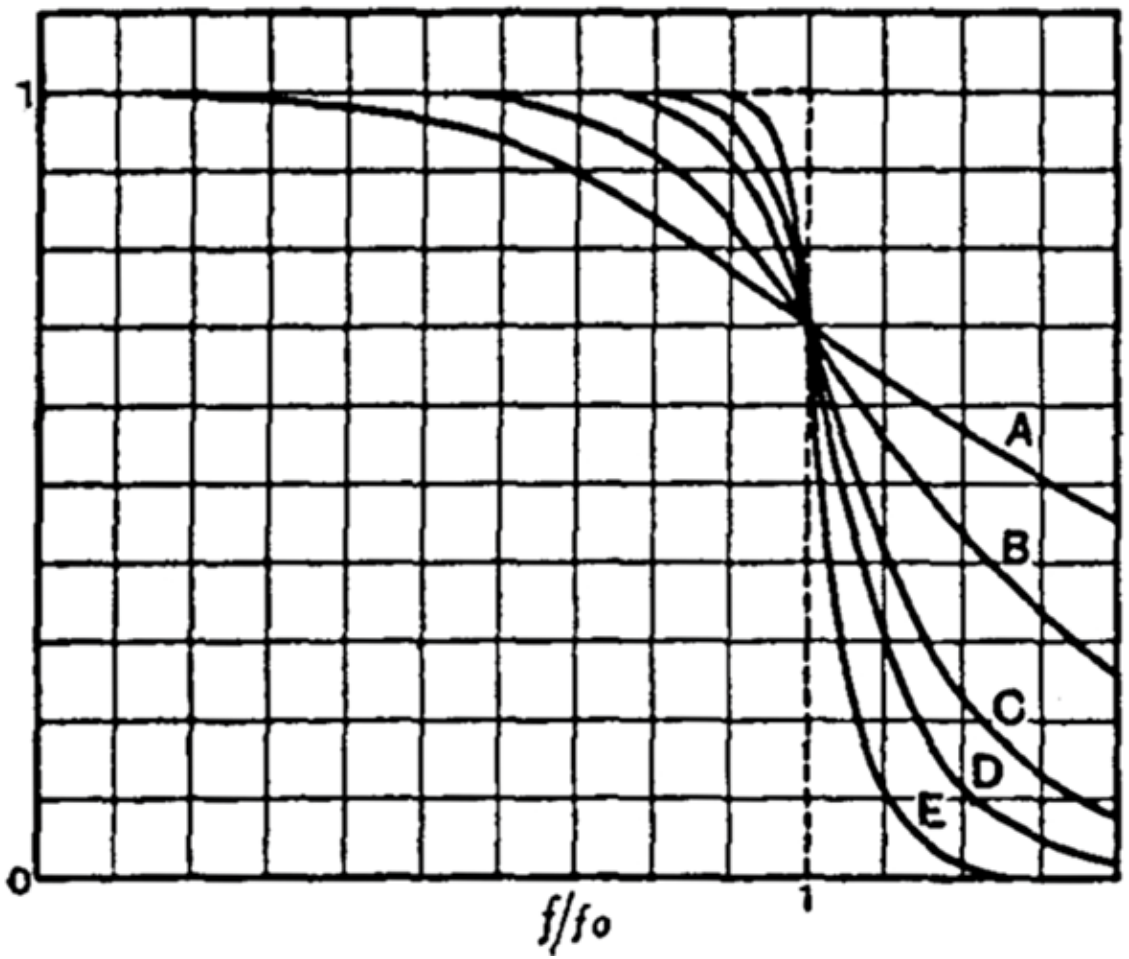
مرشح بَتَرْوورث من الدرجة n لتمرير الترددات المنخفضة



المنحنيات من أجل الدرجات n $= 1\ to\ 5$.

من الواضح أن الانتقال من مجال التمرير إلى مجال القطع يتسارع مع ازدياد قيمة n.

المرشحات الفعالة



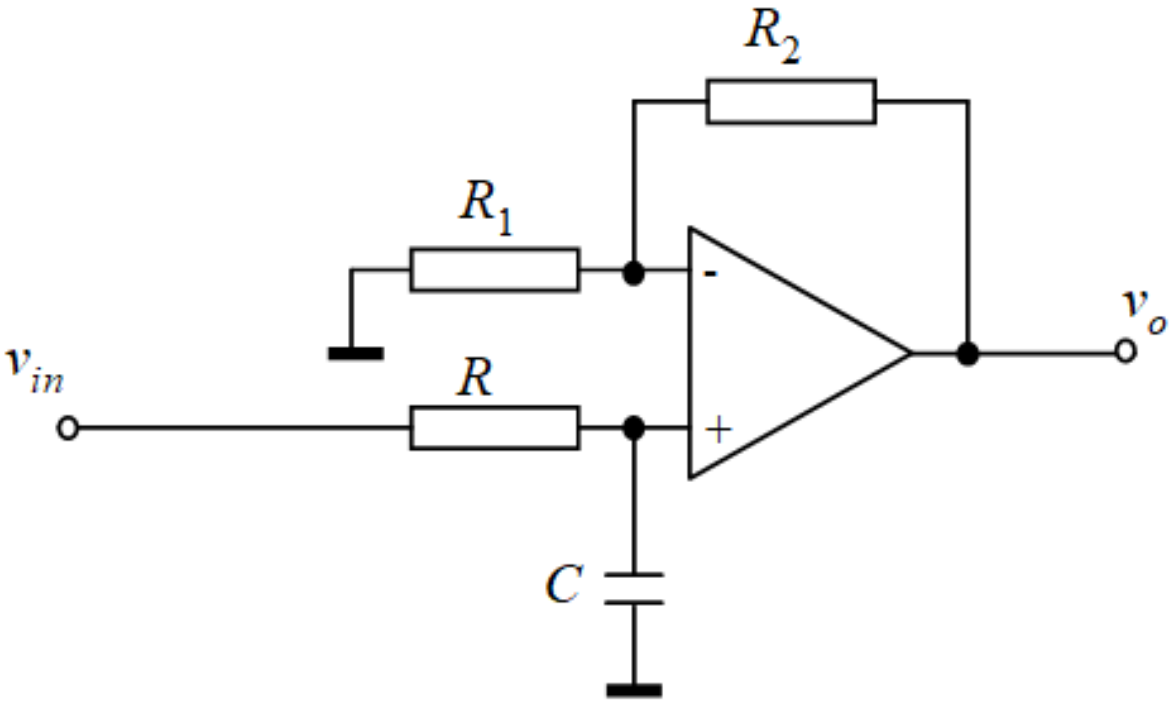
مرشح بَتَرْوورث من الدرجة n لتمرير الترددات المنخفضة.

الشكل من مأخوذ من مقالة Butterworth filter التي نشرها في عام 1930.

تقابل الأحرف $A - D$ الدرجات $n = 1\ to\ 5$.

من الواضح أن الانتقال من مجال التمرير إلى مجال القطع يتسارع مع ازدياد قيمة n.

المرشحات الفعالة



دارة مرشح بَتَرْوورث من الدرجة $n = 1$ لتمرير الترددات المنخفضة

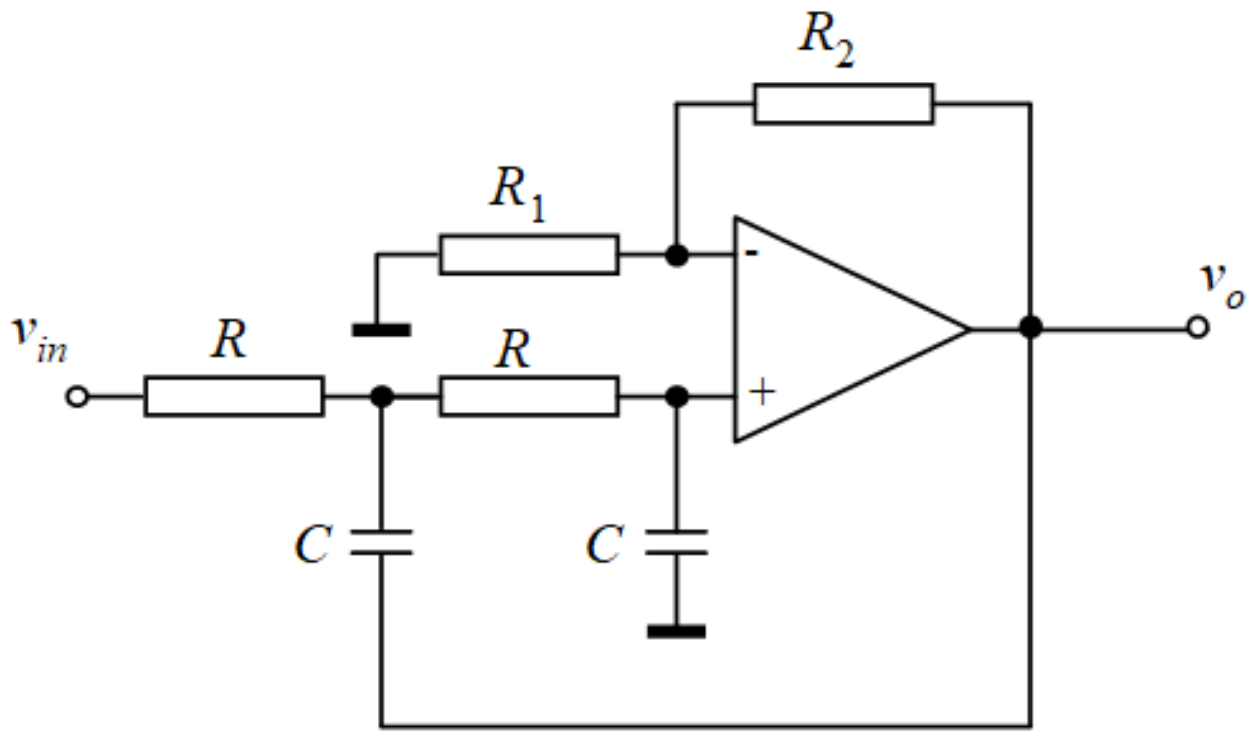
تابع تحويل الدارة:

$$H(\omega) = \frac{v_0(\omega)}{v_{in}(\omega)} = \frac{1}{j\omega RC + 1}\,\frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

تردد القطع:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$$

المرشحات الفعالة



دارة مرشح بَتَرْوورث من الدرجة $n = 2$ لتمرير الترددات المنخفضة

تابع تحويل الدارة:

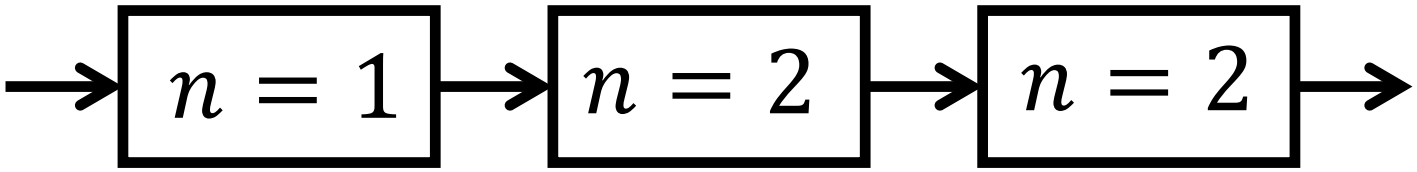
$$H(\omega) = \frac{v_0(\omega)}{v_{in}(\omega)} = \frac{\dfrac{R_1 + R_2}{R_1}}{(j\omega RC)^2 + j\omega RC\left(3 - \dfrac{R_1 + R_2}{R_1}\right) + 1}$$

تردد القطع:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$$

المرشحات الفعالة

مثال: دارة مرشح بَتَرْوورث من الدرجة $n = 5$ لتمرير الترددات المنخفضة



تابع تحويل الدارة:

$$H(\omega) = H_{1,n=1}(\omega)\, H_{2,n=2}(\omega)\, H_{3,n=2}(\omega)$$

توابع تحويل المقاطع الثلاثة ليست متماثلة، بل يجب أن تحقق مجتمعة تردد قطع المرشح المطلوب. ويجري حسابها بناء على كثيرات حدود بتروورث.

المرشحات الفعالة

كثيرات حدود بتروورث.

n	Factors of Polynomial $B_n(s)$
1	$(s+1)$
2	$(s^2+1.4142s+1)$
3	$(s+1)(s^2+s+1)$
4	$(s^2+0.7654s+1)(s^2+1.8478s+1)$
5	$(s+1)(s^2+0.6180s+1)(s^2+1.6180s+1)$
6	$(s^2+0.5176s+1)(s^2+1.4142s+1)(s^2+1.9319s+1)$
7	$(s+1)(s^2+0.4450s+1)(s^2+1.2470s+1)(s^2+1.8019s+1)$
8	$(s^2+0.3902s+1)(s^2+1.1111s+1)(s^2+1.6629s+1)(s^2+1.9616s+1)$

المقطع الأول من الدرجة الأولى

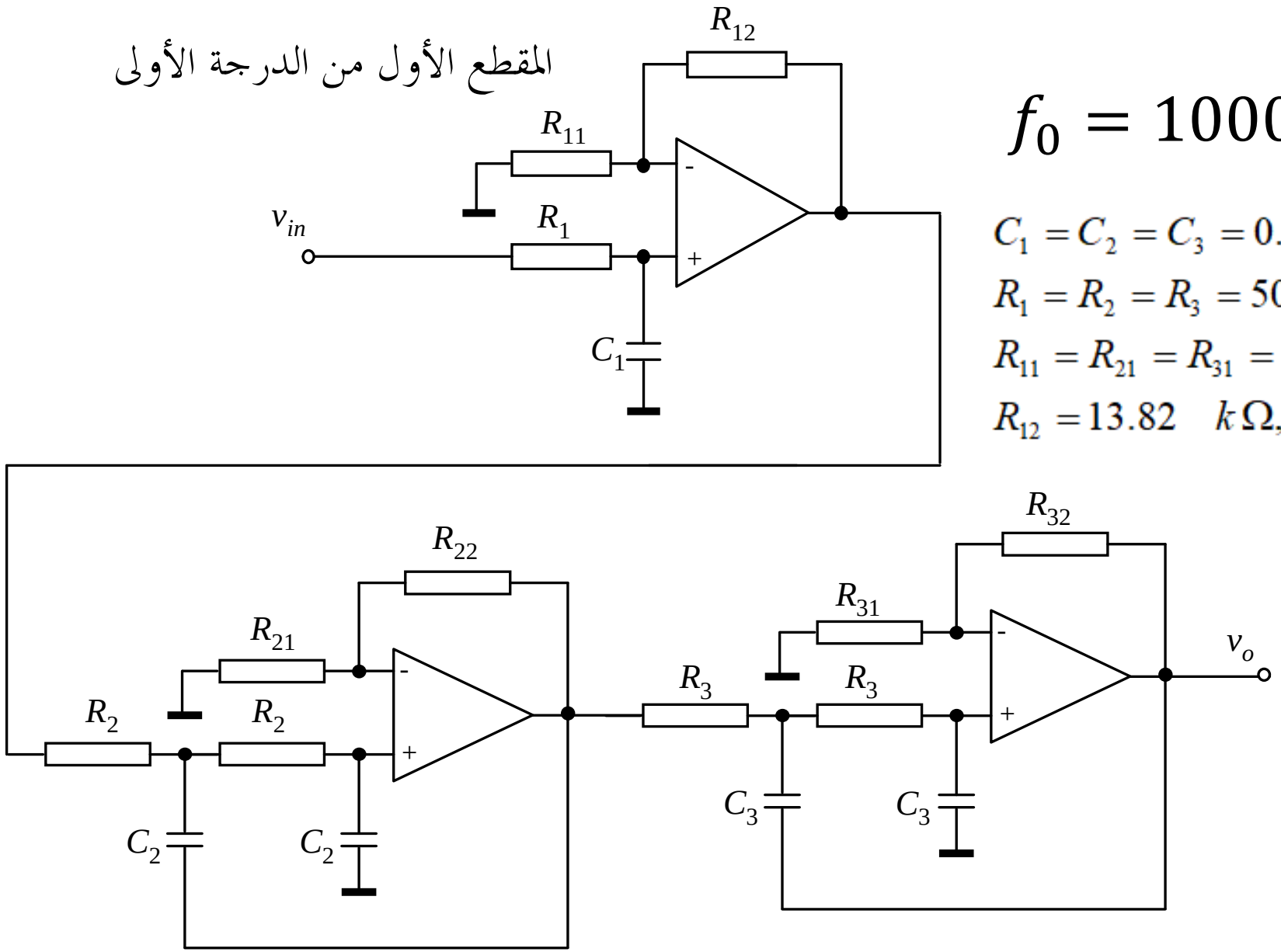
$$f_0 = 1000\ Hz, \qquad G = 5$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = 0.1\,\mu F$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = 5000/\pi \quad \Omega$$

$$R_{11} = R_{21} = R_{31} = 10 \quad k\,\Omega$$

$$R_{12} = 13.82 \quad k\Omega, \quad R_{22} = 3.82 \quad k\Omega, \quad R_{32} = 5.188 \quad k\Omega$$



المقطع الثاني من الدرجة الثانية

المقطع الثالث من الدرجة الثانية

المرشحات الفعالة

مرشحات بَتَرْوورث لتمرير الترددات العالية

تنتُج من مرشحات بتروورث لتمرير الترددات المنخفضة باستبدال كل R بـ C وكل C بـ R.

مرشحات بَتَرْوورث لتمرير حزمة ترددية

تنتُج من وضع مرشح تمرير ترددات منخفضة تردد قطعه يساوي تردد القطع العلوي لمرشح تمرير الحزمة، على التتالي مع مرشح تمرير ترددات عالية تردد قطعه يساوي تردد القطع الأدنى لمرشح تمرير الحزمة.

المرشحات الفعالة

مرشحات فعالة أخرى

هناك مرشحات أخرى تُستعمل في مقامات توابع التحويل الخاصة بها كثيرات حدود مختلفة عن تلك المستعملة في مرشحات بَتَرووورث، ولذا تتصف بخصائص مختلفة من حيث تجانس تابع التحويل في مجالات التمرير والمنع. من تلك المرشحات:

مرشح تشيبيشيف Chebyshev filter

مرشح بِسِّل Bessel filter

المرشح القطعي Elliptic filter