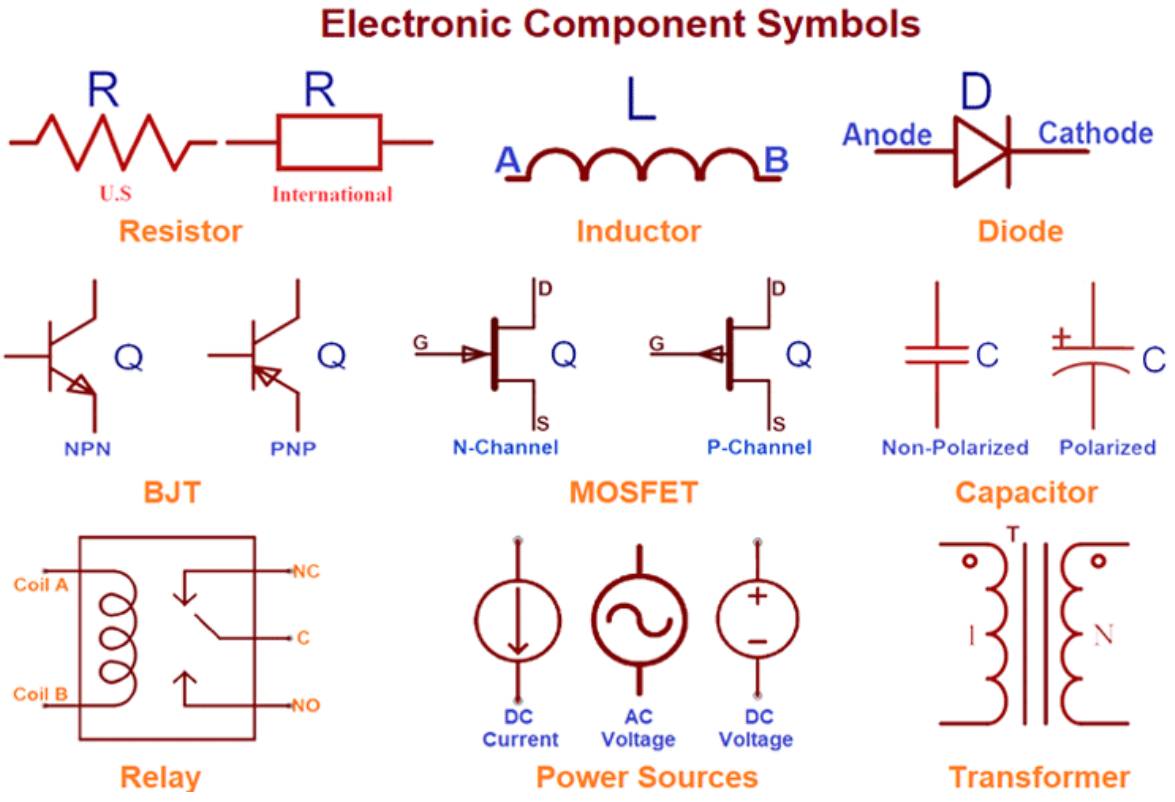
الكترونيك

ELECTRONIC



م.م احمد كريم سمير

م.م أيوب يوسف احمد

كلية التربية الأساسية حديثة

الدوائر المتكاملة Integrated Circuits

1- المقدمة

2- انواع الدوائر المتكاملة

3- الدوائـــر المتكاملـــة احاديـــة البلـــورة

1- المقدمة

تُستخدم الدوائر المتكاملة integrated circuits (او اختصاراً IC) بكثرة في الحاسبات الالكترونية بسبب صغر حجمها واستهلاكها القليل للقدرة وكذلك الدقة والجودة التي تمتاز بهما هذه الدوائر في عملها كذلك تستعمل في المركبات الفضائية وفي الاجهزة السمعية وغيرهما من الاجهزة حيث يشكل خفة الوزن للدوائر الالكترونية المستعملة عاملا حاسماً في جودة عمل هذه الاجهزة ومن هنا فان خفة وزن الدوائر المتكاملة يمنحها المركز الاول في الاستخدام في مثل هذه الاجهزة .

من ناحية اخرى تمتاز الدوائر المتكاملة برخص ثمنها وذلك بسبب من امكانية انتاج الآلاف من الوحدات المعقدة في زمن واحد وبعملية تصنيع واحدة . فعلى سبيل المثال يمكن انتاج ما يساوي او يزيد عن الف شريحة chip على رقاقة wafer (قطرها 1.5 سم وسمكها 300 مايكروميتر) تحتوي كل شريحة على 50 عنصراً أو مايزيد دفعة واحدة وعليه فانه يبدو واضحا بان كلفة العنصر الواحد من مكونات الشريحة سيكون رخيصا مقارنة مع كلفة تصنيع هذه المكونات بصورة منفصلة وبالطرق العادية .

من المعروف ان معظم العطلات failures التي تحدث في الدوائر المعقدة ذات العناصر المنفصلة discrete compnents يكون اما بسبب حدوث قطع في الاسلاك التي تربط بين هذه العناصر او بسبب من عدم احكام نقاط الربط وحيث ان هذا الربط في الدوائر المتكاملة يتم عن طريق ترسيب المعادن بين اطراف عناصر الدائرة

وعلى بلورة واحدة - كما سنرى لاحقا – لذا فانه يصبح بالامكان الاعتماد على هذه الدوائر ولفترات طويلة . وما الاقمار الصناعية والمركبات الفضائية الا أدلة جيدة على جودة واحكام عمل هذه الدوائر المتكاملة .

واخيراً وعلى الرغم من كل ماقيل عن مميزات الدوائر المتكاملة الا انه يجدر بنا الاشارة هنا الى ان من الصعوبة السيطرة على دقة قيم العناصر غير الفعالة المصنعة بطريقة التكامل (ومنها المقاومات والمتسعات مثلاً) حيث ان قيم هذه العناصر تكون دالة لكل من الجهد المستعمل ودرجة الحرارة . من جهة اخرى فان المتسعات التي تنتج عرضا – اثناء التصنيع – وبشكل غير مقصود قد يؤدي الى اقران عناصر الدائرة الواحدة مع بعضها الآخر مما يؤثر على عمل هذه الدوائر ولابد من المعالجة الصحيحة .

2- انواع الدوائر المتكاملة Types of integrated circiuts :

تصنف الدوائر المتكاملة عادة ، الى ثلاثة انواع هـــي :

1 – الدوائر المتكاملة احادية البلورة Monolithic IC$_s$
2 – الدوائر الغشائية Film circuits
3 – الدوائر المختلطة Hybrid circuits

على الرغم من أن الدوائر الاحادية البلورة هي من اكثر الانواع انتشاراً لحد الآن ومن ثم فان التركيز عليها سيكون اكثر من غيرها ، الا ان استخدام الدوائر الغشائية الرقيقة سيكون هو الافضل عندما تكون النسبة بين عدد العناصر غير الفعالة الى عدد العناصر الفعالة عاليا وعليه فاننا سنشير الى طبيعة هذه الدوائر ولكن من خلال التطرق للدوائر المتكاملة المختلطة وباختصار .

3- الدوائـــر المتكاملـــة احاديـــة البلـــورة : – Monolithic integrated circuits

ان كلمة monoli thic مشتقة من اللغة الاغريقية وتعني الحجر الواحد وعليه فان مصطلح monolithic IC يشير الى دائرة متكاملة تم تصنيع كل عناصرها على شريحة chip منفردة من رقاقة wafer السيلكون . هذا وان عملية التصنيع هذه

تعتمد على مايسمى بعملية تقنية الانتشارفي المستوى الواحد diffused planar process حيث يتم في هذه العملية تنفيذ جميع الخطوات اللازمة على سطح واحد لشريحة السيلكون وكذلك تعمل كل التوصيلات اللازمة بين المكونات على نفس السطح .

وعلى الرغم من ان جل اهتمامنا ينحصر في التعرف على الدوائر المتكاملة من حيث الاستخدام الا انه من المفيد جداً التعرف ايضا على كيفية تصنيعها حيث أن عملية التصنيع هذه تعدّ فريدة من نوعها في عالم الالكترونات .

في أوائل الخمسينات عندما كانت صناعة اشباه الموصلات semiconductor technology في بدايتها ، كان الجرمانيوم (Ge) أهم العناصر المعتمدة في هذه الصناعة ، من بين العناصر الاخرى وذلك لسهولة تنقيته وتنميته للحصول على بلورة جرمانيوم كبيرة وكذلك للسرعة العالية التي تتم فيها عملية التصنيع الخاصة بكل من الترانزستورات والثنائيات .

في عام 1960 اصبح واضحا ان السيلكون (Si) بدأ يستبدل الجرمانيوم وفي معظم التطبيقات تقريباً . ان السبب الكامن وراء هذا الاستبدال يشير الى ان للسيلكون مميزات تتلخص فيما يأتي :

أ) انه عنصر شائع ومتوافر حيث انه يكون 20 % من قشرة الارض ويمكن لذلك استخراجه بسهولة ويسر مما يعني رخص صناعته .

ب) تمتلك ذراته طاقة ترابط عالية مما يجعل استعماله افضل بكثير من الجرمانيوم عند العمل في درجات الحرارة العالية او بعبارة اخرى صغر تيار التسرب فيه وارتفاع جهد الانهيار التابع له .

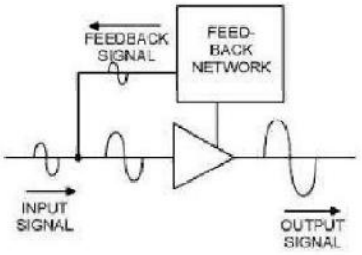
جـ- يمتلك اوكسيداً خاملاً ومستقراً يمكن استخدامه كقناع ضوئي photo-mask – كما سنرى لاحقا – في عملية تصنيع الدوائر المتكاملة اوكعازل جيد يكون طبقة منيعة تحمي البلورة من التلوث والرطوبة . اضف الى ذلك ان هذه الطبقة يمكن ازالتها بسهولة حيث انها تذوب في حامض الهيدروفلوريك الذي لايذوب فيه السيلكون .

المكبرات ذات التغذية الخلفية Feedback Amplifiers

1- التغذية الخلفية في المكبرات

2- معامل كسب المكبر في حالة وجود تغذية خلفية

3- أثر التغذية الخلفية على إستقرار معامل الكسب



١ _ التغذية الخلفية في المكبرات

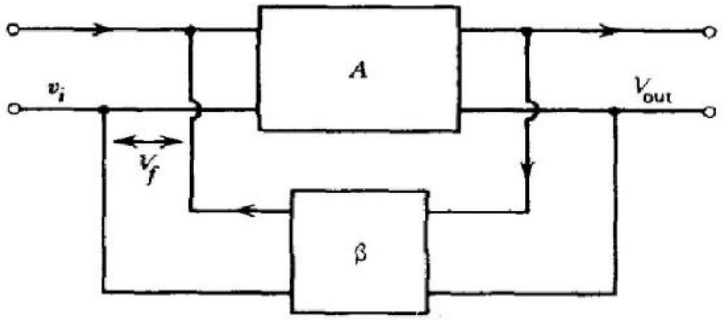
التغذية الخلفية في المكبرات عبارة عن إعادة جزء من نبضة خرج المكبر إلى مدخله من جديد . وهذا الجزء المعاد يمكن أن يكون جزءاً متناسباً من جهد الخرج وتعرف التغذية الخلفية عندئذ بالتغذية الخلفية بالجهد Voltage Feedback ، كذلك يمكن أن يكون المعاد جزءا متناسباً من تيار الخرج وتعرف التغذية الخلفية في تلك الحالة بالتغذية الخلفية بالتيار Current Feedback . وتنقسم التغذية الخلفية . من حيث طور الجزء المعاد إلى المدخل — إلى موجبة وسالبة . فعندما ينطبق طور الجزء المعاد إلى المدخل مع طور نبضة الدخل الأصلية فإن هذا يؤدي إلى زيادة قيمة نبضة الدخل الفعلية وتعرف التغذية الخلفية عندئذ بالتغذية الخلفية الموجبة Positive Feedback . إما إذا كان طور الجزء المعاد إلى المدخل مخالفاً لطور نبضة الدخل الأصلية (أي يوجد بينهما فرق طور مقداره ١٨٠°) فإن هذا يؤدي إلى إنخفاض قيمة نبضة الدخل الفعلية وتعرف هذه الحالة بالتغذية الخلفية السالبة Negative Feedback .

وتعرف نسبة الجزء المعاد من جهد أوتيار الخرج إلى القيمة الكلية لهذا الجهد أو التيار بإسم معامل التغذية الخلفية β Feedback Coefficient · وتؤثر التغذية الخلفية على خصائص المكبر مثل معامل كسبه للجهد أو التيار ومعاوقات الدخل والخرج له وعلى إستجابته لتكبير الترددات المختلفة وكذلك على مستوى الضوضاء المتولدة في المكبر وعلى التشويه اللاخطي للمكبر . وعند توفر شروط معينة للتغذية الخلفية الموجبة يتحول المكبر إلى مولد للذبذبات دونما إدخال أي نبضات للمدخل .

٢ _ معامل كسب المكبر في حالة وجود تغذية خلفية

يوضح شكل (1) مبدأ التغذية الخلفية بالجهد حيث A يرمز لمكبر معامل كسبه للجهد A بدون التغذية الخلفية ، β عبارة عن دارة التغذية الخلفية والتي تحقق معامل تغذية خلفية مقداره β . فإذا كان جهد نبضة الدخل الأصلية هو v_i فإنها تكبر خلال المكبر وينتج عنها نبضة خرج مقدارها v_o ، ثم يعاد جزء من هذا الجهد مقدار v_f إلى المدخل . وقيمة الجزء المعاد هي

$$v_f = \beta v_o \qquad \text{..... (1)}$$



شكل (1)

لذا يصبح جهد الدخل الفعلي للمكبر هو

$$v_i' = v_i + v_f = v_i + \beta v_o \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

وبالتالي يكون جهد الخرج الفعلي للمكبر هو

$$v_o = v_i' A = v_i A + \beta A v_o$$

أي

$$v_o(1-\beta A) = v_i A \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

ولما كان معامل الكسب للجهد هو عبارة عن النسبة بين جهد الخرج وجهد الدخل فإننا نجد أن معامل كسب المكبر A_f في حالة وجود تغذية خلفية هو

$$A_f = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A}{1-\beta A} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

وهكذا يلاحظ أن معامل الكسب A_f في حالة وجود تغذية خلفية قد يزيد أو ينقص عن نظيره في حالة عدم وجود تغذية خلفية . فإذا كانت إشارة β سالبة يصبح المقام $(1-\beta A) > 1$ وبالتالي يكون معامل الكسب A_f أصغر من معامل الكسب A بدون التغذية الخلفية . وهكذا نجد أن التغذية الخلفية السالبة تؤدي إلى إنخفاض معامل كسب المكبر A_f . أما إذا كانت إشارة β موجبة يصبح المقام $(1-\beta A) < 1$ وعندئذ يكون $A_f > A$. أي أن التغذية الخلفية الموجبة تؤدي إلى زيادة معامل الكسب A_f عن نظيره بدون التغذية الخلفية . وعند زيادة المعامل βA بحيث تصل قيمته إلى الواحد الصحيح يصبح المقام في العلاقة (4) مساوٍ للصفر $(1-\beta A = 0)$ وعندئذ يصبح معامل الكسب للمكبر ذي التغذية الخلفية الموجبة مساوٍ لمالا نهاية أي $A_f = \infty$ وعندئذ يتحول المكبر إلى مولد للذبذبات .

وتستخدم التغذية الخلفية السالبة في المكبرات إستخداماً واسعاً . فعلى الرغم من أنها تؤدي إلى إنخفاض معامل كسب المكبر إلا أنها تؤثر على خصائص المكبر الأخرى وتكسبه مزايا عديدة مثل :

أ ـــ زيادة إستقرار معامل الكسب بالنسبة لتغير ظروف التشغيل .
ب ـــ الإقلال من التشوية اللاخطي لموجة الخرج .
جـ ـــ زيادة إتساع شريحة الترددات التي يكون عندها معامل الكسب ثابتا .
د ـــ خفض نسبة الضوضاء للمكبر .
هـ ـــ التأثير على كل من معاوقتي الدخل والخرج .

أما التغذية الخلفية الموجبة فعلى الرغم من أنها تؤدي إلى زيادة معامل الكسب للمكبر إلى أنها تؤثر على

خصائص المكبر في عكس إتجاه تأثير التغذية الخلفية السالبة لذا فهي لا تستخدم عادة في المكبرات وإنما تستخدم في المذبذبات .

٣ ـ أثر التغذية الخلفية على إستقرار معامل الكسب

ينشأ عدم الإستقرار في قيمة معامل الكسب عن عدة عوامل مختلفة منها على سبيل المثال تغير الجهود أو درجة الحرارة بالنسبة للترانزستورات أو تغير الجهود (خاصة جهد تسخين الكاثود) والتقادم بالنسبة للصمامات. وتؤدي هذه العوامل إلى تغير معامل الكسب تبعاً لظروف التشغيل . فإذا كان معامل الكسب بدون تغذية خلفية هو $A \pm dA$ حيث dA هو قيمة عدم الإستقرار في المعامل فإنه يسهل حساب قيمة معامل عدم الإستقرار في معامل الكسب في حالة وجود تغذية خلفية كالتالي :

حيث أن معامل الكسب عند وجود تغذية خلفية يعطى بالعلاقة (4) فإنه يمكن إيجاد قيمة عدم الإستقرار في هذا المعامل بتفاضل هذه العلاقة أي أن

$$dA_f = \frac{dA}{(1-\beta A)^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

وبقسمة العلاقة (5) على (4) نجد أن

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1-\beta A)} \frac{dA}{A} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

في حالة التغذية الخلفية السالبة يكون المعامل $(1/1-\beta A) < 1$. وبالتالي تصبح نسبة عدم الإستقرار في حالة التغذية الخلفية السالبة (dA_f/A_f) أقل من نسبة عدم الإستقرار بدونها (dA/A) . وهكذا فإنه في حالة التغذية الخلفية السالبة كلما زادت قيمة (β) إنخفض معامل الكسب طبقاً للعلاقة (4) وإنخفضت نسبة عدم الإستقرار طبقاً للعلاقة (6) . فإذا أصبحت قيمة$(1/1-\beta A) \ll 1$تتخذ العلاقة (4) الشكل الآتي

$$A_f = \frac{A}{-\beta A} = -\frac{1}{\beta} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

وهكذا نجد أن معامل كسب المكبر ذي التغذية الخلفية السالبة $-A_f$ لم يعد يعتمد على معامل كسب المكبر بدون التغذية الخلفية وإنما يتوقف أساساً على قيمة المعامل β .أي أن معامل كسب المكبر لم يعد يتوقف على قيم بارامترات الترانزستور أو الصمام والتي تتغير بتغير الظروف المختلفة وإنما يتوقف فقط على المعامل β أي على عناصر دارة التغذية الخلفية . فإذا كانت عناصر هذه الدارة (وهي عبارة عن مقاومات أو مقاومات ومكثفات) لا تتغير بتغير الظروف أصبح معامل الكسب ثابتاً تقريباً وعدم الإستقرار فيه أصغر ما يمكن .

أما في حالة التغذية الخلفية الموجبة يكون المعامل $(1/1-\beta A) > 1$ وبالتالي تصبح نسبة عدم الإستقرار في حالة التغذية الخلفية الموجبة $(-dA_f/+A_f)$ أكبر من نسبة عدم الإستقرار بدونها (dA/A) .

مثال :

إذا كان معامل الكسب لمكبر بدون تغذية خلفية $A = 100$ ونسبة عدم الإستقرار في هذا المعامل يمكن أن تصل إلى $\pm$ ١٠٪ بتغير ظروف التشغيل . ثم نفذت تغذية خلفية لهذا المكبر بمعامل $\beta = \frac{1}{200}$ (أي أنه يتم إعادة

١/٢٠٠ من نبضة الخرج إلى المدخل) . إحسب معامل الكسب A_f ومعامل عدم الإستقرار عندما تكون هذه التغذية سالبة مرة وموجبة مرة أخرى . وإذا أصبح معامل التغذية الخلفية $\beta=\frac{1}{5}$ فما هو مقدار معامل الكسب في هذه الحالة .

الحل :

قيمة عدم الإستقرار في معامل الكسب بدون تغذية خلفية

$$10\pm=\frac{10\times 100}{100}$$

أي أن معامل الكسب يتغير في حدود مقدارها (٩٠-١١٠)

معامل الكسب في حالة التغذية الخلفية السالبة

$$A_{f-}=\frac{100}{1+\frac{1}{200}\times 100}=\frac{100}{1,5}=66.7$$

قيمة عدم الإستقرار في حالة التغذية الخلفية السالبة

$$dA_{f-}=\frac{1}{1.5}\ \frac{10}{100}\times 66.7=4.44$$

نسبة عدم الإستقرار في هذه الحالة هي

$$\frac{dA_{f-}}{A_{f-}}\%=\frac{4.44}{66.7}\simeq 6.6\%$$

معامل الكسب في حالة التغذية الخلفية الموجبة

$$A_{f+}=\frac{100}{1-\frac{1}{200}\times 100}=\frac{100}{0.5}=200$$

عدم الإستقرار للتغذية الموجبة هو

$$dA_{f+}=\frac{1}{0.5}\ \frac{10}{100}\times 200=40$$

نسبة عدم الإستقرار

$$\frac{dA_{f+}}{A_{f+}}=\frac{40}{200}=20\%$$

معامل الكسب عند زيادة التغذية الخلفية السالبة هو

$$A_{f-}=\frac{100}{1-\frac{1}{5}\times 100}=-\frac{100}{19}=-5.2\approx -5=\frac{-1}{\beta}$$

ومعامل عدم الإستقرار

$$dA_{f-}/A_{f-}=0.5\%$$

Sinusoidal Oscillators المذبذبات الجيبية

1- المقدمة

2- انواع التذبذب الجيبي

3- شروط التذبذب

1- المقدمة

تعرف المذبذبات بانها دوائر الكترونية تقوم بتوليد اشارات التيار المتناوب ذات الأشكال الموجية المختلفة ذاتيا – اي دون الحاجة الى اشارة ادخال – وفي مدى من الترددات تمتد من الترددات المسموعة (20 الى 20000 هرتز) مروراً بالترددات الراديوية (100 كيلوهرتز الى 30 ميكاهرتز) حتى اقصى مدى للترددات العالية.

ان توليد الاشارات يجب ان لايفهم على انه خلق للطاقة وانما هو في الحقيقة تحويل للقدرة المستمرة المجهزة بوساطة مصدر القدرة المستمرة المستخدم مع المذبذب الى قدرة متناوبة ذات خصائص مرغوبة من حيث السعة والتردد .

وعلى الرغم من ان الاشارات المتولدة تشترك في كونها دورية : تعيد نفسها بانتظام في فترات زمنية متساوية . الا ان اشكالها الموجية تكون اما جيبية ويدعى المولد عندئذ بالمذبذب الجيبي (sinusoidal oscillator) واما ان تكون الاشارة الناتجة مربعة ويدعى المولد حينذاك بمذبذب الموجات المربعة (square wave oscillator) او بمتعدد الاهتزازات (multivibrator) . بينما سنقوم هنا بالتعرف على النوع الاول من هذه المذبذبات .

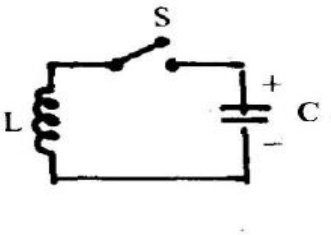
من الجدير بالذكر ان المذبذبات تستخدم بشكل كبير في اجهزة الراديو والتلفزيون والرادار والحاسبات الالكترونية وغيرها وكذلك في توليد الموجات ذات الترددات العالية بقصد استعمالها في تحميل الموجات . لذا فانه يصبح من الضروري ان تكون

سعة الموجات المتولدة وكذلك ترددها غير متغيرة مع الزمن . ولعل اكثر الاشياء ضرورة العمل المذبذب بشكل مرضي هو الاستقرارية اوالثبوتية في تردد الموجة المتولدة عند القيمة المطلوبة . كذلك يجب العمل على زيادة كفاءة المذبذب من خلال زيادة النسبة بين قدرة الموجة المتولدة الى القدرة المستمرة اللازمة لعمل المذبذب .

2- انواع التذبذب الجيبي :- Types of Sinusoidal Oscillations

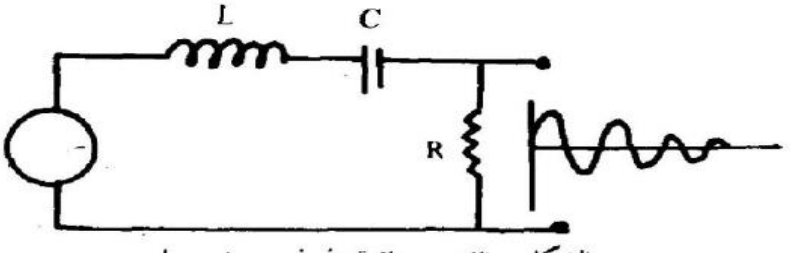
ينقسم التذبذب الكهربائي الجيبي قسمين رئيسين هما : -

أ - التذبذب المضمحل damped oscillations : - هو ذلك النوع من التذبذب الجيبي الذي تقل سعة ذبذبته مع الزمن - انظر الشكل (١) الذي يمثل الشكل الموجي للتذبذب الكهربائي المضمحل . من الواضح ان الجهاز الكهربائي المولد لهذا النوع من التذبذب يحتوي على عنصر يسبب ضياع الطاقة ومن ثم فان فقدان الطاقة يحدث مع كل ذبذبة كذلك فان هذا الفقدان في الطاقة لا يتم تعويضه وبهذا فان النقصان في سعة الذبذبة يحدث تدريجياً ، يبين الشكل (٢) الدائرة اللازمة لحدوث مثل هذا النوع من التذبذب عو فرض ان المتسعة C هي مشحونة بالاساس وان المفتاح (s) يتم غلقه وفتحه بصوره منتظمة هذا ويمكن الحصول على نفس النتيجة من دون الحاجة الى متسعة مشحونة او استعمال المفتاح (s) ، عند تسليط موجة مربعة على دائرة C , L , R مربوطة على التوالي واخذ الموجة الناتجة على المقاومة انظر الشكل (٣) .



الشكل (٢) دائرة تذبذب .

الشكل (١) التذبذب المضمحل .



الشكل (٣) دائرة تذبذب مضمحل .

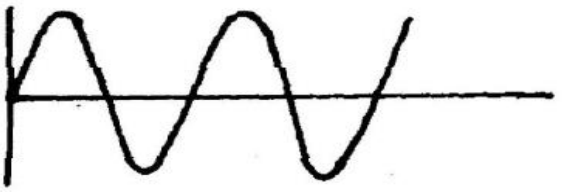
المحاضرة العاشرة

ومن الجدير بالذكر ان تردد التذبذب يبقى ثابتاً حيث ان التردد يعتمد على ثوابت خاصة بالدائرة الكهربائية ويكون مساويا في هذه الحالة ، لـ

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

ب – التذبذب الجيبي غير المضمحل : undamped oscillation

هو ذلك النوع من التذبذب الجيبي الذي لا تتغير سعته مع التذبذب او بعبارة اخرى ثبوت سعة التذبذب مع الزمن – انظر الشكل (٤) – الذي يمثل الشكل الموجي للتذبذب الكهربائي غير المضمحل .



الشكل (٤) التذبذب الجيبي غير المضمحل .

يحدث هذا النوع من التذبذب بنفس الطريقة التي يحدث بها التذبذب المضمحل مع فارق واحد ان هناك تعويض دائماً للطاقة الضائعة بسبب من مرور التيار في المقاومة المرافقة لكل من المتسعة والملف في الدائرة الشكل (٢) . كذلك فان تردد الموجة الناتجة يكون هو التردد في المعادلة (١) .

3- شروط التذبذب

رأينا فيما سبق (في التغذية الخلفية) انه بالامكان جعل المكبر يصل الى حالة التذبذب عندما تكون التغذية الخلفية المستخدمة مع دائرة المكبر . من النوع الموجب . وبهذا فانه يصح التكلم عن المذبذب باعتباره مكونا من مكبر مع دائرة تغذية خلفية موجبة – انظر الشكل (٥) . حيث نلاحظ دائرة المكبر A مع دائرة التغذية الخلفية التي تقوم بتجهيز مدخل المكبر بجهد الادخال اللازم بحيث ان

$$v_i - \beta v_o = +A\beta v_i \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

او ان

المحاضرة العاشرة

$$v_i\ (1 - \beta A) = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots (3)$$

وحيث ان v_i لا يساوي صفراً في حالة وجود v_o لذا فان

$$1 - \beta A = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots (4)$$

او ان

$$\boxed{\beta A = 1} \qquad \ldots\ldots\ldots (5)$$

ان تحقق الشرط اعلاه . المعادلة (٥/ – في دائرة المكبر عن طريق التغذية الخلفية الموجبة يعني ظهور التذبذب التلقائي في هذه الدائرة سواء اكانت اشارة الادخال موجودة او غير موجودة . وعندئذ تدعى الدائرة بدائرة المذبذب .

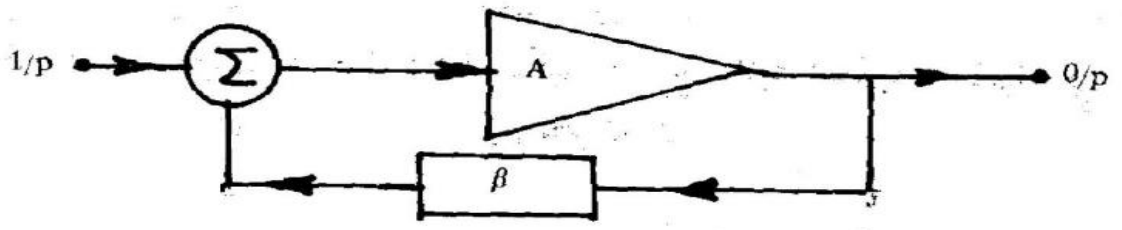
على اية حال تعامل الكمية βA . عند تحليل دائرة المذبذب ، على انها كمية معقدة complex quantity او بعبارة اخرى انها تمتلك مقداراً واتجاهاً وتكتب بالصيغة الآتية :

$$\beta A = 1 + j\,0 \qquad \ldots\ldots\ldots (6)$$

وبهذا يتضح لنا ان الشرطين الاساسين واللازمين لظهور التذبذب هما :

1 – ان قيمة عامل التغذية الخلفية $\beta A = 1$

2 – ان محصلة الازاحة الطورية للاشارة الداخلة تساوي $2n\pi$ حيث ان n عدد صحيح ويساوي $0, 1, 2, 3 \ldots$



الشكل (٥) مكبر التغذية الخلفية .

المحاضرة العاشرة