LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

✍ *Le nom du livre*, **l'auteur** [1] ⟶ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

- Système linéaire
- transformée de Laplace
- fonction de transfert

Expériences

- Biréfringence du quartz

Table des matières

Préparation

Biblio : Montrouge, Précis Bréal, Précis Bréal Electronique PSI, Sanz, Krob, Fox

Préparation : mettre le critère de stabilité (calculs théoriques...) sur diaporama. Lire Houard pour le laser, relire J. Neveu, on en apprend toujours

Plan : programme python pour Nyquist ? On a le temps pour l'oscillateur optique ? Parler de la stabilité en I ou en III ? Sinon : parler de la stabilité qu'en III, sans diagramme de Nyquist, pour prendre le temps pour expliquer clairement le laser. Mentionner en outro les milieux magnétiques.

Passage : Faire un max de schémas avec annotations. couleurs différentes à chaque partie (chaîne directe, chaîne retour).

Questions :limites ao (tension sortie, intensité sortie, slew rate), montages AO, définition de la transformée de Laplace, oscillateur de Wien, de Tantale, Autres oscillateurs : lire Brenders. Lire la fiche sur les laser.

A faire : Regarder les questions de Leo. A faire : Lire Houard pour le laser, relire J. Neveu, on en apprend toujours

Introduction

Filtres linéaires Jusqu'ici, en électronique, nous avons étudié uniquement des circuits linéaires, comme les filtres, dont la sortie dépend directement de l'entrée par une équation différentielle ordinaire linéaire (d'ordre quelconque). On est appelé à décrire des signaux temporels non restreints aux signaux périodiques, donc on va utiliser la transformée de Laplace. Un filtre linéaire est décrit par une fonction de transfert : $H(p) = s(p)/e(p)$. on fait un schéma bloc entrée-sortie, H. Par exemple, e peut être une commande électrique et s une vitesse de rotation d'un moteur.

Bonus : différence entre TF et TL La TF et la TL diffèrent par leur base de projection : en TF, ce sont les exponentielles oscillantes et en TL, ce sont les exponentielles oscillantes amorties causale, nulles à $t < 0$. De plus, la TF n'est définie que pour des fonctions intégrables et la TF réciproque n'existe que pour les fonctions de carré intégrable. Dans une application d'automatique où les signaux sont plutôt des échelons ou des rampes, la transformée de Fourier diverge ou est une distribution. Mais avec l'exponentielle décroissante, la TL est définie et régulière pour un plus grande classe de fonctions ("fonction gentille multipliée par exponentielle croissante"). Avec la TL, on peut s'intéresser à la valeur initiale et au régime transitoire avec les théorèmes de valeur initiale. Mais on peut aussi s'intéresser au régime transitoire avec en TF avec les fonctions de Green.

Schéma bloc et adaptabtion d'impédance. Le schéma bloc suppose une adaptation d'impédance. Cependant, pour les diviseurs de tension par exemple, on indique la fonction de transfert à vide. Le bouclage par diviseur de tension apparaît souvent dans les montages construits autour d'un AO, il est important de vérifier que son environnement permet de considérer qu'il fonctionne à vide.

Intérêt de la rétroaction Ainsi, à une entrée donnée correspond théoriquement une sortie unique, à supposer que l'on connaisse parfaitement $H(p)$, ce qui n'est pas forcément le cas. Par exemple, dans une voiture, la fonction de transfert qui à une certaine puissance fournie par le moteur associe la vitesse de rotation des roues dépend d'un certain nombre de paramètres comme la pente de la route ou le nombre de passagers. C'est pourquoi on utilise souvent des boucles de rétroaction qui permettent, dans le cas des systèmes asservis, de s'assurer que la sortie est bien conforme à ce que l'on attendait, et de faire réagir le système en conséquence. Dans une voiture, par exemple, les régulateurs de vitesse sont constitués d'un capteur tachymétrique qui mesure la vitesse de rotation des roues et rétroagit sur le moteur pour augmenter ou diminuer la puissance développée afin de se stabiliser à la vitesse de référence. On fait un schéma bloc conceptuel pour introduire la notion de boucle. Les boucles de rétroaction ont aussi d'autres applications (la régulation en température d'un four, les horloges atomiques, mais aussi en biologie : la régulation en température du corps humain, !), comme nous le verrons plus tard dans la leçon.

Définition : oscillateurs Les sytèmes bouclés ne servent pas toujours à respecter des consignes fixes. Dans des conditions spéciales, un système bouclé peut servir d'oscillateur. Un oscillateur est un système délivrant un signal périodique en l'absence de signal périodique extérieur à l'oscillateur et en étant alimenté par une source d'énergie continue.

Objectif On va formaliser les systèmes bouclés linéaires, illustrer les effets de la rétroaction, puis oscillations.

1 Systèmes bouclés linéaires

1.1 Fonction de transfert

✍ Brenders, p.199

Chaine directe, boucle retour, comparateur, erreur On fait un schéma annoté style Brenders p194. Un système bouclé est constitué d'abord d'une chaîne directe, qui donne la sortie "naïve" en fonction de l'entrée. Cette sortie est ensuite récupérée par un capteur par exemple, ou de manière directe, et traverse la boucle de retour, pour être comparée à l'entrée (ici les signes + et - signalent qu'il s'agit bien d'un comparateur, et non d'un additionneur) ; la différence entre les deux est appelée l'erreur. Notons que la présence d'un - est juste une convention, on peut toujours mettre un facteur -1 dans la boucle de retour pour obtenir un additionneur si l'on veut. *La chaîne directe est souvent une chaîne de (forte) puissance, alors que la chaîne de retour est généralement de faible puissance (car constituée de capteurs).*

Philosophie du système bouclé Dans l'idée, une sortie trop grande (par rapport à nos attentes, fixées par A et B) induira une grande rétroaction négative par la boucle de retour, si bien que la sortie finira par se stabiliser à une valeur inférieure ; attention ceci est juste une représentation mentale pour mieux comprendre. En réalité la sortie ne "revient" pas modifier l'entrée, tout se fait en même temps et même instantanément dans l'ARQS.

Fonction de transfert Les opérations effectuées étant linéaire, la sortie $s(p)$ sera linéaire en l'entrée, bien que modifiée par rapport au cas où il n'y a pas de rétroaction ; il doit donc être possible de modéliser l'ensemble du système bouclé par une seule fonction de transfert $H(p)$ pour, par la suite, le considérer comme une simple boîte noire. On fait le calcul, cf. fiche.

Causalité *Un système causal est un système dont l'ordre du polynôme au numérateur de sa fonction de transfert est inférieur ou égal à celui du dénominateur $m \leq n$. Cette propriété mathématique et son lien avec la causalité se vérifie via de l'analyse complexe sur les fonctions de transfert exprimées dans le formalisme de Laplace. Une conséquence : le dérivateur parfait n'est pas causal.*

Commentaire de H_{BF} Cette expression montre bien que le système bouclé se comporte comme le système sans boucle de retour ($H(p) = A(p)$), avec une correction $(1 + AB)^{-1}$ apportée par la boucle de retour.

Bonus : milieux magnétiques comme systèmes bouclés Dans un milieu paramagnétique, l'aimantation et l'excitation magnétique sont reliés par la relation linéaire $M = \chi H$, où $\chi = A$ est la susceptibilité magnétique du matériau, qui suit la loi de Curie $\chi = C/T$ où C est la constante de Curie. On peut voir un ferromagnétique comme un paramagnétique subissant une rétroaction due à son propre champ magnétique moyen, c'est-à-dire M. Cela correspond au schéma-bloc [entrée H, $A = \chi$, $B = \lambda$, sortie M]. On en déduit la susceptibilité ferrmomagnétique $\chi_{ferro} = H_{BF} = \chi/(1 - \lambda\chi) = C/(T - T_c)$, on retrouve la loi de Curie Weiss !

On va traiter un exemple pour fixer les idées.

1.2 Exemple : l'amplificateur non inverseur

Amplificateur non inverseur On va examiner un premier exemple de système bouclé : l'amplificateur non inverseur, qui utilise un AO. On donne le schéma sur diaporama.

ALI (AO ?) en régime dynamique Rappelons qu'en fonctionnement dynamique, la réponse de l'AO, non idéal ici, est donnée par son expression : on donne la fonction de transfert, les valeurs typiques de ω_{AO} et μ_0. On constate que l'AO se comporte comme un comparateur, suivi d'un filtre passe-bas du premier ordre, de pulsation de coupure $\omega_{AO} \sim 50 rad/s$ et de gain statique $\mu_0 \sim 2.10^5$. *En réalité, un amplificateur opérationnel est un système d'ordre bien supérieur avec tous ses transistors. Le condensateur est rajouté dans sa structure pour opérer une compensation en fréquence, qui consiste à forcer le système à être d'ordre 1 sur une plage de fréquence assez large qui contient la fréquence critique où le gain $A(j\omega)$ devient inférieur à 0. Ceci garantit que le déphasage en boucle ouverte n'est pas inférieur à 180 deg à cette fréquence et donc la stabilité du système lorsqu'il est bouclé, en suiveur par exemple. La compensation en fréquence dégrade donc la bande passante du composant.*

Fonction de transfert de l'amplificateur non inverseur Retournant à notre système bouclé, on pourrait calculer la sortie en fonction de l'entrée, avec les lois des mailles et lois des noeuds, ce qui serait fastidieux. On va plus vite en remarquant que l'amplificateur non inverseur est en fait un système bouclé, avec un comparateur suivi d'une chaîne directe (l'AO), et muni d'une chaîne de retour qui est un simple pont diviseur de tension, en justifiant que $i_- = 0$ dans l'AO idéal. On donne les expressions de A,B correspondants, après calculs et simplifications, on obtient : $H(p) = H_0/(1 + p/\omega_0)$.

Effet de la rétroaction On remarque que le système bouclé se comporte de la même manière que le système non bouclé (c'est toujours un filtre passe-bas d'ordre un), mais avec des caractéristiques différentes.

Comment les caractéristique du filtres ont-été modifiées par la rétroaction ?

2 Conséquences de la rétroaction

2.1 Gain et bande passante

✍ Brenders, p.208

Changement du gain et de la fréquence de coupure Pour fixer les idées, on prend des valeurs types **ODG:** $R_1 = 1k\Omega$ et $R_2 = 100k\Omega$ si bien que $B(p) = R_1/(R_1 + R_2) \sim 1/100$. Remarquons pour commencer que nous sommes dans le cas d'un système bouclé avec un grand gain en chaîne directe ($\mu_0 = 10^5 \gg 1$), et que dans ce cas,

$$H_0 = \frac{\mu_0}{1 + B\mu_0} \sim \frac{1}{B} \sim 100 \sim \frac{\mu_0}{2 \times 10^3}$$

. Comparé à l'AO seul, la rétroaction a donc drastiquement réduit le gain, d'un facteur environ 2000. Dans le même temps, la fréquence de coupure a été multipliée par le même facteur 2000. **ODG:** $\omega_0 \sim 10^5 rad/s$ ou $f_0 \sim 16$ kHz. La boucle de rétroaction a permis d'augmenter la bande passante, ce qui permet de travailler à plus haute fréquence, au prix d'une diminution du gain d'un même facteur.

Conservation du produit gain-bande Plus généralement, on énonce la conservation du produit gain-bande lorsque la chaîne de retour est réelle

$$H_0\omega_0 = cte = \mu_0\omega_{AO} = 10^7 rad/$$

ce qui est le cas du diviseur de tension (donc ce n'est pas le cas pour tous les montages ALI). On illustrer la constance du produit (Gain x Bande) sur un diagramme de Bode.

La rétroaction permet de changer la bande à produit gain-bande constant.

Bonus : ordres de grandeur et simplification de H Remarquons pour commencer que nous sommes dans le cas d'un système bouclé avec un grand gain en chaîne directe ($\mu_0 = 10^5 \gg 1$), et que dans ce cas, on a en toute généralité :

$$H(p) = A(p)/(1 + A(p)B(p)) \approx 1/B(p) \tag{1}$$

autrement dit le gain du système bouclé ne dépend (presque) que de la boucle de retour. Comme le but d'un amplificateur non inverseur est en général d'amplifier, nous prendrons $B(p) = R_1/(R_1 + R_2) \ll 1$, typiquement **ODG:** $R_1 = 1k\Omega$ et $R_2 = 100k\Omega$ si bien que $B(p) \sim 1/100$ et $H(p) \sim 100$ et on a bien un amplificateur. Ça, on aurait pu le dire sans calculer $H(p)$, mais connaître $H(p)$ nous donne quand même des informations utiles comme le comportement passe-bas.

Mis à part travailler à plus haute fréquence, quel est l'avantage d'une bande plus large ?

2.2 Sensibilité aux fluctuations

✍ Brenders p.202

Problématique Dans le cas de la voiture, un problème est que la fonction $A(p)$ peut fluctuer beaucoup au cours du temps : par exemple, si la route n'arrête pas de monter et de descendre alternativement, alors à puissance du moteur constante, la vitesse des roues (grandeur de sortie) pourra prendre des valeurs très diverses et pas forcément souhaitables. D'où la question : est-ce que cela va affecter fortement la vitesse du véhicule, ou est-ce que l'asservissement est suffisamment performant pour que la vitesse ne bouge quasiment pas ?

Estimation Supposons donc que la chaîne directe $A(p)$ fluctue de ΔA, et que la chaîne de retour, elle, ne fluctue pas (c'est tout de même la moindre des choses, pour un système d'asservissement). On peut alors calculer les variations relatives de la fonction de réponse du système une fois que l'asservissement est branché. On fait le calcul qui coûte deux lignes.

Résultat et commentaire Par rapport à la chaîne directe sans asservissement, on voit donc que les fluctuations sont atténuées d'un facteur $1 + AB$, qui est généralement grand pour peu qu'on ait pris un système avec un grand gain en chaîne directe (si l'on reprend l'exemple de l'amplificateur non inverseur avec les valeurs que nous avons données, c'est toujours le facteur 2000). En clair, même avec des variations colossales de la chaîne directe $\Delta A/A = 1$, les variations de la fonction de transfert du système bouclé ne sont que de 0.05%.

Mis à part travailler à plus haute fréquence, quel est l'avantage d'une bande plus large ?

2.3 Réponse dynamique

Cette partie est facultative, mais permet d'introduire les oscillations

Réponse dynamique Une caractéristique importante d'un système de commande est la réponse dynamique - typiquement, sur la réponse à un échelon. On va examiner l'influence de la rétroaction.

Temps de réponse pour l'ordre 1 Concernant le temps de réponse, il est donné par $\tau = 1/\omega_0$ pour les systèmes d'ordre 1. On montre un schéma. Il est donc grandement réduit par la présence de la rétroaction : celle-ci accroît la rapidité du système. **ODG:** $\tau = 20$ms avant rétroactio, $\tau = 10^{-5}s$ après rétroaction.

Rapidité vs. dépassement pour les ordres ≥ 2 Pour des systèmes d'ordre ≥ 2, il y a un prix à payer pour cette rapidité : c'est le dépassement. On montre un schéma. Le dépassement est généralement d'autant plus grand que la réponse est rapide (cf le RLC), et qui peut poser des problèmes en ingénierie (pièces métalliques qui s'entrechoquent, tout ça). Ou même pour le régulateur de vitesse : passer de 60 km/h à 80 km/h c'est bien beau, mais si on peut éviter de faire une pointe à 100km/h pendant l'accélération c'est quand même mieux. *Pour améliorer la rapidité du système on doit agir sur le signal d'erreur à l'aide d'un élément correcteur, qui va en général amplifier ce dernier lors du régime transitoire afin d'amplifier la réponse de la chaîne directe. L'inconvénient c'est qu'augmenter la rapidité de la réponse peut conduire à un dépassement de la valeur finale attendue voire à des oscillations. Augmenter la rapidité revient souvent à rapprocher le système d'un régime de fonctionnement instable. De manière générale, il y a une compétition entre rapidité et stabilité.*

Bonus : réponse d'un système d'ordre 1 vs. ordre 2 L'ordre d'une fonction de transfert a un impact direct sur la forme de la réponse temporelle d'un système : un système du second ordre peut présenter des dépassements de la valeur finale attendue et des oscillations ce qui n'est pas le cas pour un système du premier ordre. De plus, la réponse d'un système du second ordre possède une dérivée temporelle nulle en $t = 0^+$ contrairement à un système du premier ordre, qui par conséquent réagit plus rapidement au départ. L'avantage de l'ordre 2 peut résider dans l'atténuation d'un bruit haute fréquence, ou à temps de réponse égal, un filtre d'ordre 2 peut utiliser des composants moins performants. Typiquement, les grosses inductances sont difficiles à miniaturiser.

Bien, donc ce que nous avons vu jusqu'ici, ce sont des systèmes dont la rétroaction, négative, vient contrebalancer l'entrée pour stabiliser le système à une certaine valeur de sortie. Mais que se passe-t-il si l'on prend une rétroaction positive, où la rétroaction vient au contraire renforcer l'entrée ?

3 Oscillateurs quasi-sinusoïdaux

Définitions

✍ Brenders p236. *Intercaler ces définitions dans les parties suivantes*

Oscillateur : système délivrant un signal périodique en l'absence de signal périodique extéieur à l'oscillateur et en étant alimenté par une source d'énergie continue.

Oscillateur quasi-sinusoidal Les harmoniques secondaires ont leur somme des carrés négligeable devant celle du fondamental. Le taux de distorsion $0 < \tau = \sqrt{N_{harm}/N_{tot}} < 1$ où N_{harm} est la somme des carrés des amplitudes des harmoniques et N_{tot} idem avec fondamental. Les oscillateurs ne sont pas sinusoidaux à cause des non-linéarités des composants et des fluctuations statistiques de leurs caractéristiques au cours du temps.

3.1 Stabilité

✍ Brenders pp203-205 Insister sur le fait qu'il suffit d'étudier la boucle ouverte pour prédire la stabilité de la boucle fermée, heureusement, car s'il est instable on a pas intérêt à le monter.

Stabilité Un système linéaire bouclé est stable si la grandeur physique à réguler reste bornée lorsque le signal d'entrée est borné. Il faut préciser la linéarité. *Un système linéaire permanent est stable si et seulement si la totalité des pôles de sa fonction de transfert (i.e. les racines de l'équation caractéristique) sont soit réelles négatives, soit complexes à partie réelle négative. Les systèmes d'ordre 1 et 2 sont stables si et seulement si tous les coefficients de* *l'équation caractéristique associée à l'équation différentielle qui les régit (i.e. tous les coefficients du dénominateur de la fonction de transfert associée) sont de même signe.*

Exemple : l'amplificateur non inverseur est stable L'amplificateur non inverseur a un comportement passe-bas : il est stable. *On pourrait calculer ses pôles pour le vérifier.*

Changement de convention Nous allons cette fois prendre la convention de la rétroaction positive. On change le schéma. Ce n'est qu'une histoire de convention ! On a donc une nouvelle convention pour la fonction de transfert : $H(p) = A(p)/(1 - A(p)B(p))$.

Equation différentielle, sans entrée Revenons un instant sur l'équation différentielle qui gouverne l'évolution du système (en notation de Laplace)

$$(1 - A(p)B(p)) \cdot s(p) = A(p)e(p) \tag{2}$$

Ce que nous allons maintenant regarder, c'est ce qu'il se passe quand on ne met pas d'entrée ($e = 0$) : le système est-il stable ? Autrement dit, est-ce que les petites fluctuations (inévitables, dues au bruit extérieur) vont s'atténuer ou au contraire s'amplifier, conduisant à une divergence de la sortie ? Attention, même si $e = 0$, de l'énergie au système est fournie de manière continue. Il faut préciser la source d'énergie.

Solution de l'équation différentielle Cette équation dans le domaine de Laplace $(1 - A(p)B(p)) \cdot s(p) = 0$ traduit une équation différentielle homogène dans le domaine temporel. La solution est une somme d'exponentielles

$$s(t) = \sum_i a_i e^{p_i t} \tag{3}$$

où les p_i sont les racines du polynôme $1 - A(p)B(p)$. Les modes instables seront ceux pour lesquels $Re(p_i) > 0$. On fait un schéma du plan complexe.

Critère de stabilité Un système bouclé linéaire est stable si et seulement si les parties réelles des solutions de $1 + H_{BO} = 0$ sont négatives.

Un système linéaire permanent est stable si et seulement si la totalité des pôles de sa fonction de transfert sont à partie réelle négative.

Le critère de Barkhausen est un critère pratique. L'étude expériementale en boucle ouverte permet de conclure sur la stabilité en boucle fermée : pas besoin de boucler le système pour savoir s'il va exploser ou pas si on le fait. *Si on fait la partie plus tôt : Lorsque le système bouclé est stable, on parle de rétroaction, et d'oscillateur lorsqu'il est instable.*

Critère du revers/Nyquist ✍ Krob pp123-214, Jérémy Neveu. *Version simplifiée* Si un système linéaire est stable en boucle ouverte, une condition nécessaire et suffisante de stabilité asymptotique du système en boucle fermée est qu'en parcourant le lieu de Nyquist $H_{BO}(j\omega)$ dans le sens des pulsations ω croissantes, on laisse le point critique $+1$ à droite. *On le démontre en analyse complexe avec le théroème de Cauchy : l'intégrale d'une fonction complexe sur un contour est égale au nombre de tours que fait l'image du contour autour de* 0. *Pour connaître le lieu de Nyquist et donc la stabilité en boucle fermée, il suffit expérimentalement de faire l'étude fréquentielle du système en boucle ouverte. Pour des systèmes asservis du type filtre passe-bas d'ordre 1 ou 2, la phase n'est jamais inférieure à* $-\pi$ *donc les fonctions de transfert en boucle ouverte n'atteignent jamais le point critique -1 : ces systèmes sont donc stables. Attention, s'ils sont bouclés avec un sommateur, le point critique à regarder est +1 et ces systèmes peuvent présenter des instabilités. Les systèmes d'ordre supérieurs à deux sont toujours potentiellement instables.*

Application à l'amplificateur non-inverseur La racine est négative, donc il est stable. On peut juste le mentionner et dire qu'on pourrait le vérifier facilement. *En revanche, si on avait mis la rétroaction sur la borne +, on aurait obtenu un montage instable : le comparateur à hystérésis.*

Insister sur le fait qu'il suffit d'étudier la boucle ouverte pour prédire la stabilité de la boucle fermée, heureusement, car s'il est instable on a pas intérêt à le monter.

Bonus : Stabilité et transformée de Laplace La transformée de Laplace revient à choisir une base de projection de fonctions $\exp(p_0 t)$ où $p_0 = r + js$. Le critère de stabilité est ici évident : $r > 0$ est instable. Or les TL des exponentielles sont les pôles simples $1/(p - p_0)$ donc on comprend, par décomposition en éléments simples, le critère de stabilité.

Bonus : solution de l'équation différentielle On reprend l'équation différentielle linéaire liant l'entrée et la sortie :

$$H_{BF}(p) = \frac{s(p)}{e(p)} = \frac{A(p)}{1 + A(p)B(p)} \tag{4}$$

donc

$$(1 + A(p)B(p))s(p) = A(p)e(p) \tag{5}$$

On peut exprimer la solution dans le domaine temporel :

$$s(t) = \sum_i a_i e^{p_i t} \tag{6}$$

où les p_i sont les racines $1-AB$ (par transformée de Laplace inverse : la TL inverse d'un pôle simple est l'exponentielle associée). Les solutions instables sont celles pour lesquelles $Re(p_i)>0$.

3.2 Condition de Barkhausen

✍ Brenders p.238 et Houard p.354

Critère de Barkhausen Le critère de Barkhausen permet de dire à partir de quel moment on passe d'une situation stable à une situation instable, càd de $Re(p_i) < 0$ à $Re(p_i) > 0$. Au cas limite, on cherche donc des racines de partie réelle nulle au polynôme en p qu'est $1 - A(p)B(p)$, c'est-à-dire des racines du type $p = j\omega$ *Note : on change de notation car Barkhausen nous parle de régime harmonique et pas transitoire, on peut déduire des propriétés globales sur les racines p complexes simplement à partir de la courbe $AB(j\omega)$ et enfin on arrive à la partie des discussions expérimentales concrètes, et c'est donc beaucoup plus pédagogique de troquer notre p abstrait pour une fréquence bien concrète.*. La condition de Barkhausen s'énonce donc ainsi, dans la convention sommateur

$$A(j\omega)B(j\omega) = 1 \tag{7}$$

C'est une condition sur des nombres complexes qui porte donc deux informations : une sur le module, une sur la phase. *Pour la réaliser, il faut qu'il y ait deux pôles imaginaires purs conjugués : le système doit être d'ordre deux au moins !*

Interprétation interférentielle On peut réécrire H en série entière : on écrit l'expression. On interprète ça en termes d'amplification le long d'un tour de boucle (pour le module) et d'interférences constructives (pour la phase).

3.3 Application au laser

Analogie avec le laser, description du laser ✍ Houard, Sanz, fiche Laser. Tous les laser (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) ont quatre composants principaux : un milieu amplificateur, un système de bouclage, un mécanisme de pompage et un couplage avec l'extérieur. On montre un schéma.

Rôle des composants Le milieu amplificateur amplifie de manière cohérente la lumière, le système de bouclage *i.e.* la cavité optique, type Fabry-Pérot est constituée de deux miroirs en vis à vis, légèrement courbés pour assurer la stabilité des photons faisant des allers-retours. Elle assure deux rôles : (i) bouclage : les photons font plusieurs allers retours dans le milieu amplificateur. (ii) Comme l'interféromètre de Fabry-Pérot, la cavité sélectionne des fréquences particulières avec une finesse donnée par le coefficient de réflexion des miroirs. **ODG:** Si $R = 0.95$, la finesse vaut $F \sim 60$. Un des miroirs est le miroir de couplage qui cause une faible transmission vers l'extérieur de la radiation de la cavité. En régime stationnaire, il faut un apport d'énergie ou pompage pour compenser cette perte d'énergie.

Exemple : laser He-Ne Dans l'exemple du He-Ne, la source d'énergie du laser (ou « source de pompage ») est une décharge électrique de **ODG:** 1kV appliquée à l'anode et à la cathode, de part et d'autre du tube de verre, ce qui accélère des électrons et excite les atomes du milieu par collision. Dans le cas d'une émission continue on utilise le plus souvent un courant de 5 à 100 mA. Le miroir de "output coupler" a un coefficient de réflexion de **ODG:** 99%. Les lasers hélium-néon sont généralement de petite taille avec une cavité optique mesurant de **ODG:** 15 à 50 cm de long et une puissance de sortie de **ODG:** 1 à 100 mW. Pour des longueurs de cavité de 15 à 50 cm, cela permet à 2 à 8 modes longitudinaux oscillent simultanément.

Modélisation du LASER par un système bouclé On considère une composante fréquentielle ω. Les photons effectuent des aller-retours dans la cavité. Leur nombre va être amplifié à chaque passage dans le milieu amplificateur et diminué par la proportion qui va s'échapper de la cavité par M_2. On peut alors modéliser le fonctionnement interne du laser par :

- chaîne directe : l'amplification est possible dans un milieu où composé d'atomes que l'on excite via une source d'énergie externe. Il possède un gain $G(\omega) = g(\omega)\exp\{i\frac{\omega \ell_a}{c}\}$ avec ℓ_a la largeur du milieu. un aller retour dans le laser (chaîne directe). $g(\omega)$ est dû au gain du milieu. Il présente généralement un maximum à une fréquence de transition donnée, qui est celle de la transition laser. Le terme de phase est celui de la propagation d'une onde plane. Ainsi, la fonction de transfert peut se mettre sous la forme : $A(\omega) = g(\omega)^2 \exp\{2i\frac{\omega \ell_a}{c}\}$

- bouclage : le bouclage de la sortie sur l'entrée se fait avec des miroirs semi-refléchissants : miroir M_1 ($r_1 > 99.9\%$) et d'un miroir semi-réfléchissant M_2 ($r_2 \sim 95\%$).
- chaine de retour : la chaîne de retour est donnée par les réflexion sur le miroir M_2. Le miroir M_1 est supposé parfait. Ainsi, $B(\omega) = r_2$.

On donne le schéma du laser en blocs

Condition de Barkhausen pour le laser Pour regarder la condition de naissance des oscillations, on applique la condition de Barkhausen : $A(\omega)B(\omega) = 1$. On a donc les deux équations réelles :

$$|A(\omega)B(\omega)| = |r_2 g(\omega)^2| = 1 \tag{8}$$

$$arg(A(\omega)B(\omega)) = 2\frac{\omega_n \ell_a}{c} = 2n\pi \tag{9}$$

On a donc deux conditions :

$$|g(\omega)|^2 = 1/|r_2| \tag{10}$$

$$\omega_n = n\frac{\pi c}{\ell} \tag{11}$$

avec $n \in \mathbb{Z}$. Le bouclage du système est donc à l'origine de la quasi-monochromaticité du laser, donc de sa cohérence temporelle. Il faut que le gain compense les pertes par le miroir M_2. Les fréquences sélectionnées sont caractérisées par la géométrie de la cavité optique (milieu passif), de largeur ℓ. Pour le laser, c'est l'émission spontanée qui jouera le rôle de « bruit » de démarrage. *En réalité, il y a des pertes par diffusion et diffraction sur le bord des miroirs. Si $g^2 > 1/r_2$, alors le laser sort de la modélisation linéaire, $g(\omega, I)$ dépend de I et sature à une valeur déterminée par le milieu actif.*

Courbe de gain On peut montrer la courbe du Fox p73, $g(\omega)$ en fonction de ω, mise en évidence des modes qui autorisés donnés par la condition de Barkhausen et des qui oscillent tels que au-dessus de $1/\sqrt{r_2}$. Selon la longueur de la cavité, on peut avoir un laser multimode ou monomode. Un laser multimode présente plus de puissance (découpage). Un laser monomode a un plus long temps de cohérence (interférométrie). Un laser en verrouillage de mode comporte de nombreux modes actifs, en phase (sinon c'est *a mess*), possède un spectre large et donc peut être utilisé pour produire des impulsion courtes (femto voire attoseconde).

Bonus : saturation de la puissance En réalité, le gain du milieu dépend de l'intensité $g(\omega, I)$ et à trop grande intensité, le gain du milieu diminue, ce qui borne l'intensité même à pompage arbitraire. A haute intensité, l'inversion de population dépend de I en dimunuant. Cela est aussi dû au temps de vie fini des états excités,

$$I_{sat} = \frac{\hbar\omega}{\sigma\tau_{eff}}$$

où τ_{eff} est le temps de vie de l'état excité.

Largeur spectrale, laser He-Ne La longueur d'onde de fonctionnement précise varie d'environ 0,002 nm en raison de la dilatation thermique de la cavité. Il existe des versions stabilisées dont la précision est de l'ordre de 10^{-12} nm.

Largeur spectrale Pour un laser He-Ne, l'élargissement Doppler conduit, à température ambiante, à une largeur de raie $\Delta\lambda_{Dop} \sim 3 \times 10^{-4}$nm. Le Fabry-Pérot va sélectionner une raie beaucoup plus fine. Pour qu'il n'y ait qu'un seul mode de la cavité Fabry-Pérot (espacés de $\Delta\lambda = \lambda^2/2d$) qui soit amplifié, il faut choisir $\Delta\lambda \sim \Delta\lambda_{Dop}$ (ou choisir plus grand mais être plus précis sur d).

Si plusieurs modes de la cavité peuvent être amplifiés, le temps de cohérence $\tau_c \sim 1/\Delta\nu$ sera plus court car il faudra prendre $\Delta\nu$ comme l'espacement entre deux pics. Si un seul mode est amplifié *i.e.* le laser est **monomode**, le temps de cohérence est donné par $\delta\lambda = \Delta\lambda/\mathcal{F}$où $\mathcal{F} \sim \pi/T \gg 1$ est la de la cavité. Donc, *le fonctionnement monomode améliore la cohérence temporelle du rayonnement émis.*

La pureté spectrale du faisceau peut être plus faible que celle donnée par la finesse de la cavité. Mais la limitation fondamentale est les fluctuations de phase induites par l'émission spontanée (inégalité de Heisenberg).

En pratique, ce sont les vibrations mécaniques du dispositif, les fluctuations thermiques qui font varier la longueur de la cavité $L(T)$ et l'indice optique $n(T)$ du dispositif

3.4 Exemple : l'oscillateur à pont de Wien

✍ Krob

Présentation On fait un schéma avec les blocs bien identifiés. La chaîne directe est l'amplificateur non inverseur. La chaîne de retour est un filtre passif appelé pont de Wien : c'est un filtre passe bande peu sélectif $Q = 1/3$ (RC série puis RC parallèle). Le tout forme une système d'ordre 2, donc des oscillations sont possibles. L'ALI est supposé idéal.

Condition de Barkhausen La condition sur l'argument donnée par Barkhausen $\omega = \omega_0$. On s'attend donc à ce qu'en sortie de l'oscillateur, on ait une sinusoïde parfaite à la fréquence ω_0 , à condition que le module vaille 1, ce qui revient à $R_2 = 2R_1$. La condition sur le module est ...

Naissance des oscillations Le signal est engendré par le système lui-même, les oscillations "accrochant" un signal de perturbation quelconque. Par exemple, en électronique, il pourra s'agir d'une impulsion due à la mise sous tension des appareils ou à des perturbations électromagnétiques captées par induction par les fils, etc... En électronique, l'énergie produite provient évidemment des sources de tension continues non représentées sur les schémas servant à l'alimentation des composants actifs : ici l'ALI. *De même, pour tous les systèmes auto-oscillants de tout domaine de la physique (optique, mécanique, par exemple), une source d'énergie extérieure est nécessaire à l'entretien des oscillations.*

Naissance des oscillations
On s'est astucieusement placé à R_2 juste en dessous de $2R_1$, avec une boîte à décades (avec des boutons qui tournent de préférence) pour R_2 , de sorte qu'en tournant juste un peu le bon bouton on voie apparaître les oscillations. Régler l'oscillo en mode single en faisant tous les réglages (trigger, échelle horizontale etc) au préalable pour que cette étape soit rapide et démonstrative. On voit apparaître les oscillations, c'est assez joli.

Saturation des oscillations La divergence est arrêtée par les non-linéarités de l'élément actif : ici c'est la saturation de l'ALI *Cela peut être la saturation en tension (15 V), mais si l'ALI ne sature pas en tension c'est qu'il sature en courant de sortie (20 mA) ou en vitesse de balayage (0.5 V/μs).* Ce sont les non-linéarités qui enrichissent le signal en relâchant la condition de Barkhausen. Le critère de Nyquist nous apprend que ce qui compte surtout, c'est d'avoir $R_2 > 2R_1$ et pas égale : en gros, on veut avoir une bonne amplification qui ne concerne pas juste ω_0 mais aussi d'autres fréquences.

Relâchement du critère de Barkhausen. En pratique, on a toujours du mal à obtenir très précisément la condition de Barkhausen, par exemple à cause des incertitudes sur les valeurs des composants mais plus intrinsèquement, à cause des non-linéarités des composants et des fluctuations statistiques de leurs caractéristiques au cours du temps. Si $|A(j\omega)B(j\omega)| < 1$, les oscillations sont amorties. En pratique, on se place à $|A(j\omega)B(j\omega)| \gtrsim 1$ pour que les oscillations se maintiennent, mais cela se fait au prix de la déformation de la sinusoide. C'est pourquoi on n'a pas d'oscillateur exactement sinusoïdal à ω_0 , et c'est pourquoi l'on parle d'oscillateur quasisinusoïdal à ω_0. *Notons que, pour que des oscillations puissent naître à partir d'une perturbation d'entrée, il ne suffit pas que le régime linéaire du système soit instable. Il faut aussi que, une fois parvenu à sa saturation, le système n'y reste pas indéfiniment, et finisse par retrouver le régime linéaire. Alors, il oscille entre saturation haute et basse : le régime saturé doit lui aussi être instable. Les oscillations se réalisent entre les deux valeurs de saturation. Moins le système reste en régime saturé, i.e. plus il est proche de la réalisation exacte de la condition de Barkhausen, plus le signal se rapproche d'un signal sinusoïdal pur à ω_0 . L'étude exacte est assez complexe, car une fois en régime saturé, il faut écrire la nouvelle équation qui régit le système dans ce régime, et calculer sa durée.*

Rôles des non-linéarités
Refaire l'expérience précédente en dépassant plus franchement $2R_1$: on observe une distorsion du régime permanent. Montrer la TF et l'amplitude des harmoniques. On peut estimer le **taux de distorsion harmoniques**. Changer l'échelle des temps et constater aussi que la croissance des oscillations est beaucoup plus rapide : cela est lié (cf diagramme de Nyquist) au fait que plus R_2 dépasse $2R_1$, plus la partie réelle des racines de $AB - 1$ est grande dans les positifs (son expression est donnée dans le Krob (5.14) mais c'est pas très important) et donc plus la divergence est rapide dans le régime transitoire.

Limites et améliorations L'oscillateur à pont de Wien construit est un piètre oscillateur quasi-sinuosidal car : la bande passante du filtre est large, la distorsion atteint des valeurs élevées, il est limite en fréquence (par la fréquence de balayage de l'AO) **ODG:** 300 kHz. Une amélioration possible est la commande automatique de gain *(CAG)* avec un asservissement qui empêche la saturation : il faut introduire un élément non-linéaire. On peut remplacer une résistance de l'amplificateur par une résistance qui dépend de la température : supposons que R_4 soit une CTP ou CTN (typ.

filament d'ampoule). Si l'amplitude croît légèrement, la puissance dissipée dans R_4 augmente, ce qui fait croître sa valeur et donc réduit le gain de l'ampli. non inverseur, ce qui ramène l'amplitude à son niveau correct. On peut aussi utiliser un étecteur de crête (ex : diode/transistor à effet de champ). On diminue alors le gain au fur et à mesure que l'amplitude des oscillations croit : ainsi l'élément actif NL ne sature pas : la pureté spectrale est améliorée. ✍ Krob p128.

Inversion des bornes de l'ALI *Si l'on réalise le même montage en inversant simplement les bornes + et - de l'AO, la sortie de l'AO est toujours saturée, indépendamment du rapport R_2/R_1 . Le régime saturé devient stable et en pratique on observe aléatoirement s = +Vsat ou -Vsat , constante.*

Stabilité en fréquence En analysant les conditions de sortie du régime saturé à la pulsation ω_0, on peut montrer que la variablité de la fréquence des oscillations est inversement proportionnelle au facteur de qualité Q. ✍ Krob p 131. Avec Q = 1/3, la stabilité en fréquence (variation relative de fréquence) d'un oscillateur à pont de Wien est de l'ordre de $10^{-2} = 1000ppm$, ce qui est énorme. En pratique cet oscillateur n'est jamais utilisé, on préfère des oscillateurs à quartz dont le facteur de qualité est plutôt de l'ordre $Q \sim 10^4$.

Adaptation d'impédance : il faut, pour maintenir l'indépendance des chaînes, choisir un montage où l'impédance d'entrée de l'amplificateur est grande et celle de sortie très petite.

Conclusion

Nous avons vu dans cette leçon deux applications bien différentes des systèmes bouclés : pour l'asservissement (rétroaction négative), pour fabriquer des oscillateurs (rétroaction positive). L'oscillateur à pont de Wien qu'on a étudié est vraiment tout pourri, son facteur de qualité (1/3) est ridicule. Déjà pour les lasers c'est beaucoup mieux, on peut atteindre des Q très grands (finesse de la cavité), mais vous allez me dire, c'est normal c'est de l'optique, et je vous répondrai, que nenni on peut aussi avoir de très bons oscillateurs électroniques ! Par exemple dans les oscillateurs à quartz on peut facilement atteindre des facteurs de qualité beaucoup plus grands (entre 10^4 et 10^6 typiquement), d'ailleurs on les utilise dans les horloges atomiques (attention danger, être au taquet sur les oscillations de Rabi, les franges de Ramsey tout ça). Notons pour l'anecdote que dans les horloges atomiques, l'oscillateur à quartz est lui-même sujet à un asservissement (cf le principe de la méthode de Rabi), on a donc les deux types de rétroaction dans le même appareil, c'est incroyable.

Ouverture :

Compléments

Vase de Tantale Le vase de Tantale est un exemple classique d'oscillations de relaxation. C'est un dispositif constitué d'une arrivée continue d'eau et d'un vase qui se vide périodiquement à l'aide d'un siphon. C'est donc un exemple de transformation d'un courant continu en courant alternatif, transposé au domaine mécanique plutôt qu'électrique.

Compléments/Questions

Oscillateurs quasi-sinusoidaux, oscillateurs à relaxation On distingue deux types d'oscillateurs : 1. les oscillateurs quasi-sinusoïdaux, tels que le signal de sortie soit presque sinusoïdal 2. les oscillateurs à relaxation, délivrant un signal périodique non sinusoïdal.

Oscillateur à relaxation en électronique Un exemple simple est une boucle avec intégrateur + comparateur à hystérésis. Le comparateur à hystérésis non-inverseur renvoie une tension de sortie $v_{s,2} = \pm V_{sat}$. À saturation positive $v_{s,2} = +V_{sat}$, l'intégrateur va intégrer cette tension au cours du temps, sa tension de sortie décroit alors linéairement à la vitesse $-V_{sat}/(RC)$. Lorsque $v_{s,1} = v_{e,2}$ atteint le seuil de l'oscillateur à relaxation $-V_0 = -R_1V_{sat}/R_2$, le comparateur bascule à saturation négative $v_{s,2} = -V_{sat}$. La tension en sortie de l'intégrateur est alors croissante à la vitesse $V_{sat}/(RC)$, jusqu'à atteindre le seuil $+V_0$. Il y a alors à nouveau basculement, et le cycle recommence. Au final, en sortie du comparateur on a un signal créneau et en sortie de l'intégrateur on a un signal triangulaire de même période. On peut commander la période en tension en multipliant $v_{e,1}$ la tension intégrée par le signal modulant : on intègre alors plus ou moins vite.

Oscillateurs à relaxation Electronique : multivibrateur astable, comparateur à hystérésis bouclé avec un intégrateur. Mécanique : vase de Tantale `https://fr.wikipedia.org/wiki/Vase_de_Tantale`, stick-slip, le cas du siphon ou de l'extracteur de Soxhlet en chimie (voire wikipedia).

Multivibrateur astable Un AO comparateur fait la comparaison entre la tension de sortie du filtre passe-bas u_c et la tension de sortie du diviseur de tension $u = R_1/(R_1 + R_2)s$. Tant que $s = V_{sat}$, le condensateur se charge, u_c augmente jusqu'à la valeur $u_0 = R_1/(R_1 + R_2)V_{sat}$: l'AO bascule alors en saturation basse. Lorsque $s = -V_{sat}$, le condensateur se décharge, u_c diminue jusqu'à dépasser la valeur $-u_0$: l'AO bascule en saturation haute.

Effet Larsen : L'effet Larsen est un phénomène physique de rétroaction acoustique involontaire observé dès les débuts de la téléphonie. L'émetteur émet un son qui est amplifié par le récepteur et ainsi de suite.

Oscillateur à quartz ✍ Jérémy Neveu. Effet piézoélectrique. Modèle électrocinétique (RLC série en parallèle avec C). Ordre de grandeur pour les composants. Allure du diagramme de Bode : anti-résonance et résonance. La phase est positive entre les deux, négative ailleurs.

Montre à quartz La pile est le générateur de tension qui crée un champ électrique qui met en vibration le quartz. Celui-ci constitue l'étalon de fréquence vers 32 kHz, qui est divisée pour obtenir la fréquence de 1 Hz. Leur principal défaut est la forte sensibilité de leur fréquence d'oscillation par rapport à leur environnement. Ainsi, des perturbations thermiques, magnétiques, vibrationnelles ou encore radiatives peuvent considérablement modifier leur fréquence d'oscillation.

Critères d'un asservissement (i) stabilité (ii) précision statique et dynamique (iii) rapidité (iv) sécurité/dépassement. De manière générale, il y a une compétition entre rapidité et stabilité. La précision du système bouclé est d'autant meilleure que le détecteur est sensible.

Elément correcteur Un correcteur est un élément de fonction de transfert C(p), en général électronique, rajouté dans la boucle juste après le comparateur afin d'améliorer soit la précision, la stabilité ou la rapidité. Différents types de correcteur existent pour améliorer l'un ou l'autre de ces critères : "proportionnel", "intégrale", "dérivée", "déphaseur".

Lecture des diagrammes de Nyquist Pour les systèmes causaux, pour $\omega \to \pm\infty$, le lieu de H tend vers l'origine.

Asservissement d'un moteur à courant continu On mesure la vitesse de rotation en sortie avec une génératrice tachymétrique. Un AO amplifie et compare avec la tension de consigne et l'injecte dans la chaîne directe, constituée de la MCC.

Marge de gain, marge de phase On les lit sur les diagrammes de Bode : -gain lorsque $\phi = -\pi$ et phase$+\pi$ lorsque gain=1. La signe des marges donne la stabilité.

Questions

- L'amplificateur non-inverseur (présenté ici). Pensez à bien le traiter, surtout s'il s'agit de votre premier exemple : nommez-le, établissez la fonction de transfert, montrez que le produit gain-bande passante est constant, etc.
- Le moteur asservi en position (présenté ici). Vous pouvez consacrer un certain temps à cet exemple d'autant plus qu'il permet de motiver l'intérêt des systèmes asservis et de la rétroaction. Tracez rapidement quelques courbes avec des gains différents et montrez par exemple que le temps de montée, la réponse à 5%, le seuil de dépassement, varient. Vous pouvez alors discuter du compromis rapidité-stabilité du point de vue de la performance pour des applications industrielles.
- L'oscillateur à pont de Wien (présenté ici). Cet exemple permet de bien illustrer le passage d'un système bouclé stable à un système bouclé instable. C'est presque un passage obligé de la leçon, mais il faut l'exploiter à fond ! Montrer le régime stable, instable, tracer les diagrammes associés, ...
- Le LASER (présenté ici). Il est traité dans les nouveaux programmes de PC comme un système bouclé, vous pouvez donc lui consacrer une partie de votre leçon. Même si ce n'est pas le propos, vous devrez être au point sur le fonctionnement du laser (cavité et optique non-linéaire, niveaux de peuplement).
- L'asservissement en vitesse (non présenté). Plus complexe à réaliser, et probablement plus adapté au montage, mais il permet d'illustrer d'autres applications des asservissements.
- Boucle à verrouillage de phase (non présentée). Ce montage permet de proposer un système un peu plus complexe qui a de nombreuses applications en traitement du signal.
- Oscillateur commandé en tension (non présenté). C'est un système bouclé instable à seuil, ce qui permet de montrer un fonctionnement différent et dont les applications se trouvent plutôt du côté des signaux numériques.

- Oscillateur de Van der Pol (non présenté). C'est un oscillateur dont le principe repose sur l'existence d'une non-linéarité qui réinjecte de l'énergie dans le système.
- Le vase de tantale (non présenté). C'est un oscillateur à relaxation qui peut vous permettre d'introduire la leçon ou de la conclure tout en montrant autre chose qu'un système électronique.
- La réaction chimique oscillante de Belousov-Zhabotinsky, mais il faut réfléchir à la façon de l'intégrer à votre leçon.
- Pourquoi AB est la fonction de transfert en boucle ouverte ? Suffit-il de connaître la fonction de transfert en boucle ouverte pour connaître le comportement en boucle fermée ? On peut prédire la stabilité/instabilité avec le critère de Barkhausen.
- Il y a quoi dans un amplificateur opérationnel ? Des transistors. Les limites de l'AO ?
- Pourquoi peut-on amplifier un sinus à une fréquence supérieure à la fréquence de coupure de l'AO ? Conservation du produit gain bande. On peut élargir la bande passante. On peut écrire la fonction de transfert de l'AO de la forme $H = A_0/(1+\tau\omega)$ avec τA_0 constant.
- (Oscillateur de wien je crois) Il y a des pertes dans les résistances, pourquoi les oscillations continuent, d'où vient l'énergie ? De la source de l'AO.
- Dans un laser, quelle est la chaine directe, quelle est la chaine retour ? Chaine directe : milieu amplificateur. Chaine retour : miroirs de la cavité. Qu'est ce qui sélectionne la fréquence ? A la fois le milieu amplificateur (profil lorentzien) et surtout la longueur de la cavité (modes propres avec largeur liée à la réflectivité des miroirs).
- C'est quoi les oscillateurs qu'on a dans les montres ? Effet piézoélectrique. Oscillateurs à quartz. On stimule électriquement le quartz qui vibre à la fréquence de résonance, ce qui définit une base de temps (wiki horloge à quartz). On applique une tension et cela créer des oscillations
- Qu'est ce qu'il se passe dans une horloge atomique ? Généralement les atomes sont du césium 133. Transition entre deux niveaux que l'on excite avec une lumière à une fréquence ν. On regarde la proportion d'atomes excités en sortie, qui est donnée par les oscillations de Rabi. On asservit en fréquence pour obtenir un maximum de transition, atteint à $\nu = nu_0$. Oscillations de Rabi et franges de Ramsey.
- Si on alimente une ampoule avec un signal à 1Hz, A quelle fréquence elle clignote ? Dissipation en I^2 va donner des fréquences à $2Hz$.
- Est ce que l'AO impose lui aussi d'autres fréquences ? Oui a cause du slew rate.
- La puissance du laser sature à cause de la vitesse finie du pompage, qui ne peut pas peupler l'état excité aussi rapidement qu'il n'est vidé par l'émission stimulée. On est limité par les pulses/flash de la lampe Néon(?).
- Schéma équivalent de l'AO dans le précis Bréal.
- Fréquence présente naturellement dans un AO ? Slew rate
- Fonction de transfert non rationnelle ? Le retard pur : H est une exponentielle décroissante (lien avec p_x générateur des translations selon x).

Commentaires

- Ne pas expliquer l'AO dans cette leçon, on peut l'utiliser directement. On met en prérequis "fonctionnement de l'AO".
- On peut brancher les oscillo en VGA ! ! ! !

Questions des années précédentes :

- la grandeur de retour doit être du même type que la grandeur d'entrée sinon il faut utiliser un convertisseur. Par exemple, si la grandeur d'entrée est une tension et celle de sortie est un courant, il faut utiliser un convertisseur courant-tension.
- La chaîne de retour est composé d'un capteur (transducteur). Quelles doivent-être ses qualités ? Il faut qu'il soit fidèle, c'est-à-dire qu'il donne la valeur vraie avec un faible écart-type.

- Pourquoi un oscillateur peut ne pas démarrer même si on respecte la condition AB=1 en BO et qu'on ferme la boucle ? On a supposé, pour l'oscillateur à pont de Wien, que le produit AB ne variait pas lorsque l'on bouclait le système. Cela va dépendre des impédances : pour l'oscillateur à pont de Wien, l'impédance d'entrée est très grande alors que ce n'est pas le cas pour l'oscillateur Colpitts pour lequel on ne pourra pas appliquer la condition AB=1 pour faire démarrer les oscillations.
- Á quoi cela sert-il de boucler un système en une phrase ? On ajoute une boucle de rétroaction B afin de contrôler A et atteindre certains objectifs.
- Lorsque l'on applique un couple résistant sur le moteur, on modifie A mais cela ne change pas le comportement du système bouclé car il est commandé par B.
- Il faut insister suR_2 mots-clés : asservissement (linéaire) et oscillateur (non linéaire).
- Pourquoi utiliser la transformée de Laplace et pas la transformée de Fourier ? La transformée de Laplace permet de traiter les régimes transitoires alors que la transformée de Fourier ne peut être employée que pour les régimes permanents.
- Quelles hypothèses sont nécessaires sur l'amplificateur opérationnel ? Bien préciser que l'on se place en régime linéaire ou en saturation, et que l'AO est supposé idéal.
- Comment se nomment les différents montages ? Précisez : amplificateur non-inverseur, filtre passe-bande, diviseur de tension, etc.
- Qu'est-ce que la bande passante d'un amplificateur non-inverseur ? Il s'agit d'un passe-bas, toutes les fréquences inférieures à la fréquence de coupure !0 passent. La bande passante est donc simplement !0.
- Pourquoi y a-t-il un dépassement de consigne avec le moteur asservi en position ? Les systèmes asservis du premier ordre n'ont, en théorie, pas de dépassement de consigne, mais ce n'est pas le cas des systèmes du second ordre comme le moteur asservi. Pour avoir l'ordre du système, il faut regarder la chaîne directe dans son intégralité. En l'occurrence, il s'agit d'une succession de modules d'ordre 1, la chaîne globale est au moins d'ordre 2.
- Est-ce que pour le pont de Wien, on a obligatoirement les mêmes résistances et condensateurs ? Donnez l'équation différentielle associée à une notation de Laplace. Est-ce que pour la notation de Laplace revient juste à remplacer $j\omega$ par p ? Qu'est-ce que le facteur de qualité ? Connaissez-vous des oscillateurs avec un meilleur facteur de qualité ? Quand la fonction de transfert est plus grande que 1 pour toute une bande pourquoi on ne voit pas toutes les fréquences apparaître ? Comment sont créées les oscillations quand on boucle le système ?
- Dans vos différents exemples, c'est des rétroactions positives ou négatives ?
- Dans l'oscillateur à pont de Wien, la condition de Barkhausen sur la phase c'est quoi ? Pourquoi vous ne l'avez pas dit alors ? Parce que la condition sur le gain est suffisant quand on regarde le diagramme de Nyquist, alors que la condition sur la phase n'est utile que dans le cadre très restreint de Barkhausen.
- Quand on boucle l'ampli non inverseur, on change le type de circuit ? Vous avez dit que c'était une "réponse type RC ", c'est-à-dire ? Il n'y a pas un truc qui est conservé quand on passe de l'AO à l'ampli non inverseur ?
- Là un élève demanderait, pourquoi vous dites Re > 0 alors que sur le diagramme de Nyquist c'est Re < - 1 ?
- Comment on pourrait modéliser les pertes par les miroirs dans votre schéma à rétroaction positive ? On met un bloc en sortie de perte constante.
- Vous pouvez réexpliquer ce qui se passe quand vous prenez une résistance R_2 très grande ? Il se passerait quoi si on augmentait le R des miroirs ? La forme des pics s'appellerait comment ? C'est quoi l'équivalent pour le pont de Wien ? Finesse et facteur de qualité.
- Exemple de système asservi pour éviter les fluctuations thermiques ? Piezoélectriques, Le corps humain, une thermistance + pont de Wheastone ? ?
- Pourquoi être passé de p à $j\omega$ en cours de leçon ?
- Vous parlez de quel laser dans votre exemple ? Il est fait de quoi le milieu amplificateur dans un He-Ne ? Comment on fait le pompage ?
- C'est quoi la condition sur le nombre de niveaux pour qu'il y ait amplification ? Autres conditions à respecter ? Gain supérieur aux pertes.

- On cherche toujours à avoir des lasers monomodes ? En pratique c'est des lasers monomodes qu'on a ? C'est des modes transverses ou longitudinaux ?
- Dans l'oscillateur de Wien, c'est quoi l'équivalent du pompage ? Vous dites que si la croissance des oscillations s'arrête, c'est à cause de la saturation de l'AO, mais là c'est plutôt 4.5V que 15V, pourquoi ? Saturation en courant/vitesse de balayage.
- Comment stabiliser un oscillateur à pont de Wien avec une ampoule à incandescence ?

Commentaires