

LP 22 : Rétroaction et oscillations

Rapport jury: Dans le cas des oscillateurs auto-entretenus, les conditions d'apparition des oscillations et la limitation de leur amplitude doivent être discutées. Le jury souhaiterait que le terme de résonance soit dûment justifié sans oublier une discussion du facteur de qualité. Il n'est pas indispensable de se restreindre à l'électronique. Le jury n'attend pas une présentation générale et abstraite de la notion de système bouclé. Il estime indispensable de s'appuyer sur au moins un exemple concret et détaillé avec soin. L'étude est clarifiée si elle s'appuie dès le départ sur un exemple concret. Les notions de système linéaire et de fonction de transfert doivent être précisément définies. Il y a souvent confusion entre système bouclé et contre-réaction. La stabilité des systèmes bouclés est mal comprise. Le bouclage ne se limite pas uniquement à une fonction d'asservissement. Le lien entre les réponses temporelle et fréquentielle est un aspect important. L'intérêt du bouclage ne doit pas apparaître uniquement comme une fonction d'asservissement assurant la stabilité d'un système. Notamment, un oscillateur auto-entretenu constitue un exemple de système électronique bouclé. Le jury souhaite voir un exposé de niveau raisonnable mettant en évidence les effets du bouclage ainsi que l'existence de problèmes de stabilité. Cette leçon doit comporter des illustrations expérimentales. Les aspects formels de la leçon doivent rapidement céder le pas, au cours de l'exposé, à des exemples concrets. Les candidats doivent faire l'effort d'explicitier sur ceux-ci ce à quoi correspondent les signaux d'entrée et de sortie, le signal de rétroaction, le signal différentiel. Il est insuffisant de se cantonner à la présentation de montages amplificateurs à amplificateurs opérationnels. Il faut en particulier dégager les changements qualitatifs que peut introduire le bouclage, notamment l'apparition d'oscillations ou la stabilisation d'une chaîne directe instable.

Niveau : CPGE (PSI)

Pré-requis:

-Electrocinétique

-ALI

-Filtres linéaires (diagrammes de Bode, fonctions de transfert)

-Notation en transformée de Laplace

Bibliographie:

[1] Cours de Jérémy Neveu – Electronique (Montrouge)

<https://gitlab.in2p3.fr/Jeremy/Electronique/-/blob/master/Cours/electronique.pdf>

[2] Dunod, Physique tout-en-un, PSI-PSI*, Sanz et al

[3] Poly MP27 – Systèmes bouclés

Extracteur de Soxhlet : https://fr.wikipedia.org/wiki/Extracteur_de_Soxhlet Laser : Dunod, Physique tout-en-un, PC-PC*, Sanz et al.

https://uhincelin.pagesperso-orange.fr/LP22_Retroaction_et_oscillations.pdf

<https://martinbourhis.monsite-orange.fr/file/26a7d19640e6be9f7d10187c7657c60a.pdf>

<https://martinbourhis.monsite-orange.fr/file/88b06ce4faf585182abcd094c468894e.pdf>

https://www.eleves.ens.fr/home/hroussil/Plans/plans_lecon_physique.pdf

Introduction :

Rétroaction : on réinjecte le signal de sortie vers l'entrée. On a alors un système bouclé.

Notion présente dans plusieurs domaines : biologie (régulation de la température du corps), acoustique (effet Larsen), électronique (montage comportant des ALI)

Il faut distinguer 2 grandes familles de systèmes bouclés :

- Les systèmes asservis : on réalise une boucle de rétroaction afin que la sortie suive la commande imposée
- Les systèmes oscillants : on met en place une boucle afin de rendre le système instable et le faire osciller

I- Rétroaction et systèmes bouclés

1) Nécessité d'une rétroaction

Exemple d'une perceuse: **DIAPO 5**

Fonctionnement : on peut la modéliser tension de commande + alimentation + amplificateur + moteur pour faire tourner l'outil avec une certaine vitesse de rotation. Mais si le couple résistant sur l'outil varie, on a aucun moyen de contrôler la variation de la vitesse de rotation, lors que le couple se trouve face au mur, il va tourner moins vite (plus de résistance) que dans le vide, et donc cela serait difficile de percer le mur!

Diapo 6

Comment contrôler la vitesse angulaire ? → boucle de rétroaction (avec signal de retour)
On utilise une dynamo tachymétrique : capteur pour la vitesse de rotation, et une tension de retour pour contrer le couple résistant.

DIAPO 7 et 8

Généralisation : schéma fonctionnel d'un système bouclé (= schéma bloc)

- Chaîne directe : fonction de transfert $\underline{A}(p)$ contenant un actionneur
- Chaîne de retour : $\underline{B}(p)$ pouvant contenir un capteur
- un Comparateur (du signal de sortie et du signal d'entrée)

2) Comportement d'un système bouclé

DIAPO 10

Fonction de transfert en boucle fermée (FTBF): $H_{FTBF} = S/E = A/(1+A.B)$

Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) : $H_{FTBO} = R/E = AB$ (si ça fait plus une boucle)

→ Attention aux signes (précisés au niveau du comparateur, ici on a un soustracteur)

L'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) est un exemple de système bouclé en électronique : **en fonctionnement linéaire, il faut une boucle entre la sortie et la borne inverseuse de l'ALI.**

Exemple: ALI non inverseur **DIAPO 11 12 13 14 15 17**

→ Chaîne directe (ALI=filtre basse pas) et chaîne de retour

Approx : $A_0 \gg 1$, $R_2 \ll A_0 R_1$

Quelle est la fonction de transfert de ce montage?

→ Calcul de la fonction de transfert DIAPO 18

→ Tracé du diagramme de Bode , discussion du gain statique H_0 DIAPO 19

Remarques: DIAPO 20

- Le gain H_0 et le temps caractéristique τ_{BF} dépendent de R_1 et R_2 : on peut jouer sur les caractéristiques du système
- Plus τ_{BF} est grand, plus le système est lent (et la bande passante est faible) : un système est d'autant plus rapide que sa bande passante est large.
- Conservation du produit gain-bande passante : $H_0 \times 1/\tau_{BF} = A_0 \times 1/\tau$

Compromis entre valeur de gain et largeur de bande passante / rapidité.

3) Stabilité d'un système bouclé

DIAPO 22

Définition de la stabilité : Un système linéaire est stable, si et seulement si, pour une entrée bornée, la sortie reste bornée. Attention, on n'observe jamais une divergence infini mais plutôt une saturation!

- Critère de stabilité pour les systèmes d'ordre 1 ou 2 : Un système d'ordre 1 ou 2 est stable, si et seulement si, **tous les coefficients du dénominateur de la fonction de transfert sont de même signe.**

Reprenons l'exemple du montage amplificateur non inverseur : système stable

$$H_{FTBF} = H_0/(1 + \tau_{BF}p)$$

Exemple: DIAPO 23 Montage comparateur à hystérésis (on a inverser juste les branchements de l'ALI précédent)

→ Forme de la fonction de transfert,

DIAPO 24 :

On observe une en sortie de l'oscillo une boucle d'hystérésis.

Animation :

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/physique/02/electro/schmitt.html>

Signal d'entrée sinusoïdale, mais en sortie, on a plus un fonctionnement linéaire, mais on observe une saturation → donc le montage est instable, le système n'est plus dans son domaine de linéarité.

II- Oscillations dans un système bouclé instable

Mais ces saturations ne sont pas toujours considérés comme néfaste!

1) Oscillateur à pont de Wien

DIAPO 27 28 29

Montage: association d'un amplificateur (de fonction de transfert A) et d'un passe-bande (fonction de transfert B).

-Structure de l'oscillateur: **DIAPO 30**

Dans un système auto-oscillant, il n'y a pas de source à l'entrée de la boucle. Le signal est engendré par le système lui-même.

2 types d'oscillateurs:

- à relaxation (périodique mais non sinusoïdale, exemple du comparateur à hystérésis)
- quasi-sinusoïdaux

On va se restreindre au cas quasi-sinusoïdaux.

2) Condition d'auto-oscillation

Dans quelles conditions a-t-on nos oscillations? on veut avoir un signal de sortie sinusoïdal avec un signal d'entrée nul.

$H_{FTBF} = s/e = A/1-AB$, elle diverge car $e=0$ donc il faut respecter la règle de Barkhausen.

Conditions de Barkhausen :

Pour qu'un système bouclé soit auto-oscillant, il doit exister une pulsation ω_0 telle que :

$$1 - AB = 0$$

Donc le module de la FTBO doit être égal à 1 ($||A.B||=1$) et sa phase nulle à ω_0 (modulo 2π)

$$\varphi_{AB} = \varphi_A + \varphi_B = 0.$$

DIAPO 33 Pour oscillateur à pont de Wien : on doit avoir $R_2 = 2R_1$ car le gain vaut 1 et $\omega = \omega_0$

On observe des oscillations à la pulsation caractéristique du passe-bande lorsque la condition d'oscillation est assurée.

programme Python

3) Caractérisation des oscillations

Il ne suffit pas d'avoir $R_2=2.R_1$, égalité qui peut être compliqué expérimentalement.

Avant la mise sous tension de l'ali on a une tension nulle sur tous les point du circuit, après la mise sous tension, si le montage était stable il resterait à tension nulle, il faut donc que le montage soit instable pour osciller.

Si on prend fonction de transfert et le critère de stabilité donc la condition de démarrage des oscillations est : $R_2 \geq 2R_1$

programme Python : comportement quand on dépasse la condition d'oscillations : $R_2 = 2,1R_1$, On remarque qu'il y a saturation de l'ALI → écrêtage des oscillations.

Si j'augmente le rapport entre R_1 et R_2 , l'écrêtage est de plus en plus important. On remarque que le signal de retour est de moins en moins sinusoïdal car la saturation génère des harmoniques, ces harmoniques vont être filtrer par le passe bande autour de ω_0 ,

lorsqu'il y a peu d'harmoniques, le filtrage permet d'avoir un signal de retour quasi-sinusoïdale, si il y a trop d'harmonique le passe bande a du mal à faire son travail.
→ Plus on s'éloigne de la conditions d'oscillations, moins les oscillations sont harmoniques.

programme Python : Si on observe le signal du temps initial à un certain temps, on observe la croissance des oscillations.

→ Amplitude des oscillations : croissance exponentielle jusqu'à saturation de l'ALI

Conclusion :

Dans cette leçon, on a étudié

- les systèmes bouclés et leur stabilité
- comment celle-ci est exploitée pour faire des oscillateurs

A travers des exemples en électronique mais il en existe d'autres :

- oscillateur à Quartz (facteur de qualité très important → meilleure stabilité en fréquence)
- oscillateurs à relaxation pour des générations de signaux

Il existe aussi des oscillateurs non-électroniques :

- le laser
- en chimie, l'extracteur de Soxhlet
- le vase de Tantale

Remarques :

Important de parler de la phase !!

+ Insister sur l'importance d'une rétroaction

Attention au fait que le comparateur à hystérésis ne soit pas vraiment un oscillateur

Questions :

-Savoir expliquer à un étudiant, quel est le problème d'un système non bouclé, un exemple de système non bouclé qui poserait problème dans la vie de tous les jours ?

Le chauffage : si on chauffait toujours pareil sans s'occuper de la température extérieur, on aurait soit trop froid soit trop chaud. On peut aussi parler d'un conducteur de voiture : il asservi la force avec laquelle il appuie sur l'accélérateur pour réguler sa vitesse et respecter les vitesses légales... Un système non asservi serait ici une brique posée sur l'accélérateur.

-Tu parles des perceuse, pour une avec gâchette, on peut réguler nous même la vitesse de rotation en appuyant plus ou moins fort, comment ca se passe ? Il y a un capteur de position pour la gâchette, qui convertit la position en un signal électrique, et la vitesse de rotation est reliée (peut être même proportionnelle) à cette tension.

-Diapo 16 : Pourquoi on a un passe bas d'ordre 1 avec l'ampli op ?

L'ampli OP est composé de transistors, dans lequel on a des zones de déplétion (PN) : toute variation trop rapide du signal entraîne une variation de ces zones, et si la variation est trop rapide alors ça ne suit pas. Le fait que ce soit d'ordre 1 est une approximation, en réalité les AOP ont plusieurs fréquences de coupures

-Qu'est-ce qu'il y'a à l'intérieur d'un ALI ?

Transistor, jonctions PN (silicium dopé N et P), zone de déplétion

ALI = sert à amplifier les signaux fortement

-Savoir les approximations d'un ALI idéal

-Autres critères de qualité d'un facteur d'asservissement ?

La rapidité : On veut réduire le temps pour parcourir le régime transitoire (liée au temps caractéristique, donc à la bande passante)

La précision : Sortie qui finit par être très proche de l'entrée au bout d'un certain temps (souvent il y'a des erreurs statiques, dynamiques)

-Comment être + rapide et + précis ?

Amplifier le signal d'erreur, la chaîne directe va plus réagir

Mais on dégrade la stabilité du système donc compromis à faire ...

-Le produit gain \times BP = cst est il toujours vrai ? Ca reste vrai dans les grandes lignes, mais ça n'est strictement le cas que pour les ordres 1.

-Diapo 23 : comparateur à hystérésis, est ce vraiment un oscillateur ? Non, pas vraiment, car l'entrée est non nulle (??)-Animation comparateur à hystérésis : est ce que c'est vraiment un oscillateur à relaxation ?

En fait, c'est peu un oscillateur

on n'impose pas d'entrée !

-Qu'est ce qui fixe la période dans un oscillateur à relaxation ? L'évolution entre 2 états de saturation.

-Notion de système instable en mécanique ? La encore ma co a laché mais je parlerais d'un pendulum mis "verticalement vers le haut" : il est en équilibre mais la moindre petite variation le fait chuter.

-D32 : Dans le critère de Barkhausen ,on a un modulo 2π pour la phase en toute rigueur.

-Expliquer le critère de stabilité.

-Un système instable est-il toujours un oscillateur ? Sinon, sous quelle(s) condition(s) l'est-il?

-Quelle est la caractéristique principale des systèmes bouclés ? Produit gain * bande passante = cste (j'ai donné l'exemple simple de l'ampli non inverseur).

- Système bouclé dans une montre à quartz ? Qu'est-ce qui limite l'amplitude des oscillations dans l'oscillateur à pont de Wien ? Effets non linéaires. D'où viennent les non linéarités ? L'AO (transistors de l'AO). Que se passe-t-il si on modifie la valeur de la résistance variable dans l'oscillateur à pont de Wien ? Déformation du signal, on s'éloigne des oscillations quasi sinusoïdales. Qu'est-ce qui caractérise un oscillateur ? Son facteur de qualité. Que vaut-il pour l'oscillateur à pont de Wien ? (1/3). Un système linéaire continu et stationnaire n'est qu'une modélisation, les systèmes réels ne satisfont pas rigoureusement tous ces critères. Ils m'ont également demandé de

préciser les critères de stabilité, pourquoi il est nécessaire de prendre des marges en pratique

et l'intérêt de Nyquist (prévision du comportement en boucle fermée à partir de l'étude en boucle ouverte). Définition de la transmittance en boucle ouverte : plutôt utiliser grandeur de sortie sur grandeur d'entrée que grandeur de sortie sur grandeur de différence. Au niveau des expériences, j'ai présenté uniquement l'oscillateur à pont de Wien, je n'ai pas sorti de moteur.