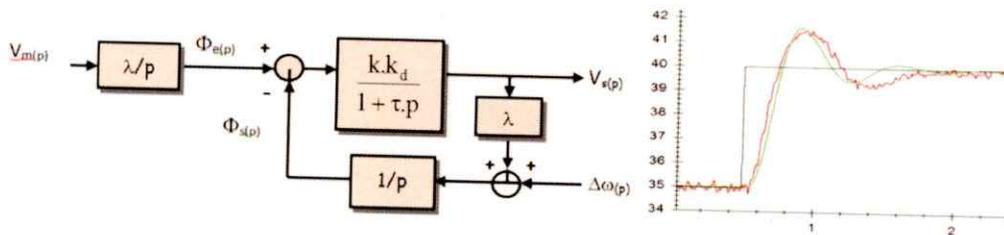


Thierry Hans - Pierre Guyénot

# Automatique : régulations et asservissements



Cours - Applications - Expérimentations - Prototypages

# Table des matières

## Partie 1 – Éléments de cours

### Chapitre 1 Introduction

1. Généralités	3
2. Classifications	4
3. Caractérisation du comportement	6
3.1. Notations usuelles.....	6
3.2. Régime statique .....	6
3.3. Régime dynamique – Réponse à une commande en échelon constant.....	7
3.4. Régime dynamique – Réponse à une commande en rampe.....	9
3.5. Régime dynamique – Réponse à une commande en profil imposé .....	10
3.6. Régime dynamique – Réponse à une commande sinusoïdale .....	11
4. Méthodologie et outils	12

### Chapitre 2 Transformation de Laplace

1. Définition	15
2. Propriétés	16
2.1. Unicité .....	16
2.2. Linéarité.....	16

<b>3. Théorèmes fondamentaux</b>	17
3.1. Théorèmes sur les limites	17
3.2. Théorème sur la dérivation	17
3.3. Théorème sur l'intégration	17
3.4. Théorème sur le retard pur	18
<b>4. Exercices d'application</b>	19
4.1. Exercice 2-1 : Transformée de Laplace d'un échelon constant puis d'un échelon de vitesse (rampé)	19
4.2. Exercice 2-2 : Transformée de Laplace de la fonction exponentielle	19
4.3. Exercice 2-3 : Transformée inverse par décomposition	20

## Chapitre 3

### Fonctions de transfert et schéma-blocs

<b>1. Définitions</b>	23
1.1. Cas d'un système monovarié	23
1.2. Coefficient de transfert statique	24
1.3. Application à l'étude d'un régime transitoire	24
1.4. Chaîne de transfert	25
1.5. Cas d'un système multivarié	25
<b>2. Fonction de transfert en boucle fermée</b>	26
<b>3. Représentations « à retour unitaire »</b>	27
3.1. Avec les unités de E, M et $\epsilon$	27
3.2. Avec les unités de S	27
<b>4. Influence du bouclage</b>	28
<b>5. Système perturbé</b>	28
<b>6. Exercices d'application</b>	29
6.1. Exercice 3-1 : Commande en couple d'un mécanisme J,f	29

6.2. Exercice 3-2 : Commande en vitesse d'un mécanisme J,f	31
6.3. Exercice 3-3 : Régulation de vitesse d'un mécanisme J,f	33

## Chapitre 4

### Généralités sur les régimes dynamiques

<b>1. Introduction</b>	35
<b>2. Prise en compte des conditions initiales</b>	36
<b>3. Études de régimes transitoires typiques</b>	36
3.1. Commande en échelon constant	36
3.2. Commande en échelon de vitesse (ou rampe)	37
3.3. Commande en rampe limitée	37
3.4. Influence d'un bouclage à retour unitaire	38
<b>4. Régime dynamique établi : régime harmonique</b>	38
4.1. Hypothèses, notations et relations entre les grandeurs	38
4.2. Lieux de transfert	39
4.3. Influence d'un bouclage à retour unitaire	40
<b>5. Exercice 4 : Régimes transitoires sur mécanisme J,f</b>	41

## Chapitre 5

### Systèmes du premier ordre

<b>1. Définitions</b>	45
<b>2. Fonction de transfert en boucle fermée à retour unitaire</b>	46
<b>3. Comportement en régime statique</b>	46

<b>4. Réponse à une entrée en échelon constant</b>	47
4.1. Étude générale .....	47
4.2. Application aux systèmes asservis .....	48
<b>5. Réponse à une entrée en rampe</b>	49
<b>6. Réponse à une entrée sinusoïdale</b>	49
6.1. Étude générale .....	49
6.2. Application aux systèmes asservis – Lieux de transfert .....	51
<b>7. Exercices d'application</b>	53
7.1. Exercice 5-1 : identification expérimentale d'un servo-mécanisme .....	53
7.2. Exercice 5-2 : régulation de la température d'un four .....	58

## Chapitre 6

### Systèmes du deuxième ordre

<b>1. Définitions</b>	63
<b>2. Fonction de transfert en boucle fermée à retour unitaire</b>	64
<b>3. Comportement en régime statique</b>	65
<b>4. Réponse à une entrée en échelon constant</b>	65
4.1. Étude générale .....	65
4.2. Application aux systèmes asservis .....	70
4.3. Utilisation d'abaques .....	71
<b>5. Réponse à une entrée en rampe</b>	73
<b>6. Réponse à une entrée sinusoïdale</b>	73
6.1. Étude générale .....	74
6.2. Application aux systèmes asservis – Lieux de transfert .....	76
<b>7. Exercice 6 : régulation en température d'un local</b>	79

## Chapitre 7

### Systèmes du premier ordre avec intégration

<b>1. Définitions</b>	83
<b>2. Fonction de transfert en boucle fermée à retour unitaire</b>	84
<b>3. Comportement en régime statique</b>	84
<b>4. Réponse à une entrée en échelon constant</b>	85
4.1. Étude en boucle ouverte .....	85
4.2. Étude en boucle fermée .....	85
<b>5. Réponse à une entrée sinusoïdale</b>	86
<b>6. Exercice 7 : asservissement en position 1</b>	89

## Chapitre 8

### Lieux d'Evans et régimes dominants

<b>1. Définitions et généralités</b>	93
<b>2. Lieux d'Evans</b>	94
2.1. Règles pour tracer les lieux d'Evans .....	94
2.2. Exploitation des lieux d'Evans .....	96
<b>3. Régimes dominants</b>	98
3.1. Introduction .....	98
3.2. Études de cas .....	99
<b>4. Exercice 8 : asservissement en position 2</b>	101

## Chapitre 9

## Précision d'un SALC

1. Expressions générales	105
2. Précision statique	106
2.1. Valeur finale de l'écart en fonction de la FTBO	106
2.2. Valeur finale de l'écart en fonction de la FTBF	107
3. Précision en rampe (ou en vitesse)	107
3.1. Valeur finale de l'écart en fonction de la FTBO	107
3.2. Valeur finale de l'écart en fonction de la FTBF	108
4. Récapitulatif : tableau de précision	109
5. Précision des systèmes perturbés	109
5.1. Expressions générales	109
5.2. Précision statique	110
6. Exercice 9 : précision de positionnement d'une charge pesante	110

## Chapitre 10

## Stabilité d'un SALC

1. Étude à partir de la FTBO	116
1.1. Expressions générales	116
1.2. Critères de stabilité absolue	117
1.3. Critères de stabilité relative ou « degré de stabilité »	119
2. Étude à partir de la FTBF	121
2.1. Critère algébrique de stabilité	121
2.2. Critère graphique de stabilité	122

## 3. Exercices d'application

3.1. Exercice 10-1 : stabilité système du 1 <sup>er</sup> ordre avec intégration	122
3.2. Exercice 10-2 : stabilité d'un système du 2 <sup>e</sup> ordre avec intégration	125

## Chapitre 11

## Correction proportionnelle intégrale dérivée (PID)

1. Expressions générales	129
2. Influence sur le comportement en BF d'un correcteur P (proportionnel)	130
3. Comportement et influence d'un correcteur I (intégral)	132
3.1. Étude du comportement du correcteur seul	132
3.2. Comparaison des comportements en BF	133
4. Comportement et influence d'un correcteur PI	134
4.1. Étude du comportement du correcteur seul	134
4.2. Comparaison des comportements en BF	135
4.3. Choix de la constante d'intégration $T_I$ et du coefficient $k$	136
5. Comportement et influence d'un correcteur D (dérivée)	138
5.1. Étude du comportement du correcteur seul	138
5.2. Limitation des effets néfastes de l'action dérivée	139
6. Comportement et influence d'un correcteur PD	141
6.1. Étude du comportement du correcteur seul	141
6.2. Comparaison des comportements en BF	142
6.3. Choix de la constante de temps de dérivation ( $T_d$ ) et du coefficient $k$	144
7. Comportement et influence d'un correcteur PID	144
7.1. Étude du comportement du correcteur seul	145
7.2. Comparaison du comportement en BF suivant le type de correcteur	146

7.3. Choix des constantes de temps $T_p$ , $T_d$ et du coefficient $k$ .....	147
8. Exercice 11 : correction P, I, PI, PD d'un servo-mécanisme .....	147

## Chapitre 12

### Autres méthodes de correction des SALC

1. Correction par placement des pôles de la FTBF .....	159
2. Correction cascade .....	160
2.1. Principe .....	160
2.2. Exemples.....	161
3. Correction par retour d'état .....	161
3.1. Principe .....	161
3.2. Généralités sur le formalisme d'état.....	162
3.3. Formalisme d'état en boucle fermée.....	165
3.4. Correction par retour d'état d'un système monovariable.....	165
4. Correction par contrôleur flou .....	166
4.1. Structure .....	166
4.2. Principe du contrôleur à logique floue (CLF).....	167
5. Exercice 12 : retour tachymétrique ou retour d'état .....	173

## Chapitre 13

### Réalisations pratiques de correcteurs

1. Structure de correcteurs PID dans le domaine « continu » .....	177
2. Synthèse de correcteurs dans le domaine « discret » .....	179
2.1. Principes .....	179

2.2. Études de cas .....	180
2.3. Imperfections pratiques.....	185

3. Techniques d'interfaces avec le processus .....	187
--	-----

3.1. Interfaces dans le domaine « continu » .....	187
3.2. Interface dans le domaine « discontinu » .....	187

4. Exercice 13 : régulateur numérique à « trains d'ondes » .....	188
--	-----

## Chapitre 14

### Asservissements de phase

1. Généralités .....	193
2. Fonctions de transfert et schéma-blocs .....	194
2.1. Discriminateur de phase .....	194
2.2. Filtre passe-bas.....	195
2.3. Correcteur de boucle .....	196
2.4. V.C.O. ....	196
2.5. Schéma-blocs.....	197
3. Exercice 14 : démodulateur FM .....	197

## Chapitre 15

### Systèmes à retard pur ou « à temps mort »

1. Comportement et modélisation en BO .....	203
1.1. Définition et FT d'un retard pur .....	203
1.2. Comportement d'un retard pur en régime harmonique .....	204
1.3. Modélisation de « Strejc » .....	204
1.4. Modélisation de « Brodia » .....	205
2. Comportement et modélisation en BF .....	206
2.1. Correction proportionnelle .....	206

3.1. Correction avec compensation du temps mort	208
3.1. Structure de principe	209
3.2. Application au modèle de Broïda avec correcteur PI	210
4. Exercices d'application	210
4.1. Exercice 15-1 : asservissement de courant dans un inducteur	210
4.2. Exercice 15-2 : Étude d'une régulation de niveau d'eau	216

### Chapitre 16

#### Synthèse par prototypage rapide

1. Méthodologie et outils	224
2. Exercice 16 : prototypage d'une régulation de débit d'air	226

## Partie 2 – Problèmes de synthèse

Chapitre 17	
Asservissements sur poste de découpe	237

Chapitre 18	
Régulation de température de recuit	251

Chapitre 19	
Étude d'un capteur de vitesse	259

## Chapitre 20

### Étude d'asservissements pour « folder »

1. Asservissement en vitesse du moteur tracteur	271
2. Asservissement en position de la balancelle	281

Annexes	289
---------	-----

Glossaire	297
-----------	-----

Index	301
-------	-----

Dans le domaine industriel, réguler une grandeur physique ou asservir la sortie d'un processus à une de ses entrées impose de faire appel à des boucles de rétroaction.

La conception, l'expérimentation, la mise au point et l'exploitation de ces systèmes « bouclés » nécessitent de sérieuses connaissances théoriques et pratiques.

Pour faciliter la compréhension de ces systèmes, cet ouvrage procède en deux temps :

- une première partie rappelle les notions théoriques indispensables illustrées par de nombreux exercices corrigés ;
- une seconde partie aborde l'étude de problèmes de synthèse à caractère industriel.

L'originalité de cet ouvrage est d'ajouter aux notions classiques propres à ces domaines l'étude expérimentale et la modélisation des processus par l'utilisation de logiciels permettant d'expérimenter puis de simuler leurs comportements afin de les améliorer avec souplesse, rapidité et économie.

Pratique, didactique et synthétique, ce livre s'adresse aux enseignants et aux étudiants concernés par l'étude des régulations ou asservissements, mais également aux techniciens et ingénieurs exerçant au sein de bureaux d'études ou de services de maintenance, à la recherche de réponses à leurs problèmes concrets.

**Thierry Hans** *est ingénieur en électronique et en automatique et professeur agrégé de génie électrique.*

**Pierre Guyénot** *est professeur ENSAM (Arts et Métiers) en mécanique générale et en mécanique appliquée.*

