

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	V
------------------------	---

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPE ET TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES ASSERVIS

CHAPITRE PREMIER. — Des automatismes à séquences aux systèmes asservis.

1-1 Introduction. Propriétés générales des automatismes	3
1-2 Automatismes en chaîne ouverte	4
1-3 Automatismes à boucle fermée	6
1-4 Systèmes asservis	7
1-5 Transition entre système asservi et automate séquentiel	12
1-6 Systèmes asservis à commande numérique	13

CHAPITRE II. — Notion de système asservi.

2-1 1 ^{er} exemple : potentiomètre enregistreur	15
2-2 2 ^e exemple : amplificateur hydraulique	20
2-3 3 ^e exemple : régulateur de vitesse	21
2-4 Autres exemples d'application du principe d'inversion	23
2-5 Exemples de systèmes à action directe	25
2-6 Remarques qualitatives sur la stabilité	27
2-7 Définition générale des systèmes asservis ou à régulation	31
2-8 Régulateurs en cascade et boucles secondaires	36
2-9 Emploi de chaînes d'action directe	38
2-9-1 Chaînes directes de compensation	38
2-9-2 Chaîne d'action directe avec asservissement	39
2-9-3 Compensation avec asservissement de la grandeur réglante à la perturbation	41
2-9-4 Programme en chaîne ouverte	42
2-9-5 Application de la compensation aux boucles couplées	42
2-9-6 Asservissement à un modèle	44

CHAPITRE III. — Transmission des informations, systèmes de modulation.

3-1 Généralités	46
3-2 Système à action par plus ou moins	46
3-3 Système à courant continu	47
3-4 Modulation d'amplitude	47
3-5 Systèmes mixtes	48
3-6 Modulateurs et démodulateurs à découpeurs	50
3-6-1 Découpeur à vibreur	50
3-6-2 Découpeur à diodes	53
3-7 Modulation de phase	55
3-8 Modulation de fréquence	55
3-9 Modulation d'impulsions	55
3-10 Linéarisation par balayage des systèmes non-linéaires	56
3-10-1 Principe	56
3-10-2 Système non-linéaire à symétrie impaire	58
3-10-3 Système à symétrie paire	60
3-10-4 La méthode de balayage dans la régulation extrême	62
3-11 Application à un système asservi bidimensionnel	63

CHAPITRE IV. — *Les étages de puissance des systèmes asservis.*

4-1	Les divers étages de puissance actuellement disponibles	66
4-1-1	Moteurs électriques à courant continu	66
4-1-1-1	Moteur à tension d'induit constante commandé par le courant inducteur	66
4-1-1-2	Moteur à courant d'induit constant commandé par le courant inducteur	66
4-1-1-3	Moteur à excitation constante commandé par le courant d'induit	67
4-1-1-4	Moteur série à double inducteur	69
4-1-2	Moteurs électriques à courant alternatif	69
4-1-3	Embrayages électromagnétiques	69
4-1-4	Variateurs mécaniques	70
4-1-5	Dispositifs de puissance hydrauliques	71
4-1-6	Dispositifs de puissance pneumatiques	71
4-2	Remarques sur l'emploi des divers étages de puissance	73
4-2-1	Exemples d'emploi de vérin hydraulique	73
4-2-2	Exemples d'emploi des variateurs électroniques	75
4-2-3	Remarques sur les applications industrielles de l'électronique	76
4-2-4	Remarques sur la comparaison des étages de puissance électriques et hydrauliques	79

CHAPITRE V. — *Méthodes de positionnement et commande numérique.*

5-1	Introduction	81
5-2	Conduite directe et indirecte, mouvement pilote	83
5-2-1	Conduite directe ou indirecte	83
5-2-2	Mouvement pilote	83
5-3	Les méthodes de positionnement	85
5-3-1	Emploi de cames	86
5-3-2	Copieurs	86
5-3-3	Butées et programme	87
5-3-3-1	Programme implicite	87
5-3-3-2	Programme explicite	87
5-3-4	Commandes numériques	89
5-3-4-1	Positionnement discontinu	89
5-3-4-2	Mesure numérique	91
5-3-4-3	Mesure analogique et conversion numérique-analogique	93
5-3-4-4	Systèmes à origines multiples	95
5-3-4-5	Déplacements multiples coordonnés	98
5-3-4-6	Fonctionnement semi-automatique	99
5-4	Réflexions sur la commande numérique	99
5-4-1	Point de vue de la machine	99
5-4-2	Avantage de la commande numérique	101

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE TEMPORELLE DES SYSTÈMES ASSERVIS LINÉAIRES

CHAPITRE VI. — *La transmittance et les schémas fonctionnels.*

6-1	Propriétés fondamentales des systèmes linéaires	105
6-2	La notion de transmittance	106
6-3	Exemples de schémas fonctionnels de systèmes linéaires	108
6-3-1	Dipôle électrique	108
6-3-2	Inertie et frottement	108
6-3-3	Moteur à courant continu commandé par le courant d'induit	109

TABLE DES MATIÈRES

IX

6-4	Formule générale de la transmittance d'une boucle	111
6-5	Applications de la formule fondamentale	112
6-5-1	Moteur à courant continu	112
6-5-2	Réducteur mécanique	113
6-5-3	Asservissement de position	114
6-6	Transformation des schémas fonctionnels	115
6-7	Schéma fonctionnel développé; variables d'état	117
6-8	Linéarisation d'un système non-linéaire	119
6-8-1	Linéarisation mathématique	119
6-8-1-1	Système à une capacité	119
6-8-1-2	Système à deux capacités	120
6-8-2	Linéarisation par les caractéristiques	122
6-8-2-1	Système hydraulique	122
6-8-2-2	Moteur électrique non-linéaire	128
6-9	Comportement des transmittances stables en régime établi	129
6-9-1	Cas général	129
6-9-2	Application à l'erreur d'un système asservi	131
6-9-2-1	Erreur en réponse à la grandeur d'entrée	131
6-9-2-2	Erreur en réponse à une perturbation	133
6-9-2-3	Remarques	135
6-9-2-4	Exemples	135
6-10	Transmittance d'un retard de parcours. Application aux systèmes échantillonnés	136

CHAPITRE VII. — Régimes transitoires et calcul symbolique. Stabilité.

7-1	Signaux canoniques	138
7-2	Principe de la méthode de calcul des régimes transitoires	140
7-3	Développement d'une transmittance en éléments canoniques	141
7-4	Table élémentaire de transformées	142
7-5	Exemples	145
7-5-1	Circuit électrique	145
7-5-2	Système asservi du second ordre	147
7-6	Courbes de réponse universelles des systèmes du second ordre	153
7-7	Théorèmes des comportements final et initial	156
7-7-1	Comportement final	156
7-7-2	Comportement initial	157
7-8	Réponse à un signal quelconque	159
7-9	Introduction de conditions initiales non nulles	159
7-9-1	Application à un système du premier ordre	159
7-9-2	Application à une transmittance du second ordre	161
7-10	Stabilité	164
7-10-1	Condition générale de stabilité	164
7-10-2	Critère de Routh	164
7-10-3	Exemples	166

CHAPITRE VIII. — Etude de quelques systèmes asservis en régime transitoire. Modes de régulation.

8-1	Systèmes du premier ordre	168
8-1-1	Commande proportionnelle d'un élément à retard exponentiel	168
8-1-2	Commande proportionnelle d'un intégrateur	169
8-1-3	Commande par intégration d'une transmittance constante	169
8-1-4	Commande par intégration approchée d'une transmittance constante	170
8-2	Systèmes du second ordre	170
8-2-1	Commande proportionnelle d'un système astatique du second ordre	171
8-2-2	Commande par intégration d'un élément à retard exponentiel	172

8-2-3	Correction par dérivation	173
8-2-4	Commande proportionnelle d'une cascade de deux éléments à retard exponentiel	175
8-2-5	Remarque	178
8-3	Système d'ordre supérieur	179
8-4	Récapitulation des divers modes de régulation	182
8-5	Remarques	186
8-5-1	Double intégration	186
8-5-2	Inconvénients des actions dérivatrices	186
8-5-3	Inconvénients de la régulation par intégration d'un processus intégrateur	188
8-6	Le caractère fallacieux de la notion de système entièrement réglable	189
8-7	Emploi de chaînes de réaction	191

CHAPITRE IX. — Réalisation pratique des correcteurs et régulateurs.

9-1	Introduction	194
9-2	Les composants et leurs homologues	194
9-3	Correcteurs passifs	197
9-3-1	Dipôles	197
9-3-2	Applications des dipôles	197
9-3-3	Quadripôles	199
9-3-4	Remarque sur une autre homologie électromécanique	203
9-4	Correcteurs actifs ou à réaction	204
9-4-1	Principe des correcteurs à réaction	204
9-4-2	Régulateurs hydrauliques	207
9-4-3	Régulateurs électriques à moteurs	207
9-4-4	Régulateurs pneumatiques	208
9-4-5	Régulateurs électromécaniques	210
9-4-6	Les régulateurs électroniques	211
9-4-6-1	Amplificateur à courant continu à dérive compensée	211
9-4-6-2	Les amplificateurs opérationnels	213
9-5	Correcteur spécial pour processus avec temps mort	217

CHAPITRE X. — Précision des systèmes asservis linéaires.

10-1	Introduction	219
10-2	Coefficients d'erreur	220
10-3	Erreurs transitoires	222
10-4	Calcul approché de l'erreur en réponse à une sollicitation quelconque	223
10-5	Relations entre les erreurs des divers ordres	226
10-6	Notion de sinusoïde équivalente	227
10-7	Coefficients d'erreur et sinusoïde équivalente	228

CHAPITRE XI. — Critère d'amortissement et calcul des paramètres de régulation.

11-1	Introduction	231
11-2	Polynômes normaux à amortissement réglable	232
11-3	Propriétés des polynômes normaux à amortissement réglable	233
11-3-1	Calcul des coefficients	233
11-3-2	Schéma fonctionnel canonique	234
11-3-3	Propriétés de la réponse indicielle	235
11-4	Tolérances sur les valeurs des rapports caractéristiques	237
11-5	Influence d'un numérateur différent d'une constante	238
11-6	Application à un processus intégrateur	239
11-6-1	Régulation proportionnelle	240
11-6-2	Régulation proportionnelle et par dérivation (PD) (ou correction par avance de phase)	241
11-6-3	Remarques diverses	243
11-6-3-1	Influence de la variation de la grande constante du temps	243

TABLE DES MATIÈRES

XI

	11-6-3-2 Constante de temps supplémentaire	244
	11-6-3-3 Emploi des tolérances pour accroître la précision	244
	11-6-3-4 Notion de système complètement réglable	245
	11-6-3-5 Régulateur ou correcteur PD physiquement réall- sable	245
	11-6-3-6 Choix de la valeur de base de α	246
	11-6-3-7 Apparition de coefficients de régulation négatifs	247
11-6-4	Réponse à un échelon de la perturbation	247
11-6-5	Compensation	248
11-6-6	Régulation proportionnelle et par intégration (PI) (correction par retard de phase)	250
11-6-7	Régulation PID (correction par retard et avance de phase)	252
11-6-8	Tableau récapitulatif et conclusions	252
11-7	Application à un processus non intégrateur	253
11-8	Correcteurs en réaction et régulateurs en cascades	258
	11-8-1 Correction tachymétrique pour un système intégrateur	258
	11-8-2 Correction tachymétrique filtrée	259
	11-8-3 Correction accélero-tachymétrique	261
	11-8-4 Régulateurs en cascade	262
11-9	Efficacité relative des différents modes de régulation	263
11-10	Remarques sur la compensation des pôles de la boucle ouverte	266
11-11	Discussion de l'amortissement dans l'espace des paramètres	267
11-12	Application en présence d'un retard de parcours	272
11-13	Méthode de Strejé pour la détermination de la transmittance des sys- tèmes à réponse apériodique	273
11-14	Conclusion générale	275

TROISIÈME PARTIE

ÉTUDE FRÉQUENTIELLE DES SYSTÈMES ASSERVIS LINÉAIRES

CHAPITRE XII. — *Propriétés des systèmes linéaires en régime permanent harmonique.*

12-1	Transmittance isochrone	279
12-2	Courbes de gain et de phase des transmittances à déphasage minimal	281
	12-2-1 Courbes de gain et de phase d'un intégrateur	281
	12-2-2 Courbes de gain et de phase d'un filtre passe-bas du premier ordre	283
	12-2-3 Courbes de gain et de phase d'un filtre passe-bas du second ordre	285
	12-2-4 Courbes de gain et de phase d'une transmittance quelconque à déphasage minimal	285
12-3	Relations générales entre les réponses indicielle et fréquentielle	290
12-4	Autres représentations graphiques de la réponse harmonique	292
12-5	Gain et phase d'une boucle fermée; abaque de Black-Nichols	293
	12-5-1 Cas particulier ($\beta = 1$)	293
	12-5-2 Cas général	298
12-6	Gain et phase d'une somme de transmittances	299
	12-6-1 Abaque pour le calcul du gain et de la phase d'une somme de transmittances	299
	12-6-2 Courbe de gain approchée d'une somme de transmittances ou d'une boucle fermée	301
	12-6-3 Courbe de gain pseudo-asymptotique d'un polynôme	305
	12-6-4 Généralisation; tracé approché de la courbe de gain des trans- mittances non factorisées	306
12-7	Courbes de gain et de phase des polynômes normaux à amortissement réglable	310

CHAPITRE XIII. — *Stabilité et précision par la méthode harmonique.*

13-1	Stabilité	313
13-1-1	Système asservi stable en boucle ouverte	313
13-1-1-1	Marges de phase et de gain	314
13-1-1-2	Résonance en boucle fermée	316
13-1-1-3	Signification de la fréquence de coupure	317
13-1-1-4	Remarque sur l'emploi de la marge de phase	317
13-1-1-5	Remplacement des faibles constantes de temps par un retard de parcours	319
13-1-1-6	Cas particulier des boucles à déphasage minimal	320
13-1-2	Cas général; critère de Nyquist	321
13-1-2-1	Courbe polaire d'une équation caractéristique et critère de stabilité	322
13-1-2-2	Critère de Nyquist	323
13-1-2-3	Application aux systèmes stables en boucle ouverte	324
13-1-2-4	Application à des systèmes instables en boucle ouverte	328
13-2	Précision	330
13-2-1	Sinusoïdes équivalentes	330
13-2-2	Optimalisation fréquentielle	331
13-2-3	Réponse fréquentielle à une perturbation	332
13-3	Relations approchées entre les régimes transitoires et le régime permanent harmonique	335

CHAPITRE XIV. — *Calcul des correcteurs par la méthode harmonique.*

14-1	Correcteurs en cascade	339
14-1-1	Correcteurs par avance de phase	340
14-1-2	Remarque sur la forme de la courbe de gain	342
14-1-3	Correcteurs par retard de phase	345
14-1-4	Correcteur à action combinée par retard et avance de phase	348
14-2	Correcteurs en réaction	350
14-2-1	Détermination approchée des correcteurs en réaction	350
14-2-1-1	1 ^{er} exemple : potentiomètre enregistreur avec correction tachymétrique pure	352
14-2-1-2	2 ^e exemple : potentiomètre enregistreur à correction tachymétrique et filtre passe-haut	356
14-2-1-3	3 ^e exemple : potentiomètre enregistreur avec correction accélérométrique et filtre passe-bas	360
14-2-1-4	4 ^e exemple : potentiomètre enregistreur avec correction potentiométrique et filtre passe-haut	360
14-2-1-5	Remarque sur la réaction tachymétrique pure	362
14-2-1-6	Exemple de correcteur mécanique : régulateur de turbine	363
14-2-1-7	Correcteurs électromécaniques	368
14-2-1-8	Réaction fictive	376
14-2-2	Calcul exact des correcteurs en réaction au moyen de l'abaque de Black-Nichols	378
14-3	Compensation par chaînes d'action directe	384

CHAPITRE XV. — *Systèmes à courant porteur.*

15-1	Introduction	390
15-2	Transposition de fréquence	394
15-3	Quelques filtres à courant porteur	394
15-3-1	Transmittance des filtres d'avance de phase à courant porteur	396
15-3-2	Filtres en T parallèles	399
15-3-3	Filtres en T parallèles résonnants	400
15-3-4	Filtres en T ponté	402
15-3-5	Tolérances	

TABLE DES MATIÈRES

XIII

15-3-6	Filtre en treillis	402
15-3-7	Filtres à retard de phase	403

CHAPITRE XVI. — *Calcul des régimes transitoires par la méthode harmonique.*

16-1	Principe de la méthode	404
16-2	Exemple : réponses indicielles d'un régulateur de température . . .	405
16-2-1	Etablissement du schéma fonctionnel	405
16-2-2	Réponse à un échelon de la valeur de consigne	407
16-2-3	Réponse à un échelon de débit	411
16-2-4	Réponse à un signal quelconque	415

CHAPITRE XVII. — *Etude expérimentale en régime permanent harmonique.*

17-1	Le transféromètre.	416
17-2	Exemple d'application à la régulation d'un groupe électrogène . . .	418

QUATRIÈME PARTIE

SYSTÈMES NON-LINÉAIRES

CHAPITRE XVIII. — *Analyse harmonique des systèmes non-linéaires filtrés.*

18-1	Introduction	424
18-2	Caractéristiques non-linéaires instantanées	425
18-3	Notion de système non-linéaire filtré; gain complexe équivalent . .	427
18-4	Calcul du gain complexe équivalent	430
18-4-1	Composante réelle	430
18-4-2	Composante imaginaire.	431
18-4-3	Exemples	432
18-4-3-1	Relais avec insensibilité	432
18-4-3-2	Amplificateur linéaire avec saturation brusque	433
18-4-3-3	Amplificateur linéaire avec seuil	435
18-4-3-4	Amplificateur linéaire avec seuil et saturation	436
18-4-3-5	Relais avec hystérésis	437
18-4-3-6	Relais avec seuil et hystérésis	440
18-4-3-7	Jeu mécanique	441
18-4-4	Approximation d'une caractéristique univoque par une ligne brisée	442
18-4-5	Méthode de Tsytkin pour une caractéristique univoque sans discontinuités	443
18-5	Auto-oscillation des systèmes asservis non-linéaires filtrés séparables .	444
18-5-1	Régimes d'auto-oscillation possibles	444
18-5-2	Cas particulier d'une caractéristique univoque	445
18-5-2-1	1 ^{er} exemple : système instable avec saturation	445
18-5-2-2	2 ^e exemple : système à stabilité conditionnelle avec saturation	446
18-5-2-3	3 ^e exemple : régulation flottante à vitesse constante	447
18-5-3	Cas général ; caractéristique impaire avec hystérésis	451
18-5-3-1	Oscillations limites convergentes et divergentes	451
18-5-3-2	Exemple : régulation flottante à vitesse constante avec hystérésis	453
18-6	Système asservi filtré contenant plusieurs non-linéarités univoques à symétrie impaire	454
18-6-1	Système asservi filtré contenant deux non-linéarités	454
18-6-2	Système asservi filtré contenant trois non-linéarités ou plus . . .	457

CHAPITRE XIX. — *Etude temporelle des systèmes non-linéaires.*

19-1	Intégration graphique dans le plan de phase	461
19-1-1	Principe, trajectoires et isoclines	461
19-1-2	Premier exemple : asservissement du second ordre avec amplificateur saturable	462
19-1-3	Second exemple : régulateur par tout ou rien	466
19-1-4	Troisième exemple : système oscillant avec frottement solide	467
19-1-4-1	Cas général	470
19-1-4-2	Cas particulier : $f = 0$	474
19-1-5	Propriétés générales des asservissements à relais	476
19-1-5-1	Relais idéal sans seuil ni hystérésis	476
19-1-5-2	Influence d'une zone morte	477
19-1-5-3	Influence d'une hystérésis	479
19-1-5-4	Influence d'un terme de correction par dérivation	480
19-1-5-5	Relais avec seuil et hystérésis	481
19-1-6	Nature du point singulier d'un système du second ordre	482
19-1-6-1	Cas général	482
19-1-6-2	Cas particulier	486
19-1-6-3	Application : asservissement de position à synchro-machines	488
19-2	Intégration par la méthode de simulation numérique	490
19-2-1	Principe	490
19-2-2	Exemple : cycle limite d'un régulateur par tout ou rien	492
19-3	Intégration des systèmes linéaires par parties au moyen des équations de transition	495
19-3-1	Etablissement des équations de transition	496
19-3-2	Programmation	498
19-4	Détermination des cycles limites par la méthode des transformations ponctuelles	500

CINQUIÈME PARTIE

SYSTÈMES BIODYNAMIQUES

CHAPITRE XX. — *Les systèmes biodynamiques et l'opérateur humain.*

20-1	Introduction	505
20-2	Modèle continu de l'opérateur humain	506
20-2-1	Position du problème	506
20-2-2	Système conduit sans inertie	509
20-2-3	Influence de la transmittance du système conduit	511
20-2-4	Influence de la dynamique du levier de commande	513
20-3	Modèle échantillonné de l'opérateur humain	515
20-3-1	Réponse à des échelons	515
20-3-2	Modèle échantillonné	516
20-4	Aides à l'opérateur humain	517
20-4-1	Correcteur dans le système de commande	517
20-4-2	Correcteur dans la chaîne de réaction (avivage)	518
20-4-3	Prédiction	518
20-4-4	Suppression de l'inertie par asservissement	519
20-4-5	Synthétiseur d'information	519