

Table des matières

Avant-propos	13
Chapitre 1. Introduction, généralités, définitions des systèmes	25
1.1. Introduction	25
1.2. Signaux et systèmes de communication	26
1.3. Représentation des signaux et systèmes	29
1.3.1. Signal	29
1.3.2. Espace fonctionnel L_2	30
1.3.3. Distribution de Dirac	33
1.4. Produit de convolution et de composition – notion de filtrage	34
1.4.1. Convolution ou produit de composition	35
1.4.1.1. Propriétés de l’impulsion de Dirac	35
1.4.2. Système	36
1.5. Systèmes de transmission, filtres	36
1.5.1. Convolution et filtrage	37
1.6. Signaux certains – signaux aléatoires – signaux analogiques	39
1.6.1. Définitions	39
1.6.1.1. Signaux certains (ou déterministes)	39
1.6.1.2. Signaux aléatoires (ou probabilistes)	40
1.6.1.3. Signal et bruit	40
1.6.2. Quelques signaux analogiques déterministes	40
1.6.2.1. Signaux exponentiels	41
1.6.2.2. Signaux impulsionnels	42
1.6.3. Représentation et modélisation de signaux et systèmes	43
1.6.3.1. Représentation par équations polynomiales	44
1.6.3.2. Représentation par équations différentielles	45

1.6.3.3. Représentation par équations d'état	46
1.6.3.4. Représentations graphiques	47
1.6.4. La représentation dans le plan de phase	48
1.6.4.1. Cas d'un système linéaire du second ordre.	49
1.6.5. Système dynamique	52
1.6.5.1. Définitions relatives à l'équilibre et la stabilité d'un système dynamique	52
1.6.5.2. Etat d'équilibre d'un système	53
1.6.5.3. Etat d'équilibre stable	53
1.6.5.4. Système stable : entrée bornée-sortie bornée	53
1.7. Exercices d'application et de compréhension	54
Chapitre 2. Transformations temps – fréquence – échelle	55
2.1. Série de Fourier appliquée pour les fonctions périodiques	55
2.1.1. Série de Fourier	55
2.1.2. Représentation spectrale (domaine fréquentiel)	57
2.1.3. Propriétés des séries de Fourier	58
2.1.4. Quelques exemples	59
2.2. Transformation de Fourier appliquée pour les fonctions non périodiques	61
2.3. Conditions d'existence de l'intégrale de Fourier	63
2.3.1. Définition	63
2.3.2. Conditions d'existence	63
2.4. Propriétés de la TF	64
2.4.1. Propriétés	64
2.4.2. Propriétés de la transformation de Fourier	65
2.4.3. Théorème de Plancherel et produit de convolution	65
2.5. Série de Fourier et transformation de Fourier	66
2.6. Signaux élémentaires et leurs transformées	69
2.7. Transformée de Laplace	70
2.7.1. Définition	70
2.7.2. Propriétés	74
2.7.3. Exemples d'utilisation de la TL unilatérale	77
2.7.4. Fonction de transfert	78
2.8. Transformée de Fourier et transformée de Laplace	79
2.9. Quelques exercices d'application	80
Chapitre 3. Etude spectrale des signaux	85
3.1. Puissance et énergie des signaux	85
3.1.1. Puissance et énergie d'un signal quelconque	85

3.2. Autocorrélation et intercorrélation	87
3.2.1. Autocorrélation, intercorrélation dans le domaine temporel	87
3.2.1.1. Signaux non périodiques à énergie finie	87
3.2.1.2. Signaux non périodiques à puissance moyenne finie	88
3.2.1.3. Signaux périodiques	88
3.2.1.4. Observations	89
3.2.1.5. Propriétés des fonctions de corrélation	89
3.2.2. Quelques exemples d'applications en régime continu	90
3.2.2.1. Force	90
3.2.2.2. Travail	90
3.2.2.3. Energie emmagasinée, fournie, dissipée	91
3.2.3. Puissances en régime variable	91
3.3. Application mathématique des fonctions de corrélation et d'autocorrélation	92
3.3.1. Durée d'un signal et largeur de son spectre	94
3.3.1.1. Signaux à spectre borné	97
3.3.1.2. Constante de temps d'un filtre passe-bas	98
3.3.2. Signaux à puissance moyenne finie ou nulle	99
3.3.2.1. Densité spectrale de puissance moyenne	99
3.3.2.2. Théorème de Wiener-Khintchine	100
3.3.3. Application au filtrage linéaire	101
3.4. Quelques exercices d'application	102

Chapitre 4. Représentation des systèmes discrets

(échantillonnés)	107
4.1. Shannon et l'échantillonnage, méthodes de discrétisation, interpolation, échantillonneurs bloqueurs	107
4.1.1. Echantillonnage, interpolation	107
4.1.1.1. Formule de Poisson	108
4.1.1.2. Application à la distribution en peigne (ou Peigne de Dirac notée $\llbracket \rrbracket_T(t)$)	109
4.1.1.3. Echantillonnage idéal	109
4.1.1.4. Théorème d'échantillonnage	111
4.1.1.5. Echantillonnage réel périodique et par blocage	114
4.2. Transformation en Z – représentation de systèmes discrets (échantillonnés)	115
4.2.1. Définition – convergence et résidus	115
4.2.1.1. Transformée en Z bilatérale	115
4.2.1.2. Transformée en Z monolatérale	118
4.2.2. Transformation en Z inverse	118
4.2.2.1. Méthode générale	118
4.2.2.2. Méthodes pratiques pour le calcul d'une transformée en Z inverse	121

4.2.2.3. Division polynomiale	122
4.2.2.4. Propriétés de la transformation en Z	122
4.2.3. Représentation de signaux et systèmes discrets	126
4.2.3.1. Représentation par réponse impulsionnelle	126
4.2.3.2. Causalité et stabilité	127
4.2.3.3. Représentation par réponse fréquentielle	128
4.2.4. Fonction de transfert en Z et représentation dans le domaine fréquentiel	129
4.2.4.1. Transmittance en Z – représentation paramétrique	129
4.2.5. Transformée en Z , transformée de Fourier et la transformation de Laplace	131
4.2.5.1. Relation avec la transformation de Laplace	131
4.2.5.2. Relation avec la transformation de Fourier	131
4.2.5.3. Application du plan des s sur le plan des Z	132
4.2.5.4. Valeurs finale et initiale d'un signal	132
4.3. Quelques exercices d'application	132

Chapitre 5. Représentation des signaux et des systèmes 151

5.1. Introduction à la modélisation	151
5.1.1. Représentation de signaux par équations polynomiales	155
5.1.2. Représentation de signaux et systèmes par des équations différentielles	155
5.2. Représentation par les équations d'état d'un système	156
5.2.1. Définition des variables d'état et de la représentation d'état	157
5.2.1.1. Systèmes linéaires variants dans le temps (LVT)	158
5.2.1.2. Systèmes linéaires invariants dans le temps (LIT)	159
5.2.2. Représentation d'état pour systèmes linéaires discrets	163
5.3. Fonctions de transfert	164
5.3.1. Fonction de transfert : représentation externe	164
5.3.2. Passage fonction de transfert et représentation d'état	164
5.3.2.1. Passage d'une équation différentielle à une description externe ou fonction de transfert	164
5.3.2.2. Passage d'une fonction de transfert à une représentation d'état	165
5.3.2.3. Passage d'une représentation d'état à une représentation externe (fonction de transfert)	166
5.3.2.4. Passage d'une équation de récurrence à une fonction de transfert en Z (cas discret)	167
5.3.2.5. Passage d'une représentation d'état discrète à une fonction de transfert en Z	167

5.3.3. Propriétés des fonctions de transfert	168
5.3.3.1. Causalité d'un système ou d'une fonction de transfert	168
5.3.3.2. Stabilité d'un système ou d'une fonction de transfert	168
5.3.3.3. Système à phase minimale	169
5.3.3.4. Réalisabilité physique d'une fonction de transfert	169
5.3.3.5. Relations entre fonctions de transfert, matrice de transition et représentation d'état	170
5.3.4. Associations des schémas fonctionnels	171
5.4. Changement de représentation, les formes canoniques	172
5.4.1. Forme canonique commandable	173
5.4.1.1. Forme compagne	173
5.4.2. Forme canonique de commandabilité	175
5.4.3. Forme canonique d'observabilité	175
5.4.4. Forme canonique observable	176
5.4.4.1. Forme compagne	176
5.4.5. Forme canonique diagonale	179
5.4.5.1. Forme de Jordan (forme diagonale ou parallèle)	179
5.4.6. Changement de représentation, changement de base	181
5.4.7. Exemples de systèmes à modéliser : le pendule inversé	183
5.4.7.1. Description d'état du système	184
5.4.7.2. Description externe de la fonction de transfert	185
5.5. Représentation d'un système dans le plan de phase	186
5.5.1. Cas d'un système linéaire du second ordre.	187
5.6. Quelques exercices d'application	192

Chapitre 6. Réponses dynamiques et performance d'un système

6.1. Introduction d'un système LIT	205
6.2. Matrice de transition d'un système LIT	205
6.2.1. Matrice de transition	205
6.3. Equation d'évolution d'un système LIT	206
6.3.1. Equation d'évolution de l'état	206
6.3.2. Calcul de la matrice de transition	208
6.4. Réponse temporelle à une excitation d'un système linéaire continu	210
6.4.1. La réponse d'un système	210
6.4.2. Solution de l'équation d'état	211
6.4.2.1. Réponse à une excitation impulsionnelle	212
6.4.2.2. Réponse à une excitation indicielle	212
6.4.2.3. Réponse à une excitation rampe	212
6.4.3. Rôle des valeurs propres de la matrice d'évolution A dans la dynamique du système	213
6.5. Echantillonnage et discrétisation de systèmes continus	214

6.5.1. Choix de la période d'échantillonnage (Shannon), méthodes d'intégration	214
6.5.2. Méthode d'Euler	215
6.5.3. Méthode de Runge-Kutta d'ordre n	216
6.5.4. Méthode utilisant la matrice de transition d'état avec bloqueur d'ordre zéro	217
6.5.5. Equation d'évolution pour un système discret invariant dans le temps (DIT)	219
6.6. Quelques réponses temporelles	219
6.6.1. Réponse à une excitation impulsionnelle	220
6.6.2. Réponse à une excitation indicielle	220
6.6.3. Réponse à une excitation harmonique ou réponse fréquentielle	221
6.6.4. Réponse temporelle d'un système linéaire échantillonné, cas d'un système second ordre	222
6.7. Réponses fréquentielles d'une fonction de transfert	226
6.7.1. Diagramme de Bode	227
6.7.1.1. Cas système du premier ordre	227
6.7.1.2. Cas système du second ordre	229
6.7.2. Diagramme de Nyquist	230
6.7.3. Diagramme de Black-Nichols	232
6.8. Identification paramétrique	233
6.8.1. Identification par analogie	234
6.8.1.1. Identification à partir d'une réponse temporelle	235
6.8.1.2. Réponse à l'infini	236
6.8.2. Identification des paramètres, exemples de systèmes	237
6.8.3. Méthode de Strejc (déphasage minimal)	238
6.9. Dynamique des systèmes linéaires	240
6.9.1. Lien entre le domaine fréquentiel et le domaine temporel	240
6.10. Performances et précision d'un système	240
6.10.1. Facteur amortissement d'un système	240
6.10.2. Rapidité et transitoire d'un système	241
6.10.3. Erreur statique, rapidité, sensibilité au bruit, précision d'un système	241
6.10.4. Conclusion	244
6.11. Quelques exercices d'application	244

Chapitre 7. Méthodes d'analyse de stabilité et robustesse des systèmes

265

7.1. Introduction	265
7.2. Définitions relatives à la stabilité d'un système dynamique	266
7.2.1. Etat d'équilibre d'un système	267
7.2.2. Système stable : entrée bornée-sortie bornée	267
7.3. Critères de stabilité	268

7.3.1. Critère de Routh, critère algébrique de stabilité	268
7.3.1.1. Zéro dans la première colonne du tableau de Routh	270
7.3.1.2. Toute une ligne est nulle dans le tableau de Routh	271
7.3.2. Critère de Jury, cas d'un système discret	273
7.3.2.1. Critère du revers (cas où $P = 0$)	278
7.3.2.2. Critère de stabilité de systèmes à minimum de phase	278
7.3.2.3. Exemple d'application	279
7.3.2.4. Conclusion	281
7.4. Quelques exercices d'application	281
7.4.1. Exercices : critère du cercle, causes d'instabilité et cas pratiques	281
Bibliographie	299
Index	305