

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

AUTOMATIQUE

Commande et diagnostic des systèmes dynamiques

Modélisation, analyse, commande par PID
et par retour d'état, diagnostic

Rosario TOSCANO

amplificateur vitesse d'impulsion pour les moteurs à courant continu
à partir d'un convertisseur à découpage à base de MOSFET
et d'un convertisseur à découpage à base de IGBT
pour les moteurs à courant alternatif à vitesse variable

ellipses

Sommaire

| | | |
|----------|---|-----------|
| I | Modélisation et analyse des systèmes | 1 |
| 1 | Modélisation des systèmes | 3 |
| 1 | Notion de système | 3 |
| 2 | Modèles d'un système | 4 |
| 2.1 | Modèle d'état ou représentation interne | 4 |
| 2.2 | Linéarisation du modèle d'état | 7 |
| 2.3 | Modèle de transfert ou représentation externe | 10 |
| 2.4 | Représentation multimodèle | 11 |
| 3 | Principes de la modélisation | 16 |
| 3.1 | Schéma de principe de l'installation | 16 |
| 3.2 | Schéma fonctionnel de l'installation | 17 |
| 3.3 | Écriture du modèle et linéarisation | 18 |
| 4 | Quelques exemples de modélisation | 20 |
| 4.1 | Modélisation d'un dispositif de mélange | 20 |
| 4.2 | Modélisation d'un actionneur électrique | 21 |
| 4.3 | Modélisation d'un dispositif de sustentation magnétique | 23 |
| 4.4 | Modélisation d'un dispositif électropneumatique | 25 |
| 4.5 | Modélisation d'un système mécanique articulé | 29 |
| 5 | Identification des paramètres d'un modèle | 32 |
| 5.1 | Principe de l'identification | 32 |
| 5.2 | Analyse de la réponse indicelle | 33 |
| 5.3 | Méthodes d'estimation | 36 |
| 5.4 | Exemples de mise en œuvre | 41 |
| 6 | Exercices | 44 |
| 2 | Analyse des systèmes dynamiques | 51 |
| 1 | Stabilité d'un point d'équilibre | 51 |
| 1.1 | Définition de la stabilité d'un point d'équilibre | 51 |
| 1.2 | Stabilité des systèmes linéaires | 52 |
| 1.3 | Étude de la stabilité par la méthode de Lyapunov | 56 |
| 1.4 | Stabilité des systèmes dynamiques discrets | 58 |
| 1.5 | Stabilité d'un système non linéaire et stabilité de son linéarisé | 59 |
| 2 | Analyse des modèles linéaires d'état | 64 |
| 2.1 | Non unicité de la représentation d'état | 64 |
| 2.2 | Solution de l'équation d'état et stabilité interne | 64 |
| 2.3 | Discrétisation exacte du modèle d'état et système pseudo-continu | 66 |
| 2.4 | Commandabilité et observabilité | 68 |
| 3 | Analyse des modèles linéaires de transfert | 75 |
| 3.1 | Unicité de la représentation par matrice de transfert | 75 |
| 3.2 | Pôles de la matrice de transfert et stabilité externe | 75 |
| 3.3 | Zéros de la matrice de transfert et liens avec la commandabilité et l'observabilité | 77 |

| | | |
|---------------------------------|---|-----------|
| 4 | Normes des signaux et des systèmes | 79 |
| 4.1 | Normes des signaux | 79 |
| 4.2 | Normes \mathcal{H}_2 et \mathcal{H}_∞ d'un système | 81 |
| 4.3 | Index \mathcal{H}_∞ d'une matrice de transfert | 90 |
| 5 | Exercices | 92 |
| II Commande des systèmes | | 95 |
| 3 | Notion de loi de commande d'un système | 97 |
| 1 | Commande en boucle ouverte et commande en boucle fermée | 97 |
| 2 | Marges de stabilité et fonctions de sensibilité | 99 |
| 3 | Fonctions de sensibilité et robustesse | 102 |
| 4 | Principe de la commande par retour d'état | 103 |
| 4 | Régulateur PID et modèle interne | 107 |
| 1 | Commande par régulateur PID | 107 |
| 1.1 | Réalisation analogique et numérique d'un PID | 108 |
| 1.2 | Méthodes de réglage des régulateurs PID | 110 |
| 1.3 | Prédicteur de Smith et régulateur PIR | 118 |
| 2 | Commande par modèle interne | 120 |
| 2.1 | Synthèse du régulateur | 120 |
| 2.2 | Application au réglage des régulateurs PID | 121 |
| 3 | Exercices | 124 |
| 5 | Commande par retour d'état | 127 |
| 1 | Approche directe et placement de pôles | 127 |
| 2 | Commande par retour d'état dans le cas monovariable | 128 |
| 2.1 | Quelques stratégies de placement de pôles | 129 |
| 2.2 | Commande modale | 133 |
| 3 | Commande par retour d'état dans le cas multivariable | 135 |
| 3.1 | Commande modale multivariable | 135 |
| 3.2 | Commande par placement de structure propre | 135 |
| 3.3 | Découplage par retour d'état | 139 |
| 3.4 | Commande LQ | 143 |
| 3.5 | Adjonction d'un effet intégral | 147 |
| 4 | Reconstruction d'état | 147 |
| 4.1 | Le problème de la reconstruction d'état | 148 |
| 4.2 | Synthèse d'un observateur | 148 |
| 4.3 | Observateur d'ordre réduit | 149 |
| 4.4 | Principe de séparation | 151 |
| 5 | Commande multimodèle | 152 |
| 5.1 | Principe de la méthode | 152 |
| 5.2 | Condition suffisante de stabilité | 153 |
| 5.3 | Synthèse de la loi de commande | 155 |
| 6 | Exercices | 159 |
| 6 | Analyse de la robustesse d'une loi de commande | 163 |
| 1 | Modèle nominal et incertitudes de modélisation | 163 |
| 1.1 | Incertitudes paramétriques et dynamiques | 164 |
| 1.2 | Notion de robustesse | 164 |
| 2 | Représentation par LFT des incertitudes de modèle | 164 |
| 2.1 | Représentation des incertitudes paramétriques | 166 |
| 2.2 | Représentation des incertitudes dynamiques | 169 |

| | | |
|------------------------------------|--|------------|
| 2.3 | Incertitudes mixtes | 171 |
| 3 | Étude de la robustesse | 173 |
| 3.1 | Analyse non structurée | 174 |
| 3.2 | Analyse structurée | 177 |
| 4 | Exercices | 186 |
| III Diagnostic des systèmes | | 189 |
| 7 | Les principes de base du diagnostic | 191 |
| 1 | Position du problème | 191 |
| 1.1 | De la maintenance préventive au diagnostic | 191 |
| 1.2 | Du principe de cohérence au problème des connaissances | 194 |
| 1.3 | Quelques définitions et structure générale d'un système industriel | 195 |
| 2 | Les différentes étapes du diagnostic d'un système | 198 |
| 3 | Classification des méthodes de diagnostic | 199 |
| 8 | Diagnostic quantitatif | 203 |
| 1 | Principe du diagnostic quantitatif | 203 |
| 1.1 | Le modèle utilisé pour la synthèse d'un générateur de résidus | 204 |
| 1.2 | Génération de résidus | 206 |
| 1.3 | Détection et localisation des défauts | 207 |
| 2 | Synthèse du générateur de résidus | 209 |
| 2.1 | Approche par espace de parité | 209 |
| 2.2 | Approche à base d'observateurs | 218 |
| 2.3 | Approche par estimation paramétrique | 233 |
| 3 | Évaluation des résidus | 240 |
| 3.1 | Étape de détection | 241 |
| 3.2 | Étape de localisation | 241 |
| 4 | Exercices | 242 |
| 9 | Diagnostic qualitatif | 245 |
| 1 | Diagnostic qualitatif et reconnaissance de formes | 245 |
| 1.1 | Principe de la reconnaissance de formes | 246 |
| 1.2 | Application au diagnostic des systèmes | 247 |
| 2 | Synthèse de la fonction de classification | 251 |
| 2.1 | Approche probabiliste | 251 |
| 2.2 | Approche neuronale | 255 |
| 2.3 | Approche floue | 260 |
| 3 | Exercices | 278 |
| 10 | Corrigés des exercices | 279 |
| Bibliographie | | 311 |
| Index | | 312 |