L'USINENOUVELLE

Bogdan Grabowski
Christian Ripoll *et coll.*

Aide-mémoire
Électronique

CAMPUS PRO DUNOD

5e édition



537-21.1

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

A GRANDEURS PHYSIQUES ET ÉLECTRIQUES 1

1 • Lois fondamentales et définitions **1**

1.1 Bref historique 1
1.2 Unités géométriques, cinématiques, mécaniques 1
1.3 Unités électriques et électromagnétiques 3
1.4 Lois fondamentales en électricité 3
1.5 Température. Chaleur. Circuit thermique 8
1.6 Photométrie 10
1.7 Unités anglo-saxonnes et américaines courantes 11

2 • Notions de mathématiques **12**

2.1 Grandeurs complexes 12
2.2 Signal périodique. Série de Fourier 17
2.3 Calcul opérationnel 19
2.4 Erreurs et imprécisions 22
2.5 Loi de Laplace-Gauss 26

B MATÉRIAUX ET COMPOSANTS PASSIFS 29

1 • Électron et matériaux. Milieu conducteur et semi-conducteur **29**

1.1 Milieu conducteur et isolant 29
1.2 Semi-conducteur 30
1.3 Matériau magnétique 34
1.4 Conducteur 36

2 • Fiabilité des composants. Généralités **38**

2.1 Définitions 38
2.2 Relations fondamentales 39
2.3 Courbe en baignoire 40

3 • Résistances linéaires 41
3.1 Caractéristiques générales 41
3.2 Performances comparées 44
3.3 Normes et codes pour résistances fixes 46

4 • Potentiomètres 47
4.1 Généralités 47
4.2 Variétés et normes applicables 49

5 • Condensateurs fixes et variables 49
5.1 Caractéristiques générales 49
5.2 Variétés technologiques. Condensateurs non polarisés 52
5.3 Variétés technologiques. Condensateurs polarisés 53
5.4 Condensateurs en microélectronique 54
5.5 Condensateurs variables 55

6 • Bobines 55
6.1 Caractéristiques générales 55
6.2 Calcul de L pour des bobinages simples 57
6.3 Q et pertes dans les bobinages 59
6.4 Variétés de noyaux-ferrites 60

7 • Le quartz 61
7.1 Le cristal 61
7.2 Réseau équivalent 63
7.3 Variétés technologiques principales et normes 65

C RÉSEAUX ET FILTRES 67

1 • Réseaux élémentaires 67
1.1 Dipôles générateurs. Associations avec la charge 67
1.2 Réseaux élémentaires passe-bas et passe-haut 69
1.3 Tracés asymptotiques 74
1.4 Semi-intégrateur et semi-dérivateur 76
1.5 Résonateurs simples 77

2 • Analyse d'un réseau 80
2.1 Théorèmes de base 80
2.2 Éléments d'un réseau et définitions 86

3 • Quadripôles passifs 88
3.1 Matrice [Z] et [Y] 88
3.2 Matrice [A] et [g] 90
3.3 Matrice de chaîne 91
3.4 Combinaison de quadripôles 91
3.5 Impédances-images et impédance caractéristique 92
3.6 Tableau de conversion des différentes matrices 93

4 • Réseaux à résistances 95
4.1 Réseau $R/2\ R$ 95
4.2 Réseaux atténuateurs non adaptés 96
4.3 Réseaux atténuateurs adaptés 98
4.4 Précisions 98
4.5 Pont à résistances 98

5 • Filtres du second ordre ou d'ordre supérieur 99
5.1 Transmittances et réponses typiques 99
5.2 Propriétés mathématiques 102
5.3 Filtres usuels passifs 104

6 • Circuits couplés 110
6.1 Couplage par inductance mutuelle 110
6.2 Couplage dans le cas général 112

D DIPÔLES NON LINÉAIRES 113

1 • Les différents modèles 113
1.1 Variétés fondamentales 113
1.2 Association d'un dipôle générateur et d'un dipôle de charge 113

2 • La diode-jonction 115
2.1 Modèle physique simplifié. Régime statique 115
2.2 La diode en régime dynamique. Les charges accumulées 117
2.3 Régime transitoire 119
2.4 Caractéristiques linéaires par parties 121
2.5 Modèles équivalents utilisables 122

3 • Variétés technologiques 123
3.1 Diodes de redressement 124
3.2 Diodes varicap 126
3.2 Diodes Zener 127

4 • Éléments à résistance négative et dipôles commandés 128
4.1 Diode-tunnel 128
4.2 Thyristor 129
4.3 Triac et diac 131
4.4 Diodes spéciales et diodes à haute fréquence 133

E CAPTEURS 135

1 • Capteurs de température 135
1.1 Comportement des diodes en température 135
1.2 Détecteur de température à diodes 136
1.3 Capteurs de température spécialisés 137

2 • Capteurs de pression de fluides 139

3 • Capteurs d'humidité 140

4 • Capteurs d'éclairement 141
4.1 Photodiodes et photopiles 141
4.2 Phototransistors 143

5 • Capteurs de force ou de pression 144
5.1 Capteurs de force piézoélectrique 144

6 • Capteurs d'accélération 146

7 • Capteurs magnétiques 148
7.1 Effet Hall 149
7.2 Magnétorésistance anisotropique (AMR) 151
7.3 Magnétorésistance géante 153

8 • Capteurs acoustiques 155
8.1 Microphones à condensateur 155
8.2 Microphones à bobine mobile 157
8.3 Diagramme de directivité 157

F DIODES ET TRANSISTORS 159

F1 Tripôles actifs 159

1 • Modèles idéaux 159
1.1 Le transistor bipolaire 159
1.2 Modèle statique général 161
1.3 Polarisation en courant et en tension 163
1.4 Variétés de tripôles actifs 166
1.5 Régime dynamique 168
1.6 Les trois configurations d'utilisation 169
1.7 La configuration de base type (G) 171

2 • Modèles réels 171
2.1 Modèles statiques 171
2.2 Régime dynamique 173
2.3 Matrice indéfinie pour différentes variétés 175

3 • Valeurs limites et paramètres 176
3.1 Régime statique. Transistor bipolaire 176
3.2 Régime statique. Transistor FET 177
3.3 Régime dynamique. Transistor bipolaire 178
3.4 Régime dynamique. Transistor FET 179
3.5 Paramètres en régime transitoire 180

4 • Caractéristiques statiques des transistors FET 181
4.1 Transistors FET à canal *N* 181
4.2 Transistors FET à canal *P* 184
4.3 Le transistor FET utilisé comme source de courant 186
4.4 Le transistor FET utilisé comme résistance variable commandée en tension 187

F2 Circuits à diode 189

5 • Redressement et détection d'amplitude 189
5.1 Mise en série. Mise en parallèle 189
5.2 Emballement thermique 191
5.3 Redressement simple alternance et détection d'amplitude 192
5.4 Montages redresseurs 194
5.5 Surcharge en courant et tension inverse 196

6 • Dispositifs à seuil 197
6.1 Circuits logiques à diodes 197
6.2 Écrêtage. Écrêtage. Limitation 199

7 • Montages stabilisateurs 202
7.1 Stabilisateur compensé en température 203

G ÉLÉMENTS AMPLIFICATEURS 205

1 • Les différents types et variétés de base 205
1.1 Classification par types et variétés 205
1.2 Règles d'association 215

2 • Montages élémentaires 219
2.1 Polarisation d'un tripôle actif 219
2.2 Stabilité statique 224
2.3 Montage type *G* 227
2.4 Montage type (*R*) ou à transrésistance 229
2.5 Source de courant et charge active 232
2.6 Les structures différentielles 236

3 • Association de montages élémentaires 238
3.1 Réalisation d'amplificateurs type (*V*) 238
3.2 Réalisation d'un amplificateur en courant ou à transrésistance (montage Darlington avec *R* résistance de réaction) 240
3.3 Structure cascode 243
3.4 Double structure différentielle utilisant la configuration cascode 245

H RÉTROACTION 247

1 • Généralités 247
1.1 Éléments constitutifs 247
1.2 Graphe de fluence 248

2 • Rétroaction négative 249
2.1 Principe 249
2.2 Sommation et distribution 250

3 • Les quatre variétés de contre-réaction 254
3.1 Les schémas de base 254
3.2 Formules essentielles 257

4 • Établissement des expressions 258
4.1 Transformation des types d'opérateurs 258
4.2 Réseaux passifs 260
4.3 Chaine tension-courant 261

I AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS 265

1 • Caractéristiques en boucle ouverte et fermée 265
1.1 Caractéristiques en boucle ouverte 265
1.2 Caractéristiques en boucle fermée 270

2 • Montages amplificateurs 272
2.1 Opérateur type (*R*) et type (*V*) 272
2.2 Transconductance 275
2.3 Montage différentiel 277
2.4 Comportement dynamique en boucle fermée 278

3 • Convertisseurs d'impédances 281
3.1 Convertisseur d'impédance négative *NIC* 281
3.2 Gyrateur 282
4 • Filtres actifs 284
4.1 Structure de Rauch 284
4.2 Structure de Sallen et Key 287
4.3 Filtre réjecteur ou coupe-bande 288
4.4 Filtre passe-tout ou déphaseur 288
4.5 Filtres correcteurs, intégrateurs et dérivateurs 291
5 • Variétés et normes applicables 294
5.1 Normes NF C 294
5.2 Performances comparatives de quelques modèles spécifiés 294
5.3 Brochages et boîtiers 295
6 • Caractéristiques de commutation à fort niveau 296
6.1 Montage de mesure 296
6.2 Paramètres mesurables 297
6.3 Exemples à hautes performances 298

J DISPOSITIFS À SEUIL 299
1 • Les principales variétés 299
2 • Limiteur symétrique 301
2.1 Caractéristiques. Limiteur à sortie courant 301
2.2 Mise en œuvre 302
3 • Comparateur 303
3.1 Structure générale d'un comparateur 303
3.2 Caractéristiques et variétés 305
3.3 Applications 306
4 • Association d'amplificateurs opérationnels et de diodes 307
4.1 Utilisation de la transrésistance négative 307
4.2 Redressement sans seuil 308

4.3 Détecteur crête 309
4.4 Circuit de *clamping* 310

K MULTIPLICATEUR ET FONCTION-PRODUIT 313
1 • Caractéristiques générales 313
2 • Applications. Modulateurs et mélangeurs 314
2.1 Modulateur Motorola MC 1496 B 314
2.2 Modulation d'amplitude analogique 316
2.3 Mélangeur 317
2.4 Modulateur d'angle 318
3 • Démodulateurs et détecteurs 320
3.1 Détecteurs 320
3.2 Démodulateur de phase 321
3.3 Démodulateur de fréquence en quadrature 322
4 • Applications au calcul analogique 325
4.1 Inversion de fonction 325
4.2 Division 326
5 • Contrôle d'amplitude et de gain 326
5.1 Schéma 326
5.2 Équations 327
5.3 Utilisation de structures différentielles 328
5.4 Structure à MOSFET 329

L GÉNÉRATEURS DE FRÉQUENCES 331
1 • Généralités et structure de base 331
1.1 Caractéristiques à considérer 331
1.2 Méthode du premier harmonique 331
1.3 Structure à réaction 332
1.4 Structure utilisant une résistance négative 334

2 • Montages oscillateurs à résistances-capacités 336
2.1 Oscillateur à pont de Wien 336
2.2 Oscillateur phase-shift 337
3 • Montages oscillateurs à inductances et capacités 338
3.1 Montages Colpitts et Hartley 338
3.2 Montage Clapp 339
4 • Oscillateur contrôlé 340
5 • Exemple de microstructure pour VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) 341
6 • Oscillateur à quartz 342
7 • Boucles à verrouillage de phase 343
7.1 Principe de fonctionnement 343
7.2 Caractéristiques de la PLL 346
8 • Bibliographie 356

M RELAIS ET INTERRUPTEURS ANALOGIQUES 357
1 • Relais statiques à transistors bipolaires 358
1.1 Fonctionnement en régime saturé 358
1.2 Attaque en courant et en tension 358
2 • Portes analogiques avec transistors à effet de champ 360
2.1 Commutateur à J-FET 360
2.2 Commutateur à MOS-FET 361
2.3 Multiplexeur à MOS. Multiplexage en tension 362
2.4 Interrupteur analogique à technologie CMOS 362
2.5 Circuit de prélèvement 363

N ALIMENTATION À DÉCOUPAGE RÉGULATEUR DE TENSION ET AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE 365
1 • Régulateur de tension 365
1.1 Généralités 365
1.2 Caractéristiques essentielles. Plage de régulation 365

1.3 Paramètres essentiels mesurables 366
1.4 Principe des alimentations stabilisée et régulée 367
1.5 Régulateur de tension. Schémas de principe 368
1.6 Régulateur intégré 371
1.7 Alimentation à découpage ou convertisseur DC-DC 373
2 • Amplificateurs de puissance 379
2.1 Les différentes classes de fonctionnement 379
2.2 Puissance utile et rendement 381
2.3 Rendement optimum 382
2.4 Amplificateurs de puissance symétrique, classe B 384
2.5 Montage classe B avec amplificateur opérationnel 385
2.6 Puissance dissipée 386

O TRANSISTORS À BASE D'ARSÉNIURE DE GALLIUM. APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DES MICRO-ONDES 387
1 • Introduction 387
2 • Lignes de transmission et matrice de distribution 387
2.1 Lignes de transmission. Propriétés principales 387
2.2 Lignes de transmission. Facteurs de réflexion 390
2.3 Matrice de répartition 391
2.4 Gain en puissance du quadripôle actif 392
2.5 Stabilité 394
3 • Transistors à arséniure de gallium 394
3.1 MESFET. Structure succincte 394
3.2 MESFET. Caractéristiques statiques 395
3.3 Schéma équivalent simplifié 397
3.4 Gain en puissance 397
3.5 Adaptation 399
3.6 Facteur de bruit 401
4 • Bibliographie 402

P ÉLÉMENTS DE CIRCUITS LOGIQUES 403

1 • Logique combinatoire 403
- 1.1 Représentation et codage 403
- 1.2 Les opérateurs logiques 408
- 1.3 Généralités sur les fonctions combinatoires 413
- 1.4 Les principales fonctions combinatoires 417
- 1.5 Extraits de la norme de représentation des circuits logiques 424
- 1.6 Exemple de fonction combinatoire 427

2 • Logique séquentielle 429
- 2.1 Système séquentiel 429
- 2.2 Bascule D 432
- 2.3 Bascule D *latch* 434
- 2.4 Autres bascules 435
- 2.5 Registre D 437
- 2.6 Registre tampon 437
- 2.7 Registre à décalage (RAD) 438
- 2.8 Compteurs synchrones 440
- 2.9 Compteur asynchrone 444
- 2.10 Exemple : construction d'un compteur binaire synchrone modulo 8 444

3 • Le langage VHDL synthétisable 446
- 3.1 Introduction 446
- 3.2 Méthodologie de conception (simplifiée) 448
- 3.3 Structure d'un code source VHDL 449
- 3.4 Les types de données 453
- 3.5 Fonctions rising_edge et falling_edge 457
- 3.6 Instructions concurrentes 458
- 3.7 Instructions séquentielles 460
- 3.8 Description hiérarchique 465
- 3.9 Exemple de description séquentielle 466
- 3.10 VHDL pour la simulation 467
- 3.11 Exemple complet : étude d'une cellule cascadable BCD 469

4 • Paramètres caractéristiques 471
- 4.1 Paramètres statiques 471
- 4.2 Paramètres dynamiques 475

5 • Circuits intégrés numériques 476
- 5.1 Composants standard 476
- 5.2 ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) 476
- 5.3 Composants programmables 476

6 • Conversion numérique-analogique et analogique-numérique 482
- 6.1 Échantillonnage 482
- 6.2 Convertisseur analogique-numérique et numérique-analogique à réseau *R-2R* 483
- 6.3 Convertisseur à approximations successives 484
- 6.4 Convertisseur parallèle ou flash 485
- 6.5 Convertisseur double rampe 488
- 6.6 Caractéristiques et définitions 490

ANNEXES 491

1 • Exemples de boîtiers 491

2 • Extrait du document 60748-5 : Dispositifs à semiconducteurs – circuits intégrés 492

3 • Sites Internet utiles 495

INDEX 497

AIDE-MÉMOIRE DE L'INGÉNIEUR

Bogdan Grabowski
Christian Ripoll *et coll.*

ÉLECTRONIQUE

5e édition

Cet aide-mémoire rassemble toutes les connaissances fondamentales et les données techniques utiles de l'électronique :

Grandeurs physiques et électriques • Matériaux et composants passifs • Réseaux et filtres • Dipôles non linéaires • Capteurs • Diodes et transistors • Éléments amplificateurs • Rétroaction • Amplificateurs opérationnels • Dispositifs à seuil • Multiplicateur et fonction-produit • Générateurs de fréquences • Relais et interrupteurs analogiques • Alimentation à découpage, régulateurs de tension et amplificateurs de puissance • Transistors GaAs • Éléments de circuits logiques.

Cette **5e édition**, entièrement revue et mise à jour, a été enrichie de nouveaux chapitres sur les capteurs, les oscillateurs à quartz, les boucles à verrouillage de phase, la logique combinatoire et séquentielle, le langage VHDL et les circuits intégrés numériques.

C'est l'outil de travail indispensable des ingénieurs, techniciens et étudiants en électronique.

BOGDAN GRABOWSKI

Ancien ingénieur de Thomson-CSF et ancien directeur du département Électronique de l'ENSTA.

Cette 5e édition a été mise à jour par une équipe d'enseignants chercheurs de l'ESIEE :

CHRISTIAN RIPOLL
CHRISTOPHE DELABIE
ANTOINE D'HERMIES
BERNARD LATORRE
PATRICK POULICHET

9 782100 525430

6672505
ISBN 978-2-10-052543-0

L'USINENOUVELLE

www.dunod.com

DUNOD

537-21.1