

heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion
du Canton de Vaud

Département Technologies Industrielles

Unité EAN

Electronique analogique

Des composants vers les systèmes

i nstitut d'
Automatisation
i ndustrielle



Prof. Freddy Mudry



*"La science, son goût est amer au début
mais à la fin, plus doux que le miel"*

(Plat à décor épigraphique
XI-XIIème siècle, Iran ou Transoxiane
Le Louvre - Arts de l'Islam)

Informations concernant les unités

EAN1 - EAN2

Électronique Analogique, Prof. F. Mudry

Objectifs

A l'issue de ces deux cours, l'étudiant devrait être en mesure de :

1. maîtriser l'application des théorèmes fondamentaux et le calcul des réponses temporelles et fréquentielles pour des circuits électroniques linéaires d'ordre 1 ;
2. expliquer le fonctionnement de circuits à transistors tels que les sources de courant, les amplificateurs EC, différentiel et push-pull ;
3. calculer les résistances d'entrée, de sortie et le gain en tension d'un circuit sur la base des modèles " petits signaux " ;
4. proposer et calculer des circuits réalisés avec des amplificateurs opérationnels (amplificateurs inverseur, non inverseur, différentiel) ainsi que des filtres, comparateurs et générateurs de signaux.

Remarques

1. Le temps accordé pour les exposés et exercices du cours EAN1 est de cinq périodes hebdomadaires pendant quatorze semaines. Le cours est complété par un laboratoire dont le programme est présenté dans le tableau ci-après.
2. Le cours EAN2 et le laboratoire se donnent pendant le trimestre 5 à raison de quatre périodes hebdomadaires. Le programme détaillé est présenté dans le tableau ci-après.
3. Dans la mesure du possible, les cours et exercices sont donnés en alternance durant deux périodes.
4. Les travaux écrits sont constitués de problèmes similaires à ceux proposés comme exercices. Ils doivent être faits sans note aucune.
5. L'examen de fin de module se fera sans document ni calculatrice et sera constitué d'exercices semblables à ceux du cours.
6. Il est bien clair que ce programme constitue une ligne directrice et qu'il peut être légèrement modifié selon les circonstances.

Recommandations

1. Les corrigés d'exercices sont donnés dans un fascicule à part. Afin d'apprendre à résoudre les exercices proposés de manière personnelle et indépendante, celui-ci ne devrait pas être consulté pendant les séances d'exercices.
2. Étant donné qu'aucun formulaire ou document ne sera autorisé pendant les examens, je recommande de résoudre chaque exercice proposé de manière complète à partir des relations et théorèmes fondamentaux.

Programme du cours EAN1

EAN1 : 14 semaines				
Exposés, exercices : 60 périodes		Périodes	Total	Semaines
1a	Modèles de base pour les amplificateurs	8	8	
2	Circuits à diodes	4	12	
	1 TE + correction	4	16	
3	Circuits à transistors	14	30	
	1 TE + correction	4	34	
1b	Utilisation des circuits RC en électronique	8	42	
4	Applications linéaires des A.O.	14	56	
	1 TE + correction	4	60	
Laboratoire : 52 périodes = 13 séances		Périodes	Séances	Semaines
	Initiation à Spice / Matlab	12	1-3	
	Mesures et analyse DC	8	4-5	
	Mesures et analyse AC	8	6-7	
	Mesure et modélisation d'une diode	8	8-9	
	Circuits à transistors	8	10-11	
	A.O. : entre l'idéal et réalité	8	12-13	

Programme du cours EAN2

EAN2 : 16 semaines				
Exposés, exercices : 32 périodes		Périodes	Total	Semaines
1	Filtres analogiques actifs	8	8	
2	Comparateurs, bascules, générateurs de signaux	6	14	
	1 TE + correction	4	18	
3	Étude de la contre-réaction	4	22	
4	Oscillateurs quasi-linéaires	6	28	
	1 TE + correction	4	32	
Laboratoire : 32 périodes = 8 séances		Séances	Total	Semaines
	Réalisation et mesure d'un filtre actif	2	8	
	Comparateurs, bascules, circuits PWM	2	16	
	Générateurs de signaux	2	24	
	Oscillateurs commandés en tension (VCO)	2	32	

Remarques

1. Le travail en laboratoire se fait par groupe de 2 personnes au plus.
2. Les travaux de laboratoires seront évalués avec les notes de deux rapports au moins.

Bibliographie commentée

A. R. Hambley : " Electronics ", McMillan, 1994

Cet ouvrage complet et didactique (plus de 1200 pages) offre une approche allant du simple vers le compliqué. L'analyse détaillée des circuits est constamment soutenue par l'utilisation de la simulation avec pSpice. De très nombreux exemples et exercices avec solution sont proposés tout au long de l'ouvrage. Sa présentation claire et aérée en fait un compagnon de travail agréable.

P. Horowitz, W. Hill : " The Art of Electronics", Cambridge University Press, 1989

Ce livre couvre l'ensemble de l'électronique moderne. Il parle aussi bien des composants discrets que des systèmes à microprocesseurs, d'électronique analogique que d'électronique numérique. L'accent est porté sur les considérations pratiques conduisant à la réalisation d'un système électronique. C'est un ouvrage de référence qui peut être consulté avec profit aussi bien par l'étudiant que par l'ingénieur électronique professionnel.

U. Tietze, Ch. Schenk : "Electronic Circuits : Design and Applications", Springer, 1999

Les commentaires de l'ouvrage précédent s'appliquent également à celui-ci. Ils sont d'égale qualité, seul diffère le style.

J. Millman, A. Grabel : " Microelectronics", McGraw-Hill, 1988

Ce livre d'un millier de pages environ couvre l'ensemble de l'électronique des semi-conducteurs modernes. C'est un livre très détaillé, complet et comprenant de nombreux exercices avec réponses.

A. P. Malvino : " Principes d'électronique ", Mc Graw-Hill, 1997, 3ème édition

Cet ouvrage est intéressant par le fait qu'il présente l'électronique de base de manière essentiellement descriptive. Sa mise en pages est aérée ; on y trouve de nombreux exemples richement illustrés ; la théorie y est bien décrite, sans abus du langage mathématique. En plus, de nombreux exercices sont proposés avec réponses.

Thomas L. Floyd : " Composants et systèmes d'applications", Reynald Goulet, 2000

Ce livre qui décrit de manière détaillée les composants et systèmes électroniques peut être considéré comme une bonne introduction à ce cours.

Table des matières

I. EAN 1 :	
les bases de l'électronique	1
1. Circuits linéaires et amplificateurs	3
1.1. Rappel des éléments de base	3
1.1.1. Générateurs de tension et de courant	3
1.1.2. Théorèmes de Thévenin et de Norton	4
1.1.3. Adaptation d'impédance	4
1.1.4. Diviseurs de tension et de courant	5
1.1.5. Théorème de superposition	5
1.1.6. Exemple	5
1.2. Amplificateurs linéaires	6
1.2.1. Généralités	6
1.2.2. Amplificateurs unilatéraux	7
1.2.3. Amplificateurs bilatéraux	7
1.2.4. Exemple	8
1.3. Modèles unilatéraux pour les amplificateurs	9
1.3.1. Amplificateurs de tension	10
1.3.2. Amplificateurs de courant	10
1.3.3. Amplificateurs à transconductance	11
1.3.4. Amplificateurs à transrésistance	11
1.3.5. Relations entre les quatre représentations	12
1.3.6. Amplificateurs en cascade	12
1.4. Amplificateurs différentiels	13
1.5. Modélisation des quadripôles linéaires	16
1.5.1. Généralités	16
1.5.2. Paramètres impédances et admittances	17
1.5.3. Paramètres hybrides	19
1.5.4. Paramètres de transmission	19
1.6. Réponses indicielles et fréquentielles des circuits d'ordre 1	21
1.6.1. Réponses indicielles	22
1.6.2. Réponses fréquentielles	22
1.7. Analyse de quelques circuits	24
1.7.1. Réponses indicielles	25
1.7.2. Réponses fréquentielles	27
1.8. Exercices	29

2. Circuits à diodes	37
2.1. Description d'une jonction semi-conductrice	37
2.2. Caractéristique d'une diode	38
2.3. Modèles linéaires d'une diode	40
2.3.1. Exemple de calcul d'un circuit	40
2.3.2. Caractéristique d'une diode Zener	41
2.4. Conformateurs à diodes	43
2.5. Circuits redresseurs	44
2.6. Redresseur avec condensateur de filtrage	45
2.6.1. Hypothèse	45
2.6.2. Tensions continue et résiduelle	46
2.7. Redresseur avec condensateur et diode Zener	47
2.8. Fonctions non linéaires	51
2.9. Exercices	55
3. Circuits à transistors bipolaires	59
3.1. Introduction	59
3.2. Équations et caractéristiques d'un transistor	60
3.3. Modèle linéaire	62
3.3.1. Domaines de fonctionnement du transistor	62
3.4. Circuit général	63
3.4.1. Courant de collecteur	63
3.4.2. Tension de collecteur	64
3.4.3. Tension d'émetteur	65
3.4.4. État de saturation	65
3.4.5. Puissance dissipée par un transistor	66
3.4.6. Exemple	67
3.5. Polarisation	69
3.5.1. Convention d'écriture	69
3.5.2. Modèle "grands signaux"	70
3.6. Amplification	70
3.6.1. Modèle "petits signaux"	71
3.6.2. Calcul des paramètres "petits signaux"	72
3.7. Amplificateur de tension	73
3.7.1. Point de fonctionnement	74
3.7.2. Amplification	75
3.7.3. Exemple	77
3.8. Sources de courant	82
3.8.1. Domaine de fonctionnement	82
3.8.2. Résistance de sortie	83
3.8.3. Miroir de courant	84
3.9. Amplificateur à collecteur commun	85
3.9.1. Paramètres de l'amplificateur CC	85
3.10. Amplificateur différentiel	86
3.10.1. Point de fonctionnement en mode commun	87
3.10.2. Amplificateur équivalent	87
3.10.3. Effet d'une source de courant réelle	89
3.10.4. Caractéristique complète de l'amplificateur différentiel	90
3.11. Amplificateur push-pull	93

3.11.1. Gain en tension, résistances d'entrée et de sortie	95
3.12. Calcul d'un amplificateur à plusieurs étages	95
3.12.1. Points de fonctionnement	98
3.12.2. Paramètres différentiels	98
3.12.3. Modèles d'amplification de chaque étage	99
3.12.4. Amplificateur complet	100
3.12.5. Simulation Spice	101
3.12.6. Comparaison des résultats obtenus	102
3.13. Exercices	103
4. Applications linéaires des amplificateurs opérationnels	113
4.1. Préliminaire	113
4.2. Description de l'amplificateur opérationnel	113
4.2.1. Modèle d'un amplificateur opérationnel	116
4.2.2. AO avec une réaction négative ou positive	117
4.2.3. Équations associées à l'AO idéal	118
4.3. Circuits de base	120
4.3.1. Amplificateur inverseur	120
4.3.2. Amplificateur sommateur	121
4.3.3. Amplificateurs non-inverseur et suiveur	122
4.3.4. Amplificateur général	123
4.3.5. Amplificateur différentiel : cas idéal	124
4.3.6. Amplificateur différentiel : cas réel	125
4.4. Circuits dépendants de la fréquence	127
4.4.1. Circuit de base	127
4.4.2. Intégrateur	127
4.4.3. Dérivateur	128
4.4.4. Filtre passe-bas	130
4.4.5. Filtre passe-haut	131
4.4.6. Filtre passe-bande	132
4.4.7. Filtres correcteurs d'amplitudes	133
4.5. Imperfections des amplificateurs opérationnels	135
4.5.1. Gain DC limité	136
4.5.2. Bande passante de l'amplificateur opérationnel	136
4.5.3. Réponses de l'amplificateur non-inverseur	137
4.5.4. Taux de variation limité (slew-rate)	140
4.5.5. Tension de décalage	141
4.5.6. Courants de polarisation	142
4.6. Exercices	143
II. EAN 2 :	
des composants aux systèmes	153
5. Réalisation de filtres analogiques	155
5.1. Filtres d'ordre 1	155
5.2. Formes canoniques	158
5.3. Filtres fondamentaux d'ordre 2	158
5.3.1. Circuit R L C	158
5.3.2. Analyse fréquentielle	158

5.3.3.	Analyse temporelle	161
5.4.	Cellules d'ordre 2	167
5.4.1.	Cellules à gain fixe	167
5.4.2.	Cellules à gain variable	170
5.4.3.	Cellules à gain négatif	172
5.4.4.	Comparaison selon les types de cellules	173
5.5.	Effet des imperfections de l'AO	173
5.6.	Filtres optimums	177
5.6.1.	Filtre idéal	177
5.6.2.	Filtres réels	177
5.6.3.	Approximations d'un filtre idéal	179
5.6.4.	Quel filtre choisir ?	184
5.7.	Filtres normalisés	186
5.7.1.	Transformations à partir d'un filtre passe-bas	186
5.7.2.	Filtres normalisés	186
5.7.3.	Exemple	187
5.8.	Calculs de quelques filtres	190
5.8.1.	Filtre passe-bas de Butterworth	190
5.8.2.	Filtre passe-bas de Bessel	190
5.8.3.	Filtre passe-bas de Tchebycheff	193
5.8.4.	Filtre passe-haut de Tchebycheff	193
5.8.5.	Filtre passe-bande de Butterworth	193
5.8.6.	Filtre coupe-bande de Butterworth	197
5.9.	Circuit universel	198
5.9.1.	Un exemple de filtre universel	200
5.10.	Exercices	202
6.	Comparateurs et générateurs de signaux	209
6.1.	Introduction	209
6.2.	Comparateurs à hystérèse	209
6.2.1.	Comparateurs à seuils symétriques	209
6.2.2.	Comparateurs à seuils variables	213
6.3.	Exemples	215
6.3.1.	Comparateur à collecteur ouvert	215
6.3.2.	Réglage de température à l'aide d'un comparateur	217
6.4.	Bascules ou circuits astables	219
6.4.1.	Bascule à cycle symétrique	219
6.4.2.	Bascule à cycle non symétrique	221
6.4.3.	Bascule unipolaire	223
6.5.	Générateurs de signaux	225
6.5.1.	Signaux carrés et triangulaires	225
6.5.2.	Oscillateur à fréquence variable (VCO)	226
6.5.3.	Signaux sinusoïdaux	228
6.6.	Exercices	234
7.	Étude de la contre-réaction	239
7.1.	Introduction	239
7.2.	Équations de la contre-réaction	239
7.3.	Contre-réaction et amplificateurs	241
7.3.1.	Amplificateur non-inverseur	241

7.3.2.	Amplificateur inverseur	242
7.3.3.	Convertisseur courant-tension	244
7.4.	Propriétés de la contre-réaction	245
7.4.1.	Stabilisation du gain en boucle fermée	245
7.4.2.	Augmentation de la bande-passante	246
7.4.3.	Réduction du bruit	248
7.4.4.	Diminution de la distorsion non-linéaire	249
7.5.	Modification des impédances d'entrée et de sortie	250
7.6.	Conclusion	254
7.7.	Amplificateurs et contre-réaction	254
7.7.1.	Deux approches complémentaires	254
7.7.2.	Les quatre types de contre-réaction (CR)	255
7.7.3.	Propriétés	258
7.8.	Exercices	262
8.	Oscillateurs quasi linéaires	269
8.1.	Éléments de base	269
8.1.1.	Boucle de réaction et oscillation	269
8.1.2.	Circuits de réaction	271
8.1.3.	Contrôle de l'amplitude et stabilité de la fréquence	271
8.2.	Oscillateur à déphaseur CR	273
8.2.1.	Circuit déphaseur	273
8.2.2.	Fréquence d'oscillation	273
8.2.3.	Maintien de l'amplitude	274
8.2.4.	Schéma de l'oscillateur	275
8.2.5.	Gain non linéaire	275
8.3.	Oscillateur de Wien	277
8.3.1.	Fréquence de l'oscillation	277
8.3.2.	Maintien de l'amplitude	278
8.3.3.	Gain non linéaire	278
8.4.	Oscillateur en quadrature	279
8.4.1.	Fréquence de l'oscillation et maintien de l'amplitude	280
8.4.2.	Gain non linéaire	281
8.5.	Considérations sur le contrôle de l'amplitude	281
8.5.1.	Analyse du limiteur d'amplitude	281
8.5.2.	Calcul des composants	282
8.6.	Signaux et analyse spectrale	285
8.7.	Exercices	287
III.	Schémas et histoire	291
9.	Schémathèque de montages à amplificateurs opérationnels	295
10.	Naissance de l'électronique moderne	297

Table des matières