

heig-vd

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

Département
d'Electricité
et Informatique

Unité EAN

Electronique analogique

Des bases vers les
systèmes analogiques

i nstitut d'
A utomatisation
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 : semestre 2 = 14 semaines			
	5 périodes hebdomadaires Exposés, exercices : 70 périodes	Périodes	Total	Semaines
1a	Modèles de base pour les amplificateurs	8	8	1.6
	1 TE + correction	4	12	2.4
2	Circuits à diodes	6	18	3.6
3	Circuits à transistors	13	31	4.2
	1 TE + correction	4	35	7.0
1b	Utilisation des circuits RC en électronique	9	44	8.8
4	Applications linéaires des A.O.	22	66	13.2
	1 TE + correction	4	70	14.0
	3 périodes hebdomadaires Laboratoire : 42 périodes	Périodes	Total	Semaines
	Introduction au laboratoire	4	4	1-2
	Initiation à Spice / Matlab	10	14	3-7
	Mesures et analyse DC	4	18	8
	Mesures et analyse AC	4	22	9
	Mesure et modélisation d'une diode	4	26	10
	Circuits à transistors	8	34	11-12
	A.O. : amplificateur inverseur, idéal et réalité	8	42	13-14

Programme du cours EAN2

	EAN2 : Semestre 3 = 16 semaines			
	2 périodes hebdomadaires Exposés, exercices : 32 périodes	Périodes	Total	Semaines
1	Filtres analogiques actifs	8	8	4
2	Comparateurs, bascules, générateurs de signaux	6	14	7
	1 TE + correction	4	18	9
3	Étude de la contre-réaction	4	22	11
4	Oscillateurs quasi-linéaires	6	28	14
	1 TE + correction	4	32	16
	4 périodes bi-hebdomadaires			
	Laboratoire : 32 périodes = 8 séances	Séances	Total	Semaines
	Réalisation et mesure d'un filtre actif	2	8	2, 4
	Comparateurs, bascules, circuits PWM	2	16	6, 8
	Générateurs de signaux	2	24	10, 12
	Oscillateurs commandés en tension (VCO)	2	32	14, 16

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.

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

1	Circuits linéaires et amplificateurs	1
1.1	Rappel des éléments de base	1
1.1.1	Générateurs de tension et de courant	1
1.1.2	Théorèmes de Thévenin et de Norton	2
1.1.3	Adaptation d'impédance	2
1.1.4	Diviseurs de tension et de courant	3
1.1.5	Théorème de superposition	3
1.1.6	Exemple	3
1.2	Amplificateurs linéaires	4
1.2.1	Généralités	4
1.2.2	Amplificateurs unilatéraux	5
1.2.3	Amplificateurs bilatéraux	5
1.2.4	Exemple	5
1.3	Modèles unilatéraux pour les amplificateurs	7
1.3.1	Amplificateurs de tension	8
1.3.2	Amplificateurs de courant	8
1.3.3	Amplificateurs à transconductance	9
1.3.4	Amplificateurs à transrésistance	9
1.3.5	Relations entre les quatre représentations	10
1.3.6	Amplificateurs en cascade	10
1.4	Amplificateurs différentiels	11
1.5	Modélisation des quadripôles linéaires	14
1.5.1	Généralités	14
1.5.2	Paramètres impédances et admittances	15
1.5.3	Paramètres hybrides	16
1.5.4	Paramètres de transmission	17
1.6	Réponses indicielles et fréquentielles des circuits d'ordre 1	19
1.6.1	Réponses indicielles	19
1.6.2	Réponses fréquentielles	19
1.7	Analyse de quelques circuits	21
1.7.1	Réponses indicielles	22
1.7.2	Réponses fréquentielles	24
1.8	Exercices	26
2	Circuits à diodes	33
2.1	Description d'une jonction semi-conductrice	33
2.2	Caractéristique d'une diode	34
2.3	Modèles linéaires d'une diode	36
2.3.1	Exemple de calcul d'un circuit	36
2.4	Circuits redresseurs	37
2.5	Redresseur avec condensateur de filtrage	39

2.5.1	Hypothèse	40
2.5.2	Tensions continue et résiduelle	40
2.6	Caractéristique d'une diode Zener	41
2.7	Redresseur avec condensateur et diode Zener	42
2.8	Fonctions non linéaires	46
2.8.1	Conformateurs à diodes	46
2.8.2	Redresseurs sans seuil	47
2.9	Exercices	51
3	Circuits à transistors bipolaires	53
3.1	Introduction	53
3.2	Équations et caractéristiques d'un transistor	54
3.3	Modèle linéaire	56
3.3.1	Domaines de fonctionnement du transistor	56
3.4	Circuit général	57
3.4.1	Courant de collecteur	58
3.4.2	Tension de collecteur	58
3.4.3	Tension d'émetteur	59
3.4.4	Etat de saturation	60
3.4.5	Puissance dissipée par un transistor	60
3.4.6	Exemple	61
3.5	Polarisation	63
3.5.1	Convention d'écriture	63
3.5.2	Modèle "grands signaux"	64
3.6	Amplification	64
3.6.1	Modèle "petits signaux"	65
3.6.2	Calcul des paramètres "petits signaux"	66
3.7	Amplificateur de tension	67
3.7.1	Point de fonctionnement	68
3.7.2	Amplification	69
3.7.3	Exemple	71
3.8	Sources de courant	76
3.8.1	Domaine de fonctionnement	76
3.8.2	Résistance de sortie	77
3.8.3	Miroir de courant	78
3.9	Amplificateur à collecteur commun	79
3.9.1	Paramètres de l'amplificateur CC	79
3.10	Amplificateur différentiel	80
3.10.1	Point de fonctionnement en mode commun	81
3.10.2	Amplificateur équivalent	81
3.10.3	Effet d'une source de courant réelle	83
3.10.4	Caractéristique complète de l'amplificateur différentiel	84
3.11	Amplificateur push-pull	87
3.11.1	Gain en tension, résistances d'entrée et de sortie	89
3.12	Calcul d'un amplificateur à plusieurs étages	89
3.12.1	Points de fonctionnement	92
3.12.2	Paramètres différentiels	92
3.12.3	Modèles d'amplification de chaque étage	93
3.12.4	Amplificateur complet	94

3.12.5	Simulation Spice	95
3.12.6	Comparaison des résultats obtenus	96
3.13	Exercices	97
4	Applications linéaires des amplificateurs opérationnels	107
4.1	Préliminaire	107
4.2	Description de l'amplificateur opérationnel	107
4.2.1	Modèle d'un amplificateur opérationnel	110
4.2.2	AO avec une réaction négative ou positive	111
4.2.3	Équations associées à l'AO idéal	112
4.3	Circuits de base	114
4.3.1	Amplificateur inverseur	114
4.3.2	Amplificateur sommateur	115
4.3.3	Amplificateurs non-inverseur et suiveur	116
4.3.4	Amplificateur général	117
4.3.5	Amplificateur différentiel : cas idéal	118
4.3.6	Amplificateur différentiel : cas réel	119
4.4	Circuits dépendants de la fréquence	121
4.4.1	Circuit de base	121
4.4.2	Intégrateur	121
4.4.3	Dérivateur	122
4.4.4	Filtre passe-bas	124
4.4.5	Filtre passe-haut	125
4.4.6	Filtre passe-bande	126
4.4.7	Filtres correcteurs d'amplitudes	127
4.5	Imperfections des amplificateurs opérationnels	129
4.5.1	Gain DC limité	130
4.5.2	Bande passante de l'amplificateur opérationnel	130
4.5.3	Réponses de l'amplificateur non-inverseur	131
4.5.4	Taux de variation limité (slew-rate)	134
4.5.5	Tension de décalage	135
4.5.6	Courants de polarisation	136
4.6	Exercices	137
5	Réalisation de filtres analogiques	147
5.1	Filtres d'ordre 1	147
5.2	Filtres fondamentaux d'ordre 2	150
5.2.1	Circuit R L C	150
5.2.2	Analyse fréquentielle	150
5.2.3	Formes canoniques	152
5.2.4	Analyse temporelle	155
5.3	Cellules d'ordre 2	159
5.3.1	Cellules à gain fixe	159
5.3.2	Cellules à gain variable	162
5.3.3	Cellules à gain négatif	164
5.3.4	Comparaison selon les types de cellules	165
5.4	Effet des imperfections de l'AO	165
5.4.1	Modèle HF	165
5.4.2	Compensation du comportement HF	168
5.5	Filtres optimums	170

5.5.1	Filtre idéal	170
5.5.2	Filtres réels	171
5.5.3	Approximations d'un filtre idéal	171
5.5.4	Quel filtre choisir ?	177
5.6	Filtres normalisés	179
5.6.1	Transformations à partir d'un filtre passe-bas	179
5.6.2	Filtres normalisés	179
5.6.3	Exemple	181
5.7	Calculs de quelques filtres	183
5.7.1	Filtre passe-bas de Butterworth	183
5.7.2	Filtre passe-bas de Bessel	183
5.7.3	Filtre passe-bas de Tchebycheff	186
5.7.4	Filtre passe-haut de Tchebycheff	186
5.7.5	Filtre passe-bande de Butterworth	186
5.7.6	Filtre coupe-bande de Butterworth	190
5.8	Circuit universel	191
5.8.1	Un exemple de filtre universel	193
5.9	Exercices	195
6	Comparateurs et générateurs de signaux	201
6.1	Introduction	201
6.2	Comparateurs à hystérèse	201
6.2.1	Comparateurs à seuils symétriques	201
6.2.2	Comparateurs à seuils variables	205
6.3	Exemples	207
6.3.1	Comparateur à collecteur ouvert	207
6.3.2	Réglage de température à l'aide d'un comparateur	209
6.4	Bascules ou circuits astables	211
6.4.1	Bascule à cycle symétrique	211
6.4.2	Bascule à cycle non symétrique	213
6.4.3	Bascule unipolaire	215
6.5	Générateurs de signaux	217
6.5.1	Signaux carrés et triangulaires	217
6.5.2	Oscillateur à fréquence variable (VCO)	218
6.5.3	Signaux sinusoïdaux	220
6.6	Exercices	226
7	Étude de la contre-réaction	231
7.1	Introduction	231
7.2	Équations de la contre-réaction	231
7.3	Contre-réaction et amplificateurs	233
7.3.1	Amplificateur non-inverseur	233
7.3.2	Amplificateur inverseur	234
7.3.3	Convertisseur courant-tension	236
7.4	Propriétés de la contre-réaction	237
7.4.1	Stabilisation du gain en boucle fermée	237
7.4.2	Augmentation de la bande-passante	238
7.4.3	Réduction du bruit	241
7.4.4	Diminution de la distorsion non-linéaire	242
7.5	Modification des impédances d'entrée et de sortie	243

7.6	Amplificateurs et contre-réaction	246
7.6.1	Deux points de vue complémentaires	246
7.6.2	Les quatre types de contre-réaction (CR)	247
7.6.3	Propriétés	250
7.7	Exercices	254
8	Oscillateurs quasi linéaires	261
8.1	Éléments de base	261
8.1.1	Boucle de réaction et oscillation	261
8.1.2	Circuits de réaction	263
8.1.3	Contrôle de l'amplitude et stabilité de la fréquence	263
8.2	Oscillateur à déphaseur CR	265
8.2.1	Circuit déphaseur	265
8.2.2	Fréquence d'oscillation	266
8.2.3	Maintien de l'amplitude	266
8.2.4	Schéma de l'oscillateur	267
8.2.5	Gain non linéaire	267
8.3	Oscillateur de Wien	269
8.3.1	Fréquence de l'oscillation	269
8.3.2	Maintien de l'amplitude	270
8.3.3	Gain non linéaire	270
8.4	Oscillateur en quadrature	271
8.4.1	Fréquence de l'oscillation et maintien de l'amplitude	271
8.4.2	Gain non linéaire	273
8.5	Considérations sur le contrôle de l'amplitude	273
8.5.1	Analyse du limiteur d'amplitude	274
8.5.2	Calcul des composants	275
8.6	Signaux et analyse spectrale	277
8.7	Exercices	280
9	Schémathèque de montages à amplificateurs opérationnels	285
10	Naissance de l'électronique moderne	287

Table des matières