

Francesc Josep Sánchez Robert

Problemes de circuits electrònics analògics

Primera edició: setembre de 2001

Aquesta publicació s'acull a la política de normalització lingüística i ha comptat amb la col·laboració del Departament de Cultura i de la Direcció General d'Universitats, de la Generalitat de Catalunya.

Disseny de la coberta: Edicions UPC

© Francesc Josep Sánchez Robert, 2001

© Edicions UPC, 2001
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona
Tel. 93 401 68 83 Fax 93 401 58 85
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
e-mail: edicions.virtuals@upc.es

Producció: CPET (Centre de Publicacions del Campus Nord)
La Cup. Gran Capità s/n, 08034 Barcelona

Dipòsit legal: B-40325-2001
ISBN: 84-8301-548-X

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del copyright, sota les sancions establertes a la llei, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment, inclosos la reproducció i el tractament informàtic, i la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec públics.

Primera edició: setembre de 2001

Aquesta publicació s'acull a la política de normalització lingüística i ha comptat amb la col·laboració del Departament de Cultura i de la Direcció General d'Universitats, de la Generalitat de Catalunya.

Disseny de la coberta: Edicions UPC

© Francesc Josep Sánchez Robert, 2001

© Edicions UPC, 2001
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona
Tel. 93 401 68 83 Fax 93 401 58 85
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
e-mail: edicions.virtuals@upc.es

Producció: CPET (Centre de Publicacions del Campus Nord)
La Cup. Gran Capità s/n, 08034 Barcelona

Dipòsit legal: B-40325-2001
ISBN: 84-8301-548-X

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del copyright, sota les sancions establertes a la llei, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment, inclosos la reprografia i el tractament informàtic, i la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec públics.

Aquesta obra està dedicada a la meva
esposa Maria i a la meva filla Helena

Presentació

Aquest llibre es una col·lecció dels problemes i les pràctiques proposades durant uns anys als estudiants d'enginyeria tècnica en electrònica industrial. Concretament a les assignatures d'Electrònica analògica i Laboratori de Circuits Electrònics impartides al tercer quadrimestre de la carrera a l'Escola Universitària Politècnica de Vilanova i la Geltrú. Aquestes assignatures, una de teoria i l'altra de laboratori, són una continuació dels cursos impartits als primers dos quadrimestres sobre components i tecnologia electrònica i electrònica bàsica. Ara bé, tal com ha quedat l'obra, una vegada estructurada en capítols, podem dir que abasta més enllà dels estudis d'una sola carrera. Es pot afirmar que el llibre té interès també pel estudis de les enginyeries tècniques i superiors de telecomunicacions en les seves diverses especialitats.

L'objectiu més important és estudiar amb detall l'estructura i funcionament de diversos circuits electrònics bàsics configurats a partir de transistors (BJT, JFET, MOSFET) i amplificadors operacionals (convencionals i OTA). Aquests circuits s'utilitzen per a desenvolupar mòduls analògics de gran importància que formen part de la majoria d'equips electrònics d'avui en dia: reguladors de tensió i corrent; amplificadors de potència d'àudio; filtres equalitzadors; oscil·ladors sinusoïdals i altres generadors de senyal; moduladors d'amplitud i de freqüència; mòduls de càlcul logarítmic; PLL (Phase-lock loop); etc. És a dir, es tracta d'aprendre conceptes bàsics de l'enginyeria electrònica, que més tard, en assignatures d'aplicació com ara la instrumentació, l'electrònica de potència, l'electrònica de comunicacions, o bé en els treballs de fi de carrera seran la clau per a dissenyar circuits i sistemes electrònics d'aplicació comercial.

En els primers cursos de carrera no tenim perquè proposar circuits d'aplicació directa comercial, ja que tal com s'ha dit, hem d'ensenyar en primer lloc l'abecedari de l'electrònica i la teoria. Això ha estat així moltes vegades. Tots hem utilitzat llibres d'electrònica que expliquen els conceptes correctament i amb precisió, però que a l'hora de proposar problemes per a fixar els coneixements s'inventen els circuits, és a dir, no creuen necessari (o els hi és més difícil) usar circuits reals per a exemplificar els conceptes teòrics. Això comporta que des d'un bon començament hi hagi una certa distància entre els circuits "fàcils" i "preparats" que s'expliquen a la carrera i els circuits reals "plens de components i de transistors comercials" que es troben els estudiants quan han de realitzar un projecte o comencen a treballar a la indústria en el sector del disseny electrònic.

L'experiència de l'autor en assignatures d'aplicació, com la instrumentació electrònica, on es pot treballar pràcticament tot el curs amb circuits reals, extrets de notes d'aplicació i d'articles de revistes, li ha permès enfocar tant la teoria com les pràctiques de l'electrònica analògica cap a una vessant molt més aplicada del què és costum. Així doncs, exceptuant els primers problemes de cada capítol, que serien diguem-ne dels típics, aquesta col·lecció és una mostra de com és possible plantejar i resoldre circuits reals amb tota la utilitat pràctica fins i tot a les assignatures bàsiques de la carrera.

El recull de problemes s'ha estructurat en quatre capítols més un capítol addicional dedicat a les solucions d'alguns dels problemes. L'amplificació de senyal i la resposta en freqüència; l'amplificador realimentat; les etapes de potència i els oscil·ladors. Els tres primers capítols tracten de circuits i sistemes lineals, bàsicament l'amplificador com a element essencial de l'electrònica. L'últim introdueix els circuits no lineals i inestables. Com que la majoria de problemes són extrets d'esquemes reals, és a vegades difícil d'incloure'ls en algun capítol concret. D'aquesta manera, es poden trobar apartats d'un problema que cal resoldre amb els coneixements adquirits als capítols anteriors. Però això ja està fet així expressament.

Els circuits reals tenen diversos blocs, cadascun amb unes especificacions a complir, i no tenen perquè saber-se dissenyar tots al mateix temps. No tenim perquè espantar-nos davant d'un esquema del qual a simple vista no entenguem gaire cosa. L'important és saber extreure del circuit els seus blocs principals. Representar-los per un circuit equivalent que faci la mateixa funció. Per exemple, si identifiquem que un transistor amb unes resistències de polarització i un díode zener treballa com una font de corrent, el que s'escau és substituir d'entrada aquest conjunt de components per una font de corrent ideal amb una resistència paral·lel associada. D'aquesta forma reduïm l'esquema real a un conjunt de blocs cadascun amb una funció assignada. Més endavant, si cal, ja es dissenyarà cadascuna d'aquestes caixes de forma individual. Diguem-ne que la gràcia de l'autor ha estat agafar un circuit real i preparar-lo a través d'una sèrie d'apartats per a que es pugui analitzar en el context de cada capítol. Això permet, si hom vol, visitar una vegada i un altra el mateix esquemàtic i enfocar-lo des de punts de vista diferents. Per exemple, un amplificador d'àudio de potència, amb etapa d'entrada diferencial, amplificador de tensió i etapa de sortida amb guany de corrent, es pot analitzar des de la perspectiva d'un sistema realimentat o bé des de la perspectiva més usual donant èmfasi a l'etapa *driver* de guany de corrent.

Val a dir també que molts dels problemes s'han simulat en SPICE per tal de fer-los encara més verídics. Aquest és avui en dia un pas imprescindible que cal fer després del càlcul d'un circuit electrònic i abans d'anar al laboratori a muntar un prototip. La simulació amb tot el què representa de modelització de dispositius, components i llibreries de fabricant, tipus d'anàlisi, etc., ha obert un camp nou a l'enginyer electrònic que permet en última instància millorar substancialment els dissenys. Ara bé, cal fer la simulació quant toca, després d'haver après com calcular i analitzar cadascun dels components del circuit, no abans. Sinó resulta tant ineficaç com anar al laboratori a muntar un circuit sense saber com funciona ni què és el què ha de donar.

La resolució dels problemes plantejats al primer capítol, comporta l'aprenentatge de conceptes com la polarització de dispositius actius; models lineals en petit senyal; linealitat; distorsió; funció de transferència en el domini de Laplace; pols i zeros; resposta freqüencial; amplada de banda; guany i impedàncies d'entrada i sortida; efecte Miller; amplificació diferencial; etc.

El capítol segon sobre amplificadors realimentats introdueix el concepte de sistema, de llaç obert i de llaç tancat. Permet comprovar com fonamentalment gràcies a una pèrdua del guany en llaç obert és possible obtenir tot un seguit d'avantatges sobre les circuits descrits al capítol anterior. L'augment de l'amplada de banda, la desensibilització de la funció de transferència en realimentació respecte dels paràmetres de l'amplificador i les seves derives; l'augment de la linealitat; la disminució de l'efecte del soroll intern i la distorsió, etc.

El tercer capítol tracta de les etapes de potència i de la regulació lineal de tensió. La majoria de vegades els circuits electrònics han d'excitar càrregues amb potències considerables. Per tant, han d'incloure a l'amplificador una etapa addicional que acostuma a ser de guany de corrent. Treballar amb grans senyals obliga a plantejar noves etapes (classe B, classe AB) que augmenten el rendiment de l'equip. Així mateix, cal seleccionar dispositius de potència que han d'anar acoblats a dissipadors de calor. És freqüent trobar també circuits de protecció contra un corrent excessiu o curtcircuit, contra sobretensions i per a protegir d'una temperatura massa elevada.

El quart capítol introdueix els oscil·ladors sinusoidals i altres generadors de senyal quadrada, polsada i triangular. Es proposa analitzar dissenys en pont de Wien; per desplaçament de fase; sintonitzats amb condensadors i inductàncies i oscil·ladors a cristall de quars. Els conceptes més importants introduïts són el càlcul de la freqüència d'oscil·lació; el guany mínim que ha de tenir l'amplificador per a l'arrencada; i el control de l'amplitud d'oscil·lació, absolutament necessari si es pretén obtenir una sortida estable.

L'autor
Barcelona, juliol de 2001

Índex:

1	Amplificadors de senyal i resposta en freqüència	9
1.1	Anàlisi i disseny d'una etapa FET en font comú	9
1.2	Simulació SPICE d'una etapa FET en font comú.....	11
1.3	Muntatge d'un prototip d'amplificador i mesures de laboratori	12
1.4	Amplificador amb JFET en configuració 'font comú'	15
1.5	Amplificador amb JFET en configuració 'porta-comú'	16
1.6	Amplificador amb JFET en configuració 'drenador comú'	17
1.7	Anàlisi i disseny d'una etapa BJT en emissor comú.....	19
1.8	Disseny de l'amplada d'un BJT en emissor comú.....	20
1.9	Disseny de l'amplada de banda d'un FET en font comú	21
1.10	Efecte de la sonda de l'oscil·loscopi sobre les mesures.....	22
1.11	Amplificador amb BJT en configuració 'cascode'	24
1.12	Amplificador diferencial amb transistors BJT	26
1.13	Amplificador multietapa amb transistors JFET i BJT	28
1.14	Amplificador receptor de fibra òptica.....	30
1.15	Amplificador diferencial amb OTA.....	33
1.16	Preamplificador de vídeo amb configuració de cascode complementari.....	34
1.17	Multiplicador analògic de quatre quadrants.....	36
1.18	Anàlisi d'un amplificador diferencial amb OTA	38
1.19	Muntatge d'un amplificador diferencial amb OTA.....	40
2	Amplificadors realimentats.....	43
2.1	Amplificador d'una etapa amb BJT realimentat	43
2.2	Amplificador inversor amb AO	44
2.3	Anàlisi d'un amplificador multietapa	45
2.4	Simulació de l'amplificador realimentat.....	46
2.5	Amplificador de baix soroll i d'alimentació única	47
2.6	Amplificador multietapa realimentat	48
2.7	Preamplificador amb equalització RIAA per a càpsula magnètica.....	49
2.8	Amplificador multietapa realimentat	51
2.9	Preamplificador realimentat amb control de tonalitat.....	52
2.10	Preamplificador per a càpsula fonogràfica amb LM389.....	54

2.11	Circuit equalitzador d'àudio RIAA.....	57
2.12	Filtre controlat per tensió amb OTA.....	59
2.13	Filtre passa banda controlat per tensió amb OTA.....	60
2.14	Amplificador de transresistència com a receptor analògic de fibra òptica	62
2.15	Amplificador amb tecnologia BiCMOS d'amplada de banda gran	63
3	Amplificadors de potència i reguladors de voltatge	65
3.1	Amplificador de potència amb preamplificador de micròfon	65
3.2	Amplificador de potència basat en l'OTA CA3094	67
3.3	Amplificador de potència amb entrada diferencial.....	69
3.4	Amplificador de potència de 90 W	71
3.5	Amplificador de potència de 70 W amb <i>driver</i> AO d'alta tensió	73
3.6	Amplificador de potència de 25 W amb protecció contra sobrecorrents	76
3.7	Regulador de tensió lineal i simètric.....	78
3.8	Amplificador de potència de 35 W	79
3.9	Anàlisi d'una font d'alimentació positiva, regulada i ajustable.....	81
3.10	Font d'alimentació negativa lineal amb regulador de tensió ajustable	82
3.11	Font de corrent regulada i ajustable fins a 1 A	84
3.12	Amplificador d'àudio de 90 W amb <i>driver</i> AO d'alta tensió	86
4	Oscil·ladors i generadors de senyal	89
4.1	Preamplificador per a micròfon amb senyal de prova sinusoidal	89
4.2	Oscil·lador local d'un receptor de radio	90
4.3	Oscil·lador d'ona quadrada i triangular controlat per tensió.....	91
4.4	Oscil·lador VCO d'ona polsada i rampa.....	93
4.5	Circuit de rellotge a cristall amb molt baix consum	95
4.6	Oscil·lador per un condicionador de senyal per a LDVT	96
5	Solucions a problemes seleccionats.....	97
5.1	Amplificadors de senyal i resposta en freqüència.....	97
5.2	Amplificadors realimentats.....	100
5.3	Amplificadors de potència i reguladors de tensió lineals	107
5.4	Oscil·ladors i generadors de senyal.....	111