

BEHZAD
RAZAVI

Βασικές αρχές Μικροηλεκτρονικής



ΔΕΥΤΕΡΗ ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

Επιστημονική επιμέλεια ελληνικής έκδοσης:
Σπύρος Νικολαΐδης, Καθηγητής ΑΠΘ



Ο συγγραφέας

Ο Behzad Razavi απέκτησε πτυχίο BSEE από το Sharif University of Technology το 1985 και πτυχία MSEE και PhDEE από το Stanford University το 1988 και το 1992, αντίστοιχα. Εργάστηκε στα εργαστήρια AT&T Bell Laboratories και Hewlett-Packard Laboratories μέχρι το 1996. Από το 1996, διετέλεσε Αναπληρωτής Καθηγητής και στη συνέχεια Καθηγητής σε ηλεκτρολόγους μηχανικούς στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας (University of California), στο Λος Άντζελες. Στο τρέχον ερευνητικό έργο του περιλαμβάνονται οι ασύρματοι πομποδέκτες, οι συνθετητές συχνοτήτων (frequency synthesizers), το κλείδωμα φάσης (phase-locking) και η επαναφορά χρονισμού (clock recovery) για επικοινωνίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας, και οι μετατροπείς δεδομένων (data converters).

Ο Καθηγητής Razavi διετέλεσε επισκέπτης καθηγητής στο Princeton University από το 1992 έως το 1994, στο Stanford University το 1995. Εργάστηκε στις επιτροπές Technical Program Committees του Διεθνούς Συνεδρίου Κυκλωμάτων Στερεάς Κατάστασης (International Solid-State Circuits Conference — ISSCC) από το 1993 έως το 2002 και στο Συμπόσιο Κυκλωμάτων VLSI (VLSI Circuits Symposium) από το 1998 έως το 2002. Εργάστηκε επίσης ως Guest Editor και Associate Editor στα επιστημονικά περιοδικά IEEE Journal of Solid-State Circuits, IEEE Transactions on Circuits and Systems, και International Journal of High Speed Electronics.

Ο Καθηγητής Razavi τιμήθηκε με το βραβείο Beatrice Winner Award for Editorial Excellence στο ISSCC του 1994, το βραβείο για το καλύτερο άρθρο στο Διεθνές Συνέδριο Κυκλωμάτων Στερεάς Κατάστασης του 1994, το βραβείο για το καλύτερο πάνελ στο ISSCC του 1995 και του 1997, το βραβείο TRW Innovative Teaching Award το 1997, και το βραβείο για το καλύτερο άρθρο στο συνέδριο Custom Integrated Circuits της IEEE το 1998, και το βραβείο McGraw-Hill First Edition of the Year Award το 2001. Ήταν συναποδέκτης των βραβείων Jack Kilby Outstanding Student Paper Award και Beatrice Winner Award for Editorial Excellence στο ISSCC του 2001. Τιμήθηκε με το βραβείο Lockheed Martin Excellence in Teaching Award το 2006, το βραβείο UCLA Faculty Senate Teaching Award το 2007, και το βραβείο CICC Best Invited Paper Award το 2009 και το 2012. Ήταν συναποδέκτης του βραβείου VLSI Circuits Symposium Best Student Paper Award του 2012. Αναγνωρίστηκε επίσης ως ένας από τους κορυφαίους 10 συγγραφείς στην 50ετή ιστορία του ISSCC. Ο Καθηγητής Razavi τιμήθηκε με το βραβείο IEEE Donald Pederson Award in Solid-State Circuits το 2011.

Ο Καθηγητής Razavi είναι μέλος της IEEE, έχει διατελέσει Διακεκριμένος Ομιλητής (Distinguished Lecturer) της IEEE, και είναι συγγραφέας των βιβλίων *Principles of Data Conversion System Design*, *RF Microelectronics* (που μεταφράστηκε στα κινεζικά, τα ιαπωνικά, και τα κορεατικά), *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* (που μεταφράστηκε στα κινεζικά, τα ιαπωνικά, και τα κορεατικά), *Design of Integrated Circuits for Optical Communications*, και *Fundamentals of Microelectronics* (που μεταφράστηκε στα κορεατικά και τα πορτογαλικά). Είναι επίσης συγγραφέας των τίτλων *Monolithic Phase-Locked Loops and Clock Recovery Circuits* και *Phase-Locking in High-Performance Systems*.

Πρόλογος

Η πρώτη έκδοση αυτού του βιβλίου κυκλοφόρησε το 2008 και έχει υιοθετηθεί από πολλά πανεπιστήμια ανά την υφήλιο για την προπτυχιακή εκπαίδευση στη μικροηλεκτρονική (microelectronics). Μετά από τα σχόλια που λάβαμε από φοιτητές και εκπαιδευτικούς, αυτή η δεύτερη έκδοση περιλαμβάνει αρκετές αναθεωρήσεις που βελτιώνουν τις παιδαγωγικές πλευρές του βιβλίου:

1. Σε όλο το βιβλίο έχουμε προσθέσει αρκετά ειδικά πλαίσια σχετικά με την ιστορία και τις εφαρμογές των ηλεκτρονικών διατάξεων και κυκλωμάτων, βοηθώντας τον αναγνώστη να διατηρήσει το ενδιαφέρον και τα κίνητρά του και επιτρέποντας στον εκπαιδευτικό να βασιστεί σε παραδείγματα από την πραγματική ζωή στις διαλέξεις του. Τα ειδικά πλαίσια έχουν στόχο να δείξουν την επίδραση των ηλεκτρονικών συστημάτων, να τονώσουν το ενδιαφέρον του αναγνώστη για τις διάφορες έννοιες, ή να προσφέρουν ένα στιγμιότυπο των πιο πρόσφατων εξελίξεων στον τομέα.
2. Έχει προστεθεί ένα κεφάλαιο για τους ταλαντωτές. Φυσική εξέλιξη των κυκλωμάτων ανάδρασης, οι διακριτοί και οι ολοκληρωμένοι ταλαντωτές έχουν γίνει απαραίτητοι στις περισσότερες διατάξεις και, γι' αυτόν τον λόγο, τους αξίζει μια αναλυτική εξέταση.
3. Τα προβλήματα στο τέλος των κεφαλαίων έχουν αναδιαταχθεί έτσι ώστε να ταιριάζουν καλύτερα με την πρόοδο του αντίστοιχου κεφαλαίου. Επίσης, για να βοηθήσουμε τον αναγνώστη να βρίσκει γρήγορα τα προβλήματα για κάθε ενότητα, έχουμε προσθέσει τους αντίστοιχους τίτλους ενοτήτων. Εκτός από αυτά, έχουμε κατατάξει τα πιο απαιτητικά προβλήματα σύμφωνα με τον βαθμό δυσκολίας τους με έναν ή δύο αστερίσκους.
4. Μιας και οι φοιτητές συχνά ζητούν τις λύσεις των προβλημάτων ώστε να ελέγξουν την ορθότητα της μεθόδου που ακολούθησαν, έχουμε «ανεβάσει» τις λύσεις των προβλημάτων με περιττό αριθμό στην ιστοσελίδα του βιβλίου (στα Αγγλικά).
5. Έχουν διορθωθεί διάφορα τυπογραφικά λάθη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φοιτητές και τους εκπαιδευτικούς που μου πρόσφεραν πολύτιμα σχόλια και παρατηρήσεις σχετικά με το βιβλίο τα τελευταία πέντε χρόνια και με βοήθησαν να αποφασίσω για τις αναθεωρήσεις που τελικά έγιναν στην παρούσα έκδοση.

Behzad Razavi
Ιανουάριος 2013

Πρόλογος της πρώτης έκδοσης

Με τις προόδους που συντελούνται στους κλάδους των ημιαγωγών και των επικοινωνιών, γίνεται όλο και πιο σημαντικό για τους ηλεκτρολόγους μηχανικούς να κατανοούν επαρκώς τη μικροηλεκτρονική. Το βιβλίο αυτό καλύπτει την ανάγκη για ένα σύγγραμμα το οποίο θα διδάσκει τη μικροηλεκτρονική από μια σύγχρονη και εύκολα κατανοητή προοπτική. Με οδηγό τη βιομηχανική, την ερευνητική, και την ακαδημαϊκή μου πείρα, διάλεξα τα θέματα, τη σειρά, το βάθος και την έκταση έτσι ώστε να μεταδώσω με αποδοτικό τρόπο αρχές της ανάλυσης και του σχεδιασμού τις οποίες οι φοιτητές θα βρουν χρήσιμες κατά τις σπουδές τους.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του βιβλίου είναι η συνθετική ή βασισμένη στον σχεδιασμό προσέγγιση που ακολουθεί. Αντί να βγάζουμε ένα κύκλωμα από μια σακούλα και να προσπαθούμε να το αναλύσουμε, ορίζουμε το γενικό πλαίσιο διατυπώνοντας ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε στην πραγματική ζωή (για παράδειγμα, πώς θα σχεδιάσουμε έναν φορτιστή κινητού τηλεφώνου). Στη συνέχεια, προσπαθούμε να βρούμε μια λύση χρησιμοποιώντας βασικές αρχές και παρουσιάζοντας στην πορεία τόσο τις αποτυχίες όσο και τις επιτυχίες. Όταν φθάνουμε στην τελική λύση, ο φοιτητής έχει δει τον ακριβή ρόλο που παίζει κάθε διάταξη, καθώς και τη λογική ακολουθία σκέψης πίσω από τη σύνθεση του κυκλώματος.

Ένα άλλο απαραίτητο συστατικό του βιβλίου αυτού είναι «η ανάλυση με απλή θεώρηση» (analysis by inspection). Αυτή η «νοοτροπία» αποτελείται από δύο βήματα. Πρώτον, διατυπώνεται η συμπεριφορά των βασικών δομικών στοιχείων με μια «λεκτική» περιγραφή κάθε αναλυτικού αποτελέσματος (για παράδειγμα, «αν κοιτάξουμε μέσα στον εκπομπό, θα δούμε $1/g_m$ »). Δεύτερον, τα μεγαλύτερα κυκλώματα αναλύονται στα συστατικά τους και «απεικονίζονται» σε βασικά δομικά στοιχεία για να αποφευχθεί η ανάγκη χρήσης των κανόνων του Kirchhoff για το ρεύμα και για την τάση. Η προσέγγιση αυτή αφενός μεταδίδει μεγάλη ποσότητα γνώσεων και αφετέρου απλουστεύει την ανάλυση των μεγάλων κυκλωμάτων.

Τα δύο άρθρα που ακολουθούν μετά από αυτόν τον πρόλογο περιέχουν χρήσιμες συστάσεις για φοιτητές και εκπαιδευτικούς. Ελπίζω οι συστάσεις αυτές να κάνουν πιο απολαυστικό το έργο της μάθησης ή της διδασκαλίας της μικροηλεκτρονικής.

Behzad Razavi
Νοέμβριος 2013

Ευχαριστίες

Χρειάστηκαν τέσσερα χρόνια για να γραφεί αυτό το βιβλίο, στη συγγραφή του οποίου συνέβαλαν πολλοί. Θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συμβολή τους στα διάφορα στάδια της εξέλιξης του βιβλίου τους David Allstot (University of Washington), Joel Berlinghieri, Sr. (The Citadel), Bernhard Boser (University of California, Berkeley), Charles Bray (University of Memphis), Marc Cahay (University of Cincinnati), Norman Cox (University of Missouri, Rolla), James Daley (University of Rhode Island), Tranjan Farid (University of North Carolina at Charlotte), Paul Furth (New Mexico State University), Roman Genov (University of Toronto), Maysam Ghovanloo (North Carolina State University), Gennady Gildenblat (Pennsylvania State University), Ashok Goel (Michigan Technological University), Michael Gouzman (SUNY, Stony Brook), Michael Green (University of California, Irvine), Sotoudeh Hamed-Hagh (San Jose State University), Reid Harrison (University of Utah), Payam Heydari (University of California, Irvine), Feng Hua (Clarkson University), Marian Kazmierchuk (Wright State University), Roger King (University of Toledo), Edward Kolesar (Texas Christian University), Ying-Cheng Lai (Arizona State University), Daniel Lau (University of Kentucky, Lexington), Stanislaw Legowski (University of Wyoming), Philip Lopresti (University of Pennsylvania), Mani Mina (Iowa State University), James Morris (Portland State University), Khalil Najafi (University of Michigan), Homer Nazeran (University of Texas, El Paso), Tamara Papalias (San Jose State University), Matthew Radmanesh (California State University, Northridge), Angela Rasmussen (University of Utah), Sal R. Riggio, Jr. (Pennsylvania State University), Ali Sheikholeslami (University of Toronto), Kalpathy B. Sundaram (University of Central Florida), Yannis Tsiividis (Columbia University), Thomas Wu (University of Central Florida), Darrin Young (Case Western Reserve University).

Εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στον Naresh Shanbhag (University of Illinois, Urbana-Champaign) για τη δοκιμαστική χρήση ενός προσχεδίου του βιβλίου σε μια σειρά παραδόσεων και την παροχή πολύτιμων παρατηρήσεων. Το «λυσάρι» κατάρτισαν με επιμέλεια οι φοιτητές του UCLA Lawrence Au, Hamid Hatamkhani, Alireza Mehrnia, Alireza Razzaghi, William Wai-Kwok Tang, και Ning Wang. Ο Ning Wang ετοίμασε επίσης τις διαφάνειες του Powerpoint για όλο το βιβλίο. Οι Eudean Sun (University of California, Berkeley) και John Tyler (Texas A&M University) έκαναν τους απαραίτητους ελέγχους. Τις ευχαριστίες μου για τη σκληρή δουλειά τους.

Ευχαριστώ την εκδότριά μου, την Catherine Shultz, για τη αφοσίωση και το κέφι που έδειξε. Είμαι ευγνώμων επίσης στους Lucille Buonocore, Carmen Hernandez, Dana Kellogg, Madelyn Lesure, Christopher Ruel, Kenneth Santor, Lauren Sapira, Daniel Sayre, Gladys Soto, και Carolyn Weisman της Wiley και Bill Zobrist (που εργαζόταν πριν στη Wiley). Εξάλλου, θέλω να ευχαριστήσω τις Jessica Knecht και Joyce Poh για τη σκληρή δουλειά τους στη δεύτερη έκδοση.

Η σύζυγός μου, η Angelina, πληκτρολόγησε το σύνολο του βιβλίου και διατήρησε το χιούμορ της παρά την παράταση του έργου. Θα ήθελα να της δώσω τις βαθύτερες ευχαριστίες μου.

Behzad Razavi

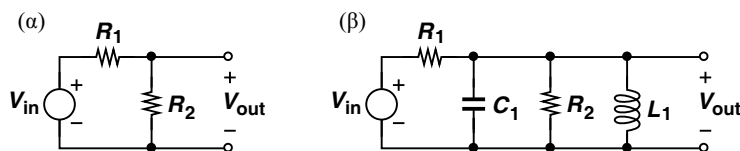
Συστάσεις για τους φοιτητές

Σε λίγο θα ξεκινήσετε ένα ταξίδι στον γοητευτικό κόσμο της μικροηλεκτρονικής. Ευτυχώς, η μικροηλεκτρονική εμφανίζεται σε τόσο πολλές πλευρές της ζωής μας ώστε να μπορούμε να βρούμε εύκολα αρκετά κίνητρα για να τη μελετήσουμε. Παρόλα αυτά, η ανάγνωση δεν είναι τόσο εύκολη όσο αυτή ενός μυθιστορήματος: θα πρέπει να ασχοληθούμε με ανάλυση και σχεδιασμό, εφαρμόζοντας μαθηματική αυστηρότητα καθώς και τεχνική αντίληψη σε κάθε βήμα της διαδικασίας. Το άρθρο αυτό περιέχει μερικές συστάσεις που οι φοιτητές θα βρουν χρήσιμες κατά τη μελέτη της μικροηλεκτρονικής.

Αυστηρότητα και αντίληψη Πριν διαβάσετε αυτό το βιβλίο, έχετε παρακολουθήσει κάποια μαθήματα βασικής θεωρίας κυκλωμάτων, και μάθατε να εφαρμόζετε τους κανόνες του Kirchhoff και να χρησιμοποιείτε ανάλυση κυκλωμάτων RLC. Παρόλο που είναι αρκετά αφηρημένες και φαινομενικά τουλάχιστον δεν συνδέονται με την πραγματική ζωή, οι έννοιες που μελετήσατε στις παραδόσεις αυτές θέτουν τα θεμέλια της μικροηλεκτρονικής — ακριβώς όπως και ο μαθηματικός λογισμός για τη μηχανική.

Ο τρόπος που θα εξετάσουμε τη μικροηλεκτρονική απαιτεί επίσης αυστηρότητα, αλλά περιλαμβάνει και δύο πρόσθετα συστατικά. Πρώτον, προσδιορίζουμε πολλές εφαρμογές των εννοιών που μελετούμε. Δεύτερον, θα πρέπει να αναπτύξουμε αντίληψη και *διαίσθηση*, δηλαδή μια «αίσθηση» για τη λειτουργία των μικροηλεκτρονικών διατάξεων και κυκλωμάτων. Χωρίς διαισθητική κατανόηση, η ανάλυση των κυκλωμάτων γίνεται όλο και πιο δύσκολη καθώς προσθέτουμε περισσότερες διατάξεις για να εκτελέσουμε όλο και πιο πολύπλοκες λειτουργίες.

Ανάλυση με απλή θεώρηση Θα καταβάλουμε σημαντική προσπάθεια για να αποκτήσουμε τη νοοτροπία και τις ικανότητες που είναι απαραίτητες για την «ανάλυση με απλή θεώρηση» (analysis by inspection). Δηλαδή, όταν βλέπουμε ένα πολύπλοκο κύκλωμα, θέλουμε να το αναλύσουμε ή να το «αντιστοιχίσουμε» σε πιο απλές τοπολογίες, διατυπώνοντας έτσι τη συμπεριφορά του μέσα σε λίγες γραμμές άλγεβρας. Ως ένα απλό παράδειγμα, υποθέστε ότι έχουμε συναντήσει τον ωμικό διαιρέτη (resistive divider) που βλέπετε στην Εικ. (α) και βρήκαμε το ισοδύναμο Thevenin. Τώρα, αν μας δοθεί το κύκλωμα της Εικ. (β), μπορούμε εύκολα να αντικαταστήσουμε τις V_{in} , R_1 , και R_2 με ένα ισοδύναμο Thevenin, απλοποιώντας έτσι τους υπολογισμούς.



Παράδειγμα ανάλυσης με απλή θεώρηση.

40 σελίδες την εβδομάδα Όσο παρακολουθείτε τα μαθήματα της μικροηλεκτρονικής, θα πρέπει να διαβάσετε περίπου 40 σελίδες του βιβλίου αυτού κάθε εβδομάδα, με κάθε σελίδα να περιέχει πολλές νέες έννοιες, αποδείξεις σχέσεων, και παραδείγματα. Οι παραδόσεις του διδάσκοντος δημιουργούν έναν «σκελετό» κάθε κεφαλαίου, αλλά επαφίεται σε εσάς να συνδέσετε τις έννοιες διαβάζοντας το βιβλίο προσεκτικά και κατανοώντας πλήρως κάθε παράγραφο πριν προχωρήσετε στην επόμενη.

Η ανάγνωση και η κατανόηση 40 σελίδων του βιβλίου κάθε εβδομάδα απαιτεί συγκέντρωση και πειθαρχία. Θα συναντήσετε νέα ύλη και αναλυτικές αποδείξεις σχέσεων σε κάθε σελίδα και θα πρέπει να αφιερώνετε δύο ή τρεις ώρες χωρίς περισπασμούς (όχι τηλεφωνήματα, τηλεόραση, μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, κ.λπ.) ώστε να μπορείτε να παρακολουθείτε την εξέλιξη των εννοιών ενώ ταυτόχρονα ακονίζετε τις αναλυτικές σας ικανότητες. Σας συμβουλεύω επίσης να δοκιμάζετε να λύσετε μόνοι σας κάθε παράδειγμα πριν διαβάσετε τη λύση του.

40 προβλήματα την εβδομάδα Αφού διαβάσετε κάθε ενότητα και τα παραδείγματά της, καλό είναι να αξιολογείτε και να βελτιώνετε την κατανόησή σας δοκιμάζοντας να λύσετε τα αντίστοιχα προβλήματα στο τέλος του κεφαλαίου. Τα προβλήματα αυτά ξεκινούν από ένα σχετικά εύκολο επίπεδο και σταδιακά γίνονται όλο και πιο δύσκολα. Για μερικά προβλήματα μπορεί να χρειαστεί να επιστρέψετε στην αντίστοιχη ενότητα και να μελετήσετε κάποια λεπτά σημεία πιο προσεκτικά.

Η διδακτική αξία κάθε προβλήματος εξαρτάται από την επιμονή σας. Την πρώτη φορά που θα διαβάσετε το πρόβλημα μπορεί να απογοητευθείτε. Όσο όμως το σκέπτεστε από διάφορες οπτικές γωνίες και, το πιο σημαντικό, επανεξετάζετε τις έννοιες του κεφαλαίου, θα αρχίσετε να σχηματίζετε στο μυαλό σας μια πορεία που θα σας οδηγήσει στη λύση του. Για την ακρίβεια, αν έχετε επεξεργαστεί κάποιο πρόβλημα εκτεταμένα και δεν το έχετε λύσει ακόμη, δεν χρειάζεστε παρά μόνο μια μικρή υπόδειξη από τον καθηγητή σας. Επίσης, όσο πιο σκληρά προσπαθείτε να λύσετε ένα πρόβλημα, τόσο πιο εύκολα θα θυμάστε τη λύση του.

Η παρακολούθηση των παραδόσεων και η ανάγνωση του βιβλίου αποτελούν παραδείγματα «παθητικής μάθησης»: Απλώς δέχεστε (και, ελπίζουμε, κάνετε κτήμα σας) μια ροή πληροφοριών που παρέχονται από τον διδάσκοντα και το βιβλίο. Αν και απαραίτητη, η παθητική μάθηση δεν *εξασκεί* την κατανόησή σας, και έτσι της λείπει το βάθος. Μπορείτε να επισημάνετε πολλές γραμμές του κειμένου ως σημαντικές. Μπορείτε ακόμη και να συνοψίσετε τις πιο σημαντικές έννοιες σε ένα φύλλο χαρτί (και σας προτείνουμε ανεπιφύλακτα να το κάνετε). Για να κάνετε όμως πραγματικά κτήμα σας την ύλη, χρειάζεστε εξάσκηση («ενεργητική μάθηση»). Οι ομάδες προβλημάτων στο τέλος κάθε κεφαλαίου εξυπηρετούν αυτόν τον σκοπό.

Εργασίες και εξετάσεις Όταν λύνετε τα προβλήματα στο τέλος κάθε κεφαλαίου, προετοιμάζεστε επίσης για τις εργασίες και τις εξετάσεις. Οι εργασίες απαιτούν να αφιερώνετε χωρίς περισπασμούς χρονικά διαστήματα στη διάρκεια των οποίων εφαρμόζετε τις γνώσεις σας και τελειοποιείτε την κατανόησή σας. Μια σημαντική συμβουλή που μπορώ να σας προσφέρω στο σημείο αυτό είναι ότι είναι κακή ιδέα να κάνετε τις εργασίες σας μαζί με συμφοιτητές σας! Αντίθετα με άλλα είδη ύλης στα οποία είναι επωφελής η συζήτηση, η επιχειρηματολογία, και οι αντιρρήσεις, η μάθηση της μικροηλεκτρονικής απαιτεί ηρεμία και συγκέντρωση. (Άλλωστε, στις εξετάσεις θα είστε εσείς και ο εαυτός σας!) Για να αποκτήσετε περισσότερη αυτοπεποίθηση στις λύσεις, μπορείτε να συζητήσετε τα αποτελέσματα με τους συμφοιτητές σας, τον διδάσκοντα, ή άλλα μέλη του εκπαιδευτικού προσωπικού αφού ολοκληρώσετε την εργασία μόνοι σας.

Διαχείριση του χρόνου Η ανάγνωση της θεωρίας, η λύση των προβλημάτων, και η ολοκλήρωση των εργασιών απαιτούν από εσάς τουλάχιστον 10 ώρες την εβδομάδα. Λόγω της γρήγορης εξέλιξης των μαθημάτων, η ύλη συσσωρεύεται ταχύτατα, οπότε θα δυσκολευτείτε να παρακολουθήσετε τις παραδόσεις αν δεν αφιερώσετε τον απαραίτητο χρόνο από την πρώτη κιόλας εβδομάδα. Για την ακρίβεια, όσο περισσότερο μένετε πίσω, τόσο λιγότερο ενδιαφέρον και χρησιμότητα θα έχουν οι παραδόσεις, αναγκάζοντάς σας απλώς να κρατάτε σημειώσεις με όλα όσα παραδίδει ο διδάσκων παρόλο που δεν θα καταλαβαίνετε και πολλά από αυτά. Καθώς τα υπόλοιπα μαθήματά σας απαιτούν ανάλογες χρονικές δεσμεύσεις, σύντομα μπορεί να νιώσετε απελπισία αν δεν διαχειριστείτε τον χρόνο σας με προσοχή.

Η διαχείριση του χρόνου αποτελείται από δύο βήματα: (1) τον επιμερισμό του χρόνου σας και (2) την *αποδοτική* αξιοποίησή του. Για να βελτιώσετε την αποδοτικότητα, μπορείτε: (α) να εργαστείτε σε ένα ήσυχο περιβάλλον για να ελαχιστοποιήσετε τους περισπασμούς· (β) να καταναίμετε την εργασία επάνω σε ένα συγκεκριμένο θέμα σε όλη την εβδομάδα (για παράδειγμα, 3 ώρες κάθε μέρα) ώστε να αποφύγετε τον κορεσμό και να δώσετε στο υποσυνείδητό σας τον χρόνο να επεξεργάζεται τις έννοιες στο μεταξύ.

Προαπαιτούμενα Πολλές από τις έννοιες που μάθατε στα μαθήματα θεωρίας των κυκλωμάτων θα φανούν ότι είναι βασικές για τη μελέτη της μικροηλεκτρονικής. Στο Κεφάλαιο 1 θα διαβάσετε μια σύντομη ανασκόπηση για να φρεσκάρете τη μνήμη σας. Στον περιορισμένο χρόνο των παραδόσεων, ο διδάσκων μπορεί να μην μπορέσει να καλύψει την ύλη αυτή στην τάξη, αφήνοντάς σας να τη μελετήσετε στο σπίτι. Μπορείτε στην αρχή να ρίξετε μια ματιά στο κεφάλαιο και να δείτε ποιες έννοιες σας «προβληματίζουν» πριν καθίσετε κάτω και συγκεντρωθείτε στη μελέτη τους.

Συστάσεις για τους διδάσκοντες

Η διδασκαλία προπτυχιακών μαθημάτων αποδεικνύεται αρκετά δύσκολη — ιδιαίτερα αν δίνεται έμφαση στον συλλογισμό και τα συμπεράσματα παρά στην απομνημόνευση. Σήμερα που οι νέοι χρησιμοποιούν το μυαλό τους για να παίζουν γρήγορα εξελισσόμενα βιντεοπαιχνίδια και για να ανοίγουν διάφορους συνδέσμους στο Διαδίκτυο, γίνεται όλο και πιο δύσκολο να τους ενθαρρύνουμε να συγκεντρώνονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να ασχολούνται με αφηρημένες έννοιες. Με βάση τη διδακτική πείρα μίας και πλέον δεκαετίας, στο άρθρο αυτό δίνουμε συστάσεις και συμβουλές για τους διδάσκοντες της μικροηλεκτρονικής.

Αγωγή Οι φοιτητές που παρακολουθούν το πρώτο τους μάθημα μικροηλεκτρονικής έχουν ολοκληρώσει κατά κανόνα μία ή δύο σειρές μαθημάτων βασικής θεωρίας κυκλωμάτων. Για πολλούς, η εμπειρία αυτή δεν ήταν ιδιαίτερα αξιομνημόνευτη. Άλλωστε, το βιβλίο της θεωρίας κυκλωμάτων κατά πάσα πιθανότητα είναι γραμμένο από κάποιον που δεν ανήκει στον συγκεκριμένο κλάδο. Αντίστοιχα, τα μαθήματα παραδίδονται μάλλον από έναν διδάσκοντα ο οποίος έχει ασχοληθεί ελάχιστα με τον σχεδιασμό κυκλωμάτων. Για παράδειγμα, στους φοιτητές σπάνια λέγεται ότι η ανάλυση κόμβων (node analysis) χρησιμοποιείται πολύ πιο συχνά σε υπολογισμούς «με το χέρι» από την ανάλυση πλέγματος (mesh analysis). Ή, εφοδιάζονται με λίγη αντίληψη και διαίσθηση όσον αφορά τα θεωρήματα του Thevenin και του Norton.

Έχοντας κατά νου τα προηγούμενα ζητήματα, ξεκινώ την πρώτη σειρά μαθημάτων με ένα πεντάλεπτο «εξοικείωσης». Ρωτώ σε πόσους από αυτούς άρεσαν τα μαθήματα της θεωρίας κυκλωμάτων και αισθάνονται ότι τους χάρισαν «πρακτική» κατανόηση. Πολύ λίγοι είναι αυτοί που σηκώνουν το χέρι τους. Στη συνέχεια τους ρωτώ: «Τι έχετε να πείτε για τα μαθήματα του μαθηματικού λογισμού; Πόσοι από σας απέκτησαν "πρακτική κατανόηση" από αυτά;» Μετά, εξηγώ ότι η θεωρία κυκλωμάτων βάζει τα θεμέλια για τη μικροηλεκτρονική, ακριβώς όπως κάνει ο μαθηματικός λογισμός για τη μηχανική. Έπειτα αναφέρω ότι θα πρέπει να αναμένεται κάποιο επίπεδο αφαίρεσης και στη μικροηλεκτρονική καθώς ολοκληρώνουμε τα θεμέλια για πιο προχωρημένα θέματα της ανάλυσης και του σχεδιασμού κυκλωμάτων. Κατόπιν τονίζω ότι (1) η μικροηλεκτρονική βασίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στη διαισθητική κατανόηση, απαιτώντας από εμάς όχι απλώς να γράφουμε τους κανόνες του Kirchhoff για το ρεύμα και την τάση, αλλά και να ερμηνεύουμε τις μαθηματικές παραστάσεις με διαίσθηση, και (2) τα μαθήματα αυτά προσφέρουν πολλές εφαρμογές των μικροηλεκτρονικών διατάξεων και κυκλωμάτων στην καθημερινή μας ζωή. Με άλλα λόγια, η μικροηλεκτρονική δεν είναι τόσο «ξερή» όπως τα τυχαία κυκλώματα RLC που αποτελούνται από αντιστάσεις του $1\ \Omega$, πηνία αυτεπαγωγής του $1\ \text{H}$, και πυκνωτές του $1\ \text{F}$.

Το πρώτο κουίζ Μιας και οι διάφοροι φοιτητές που λαμβάνουν μέρος σε κάθε σειρά μαθημάτων έχουν διαφορετικά επίπεδα προετοιμασίας, έχω διαπιστώσει ότι είναι χρήσιμο να κάνω ένα δεκάλεπτο κουίζ στο πρώτο κιόλας μάθημα. Τονίζοντας ότι το κουίζ δεν πρόκειται να μετρήσει στη βαθμολογία τους, αλλά εξυπηρετεί ως ένα μέτρο του βαθμού κατανόησης που έχουν αποκτήσει, δίνω έμφαση στο γεγονός ότι στόχος μου είναι να μετρήσω τις γνώσεις τους και όχι την ευφυΐα τους. Αφού συγκεντρώσω τις απαντήσεις τους, ζητώ από έναν από τους βοηθούς να κάνει μια αρχική διαλογή: Σημαδεύω τα γραπτά των φοιτητών που παίρνουν λιγότερο από 50% με έναν κόκκινο αστερίσκο. Στο τέλος της παράδοσης, τους επιστρέφω τα κουίζ και λέω ότι όσοι έχουν τον κόκκινο αστερίσκο θα πρέπει να δουλέψουν πιο σκληρά και να είναι περισσότερο σε επαφή με τους διδάσκοντες βοηθούς και μαζί μου.

Η γενική εικόνα Ένα πανίσχυρο εργαλείο ενθάρρυνσης των υποψήφιων διδασκόντων στη διδασκαλία είναι η «γενική εικόνα», δηλαδή η «πρακτική» εφαρμογή της υπό μελέτη έννοιας. Τα δύο παραδείγματα μικροηλεκτρονικών συστημάτων που περιγράφουμε στο Κεφάλαιο 1 εξυπηρετούν ως το πρώτο βήμα προς τη δημιουρ-

γία του πλαισίου της ύλης που θα καλύψουμε στο παρόν βιβλίο. Όμως, η γενική εικόνα δεν μπορεί να σταματάει εδώ. Κάθε νέα έννοια μπορεί να χρειάζεται να τεθεί σε εφαρμογή — όσο σύντομη και να είναι η αναφορά στην εφαρμογή — και αυτό γίνεται κατά κύριο λόγο στις παραδόσεις παρά στο βιβλίο.

Στην επιλογή της εφαρμογής θα πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή. Αν η περιγραφή είναι υπερβολικά εκτενής ή το αποτέλεσμα υπερβολικά αφηρημένο, οι φοιτητές είναι πιθανό να μη διακρίνουν τη σύνδεση μεταξύ της έννοιας και της εφαρμογής. Η γενική προσέγγιση που ακολουθώ είναι η εξής: Ας υποθέσουμε ότι είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε το Κεφάλαιο 2 (Φυσική των ημιαγωγών). Κάνω την ερώτηση «Πώς θα ήταν ο κόσμος μας χωρίς τους ημιαγωγούς;» ή «Υπάρχει κάποια διάταξη ημιαγωγών στο ρολόι σας; Στο κινητό σας τηλέφωνο; Στον φορητό σας υπολογιστή; Στην ψηφιακή φωτογραφική μηχανή σας;» Στη συζήτηση που ακολουθεί, γρήγορα δίνω παραδείγματα διατάξεων ημιαγωγών και αναφέρω πού χρησιμοποιούνται.

Αφού δώσω τη γενική εικόνα, δίνω πρόσθετα κίνητρα στους φοιτητές ρωτώντας: «Ναι, αλλά δεν είναι παλιά όλα αυτά; Για ποιον λόγο θα πρέπει να μάθουμε γι' αυτά;» Στη συνέχεια μιλώ για λίγο σχετικά με τις δυσκολίες στον σημερινό σχεδιασμό κυκλωμάτων και τον ανταγωνισμό ανάμεσα στους κατασκευαστές με στόχο τόσο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας όσο και το κόστος των φορητών συσκευών.

Ανάλυση ή σύνθεση; Ας σκεφθούμε το υπόβαθρο των φοιτητών που αρχίζουν να παρακολουθούν μαθήματα μικροηλεκτρονικής. Μπορούν να γράψουν άνετα τον κανόνα του Kirchhoff για την τάση και τον κανόνα του Kirchhoff για το ρεύμα. Έχουν επίσης δει αρκετά «τυχαία» κυκλώματα RLC· δηλαδή, για τους φοιτητές αυτούς όλα τα κυκλώματα RLC φαίνονται ίδια, και δεν είναι σαφές με ποιον τρόπο προέκυψαν. Από την άλλη, ένας από τους βασικούς στόχους στη διδασκαλία της μικροηλεκτρονικής είναι η δημιουργία συγκεκριμένων τοπολογιών κυκλωμάτων που προσφέρουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Θα πρέπει επομένως να αλλάξουμε τη νοοτροπία των φοιτητών από «Να ένα κύκλωμα που μπορεί να μην ξαναδείτε ποτέ στη ζωή σας. Αναλύστε το!» σε «Αντιμετωπίζουμε το επόμενο πρόβλημα και θα πρέπει να δημιουργήσουμε (να συνθέσουμε) ένα κύκλωμα που λύνει το πρόβλημα αυτό». Μπορούμε στη συνέχεια να ξεκινήσουμε από την πιο απλή τοπολογία, να αναγνωρίσουμε τα μειονεκτήματά της, και να την τροποποιήσουμε πολλές φορές μέχρι να καταλήξουμε σε μια αποδεκτή λύση. Αυτή η συνθετική προσέγγιση (α) δείχνει τον ρόλο κάθε διάταξης που περιλαμβάνεται στο κύκλωμα, (β) καθιερώνει μια νοοτροπία «προσανατολισμένη στον σχεδιασμό», και (γ) συνδυάζει τις διανοητικές ικανότητες και το ενδιαφέρον των φοιτητών.

Ανάλυση με απλή θεώρηση Στο ταξίδι τους στον κόσμο της μικροηλεκτρονικής, οι φοιτητές αντιμετωπίζουν όλο και πιο πολύπλοκα κυκλώματα, καταλήγοντας στο τέλος σε ένα σημείο στο οποίο η απλή γραφή του κανόνα του Kirchhoff για την τάση και του κανόνα του Kirchhoff για το ρεύμα γίνεται εξαιρετικά μη αποδοτική, έως και απαγορευτική. Σε μια από τις πρώτες διαλέξεις μου, παρουσιάζω το εσωτερικό κύκλωμα ενός σύνθετου τελεστικού ενισχυτή και ρωτώ: «Μπορούμε να αναλύσουμε τη συμπεριφορά του κυκλώματος αυτού γράφοντας απλώς εξισώσεις κόμβων ή πλέγματος;» Επομένως, είναι σημαντικό να ενσταλάξουμε στους φοιτητές την έννοια της «ανάλυσης με απλή θεώρηση». Η προσέγγισή μου αποτελείται από δύο βήματα: (1) Για κάθε απλό κύκλωμα, διατυπώνουμε τις ιδιότητες σε μια διαισθητική γλώσσα· για παράδειγμα, «το κέρδος τάσης μιας βαθμίδας κοινής πηγής δίνεται από το πηλίκο της αντίστασης φορτίου προς $1/g_m$ συν την αντίσταση που συνδέει την πηγή με τη γείωση». (2) Αντιστοιχίζουμε πολύπλοκα κυκλώματα σε μία ή περισσότερες τοπολογίες που μελετήσαμε στο βήμα (1).

Εκτός από την αποδοτικότητα, η ανάλυση με απλή θεώρηση παρέχει επίσης εξαιρετική αντίληψη και βαθιά γνώση των πραγμάτων. Καθώς καλύπτουμε διάφορα παραδείγματα, τονίζω στους φοιτητές ότι τα αποτελέσματα που έχουμε βρει ως εκείνο το σημείο αποκαλύπτουν τις εξαρτήσεις του κυκλώματος πολύ πιο καθαρά από ό,τι αν γράφαμε τον κανόνα του Kirchhoff για την τάση και τον κανόνα του Kirchhoff για το ρεύμα χωρίς αντιστοίχιση.

Περιπέτειες με υποθετικά σενάρια Μια ενδιαφέρουσα μέθοδος επανακαθορισμού των ιδιοτήτων ενός κυκλώματος είναι να κάνουμε μια ερώτηση όπως η εξής: «Τι θα γίνει αν συνδέσουμε αυτή τη διάταξη στους κόμβους C και D αντί στους κόμβους A και B;» Για την ακρίβεια, οι ίδιοι οι φοιτητές κάνουν συχνά παρόμοιες ερωτήσεις. Η απάντησή μου σε αυτές είναι: «Μη φοβάστε! Το κύκλωμα δεν πρόκειται να σας δαγκώσει αν το αλλάξετε έτσι. Προχωρήστε λοιπόν, και αναλύστε το στη νέα του μορφή.»

Στην περίπτωση απλών κυκλωμάτων, μπορούμε να ενθαρρύνουμε τους φοιτητές να σκεφθούν διάφορες πιθανές τροποποιήσεις και να προσδιορίσουν τη συμπεριφορά που θα προκύψει. Έτσι, οι φοιτητές αισθάνονται πιο άνετα με την αρχική τοπολογία και καταλαβαίνουν γιατί είναι η μόνη αποδεκτή λύση (εφόσον αυτό είναι αλήθεια).

Αριθμητικοί ή αλγεβρικοί υπολογισμοί; Κατά την κατάρτιση των παραδειγμάτων, των εργασιών, και των εξετάσεων, ο διδάσκων θα πρέπει να αποφασίσει μεταξύ αριθμητικών και αλγεβρικών υπολογισμών. Οι φοιτητές είναι πιθανό, όπως είναι φυσικό, να προτιμούν την πρώτη μορφή, επειδή το μόνο που απαιτεί είναι η εύρεση της αντίστοιχης εξίσωσης και η τοποθέτηση των αριθμών σε αυτή.

Ποια είναι η αξία των αριθμητικών υπολογισμών; Κατά τη γνώμη μου, είτε κάνουν τους φοιτητές να νιώθουν άνετα με τα πρόσφατα αποτελέσματα, είτε τους δίνουν μια αίσθηση των τυπικών τιμών που θα συναντήσουν στην πράξη. Επομένως, οι αριθμητικοί υπολογισμοί έχουν περιορισμένο ρόλο στη διδασκαλία και την κατανόηση των εννοιών.

Οι αλγεβρικοί υπολογισμοί, από την άλλη, μπορούν να προσφέρουν βαθιά κατανόηση της συμπεριφοράς του κυκλώματος, αποκαλύπτοντας εξαρτήσεις, τάσεις, και όρια. Επίσης, τα αποτελέσματα που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιο πολύπλοκα παραδείγματα.

Μαυροπίνακας ή Powerpoint; Συνιστώ στους διδάσκοντες να εξετάζουν πολύ προσεκτικά τα θετικά και τα αρνητικά της παρουσίασης στον μαυροπίνακα και μέσω διαφανειών στο Powerpoint.

Έχω παρατηρήσει τα εξής: (1) Πολλοί φοιτητές αποκοιμούνται (τουλάχιστον πνευματικά) στην τάξη αν δεν γράφουν. (2) Πολλοί άλλοι νιώθουν ότι έχουν χάσει κάτι αν δεν γράφουν. (3) Οι περισσότεροι φοιτητές θυμούνται πιο εύκολα οτιδήποτε σημειώνουν στο χαρτί. (4) Η χρήση διαφανειών επιταχύνει την παράδοση («εφόσον δεν γράφουμε, θα πρέπει να προχωρήσουμε!»), αφήνοντας ελάχιστο χρόνο στους φοιτητές για να «χωνέψουν» τις έννοιες. Για τους λόγους αυτούς, ακόμη και όταν οι φοιτητές πάρουν ένα αντίγραφο των διαφανειών, αυτός ο τύπος παρουσίασης αποδεικνύεται αρκετά αναποτελεσματικός.

Για να βελτιώσετε την κατάσταση, μπορείτε να αφήνετε κενό χώρο στις διαφάνειές σας και να τον γεμίζετε με κρίσιμα και ενδιαφέροντα αποτελέσματα επιτόπου. Έχω δοκιμάσει τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιώντας διαφάνειες και, πιο πρόσφατα, υπολογιστές ταμπλέτες. Η προσέγγιση είναι αρκετά αποτελεσματική για μεταπτυχιακά μαθήματα, αλλά στους προπτυχιακούς φοιτητές προκαλεί ανία ή αμηχανία.

Το συμπέρασμα στο οποίο έχω καταλήξει είναι ότι ο παλιός καλός μαυροπίνακας εξακολουθεί να είναι το καλύτερο μέσο για τη διδασκαλία της προπτυχιακής μικροηλεκτρονικής. Παρόλα αυτά, μπορείτε κάποιες φορές να ετοιμάσετε και να χρησιμοποιήσετε τυπωμένες διαφάνειες του Powerpoint ως οδηγό για τη ροή του μαθήματος.

Διακριτά ή ολοκληρωμένα; Πόση έμφαση θα πρέπει να δίνει μια σειρά μαθημάτων μικροηλεκτρονικής στα διακριτά και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα; Για τους περισσότερους από εμάς, ο όρος «μικροηλεκτρονική» παραμένει συνώνυμος με τα «ολοκληρωμένα κυκλώματα» και, για την ακρίβεια, κάποια πανεπιστημιακά προγράμματα έχουν σταδιακά μειώσει τον σχεδιασμό διακριτών κυκλωμάτων σχεδόν στο μηδέν. Όμως, μόνον ένα μικρό μέρος των φοιτητών που παρακολουθούν τέτοια μαθήματα απασχολούνται στο τέλος ενεργά σε προϊόντα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ενώ πολλοί από αυτούς καταλήγουν στον σχεδιασμό πλακετών.

Η μέθοδος που ακολουθώ στο παρόν βιβλίο είναι να ξεκινώ με τις γενικές έννοιες που ισχύουν και στα δύο υποδείγματα και σιγά-σιγά να επικεντρώνομαι στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Πιστεύω επίσης ότι ακόμη και οι σχεδιαστές πλακετών θα πρέπει να γνωρίζουν τα βασικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιούν.

Διπολικά τρανζίστορ ή MOSFET; Προς το παρόν, υπάρχει κάποια διχογνωμία γύρω από τη συμπερίληψη των διπολικών τρανζίστορ και κυκλωμάτων στην προπτυχιακή μικροηλεκτρονική. Με τα MOSFET να κυριαρχούν στην αγορά των ημιαγωγών, φαίνεται ότι οι διπολικές διατάξεις δεν έχουν και μεγάλη αξία. Αν και η άποψη αυτή μπορεί να ισχύει σε κάποιο βαθμό για τα πτυχιακά μαθήματα, δεν θα πρέπει να ξεχνούμε ότι (1) όπως είπαμε και παραπάνω, πολλοί προπτυχιακοί φοιτητές καταλήγουν στον σχεδιασμό πλακετών και διακριτών κυκλωμάτων και είναι πιθανό να συναντήσουν στον δρόμο τους διπολικές διατάξεις, και (2) οι

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ	27	3.2	Η επαφή $p-n$ ως δίοδος.....	96
1.1	Ηλεκτρονικά και μικροηλεκτρονική	27	3.3	Πρόσθετα παραδείγματα.....	98
1.2	Παραδείγματα ηλεκτρονικών συστημάτων..	28	3.4	Λειτουργία μεγάλου και μικρού σήματος...	103
1.2.1	Το κινητό τηλέφωνο	28	3.5	Εφαρμογές των διόδων	111
1.2.2	Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή	31	3.5.1	Ημιανορθωτές και ανορθωτές πλήρους κύματος	111
1.2.3	Αναλογικό ή ψηφιακό.....	33	3.5.2	Ρύθμιση της τάσης.....	123
1.3	Βασικές έννοιες.....	34	3.5.3	Κυκλώματα περιορισμού (περιοριστές).....	126
1.3.1	Αναλογικά και ψηφιακά σήματα	34	3.5.4	Διπλασιαστές τάσης.....	129
1.3.2	Αναλογικά κυκλώματα	35	3.5.5	Οι δίοδοι ως μετατροπείς στάθμης και διακόπτες	134
1.3.3	Ψηφιακά κυκλώματα	37	3.6	Περίληψη κεφαλαίου	136
1.3.4	Βασικά θεωρήματα των κυκλωμάτων.....	38		Προβλήματα.....	137
1.4	Περίληψη κεφαλαίου	46		Προβλήματα SPICE.....	144
2	ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ	47	4	ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΔΙΠΟΛΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ	147
2.1	Τα υλικά των ημιαγωγών και οι ιδιότητές τους.....	48	4.1	Γενικά ζητήματα	147
2.1.1	Φορείς φορτίων σε στερεά.....	48	4.2	Δομή του διπολικού τρανζίστορ	149
2.1.2	Τροποποίηση της πυκνότητας των φορέων	50	4.3	Λειτουργία διπολικού τρανζίστορ στην ενεργό κατάσταση	150
2.1.3	Μεταφορά των φορέων.....	53	4.3.1	Ρεύμα συλλέκτη.....	152
2.2	Επαφή $p-n$	61	4.3.2	Ρεύματα βάσης και εκπομπού	156
2.2.1	Η επαφή $p-n$ σε ισορροπία	62	4.4	Μοντέλα και χαρακτηριστικές διπολικών τρανζίστορ	157
2.2.2	Η επαφή $p-n$ υπό ανάστροφη πόλωση.....	67	4.4.1	Μοντέλο μεγάλου σήματος	157
2.2.3	Η επαφή $p-n$ υπό ορθή πόλωση.....	70	4.4.2	Χαρακτηριστικές έντασης/τάσης....	159
2.2.4	Χαρακτηριστικές έντασης/τάσης	73	4.4.3	Η έννοια της διαγωγιμότητας	161
2.3	Ανάστροφη κατάρρευση	78	4.4.4	Μοντέλο μικρού σήματος.....	164
2.3.1	Κατάρρευση Zener.....	78	4.4.5	Το φαινόμενο Early	168
2.3.2	Κατάρρευση χιονοστιβάδας.....	79	4.5	Λειτουργία διπολικού τρανζίστορ σε κατάσταση κορεσμού.....	173
2.4	Περίληψη κεφαλαίου	79	4.6	Το τρανζίστορ pnp	176
	Προβλήματα	80	4.6.1	Δομή και λειτουργία	177
	Προβλήματα SPICE	82	4.6.2	Μοντέλο μεγάλου σήματος	177
3	ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΔΙΟΔΩΝ	85	4.6.3	Μοντέλο μικρού σήματος.....	180
3.1	Η ιδανική δίοδος	85	4.7	Περίληψη κεφαλαίου	183
3.1.1	Αρχικές σκέψεις.....	85		Προβλήματα.....	184
3.1.2	Η ιδανική δίοδος	87		Προβλήματα SPICE.....	191
3.1.3	Παραδείγματα εφαρμογής	91			

5 ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΜΕ ΔΙΠΟΛΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ 193

5.1	Γενικά ζητήματα	193
5.1.1	Αντιστάσεις εισόδου και εξόδου....	194
5.1.2	Πόλωση.....	198
5.1.3	Ανάλυση συνεχούς ρεύματος (DC) και ανάλυση μικρού σήματος	198
5.2	Ανάλυση σημείου λειτουργίας και σχεδιασμός	200
5.2.1	Απλή πόλωση.....	201
5.2.2	Πόλωση με ωμικό διαιρέτη τάσης ..	204
5.2.3	Πόλωση με αντίσταση στον εκπομπό.....	207
5.2.4	Βαθμίδα αυτοπόλωσης.....	211
5.2.5	Πόλωση τρανζίστορ <i>pnp</i>	214
5.3	Τοπολογίες ενισχυτών με διπολικά τρανζίστορ.....	217
5.3.1	Τοπολογία κοινού εκπομπού.....	218
5.3.2	Τοπολογία κοινής βάσης.....	244
5.3.3	Ακόλουθος εκπομπού	260
5.4	Περίληψη και πρόσθετα παραδείγματα	268
5.5	Περίληψη κεφαλαίου	274
	Προβλήματα.....	275
	Προβλήματα SPICE	288

6 ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ MOS 291

6.1	Δομή των διατάξεων MOSFET.....	291
6.2	Λειτουργία των MOSFET.....	294
6.2.1	Ποιοτική ανάλυση.....	294
6.2.2	Εύρεση των χαρακτηριστικών έντασης-τάσης.....	300
6.2.3	Διαμόρφωση μήκους καναλιού.....	309
6.2.4	Διαγωγιμότητα διατάξεων MOS....	311
6.2.5	Κορεσμός ταχύτητας.....	312
6.2.6	Άλλα φαινόμενα δεύτερης τάξης ...	312
6.3	Μοντέλα διατάξεων MOS.....	314
6.3.1	Μοντέλο μεγάλου σήματος.....	314
6.3.2	Μοντέλο μικρού σήματος	315
6.4	Τρανζίστορ PMOS	316
6.5	Η τεχνολογία CMOS.....	319
6.6	Σύγκριση των διπολικών διατάξεων και των διατάξεων MOS	319
6.7	Περίληψη κεφαλαίου	320
	Προβλήματα.....	321
	Προβλήματα SPICE	327

7 ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ CMOS 329

7.1	Γενικά ζητήματα	329
7.1.1	Τοπολογίες ενισχυτών MOS.....	329

7.1.2	Πόλωση	329
7.1.3	Υλοποίηση πηγών ρεύματος.....	333
7.2	Βαθμίδα κοινής πηγής	334
7.2.1	Πυρήνας κοινής πηγής.....	334
7.2.2	Βαθμίδα κοινής πηγής με φορτίο πηγής ρεύματος	337
7.2.3	Βαθμίδα κοινής πηγής με φορτίο σύνδεσης διόδου	338
7.2.4	Βαθμίδα κοινής πηγής με εκφυλισμό.....	340
7.2.5	Πυρήνας κοινής πηγής με πόλωση ..	343
7.3	Βαθμίδα κοινής πύλης	345
7.3.1	Βαθμίδα κοινής πύλης με πόλωση...350	
7.4	Ακόλουθος πηγής.....	351
7.4.1	Πυρήνας ακολούθου πηγής	352
7.4.2	Ακόλουθος πηγής με πόλωση.....	354
7.5	Περίληψη και πρόσθετα παραδείγματα	356
7.6	Περίληψη κεφαλαίου	359
	Προβλήματα.....	359
	Προβλήματα SPICE.....	371

8 Ο ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΩΣ ΜΑΥΡΟ ΚΟΥΤΙ 373

8.1	Γενικά ζητήματα	374
8.2	Κυκλώματα βασισμένα σε τελεστικό ενισχυτή	376
8.2.1	Μη αναστρέφων ενισχυτής.....	376
8.2.2	Αναστρέφων ενισχυτής	378
8.2.3	Ολοκληρωτής και διαφοριστής	381
8.2.4	Αθροιστής τάσεων.....	388
8.3	Μη γραμμικές συναρτήσεις	389
8.3.1	Ανορθωτής ακριβείας.....	389
8.3.2	Λογαριθμικός ενισχυτής.....	390
8.3.3	Ενισχυτής τετραγωνικής ρίζας	391
8.4	Μη ιδανικές καταστάσεις τελεστικού ενισχυτή	391
8.4.1	Αποκλίσεις συνεχούς ρεύματος.....	392
8.4.2	Ρεύμα πόλωσης εισόδου.....	395
8.4.3	Περιορισμοί ταχύτητας.....	398
8.4.4	Πεπερασμένες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου	403
8.5	Παραδείγματα σχεδιασμού	404
8.6	Περίληψη κεφαλαίου	406
	Προβλήματα.....	407
	Προβλήματα SPICE.....	412

9 ΚΑΣΚΩΔΙΚΕΣ ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΚΑΙ ΚΑΘΡΕΦΤΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ 415

9.1	Η κασκωδική βαθμίδα	415
9.1.1	Η κασκωδική βαθμίδα ως πηγή ρεύματος.....	415

9.1.2	Η κασκωδική βαθμίδα ως ενισχυτής.....	422	11.4.2	Απόκριση υψηλών συχνοτήτων.....	541
9.2	Καθρέφτες ρεύματος.....	430	11.4.3	Χρήση του θεωρήματος του Miller.....	542
9.2.1	Αρχικές σκέψεις.....	430	11.4.4	Απευθείας ανάλυση.....	544
9.2.2	Διπολικός καθρέφτης ρεύματος.....	431	11.4.5	Σύνθετη αντίσταση εισόδου.....	548
9.2.3	Καθρέφτης ρεύματος MOS.....	441	11.5	Απόκριση συχνότητας βαθμίδων κοινής βάσης και κοινής πύλης.....	549
9.3	Περίληψη κεφαλαίου.....	443	11.5.1	Απόκριση σε χαμηλές συχνότητες.....	549
	Προβλήματα.....	444	11.5.2	Απόκριση υψηλών συχνοτήτων.....	550
	Προβλήματα SPICE.....	454	11.6	Απόκριση συχνότητας ακολουθών.....	552
10	ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ 457		11.6.1	Σύνθετες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου.....	555
10.1	Γενικά ζητήματα.....	457	11.7	Απόκριση συχνότητας κασκωδικής βαθμίδας.....	559
10.1.1	Αρχικές σκέψεις.....	457	11.7.1	Σύνθετες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου.....	563
10.1.2	Διαφορικά σήματα.....	459	11.8	Απόκριση συχνότητας διαφορικών ζευγών.....	563
10.1.3	Διαφορικό ζεύγος.....	461	11.8.1	Απόκριση συχνότητας κοινού σήματος.....	565
10.2	Διπολικό διαφορικό ζεύγος.....	462	11.9	Πρόσθετα παραδείγματα.....	566
10.2.1	Ποιοτική ανάλυση.....	462	11.10	Περίληψη κεφαλαίου.....	570
10.2.2	Ανάλυση μεγάλου σήματος.....	468		Προβλήματα.....	571
10.2.3	Ανάλυση μικρού σήματος.....	472		Προβλήματα SPICE.....	579
10.3	Διαφορικό ζεύγος MOS.....	478	12	ΑΝΑΔΡΑΣΗ 581	
10.3.1	Ποιοτική ανάλυση.....	479	12.1	Γενικά ζητήματα.....	581
10.3.2	Ανάλυση μεγάλου σήματος.....	483	12.1.1	Κέρδος βρόχου.....	584
10.3.3	Ανάλυση μικρού σήματος.....	487	12.2	Ιδιότητες της αρνητικής ανάδρασης.....	585
10.4	Διαφορικοί κασκωδικοί ενισχυτές.....	490	12.2.1	Απεναισθητοποίηση του κέρδους.....	585
10.5	Απόρριψη κοινού τρόπου.....	494	12.2.2	Επέκταση εύρους ζώνης.....	587
10.6	Διαφορικό ζεύγος με ενεργό φορτίο.....	498	12.2.3	Τροποποίηση αντιστάσεων E/E.....	589
10.6.1	Ποιοτική ανάλυση.....	498	12.2.4	Βελτίωση της γραμμικότητας.....	593
10.6.2	Ποσοτική ανάλυση.....	501	12.3	Τύποι ενισχυτών.....	593
10.7	Περίληψη κεφαλαίου.....	505	12.3.1	Απλά μοντέλα ενισχυτών.....	594
	Προβλήματα.....	506	12.3.2	Παραδείγματα τύπων ενισχυτών.....	595
	Προβλήματα SPICE.....	517	12.4	Μέθοδοι ανίχνευσης και επιστροφής.....	596
11	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ 519		12.5	Πολικότητα της ανάδρασης.....	599
11.1	Θεμελιώδεις έννοιες.....	519	12.6	Τοπολογίες ανάδρασης.....	601
11.1.1	Γενικά ζητήματα.....	519	12.6.1	Ανάδραση τάσης-τάσης.....	601
11.1.2	Σχέση μεταξύ συνάρτησης μεταφοράς και απόκρισης συχνότητας.....	522	12.6.2	Ανάδραση τάσης-ρεύματος.....	606
11.1.3	Κανόνες του Bode.....	525	12.6.3	Ανάδραση ρεύματος-τάσης.....	609
11.1.4	Σχέση πόλων και κόμβων.....	526	12.6.4	Ανάδραση ρεύματος-ρεύματος.....	614
11.1.5	Θεώρημα του Miller.....	528	12.7	Επίδραση μη ιδανικών αντιστάσεων E/E.....	617
11.1.6	Γενική απόκριση συχνότητας.....	531	12.7.1	Συμπερίληψη επιδράσεων E/E.....	618
11.2	Μοντέλα τρανζίστορ υψηλής συχνότητας.....	534	12.8	Η ευστάθεια σε συστήματα ανάδρασης.....	630
11.2.1	Μοντέλο υψηλής συχνότητας για διπολικά τρανζίστορ.....	534	12.8.1	Επανεξέταση των κανόνων του Bode.....	631
11.2.2	Μοντέλο υψηλής συχνότητας για MOSFET.....	536	12.8.2	Το πρόβλημα της αστάθειας.....	632
11.2.3	Συχνότητα μετάβασης.....	538	12.8.3	Συνθήκη ευστάθειας.....	635
11.3	Διαδικασία ανάλυσης.....	540	12.8.4	Περιθώριο φάσης.....	638
11.4	Απόκριση συχνότητας βαθμίδων κοινού εκπομπού και κοινής πηγής.....	540	12.8.5	Αντιστάθμιση συχνότητας.....	640
11.4.1	Απόκριση χαμηλών συχνοτήτων.....	540	12.8.6	Αντιστάθμιση Miller.....	643

12.9	Περίληψη κεφαλαίου	644
	Προβλήματα	645
	Προβλήματα SPICE	655

13 ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ 657

13.1	Γενικά ζητήματα	657
13.2	Ταλαντωτές δακτυλίου	660
13.3	Ταλαντωτές LC	664
13.3.1	Παράλληλα κυκλώματα συντονισμού	664
13.3.2	Ταλαντωτής διασταυρωμένου ζεύγους	668
13.3.3	Ταλαντωτής Colpitts	670
13.4	Ταλαντωτής μετατόπισης φάσης	673
13.5	Ταλαντωτής γέφυρας Wien	675
13.6	Κρυσταλλικοί ταλαντωτές	677
13.6.1	Μοντέλο κρυστάλλου	677
13.6.2	Κύκλωμα αρνητικής αντίστασης ...	679
13.6.3	Υλοποίηση κρυσταλλικού ταλαντωτή	680
13.7	Περίληψη κεφαλαίου	683
	Προβλήματα	683
	Προβλήματα SPICE	688

14 ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ 689

14.1	Γενικά ζητήματα	689
14.2	Ο ακόλουθος εκπομπού ως ενισχυτής ισχύος	690
14.3	Βαθμίδα push-pull	692
14.4	Βελτιωμένη βαθμίδα push-pull	695
14.4.1	Μείωση της παραμόρφωσης διάβασης	695
14.4.2	Προσθήκη βαθμίδας κοινού εκπομπού	699
14.5	Ζητήματα μεγάλου σήματος	702
14.5.1	Ζητήματα πόλωσης	702
14.5.2	Παράλειψη του τρανζίστορ ισχύος <i>pn</i> p	703
14.5.3	Σχεδιασμός υψηλής πιστότητας	706
14.6	Προστασία από βραχυκύκλωμα	707
14.7	Απαγωγή θερμότητας	708
14.7.1	Ονομαστική ισχύς ακολούθου εκπομπού	708
14.7.2	Ονομαστική ισχύς βαθμίδας push-pull	709
14.7.3	Θερμική διαφυγή	711
14.8	Απόδοση	712
14.8.1	Απόδοση ακολούθου εκπομπού	712
14.8.2	Απόδοση βαθμίδας push-pull	713

14.9	Τάξεις ενισχυτών ισχύος	714
14.10	Περίληψη κεφαλαίου	715
	Προβλήματα	716
	Προβλήματα SPICE	720

15 ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ 723

15.1	Γενικά ζητήματα	723
15.1.1	Χαρακτηριστικά των φίλτρων	724
15.1.2	Ταξινόμηση των φίλτρων	725
15.1.3	Συνάρτηση μεταφοράς φίλτρου	728
15.1.4	Το πρόβλημα της ευαισθησίας	731
15.2	Φίλτρα πρώτης τάξης	732
15.3	Φίλτρα δεύτερης τάξης	735
15.3.1	Ειδικές περιπτώσεις	735
15.3.2	Υλοποιήσεις RLC	738
15.4	Ενεργά φίλτρα	743
15.4.1	Φίλτρο Sallen και Key	744
15.4.2	Διτετραγωνικές τοπολογίες βασισμένες σε ολοκληρωτή	749
15.4.3	Διτετραγωνικές τοπολογίες με προσομοιωμένα πηνία αυτεπαγωγής	753
15.5	Προσέγγιση της απόκρισης των φίλτρων ...	758
15.5.1	Απόκριση Butterworth	759
15.5.2	Απόκριση Chebyshev	763
15.6	Περίληψη κεφαλαίου	768
	Προβλήματα	769
	Προβλήματα SPICE	773

16 ΨΗΦΙΑΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ CMOS 775

16.1	Γενικά ζητήματα	775
16.1.1	Στατικός χαρακτηρισμός των πυλών	776
16.1.2	Δυναμικός χαρακτηρισμός των πυλών	783
16.1.3	Συμβιβασμός μεταξύ ισχύος και ταχύτητας	786
16.2	Αντιστροφείας CMOS	787
16.2.1	Πρώτες σκέψεις	787
16.2.2	Χαρακτηριστική μεταφοράς τάσης	790
16.2.3	Δυναμικές χαρακτηριστικές	795
16.2.4	Κατανάλωση ισχύος	801
16.3	Πύλες CMOS NOR και NAND	804
16.3.1	Πύλη NOR	804
16.3.2	Πύλη NAND	807
16.4	Περίληψη κεφαλαίου	809
	Προβλήματα	809
	Προβλήματα SPICE	814

17 ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ CMOS 815

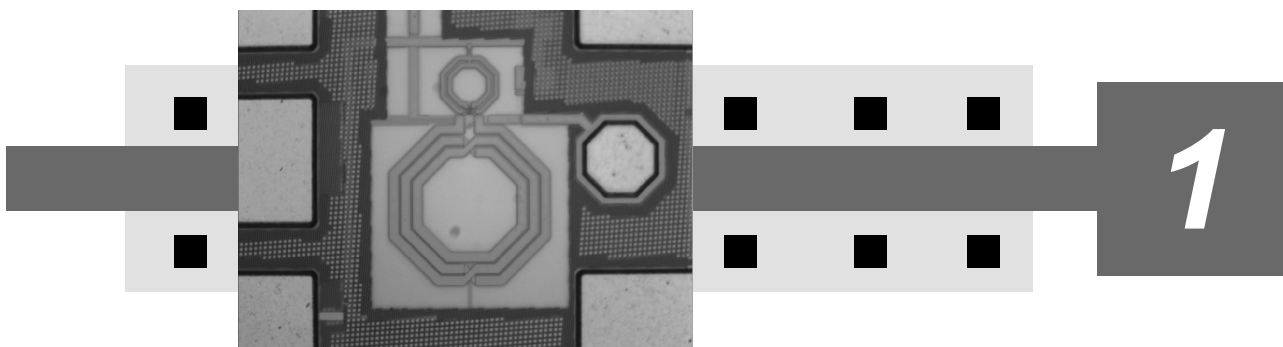
17.1	Γενικά ζητήματα	815
17.1.1	Αντιστάσεις εισόδου και εξόδου....	816
17.1.2	Πόλωση.....	820
17.1.3	Ανάλυση συνεχούς ρεύματος και μικρού σήματος	820
17.2	Ανάλυση και σχεδιασμός σημείου λειτουργίας	822
17.2.1	Απλή πόλωση.....	824
17.2.2	Πόλωση με εκφυλισμό πηγής	826
17.2.3	Αυτοπολωμένη βαθμίδα.....	828
17.2.4	Πόλωση τρανζίστορ PMOS	829
17.2.5	Υλοποίηση πηγών ρεύματος	831
17.3	Τοπολογίες ενισχυτών CMOS.....	831
17.4	Τοπολογία κοινής πηγής	832
17.4.1	Βαθμίδα κοινής πηγής με φορτίο πηγής ρεύματος.....	837
17.4.2	Βαθμίδα κοινής πηγής με φορτίο σύνδεσης διόδου	838
17.4.3	Βαθμίδα κοινής πηγής με εκφυλισμό πηγής	839
17.4.4	Τοπολογία κοινής πύλης	852
17.4.5	Ακόλουθος πηγής.....	862

17.5	Πρόσθετα παραδείγματα.....	867
17.6	Περίληψη κεφαλαίου	871
	Προβλήματα.....	872
	Προβλήματα SPICE.....	883

Παράρτημα Α**ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SPICE 885**

Π.1	Διαδικασία προσομοίωσης	885
Π.2	Τύποι ανάλυσης	888
Π.2.1	Ανάλυση σημείου λειτουργίας	888
Π.2.2	Μεταβατική ανάλυση	888
Π.2.3	Ανάλυση συνεχούς ρεύματος	891
Π.3	Περιγραφές στοιχείων.....	892
Π.3.1	Πηγές ρεύματος	892
Π.3.2	Δίοδοι	893
Π.3.3	Διπολικά τρανζίστορ	895
Π.3.4	MOSFET	897
Π.4	Άλλα στοιχεία και διαταγές	899
Π.4.1	Εξαρτημένες πηγές	899
Π.4.2	Αρχικές συνθήκες.....	901

Ευρετήριο	903
-----------------	-----



Εισαγωγή στη μικροηλεκτρονική

Τις τελευταίες πέντε δεκαετίες, η μικροηλεκτρονική έχει φέρει επανάσταση στη ζωή μας. Ενώ ήταν αντικείμενο της επιστημονικής φαντασίας λίγες δεκαετίες πριν, τα κινητά τηλέφωνα, οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, φορητοί υπολογιστές, και πολλά άλλα ηλεκτρονικά προϊόντα έχουν πλέον γίνει αναπόσπαστο μέρος της καθημερινότητάς μας.

Η εκμάθηση της μικροηλεκτρονικής μπορεί να είναι διασκεδαστική. Καθώς μαθαίνουμε πώς λειτουργεί κάθε διάταξη, με ποιον τρόπο οι διάφορες διατάξεις σχηματίζουν κυκλώματα που εκτελούν ενδιαφέρουσες και χρήσιμες λειτουργίες, και με ποιον τρόπο τα κυκλώματα σχηματίζουν πολύπλοκα συστήματα, αρχίζουμε να βλέπουμε την ομορφιά της μικροηλεκτρονικής και να εκτιμούμε τους λόγους που βρίσκονται πίσω από την εκρηκτική της ανάπτυξη.

Το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια γενική περιγραφή της μικροηλεκτρονικής με στόχο να αποτελέσει ένα πλαίσιο για την ύλη που θα παρουσιαστεί στο βιβλίο. Παρουσιάζουμε παραδείγματα μικροηλεκτρονικών συστημάτων και προσδιορίζουμε τις «λειτουργίες» κυκλωμάτων τις οποίες υλοποιούν. Δίνουμε επίσης μια ανασκόπηση της βασικής θεωρίας των κυκλωμάτων για να φρεσκάρουμε τη μνήμη του αναγνώστη.

1.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Ο γενικός τομέας των ηλεκτρονικών ξεκίνησε περίπου έναν αιώνα πριν και αποδείχθηκε αποφασιστικής σημασίας στις επικοινωνίες μέσω ασυρμάτου και ραντάρ που χρησιμοποιήθηκαν στη διάρκεια των δύο παγκοσμίων πολέμων. Τα πρώτα συστήματα χρησιμοποιούσαν «λυχνίες κενού» (vacuum tubes), ενισχυτικές διατάξεις οι οποίες λειτουργούσαν με τη ροή ηλεκτρονίων μεταξύ πλακών σε έναν θάλαμο κενού. Παρόλα αυτά, η πεπερασμένη διάρκεια ζωής και το μεγάλο μέγεθος των λυχνιών κενού παρακίνησαν τους ερευνητές να ψάξουν για μια ηλεκτρονική διάταξη με καλύτερες ιδιότητες.

Το πρώτο τρανζίστορ εφευρέθηκε τη δεκαετία του 1940 και γρήγορα εκτόπισε τις λυχνίες κενού. Παρουσίαζε πολύ μεγάλη (στην πράξη, άπειρη) διάρκεια ζωής και καταλάμβανε πολύ μικρότερο όγκο από ό,τι οι λυχνίες (για παράδειγμα, λιγότερο από 1 cm^3 στην τελική του μορφή).

Έπρεπε όμως να έλθει η δεκαετία του 1960 για να ξεκινήσει ο τομέας της μικροηλεκτρονικής, δηλαδή η επιστήμη της ενσωμάτωσης πολλών τρανζίστορ σε ένα τσιπ. Τα πρώτα «ολοκληρωμένα κυκλώματα» (integrated circuits — IC) περιείχαν ελάχιστες μόνο διατάξεις, αλλά η πρόοδος της τεχνολογίας γρήγορα έκανε δυνατή την εντυπωσιακή αύξηση της πολυπλοκότητας των «μικροτσίπ».

Παράδειγμα 1.1	Οι σημερινοί μικροεπεξεργαστές περιέχουν περίπου 100 εκατομμύρια τρανζίστορ σε μια επιφάνεια τσιπ περίπου $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$. (Το πάχος του τσιπ είναι ίσο με λίγες εκατοντάδες μικρά.) Ας υποθέσουμε ότι δεν έχουν εφευρεθεί τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και προσπαθούμε να κατασκευάσουμε έναν μικροεπεξεργαστή χρησιμοποιώντας 100 εκατομμύρια «διακριτά» τρανζίστορ. Αν κάθε διάταξη καταλαμβάνει όγκο $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, υπολογίστε τον ελάχιστο όγκο του επεξεργαστή. Ποια άλλα προβλήματα είναι πιθανό να προκύψουν σε μια τέτοια υλοποίηση;
Λύση	Ο ελάχιστος όγκος είναι ίσος με $27\text{ mm}^3 \times 10^8$, δηλαδή ένας κύβος με πλευρά 1.4 m! Φυσικά, οι αγωγοί σύνδεσης των τρανζίστορ θα αύξαναν σημαντικά τον όγκο. Εκτός από τον μεγάλο όγκο του, αυτός ο διακριτός επεξεργαστής θα ήταν εξαιρετικά αργός· τα σήματα θα έπρεπε να κινούνται μέσα σε αγωγούς με μήκος έως και 1.4 m! Εκτός από αυτό, αν κάθε διακριτό τρανζίστορ κοστίζει 1 σεντ και ζυγίζει 1 g, κάθε μονάδα του επεξεργαστή θα κόστιζε ένα εκατομμύριο δολάρια και θα ζύγιζε 100 τόνους!

Άσκηση Πόση ισχύ θα κατανάλωνε ένα τέτοιο σύστημα αν κάθε τρανζίστορ χρειάζεται $10\text{ }\mu\text{W}$;

Το βιβλίο αυτό ασχολείται κυρίως με τη μικροηλεκτρονική παρέχοντας συγχρόνως τα θεμέλια για τα γενικά (πιθανόν διακριτά) ηλεκτρονικά συστήματα.

1.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

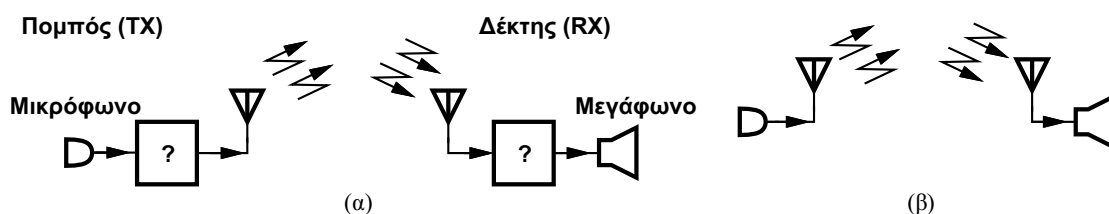
Στο σημείο αυτό, παρουσιάζουμε δύο παραδείγματα μικροηλεκτρονικών συστημάτων και προσδιορίζουμε τα σημαντικά δομικά στοιχεία που θα πρέπει να μελετήσουμε στα βασικά ηλεκτρονικά.

1.2.1 Το κινητό τηλέφωνο

Τα κινητά τηλέφωνα κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980 και απέκτησαν γρήγορα μεγάλη δημοτικότητα τη δεκαετία του 1990. Τα κινητά τηλέφωνα της σημερινής εποχής περιέχουν πλήθος πολύπλοκων αναλογικών και ψηφιακών ηλεκτρονικών τα οποία είναι έξω από την ύλη του βιβλίου. Στόχος μας όμως εδώ είναι να δούμε με ποιον τρόπο οι έννοιες που περιγράφουμε στο βιβλίο αυτό σχετίζονται με τη λειτουργία ενός κινητού τηλεφώνου.

Υποθέστε ότι μιλάτε με έναν φίλο σας στο κινητό σας τηλέφωνο. Η φωνή σας μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα από ένα μικρόφωνο και, αφού υποστεί κάποια επεξεργασία, μεταδίδεται μέσω της κεραίας. Το σήμα που παράγεται από την κεραία της συσκευής σας συλλαμβάνεται από τον δέκτη του φίλου σας και, αφού υποστεί κάποια επεξεργασία, μεταφέρεται στο μεγάφωνο [Εικ. 1.1(α)]. Τι συμβαίνει μέσα σε αυτά τα μαύρα κουτιά; Σε τι χρειάζονται;

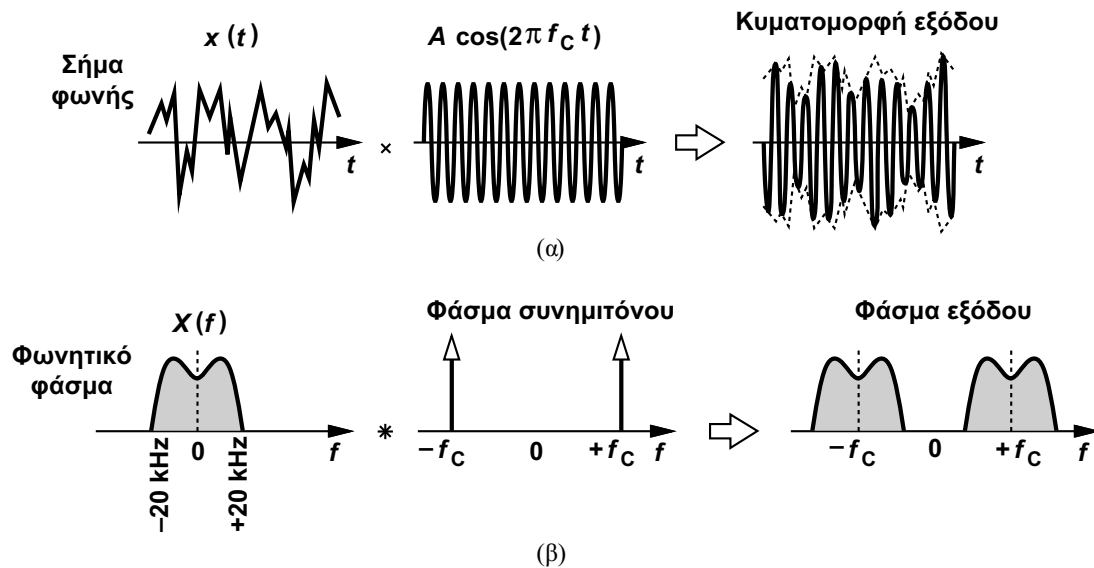
Ας δοκιμάσουμε να παραλείψουμε τα μαύρα κουτιά και να κατασκευάσουμε το απλό σύστημα που βλέπετε στην Εικ. 1.1(β). Πόσο καλά λειτουργεί αυτό το σύστημα; Κάνουμε δύο παρατηρήσεις. Πρώτον, η φωνή μας αποτελείται από συχνότητες από 20 Hz έως 20 kHz (που ονομάζονται «φωνητική ζώνη» — voice band). Δεύτερον, για να λειτουργεί σωστά μια κεραία, δηλαδή να μετατρέπει το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρικού



Εικόνα 1.1 (α) Απλουστευμένη εικόνα ενός κινητού τηλεφώνου, (β) περαιτέρω απλούστευση των διαδρομών εκπομπής και λήψης.

σήματος σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, οι διαστάσεις της θα πρέπει να αποτελούν σημαντικό ποσοστό (για παράδειγμα, 25%) του μήκους κύματος. Δυστυχώς, ένα εύρος συχνοτήτων 20 Hz έως 20 kHz μεταφράζεται σε μήκος κύματος¹ ίσο με 1.5×10^7 m έως 1.5×10^4 m, και αυτό απαιτεί τεράστιες κεραίες για κάθε κινητό τηλέφωνο. Αντίστροφα, για να έχουμε ένα λογικό μήκος κεραίας, όπως για παράδειγμα 5 cm, το μήκος κύματος θα πρέπει να είναι περίπου 20 cm και η συχνότητα περίπου 1.5 GHz.

Πώς μπορούμε να «μετατρέψουμε» τη φωνητική ζώνη σε μια κεντρική συχνότητα gigahertz; Μια πιθανή προσέγγιση είναι να πολλαπλασιάσουμε το σήμα της φωνής, $x(t)$, με ένα ημιτονοειδές $A \cos(2\pi f_c t)$ [Εικ. 1.2(α)]. Επειδή ο πολλαπλασιασμός σε χρονικό πεδίο τιμών αντιστοιχεί σε συνέλιξη (convolution) στο πεδίο της συχνότητας, και επειδή το φάσμα του ημιτονοειδούς αποτελείται από δύο παλμούς $\pm f_c$, το φωνητικό φάσμα απλώς μετατοπίζεται κατά $\pm f_c$ [Εικ. 1.2(β)]. Επομένως, αν $f_c = 1$ GHz, η έξοδος καταλαμβάνει εύρος ζώνης 40 kHz με κέντρο στο 1 GHz. Η λειτουργία αυτή είναι ένα παράδειγμα «διαμόρφωσης πλάτους» (amplitude modulation).²



Εικόνα 1.2 (α) Ο πολλαπλασιασμός ενός σήματος φωνής με ένα ημιτονοειδές, (β) ισοδύναμη λειτουργία στο πεδίο τιμών της συχνότητας.

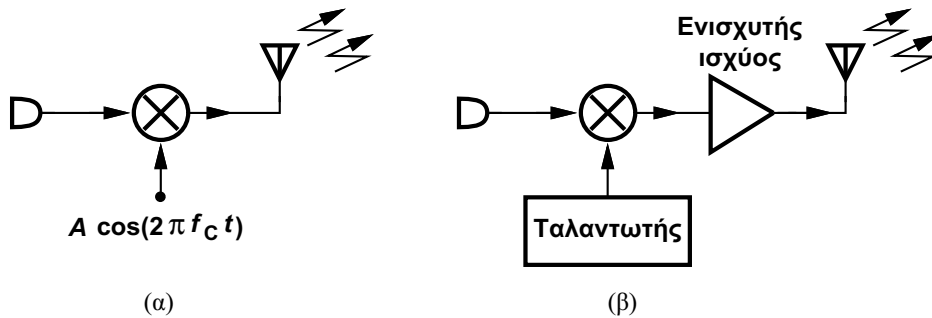
Επομένως, συμπεραίνουμε ότι το μαύρο κουτί στον πομπό της Εικ. 1.1(α) περιέχει έναν πολλαπλασιαστή,³ όπως φαίνεται στην Εικ. 1.3(α). Όμως, ανακύπτουν δύο άλλα ζητήματα. Πρώτον, το κινητό τηλέφωνο θα πρέπει να μεταφέρει μια σχετικά υψηλή ταλάντωση τάσης στην κεραία (για παράδειγμα, 20 V_{pp}) ώστε η ακτινοβολούμενη ισχύς να μπορεί να φθάσει σε αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων, απαιτώντας έτσι έναν «ενισχυτή ισχύος» ανάμεσα στον πολλαπλασιαστή και την κεραία. Δεύτερον, το ημιτονοειδές $A \cos(2\pi f_c t)$ θα πρέπει να παράγεται από έναν «ταλαντωτή» (oscillator). Έτσι καταλήγουμε στην αρχιτεκτονική του πομπού που βλέπετε στην Εικ. 1.3(β).

Ας στρέψουμε τώρα την προσοχή μας στη διαδρομή λήψης του κινητού τηλεφώνου, ξεκινώντας από την απλή υλοποίηση που βλέπετε στην Εικ. 1.1(β). Δυστυχώς, η τοπολογία αυτή δεν καταφέρνει να λειτουργήσει σύμφωνα με την αρχή της διαμόρφωσης: Αν το σήμα που λαμβάνεται από την κεραία εκτείνεται γύρω από μια κεντρική συχνότητα gigahertz, το ακουστικό μεγάφωνο δεν μπορεί να παραγάγει κατανοητές πληροφορίες. Με άλλα λόγια, είναι απαραίτητο ένα μέσο μετατόπισης του φάσματος πάλι σε συχνότητες με μηδενικό κέντρο.

¹ Θυμηθείτε ότι το μήκος κύματος είναι ίσο με το πηλίκο της ταχύτητας (του φωτός) και της συχνότητας.

² Για την ακρίβεια, τα κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούν άλλους τύπους διαμόρφωσης για να μετατοπίσουν τη φωνητική ζώνη σε υψηλότερες συχνότητες.

³ Ονομάζεται και «μίκτης» στα ηλεκτρονικά υψηλών συχνοτήτων.



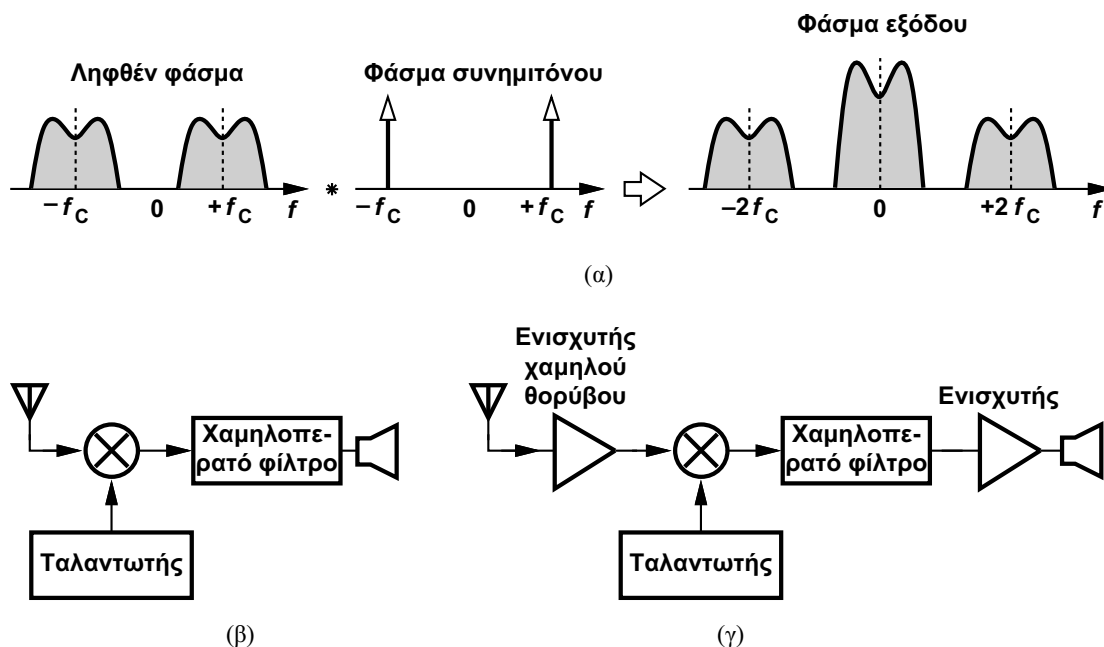
Εικόνα 1.3 (α) Απλός πομπός, (β) πιο ολοκληρωμένος πομπός.

Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.4(α), ο πολλαπλασιασμός με ένα ημιτονοειδές $A \cos(2\pi f_c t)$ μετατοπίζει το φάσμα προς τα αριστερά και τα δεξιά κατά f_c , αποκαθιστώντας την αρχική φωνητική ζώνη. Τα νεοπαράχθεντα συστατικά στο $\pm 2f_c$ μπορούμε να τα αφαιρέσουμε με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο (low-pass filter). Έτσι καταλήγουμε στην τοπολογία που βλέπετε στην Εικ. 1.4(β).

Ο σχεδιασμός του δέκτη μας είναι ακόμη ημιτελής. Το σήμα που λαμβάνει η κεραία μπορεί να είναι μόλις μερικές δεκάδες microvolt, ενώ το μεγάφωνο μπορεί να απαιτεί ταλαντώσεις πολλών δεκάδων ή και εκατοντάδων millivolt. Δηλαδή, ο δέκτης θα πρέπει να παρέχει μεγάλη ενίσχυση («κέρδος ή απολαβή») μεταξύ της κεραίας και του μεγαφώνου. Επιπλέον, καθώς οι ενισχυτές συνήθως έχουν το πρόβλημα του υψηλού «θορύβου» και επομένως αλλοιώνουν το ληφθέν σήμα, πριν από τον πολλαπλασιαστή πρέπει να παρεμβάλλεται ένας «ενισχυτής χαμηλού θορύβου». Το σύνολο αυτής της αρχιτεκτονικής φαίνεται στην Εικ. 1.4(γ).

Τα σύγχρονα κινητά τηλέφωνα είναι πολύ περισσότερο πολύπλοκα από τις τοπολογίες που δημιουργήσαμε εδώ. Για παράδειγμα, το σήμα της φωνής στον πομπό και τον δέκτη εφαρμόζεται σε έναν επεξεργαστή ψηφιακού σήματος (digital signal processor — DSP) με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης της επικοινωνίας. Παρόλα αυτά, η μελέτη μας αποκαλύπτει κάποια από τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία των κινητών τηλεφώνων, όπως για παράδειγμα ενισχυτές, ταλαντωτές, και φίλτρα, με τα δύο τελευταία να χρησιμοποιούν και ενίσχυση. Επομένως, ασχολούμαστε επισταμένα με την ανάλυση και τον σχεδιασμό ενισχυτών.

Έχοντας δει την αναγκαιότητα της ύπαρξης ενισχυτών, ταλαντωτών, και πολλαπλασιαστών τόσο στη διαδρομή μετάδοσης όσο και στη διαδρομή λήψης ενός κινητού τηλεφώνου, είναι πιθανό να αναρωτιέστε κατά πόσο όλα αυτά δεν είναι «παλιά και γνωστά» και μάλλον ασήμαντα σε σύγκριση με την αιχμή της τεχνολο-



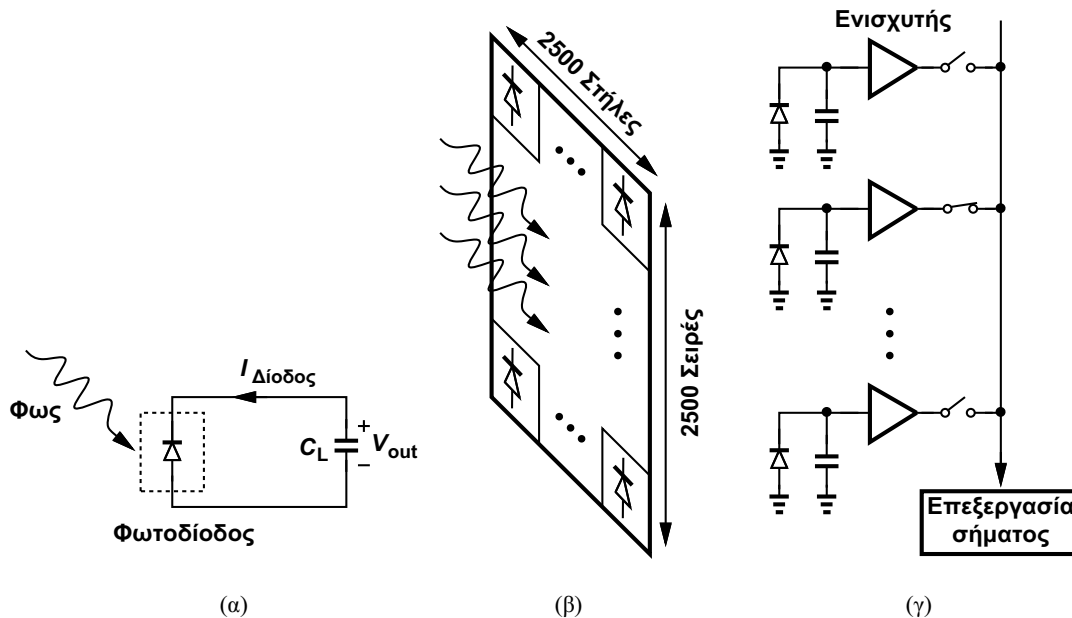
Εικόνα 1.4 (α) Μετάφραση διαμορφωμένου σήματος σε μηδενική κεντρική συχνότητα, (β) απλός δέκτης, (γ) πιο ολοκληρωμένος δέκτης.

γίας. Το ενδιαφέρον όμως είναι ότι αυτά τα δομικά στοιχεία εξακολουθούν να είναι από τα πιο δύσκολα κυκλώματα στα συστήματα επικοινωνίας. Αυτό οφείλεται στο ότι ο σχεδιασμός περιλαμβάνει *κρίσιμους συμβιβασμούς* (trade offs) μεταξύ της ταχύτητας (κεντρικές συχνότητες τάξης gigahertz), θορύβου, κατανάλωσης ισχύος (δηλαδή διάρκειας ζωής της μπαταρίας), βάρους, κόστους (δηλαδή της τιμής ενός κινητού τηλεφώνου), και πολλών άλλων παραμέτρων. Στον ανταγωνιστικό κόσμο της βιομηχανίας των κινητών τηλεφώνων, ένας δεδομένος σχεδιασμός δεν είναι ποτέ «αρκετά καλός» και οι μηχανικοί αναγκάζονται να κάνουν όλο και πιο οριακούς τους παραπάνω συμβιβασμούς σε κάθε νέα γενιά προϊόντων.

1.2.2 Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή

Ένα άλλο καταναλωτικό προϊόν το οποίο, λόγω της επικράτησης της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, έχει αλλάξει ριζικά τις συνήθειες και τις παραδόσεις μας είναι η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή. Με τις παραδοσιακές φωτογραφικές μηχανές δεν είχαμε άμεση πληροφόρηση για την ποιότητα της φωτογραφίας που θα παίρναμε, ήμασταν πολύ προσεκτικοί στην επιλογή και τη φωτογράφιση σκηνών ώστε να αποφύγουμε τη σπατάλη φιλμ, έπρεπε να έχουμε μαζί μας ογκώδη ρολά φιλμ, και παίρναμε το τελικό αποτέλεσμα μόνο σε έντυπη μορφή. Με τις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, από την άλλη, έχουμε λύσει αυτά τα προβλήματα και απολαμβάνουμε πολλές άλλες δυνατότητες τις οποίες μόνον η ηλεκτρονική επεξεργασία μπορεί να δώσει, όπως για παράδειγμα η μεταφορά των φωτογραφιών μέσω κινητών τηλεφώνων ή η δυνατότητα της βελτίωσης ή της τροποποίησης φωτογραφιών σε υπολογιστή. Στην ενότητα αυτή, θα μελετήσουμε της λειτουργία της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.

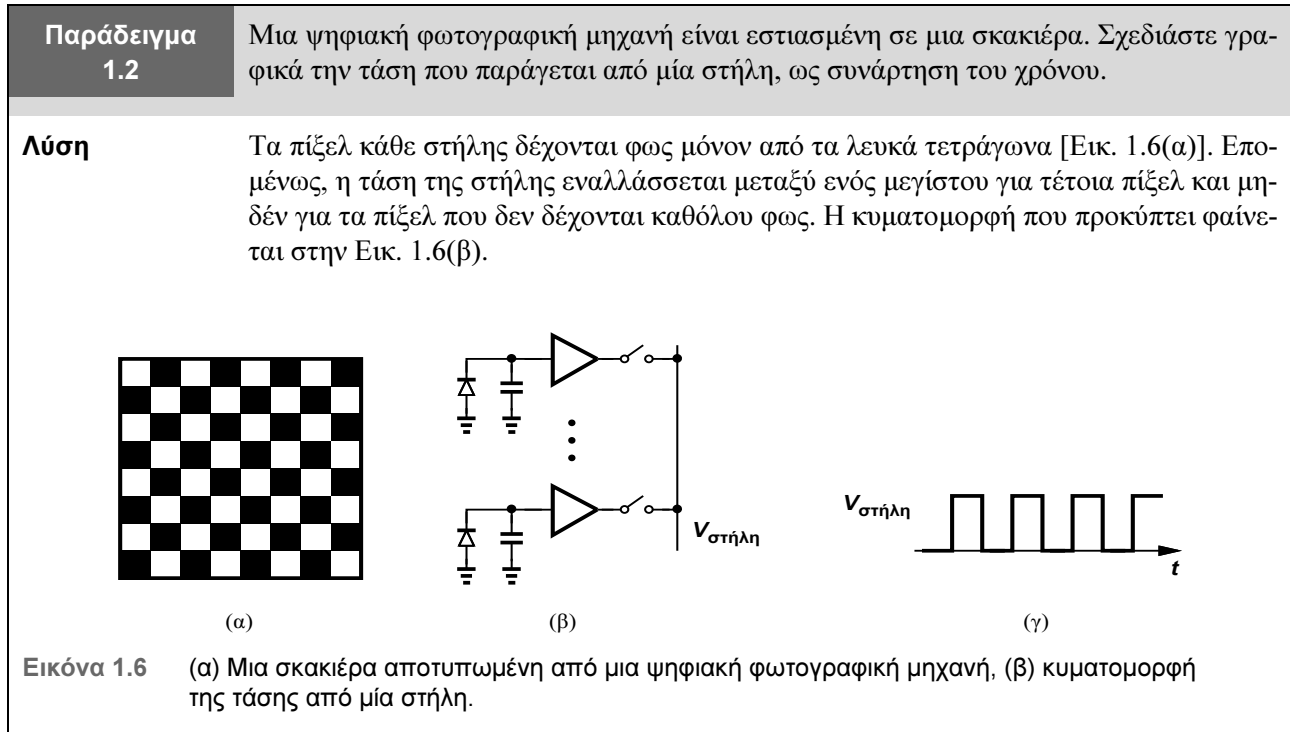
Η «εμπροσθοφυλακή» της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής πρέπει να μετατρέπει το φως σε ηλεκτρισμό, κάτι που γίνεται από μια συστοιχία (μήτρα) «πίξελ».⁴ Κάθε πίξελ αποτελείται από μια ηλεκτρονική διάταξη (μια «φωτοδίοδο» — photodiode) η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο με την ένταση του φωτός που δέχεται. Όπως φαίνεται στην Εικ. 1.5(α), το ρεύμα αυτό ρέει μέσα από έναν πυκνωτή χωρητικότητας (capacitance) C_L για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, παράγοντας έτσι μια ανάλογη τάση στα άκρα του πυκνωτή. Έτσι, κάθε πίξελ παράγει μια τάση ανάλογη προς την «τοπική» ένταση του φωτός.



Εικόνα 1.5 (α) Λειτουργία μιας φωτοδίοδου, (β) συστοιχία πίξελ σε μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, (γ) μία στήλη της συστοιχίας.

⁴ Ο όρος «πίξελ» (pixel) είναι σύντμηση του «picture cell», που σημαίνει «εικονοστοιχείο».

Θεωρήστε τώρα μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, π.χ. μια μηχανή με 6.25 εκατομμύρια πίξελ διατεταγμένα σε μια συστοιχία 2500×2500 [Εικ. 1.5(β)]. Πώς γίνεται η ανίχνευση και η επεξεργασία της τάσης εξόδου κάθε πίξελ; Αν κάθε πίξελ περιέχει τα δικά του ηλεκτρονικά κυκλώματα, όλη η συστοιχία καταλαμβάνει μια πολύ μεγάλη περιοχή, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος και την κατανάλωση ισχύος. Επομένως, θα πρέπει να «χρονομερίσουμε» (time-share) τα κυκλώματα επεξεργασίας του σήματος στα πίξελ. Για τον σκοπό αυτόν, εφαρμόζουμε το κύκλωμα της Εικ. 1.5(α) με έναν απλό ενισχυτή μικρού μεγέθους και έναν διακόπτη (στο εσωτερικό του πίξελ) [Εικ. 1.5(γ)]. Τώρα, συνδέουμε έναν αγωγό στις εξόδους και των 2500 πίξελ σε μια «στήλη», ενεργοποιούμε έναν μόνο διακόπτη κάθε στιγμή, και εφαρμόζουμε την αντίστοιχη τάση στο μπλοκ «επεξεργασίας σήματος» έξω από τη στήλη. Η συνολική συστοιχία αποτελείται από 2500 τέτοιες στήλες, όπου κάθε στήλη χρησιμοποιεί ένα αποκλειστικό μπλοκ επεξεργασίας σήματος.



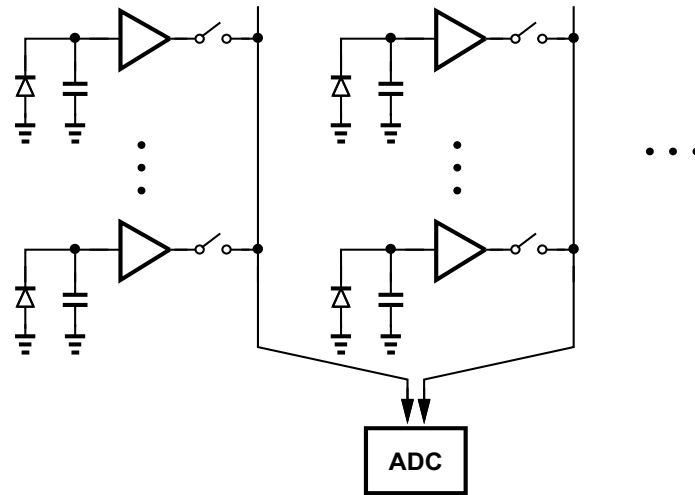
Άσκηση

Σχεδιάστε γραφικά την τάση, αν το πρώτο και το δεύτερο τετράγωνο κάθε σειράς έχουν το ίδιο χρώμα.

Τι κάνει κάθε μπλοκ επεξεργασίας σήματος; Επειδή η τάση που παράγεται από κάθε πίξελ είναι ένα αναλογικό σήμα και μπορεί να πάρει όλες τις τιμές που περιέχονται σε ένα εύρος, θα πρέπει πρώτα να την «ψηφιοποιήσουμε» (digitize) με τη βοήθεια ενός «αναλογοψηφιακού μετατροπέα» (analog-to-digital converter — ADC). Επομένως, μια συστοιχία 6.25 megapixel θα πρέπει να περιλαμβάνει 2500 ADC. Μιας και οι ADC είναι σχετικά πολύπλοκα κυκλώματα, μπορούμε να χρονομερίσουμε έναν ADC μεταξύ δύο στηλών (Εικ. 1.7), με την απαίτηση όμως ο ADC να λειτουργεί με διπλάσια ταχύτητα (γιατί;). Στην ακραία περίπτωση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μόνο έναν πολύ γρήγορο ADC και για τις 2500 στήλες. Στην πράξη, η βέλτιστη επιλογή είναι κάτι ανάμεσα στα δύο άκρα.

Στο ψηφιακό πλαίσιο, το σήμα «εικόνας» που αποτύπωσε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή μπορεί να υποστεί εκτεταμένο χειρισμό. Για παράδειγμα, για να «πλησιάσει» (zoom in), ο επεξεργαστής ψηφιακού σήματος (digital signal processor — DSP) απλώς λαμβάνει υπόψη του μόνον ένα κεντρικό τμήμα της συστοιχίας, απορρίπτοντας τις πληροφορίες από τα πίξελ που περισσεύουν. Επίσης, για να μειώσει το απαιτούμενο μέγεθος μνήμης, ο επεξεργαστής «συμπίεζει» το σήμα εικόνας.

Η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή αποτελεί τυπικό παράδειγμα της εκτεταμένης χρήσης και αναλογικής και ψηφιακής μικροηλεκτρονικής. Στις αναλογικές λειτουργίες περιλαμβάνεται η ενίσχυση, οι λειτουργίες εναλλαγής, και η αναλογοψηφιακή μετατροπή, ενώ οι ψηφιακές λειτουργίες συνίστανται στην επακόλουθη επεξεργασία του σήματος και την αποθήκευση.



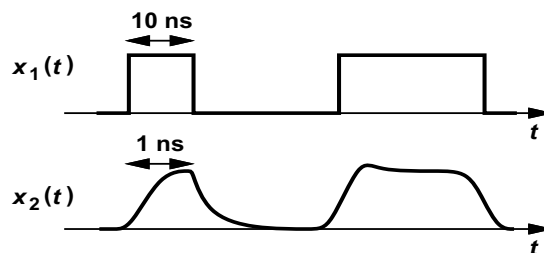
Εικόνα 1.7 Κοινή χρήση ενός ADC μεταξύ δύο στηλών μιας συστοιχίας πίξελ.

1.2.3 Αναλογικό ή ψηφιακό

Οι ενισχυτές και οι ADC αποτελούν παραδείγματα αναλογικών λειτουργιών, κυκλωμάτων τα οποία πρέπει να επεξεργαστούν κάθε σημείο μιας κυματομορφής (όπως για παράδειγμα ένα φωνητικό σήμα) με μεγάλη προσοχή ώστε να αποτραπούν φαινόμενα όπως ο θόρυβος και η «παραμόρφωση» (distortion). Από την άλλη πλευρά, τα ψηφιακά κυκλώματα χειρίζονται δυαδικές στάθμες (ΕΝΑ και ΜΗΔΕΝ) και, προφανώς, δεν περιέχουν αναλογικές λειτουργίες. Επομένως, θα μπορούσατε να σκεφτείτε ότι «δεν έχω σκοπό να εργαστώ στη βιομηχανία κινητών τηλεφώνων ή ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών και, έτσι, δεν χρειάζεται να μάθω για τα αναλογικά κυκλώματα». Μάλιστα, με τις ψηφιακές επικοινωνίες, τους επεξεργαστές ψηφιακού σήματος, και όλες τις άλλες λειτουργίες να μετατρέπονται σε ψηφιακές, έχει μέλλον ο αναλογικός σχεδιασμός;

Κάποιες από τις παραδοχές που κάναμε στα παραπάνω είναι λάθος. Πρώτον, δεν είναι δυνατή η ψηφιακή υλοποίηση όλων των λειτουργιών. Οι αρχιτεκτονικές των Εικόνων 1.3 και 1.4 πρέπει να χρησιμοποιήσουν ενισχυτές χαμηλού θορύβου και χαμηλής ισχύος, ταλαντωτές, και πολλαπλασιαστές ανεξάρτητα από το αν η πραγματική επικοινωνία θα έχει αναλογική ή ψηφιακή μορφή. Για παράδειγμα, ένα σήμα $20 \mu\text{V}$ (είτε αναλογικό είτε ψηφιακό) που λαμβάνει μια κεραία δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε μια ψηφιακή πύλη. Επίσης, το εικονοσήμα που αποτυπώνουν συλλογικά τα πίξελ μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής θα πρέπει να υποστεί επεξεργασία με χαμηλό θόρυβο και παραμόρφωση πριν από την είσοδό του στο ψηφιακό πεδίο.

Δεύτερον, τα ψηφιακά κυκλώματα απαιτούν αναλογικές ικανότητες όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Η Εικόνα 1.8 αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα δείχνοντας δύο κυματομορφές δυαδικών δεδομένων, μία σε ρυθμό 100 Mb/s και μια άλλη σε 1 Gb/s. Ο πεπερασμένος χρόνος ανόδου (risetime) και χρόνος καθόδου (falltime) της τελευταίας εγείρουν πολλά ζητήματα όσον αφορά τη λειτουργία των πυλών, των δισταθών κυκλωμάτων (flip-flop), και άλλων ψηφιακών κυκλωμάτων, κάνοντας απαραίτητη την επίδειξη μεγάλης προσοχής σε κάθε σημείο της κυματομορφής.



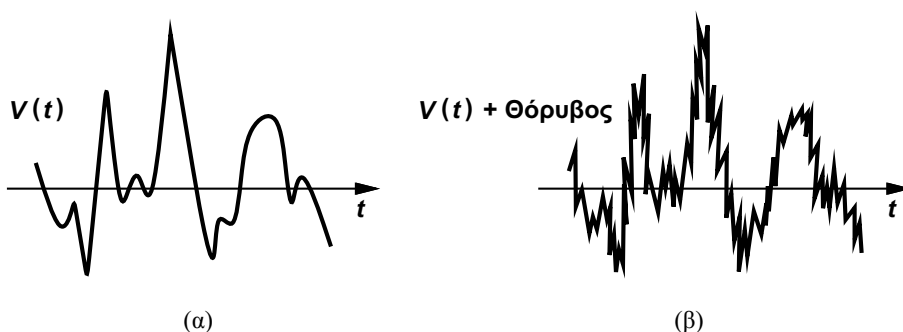
Εικόνα 1.8 Κυματομορφές δεδομένων σε ρυθμούς 100 Mb/s και 1 Gb/s.

1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η ανάλυση των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων βασίζεται σε πολλές έννοιες οι οποίες διδάσκονται στα βασικά μαθήματα των σημάτων, των συστημάτων, και της θεωρίας κυκλωμάτων. Η ενότητα αυτή* παρέχει μια σύντομη εισαγωγή στις έννοιες αυτές για να τις υπενθυμίσει και να παγιώσει την ορολογία που χρησιμοποιούμε σε όλο το βιβλίο. Μπορείτε να ρίξετε πρώτα μια γρήγορη ματιά για να δείτε ποια θέματα χρειάζονται μια επανάληψη ή απλώς να επιστρέψετε εδώ αν χρειαστεί κάτι τέτοιο αργότερα.

1.3.1 Αναλογικά και ψηφιακά σήματα

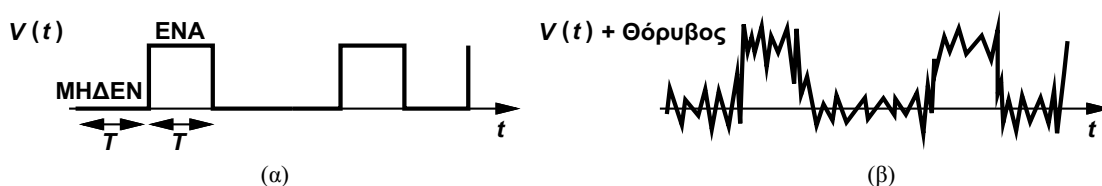
Ένα ηλεκτρικό σήμα είναι μια κυματομορφή που μεταφέρει πληροφορίες. Τα σήματα που υπάρχουν στη φύση μπορούν να πάρουν όλες τις τιμές σε ένα δεδομένο εύρος. Τέτοια σήματα ονομάζονται «αναλογικά», και περιλαμβάνουν κυματομορφές φωνής, εικόνας, σεισμών, και μουσικής. Όπως βλέπετε στην Εικ. 1.9(α), μια αναλογική κυματομορφή τάσης ταλαντεύεται μέσω ενός «συνεχούς» τιμών και παρέχει πληροφορίες σε κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 1.9 (α) Αναλογικό σήμα, (β) επίδραση του θορύβου σε ένα αναλογικό σήμα.

Παρόλο που υπάρχουν παντού γύρω μας, η «επεξεργασία» των αναλογικών σημάτων είναι δύσκολη εξαιτίας ατελειών όπως ο «θόρυβος» (noise) και η «παραμόρφωση» (distortion).⁵ Ως ένα παράδειγμα, η Εικόνα 1.9(β) δείχνει την επίδραση του θορύβου. Εκτός από αυτά, δύσκολη είναι και η «αποθήκευση» των αναλογικών σημάτων επειδή χρειάζονται «αναλογικές μνήμες» (όπως για παράδειγμα πυκνωτές).

Σε αντίθεση, ένα ψηφιακό σήμα παίρνει μόνον έναν πεπερασμένο αριθμό τιμών και μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Στην Εικ. 1.10(α) φαίνεται μια «δυαδική» (binary) κυματομορφή, η οποία διατηρεί μόνον ένα από δύο επίπεδα για κάθε χρονική περίοδο, T . Για όσο οι δύο τάσεις που αντιστοιχούν σε ΕΝΑ και ΜΗΔΕΝ διαφέρουν αρκετά, τα λογικά κυκλώματα ανιχνεύουν μια τέτοια διαδοχή σημάτων σωστά — ακόμη και όταν ο θόρυβος ή η παραμόρφωση δημιουργούν κάποια αλλοίωση [Εικ. 1.10(β)]. Επομένως, θεωρούμε τα ψηφιακά σήματα πιο «ανθεκτικά» από τα αναλογικά τους αντίστοιχα. Επίσης, πολύ απλούστερη είναι και η αποθήκευση των ψηφιακών σημάτων (σε μια ψηφιακή μνήμη).



Εικόνα 1.10 (α) Ψηφιακό σήμα, (β) επίδραση του θορύβου σε ένα ψηφιακό σήμα.

* Η ενότητα αυτή εξυπηρετεί ως επανάληψη και μπορεί να παραλειφθεί κατά τη διδασκαλία στην τάξη.

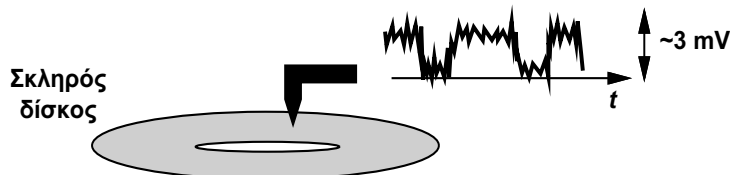
⁵ Παραμόρφωση προκύπτει όταν η έξοδος δεν είναι γραμμική συνάρτηση της εισόδου.



Εικόνα 1.11 Επεξεργασία σήματος σε ένα τυπικό σύστημα.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις ευνοούν την επεξεργασία των σημάτων σε ψηφιακό περιβάλλον, συνιστώντας ότι οι εγγενώς αναλογικές πληροφορίες θα πρέπει να μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή όσο το δυνατόν πιο νωρίς. Πράγματι, πολύπλοκα μικροηλεκτρονικά συστήματα όπως ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, εγγραφείς βίντεο, και εγγραφείς ψηφιακών δίσκων (CD) εκτελούν κάποια αναλογική επεξεργασία, «αναλογοψηφιακή μετατροπή» (analog-to-digital conversion), και ψηφιακή επεξεργασία (Εικ. 1.11), όπου οι δύο πρώτες λειτουργίες παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ποιότητα του σήματος.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι πολλά ψηφιακά δυαδικά σήματα θα πρέπει να θεωρούνται και να υφίστανται επεξεργασία ως αναλογικές κυματομορφές. Θεωρήστε, για παράδειγμα, τις πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες στον σκληρό δίσκο ενός υπολογιστή. Κατά την ανάκτηση, τα «ψηφιακά» δεδομένα εμφανίζονται ως μια παραμορφωμένη κυματομορφή με λίγα μόνο millivolt πλάτους (Εικ. 1.12). Μια τόσο μικρή διαφορά μεταξύ ΕΝΑ και ΜΗΔΕΝ αποδεικνύεται ανεπαρκής αν το σήμα αυτό πρόκειται να οδηγήσει μια λογική πύλη (logical gate), απαιτώντας πολύ μεγάλη ενίσχυση και επιπλέον αναλογική επεξεργασία ώστε τα δεδομένα να φθάσουν σε μια ανθεκτική ψηφιακή μορφή.



Εικόνα 1.12 Σήμα που λήφθηκε από έναν σκληρό δίσκο υπολογιστή.

1.3.2 Αναλογικά κυκλώματα

Τα σύγχρονα μικροηλεκτρονικά συστήματα περιλαμβάνουν πολλές αναλογικές λειτουργίες. Όπως δείχνει το κινητό τηλέφωνο και η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή που μελετήσαμε παραπάνω, τα αναλογικά κυκλώματα συχνά περιορίζουν την απόδοση όλου του συστήματος.

Η πιο συνήθης αναλογική λειτουργία είναι η ενίσχυση. Το σήμα που λαμβάνει ένα κινητό τηλέφωνο ή ένα μικρόφωνο αποδεικνύεται πολύ μικρό για να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Επομένως, είναι απαραίτητος ένας ενισχυτής για να αυξήσει το πλάτος του σήματος σε αποδεκτά επίπεδα.

Η απόδοση ενός ενισχυτή καθορίζεται από έναν αριθμό παραμέτρων, όπως για παράδειγμα το κέρδος (gain), η ταχύτητα (speed), και η κατανάλωση ισχύος (power dissipation). Θα εξετάσουμε πιο αναλυτικά αυτές τις παραμέτρους της ενίσχυσης στη συνέχεια, αλλά θα μας ωφελήσει να εξετάσουμε σύντομα μερικές από τις έννοιες αυτές και εδώ.

Ένας ενισχυτής τάσης παράγει ταλάντωση εξόδου μεγαλύτερη από αυτή της εισόδου. Το κέρδος τάσης (voltage gain), A_v , ορίζεται από τη σχέση

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad (1.1)$$

Σε μερικές περιπτώσεις, προτιμούμε να εκφράζουμε το κέρδος σε decibel (dB):

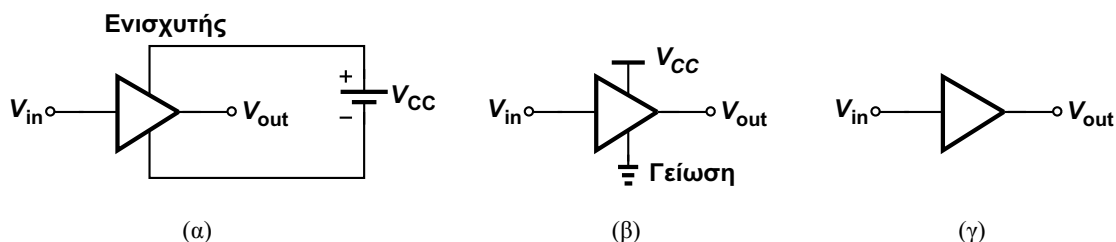
$$A_{v,dB} = 20 \log \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad (1.2)$$

Για παράδειγμα, ένα κέρδος τάσης ίσο με 10 μεταφράζεται σε 20 dB. Το κέρδος των τυπικών ενισχυτών βρίσκεται στο εύρος τιμών 10^1 έως 10^5 .

Παράδειγμα 1.3	Ένα κινητό τηλέφωνο λαμβάνει σήμα με στάθμη $20\ \mu\text{V}$, αλλά πρέπει να παραδώσει ταλάντωση πλάτους $50\ \text{mV}$ στο μεγάφωνο που αναπαράγει τη φωνή. Υπολογίστε το απαιτούμενο κέρδος τάσης σε decibel.
Λύση	Έχουμε ότι $A_v = 20 \log \frac{50\ \text{mV}}{20\ \mu\text{V}} \quad (1.3)$ $\approx 68\ \text{dB} \quad (1.4)$

Άσκηση Ποιο είναι το πλάτος της ταλάντωσης στην έξοδο αν το κέρδος είναι $50\ \text{dB}$;

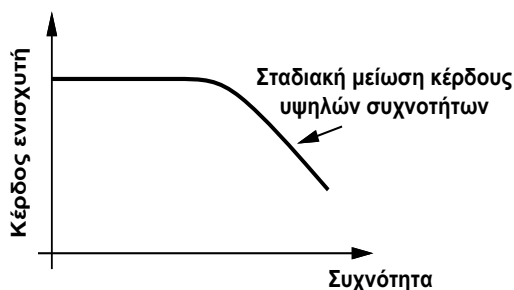
Για να λειτουργεί κανονικά και να παρέχει κέρδος, ένας ενισχυτής θα πρέπει να απορροφά ενέργεια από μια πηγή τάσης, όπως για παράδειγμα ένας συσσωρευτής (μπαταρία) ή ένας φορτιστής. Η πηγή αυτή ονομάζεται «τροφοδοτικό» (power supply) και κατά κανόνα συμβολίζεται με V_{CC} ή V_{DD} [Εικ. 1.13(α)]. Σε πολύπλοκα κυκλώματα, μπορούμε να απλοποιήσουμε τον συμβολισμό σε αυτόν που βλέπετε στην Εικ. 1.13(β), όπου ο ακροδέκτης της «γείωσης» χαρακτηρίζει ένα σημείο αναφοράς με δυναμικό μηδέν. Αν συμβολίσουμε τον ενισχυτή με ένα απλό τρίγωνο, μπορούμε και να παραλείψουμε τους ακροδέκτες της τροφοδοσίας [Εικ. 1.13(γ)], με τη σύμβαση ότι υπάρχουν. Οι τυπικοί ενισχυτές λειτουργούν με τάσεις τροφοδοσίας στο εύρος τιμών $1\ \text{V}$ έως $10\ \text{V}$.



Εικόνα 1.13 (α) Γενικό σύμβολο ενισχυτή μαζί με το τροφοδοτικό του, (β) απλοποιημένο διάγραμμα του (α), (γ) ενισχυτής χωρίς τις γραμμές τροφοδοσίας του.

Τι είναι αυτό που περιορίζει την *ταχύτητα* των ενισχυτών; Αναμένουμε ότι οι διάφορες χωρητικότητες που υπάρχουν στο κύκλωμα αρχίζουν να εκδηλώνονται στις υψηλές συχνότητες, μειώνοντας με τον τρόπο αυτόν το κέρδος. Με άλλα λόγια, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.14, το κέρδος μειώνεται σταδιακά σε αρκετά υψηλές συχνότητες, περιορίζοντας το (χρήσιμο) «εύρος ζώνης» (bandwidth) του κυκλώματος. Οι ενισχυτές (και άλλα αναλογικά κυκλώματα) περιορίζονται από συμβιβασμούς μεταξύ κέρδους, ταχύτητας, και καταναλώσεως ενέργειας. Οι σύγχρονοι μικροηλεκτρονικοί ενισχυτές επιτυγχάνουν εύρη ζώνης έως και δεκάδες gigahertz.

Ποιες άλλες αναλογικές λειτουργίες χρησιμοποιούνται συχνά; Μια κρίσιμη λειτουργία είναι τα «φίλτρα». Για παράδειγμα, ένας ηλεκτροκαρδιογράφος που μετράει τη δραστηριότητα της καρδιάς ενός ασθενούς συλλέγει επίσης τη συχνότητα $60\ \text{Hz}$ (ή $50\ \text{Hz}$) της ηλεκτρικής τροφοδοσίας επειδή το σώμα του ασθενούς



Εικόνα 1.14 Σταδιακή μείωση κέρδους ενός ενισχυτή σε υψηλές συχνότητες.

λειτουργεί ως κεραία. Έτσι, θα πρέπει να υπάρξει ένα φίλτρο που θα καταστείλει αυτή την «παρεμβολή» ώστε να επιτρέψει τη σωστή μέτρηση των καρδιακών παλμών.

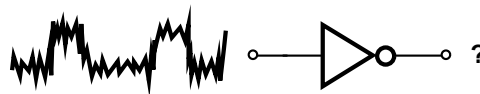
1.3.3 Ψηφιακά κυκλώματα

Περισσότερο από το 80% του κλάδου της μικροηλεκτρονικής έχει να κάνει με ψηφιακά κυκλώματα. Στα παραδείγματα περιλαμβάνονται μικροεπεξεργαστές, στατικές και δυναμικές μνήμες, και επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων. Θυμηθείτε από τον βασικό λογικό σχεδιασμό ότι οι πύλες (gates) σχηματίζουν «συνδυαστικά» (combinational) κυκλώματα, και τα κυκλώματα μανδάλωσης (latches) και τα δισταθή κυκλώματα (flip-flop) είναι «ακολουθιακές» (sequential) μηχανές. Η πολυπλοκότητα, η ταχύτητα, και η κατανάλωση ενέργειας αυτών των δομικών στοιχείων παίζουν κεντρικό ρόλο στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Στην ψηφιακή μικροηλεκτρονική, μελετούμε τον σχεδιασμό των εσωτερικών κυκλωμάτων πυλών, δισταθών κυκλωμάτων, και άλλων εξαρτημάτων. Για παράδειγμα, κατασκευάζουμε ένα κύκλωμα χρησιμοποιώντας διατάξεις όπως τα τρανζίστορ για να υλοποιήσουμε τις λειτουργίες άρνησης (NOT) και διαζευκτικής άρνησης (NOR) που βλέπετε στην Εικ. 1.15. Με βάση τις υλοποιήσεις αυτές, στη συνέχεια προσδιορίζουμε τις διάφορες ιδιότητες κάθε κυκλώματος. Για παράδειγμα, τι περιορίζει την ταχύτητα μιας πύλης; Πόση ισχύ καταναλώνει μια πύλη όταν λειτουργεί σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα; Πόσο ανθεκτικά λειτουργεί μια πύλη με την παρουσία μη ιδανικών καταστάσεων όπως ο θόρυβος (Εικ. 1.16);



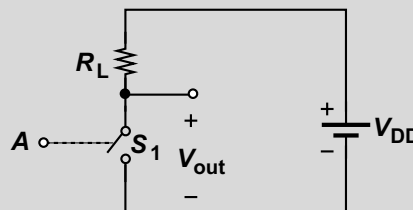
Εικόνα 1.15 Πύλες NOT και NOR.



Εικόνα 1.16 Απόκριση μιας πύλης σε θορυβώδη είσοδο.

Παράδειγμα 1.4

Θεωρήστε το κύκλωμα που βλέπετε στην Εικ. 1.17, όπου ο διακόπτης S_1 ελέγχεται από την ψηφιακή είσοδο. Δηλαδή, αν το A είναι υψηλό, το S_1 είναι κλειστό (άγει) και αντίστροφα. Αποδείξτε ότι το κύκλωμα παρέχει τη λειτουργία NOT.



Εικόνα 1.17

Λύση

Αν το A είναι υψηλό, το S_1 είναι κλειστό, εξαναγκάζοντας τη V_{out} σε μηδέν. Από την άλλη, αν το A είναι χαμηλό, το S_1 παραμένει ανοικτό (δεν άγει), και δεν περνά ρεύμα από την R_L . Ως αποτέλεσμα, η πτώση τάσης στα άκρα της R_L είναι μηδέν, και επομένως θα είναι $V_{out} = V_{DD}$, δηλαδή η έξοδος είναι υψηλή. Έτσι, παρατηρούμε πως, και για τις δύο λογικές καταστάσεις στην είσοδο, η έξοδος έχει την αντίθετη κατάσταση.

Άσκηση

Προσδιορίστε τη λογική λειτουργία αν εναλλάξουμε τα S_1 και R_L και στα άκρα της R_L εφαρμόζεται τάση V_{out} .

ΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΕ ΜΙΑ ΝΕΑ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ

Σε αυτή τη νέα έκδοση του *Βασικές αρχές Μικροηλεκτρονικής*, ο Behzad Razavi εφαρμόζει τεχνικές δοκιμασμένες στην αίθουσα διδασκαλίας και στη βιομηχανία για να διδάξει ανάλυση και σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Βασίζεται σε μια προσέγγιση «ανάλυσης με απλή θεώρηση, επικεντρωμένη στη σύνθεση» για να ενθαρρύνει τους φοιτητές να σκέπτονται ως μηχανικοί και να αναπτύξουν το σχεδιαστικό τους ένστικτο. Περιλαμβάνοντας στο βιβλίο ένα μεγάλο εύρος νέων εκπαιδευτικών βοηθημάτων, ο Razavi κάνει τη μάθηση πιο προσιτή και τη διδασκαλία αποτελεσματικότερη. Μερικά από αυτά τα εκπαιδευτικά βοηθήματα είναι τα εξής:

- Παραδείγματα των σημαντικών εννοιών από τον πραγματικό κόσμο
- Υπολογιστικά προβλήματα καθώς και τα συμβολικά προβλήματα που αποτελούν σήμα κατατεθέν του Razavi
- Νέα ειδικά πλαίσια που παρουσιάζουν πρακτικά παραδείγματα εφαρμογής της θεωρίας
- Ειδικό κεφάλαιο αφιερωμένο στην ανάλυση και τον σχεδιασμό ταλαντωτών
- Πολλά προβλήματα αυτοεξέτασης με τις λύσεις τους
- Προβλήματα προσομοίωσης με τη χρήση των Pspice® και NI Multisim™
- Διαίρεση των προβλημάτων κατά ενότητα κεφαλαίου, με πολλά βασικά, μέτρια, και δύσκολα προβλήματα σε κάθε ενότητα

Ο συγγραφέας

Ο Behzad Razavi είναι πολυβραβευμένος καθηγητής και μέλος της IEEE. Έχει διατελέσει Distinguished Lecturer της IEEE και είναι ο συγγραφέας των βιβλίων *Principles of Data Conversion System Design*, *RF Microelectronics* και *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* (που μεταφράστηκαν στα κινεζικά, τα ιαπωνικά και τα κορεατικά), καθώς και των *Design of Integrated Circuits for Optical Communications* και *Fundamentals of Microelectronics* (που μεταφράστηκε στα κορεατικά και τα πορτογαλικά). Είναι επίσης ο συγγραφέας των βιβλίων *Monolithic Phase-Locked Loops and Clock Recovery Circuits* και *Phase-Locking in High-Performance Systems*.



ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ

Διοικητικό 4, Σταθμός Λαρίσης, 10440 Αθήνα, Τηλ. 210-5237635
info@klidarithmos.gr www.klidarithmos.gr
www.facebook.com/klidarithmos.gr

ISBN 978-960-461-650-7

