

# ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ *xii*

ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ *xiii*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ *xiv*

## ΜΕΡΟΣ I **ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ** 2

---

- 1 Σήματα, Ενισχυτές και Ημιαγωγοί 4
- 2 Τελεστικοί Ενισχυτές 66
- 3 Δίοδοι 120
- 4 Τρανζίστορ BJT 168
- 5 Τρανζίστορ MOSFET 210
- 6 Ενισχυτές με Τρανζίστορ 254

## ΜΕΡΟΣ II **ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ** 350

---

- 7 Δομικά Συστατικά Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων Ενισχυτών 352
- 8 Διαφορικοί Ενισχυτές και Ενισχυτές Πολλών Σταδίων 406
- 9 Απόκριση Συχνότητας 476
- 10 Ανάδραση 554
- 11 Στάδια Εξόδου και Ενισχυτές Ισχύος 632
- 12 Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών 668
- 13 Φίλτρα και Συντονισμένοι Ενισχυτές 718

## ΜΕΡΟΣ III **ΨΗΦΙΑΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ** 794

---

- 14 Ψηφιακά Λογικά Κυκλώματα CMOS 796
- 15 Σχεδίαση Ψηφιακών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων: Ισχύς, Ταχύτητα και Εμβαδό Επιφάνειας 826
- 16 Κυκλώματα Μνήμης και Χρονισμού 856

Παραρτήματα στον Συνοδευτικό Ιστότοπο *I-1*

Ευρετήριο *E-1*

# Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ *xii*

ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ *xiii*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ *xiv*

## ΜΕΡΟΣ Ι ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ 2

### 1 Σήματα, Ενισχυτές και Ημιαγωγοί 4

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 5

1.1 ΣΗΜΑΤΑ 5

1.2 ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ 8

1.3 ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΗΜΑΤΑ 10

1.4 ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ 12

1.4.1 Ενίσχυση Σήματος 12

1.4.2 Το Κυκλωματικό Σύμβολο του  
Ενισχυτή 13

1.4.3 Κέρδος Τάσης 13

1.4.4 Κέρδος Ισχύος και Κέρδος Ρεύματος 14

1.4.5 Έκφραση του Κέρδους σε Decibel 14

1.4.6 Η Τροφοδοσία του Ενισχυτή 14

1.4.7 Κορεσμός (Saturation) του Ενισχυτή 16

1.4.8 Σύμβολα και Σημειογραφία:  
Συμβάσεις 16

1.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ 17

1.5.1 Ενισχυτές Τάσης 17

1.5.2 Ενισχυτές Πολλών Σταδίων 19

1.5.3 Άλλοι Τύποι Ενισχυτών 21

1.5.4 Σχέσεις Μεταξύ των Τεσσάρων Μοντέλων  
Ενισχυτών 21

1.5.5 Εύρεση των  $R_i$  και  $R_o$  22

1.5.6 Μονόπλευρα Μοντέλα 22

1.6 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ 24

1.6.1 Μέτρηση της Απόκρισης Συχνότητας  
Ενός Ενισχυτή 24

1.6.2 Το Εύρος Ζώνης των Ενισχυτών 25

1.6.3 Υπολογισμός της Απόκρισης Συχνότητας  
των Ενισχυτών 25

1.6.4 Δίκτυα Μιας Σταθεράς Χρόνου 26

1.6.5 Κατηγοριοποίηση των Ενισχυτών με Βάση  
την Απόκριση Συχνότητας 30

1.7 ΕΝΔΟΓΕΝΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ 31

1.8 ΝΟΘΕΥΜΕΝΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ 34

1.9 ΡΟΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ 36

1.9.1 Ρεύμα Ολίσθησης 36

1.9.2 Ρεύμα Διάχυσης 38

1.9.3 Η Σχέση Μεταξύ των Μεγεθών  $D$  και  $\mu$  40

1.10 Η ΕΝΩΣΗ  $pn$  41

1.10.1 Φυσική Δομή 41

1.10.2 Λειτουργία σε Κατάσταση Ανοικτού  
Κυκλώματος 41

1.11 Η ΕΝΩΣΗ  $pn$  ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ 46

1.11.2 Ποιοτική Περιγραφή της Λειτουργίας της  
Ένωσης 46

1.11.2 Η Σχέση Ρεύματος - Τάσης της Ένωσης 47

1.11.3 Διάσπαση Κατά την Ανάστροφη  
Πόλωση 50

1.12 ΧΩΡΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΕΝΩΣΗ  $pn$  51

1.12.1 Χωρητικότητα της Περιοχής Απογύμνωσης  
(Χωρητικότητα της Ένωσης) 51

1.12.2 Χωρητικότητα Διάχυσης 53

ΣΥΝΟΨΗ 54

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ 55

### 2 Τελεστικοί Ενισχυτές 66

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 67

2.1 Ο ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ 67

2.1.1 Οι Ακροδέκτες του Τελεστικού  
Ενισχυτή 67

2.1.2 Λειτουργία και Χαρακτηριστικά του  
Ιδανικού Τελεστικού Ενισχυτή 68

2.1.3 Διαφορικό και Κοινό Σήμα 69

2.2 Η ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΣΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 71

2.2.1 Το Κέρδος Κλειστού Βρόχου 71

2.2.2 Η Επίδραση του Πεπερασμένου Κέρδους  
Ανοικτού Βρόχου 72

2.2.3 Αντιστάσεις Εισόδου και Εξόδου 74

2.2.4 Μία Σημαντική Εφαρμογή — Ο Αθροιστής  
με Βάρη 76

2.3 Η ΜΗ-ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΣΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ 77

2.3.1 Το Κέρδος Κλειστού Βρόχου 78

2.3.2 Η Επίδραση του Πεπερασμένου Κέρδους  
Ανοικτού Βρόχου 78

2.3.3 Αντίσταση Εισόδου και Εξόδου 79

2.3.4 Ο Ακόλουθος Τάσης 79

2.4 ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ 80

2.4.1 Υλοποίηση Ενισχυτή Διαφορών με Χρήση  
Ενός Τελεστικού Ενισχυτή 81

2.4.2 Ένα Ανώτερο Κύκλωμα — Ο Ενισχυτής  
Οργάνων Μέτρησης 84

2.5 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΩΝ ΚΑΙ  
ΔΙΑΦΟΡΙΣΤΩΝ 87

2.5.1 Η Αναστρέφουσα Συνδεσμολογία με  
Γενικευμένες Σύνθετες Αντιστάσεις 87

2.5.2 Ο Αναστρέφων Ολοκληρωτής 89

2.5.3 Χρήση Τελεστικού Ενισχυτή για την  
Υλοποίηση Ενός Διαφοριστή 93

2.6 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΕ DC ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ 94

2.6.1 Τάση Εκτροπής 94

2.6.2	Ρεύματα Πόλωσης Εισόδου και Εκτροπής	97	3.7.3	Varactors	155
2.6.3	Η Επίδραση των $V_{OS}$ και $I_{OS}$ στη Λειτουργία του Αναστρέφοντος Ολοκληρωτή	99	3.7.4	Φωτοδίοδοι	156
2.7	Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ	100	3.7.5	Δίοδοι Εκπομπής Φωτός (LED)	157
2.7.1	Εξάρτηση του Κέρδους Ανοικτού Βρόχου από τη Συχνότητα	100	ΣΥΝΟΨΗ	159	
2.7.2	Η Απόκριση Συχνότητας Ενισχυτών Κλειστού Βρόχου	102	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	159	
2.8	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΙΣΧΥΡΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΤΕΛΕΣΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ	104	<b>4 Τρανζίστορ BJT</b>	<b>168</b>	
2.8.1	Κορεσμός Εξόδου	104	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	169	
2.8.2	Όρια Ρεύματος Εξόδου	104	4.1 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	169	
2.8.3	Ρυθμός Μεταβολής Εξόδου	105	4.1.1 Απλοποιημένη Δομή και Περιοχές Λειτουργίας	169	
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	108	4.1.2 Λειτουργία του <i>nnp</i> Τρανζίστορ στην Ενεργό Περιοχή	170		
ΣΥΝΟΨΗ	108	4.1.3 Η Δομή των Πραγματικών Τρανζίστορ	176		
<b>3 Δίοδοι</b>	<b>120</b>	4.1.4 Λειτουργία στον Κορεσμό	177		
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	121	4.1.5 Το <i>pnp</i> Τρανζίστορ	178		
3.1 Η ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΙΟΔΟΣ	121	4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ-ΤΑΣΗΣ	180		
3.1.1 Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης	121	4.2.1 Κυκλωματικά Σύμβολα και Συμβάσεις	180		
3.1.2 Ο Ανορθωτής	122	4.2.2 Γραφική Αναπαράσταση των Χαρακτηριστικών του Τρανζίστορ	183		
3.1.3 Κυκλώματα Περιορισμού και Προστασίας	124	4.2.3 Η Εξάρτηση του Ρεύματος $i_c$ από την Τάση Συλλέκτη – Το Φαινόμενο Early	183		
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΩΝ ΑΚΡΟΔΕΚΤΩΝ ΤΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΕΝΩΣΗΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	127	4.2.4 Μία Εναλλακτική Μορφή των Χαρακτηριστικών Κοινού Εκπομπού	186		
3.2.1 Η Περιοχή Ορθής Πόλωσης	127	4.3 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ BJT ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΕ DC ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	188		
3.2.2 Η Περιοχή Ανάστροφης Πόλωσης	131	4.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΣΤΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	201		
3.2.3 Η Περιοχή Διάσπασης	131	4.4.1 Το Φαινόμενο Διάσπασης	201		
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ	131	4.4.2 Εξάρτηση του $\beta$ από το $I_c$ και τη Θερμοκρασία	202		
3.3.1 Το Εκθετικό Μοντέλο	132	ΣΥΝΟΨΗ	203		
3.3.2 Γραφική Ανάλυση με Χρήση του Εκθετικού Μοντέλου	132	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	203		
3.3.3 Ανάλυση Διά της Επαναληπτικής Διαδικασίας	132	<b>5 Τρανζίστορ MOSFET</b>	<b>210</b>		
3.3.4 Η Ανάγκη για Γρήγορη Ανάλυση	133	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	211		
3.3.5 Το Μοντέλο Σταθερής Πτώσης Τάσης	133	5.1 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	211		
3.3.6 Το Μοντέλο Ιδανικής Διόδου	134	5.1.1 Δομή του Στοιχείου	211		
3.3.7 Λειτουργία στην Περιοχή Διάσπασης κατά την Ανάστροφη Πόλωση	135	5.1.2 Λειτουργία με Μηδενική Τάση Πύλης	213		
3.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΣΗΜΑΤΟΣ	136	5.1.3 Δημιουργία Καναλιού για την Αγωγή Ρεύματος	213		
3.5 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ	140	5.1.4 Γραμμική Συμπεριφορά: Εφαρμογή Μικρής $v_{DS}$	214		
3.6 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΝΟΡΘΩΤΩΝ	143	5.1.5 Μη-Γραμμική Συμπεριφορά: Εφαρμογή Μεγάλης Θετικής $v_{DS}$	216		
3.6.1 Ανορθωτής Ημίσεως Κύματος	144	5.1.6 Λειτουργία με $v_{DS} \geq v_{OV}$ : Στραγγαλισμός Καναλιού και Κορεσμός Ρεύματος	218		
3.6.2 Ανορθωτής Πλήρους Κύματος	145	5.1.7 Το MOSFET <i>p</i> Καναλιού	221		
3.6.3 Ανορθωτής Γέφυρας	146	5.1.8 Στοιχεία CMOS	222		
3.6.4 Ανορθωτής με Φίλτρο Πυκνωτή – Ανορθωτής Κορυφής	148	5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ-ΤΑΣΗΣ	222		
3.6.5 Ημιανορθωτής Ακριβείας: Υπερ-Δίοδος	153	5.2.1 Κυκλωματικό Σύμβολο	223		
3.7 ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΟΔΩΝ	154	5.2.2 Χαρακτηριστικές Ρεύματος-Τάσης ( $i_D-v_{DS}$ )	223		
3.7.1 Το Κύκλωμα Προσδεμένου Πυκνωτή και Αυτοεκκίνηση	154				
3.7.2 Διπλασιαστής Τάσης	155				

5.2.3.	Η Χαρακτηριστική Καμπύλη $i_D-v_{GS}$	225
5.2.4	Η Πεπερασμένη Αντίσταση Εξόδου στον Κορεσμό	227
5.2.5	Χαρακτηριστικές του MOSFET $p$ Καναλιού	230
5.3	ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ MOSFET ΣΕ DC ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	232
5.4	ΚΛΙΜΑΚΩΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ MOORE) ΚΑΙ ΑΛΛΑ ΘΕΜΑΤΑ	239
5.4.1	Κλιμάκωση της Τεχνολογίας	240
5.4.2	Αγωγή στην Περιοχή Υποκατωφλίου και Ρεύμα Διαρροής	242
5.4.3	Ο Ρόλος του Υποστρώματος και το Φαινόμενο Σώματος	242
5.4.4	Επιδράσεις της Θερμοκρασίας	243
5.4.5	Φαινόμενα Διάσπασης και Προστασία από Αυτά	243
5.4.6	Το MOSFET Τύπου Απογύμνωσης	243
	ΣΥΝΟΨΗ	244
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	245

## 6 Ενισχυτές με Τρανζίστορ 254

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	255
6.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	255
6.1.1	Η Βάση για τη Λειτουργία Ενός Τρανζίστορ ως Ενισχυτή	255
6.1.2	Υλοποίηση ενός Ενισχυτή Τάσης	256
6.1.3	Η Χαρακτηριστική Μεταφοράς Τάσης (VTC)	256
6.1.4	Γραμμική Ενίσχυση και Πόλωση του Τρανζίστορ	258
6.1.5	Το Κέρδος Τάσης Ασθενούς Σήματος	259
6.1.6	Εύρεση της VTC με Γραφική Ανάλυση	264
6.1.7	Επιλογή της Θέσης για το Σημείο Πόλωσης $Q$	265
6.2	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΣΗΜΑΤΟΣ	266
6.2.1	Η Περίπτωση των MOSFET	266
6.2.2	Η Περίπτωση των BJT	277
6.2.3	Πίνακες Σύνοψης	292
6.3	ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ	292
6.3.1	Οι Τρεις Βασικές Συνδεσμολογίες	292
6.3.2	Χαρακτηρισμός των Ενισχυτών	293
6.3.3	Οι Ενισχυτές Κοινής Πηγής (CS) και Κοινού Εκπομπού (CE)	295
	Τελικά Σχόλια	298
6.3.4	Ο Ενισχυτής Κοινής Πηγής (Κοινού Εκπομπού) με Αντίσταση Πηγής (Εκπομπού)	299
6.3.5	Οι Ενισχυτές Κοινής Πύλης (CG) και Κοινής Βάσης (CB)	304
6.3.6	Οι Ακόλουθοι Πηγής και Εκπομπού	307
6.3.7	Πίνακες Σύνοψης και Συγκρίσεις	314
6.3.8	Υπό Ποιες Συνθήκες Συμπεριλαμβάνεται η Αντίσταση Εξόδου $r_o$	314
6.4	ΠΟΛΩΣΗ	315
6.4.1	Η Περίπτωση των MOSFET	315

6.4.2	Η Περίπτωση των BJT	320
6.5	ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	324
6.5.1	Ένα Κύκλωμα Ενισχυτή Κοινής Πηγής (CS)	324
6.5.2	Ένα Κύκλωμα Ενισχυτή Κοινού Εκπομπού	326
6.5.3	Ένα Κύκλωμα Ενισχυτή Κοινού Εκπομπού με Αντίσταση Εκπομπού, $R_e$	327
6.5.4	Ένα Κύκλωμα Ενισχυτή Κοινής Βάσης (CB)	328
6.5.5	Ένα Κύκλωμα Ακόλουθου Εκπομπού	330
6.5.6	Η Απόκριση Συχνότητας του Ενισχυτή	331
	ΣΥΝΟΨΗ	332
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	333

## ΜΕΡΟΣ II ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ 350

### 7 Δομικά Συστατικά Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων Ενισχυτών 352

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	353
7.1	ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ	353
7.2	ΠΟΛΩΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ – ΠΗΓΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΚΑΘΡΕΠΤΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	354
7.2.1	Μία Απλή Πηγή Ρεύματος με MOSFET	354
7.2.2	Κυκλώματα Καθρέπτη Ρεύματος με Στοιχεία MOS	355
7.2.3	Κυκλώματα Οδήγησης Ρεύματος με Στοιχεία MOS	357
7.2.4	Κυκλώματα με Στοιχεία BJT	358
7.2.5	Λειτουργία Ασθενούς Σήματος των Καθρεπτών Ρεύματος	363
7.3	ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ ΚΥΤΤΑΡΟ ΚΕΡΑΟΥΣ	364
7.3.1	Οι Ενισχυτές CS και CE με Ενεργά Φορτία	364
7.3.2	Το Εσωτερικό Κέρδος	366
7.3.3	Η Επίδραση της Αντίστασης Εξόδου του Ενεργού Φορτίου	368
7.3.4	Αύξηση του Κέρδους του Βασικού Κυττάρου	371
7.4	ΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΚΟΙΝΗΣ ΠΥΛΗΣ (CG) ΚΑΙ ΚΟΙΝΗΣ ΒΑΣΗΣ (CB)	371
7.4.1	Ο Ενισχυτής CG	372
7.4.2	Η Αντίσταση Εξόδου Ενός Ενισχυτή CS με Αντίσταση Πηγής	376
7.4.3	Το Φαινόμενο Σώματος στον Ενισχυτή CG	376
7.4.4	Το Κύκλωμα Κοινής Βάσης (CB)	377
7.4.5	Η Αντίσταση Εξόδου Ενός Ενισχυτή CE Όταν Υφίσταται Εκφυλισμός Εκπομπού	379



7.5	ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ CASCODE	380	8.5.2	Το Διαφορικό Ζεύγος MOS με Ενεργό Φορτίο	444
7.5.1	Υλοποίηση του Ενισχυτή Cascode με Στοιχεία MOS	380	8.5.3	Το Διαφορικό Κέρδος του Ζεύγους MOS με Ενεργό Φορτίο	445
7.5.2	Κατανομή του Κέρδους Τάσης σε Έναν Ενισχυτή Cascode	384	8.5.4	Το Διπολικό Διαφορικό Ζεύγος με Ενεργό Φορτίο	448
7.5.3	BJT Υλοποίηση του Ενισχυτή Cascode	385	8.5.5	Κέρδος και Λόγος Απόρριψης Κοινού Σήματος	449
7.6	ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΚΟΛΟΥΘΟΥ ΠΗΓΗΣ	387	8.6	ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΠΟΛΛΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ	452
7.7	ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΚΑΘΡΕΠΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	388	8.6.1	Τελεστικός Ενισχυτής Δύο Σταδίων	453
7.7.1	Καθρέπτες Ρεύματος Στοιχείων MOS σε Συνδεσμολογία Cascode	388	8.6.2	Τελεστικός Ενισχυτής με Διπολικά Στοιχεία	456
7.7.2	Ο Καθρέπτης Ρεύματος Wilson με BJT Τρανζίστορ	389	ΣΥΝΟΨΗ	462	
7.7.3	Ο Καθρέπτης Ρεύματος Wilson με MOS Τρανζίστορ	391	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	463	
7.6.4	Η Πηγή Ρεύματος Widlar	393	<b>9 Απόκριση Συχνότητας</b>	<b>476</b>	
ΣΥΝΟΨΗ	394	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	477		
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	395	9.1	ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΨΙΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ	478	
<b>8 Διαφορικοί Ενισχυτές και Ενισχυτές Πολλών Σταδίων</b>	<b>406</b>	9.1.1	Η Περίπτωση των MOSFET	478	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	407	9.1.2	Η Περίπτωση των BJT	481	
8.1	ΤΟ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΖΕΥΓΟΣ MOS	407	9.2	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ CS ΚΑΙ CE ΣΤΙΣ ΥΨΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	485
8.1.1	Λειτουργία με Κοινή Τάση Εισόδου	407	9.2.1	Απόκριση Συχνότητας του Βαθυπερατού Κυκλώματος Μονής Σταθεράς Χρόνου	485
8.1.2	Λειτουργία με Διαφορική Τάση Εισόδου	411	9.2.2	Ο Ενισχυτής Κοινής Πηγής	486
8.1.3	Λειτουργία Ισχυρού Σήματος	413	9.2.3	Η Απόκριση Συχνότητας του Ενισχυτή CS Όταν η $R_{sig}$ Είναι Μικρή	490
8.1.4	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΣΗΜΑΤΟΣ	416	9.2.4	Ο Ενισχυτής Κοινού Εκπομπού	492
8.1.5	Ο Διαφορικός Ενισχυτής με Ενεργά Φορτία	419	9.2.5	Το Θεώρημα Miller	495
8.1.6	Ο Διαφορικός Ενισχυτής Συνδεσμολογίας Cascode	420	9.3	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ	498
8.2	ΤΟ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΖΕΥΓΟΣ BJT	421	9.3.1	Η Συνάρτηση Κέρδους στις Υψηλές Συχνότητες	498
8.2.1	Βασική Λειτουργία	421	9.3.2	Εύρεση της Συχνότητας 3-dB, $f_H$	498
8.2.2	Περιοχή Κοινού Σήματος Εισόδου	423	9.3.3	Εφαρμογή της Μεθόδου Σταθερών Χρόνου Ανοικτού Κυκλώματος στον Ενισχυτή CS	499
8.2.3	Λειτουργία Ισχυρού Σήματος	423	9.3.4	Εφαρμογή της Μεθόδου των Σταθερών Χρόνου Ανοικτού Κυκλώματος στον Ενισχυτή CE	502
8.2.4	Λειτουργία Ασθενούς Σήματος	425	9.4	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ CG ΚΑΙ CASCODE	503
8.3	ΑΠΟΡΡΙΨΗ ΚΟΙΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ	431	9.4.1	Απόκριση Υψηλών Συχνοτήτων του Ενισχυτή CG	503
8.3.1	Η Περίπτωση των Διαφορικών Ενισχυτών MOS	431	9.4.2	Απόκριση Υψηλών Συχνοτήτων του Υλοποιημένου με MOSFET Ενισχυτή Cascode	507
8.3.2	Η Περίπτωση των Διαφορικών Ενισχυτών BJT	435	9.4.3	Απόκριση Υψηλών Συχνοτήτων του Υλοποιημένου με Διπολικά Στοιχεία Ενισχυτή Cascode	511
8.4	ΕΚΤΡΟΠΗ ΣΕ DC ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	438	9.5	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΑΚΟΛΟΥΘΩΝ ΠΗΓΗΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΟΥ	512
8.4.1	Η Τάση Εκτροπής Εισόδου του Διαφορικού Ζεύγους MOS	438	9.5.1	Η Περίπτωση του Ακόλουθου Πηγής	512
8.4.2	Η Τάση Εκτροπής Εισόδου του Διπολικού Διαφορικού Ενισχυτή	441	9.5.2	Η Περίπτωση του Ακόλουθου Εκπομπού	517
8.4.3	Ρεύματα Πόλωσης και Εκτροπής Εισόδου του Διπολικού Ενισχυτή	442			
8.4.4	Ένα Τελικό Σχόλιο	443			
8.5	Ο ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟ ΦΟΡΤΙΟ	443			
8.5.1	Μετατροπή από Διαφορική σε Μονή Έξοδο	443			

9.6	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ	518
9.6.1	Ανάλυση του Ενισχυτή MOSFET με Ωμικό Φορτίο	518
9.6.2	Απόκριση Συχνότητας του Διαφορικού Ενισχυτή MOSFET με Ενεργό Φορτίο	521
9.7	ΆΛΛΕΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ	525
9.7.1	Ενίσχυση Ευρείας Ζώνης Μέσω Εκφυλισμού Πηγής ή Εκπομπού	526
9.7.2	Αύξηση της $f_H$ με Απομόνωση της Πηγής Σήματος Εισόδου	528
9.7.3	Αύξηση της $f_H$ Εξαλείφοντας το Φαινόμενο Miller, Χρησιμοποιώντας Συνδεσμολογία CG ή CB με Απομονωτή Εισόδου	531
9.8	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΑΜΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ CS ΚΑΙ CE ΜΕ ΔΙΑΚΡΙΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	533
9.8.1	Απόκριση Συχνότητας του Υπεραυτού Κυκλώματος Μονής Σταθεράς Χρόνου	533
9.8.2	Ο Ενισχυτής CS (Κοινής Πηγής)	534
9.8.3	Η Μέθοδος των Σταθερών Χρόνου (σε Κατάσταση) Βραχυκύκλωσης	539
9.8.4	Ο Ενισχυτής CE	539
	ΣΥΝΟΨΗ	542
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	543

## 10 Ανάδραση 554

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	555
10.1	Η ΓΕΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ	555
10.1.1	Το Διάγραμμα Ροής Σήματος	555
10.1.2	Το Κέρδος Κλειστού Βρόχου	556
10.1.3	Το Κέρδος Βρόχου	557
10.1.4	Η Ιδανική Περίπτωση Άπειρου Κέρδους Ανοικτού Βρόχου A	558
10.1.5	Σύνοψη	561
10.2	ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ	561
10.2.1	Απευαισθητοποίηση του Κέρδους	561
10.2.2	Διεύρυνση του Εύρους Ζώνης	561
10.2.3	Μείωση της Μη-Γραμμικής Παραμόρφωσης	562
10.3	Ο ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΡΑΣΗ	564
10.3.1	Η Τοπολογία Ανάδρασης Σειράς-Παράλληλα	564
10.3.2	Παραδείγματα Ενισχυτών με Ανάδραση Σειράς-Παράλληλα	565
10.3.3	Ανάλυση του Ενισχυτή Τάσης με Ανάδραση	566
10.3.4	Ένα Τελικό Σχόλιο	571
10.4	ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΡΑΣΗ	571
10.4.1	Η Ιδανική Περίπτωση	571
10.4.2	Η Πρακτική Περίπτωση	573
10.5	ΆΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΔΡΑΣΗ	580
10.5.1	Οι Βασικές Αρχές	580

10.5.2	Ο Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με Ανάδραση (Σειράς-Σειράς)	582
10.5.3	Ο Ενισχυτής Διαντίστασης με Ανάδραση (Παράλληλα-Παράλληλα)	590
10.5.4	Ο Ενισχυτής Ρεύματος με Ανάδραση (Παράλληλα-Σειράς)	590
10.6	ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ	590
10.7	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	600
10.8	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ ΤΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ	602
10.8.1	Ευστάθεια και Θέση των Πόλων	602
10.8.2	Πόλοι του Ενισχυτή με Ανάδραση	602
10.8.3	Ενισχυτής με Απόκριση Ενός Πόλου	603
10.8.4	Ενισχυτές με Απόκριση Δύο Πόλων	604
10.8.5	Ενισχυτές με Τρεις ή Περισσότερους Πόλους	606
10.9	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ BODE	607
10.9.1	Περιθώρια Κέρδους και Φάσης	607
10.9.2	Επίδραση του Περιθωρίου Φάσης στην Απόκριση Κλειστού Βρόχου	608
10.9.3	Μία Εναλλακτική Προσέγγιση για τη Διερεύνηση της Ευστάθειας	609
10.10	ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	611
10.10.1	Θεωρία	611
10.10.2	Υλοποίηση	612
10.10.3	Αντιστάθμιση Miller και Διαχωρισμός Πόλων	613

ΣΥΝΟΨΗ 615

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ 616

## 11 Στάδια Εξόδου και Ενισχυτές Ισχύος 632

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	633
11.1	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΕΞΟΔΟΥ	633
11.2	ΣΤΑΔΙΟ ΕΞΟΔΟΥ ΣΕ ΤΑΣΗ A	635
11.2.1	Χαρακτηριστικές Μεταφοράς	635
11.2.2	Κυματομορφές Σήματος	637
11.2.3	Κατανάλωση Ισχύος	637
11.2.4	Αποδοτικότητα Μετατροπής Ενέργειας	638
11.3	ΣΤΑΔΙΟ ΕΞΟΔΟΥ ΣΕ ΤΑΣΗ B	639
11.3.1	Λειτουργία του Κυκλώματος	639
11.3.2	Χαρακτηριστική Μεταφοράς	640
11.3.3	Αποδοτικότητα Μετατροπής Ενέργειας	640
11.3.4	Κατανάλωση Ισχύος	641
11.4	ΣΤΑΔΙΟ ΕΞΟΔΟΥ ΣΕ ΤΑΣΗ AB	643
11.4.1	Λειτουργία του Κυκλώματος	643
11.4.2	Αντίσταση Εξόδου	644
11.5	ΠΟΛΩΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΤΑΣΗΣ AB	646
11.5.1	Πόλωση με Χρήση Διόδων	646
11.5.2	Πόλωση με την Χρήση του Πολλαπλασιαστή $V_{BE}$	648
11.5.3	Χρήση Ακόλουθων Εκπομπού στην Είσοδο	650

11.5.4	Χρήση Σύνθετων Στοιχείων	651
11.6	ΣΤΑΔΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CMOS	653
11.6.1	Ο Ακόλουθος Πηγής	653
11.6.2	Μια Εναλλακτική, με Χρήση Τρανζίστορ Κοινής Πηγής	654
11.6.3	Ενισχυτές Ισχύος Τάξης D	657
11.7	ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΙΣΧΥΟΣ	659
11.7.1	Συσκευασίες και Αποδέκτες Θερμότητας	659
11.7.2	BJT Ισχύος	660
11.7.3	MOSFET Ισχύος	660
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	662
	ΣΥΝΟΨΗ	662

## 12 Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών 668

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	669
12.1	Ο ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ CMOS ΔΥΟ ΣΤΑΔΙΩΝ	669
12.1.1	Το Κύκλωμα	669
12.1.2	Περιοχή Κοινού Σήματος Εισόδου και Περιθώριο Μεταβολής Εξόδου	670
12.1.3	DC Κέρδος Τάσης	671
12.1.4	Λόγος Απόρριψης Κοινού Σήματος	673
12.1.5	Απόκριση Συχνότητας	673
12.1.6	Ρυθμός Ανόδου	677
12.1.7	Λόγος Απόρριψης Τάσης Τροφοδοσίας (PSRR)	678
12.1.8	Σχεδιαστικοί Συμβιβασμοί	679
12.2	Ο FOLDED CASCODE ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ CMOS	682
12.2.1	Το Κύκλωμα	683
12.2.2	Περιοχή Κοινού Σήματος Εισόδου και Περιθώριο Μεταβολής της Εξόδου	684
12.2.3	Κέρδος Τάσης	685
12.2.4	Απόκριση Συχνότητας	687
12.2.5	Ρυθμός Ανόδου	687
12.2.6	Αύξηση του Εύρους της Περιοχής Κοινού Σήματος Εισόδου με Χρήση της Δομής Rail-to-Rail για το Στάδιο Εισόδου	689
12.2.7	Αύξηση του Εύρους Τιμών της Εξόδου: Ο «Wide-Swing» Καθρέπτης Ρεύματος	690
12.3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ BJT	691
12.3.1	Σχεδίαση του Κυκλώματος Πόλωσης	692
12.3.2	Σχεδίαση του Σταδίου Εισόδου	693
12.3.3	Ανάδραση Κοινού Σήματος για τον Έλεγχο της DC Τάσης στην Έξοδο του Σταδίου Εισόδου	698
12.3.4	Το Στάδιο Εισόδου του Τελεστικού Ενισχυτή	741 702
12.3.5	Σχεδίαση του Σταδίου Εξόδου για «Σχεδόν Rail-to-Rail» Έξοδο	708
	ΣΥΝΟΨΗ	711
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	712

## 13 Φίλτρα και Συντονισμένοι Ενισχυτές 718

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	719
13.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΦΙΛΤΡΩΝ	719
13.1.1	Μετάδοση Φίλτρου	719
13.1.2	Τύποι Φίλτρων	720
13.1.3	Καθορισμός Προδιαγραφών Φίλτρου	721
13.1.4	Εύρεση της Συνάρτησης Μεταφοράς του Φίλτρου: Προσέγγιση του Φίλτρου	722
13.1.5	Εύρεση του Κυκλώματος του Φίλτρου: Υλοποίηση του Φίλτρου	722
13.2	Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ	723
13.2.1	Η Τάξη του Φίλτρου	723
13.2.2	Οι Πόλοι του Φίλτρου	724
13.2.3	Τα Μηδενικά Μετάδοσης του Φίλτρου	724
13.2.4	Φίλτρα Μόνο με Πόλους	726
13.2.5	Παραγοντοποίηση της $T(s)$ σε Γινόμενο Συναρτήσεων Πρώτης και Δεύτερης Τάξης	727
13.2.6	Φίλτρα Πρώτης Τάξης	727
13.2.7	Συναρτήσεις Φίλτρων Δεύτερης Τάξης	728
13.3	ΦΙΛΤΡΑ BUTTERWORTH ΚΑΙ CHEBYSHEV	730
13.3.1	Το Φίλτρο Butterworth	731
13.3.2	Το Φίλτρο Chebyshev	735
13.4	ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ LCR ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ	737
13.4.1	Οι Πόλοι του Κυκλώματος Συντονισμού	737
13.4.2	Υλοποίηση των Μηδενικών Μετάδοσης	738
13.4.3	Υλοποίηση της Συνάρτησης Βαθυπερατού Τύπου	738
13.4.4	Υλοποίηση της Συνάρτησης Ζωνοπερατού Τύπου	739
13.4.5	Υλοποίηση των Συναρτήσεων Σχιsmής	740
13.5	ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΗΝΙΟΥ	740
13.5.1	Το Κύκλωμα Προσομοίωσης Πηνίου του Αντώνιου	741
13.5.2	Το Κύκλωμα Συντονισμού Τελεστικού Ενισχυτή-RC	742
13.5.3	Υλοποίηση Διάφορων Τύπων Φίλτρων	743
13.6	ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΒΡΟΧΟ ΔΥΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΩΝ	745
13.6.1	Δημιουργία του Biquad Βρόχου Δύο Ολοκληρωτών	745
13.6.2	Κυκλωματική Υλοποίηση	747
13.6.3	Ένα Εναλλακτικό Biquad Κύκλωμα με Βρόχο Δύο Ολοκληρωτών	748
13.6.4	Τελικά Σχόλια	749
13.7	ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ	750
13.7.1	Ζωνοπερατό Κύκλωμα	751
13.7.2	Υψιπερατό Φίλτρο	752

13.7.3	Βαθυπερατό Κύκλωμα	753
13.8	ΦΙΛΤΡΑ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ	754
13.8.1	Η Βασική Αρχή	754
13.8.2	Ολοκληρωτής Διακοπτόμενων Πυκνωτών	756
13.8.3	Biquad Φίλτρα Διακοπτόμενων Πυκνωτών	756
13.8.4	Ένα Τελικό Σχόλιο	758
13.9	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΤΩΝ	758
13.9.1	Ο Βρόχος Ανάδρασης του Ταλαντωτή	758
13.9.2	Το Κριτήριο Ταλάντωσης	758
13.9.3	Ανάλυση Κυκλωμάτων Ταλαντωτών	759
13.9.4	Μη-Γραμμικός Έλεγχος Πλάτους	762
13.10	ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΤΑΛΑΝΤΩΤΩΝ ΜΕ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΚΑΙ RC	764
13.10.1	Ο Ταλαντωτής Γέφυρας Wien	764
13.10.2	Ο Ταλαντωτής Ολίσθησης Φάσης	766
13.10.3	Ο Ταλαντωτής Τετραγωνισμού	768
13.10.4	Συντονιζόμενος Ταλαντωτής Ενεργού Φίλτρου	769
13.10.5	Ένα Τελικό Σχόλιο	770
13.11	LC ΚΑΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ	770
13.11.1	Ταλαντωτές Colpitts και Hartely	770
13.11.2	Ο Χιαστί Συνδεδεμένος (Cross-Coupled) Ταλαντωτής LC	773
13.11.3	Κρυσταλλικοί Ταλαντωτές	774
13.12	ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ Ή ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	776
13.12.1	Ο Δισταθής Βρόχος Ανάδρασης	776
13.12.2	Η Χαρακτηριστική Μεταφοράς του Δισταθούς Κυκλώματος	777
13.12.3	Σκανδαλισμός του Δισταθούς Κυκλώματος	778
13.12.4	Το Δισταθές Κύκλωμα Ως Στοιχείο Μνήμης	779
13.4.5	Δισταθές Κύκλωμα με Μη-Αναστρέφουσα Χαρακτηριστική Μεταφοράς	779
13.12.6	Παραγωγή Τετραγωνικών Κυματομορφών με Χρήση Δισταθούς Κυκλώματος	780
13.12.7	Παραγωγή Τριγωνικών Κυματομορφών	782
13.12.8	Παραγωγή Ημιτονοειδών Κυμάτων	784
	ΣΥΝΟΨΗ	784
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	785

### ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ 794

#### 14 Ψηφιακά Λογικά Κυκλώματα CMOS 796

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	797
14.1	ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΛΟΓΙΚΩΝ ΠΥΛΩΝ CMOS	797
14.1.1	Μοντελοποίηση του Τρανζίστορ ως Διακόπτη	797

14.1.2	Ο Αντιστροφέας CMOS	797
14.1.3	Η Γενική Δομή της Λογικής CMOS	797
14.1.4	Η Πύλη NOR Δύο Εισόδων	801
14.1.5	Η Πύλη NAND Δύο Εισόδων	801
14.1.6	Μία Πολυπλοκότερη Πύλη	801
14.1.7	Εύρεση του PUN από το PDN και Αντίστροφα	802
14.1.8	Η Συνάρτηση Αποκλειστικού OR	802
14.1.9	Σύνοψη της Μεθόδου Σύνθεσης	803
14.2	ΨΗΦΙΑΚΟΙ ΛΟΓΙΚΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ	804
14.2.1	Η Χαρακτηριστική Μεταφοράς Τάσης	805
14.2.2	Περιθώρια Θορύβου	806
14.2.3	Η Ιδανική Χαρακτηριστική VTC	807
14.2.4	Υλοποίηση Ενός Αντιστροφέα	807
14.3	Ο ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ CMOS	814
14.3.1	Η Λειτουργία του Κυκλώματος	814
14.3.2	Η Χαρακτηριστική Μεταφοράς Τάσης	816
14.3.3	Η Περίπτωση Όπου τα $Q_N$ και $Q_P$ Δεν Είναι Ταίριασμένα	818
	ΣΥΝΟΨΗ	822
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	823

#### 15 Σχεδίαση Ψηφιακών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων: Ισχύς, Ταχύτητα και Εμβαδό Επιφάνειας 826

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	827
15.1	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ CMOS	827
15.1.1	Καθυστέρηση Διάδοσης	827
15.1.2	Καθορισμός της Καθυστέρησης Διάδοσης του Αντιστροφέα CMOS	830
15.1.3	Καθορισμός της Ισοδύναμης Χωρητικότητας Φορτίου C	835
15.2	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ	838
15.2.1	Διαστάσεις του Αντιστροφέα	838
15.2.2	Διαστάσεις των Τρανζίστορ σε Λογικές Πύλες CMOS	839
15.2.3	Η Επίδραση των Fan-In και Fan-Out στην Καθυστέρηση Διάδοσης	841
15.2.4	Οδήγηση Μεγάλης Χωρητικότητας	842
15.3	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ	844
15.3.1	Πηγές Κατανάλωσης Ισχύος	844
15.3.2	Γινόμενο Ισχύος-Καθυστέρησης και Γινόμενο Ενέργειας-Καθυστέρησης	847
15.4	ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΑΤΩ ΚΛΙΜΑΚΩΣΗΣ: ΟΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΒΑΘΕΩΣ ΥΠΟΜΙΚΡΟΥ	848
15.4.1	Επιφάνεια Πυριτίου	848
15.4.2	Οι Συνέπειες της Κλιμάκωσης	848
15.4.3	Επίδραση της Μεταβλητότητας στη Θερμοκρασία, στην Τάση και στις Παραμέτρους της Τεχνολογίας Κατασκευής	849
15.4.4	Το Ζήτημα με τους Αγωγούς Διασύνδεσης	850



15.4.5 Φηφιακή Σχεδίαση στις Σύγχρονες Τεχνολογίες	850
ΣΥΝΟΨΗ	851
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	852
<b>16 Κυκλώματα Μνήμης και Χρονισμού</b>	<b>856</b>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	857
16.1 Η ΠΥΛΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	857
16.1.1 Λειτουργία με NMOS Τρανζίστορ ως Διακόπτες	858
16.1.2 Αποκατάσταση της Τιμής της $V_{OH}$ στη Στάθμη $V_{DD}$	860
16.1.3 Χρήση Πυλών Μετάδοσης CMOS ως Διακοπών	861
16.2 ΜΑΝΔΑΛΩΤΕΣ ΚΑΙ FLIP-FLOP	865
16.2.1 Ο Μανδαλωτής	865
16.2.2 Το SR Flip-Flop	867
16.2.3 CMOS Υλοποίηση των SR Flip-Flop	868
16.2.4 Μία Απλούστερη CMOS Υλοποίηση του SR Flip-Flop με Κύκλωμα Ρολογιού	871
16.2.5 Κυκλώματα D Flip-Flop	871
16.3 ΚΥΤΤΑΡΑ ΜΝΗΜΗΣ ΤΥΧΑΙΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ (RAM)	873
16.3.1 Κύτταρα Στατικής Μνήμης	875

16.3.2 Κύτταρα Δυναμικής Μνήμης	880
16.3.3 Μνήμη Flash	882
16.4 ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ ΤΥΠΟΥ RING ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΕΙΔΙΚΟΥ ΣΚΟΠΟΥ	883
16.4.1 Ο Ταλαντωτής Τύπου Ring και Κυκλώματα Παραγωγής Παλμών	884
16.4.2 Ενισχυτής Ανίχνευσης	885
16.4.3 Ο Αποκωδικοποιητής Διεύθυνσης Γραμμής	889
16.4.4 Ο Αποκωδικοποιητής Διεύθυνσης Στήλης	890
ΣΥΝΟΨΗ	891
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	892

### Παραρτήματα στον Συνοδευτικό Ιστότοπο

I.	ΤΙΜΕΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ	I-1
ΙΑ	ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ	ΙΑ-1

### Ευρετήριο E-1