

Λογική Σχεδίαση



dscal

DIGITAL SYSTEMS & COMPUTER ARCHITECTURE LABORATORY

Λογική σχεδίαση

- Θεωρία: Καθηγητής Αντώνιος Πασχάλης
 - E-mail: paschalis@di.uoa.gr
- Εργαστήριο: Διονύσιος Βασιλόπουλος, ΕΤΕΠ
 - E-mail: denis@di.uoa.gr
- Πληροφορίες για το μάθημα θα βρείτε στο eclass
 - Οι διαλέξεις του μαθήματος
 - Λυμένες ασκήσεις
- Το εργαστήριο προσφέρει την κατανόηση των βασικών αρχών και πρακτικών της ψηφιακής λογικής, σύμφωνα με το αρχαίο κινέζικο ρητό:
 - “Ακούω και ξεχνώ,
βλέπω και θυμάμαι,
εφαρμόζω και κατανοώ (μαθαίνω)”

Λογική σχεδίαση

■ Μαθησιακοί στόχοι:

- Να μνηθούν βήμα-βήμα οι αμύητοι φοιτητές, χωρίς την αναγκαιότητα κάποιας πρότερης γνώσης, αρχικά στα αριθμητικά συστήματα και στις λογικές πύλες, κατόπιν στη συνδυαστική λογική και τέλος στην ακολουθιακή λογική
- Η μύηση συμπεριλαμβάνει και θεμελιώδεις γνώσεις προγραμματισμού σε γλώσσα περιγραφής υλικού (VHDL)
 - Σήμερα, το hardware είναι κυρίως προγραμματισμός
- Το ιδιαίτερο τελετουργικό μύησης στην ψηφιακή σχεδίαση, που ακολουθείται στο παρόν μάθημα, αφορά όλους τους φοιτητές που ενδιαφέρονται να εντρυφήσουν :
 - στην ανάπτυξη του υλικού και του λογισμικού υπολογιστικών συστημάτων, τηλεπικοινωνιακών και δικτυακών συστημάτων, και συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και πληροφοριών
 - στην επιστήμη και τεχνολογία των υπολογιστών

Λογική σχεδίαση

- Προσδοκώμενα μαθησιακά αποτελέσματα
- Με την επιτυχή ολοκλήρωση του μαθήματος ο φοιτητής/η φοιτήτρια θα είναι σε θέση να:
 - περιγράφει τις αρχές και πρακτικές της συνδυαστικής και ακολουθιακής λογικής,
 - σχεδιάζει όλες τις βασικές μονάδες ενός ψηφιακού συστήματος στο επίπεδο της λογικής σχεδίασης,
 - αναλύει το συγχρονισμό των ψηφιακών συστημάτων,
 - περιγράφει τις σύγχρονες διατάξεις μνήμης και λογικής,
 - κατέχει βασική γνώση προγραμματισμού σε γλώσσα περιγραφής υλικού (VHDL) (μέσω του εργαστηρίου)

Λογική σχεδίαση

■ Βιβλιογραφία

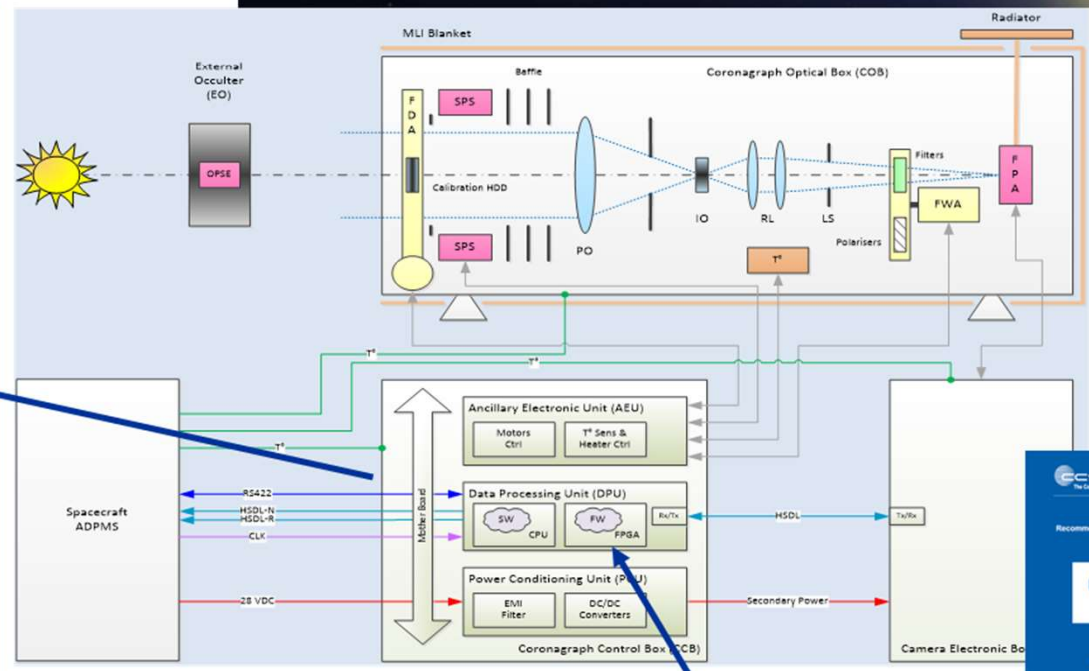
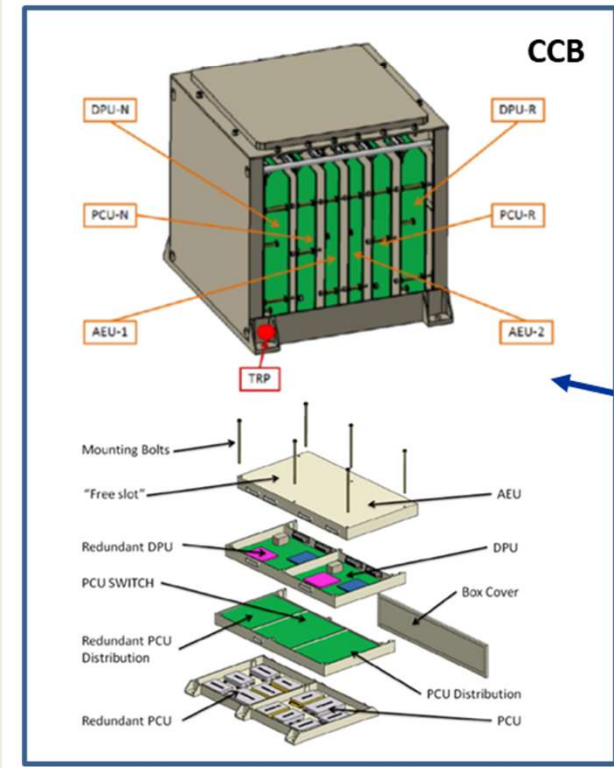
- ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, ΕΚΔΟΣΗ ARM®
- Κωδικός Βιβλίου στον Εύδοξο: 86055864
- Έκδοση: 1η/2019
- Συγγραφείς: SARAH L. HARRIS, DAVID MONEY HARRIS
- ISBN: 978-960-461-961-0
- Τύπος: Σύγγραμμα
- Διαθέτης (Εκδότης): ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΕ





dscal
DIGITAL SYSTEMS & COMPUTER ARCHITECTURE LABORATORY

ESA PROBA-3 Coronagraph System



Made in Greece

CCSDS 121.0-B-2 Image Data Compression (IDC) IP core



Κεφάλαιο **1**

Εισαγωγή στη ψηφιακή σχεδίαση και
τεχνολογία (από το μηδέν στο ένα)

Γιώργος Παπαδημητρίου, Αντώνης Πασχάλης



dscal
DIGITAL SYSTEMS & COMPUTER ARCHITECTURE LABORATORY

Περιεχόμενα κεφαλαίου 1

- Εξέλιξη ψηφιακής τεχνολογίας
- Περί μικροεπεξεργαστών
- Διαχείριση πολυπλοκότητας υπολογιστικών συστημάτων
- Ψηφιακή «αφαίρεση»
- Αναπαράσταση αριθμών σε δυαδική μορφή
- Πράξεις (+, -) μεταξύ δυαδικών αριθμών
- Αθροιστές - Αφαιρέτες
- Λογικές πύλες
- Λογικά επίπεδα – Περιθώρια θορύβου
- Τρανζίστορ CMOS – Μοντέλο διακοπών – CMOS πύλες
- Κατανάλωση ισχύος

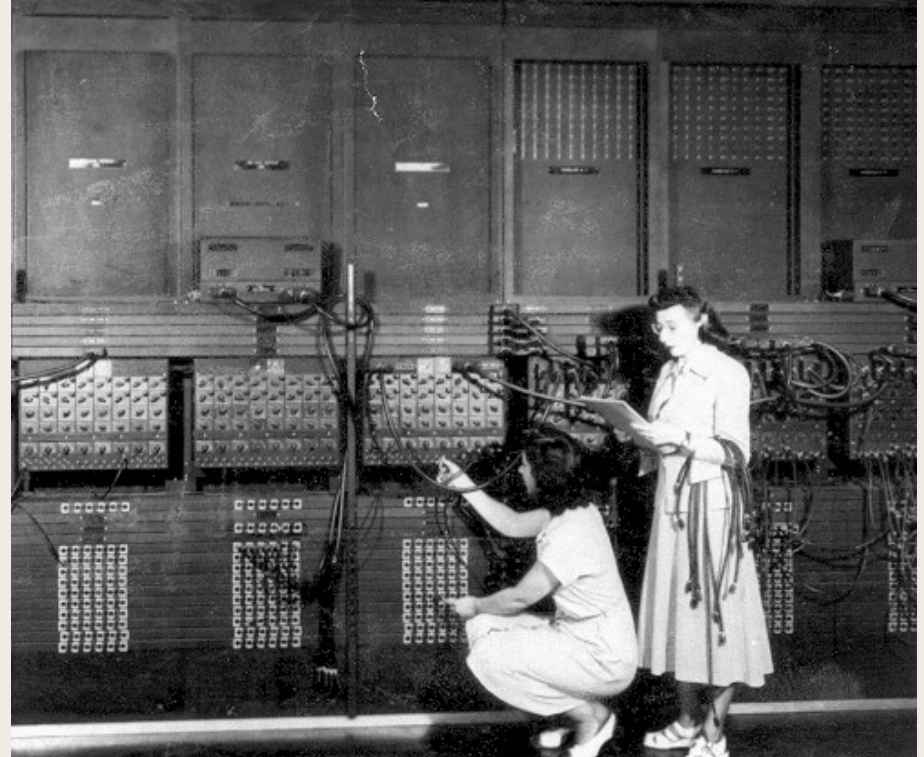
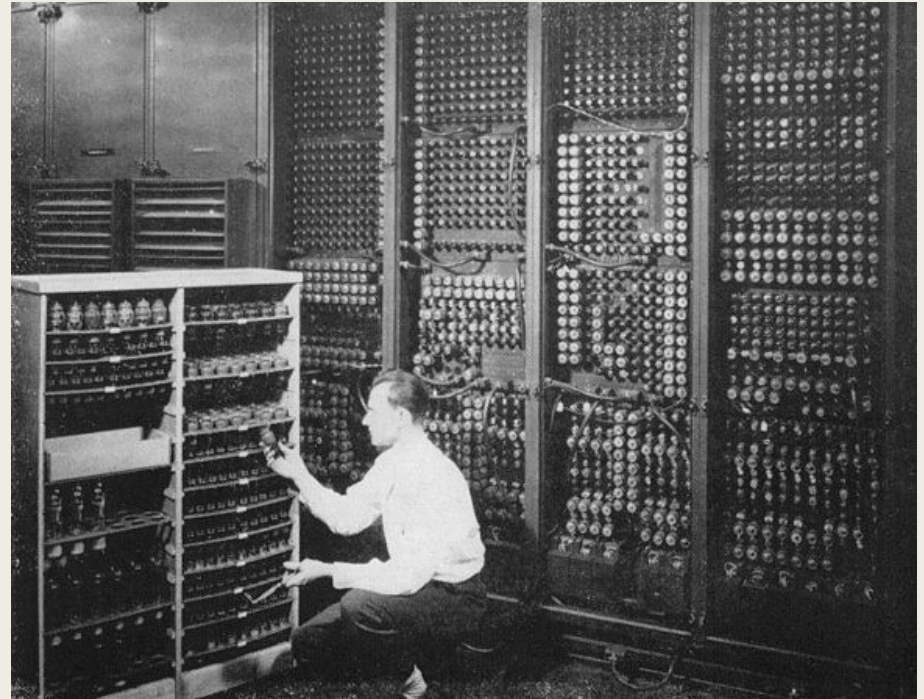
Οι παρουσιάσεις βασίζονται στο βιβλίο με τίτλο «[Ψηφιακή σχεδίαση και αρχιτεκτονική υπολογιστών – Έκδοση ARM](#)» των Sarah L. Harris & David Money Harris. Τίτλοι με κόκκινο υποδηλώνουν εκπαιδευτικό υλικό εκτός αυτού του βιβλίου.

Τεχνολογική εξέλιξη

- 1930 : ρελέδες (relays)
- 1940 : λυχνίες (tubes)
 - ENIAC 19.000 λυχνίες, 30x3x1 m³, 140 KW
- 1950 : τρανζίστορ (transistors)
- 1960 : ολοκληρωμένα κυκλώματα (integrated circuits – ICs):
 - μερικές πύλες (4-6) σε ένα chip
- 1970 : μικροεπεξεργαστές, μνήμες (RAM, ROM), PLD
 - 1971 i4004, 1972 i8080, 1978 i8086
- 1980-90 : VLSI κυκλώματα
 - ASIC, CPLD, FPGA, DSP, MCM, ...
- 2000 : Σύστημα σε τσιπ (System on Chip - SoC)
 - Η πλακέτα του σήμερα το τσιπ του αύριο
- 2010 : Ετερογενείς τεχνολογίες και 3D σε ένα τσιπ
 - προγραμματιζόμενη λογική + μνήμες + μικροεπεξεργαστές + επεξεργαστές γραφικών + επιταχυντές υλικού σε ένα τσιπ

ENIAC

- Αντικατάσταση λυχνίας (19.000 πιθανές βλάβες)
- Εισαγωγή προγράμματος (με κατάλληλη καλωδίωση)

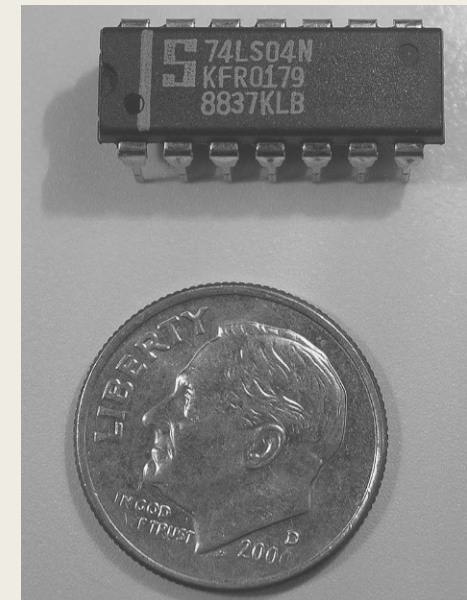
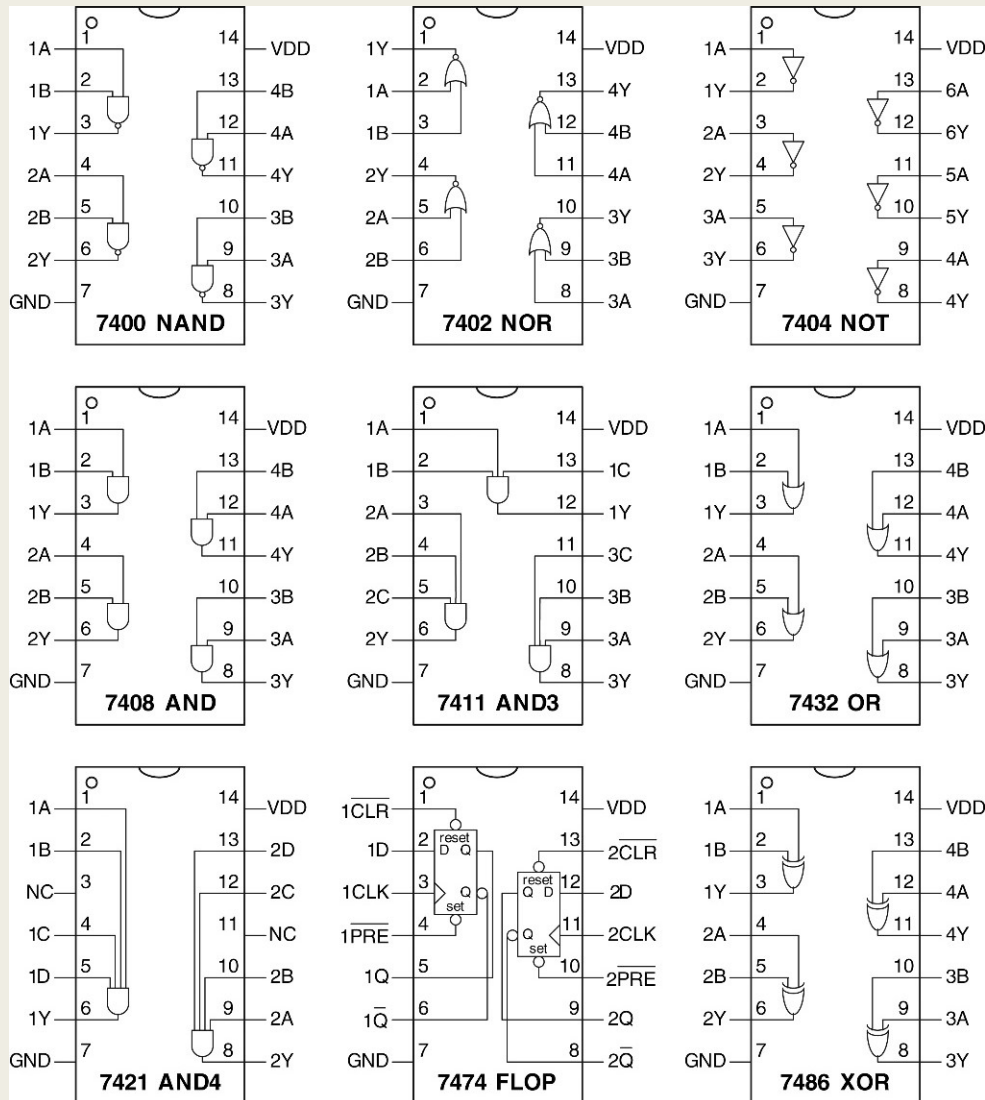


Ολοκληρωμένα κυκλώματα

- **SSI (small scale integration)** : 1-20 πύλες
 - μερικές πύλες σε ένα *chip*
- **MSI (medium scale integration)** : 20-200 πύλες
 - αποκωδικοποιητές, καταχωρητές, μετρητές
- **LSI (large scale integration)** : 200-200.000 πύλες
 - μνήμες, μικροεπεξεργαστές (*μPs*), *PLDs*
- **VLSI (very large scale integration)** : > 500.000 transistors
 - *Application Specific Integrated Circuits* - *ASICs*
 - *Field-Programmable Gate Arrays* - *FPGAs*
 - *Complex Programmable Logic Devices* - *CPLDs*
 - *Digital Signal Processors* - *DSPs*
 - *Multichip Modules* - *MCMs*

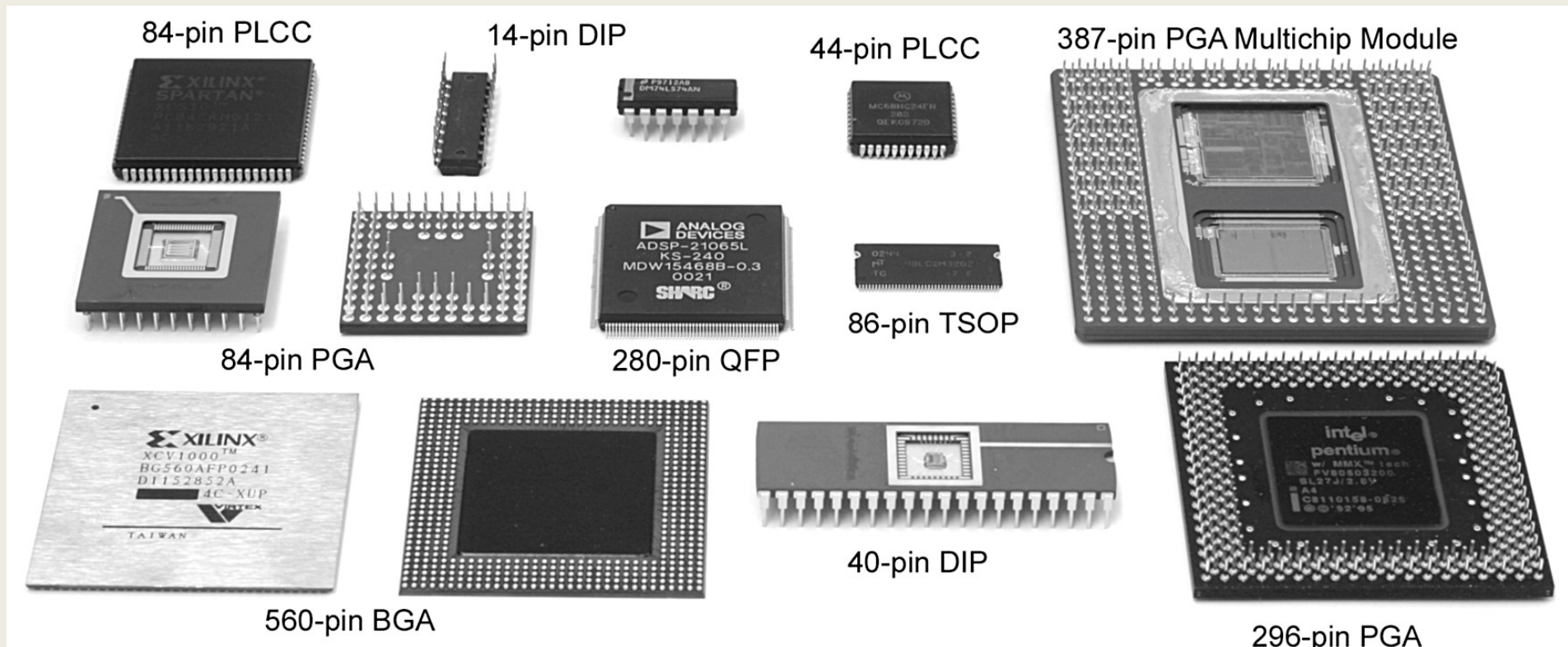
Ολοκληρωμένα κυκλώματα

- Η αρχή: SSI, σειρά 74xx (με 14 ακροδέκτες)



Ολοκληρωμένα κυκλώματα

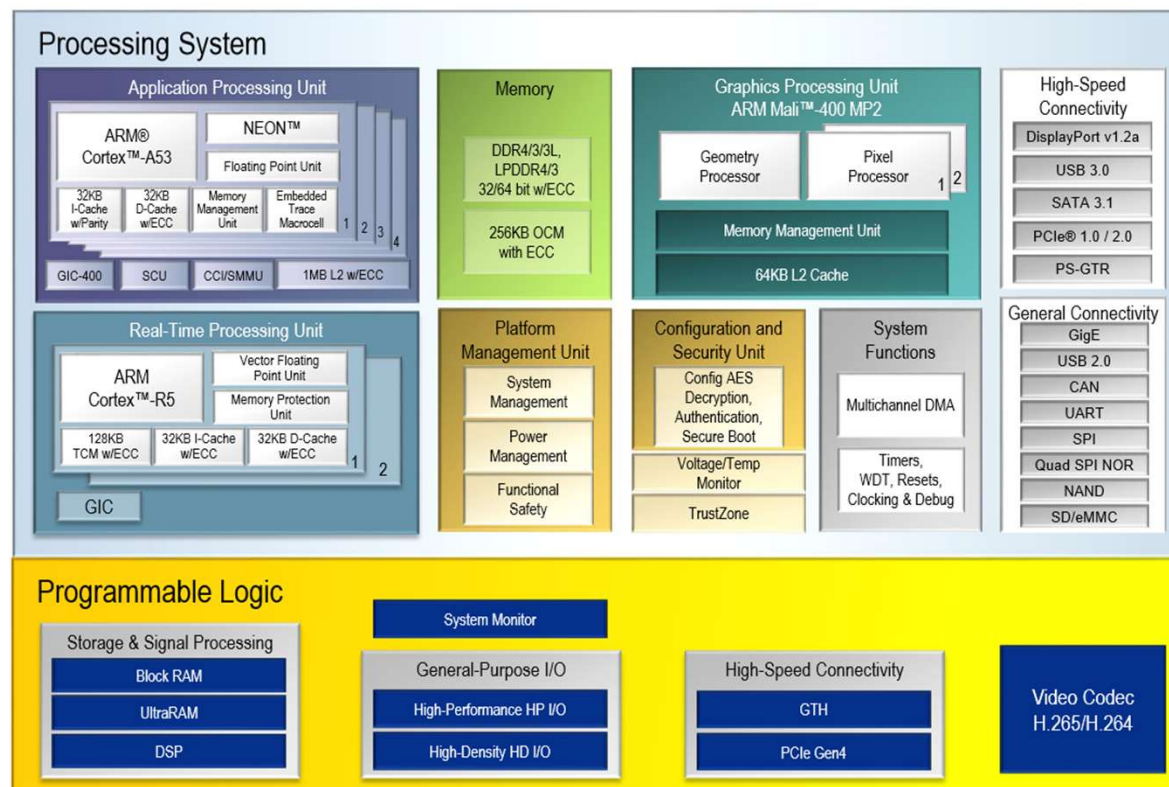
- Η εξέλιξη: SSI-MSI-LSI-VLSI (από 14 μέχρι 560 ακροδέκτες)



Ολοκληρωμένα κυκλώματα

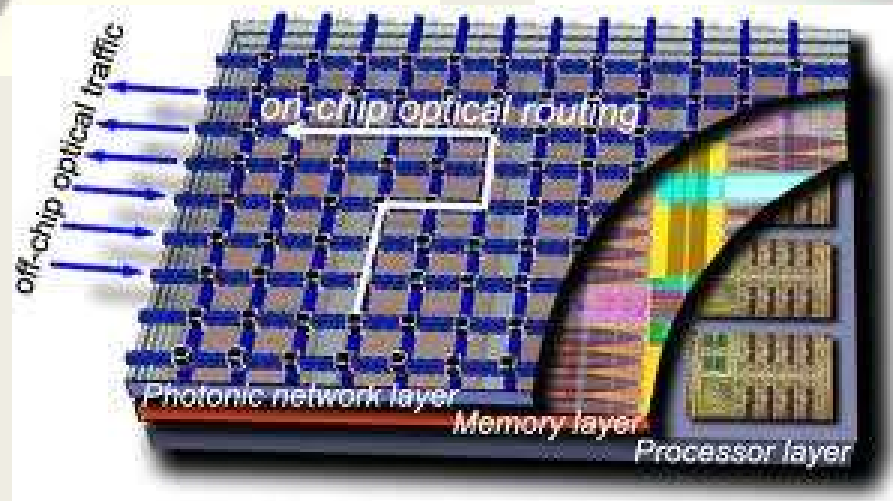
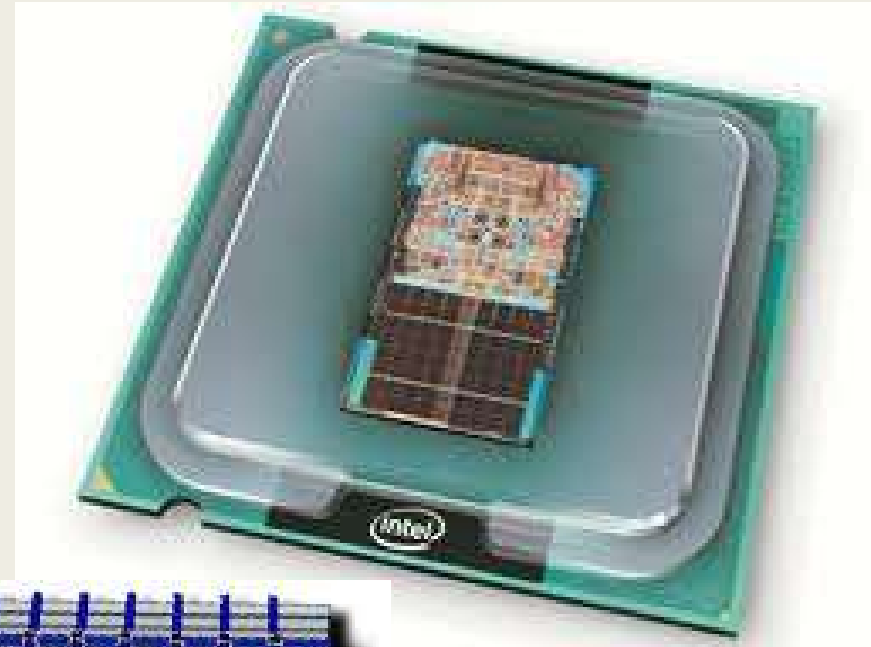
- Η τεχνολογική εξέλιξη που αλλάζει τα δεδομένα του **Hardware**
 - προγραμματιζόμενη λογική + μνήμες + μικροεπεξεργαστές + επεξεργαστές γραφικών + επιταχυντές υλικού σε ένα τσιπ

Zynq® UltraScale+™ MPSoCs: EV Block Diagram



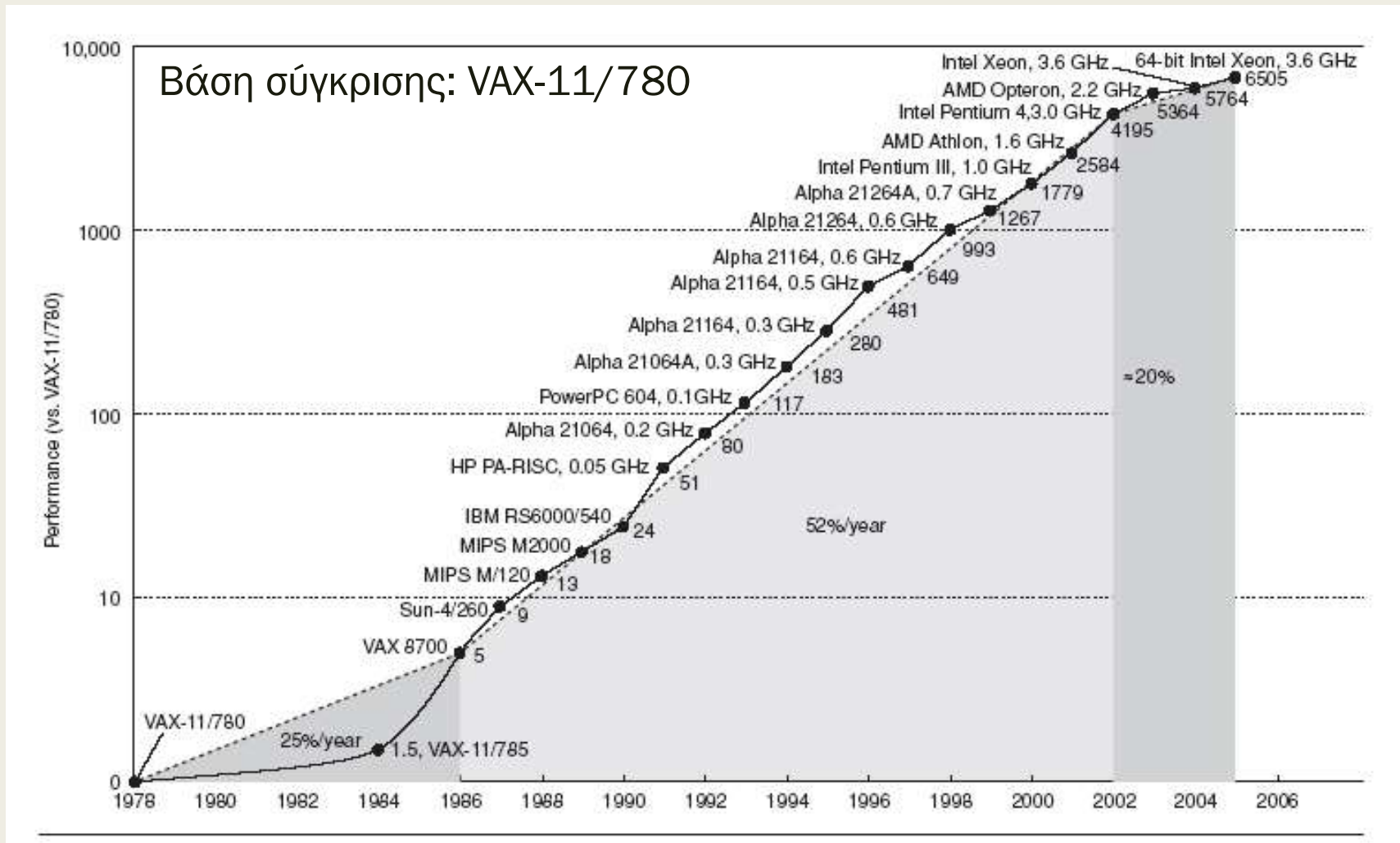
Ολοκληρωμένα κυκλώματα

- Το παρόν (2D και 3D) και το μέλλον (φωτονικοί υπερυπολογιστές)

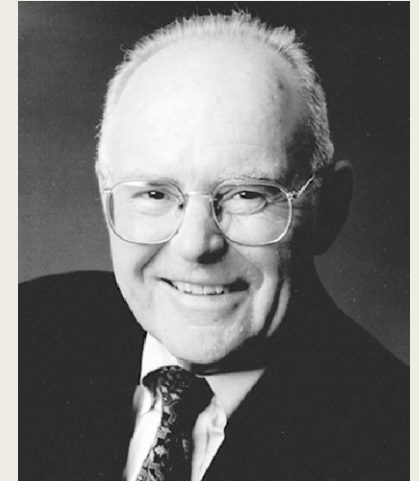


Εξέλιξη μικροεπεξεργαστών

- Σε 30 χρόνια η απόδοση ενός μP έχει αυξηθεί > 6.000 φορές.
Ο κορεσμός αντιμετωπίστηκε με τους πολυύρηνους επεξεργαστές



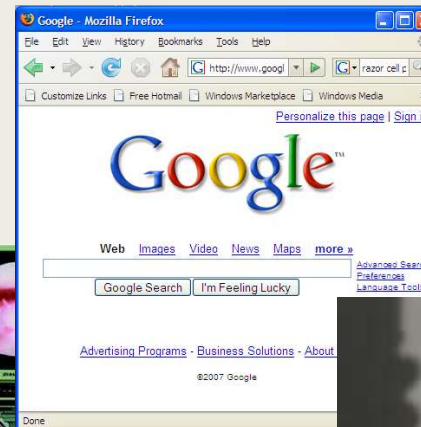
Νόμος του Moore



- Gordon Moore (Σαν Φρανσίσκο, 1929)
- Κάτοχος προπτυχιακού διπλώματος στη Χημεία από το Πανεπιστήμιο Berkeley και διδακτορικού διπλώματος στη Χημεία και τη Φυσική από το Πανεπιστήμιο Caltech
- Το 1968 ίδρυσε την εταιρεία Intel μαζί με τον Robert Noyce
- Το 1965 παρατήρησε ότι **το πλήθος των τρανζίστορ σε ένα τσιπ υπολογιστών διπλασιάζεται κάθε χρόνο**. Αυτή η τάση έχει γίνει ευρύτερα γνωστή ως **Νόμος του Moore**
- Από το 1975 και έπειτα, **το πλήθος των τρανζίστορ διπλασιάζεται κάθε δύο χρόνια**, ενώ **η απόδοση των μικροεπεξεργαστών διπλασιάζεται κάθε 18 με 24 μήνες**
- Το νόμο του Moore ακολουθούν και **οι μνήμες (τεχνολογίας SRAM, DRAM, HDD, SSD)** του ιεραρχικού συστήματος μνήμης, αλλά με μικρότερους ρυθμούς
- Οι **πωλήσεις των ημιαγωγών** εμφανίζουν και αυτές εκθετική αύξηση
- Ο Νόμος του Moore έχει αποτελέσει την κινητήρια δύναμη πίσω από την απίστευτη πρόοδο που έχει σημειωθεί στη **βιομηχανία των ημιαγωγών** τα 50 τελευταία χρόνια, που οδηγεί στη ψηφιακή εποχή

Εφαρμογές μικροεπεξεργαστών

- Οι μικροεπεξεργαστές έχουν εξελιχτεί σε μεγάλο βαθμό τις τέσσερις τελευταίες δεκαετίες:
 - Υπολογιστικά συστήματα
 - Αυτοκίνητα
 - Κινητά τηλέφωνα
 - Διαδίκτυο
 - Όργανα ιατρικής



Διαχείριση Πολυπλοκότητας

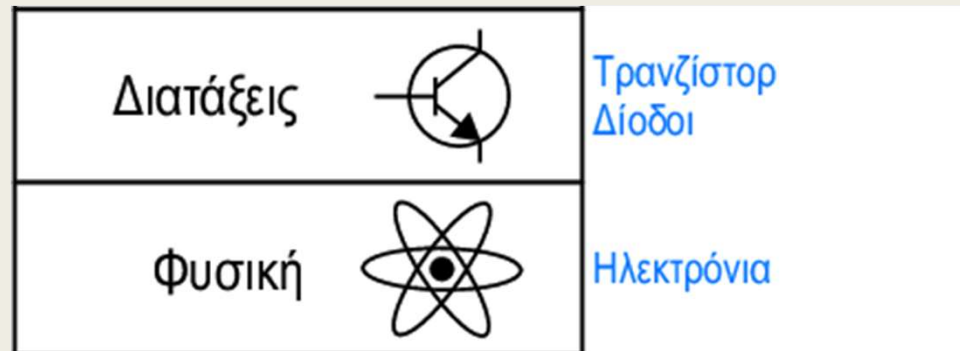
- Για την κατασκευή ενός μικροεπεξεργαστή χρειάζεται πολύ **μεγάλος αριθμός τρανζίστορ** (πάνω από 1 δισεκατομμύριο)
 - Η κατανόηση του είναι αδύνατη χωρίς να γίνεται διαχείριση της πολυπλοκότητας
- Τρόποι **διαχείρισης της πολυπλοκότητας**
 - Αφαίρεση (*Abstraction*)
 - Πειθαρχία (*Discipline*)
 - Τα τρία «Α»
 - Ιεραρχία (*hierarchy*),
 - Τμηματικότητα (*modularity*)
 - Κανονικότητα (*regularity*)

Αφαίρεση (Abstraction)

- Η **αφαίρεση** είναι μία τεχνική διαχείρισης της πολυπλοκότητας
 - Πληροφορίες οι οποίες **δεν είναι σημαντικές** πρέπει να αποκρύπτονται
- Παραδείγματα αφαίρεσης:
 - Η Ελλάδα χωρίζεται σε νομούς
 - Κάθε νομός έχει έναν αριθμό πόλεων
 - Ένας πολιτικός στην προεκλογική του εκστρατεία θα εστιάσει την προσοχή του στο πως θα ψηφίσει **ο νομός σαν σύνολο και όχι στις επιμέρους ψήφους της κάθε πόλης**

Επίπεδα Αφαίρεσης Υ/Σ*

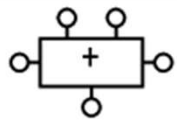

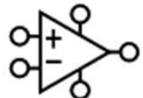


- 1^ο επίπεδο: η κίνηση των ηλεκτρονίων
 - Η κίνησή τους περιγράφεται στις εξισώσεις Maxwell και την κβαντική μηχανή
- 2ο επίπεδο: οι ηλεκτρονικές διατάξεις από τις οποίες ένα σύστημα κατασκευάζεται, π.χ., τρανζίστορ, δίοδοι, κλπ.
 - Οι διατάξεις αυτές διαθέτουν καλώς ορισμένα σημεία σύνδεσης που ονομάζονται **τερματικά σημεία** και περιγράφονται από την **σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος**
 - Μπορούμε να αγνοήσουμε τα μεμονωμένα ηλεκτρόνια



*Υ/Σ: υπολογιστικό σύστημα


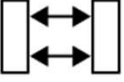
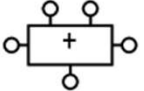

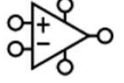


Επίπεδα Αφαίρεσης Υ/Σ

- 3^ο επίπεδο: τα αναλογικά κυκλώματα
 - Παίρνουν ως είσοδο και δημιουργούν σαν έξοδο **ένα συνεχές εύρος τιμών τάσης**
 - Η σύνδεση τους μπορεί να παράξει ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως οι ενισχυτές και τα φίλτρα
- 4^ο επίπεδο: τα ψηφιακά κυκλώματα
 - Περιορίζουν τις τάσεις/εισόδους σε **διακριτό εύρος τιμών** το οποίο θα αντιστοιχούμε σε 0 και 1 και παράγουν αντίστοιχες εξόδους
 - Η πιο απλή κατηγορία των ψηφιακών κυκλωμάτων είναι οι **λογικές πύλες**
- 5^ο επίπεδο: η λογική σχεδίαση
 - Με την βοήθεια των λογικών πυλών, κατασκευάζονται πιο **σύνθετες δομές**, όπως οι αθροιστές και οι μνήμες

Λογική		Αθροιστές Μνήμες
Ψηφιακά κυκλώματα		Πύλες AND Πύλες NOT
Αναλογικά κυκλώματα		Ενισχυτές Φίλτρα
Διατάξεις		Τρανζίστορ Δίοδοι
Φυσική		Ηλεκτρονία





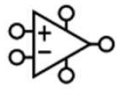

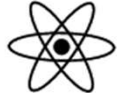
Επίπεδα Αφαίρεσης Υ/Σ

- 6^ο επίπεδο: η μικροαρχιτεκτονική
 - Συνδέει τα επίπεδα που σχετίζονται με τη λογική και την αρχιτεκτονική
 - Περιλαμβάνει τον **συνδυασμό ψηφιακών κυκλωμάτων** με στόχο την εκτέλεση των εντολών που ορίζονται από το επίπεδο της αρχιτεκτονικής
 - Πολλές μικροαρχιτεκτονικές με **διαφορετικούς συμβιβασμούς** σε κόστος, επιδόσεις και κατανάλωση ισχύος υλοποιούν την ίδια αρχιτεκτονική
- 7^ο επίπεδο: η αρχιτεκτονική
 - περιγράφει έναν υπολογιστή από την **οπτική γωνία του προγραμματιστή**
 - Η INTELx86 ορίζεται από ένα σύνολο εντολών και καταχωρητών που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο προγραμματιστής

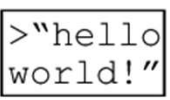


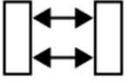
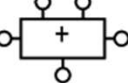
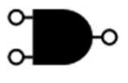
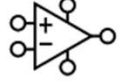


Αρχιτεκτονική		Εντολές Καταχωρητές
Μικρο-αρχιτεκτονική		Διαδρομές δεδομένων Ελεγκτές
Λογική		Αθροιστές Μνήμες
Ψηφιακά κυκλώματα		Πύλες AND Πύλες NOT
Αναλογικά κυκλώματα		Ενισχυτές Φίλτρα
Διατάξεις		Τρανζίστορ Δίοδοι
Φυσική		Ηλεκτρονία

Επίπεδα Αφαίρεσης Υ/Σ

- 8^ο επίπεδο: το λειτουργικό σύστημα
 - Διαχειρίζεται λειτουργίες **χαμηλού επιπέδου**, όπως
 - Προσπέλαση σκληρού δίσκου
 - Διαχείριση μνήμης
- 9^ο επίπεδο: το λογισμικό εφαρμογών
 - Εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες του λειτουργικού συστήματος για να λύσει ένα πρόβλημα για λογαριασμό του χρήστη
- Η δύναμη της αφαίρεσης:
 - Σερφάρουμε στο διαδίκτυο χωρίς να νοιαζόμαστε για τις κβαντικές ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων

Λογισμικό εφαρμογών		Προγράμματα
Λειτουργικά συστήματα		Προγράμματα οδήγησης διατάξεων/συσκευών
Αρχιτεκτονική		Εντολές Καταχωρητές
Μικρο-αρχιτεκτονική		Διαδρομές δεδομένων Ελεγκτές
Λογική		Αθροιστές Μνήμες
Ψηφιακά κυκλώματα		Πύλες AND Πύλες NOT
Αναλογικά κυκλώματα		Ενισχυτές Φίλτρα
Διατάξεις		Τρανζίστορ Δίοδοι
Φυσική		Ηλεκτρόνια

Επίπεδα Αφαίρεσης Υ/Σ

Λογισμικό εφαρμογών		Προγράμματα
Λειτουργικά συστήματα		Προγράμματα οδήγησης διατάξεων/συσκευών
Αρχιτεκτονική		Εντολές Καταχωρητές
Μικρο-αρχιτεκτονική		Διαδρομές δεδομένων Ελεγκτές
Λογική		Αθροιστές Μνήμες
Ψηφιακά κυκλώματα		Πύλες AND Πύλες NOT
Αναλογικά κυκλώματα		Ενισχυτές Φίλτρα
Διατάξεις		Τρανζίστορ Δίοδοι
Φυσική		Ηλεκτρόνια

Αρχιτεκτονική
Υπολογιστών

Ψηφιακή
Σχεδίαση

Ηλεκτρονική

Πειθαρχία

- Η **πειθαρχία** ορίζεται ως ο εσκεμμένος περιορισμός των σχεδιαστικών επιλογών ενός ατόμου με σκοπό την πιο παραγωγική εργασία σε ένα υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης
- Τα ψηφιακά κυκλώματα προτιμώνται από τα αναλογικά επειδή είναι **πιο εύκολα στην σχεδίασή τους** και έχουν τελικά **καλύτερες επιδόσεις** από τα αντίστοιχα αναλογικά συστήματα σε πολλές εφαρμογές, όπως:
 - Ψηφιακές τηλεοράσεις
 - Ψηφιακοί δίσκοι
 - Κινητά τηλέφωνα

Τα τρία «Α»

- **Ιεραρχία** (hierarchy)
 - Περιλαμβάνει την συνεχή υποδιαίρεση ενός συστήματος σε **υπομονάδες** μέχρι αυτές να είναι εύκολα κατανοήσιμες και υλοποιήσιμες
- **Τμηματικότητα** (modularity)
 - Ορίζει ότι οι υπομονάδες πρέπει να έχουν **καλώς ορισμένες λειτουργίες και διασυνδέσεις** έτσι ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στην επικοινωνία τους
- **Κανονικότητα** (regularity)
 - Αποσκοπεί στο να υπάρχει **ομοιομορφία** μεταξύ των λειτουργικών μονάδων
 - Οι κοινές ομάδες **επαναχρησιμοποιούνται** πολλές φορές
 - Με αυτόν τον τρόπο ελαττώνεται ο αριθμός των διαφορετικών μονάδων που πρέπει να σχεδιαστούν

Παράδειγμα: Καριοφίλι

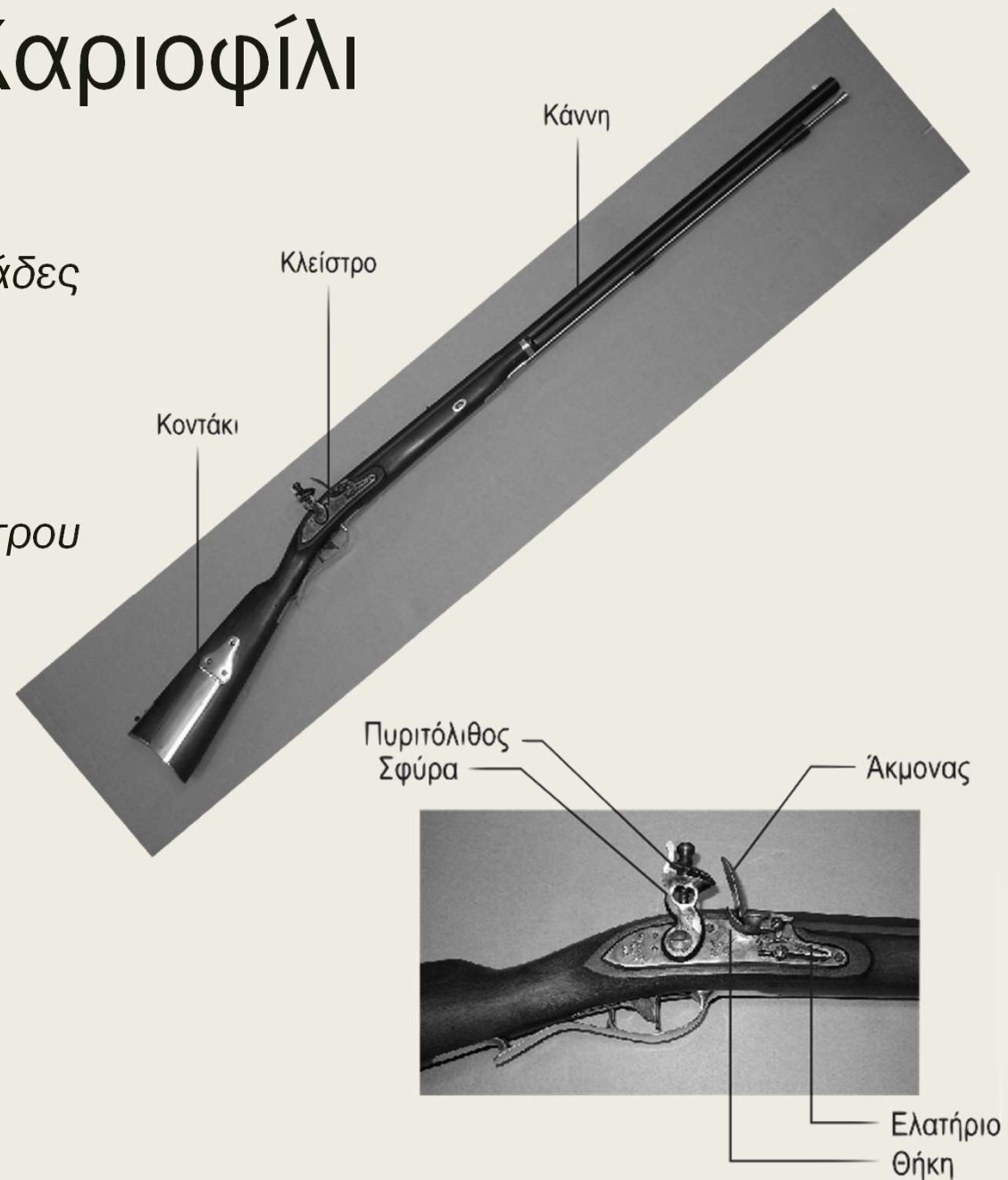
■ Ιεραρχία

- Τρεις βασικές υπομονάδες

- Κάννη (barrel)
- Κλείστρο (lock)
- Κοντάκι (stock)

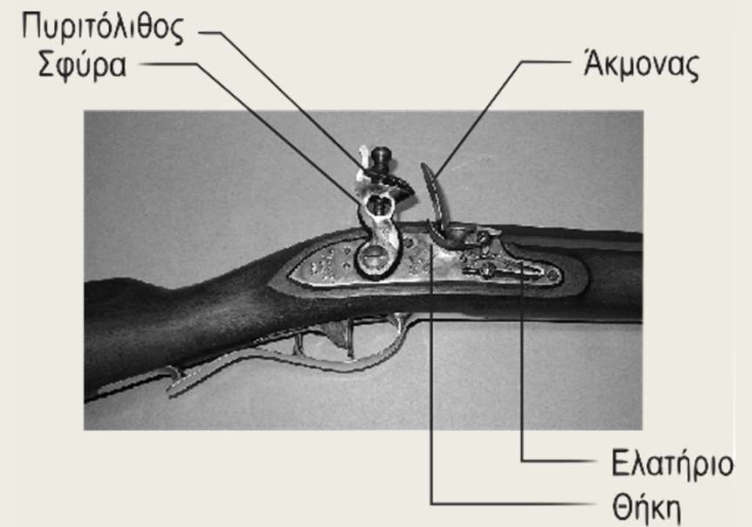
- Υπομονάδες του κλείστρου

- Σκανδάλη (trigger)
- Σφύρα (hammer)
- Πυριτόλιθος (flint)
- Άκμονας (frizzen)
- Ελατήριο (spring)
- Θήκη (pan)



Παράδειγμα: Καριοφίλι

- Τμηματικότητα
 - Μια λειτουργία του κοντακιού είναι η στήριξη της κάνης και του κλείστρου
 - Η διασύνδεσή του κοντακιού αποτελείται από το μήκος του και τη θέση των πέρων στήριξης
 - Η σχεδίαση του κοντακιού δεν εμποδίζει τη λειτουργία της κάνης (περιδίνηση στο βόλι)
- Κανονικότητα
 - Ανταλλάξιμα εξαρτήματα
 - Χρήση ανταλλακτικών από διαφορετικούς κατασκευαστές

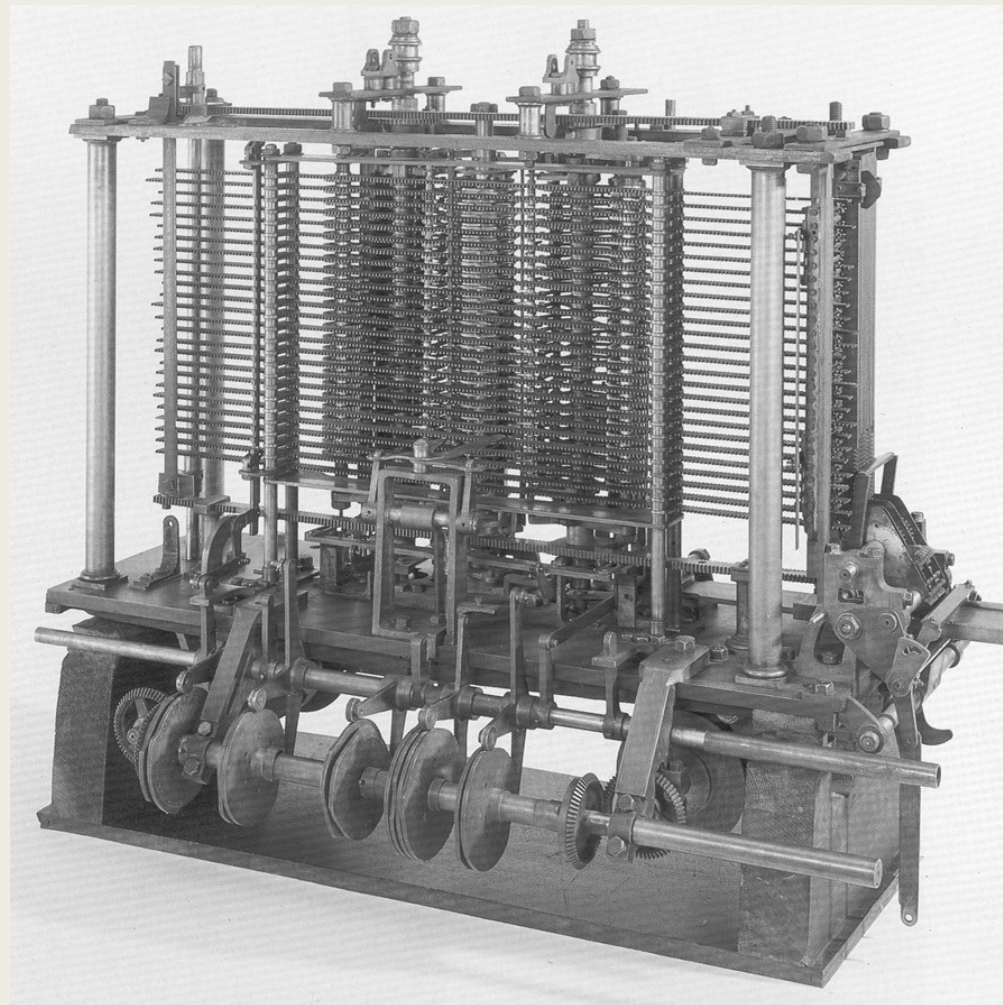


Ψηφιακή «Αφαίρεση»

- Οι περισσότερες φυσικές μεταβλητές παίρνουν συνεχείς τιμές, αλλά στα ψηφιακά συστήματα οι πληροφορίες αναπαρίστανται με μεταβλητές διακριτών τιμών που παίρνουν πεπερασμένο πλήθος διαφορετικών τιμών
- Charles Babbage, 1834-1871
 - *Εφηύρε την Αναλυτική Μηχανή, ένα από τα πρώτα ψηφιακά συστήματα που χρησιμοποιούσε μεταβλητές με δέκα διακριτές τιμές τις οποίες υλοποιούσαν γρανάζια των δέκα θέσεων*
- Την σημερινή εποχή η πλειοψηφία των ψηφιακών συστημάτων κάνει χρήση δύο τιμών:
 - *Το '1' (HIGH) το οποίο υποδηλώνεται με υψηλή τάση*
 - *Το '0' (LOW) το οποίο υποδηλώνεται με χαμηλή τάση*

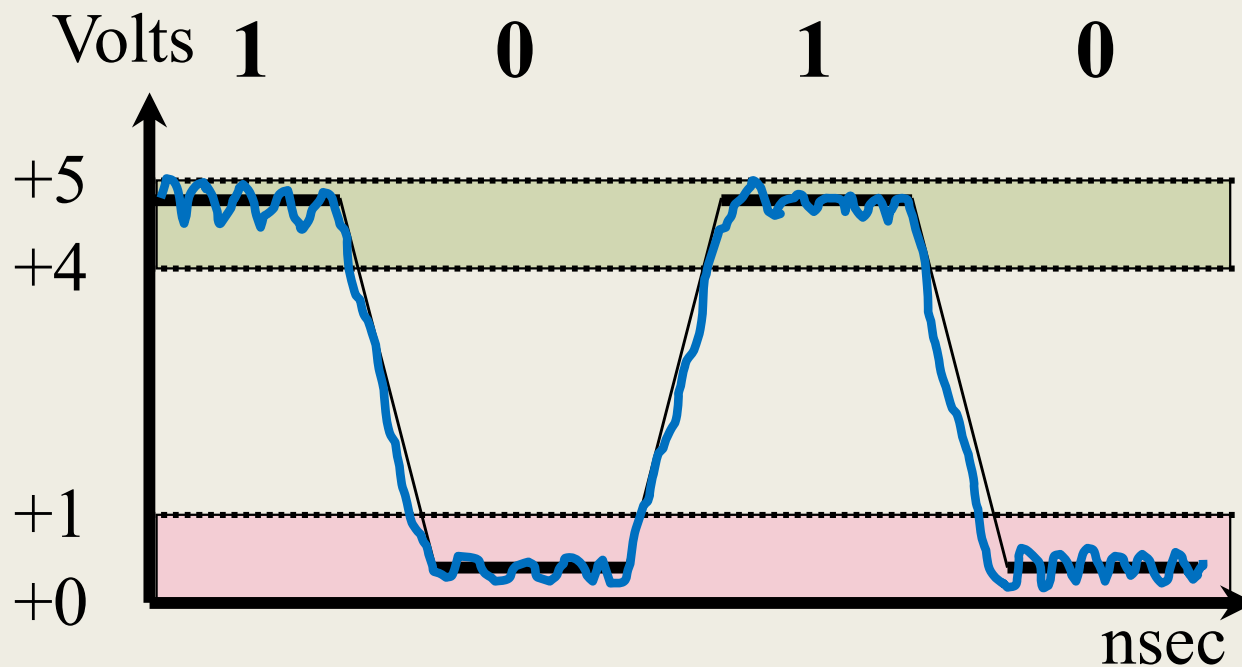
Η αναλυτική μηχανή του Babbage

- Είχε 25 σειρές γραναζιών των 10 θέσεων και συνεπώς διέθετε ακρίβεια 25 ψηφίων



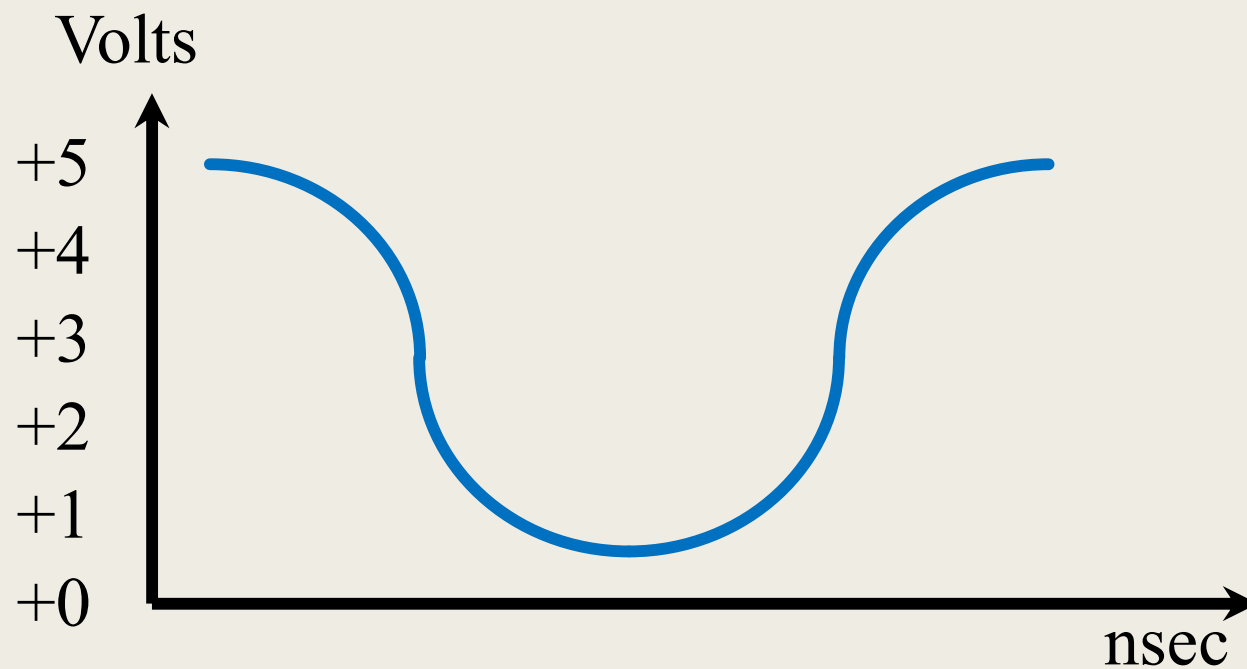
Ψηφιακά συστήματα

- Επεξεργάζονται δυαδικά ηλεκτρικά σήματα
- Τα δυαδικά σήματα λαμβάνουν δύο μόνο τιμές:
 - Το μηδέν (0 ή LOW)
 - Το ένα (1 ή HIGH)



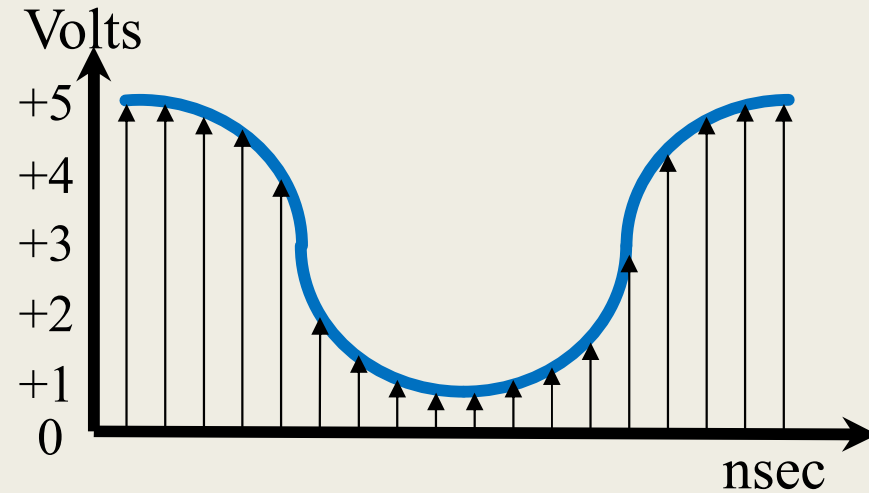
Αναλογικά συστήματα

- Επεξεργάζονται συνεχή ηλεκτρικά σήματα, που μεταβάλλονται σαν συναρτήσεις του χρόνου

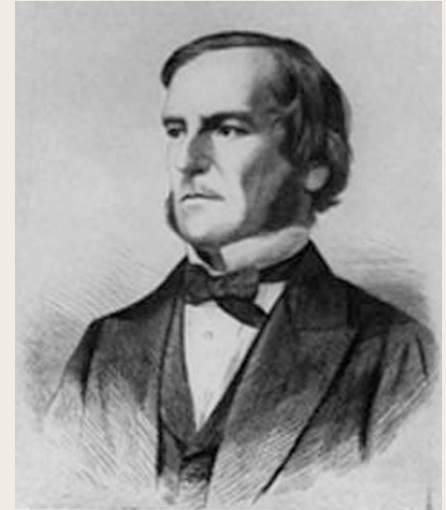


Ψηφιακά συστήματα

- Συστήματα Υπολογιστών
- Συστήματα Επικοινωνιών
- Συστήματα Επεξεργασίας Σήματος
- Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου
 - ψηφιακή επεξεργασία δεδομένων
 - ψηφιακή λήψη δεδομένων
 - ψηφιακή απόκριση
 - αναλογική λήψη δεδομένων
 - μετατροπή της πληροφορίας από αναλογική σε ψηφιακή με Analog to Digital Converter – ADC (δειγματοληψία + κβαντοποίηση σε ακέραιους αριθμούς 10-16 bit)
 - αναλογική απόκριση
 - μετατροπή της πληροφορίας από ψηφιακή σε αναλογική με Digital to Analog Converter – DAC



George Boole, 1815–1864



- Όντας παιδί εργατών και μην έχοντας την οικονομική δυνατότητα να μορφωθεί μέσω του εκπαιδευτικού συστήματος, ο Boole έμαθε μόνος του μαθηματικά και στη συνέχεια έγινε μέλος του διδακτικού προσωπικού στο Κολέγιο Κουίνς (Ιρλανδία).
- Έγραψε τη μονογραφία [An Investigation of the Laws of Thought \(1854\)](#), όπου παρουσίασε για πρώτη φορά τις δυαδικές μεταβλητές και τις τρεις θεμελιώδεις λογικές πράξεις (logic operations): AND, OR και NOT.
 - *Οι δυαδικές μεταβλητές του Boole μπορούσαν να λάβουν τις τιμές TRUE ή FALSE*
 - *Θεωρούμε ότι είναι συνώνυμοι οι όροι:*
 - 1, TRUE, HIGH
 - 0, FALSE, LOW

Μεταφορά πληροφορίας

- Η ποσότητα πληροφορίας D σε μία μεταβλητή διακριτών τιμών με N διαφορετικές καταστάσεις χαρακτηρίζεται από την σχέση
 - $D = \log_2 N$
 - Ο λογάριθμος έχει βάση το 2
 - Η μονάδα μέτρησης του D είναι το *bit*
- Κάθε δυαδική μεταβλητή μεταφέρει $\log_2 2 = 1$ bit πληροφοριών
- Θεωρητικά, ένα συνεχές σήμα μεταφέρει άπειρη ποσότητα πληροφοριών, αφού μπορεί να πάρει άπειρο πλήθος τιμών
- Στην πράξη, ο θόρυβος και το σφάλμα μέτρησης περιορίζουν τις πληροφορίες που μεταφέρονται στα **10-16 bit**, για τα περισσότερα συνεχή σήματα

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.4

Μια αναλογική τάση παίρνει τιμές από 0 έως 5 V. Αν είναι εφικτό να μετρηθεί με ακρίβεια ± 50 mV, πόσα bit πληροφοριών μπορεί να μεταφέρει το μέγιστο;

- *Ακρίβεια ± 50 mV σημαίνει ότι το αναλογικό σήμα διαμερίζεται ανά 100 mV, δηλαδή σε 50 διακριτές τιμές από 0 έως 5 V*
- $\log_2 50 = 5.64$ bits

■ Άσκηση 1.6

Οι Βαβυλώνιοι ανέπτυξαν το εξηνταδικό (sexagesimal, με βάση το 60) αριθμητικό σύστημα πριν από 4000 χρόνια περίπου. Πόσα bit πληροφοριών μεταφέρονται με ένα εξηνταδικό ψηφίο;

- $\log_2 60 = 5.91$ bits

Ερωτήσεις συνεντεύξεων

■ Ερώτηση 1.2

Ένας βασιλιάς παραλαμβάνει 64 χρυσά νομίσματα σε φόρους, αλλά έχει βάσιμες υποψίες ότι ένα από αυτά είναι κάλπικο. Σας καλεί στο παλάτι για να εντοπίσετε το κάλπικο νόμισμα.

Έχετε στη διάθεσή σας μια ζυγαριά παλαιού τύπου με δύο δίσκους στους οποίους μπορείτε να τοποθετείτε νομίσματα.

Πόσες φορές πρέπει να χρησιμοποιήσετε τη ζυγαριά για να βρείτε το ελαφρύτερο, κάλπικο νόμισμα;

– *Επιλέξτε μία από τις απαντήσεις:*

(α) 6

(β) 5

(γ) 4

(δ) 3

Αριθμητικά Συστήματα

- Δεκαδικό σύστημα αναπαράστασης αριθμών (0-9)

Στήλη των 1
Στήλη των 10
Στήλη των 100
Στήλη των 1000

6 5 9 8₁₀

Κάθε στήλη ενός δεκαδικού αριθμού έχει δεκαπλάσιο βάρος από την προηγούμενη στήλη. Ξεκινώντας από τα δεξιά προς τα αριστερά τα βάρη είναι: 10^0 , 10^1 , 10^2 , 10^3 , ...

- Δυαδικό σύστημα αναπαράστασης αριθμών (0-1)

Στήλη των 1
Στήλη των 2
Στήλη των 4
Στήλη των 8

1 1 0 1₂

Κάθε στήλη ενός δυαδικού αριθμού έχει διπλάσιο βάρος από την προηγούμενη στήλη. Ξεκινώντας από τα δεξιά προς τα αριστερά τα βάρη είναι: 2^0 , 2^1 , 2^2 , 2^3 , ...

Αριθμητικά Συστήματα

- Δεκαδικό σύστημα αναπαράστασης αριθμών (0-9)

Στήλη των 1
Στήλη των 10
Στήλη των 100
Στήλη των 1000

$$6598_{10} = 6 \times 10^3 + 5 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 8 \times 10^0$$

Έξι Χιλιάδες Πέντε Εκατοντάδες Εννέα Δεκάδες Οκτώ Μονάδες

- Δυαδικό σύστημα αναπαράστασης αριθμών (0-1)

Στήλη των 1
Στήλη των 2
Στήλη των 4
Στήλη των 8

$$1101_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 13_{10}$$

Μια Οκτάδα Μια Τετράδα Μηδέν Δυάδες Μια Μονάδα

Δυνάμεις του 2

- $2^0 = 1$
- $2^1 = 2$
- $2^2 = 4$
- $2^3 = 8$
- $2^4 = 16$
- $2^5 = 32$
- $2^6 = 64$
- $2^7 = 128$
- $2^8 = 256$
- $2^9 = 512$
- $2^{10} = 1024$
- $2^{11} = 2048$
- $2^{12} = 4096$
- $2^{13} = 8192$
- $2^{14} = 16384$
- $2^{15} = 32768$

Προσπαθήστε
να θυμάστε
μέχρι το 2^{10}

Παράδειγμα 1.1

- Μετατροπή από το **Δυαδικό** στο **Δεκαδικό** σύστημα
 - Μετατρέψτε τον αριθμό **10110_2** στο δεκαδικό

$$16 \times 1 + 8 \times 0 + 4 \times 1 + 2 \times 1 + 1 \times 0 = 22_{10}$$

Παράδειγμα 1.2

- Μετατροπή από το **Δεκαδικό** στο **Δυαδικό** σύστημα
 - *Μετατρέψτε τον αριθμό 84_{10} στο δυαδικό*

Μετατροπή από το δεκαδικό στο δυαδικό σύστημα

■ Μέθοδος 1: Από αριστερά προς τα δεξιά

1. Βρίσκω την μεγαλύτερη δύναμη του 2 που χωράει (\leq) στον αριθμό
2. Εάν χωράει, στη στήλη αυτής της δύναμης το αντίστοιχο ψηφίο του δυαδικού αριθμού είναι 1, αλλιώς είναι 0
3. Αφαιρώ τη δύναμη του 2 από τον αριθμό
4. Επαναλαμβάνω

Μετατροπή από το δεκαδικό στο δυαδικό σύστημα

Μέθοδος 1: Από αριστερά προς τα δεξιά

$$84_{10}$$

$$84 - 64 = 20_{10}$$

$$20_{10}$$

$$20 - 16 = 4_{10}$$

$$4_{10}$$

$$4 - 4 = 0_{10}$$

$$0_{10}$$

$$2^6 = 64 < 84$$

$$2^5 = 32 > 20$$

$$2^4 = 16 < 20$$

$$2^3 = 8 > 4$$

$$2^2 = 4 = 4$$

$$2^1 = 2 > 0$$

$$2^0 = 1 > 0$$

$$64 \times 1$$

$$32 \times 0$$

$$16 \times 1$$

$$8 \times 0$$

$$4 \times 1$$

$$2 \times 0$$

$$1 \times 0$$


$$= 1010100_2$$


Μετατροπή από το δεκαδικό στο δυαδικό σύστημα

■ Μέθοδος 2: Από δεξιά προς τα αριστερά

1. Επαναληπτικά διαιρώ με το 2
2. Βάζω το υπόλοιπο (0 ή 1) ως ψηφίο του δυαδικού αριθμού από δεξιά προς τα αριστερά
3. Επαναλαμβάνω

Μετατροπή από το δεκαδικό στο δυαδικό σύστημα

Μέθοδος 2: Από δεξιά προς τα αριστερά (διαίρεση δια 2)

$84_{10} =$	$84/2 = 42$	Υπ. 0	
	$42/2 = 21$	Υπ. 0	
	$21/2 = 10$	Υπ. 1	
	$10/2 = 5$	Υπ. 0	
	$5/2 = 2$	Υπ. 1	
	$2/2 = 1$	Υπ. 0	
	$1/2 = 0$	Υπ. 1	

Εύρος τιμών ενός αριθμού με N ψηφία

- Δεκαδικός Αριθμός N ψηφίων
 - Πόσες τιμές μπορεί να πάρει? 10^N
 - Εύρος? $[0, 10^N - 1]$
 - Παράδειγμα: Δεκαδικός αριθμός 3 ψηφίων:
 - $10^3 = 1000$ πιθανές τιμές
 - Εύρος: $[0, 999]$
- Δυαδικός Αριθμός N ψηφίων
 - Πόσες τιμές μπορεί να πάρει? 2^N
 - Εύρος? $[0, 2^N - 1]$
 - Παράδειγμα: Δυαδικός αριθμός 3 ψηφίων:
 - $2^3 = 8$ πιθανές τιμές
 - Εύρος: $[0, 7] = [000_2 \text{ to } 111_2]$

Δεκαεξαδικοί Αριθμοί (hexadecimal)

- Η βάση είναι το 16
- Ευκολότερη αναπαράσταση των Δυαδικών αριθμών

Δεκαεξαδικό	Δεκαδικό	Δυαδικό
0	0	
1	1	
2	2	
3	3	
4	4	
5	5	
6	6	
7	7	

Δεκαεξαδικό	Δεκαδικό	Δυαδικό
8	8	
9	9	
A	10	
B	11	
C	12	
D	13	
E	14	
F	15	

Δεκαεξαδικοί Αριθμοί (hexadecimal)

- Η βάση είναι το 16
- Ευκολότερη αναπαράσταση των δυαδικών αριθμών

Δεκαεξαδικό	Δεκαδικό	Δυαδικό
0	0	0000
1	1	0001
2	2	0010
3	3	0011
4	4	0100
5	5	0101
6	6	0110
7	7	0111

Δεκαεξαδικό	Δεκαδικό	Δυαδικό
8	8	1000
9	9	1001
A	10	1010
B	11	1011
C	12	1100
D	13	1101
E	14	1110
F	15	1111

Αριθμητικά Συστήματα

- Δεκαεξαδικό σύστημα αναπαράστασης αριθμών (0-9,A-F)

Στήλη των 1
Στήλη των 16
Στήλη των 256

Κάθε στήλη ενός δεκαεξαδικού αριθμού έχει δεκαεξαπλάσιο βάρος από την προηγούμενη στήλη. Ξεκινώντας από τα δεξιά προς τα αριστερά τα βάρη είναι: 16^0 , 16^1 , $16^2=256$, $16^3=4096$, ...

$$2ED_{16} = 2 \times 16^2 + E \times 16^1 + D \times 16^0$$

Δύο
διακοσιο-
πενηνταεξάδες

Δεκατέσσερις
δεκαεξάδες

Δεκατρείς
μονάδες

Παράδειγμα 1.3

- Μετατροπή από το **Δεκαεξαδικό** στο **Δεκαδικό** σύστημα
 - Μετατρέψτε τον αριθμό **$2ED_{16}$** στο δεκαδικό

$$2ED_{16} = 2 \times 16^2 + 14 \times 16^1 + 13 \times 16^0 = 749_{10}$$

Δεκαεξαδικό	Δεκαδικό
A	10
B	11
C	12
D	13
E	14
F	15

Παράδειγμα 1.3

- Μετατροπή από το **Δεκαεξαδικό** στο **Δυαδικό** σύστημα
 - Μετατρέψτε τον αριθμό $2ED_{16}$ στο δυαδικό
- Κάθε δεκαεξαδικό ψηφίο μετατρέπεται σε τέσσερα δυαδικά ψηφία σύμφωνα με τον πίνακα

$$2ED_{16} = 0010\ 1110\ 1101 = 001011101101_2$$

Δεκαεξαδικό	Δυαδικό
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111

Δεκαεξαδικό	Δυαδικό
8	1000
9	1001
A	1010
B	1011
C	1100
D	1101
E	1110
F	1111

Παράδειγμα 1.4

- Μετατροπή από το **Δυαδικό** στο **Δεκαεξαδικό** σύστημα
 - *Μετατρέψτε τον αριθμό 1111010_2 στο δεκαεξαδικό*
- Ξεκινώντας από δεξιά προς τα αριστερά χωρίζουμε σε τετράδες δυαδικών ψηφίων
- Η περισσότερο σημαντική τετράδα (στα αριστερά) μπορεί να έχει λιγότερα από τέσσερα ψηφία, οπότε συμπληρώνεται με μηδενικά στα αριστερά
- Κάθε τετράδα δυαδικών ψηφίων μετατρέπεται σε ένα δεκαεξαδικό ψηφίο σύμφωνα με τον προηγούμενο πίνακα

$$1111010_2 = 0111_2 \ 1010_2 = 7_{16} \ A_{16} = 7A_{16}$$

Παράδειγμα 1.5

- Μετατροπή από το **Δεκαδικό** στο **Δεκαεξαδικό** σύστημα

– Μετατρέψτε τον αριθμό 333_{10} στο δεκαεξαδικό

Αρχικά μετατρέπουμε τον δεκαδικό αριθμό στο δυαδικό και στη συνέχεια μετατρέπουμε το δυαδικό αριθμό στο δεκαεξαδικό (απλούστερη μέθοδος με πιο απλές πράξεις)

$$333_{10} = 333/2 = 166 \text{ Υπ. } 1$$

$$166/2 = 83 \text{ Υπ. } 0$$

$$83/2 = 41 \text{ Υπ. } 1$$

$$41/2 = 20 \text{ Υπ. } 1$$

$$20/2 = 10 \text{ Υπ. } 0$$

$$10/2 = 5 \text{ Υπ. } 0$$

$$5/2 = 2 \text{ Υπ. } 1$$

$$2/2 = 1 \text{ Υπ. } 0$$

$$1/2 = 0 \text{ Υπ. } 1 = 101001101_2$$

$$101001101_2 = 0001 \ 0100 \ 1101 = 14D_{16}$$

Επιλεγμένες ασκήσεις

- Άσκηση 1.13 / 1.15

Μετατρέψτε τους ακόλουθους μη προσημασμένους δυαδικούς αριθμούς σε δεκαδικούς και σε δεκαεξαδικούς. Δείξτε αναλυτικά τη μετατροπή.

$$(\beta) \quad 110110_2 \quad (\gamma) \quad 11110000_2$$

- Άσκηση 1.17

Μετατρέψτε τους ακόλουθους δεκαεξαδικούς αριθμούς σε δεκαδικούς. Δείξτε αναλυτικά τη μετατροπή.

$$(\alpha) \quad A5_{16} \quad (\gamma) \quad FFFF_{16}$$

- Άσκηση 1.25 / 1.27

Μετατρέψτε τους ακόλουθους δεκαδικούς αριθμούς σε μη προσημασμένους δυαδικούς και στη συνέχεια σε δεκαεξαδικούς.

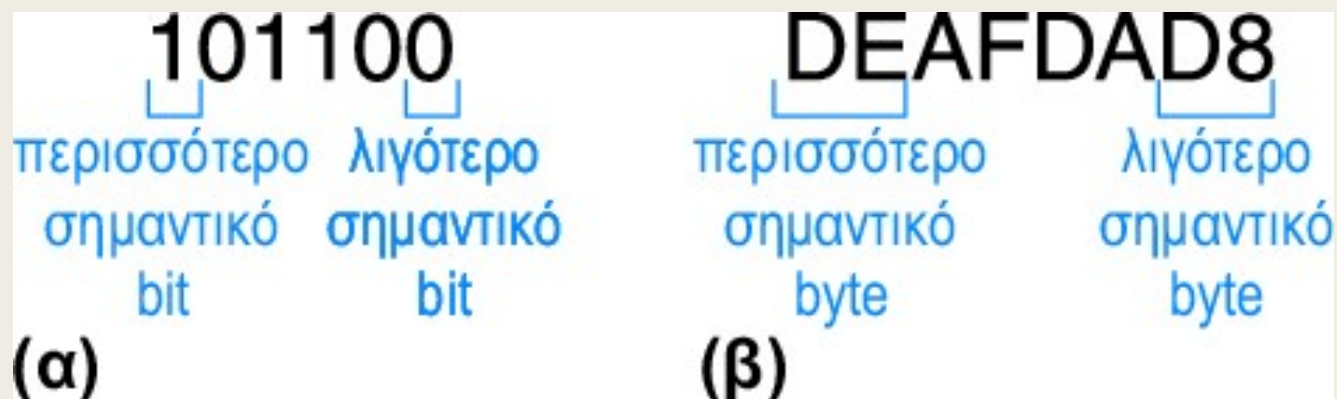
$$(\beta) \quad 63_{10} \quad (\delta) \quad 845_{10}$$

Byte, nibble και λέξεις

- **Byte** ονομάζεται μία ομάδα των οκτώ bits
 - Αναπαριστά μία από $2^8 = 256$ πιθανές τιμές
 - Χρησιμοποιείται ως μέγεθος αποθήκευσης στη μνήμη
- **Nibble** ονομάζεται μία ομάδα των τεσσάρων bits ή μισού byte
 - Αναπαριστά μία από $2^4 = 16$ πιθανές τιμές
 - Σε ένα δεκαεξαδικό ψηφίο μπορεί να αποθηκευτεί ένα *nibble*, ενώ σε δύο δεκαεξαδικά ψηφία μπορεί να αποθηκευτεί ένα πλήρες *byte*
- Οι μικροεπεξεργαστές χειρίζονται δεδομένα σε τεμάχια τα οποία ονομάζονται **λέξεις** (words).
 - Το μέγεθος μιας λέξης εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του μικροεπεξεργαστή
 - Στα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα χρησιμοποιούνται μικροεπεξεργαστές των 64 ή των 32 bit.
 - Ενσωματωμένοι επεξεργαστές σε απλές οικιακές συσκευές χρησιμοποιούν λέξεις των 8 ή των 16 bit

Περισσότερο & Λιγότερο Σημαντικά Bit/Byte

- Σε μία ομάδα από bits
 - το πιο αριστερό bit ονομάζεται **περισσότερο σημαντικό bit** (*most significant bit - MSB*)
 - το bit που βρίσκεται στο άλλο άκρο δεξιά λέγεται **λιγότερο σημαντικό bit** (*least significant bit - LSB*)
- Ομοίως, στο εσωτερικό μιας λέξης
 - το πιο αριστερό byte ονομάζεται **περισσότερο σημαντικό byte**
 - το byte που βρίσκεται στο δεξί άκρο λέγεται **λιγότερο σημαντικό byte**



Bytes, bits/sec και διαβαθμίσεις

- Ο όρος **kilo** (χιλιάδα) αντιστοιχεί στο $2^{10} \approx 10^3$
- Ο όρος **mega** (εκατομμύριο) αντιστοιχεί στο $2^{20} \approx 10^6$
- Ο όρος **giga** (δισεκατομμύριο) αντιστοιχεί στο $2^{30} \approx 10^9$
- Η χωρητικότητα της μνήμης συνήθως μετριέται σε **bytes**
 - τα 2^{10} bytes είναι ένα kilobyte (1KB) δηλαδή 1024 bytes
 - τα 2^{20} bytes είναι ένα megabyte (1MB) δηλαδή $1024 \times 1024 = 1.048.576$ bytes
 - τα 2^{30} bytes είναι ένα gigabyte (1GB) δηλαδή $1024 \times 1024 \times 1024 = 1.073.741.824$ bytes
- Η ταχύτητα των καναλιών επικοινωνίας μετριέται σε **bits/sec (bps)**
 - τα 2^{10} bps είναι ένα kilobit/sec (1Kbps) δηλαδή 1024 bits/sec
 - τα 2^{20} bps είναι ένα megabit/sec (1Mbps) δηλαδή $1024 \times 1024 = 1.048.576$ bits/sec
 - τα 2^{30} bps είναι ένα gigabit/sec (1Gbps) δηλαδή $1024 \times 1024 \times 1024 = 1.073.741.824$ bits/sec

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.45

Ένα συγκεκριμένο μόντεμ DSL λειτουργεί στα 768 Kbit/sec.
Πόσα Kbyte μπορεί να λάβει σε 1 λεπτό;

– *5760 Kbyte/min*

■ Άσκηση 1.47

Όταν οι κατασκευαστές σκληρών δίσκων χρησιμοποιούν τους όρους «megabyte» και «gigabyte», εννοούν 10^6 byte και 10^9 byte, αντίστοιχα. Πόσα πραγματικά GB μουσικής μπορείτε να αποθηκεύσετε σε έναν σκληρό δίσκο με χωρητικότητα 50 GB;

– *46,566 GB*

Παράδειγμα 1.6

- Υπολογισμός κατά προσέγγιση δυνάμεων του 2 στο δεκαδικό σύστημα

- *Βρείτε κατά προσέγγιση την τιμή του 2^{24}*
- *Χωρίζουμε τον εκθέτη σε δύο μέρη*

- ένα πολλαπλάσιο του δέκα
- και το υπόλοιπο

$$2^{24} = 2^{20} \times 2^4$$

$$2^{20} \approx 10^6 \approx 1 \text{ εκατομμύριο.}$$

$$2^4 = 16.$$

Άρα, $2^{24} \approx 16$ εκατομμύρια (καλή προσέγγιση)

Με ακρίβεια είναι $2^{24} = 16.777.216$

Επιλεγμένες ασκήσεις

- Άσκηση 1.48

Εκτιμήστε την τιμή του 2^{31} χωρίς τη χρήση αριθμομηχανής

- 2 Δις

- Άσκηση 1.49

Μια μνήμη στον μικροεπεξεργαστή Pentium II είναι οργανωμένη ως ορθογώνια διάταξη bit με 2^8 γραμμές και 2^9 στήλες. Εκτιμήστε πόσα bit (σε χιλιάδες) διαθέτει η μνήμη χωρίς να χρησιμοποιήσετε αριθμομηχανή

- 128

Ερωτήσεις συνεντεύξεων

■ Ερώτηση 1.3

Ένας καθηγητής, ένας βοηθός διδασκαλίας, ένας φοιτητής σχεδίασης ψηφιακών συστημάτων και ένας πρωτοετής που είναι το αστέρι της ομάδας στίβου του πανεπιστημίου πρέπει να διασχίσουν μια ετοιμόρροπη γέφυρα κατά τη διάρκεια μιας νύχτας χωρίς φεγγάρι.

Η γέφυρα είναι τόσο ασταθής που μόνο δύο άτομα μπορούν να τη διασχίσουν ταυτόχρονα.

Οι τέσσερις πρωταγωνιστές έχουν μόνο έναν φακό στη διάθεσή τους, και η απόσταση της γέφυρας από τη μία άκρη έως την άλλη είναι υπερβολικά μεγάλη για να πετούν τον φακό, οπότε κάποιος πρέπει να τον μεταφέρει πίσω στους άλλους.

Το αστέρι του στίβου μπορεί να διασχίσει τη γέφυρα σε 1 λεπτό. Ο φοιτητής σχεδίασης ψηφιακών συστημάτων μπορεί να τη διασχίσει σε 2 λεπτά. Ο βοηθός διδασκαλίας μπορεί να τη διασχίσει σε 5 λεπτά. Ο καθηγητής πάντα αφαιρείται, με αποτέλεσμα να χρειάζεται 10 λεπτά για να διασχίσει τη γέφυρα.

Ποιος είναι ο ταχύτερος χρόνος που απαιτείται για να μεταβούν όλοι οι πρωταγωνιστές μας από τη μία άκρη της γέφυρας στην άλλη;

Πρόσθεση δυαδικών αριθμών

- Ακριβώς όπως και στο δεκαδικό σύστημα προσθέτουμε τα ψηφία της ίδιας στήλης (ή αλλιώς ίδιου βάρους) μαζί με το bit κρατούμενου (αν υπάρχει)
- Στο **δεκαδικό**

$$\begin{array}{r} 11 \quad \leftarrow \text{κρατούμενο} \\ 4277 \\ + 5499 \\ \hline 9776 \end{array}$$

- Στο **δυαδικό**

Παράγεται bit κρατούμενου:

$$1+1 = 2_{10} = 10_2$$

$$1+1+1 = 3_{10} = 11_2$$

$$\begin{array}{r} 11 \quad \leftarrow \text{κρατούμενο} \\ 1011 \\ + 0011 \\ \hline 1110 \end{array}$$

Υπερχείλιση μη προσημασμένων

- Ένας **μη προσημασμένος (unsigned) δυαδικός αριθμός** με **N bits** μπορεί να πάρει τιμές από το διάστημα **$[0, 2^N - 1]$**
 - Υπάρχει η περίπτωση το αποτέλεσμα μιας πρόσθεσης να χρειάζεται **$N+1$ bits** για αναπαρασταθεί
 - Σε αυτή την περίπτωση το bit που βρίσκεται στην $N+1$ θέση **αγνοείται** και έτσι τα υπόλοιπα N bits αναπαριστούν ένα λάθος αποτέλεσμα
 - Αυτό το φαινόμενο λέγεται **υπερχείλιση**
 - μπορεί να ανιχθευθεί μέσω του ελέγχου για κάποιο κρατούμενο εξόδου, το οποίο παράγεται στη στήλη του πιο σημαντικού bit

Παραδείγματα 1.7 και 1.8

- Προσθέστε τους ακόλουθους μη προσημασμένους δυαδικούς αριθμούς μεγέθους 4 bit (Παράδειγμα 1.7)

$$\begin{array}{r} 0111 \\ + 0101 \\ \hline \end{array}$$

- Προσθέστε τους ακόλουθους μη προσημασμένους δυαδικούς αριθμούς μεγέθους 4 bit (Παράδειγμα 1.8)

$$\begin{array}{r} 1101 \\ + 0101 \\ \hline \end{array}$$

Παραδείγματα 1.7 και 1.8

- Προσθέστε τους ακόλουθους μη προσημασμένους δυαδικούς αριθμούς μεγέθους 4 bit (Παράδειγμα 1.7)

$$\begin{array}{r} 111 \\ 0111 \\ + 0101 \\ \hline 1100 \end{array} \quad \leftarrow \text{κρατούμενο}$$

- Επαλήθευση $0111_2 = 7_{10}$, $0101_2 = 5_{10}$, $1100_2 = 12_{10}$

- Προσθέστε τους ακόλουθους μη προσημασμένους δυαδικούς αριθμούς μεγέθους 4 bit (Παράδειγμα 1.8)

$$\begin{array}{r} 11\ 1 \\ 1101 \\ + 0101 \\ \hline \underline{1}0010 \end{array} \quad \leftarrow \text{κρατούμενο}$$

Υπερχείλιση: 2 αντί 18!
(Overflow)

- Επαλήθευση $1101_2 = 13_{10}$, $0101_2 = 5_{10}$, $10010_2 = 18_{10}$

Προσημασμένοι δυαδικοί αριθμοί

- Μέχρι στιγμής μελετήσαμε **μη προσημασμένους (unsigned)** ακέραιους αριθμούς στο δυαδικό σύστημα αρίθμησης στους οποίους απεικονίζονται μόνο οι **φυσικοί ακέραιοι αριθμοί**.
- Για να απεικονίστουν **αρνητικοί ακέραιοι αριθμοί** στο δυαδικό σύστημα αρίθμησης πρέπει να γίνει χρήση ενός **προσημασμένου (signed) συστήματος αρίθμησης**
- Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την αναπαράσταση προσημασμένων ακεραίων αριθμών (θετικών και αρνητικών) στο δυαδικό σύστημα. Οι πιο διαδεδομένες σήμερα είναι:
 - **Αριθμοί προσήμου-μεγέθους (sign/magnitude)**
 - **Αριθμοί συμπληρώματος ως προς δύο (two's complement)**

Αριθμοί προσήμου-μεγέθους

- Σε έναν αριθμό προσήμου-μεγέθους των N bit **το πιο σημαντικό bit** του αριθμού υποδηλώνει το πρόσημο του
 - Το '0' στο *MSB* δηλώνει ότι ο αριθμός είναι **θετικός**
 - Το '1' στο *MSB* δηλώνει ότι ο αριθμός είναι **αρνητικός**
- Τα υπόλοιπα $N-1$ bit του αριθμού δηλώνουν το μέγεθος του αριθμού, δηλαδή την **απόλυτη τιμή** του
- Άρα, για έναν αριθμό προσήμου-μεγέθους N -bit ισχύει
 - *1 bit* πρόσημου, *$N-1$ bits* μέγεθος (απόλυτη τιμή)
- Ένας αριθμός προσήμου-μεγέθους των N bit παίρνει τιμές από το κλειστό διάστημα: **$[-(2^{N-1} - 1), 2^{N-1} - 1]$**

Παράδειγμα 1.9

- Μετατροπή προσημασμένων δεκαδικών αριθμών σε δυαδικούς αριθμούς προσήμου-μεγέθους
- Οι δεκαδικοί ακέραιοι αριθμοί ± 5 σε αναπαράσταση δυαδικού αριθμού προσήμου-μεγέθους με 4 bit είναι:
 - Αρχικά βρίσκουμε το μέγεθος τους αριθμού μετατρέποντας τον δεκαδικό αριθμό σε μη προσημασμένο δυαδικό αριθμό
 - $5_{10} = 101_2$
 - Στη συνέχεια βάζουμε και το bit προσήμου
 - +5 = 0101
 - 5 = 1101

Αριθμοί προσήμου-μεγέθους

- **Προβλήματα** στην αναπαράσταση προσήμου-μεγέθους
 - Η **πρόσθεση** δεκαδικών αριθμών στην αναπαράσταση προσήμου-μεγέθους **δεν δίνει σωστά αποτελέσματα**
 - Για παράδειγμα, $-5 + 5 = 0$:

$$\begin{array}{r} 1101 \\ + 0101 \\ \hline \end{array}$$

±0010 (2_{10} αντί για 0 – Λάθος!)

- Επίσης, υπάρχουν δύο αναπαραστάσεις του 0
 - **0000** (+0)
 - **1000** (-0)

Αριθμοί συμπληρώματος ως προς 2

- **Δεν έχουν τα προβλήματα** των αριθμών προσήμου-μεγέθους
 - Η **πρόσθεση** δίνει **σωστά αποτελέσματα** είτε οι αριθμοί είναι μη προσημασμένοι (*unsigned*) είτε είναι προσημασμένοι (*signed*) σε αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
 - Υπάρχει **μόνο μία αναπαράσταση για το 0**
 - Το **κρατούμενο εξόδου** που παράγεται κατά την πρόσθεση **αγνοείται** χωρίς να απαιτείται άλλη ενέργεια
 - Δεν αλλάζει το πλήθος των ψηφίων του αριθμού μετά την πρόσθεση, αλλά θέλει προσοχή στην **υπερχείλιση**

Αριθμοί συμπληρώματος ως προς δύο

- Είναι ίδιοι με τους μη προσημασμένους δυαδικούς αριθμούς των N bit με τη μόνη διαφορά ότι η θέση του περισσότερου σημαντικού bit (MSB) έχει βάρος ίσο με -2^{N-1} αντί για 2^{N-1}
- Το **πιο σημαντικό bit** συνεχίζει να δηλώνει το **πρόσημο** (**0** = θετικός, **1** = αρνητικός)
- Ο μεγαλύτερος θετικός αριθμός στα 4 bit είναι ο αριθμός **+7**: **0111**
- Το **0** αναπαρίσταται πάντα με τα ψηφία **όλα-0** (0000)
- Το **-1** αναπαρίσταται πάντα με τα ψηφία **όλα-1** (1111)
- Ο μικρότερος αρνητικός αριθμός στα 4 bit είναι ο αριθμός **-8**: **1000**
- Ένας αριθμός συμπληρώματος ως προς δύο των N bit παίρνει τιμές από το κλειστό διάστημα: $[-2^{N-1}, 2^{N-1} - 1]$

Αριθμοί συμπληρώματος ως προς δύο

- **Μετατροπή** προσημασμένου αριθμού συμπληρώματος ως προς δύο σε δεκαδικό προσημασμένο ακέραιο αριθμό:
 - Η διαδικασία είναι ίδια με τους μη προσημασμένους δυαδικούς αριθμούς με τη μόνη διαφορά ότι το πιο σημαντικό bit (το bit προσήμου) και έχει βάρος -2^{N-1} αντί για 2^{N-1}
 - $1011 = 1 \times -2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = -5$
- **Υπολογισμός του συμπληρώματος ως προς δύο** ενός αριθμού με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
 - Αντιστροφή όλων των bit του δυαδικού αριθμού
 - Πρόσθεση του '1'
- Για παράδειγμα ο αριθμός $3_{10} = 0011_2$ έχει συμπλήρωμα ως προς δύο το -3_{10} που βρίσκεται ως εξής:
 1. Αντιστροφή bit: 1100
 2. Πρόσθεση +1: +0001

$1101 = -3_{10}$

Παράδειγμα 1.10

- Αναπαράσταση ενός αρνητικού αριθμού με χρήση συμπληρώματος ως προς δυο
- Βρείτε πώς μπορεί να αναπαρασταθεί το -2_{10} ως αριθμός συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit.
 - Αρχικά βρίσκουμε τον δυαδικό αριθμό με το ίδιο μέγεθος $+2_{10} = 0010_2$
 - Στη συνέχεια αντιστρέφουμε τα bit του 0010_2 οπότε παράγεται το 1101_2
 - Τέλος, προσθέτουμε το 1 στο προηγούμενο αποτέλεσμα $1101_2 + 0001_2 = 1110_2 = -2_{10}$

Παράδειγμα 1.11

- Εύρεση της τιμής των αρνητικών αριθμών με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
- Βρείτε τη δεκαδική τιμή του αριθμού 1001_2 , ο οποίος αναπαρίσταται με τη χρήση συμπληρώματος ως προς δύο.
- Μέθοδος 1: Εύρεση συμπληρώματος ως προς 2
 - Αντιστρέφουμε τα bit και προσθέτουμε 1
 - $1001_2 = 0110_2$
 - $0110_2 + 0001_2 = 0111_2 = 7_{10}$
 - Άρα, $1001_2 = -7_{10}$.
- Μέθοδος 2: Μετατροπή στον αντίστοιχο δεκαδικό αριθμό με βάση ότι το βάρος του MSB είναι -2^3 αντί για 2^3
 - $1001 = 1 \times -2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = -7$

Συμπλήρωμα ως προς δύο του 0

- Βρείτε πώς μπορεί να αναπαρασταθεί το -0_{10} ως αριθμός συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit.
 - Αρχικά βρίσκουμε τον δυαδικό αριθμό με το ίδιο μέγεθος $+0_{10} = 0000_2$
 - Στη συνέχεια αντιστρέφουμε τα bit του 0000_2 οπότε παράγεται το 1111_2
 - Τέλος, προσθέτουμε το 1 στο προηγούμενο αποτέλεσμα $1111_2 + 0001_2 = \cancel{1}0000_2 = -0_{10}$
- Δεν υπάρχει ξεχωριστή αναπαράσταση για το -0_{10} με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
- Το μηδέν θεωρείται θετικό επειδή στο bit του προσήμου του υπάρχει το ψηφίο 0
- Συνεπώς οι θετικοί αριθμοί που μπορούν να αναπαρασταθούν με συμπλήρωμα ως προς δύο είναι κατά ένας λιγότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους αρνητικούς αριθμούς

Συμπλήρωμα ως προς δύο του -2^{N-1}

- Βρείτε εάν μπορεί να αναπαρασταθεί το $+2^{N-1}_{10}$ ως αριθμός συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit (N=4, ισχύει για κάθε N).
 - Αρχικά βρίσκουμε τον αριθμό συμπληρώματος ως προς δύο του $-2^3_{10} = 1000_2$
 - Στη συνέχεια αντιστρέφουμε τα bit του 1000_2 οπότε παράγεται το 0111_2
 - Τέλος, προσθέτουμε το 1 στο προηγούμενο αποτέλεσμα $0111_2 + 0001_2 = 1000_2 = -2^3_{10}$
- Δεν υπάρχει δυνατότητα αναπαράστασης για το $+2^3_{10}$ λόγω του φαινομένου της υπερχείλισης των προσημασμένων αριθμών συμπληρώματος ως προς δύο
 - Προσθέσαμε δύο θετικούς αριθμούς και το αποτέλεσμα ήταν ένας αρνητικός αριθμός

Πρόσθεση προσημασμένων αριθμών

- Η πρόσθεση προσημασμένων αριθμών με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο υλοποιείται ακριβώς όπως και στους μη προσημασμένους αριθμούς με τις ακόλουθες διαφοροποιήσεις ως προς την ερμηνεία του αποτελέσματος:
 - Σε αντίθεση με τους μη προσημασμένους αριθμούς η παραγωγή ενός κρατούμενου εξόδου από τη στήλη του πιο σημαντικού bit **δεν σημαίνει πάντοτε υπερχείλιση**
 - Η πρόσθεση δύο **ετερόσημων αριθμών** δεν παράγει ποτέ υπερχείλιση
 - Η πρόσθεση δύο **ομόσημων αριθμών** των N bits μπορεί να προκαλέσει υπερχείλιση αν το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο του $2^{N-1} - 1$ ή μικρότερο του -2^{N-1}
- Αν δύο ομόσημοι αριθμοί προστεθούν και το αποτέλεσμα έχει αντίθετο πρόσημο, τότε παρουσιάζεται **υπερχείλιση**
- **Προσοχή:** Δεν ταυτίζονται οι υπερχειλίσεις που παράγονται κατά την πρόσθεση μεταξύ προσημασμένων και μη προσημασμένων αριθμών

Παράδειγμα 1.12

- Πρόσθεση αριθμών με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
- Υπολογίστε τα αθροίσματα (α) $-2_{10} + 1_{10}$ και (β) $-7_{10} + 7_{10}$ χρησιμοποιώντας αριθμούς συμπληρώματος ως προς δύο.
 - α) $-2_{10} + 1_{10} = 1110_2 + 0001_2 = 1111_2 = -1_{10}$
 - β) $-7_{10} + 7_{10} = 1001_2 + 0111_2 = \cancel{1}0000_2 = 0000_2 = -0_{10}$

Το κρατούμενο εξόδου (πέμπτο bit) αγνοείται, οπότε μένει το σωστό αποτέλεσμα (με 4 bit), δηλαδή το 0000_2 .

Παράδειγμα 1.14

- Πρόσθεση αριθμών συμπληρώματος ως προς δύο με υπερχείλιση
- Υπολογίστε το άθροισμα $4_{10} + 5_{10}$ χρησιμοποιώντας αριθμούς συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit
 - $4_{10} + 5_{10} = 0100_2 + 0101_2 = 1001_2 = -7_{10}$
 - Το αποτέλεσμα υπερχειλίζει το εύρος τιμών των θετικών αριθμών συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit (που είναι το $+7_{10}$), παράγοντας ένα εσφαλμένο αρνητικό αποτέλεσμα, το -7_{10}
 - Εάν χρησιμοποιούσαμε αριθμούς τουλάχιστον των 5 bits τότε το αποτέλεσμα θα ήταν σωστό
 - $4_{10} + 5_{10} = 00100_2 + 00101_2 = 01001_2 = 9_{10}$
 - Προσοχή: Εάν θεωρήσουμε ότι οι αριθμοί των 4 bit είναι μη προσημασμένοι, το αποτέλεσμα είναι σωστό χωρίς υπερχείλιση!
 - $4_{10} + 5_{10} = 0100_2 + 0101_2 = 1001_2 = 9_{10}$

Το ατύχημα του πύραυλου Ariane 5

- Ο πύραυλος Ariane 5, που κόστισε 7 δισεκατομμύρια δολάρια και εκτοξεύτηκε στις 4 Ιουνίου 1996, απέκλινε από την πορεία του 40 δευτερόλεπτα μετά από την εκτόξευση, κόπηκε στα δύο και εξερράγη.
- Η αποτυχία προκλήθηκε όταν ο υπολογιστής που έλεγχε τον πύραυλο **υπερχειλίσε** το εύρος (16 bit) των προσημασμένων τιμών του και κατέρρευσε.
- Ο εν λόγω κώδικας είχε ελεγχθεί διεξοδικά στον πύραυλο Ariane 4. Όμως, ο Ariane 5 διέθετε πιο γρήγορη μηχανή η οποία παρήγαγε μεγαλύτερες τιμές για τον υπολογιστή ελέγχου, προκαλώντας έτσι την υπερχειλίση



Αφαίρεση αριθμών συμπληρώματος ως προς δύο

- **Μέθοδος 1:**

Για να πραγματοποιήσουμε την αφαίρεση υπολογίζουμε το συμπλήρωμα ως προς δύο του αφαιρετέου και το προσθέτουμε στον μειωτέο

- **Μέθοδος 2: Εναλλακτική μέθοδος**

Για να πραγματοποιήσουμε την αφαίρεση αντιστρέφουμε τα bit του αφαιρετέου και το προσθέτουμε στο μειωτέο ξεκινώντας με κρατούμενο εισόδου 1, αντί για 0

Παράδειγμα 1.13

- Αφαίρεση αριθμών με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
- Υπολογίστε τα (α) $5_{10} - 3_{10}$ και (β) $3_{10} - 5_{10}$ χρησιμοποιώντας αριθμούς συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit.

- **Μέθοδος 1:**

(α) Ο μειωτέος είναι $5_{10} = 0101_2$

Ο αφαιρετέος είναι $3_{10} = 0011_2$

- Υπολογίζουμε το συμπλήρωμα του αφαιρετέου ως προς δύο και παίρνουμε $-3_{10} = 1101_2$
- Εκτελούμε πρόσθεση αντί για αφαίρεση
- $5_{10} + (-3_{10}) = 0101_2 + 1101_2 = \cancel{1}0010_2 = 2_{10}$
- Το κρατούμενο στην πιο σημαντική θέση αγνοείται

Παράδειγμα 1.13

- Αφαίρεση αριθμών με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
- Υπολογίστε τα (α) $5_{10} - 3_{10}$ και (β) $3_{10} - 5_{10}$ χρησιμοποιώντας αριθμούς συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit.

- **Μέθοδος 1:**

(β) Ο μειωτέος είναι $3_{10} = 0011_2$

Ο αφαιρετέος είναι $5_{10} = 0101_2$

- Υπολογίζουμε το συμπλήρωμα του αφαιρετέου ως προς δύο και παίρνουμε $-5_{10} = 1011_2$
- Εκτελούμε πρόσθεση αντί για αφαίρεση
- $3_{10} + (-5_{10}) = 0011_2 + 1011_2 = 1110_2 = -2_{10}$

Παράδειγμα 1.13

- Αφαίρεση αριθμών με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
- Υπολογίστε τα (α) $5_{10} - 3_{10}$ και (β) $3_{10} - 5_{10}$ χρησιμοποιώντας αριθμούς συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit.

- **Μέθοδος 2:**

(α) Ο μειωτέος είναι $5_{10} = 0101_2$

Ο αφαιρετέος είναι $3_{10} = 0011_2$

- Αντιστρέφουμε τα bit του αφαιρετέου και παίρνουμε 1100_2
- Εκτελούμε πρόσθεση αντί για αφαίρεση με κρατούμενο εισόδου 1
- $5_{10} + (-3_{10}) = 0101_2 + 1100_2 + 1 = \cancel{1}0010_2 = 2_{10}$
- Το κρατούμενο στην πιο σημαντική θέση αγνοείται

Παράδειγμα 1.13

- Αφαίρεση αριθμών με αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
- Υπολογίστε τα (α) $5_{10} - 3_{10}$ και (β) $3_{10} - 5_{10}$ χρησιμοποιώντας αριθμούς συμπληρώματος ως προς δύο με 4 bit.

- **Μέθοδος 2:**

(β) Ο μειωτέος είναι $3_{10} = 0011_2$

Ο αφαιρετέος είναι $5_{10} = 0101_2$

- Αντιστρέφουμε τα bit του αφαιρετέου και παίρνουμε 1010_2
- Εκτελούμε πρόσθεση αντί για αφαίρεση με κρατούμενο εισόδου 1
- $3_{10} + (-5_{10}) = 0011_2 + 1010_2 + 1 = 1110_2 = -2_{10}$

Επέκταση προσήμου/μηδενός

- Ένας προσημασμένος αριθμός συμπληρώματος ως προς δύο μπορεί να επεκταθεί ώστε να έχει περισσότερα bits
 - Αυτή η διαδικασία λέγεται **επέκταση προσήμου** (*sign extension*)
Τα επιπλέον bits που θα προστεθούν θα αντιγράφονται από το bit προσήμου
 - Έστω ότι θέλουμε να προσθέσουμε 4 παραπάνω bit αριστερά:
 $3 = 0011 = 00000011$
 $-3 = 1011 = 11111011$
- Ένας μη προσημασμένος αριθμός μπορεί να επεκταθεί ώστε να έχει περισσότερα bits
 - Αυτή η διαδικασία λέγεται **επέκταση μηδενός** (*zero extension*)
 - Τα επιπλέον bits που θα προστεθούν θα είναι 0
 - Έστω ότι θέλουμε να προσθέσουμε 4 παραπάνω bit αριστερά
 $3 = 0011 = 00000011$
 $11 = 1011 = 00001011$

Δυαδικές κωδικοποιήσεις με 4 bit

- Μη προσημασμένοι αριθμοί
- Εύρος τιμών στα N bit: $[0, 2^N - 1]$

Δεκαδικός	Μη προσημασμένος
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111

Δεκαδικός	Μη προσημασμένος
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
15	1111

Δυαδικές κωδικοποιήσεις με 4 bit

- Προσημασμένοι αριθμοί προσήμου-μεγέθους
- Εύρος τιμών στα N bit: $[-(2^{N-1} - 1), 2^{N-1} - 1]$

Δεκαδικός	Προσημασμένος προσήμου μεγέθους
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111

Δεκαδικός	Προσημασμένος προσήμου μεγέθους
-0	1000
-1	1001
-2	1010
-3	1011
-4	1100
-5	1101
-6	1110
-7	1111

Δυαδικές κωδικοποιήσεις με 4 bit

- Προσημασμένοι αριθμοί συμπληρώματος ως προς δύο
- Εύρος τιμών στα N bit: $[-2^{N-1}, 2^{N-1} - 1]$

Δεκαδικός	Προσημασμένος συμπλ. ως προς δύο
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111

Δεκαδικός	Προσημασμένος συμπλ. ως προς δύο
-8	1000
-7	1001
-6	1010
-5	1011
-4	1100
-3	1101
-2	1110
-1	1111

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.58

Εκτελέστε τις ακόλουθες προσθέσεις μη προσημασμένων δεκαεξαδικών αριθμών. Αναφέρετε αν το άθροισμα θα προκαλέσει υπερχείλιση ή όχι στην περίπτωση που το αποτέλεσμα έχει 8 bit (δύο δεκαεξαδικά ψηφία).

$$(γ) \quad AB_{16} + 3E_{16}$$

$$(δ) \quad 8F_{16} + AD_{16}$$

■ Άσκηση 1.61

Μετατρέψτε τους παρακάτω δεκαδικούς αριθμούς σε δυαδικούς αριθμούς συμπληρώματος ως προς δύο των 6 bit και αφαιρέστε τους. Αναφέρετε αν η διαφορά θα προκαλέσει υπερχείλιση ή όχι στην περίπτωση που το αποτέλεσμα έχει 6 bit.

$$(γ) \quad -28_{10} - 3_{10}$$

$$(δ) \quad -16_{10} - 21_{10}$$

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.64

Σε ένα δυαδικά κωδικοποιημένο δεκαδικό (**binary coded decimal, BCD**) σύστημα, χρησιμοποιούνται 4 bit για την αναπαράσταση ενός δεκαδικού ψηφίου από το 0 έως το 9.

Για παράδειγμα, το 37_{10} γράφεται ως 00110111_{BCD} .

- (α) Γράψτε τον αριθμό 289_{10} στο σύστημα BCD.
- (β) Μετατρέψτε τον αριθμό $100101010001_{\text{BCD}}$ σε δεκαδικό.
- (γ) Μετατρέψτε τον αριθμό 01101001_{BCD} σε δυαδικό.
- (δ) Εξηγήστε γιατί το σύστημα BCD ενδέχεται να είναι ένας χρήσιμος τρόπος αναπαράστασης αριθμών.
 - *Εύκολη μετατροπή από το BCD στο δεκαδικό σύστημα*
 - *Οθόνες επτά τμημάτων (ψηφιακά ρολόγια)*
 - *Ακριβής αναπαράσταση του διψήφιου δεκαδικού κλασματικού μέρους με ένα byte στις χρηματοοικονομικές εφαρμογές*

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.65

Σε ένα δυαδικά κωδικοποιημένο δεκαδικό (**binary coded decimal, BCD**) σύστημα, χρησιμοποιούνται 4 bit για την αναπαράσταση ενός δεκαδικού ψηφίου από το 0 έως το 9.

Για παράδειγμα, το 37_{10} γράφεται ως 00110111_{BCD} .

- (α) Εξηγήστε τα μειονεκτήματα του συστήματος BCD σε σύγκριση με τις δυαδικές αναπαραστάσεις αριθμών
- Δεν λειτουργεί σωστά η πρόσθεση
 - Σε 1 byte στο BCD σύστημα αποθηκεύονται 100 αριθμοί (0-99), ενώ στο δυαδικό σύστημα 256 αριθμοί

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.66

Ένας ιπτάμενος δίσκος πέφτει σε ένα χωράφι με καλαμπόκια στη Νεμπράσκα. Το FBI, που καλείται να ερευνήσει τα συντρίμμια, βρίσκει ένα τεχνικό εγχειρίδιο το οποίο περιέχει μια εξίσωση στο Αρειανό αριθμητικό σύστημα:

$$325 + 42 = 411$$

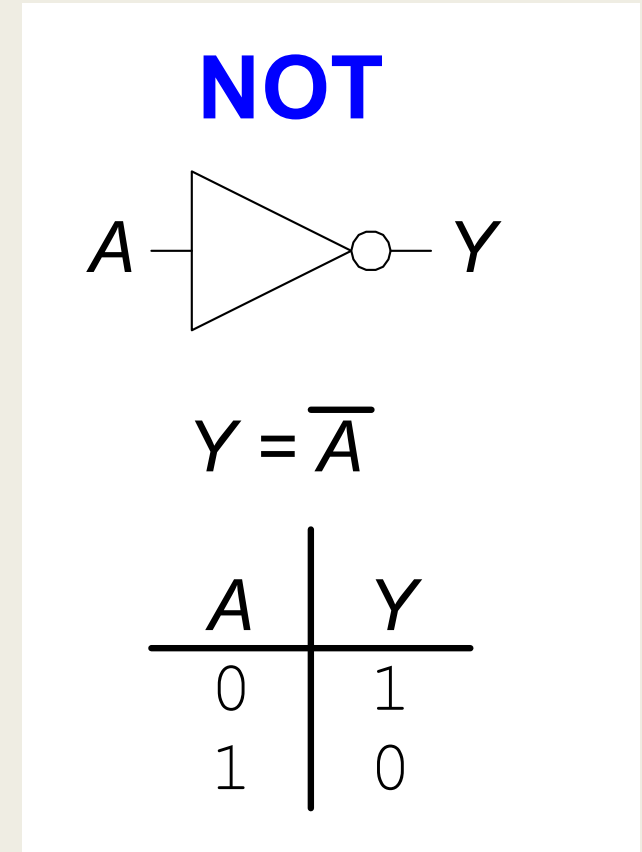
Αν η εξίσωση είναι σωστή, πόσα δάχτυλα σε κάθε ένα από τα δύο χέρια θα περιμένατε να έχουν οι Αρειανοί;

Λογικές Πύλες

- Οι **λογικές πύλες** είναι απλά ψηφιακά κυκλώματα που δέχονται μία η παραπάνω δυαδικές εισόδους και παράγουν μία δυαδική έξοδο
- Η σχέση μεταξύ εισόδων και εξόδου μπορεί να περιγραφτεί από έναν **πίνακα αλήθειας** ή μία **εξίσωση Boole**
- Ο πίνακας αλήθειας έχει **δύο στήλες**, αριστερά οι είσοδοι και δεξιά οι αντίστοιχοι έξοδοι
- Ο πίνακας αληθείας έχει **2^N γραμμές** ώστε να περιέχει **όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των τιμών των N εισόδων**
- Η εξίσωση Boole είναι μια **μαθηματική παράσταση με δυαδικές μεταβλητές και λογικούς τελεστές** που προκύπτει από τον πίνακα αλήθειας

Πύλη NOT

- Η **πύλη NOT** παίρνει μία τιμή και παράγει την αντίστροφη τιμή στην έξοδο
 - Για είσοδο '1' (TRUE) παράγει έξοδο '0' (FALSE)
 - Για είσοδο '0' (FALSE) παράγει έξοδο '1' (TRUE)
- Αν η είσοδος είναι A και η έξοδος Y τότε το σχηματικό της, η εξίσωση Boole και ο πίνακας αλήθειας φαίνονται δεξιά
 - Ο κύκλος στο τέλος της πύλης ονομάζεται **φυσαλίδα** και δηλώνει αντιστροφή της εξόδου
 - Η γραμμή πάνω από το A στην εξίσωση Boole προφέρεται **NOT**
- Η πύλη NOT είναι επίσης γνωστή ως **αντιστροφέας (inverter)**

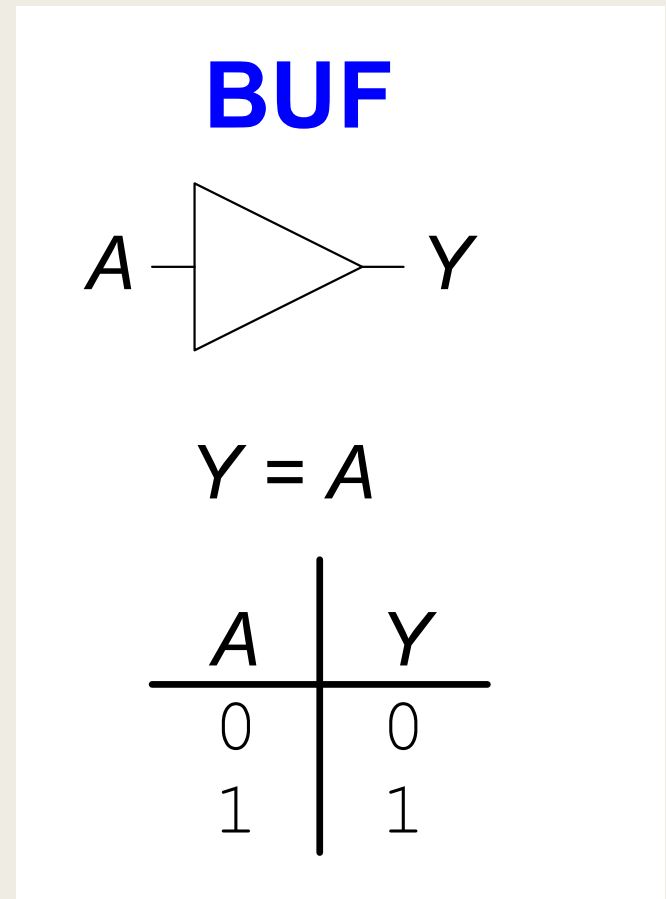


Συμβολισμοί Πύλης NOT

- $Y = \sim A$ (SystemVerilog)
- $Y = !A$
- $Y = \mathbf{not} A$ (VHDL)
- $Y = A'$
- $Y = \neg A$
- $Y = \bar{A}$ (βιβλίο)

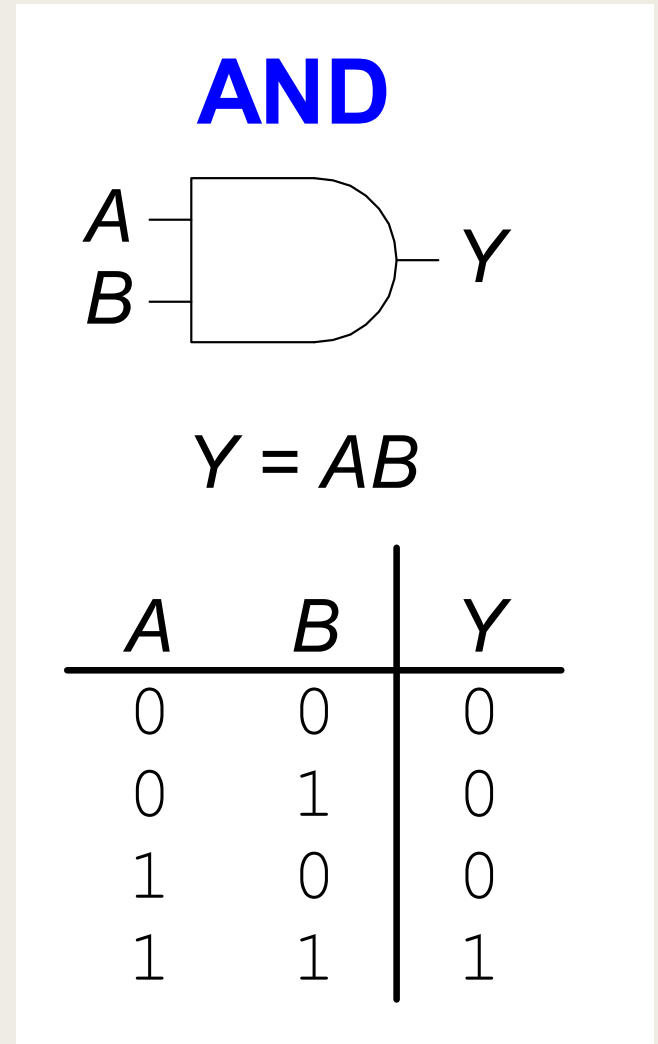
Απομονωτής (Buffer)

- Ο απομονωτής ή **buffer** αντιγράφει την είσοδο στην έξοδο
 - Για είσοδο '1' (TRUE) παράγει έξοδο '1' (TRUE)
 - Για είσοδο '0' (FALSE) παράγει έξοδο '0' (FALSE)
- Αν η είσοδος είναι A και η έξοδος Y τότε το σχηματικό της, η εξίσωση Boole και ο πίνακας αλήθειας φαίνονται δεξιά
 - Στο σχηματικό διαφέρει από την πύλη NOT ως προς τη φουσαλίδα
- Ο απομονωτής δεν αλλάζει τη λογική τιμή, αλλά ενισχύει το ρεύμα του σήματος, ώστε να διοχετεύει μεγάλες ποσότητες ρεύματος σε έναν κινητήρα ή να διασυνδέει την έξοδό του με εισόδους πολλών πυλών



Πύλη AND (2 εισόδων)

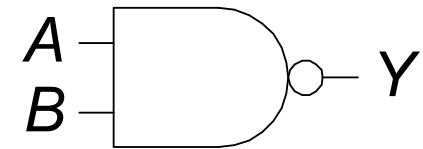
- Η **πύλη AND** παράγει έξοδο Y με τιμή '1' (TRUE), αν και μόνο αν, τόσο το A όσο και το B έχουν την τιμή '1' (TRUE). Διαφορετικά, η έξοδος έχει την τιμή '0' (FALSE)
- Η εξίσωση Boole διαβάζεται:
 - το Y ισούται με το A **και** το B



Πύλη NAND (2 εισόδων)

- Η **πύλη NAND** εκτελεί την πράξη **NOT AND**
 - Στο σχηματικό διαφέρει από την πύλη **AND** ως προς τη φουσαλίδα που έχει στην έξοδο
- Η πύλη NAND παράγει έξοδο πάντα με τιμή '1' (TRUE), με εξαίρεση την περίπτωση που και οι δύο είσοδοι έχουν την τιμή TRUE

NAND

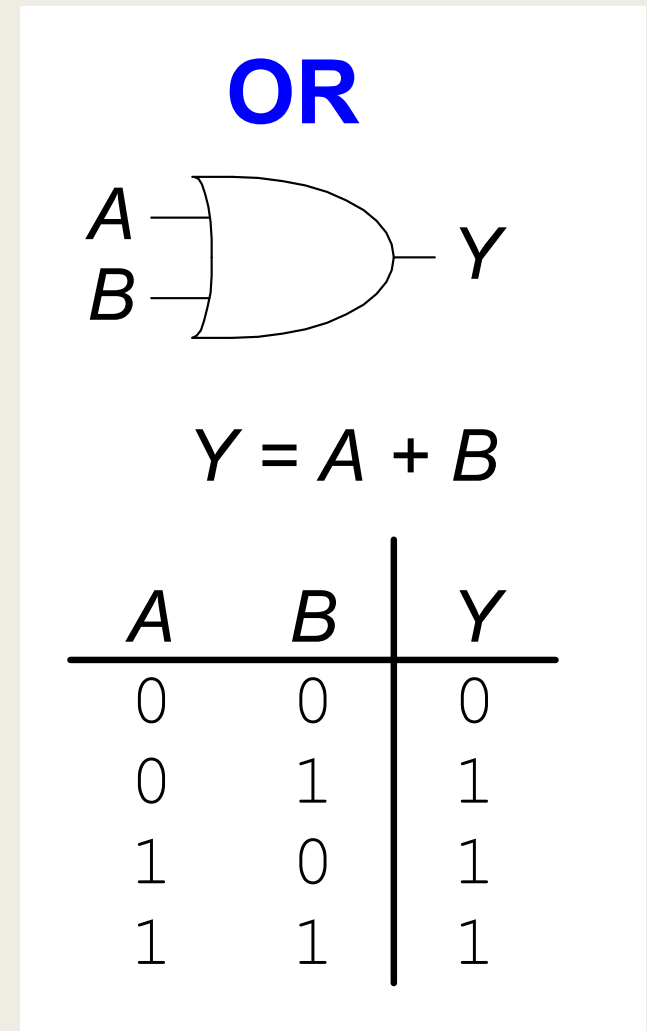


$$Y = \overline{AB}$$

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

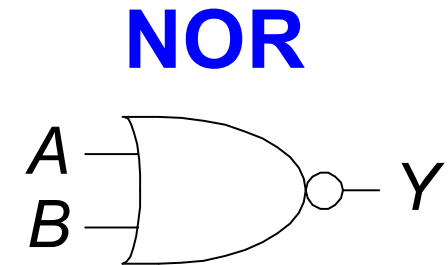
Πύλη OR (2 εισόδων)

- Η **πύλη OR** παράγει έξοδο Y με τιμή '1' (TRUE), αν είτε το A είτε το B (είτε και τα δύο) έχουν την τιμή '1' (TRUE). Διαφορετικά, η έξοδος έχει την τιμή '0' (FALSE)
- Η εξίσωση Boole διαβάζεται:
 - το Y ισούται με το A **ή** το B



Πύλη NOR (2 εισόδων)

- Η **πύλη NOR** εκτελεί την πράξη **NOT OR**
 - Στο σχηματικό διαφέρει από την πύλη **OR** ως προς τη φουσαλίδα που έχει στην έξοδο
- Η πύλη NOR παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE) αν ούτε το A ούτε το B δεν έχουν την τιμή TRUE, δηλαδή αν και τα δύο έχουν την τιμή '0' (FALSE)



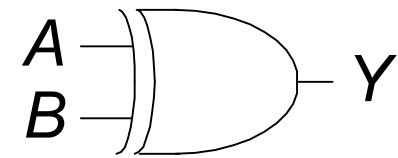
$$Y = \overline{A + B}$$

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Πύλη XOR (2 εισόδων)

- Η **πύλη XOR (exclusive OR)** παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE) αν το A ή το B, αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα, έχουν την τιμή '1' (TRUE)
- Η πράξη XOR συμβολίζεται με το \oplus δηλαδή το συν μέσα σε έναν κύκλο
- Επίσης, υλοποιεί την αλγεβρική πράξη $Y = (A+B) \bmod 2, A, B \in \{0,1\}$

XOR



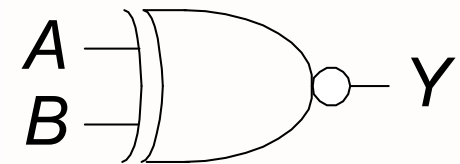
$$Y = A \oplus B$$

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Πύλη XNOR (2 εισόδων)*

- Η **πύλη XNOR (exclusive NOR)** παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE) αν το A και το B ταυτόχρονα έχουν την τιμή '1' (TRUE) ή την τιμή '0' (FALSE)
- Η πύλη XNOR εκτελεί την **αντίστροφη πράξη** μίας πύλης XOR
 - Στο σχηματικό διαφέρει από την πύλη XOR ως προς τη φυσαλίδα που έχει στην έξοδο
- Μία πύλη XNOR με δύο εισόδους ονομάζεται ενίοτε πύλη ισότητας (**equality gate**) επειδή η έξοδός της έχει την τιμή '1' (TRUE) όταν οι **είσοδοι είναι ίσες**

XNOR



$$Y = \overline{A \oplus B}$$

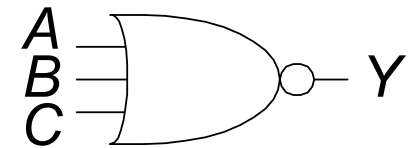
A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

*Παράδειγμα 1.15

Παράδειγμα 1.16

- Πύλες NOR με περισσότερες από δύο εισόδους
- Μία πύλη NOR με N εισόδους παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE) μόνο αν όλες οι είσοδοι έχουν την τιμή '0' (FALSE)

NOR3



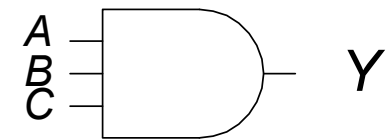
$$Y = \overline{A+B+C}$$

A	B	C	Y
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Παράδειγμα 1.17

- Πύλες AND με περισσότερες από δύο εισόδους
- Μία πύλη AND με N εισόδους παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE) μόνο αν όλες οι είσοδοι έχουν την τιμή '1' (TRUE)

AND3



$$Y = ABC$$

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Πύλες περιττής και άρτιας ισοτιμίας

- Μια πύλη XOR με N εισόδους ονομάζεται ενίοτε **πύλη περιττής ισοτιμίας (odd parity gate)** και παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE) αν ένα **περιττό πλήθος** εισόδων έχουν την τιμή '1' (TRUE)
- Μια πύλη XNOR με N εισόδους ονομάζεται ενίοτε **πύλη άρτιας ισοτιμίας (even parity gate)** και παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE) αν ένα **άρτιο πλήθος εισόδων** έχουν την τιμή '1' (TRUE)
- Υλοποιούνται με δένδρα από N-1 πύλες XOR δύο εισόδων
 - Στην περίπτωση της πύλης XNOR, η πύλη δύο εισόδων στην έξοδο είναι πύλη XNOR αντί για XOR
- Χρησιμοποιούνται στην κωδικοποίηση και την κρυπτογραφία

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.73

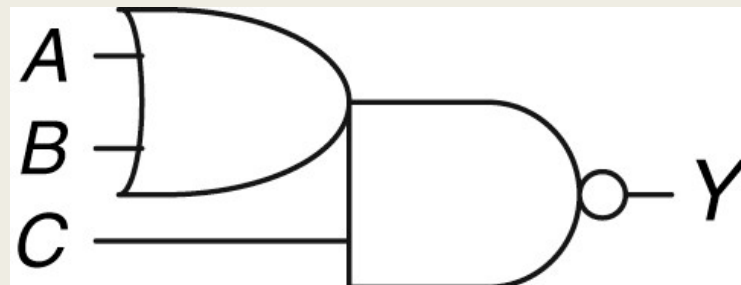
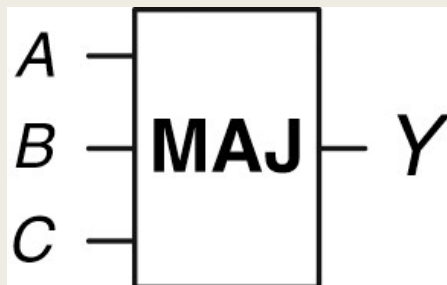
Μια **πύλη πλειοψηφίας (majority gate)** παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE), αν και μόνο αν, περισσότερες από τις μισές είσοδοι έχουν την τιμή '1' (TRUE)

- Συμπληρώστε τον πίνακα αληθείας για την πύλη πλειοψηφίας με τρεις εισόδους

■ Άσκηση 1.75

Μια πύλη **OR-AND-INVERT (OAI)** παράγει έξοδο με τιμή '0' (FALSE) αν το C έχει την τιμή '1' (TRUE) και το A ή το B έχει την τιμή '1' (TRUE). Διαφορετικά παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE).

- Συμπληρώστε τον πίνακα αληθείας για την πύλη OR-AND-INVERT (OAI)

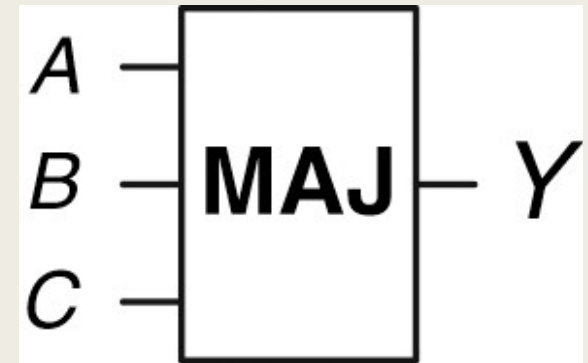


■ Άσκηση 1.73

Μια **πύλη πλειοψηφίας (majority gate)** παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE), αν και μόνο αν, περισσότερες από τις μισές είσοδοι έχουν την τιμή '1' (TRUE)

- Συμπληρώστε τον πίνακα αληθείας για την πύλη πλειοψηφίας με τρεις εισόδους

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

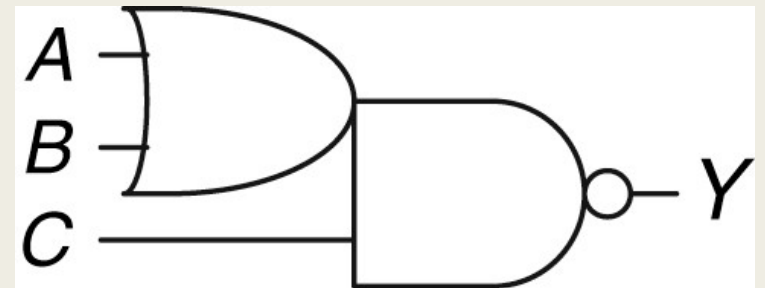


■ Άσκηση 1.75

Μια πύλη **OR-AND-INVERT (OAI)** παράγει έξοδο με τιμή '0' (FALSE) αν το C έχει την τιμή '1' (TRUE) και το A ή το B έχει την τιμή '1' (TRUE). Διαφορετικά παράγει έξοδο με τιμή '1' (TRUE).

- Συμπληρώστε τον πίνακα αληθείας για την πύλη OR-AND-INVERT (OAI)

A	B	C	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0



Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.76

Υπάρχουν 16 διαφορετικοί πίνακες αληθείας για εξισώσεις (συναρτήσεις) Boole με δύο μεταβλητές.

- Παραθέστε όλους τους πίνακες.
- Δώστε ένα σύντομο περιγραφικό όνομα.

■ Άσκηση 1.77

Πόσοι διαφορετικοί πίνακες αληθείας υπάρχουν για συναρτήσεις Boole με N μεταβλητές;

- 2^{2^N}

A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
Zero			A NOR B			$\bar{A}B$			NOT A		

A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
$A\bar{B}$			NOT B			XOR			NAND		

A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AND			XNOR			B			$\bar{A} + B$		

A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y	A	B	Y
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A			$A + \bar{B}$			OR			One		

Αριθμητικά Κυκλώματα

- Τα **αριθμητικά κυκλώματα** αποτελούν τα κεντρικά δομικά στοιχεία των υπολογιστών
- Οι υπολογιστές και τα στοιχεία ψηφιακής λογικής εκτελούν πολλές αριθμητικές λειτουργίες ή πράξεις, όπως:
 - πρόσθεση
 - αφαίρεση
 - συγκρίσεις
 - ολισθήσεις
 - πολλαπλασιασμό
 - διαίρεση

Στην ενότητα αυτή θα επικεντρωθούμε στα αριθμητικά κυκλώματα που εκτελούν τις πράξεις της πρόσθεσης και της αφαίρεσης

Πρόσθεση δυαδικών αριθμών

- Ακριβώς όπως και στο δεκαδικό σύστημα προσθέτουμε τα ψηφία της ίδιας στήλης (ή αλλιώς ίδιου βάρους) μαζί με το bit κρατούμενου (αν υπάρχει)
- Στο **δεκαδικό**

$$\begin{array}{r} 11 \quad \leftarrow \text{κρατούμενο} \\ 4277 \\ + 5499 \\ \hline 9776 \end{array}$$

- Στο **δυαδικό**

Παράγεται bit κρατούμενου εξόδου:

$$1+1 = 2_{10} = 10_2$$

$$1+1+1 = 3_{10} = 11_2$$

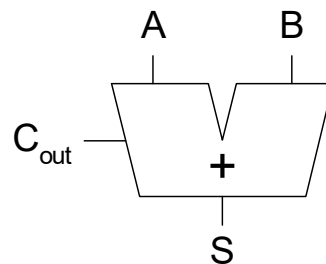
$$\begin{array}{r} 11 \quad \leftarrow \text{κρατούμενο} \\ 1011 \\ + 0011 \\ \hline 1110 \end{array}$$

Αθροιστές του ενός bit

- Προσθέτουν τα ψηφία της ίδιας στήλης (ή αλλιώς ίδιου βάρους) μαζί με το bit κρατούμενου (εάν υπάρχει)
- Υπάρχουν δύο αθροιστές του ενός bit
 - Ο *ημιαθροιστής (half-adder)*, όταν δεν υπάρχει κρατούμενο εισόδου
 - Ο *πλήρης αθροιστής (full-adder)*, όταν υπάρχει *κρατούμενο εισόδου C_{in} (carry in)*
- Παράγουν στην έξοδο
 - Το *άθροισμα S (sum)*
 - Το *κρατούμενο εξόδου C_{out} (carry out)*
- Σε έναν αθροιστή πολλών bit, το κρατούμενο εξόδου C_{out} μεταφέρεται ως κρατούμενο εισόδου C_{in} , στην επόμενη στήλη στα αριστερά (στο επόμενο βάρος), όταν υπάρχει
- Δεν διαφοροποιείται η πράξη της πρόσθεσης στο δυαδικό σύστημα μεταξύ μη προσημασμένων αριθμών και προσημασμένων αριθμών σε αναπαράσταση συμπληρώματος ως προς δύο
 - *αλλάζει μόνο η ερμηνεία των αριθμών και η εμφάνιση της υπερχειλίσης*

Αθροιστές του ενός bit

Half Adder

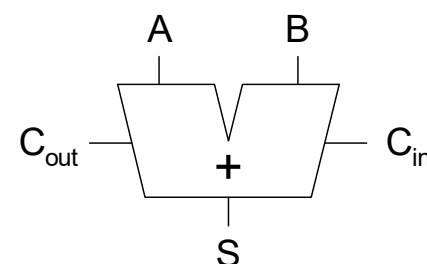


A	B	C_{out}	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

$$S = A \oplus B$$

$$C_{out} = AB$$

Full Adder



C_{in}	A	B	C_{out}	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

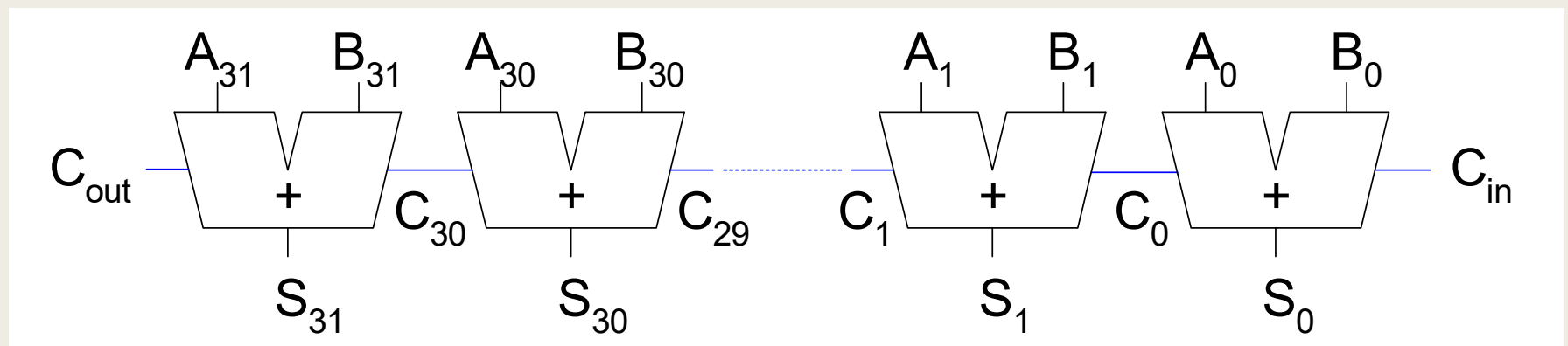
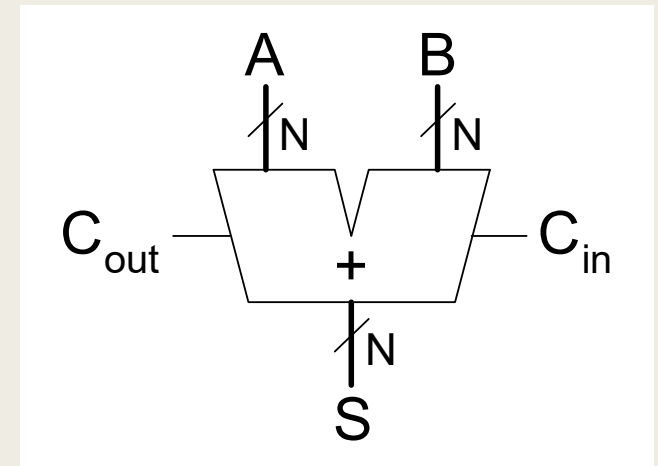
$$S = A \oplus B \oplus C_{in}$$

$$C_{out} = AB + AC_{in} + BC_{in}$$

Αθροιστές των N bit

■ Αθροιστής κυμάτωσης κρατούμενου (ripple-carry adder)

- N πλήρεις αθροιστές του ενός bit συνδεδεμένοι αλυσιδωτά
- Το κρατούμενο **διαδίδεται** μέσω της αλυσίδας κρατουμένου
- Η έξοδος C_{out} του ενός βάρους χρησιμεύει ως είσοδος C_{in} του επόμενου βάρους
- Γενικά είναι αργός (χρησιμοποιείται μόνο στα FPGA)



Αφαίρεση αριθμών συμπληρώματος ως προς δύο

- **Μέθοδος 1:**

Για να πραγματοποιήσουμε την αφαίρεση υπολογίζουμε το συμπλήρωμα ως προς δύο του αφαιρετέου και το προσθέτουμε στον μειωτέο

- **Μέθοδος 2: Εναλλακτική μέθοδος**

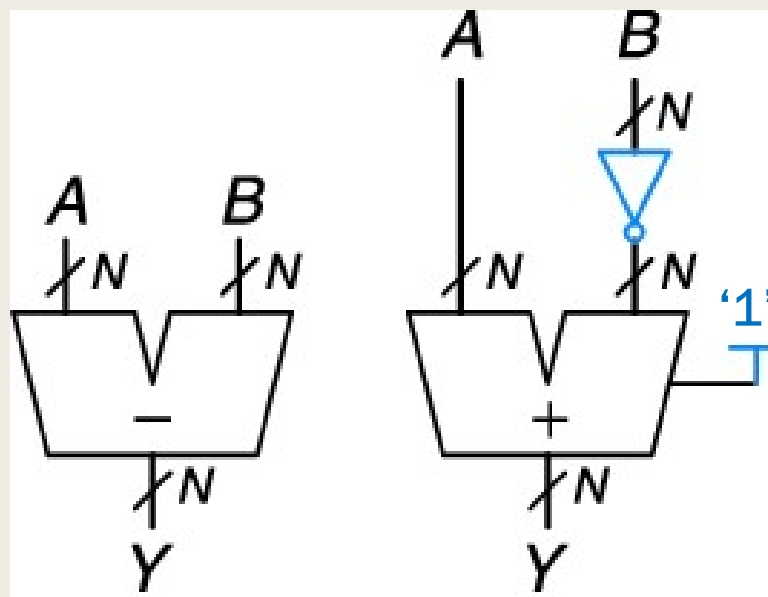
Για να πραγματοποιήσουμε την αφαίρεση αντιστρέφουμε τα bit του αφαιρετέου και το προσθέτουμε στο μειωτέο ξεκινώντας με κρατούμενο εισόδου 1, αντί για 0

Στην υλοποίηση του αφαιρέτη χρησιμοποιούμε έναν αθροιστή με βάση την εναλλακτική μέθοδο

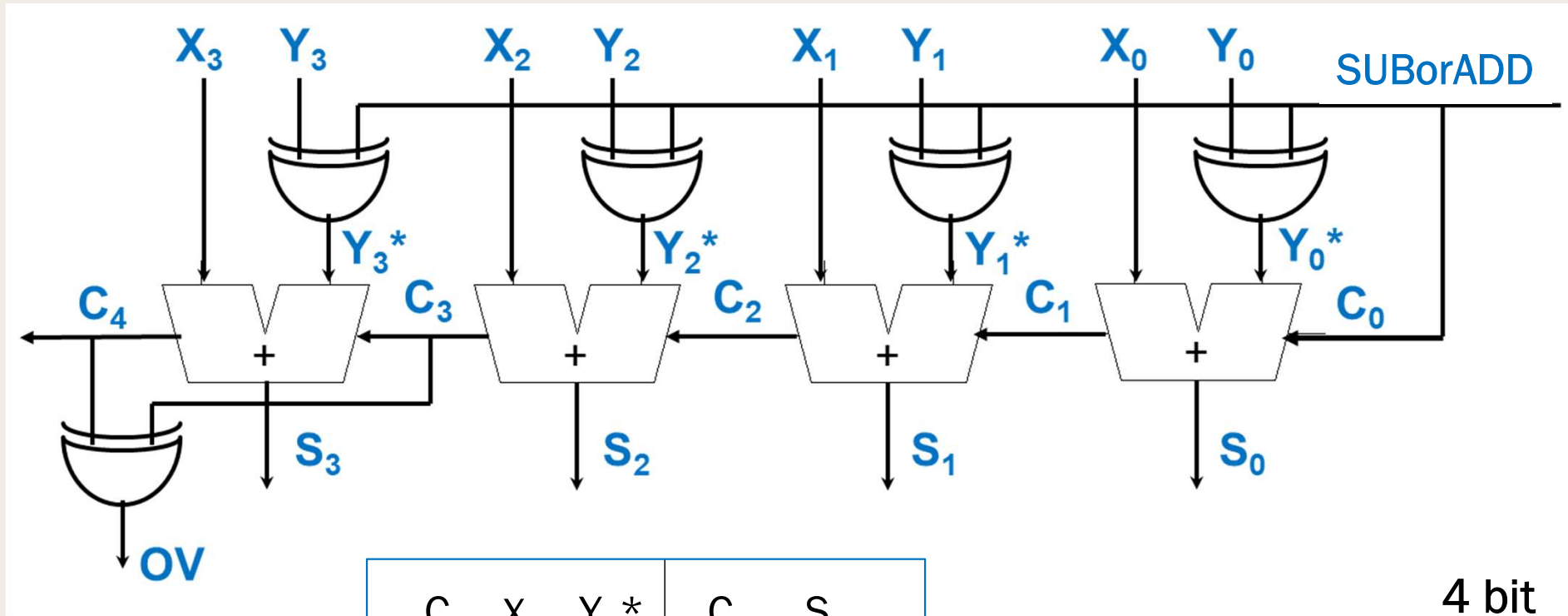
Αφαιρέτες των N bit

■ Αφαιρέτης κυμάτωσης κρατούμενου (ripple-carry subtracter)

- N πλήρεις αθροιστές του ενός bit συνδεδεμένοι αλυσιδωτά
- Το κρατούμενο **διαδίδεται** μέσω της αλυσίδας κρατουμένου
- Η έξοδος C_{out} του ενός βάρους χρησιμεύει ως είσοδος C_{in} του επόμενου βάρους
- **Αντιστρέφονται** τα ψηφία του αφαιρετέου
- Η είσοδος C_{in} του μικρότερου βάρους **αρχικοποιείται στο 1**
- Γενικά είναι αργός (χρησιμοποιείται μόνο στα FPGA)



Αθροιστής/αφαιρέτης με επιλογή και υπερχείλιση προσημασμένων



$X_3=Y_3^*=1 \ \& \ S_3=0$

$X_3=Y_3^*=0 \ \& \ S_3=1$

C_3	X_3	Y_3^*	C_4	S_3
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

4 bit

<p>Πρόσθεση SUBorADD = 0</p> <p>$C_3 C_2 C_1 C_0 = 0$</p> $\begin{array}{r} X_3 X_2 X_1 X_0 \\ + Y_3 Y_2 Y_1 Y_0 \\ \hline C_4 S_3 S_2 S_1 S_0 \end{array}$	<p>Αφαίρεση SUBorADD = 1</p> <p>$C_3 C_2 C_1 C_0 = 1$</p> $\begin{array}{r} X_3 X_2 X_1 X_0 \\ + \overline{Y_3} \overline{Y_2} \overline{Y_1} \overline{Y_0} \\ \hline C_4 S_3 S_2 S_1 S_0 \end{array}$
--	--

Λογικά επίπεδα

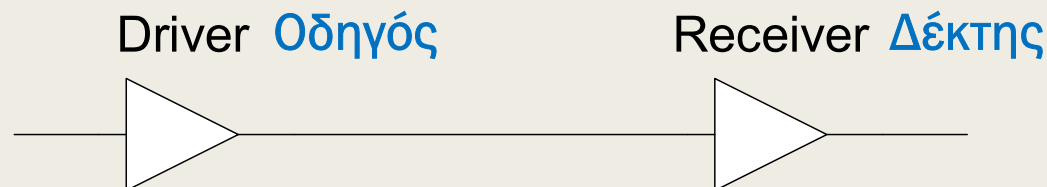
- Οι μεταβλητές (όπως η τάση στην έξοδο ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος) αναπαρίστανται με συνεχείς φυσικές τιμές
- Ενα ψηφιακό σύστημα όμως χρησιμοποιεί μεταβλητές που παίρνουν **διακριτές τιμές**
- Επομένως ένας κατασκευαστής ψηφιακών συστημάτων πρέπει να βρεί μία αντιστοίχιση **που να συνδέει τις συνεχείς τιμές με τις διακριτές τιμές**
- Για παράδειγμα: Η αντιστοίχιση ενός δυαδικού σήματος A με την τάση σε μία έξοδο μίας πύλης (κατά τη θετική λογική)
 - Τα $0V$ αντιστοιχούν στο $A=0$ (LOW)
 - Τα $5V$ αντιστοιχούν στο $A=1$ (HIGH)
- Λόγω ανοχής στον θόρυβο, θα πρέπει και κάποιες κοντινές τάσεις να αντιστοιχούν στο $A=0$ ή $A=1$
 - π.χ. τα $4,9V$ στα $5V$ αντιστοιχούν στο $A=1$
- Τί συμβαίνει όμως με ποιο ενδιάμεσες τιμές τάσεων (π.χ. $3,2V$);

Τάση Τροφοδοσίας και Γείωση

- Η χαμηλότερη τάση σε ένα σύστημα ονομάζεται **γείωση** (ground) ή **GND**
 - Θεωρούμε ότι η χαμηλότερη τάση είναι 0V
- Η υψηλότερη τάση σε ένα σύστημα, δηλαδή η τάση τροφοδοσίας, προέρχεται από την τροφοδοσία και συμβολίζεται με **V_{DD}**
 - Στις δεκαετίες του 1970 και 1980 είχε την τιμή 5V
 - Κάθως η τεχνολογία των τσιπ εξελίσσεται η υψηλότερη τάση μειώνεται συνεχώς (από τα 5V στο 1V)

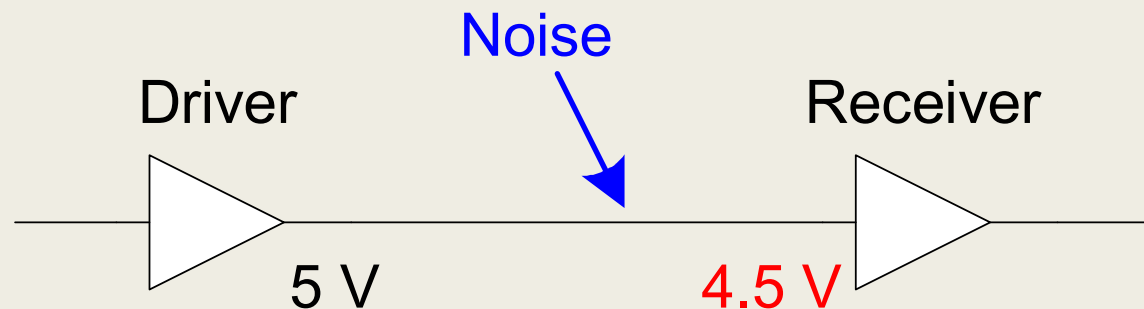
Λογικά Επίπεδα

- Η αντιστοίχιση μιας συνεχούς μεταβλητής σε μία διακριτή δυαδική μεταβλητή πραγματοποιείται με τον ορισμό των λογικών επιπέδων
- Ορίζονται διαφορετικά λογικά επίπεδα για εισόδους και εξόδους, ώστε να παρέχεται προστασία από τον θόρυβο
 - V_{OH} : ελάχιστη τάση στην έξοδο ενός οδηγού που αντιστοιχεί στην τιμή '1' (HIGH)
 - V_{OL} : μέγιστη τάση στην έξοδο ενός οδηγού που αντιστοιχεί στην τιμή '0' (LOW)
 - V_{IH} : ελάχιστη τάση στην είσοδο ενός δέκτη που αντιστοιχεί στην τιμή '1' (HIGH)
 - V_{IL} : μέγιστη τάση στην είσοδο ενός δέκτη που αντιστοιχεί στην τιμή '0' (LOW)

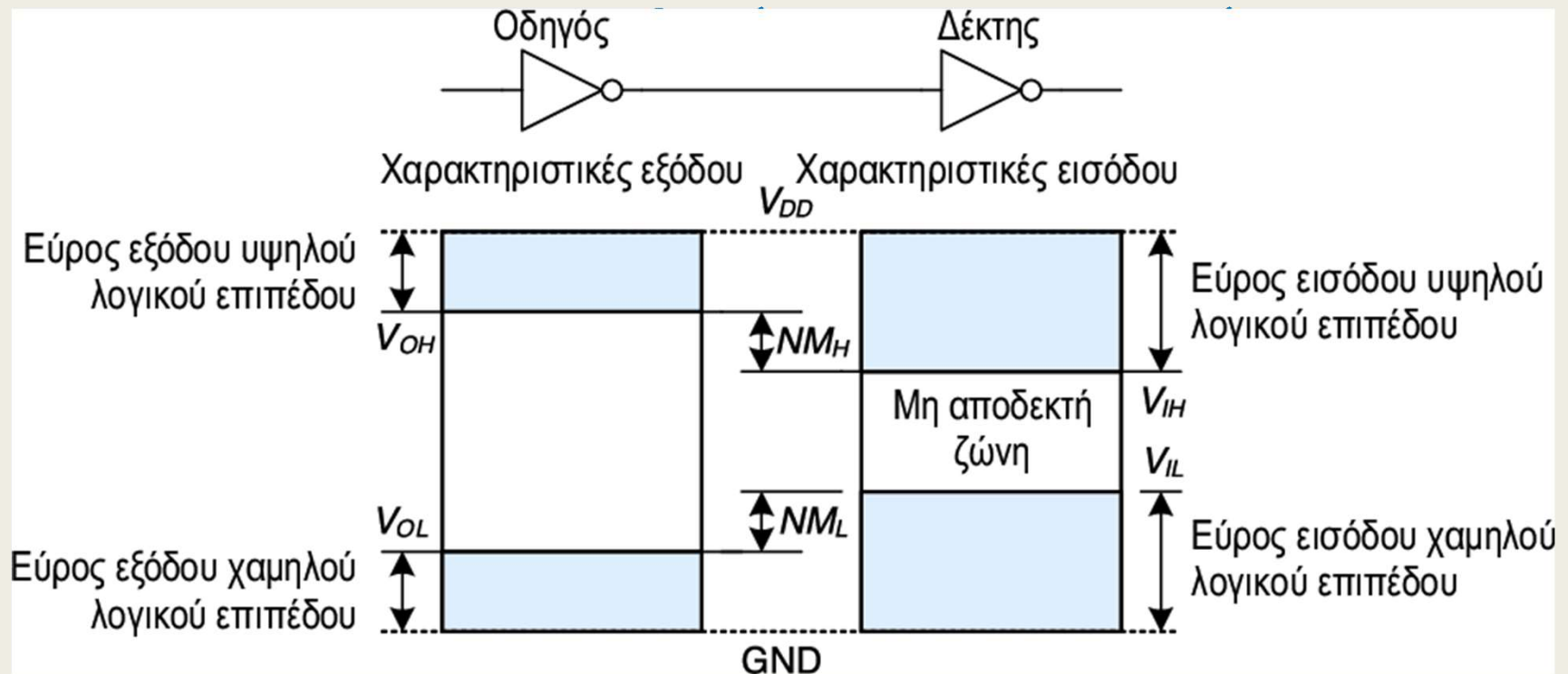


Τι είναι ο θόρυβος (noise);

- Η ύπαρξη θορύβου είναι αρκετά συχνό φαινόμενο ανάμεσα στον οδηγό και στον δέκτη
- Οτιδήποτε μπορεί να επηρεάσει ή να υποβαθμίσει ένα σήμα
 - Π.χ., αντίσταση, θόρυβος τάσης τροφοδοσίας, ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών συρμάτων, κλπ.
- Για παράδειγμα: Η πύλη «οδηγός» έχει έξοδο 5V. Λόγω της αντίστασης απ' το μακρύ σύρμα που συνδέει την έξοδο του οδηγού με την είσοδο του δέκτη τελικά ο δέκτης θα λάβει 4.5V



Περιθώρια θορύβου (noise margins)



Υψηλό Περιθώριο Θορύβου: $NM_H = V_{OH} - V_{IH}$

Χαμηλό Περιθώριο Θορύβου : $NM_L = V_{IL} - V_{OL}$

Περιθώρια θορύβου

- Για να ερμηνευθεί σωστά η έξοδος του οδηγού στην είσοδο του δέκτη, πρέπει να επιλέξουμε τέτοιες τιμές λογικών επιπέδων ώστε να ισχύουν οι ανισότητες:
 - $V_{OL} < V_{IL}$ και $V_{OH} > V_{IH}$
- Άρα, ακόμα και αν η τάση στην έξοδο του οδηγού έχει μεταβληθεί από κάποια ποσότητα θορύβου, η είσοδος του δέκτη θα εξακολουθεί να είναι σε θέση να ανιχνεύει το σωστό λογικό επίπεδο.
- Το **περιθώριο θορύβου (noise margin)** είναι εκείνη η ποσότητα του θορύβου που θα μπορούσε να προστεθεί στην έξοδο του οδηγού στη χειρότερη περίπτωση, η οποία επιτρέπει ωστόσο στο σήμα να ερμηνευθεί σωστά ως μια έγκυρη είσοδος του δέκτη
- Αν για κάποιον λόγο, π.χ. την παρουσία θορύβου ή την ύπαρξη κάποιου ελαττωματικού εξαρτήματος, η είσοδος του δέκτη έχει τιμή που εμπίπτει στη **μη αποδεκτή ζώνη (forbidden zone)** μεταξύ V_{IL} και V_{IH} , τότε η συμπεριφορά της πύλης είναι απρόβλεπτη.

Παράδειγμα 1.18



- Θεωρήστε το κύκλωμα αντιστροφών της Εικόνας.
 - Το V_{O1} είναι η τάση εξόδου του οδηγού, ενώ το V_{I2} είναι η τάση εισόδου του δέκτη
 - Και οι δύο αντιστροφείς έχουν $V_{DD} = 5V$, $V_{IL} = 1,35V$, $V_{IH} = 3,15V$, $V_{OL} = 0,33V$ και $V_{OH} = 3,84V$.
 - Ποια είναι τα περιθώρια θορύβου για το χαμηλό και το υψηλό λογικό επίπεδο του αντιστροφέα;
 - Μπορεί το κύκλωμα να ανέχεται 1 V θορύβου μεταξύ των V_{O1} και V_{I2} ;
- Τα περιθώρια θορύβου του αντιστροφέα είναι τα εξής:
 - $NM_L = V_{IL} - V_{OL} = 1,35V - 0,33V = 1,02V$
 - $NM_H = V_{OH} - V_{IH} = 3,84V - 3,15V = 0,69V$
 - Το κύκλωμα μπορεί να ανεχθεί 1V θορύβου όταν η έξοδος είναι LOW ($NM_L = 1,02V$), αλλά **όχι** όταν η έξοδος είναι HIGH ($NM_H = 0,69V$).
 - Εάν $V_{O1} = V_{OH} = 3,84V$, τότε εξαιτίας του θορύβου $V_{I2} = 3,84V - 1V = 2,84V < V_{IH} = 3,15V$, άρα ο δέκτης ενδέχεται να μην ανιχνεύσει μια σωστή είσοδο HIGH, αλλά μία λανθασμένη είσοδο LOW

Λογικές οικογένειες

- Από το 1970 μέχρι και το 1990 υπήρχαν τέσσερις λογικές οικογένειες που κυριάρχησαν στην αγορά
 - Λογική τρανζίστορ-τρανζίστορ (*Transistor-Transistor Logic, TTL*)
 - Λογική συμπληρωματικού ημιαγωγού οξειδίου μετάλλου (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Logic, CMOS*)
 - Λογική TTL χαμηλής τάσης (*Low Voltage TTL Logic, LVTTTL*)
 - Λογική CMOS χαμηλής τάσης (*Low Voltage CMOS Logic, LVCMOS*).

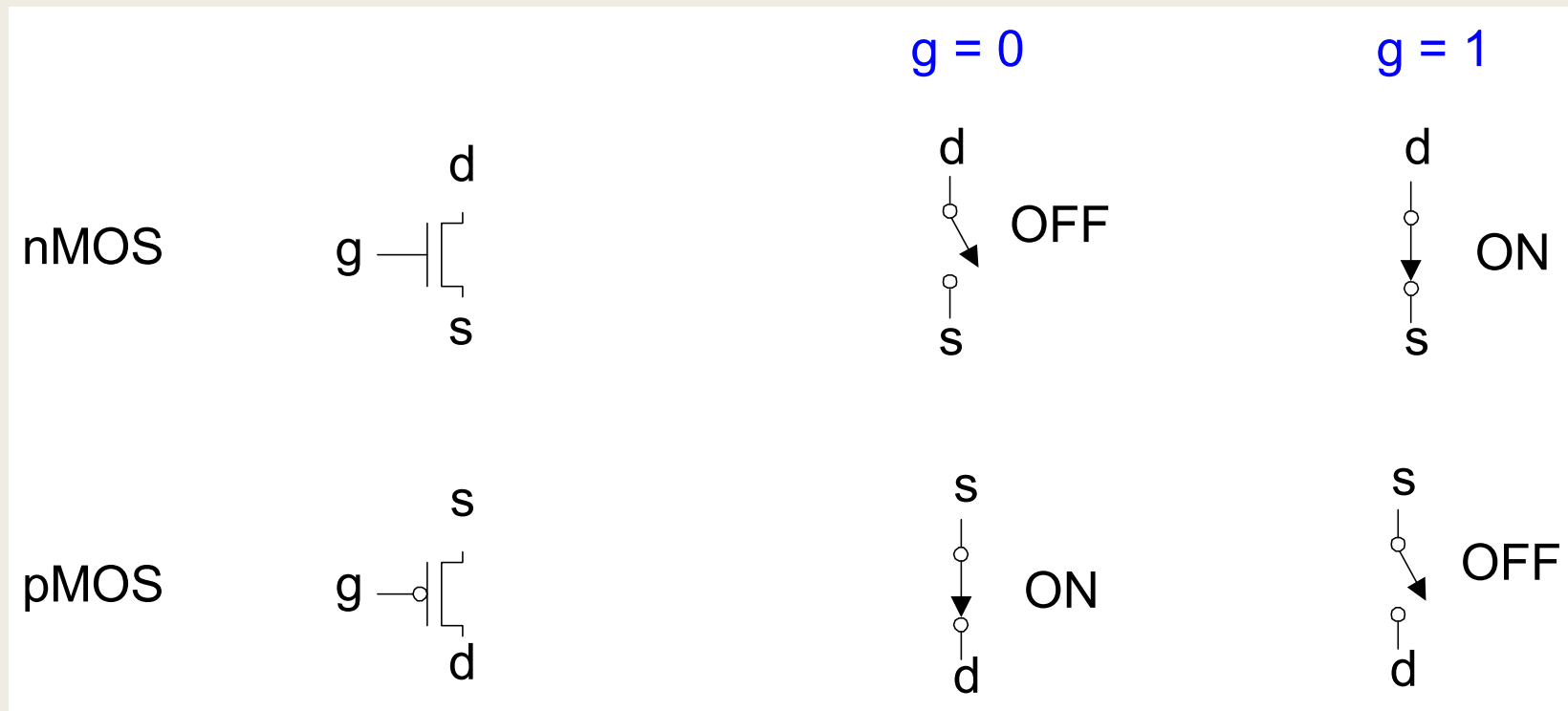
Λογική οικογένεια	V_{DD}	V_{IL}	V_{IH}	V_{OL}	V_{OH}
TTL	5(4.75-5.25)	0.8	2.0	0.4	2.4
CMOS	5(4.5-6)	1.35	3.15	0.33	3.84
LVTTTL	3.3(3-3.6)	0.8	2.0	0.4	2.4
LVCMOS	3.3(3-3.6)	0.9	1.8	0.36	2.7

Τρανζίστορ

- Οι πρώτοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρησιμοποιούσαν ηλεκτρονόμους ή λυχνίες κενού.
- Οι σύγχρονοι υπολογιστές χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς διακόπτες οι οποίοι είναι επίσης γνώστοί σαν τρανζίστορ
 - *Τρανζίστορ διπολικής επαφής*
 - *Τρανζίστορ φαινομένου πεδίου ημιαγωγών μετάλλου οξειδίου (MOSFET)*
- Τα τρανζίστορ MOSFET χρησιμοποιούνται σαν δομικά στοιχεία σχεδόν σε όλα τα ψηφιακά συστήματα.

Τρανζίστορ MOSFET ως διακόπτης

- Οι λογικές πύλες κατασκευάζονται από τρανζίστορ φαινομένου πεδίου ημιαγωγών μετάλλου οξειδίου (MOSFET) που λειτουργούν ως διακόπτες
- Υπάρχουν δύο είδη τρανζίστορ MOSFET: nMOS και pMOS
 - Η τάση στην **πύλη (gate)** ρυθμίζει τη ροή του ρεύματος μεταξύ της **πηγής (source)** και της **υποδοχής (drain)**

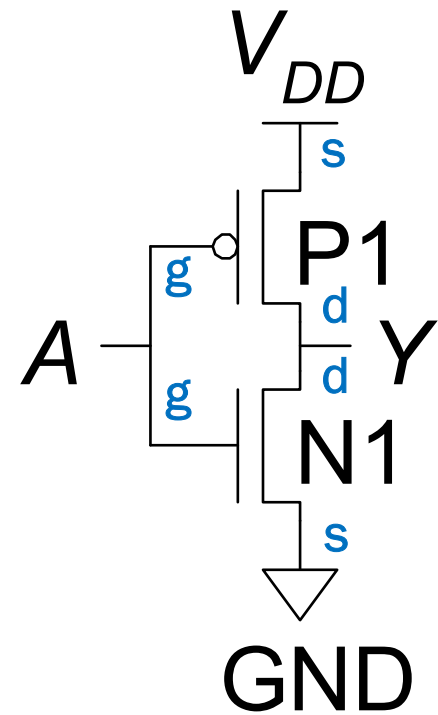


Λειτουργία τρανζίστορ MOSFET

- Το τρανζίστορ nMOS
 - *δεν άγει (είναι OFF) όταν η πύλη (gate) είναι '0'*
(έχει σαν τάση αντίστοιχη της λογικής τιμής '0')
 - *άγει (είναι ON) όταν η πύλη (gate) είναι '1'*
(έχει σαν τάση αντίστοιχη της λογικής τιμής '1')
- Το τρανζίστορ pMOS
 - *δεν άγει (είναι OFF) όταν η πύλη είναι '1'*
 - *άγει (είναι ON) όταν η πύλη είναι '0'*
- Όταν το τρανζίστορ δεν άγει (είναι OFF) έχει πολύ μεγάλη αντίσταση αλλά όχι άπειρη
 - *Υπάρχει ένα μικρό ρεύμα διαρροής I_{DD}*
- Όταν το τρανζίστορ άγει (είναι ON) μεταφέρει «καλά» από την πηγή (source) στην υποδοχή (drain)
 - *εάν είναι nMOS το '0', συνεπώς συνδέεται η πηγή (s) στο GND*
 - *εάν είναι pMOS το '1', συνεπώς συνδέεται η πηγή (s) στο V_{DD}*

Πύλη NOT σε τεχνολογία CMOS

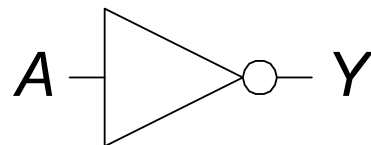
- Στην τεχνολογία **CMOS (complementary MOS)** χρησιμοποιούνται **μαζί** και τα δύο είδη τρανζίστορ MOSFET, δηλαδή **nMOS και pMOS**
- Πώς δημιουργείται μία **πύλη NOT** σε τεχνολογία CMOS;
- Σχηματικό διάγραμμα:
 - Στο τρανζίστορ nMOS (N1) συνδέεται η πηγή (s) στο GND (τρίγωνο)
 - Στο τρανζίστορ pMOS (P1) συνδέεται η πηγή (s) στο V_{DD} (γραμμή)
 - Οι πύλες (g) των N1 και P1 συνδέονται στην είσοδο A
 - Οι υποδοχές (d) των N1 και P1 συνδέονται στην έξοδο Y



CMOS Πύλη NOT

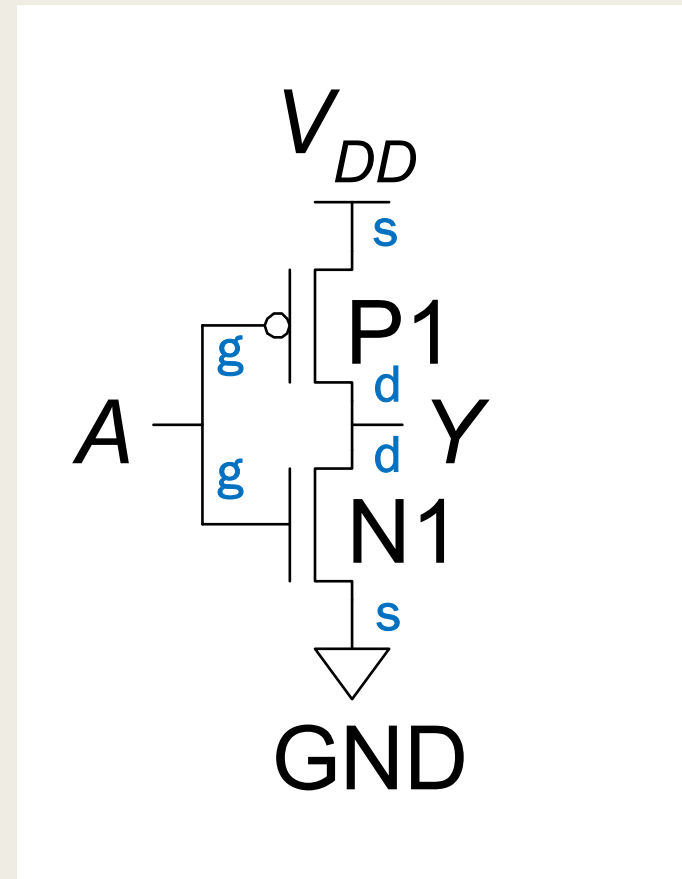
A	P1	N1	Y
0	ON	OFF	1
1	OFF	ON	0

NOT

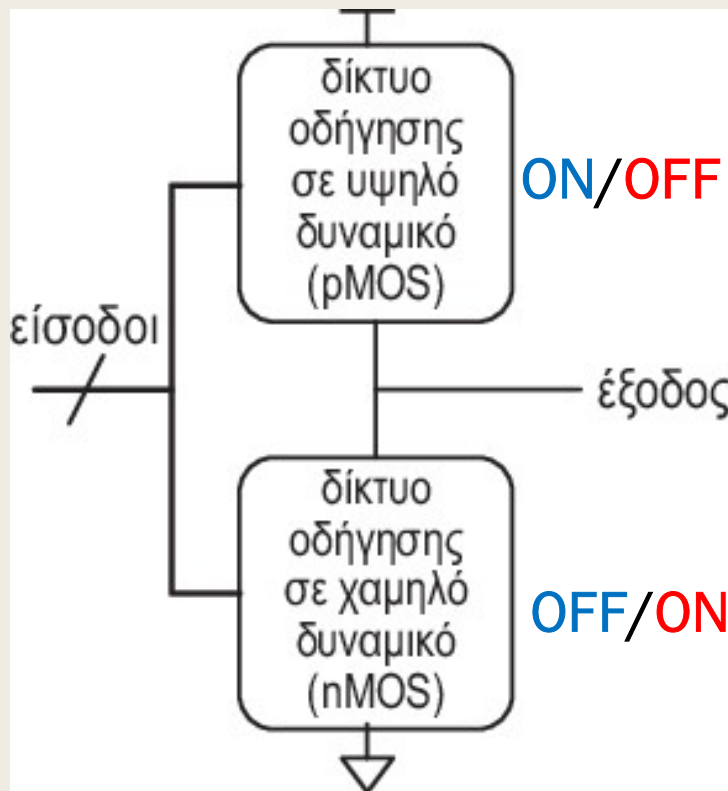


$$Y = \overline{A}$$

A	Y
0	1
1	0



Γενική μορφή λογικής πύλης CMOS



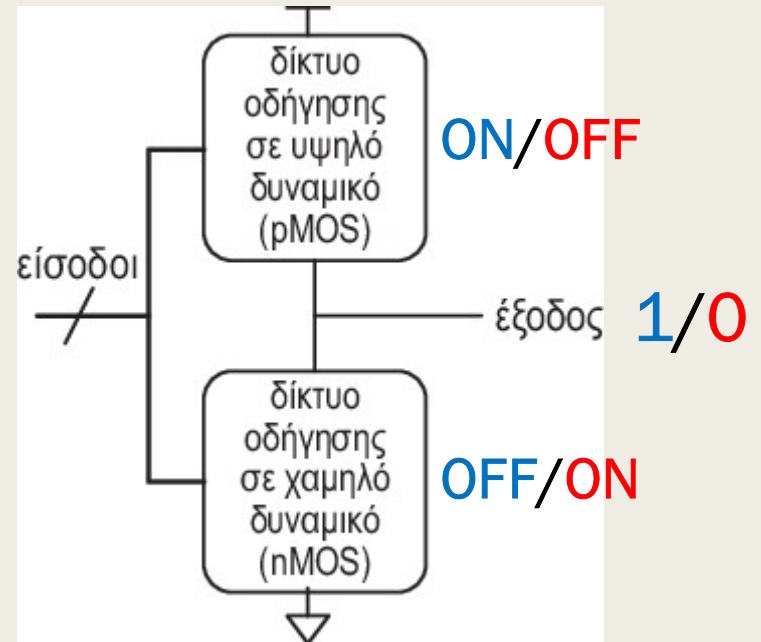
Δίκτυο οδήγησης της εξόδου σε υψηλό δυναμικό (ώστε όταν είναι ON να είναι η έξοδος '1') με τρανζίστορ pMOS. Το δίκτυο pMOS τοποθετείται ανάμεσα στην τάση V_{DD} και την έξοδο

Δίκτυο οδήγησης της εξόδου σε χαμηλό δυναμικό (ώστε όταν είναι ON να είναι η έξοδος '0') με τρανζίστορ nMOS. Το δίκτυο nMOS τοποθετείται ανάμεσα στην έξοδο και την τάση 0V (GND)

- Τα δίκτυα αποτελούνται από τρανζίστορ συνδεδεμένα παράλληλα ή σε σειρά.
 - Όταν τα τρανζίστορ είναι συνδεδεμένα παράλληλα, το δίκτυο είναι ON αν οποιοδήποτε από τα τρανζίστορ είναι ON.
 - Όταν τα τρανζίστορ είναι συνδεδεμένα σε σειρά, το δίκτυο είναι ON μόνο αν όλα τα τρανζίστορ είναι ON.

Γενική μορφή λογικής πύλης CMOS

- Σε μια CMOS πύλη που λειτουργεί σωστά σε κάθε δεδομένη στιγμή, το ένα από τα δύο δίκτυα πρέπει να είναι ON και το άλλο OFF, έτσι ώστε η έξοδος να μην βραχυκυκλώνει ή να παραμένει μετέωρη.



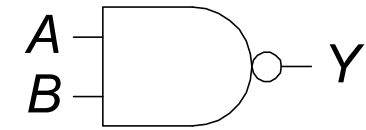
- Κανόνας των **συμπληρωμάτων αγωγιμότητας**
 - Όταν τα τρανζίστορ nMOS είναι συνδεδεμένα σε **σειρά (πράξη AND)**, τα τρανζίστορ pMOS πρέπει να είναι συνδεδεμένα παράλληλα
 - Όταν τα τρανζίστορ nMOS είναι συνδεδεμένα **παράλληλα (πράξη OR)**, τα τρανζίστορ pMOS πρέπει να είναι συνδεδεμένα σε σειρά.
- Ξεκινάμε τη σχεδίαση πάντα από το δίκτυο nMOS υλοποιώντας τις απαιτούμενες πράξεις AND και OR
 - Η έξοδος πάντα αντιστρέφεται (πράξη NOT) εκ κατασκευής

CMOS πύλη NAND-2

- Σχηματικό διάγραμμα:
 - Στο δίκτυο nMOS τα 2 τρανζίστορ συνδέονται στη σειρά, ώστε να γίνει η πράξη AND
 - Στο δίκτυο pMOS τα 2 τρανζίστορ συνδέονται παράλληλα, λόγω του κανόνα των συμπληρωμάτων αγωγιμότητας

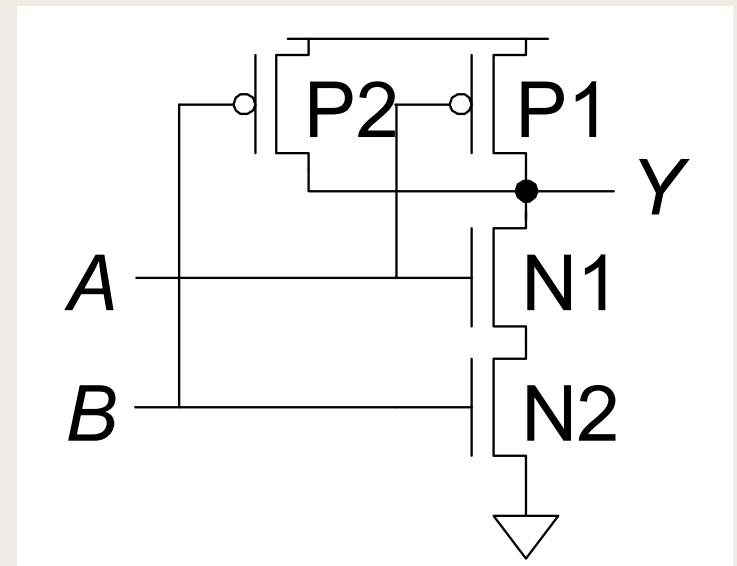
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>Y</i>
0	0	ON	ON	OFF	OFF	1
0	1	ON	OFF	OFF	ON	1
1	0	OFF	ON	ON	OFF	1
1	1	OFF	OFF	ON	ON	0

NAND



$$Y = \overline{AB}$$

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>Y</i>
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



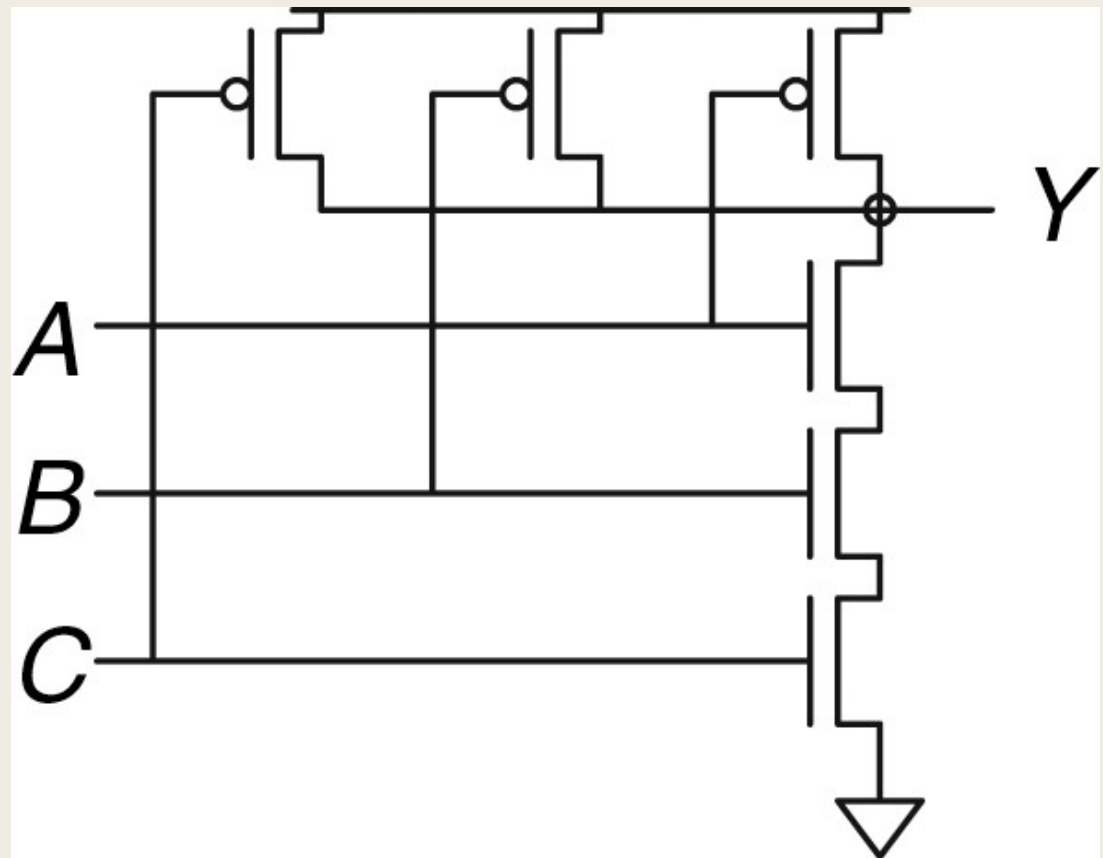
CMOS πύλη NAND-3*

- Σχηματικό διάγραμμα:

- Στο δίκτυο *nMOS* τα 3 τρανζίστορ συνδέονται στη σειρά (πράξη *AND*)
- Στο δίκτυο *pMOS* τα 3 τρανζίστορ συνδέονται παράλληλα

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

*Παράδειγμα 1.20



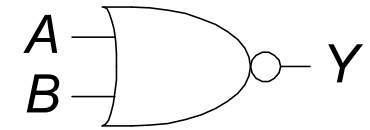
CMOS πύλη NOR-2*

- Σχηματικό διάγραμμα:
 - Στο δίκτυο nMOS τα 2 τρανζίστορ συνδέονται παράλληλα, ώστε να γίνει η πράξη OR
 - Στο δίκτυο pMOS τα 2 τρανζίστορ συνδέονται σε σειρά, λόγω του κανόνα των συμπληρωμάτων αγωγιμότητας

A	B	P1	P2	N1	N2	Y
0	0	ON	ON	OFF	OFF	1
0	1	ON	OFF	OFF	ON	0
1	0	OFF	ON	ON	OFF	0
1	1	OFF	OFF	ON	ON	0

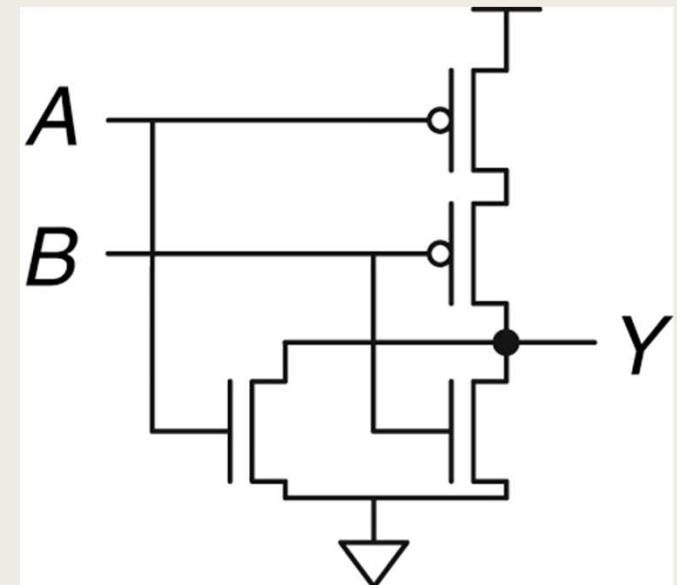
*Παράδειγμα 1.21

NOR



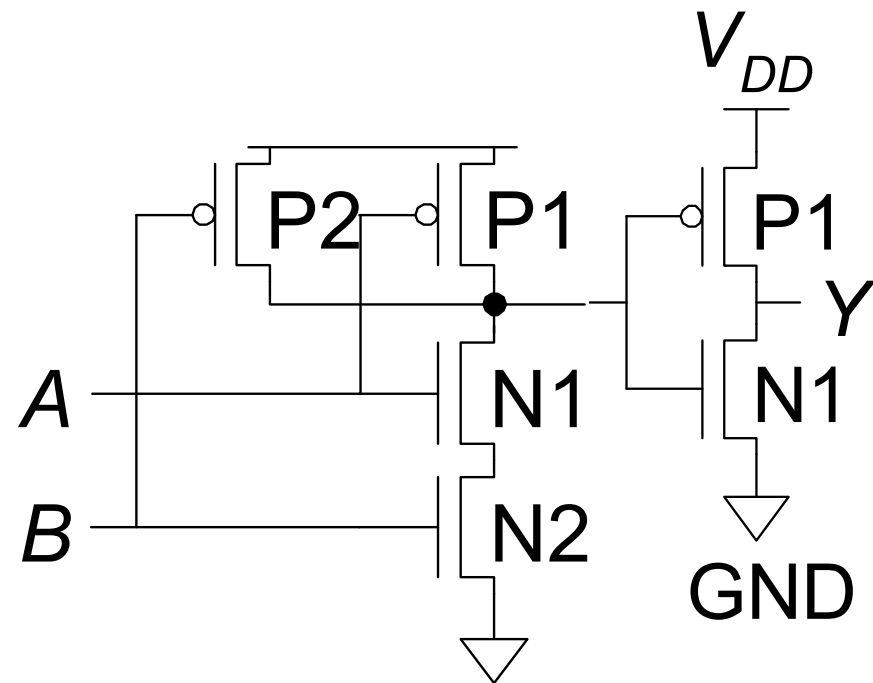
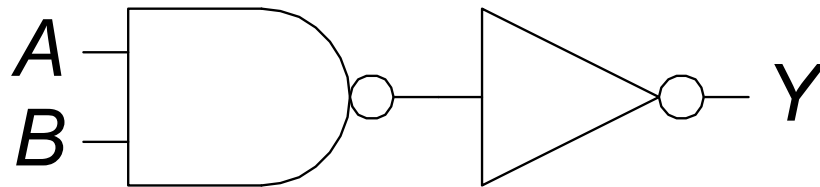
$$Y = \overline{A + B}$$

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



CMOS Πύλη AND-2*

- Πώς θα κατασκευάσετε μια πύλη AND?



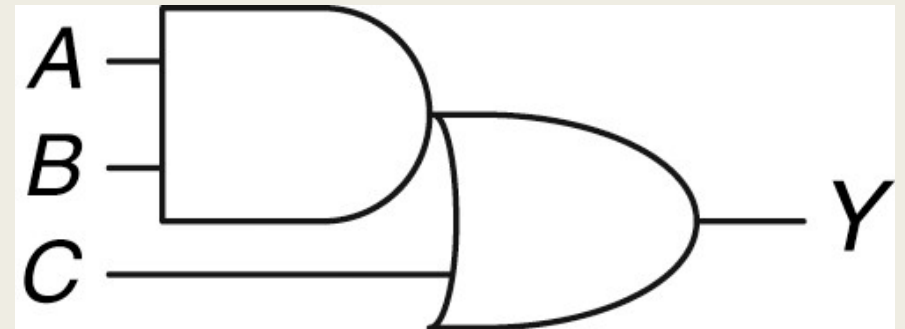
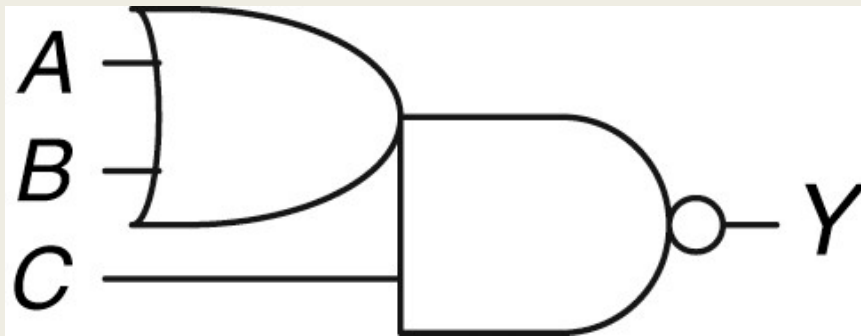
*Παράδειγμα 1.22

Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.84

Σχεδιάστε ένα σχηματικό διάγραμμα για τις ακόλουθες πύλες CMOS. Χρησιμοποιήστε τον ελάχιστο δυνατό αριθμό τρανζίστορ.

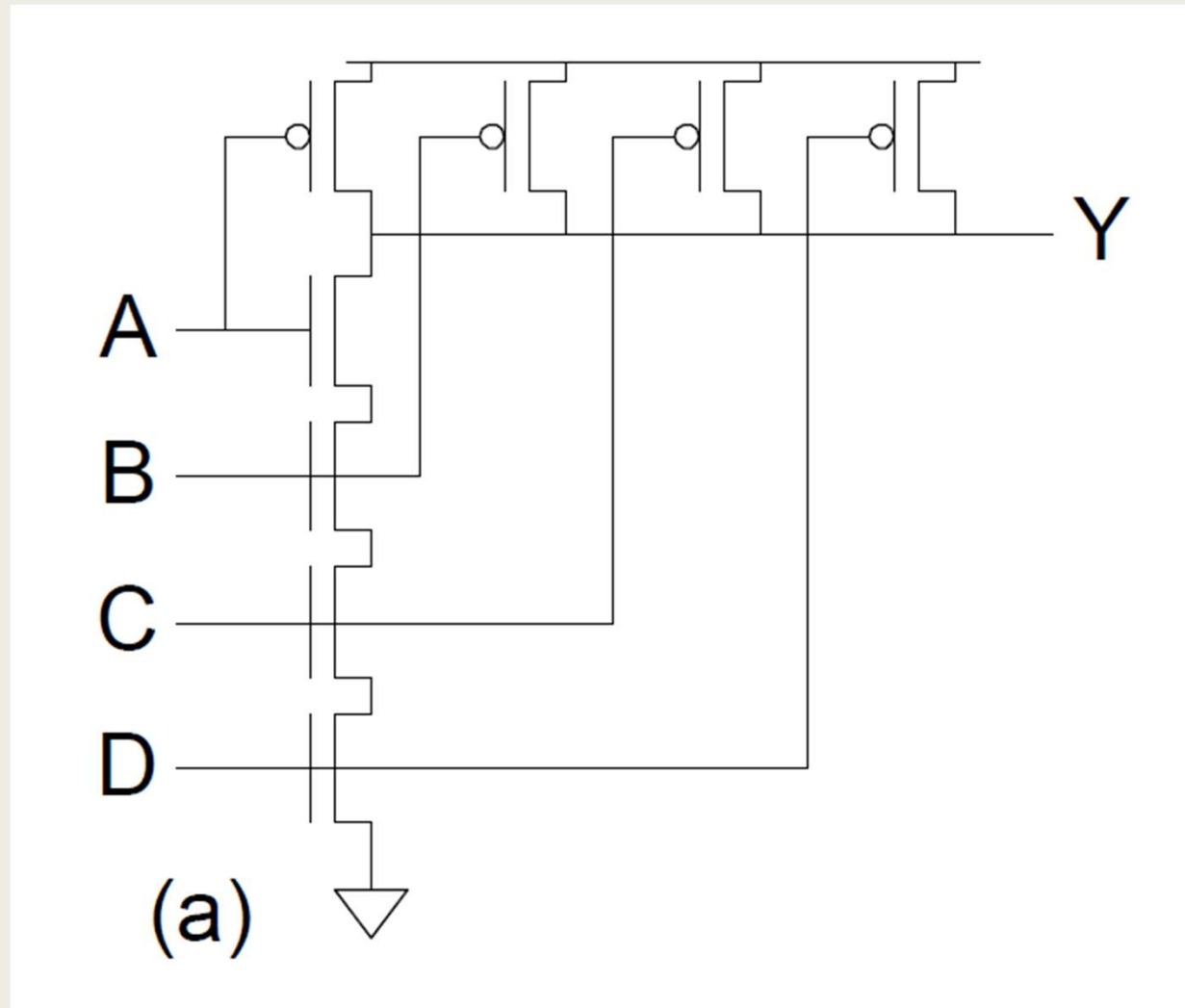
- (α) Πύλη NAND-4 με τέσσερις εισόδους
- (β) Πύλη OR-AND-INVERT με τρεις εισόδους
- (γ) Πύλη AND-OR με τρεις εισόδους



■ Άσκηση 1.84

Σχεδιάστε ένα σχηματικό διάγραμμα για τις ακόλουθες πύλες CMOS. Χρησιμοποιήστε τον ελάχιστο δυνατό αριθμό τρανζίστορ.

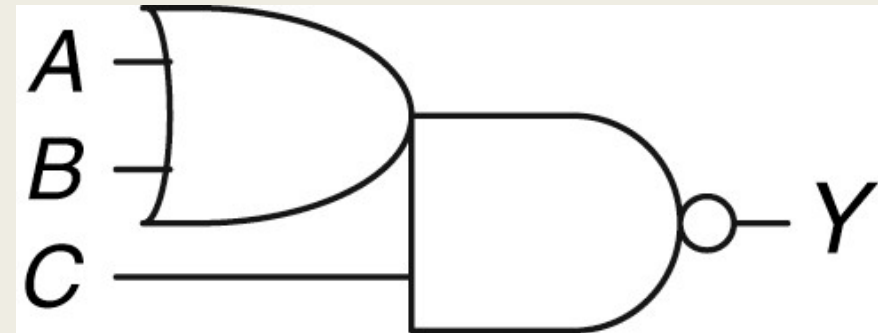
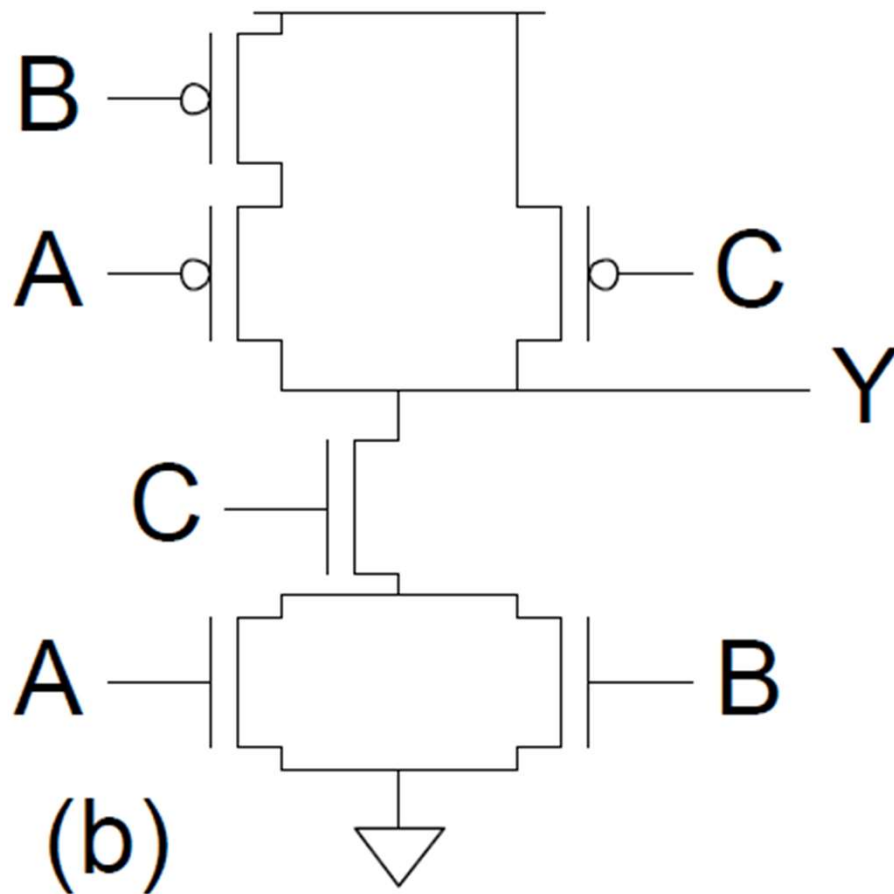
- (α) Πύλη NAND-4 με τέσσερις εισόδους



■ Άσκηση 1.84

Σχεδιάστε ένα σχηματικό διάγραμμα για τις ακόλουθες πύλες CMOS. Χρησιμοποιήστε τον ελάχιστο δυνατό αριθμό τρανζίστορ.

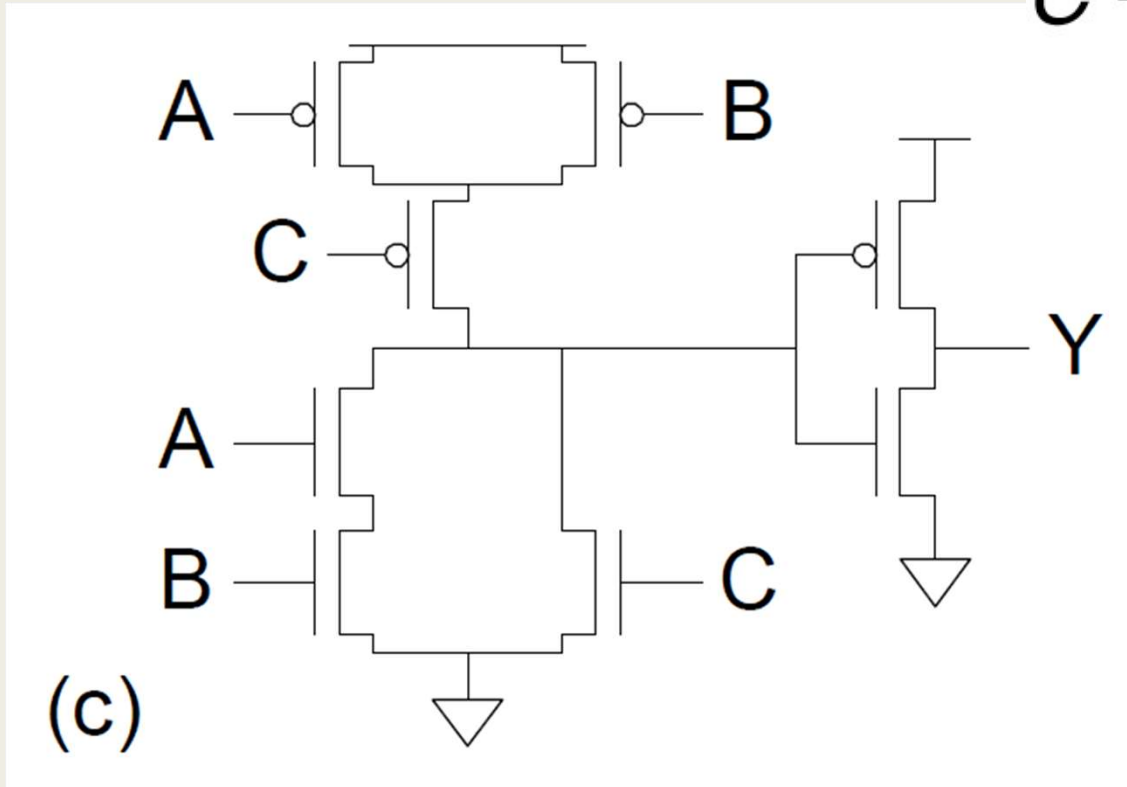
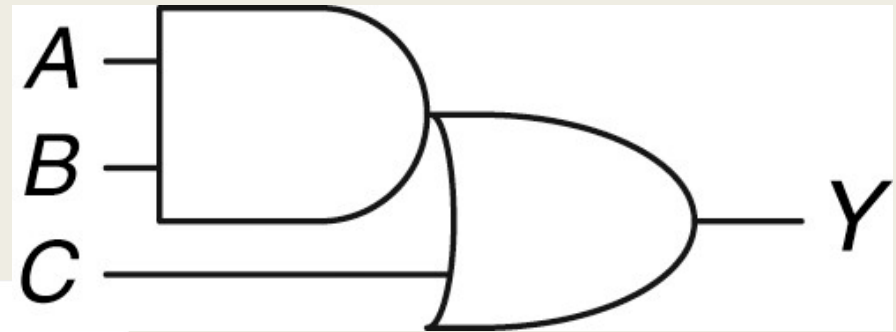
- (β) Πύλη OR-AND-INVERT με τρεις εισόδους



■ Άσκηση 1.84

Σχεδιάστε ένα σχηματικό διάγραμμα για τις ακόλουθες πύλες CMOS. Χρησιμοποιήστε τον ελάχιστο δυνατό αριθμό τρανζίστορ.

- (γ) Πύλη AND-OR με τρεις εισόδους

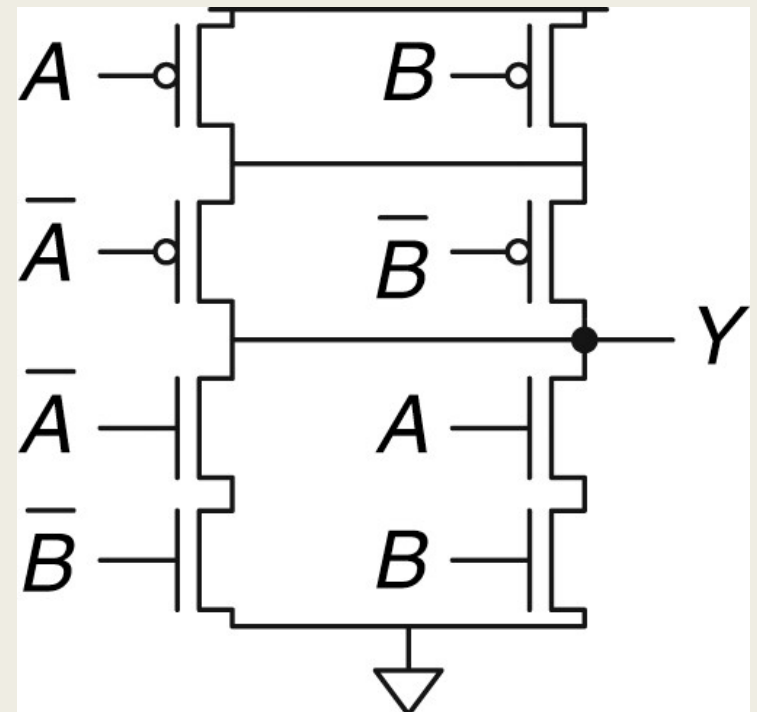


Επιλεγμένες ασκήσεις

■ Άσκηση 1.87

- Συμπληρώστε τον πίνακα αληθείας για τη συνάρτηση που εκτελείται από την πύλη της Εικόνας
- Ο πίνακας θα πρέπει να έχει δύο εισόδους, τα A και B .
- Ποιο είναι το όνομα της συνάρτησης;

A	B	Y
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	



Κατανάλωση Ισχύος

- Η ποσότητα της ενέργειας που καταναλώνεται ανά μονάδα χρόνου λέγεται **κατανάλωση ισχύος**
- Τα ψηφιακά συστήματα καταναλώνουν **δυναμική** και **στατική** ισχύς
 - **Δυναμική ισχύς:** η κατανάλωση ισχύος καθώς τα σήματα μεταβάλλονται μεταξύ του 0 και 1

$$P_{\text{dynamic}} = \frac{1}{2} C V_{DD}^2 f$$

όπου C η μέση χωρητικότητα, V_{DD} η τάση τροφοδοσίας και f η συχνότητα λειτουργίας του τσιπ

- **Στατική ισχύς:** η κατανάλωση ισχύος όταν τα τρανζίστορ είναι OFF λόγω του **ρεύματος διαρροής I_{DD}** στο τσιπ

$$P_{\text{static}} = I_{DD} V_{DD}$$

Παράδειγμα 1.23

- Ένα κινητό τηλέφωνο διαθέτει μπαταρία των 6 watt-hour (W-hr) και λειτουργεί στα 1,2 V
- Υποθέστε ότι, όταν το κινητό τηλέφωνο βρίσκεται σε χρήση, λειτουργεί στα 300 MHz, η μέση ποσότητα χωρητικότητας στο τσιπ η οποία εναλλάσσεται σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή είναι ίση με 10 nF (10^{-8} Farad) και εκπέμπει επίσης 3 W ισχύος από την κεραία του.
- Όταν το τηλέφωνο δεν βρίσκεται σε χρήση, η δυναμική ενέργεια μειώνεται σχεδόν στο μηδέν επειδή είναι απενεργοποιημένη η επεξεργασία του σήματος. Όμως, το τηλέφωνο αντλεί 40 mA του ρεύματος ηρεμίας ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιείται ή όχι.
- Υπολογίστε τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του τηλεφώνου (α) αν δεν χρησιμοποιείται, και (β) αν χρησιμοποιείται συνεχώς.

Παράδειγμα 1.23 (Λύση)

- Η στατική ισχύς είναι $P_{\text{static}} = (40 \text{ mA})(1,2 \text{ V}) = 48 \text{ mW}$.
- (α) Αν το τηλέφωνο δεν χρησιμοποιείται, τότε αυτή είναι και η μόνη κατανάλωση ισχύος, άρα η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι $(6 \text{ Whr}) / (0,048 \text{ W}) = 125 \text{ ώρες}$ (περίπου 5 μέρες).
- Η δυναμική ισχύς είναι $P_{\text{dynamic}} = (0,5)(10^{-8} \text{ F})(1,2 \text{ V})^2(3 \times 10^8 \text{ Hz}) = 2,16 \text{ W}$.
- (β) Αν το τηλέφωνο χρησιμοποιείται, τότε η συνολική ενεργή ισχύς που καταναλώνεται (η δυναμική ισχύς μαζί με τη στατική ισχύ και την ισχύ εκπομπής) είναι $2,16 \text{ W} + 0,048 \text{ W} + 3 \text{ W} = 5,2 \text{ W}$
- Άρα η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι $6 \text{ W-hr} / 5,2 \text{ W} = 1,15 \text{ ώρες}$.