Κ03 - Λογική Σχεδίαση
Δεύτερο Εξάμηνο Φοίτησης

Άλγεβρα Boole, λογικές συναρτήσεις και κυκλώματα

Γεώργιος Χ. Αλεξανδρόπουλος
Λέκτορας Π.Δ. 407/80
e-mail: alexandg@uop.gr
URL: http://users.iit.demokritos.gr/~alexandg

Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών

Περιεχόμενα

Εισαγωγή

- Η δυαδική λογική χρησιμοποιείται στα ψηφιακά συστήματα
- Το κόστος των ψηφιακών συστημάτων αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό τους
- Η μείωση του κόστους σχεδίασης κι υλοποίησης επιτυγχάνεται με την εξεύρεση λειτουργικά ισοδύναμων, απλούστερων κι οικονομικότερων υλοποιήσεων
- Οι μέθοδοι απλοποίησης ψηφιακών κυκλωμάτων βασίζονται στην άλγεβρα Boole

Άλγεβρα Boole

- Το 1854 ο G. Boole αναπτύσσει το αλγεβρικό σύστημα και το 1938 ο C. E. Shannon παρουσιάζει την άλγεβρα διακοπτών
- Ο αυστηρός ορισμός της άλγεβρας επιτυγχάνεται με τα αξιώματα που διατύπωσε ο E. V. Huntington το 1904
- Η άλγεβρα Boole είναι μια αλγεβρική δομή, η οποία ορίζεται σε ένα σύνολο στοιχείων B, με τους δύο δυαδικούς τελεστές $+$ και $\cdot$, έτσι ώστε:

Αξιώματα Huntington

1. Κλειστότητα ως προς $+$ και $\cdot$, δηλαδή $\forall x, y \in B$: $x + y \in B$, $x \cdot y \in B$
2. $0 \rightarrow$ ουδέτερο στοιχείο ως προς $+$: $x + 0 = 0 + x = x$
   $1 \rightarrow$ ουδέτερο στοιχείο ως προς $\cdot$: $x \cdot 1 = 1 \cdot x = x$
3. Οι πράξεις $+$ και $\cdot$ είναι αντιμεταθετικές:
   $x + y = y + x$ και $x \cdot y = y \cdot x$
4. Η πράξη $\cdot$ είναι επιμεριστική ως προς την $+$, δηλαδή:
   $x \cdot (y + z) = (x \cdot y) + (x \cdot z)$
   Η πράξη $+$ είναι επιμεριστική ως προς την $\cdot$, δηλαδή:
   $x + (y \cdot z) = (x + y) \cdot (x + z)$
5. $\forall x \in B \; \exists x' \in B$ ώστε: $x + x' = 1$ και $x \cdot x' = 0$
6. $\exists$ τουλάχιστον δύο $x, y \in B : x \neq y$

Αξιώματα Huntington

Διαφορές με αριθμητική και συμβατική άλγεβρα:

- Δεν υπάρχει ο προσεταιριστικός κανόνας *αν κι αποδεικνύεται*
- Ο επιμεριστικός κανόνας $x + (y \cdot z) = (x + y) \cdot (x + z)$ υπάρχει μόνο στην άλγεβρα Boole
- Δεν υπάρχουν αντίστροφες πράξεις των $+$ και $\cdot$
- Ο τελεστής συμπληρώματος δεν υπάρχει στη συμβατική άλγεβρα
- Η δίτιμη άλγεβρα Boole ορίζεται στο σύνολο $B = \{0, 1\}$

Αξιώματα Huntington

Απόδειξη της επιμεριστικής ιδιότητας ως προς την $\cdot$ με τη βοήθεια πινάκων αληθείας:

x	y	z	$y \cdot z$	$x + (y \cdot z)$	$x + y$	$x + z$	$(x + y) \cdot (x + z)$
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	1
1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

Αξιώματα και Θεωρήματα της Άλγεβρας Boole

Δυϊσμός: Κάθε αλγεβρική έκφραση που συνάγεται με βάση τα αξιώματα της άλγεβρας Boole παραμένει σε ισχύ εάν οι τελεστές και τα ουδέτερα στοιχεία εναλλαχθούν

Παραδείγματα:

- $x + 0 = x \leftrightarrow x \cdot 1 = x$
- $x + x' = 1 \leftrightarrow x \cdot x' = 0$

Αξιώματα και Θεωρήματα της Άλγεβρας Boole

	Πολλαπλασιασμός	Πρόσθεση	
Αξίωμα	$x \cdot 1 = x$	$x + 0 = x$	
Αξίωμα	$x \cdot \overline{x} = 0$	$x + \overline{x} = 1$	
Θεώρημα	$x \cdot x = x$	$x + x = x$	
Θεώρημα	$x \cdot 0 = 0$	$x + 1 = 1$	
Θεώρημα (διπλή άρνηση)			$\overline{\overline{x}} = x$
Αξίωμα (αντιμεταθετική)	$x \cdot y = y \cdot x$	$x + y = y + x$	
Θεώρημα (προσεταιριστική)	$x \cdot (y \cdot z) = (y \cdot x) \cdot z$	$x + (y + z) = (y + x) + z$	
Αξίωμα (επιμεριστική)	$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$	$x + (y \cdot z) = (x + y) \cdot (x + z)$	
Θεώρημα (DeMorgan)	$\overline{x \cdot y} = \overline{x} + \overline{y}$	$\overline{x + y} = \overline{x} \cdot \overline{y}$	
Θεώρημα (απορρόφηση)	$x \cdot (x + y) = x$	$x + x \cdot y = x$	

(α' ή $\overline{\alpha}$: συμπλήρωμα του α)

Προτεραιότητα Τελεστών

Για εκφράσεις της άλγεβρας Boole:

Προτεραιότητα 1: (,), [,], {, }

Προτεραιότητα 2: Πράξη ΌΧΙ (NOT)

Προτεραιότητα 3: Πράξη ΚΑΙ (AND), «·»

Προτεραιότητα 4: Πράξη Ή (OR), «+»

Συναρτήσεις Boole

- Έστω οι μεταβλητές $x_1, x_2, \ldots, x_n \in \{0, 1\}$, τότε μια λογική συνάρτηση ή συνάρτηση Boole συμβολίζεται ως:

$$f = f\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right) \in \{0, 1\}$$

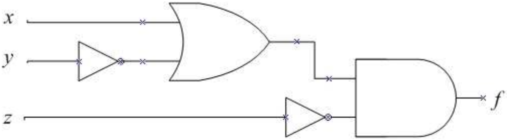
- Κάθε συνάρτηση Boole μπορεί να παρασταθεί από ένα μοναδικό πίνακα αληθείας
- Κάθε συνάρτηση Boole μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα λογικό κύκλωμα
- Ωστόσο, η αλγεβρική μορφή μιας συνάρτησης Boole μπορεί να αναπαρασταθεί με λογικές πύλες με παραπάνω από έναν τρόπους!!

Συναρτήσεις Boole

$$f = (x + y')z'$$

- Πίνακας αληθείας της f από όλους τους συνδυασμούς τιμών των x, y και z
- Η f περιέχει ένα OR κι ένα AND
- Η f υλοποιείται από το ακόλουθο λογικό κύκλωμα:

x	y	z	f
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0



Απλοποίηση Συνάρτησης Boole

Σκοπός Σχεδιαστών Ψηφιακών Συστημάτων

Μείωση πολυπλοκότητας κι αριθμού πυλών σε ένα λογικό κύκλωμα $\Rightarrow$ Μείωση κόστους ψηφιακών συστημάτων

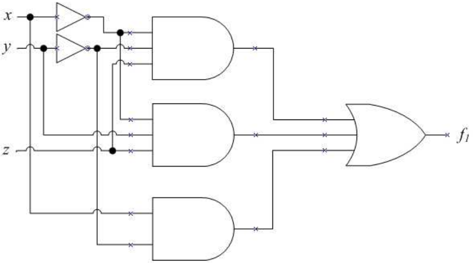
Δεδομένης μιας έκφρασης μιας συνάρτησης Boole, χρησιμοποιώ κανόνες της άλγεβρας Boole προσπαθώντας να καταλήξω σε απλούστερες εκφράσεις για τη συνάρτηση

Παράδειγμα Απλοποίησης Συνάρτησης Boole

Έστω η $f_1 = x'y'z + x'yz + xy'$

- Πίνακας αληθείας της f από όλους τους συνδυασμούς τιμών των x, y και z
- Η f_1 περιέχει ένα OR και δύο AND τριών εισόδων και μια AND δύο εισόδων
- Η f_1 υλοποιείται από το ακόλουθο λογικό κύκλωμα:

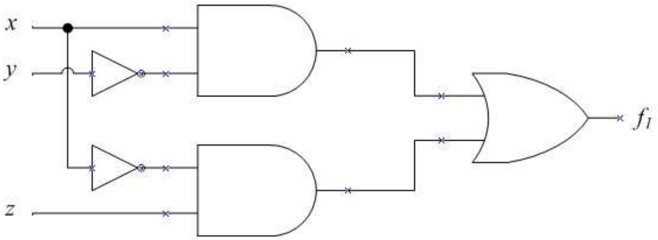
x	y	z	f_1
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	0



Παράδειγμα Απλοποίησης Συνάρτησης Boole

$$
\begin{aligned}
f_1 &= x'y'z + x'yz + xy' \\
&= x'z(y' + y) + xy' \\
&= x'z + xy'
\end{aligned}
$$

Η f_1 περιέχει περιέχει *πλέον* ένα OR και δύο AND δύο εισόδων



Ελαχιστόροι και Μεγιστόροι Συνάρτησης

- **Ελαχιστόρος συνάρτησης (*πρότυπο γινόμενο*)**: το λογικό γινόμενο κάθε δυνατού συνδυασμού όλων των μεταβλητών εισόδου της συνάρτησης ή/και των συμπληρωμάτων τους,
  πχ για δύο μεταβλητές εισόδου x και y οι ελαχιστόροι είναι οι $x'y'$, $x'y$, xy' και xy
- **Μεγιστόρος συνάρτησης (*πρότυπο άθροισμα*)**: το λογικό άθροισμα κάθε δυνατού συνδυασμού όλων των μεταβλητών εισόδου της συνάρτησης ή/και των συμπληρωμάτων τους,
  πχ για δύο μεταβλητές εισόδου x και y οι ελαχιστόροι είναι οι $x' + y'$, $x' + y$, $x + y'$ και $x + y$
- Για n μεταβλητές εισόδου το πλήθος των ελαχιστόρων και των μεγιστόρων είναι 2^n
- **Κανονική μορφή λογικής συνάρτησης**: όταν είναι εκφρασμένη σε άθροισμα ελαχιστόρων ή γινόμενο μεγιστόρων

Ελαχιστόροι και Μεγιστόροι Συνάρτησης

Έστω συνάρτηση n μεταβλητών. Τοποθετώ κατά αύξουσα σειρά κάτω από τις n μεταβλητές τους n-bit 2-δικούς αριθμούς από 0 έως $2^n - 1$. Δίπλα σε κάθε 2-δικό αριθμό, τοποθετώ:

Ελαχιστόροι m_j, $j = 0, 1, \ldots, 2^n - 1$

- Το γινόμενο όλων των n μεταβλητών με κάθε μεταβλητή συμπληρωμένη αν το αντίστοιχο bit του 2-δικού αριθμού είναι 0 και μη συμπληρωμένη εάν αυτό είναι 1
- Κάθε γινόμενο αποτελεί το m_j με το j να είναι η αναπαράσταση στο 10-δικό του 2-δικού αριθμού που αντιστοιχεί στον ελαχιστόρο

Μεγιστόροι M_j, $j = 0, 1, \ldots, 2^n - 1$

- Το άθροισμα όλων των n μεταβλητών με κάθε μεταβλητή συμπληρωμένη αν το αντίστοιχο bit του 2-δικού αριθμού είναι 1 και μη συμπληρωμένη εάν αυτό είναι 0
- Κάθε άθροισμα αποτελεί το M_j με το j να είναι η αναπαράσταση στο 10-δικό του 2-δικού αριθμού που αντιστοιχεί στον μεγιστόρο

Ελαχιστόροι και Μεγιστόροι Συνάρτησης

$n = 2$

x y	Min	Ονομασία	Max	Ονομασία
0 0	$\overline{x}\cdot\overline{y}$	m_0	$x+y$	M_0
0 1	$\overline{x}\cdot y$	m_1	$x+\overline{y}$	M_1
1 0	$x\cdot\overline{y}$	m_2	$\overline{x}+y$	M_2
1 1	$x\cdot y$	m_3	$\overline{x}+\overline{y}$	M_3

$n = 3$

x y z	Min	Ονομασία	Max	Ονομασία
0 0 0	$\overline{x}\cdot\overline{y}\cdot\overline{z}$	m_0	$x+y+z$	M_0
0 0 1	$\overline{x}\cdot\overline{y}\cdot z$	m_1	$x+y+\overline{z}$	M_1
0 1 0	$\overline{x}\cdot y\cdot\overline{z}$	m_2	$x+\overline{y}+z$	M_2
0 1 1	$\overline{x}\cdot y\cdot z$	m_3	$x+\overline{y}+\overline{z}$	M_3
1 0 0	$x\cdot\overline{y}\cdot\overline{z}$	m_4	$\overline{x}+y+z$	M_4
1 0 1	$x\cdot\overline{y}\cdot z$	m_5	$\overline{x}+y+\overline{z}$	M_5
1 1 0	$x\cdot y\cdot\overline{z}$	m_6	$\overline{x}+\overline{y}+z$	M_6
1 1 1	$x\cdot y\cdot z$	m_7	$\overline{x}+\overline{y}+\overline{z}$	M_7

Κανονική Μορφή Συνάρτησης

Έστω ο πίνακας αληθείας μιας λογικής συνάρτησης, τότε η συνάρτηση αυτή δύναται να εκφραστεί αλγεβρικά ως:

- Άθροισμα «+» εκείνων των m_j's για τα οποία ο συνδυασμός τιμών των μεταβλητών της συνάρτησης δίνουν 1 στη συνάρτηση
- Γινόμενο «·» εκείνων των M_j's για τα οποία ο συνδυασμός τιμών των μεταβλητών της συνάρτησης δίνουν 0 στη συνάρτηση

- Όταν η αλγεβρική έκφραση μιας συνάρτηση είναι σε κανονική μορφή, ο πίνακας αληθείας της προκύπτει άμεσα

Ελαχιστόροι και Μεγιστόροι Συνάρτησης

x	y	f_1	f_2	f_3
0	0	0	1	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	1	1	0	1

$n = 2$

$x\ y$	Min	Ονομασία	Max	Ονομασία
0 0	$\overline{x} \cdot \overline{y}$	m_0	$x + y$	M_0
0 1	$\overline{x} \cdot y$	m_1	$x + \overline{y}$	M_1
1 0	$x \cdot \overline{y}$	m_2	$\overline{x} + y$	M_2
1 1	$x \cdot y$	m_3	$\overline{x} + \overline{y}$	M_3

- $f_1(x, y) = \sum(1, 3) = m_1 + m_3$
  $f_1(x, y) = \prod(0, 2) = M_0 \cdot M_2$
- $f_2(x, y) = \sum(0, 1) = m_0 + m_1$
  $f_2(x, y) = \prod(2, 3) = M_2 \cdot M_3$
- $f_3(x, y) = \sum(0, 3) = m_0 + m_3$
  $f_3(x, y) = \prod(1, 2) = M_1 \cdot M_2$

Ισοδυναμία Κανονικών Μορφών

- Άθροισμα Ελαχιστόρων:

$$\begin{aligned} f_1 &= x'y + xy \\ &= y(x' + x) \\ &= y \end{aligned}$$

- Γινόμενο Μεγιστόρων:

$$\begin{aligned} f_1 &= (x + y)(x' + y) \\ &= xx' + xy + yx' + yy \\ &= 0 + xy + x'y + y \\ &= x'y + y = y \end{aligned}$$

Ελαχιστόροι και Μεγιστόροι Συνάρτησης

x	y	z	f_1	f_2
0	0	0	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	1	0	1

$n = 3$

x y z	Min	Ονομασία	Max	Ονομασία
0 0 0	$\overline{x} \cdot \overline{y} \cdot \overline{z}$	m_0	$x + y + z$	M_0
0 0 1	$\overline{x} \cdot \overline{y} \cdot z$	m_1	$x + y + \overline{z}$	M_1
0 1 0	$\overline{x} \cdot y \cdot \overline{z}$	m_2	$x + \overline{y} + z$	M_2
0 1 1	$\overline{x} \cdot y \cdot z$	m_3	$x + \overline{y} + \overline{z}$	M_3
1 0 0	$x \cdot \overline{y} \cdot \overline{z}$	m_4	$\overline{x} + y + z$	M_4
1 0 1	$x \cdot \overline{y} \cdot z$	m_5	$\overline{x} + y + \overline{z}$	M_5
1 1 0	$x \cdot y \cdot \overline{z}$	m_6	$\overline{x} + \overline{y} + z$	M_6
1 1 1	$x \cdot y \cdot z$	m_7	$\overline{x} + \overline{y} + \overline{z}$	M_7

- $f_1(x, y, z) = \sum(1, 3, 4, 5) = m_1 + m_3 + m_4 + m_5$
  $f_1(x, y, z) = \prod(0, 2, 6, 7) = M_0 \cdot M_2 \cdot M_6 \cdot M_7$
- $f_2(x, y, z) = \sum(0, 1, 3, 5, 7) = m_0 + m_1 + m_3 + m_5 + m_7$
  $f_2(x, y, z) = \prod(2, 4, 6) = M_2 \cdot M_4 \cdot M_6$

Υπολογισμός Κανονικής Μορφής Συνάρτησης

Έστω πχ η λογική συνάρτηση $f_1(x, y, z) = x + y' \cdot z$, η οποία δεν είναι εκφρασμένη σε κανονική μορφή.
Για να σχηματίσω την αλγεβρικά ισοδύναμη κανονικής μορφής έκφρασή της:

- Άθροισμα ελαχιστόρων: συμπληρώνω σε κάθε όρο του αθροίσματος τις μεταβλητές που λείπουν πολλαπλασιάζοντας το άθροισμα καθεμιάς από αυτές με το συμπλήρωμά της
  Κατά τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιώ τις ιδιότητες: $A \cdot 1 = A$ και $A + A' = 1$
- Γινόμενο μεγιστόρων: συμπληρώνω σε κάθε παράγοντα του γινομένου τις μεταβλητές που λείπουν προσθέτοντας το γινόμενο καθεμιάς από αυτές με το αντίστοιχο συμπλήρωμά της
  Κατά τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιώ τις ιδιότητες: $A \cdot A' = 0$ και $A + B \cdot C = (A + B) \cdot (A + C)$

Παραδείγματα

Έστω η λογική συνάρτηση $f_1(x, y, z) = x + y'z$

$$\begin{aligned} f_1(x,y,z) =& x(y+y')(z+z') + y'z(x+x') \\ =& xyz + xyz' + xy'z + xy'z' + xy'z + x'y'z \\ =& m_1 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 = \sum(1,4,5,6,7) \end{aligned}$$

$n = 3$

x y z	Min	Ονομασία	Max	Ονομασία
0 0 0	$\overline{x} \cdot \overline{y} \cdot \overline{z}$	m_0	$x + y + z$	M_0
0 0 1	$\overline{x} \cdot \overline{y} \cdot z$	m_1	$x + y + \overline{z}$	M_1
0 1 0	$\overline{x} \cdot y \cdot \overline{z}$	m_2	$x + \overline{y} + z$	M_2
0 1 1	$\overline{x} \cdot y \cdot z$	m_3	$x + \overline{y} + \overline{z}$	M_3
1 0 0	$x \cdot \overline{y} \cdot \overline{z}$	m_4	$\overline{x} + y + z$	M_4
1 0 1	$x \cdot \overline{y} \cdot z$	m_5	$\overline{x} + y + \overline{z}$	M_5
1 1 0	$x \cdot y \cdot \overline{z}$	m_6	$\overline{x} + \overline{y} + z$	M_6
1 1 1	$x \cdot y \cdot z$	m_7	$\overline{x} + \overline{y} + \overline{z}$	M_7

Παραδείγματα

Έστω η λογική συνάρτηση $f_2(x, y, z) = xy + x'z$

$$\begin{aligned}
f_2(x, y, z) =& (xy + x')(xy + z) \\
=& (x + x')(y + x')(x + z)(y + z) \\
=& (y + x' + zz')(x + z + yy')(y + z + xx') \\
=& (x' + y + z)(x + y + z)(x + y + z) \\
& \cdot (x' + y + z')(x + y' + z)(x' + y + z) \\
=& M_0 M_2 M_4 M_5 = \prod(0, 2, 4, 5)
\end{aligned}$$

Μετατροπή Μεταξύ Κανονικών Μορφών Λογικής Συνάρτησης

Είναι εμφανές, χρησιμοποιώντας το θεώρημα DeMorgan, ότι $m_j' = M_j$
πχ $f(x, y, z) = \sum(1, 4, 5, 6, 7) \leftrightarrow f(x, y, z) = \prod(0, 2, 3)$

Πρότυπη Μορφή Λογικής Συνάρτηση

- Εξ΄ ορισμού, σπάνια οι κανονικές μορφές συνάρτησης περιέχουν τον ελάχιστο δυνατό αριθμό παραγόντων, άρα και λογικών πυλών κατά το σχεδιασμό
- Πρότυπη μορφή αθροίσματος γινομένων: Η έκφραση αυτή περιέχει όρους AND και OR
- Πρότυπη μορφή γινομένου αθροισμάτων: Η έκφραση αυτή περιέχει όρους OR και AND
- Η υλοποίηση με τη βοήθεια πρότυπων μορφών είναι προτιμητέα δίοτι παράγει την ελάχιστη καθυστέρηση διάδοσης των σημάτων, μέσω των πυλών, από τις εισόδους των στην έξοδο

Επιπλέον Λογικές Πράξεις

Έστω n 2-δικές μεταβλητές, τότε πλήθος των διαφορετικών συναρτήσεων Boole είναι 2^{2n}

- Συνάρτηση NAND «$\uparrow$»
- Συνάρτηση NOR «$\downarrow$»
- Συνάρτηση XOR «$\oplus$»
- Συνάρτηση XNOR

Ψηφιακές Λογικές Πύλες

AND

x	y	$z = x \cdot y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

NAND (Not AND)

x	y	$z = \overline{x \cdot y}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

OR

x	y	$z = x + y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

NOR (Not OR)

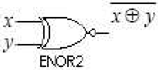
x	y	$z = \overline{x + y}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Ψηφιακές Λογικές Πύλες

XOR (eXclusive OR)

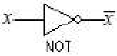
x	y	$z = x \oplus y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

XNOR (eXclusive Not OR)



x	y	$z = \overline{x \oplus y}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

NOT



x	$z = \overline{x}$
0	1
1	0

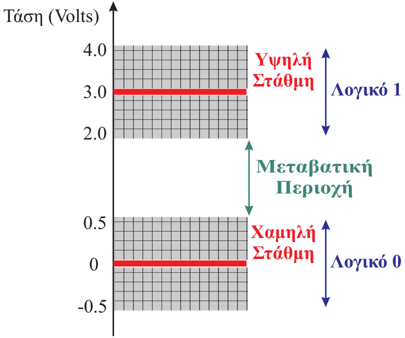
Απομονωτής

x	$z = x$
0	0
1	1

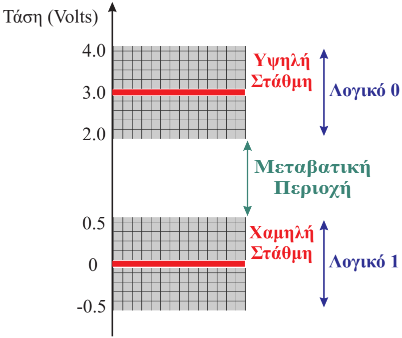
Θετική κι Αρνητική Λογική

Η αντιστοίχιση του λογικού 0 και 1 στην υψηλή και χαμηλή τάση δύναται να γίνει με δύο τρόπους:

Θετική Λογική



Αρνητική Λογική



Ολοκληρωμένα Κυκλώματα

Ολοκληρωμένο κύκλωμα → βάση κρυστάλλου ημιαγωγού πυριτίου με διασυνδεδεμένα ηλεκτρονικά στοιχεία που υλοποιούν ψηφιακές πύλες

- Transistor-Transistor Logic (TTL) → φθηνή και παλιά τεχνολογία (*σπάνια*)
- Emitter-Coupled Logic (ECL) → πλεονεκτεί σε συστήματα που απαιτούν υψηλή ταχύτητα (*σπάνια*)
- Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) → για υψηλή πυκνότητα στοιχείων
- Complementary MOS (CMOS) → για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Βασικά Χαρακτηριστικά Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Τα χαρακτηριστικά ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος περιγράφονται από τα χαρακτηριστικά του βασικού ηλεκτρονικού κυκλώματος πύλης της οικογένειας που ανήκει

- δυνατότητα εξόδου → πλήθος τυπικών φορτίων που δύναται να οδηγήσει η έξοδος της πύλης χωρίς να αποκλίνει από την κανονική λειτουργία της
- δυνατότητα εισόδου → πλήθος εισόδων της πύλης
- κατανάλωση ισχύος
- καθυστέρηση διάδοσης → μέσος χρόνος καθυστέρησης μετάδοσης ενός σήματος από τις εισόδους της πύλης στην έξοδό της
- περιθώριο θορύβου → μέγιστη τάση εξωτερικού θορύβου που μπορεί να προστεθεί σε ένα σήμα εισόδου χωρίς να προκαλέσει ανεπιθύμητη αλλαγή στην έξοδο του κυκλώματος

Σχεδιασμός Κυκλωμάτων με τη Βοήθεια Υπολογιστή

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η ανάπτυξη κι η επαλήθευση της ορθής λειτουργίας συστημάτων πολυπλοκότητας VLSI επιτυγχάνεται με εργαλεία CAD

- Ολοκληρωμένο κύκλωμα εξειδικευμένο για συγκεκριμένες εφαρμογές (ASIC)
- Προγραμματίσιμη από το χρήστη διάταξη πυλών (FPGA)
- Συσκευή προγραμματίσιμης λογικής (PLD)
- Ολοκληρωμένο κύκλωμα σχεδιασμένο από την αρχή

Γλώσσες περιγραφής υλικού HDL

- Verilog
- VHDL

Τέλος Θεματικής Ενότητας

Ευχαριστώ για την προσοχή σας

Γεώργιος Χ. Αλεξανδρόπουλος

e-mail: alexandg@uop.gr
URL: http://users.iit.demokritos.gr/~alexandg

eclass: http://eclass.uop.gr/courses/TST289/