

Ψηφιακή Σχεδίαση

# Σύγχρονη ακουλουθιακή λογική

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΚΟΣΜΑΣ

ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2019-2020 | ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# Περίληψη

στην παρούσα διάλεξη...

- ▶ Θα αναφέρουμε τα **είδη** ακολουθιακών κυκλωμάτων
- ▶ Θα παρουσιάσουμε τα **σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι**
- ▶ Θα μελετήσουμε τους **μανδαλωτές**
- ▶ Θα μελετήσουμε τα **φλιπ-φλοπ**
- ▶ Θα συζητήσουμε τον τρόπο **ανάλυσης** και **σχεδίασης** ακολουθιακών κυκλωμάτων με ρολόι

# Εισαγωγή

τα **λογικά κυκλώματα** που χρησιμοποιούνται στα ψηφιακά συστήματα είναι **δύο** κατηγοριών:

## 1. συνδυαστικά

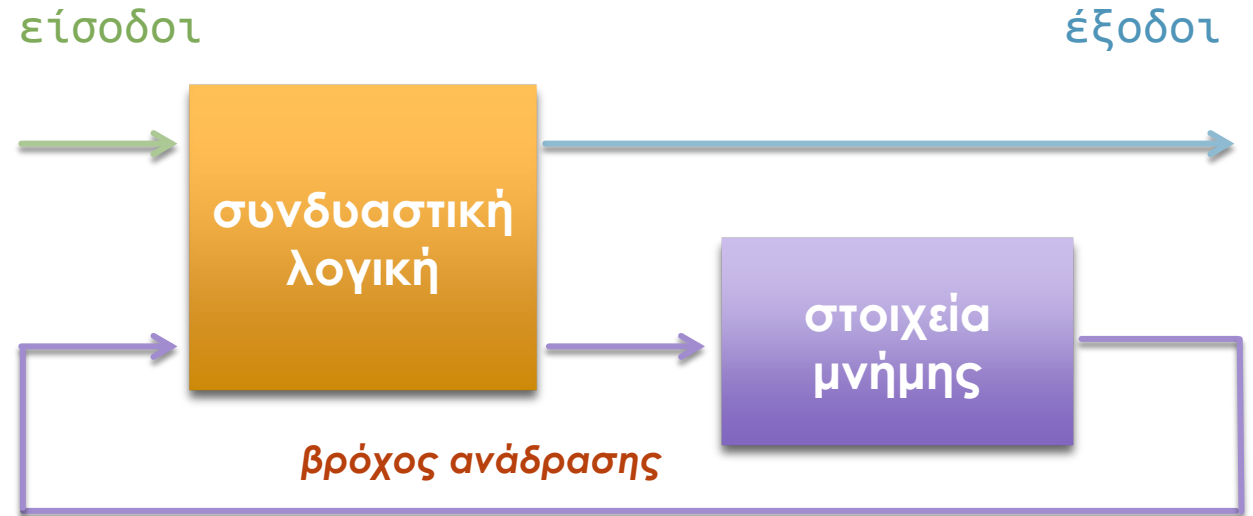
- ▶ συντίθεται από **λογικές πύλες**
- ▶ ανα πάσα χρονική στιγμή, οι **έξοδοι** καθορίζονται **μόνο** από τον τρέχοντα συνδυασμό **εισόδων**
- ▶ εκτελεί μία **λειτουργία** που μπορεί να προσδιοριστεί λογικά από ένα σύνολο **συναρτήσεων** Boole

## 2. ακολουθιακά

- ▶ επιπρόσθετα των **λογικών πυλών**, υπάρχουν και **στοιχεία μνήμης**
- ▶ οι **έξοδοι** εξαρτώνται όχι μόνο από τις **εισόδους**, αλλά και από την **κατάσταση** των **στοιχείων μνήμης**
- ▶ η κατάσταση των **στοιχείων μνήμης** εξαρτάται από **προηγούμενες εισόδους**

# Ακολουθιακά κυκλώματα

- ❖ περιλαμβάνει ένα **συνδυαστικό υποκύκλωμα**, στο οποίο συνδέονται **στοιχεία μνήμης** → ώστε να σχηματιστεί ένας **βρόχος ανάδρασης**
- ❖ τα **στοιχεία μνήμης** μπορούν να αποθηκεύσουν **δυαδικές πληροφορίες**
  - ▶ ορίζουν την **κατάσταση** του ακολουθιακού κυκλώματος
  - ▶ μαζί με τις **εισόδους** → **καθορίζουν** την τιμή των **εξόδων**
  - ▶ η **επόμενη** κατάσταση των **στοιχείων μνήμης** είναι συνάρτηση των **εισόδων** και της **τρέχουσας** κατάστασης
- ❖ ένα ακολουθιακό κύκλωμα **καθορίζεται** από μία **χρονική ακολουθία** **εισόδων**, **εξόδων** και **στοιχείων μνήμης**



# Ακολουθιακά κυκλώματα

## Σύγχρονα & Ασύγχρονα

υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ακολουθιακών κυκλωμάτων, οι οποίοι καθορίζονται από το συγχρονισμό των σημάτων τους

1. **σύγχρονο ακολουθιακό κύκλωμα:** η συμπεριφορά του καθορίζεται από την τιμή συγκεκριμένων σημάτων του σε διακριτά χρονικά σημεία
2. **ασύγχρονο ακολουθιακό κύκλωμα:** η συμπεριφορά του εξαρτάται
  - a) τόσο από τα σήματα εισόδου
  - b) όσο και από τη σειρά με την οποία οι είσοδοι αλλάζουν

# Σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα

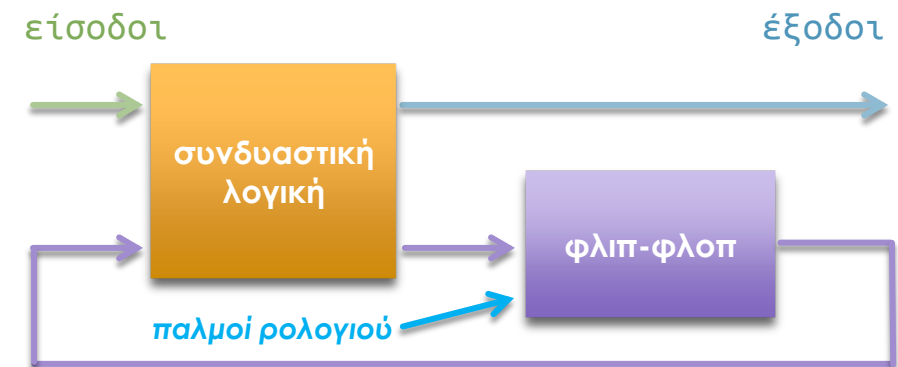
## Εισαγωγή

- ❖ χρησιμοποιούνται **σήματα** που επηρεάζουν τα **στοιχεία μνήμης μόνο** σε διακριτές χρονικές στιγμές
  - ▶ ο **συγχρονισμός** των **στοιχείων μνήμης** επιτυγχάνεται με τη **γεννήτρια ρολογιού**
    - ▶ παράγει το **σήμα ρολογιού** (**clock** ή **clk**) που έχει τη μορφή **παλμών ρολογιού**
  - ▶ οι **παλμοί ρολογιού**
    - ▶ διανέμονται σε όλο το σύστημα, με τέτοιο τρόπο → ώστε να επηρεάζουν τα **στοιχεία μνήμης μόνο** κατά τη **στιγμή** της **άφιξης** κάθε νέου **παλμού**
    - ▶ καθορίζουν **μόνο** πότε θα συμβεί κάτι
      - π.χ. έστω ένα σύστημα **πρόσθεσης** δύο αριθμών και **αποθήκευσης** του **αποτελέσματος**
        1. θα υπολογίσει το άθροισμα
        2. θα **αποθηκεύσει** το **αποτέλεσμα** στα **στοιχεία μνήμης**, **μόνο** όταν εμφανιστεί ο επόμενος **παλμός**
- ❖ ονομάζονται και **ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι**
  - ▶ είναι **σύγχρονα** διότι → ο **συγχρονισμός** της **δραστηριότητάς** τους και η **ενημέρωση** των **στοιχείων μνήμης** γίνεται με τους **παλμούς ρολογιού**

# Σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα

## φλιπ-φλοπ (flip-flop)

- ❖ τα **στοιχεία μνήμης** που χρησιμοποιούνται στα **ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι** ονομάζονται **φλιπ-φλοπ**
  - ▶ μια **διάταξη** που μπορεί να **αποθηκεύσει** ένα bit δυαδικής πληροφορίας
  - ▶ η **έξοδος** ενός **φλιπ-φλοπ**, όταν βρίσκεται σε **σταθερή** κατάσταση → είναι **0** ή **1**
- ❖ σε ένα ακολουθιακό κύκλωμα → χρησιμοποιείται ο **απαιτούμενος** αριθμός από **φλιπ-φλοπ** για την αποθήκευση του **επιθυμητού** πλήθους δυαδικών ψηφίων

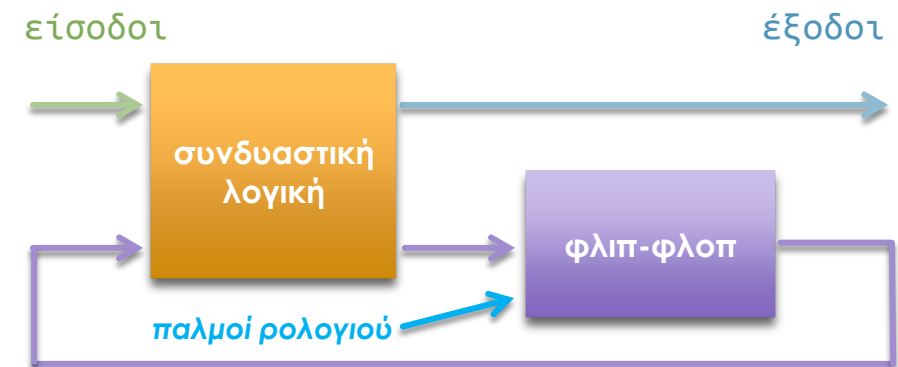


# Σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα

## φλιπ-φλοπ (flip-flop) (II)

- ❖ οι **έξοδοι** παράγονται ως **συνδυαστικές λογικές συναρτήσεις** των **εισόδων** και των τιμών που αποθηκεύονται στα **φλιπ-φλοπ**
- ❖ οι **νέες τιμές** των **φλιπ-φλοπ** σε κάθε **παλμό** καθορίζονται από τις **εισόδους** και τις τιμές που είχαν στον προηγούμενο **παλμό**
- ❖ οι νέες τιμές **αποθηκεύονται** στα **φλιπ-φλοπ** ακριβώς τη **στιγμή** που έρχεται ο νέος **παλμός**
  - ▶ λέμε ότι τότε τα φλιπ-φλοπ **ενημερώνονται**

- ✍ **πριν** τον **παλμό** του ρολογιού → το **συνδυαστικό κύκλωμα** που προσδιορίζει τις επόμενες τιμές των **φλιπ-φλοπ** πρέπει να έχει φτάσει σε **σταθερές, τελικές** τιμές
- ✍ άρα, η **ταχύτητα** με την οποία λειτουργούν τα **συνδυαστικά κυκλώματα** είναι **κρίσιμη**

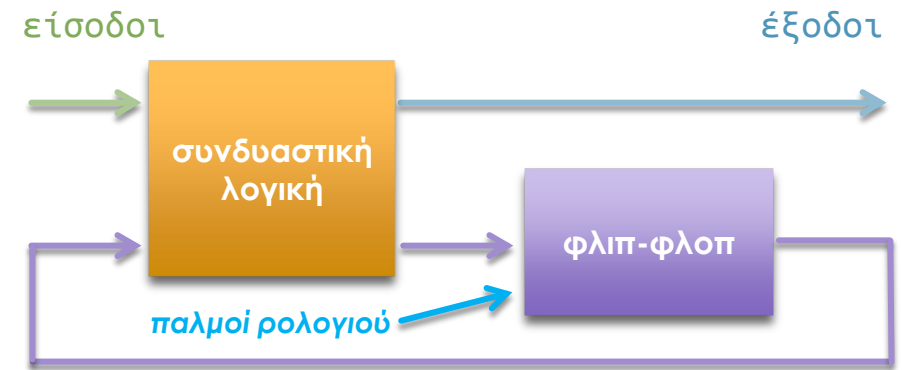




# Σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα

## φλιπ-φλοπ (flip-flop) - Παλμοί ρολογιού

- ❖ συνήθως οι **παλμοί** ρολογιού έρχονται σε **σταθερά** χρονικά διαστήματα
- ❖ το **συνδυαστικό υποκύκλωμα** πρέπει να **προλαβαίνει** να αντιδράσει εγκαίρως σε κάθε αλλαγή των **εισόδων**, **πριν** από τον επόμενο **παλμό** του ρολογιού
  - ✍ οι **καθυστερήσεις διάδοσης** παίζουν **σημαντικό** ρόλο στον καθορισμό του **ελάχιστου** χρονικού διαστήματος μεταξύ των **παλμών** → ώστε το κύκλωμα να λειτουργεί **σωστά**
- ❖ η **κατάσταση** των φλιπ-φλοπ μπορεί να αλλάξει **μόνο** κατά την αλλαγή της τιμής του **σήματος ρολογιού** π.χ. κατά τη **μετάβαση** από **0** σε **1**
  - ▶ όταν το **σήμα ρολογιού** είναι **ανενεργό** → οι βρόχοι ανάδρασης **διακόπτονται**
  - ▶ άρα, η **μετάβαση** του ακολουθιακού κυκλώματος από μία κατάσταση στην επόμενη, μπορεί να γίνει **μόνο** σε **καθορισμένες** χρονικές στιγμές (που προσδιορίζονται από τους **παλμούς ρολογιού**)



διάγραμμα χρονισμού παλμών ρολογιού

# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτές

# Στοιχεία μνήμης

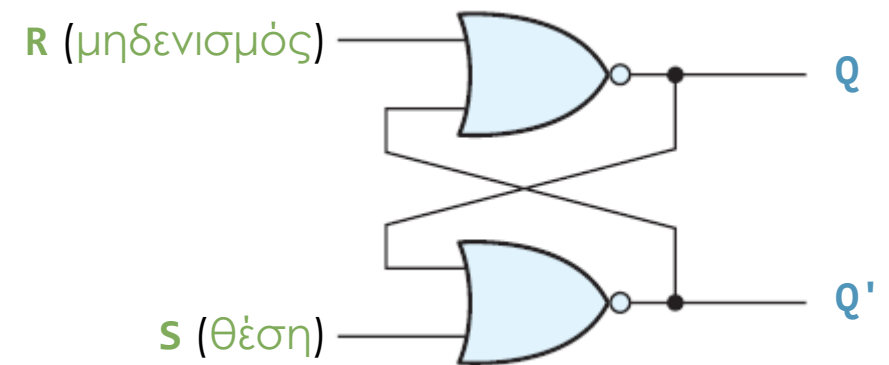
## Εισαγωγή

- ❖ κάθε στοιχείο μνήμης μπορεί να διατηρήσει τη δυαδική κατάστασή του επ' αόριστον
  - ▶ εφόσον εξακολουθεί η παροχή ηλεκτρικής ισχύος στο κύκλωμα
  - ▶ έως ότου αλλάξει ένα σήμα εισόδου, με τρόπο ώστε να πρέπει να μεταβληθεί
- ❖ βασικά χαρακτηριστικά διαφοροποίησης στοιχείων μνήμης
  - a) αριθμός εισόδων
  - b) ο τρόπος με τον οποίο οι είσοδοι των στοιχείων επηρεάζουν την επόμενη κατάσταση
- ❖ τα στοιχεία μνήμης που ενεργοποιούνται
  - 1. από την παρουσία συγκεκριμένων τιμών του σήματος ρολογιού (για τα **0** και **1**) → ονομάζονται **μανδαλωτές**
  - 2. από μεταβάσεις τιμών του σήματος ρολογιού → ονομάζονται **φλιπ-φλοπ**
- ✍ οι **μανδαλωτές** είναι τα βασικά κυκλώματα από τα οποία κατασκευάζονται τα **φλιπ-φλοπ**

# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής τύπου SR

- ❖ ένα κύκλωμα με δύο πύλες NOR (ή NAND) συνδεδεμένες χιαστί
- ❖ έχει δύο εισόδους
  - ▶ την S (από το set που σημαίνει) → θέση
  - ▶ την R (από το reset που σημαίνει) → επαναφορά ή μηδενισμός
- ❖ κάθε μανδαλωτής έχει δύο χρήσιμες, σταθερές καταστάσεις
  1. κατάσταση θέσης:  
όταν ισχύει  $Q = 1$  και  $Q' = 0$
  2. κατάσταση επαναφοράς ή μηδενισμού:  
όταν  $Q = 0$  και  $Q' = 1$
- ❖ κανονικά οι έξοδοι είναι συμπληρωματικές



μανδαλωτής τύπου SR  
με πύλες NOR

# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής τύπου SR (II)

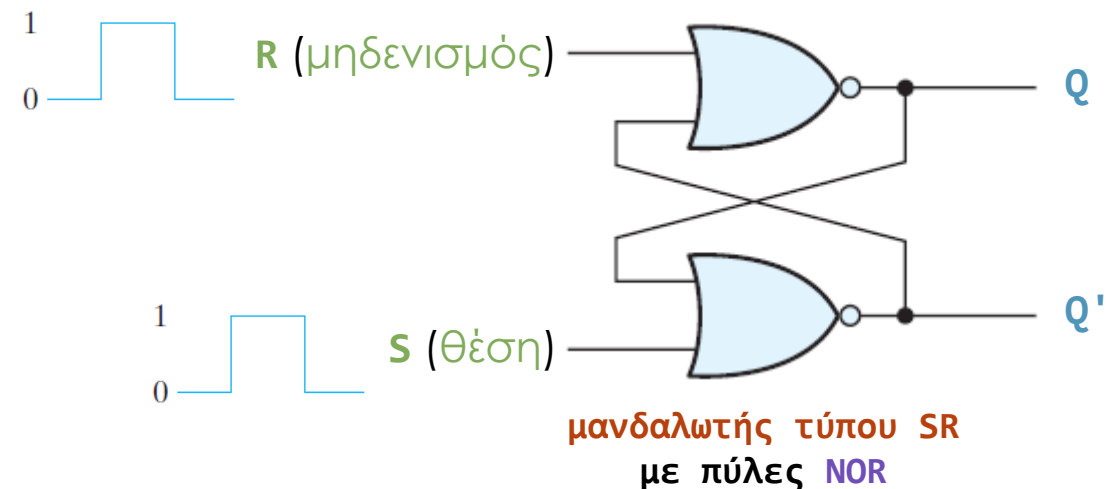
- ❖ η εφαρμογή ενός **στιγμιαίου 1**
  - ▶ στην είσοδο **S** → αναγκάζει το **μανδαλωτή** να **μεταβεί** σε **κατάσταση θέσης** ( $Q = 1$ )
  - ▶ στην είσοδο **R** → αναγκάζει το **μανδαλωτή** να **μεταβεί** σε **κατάσταση μηδενισμού** ( $Q = 0$ )
- ❖ μετά την εφαρμογή αυτή, ακόμη και εάν η **είσοδος S** (ή **R**) **επανέλθει** στο **0** → ο **μανδαλωτής παραμένει** σε κατάσταση θέσης (ή μηδενισμού αντίστοχα)
  - ▶ **διατηρείται** ακόμη και όταν  $S = R = 0$
- ❖ σε **κανονικές** συνθήκες φροντίζουμε να κρατάμε τις δύο **εισόδους** στο **0**
  - ▶ **εκτός** εάν θέλουμε να **αλλάξουμε** την κατάσταση του

S	R	Q	Q'
1	0	1	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	0	0	1
1	1	0	0

(όταν,  $S = 1, R = 0$ )

(όταν,  $S = 0, R = 1$ )

(απαγορεύεται)

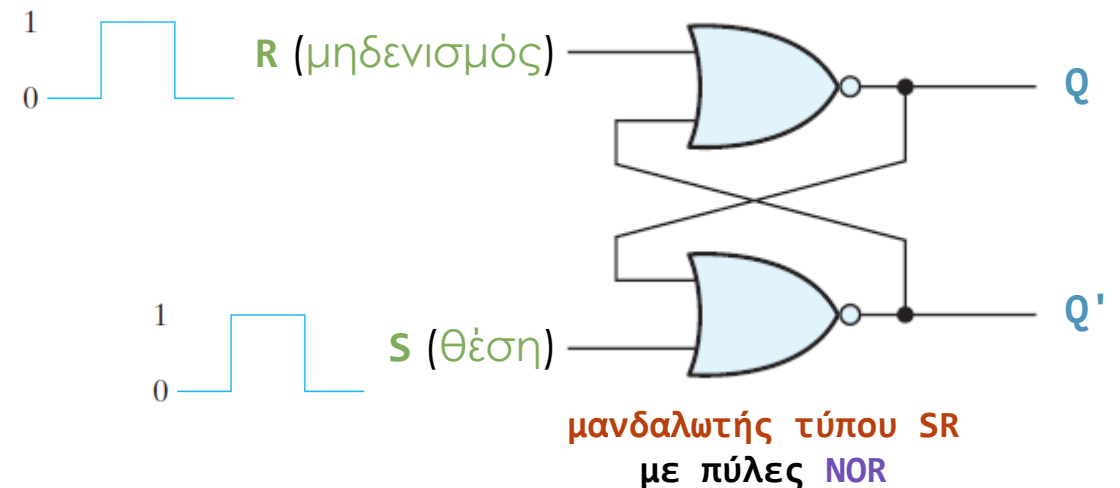


# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής τύπου SR (III)

- ❖ η ταυτόχρονη ενεργοποίηση των δύο **εισόδων**, δηλαδή εάν και οι δύο **είσοδοι** (**S** και **R**) του **μανδαλωτή** γίνουν ταυτόχρονα **1** τότε
  - ▶ και οι δύο **έξοδοι** (**Q** και **Q'**) γίνονται **ταυτόχρονα 0**
    - 👉 παραβιάζεται η απαίτηση οι έξοδοι να είναι **συμπληρωματικές**
    - 👉 οδηγεί σε μία επόμενη κατάσταση που **δε** μπορεί να **προσδιοριστεί**
      - ▶ εξαρτάται από τη **σειρά** με την οποία οι **είσοδοι** θα επανέλθουν στο **0**

- ❖ σε κανονική λειτουργία (προκειμένου να **αποφευχθεί** η **απροσδιορίστη κατάσταση**) → πρέπει να **εξασφαλίσουμε** ότι **δε** θα δώσουμε **ποτέ** τιμή **1** ταυτόχρονα στις δύο **εισόδους** του **μανδαλωτή**

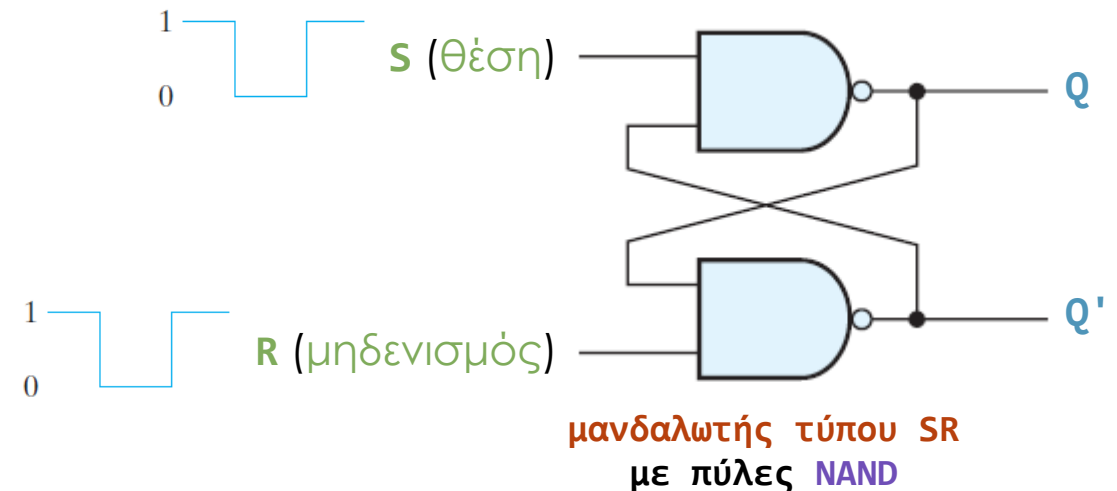


# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής τύπου SR - με πύλες NAND

- ❖ η εφαρμογή ενός **στιγμιαίου 0**
  - ▶ στην είσοδο **S** → αναγκάζει το **μανδαλωτή** να **μεταβεί** σε **κατάσταση θέσης** ( $Q = 1$ )
  - ▶ στην είσοδο **R** → αναγκάζει το **μανδαλωτή** να **μεταβεί** σε **κατάσταση μηδενισμού** ( $Q = 0$ )
- ❖ μετά την εφαρμογή αυτή, ακόμη και εάν η **είσοδος S** (ή **R**) **επανέλθει** στο **1** → ο **μανδαλωτής** **παραμένει** σε κατάσταση θέσης (ή μηδενισμού αντίστοχα)
  - ▶ **διατηρείται** ακόμη και όταν **S = R = 1**
- ✗ συνθήκη **απαγορευμένων εισόδων**:  
**S = R = 0**
  - ▶ πρέπει να **αποφεύγεται** → ώστε να **εξασφαλίζεται** η **ομαλή** και **προβλέψιμη** λειτουργία του **μανδαλωτή**
- ❖ σε **κανονική** λειτουργία φροντίζουμε να κρατάμε τις δύο **εισόδους** στο **1**
  - ▶ **εκτός** εάν θέλουμε να **αλλάξουμε** την κατάσταση του

S	R	Q	Q'	
1	0	0	1	
1	1	0	1	(όταν, S = 1, R = 0)
0	1	1	0	
1	1	1	0	(όταν, S = 0, R = 1)
0	0	1	1	(απαγορεύεται)

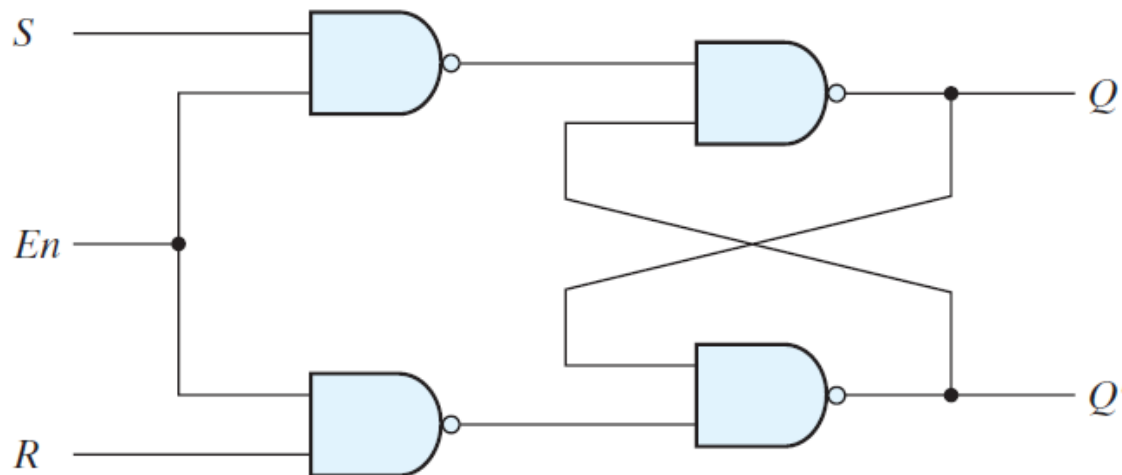


# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής τύπου SR - Βελτίωση

- ❖ η λειτουργία του βασικού **μανδαλωτή SR** μπορεί να **βελτιωθεί** εάν προσθέσουμε μία **είσοδο ελέγχου (En)**
  - ▶ προσδιορίζει **πότε** μπορεί να **αλλάξει** η κατάσταση του **μανδαλωτή**
  - ▶ συμπεριφέρεται ως σήμα **επίτρεψης** για τις άλλες δύο **εισόδους (S και R)**
    - ▶ όταν **En = 0** → το κύκλωμα **απενεργοποιείται**, δηλαδή η κατάσταση της εξόδου δεν αλλάζει
    - ▶ όταν **En = 1** → τα σήματα στις εισόδους **S** και **R** μπορούν να μεταβάλουν την κατάσταση του **μανδαλωτή**

μανδαλωτής  
τύπου SR  
με πύλες  
NAND και  
είσοδο  
επίτρεψης



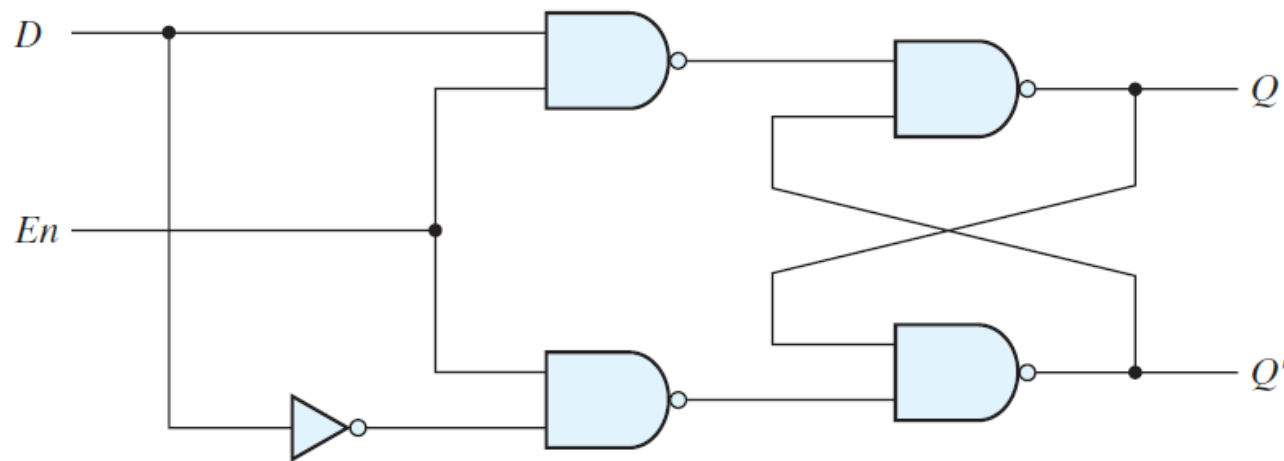
En	S	R	επόμενη κατάσταση του Q
0	X	X	καμία αλλαγή
1	0	0	καμία αλλαγή
1	0	1	$Q = 0$ (κατάσταση μηδενισμού)
1	1	0	$Q = 1$ (κατάσταση θέσης)
1	1	1	απροσδιόριστη έξοδος



# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής τύπου D (διαφανής μανδαλωτής)

- ❖ για να απαλλαγούμε από τις συνέπειες της ανεπιθύμητης κατάστασης **μη προσδιορίσιμης εξόδου** → αρκεί να **εξασφαλίσουμε** ότι οι **είσοδοι S** και **R** δε θα γίνουν ποτέ ταυτόχρονα **0**
  - ▶ για τον **μανδαλωτή SR** με πύλες **NAND**
- ❖ αυτό συμβαίνει στο **μανδαλωτή D**
  - ▶ έχει **μόνο** δύο **εισόδους**: **D** (δεδομένα) και **En** (επίτρεψη)

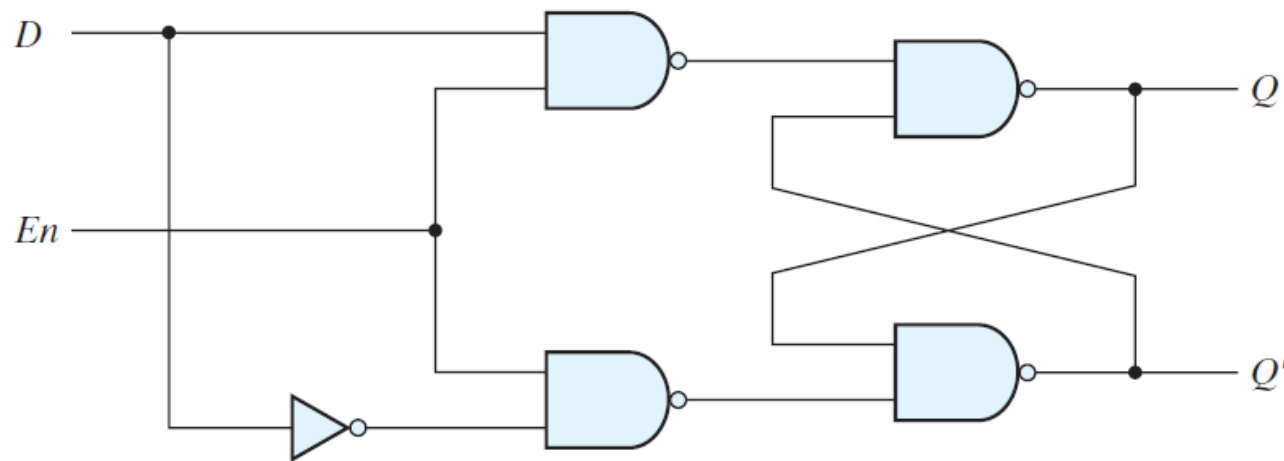


En	D	επόμενη κατάσταση του Q
0	X	καμία αλλαγή
1	0	$Q = 0$ (κατάσταση μηδενισμού)
1	1	$Q = 1$ (κατάσταση θέσης)

# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής τύπου D (διαφανής μανδαλωτής) (II)

- ❖ η δυαδική πληροφορία που εμφανίζεται στην **είσοδο δεδομένων** του **μανδαλωτή** → **μεταφέρεται** στην **έξοδο Q** όταν είναι ενεργοποιημένη η **είσοδος επίτρεψης**
- ❖ ονομάζεται **διαφανής** καθώς, όσο η **είσοδος επίτρεψης παραμένει** ενεργή → η **έξοδος Q** ακολουθεί οποιεσδήποτε αλλαγές της **εισόδου δεδομένων (D)**
  - ▶ ισοδυναμεί με άμεση σύνδεση της **εισόδου** με την **έξοδο**



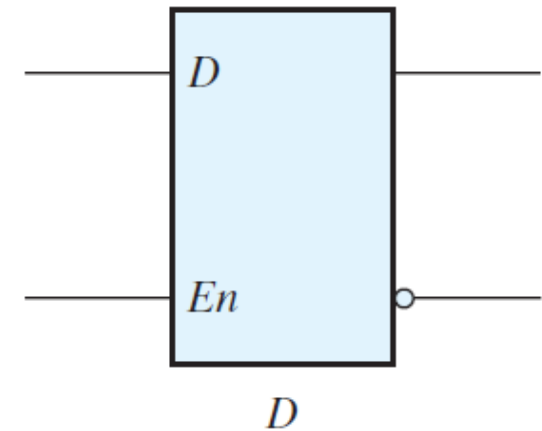
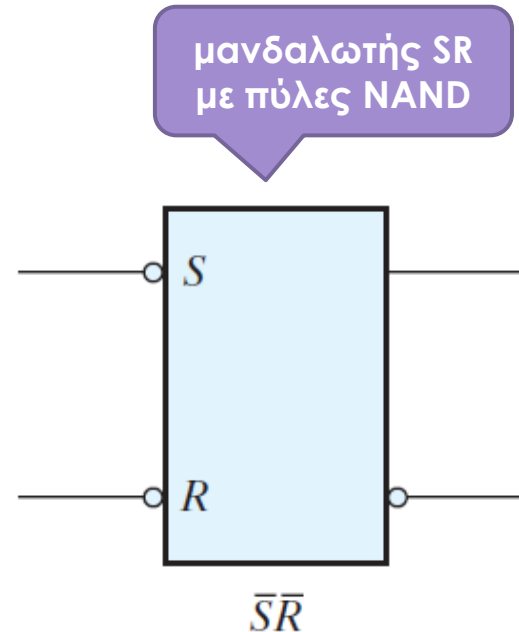
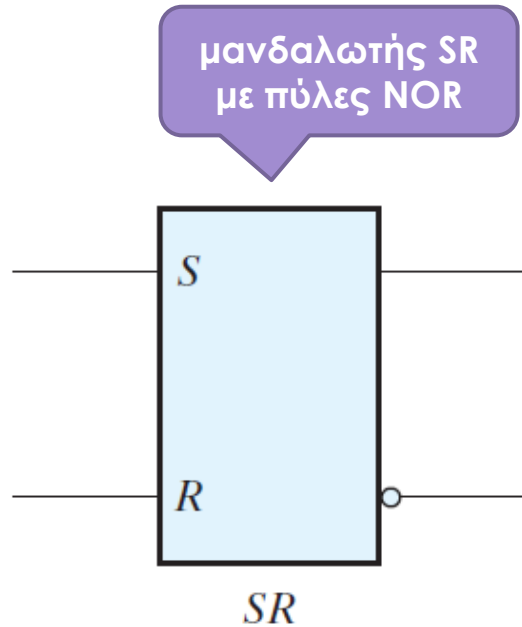
λογικό διάγραμμα **μανδαλωτή D**

En	D	επόμενη κατάσταση του Q
0	X	καμία αλλαγή
1	0	$Q = 0$ (κατάσταση μηδενισμού)
1	1	$Q = 1$ (κατάσταση θέσης)

# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτές - Σχηματικά σύμβολα

- ❖ κάθε μανδαλωτής παρουσιάζεται ως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμο, με
  - ▶ τις εισόδους του στην αριστερή πλευρά
  - ▶ τις εξόδους του στη δεξιά πλευρά
    - ▶ η πάνω έξοδος είναι η κανονική ( $Q$ ) και η κάτω η συμπληρωμένη ( $Q'$ )



# Στοιχεία μνήμης

Φλιπ-φλοπ

# Στοιχεία μνήμης

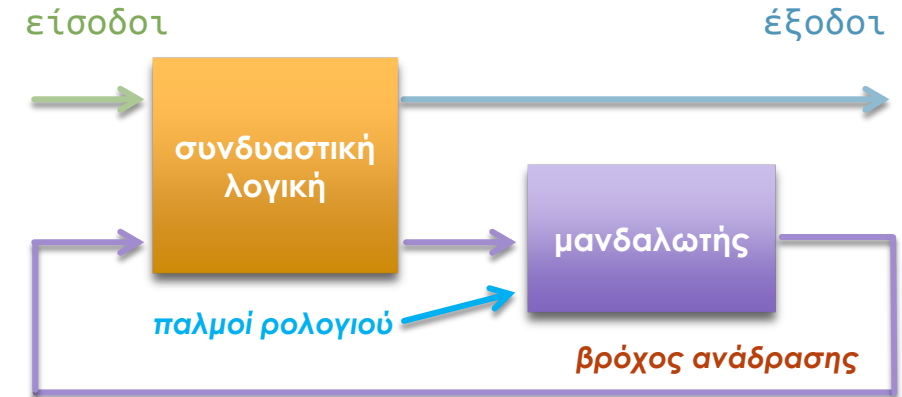
## Σύγκριση φλιπ-φλοπ & μανδαλωτή

- ❖ η κατάσταση ενός φλιπ-φλοπ μεταβάλλεται μετά από συγκεκριμένη αλλαγή τιμής των σχετικών εισόδων ελέγχου
  - ▶ αυτή η αλλαγή ονομάζεται πυροδότηση (trigger)
  - ▶ η σχετική μετάβαση κατάστασης του σήματος ελέγχου πυροδοτεί το φλιπ-φλοπ
- ❖ ο μανδαλωτής τύπου D δέχεται παλμούς στην είσοδο ελέγχου του και λειτουργεί όσο το επίπεδο του σήματος ελέγχου παραμένει στο λογικό 1
  - ▶ οποιεσδήποτε αλλαγές στην είσοδο δεδομένων → προκαλούν αλλαγές στην κατάσταση του μανδαλωτή και στην έξοδό του
  - ✍ λειτουργεί σαν ένα φλιπ-φλοπ που πυροδοτείται κάθε φορά που ο εκάστοτε παλμός έχει τη λογική τιμή 1

# Στοιχεία μνήμης

## Μανδαλωτής - Προβληματική συμπεριφορά

- ❖ οποιοδήποτε ακολουθιακό κύκλωμα → περιέχει **βρόχους ανάδρασης**
  - ✍ οι **είσοδοί** τους **επηρεάζονται** από τις **εξόδους** των **ίδιων** ή άλλων **στοιχείων μνήμης**
- ❖ εάν χρησιμοποιήσουμε **μανδαλωτές** ως στοιχεία μνήμης
  - ✍ οι **μεταβάσεις** των καταστάσεων των **μανδαλωτών** **ξεκινούν** όταν ο **παλμός ρολογιού** μεταβαίνει στο λογικό **1** (και **συνεχίζονται** όσο παραμένει στο λογικό **1**)
  - ▶ είναι πιθανό οι **νέες** καταστάσεις των **μανδαλωτών** να **προλάβουν** να φτάσουν στην **έξοδο** και στη συνέχεια στην **είσοδο** των **μανδαλωτών** (**εξαιτίας** του βρόχου ανάδρασης), ενώ ο **παλμός ελέγχου** έχει ακόμη τιμή **1**
    - 💡 εάν αυτό συμβεί: οι **μανδαλωτές** θα **επηρεαστούν** από τις νέες τιμές → πιθανές **αλλαγές** της κατάστασής τους
  - ✖ **πρόβλημα**: **έλλειψη** δυνατότητας πρόβλεψης των καταστάσεων των **μανδαλωτών**
  - ✍ **λύση**: **αποφυγή** σύνδεσης των **εξόδων** των **μανδαλωτών** απευθείας ή μέσω **συνδυαστικής λογικής** με την **είσοδο** του **ίδιου** ή άλλου **μανδαλωτή**
    - ▶ όταν όλοι οι εμπλεκόμενοι **μανδαλωτές** πυροδοτούνται από το **ένα κοινό** ρολόι



# Στοιχεία μνήμης

## Φλιπ-φλοπ

- ❖ λειτουργούν σωστά όταν αποτελούν μέρος ενός ακολουθιακού κυκλώματος που χρησιμοποιεί ένα κοινό ρολόι
- ❖ πυροδοτούνται **μόνο** κατά την αλλαγή επιπέδου του σήματος ρολογιού
  - ▶ θετική μετάβαση και αρνητική μετάβαση
  - ✍ έτσι, διακόπτεται ο βρόχος ανάδρασης → δε μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα
- ❖ τρόποι κατασκευής φλιπ-φλόπ:
  1. με χρήση δύο μανδαλωτών συνδεδεμένων με ειδικό τρόπο, ώστε
    - ▶ η έξοδος του φλιπ-φλοπ να απομονώνεται από τις εισόδους του
    - ▶ να μην είναι δυνατό να αλλάξει κατάσταση όσο διαρκούν οι αλλαγές των εισόδων του
  2. κατάλληλος σχεδιασμός, ώστε
    - ▶ να πυροδοτείται **μόνο** κατά τη μετάβαση του σήματος από το 0 στο 1 (ή το ανάποδο)
    - ▶ να απενεργοποιείται καθόλη τη διάρκεια του ίδιου παλμού του ρολογιού



# Στοιχεία μνήμης

Ακμοπυροδότητο φλιπ-φλοπ



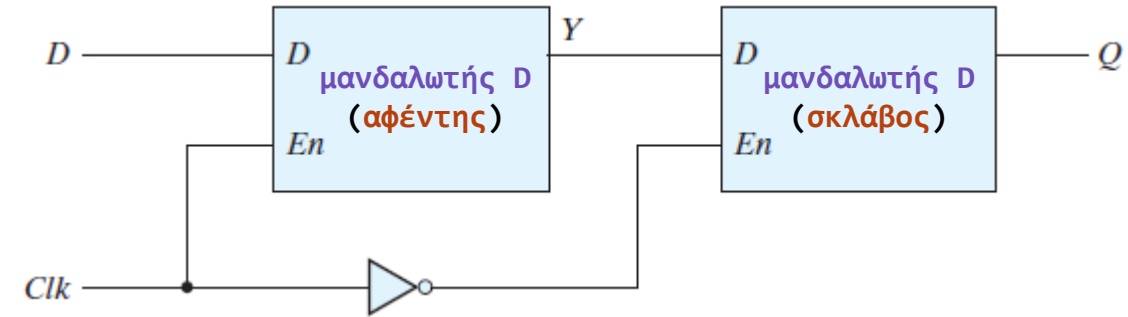
# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ

- ❖ κατασκευή με δύο μανδαλωτές D και έναν αντιστροφέα
  - ▶ ο πρώτος μανδαλωτής ονομάζεται **αφέντης** και ο δεύτερος **σκλάβος**

περιγραφή λειτουργίας (σε κάθε παλμό):

- ❖ όταν ο παλμός του ρολογιού (**Clk**) γίνει **1**:
  - ▶ η δυαδική πληροφορία της εισόδου **D** μεταφέρεται στην έξοδο του μανδαλωτή αφέντη (**Y**)
  - ▶ ο μανδαλωτής σκλάβος απενεργοποιείται
  - ▶ οποιαδήποτε αλλαγή στην τιμή της εισόδου **D** μπορεί να αλλάξει την έξοδο **Y** αλλά **δε** μπορεί να επηρεάσει την έξοδο **Q** του μανδαλωτή σκλάβου
- ❖ όταν ο παλμός του ρολογιού (**Clk**) επιστρέψει στο **0**:
  - ▶ ο μανδαλωτής σκλάβος ενεργοποιείται και η έξοδός του (**Q**) γίνεται ίση με την έξοδο (**Y**) του αφέντη
  - ▶ ο μανδαλωτής αφέντης απενεργοποιείται
- ❖ επομένως, το κύκλωμα **ελέγχει** την τιμή της εισόδου **D** και **αλλάζει** αντίστοιχα την έξοδο του (**Q**) **μόνο** στην **αρνητική ακμή** του ρολογιού

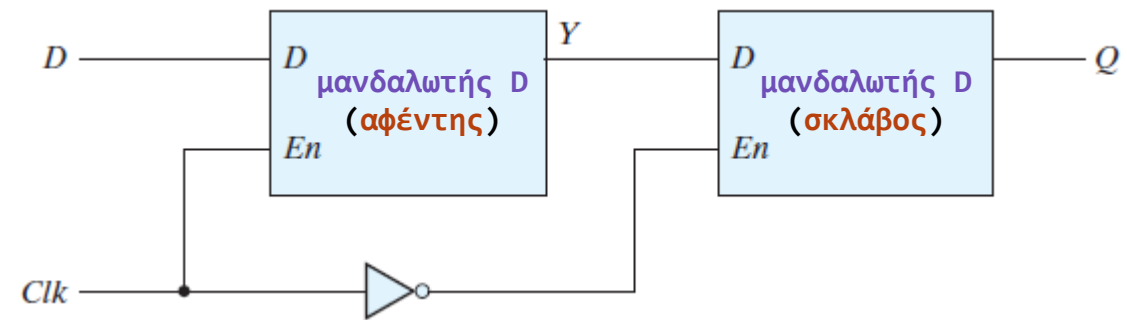


λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές D)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - Συμπεράσματα

- ❖ η **έξοδος** του **φλιπ-φλοπ** μπορεί να αλλάξει **μία φορά μόνο** κατά τη διάρκεια ενός **παλμού** του **ρολογιού**
  - ❖ οποιαδήποτε **αλλαγή** της **εξόδου** πυροδοτείται από την **αρνητική ακμή** του **ρολογιού**
  - ❖ η **αλλαγή** αυτή μπορεί να συμβεί **μόνο** κατά τη διάρκεια του **αρνητικού επιπέδου** του **παλμού** **ρολογιού**
  - ❖ η **τιμή** που παρουσιάζεται στην **έξοδο** του **φλιπ-φλοπ** είναι αυτή που αποθηκεύτηκε στο **μανδαλωτή αφέντη** αμέσως πριν την **αρνητική ακμή** του σήματος **ρολογιού**
- ? πώς μπορούμε να σχεδιάσουμε το κύκλωμα ώστε η **έξοδος** του **φλιπ-φλοπ** να αλλάξει στη **θετική ακμή**;

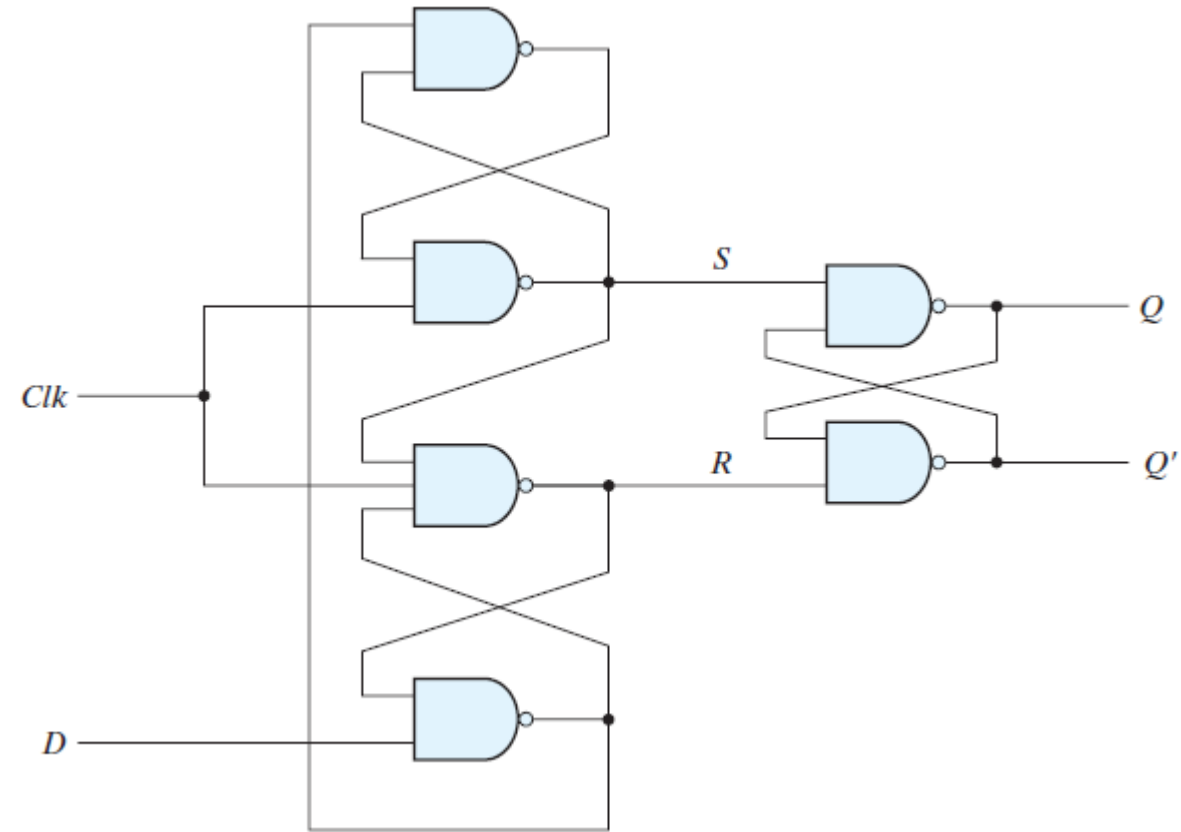


λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές D)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής

- ❖ κατασκευή με τρεις μανδαλωτές SR
  - ▶ δύο από αυτούς αποκρίνονται στις εισόδους **D** και **Clk**
  - ▶ ο 3<sup>ος</sup> παράγει τις εξόδους του φλιπ-φλοπ
- ❖ όταν **Clk** = 0
  - ▶ **S** και **R** έχουν τιμή 1
  - ▶ ο 3<sup>ος</sup> μανδαλωτής παραμένει σε σταθερή κατάσταση
  - ▶ η έξοδος δε μεταβάλεται
  - ▶ η είσοδος **D** μπορεί να είναι 0 ή 1

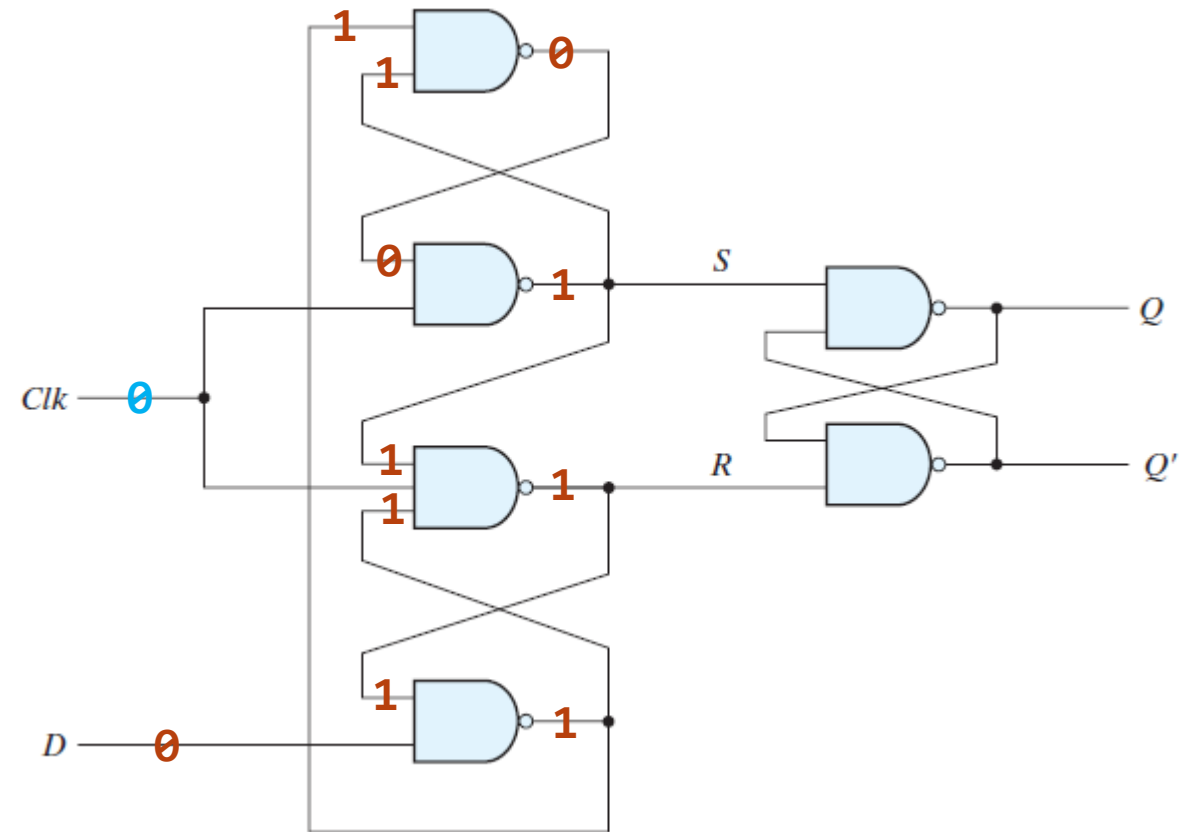


λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής

❖ έστω ότι **D** = 0 λίγο πριν το **Clk** γίνει 0

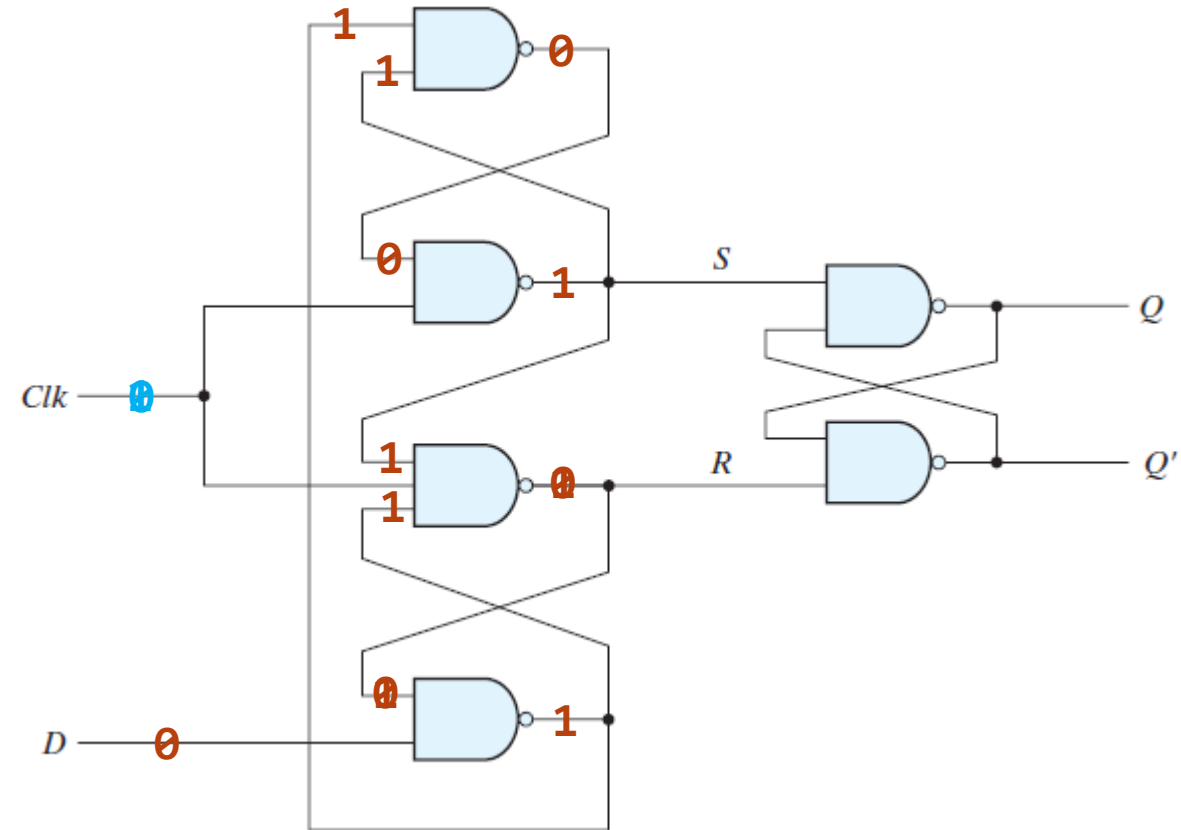


λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής

- ❖ έστω ότι **D** = **0** λίγο πριν το **Clk** γίνει **1**
- ❖ όταν **Clk** = **1**
  - ▶ ο ακροδέκτης **R** γίνεται **0**
  - ▶ το φλιπ-φλοπ μεταβαίνει σε κατάσταση μηδενισμού
  - ▶ **Q** = **0**
  - ▶ ακόμη και αν υπάρξουν αλλαγές της τιμής της εισόδου **D** (όσο **Clk** = **1**) ο ακροδέκτης **R** παραμένει στην τιμή **0**

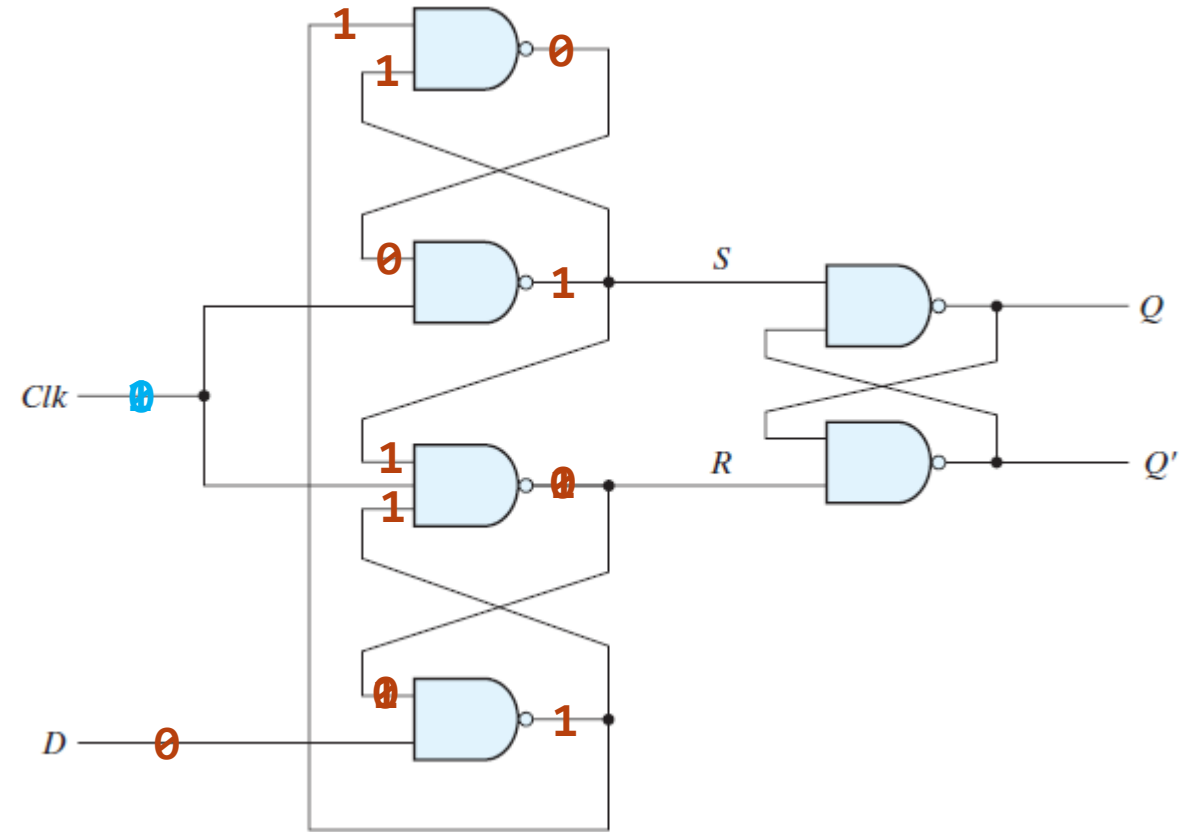


λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής

- ❖ έστω ότι **D** = **0** λίγο πριν το **Clk** γίνει **1**
- ❖ όταν **Clk** = **1**
  - ▶ ο ακροδέκτης **R** γίνεται **0**
  - ▶ το φλιπ-φλοπ μεταβαίνει σε κατάσταση μηδενισμού
  - ▶ **Q** = **0**
  - ▶ ακόμη και αν υπάρξουν αλλαγές της τιμής της εισόδου **D** (όσο **Clk** = **1**) ο ακροδέκτης **R** παραμένει στην τιμή **0**
- ❖ όταν το **Clk** γίνει και πάλι **0**
  - ▶ ο ακροδέκτης **R** γίνεται **1**
  - ▶ ο μανδαλωτής εξόδου τίθεται σε κατάσταση μηδενισμού
  - ▶ η έξοδος δεν αλλάζει



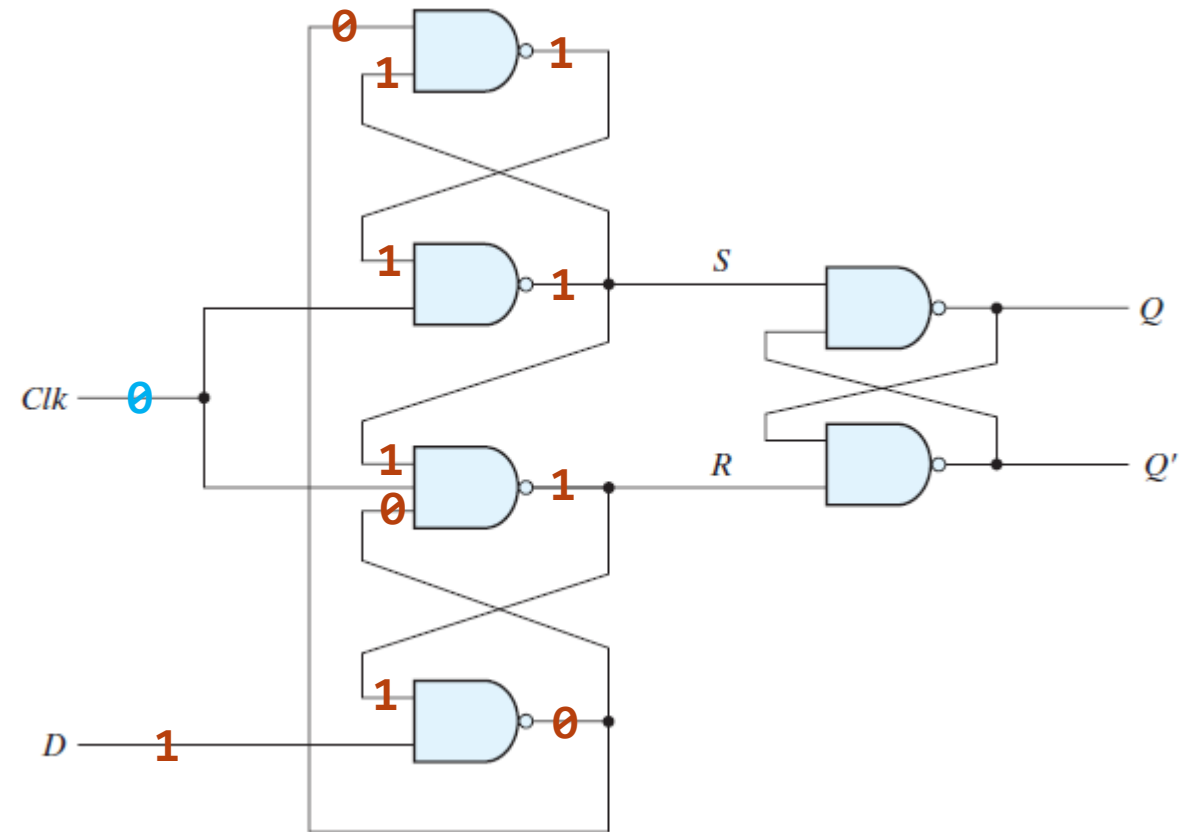
λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής (II)

ομοίως,

❖ έστω ότι **D** = **1** λίγο πριν το **Clk** γίνει **1**



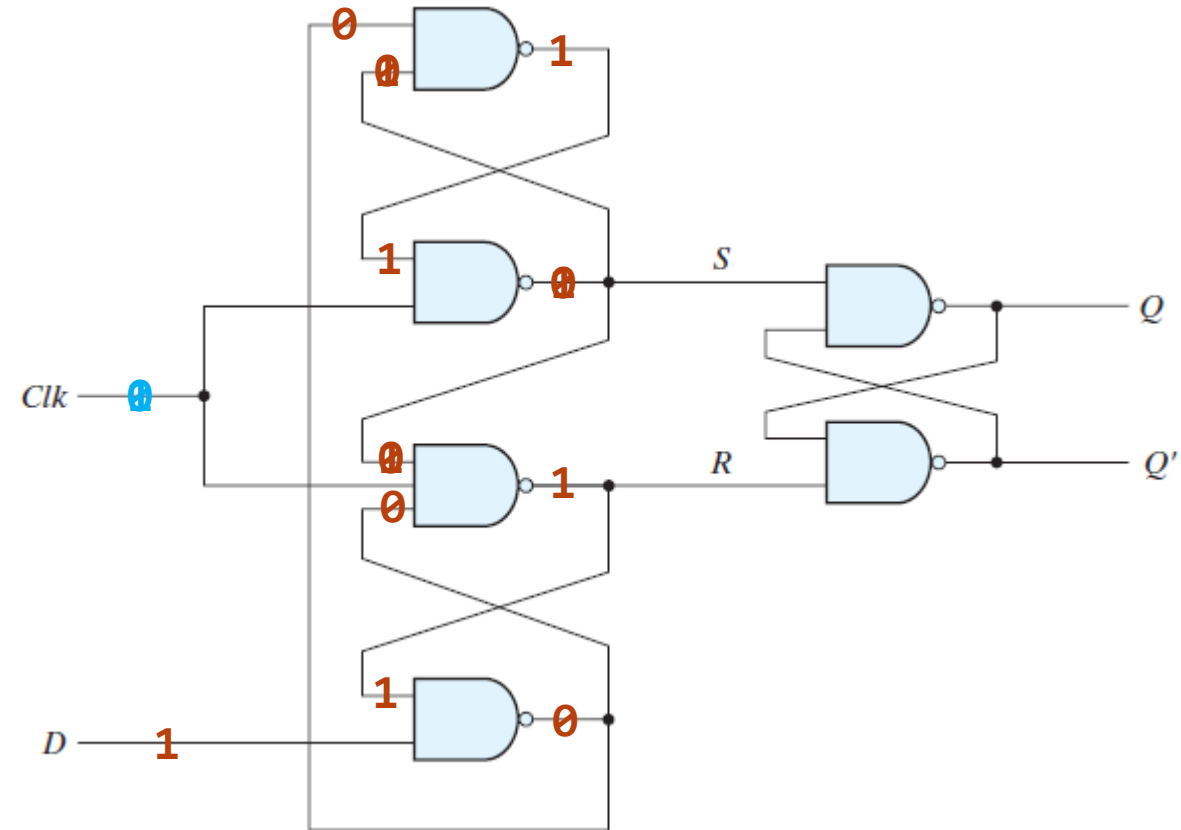
λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής (II)

ομοίως,

- ❖ έστω ότι **D** = **1** λίγο πριν το **Clk** γίνει **1**
- ❖ όταν **Clk** = **1**
  - ▶ ο ακροδέκτης **S** γίνεται **0**
  - ▶ το φλιπ-φλοπ μεταβαίνει σε κατάσταση θέσης
  - ▶ **Q** = **1**
  - ▶ ακόμη και αν υπάρξουν αλλαγές της τιμής της εισόδου **D** (όσο **Clk** = **1**) ο ακροδέκτης **S** παραμένει στην τιμή **0**



λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

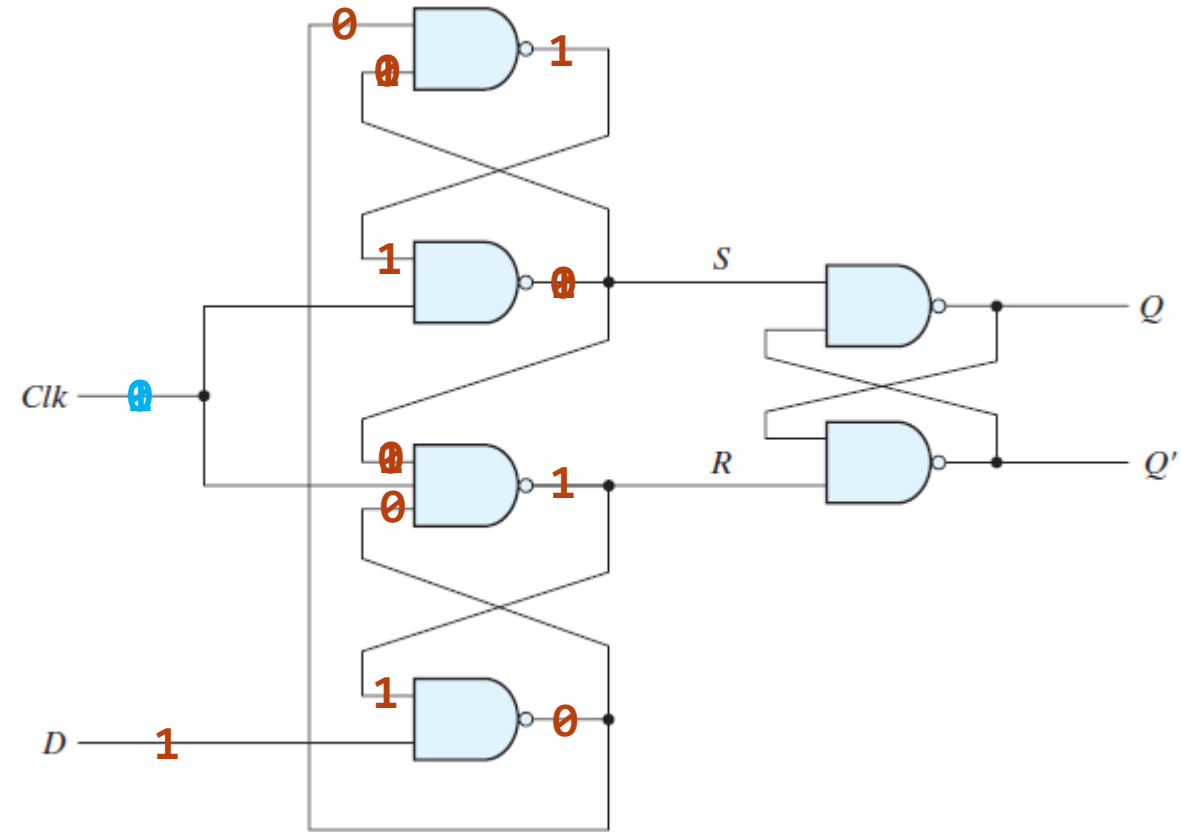


# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής (II)

ομοίως,

- ❖ έστω ότι **D** = **1** λίγο πριν το **Clk** γίνει **1**
- ❖ όταν **Clk** = **1**
  - ▶ ο ακροδέκτης **S** γίνεται **0**
  - ▶ το φλιπ-φλοπ μεταβαίνει σε κατάσταση θέσης
  - ▶ **Q** = **1**
  - ▶ ακόμη και αν υπάρξουν αλλαγές της τιμής της εισόδου **D** (όσο **Clk** = **1**) ο ακροδέκτης **S** παραμένει στην τιμή **0**
- ❖ όταν το **Clk** γίνει και πάλι **0**
  - ▶ ο ακροδέκτης **S** γίνεται **1**
  - ▶ ο μανδαλωτής εξόδου τίθεται σε κατάσταση θέσης
  - ▶ η έξοδος δεν αλλάζει

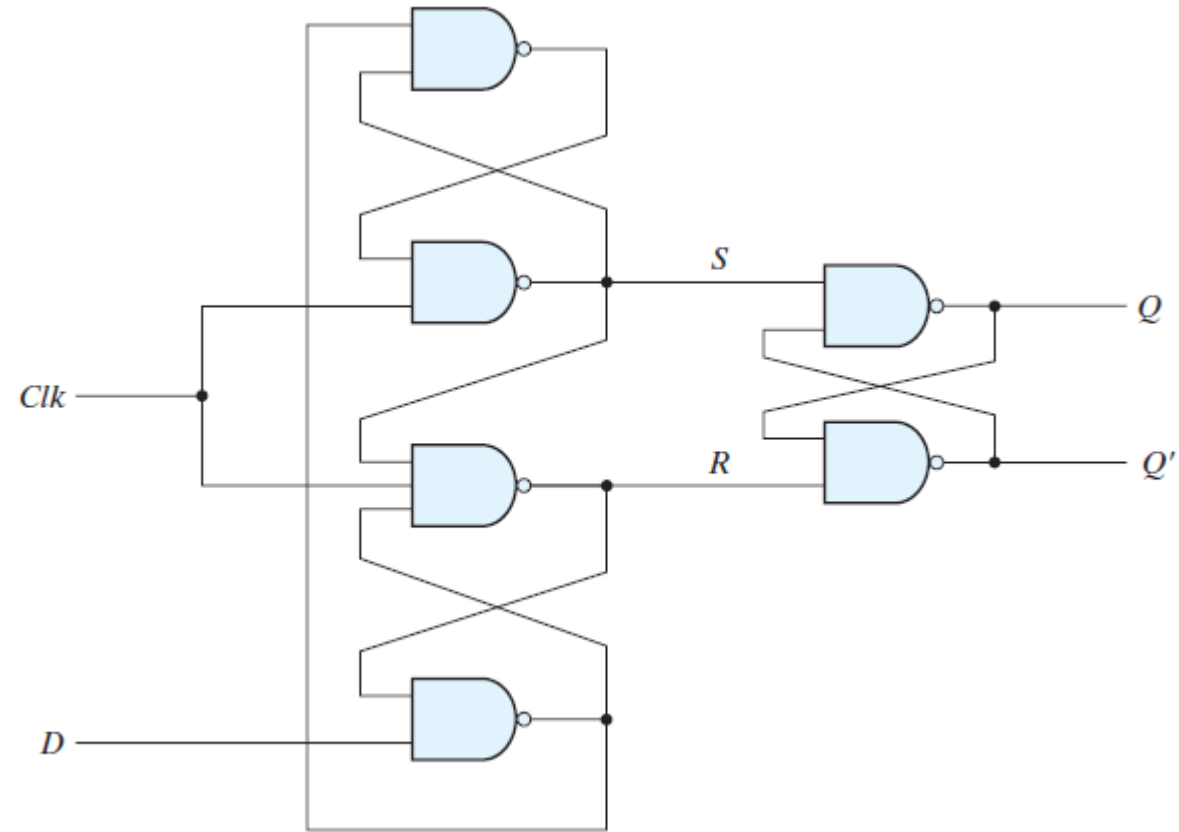


λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - 2<sup>ος</sup> τρόπος κατασκευής - Σύνοψη

- ❖ η τιμή που τίθεται στην είσοδο **D** → μεταφέρεται στην έξοδο **Q** στη θετική μετάβαση του σήματος ρολογιού
  - ❖ η αρνητική μετάβαση του ρολογιού δεν επηρεάζει την έξοδο του φλιπ-φλοπ
  - ❖ όσο το **clk** είναι σε σταθερή κατάσταση (είτε **0** είτε **1**) → δεν επηρεάζεται η έξοδος από αλλαγές της είσοδου **D**
- ✍ αυτός ο τύπος φλιπ-φλοπ αποκρίνεται μόνο στη θετική μετάβαση (από το **0** στο **1**) του σήματος ρολογιού



λογικό διάγραμμα  
ακμοπυροδότητου D φλιπ-φλοπ  
(με μανδαλωτές SR)

# Στοιχεία μνήμης

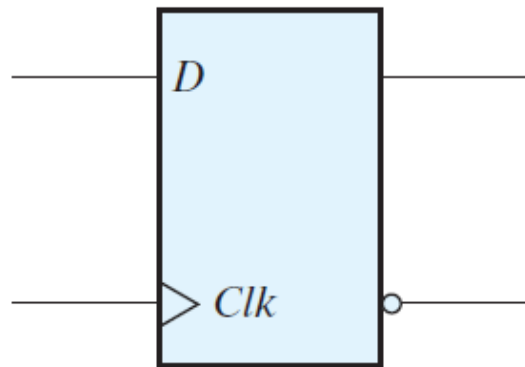
## Ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ - Παρατηρήσεις

- ❖ πρέπει να τηρούμε αυστηρά τις προδιαγραφές που αφορούν το χρονισμό απόκρισης των φλιπ-φλοπ στα δεδομένα εισόδου και στο ρολόι
  1. **χρόνος προετοιμασίας** (setup time): το ελάχιστο χρονικό διάστημα πριν από τη μετάβαση του ρολογιού κατά τη διάρκεια του οποίου η είσοδος D πρέπει να διατηρείται σε σταθερή τιμή
  2. **χρόνος συγκράτησης** (hold time): το ελάχιστο χρονικό διάστημα μετά τη θετική μετάβαση του ρολογιού κατά τη διάρκεια του οποίου η είσοδος D δεν πρέπει να αλλάξει
  3. **χρόνος καθυστέρησης διάδοσης**: το ελάχιστο χρονικό διάστημα μετά την ακμή πυροδότησης, μετά την παρέλευση του οποίου μπορεί ο σχεδιαστής να θεωρήσει ότι οι έξοδοι του φλιπ-φλοπ έχουν σταθεροποιηθεί στη νέα τους κατάσταση
- ❖ οι τιμές αυτές προσδιορίζονται στα εγχειρίδια των κατασκευαστών για τις διάφορες οικογένειες ψηφιακών κυκλωμάτων

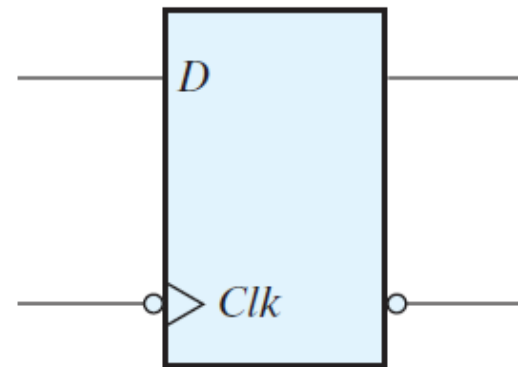
# Στοιχεία μνήμης

## Ακμοπυροδοτούτο D φλιπ-φλοπ - Σχηματικά σύμβολα

- ❖ τα σύμβολα **μοιάζουν** με εκείνα που χρησιμοποιούνται για το **μανδαλωτή D**
- ❖ η **διαφορά** είναι το **τριγωνικό σύμβολο**, μπροστά από την **είσοδο Clk**
  - ▶ δηλώνει ότι η συγκεκριμένη **είσοδος** είναι **δυναμική** → το **φλιπ-φλοπ** αποκρίνεται στις μεταβάσεις (δηλαδή στις ακμές) του **παλμού** του **ρολογιού**
    - ▶ ένας **μικρός κύκλος** → δηλώνει ότι πυροδοτείται στην **αρνητική ακμή**
    - ▶ αλλιώς, η **απουσία** μικρού κύκλου → δηλώνει ότι πυροδοτείται στη **θετική ακμή**



**Θετικά** ακμοπυροδοτούτο



**αρνητικά** ακμοπυροδοτούτο

# Στοιχεία μνήμης

JK φλιπ-φλοπ και T φλιπ-φλοπ

# Στοιχεία μνήμης

## Άλλα φλιπ-φλοπ

- ❖ κάθε **φλιπ-φλοπ** κατασκευάζεται από κατάλληλα διασυνδεδεμένες πύλες
  - ▶ το πιο **οικονομικό** και **αποδοτικό** **φλιπ-φλοπ** είναι το **ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ**
    - ▶ απαιτείται το **μικρότερο** πλήθος πυλών
  - ▶ **άλλοι τύποι** **φλιπ-φλοπ**, κατασκευάζονται με τη χρήση
    - ▶ του **ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ** και
    - ▶ εξωτερικής **συνδυαστικής λογικής**

π.χ.

- ▶ **JK φλιπ-φλοπ**
- ▶ **T φλιπ-φλοπ**

# Στοιχεία μνήμης

## Άλλα φλιπ-φλοπ - Λειτουργίες

κάθε **φλιπ-φλοπ** μπορεί να εκτελέσει το πολύ **τρεις** λειτουργίες:

1. να τεθεί σε **κατάσταση θέσης**
  - ▶ να δώσει **έξοδο 1**
2. να τεθεί σε **κατάσταση μηδενισμού**
  - ▶ να δώσει **έξοδο 0**
3. να **συμπληρώσει** την **έξοδό** του

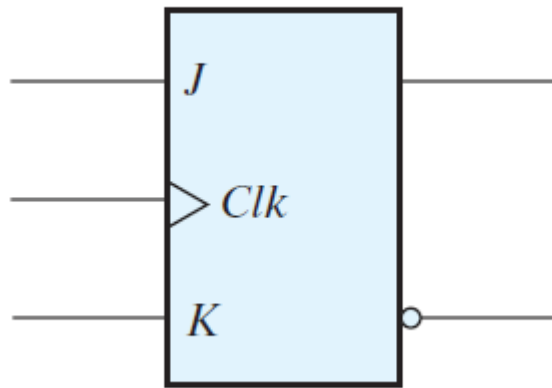
 το **φλιπ-φλοπ D**

- ▶ έχει **μία** μόνο **είσοδο**
- ▶ **μπορεί** να θέσει την **έξοδό** του στο **1** ή στο **0**
  - ▶ ανάλογα με την τιμή που παίρνει η **είσοδος** του ακριβώς **πριν** τη **μετάβαση** του **ρολογιού**

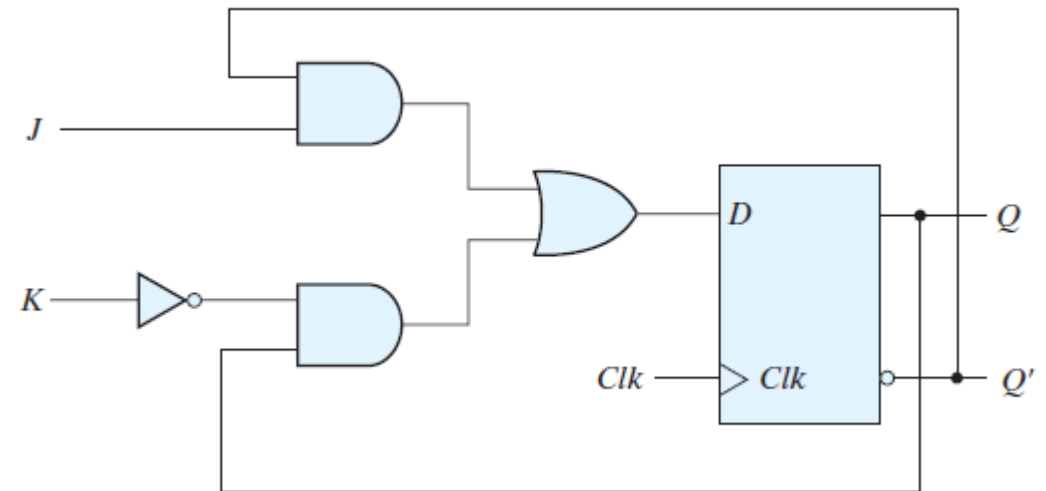
# Στοιχεία μνήμης

## JK φλιπ-φλοπ

- ❖ συγχρονίζεται με ρολόι, έχει δύο εισόδους και μπορεί να εκτελέσει τις τρεις λειτουργίες
  1. όταν ενεργοποιείται η είσοδος **J** → μεταβαίνει σε κατάσταση θέσης
  2. όταν ενεργοποιείται η είσοδος **K** → μεταβαίνει σε κατάσταση μηδενισμού
  3. όταν ενεργοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο εισόδους → η έξοδος συμπληρώνεται



σηματικό σύμβολο  
JK φλιπ-φλοπ



λογικό διάγραμμα  
JK φλιπ-φλοπ



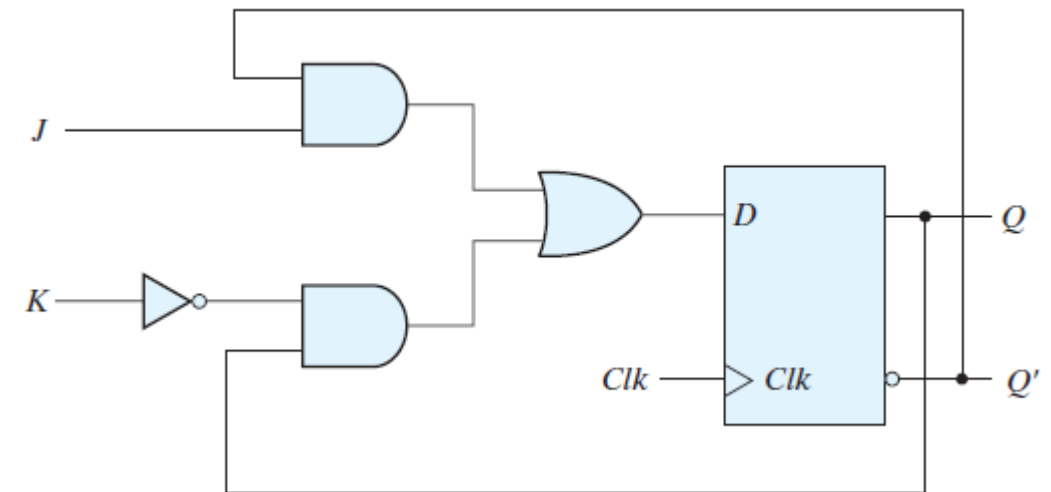
# Στοιχεία μνήμης

## JK φλιπ-φλοπ (II)

- ❖ επαληθεύουμε τη λειτουργία του, εξετάζοντας το **συνδυαστικό κύκλωμα** που δίνει τιμή στην είσοδο **D**:

$$D = JQ' + K'Q$$

- ▶ εάν  $J = 1$  και  $K = 0 \rightarrow D = Q' + Q = 1$ , οπότε η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί τη **θέση** του D φλιπ-φλοπ
- ▶ εάν  $J = 0$  και  $K = 1 \rightarrow D = 0$ , άρα η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί το **μηδενισμό** του D φλιπ-φλοπ
- ▶ εάν  $J = 1$  και  $K = 1 \rightarrow D = Q'$ , άρα η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί τη **συμπλήρωση** της **εξόδου** του D φλιπ-φλοπ
- ▶ εάν  $J = 0$  και  $K = 0 \rightarrow D = Q$ , άρα η επόμενη ακμή του ρολογιού **δεν** προκαλεί αλλαγή της **εξόδου** του D φλιπ-φλοπ



λογικό διάγραμμα  
JK φλιπ-φλοπ

# Στοιχεία μνήμης

## T φλιπ-φλοπ

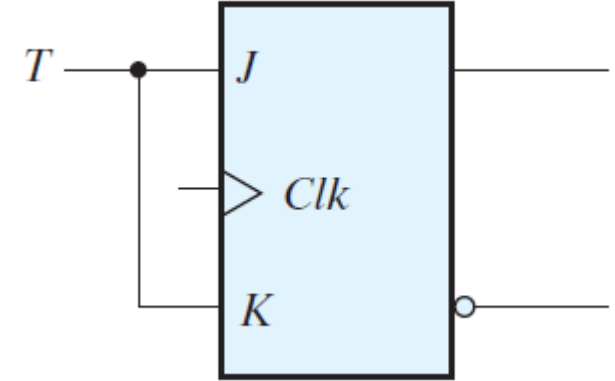
- ❖ κάθε φορά που ενεργοποιείται → συμπληρώνει την έξοδό του
- ❖ τρόποι κατασκευής

### 1. βραχυκύκλωση των εισόδων J και K ενός JK φλιπ-φλοπ

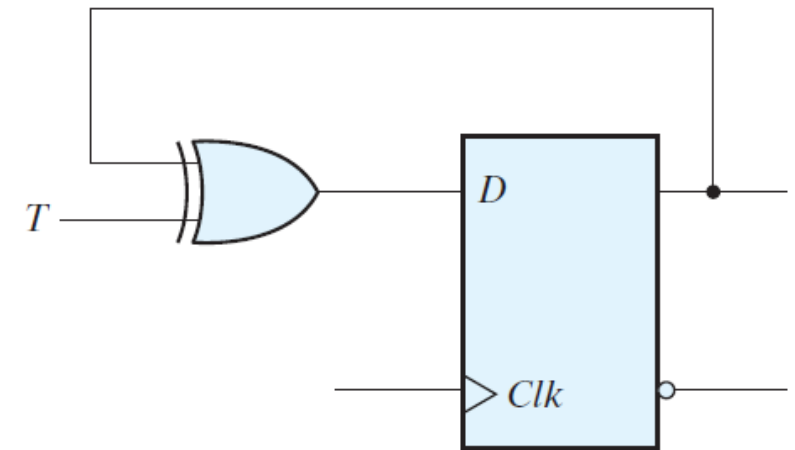
- ▶ όταν  $T = 0$  (δηλαδή αν  $J = 0$  και  $K = 0$ ) → η επόμενη ακμή του ρολογιού δεν προκαλεί αλλαγή της εξόδου του JK φλιπ-φλοπ
- ▶ όταν  $T = 1$  (δηλαδή αν  $J = 1$  και  $K = 1$ ) → η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί τη συμπλήρωση της εξόδου του JK φλιπ-φλοπ

### 2. με τη χρήση ενός D φλιπ-φλοπ και μιας πύλης XOR

- ▶ η αλγεβρική έκφραση της εισόδου D είναι:  $D = TQ' + T'Q$
- ▶ όταν  $T = 0$  (ισχύει αν  $T = Q$ ) → η επόμενη ακμή του ρολογιού δεν προκαλεί αλλαγή της εξόδου του D φλιπ-φλοπ
- ▶ όταν  $T = 1$  (ισχύει αν  $T = Q'$ ) → η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί τη συμπλήρωση της εξόδου του D φλιπ-φλοπ



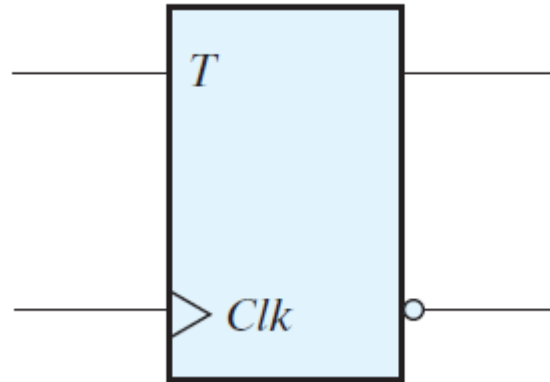
λογικό διάγραμμα T φλιπ-φλοπ  
(με χρήση JK φλιπ-φλοπ)



λογικό διάγραμμα T φλιπ-φλοπ  
(με χρήση D φλιπ-φλοπ & XOR)

# Στοιχεία μνήμης

T φλιπ-φλοπ - Σχηματικό σύμβολο



σχηματικό σύμβολο  
JK φλιπ-φλοπ

# Στοιχεία μνήμης

Φλιπ-φλοπ - Χαρακτηριστικοί πίνακες & χαρακτηριστικές εξισώσεις

# Στοιχεία μνήμης

## Φλιπ-φλοπ - Χαρακτηριστικοί πίνακες

❖ ο χαρακτηριστικός πίνακας ενός **φλιπ-φλοπ** ορίζει τις **λογικές ιδιότητες** του

▶  $Q(t)$ : παρούσα κατάσταση

▶  $Q(t+1)$ : επόμενη κατάσταση

J	K	$Q(t+1)$	
0	0	$Q(t)$	(καμία αλλαγή)
0	1	0	(μηδενισμός)
1	0	1	(θέση)
1	1	$Q'(t)$	(συμπλήρωση εξόδου)

χαρακτηριστικός πίνακας  
JK φλιπ-φλοπ

D	$Q(t+1)$	
0	0	(μηδενισμός)
1	1	(θέση)

χαρακτηριστικός πίνακας  
D φλιπ-φλοπ

T	$Q(t+1)$	
0	$Q(t)$	(καμία αλλαγή)
1	$Q'(t)$	(συμπλήρωση εξόδου)

χαρακτηριστικός πίνακας  
T φλιπ-φλοπ

# Στοιχεία μνήμης

## Φλιπ-φλοπ - Χαρακτηριστικοί εξισώσεις

- ❖ περιγράφουν τις λογικές ιδιότητες ενός φλιπ-φλοπ
  - ▶ οι οποίες ορίζονται στο χαρακτηριστικό πίνακά του

- ❖ **χαρακτηριστικές εξισώσεις**

- ▶ D φλιπ-φλοπ:  $Q(t+1) = D$
- ▶ JK φλιπ-φλοπ:  $Q(t+1) = JQ' + K'Q$
- ▶ T φλιπ-φλοπ:  $Q(t+1) = TQ' + T'Q$

# Στοιχεία μνήμης

Φλιπ-φλοπ - Άμεσες εισοδοι

# Στοιχεία μνήμης

## Φλιπ-φλοπ - Άμεσες εισοδοι

- ❖ κάποια **φλιπ-φλοπ** έχουν **επιπλέον** εισόδους που καλούνται **ασύγχρονες εισοδοι**
- ❖ αναγκάζουν το **φλιπ-φλοπ** να μεταβεί σε μία **συγκεκριμένη** κατάσταση
  - ▶ **ανεξάρτητα** από το **ρολόι**

π.χ.

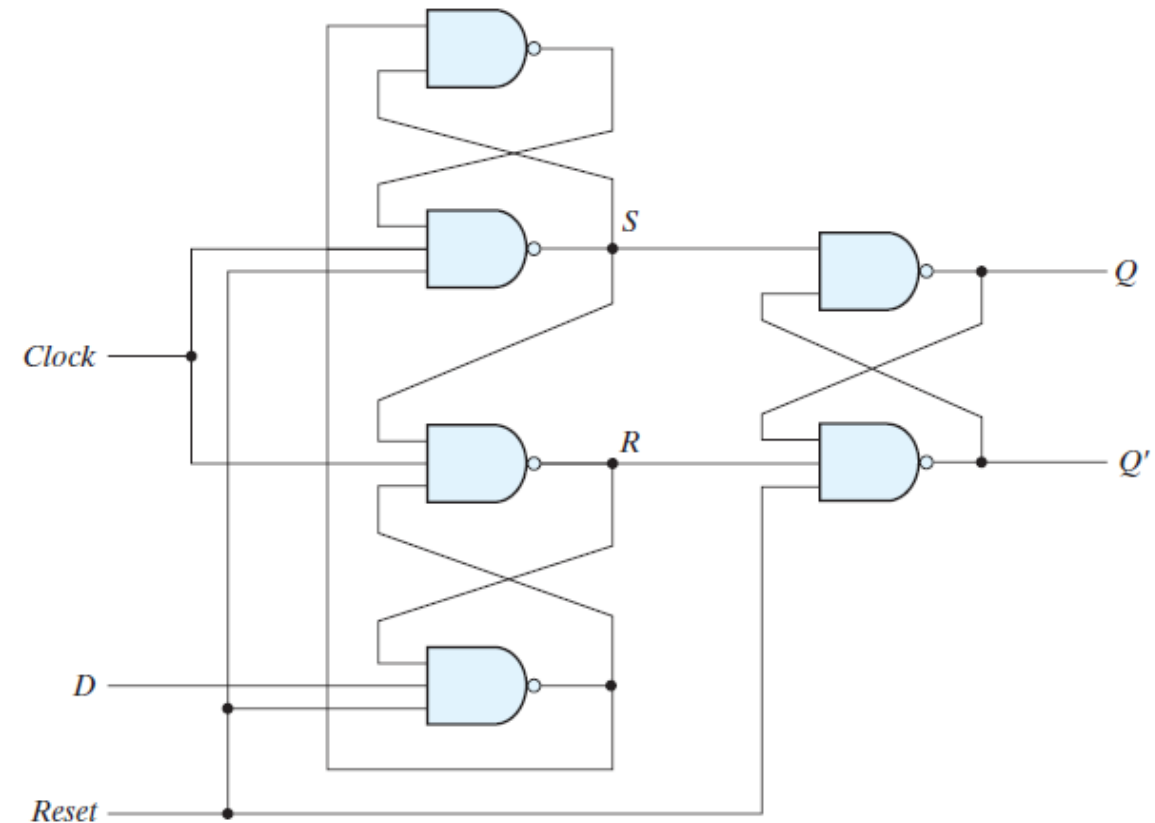
1. **είσοδος άμεσης θέσης** (preset ή direct set): **θέτει** το **φλιπ-φλοπ** στο **1**
  2. **είσοδος άμεσης μηδενισμού** ή **άμεσης επαναφοράς** (clear ή direct reset):  
**επαναφέρει** το **φλιπ-φλοπ** στο **0**
- ❖ όταν ένα ψηφιακό σύστημα τροφοδοτείται με ισχύ, η **κατάσταση** των **φλιπ-φλοπ** **δεν** είναι γνωστή
    - ▶ χρησιμότητα άμεσων εισόδων: **κατάσταση εκκίνησης**
      - ▶ Θέτουν **όλα** τα **φλιπ-φλοπ** του συστήματος σε μία **γνωστή** κατάσταση, **πριν** ξεκινήσει η λειτουργία του **ρολογιού**



# Στοιχεία μνήμης

## Φλιπ-φλοπ - Άμεσες εισοδοι - D φλιπ-φλοπ με ασύγχρονο μηδενισμό

- ❖ έχει επιπλέον **μία είσοδο μηδενισμού (Reset)** συνδεδεμένη με **τρεις** πύλες **NAND**
- ❖ εάν **αυτή** γίνει **0**
  - ▶ αναγκάζει την **έξοδο** της πύλης που παράγει το **Q'** να πάρει τιμή **1**
  - ▶ έτσι, **αναγκάζει** την **έξοδο Q** να γίνει **0**
  - ☞ οπότε, το **φλιπ-φλοπ μηδενίζεται**
- ❖ οι άλλες δύο συνδέσεις της **εισόδου μηδενισμού** διασφαλίζουν ότι:
  - ▶ όσο η **εισόδος μηδενισμού** είναι **0** → η είσοδος **S** του τρίτου **μανδαλωτή SR** παραμένει στο λογικό **1**
    - ▶ **ανεξάρτητα** από τις τιμές των **D** και **clk**



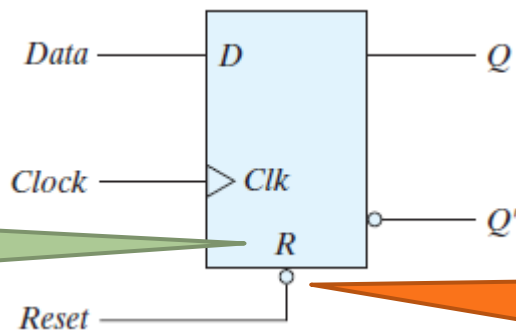
Λογικό διάγραμμα **D** φλιπ-φλοπ  
με **ασύγχρονο μηδενισμό**

# Στοιχεία μνήμης

## Φλιπ-φλοπ - Άμεσες εισοδοι - D φλιπ-φλοπ με ασύγχρονο μηδενισμό (II)

$R$	$Clk$	$D$	$Q$	$Q'$
0	X	X	0	1
1	↑	0	0	1
1	↑	1	1	0

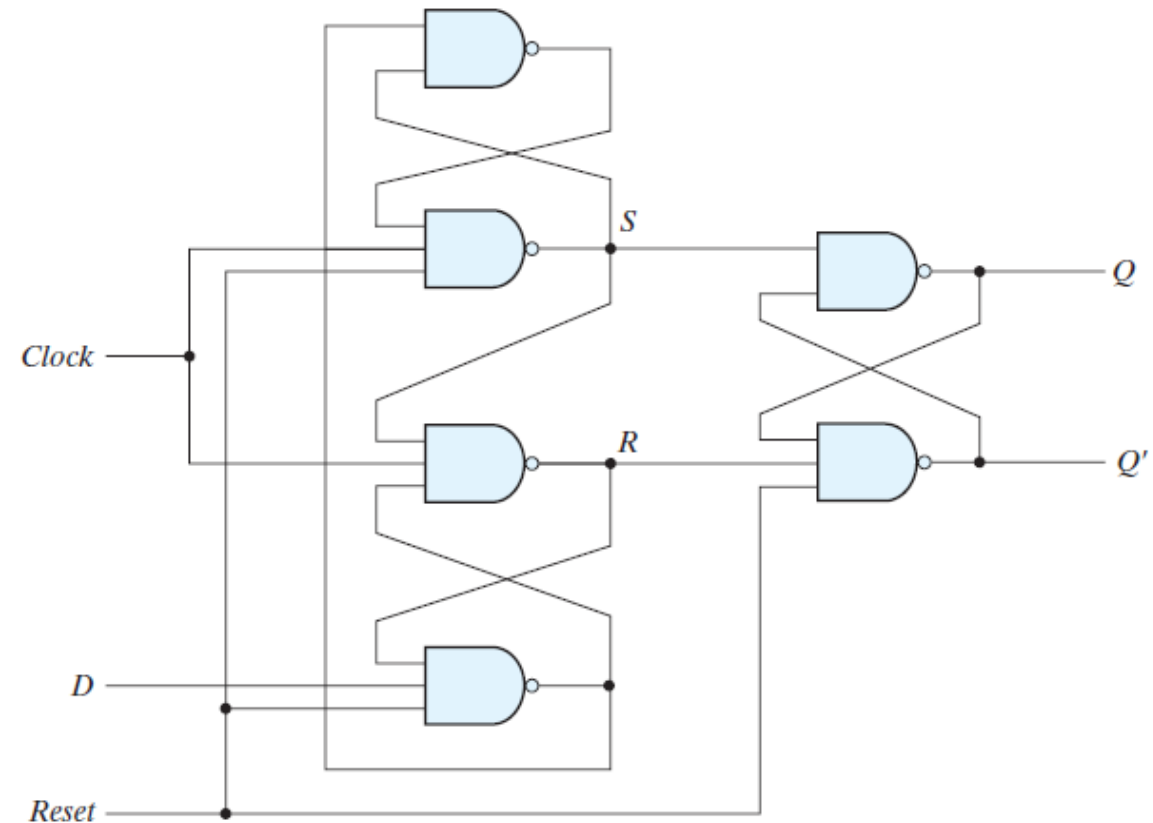
πίνακας λειτουργίας D φλιπ-φλοπ  
με ασύγχρονο μηδενισμό



έχει την πρόθετη  
είσοδο R

το κυκλάκι δείχνει ότι  
ενεργοποιείται από  
επίπεδο σήματος  
λογικού 0

σηματικό σύμβολο D φλιπ-φλοπ  
με ασύγχρονο μηδενισμό



λογικό διάγραμμα D φλιπ-φλοπ  
με ασύγχρονο μηδενισμό

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

- ❖ περιλαμβάνει φλιπ-φλοπ με εισόδους ρολογιού, στις οποίες συνδέεται ένα σήμα ρολογιού

## Ανάλυση

- ❖ **στόχος**: προσδιορισμός της συμπεριφοράς του κυκλώματος
  - ▶ η συμπεριφορά καθορίζεται από: εισόδους, εξόδους και κατάσταση των φλιπ-φλοπ
- ❖ **μέθοδοι**:
  1. προσδιορισμός ειδικών εκφράσεων Boole
    - ▶ περιλαμβάνεται ως παράμετρος ο χρόνος (είτε άμεσα είτε έμμεσα)
  2. προσδιορισμός πίνακα ή διαγράμματος
    - ▶ περιγράφουν και προδιορίζουν τη χρονική αλληλουχία εισόδων, εξόδων και καταστάσεων των φλιπ-φλοπ του κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Εξισώσεις καταστάσεων

- ❖ περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός ακολουθιακού κυκλώματος με ρολόι
- ❖ καθορίζουν την επόμενη κατάσταση ως συνάρτηση της παρούσας κατάστασης και των εισόδων

π.χ.

$$\text{▶ } A(t+1) = A(t)x(t) + B(t)x(t)$$

$$\text{▶ } B(t+1) = A'(t)x(t)$$

ή πιο απλά:

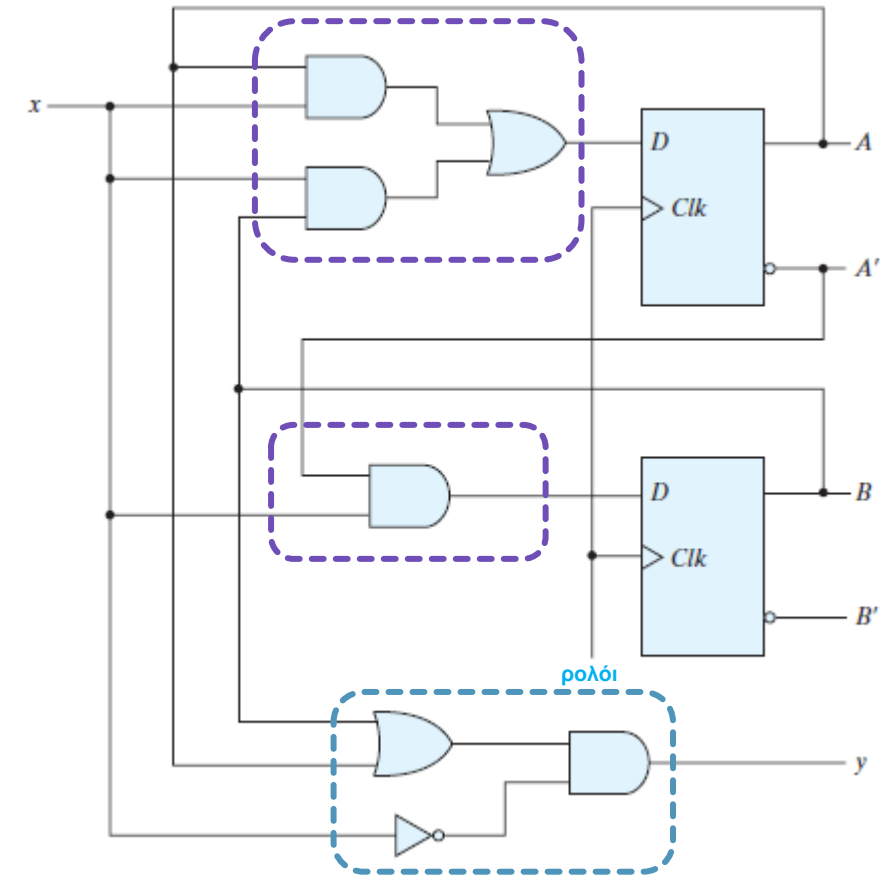
$$\text{▶ } A(t+1) = Ax + Bx$$

$$\text{▶ } B(t+1) = A'x$$

- ❖ τιμή της παρούσας κατάστασης της εξόδου

$$\text{▶ } y(t) = [A(t) + B(t)]x'(t)$$

$$\text{▶ ή πιο απλά: } y = (A + B)x'$$



παράδειγμα ακολουθιακού  
κυκλώματος με ρολόι

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Πίνακας καταστάσεων

- ❖ περιγράφει τη χρονική αλληλουχία εισόδων, εξόδων και καταστάσεων των φλιπ-φλοπ του κυκλώματος

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος
A	B	x	A	B	y
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0

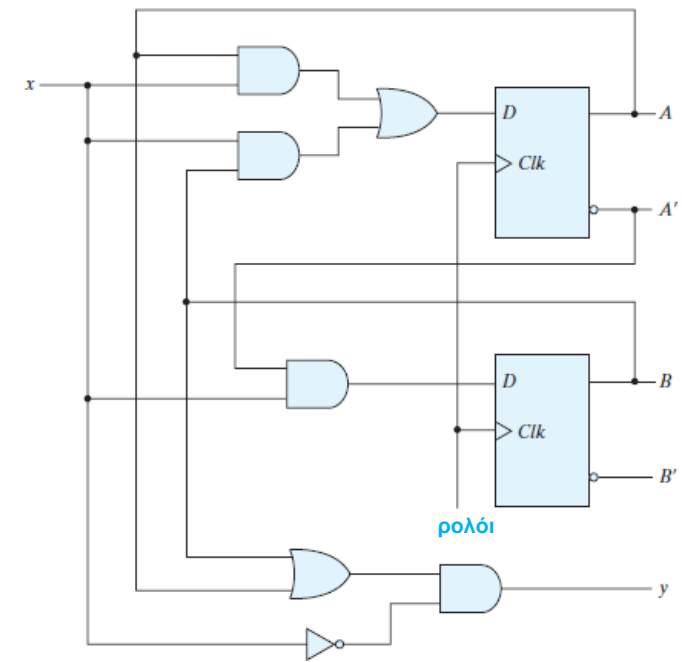
► η συμπλήρωση του πίνακα καταστάσεων γίνεται χρησιμοποιώντας

1. είτε το λογικό διάγραμμα του κυκλώματος
2. είτε τις εξισώσεις καταστάσεων και εξόδων

►  $A(t+1) = Ax + Bx$

►  $B(t+1) = A'x$

►  $y = (A + B)x'$



παράδειγμα ακολουθιακού κυκλώματος με ρολόι

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Πίνακας καταστάσεων (II)

- ❖ ο πίνακας καταστάσεων ενός ακολουθιακού κυκλώματος με  $m$  φλιπ-φλοπ και  $n$  εισόδους  $\rightarrow$  έχει  $2^{m+n}$  γραμμές
  - ▶ γράφουμε τους δυαδικούς αριθμούς  $0 \dots 2^{m+n}-1$  στις στήλες παρούσας κατάστασης και εισόδων
- ❖ το τμήμα της επόμενης κατάστασης θα έχει  $m$  στήλες (μία για κάθε φλιπ-φλοπ)
  - ▶ οι δυαδικές τιμές της επόμενης κατάστασης προκύπτουν από τις εξισώσεις καταστάσεων (ή το λογικό διάγραμμα)
- ❖ το τμήμα εξόδου θα έχει τόσες μεταβλητές όσες και οι μεταβλητές εξόδου
  - ▶ οι δυαδικές τιμές των εξόδων υπολογίζονται από το λογικό διάγραμμα του κυκλώματος (ή από τις συναρτήσεις Boole των εξόδων)

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Πίνακας καταστάσεων - Εναλλακτική μορφή

- ❖ περιγράφει τη χρονική αλληλουχία εισόδων, εξόδων και καταστάσεων των φλιπ-φλοπ του κυκλώματος

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος x	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος y
A	B		A	B	
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0

Παρούσα κατάσταση		Επόμενη κατάσταση				Έξοδος	
		x = 0		x = 1		x = 0	x = 1
A	B	A	B	A	B	y	y
0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0

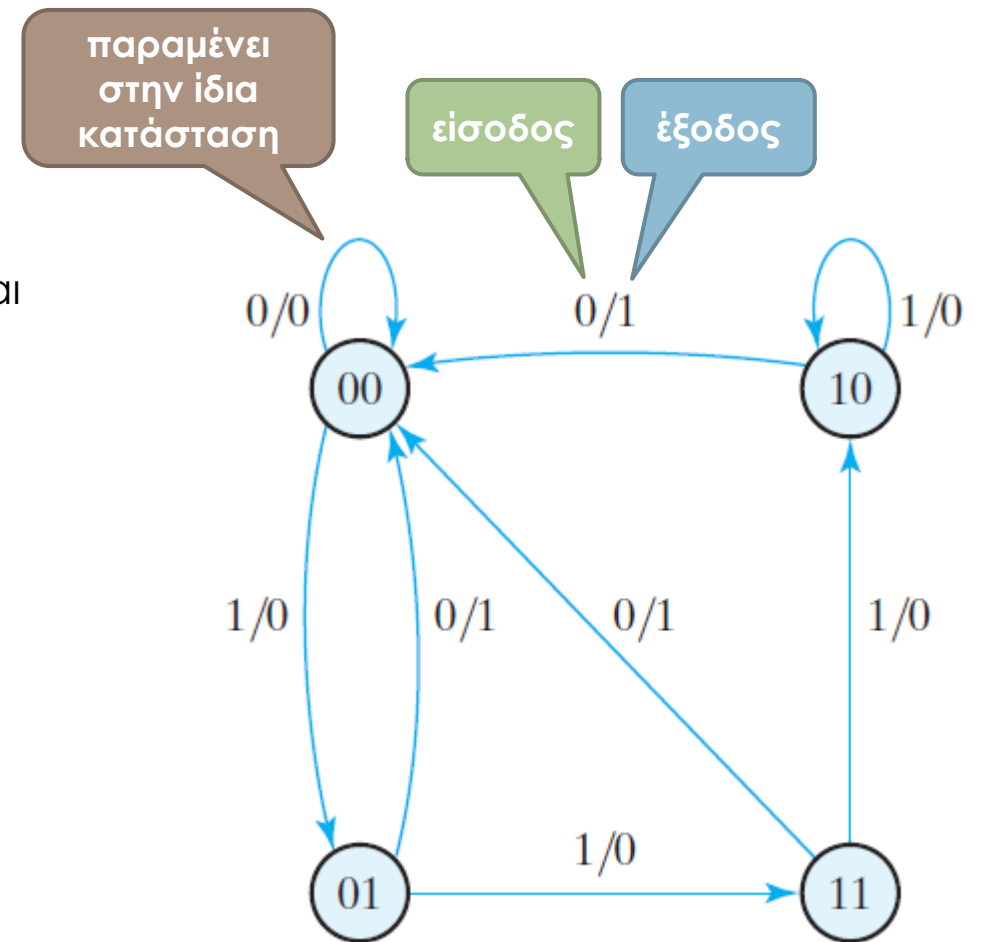


# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Διάγραμμα καταστάσεων

- ❖ παριστάνει γραφικά την πληροφορία που περιέχεται σε έναν **πίνακα καταστάσεων**
  - ▶ οι **καταστάσεις** παριστάνονται με **κύκλους**
  - ▶ οι **μεταβάσεις** σε άλλες καταστάσεις παριστάνονται με **βέλη** που συνδέουν τους κύκλους αυτούς

Παρούσα κατάσταση		Επόμενη κατάσταση				Έξοδος	
		x = 0		x = 1		x = 0	x = 1
A	B	A		B		y	
0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0



διάγραμμα καταστάσεων

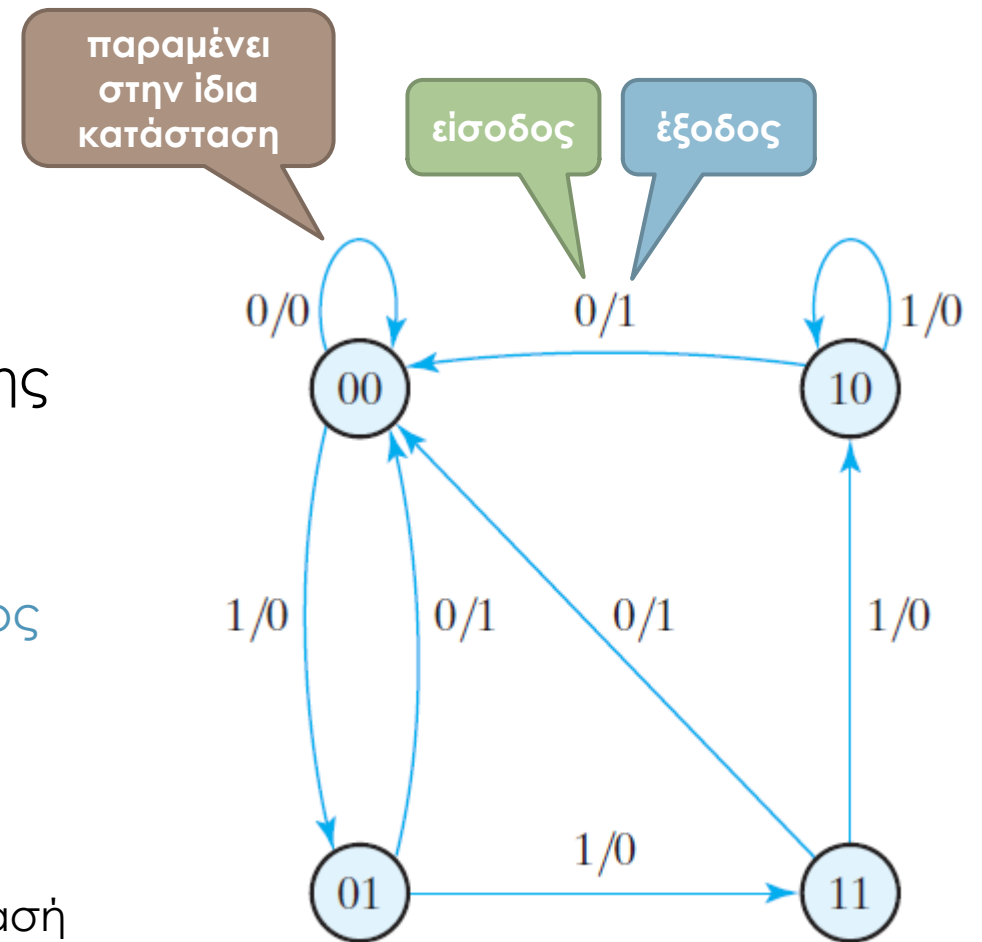
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Διάγραμμα καταστάσεων

- ❖ απεικονίζει τις μεταβάσεις καταστάσεων σε ευκολότερα **κατανοήσιμη** μορφή
- ❖ επομένως, είναι **ευκολότερη** η κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος

π.χ. για το διπλανό διάγραμμα

- ▶ ξεκινώντας από την κατάσταση **00** → η **έξοδος** παραμένει **0** όσο η **είσοδος** είναι **1**
- ▶ το πρώτο **0** που θα εμφανιστεί στην **είσοδο**
  1. **αλλάζει** την **έξοδο** σε **1**
  2. **επαναφέρει** το κύκλωμα στην αρχική κατάστασή του (**00**)



διάγραμμα καταστάσεων

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ

- ❖ Θα χρησιμοποιούμε το **σύμβολο** της **εισόδου** ενός **φλιπ-φλοπ** για να δηλώσουμε τη μεταβλητή της αντίστοιχης **εξίσωσης εισόδου**,
  - ▶ στην **οποία** θα βάζουμε ως δείκτη το όνομα της **εξόδου** του **φλιπ-φλοπ**

π.χ.

- $D_A = Ax + Bx$
- $D_B = A'x$

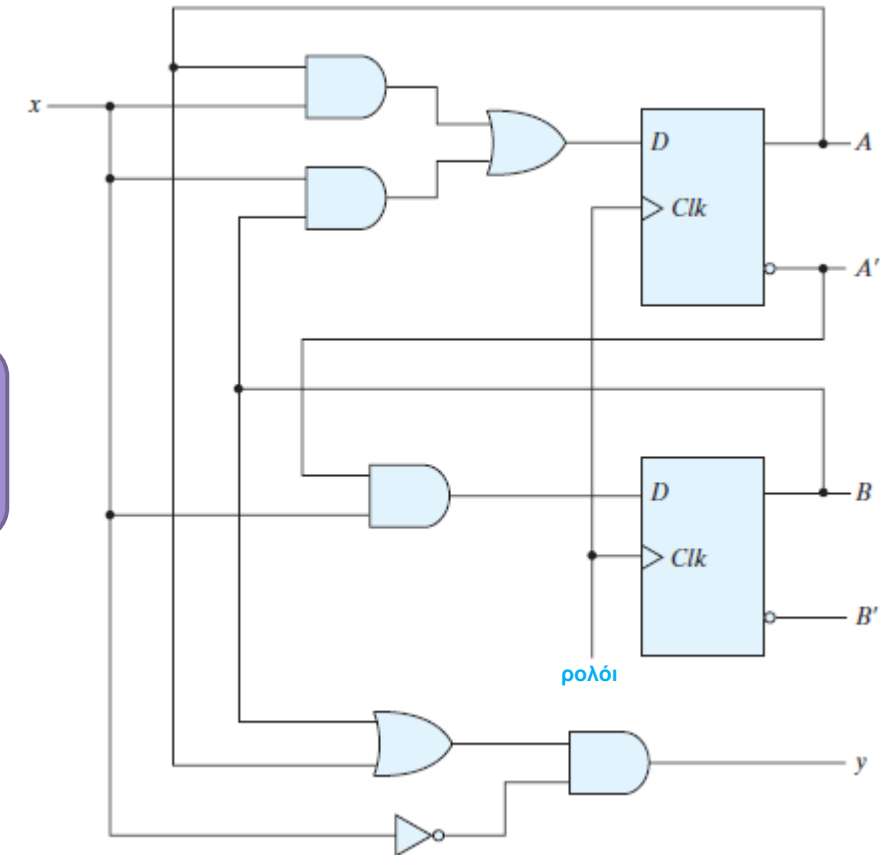
σημείωση: η αλγεβρική έκφραση της εξίσωσης εισόδου ενός D φλιπ-φλοπ είναι ίδια με την αντίστοιχη αλγεβρική έκφραση της εξίσωσης κατάστασής του

- ❖ **μαζί** με την **εξίσωση εξόδου** του κυκλώματος

π.χ.

- $y = (A + B)x'$

παρέχουν **όλη** την πληροφορία που χρειαζόμαστε για να σχεδιάσουμε το αντίστοιχο **λογικό διάγραμμα** του ακολουθιακού κυκλώματος



παράδειγμα ακολουθιακού κυκλώματος με ρολόι

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Παράδειγμα ανάλυσης με D φλιπ-φλοπ

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

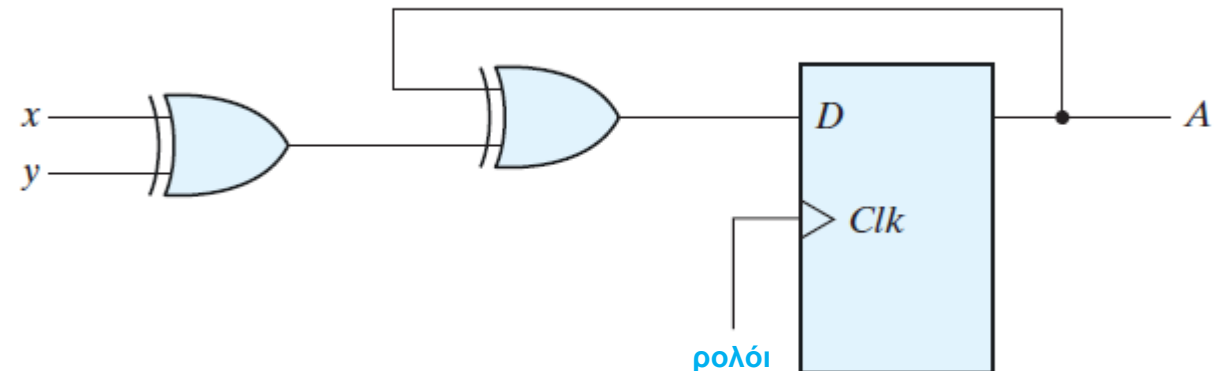
## Ανάλυση - Παράδειγμα με D φλιπ-φλοπ

το κύκλωμα περιγράφεται από την εξίσωση εισόδου:  $D_A = A \oplus x \oplus y$

❖ επομένως:

- ▶ περιέχει ένα D φλιπ-φλοπ με έξοδο A
- ▶ οι μεταβλητές x και y είναι οι είσοδοι του κυκλώματος
- ▶ εφόσον δε δίνονται εξισώσεις εξόδων → η έξοδος του κυκλώματος είναι ίδια με την έξοδο του φλιπ-φλοπ

1. σχεδιασμός λογικού διαγράμματος κυκλώματος



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Παράδειγμα με D φλιπ-φλοπ (II)

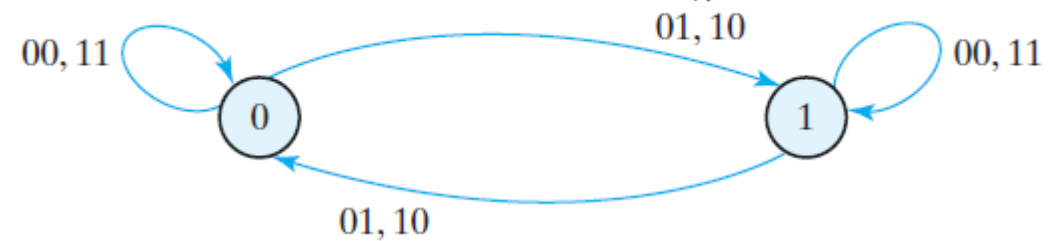
το κύκλωμα περιγράφεται από την εξίσωση εισόδου:

1. σχεδιασμός λογικού διαγράμματος κυκλώματος
2. εξίσωση καταστάσεων:  $A(t+1) = A \oplus x \oplus y$
3. συμπλήρωση πίνακα κατατάσεων
4. σχεδίαση διαγράμματος καταστάσεων

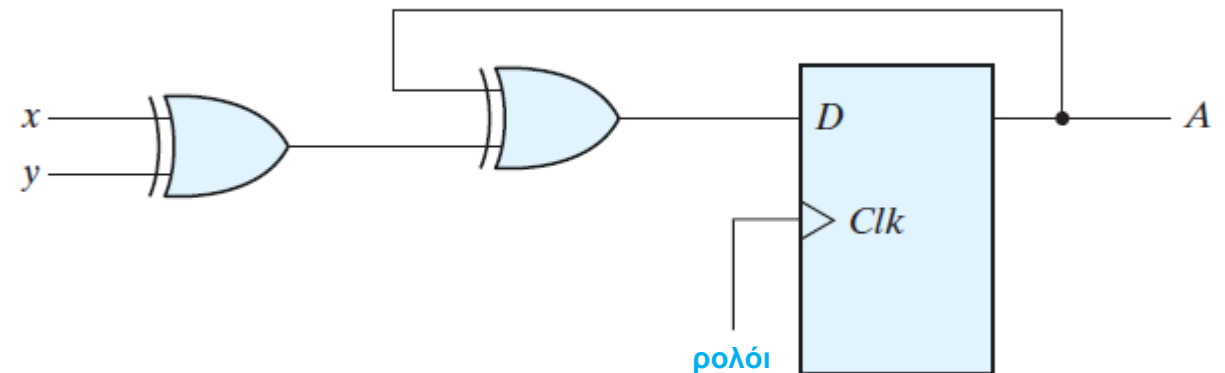
Παρούσα κατάσταση	Είσοδοι		Επόμενη κατάσταση
A	x	y	A
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

πίνακας καταστάσεων

$$D_A = A \oplus x \oplus y$$



διάγραμμα καταστάσεων



λογικό διάγραμμα κυκλώματος

η έξοδος δεν είναι απαραίτητη, επειδή δεν υπάρχει έξοδος που να προκύπτει από το συνδυαστικό υποκύκλωμα

δύο εισοδοι

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Παράδειγμα ανάλυσης με JK φλιπ-φλοπ

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - JK φλιπ-φλοπ - Εισαγωγή

❖ για ένα D φλιπ-φλοπ → η εξίσωση κατάστασης είναι ίδια με την εξίσωση εισόδου

❖ για ένα JK φλιπ-φλοπ για να υπολογίσουμε τις τιμές επόμενης κατάστασης → πρέπει να χρησιμοποιήσουμε

▶ είτε τον αντίστοιχο χαρακτηριστικό πίνακα

▶ είτε την αντίστοιχη χαρακτηριστική εξίσωση

$$Q(t+1) = JQ' + K'Q$$

J	K	Q(t+1)	
0	0	Q(t)	(καμία αλλαγή)
0	1	0	(μηδενισμός)
1	0	1	(θέση)
1	1	Q'(t)	(συμπλήρωση εξόδου)

χαρακτηριστικός πίνακας  
JK φλιπ-φλοπ



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση - JK (ή T) φλιπ-φλοπ με χρήση χαρακτηριστικού πίνακα

υπολογίζουμε τις τιμές επόμενης κατάστασης ως εξής:

1. **προσδιορίζουμε** τις εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ

- ▶ χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές

- ▶ την παρούσα κατάσταση και

- ▶ τις μεταβλητές εισόδου

2. **καταγράφουμε** σε πίνακα όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των δυαδικών τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών των εξισώσεων εισόδου φλιπ-φλοπ

3. **χρησιμοποιούμε** τον αντίστοιχο χαρακτηριστικό πίνακα φλιπ-φλοπ

- ▶ για να προσδιορίσουμε τις τιμές επόμενης κατάστασης στον πίνακα καταστάσεων

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ - Χρήση χαρακτηριστικού πίνακα

❖ έστω το διπλανό λογικό διάγραμμα του ακολουθιακού κυκλώματος

▶ το κύκλωμα δεν έχει εξόδους → οι **έξοδοι** του κυκλώματος είναι **ίδιες** με τις **εξόδους** των φλιπ-φλοπς

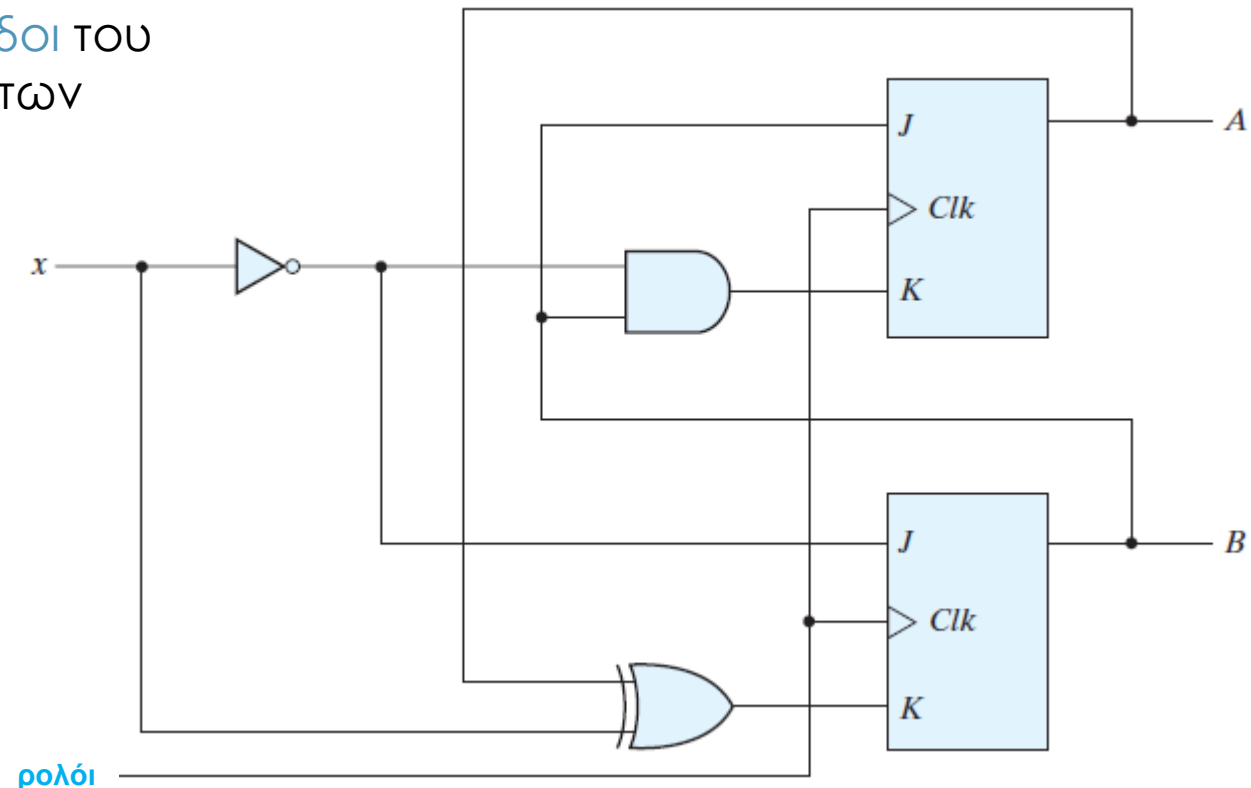
❖ **1<sup>ο</sup> βήμα:** εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ

▶  $J_A = B$

▶  $K_A = Bx'$

▶  $J_B = x'$

▶  $K_B = A'x + Ax' = A \oplus x$



Λογικό διάγραμμα κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ - Χρήση χαρακτηριστικού πίνακα (II)

❖ **1<sup>ο</sup> βήμα:** εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ

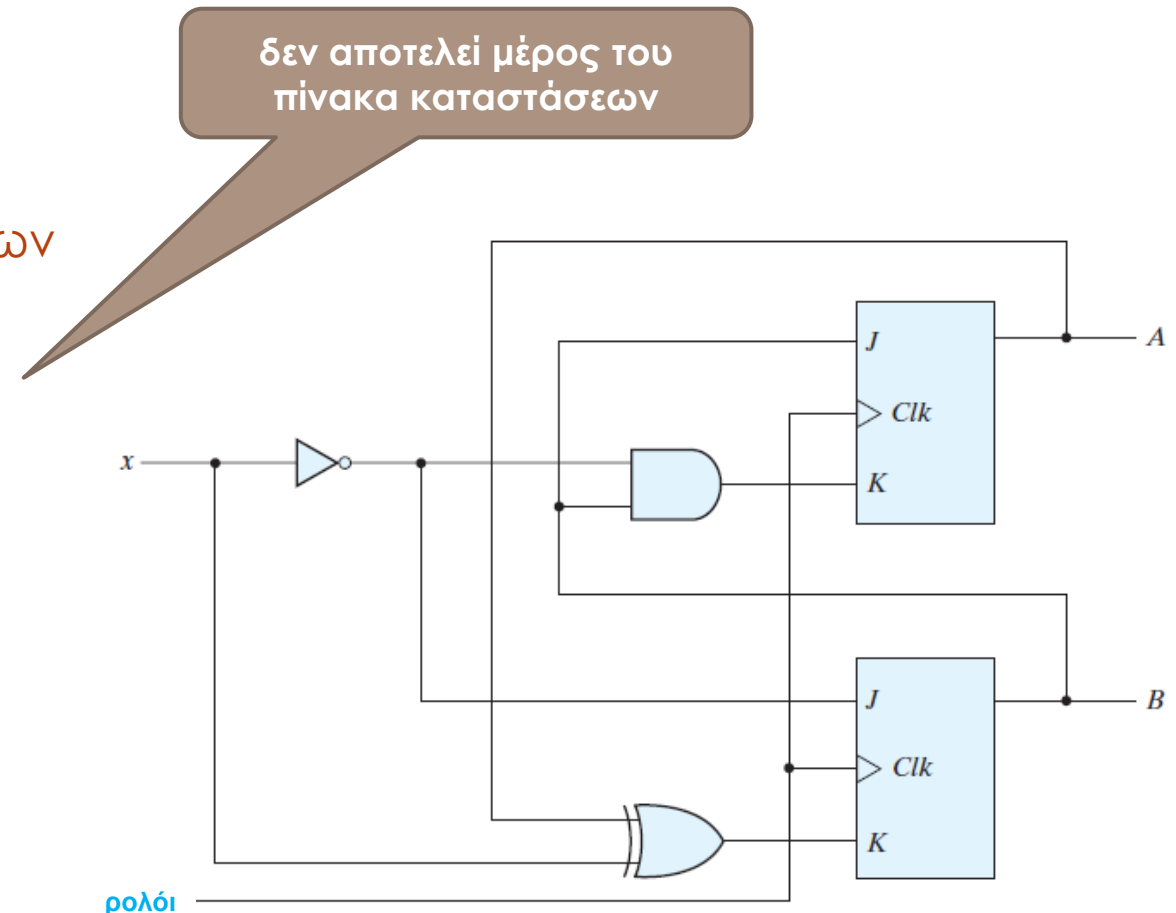
▶  $J_A = B$  &  $K_A = Bx'$

▶  $J_B = x'$  &  $K_B = A'x + Ax' = A \oplus x$

❖ **2<sup>ο</sup> & 3<sup>ο</sup> βήμα:** συμπλήρωση πίνακα καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση		Είσοδοι φλιπ-φλοπ			
A	B	x	A	B	$J_A$	$K_A$	$J_B$	$K_B$
0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	0	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	0	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	0	0	0

πίνακας καταστάσεων



λογικό διάγραμμα κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση - JK (ή T) φλιπ-φλοπ με χρήση χαρακτηριστικών εξισώσεων

υπολογίζουμε τις τιμές επόμενης κατάστασης ως εξής:

1. **προσδιορίζουμε** τις εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ

- ▶ χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές
  - ▶ την παρούσα κατάσταση και
  - ▶ τις μεταβλητές εισόδου

2. **αντικαθιστούμε** τις ανεξάρτητες μεταβλητές της χαρακτηριστικής εξίσωσης κάθε φλιπ-φλοπ με τις τιμές των μεταβλητών αυτών που μας δίνουν οι εξισώσεις εισόδων αυτού του φλιπ-φλοπ → οπότε, παίρνουμε τις εξισώσεις καταστάσεων του ακολουθιακού κυκλώματος

3. **χρησιμοποιούμε** τις αντίστοιχες εξισώσεις καταστάσεων για να προσδιορίσουμε τις τιμές επόμενης κατάστασης

- ▶ τις οποίες γράφουμε στον πίνακα καταστάσεων

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ - Χρήση χαρακτηριστικών εξισώσεων

❖ **1<sup>ο</sup> βήμα:** εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ

▶  $J_A = B$  &  $K_A = Bx'$

▶  $J_B = x'$  &  $K_B = A'x + Ax' = A \oplus x$

✍️ χαρακτηριστικές εξισώσεις:

▶  $A(t+1) = J_A A' + K_A A$

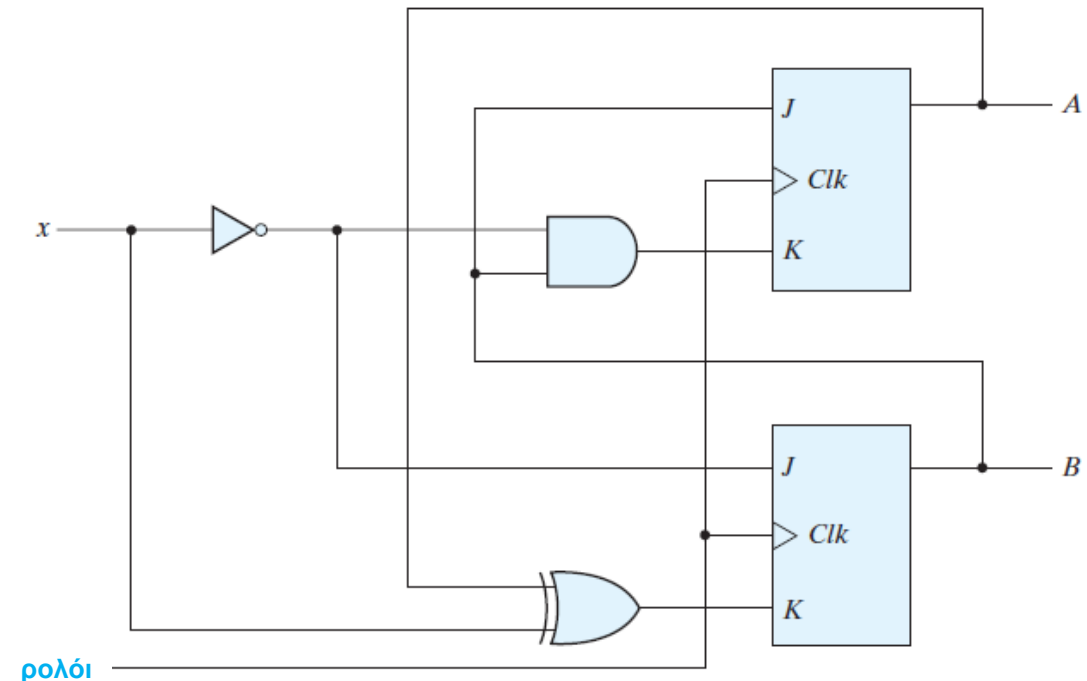
▶  $B(t+1) = J_B B' + K_B B$

❖ **2<sup>ο</sup> βήμα:** αντικατάσταση τιμών →  
εξισώσεις καταστάσεων

▶  $A(t+1) = J_A A' + K_A A = BA' + (Bx')'A$   
 $= A'B + AB' + Ax$

▶  $B(t+1) = J_B B' + K_B B = x'B' + (A \oplus x)'B$   
 $= B'x' + ABx + A'Bx'$

❖ **3<sup>ο</sup> βήμα:** προσδιορισμός τιμών επόμενων  
καταστάσεων (χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις καταστάσεων)



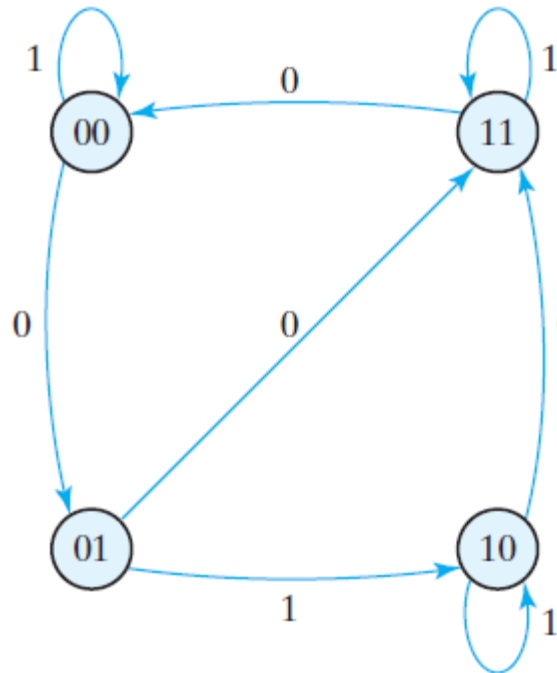
λογικό διάγραμμα κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ - Διάγραμμα καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση	
A	B		A	B
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0
0	1	0	1	1
0	1	1	1	0
1	0	0	1	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	1	1	1

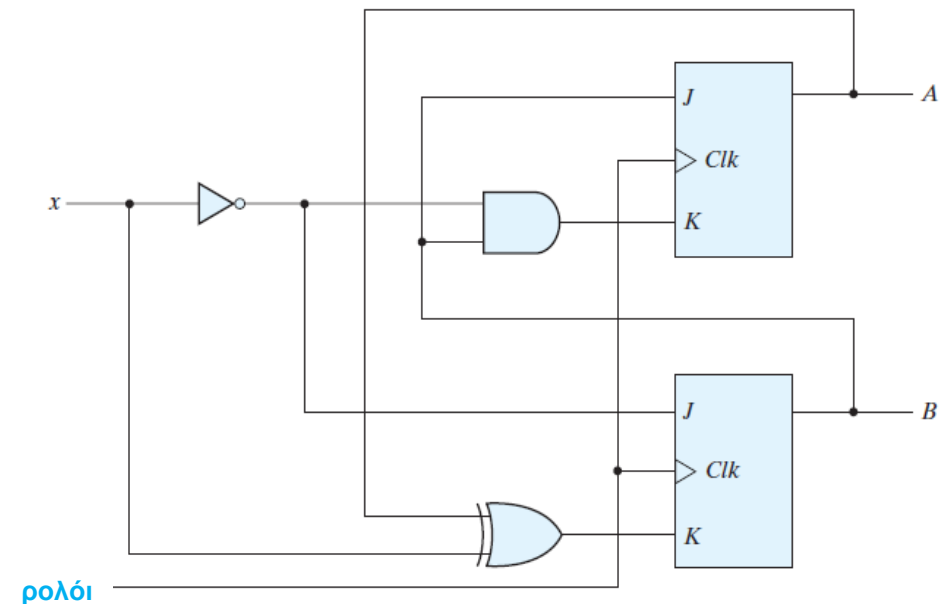
πίνακας καταστάσεων



διάγραμμα καταστάσεων

είσοδος

η έξοδος δεν είναι απαραίτητη, επειδή δεν υπάρχει έξοδος που να προκύπτει από το συνδυαστικό υποκύκλωμα



λογικό διάγραμμα κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Παράδειγμα ανάλυσης με T φλιπ-φλοπ

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - T φλιπ-φλοπ - Εισαγωγή

- ❖ για ένα T φλιπ-φλοπ για να υπολογίσουμε τις τιμές επόμενης κατάστασης → πρέπει να χρησιμοποιήσουμε

- ▶ είτε τον αντίστοιχο χαρακτηριστικό πίνακα
- ▶ είτε την αντίστοιχη χαρακτηριστική εξίσωση

$$Q(t+1) = TQ' + T'Q$$

- ❖ η διαδικασία ανάλυσης που ακολουθούμε είναι ίδια με την περίπτωση των JK φλιπ-φλοπ

T	Q(t+1)	
0	Q(t)	(καμία αλλαγή)
1	Q'(t)	(συμπλήρωση εξόδου)

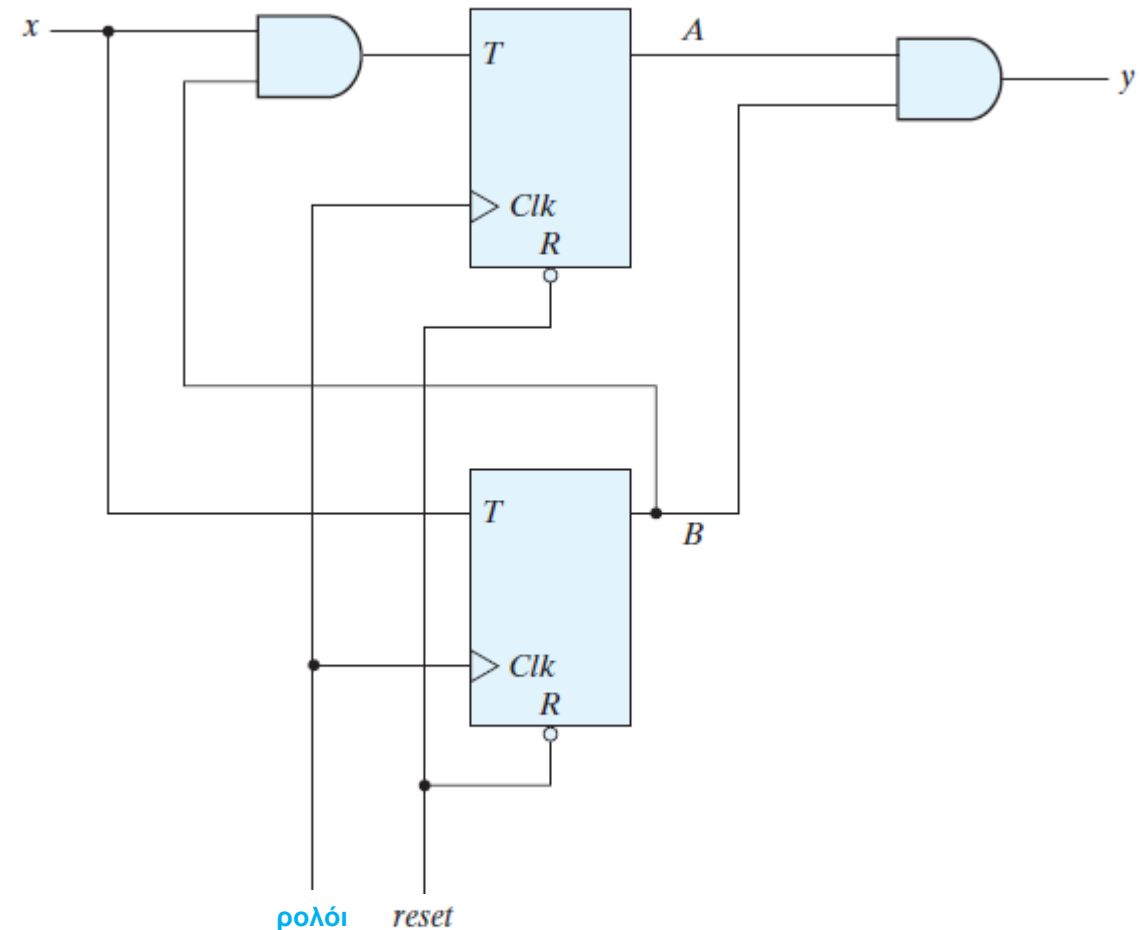
χαρακτηριστικός πίνακας  
T φλιπ-φλοπ



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ

- ❖ έστω το διπλανό λογικό διάγραμμα του ακολουθιακού κυκλώματος
- ❖ εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ
  - ▶  $T_A = Bx$
  - ▶  $T_B = x$
- ❖ εξίσωση εξόδου
  - ▶  $y = AB$



λογικό διάγραμμα κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ (II)

❖ εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ

▶  $T_A = Bx$

▶  $T_B = x$

✍️ χαρακτηριστικές εξισώσεις:

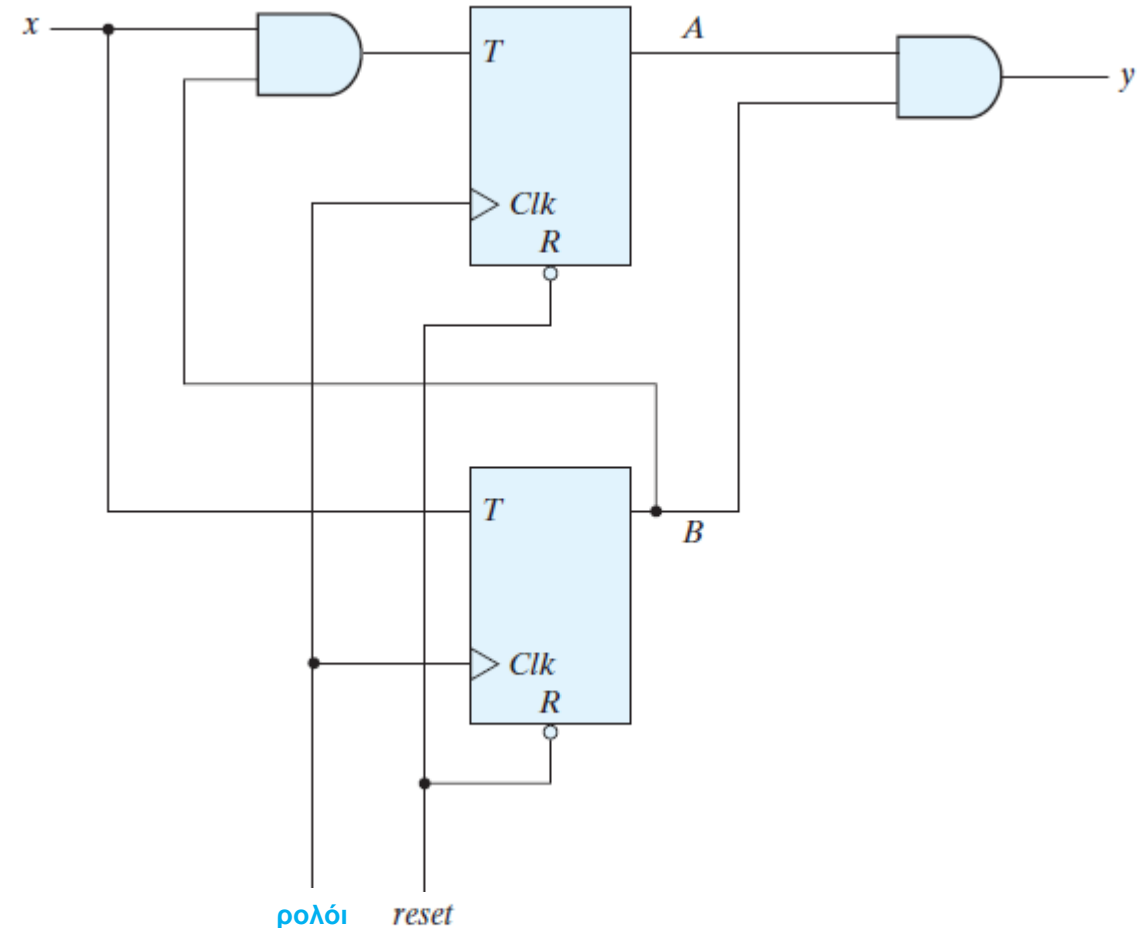
▶  $A(t+1) = T_A'A + T_AA'$

▶  $B(t+1) = T_B'B + T_BB'$

❖ αντικατάσταση τιμών → εξισώσεις καστάσεων

▶  $A(t+1) = T_A'A + T_AA' = (Bx)'A + BxA'$   
 $= AB' + Ax' + A'Bx$

▶  $B(t+1) = T_B'B + T_BB' = x'B + xB'$   
 $= x \oplus B$



λογικό διάγραμμα κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Ανάλυση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ (III)

η έξοδος υπολογίζεται βάσει της παρούσας κατάστασης

### ❖ εξισώσεις καταστάσεων

$$\begin{aligned} \text{▶ } A(t+1) &= T_A' A + T_A A' = (Bx)' A + BxA' \\ &= AB' + Ax' + A'Bx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{▶ } B(t+1) &= T_B' B + T_B B' = x'B + xB' \\ &= x \oplus B \end{aligned}$$

### ❖ εξίσωση εξόδου

$$\text{▶ } y = AB$$

### ❖ πίνακας καταστάσεων

▶ οι τιμές επόμενων καταστάσεων υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις καταστάσεων

▶ οι τιμές εξόδου υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση εξόδου

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος
A	B	x	A	B	x
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	1
1	1	1	0	0	1

πίνακας καταστάσεων

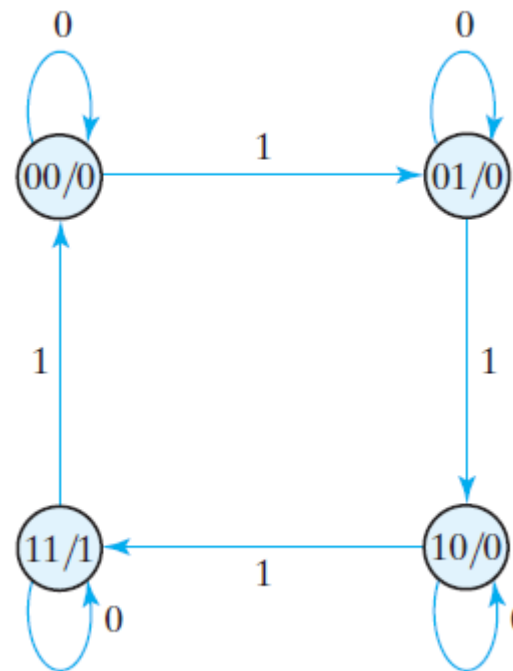
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Ανάλυση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ - Διάγραμμα καταστάσεων

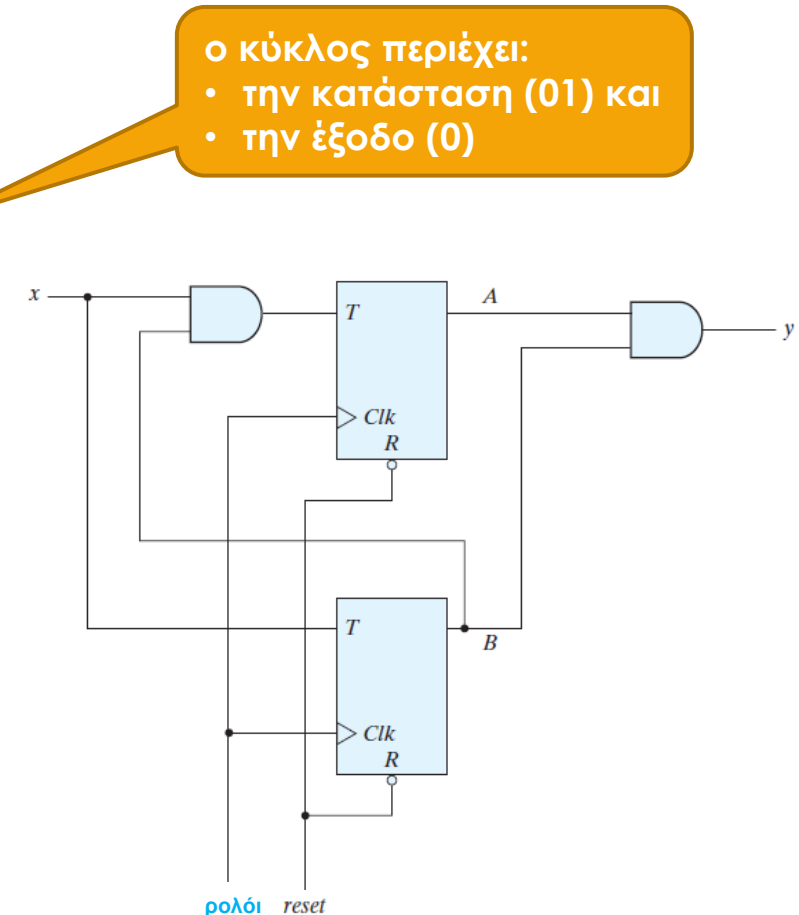
- ❖ η έξοδος είναι ανεξάρτητη της εισόδου και εξαρτάται μόνο από την παρούσα κατάσταση

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος
A	B		A	B	
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	1
1	1	1	0	0	1

πίνακας καταστάσεων



διάγραμμα καταστάσεων



λογικό διάγραμμα κυκλώματος

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

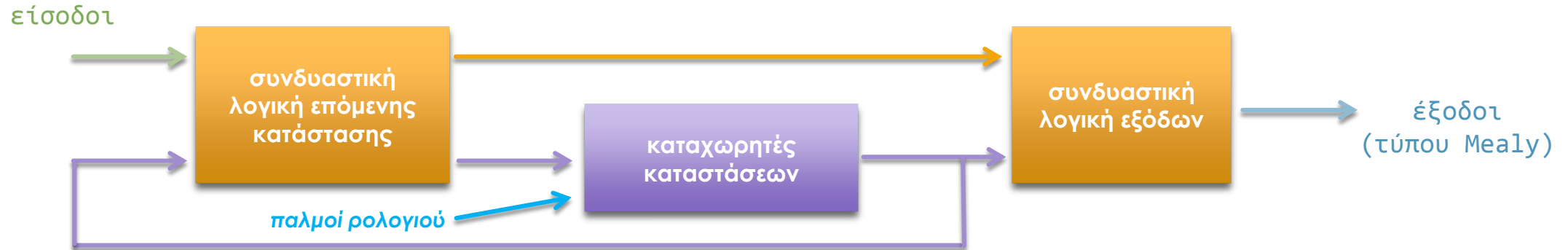
Μοντέλα μηχανών πεπερασμένων καταστάσεων Mealy και Moore

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

- ❖ το γενικό μοντέλο ενός ακολουθιακού κυκλώματος έχει υποχρεωτικά **εισόδους**, **εξόδους** και **εσωτερικές καταστάσεις**
- ❖ συνήθως χρησιμοποιούμε τα ακόλουθα δύο μοντέλα
  1. μοντέλο **Mealy**
  2. μοντέλο **Moore**
- ❖ τα δύο αυτά μοντέλα
  - ▶ **διαφέρουν** στον τρόπο με τον οποίο **παράγονται** οι **εξόδοι**
    1. στο μοντέλο **Mealy** → οι **εξόδοι** είναι **συναρτήσεις** της παρούσας κατάστασης **και** των **εισόδων**
    2. στο μοντέλο **Moore** → οι **εξόδοι** είναι **συναρτήσεις μόνο** της παρούσας κατάστασης
  - ▶ ονομάζονται **μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων**
- ❖ ένα κύκλωμα μπορεί να έχει και τους δύο τύπους **εξόδων**

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Μοντέλο Mealy και μοντέλο Moore



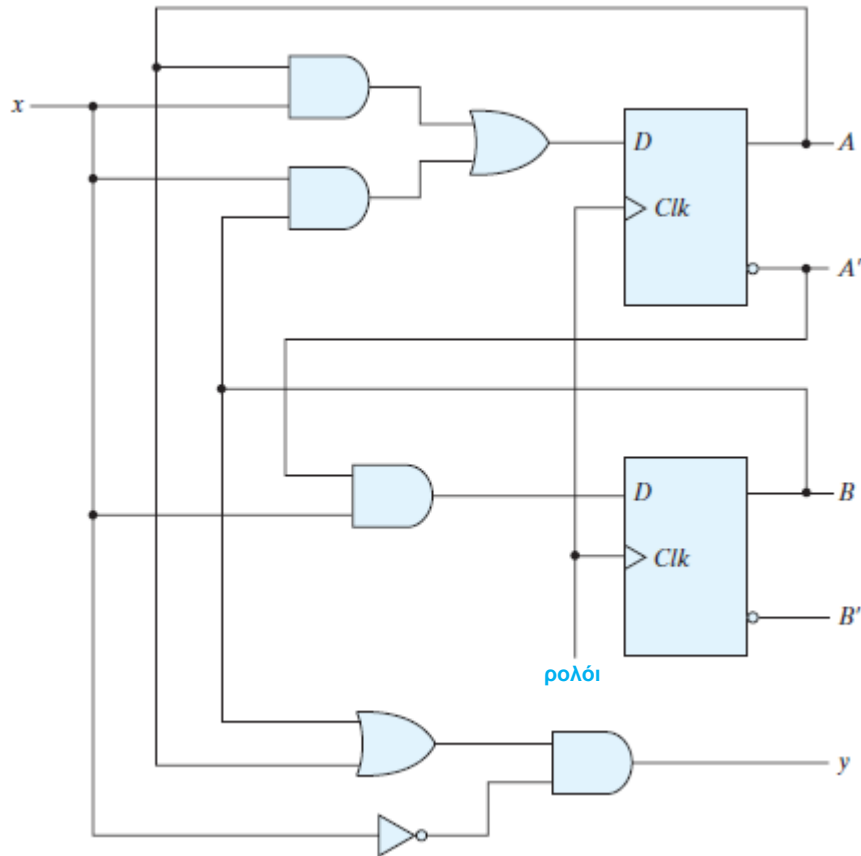
**Μηχανή Mealy**



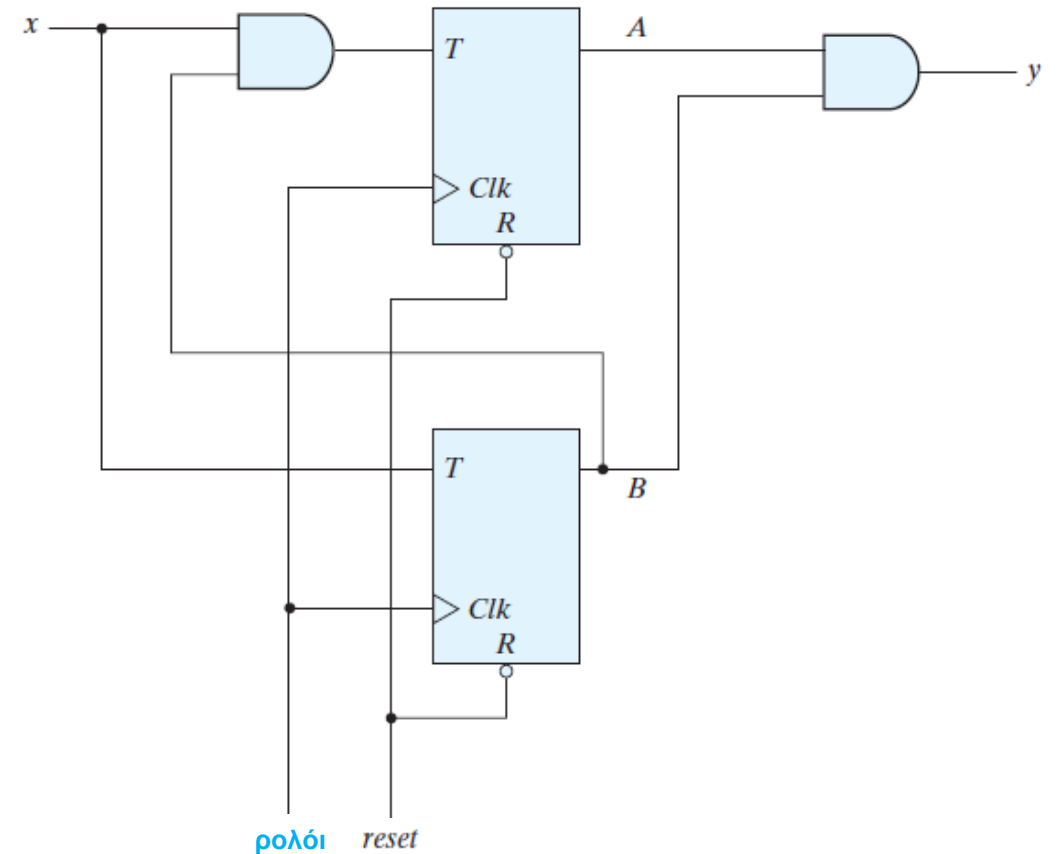
**Μηχανή Moore**

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Μοντέλο Mealy και μοντέλο Moore - Παραδείγματα



παράδειγμα ακολουθιακού κυκλώματος  
με ρολόι, **τύπου Mealy**



παράδειγμα ακολουθιακού κυκλώματος  
με ρολόι, **τύπου Moore**



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Μοντέλο Mealy και μοντέλο Moore - Έξοδοι

- ❖ σε ένα μοντέλο **Moore** → οι **έξοδοι** των ακολουθιακών κυκλωμάτων είναι **υποχρεωτικά** συγχρονισμένες με το **ρολόι**
  - ▶ καθώς εξαρτώνται μόνο από τις **εξόδους** των **φλιπ-φλοπ**  
(οι οποίες, εκ της λειτουργίας των **φλιπ-φλοπ**, είναι **συγχρονισμένες** με το ρολόι)
- ❖ σε ένα μοντέλο **Mealy**
  - ▶ αν οι **είσοδοι** **αλλάξουν** κατά τη διάρκεια του κύκλου του **ρολογιού** → οι **έξοδοι** **μπορεί** να αλλάξουν → οι **έξοδοι** μπορεί να πάρουν **λανθασμένες** τιμές για ένα σύντομο χρονικό διάστημα
    - ▶ λόγω της **καθυστέρησης** που μπορεί να παρουσιαστεί από τη στιγμή που αλλάζουν οι **είσοδοι** μέχρι τη στιγμή που αλλάζουν οι **έξοδοι** των **φλιπ-φλοπ**
  - ▶ για να δουλέψει σωστά
    1. οι **είσοδοι** **πρέπει** να **συγχρονίζονται** με το **ρολόι** και να αλλάζουν στην ανενεργή ακμή του
      - ▶ ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι είσοδοι των **φλιπ-φλοπ** θα είναι ήδη **σταθεροποιημένες πριν** από την ενεργή ακμή του επόμενου **παλμού** του ρολογιού
    2. οι **έξοδοι** του να διαβάζονται **αμέσως πριν** από την ακμή του επόμενου **παλμού** του ρολογιού

# Ελαχιστοποίηση και κωδικοποίηση καταστάσεων

ένα βήμα πριν τη σχεδίαση ακολουθιακών κυκλωμάτων...

# Ελαχιστοποίηση και κωδικοποίηση καταστάσεων

## Εισαγωγή

- ❖ κατά την **ανάλυση** ενός ακολουθιακού κυκλώματος
  - ▶ ξεκινάμε από το **λογικό διάγραμμα** και
  - ▶ καταλήγουμε στον **πίνακα καταστάσεων** ή στο **διάγραμμα καταστάσεων**

- ❖ κατά τη **σχεδίαση** (ή **σύνθεση**) ενός ακολουθιακού κυκλώματος
  - ▶ ξεκινάμε από ένα **σύνολο προδιαγραφών** και
  - ▶ καταλήγουμε στο σχετικό **λογικό διάγραμμα**

πριν συζητήσουμε τη διαδικασία της **σχεδίασης**

- ▶ Θα **εξετάσουμε** συγκεκριμένες **ιδιότητες** των ακολουθιακών κυκλωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την **απλοποίηση** ενός υπό σχεδίαση κυκλώματος
  - ▶ **μείωση** του **πλήθους** των **πυλών** και των **φλιπ-φλοπ** → **μείωση** κόστους

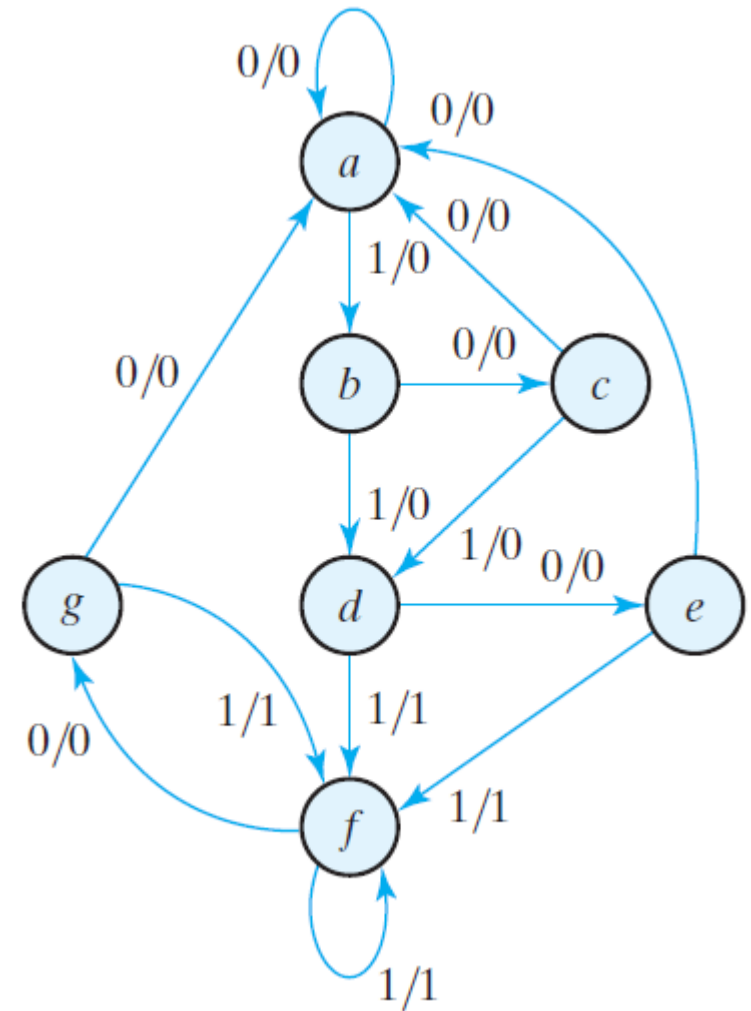
# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

- ❖ μείωση του πλήθους των φλιπ-φλοπ ενός ακολουθιακού κυκλώματος
    - ▶  $m$  φλιπ-φλοπ μας επιτρέπουν να διακρίνουμε  $2^m$  καταστάσεις
  - ❖ αλγόριθμοι ελαχιστοποίησης καταστάσεων: επιδιώκουν τη μείωση του αριθμού καταστάσεων ενός πίνακα καταστάσεων
    - χωρίς να χρειαστεί αλλαγή των προδιαγραφών των χρονικών ακολουθιών των εισόδων και των εξόδων του υπό σχεδίαση κυκλώματος
- ώστε (πιθανώς) να μειωθούν τα φλιπ-φλοπ
- ✂ ωστόσο, αυτό δεν είναι σίγουρο
  - 👉 επίσης, είναι πιθανό το ισοδύναμο κύκλωμα με τα λιγότερα φλιπ-φλοπ → να έχει περισσότερες πύλες στο συνδυαστικό μέρος του

# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

## Παράδειγμα

- ❖ έστω ότι το διπλανό **διάγραμμα καταστάσεων** αποτελεί την **προδιαγραφή** ενός ακολουθιακού κυκλώματος
  - ▶ μόνο οι ακολουθίες **εισόδων** και **εξόδων** έχουν σημασία
  - ▶ οι **εσωτερικές καταστάσεις** χρησιμοποιούνται μόνο για το σκοπό αυτό → άρα, έχουν ονοματιστεί με **γράμματα**
- ❖ για κάθε ακολουθιακό κύκλωμα υπάρχουν **άπειρες** ακολουθίες πιθανών **εισόδων**
  - ▶ καθεμία εκ των οποίων δίνει μία **μοναδική** ακολουθία **εξόδων**



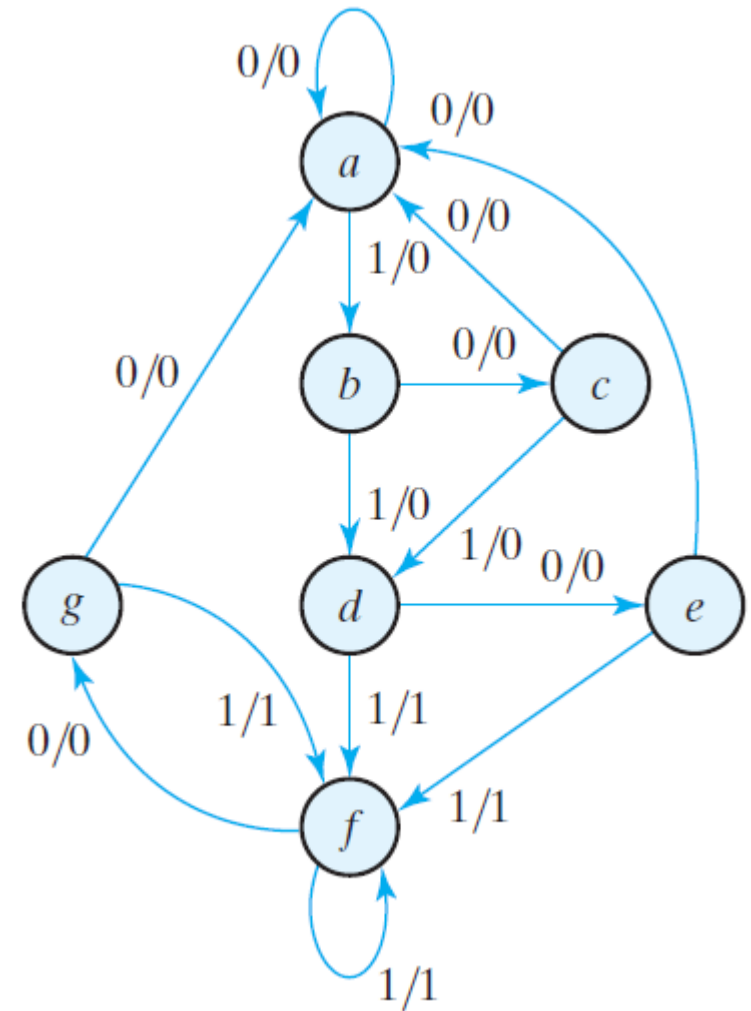
**διάγραμμα καταστάσεων**

# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

## Παράδειγμα - Ακολουθίες

- ❖ έστω ότι
  - ▶ δίνουμε την ακολουθία εισόδων **01010110100**
  - ▶ το κύκλωμα ξεκινά από την κατάσταση **a**
- ❖ τότε, μπορούμε να βρούμε
  - ▶ την ακολουθία εξόδων και
  - ▶ την ακολουθία καταστάσεωναπό το διάγραμμα καταστάσεων

κατάσταση	a	a	b	c	d	e	f	f	g	f	g	a
είσοδος	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	
έξοδος	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	

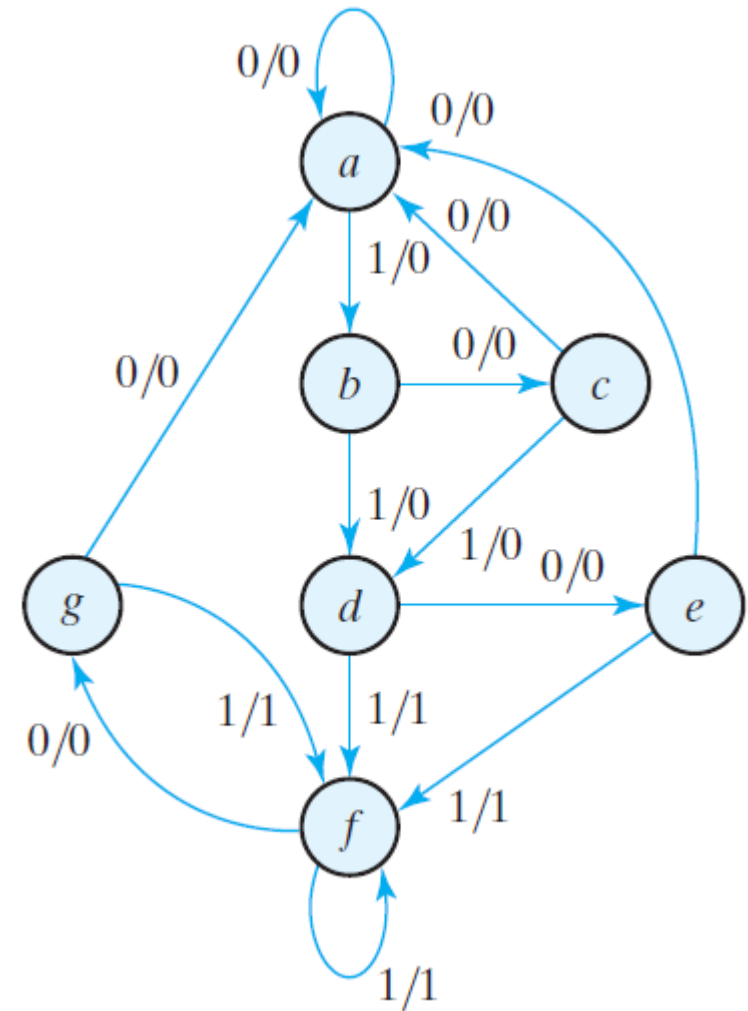


διάγραμμα καταστάσεων

# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

## Ισοδυναμία κυκλωμάτων

- ❖ έστω ότι
  - ▶ έχουμε βρει ένα ακολουθιακό κύκλωμα του οποίου το **διάγραμμα καταστάσεων** έχει λιγότερες από επτά **καταστάσεις**
  - ▶ θέλουμε να **συγκρίνουμε** το κύκλωμα αυτό με το κύκλωμα που έχει το διπλανό **διάγραμμα καταστάσεων**
- ❖ τότε, τα δύο κυκλώματα θεωρούνται **ισοδύναμα** (όσον αφορά τις προδιαγραφές **εισόδων** - **εξόδων**), εάν
  1. για τις **ίδιες** ακολουθίες **εισόδων** → παράγουν τις **ίδιες** ακολουθίες **εξόδων**
  2. και αυτό ισχύει για **κάθε** ακολουθία **εισόδων**
- ✍ έτσι, για να **επιλύσουμε** το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης καταστάσεων → αρκεί να **μειώσουμε** τις **καταστάσεις**, **χωρίς** να αλλάξουμε τις σχέσεις **εισόδων** - **εξόδων**



**διάγραμμα καταστάσεων**

# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

## Ισοδυναμία καταστάσεων

**βασική αρχή** κατασκευής αλγορίθμου ελαχιστοποίησης ενός πίνακα καταστάσεων:

- ❖ δύο καταστάσεις θεωρούνται **ισοδύναμες**, αν για κάθε πιθανή είσοδο
  1. δίνουν ακριβώς την **ίδια** έξοδο και
  2. στέλνουν το κύκλωμα ακριβώς στην **ίδια** ή σε **ισοδύναμη** κατάσταση
- ❖ όταν δύο καταστάσεις είναι ισοδύναμες → η μία από αυτές μπορεί να αντικατασταθεί από την άλλη → επομένως, μπορεί να **απαληφθεί**
  - ▶ χωρίς να προκύψει μεταβολή των σχέσεων εισόδων - εξόδων



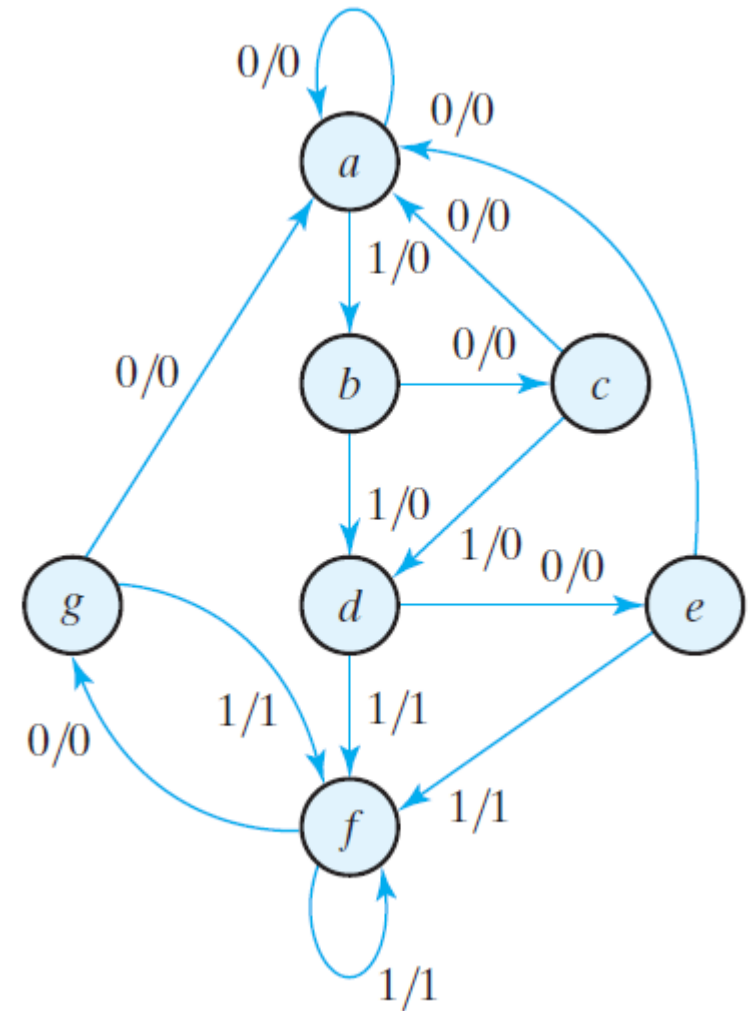
# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

## Παράδειγμα - Πίνακας καταστάσεων

- ❖ για την ελαχιστοποίηση των καταστάσεων, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε τον πίνακα καταστάσεων
  - ▶ προκύπτει απευθείας από το διάγραμμα καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος	
	$x = 0$	$x = 1$	$x = 0$	$x = 1$
a	a	b	0	0
b	c	d	0	0
c	a	d	0	0
d	e	f	0	1
e	a	f	0	1
f	g	f	0	1
g	a	f	0	1

πίνακας καταστάσεων



διάγραμμα καταστάσεων

# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

## Παράδειγμα - Ισοδυναμία καταστάσεων

- ❖ εξετάζουμε τον πίνακα καταστάσεων, ψάχνοντας για δύο παρούσες **ισοδύναμες** καταστάσεις, δηλαδή για κάθε πιθανή **είσοδο**
  1. δίνουν ακριβώς την **ίδια** **έξοδο** και
  2. στέλνουν το κύκλωμα ακριβώς στην **ίδια** ή σε **ισοδύναμη** κατάσταση
- ❖ οι καταστάσεις **e** και **g** είναι ισοδύναμες
  - ▶ άρα, **μία** από αυτές μπορεί να **απαλειφθεί**
- ❖ **απαλείφουμε** την κατάσταση **g**

Παρούσα κατάσταση	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος	
	x = 0	x = 1	x = 0	x = 1
a	a	b	0	0
b	c	d	0	0
c	a	d	0	0
d	e	f	0	1
e	a	f	0	1
f	g	f	0	1
g	a	f	0	1

αρχικός πίνακας καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος	
	x = 0	x = 1	x = 0	x = 1
a	a	b	0	0
b	c	d	0	0
c	a	d	0	0
d	e	f	0	1
e	a	f	0	1
f	e	f	0	1

μειωμένος πίνακας καταστάσεων

# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

## Παράδειγμα - Ισοδυναμία καταστάσεων (II)

επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία, δηλαδή

- ❖ εξετάζουμε τον πίνακα καταστάσεων, ψάχνοντας για δύο παρούσες **ισοδύναμες** καταστάσεις, δηλαδή για κάθε πιθανή **είσοδο**

1. δίνουν ακριβώς την **ίδια** **έξοδο** και
2. στέλνουν το κύκλωμα ακριβώς στην **ίδια** ή σε **ισοδύναμη** κατάσταση

- ❖ οι καταστάσεις **d** και **f** είναι ισοδύναμες
  - ▶ άρα, **μία** από αυτές μπορεί να **απαλειφθεί**
- ❖ **απαλείφουμε** την κατάσταση **f**

Παρούσα κατάσταση	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος	
	x = 0	x = 1	x = 0	x = 1
a	a	b	0	0
b	c	d	0	0
c	a	d	0	0
d	e	f	0	1
e	a	f	0	1
f	e	f	0	1

μειωμένος πίνακας καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος	
	x = 0	x = 1	x = 0	x = 1
a	a	b	0	0
b	c	d	0	0
c	a	d	0	0
d	e	d	0	1
e	a	d	0	1

ελαχιστοποιημένος πίνακας καταστάσεων

# Ελαχιστοποίηση καταστάσεων

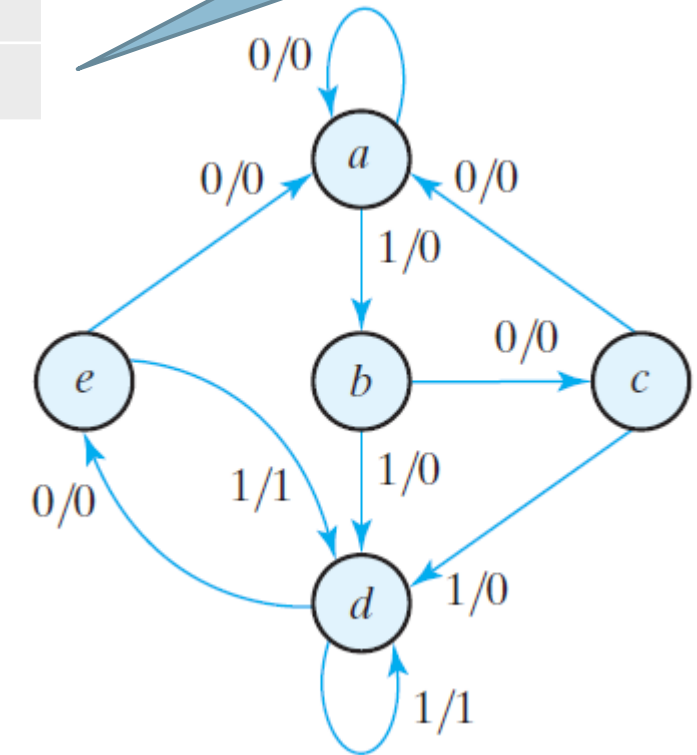
Παράδειγμα - Ελαχιστοποιημένο διάγραμμα καταστάσεων

η ακολουθία εξόδων παραμένει αμετάβλητη (καθώς τα κυκλώματα είναι ισοδύναμα)

κατάσταση	a	a	b	c	d	e	d	d	e	d	e	a
είσοδος	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	
έξοδος	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	

Παρούσα κατάσταση	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος	
	x = 0	x = 1	x = 0	x = 1
a	a	b	0	0
b	c	d	0	0
c	a	d	0	0
d	e	d	0	1
e	a	d	0	1

ελαχιστοποιημένος πίνακας καταστάσεων



ελαχιστοποιημένο διάγραμμα καταστάσεων

# Κωδικοποίηση καταστάσεων

- ❖ **αντικατάσταση** των συμβολικών ονομάτων (ή γραμμάτων) των καταστάσεων → με διακριτές, **κωδικοποιημένες** δυαδικές τιμές
- ❖ για ένα κύκλωμα με **m** καταστάσεις → οι **κωδικοποιημένες** λέξεις πρέπει να έχουν μήκος **n** μπιτ
  - ▶ όπου **n** είναι ο **ελάχιστος** ακέραιος για τον οποίο ισχύει  $2^n \geq m$
  - π.χ.
    - ▶ με **3** μπιτ → μπορούμε να κατασκευάσουμε **κώδικα** για να διακρίνουμε **8** καταστάσεις
    - ▶ οι αντίστοιχες **κωδικοποιημένες** λέξεις θα είναι οι δυαδικοί αριθμοί: **000, 001, ..., 111**
- ❖ μπορούμε να επιλέξουμε **όποια** κωδικοποίηση (π.χ. κώδικα Gray) επιθυμούμε ή ακόμη και απλά τη **δυαδική αναπαράσταση**

# Κωδικοποίηση καταστάσεων

## Παράδειγμα

- ❖ η δυαδική μορφή του πίνακα καταστάσεων χρησιμοποιείται για να κατασκευάσουμε το **συνδυαστικό τμήμα** του ακολουθιακού κυκλώματος

- ▶ παραγωγή των **εξόδων**
- ▶ προετοιμασία επόμενων **καταστάσεων**

- ✍ η πολυπλοκότητα του **συνδυαστικού κυκλώματος** που προκύπτει **εξαρτάται** από τον τρόπο **κωδικοποίησης καταστάσεων** που επιλέγουμε

- ▶ οι **μη χρησιμοποιούμενες** κωδικές λέξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως **συνθήκες αδιαφορίας**, στους αντίστοιχους χάρτες Καρνό

κατάσταση	1 <sup>η</sup> Ανάθεση: Δυαδική	2 <sup>η</sup> Ανάθεση: Κώδικας Gray	3 <sup>η</sup> Ανάθεση: Ενός ενεργού
a	000	000	00001
b	001	001	00010
c	010	011	00100
d	011	010	01000
e	100	110	10000

τρεις πιθανές δυαδικές αναθέσεις καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος	
	x = 0	x = 1	x = 0	x = 1
000	000	001	0	0
001	010	011	0	0
010	000	011	0	0
011	100	011	0	1
100	000	011	0	1

δυαδική μορφή πίνακα καταστάσεων (με 1<sup>η</sup> Ανάθεση)

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση

- ❖ αποσκοπεί στον **προδιορισμό** του ακριβούς **υλικού** (hardware) που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την **υλοποίηση** κυκλώματος με **προδιαγεγραμμένη** επιθυμητή συμπεριφορά
- ❖ κατά τη **σχεδίαση** (ή **σύνθεση**) ενός ακολουθιακού κυκλώματος
  - ▶ ξεκινάμε από ένα **σύνολο προδιαγραφών** και
  - ▶ καταλήγουμε
    - ▶ στο σχετικό **λογικό διάγραμμα** ή
    - ▶ σε ένα σύνολο από **συναρτήσεις Boole** → με τις οποίες μπορούμε να φτιάξουμε το **λογικό διάγραμμα**



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Βήματα

1. από τη λεκτική περιγραφή και τις προδιαγραφές της επιθυμητής λειτουργίας του κυκλώματος → **παράγουμε** ένα **διάγραμμα καταστάσεων**
2. **μειώνουμε** το πλήθος των **καταστάσεων**
  - ▶ αν είναι απαραίτητο
3. **κωδικοποιούμε** τις **καταστάσεις**
4. **σχηματίζουμε** το δυαδικά **κωδικοποιημένο πίνακα καταστάσεων**
5. **επιλέγουμε** το είδος **φλιπ-φλοπ** που θα χρησιμοποιήσουμε
  - ▶ το πλήθος τους προκύπτει από τις καταστάσεις του κυκλώματος
6. **βρίσκουμε** τις απλοποιημένες **εξισώσεις**
  - a) **εισόδων** των **φλιπ-φλοπ**
  - b) **εξόδων** του κυκλώματος
7. **σχεδιάζουμε** το **λογικό διάγραμμα** του κυκλώματος

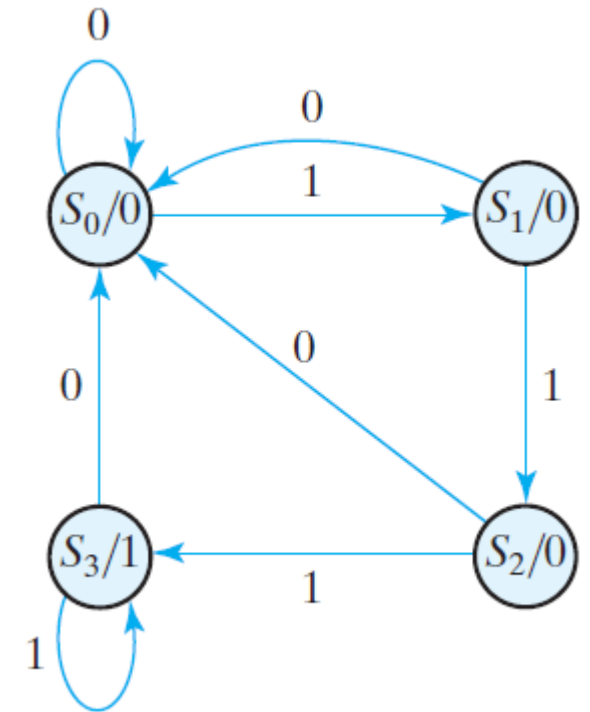
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Κατασκευή διαγράμματος καταστάσεων - Παράδειγμα

- ❖ έστω ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα κύκλωμα που εντοπίζει μία ακολουθία τριών ή περισσότερων διαδοχικών **1** (σε μία ακολουθία από μπιτ που έρχεται σε μία γραμμή εισόδου του κυκλώματος)
- ❖ σχεδίαση διαγράμματος:
  1. έστω ότι η αρχική κατάσταση είναι η  $S_0$ 
    - ▶ δηλώνει ότι δεν έχει ακόμη εντοπιστεί η ακολουθία
  2. εάν στην  $S_0$  έρθει **1** → μεταβαίνει στην  $S_1$ 
    - ▶ δηλώνει ότι εντοπίστηκε ένα **1**
  3. εάν στην  $S_1$  έρθει **1** → μεταβαίνει στην  $S_2$ 
    - ▶ δηλώνει ότι εντοπίστηκαν δύο **1**
  4. εάν στην  $S_2$  έρθει **1** → μεταβαίνει στην  $S_3$ 
    - ▶ δηλώνει ότι εντοπίστηκαν τρία **1**
    - ▶ η έξοδος είναι **1**

☞ εάν σε οποιαδήποτε κατάσταση έρθει **0** → μεταβαίνει στην  $S_0$

☞ η έξοδος εξαρτάται μόνο από την κατάσταση → μοντέλο Moore



διάγραμμα καταστάσεων  
(ανιχνευτή ακολουθίας)

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Παράδειγμα σχεδίασης με D φλιπ-φλοπ

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Παράδειγμα με D φλιπ-φλοπ

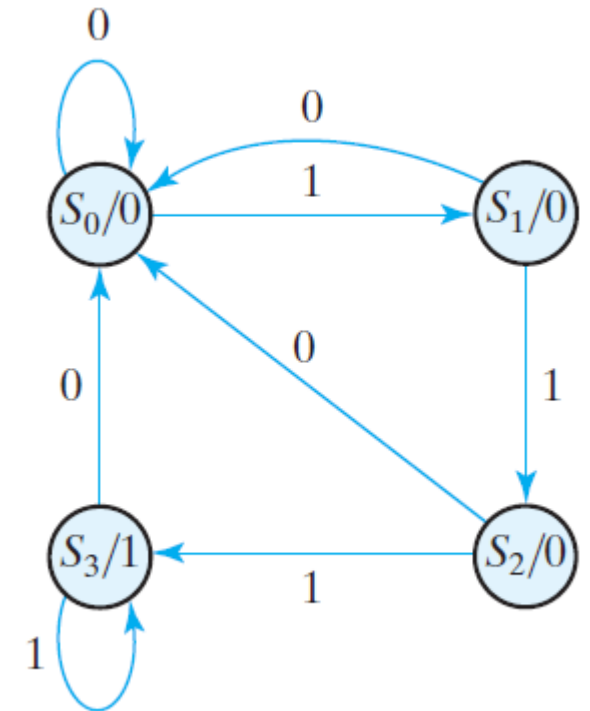
3. **κωδικοποιούμε** τις καταστάσεις του διαγράμματος καταστάσεων

► χρησιμοποιούμε τη δυαδική αναπαράσταση

4. **σχηματίζουμε** το δυαδικά κωδικοποιημένο πίνακα καταστάσεων

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος
A	B	x	A	B	y
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1

πίνακας καταστάσεων  
(ανιχνευτή ακολουθίας)



διάγραμμα καταστάσεων  
(ανιχνευτή ακολουθίας)

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Παράδειγμα με D φλιπ-φλοπ (II)

5. **επιλέγουμε** δύο **φλιπ-φλοπ D** για την παράσταση των **τεσσάρων** καταστάσεων

- ▶ ονομάσαμε τις **εξόδους** των **φλιπ-φλοπ A** και **B**
- ▶ ονομάσαμε την **είσοδο** του κυκλώματος **x** και την **έξοδο y**

❖ καθώς για ένα **D φλιπ-φλοπ** η εξίσωση **είσοδου** είναι **ίδια** με την **εξίσωση κατάστασης**, ισχύουν:

▶  $A(t+1) = D_A(A, B, x) = \Sigma(3, 5, 7)$

▶  $B(t+1) = D_B(A, B, x) = \Sigma(1, 5, 7)$

❖ εξίσωση **εξόδου** κυκλώματος

▶  $y = AB$

6. **βρίσκουμε** τις απλοποιημένες **εξισώσεις εισόδων** των **φλιπ-φλοπ** και **εξόδων** του κυκλώματος...

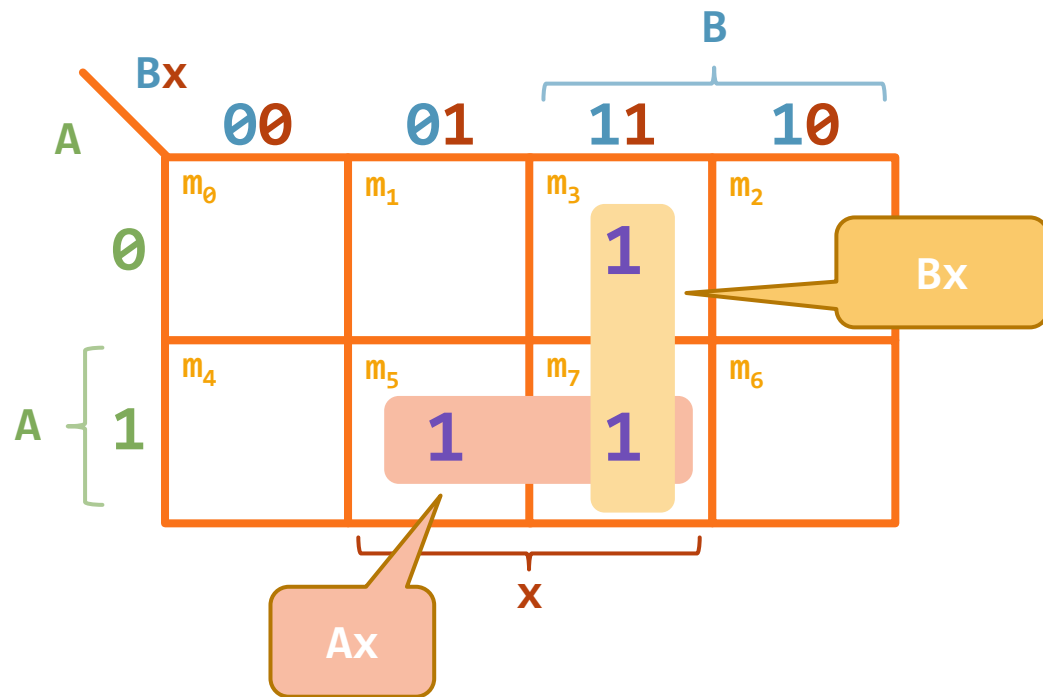
Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση		Έξοδος
A	B	x	A	B	y
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1

**πίνακας καταστάσεων**  
(ανιχνευτή ακολουθίας)

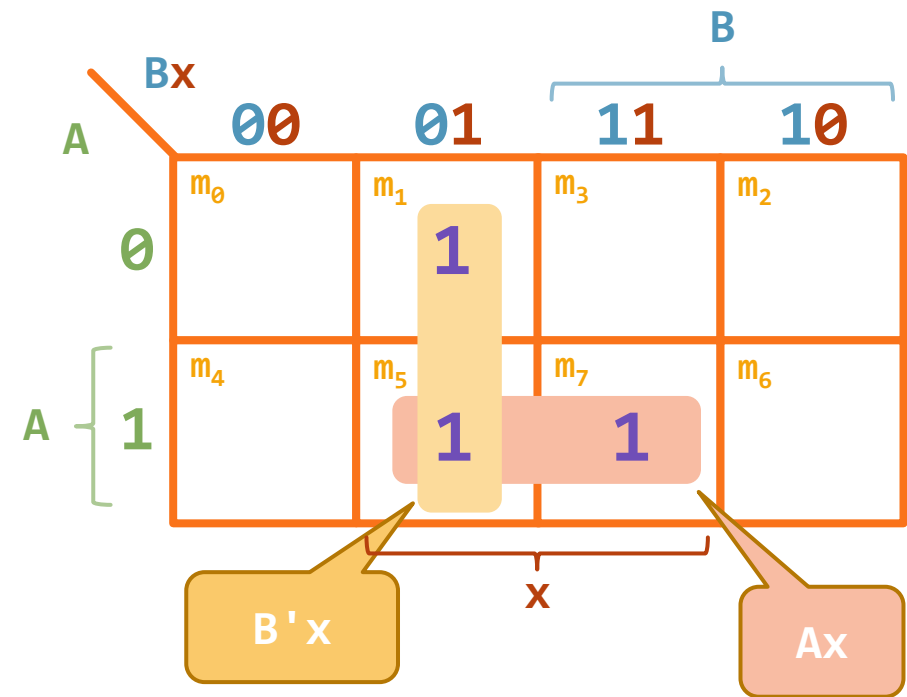
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση - Παράδειγμα με D φλιπ-φλοπ - Απλοποίηση εξισώσεων εισόδων

$$\begin{aligned}D_A(A, B, x) &= \Sigma(3, 5, 7) \\ &= Ax + Bx\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}D_B(A, B, x) &= \Sigma(1, 5, 7) \\ &= Ax + B'x\end{aligned}$$



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση - Παράδειγμα με D φλιπ-φλοπ - Λογικό διάγραμμα

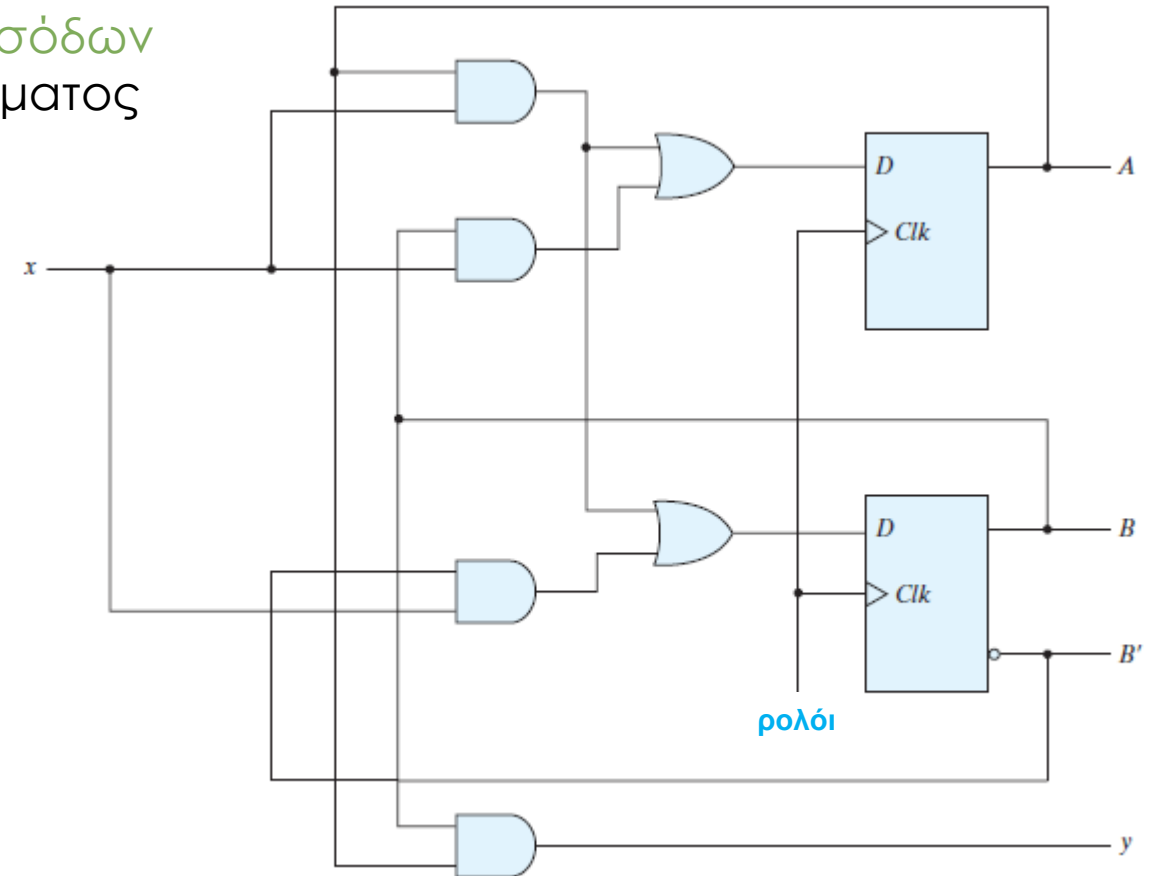
6. **βρίσκουμε** τις απλοποιημένες εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ και των εξόδων του κυκλώματος

▶  $D_A(A, B, x) = Ax + Bx$

▶  $D_B(A, B, x) = Ax + B'x$

▶  $y = AB$

7. **σχεδιάζουμε** το λογικό διάγραμμα του κυκλώματος



Λογικό διάγραμμα ανιχνευτή ακολουθίας, τύπου Moore (με D φλιπ-φλοπ)

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Παράδειγμα σχεδίασης με JK φλιπ-φλοπ



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - JK φλιπ-φλοπ - Εισαγωγή

- ❖ κατά τη διαδικασία σχεδίασης
  - ▶ **γνωρίζουμε** τις τιμές της **παρούσας** και της **επόμενης κατάστασης**, δηλαδή την **επιθυμητή μετάβαση**, και
  - ▶ **ζητάμε** τις συνθήκες **εισόδων** του **φλιπ-φλοπ** που θα προκαλέσουν αυτή τη **μετάβαση**
- ❖ για ένα **D φλιπ-φλοπ** → **εξίσωση εισόδου** είναι **ίδια** με την **εξίσωση κατάστασης**
- ❖ για ένα **JK φλιπ-φλοπ** για να υπολογίσουμε τις συνθήκες **εισόδων** → χρειαζόμαστε έναν πίνακα που δίνει τις **απαιτούμενες εισόδους** για κάθε μία από όλες τις δυνατές αλλαγές **κατάστασης** του **φλιπ-φλοπ**
  - ▶ ονομάζεται **πίνακας διέγερσης**

Q(t)	Q(t+1)	J	K
0	0	0	X
0	1	1	X
1	0	X	1
1	1	X	0

πίνακας διέγερσης  
JK φλιπ-φλοπ

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ

- ❖ **συμπληρώνουμε** τον παρακάτω πίνακα, ώστε να βρούμε τις **εισόδους** των **φλιπ-φλοπ** κατά τις **μεταβάσεις καταστάσεων** (χρησιμοποιώντας τον **πίνακα διέγερσης του JK φλιπ-φλοπ**)

Παρούσα κατάσταση		Είσοδος	Επόμενη κατάσταση		Είσοδοι φλιπ-φλοπ			
A	B	x	A	B	J <sub>A</sub>	K <sub>A</sub>	J <sub>B</sub>	K <sub>B</sub>
0	0	0	0	0	0	x	0	x
0	0	1	0	1	0	x	1	x
0	1	0	1	0	1	x	x	1
0	1	1	0	1	0	x	x	1
1	0	0	1	0	x	0	0	x
1	0	1	1	1	x	0	1	x
1	1	0	1	1	x	0	x	0
1	1	1	0	0	x	1	x	1

πίνακας καταστάσεων και είσοδοι των JK φλιπ-φλοπ

προκύπτει ότι:

- $J_A(A,B,x) = \Sigma(2)$  με συνθήκες αδιαφορίας:  $d(A,B,x) = \Sigma(4,5,6,7)$
- $K_A(A,B,x) = \Sigma(7)$  με συνθήκες αδιαφορίας:  $d(A,B,x) = \Sigma(1,2,3,4)$
- $J_B(A,B,x) = \Sigma(1,5)$  με συνθήκες αδιαφορίας:  $d(A,B,x) = \Sigma(2,3,6,7)$
- $K_B(A,B,x) = \Sigma(2,3,7)$  με συνθήκες αδιαφορίας:  $d(A,B,x) = \Sigma(0,1,4,5)$

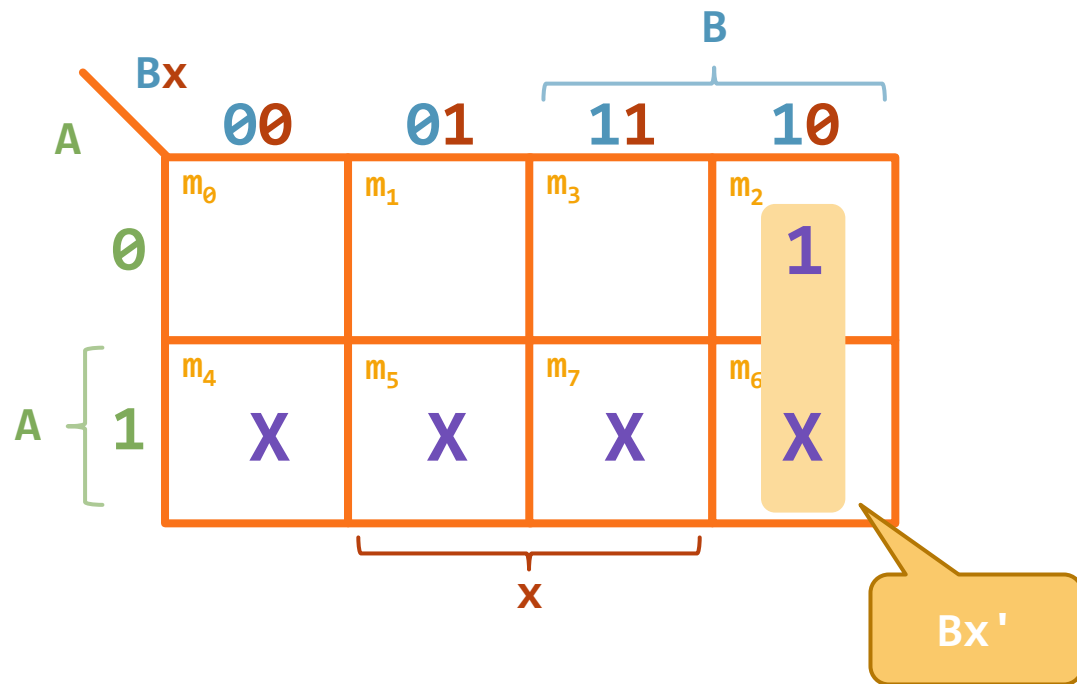
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ - Απλοποίηση εξισώσεων εισόδων

$$d(A, B, x) = \Sigma(4, 5, 6, 7)$$

$$J_A(A, B, x) = \Sigma(2)$$

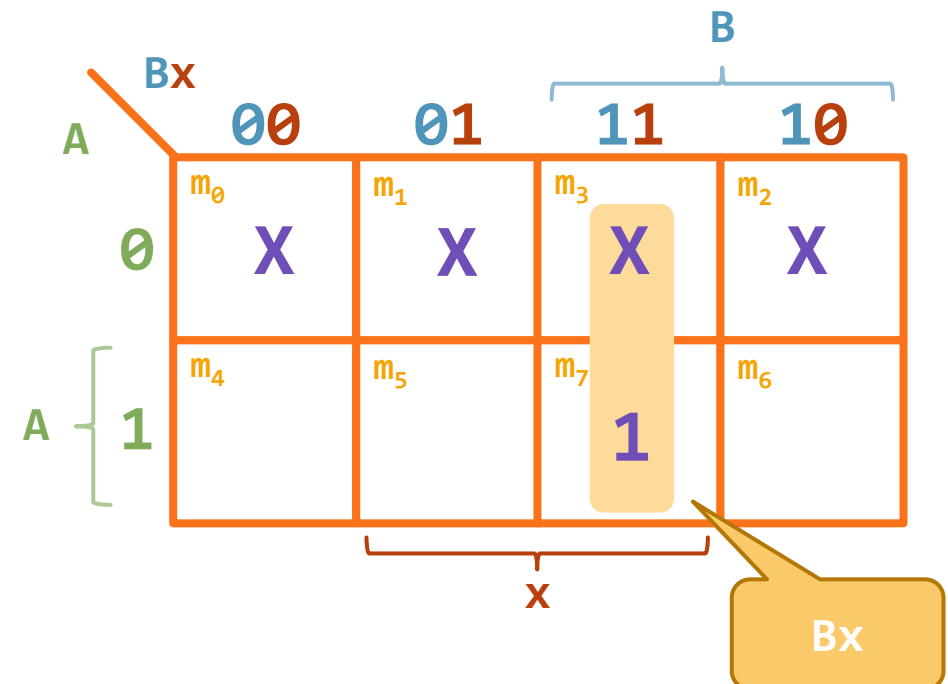
$$= Bx'$$



$$d(A, B, x) = \Sigma(1, 2, 3, 4)$$

$$K_A(A, B, x) = \Sigma(7)$$

$$= Bx$$



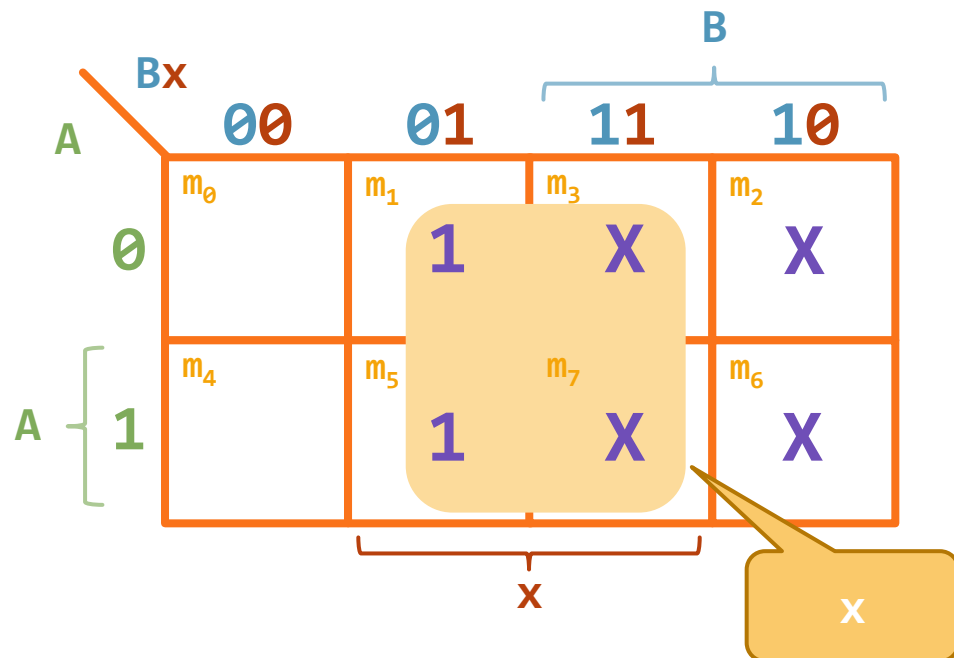
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ - Απλοποίηση εξισώσεων εισόδων (II)

$$d(A, B, x) = \Sigma(2, 3, 6, 7)$$

$$J_B(A, B, x) = \Sigma(1, 5)$$

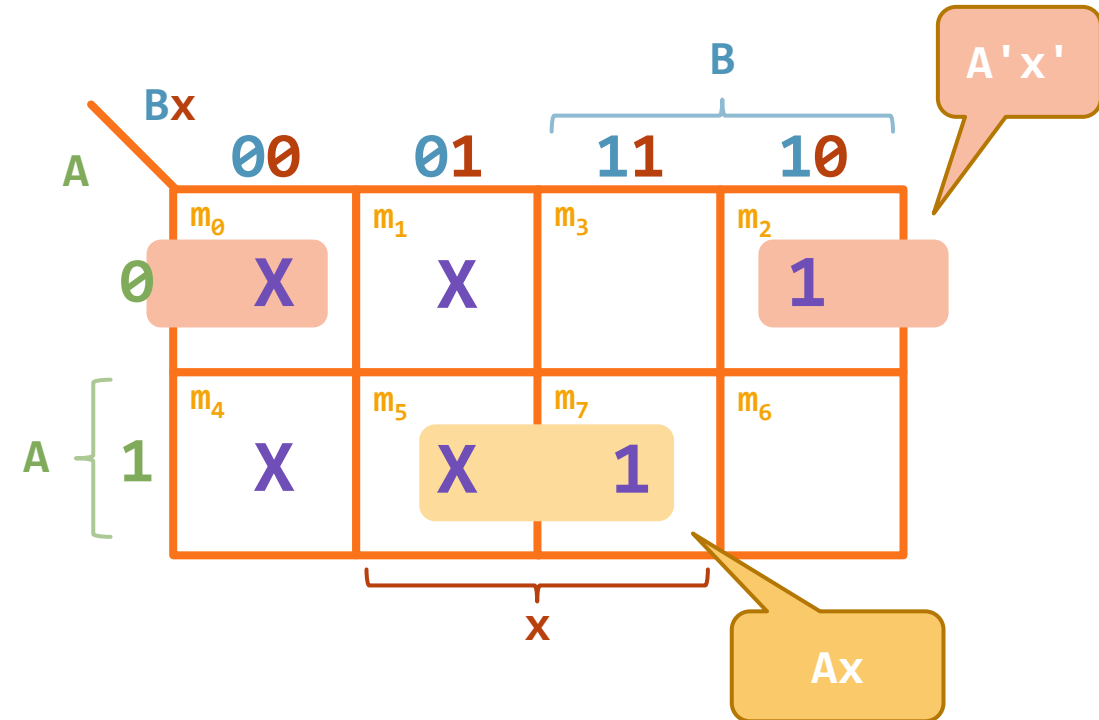
$$= x$$



$$d(A, B, x) = \Sigma(0, 1, 4, 5)$$

$$K_B(A, B, x) = \Sigma(2, 3, 7)$$

$$= Ax + A'x' = (A \oplus x)'$$



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση - Παράδειγμα με JK φλιπ-φλοπ - Λογικό διάγραμμα

6. **βρίσκουμε** τις απλοποιημένες εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ και των εξόδων του κυκλώματος

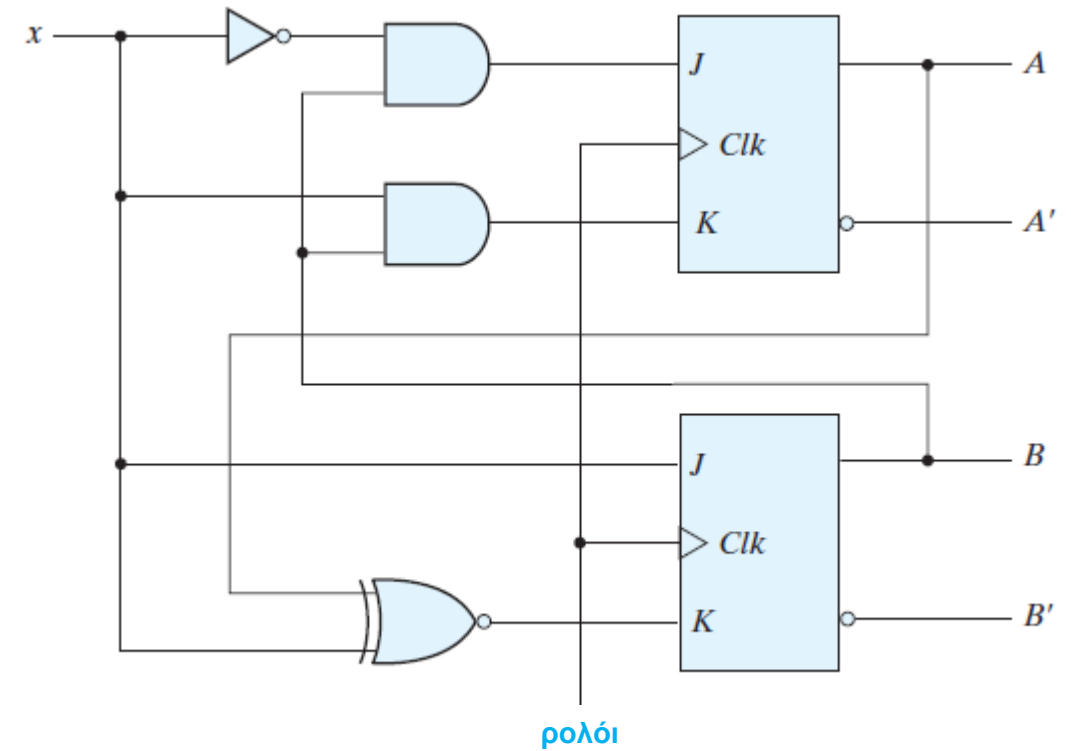
►  $J_A(A, B, x) = Bx'$

►  $K_A(A, B, x) = Bx$

►  $J_B(A, B, x) = x$

►  $K_B(A, B, x) = (A \oplus x)'$

7. **σχεδιάζουμε** το λογικό διάγραμμα του κυκλώματος



Λογικό διάγραμμα  
(με JK φλιπ-φλοπ)

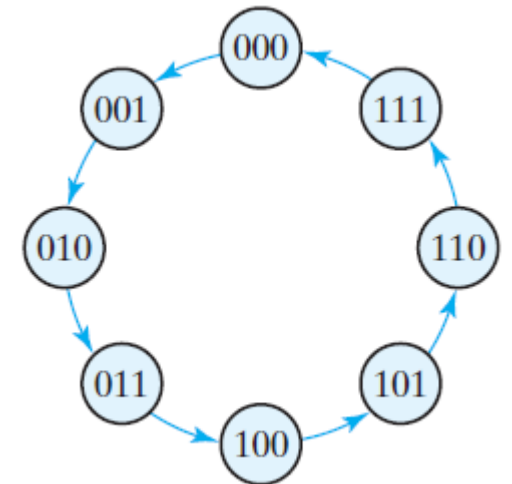
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Παράδειγμα σχεδίασης με T φλιπ-φλοπ

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ

- ❖ έστω ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα δυαδικό μετρητή των **n** μπιτ
  - ▶ έχει **n** φλιπ-φλοπ
  - π.χ.
    - ▶ για **n = 3** → προκύπτει το διπλανό **διάγραμμα καταστάσεων**
- ❖ η μόνη **είσοδος** του κυκλώματος είναι το **ρολόι**
  - ▶ δε γράψαμε **εισόδους** στα βέλη μεταβάσεων, καθώς το ρολόι δεν εμφανίζεται άμεσα ως μεταβλητή **εισόδου** στα **διαγράμματα καταστάσεων** ή στους **πίνακες καταστάσεων**
    1. οι **μεταβάσεις κατάστασης** στα ακολουθιακά κυκλώματα συμβαίνουν σε κάθε **ακμή** του **σήματος ρολογιού**
    2. τα **φλιπ-φλοπ** παραμένουν στην παρούσα **κατάστασή** τους εάν δεν εμφανιστεί **ακμή** στο **σήμα** του **ρολογιού**
- ❖ οι **έξοδοι** δίνονται από την παρούσα κατάσταση των **φλιπ-φλοπ**
- ❖ η επόμενη **κατάσταση** εξαρτάται μόνο από την παρούσα



**διάγραμμα καταστάσεων**  
(μετρητή τριών μπιτ)

# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ (II)

- ❖ **συμπληρώνουμε** τον παρακάτω πίνακα, ώστε να βρούμε τις **εισόδους** των **φλιπ-φλοπ** κατά τις **μεταβάσεις καταστάσεων** (χρησιμοποιώντας τον **πίνακα διέγερσης** του **T φλιπ-φλοπ**)

Παρούσα κατάσταση			Επόμενη κατάσταση			Είσοδοι φλιπ-φλοπ		
A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	T <sub>A2</sub>	T <sub>A1</sub>	T <sub>A0</sub>
0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	0	1	1	1
1	0	0	1	0	1	0	0	1
1	0	1	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	1	1	0	0	1
1	1	1	0	0	0	1	1	1

πίνακας καταστάσεων και είσοδοι των T φλιπ-φλοπ

Q(t)	Q(t+1)	T
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

πίνακας διέγερσης  
T φλιπ-φλοπ

προκύπτει ότι:

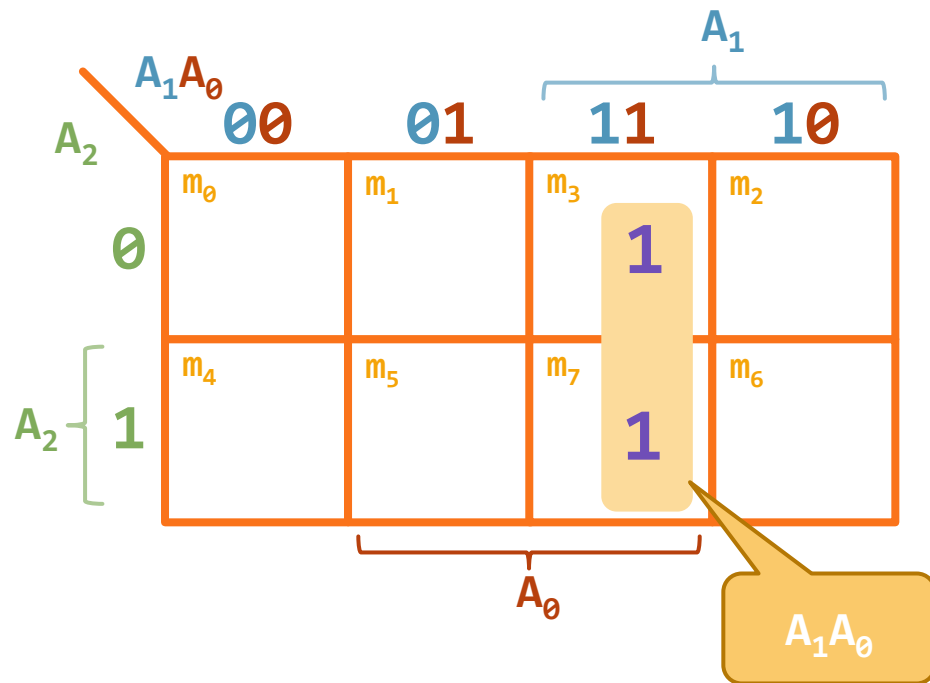
- $T_{A2}(A_2, A_1, A_0) = \Sigma(3, 7)$
- $T_{A1}(A_2, A_1, A_0) = \Sigma(1, 3, 5, 7)$
- $T_{A0}(A_2, A_1, A_0) = \Sigma(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)$



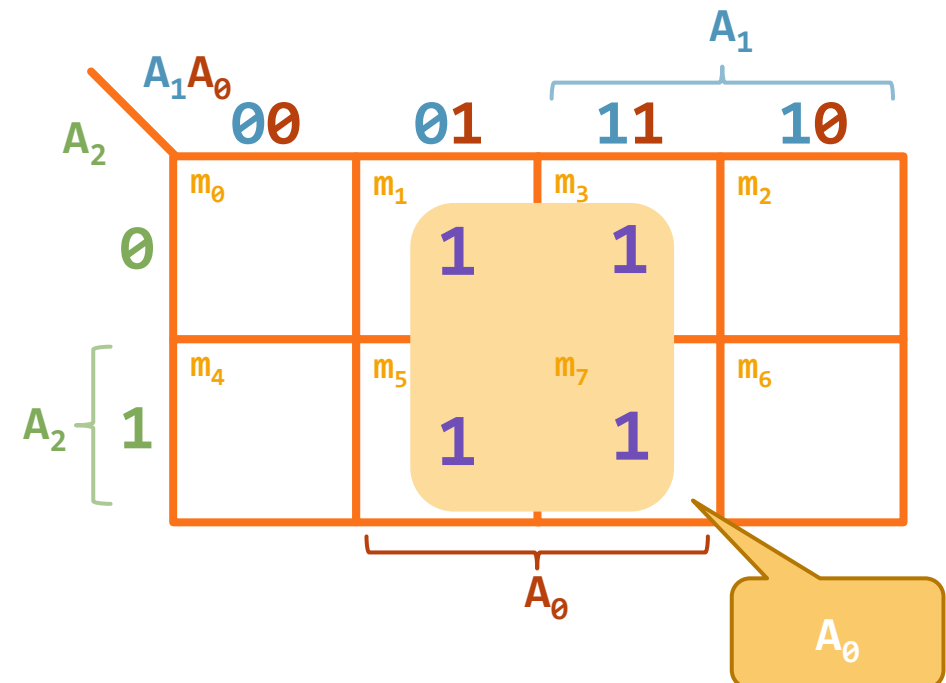
# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ - Απλοποίηση εξισώσεων εισόδων

$$\begin{aligned}T_{A_2}(A_2, A_1, A_0) &= \Sigma(3, 7) \\ &= A_1 A_0\end{aligned}$$



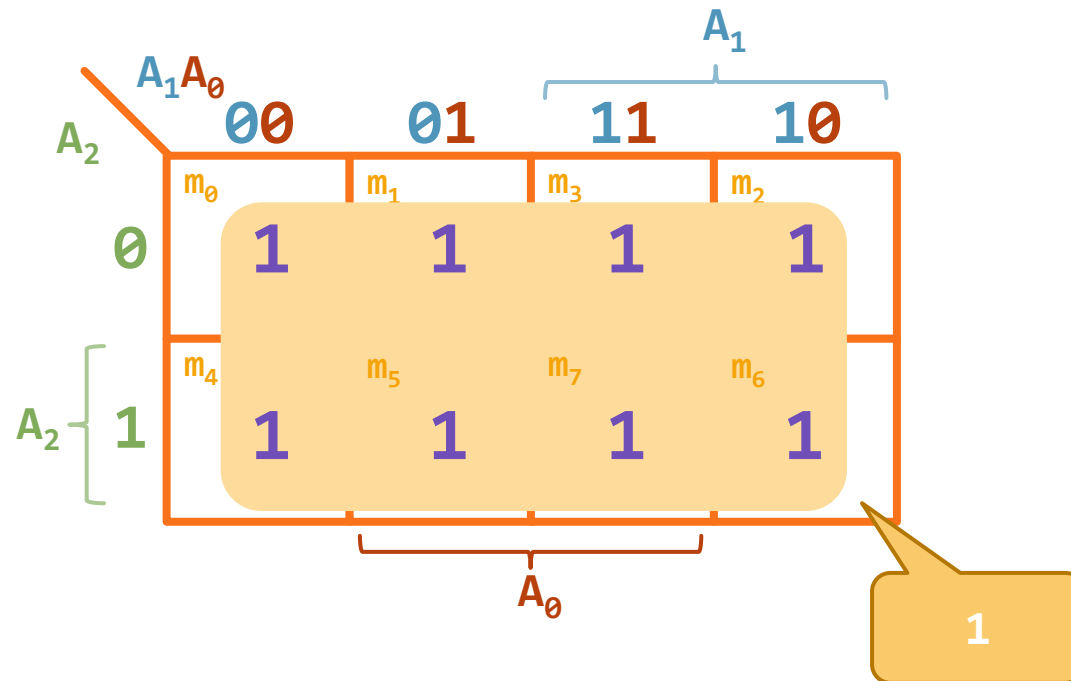
$$\begin{aligned}T_{A_1}(A_2, A_1, A_0) &= \Sigma(1, 3, 5, 7) \\ &= A_0\end{aligned}$$



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

Σχεδίαση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ - Απλοποίηση εξισώσεων εισόδων (II)

$$T_{A_0}(A_2, A_1, A_0) = \Sigma(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) \\ = 1$$



# Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι

## Σχεδίαση - Παράδειγμα με T φλιπ-φλοπ - Λογικό διάγραμμα

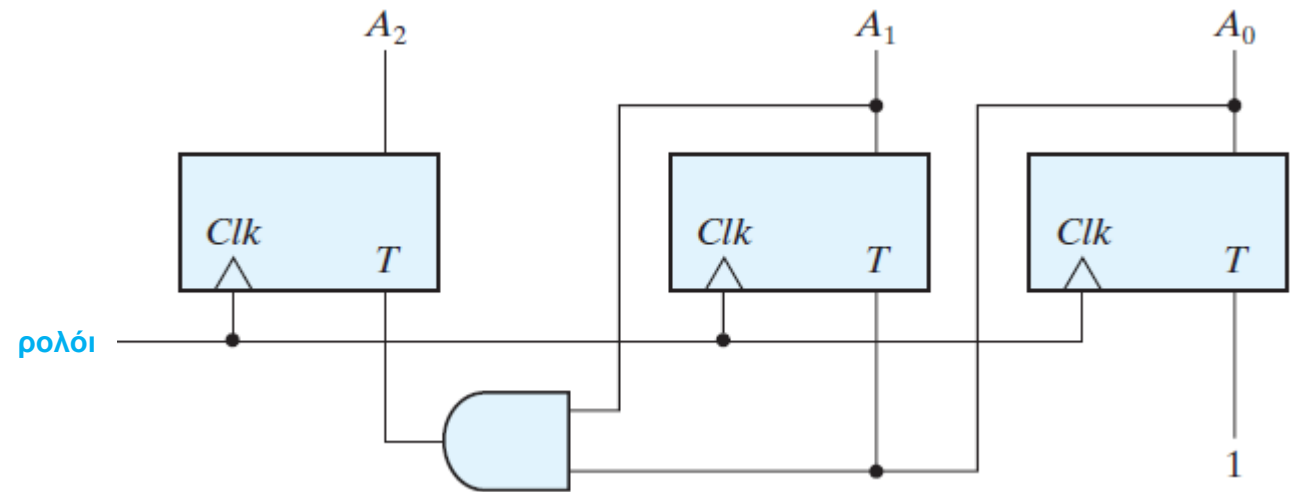
6. **βρίσκουμε** τις απλοποιημένες εξισώσεις εισόδων των φλιπ-φλοπ και των εξόδων του κυκλώματος

▶  $T_{A_2}(A_2, A_1, A_0) = A_1 A_0$

▶  $T_{A_1}(A_2, A_1, A_0) = A_0$

▶  $T_{A_0}(A_2, A_1, A_0) = 1$

7. **σχεδιάζουμε** το λογικό διάγραμμα του κυκλώματος



Λογικό διάγραμμα μετρητή τριών μπιτ  
(με T φλιπ-φλοπ)

# Σύνοψη

- ▶ Σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα
- ▶ Στοιχεία μνήμης - Μανδαλωτές
  - ▶ μανδαλωτές τύπου SR
  - ▶ μανδαλωτές τύπου SR με είσοδο επίτρεψης
  - ▶ μανδαλωτές τύπου D (ή διαφανής μανδαλωτής)
- ▶ Στοιχεία μνήμης - Φλιπ-φλοπ
  - ▶ ακμοπυροδότητο D φλιπ-φλοπ, JK φλιπ-φλοπ, T φλιπ-φλοπ
  - ▶ χαρακτηριστικοί πίνακες & χαρακτηριστικές εξισώσεις
  - ▶ άμεσες είσοδοι
- ▶ Ακολουθιακά κυκλώματα με ρολόι
  - ▶ Ανάλυση - πίνακες καταστάσεων, εξισώσεις εισόδων, εξόδων και καταστάσεων, διαγράμματα καταστάσεων, μοντέλα Mealy και Moore
  - ▶ Σχεδίαση - ελαχιστοποίηση και κωδικοποίηση καταστάσεων, πίνακες διέγερσης