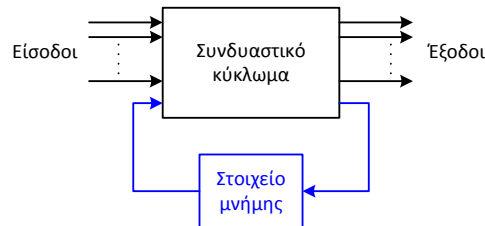


## Ακολουθιακά Λογικά Κυκλώματα

Τα ψηφιακά λογικά κυκλώματα που μελετήσαμε μέχρι τώρα ήταν **συνδυαστικά** κυκλώματα. Στα συνδυαστικά κυκλώματα οι έξοδοι σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτώνται αποκλειστικά και μόνο από το συνδυασμό τιμών στις εισόδους του κυκλώματος εκείνη τη συγκεκριμένη στιγμή. Δεν εξαρτώνται ούτε από την σειρά με την οποία αυτές οι εισόδους εφαρμόζονται, ούτε από την κατάσταση εξόδου του κυκλώματος πριν αυτές εφαρμοσθούν.

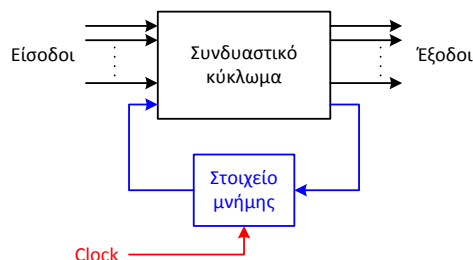
Πολλές φορές, η χρονική ακολουθία των καταστάσεων εξόδου είναι καθοριστικής σημασίας και σε πολλές εφαρμογές χρειαζόμαστε κυκλώματα τα οποία να μπορούν να "θυμούνται" κάποια προηγούμενη κατάσταση. Τα κυκλώματα αυτά ονομάζονται **ακολουθιακά**. Στα ακολουθιακά κυκλώματα οι έξοδοι σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτώνται όχι μόνον από τις τιμές των εισόδων εκείνη τη χρονική στιγμή, αλλά και από τις τιμές των εξόδων των στοιχείων μνήμης του κυκλώματος την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Τα ακολουθιακά κυκλώματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα **ασύγχρονα** και στα **σύγχρονα**. Η συμπεριφορά ενός ασύγχρονου ακολουθιακού κυκλώματος εξαρτάται από την σειρά με την οποία αλλάζουν οι παλμοί εισόδου του και μπορεί να επηρεασθεί σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Ένα συνδυαστικό κύκλωμα με ανατροφοδότηση αποτελεί ουσιαστικά ένα ασύγχρονο ακολουθιακό κύκλωμα. Εξαιτίας ακριβώς της ανατροφοδότησης, ένα τέτοιο κύκλωμα μπορεί να γίνει εύκολα ασταθές.



Ασύγχρονο ακολουθιακό κύκλωμα

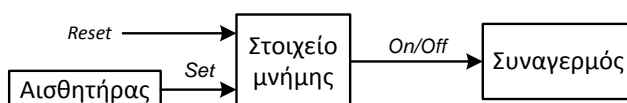
Στα σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα η λειτουργία ρυθμίζεται με κάποιο παλμό χρονισμού (ρολόι, clock, Clk, CP). Οποιοσδήποτε αλλαγές στην κατάσταση εξόδου ενός σύγχρονου ακολουθιακού κυκλώματος συμβαίνουν σε συγκεκριμένες διακριτές χρονικές στιγμές. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι τα σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα δεν παρουσιάζουν προβλήματα αστάθειας και ο χρονισμός τους μπορεί εύκολα να αναλυθεί σε ανεξάρτητα διακριτά βήματα.



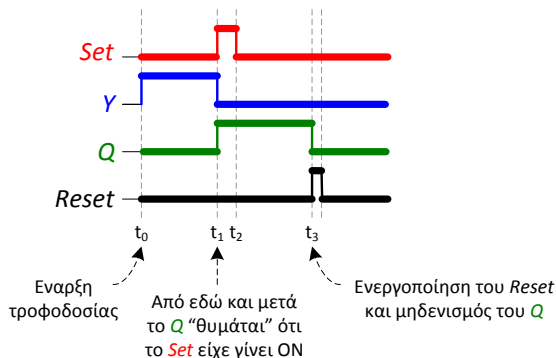
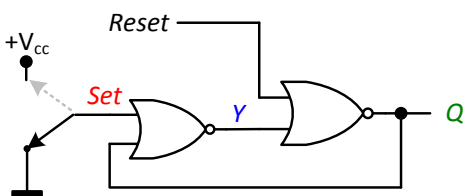
Σύγχρονο ακολουθιακό κύκλωμα

Για να μπορέσουμε να παρακολουθήσουμε την αλληλουχία κάποιων γεγονότων θα πρέπει να έχουμε ένα κύκλωμα το οποίο να μπορεί να "θυμάται", δηλαδή να έχει μνήμη. Για να γίνει κατανοητό αυτό ας δούμε το ακόλουθο παράδειγμα.

**Παράδειγμα 1.** Έστω ότι θέλουμε να ελέγξουμε τη λειτουργία του συστήματος συναγερμού του σχήματος. Ο συναγερμός ενεργοποιείται όταν η είσοδος ελέγχου On/Off = 1 και απενεργοποιείται όταν On/Off = 0. Για να ενεργοποιηθεί ο συναγερμός θα πρέπει ο αισθητήρας να δημιουργήσει στην έξοδό του μια θετική τάση (Set = 1), ως αποτέλεσμα της ανίχνευσης ενός ανεπιθύμητου γεγονότος. Εφόσον ενεργοποιηθεί ο συναγερμός, θα πρέπει να παραμείνει ενεργοποιημένος ακόμα κι όταν η έξοδος του αισθητήρα επανέλθει στην τιμή Set = 0, δηλαδή κι όταν εκλείψει το ανεπιθύμητο γεγονός. Ο συναγερμός απενεργοποιείται με το χέρι, μέσω ενός σήματος εισόδου Reset = 1.



Το σύστημα αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με ένα λογικό κύκλωμα από δύο πύλες NOR, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το κύκλωμα απαιτεί την ύπαρξη ενός στοιχείου μνήμης για να "θυμάται" ότι ο συναγερμός θα πρέπει να παραμείνει ενεργοποιημένος μέχρι την εξαναγκασμένη απενεργοποίησή του, με ένα σήμα Reset = 1. Η λειτουργία του περιγράφεται από το αντίστοιχο διάγραμμα κυματομορφών.



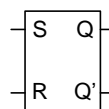
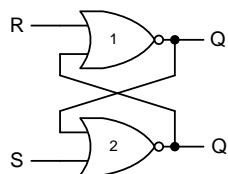
Θεωρούμε ότι αρχικά το σύστημα είναι απενεργοποιημένο ( $Q = 0$ ). Μετά την έναρξη τροφοδοσίας ( $t_0$ ) και για όσο διάστημα το Set είναι στο λογικό "0" (γείωση), η έξοδος Y της πρώτης πύλης NOR παραμένει στο λογικό "1" και η έξοδος Q της δεύτερης πύλης NOR παραμένει στο λογικό "0". Τη χρονική στιγμή  $t_1$  το Set γίνεται "1" ( $+V_{cc}$ ), που αντιστοιχεί στην ανίχνευση από τον αισθητήρα ενός ανεπιθύμητου γεγονότος. Τότε, η έξοδος Y της πρώτης πύλης NOR μεταβαίνει στην κατάσταση "0" και, συνεπακόλουθα, η έξοδος Q της δεύτερης πύλης NOR μεταβαίνει στην κατάσταση "1". Η έξοδος Y της πρώτης πύλης NOR παραμένει στην κατάσταση "0" ακόμα και μετά την επαναφορά του Set στην κατάσταση "0", επειδή έχουμε **ανατροφοδότηση** του σήματος  $Q = 1$  στην είσοδο αυτής της πύλης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η έξοδος Q να παραμένει στην κατάσταση "1", δηλαδή να "θυμάται" ότι πρέπει να παραμείνει σε αυτή την κατάσταση, ακόμα και μετά το μηδενισμό του Set (ο συναγερμός παραμένει ενεργοποιημένος μέχρι την εξαναγκασμένη απενεργοποίησή του). Για την επαναφορά του Q

στην κατάσταση “0” (απενεργοποίηση του συστήματος), απαιτείται σε κάποια χρονική στιγμή ( $t_3$ ), η στιγμιαία ενεργοποίηση της εισόδου Reset (Reset = 1).

Το απλούστερο κύτταρο μνήμης του ενός bit είναι το **flip-flop** (FF), που ονομάζεται και δισταθής πολυδονητής. Ένα τέτοιο κύκλωμα κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας είτε πύλες NOR, είτε πύλες NAND.

### Flip – flop (μανταλωτής) SR με πύλες NOR

Το λογικό κύκλωμα του παραδείγματος 1 μπορεί να ξανασχεδιαστεί ως ακολούθως:



Λογικό κύκλωμα SR flip-flop

Χονδρικό διάγραμμα

Το κύκλωμα αυτό έχει δύο εισόδους, S και R, και δύο εξόδους, Q και Q', και ονομάζεται SR flip-flop ή, πιο σωστά, **SR μανταλωτής**. Ο μανταλωτής είναι ένας τύπος flip-flop χωρίς ρολόι ή με ρολόι το οποίο είναι ευαίσθητο στη διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού του ρολογιού, όπως θα δούμε αργότερα.

Η ονομασία των εισόδων S και R προκύπτουν από τα αρχικά γράμματα των λέξεων Set και Reset αντίστοιχα. Η απόδοση στα ελληνικά της λέξης Set είναι “θέση” ή “ενεργοποίηση” και αντιστοιχεί στον καθορισμό της εξόδου Q στο λογικό “1” και της λέξης Reset είναι “απενεργοποίηση” ή “εκκαθάριση” ή “μηδενισμός” και αντιστοιχεί στην επαναφορά της εξόδου Q στο λογικό “0”. Η έξοδος Q αποτελεί και την **κατάσταση** του FF, ενώ η έξοδος Q' είναι συμπληρωματική της Q.

Ας εξετάσουμε τη λειτουργία του SR FF.

Για αρχική (παρούσα) κατάσταση του FF  $Q_t = 0$ , έχουμε:

- Με **S = 0, R = 0**, η έξοδος της πύλης 2 είναι “1”, οπότε η έξοδος της πύλης 1 γίνεται “0”. Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 0$  και  $Q'(t+1) = 1$  (**καμία αλλαγή,  $Q(t+1) = Q_t$** ).
- Με **S = 0, R = 1**, η έξοδος της πύλης 2 είναι “1”, οπότε η έξοδος της πύλης 1 γίνεται “0”. Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 0$  και  $Q'(t+1) = 1$  (**μηδενισμός**).
- Με **S = 1, R = 0**, η έξοδος της πύλης 2 είναι “0”, οπότε η έξοδος της πύλης 1 γίνεται “1”. Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 1$  και  $Q'(t+1) = 0$  (**ενεργοποίηση**).
- Με **S = 1, R = 1**, η έξοδος της πύλης 2 είναι “0” και η έξοδος της πύλης 1 είναι “0”. Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 0$  και  $Q'(t+1) = 0$  (**απροσδιοριστία**).

Για αρχική (παρούσα) κατάσταση του FF  $Q = 1$ , έχουμε:

- Με  $S = 0, R = 0$ , η έξοδος της πύλης 2 είναι "0", οπότε η έξοδος της πύλης 1 γίνεται "1". Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 1$  και  $Q'(t+1) = 0$  (**καμία αλλαγή,  $Q(t+1) = Q_t$** ).
- Με  $S = 0, R = 1$ , η έξοδος της πύλης 2 είναι "0", οπότε η έξοδος της πύλης 1 γίνεται "0". Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 0$  και  $Q'(t+1) = 1$  (**μηδενισμός**).
- Με  $S = 1, R = 0$ , η έξοδος της πύλης 2 είναι "0", οπότε η έξοδος της πύλης 1 γίνεται "1". Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 1$  και  $Q'(t+1) = 0$  (**ενεργοποίηση**).
- Με  $S = 1, R = 1$ , η έξοδος της πύλης 2 είναι "0" και η έξοδος της πύλης 1 είναι "0". Επομένως, η επόμενη κατάσταση του συστήματος είναι  $Q(t+1) = 0$  και  $Q'(t+1) = 0$  (**απροσδιόριστη**).

Με βάση τα παραπάνω, συντάσσονται ο πίνακας αλήθειας και ο χαρακτηριστικός πίνακας του SR FF:

**Πίνακας Αλήθειας**

$Q_t$	S	R	$Q_{(t+1)}$	$Q'_{(t+1)}$
0	0	0	0	1
0	0	1	0	1
0	1	0	1	0
0	1	1	απροσδιόριστη	
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	απροσδιόριστη	

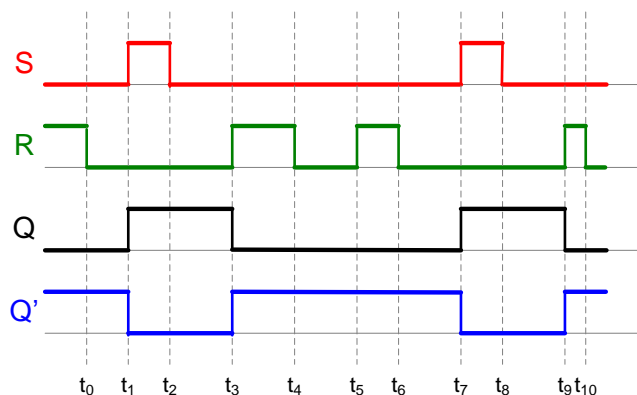
**Χαρακτηριστικός Πίνακας**

S	R	$Q_{(t+1)}$
0	0	$Q_t$
0	1	0
1	0	1
1	1	απροσδιόριστη

Στο εξής για συντομία, παρούσα κατάσταση  $Q_t$  θα συμβολίζεται ως Q και η επόμενη κατάσταση  $Q_{(t+1)}$  θα συμβολίζεται ως  $Q^+$ .

**Παράδειγμα 2.** Εάν στις εισόδους ενός μανταλωτή SR εφαρμοστούν οι παλμοσειρές του σχήματος, να προσδιοριστούν οι κυματομορφές των εξόδων του Q και Q'.

Οι κυματομορφές των εξόδων Q και Q' δείχνονται στο ίδιο σχήμα.



Για τον προσδιορισμό των κυματομορφών για τις εξόδους Q και Q' χρησιμοποιούμε τον χαρακτηριστικό πίνακα του SR FF, οπότε προκύπτουν τα ακόλουθα:

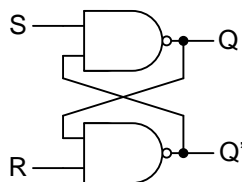
Για το διάστημα:	$-t_0$	$S = 0, R = 1$	$\Rightarrow$	$Q = 0,$	$Q' = 1$
Για το διάστημα:	$t_0 - t_1$	$S = 0, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 0$ ( $Q^+ = Q$ ),	$Q' = 1$
Για το διάστημα:	$t_1 - t_2$	$S = 1, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 1,$	$Q' = 0$
Για το διάστημα:	$t_2 - t_3$	$S = 0, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 1$ ( $Q^+ = Q$ ),	$Q' = 0$
Για το διάστημα:	$t_3 - t_4$	$S = 0, R = 1$	$\Rightarrow$	$Q = 0,$	$Q' = 1$
Για το διάστημα:	$t_4 - t_5$	$S = 0, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 0$ ( $Q^+ = Q$ ),	$Q' = 1$
Για το διάστημα:	$t_5 - t_6$	$S = 0, R = 1$	$\Rightarrow$	$Q = 0,$	$Q' = 1$
Για το διάστημα:	$t_6 - t_7$	$S = 0, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 0$ ( $Q^+ = Q$ ),	$Q' = 1$
Για το διάστημα:	$t_7 - t_8$	$S = 1, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 1,$	$Q' = 0$
Για το διάστημα:	$t_8 - t_9$	$S = 0, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 1$ ( $Q^+ = Q$ ),	$Q' = 0$
Για το διάστημα:	$t_9 - t_{10}$	$S = 0, R = 1$	$\Rightarrow$	$Q = 0,$	$Q' = 1$
Για το διάστημα:	$t_{10} -$	$S = 0, R = 0$	$\Rightarrow$	$Q = 0$ ( $Q^+ = Q$ ),	$Q' = 1$

### Flip-flop (μανταλωτής) SR με πύλες NAND

Η υλοποίηση του μανταλωτή SR με πύλες NAND ακολουθεί την ίδια λογική με την υλοποίηση με πύλες NOR, με τη διαφορά ότι η είσοδος Set συνδέεται με την πύλη NAND η οποία παράγει την έξοδο Q και η είσοδος Reset συνδέεται με την πύλη NAND η οποία παράγει την έξοδο Q'.

Το λογικό κύκλωμα του μανταλωτή SR με πύλες NAND και ο πίνακας αλήθειας του φαίνονται στο επόμενο σχήμα.

Λογικό κύκλωμα



Πίνακας Αλήθειας

$Q_t$	S	R	$Q_{(t+1)}$	$Q'_{(t+1)}$
0	0	0	απροσδιόριστη	
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	απροσδιόριστη	
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

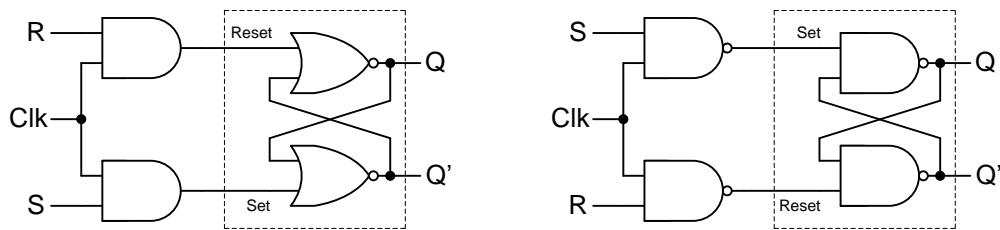
Η σύγκριση των πινάκων αλήθειας των δύο μανταλωτών δείχνει ότι η συμπεριφορά τους είναι ίδια, όταν οι τιμές των εισόδων τους είναι μεταξύ τους συμπληρωματικές. Ο μανταλωτής με πύλες NOR οδηγεί το κύκλωμα σε κατάσταση αδράνειας ( $Q^+ = Q$ ) όταν  $S = R = 0$ . Αντίθετα, ο μανταλωτής με πύλες NAND οδηγεί το κύκλωμα σε αδράνεια όταν  $S = R = 1$ . Αντίστοιχα, η απροσδιόριστη κατάσταση στον μανταλωτή με πύλες NOR προκαλείται όταν  $S = R = 1$ , ενώ στον μανταλωτή με πύλες NAND προκαλείται όταν  $S = R = 0$ . Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και όσον αφορά στις καταστάσεις ενεργοποίησης και μηδενισμού.

### Χρονιζόμενα flip-flop (μανταλωτές) τύπου SR

Τα FF τύπου SR που εξετάσαμε είναι ασύγχρονα κυκλώματα και παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στους οποιουδήποτε τυχαίους παλμούς μικρού εύρους στις εισόδους του, οι οποίοι είναι δυνατό να αλλάξουν την κατάσταση εξόδου Q σε ανεπιθύμητο χρόνο.

Για να αποφύγουμε τέτοια προβλήματα, συγχρονίζουμε τις εισόδους του FF προσθέτοντας μια ακόμη είσοδο, την είσοδο χρονισμού ή είσοδο ρολογιού (Clock, Clk, CP), η οποία μετατρέπει το FF σε σύγχρονο και ελέγχει χρονικά τη μεταβολή των καταστάσεων εξόδου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα χρονιζόμενα SR FF με πύλες NOR και πύλες NAND, το χοντρικό διάγραμμα, ο πίνακας αλήθειας και ο χαρακτηριστικός πίνακας.



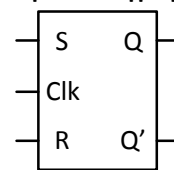
Πίνακας Αλήθειας

$Q_t$	S	R	$Q_{(t+1)}$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	απροσδιόριστη
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	απροσδιόριστη

Χαρακτηριστικός Πίνακας

S	R	$Q_{(t+1)}$
0	0	$Q_t$
0	1	0
1	0	1
1	1	απροσδιόριστη

Χοντρικό Διάγραμμα

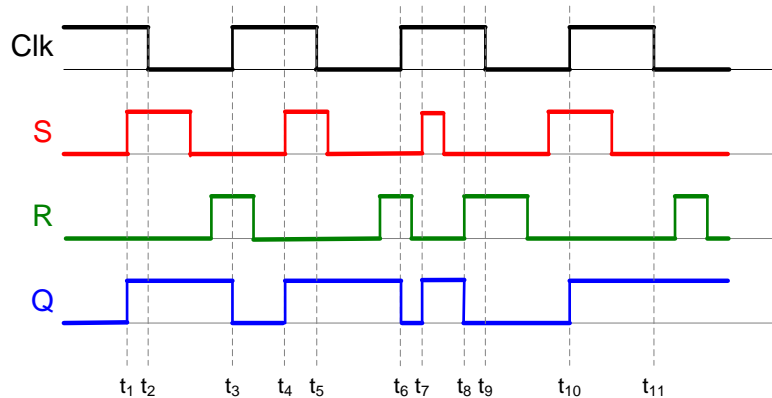


Στο χρονιζόμενο FF μόνον όταν ο παλμός του ρολογιού είναι στο λογικό "1" ( $Clk = 1$ ), δηλαδή στη διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού του ρολογιού, επιτρέπεται οι τιμές των S και R να "περάσουν" στις εισόδους Set και Reset και να επηρεάσουν τη λειτουργία του. Όταν  $Clk = 0$ , το κύκλωμα παραμένει στην προηγούμενη κατάστασή του (αδράνεια). Στην περίπτωση αυτή το flip-flop λέγεται ότι λειτουργεί με **πυροδότηση παλμού** (pulse triggering).

**Παράδειγμα 3.** Εάν στις εισόδους ενός χρονιζόμενου μανταλωτή SR εφαρμοστούν οι παλμοσειρές του σχήματος, να προσδιοριστεί η κυματομορφή της εξόδου Q (Διάγραμμα Χρονισμού).

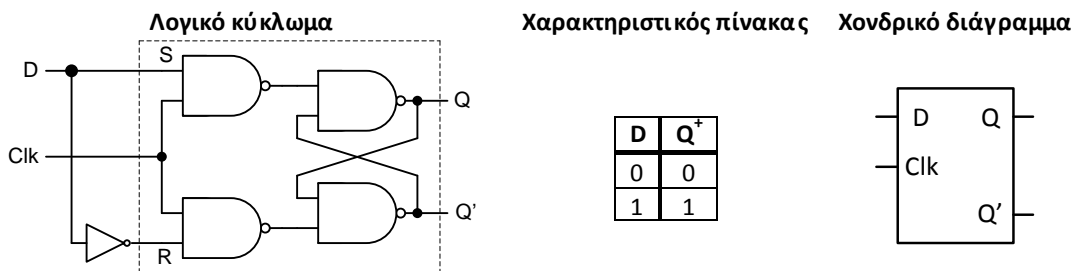
Η κυματομορφή της εξόδου Q δείχνεται στο ίδιο σχήμα.

Σημειώνεται ότι οι οποιοσδήποτε αλλαγές μπορούν να συμβούν μόνο κατά τη διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού του ρολογιού. Παρατηρείται ότι για όσο χρόνο ο παλμός χρονισμού είναι σε λογικό "1", η κατάσταση εξόδου του FF εξαρτάται από τις καταστάσεις των εισόδων του S και R και μπορεί να αλλάξει μία ή περισσότερες φορές, όπως φαίνεται στο διάγραμμα χρονισμού. Αυτή η ιδιότητα των FF με πυροδότηση παλμού αποτελεί ένα σοβαρό μειονέκτημα και θα δούμε στη συνέχεια με ποιο τρόπο μπορεί να αντιμετωπιστεί



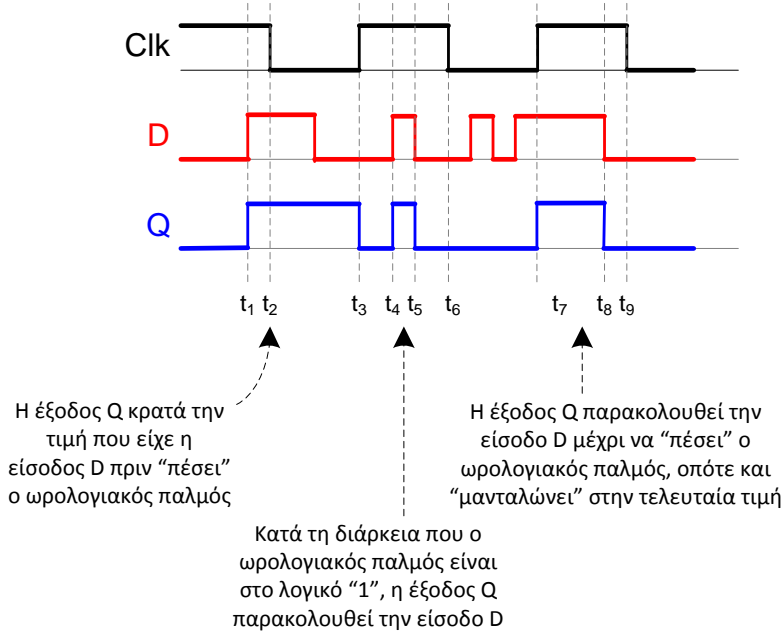
### Flip-flop (μανταλωτής) τύπου D

Εάν προσθέσουμε μία πύλη NOT μεταξύ των εισόδων S και R ενός χρονιζόμενου SR μανταλωτή, προκύπτει ένας νέος μανταλωτής με μία είσοδο D. Η είσοδος D αντιστοιχεί στην είσοδο S. Με τον τρόπο αυτό λειτουργούμε το κύκλωμα του μανταλωτή SR μόνο για τις καταστάσεις  $S = 0, R = 1$  και  $S = 1, R = 0$ . Επομένως, όταν  $D = 0$  τότε  $Q = 0$  και όταν  $D = 1$  τότε  $Q = 1$ . Λόγω του χρονισμού, οι οποιοσδήποτε αλλαγές συμβαίνουν μόνο κατά τη διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού του ρολογιού. Ο μανταλωτής αυτός ονομάζεται μανταλωτής τύπου D και στο παρακάτω σχήμα φαίνονται το λογικό κύκλωμα, ο χαρακτηριστικός πίνακας και το χονδρικό διάγραμμα.



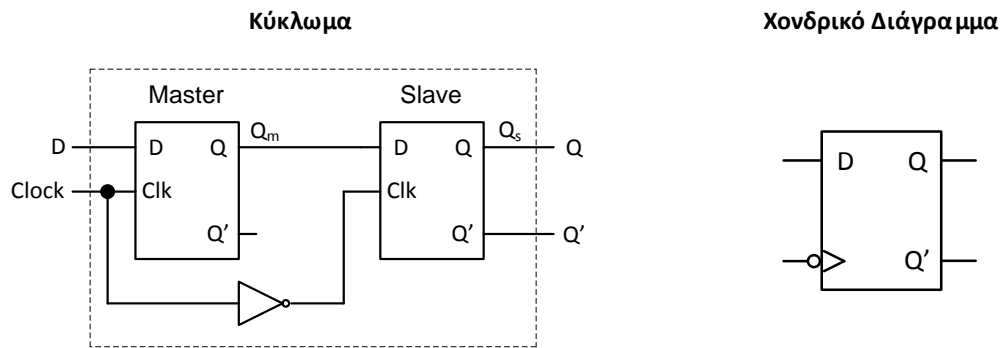
**Παράδειγμα 4.** Εάν στην είσοδο ενός χρονιζόμενου μανταλωτή τύπου D εφαρμοστεί η παλμοσειρά του σχήματος, να προσδιοριστεί η κυματομορφή της εξόδου Q (Διάγραμμα Χρονισμού).

Η κυματομορφή της εξόδου Q δείχνεται στο ίδιο σχήμα.



### Master-Slave D flip-flop

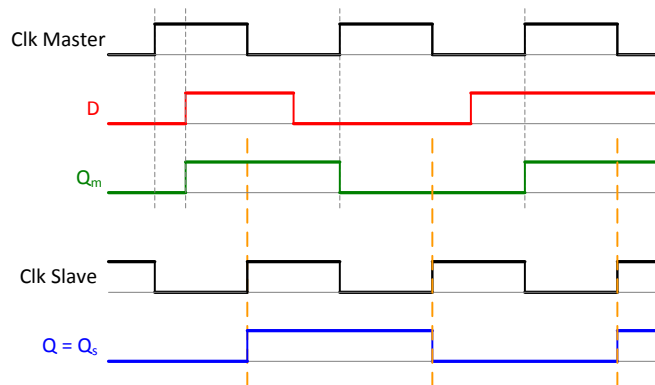
Συνδέουμε δύο χρονιζόμενους μανταλωτές τύπου D, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο πρώτος μανταλωτής, που ονομάζεται Master (“αφέντης” – κύριος), δέχεται σήμα ρολογιού Clk, είσοδο D και παράγει έξοδο  $Q_m$ . Ο δεύτερος μανταλωτής, που ονομάζεται Slave (“σκλάβος” – εξαρτώμενος), δέχεται σήμα ρολογιού το συμπλήρωμα του Clk, είσοδο την έξοδο του κύριου μανταλωτή  $Q_m$  και παράγει έξοδο  $Q_s = Q$ . Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται **Master-Slave D flip-flop** και το χονδρικό του διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα.



Η λειτουργία του φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα χρονισμού. Παρατηρούμε ότι όταν ο ωρολογιακός παλμός του Clk είναι “1”, ο μανταλωτής Master παρακολουθεί την τιμή της εισόδου D, ενώ ο μανταλωτής Slave παραμένει σε αδράνεια αφού δέχεται σήμα ρολογιού το συμπλήρωμα του Clk, δηλαδή “0”. Επομένως η έξοδος  $Q_m$  παρακολουθεί τις αλλαγές της εισόδου D, ενώ η έξοδος  $Q_s$



παραμένει σταθερή. Όταν  $Clk = 0$ , ο μανταλωτής Master παύει να παρακολουθεί τις αλλαγές της εισόδου  $D$ , ενώ ταυτόχρονα ο μανταλωτής Slave αποκρίνεται στην τιμή της  $Q_m$  και μεταβάλλει την έξοδο του  $Q_s$  ανάλογα. Εφόσον η τιμή της  $Q_m$  δεν αλλάζει όσο  $Clk = 0$ , ο μανταλωτής Slave μπορεί να υποστεί το πολύ μία αλλαγή κατά τη διάρκεια ενός ωρολογιακού παλμού. Επομένως το συνολικό κύκλωμα Master – Slave αλλάζει την κατάστασή του  $Q = Q_s$  κατά την αλλαγή του ωρολογιακού παλμού  $Clk$  από “1” σε “0”, δηλαδή κατά το κατερχόμενο μέτωπο του ωρολογιακού παλμού. Επομένως, ανεξάρτητα από τον αριθμό μεταβολών της εισόδου  $D$  κατά τη διάρκεια ενός ωρολογιακού παλμού, η έξοδος  $Q$  του συνολικού κυκλώματος θα παρουσιάζει μόνο την αλλαγή που αντιστοιχεί στην τιμή της εισόδου  $D$  κατά το κατερχόμενο μέτωπο του ωρολογιακού παλμού  $Clk$ .



Ο όρος flip-flop δηλώνει ένα στοιχείο μνήμης που αλλάζει την κατάσταση της εξόδου του κατά το μέτωπο ενός ωρολογιακού παλμού. Το γραφικό σύμβολο “>” στο χονδρικό διάγραμμα εννοεί ότι το flip-flop ανταποκρίνεται στο “ενεργό μέτωπο” του ωρολογιακού παλμού, ενώ ο κύκλος αντιστροφής στην είσοδο του ωρολογιακού σήματος σημαίνει ότι το ενεργό μέτωπο του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι το αρνητικό ή κατερχόμενο μέτωπο. Το κύκλωμα μπορεί να τροποποιηθεί, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στο ανερχόμενο μέτωπο του ωρολογιακού παλμού, εάν συνδεθεί ο μανταλωτής Slave απευθείας με το ωρολογιακό σήμα και ο μανταλωτής Master στο συμπλήρωμα του ωρολογιακού σήματος. Τα flip-flop που ανταποκρίνονται σε ενεργό μέτωπο του ωρολογιακού παλμού ονομάζονται **ακμοπυροδότητα** (edge triggered) και στο εξής τα flip-flop που θα εξετάσουμε θα θεωρούμε ότι είναι αυτού του τύπου.

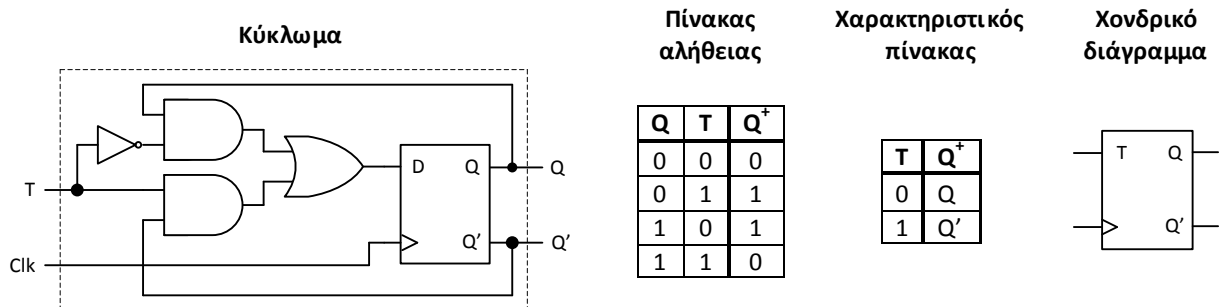
## T flip-flop

Το T flip-flop είναι ένα κύκλωμα με μία είσοδο,  $T$ , που περιλαμβάνει ένα συνδυαστικό τμήμα πυλών το οποίο τροφοδοτεί την είσοδο ενός D flip-flop. Στο σχήμα που ακολουθεί έχει χρησιμοποιηθεί ένα D FF θετικής ακμοπυροδότησης, άρα και το T FF που προκύπτει θα έχει ομοίως θετική ακμοπυροδότηση.

Από το κύκλωμα προκύπτει ότι:

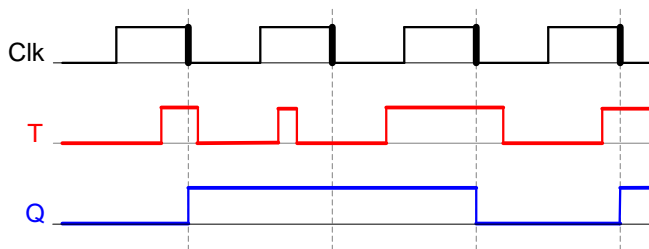
$$Q+ = T'Q + TQ' = T \oplus Q$$

Από τον πίνακα αλήθειας της συνάρτησης λειτουργίας του T FF προκύπτει ότι, όταν  $T = 0$ , η κατάσταση εξόδου παραμένει αμετάβλητη, δηλαδή  $Q^+(T=0) = Q$ , ενώ όταν  $T = 1$ , σε κάθε θετικό μέτωπο του ωρολογιακού παλμού θα αντιστρέφεται η προηγούμενη κατάσταση, δηλαδή  $Q^+(T=1) = Q'$ .



**Παράδειγμα 5.** Εάν στην είσοδο ενός T flip-flop με αρνητική ακμοπυροδότηση εφαρμοστεί η παλμοσειρά του σχήματος, να προσδιοριστεί η κυματομορφή της εξόδου Q (Διάγραμμα Χρονισμού). Αρχική κατάσταση εξόδου  $Q = 0$ .

Η κυματομορφή της εξόδου Q δείχνεται στο ίδιο σχήμα.



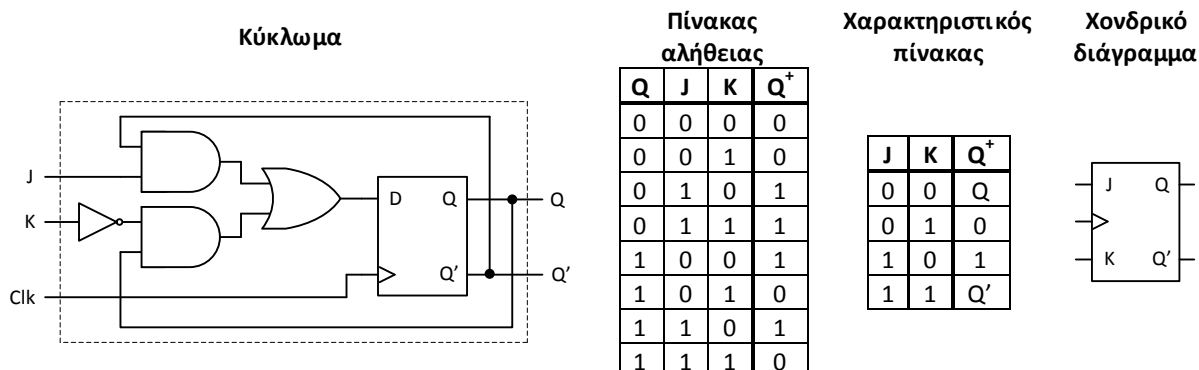
### JK flip-flop

Ένα άλλο κύκλωμα, που κατασκευάζεται με παρόμοιο τρόπο, είναι το JK flip-flop. Περιλαμβάνει ένα συνδυαστικό τμήμα πυλών με δύο εισόδους, J και K, το οποίο τροφοδοτεί την είσοδο ενός D flip-flop. Στο σχήμα που ακολουθεί έχει χρησιμοποιηθεί ένα D FF θετικής ακμοπυροδότησης, άρα και το JK FF που προκύπτει θα έχει ομοίως θετική ακμοπυροδότηση. Από το κύκλωμα προκύπτει ότι:

$$Q^+ = JQ' + K'Q$$

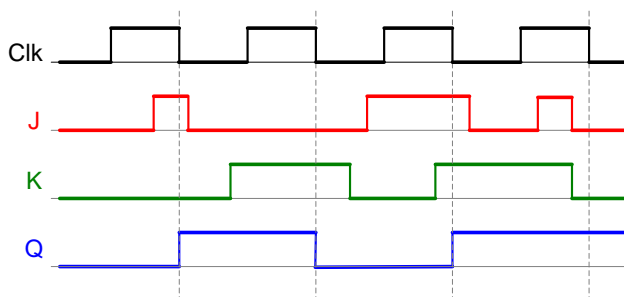
Από τον πίνακα αλήθειας της συνάρτησης λειτουργίας του JK FF προκύπτει ότι, όταν  $J = 0$  και  $K = 0$ , η κατάσταση εξόδου παραμένει αμετάβλητη, δηλαδή  $Q^+ = Q$ , ενώ όταν  $J = 1$  και  $K = 1$ , σε κάθε θετικό μέτωπο του ωρολογιακού παλμού θα αντιστρέφεται η προηγούμενη κατάσταση, δηλαδή  $Q^+ = Q'$ . Επομένως, για  $J = K$  (βραχυκυκλωμένες εισόδους) το JK FF συμπεριφέρεται ως T FF. Αντίστοιχα, για  $J = 0$  και  $K = 1$ , μηδενίζεται η κατάσταση εξόδου ( $Q = 0$ ), ενώ για  $J = 1$  και  $K = 0$ , η κατάσταση εξόδου

ενεργοποιείται ( $Q = 1$ ), δηλαδή για αυτούς τους συνδυασμούς τιμών των J και K το JK flip-flop συμπεριφέρεται ως SR flip-flop.



**Παράδειγμα 6.** Εάν στις εισόδους ενός JK flip-flop με αρνητική ακμοπυροδότηση εφαρμοστούν οι παλμοσειρές του σχήματος, να προσδιοριστεί η κυματομορφή της εξόδου Q (Διάγραμμα Χρονισμού). Αρχική κατάσταση εξόδου  $Q = 0$ .

Η κυματομορφή της εξόδου Q δείχνεται στο ίδιο σχήμα.

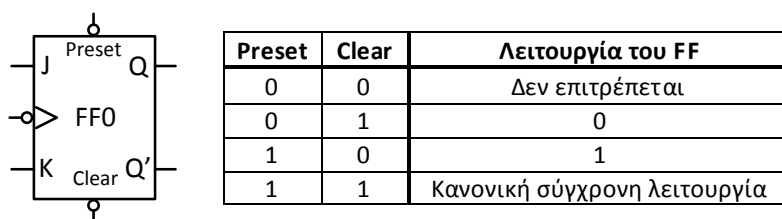


### Ασύγχρονες εισόδους Ενεργοποίησης (Preset) και Μηδενισμού (Clear)

Οι εισόδους των flip-flop που εξετάσαμε μέχρι τώρα είναι σύγχρονοι εισόδοι, επειδή η επίδρασή τους στη λειτουργία των flip-flop συγχρονίζεται με τους ωρολογιακούς παλμούς. Συνήθως όμως τα flip-flop διαθέτουν επιπλέον μία ή δύο ασύγχρονες εισόδους, οι οποίες λειτουργούν ανεξάρτητα από τις άλλες εισόδους και την είσοδο του ρολογιού. Αυτές οι εισόδους χρησιμοποιούνται για να καθορίζουν την κατάσταση (έξοδο) Q του flip-flop και συγκεκριμένα, για να τη θέσουν στην κατάσταση “1” (Preset) ή για να την μηδενίσουν (Clear), σε οποιαδήποτε χρονικά στιγμή, ανεξάρτητα από τις τιμές των άλλων (σύγχρονων) εισόδων και τον ωρολογιακό παλμό.

Οι ασύγχρονες εισόδους μπορούν να ενεργοποιούνται είτε με λογικό “0” (active low), είτε με λογικό “1” (active high). Η ενεργοποίησή τους γίνεται συνήθως με ένα στιγμιαίο παλμό. Όταν ενεργοποιούνται με λογικό “0” (active low), τοποθετείται ένας κύκλος αντιστροφής στην αντίστοιχη είσοδο στο χονδρικό διάγραμμα του flip-flop, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για ένα JK FF. Αυτό σημαίνει ότι όταν μια

από τις ασύγχρονες εισόδους ενεργοποιηθεί με λογικό "0", τότε η έξοδος Q του FF θα μεταβεί αμέσως στην αντίστοιχη κατάσταση ( $Q = 1$  για  $\text{Preset} = 1$  και  $Q = 0$  για  $\text{Clear} = 0$ ), ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία ήταν το FF ή τις τιμές που έχουν οι εισοδοί του και ο ωρολογιακός παλμός εκείνη τη στιγμή. Όταν οι ασύγχρονες εισοδοί είναι απενεργοποιημένες, το FF λειτουργεί κανονικά, όπως το έχουμε εξετάσει μέχρι τώρα. Η περίπτωση κατά την οποία και οι δύο ασύγχρονες εισοδοί είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένες οδηγεί σε απροσδιοριστία και πρέπει να αποφεύγεται. Να σημειωθεί ότι, επειδή οι ασύγχρονες εισοδοί λειτουργούν ανεξάρτητα από τους ωρολογιακούς παλμούς, μπορεί η ενεργοποίησή τους να είναι active low και ο χρονισμός του FF να είναι θετικής ακμυροδότησης ή αντίστροφα.



**Παράδειγμα 7.** Εάν στις εισόδους ενός T flip-flop με αρνητική ακμυροδότηση και active low ασύγχρονες εισόδους εφαρμοστούν οι παλμοσειρές του σχήματος, να προσδιοριστεί η κυματομορφή της εξόδου Q (Διάγραμμα Χρονισμού).

