

ΒΑΣΙΚΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

6.1 Εισαγωγή

Τα ψηφιακά κυκλώματα διακρίνονται σε συνδυαστικά και ακολουθιακά. Τα κυκλώματα που εξετάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια ήταν συνδυαστικά. Οι τιμές των εξόδων των *συνδυαστικών* (*combinational*) κυκλωμάτων εξαρτώνται μόνο από τις τιμές των εισόδων τους τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Οι τιμές των εξόδων των *ακολουθιακών* (*sequential*) κυκλωμάτων δεν εξαρτώνται μόνο από τις παρούσες τιμές των εισόδων, αλλά και από τις τιμές τους σε προηγούμενες χρονικές στιγμές. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ακολουθιακών κυκλωμάτων, τα σύγχρονα και τα ασύγχρονα. Έστω $x(t)$ η είσοδος και $z(t)$ η έξοδος ενός λογικού κυκλώματος τη χρονική στιγμή t . Για τα συνδυαστικά κυκλώματα ισχύει $z(t)=f(x(t))$, ενώ για τα ακολουθιακά κυκλώματα ισχύει $z(t)=f(x(0, t))$, όπου με $(0, t)$ συμβολίζεται το χρονικό διάστημα από τη χρονική στιγμή 0 έως την χρονική στιγμή t .

Σύγχρονα (*synchronous*) ονομάζονται τα ακολουθιακά κυκλώματα των οποίων οι είσοδοι και οι έξοδοι εξετάζονται σε διακριτές χρονικές στιγμές που καθορίζονται από τους παλμούς (*pulses*) ενός σήματος συγχρονισμού που ονομάζεται σήμα ωρολογίου (*clock*) και συμβολίζεται με *CLK*. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών παλμών του σήματος ωρολογίου είναι σταθερό και ονομάζεται *περίοδος*, ή *κύκλος ωρολογίου* (*clock cycle*) ή απλά *κύκλος*. Οι διαδοχικές χρονικές στιγμές που καθορίζει το σήμα ωρολογίου συμβολίζονται με φυσικούς αριθμούς, όπως $t=1, 2, 3, \dots$

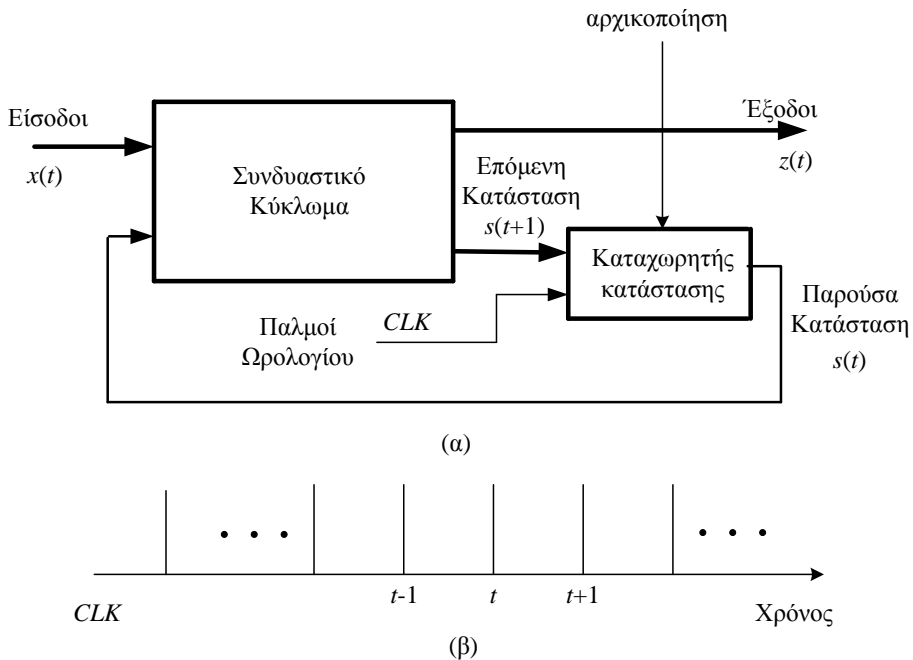
Ασύγχρονα (*asynchronous*) είναι τα ακολουθιακά κυκλώματα των οποίων η παράμετρος του χρόνου είναι συνεχής και τα σήματα εισόδου και εξόδου πρέπει να ορίζονται κάθε χρονική στιγμή.

6.2 Συστήματα πεπερασμένων καταστάσεων

Στα ακολουθιακά κυκλώματα οι προηγούμενες εισόδοι επιδρούν στην παρούσα έξοδο. Σαν συνέπεια φαίνεται αναγκαίο να μπορούν να αποθηκεύουν την πλήρη σειρά των εισόδων $x(0, t)$ για να προσδιορίζουν την έξοδό τους τη χρονική στιγμή t . Τα σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται στην πράξη έχουν την ιδιότητα οι ακολουθίες των εισόδων να μπορούν να χωρισθούν σε πεπερασμένο αριθμό κλάσεων (*classes*), έτσι ώστε αυτές που έχουν την ίδια επίδραση στην έξοδο τη χρονική στιγμή t να ανήκουν στην ίδια κλάση. Σαν αποτέλεσμα, για τον καθορισμό της εξόδου $z(t)$ δεν χρειάζεται η πλήρης ακολουθία εισόδων $x(0, t)$ αλλά η γνώση της κλάσης στην οποία ανήκει. Η κάθε κλάση εκφράζεται με μία μεταβλητή που ονομάζεται *κατάσταση* (*state*) η οποία επίσης είναι συνάρτηση του χρόνου και συμβολίζεται με $s(t)$. Επειδή στα ακολουθιακά κυκλώματα που θα εξετάσουμε ο αριθμός των κλάσεων και κατά συνέπεια των καταστάσεων είναι πεπερασμένος, τα συστήματα αυτά ονομάζονται *συστήματα* (ή *μηχανές*) *πεπερασμένων καταστάσεων* (*finite state machines*). Για την περιγραφή αυτών των κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται τρεις μεταβλητές, εισόδου, κατάστασης και εξόδου.

6.3 Δομή των ακολουθιακών κυκλωμάτων

Στο σχήμα 6.1α δίδεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός σύγχρονου ακολουθιακού κυκλώματος. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από έναν καταχωρητή κατάστασης και ένα συνδυαστικό κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για να υλοποιεί την αλλαγή κατάστασης και να υπολογίζει τις εξόδους. Επειδή το σύστημα είναι σύγχρονο, ένα σήμα ωρολογίου *CLK* προσδιορίζει τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες η επόμενη κατάσταση θα φορτώνεται στον καταχωρητή κατάστασης. Το σήμα ωρολογίου συνίσταται από περιοδικούς παλμούς που στην ιδανική περίπτωση έχουν μηδενικό πλάτος, όπως δείχνεται στο σχήμα 6.1β. Κατά τον ωρολογιακό παλμό t φορτώνεται στον καταχωρητή κατάστασης η κατάσταση $s(t)$ και παραμένει αποθηκευμένη σε αυτόν έως τον επόμενο ωρολογιακό παλμό $t+1$. Η περιγραφή των ακολουθιακών κυκλωμάτων περιλαμβάνει και μία αρχική τιμή του καταχωρητή κατάστασης ώστε αυτά να έχουν την επιθυμητή συμπεριφορά. Η αρχικοποίηση του καταχωρητή κατάστασης γίνεται με την ενεργοποίηση της εισόδου *αρχικοποίησης* (*initialize input*).

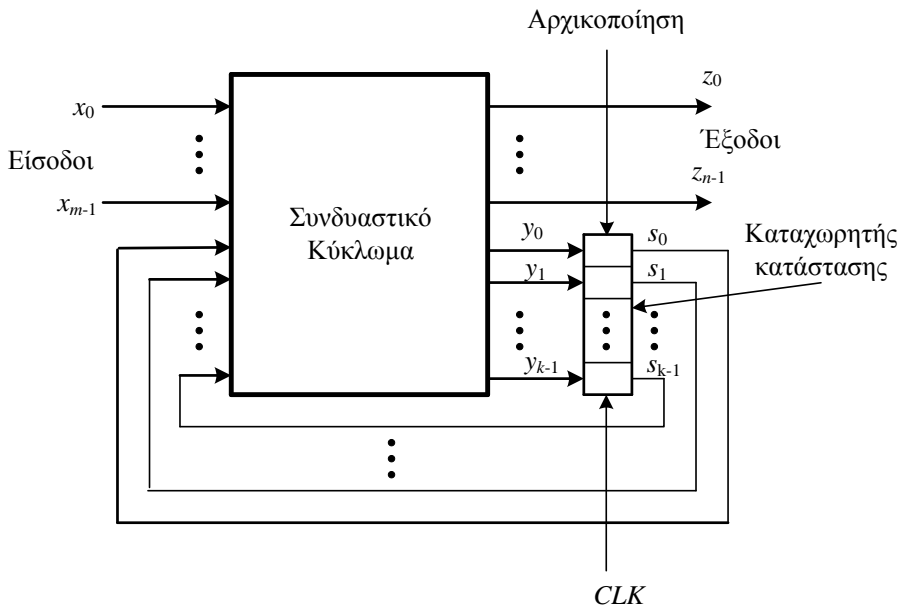


Σχήμα 6.1. Δομή σύγχρονου ακολουθιακού κυκλώματος (α) και ιδανικό σήμα ωρολογίου (β)

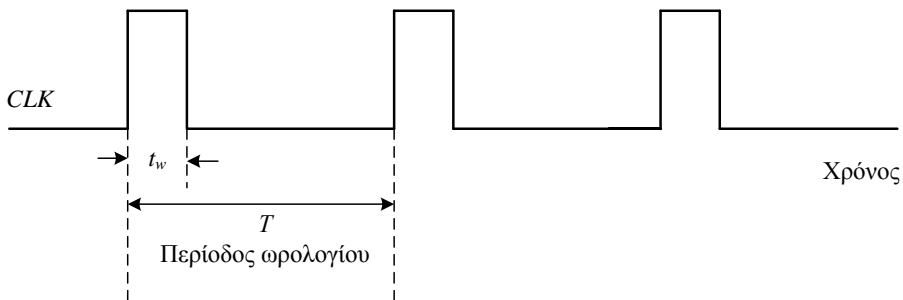
Στο σχήμα 6.2 δίδεται η δομή ενός σύγχρονου ακολουθιακού κυκλώματος το οποίο βασίζεται σε δυαδική κωδικοποίηση των μεταβλητών εισόδου, εξόδου και της κατάστασης. Ο καταχωρητής κατάστασης αποτελείται από στοιχεία μνήμης. Η είσοδος συμβολίζεται με $x=(x_{m-1}, \dots, x_0)$ και η έξοδος με $z=(z_{n-1}, \dots, z_0)$, η παρούσα κατάσταση είναι η $s=(s_{k-1}, \dots, s_0)$, ενώ η επόμενη κατάσταση είναι η $y=(y_{k-1}, \dots, y_0)$ με $x_i, z_i, s_i, y_i \in \{0, 1\}$.

Στην πράξη οι ωρολογιακοί παλμοί δεν έχουν μηδενικό πλάτος. Στο σχήμα 6.3 δίδονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πραγματικών σημάτων ωρολογίου σαν συνάρτηση του χρόνου. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η *περίοδος*, T και το *εύρος των παλμών*, t_w . Η περίοδος του σήματος ωρολογίου ονομάζεται όπως προαναφέραμε και *κύκλος ωρολογίου*, ή απλά *κύκλος*. Το πηλίκο t_w/T ονομάζεται *duty cycle*

Τα στοιχεία μνήμης που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του καταχωρητή κατάστασης στα σύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα ονομάζονται φλιπ-φλοπ. Τα *φλιπ-φλοπ* (*flip-flop*) μπορούν να αποθηκεύσουν ένα bit (0 ή 1) και έχουν συνήθως δύο εξόδους, μια για την τιμή του bit που είναι αποθηκευμένο σε αυτά και μια για το συμπλήρωμά της. Οι δυαδικές πληροφορίες μπορούν να εγγραφούν στο φλιπ-φλοπ με διάφορους τρόπους και έτσι έχουμε διάφορους τύπους φλιπ-φλοπ.



Σχήμα 6.2. Δομή σύγχρονου ακολουθιακού κυκλώματος με χρήση δυαδικών μεταβλητών



Σχήμα 6.3. Βασικά χαρακτηριστικά πραγματικού σήματος ωρολογίου

Ένα είδος μνήμης που εμπεριέχεται στα ασύγχρονα ακολουθιακά κυκλώματα είναι τα στοιχεία χρονικής καθυστέρησης. Η ικανότητα αποθήκευσης που έχουν τα στοιχεία αυτά οφείλεται στο χρόνο που χρειάζεται για να διαδοθεί το σήμα μέσω αυτών. Στην πράξη, η καθυστέρηση που εισάγουν οι λογικές πύλες είναι αρκετή και έτσι δεν χρειάζονται πιο πολύπλοκα στοιχεία μνήμης. Κατ' αυτόν τον τρόπο ένα ασύγχρονο ακολουθιακό κύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα συνδυαστικό κύκλωμα με ανάδραση (*feedback*). Λόγω της ανάδρασης, ένα τέτοιο κύκλωμα μπορεί ορισμένες φορές να είναι ασταθές (*unstable*). Τέτοιες αστάθειες προκαλούν δυσκολίες στη σχεδίασή τους.

6.4 Μανδαλωτές και φλιπ-φλοπ

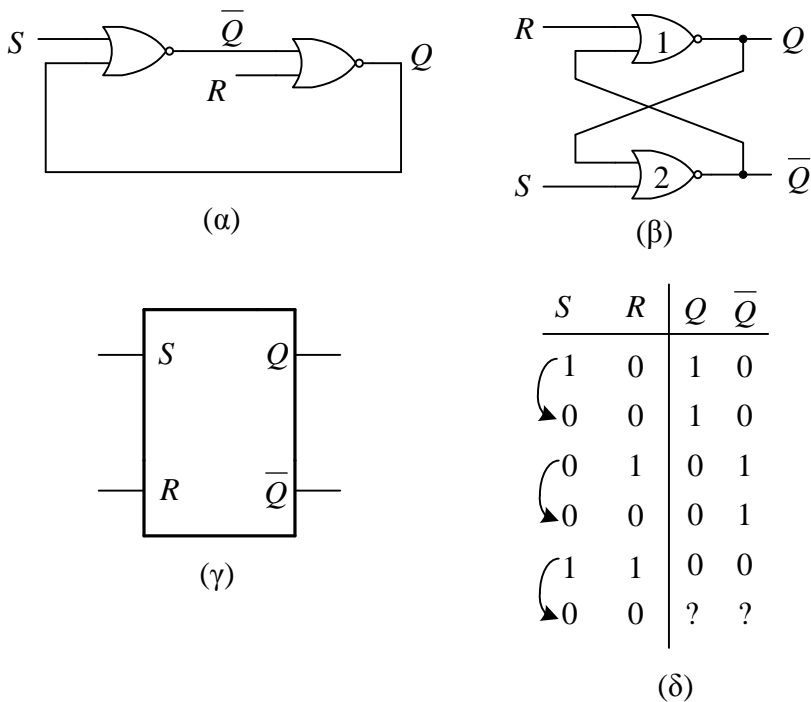
6.4.1 Βασικός μανδαλωτής

Ένα απλό και διαδομένο στοιχείο μνήμης είναι ο *μανδαλωτής SR* (*SR latch*). Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα τέτοιο κύκλωμα, χρησιμοποιώντας τις γνωστές λογικές πύλες NOR και NAND.

Μανδαλωτής με πύλες NOR

Ο *μανδαλωτής SR* (*SR latch*) μπορεί να κατασκευασθεί συνδέοντας δύο πύλες NOR, όπως δείχνεται στο σχήμα 6.4α. Το κύκλωμα έχει δύο εισόδους, τις *S* (Set) και *R* (Reset). Η απόδοση της λέξης Set στην ελληνική γλώσσα είναι "ενεργοποίηση", ή "θέση", ενώ της λέξης Reset είναι "απενεργοποίηση", "μηδενισμός", ή "επαναφορά". Η έξοδος *Q* δείχνει και την *κατάσταση* (*state*) του μανδαλωτή, ενώ η έξοδος \bar{Q} είναι συμπληρωματική της *Q*. Ένας πιο διαδεμένος τρόπος σχεδίασης του μανδαλωτή SR δίδεται στο σχήμα 6.4β όπου οι συνδέσεις των πυλών NOR είναι διασταυρωμένες (*cross coupled*). Στο σχήμα 6.4γ δίδεται το λογικό σύμβολο του μανδαλωτή SR. Στη συνέχεια αναλύουμε τη λειτουργία του μανδαλωτή SR του σχήματος 6.4β. Για $S=1$ και $R=0$ η έξοδος \bar{Q} της πύλης 2 γίνεται 0 (πύλη NOR), ανεξάρτητα από την τιμή της άλλης εισόδου. Συνεπώς, η πύλη 1 έχει και τις δύο εισόδους της στο λογικό 0 και άρα $Q=1$. Δηλαδή, για $S=1$ και $R=0$ έχουμε $Q=1$ και $\bar{Q}=0$ και η κατάσταση του μανδαλωτή γίνεται 1 (SET). Αν τώρα αλλάξουμε την τιμή της εισόδου *S* και την κάνουμε 0 ($S=0$), αυτή η αλλαγή δεν επηρεάζει την κατάσταση του κυκλώματος, η οποία παραμένει στο λογικό 1. Αυτό συμβαίνει, διότι η άλλη είσοδος της πύλης 2 εξακολουθεί να είναι στο λογικό 1. Δηλαδή, το κύκλωμα "θυμάται" την προηγούμενη κατάσταση.

Έστω τώρα ότι $R=1$ και $S=0$. Για $R=1$ η έξοδος της πύλης 1 γίνεται 0 ($Q=0$) και κατά συνέπεια η έξοδος της πύλης 2 γίνεται 1 ($\bar{Q}=1$), αφού και στις δύο εισόδους της εφαρμόζεται το λογικό 0. Άρα, για $S=0$ και $R=1$ επιτυγχάνεται "εκκαθάριση" ή "μηδενισμός" (RESET) του στοιχείου μνήμης.



Σχήμα 6.4. Μανδαλωτής SR με πύλες NOR

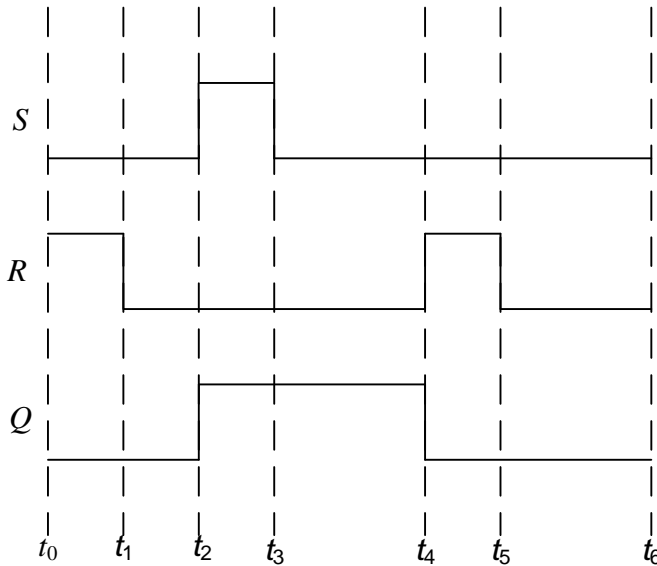
Αν επαναφέρουμε την είσοδο R στο λογικό 0, οπότε $S=0$ και $R=0$, η κατάσταση του μανδαλωτή δεν αλλάζει, δηλαδή $Q=0$ και $\bar{Q}=1$. Άρα και πάλι μπορούμε να πούμε ότι ο μανδαλωτής "θυμάται" την προηγούμενη κατάστασή του.

Συνοψίζοντας το κύκλωμα του σχήματος 6.4a είναι ένα βασικό στοιχείο μνήμης στο οποίο έχουμε τη δυνατότητα να αποθηκεύουμε το λογικό 1 θέτοντας $S=1$ και $R=0$ ή το λογικό 0 θέτοντας $S=0$ και $R=1$. Στην κατάσταση μνήμης και οι δύο είσοδοι S και R είναι στο λογικό 0.

Έστω τώρα ότι και οι δύο είσοδοι S και R γίνονται 1 ($S=1, R=1$). Στην περίπτωση αυτή και οι δύο έξοδοι των πυλών 1 και 2 γίνονται 0 ($Q=0, \bar{Q}=0$). Παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση οι έξοδοι δεν είναι η μία συμπληρωματική της άλλης. Εάν επαναφέρουμε ταυτόχρονα τις εισόδους στο λογικό 0, ($S=0, R=0$), τότε η κατάσταση (έξοδος) του μανδαλωτή SR θα είναι απροσδιόριστη. Εάν η είσοδος S γίνει 0, αφού ήδη έχει γίνει 0 η είσοδος R , τότε η έξοδος θα γίνει 1 ($Q=1$). Αν όμως η είσοδος R καθυστερήσει περισσότερο από την S να μεταβεί στο λογικό 0 (οπότε στιγμιαία θα έχουμε $S=0$ και $R=1$), τότε η έξοδος Q θα παραμείνει στο λογικό 0 ($Q=0$). Είναι φανερό ότι η περίπτωση $S=R=1$ του πίνακα

αλήθειας πρέπει να αποφεύγεται. Η πιο πάνω ανάλυση της λειτουργίας του μανδαλωτή συνοψίζεται στον πίνακα του σχήματος 6.4δ.

Παράδειγμα 6.1. Στη συνέχεια δίδεται η κυματομορφή της εξόδου Q του μανδαλωτή SR του σχήματος 6.4, όταν στις εισόδους του S , R εφαρμόζονται οι δοσμένες παλμοσειρές.



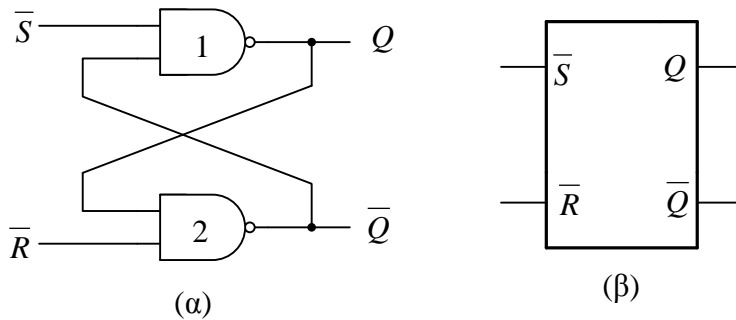
Το διάγραμμα αυτό προκύπτει ως εξής. Από τη χρονική στιγμή t_0 έως τη χρονική στιγμή t_1 , παρατηρούμε ότι $S=0$ και $R=1$, οπότε $Q=0$. Από την χρονική στιγμή t_1 έως τη χρονική στιγμή t_2 , $S=0$ και $R=0$, οπότε η έξοδος Q παραμένει στην τιμή που είχε τη χρονική στιγμή t_1 , δηλαδή $Q=0$. Από τη χρονική στιγμή t_2 έως τη χρονική στιγμή t_3 , $S=1$ και $R=0$, οπότε $Q=1$. Από τη χρονική στιγμή t_3 έως τη χρονική στιγμή t_4 , $S=0$ και $R=0$, οπότε η έξοδος Q παραμένει στην τιμή που είχε τη χρονική στιγμή t_3 , δηλαδή $Q=1$. Από τη χρονική στιγμή t_4 έως την χρονική στιγμή t_5 , $S=0$ και $R=1$, οπότε $Q=0$. Από τη χρονική στιγμή t_5 έως την χρονική στιγμή t_6 , $S=0$ και $R=0$, οπότε η έξοδος Q παραμένει στην τιμή που είχε τη χρονική στιγμή t_5 , δηλαδή $Q=0$.

Στο προηγούμενο παράδειγμα απεφεύχθη η περίπτωση κατά την οποία και οι δύο είσοδοι S και R να είναι ταυτόχρονα 1, δηλαδή $S=R=1$. Θεωρήσαμε επίσης ότι οι λογικές πύλες είναι ιδανικά στοιχεία με μηδενικό χρόνο αλλαγής λογικής κατάστασης, δηλαδή δεν έχουμε καθυστερήσεις διάδοσης (*propagation delay*).

Μανδαλωτής SR με πύλες NAND

Ο μανδαλωτής SR μπορεί να κατασκευασθεί με πύλες NAND αντί για πύλες NOR, όπως δείχνεται στο σχήμα 6.5α. Το λογικό σύμβολο του μανδαλωτή αυ-

τού του τύπου δίδεται στο σχήμα 6.5β. Η λειτουργία του συνοψίζεται στον πίνακα του σχήματος 6.5γ. Το λογικό 1 αποθηκεύεται θέτοντας $\bar{S} = 0$ και $\bar{R} = 1$, ενώ το λογικό 0 αποθηκεύεται θέτοντας $\bar{S} = 1$ και $\bar{R} = 0$. Η κατάσταση μνήμης είναι η $\bar{S} = \bar{R} = 1$, ενώ ο συνδυασμός $\bar{S} = \bar{R} = 0$ είναι αυτός που πρέπει να αποφεύγεται.



\bar{S}	\bar{R}	Q	\bar{Q}
0	1	1	0
1	1	1	0
1	0	0	1
1	1	0	1
0	0	1	1
1	1	?	?

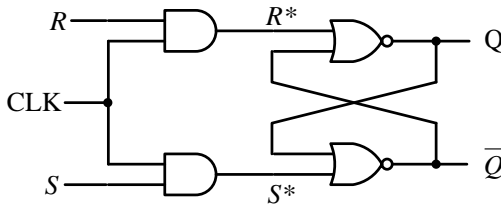
(γ)

Σχήμα 6.5. Μανταλωτής SR με πύλες NAND

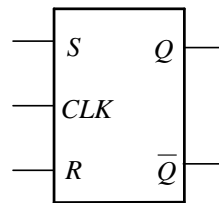
6.4.2 SR φλιπ-φλοπ

Οι μανδαλωτές SR που περιγράψαμε προηγουμένως είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι στους ανεπιθύμητους παλμούς μικρού εύρους (glitches), που μπορεί να παρουσιασθούν στις εισόδους S , R . Αυτοί οι παλμοί μπορούν να προκύψουν λόγω της διαφορετικής καθυστέρησης, που υφίστανται τα σήματα μέσα από ένα συνδυαστικό κύκλωμα. Για να αποφύγουμε τέτοια προβλήματα, μπορούμε να συγχρονίσουμε τις εισόδους του μανδαλωτή του σχήματος 6.4, προσθέτοντας δύο πύλες AND όπως δείχνεται στο σχήμα 6.6α. Στο κύκλωμα αυτό οι τιμές των εισόδων S και R περνούν στις εισόδους S^* και R^* του μανδαλωτή και επηρεάζουν τη

λειτουργία του μόνον όταν η είσοδος $CLK=1$. Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι οι είσοδοι S, R παραμένουν σταθερές όταν $CLK=1$. Όταν $CLK=0$, τότε οι είσοδοι S και R δεν μπορούν να επηρεάσουν τον μανδαλωτή και το κύκλωμα παραμένει στην προηγούμενη κατάσταση του. Στο σχήμα 6.6β δίδεται το λογικό σύμβολο του SR φλιπ-φλοπ με ρολόι, ενώ στο σχήμα 6.6γ δίδεται ο χαρακτηριστικός του πίνακας (*characteristic table*) στον οποίο αναλύεται η λειτουργία του. Στον χαρακτηριστικό πίνακα έχει συμπεριληφθεί και η κατάσταση του φλιπ-φλοπ, πριν εφαρμοσθεί ο ωρολογιακός παλμός t που συμβολίζεται ως $Q(t-1)$, ή για συντομία Q_{t-1} . Δηλαδή, αν γνωρίζουμε την κατάσταση του φλιπ-φλοπ, πριν εφαρμοσθεί ο ωρολογιακός παλμός καθώς και τις τιμές των εισόδων S, R κατά τη διάρκειά του, μπορούμε να βρούμε σε ποια κατάσταση $Q(t)$ (ή Q_t) θα βρεθεί αυτό μετά την εφαρμογή του παλμού t στην είσοδο ωρολογίου. Ο πίνακας 6.6γ μπορεί να συμπτυχθεί στον πιο συνοπτικό πίνακα 6.6δ που ονομάζεται *πίνακας λειτουργίας (function table)*.



(α)



(β)

S	R	Q_{t-1}	Q_t
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	?
1	1	1	?

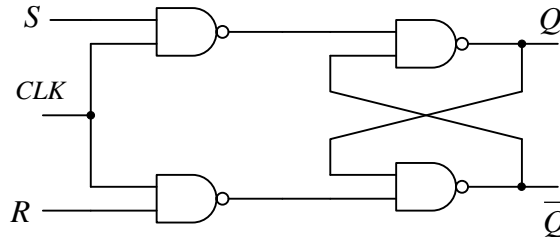
(γ)

S	R	Q_t
0	0	Q_{t-1}
0	1	0
1	0	1
1	1	?

(δ)

Σχήμα 6.6 Χρονιζόμενο SR φλιπ-φλοπ

Οι είσοδοι του μανδαλωτή SR του σχήματος 6.5 μπορούν να συγχρονισθούν με την προσθήκη δύο πυλών NAND όπως δείχνεται στο σχήμα 6.7. Το κύκλωμα του σχήματος 6.7 είναι ισοδύναμο με αυτό του σχήματος 6.6, έχει το ίδιο λογικό σύμβολο και τον ίδιο χαρακτηριστικό πίνακα και συνεπώς τον ίδιο πίνακα λειτουργίας.

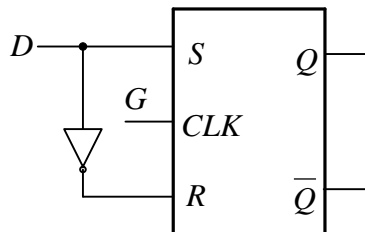


Σχήμα 6.7. SR φλιπ-φλοπ με πύλες NAND

Με την προσθήκη των λογικών πυλών στις εισόδους του μανδαλωτή SR το φλιπ-φλοπ που προέκυψε δεν επηρεάζεται πλέον από ανεπιθύμητες αιχμές που παρουσιάζονται στις εισόδους του και η λειτουργία του συγχρονίζεται από τους παλμούς που εφαρμόζονται στην είσοδο ωρολογίου (CLK). Δεν έχει όμως επιλυθεί ακόμα το πρόβλημα της απροσδιοριστίας όταν και οι δύο είσοδοι είναι 1. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία των φλιπ-φλοπ που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

6.4.3. D φλιπ-φλοπ

Το D φλιπ-φλοπ μπορεί να δημιουργηθεί με την προσθήκη ενός αντιστροφέα (πύλη NOT) από είσοδο S στην είσοδο R του χρονιζόμενου SR φλιπ-φλοπ όπως δείχνεται στο σχήμα 6.8.

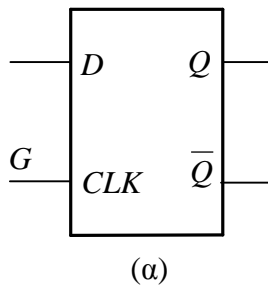


Σχήμα 6.8. Μετατροπή SR φλιπ-φλοπ σε D

Με τη μετατροπή αυτή η λειτουργία του SR φλιπ-φλοπ περιορίζεται στην 3^η, 4^η, 5^η και 6^η γραμμή του χαρακτηριστικού πίνακα του σχήματος 6.6γ, ή αντίστοιχα

στην 2^η και 3^η γραμμής του πίνακα λειτουργίας του σχήματος 6.6δ. Η έξοδος Q γίνεται ίση με την είσοδο D όταν η είσοδος ωρολογίου είναι στο λογικό 1 ($CLK=1$). Όταν η είσοδος αυτή μεταβεί στο λογικό 0, ή έξοδος Q παραμένει στην τελευταία τιμή που είχε πριν τη μετάβαση του παλμού CLK από το 1 στο 0. Το D φλιπ-φλοπ αυτού του τύπου ονομάζεται πολλές φορές και *μανταλωτής D* (*D latch*), παίρνοντας το όνομά του από τη δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων (*data*) σε αυτό.

Στο σχήμα 6.9α δίδεται το λογικό σύμβολο του D φλιπ-φλοπ. Ο χαρακτηριστικός πίνακας του D φλιπ-φλοπ δίδεται στο σχήμα 6.9β. Από τον πίνακα αυτόν φαίνεται ότι η επόμενη κατάσταση του D φλιπ-φλοπ είναι ανεξάρτητη από την τρέχουσα, αφού η έξοδος $Q(t)$ ισούται με την είσοδο D , ανεξάρτητα από το εάν η έξοδος $Q(t-1)$ πριν τον παλμό είναι 1 ή 0. Στο σχήμα 6.9γ δίδεται ο πίνακας λειτουργίας του D φλιπ-φλοπ, ενώ στο σχήμα 6.9δ δίδεται η χαρακτηριστική του εξίσωση σύμφωνα με την οποία η έξοδος $Q(t)$ είναι ίση με την είσοδο D κατά τη χρονική στιγμή t .



D	Q_{t-1}	Q_t
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

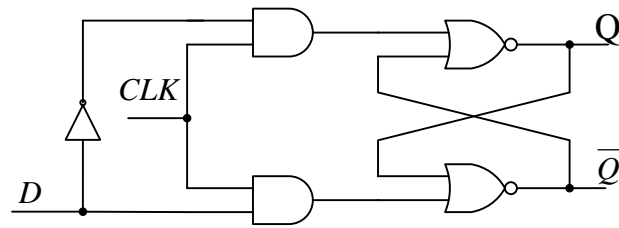
D	Q_t
0	0
1	1

	D	0	1
Q_{t-1}	0	0	1
	1	0	1

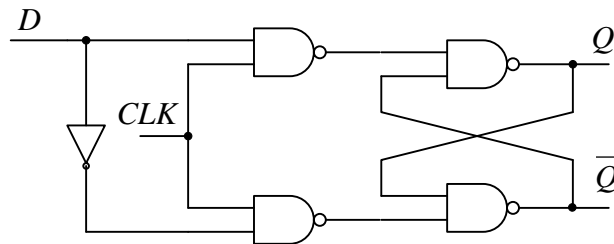
$Q_t = D$

Σχήμα 6.9. Φλιπ-φλοπ τύπου D (μανταλωτής D)

Στο σχήμα 6.10 δίδονται δύο υλοποιήσεις του D φλιπ-φλοπ με λογικές πύλες οι οποίες βασίζονται στην υλοποίηση του SR φλιπ-φλοπ του σχήματος 6.5 η (α) και στην υλοποίηση του σχήματος 6.6 η (β).



(α)

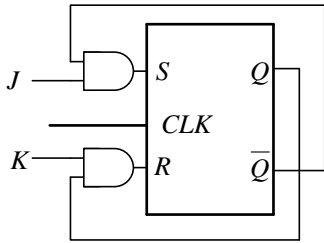


(β)

Σχήμα 6.10. Υλοποίηση φλιπ-φλοπ τύπου D με λογικές πύλες

6.4.4. JK φλιπ-φλοπ

Η απροσδιόριστη κατάσταση του SR φλιπ-φλοπ που προκύπτει όταν $S=R=1$ μπορεί να αποφευχθεί τροποποιώντας το κύκλωμα του σχήματος 6.6β, όπως δείχνεται στο σχήμα 6.11α. Η έξοδος Q οδηγείται μαζί με την είσοδο K σε μια πύλη AND που οδηγεί την είσοδο R σε τρόπο ώστε το φλιπ-φλοπ να μηδενίζεται για $K=1$ μόνο αν η έξοδος Q ήταν πριν 1 (\bar{Q} ίσο με 0). Παρόμοια, η έξοδος \bar{Q} οδηγείται μαζί με την είσοδο J στην ίδια πύλη AND που τροφοδοτεί την είσοδο S ώστε η κατάσταση του φλιπ-φλοπ να γίνεται 1 για $J=1$, μόνο αν το \bar{Q} ήταν πριν ίσο με 1 (και το Q ίσο με 0). Η λειτουργία του κυκλώματος αναλύεται στον πίνακα του σχήματος 6.11β.



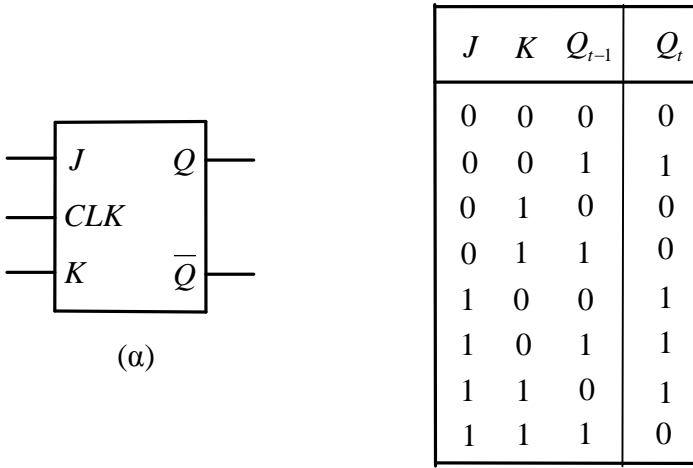
(α)

J	K	Q_{t-1}	\overline{Q}_{t-1}	S	R	Q_t
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1
1	0	1	0	0	0	1
1	1	0	1	1	0	1
1	1	1	0	0	1	0

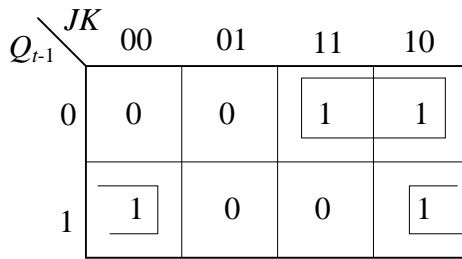
(β)

Σχήμα 6.11. Μετατροπή SR φλιπ-φλοπ σε JK

Το κύκλωμα που προκύπτει ονομάζεται JK φλιπ-φλοπ. Η λειτουργία του είναι ακριβώς ίδια με εκείνη του SR φλιπ-φλοπ, με μόνη διαφορά ότι το κύκλωμα αυτό δεν πηγαίνει σε απροσδιόριστη κατάσταση όταν και οι δύο εισόδους του είναι στο λογικό 1. Οι εισόδους J και K αντιστοιχούν στις εισόδους S και R , δηλαδή, η J ενεργοποιεί (set) το φλιπ-φλοπ, ενώ η K το απενεργοποιεί (reset). Όταν $J=K=1$ και μετά την έλευση παλμού στην είσοδο CLK η κατάσταση του φλιπ-φλοπ αντιστρέφεται, δηλαδή από 1 γίνεται 0 και από 0 γίνεται 1, δηλαδή η κατάσταση του JK φλιπ-φλοπ αλλάζει, μεταβαίνοντας κάθε φορά στην συμπληρωματική αυτής στην οποία ήταν. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας του JK φλιπ-φλοπ είναι πολύ χρήσιμος, ειδικά στη σχεδίαση απαριθμητών. Στο σχήμα 6.12 δίδεται το λογικό σύμβολο (α), ο χαρακτηριστικός πίνακας (β), ο πίνακας λειτουργίας (γ) και η χαρακτηριστική εξίσωση (δ) του JK φλιπ-φλοπ. Στο σχήμα 6.13 δίδονται δύο υλοποιήσεις του JK φλιπ-φλοπ με πύλες AND, NOR η (α) και με πύλες NAND η (β).



J	K	Q_t
0	0	Q_{t-1}
0	1	0
1	0	1
1	1	\bar{Q}_{t-1}

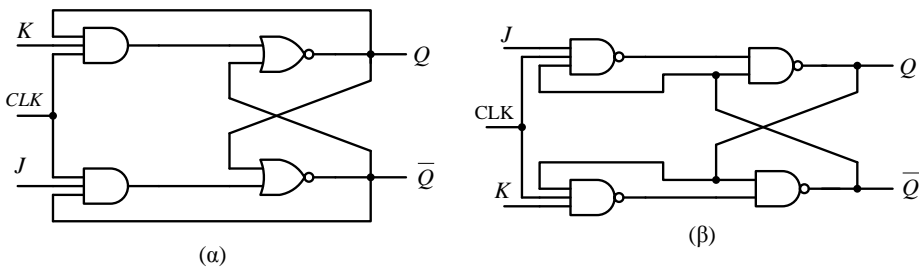


$$Q_t = J\bar{Q}_{t-1} + \bar{K}Q_{t-1}$$

(γ)

(δ)

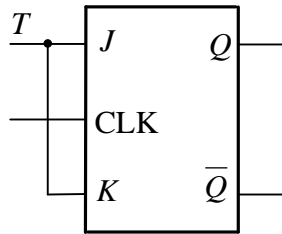
Σχήμα 6.12. Φλιπ-φλοπ τύπου JK



Σχήμα 6.13. Υλοποιήσεις του JK φλιπ-φλοπ

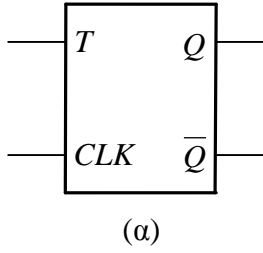
6.4.5. T φλιπ-φλοπ

Το T φλιπ-φλοπ προκύπτει από το JK φλιπ-φλοπ βραχυκυκλώνοντας τις εισόδους J , K όπως δείχνεται στο σχήμα 6.14. Με τη μετατροπή αυτή η λειτουργία του JK φλιπ-φλοπ περιορίζεται στην 1^η, 2^η, 7^η και 8^η γραμμή του χαρακτηριστικού πίνακα του σχήματος 6.12β, ή αντίστοιχα στην 1^η και 4^η γραμμή του πίνακα λειτουργίας του σχήματος 6.12δ.



Σχήμα 6.14. Μετατροπή JK φλιπ-φλοπ σε T

Στο σχήμα 6.15 δίδεται το λογικό σύμβολο (α), ο χαρακτηριστικός πίνακας (β), ο πίνακας λειτουργίας (γ) και η χαρακτηριστική εξίσωση (δ) του T φλιπ-φλοπ. Όταν $T=0$ το φλιπ-φλοπ μετά τον παλμό παραμένει στην προηγούμενη κατάσταση ("θυμάται"), ενώ όταν $T=1$, αυτό μεταβαίνει στη συμπληρωματική της προηγούμενης κατάστασής του. Αυτή ακριβώς η λειτουργία του, δηλαδή της μετάπτωσης από τη μία λογική κατάσταση στην άλλη (toggle), έδωσε και την ονομασία στο συγκεκριμένο φλιπ-φλοπ. Στο σχήμα 6.16 δίδονται δύο υλοποιήσεις του JK φλιπ-φλοπ (α) με πύλες AND, NOR και (β) με πύλες NAND.



T	Q_{t-1}	Q_t
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(β)

T	Q_t
0	Q_{t-1}
1	\bar{Q}_{t-1}

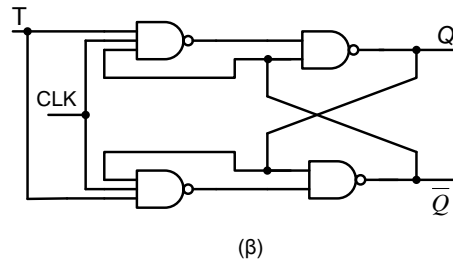
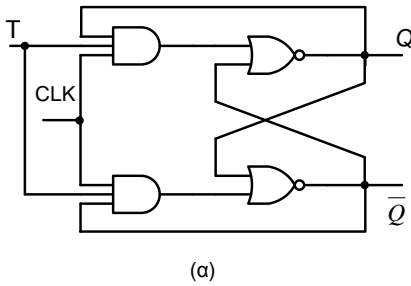
(γ)

$T \backslash Q_{t-1}$	0	1
0	0	1
1	1	0

$Q_t = T\bar{Q}_{t-1} + \bar{T}Q_{t-1}$

(δ)

Σχήμα 6.15. Φλιπ-φλοπ τύπου T



Σχήμα 6.16. Υλοποιήσεις του T φλιπ-φλοπ

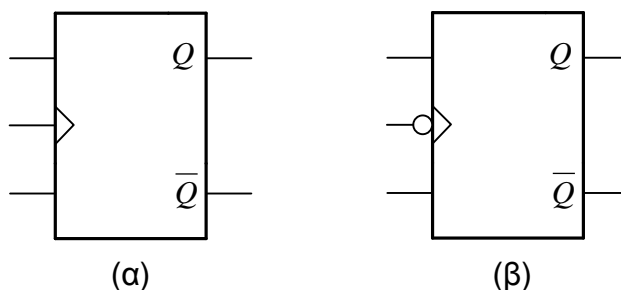
6.5. Ακμοπυροδοτούμενα φλιπ-φλοπ

Στην πράξη είναι επιθυμητό οι έξοδοι των φλιπ-φλοπ να αλλάζουν μόνο μία φορά κατά τη διάρκεια των ωρολογιακών παλμών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία φλιπ-φλοπ τα οποία ενεργοποιούνται κατά την άνοδο ή την κάθοδο των παλμών του ωρολογίου και όχι κατά το διάστημα που η είσοδος CLK είναι στο λογικό 1. Τα φλιπ-φλοπ αυτά ονομάζονται ακμοπυροδοτούμενα. Τα *ακμοπυροδοτούμενα φλιπ-φλοπ (edge-triggered flip-flop)* συγχρονίζουν την αλλαγή της κατάστασής τους με τις ακμές των παλμών του ωρολογίου. Όταν ο ωρολογιακός παλμός μεταβαίνει από το 0 στο 1 έχουμε μία *θετική ακμή* (σχήμα 6.17α) ενώ όταν μεταβαίνει από το 1 στο 0 μία *αρνητική ακμή* (σχήμα 6.17β).



Σχήμα 6.17. Θετικές (α) και αρνητικές (β) ακμές παλμών ωρολογίου

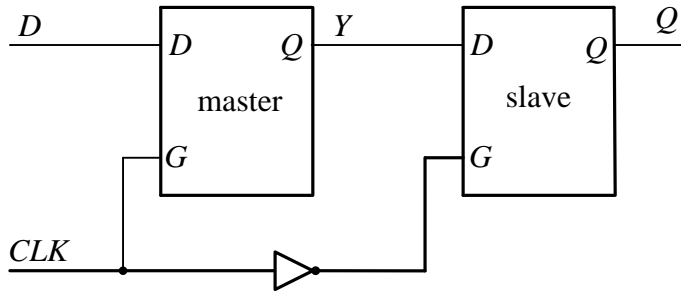
Τα ακμοπυροδοτούμενα φλιπ-φλοπ που αλλάζουν κατάσταση στη θετική ακμή των παλμών του ωρολογίου ονομάζονται *θετικά ακμοπυροδοτούμενα φλιπ-φλοπ (positive edge-triggered flip-flop)*, ενώ αυτά που αλλάζουν κατάσταση στην αρνητική ακμή των παλμών του ωρολογίου ονομάζονται *αρνητικά ακμοπυροδοτούμενα φλιπ-φλοπ (negative edge-triggered flip-flop)*. Για τα ακμοπυροδοτούμενα φλιπ-φλοπ χρησιμοποιείται ειδικός συμβολισμός στην είσοδο ωρολογίου. Ο ειδικός συμβολισμός στην είσοδο ωρολογίου των θετικά ακμοπυροδοτούμενων φλιπ-φλοπ δίδεται στο σχήμα 6.18α, ενώ ο αντίστοιχος των αρνητικά ακμοπυροδοτούμενων φλιπ-φλοπ στο σχήμα 6.18β.



Σχήμα 6.18. Θετικά (α) και αρνητικά(β) ακμοπυροδοτούμενα φλιπ-φλοπ.

6.5.1. Ακμοπυροδοτούμενα D φλιπ-φλοπ

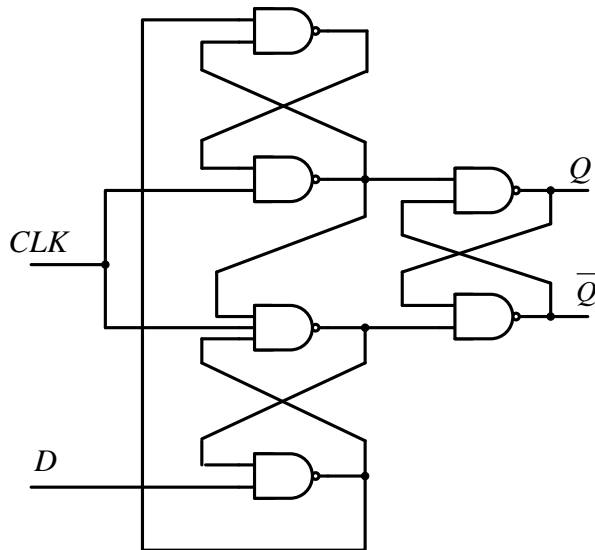
Τα αρνητικά ακμοπυροδοτούμενα D φλιπ-φλοπ μπορούν να κατασκευασθούν συνδέοντας δύο μανταλωτές τύπου D όπως αυτοί του σχήματος 6.9, ομοίως δείχνεται στο σχήμα 6.19. Η δομή αυτή ονομάζεται *master-slave D φλιπ-φλοπ*.



Σχήμα 6.19. Master-Slave D φλιπ-φλοπ

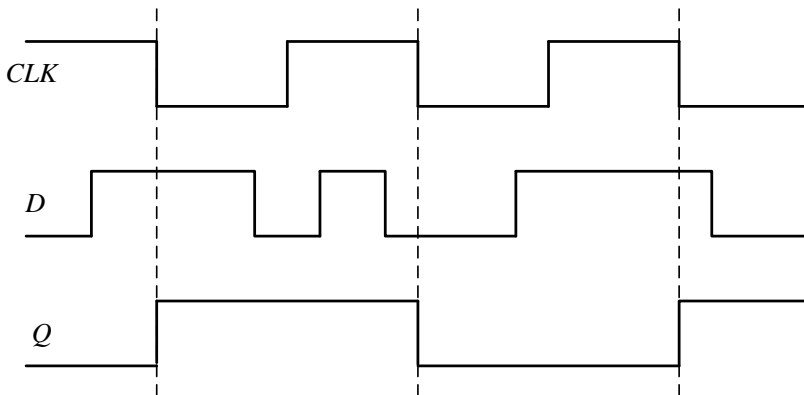
Ο πρώτος μανδαλωτής D ονομάζεται master (κύριος) και αλλάζει κατάσταση όταν $CLK=1$. Ο δεύτερος μανδαλωτής ονομάζεται slave (εξαρτημένος) και αλλάζει κατάσταση λόγω της ύπαρξης του αντιστροφέα όταν $CLK=0$. Όταν $CLK=1$, ο μανδαλωτής master παρακολουθεί τις αλλαγές της εισόδου D , ενώ ο slave είναι απενεργοποιημένος. Επομένως η έξοδος Y του κύριου μανδαλωτή παρακολουθεί την είσοδο D ενώ η έξοδος Q παραμένει σταθερή. Όταν $CLK=0$ ο μανδαλωτής master παύει να παρακολουθεί τις αλλαγές της εισόδου D . Ταυτόχρονα ο μανδαλωτής slave παρακολουθεί στην τιμή της Y και μεταβάλλει την έξοδό του ανάλογα. Εφ' όσον η έξοδος Y δεν αλλάζει όταν $CLK=0$, ο μανδαλωτής slave μπορεί να υποστεί μόνο μια αλλαγή κατά τη διάρκεια ενός ωρολογιακού παλμού. Η τιμή της εξόδου του συνολικού κυκλώματος αλλάζει μόνο κατά τα αρνητικά μέτωπα των ωρολογιακών παλμών, δηλαδή το κύκλωμα του σχήματος 6.19 είναι ένα αρνητικά ακμοπυροδοτούμενο D φλιπ-φλοπ.

Στο σχήμα 6.20 δίδεται μία εναλλακτική σχεδίαση ακμοπυροδοτούμενου D φλιπ-φλοπ. Το κύκλωμα αυτό είναι θετικά ακμοπυροδοτούμενο D φλιπ-φλοπ και ουσιαστικά αποτελείται από τρεις μανδαλωτές SR όπως αυτοί του σχήματος 6.5.



Σχήμα 6.20. Θετικά ακμοπυροδοτούμενο D φλιπ-φλοπ

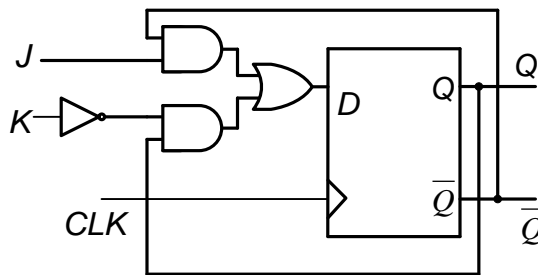
Παράδειγμα 6.2. Στη συνέχεια δίδεται η κυματομορφή εξόδου Q ενός αρνητικά ακμοπυροδοτούμενου D φλιπ-φλοπ για τις δοσμένες εισόδους CLK και D . Θεωρούμε ότι αρχικά $Q=0$.



Εφόσον το D φλιπ-φλοπ είναι αρνητικά ακμοπυροδοτούμενο, θα ενεργοποιείται κάθε φορά που παρουσιάζεται μία αρνητική ακμή στην είσοδο των ωρολογιακών παλμών μεταφέροντας στην έξοδο Q την τιμή που έχει η είσοδος D τη στιγμή εκείνη. Οι οποιοσδήποτε εναλλαγές της εισόδου, πριν την πτώση (αρνητική ακμή) των ωρολογιακών παλμών, δεν γίνονται αντιληπτές από το D φλιπ-φλοπ.

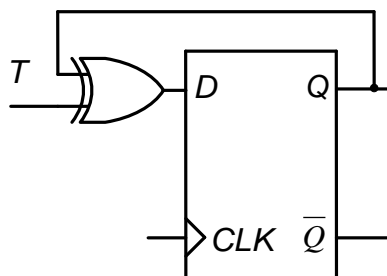
6.5.2 Ακμοπυροδοτούμενα JK και T φλιπ-φλοπ

Τα ακμοπυροδοτούμενα JK και T φλιπ-φλοπ κατασκευάζονται με βάση τα ακμοπυροδοτούμενα D φλιπ-φλοπ. Έστω ότι θέλουμε να μετατρέψουμε ένα D φλιπ-φλοπ σε JK. Με δεδομένο ότι η χαρακτηριστική εξίσωση του JK φλιπ-φλοπ είναι $Q_t = J\bar{Q}_{t-1} + \bar{K}Q_{t-1}$ και του D φλιπ-φλοπ $Q_t = D$, προκύπτει εύκολα ότι αν θέσουμε $D = J\bar{Q}_{t-1} + \bar{K}Q_{t-1}$ το D φλιπ-φλοπ μετατρέπεται σε JK. Στο σχήμα 6.21 δίδεται η μετατροπή ενός θετικά ακμοπυροδοτούμενου D φλιπ-φλοπ σε JK φλιπ-φλοπ.



Σχήμα 6.21. Θετικά ακμοπυροδοτούμενο JK φλιπ-φλοπ

Για να μετατρέψουμε ένα D φλιπ-φλοπ σε T με δεδομένο ότι η χαρακτηριστική εξίσωση του T φλιπ-φλοπ είναι $Q_t = T\bar{Q}_{t-1} + \bar{T}Q_{t-1} = T \oplus Q_{t-1}$ και του D φλιπ-φλοπ $Q_t = D$ προκύπτει εύκολα ότι αν θέσουμε $D = T \oplus Q_{t-1}$ το D φλιπ-φλοπ μετατρέπεται σε T. Στο σχήμα 6.22 δίδεται η μετατροπή ενός θετικά ακμοπυροδοτούμενου D φλιπ-φλοπ σε T.



Σχήμα 6.22. Θετικά ακμοπυροδοτούμενο T φλιπ-φλοπ

Παράδειγμα 6.3. Στη συνέχεια δίδεται η κυματομορφή εξόδου Q ενός αρνητικά ακμοπυροδοτούμενου JK φλιπ-φλοπ για τις δοσμένες κυματομορφές εισόδου. Θεωρούμε ότι αρχικά $Q=0$.