



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Αναφορά 1ης Εργασίας : Pong Game
“Εργαστήριο Ψηφιακών Συστημάτων”

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΑ	
ΕΞΑΜΗΝΟ	6ο
ΟΜΑΔΑ	A_Ομάδα 17
ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΕΣ	Δ. Πνευματικάτος, Γ. Παναγόπουλος, Ι. Παναγοδήμος

Αθήνα
2024

Εισαγωγή

Κριτήρια αποδοτικότητας:

Με την διαδικασία έναρξης σχεδιασμού και δημιουργίας ενός κυκλώματος είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τα κριτήρια αποδοτικότητας ενός συστήματος, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη υλοποίηση του ζητούμενου τόσο για τον κατασκευαστή και τον καταναλωτή όσο και για το περιβάλλον. Έχοντας κατά νου τις παραπάνω παραμέτρους τα κριτήρια αποδοτικότητας χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες με τον εξής τρόπο:

Απλότητα

- Οικονομικό Κόστος
- Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα

Χρόνος

- Χρόνος Εκτέλεσης
- Χρόνος Υλοποίησης

Προσαρμοστικότητα

- Τροποποίηση - Προσθήκη Υλικού
- Debugging

Σε όλες τις παραπάνω υποκατηγορίες ο κύριος στόχος συνοψίζεται στην απλότητα, καθώς μέσω αυτής επιτυγχάνεται τόσο η μείωση του υλικού (συνεπώς, και το κόστος) όσο και ο χρόνος επιδιόρθωσης σε περίπτωση προβλήματος σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας. Τέλος, με την μείωση των χρησιμοποιούμενων υλικών αλλά και με την βέλτιστη υλοποίηση σε πρακτικό επίπεδο, κατορθώνεται έμμεσα και άμεσα η προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Στόχος άσκησης:

Σκοπός της συγκεκριμένης αναφοράς είναι η διαδικασία σχεδιασμού του παιχνιδιού Ping Pong με χρήση led, στην θέση της μπάλας και των θέσεων αυτής, αναλύοντας 3 ζητούμενες μεθόδους υλοποίησης.

Η βασική ιδέα τοποθετεί 8 led φωτάκια στην σειρά, ένα μπουτόν χειρισμού «Player», ένα μπουτόν «Reset» και ένα ρολόι υπεύθυνο για τον ρυθμό κίνησης της μπάλας. Στην συνέχεια, η λογική για την ολοκλήρωση του κυκλώματος που θα επιτρέψει στον παίκτη να παίξει το παιχνίδι διαφέρει ανάλογα με την προσέγγιση. Ωστόσο, τα ζητούμενα από το κύκλωμα χαρακτηριστικά είναι κοινά, καθώς από όλες τις υλοποιήσεις ζητείται να είναι σε θέση να μετακινούν σωστά την «μπάλα» και να ανταποκρίνονται κατάλληλα στις αντιδράσεις του «Player», με «αντίκρουση» της μπάλας (που ισοδυναμεί με αλλαγή πορείας της) ή επανεκκίνηση του γύρου.

Έτσι, παρακάτω αναλύεται σε κάθε προσέγγιση το υλικό και ο τρόπος λειτουργίας του που θα πραγματοποιήσει κατάλληλα τα προαναφερθέντα ζητούμενα.

Επιλογή υλικών:

Παρότι στο εικονικό εργαστήριο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ελεύθερα υλικό σαν Λογικές Πύλες και Πολυπλέκτες από τις βασικές βιβλιοθήκες του LogiSim Evolution, στην πράξη προτιμάμε συγκεκριμένα υλικά, όπως D Flip - Flop λόγω της απλότητας τους. Ομοίως, η πύλη NAND, όντας Universal Gate χαμηλού κόστους, προσφέρεται για την υλοποίηση όλων των κυκλωμάτων μας μέσω ολοκληρωμένων TTL.

Προσέγγιση με Καταχωρητή Αμφίδρομης Ολίσθησης

Θα κατασκευάσουμε έναν καταχωρητή που θα επιτελεί διάφορες λειτουργίες, ανάλογα με τις τιμές 2 σημάτων ελέγχου $S1S0$ και των θυρών διαδοχικών πολυπλεκτών. Για τις διάφορες τιμές του διατεταγμένου ζεύγους επιλογών ($S1, S0$) ισχύουν τα εξής:

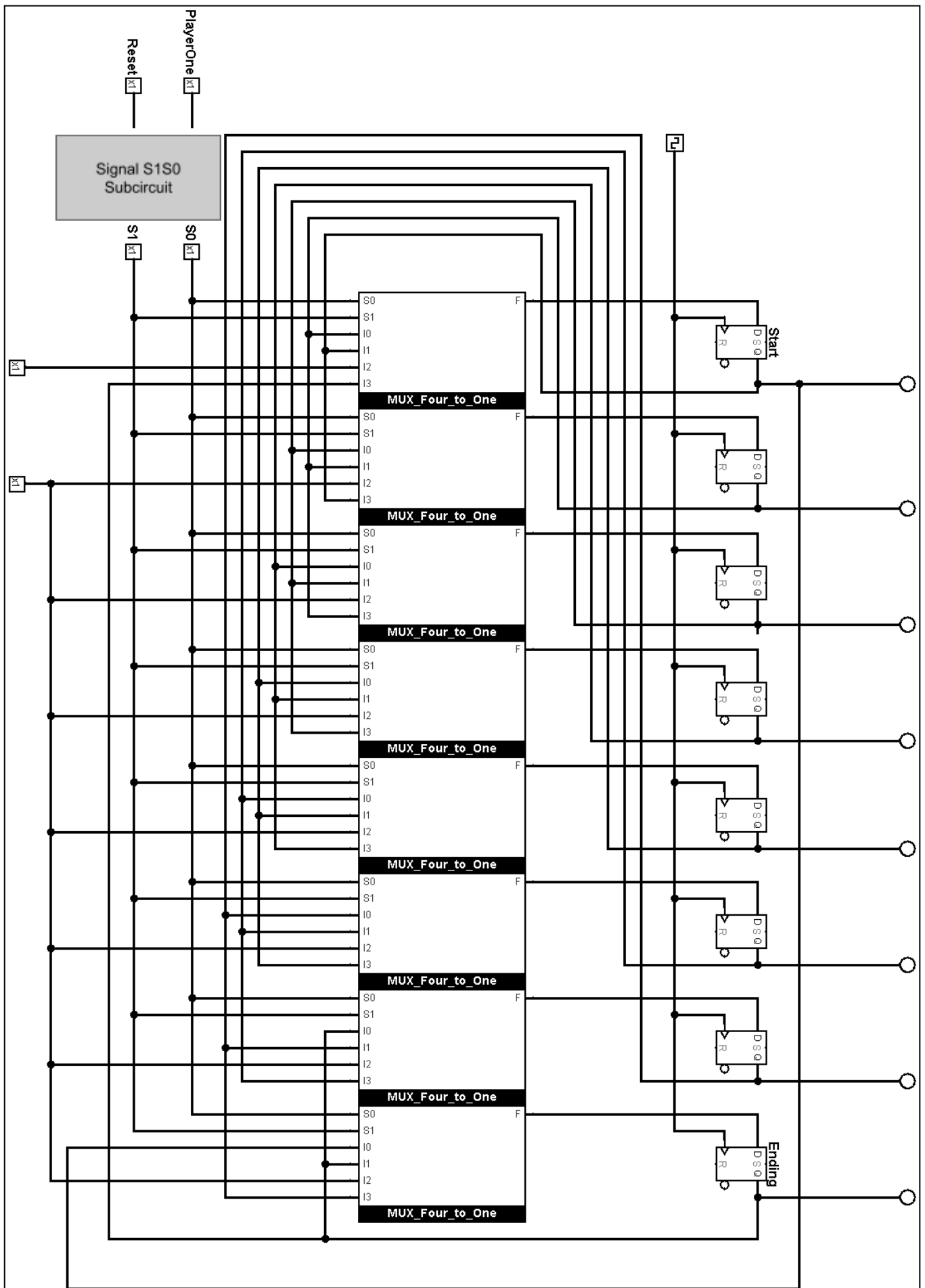
- Όταν $S1S0 = 00$ να πραγματοποιεί αριστερή κυκλική ολίσθηση. Η κατάσταση αυτή μοντελοποιεί την «κατεύθυνση» της μπάλας προς τα αριστερά.
- Όταν $S1S0 = 01$ να διατηρεί το περιεχόμενο. Το στάδιο αυτό δεν έχει άμεση χρησιμότητα στο παιχνίδι αλλά το εισάγουμε για να μην αποτελεί διαφορετικά αξιοποιημένη κατάσταση και οδηγήσει σε απροσδιόριστη.
- Όταν $S1S0 = 10$ να επιτελεί παράλληλη φόρτωση από τις γραμμές δεδομένων τον αριθμό 10..0 στο δυαδικό σύστημα αρίθμησης. Η κατάσταση αυτή μοντελοποιεί τον πιεστικό διακόπτη «Reset» στο σχήμα.
- Όταν $S1S0 = 11$ να πραγματοποιεί δεξιά κυκλική ολίσθηση. Η κατάσταση αυτή μοντελοποιεί την «κατεύθυνση» της μπάλας προς τα δεξιά.

Για την δημιουργία του καταχωρητή αυτού χρησιμοποιούνται 8 D Flip - Flop και αντίστοιχα 8 MUX four-to-one, για τις 8 θέσεις-led της μπάλας.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα προσομοίωσης που ακολουθεί, βασικός στόχος είναι η αυτοματοποίηση των τιμών των $S0, S1$ ώστε σύμφωνα με τους χτύπους του ρολογιού και τις αλλαγές που αυτοί επιφέρουν στις θέσεις του συστήματος να λαμβάνουν τις κατάλληλες τιμές χωρίς να κρίνεται αναγκαία η άμεση ανάμειξη του παίκτη με την ρύθμισή τους.

Αναφορικά με τα κριτήρια αποδοτικότητας που αναφέρθηκαν κατά την εισαγωγή:

Με τον τρόπο αυτό θα έχει επιτευχθεί ένα σύστημα με μικρό κόστος, καλό χρόνο απόκρισης και πολύ δεκτικό σε οποιαδήποτε προσθήκη χωρίς να απαιτείται εκ νέου ανάλυση νέων περιπτώσεων και δεδομένων που ακυρώνουν τα προυπάρχοντα. Αν ο αυτοματισμός αυτός δεν επιτευχθεί, το σύστημα για να είναι πλήρως λειτουργικό σύμφωνα με τα ζητούμενα, θα πρέπει να ολοκληρωθεί κάνοντας χρήση της λογικής του ακολουθιακού κυκλώματος, χάνοντας την ανεκτικότητα του στις επιπρόσθετες μετατροπές.



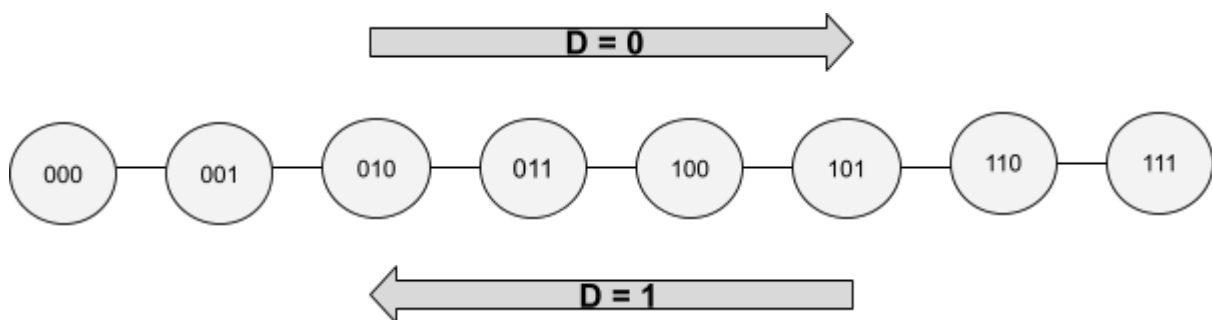
Προσέγγιση ως Ακολουθιακό Κύκλωμα - Διάγραμμα Μεταβάσεων

Κατ' Αρχάς, τρία Flip - Flops απαιτούνται για την υλοποίηση του συγκεκριμένου ακολουθιακού, καθώς μπορούν να περιγράψουν το πολύ ($2^3 = 8$) οκτώ διαφορετικές καταστάσεις. Οι προδιαγραφές του συγκεκριμένου προβλήματος απαιτούν την διαχείριση τουλάχιστον οκτώ ακεραίων αριθμών 1, 2, 3, ..., 7, 8 στο δεκαδικό σύστημα αρίθμησης. Ακόμα, θα χρειαστούμε ένα Flip - Flop το οποίο θα αποθηκεύει την «κατεύθυνση» της μπάλας στην εκάστοτε κατάσταση. Συνεπώς, τέσσερα Flip - Flops πρέπει και αρκεί να χρησιμοποιηθούν για την σύνθεση του ζητούμενου σύγχρονου ακολουθιακού κυκλώματος.

Πριν προβούμε στον Πίνακα Επιθυμητών Μεταβάσεων, θα αναλύσουμε όλα τα επιμέρη στοιχεία του κυκλώματος και τις εισόδους του:

- Ο τριαδικός αριθμός ABC στο δυαδικό σύστημα αρίθμησης, με A το MSB, B το δεύτερο περισσότερο σημαντικό ψηφίο, και C το LSB.
- Η εξωτερική είσοδος x , η οποία δεν είναι συγχρονισμένη με το ρολόι, και προσφέρεται για «απόκρουση» της μπάλας, ως πιεστικός διακόπτης «Player 1» στο σχήμα. Η τιμή της καθορίζεται ελεύθερα από το χρήστη.
- Η εξωτερική είσοδος r , η οποία δεν είναι συγχρονισμένη με το ρολόι, και προσφέρεται για αρχικοποίηση, ως πιεστικός διακόπτης «Reset» στο σχήμα. Η τιμή της καθορίζεται ελεύθερα από το χρήστη.
- Το ψηφίο D στο δυαδικό σύστημα αρίθμησης, το οποίο είναι συγχρονισμένο με το ρολόι, και προσφέρεται για την «κατεύθυνση» της μπάλας, ως εσωτερικό σήμα. Η τιμή δεν καθορίζεται από το χρήστη, ορίζουμε την προς τα δεξιά κίνηση ως $D = 1$ και την προς τα αριστερά κίνηση ως $D = 0$.

Μοντελοποιούμε την κίνηση της μπάλας με τον εξής απλό τρόπο:



Οπότε, προκύπτει το Διάγραμμα Μεταβάσεων με $6 \times 6 = 2^6 = 64$ καταστάσεις.

		Παρούσα Κατάσταση F-F				Επόμενη Κατάσταση F-F				Είσοδοι D F-F			
Είσοδος r	Είσοδος x	D_n	A_n	B_n	C_n	D_{n+1}	A_{n+1}	B_{n+1}	C_{n+1}	D	A	B	C
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

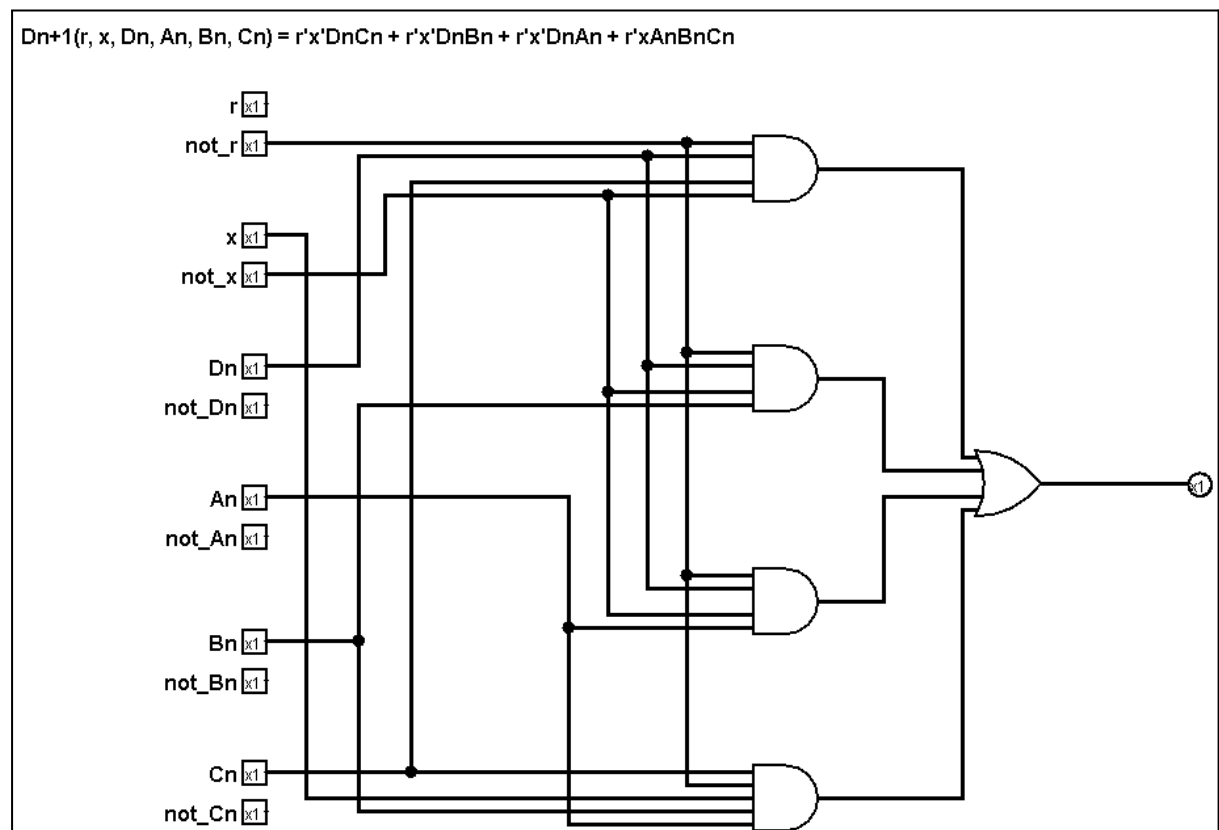
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

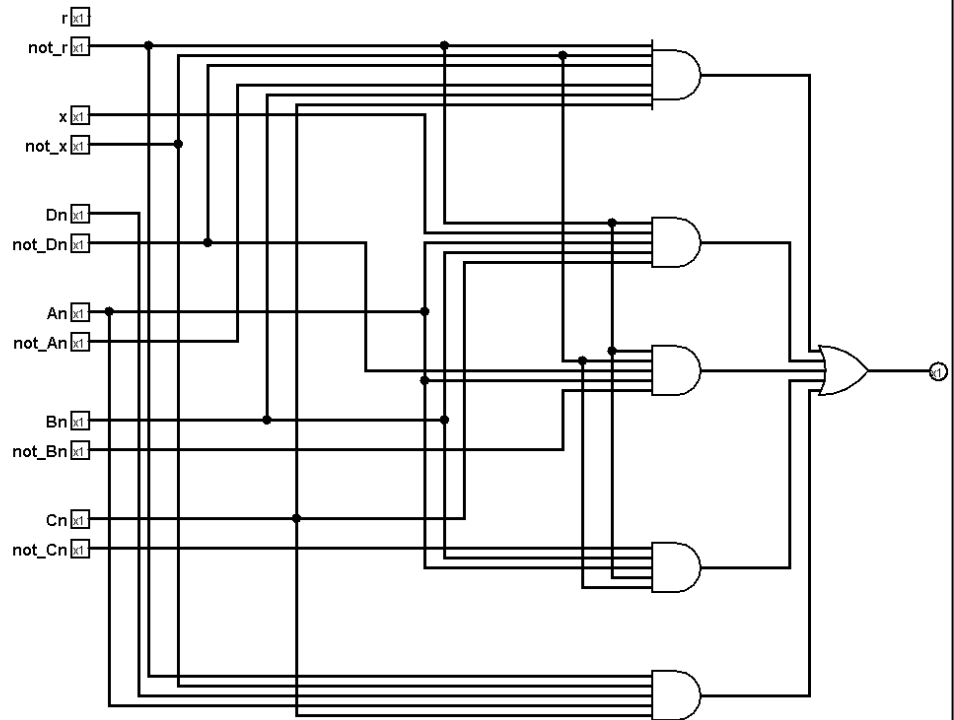
Θεωρούμε κάθε μία από τις εισόδους D_D , D_A , D_B , D_C ως μία συνάρτηση Boole, η οποία εξαρτάται από έξι μεταβλητές και συγκεκριμένα τις r , x , D_n , A_n , B_n , C_n . Απλοποιούμε τις εκφράσεις τους με την χρήση Χαρτών Karnaugh και καταλήγουμε με τις παρακάτω συναρτήσεις:

- $D_{n+1}(r, x, D_n, A_n, B_n, C_n) = r'x'D_nC_n + r'x'D_nB_n + r'x'D_nA_n + r'xA_nB_nC_n$
- $A_{n+1}(r, x, D_n, A_n, B_n, C_n) = r'x'D_n'A_n'B_nC_n + r'xA_nB_nC_n + r'x'D_n'A_nB_n' + r'x'A_nB_nC_n' + r'x'D_nA_nC_n$
- $B_{n+1}(r, x, D_n, A_n, B_n, C_n) = r'x'D_n'B_n'C_n + r'x'D_n'B_nC_n' + r'x'D_nB_nC_n + r'x'D_nA_nB_n'C_n' + r'xA_nB_nC_n$
- $C_{n+1}(r, x, D_n, A_n, B_n, C_n) = r'x'D_n'C_n' + r'x'B_nC_n' + r'x'A_nC_n' + r'xA_nB_nC_n$

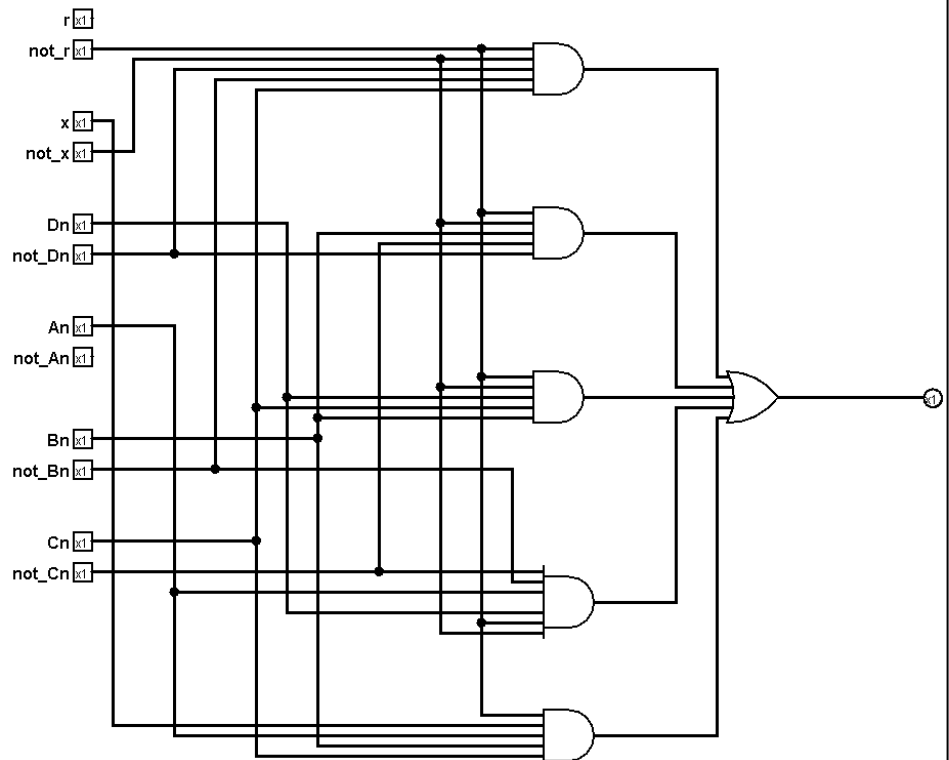
Συνολικά, προκύπτουν τα εξής υποκυκλώματα στην είσοδο κάθε Flip - Flop:

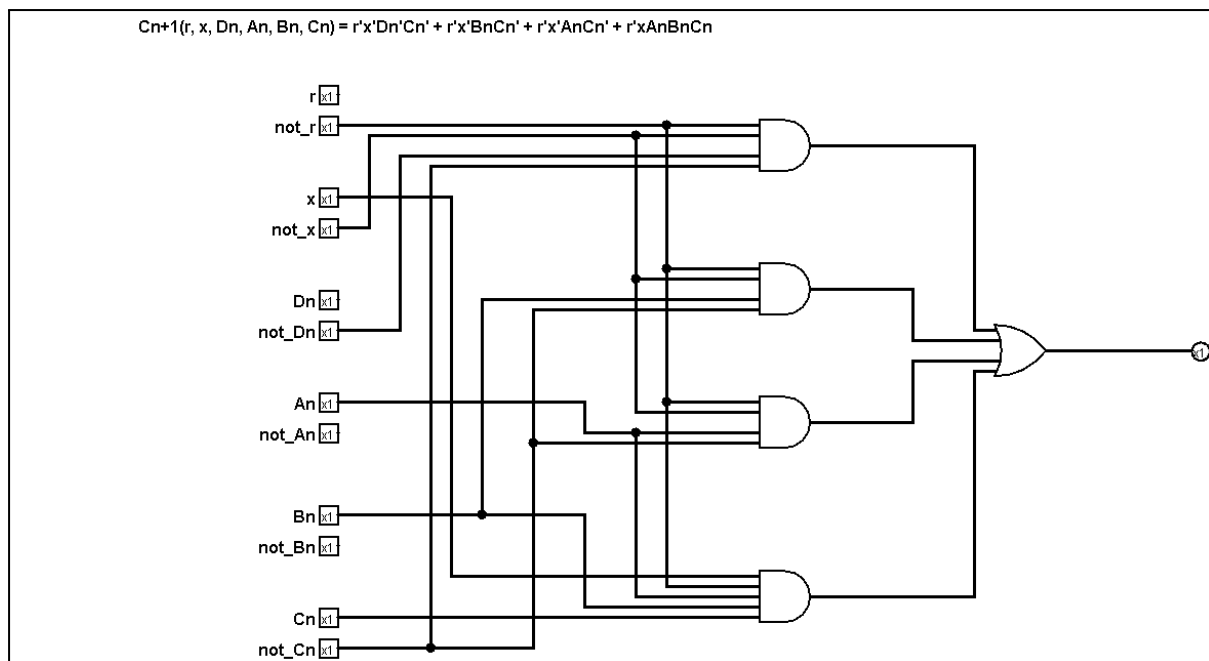


$$An+1(r, x, Dn, An, Bn, Cn) = r'x'Dn'An'BnCn + r'xAnBnCn + r'x'Dn'AnBn' + r'x'AnBnCn' + r'x'DnAnCn$$

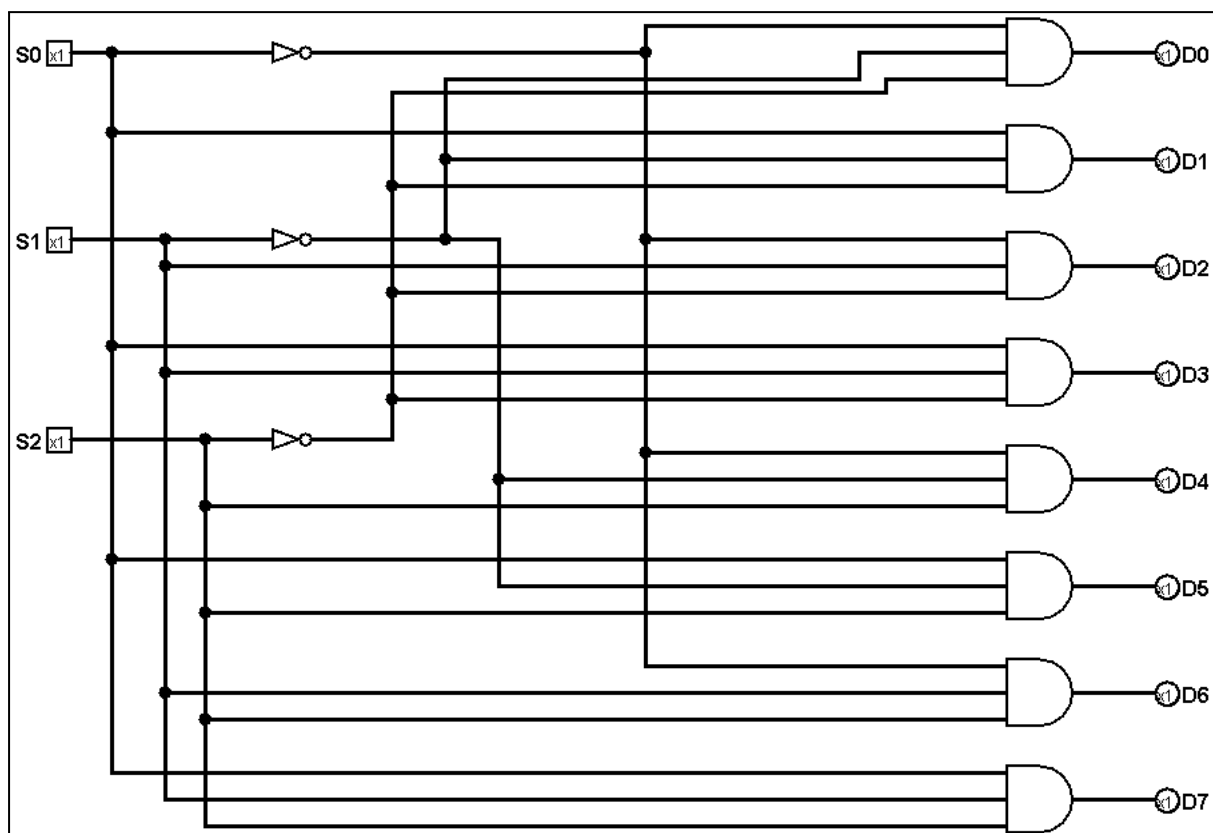


$$Bn+1(r, x, Dn, An, Bn, Cn) = r'x'Dn'Bn'Cn + r'x'Dn'BnCn' + r'x'DnBnCn + r'x'DnAnBn'Cn' + r'xAnBnCn$$

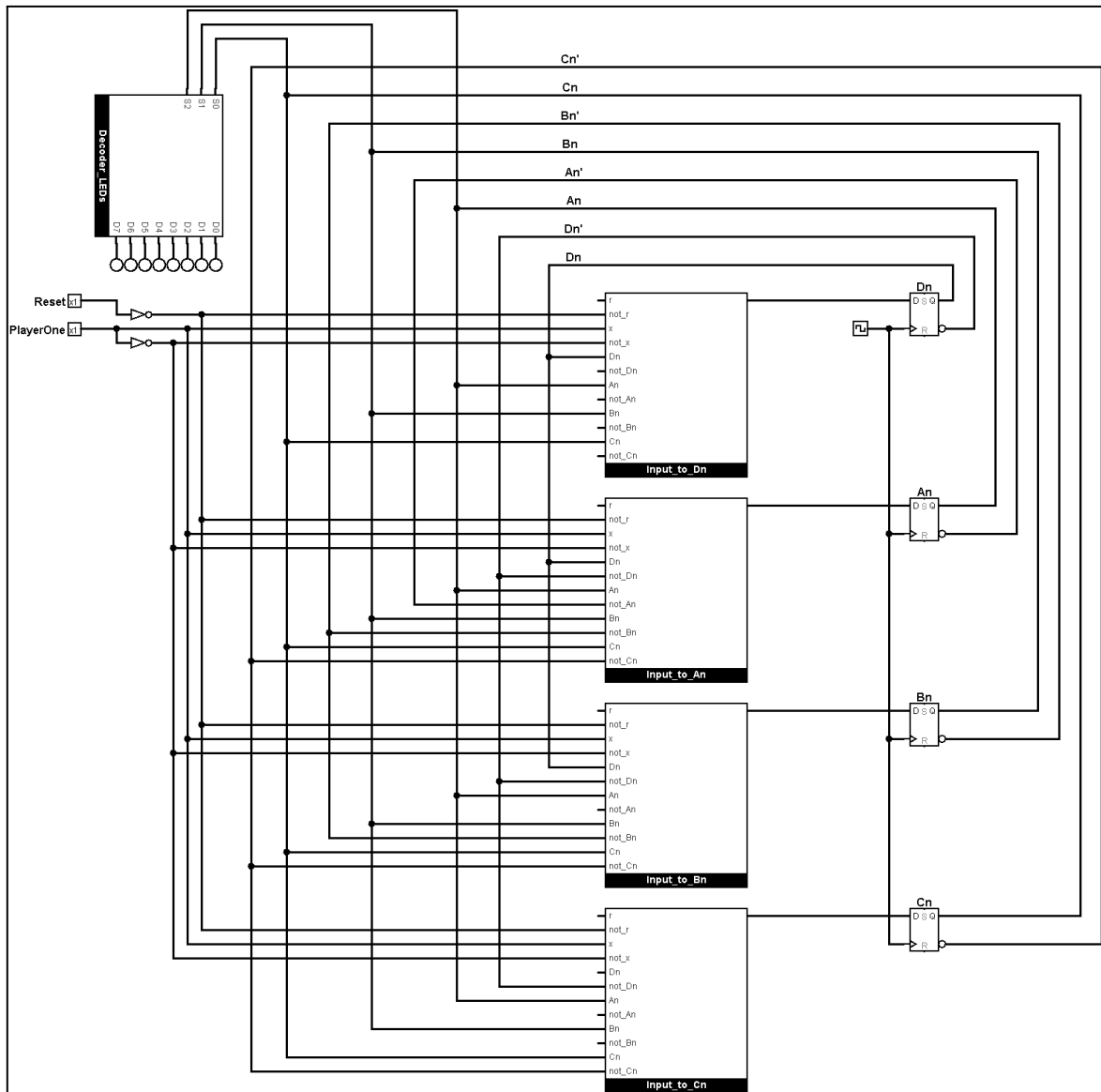




Η αναγνώριση του τριαδικού αριθμού ABC και η επιλογή του led, το οποίο αν είναι αναμμένο είναι η μπάλα, γίνεται με την χρήση ενός Αποκωδικοποιητή - Decoder 3 εισόδων, 8 εξόδων (3 σε 8), όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

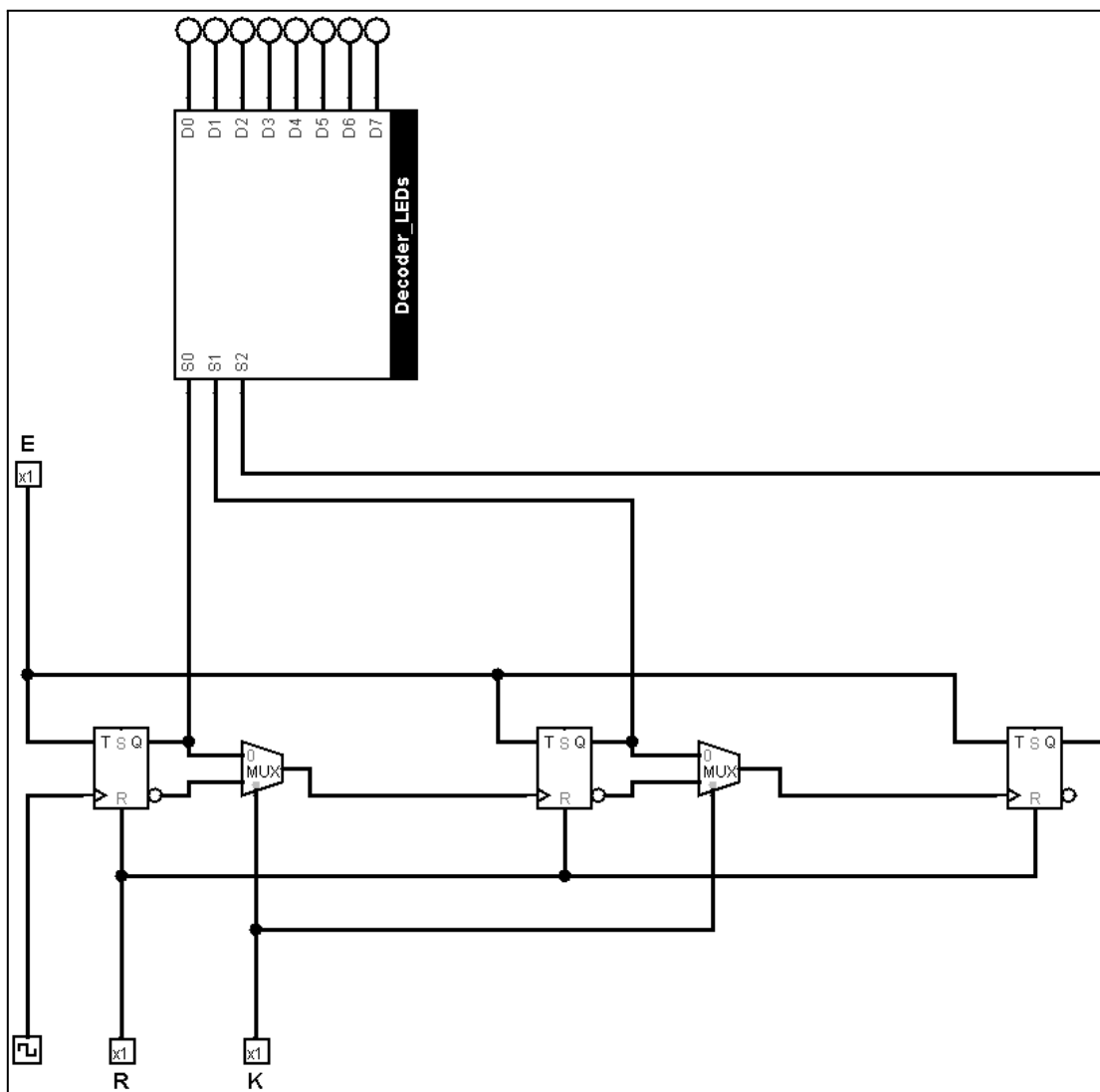


Συγκεντρώνοντας, τέλος, όλα τα υποκυκλώματα προκύπτει το συνολικό Ακολουθιακό Κύκλωμα:



Η προσέγγιση ως Ακολουθιακό Κύκλωμα με την επίλυση του Διαγράμματος Μεταβάσεων φέρει τα εξής χαρακτηριστικά σε αναφορά και με τα κριτήρια αποδοτικότητας, που αναφέρθηκαν κατά την εισαγωγή. Συγκεκριμένα,

- Η Ακολουθιακή Λογική δεν προσφέρεται για την απλότητα της. Χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε μεγάλο αριθμό πυλών και για αυτές θα χρησιμοποιήσουμε σημαντική ποσότητα καλίδι ώστε να τις συνδέσουμε καταλλήλως. Με άλλα λόγια, ενδέχεται να περιέχει περισσότερους πόρους.
- Η Ακολουθιακή Λογική, ωστόσο, είναι σαφής και ο χρόνος υλοποίησης της μπορεί να είναι μικρότερος, συγκριτικά των υπολοίπων προσεγγίσεων. Αυτό γιατί είναι ευκολότερη προς την κατανόηση. Ο χρόνος εκτέλεσης χρειάζεται να παρατηρηθεί πειραματικά.



Μόλις φτάσουμε στην θέση $N - 1$ υπάρχουν δύο περιπτώσεις. Εάν δεν πατήσουμε το κουμπί τότε χάνουμε και γίνεται Reset ($R = 1$), ενώ εάν το πατήσουμε κατάλληλα τότε ενεργοποιείται ο αφαιρέτης και η κατεύθυνση αλλάζει. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια πύλη NAND τέτοια ώστε να δίνει 0 αν το led της θέσης 111 και το κουμπί «Player» είναι ταυτόχρονα On. Η έξοδος αυτή οδηγείται στο K. Αν $K = 1$ πλέον είμαστε στην κατάσταση του αθροιστή και προτού αυτού χρειάζεται να γίνει Reset με το CLR ώστε να μετράμε εκ νέου από το 0, να κινούμαστε, δηλαδή, εξ αρχής προς τα δεξιά, εφόσον χάσαμε. Ακριβώς ίδιο σκεπτικό εφαρμόζουμε στην αντίθετη αλλά αντίστοιχη περίπτωση.

Η προσέγγιση με Μετρητή φέρει τα εξής χαρακτηριστικά σε αναφορά και με τα κριτήρια αποδοτικότητας, που αναφέρθηκαν κατά την εισαγωγή. Συγκεκριμένα,

- Ο μετρητής άνω - κάτω είναι ρίπης και σαν ασύγχρονο κύκλωμα προσφέρεται για την απλότητα του. Είναι σαφής τρόπος επίλυσης και ο χρόνος υλοποίησης του είναι μικρότερος, συγκριτικά των υπολοίπων προσεγγίσεων. Αυτό γιατί χρησιμοποιούμε απλά T Flip - Flop, γεγονός που το κάνει να προσαρμόζεται εύκολα σε επεκτάσεις.
- Ο μετρητής άνω - κάτω είναι ρίπης και σαν ασύγχρονο κύκλωμα παράγει decoding errors και υπάρχει propagation delay. Με την προσθήκη υλικού, για παράδειγμα αν $N = 8, 16, 32$ και λοιπά, ο μετρητής θα δίνει λάθη και το παιχνίδι δεν θα συνεχίζει σωστά. Μπορούμε να εφαρμόσουμε σύγχρονο μετρητή άνω - κάτω, όπου, δηλαδή, όλα τα J K Flip - Flop είναι συγχρονισμένα με κοινό ρολόι. Τότε, ωστόσο, η πολυπλοκότητα του κυκλώματος θα αυξηθεί σημαντικά.

Συμπέρασμα

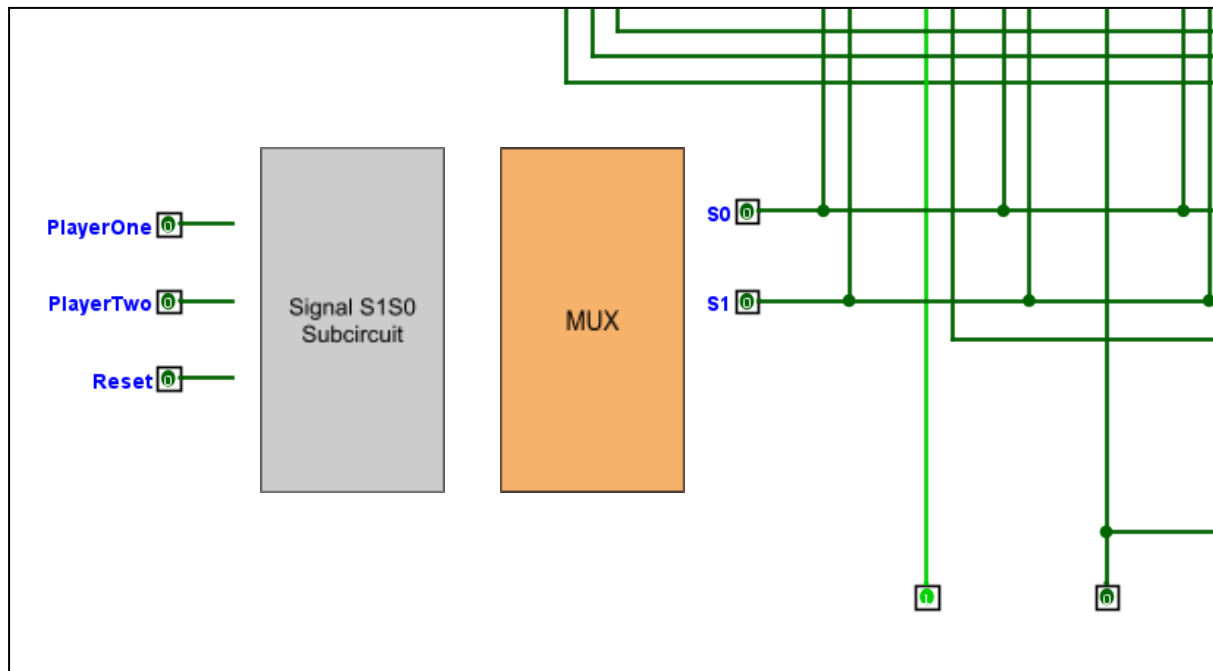
Έχοντας μελετήσει διεξοδικά τα θετικά και τα αρνητικά όλων των παραπάνω ανελυμένων μεθόδων για την υλοποίηση του Pong Game με χρήση led, και λαμβάνοντας υπόψιν τα κριτήρια αποδοτικότητας που αναλύθηκαν στη εισαγωγή της παρούσας αναφοράς, προκύπτει το συμπέρασμα πως η προτιμότερη για εκτέλεση μέθοδος είναι η (α), δηλαδή η Προσέγγιση με Καταχωρητή Αμφίδρομης Ολίσθησης. Γι' αυτό τον λόγο και καθώς το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι πιο δεκτικό σε αλλαγές εξέλιξης και προσθήκες νέων παραμέτρων χρησιμοποιείται παρακάτω ως κύριο αντικείμενο μελέτης για την ανάλυση των ζητούμενων επεκτάσεων για το παιχνίδι.

Επεκτάσεις

Έχοντας κατασταλάξει στην πρώτη προσέγγιση προχωράμε στις δυνατές επεκτάσεις και, αρχικά, με την προσθήκη δεύτερου παίκτη. Διευκρινιστικά, αποφασίζουμε πως οι δύο παίκτες θα παίξουν με την ίδια μπάλα και με διαφορετικούς πιεστικούς διακόπτες «Player 1» και «Player 2». Θα νικάει αυτός που θα καταφέρει πρώτος την «απόκρουση» της μπάλας και τότε στο παιχνίδι η μπάλα θα αλλάζει φορά και θα αρχίζει να κατευθύνεται προς την άλλη άκρη και για τους δύο. Αν ο διακόπτης πατηθεί νωρίτερα από κάποιον, το παιχνίδι τελειώνει και για τους δύο με ηττημένο αυτόν που προσπάθησε να αποκρούσει.

Έτσι, χρειαζόμαστε και μία δεύτερη εξωτερική είσοδο γ, η οποία δεν είναι συγχρονισμένη με το ρολόι, και προσφέρεται για «απόκρουση» της μπάλας, ως πιεστικός διακόπτης «Player 2». Επίσης, θα χρειαστούμε να προσθέσουμε ένα καινούριο υποκύκλωμα MUX για την επιλογή του παρόντος - εκ των δύο - παίκτη την εκάστοτε χρονική στιγμή. Οπότε, χρειάζεται κατάλληλο υποκύκλωμα για το σήμα του MUX S1S0. Ενδεικτικά, η κατάσταση

που παίζουν ταυτόχρονα οι παίκτες θα απορρίπτεται και θα οδηγεί σε Reset, αυτό εύκολο υλοποιείται με μία πύλη AND.



Η προσθήκη ενός εξαρτήματος Buzzer στο παιχνίδι ενός ή δύο παικτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σηματοδότηση τόσο μιας λανθασμένης απόκρουσης όσο και αντίστοιχα μιας σωστής αντίκρουσης της μπάλας. Γνωρίζοντας πως διαφορετική συχνότητα σήματος μπορεί να παράγει διαφορετικό ηχητικό αποτέλεσμα για τον παίκτη, η σύνδεση του Buzzer με το signal S1S0 Subcircuit που φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα θα προσφέρει στον παίκτη την ηχητική συνοδεία που θα κάνει πιο ενδιαφέρον το παιχνίδι. Συγκεκριμένα, ο συνδυασμός των δύο bit πληροφορίας που θα λαμβάνει το Buzzer θα δίνει έναν μοναδικό συνδυασμό ήχου όταν η μπάλα κατευθύνεται δεξιά, όταν κατευθύνεται αριστερά καθώς και όταν η αντίκρουση της μπάλας είναι άκυρη.

Για την προσθήκη ενός πίνακα αποτελεσμάτων στο παιχνίδι δύο παικτών μπορούμε να εκμεταλλευτούμε δύο 7 - Segment Display. Όταν οι δύο παίκτες χτυπάνε ταυτόχρονα τότε τα δύο Display παραμένουν ως έχουν, το Score δεν αλλάζει και το παιχνίδι οδηγεί σε Reset. Μπορούμε να υλοποιήσουμε και αρνητική «βαθμολογία», έχοντας το Score αυτού που χάνει να μειώνεται κατά ένα. Η υλοποίηση αυτών μπορεί να γίνει με πύλες AND, OR, για παράδειγμα, δηλαδή, όταν ο διακόπτης «Player 2» είναι ON AND το ένα led εκ των άκρων είναι ON και OR όταν οποιοδήποτε των ενδιάμεσων led είναι ON μαζί με τον διακόπτη, πράγμα που θα οδηγεί σε μείωση του Score.

Τέλος, μπορούμε να επιχειρήσουμε και καινούριες επεκτάσεις, όπως η προσθήκη difficulty level (basic - intermediate - advanced), όπου αναλόγως την επιλογή πριν την εκκίνηση του παιχνιδιού το frequency, οπτικά η ταχύτητα, του ρολογιού να κλιμακώνεται. Αυτό, παρότι δεν είναι δυνατό στο LogiSim Evolution, μπορούμε να το επιχειρήσουμε με τρία διαφορετικά ρολόγια και ένα MUX. Επίσης, ενδεικτικά με την τροπή του παιχνιδιού, αν και ποιος παίχτης νικά ή/και χάνει, μπορούμε να έχουμε Output Component, το οποίο να εμφανίζει κατάλληλο μήνυμα, όπως «Player One wins!», «Player Two loses».