

Υπολογιστικά Συστήματα Υψηλής Αξιοπιστίας

Ενσωματωμένος αυτοέλεγχος

Δρ. Γκάμας Βασίλειος

Επιστημονικός Συνεργάτης
vgkamas@uniwa.gr

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών

Σκοπός παρουσίασης

- Να εισάγει τους φοιτητές στις βασικές τεχνικές του ενσωματωμένου αυτοέλεγχου ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Εισαγωγή

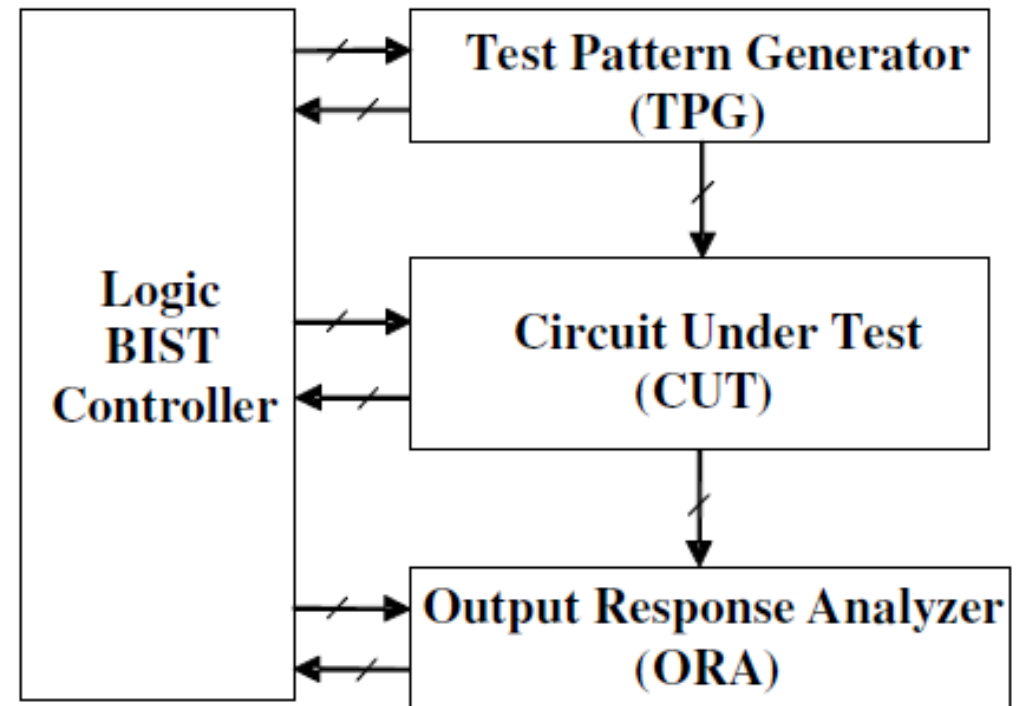
- Προβλήματα στην δοκιμή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
 - Οι παραδοσιακές τεχνικές είναι αρκετά ακριβές
 - Δεν παρέχουν πλέον ικανοποιητικά υψηλή κάλυψη σφαλμάτων
- Ενσωματωμένος αυτοέλεγχος (Built-In Self-Test – BIST)
 - Στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα ενσωματώνονται:
 - Κυκλώματα για την παραγωγή διανυσμάτων δοκιμής
 - Κυκλώματα για τον έλεγχο της απόκρισης του υπό έλεγχο κυκλώματος
- Ανάγκη για ενσωματωμένο αυτοέλεγχο
 - Έλεγχος της ορθής λειτουργίας ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος μετά την κατασκευή του, αλλά και στο πεδίο της εφαρμογής
 - Βοηθάει στη διάγνωση των ελαττωμάτων
 - Το κόστος είναι μικρότερο από αυτό των εξωτερικών συσκευών ελέγχου

Κατηγοριοποίηση BIST τεχνικών

- Online BIST
 - Concurrent online BIST
 - Non Concurrent online BIST
- Offline BIST
 - Functional offline BIST
 - Structural offline BIST

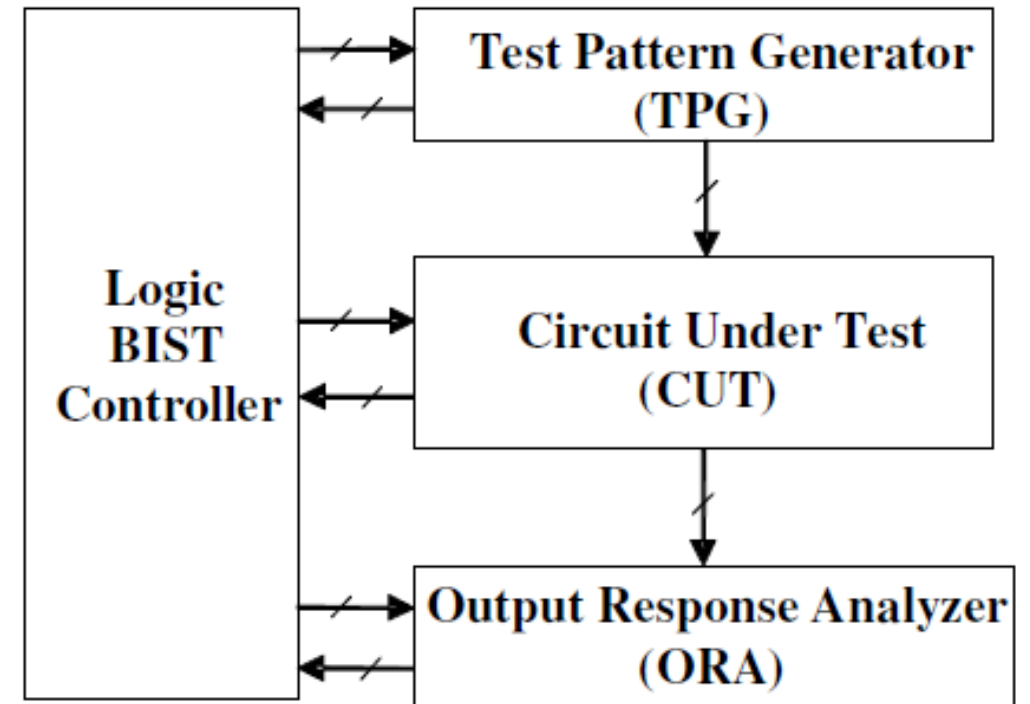
Τυπικό λογικό BIST σύστημα (1/2)

- Η μονάδα TPG αυτοματοποιημένα παράγει πρότυπα δοκιμής τα οποία εφαρμόζονται στις εισόδους του CUT.
- Η μονάδα ORA αυτοματοποιημένα συμπιέζει τις αποκρίσεις του CUT και δημιουργείται μια υπογραφή
- Συγκεκριμένα BIST σήματα ελέγχου δημιουργούνται από τον BIST controller για τον συντονισμό της λειτουργίας των μονάδων TPG, CUT και ORA.



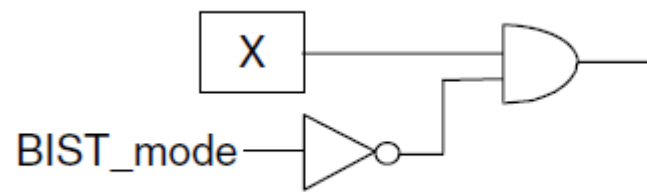
Τυπικό λογικό BIST σύστημα (2/2)

- Η μονάδα BIST controller παρέχει μία pass/fail ένδειξη μόλις ολοκληρωθεί η λειτουργία BIST.
- Πραγματοποιείται μία λογική σύγκριση ανάμεσα στην υπογραφή που παράγεται και μία ενσωματωμένη υπογραφή
- Απαιτείται όλα τα στοιχεία αποθήκευσης στις μονάδες TPG, CUT και ORA να έχουν αρχικοποιηθεί σε μία γνωστή τιμή πριν την έναρξη του αυτό-ελέγχου και δεν επιτρέπεται να μεταδίδονται από το CUT στο ORA άγνωστες τιμές (X)
 - Η υπογραφή που παράγεται θα γίνει corrupted και θα εμφανιστεί δυσλειτουργία στο BIST

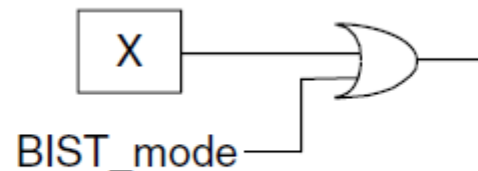


Τυπικές τεχνικές X-Bounding

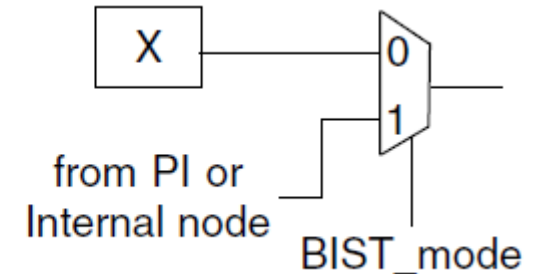
- Οποιαδήποτε πηγή με μια άγνωστη τιμή (X) σε ένα BIST σύστημα η οποία μπορεί άμεσα ή έμμεσα να μεταδώσει την άγνωστη τιμή στο ORA πρέπει να μπλοκάρεται χρησιμοποιώντας μία τεχνική DFT που ονομάζεται X-Bounding ή X-Blocking



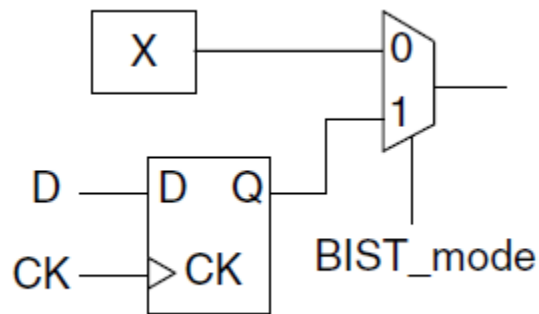
0-control point



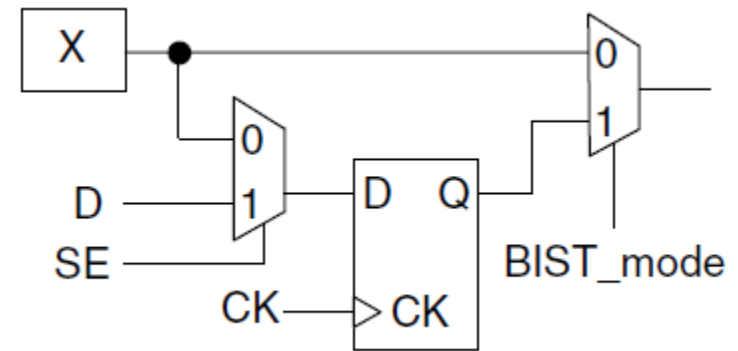
1-control point



bypass logic



control-only scan point



scan point

Πηγές άγνωστων τιμών

- Αναλογικά μπλοκ (π.χ. analog-to-digital converters)
 - Προσθήκη bypass logic
 - Προσθήκη control-only scan point
- Μνήμες (π.χ. DRAM και SRAM) και στοιχεία αποθήκευσης μη σάρωσης (π.χ. D flip-flop)
 - Προσθήκη bypass logic
 - Αρχικοποίηση σε γνωστή τιμή
- Συνδυαστικές επαναλήψεις ανάδρασης (Combinational Feedback Loops)
 - Προσθήκη control points
 - Προσθήκη scan points

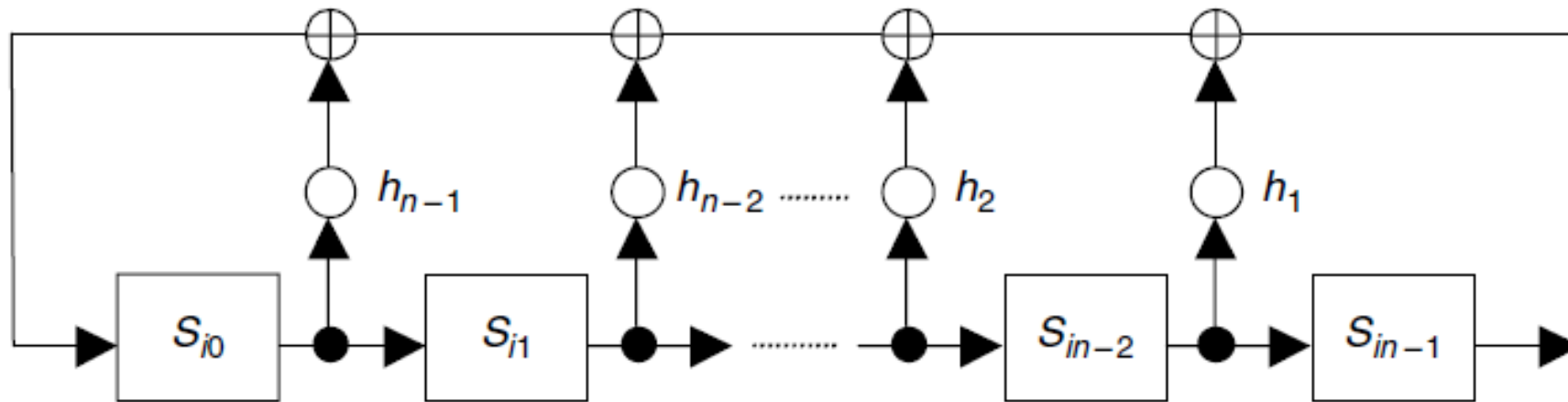
Παραγωγή διανυσμάτων δοκιμής

Παραγωγή διανυσμάτων δοκιμής

- Οι γεννήτριες προτύπων δοκιμής (TPGs) κατασκευάζονται από καταχωρητές ολίσθησης γραμμικής ανάδρασης (Linear Feedback Shift Registers - LFSRs)
- TPG
 - Εξαντλητική δοκιμή (Exhaustive testing)
 - Ψευδό-τυχαία δοκιμή (Pseudo-random testing)
 - Ψευδό-εξαντλητική δοκιμή (Pseudo-exhaustive testing)

Standard LFSR

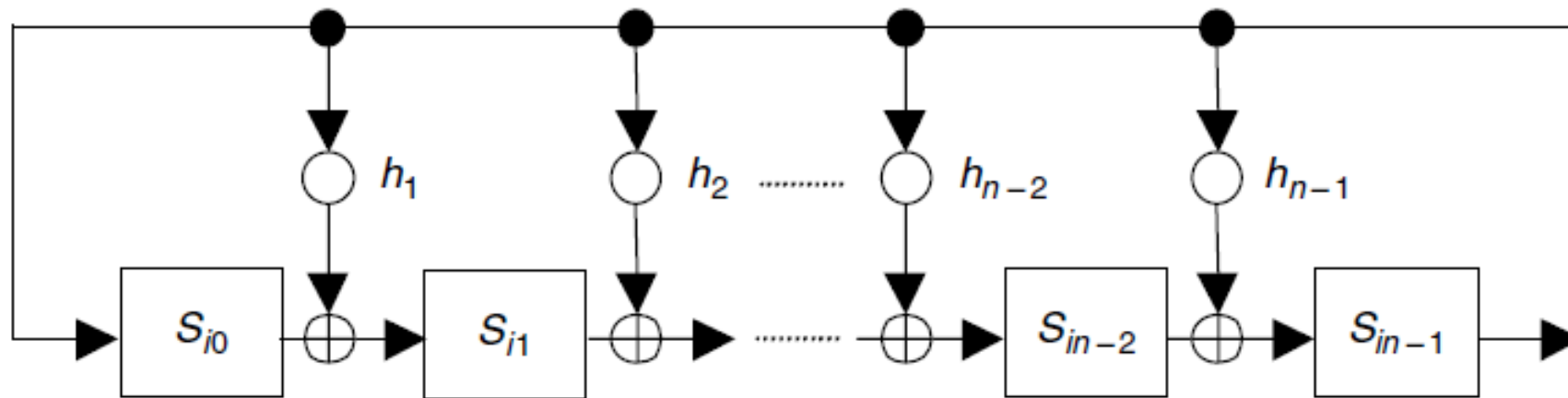
- Αποτελείται από n D flip-flops και έναν αριθμό πυλών XOR.
- Οι πύλες XOR εμφανίζονται μόνο στα μονοπάτια ανάδρασης



n-stage (external-XOR) standard LFSR

Modular LFSR

- Αποτελείται από n D flip-flops και έναν αριθμό πυλών XOR.
- Οι πύλες XOR εμφανίζονται μόνο μεταξύ των flip-flops



n-stage (internal-XOR) modular LFSR

Ιδιότητες LFSR (1/3)

- Η εσωτερική δομή ενός LFSR n-βαθμίδων μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα πολυώνυμο $f(x)$ βαθμού n

$$f(x) = 1 + h_1x + h_2x^2 + \dots + h_{n-1}x^{n-1} + x^n$$

όπου το h_i ισούται με 0 ή 1 αναλόγως με την παρουσία ή απουσία μονοπατιού ανάδρασης

Ιδιότητες LFSR (2/3)

- Έστω ότι η μεταβλητή S_i αναπαριστά το περιεχόμενο ενός n -βαθμίδων LFSR μετά από i ολισθήσεις των αρχικών περιεχομένων S_0
- Έστω $S_i(x)$ η πολυωνυμική αναπαράσταση του S_i
- Τότε το $S_i(x)$ είναι ένα πολυώνυμο $n-1$ βαθμού το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$S_i(x) = S_{i0} + S_{i1}x + S_{i2}x^2 + \dots + S_{in-2}x^{n-2} + S_{in-1}x^{n-1}$$

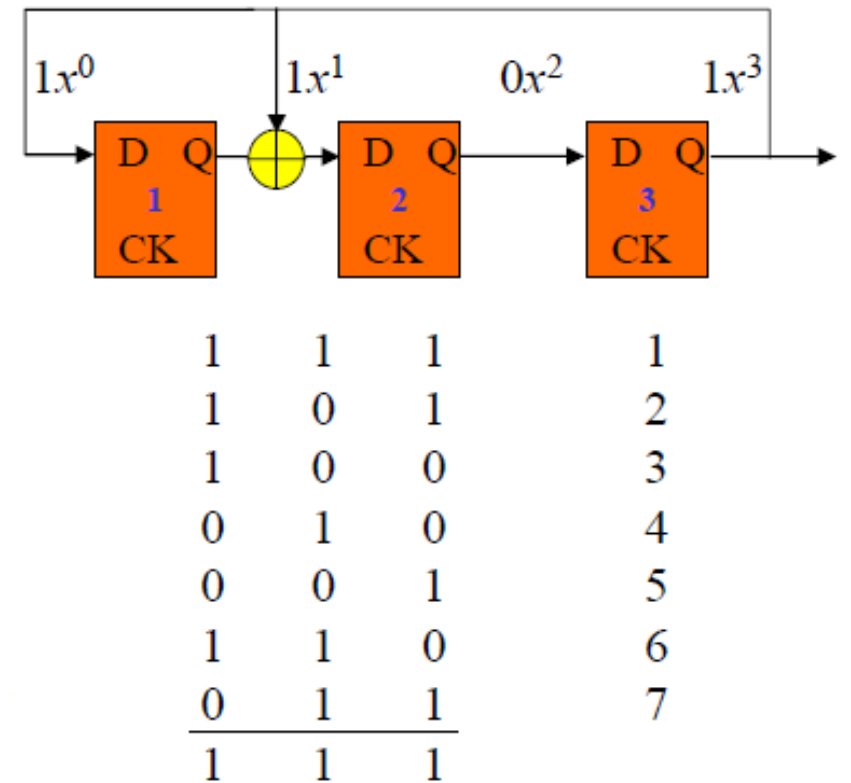
- Περίοδος T ενός LFSR: Ο μικρότερος θετικός αριθμός τέτοιος ώστε το $f(x)$ να διαιρεί το $1 + x^T$

Ιδιότητες LFSR (3/3)

- Η ακολουθία που παράγεται από έναν καταχωρητή ολίσθησης γραμμικής ανάδρασης των n βαθμίδων είναι περιοδική με περίοδο μικρότερη ή ίση του $2^n - 1$
- Στη γενική περίπτωση η περίοδος της ακολουθίας εξαρτάται από την αρχική κατάσταση του καταχωρητή ολίσθησης γραμμικής ανάδρασης
- Όταν το χαρακτηριστικό πολυώνυμο είναι πρωταρχικό με βαθμό n , τότε η περίοδος ισούται με $2^n - 1$

LFSR – Πρωταρχικό πολυώνυμο (1/2)

- Το μέγιστο μέγεθος ενός n -βαθμίδων LFSR είναι $2^n - 1$
- Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο ενός LFSR που δημιουργεί μια ακολουθία μέγιστου μεγέθους ονομάζεται πρωταρχικό πολυώνυμο (primitive polynomial)
- 3-σταδίων LFSR σχήματος
 - Χαρακτηριστικό πολυώνυμο: $f(x) = 1 + x + x^3$
 - Περίοδος: 7
 - Μέγιστο μέγεθος: $2^3 - 1 = 7$
 - Άρα το πολυώνυμο είναι πρωταρχικό



LFSR – Πρωταρχικό πολυώνυμο (2/2)

Πρωταρχικά πολυώνυμα με τον ελάχιστο αριθμό XOR

Degree (n)	Polynomial
2,3,4,6,7,15,22	$x^n + x + 1$
5,11,21,29	$x^n + x^2 + 1$
8,19	$x^n + x^6 + x^5 + x + 1$
9	$x^n + x^4 + 1$
10,17,20,25,28	$x^n + x^3 + 1$
12	$x^n + x^7 + x^4 + x^3 + 1$
13,24	$x^n + x^4 + x^3 + x + 1$
14	$x^n + x^{12} + x^{11} + x + 1$
16	$x^n + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
18	$x^n + x^7 + 1$
23	$x^n + x^5 + 1$
26,27	$x^n + x^8 + x^7 + x + 1$
30	$x^n + x^{16} + x^{15} + x + 1$

LFSR – Αντίστροφο πολυώνυμο

- Ένα αντίστροφο πολυώνυμο (reciprocal polynomial) $P^*(x)$ ορίζεται ως εξής

$$P^*(x) = x^n P(1/x)$$

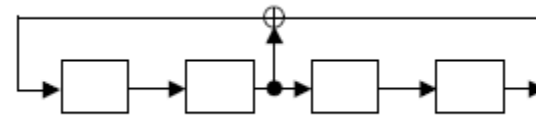
- Παράδειγμα
 - $P(x) = x^3 + x + 1$
 - $P^*(x) = x^3 \left(\frac{1}{x^3+x+1} \right) = x^3(x^{-3} + x^{-1} + 1) = 1 + x^2 + x^3$
- Αν το $P(x)$ είναι πρωταρχικό πολυώνυμο τότε και το $P^*(x)$ είναι πρωταρχικό
 - Το ίδιο ισχύει και για τα μη πρωταρχικά πολυώνυμα
- Η ακολουθία που παράγεται από έναν καταχωρητή ολίσθησης γραμμικής ανάδρασης που αντιστοιχεί στο $P^*(x)$ είναι η αντίστροφη της ακολουθίας που παράγεται από έναν καταχωρητή ολίσθησης γραμμικής ανάδρασης που αντιστοιχεί στο χαρακτηριστικό πολυώνυμο $P(x)$

Modular και standard LFSR τεσσάρων σταδίων

- 4-stage standard LFSR
 - Η ακολουθία δοκιμών επαναλαμβάνεται μετά από 6 πρότυπα
 - Περίοδος 6
 - Το $1 + x^6$ διαιρείται από το $1 + x^2 + x^4$
- 4-stage modular LFSR
 - Η ακολουθία δοκιμών επαναλαμβάνεται μετά από 15 πρότυπα
 - Περίοδος 15
 - Το $1 + x^{15}$ διαιρείται από το $1 + x + x^4$

4-stage standard LFSR

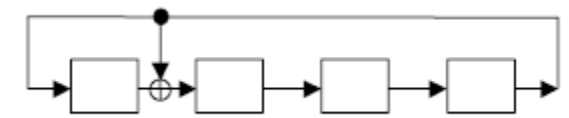
$$1 + x^2 + x^4$$



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

4-stage modular LFSR

$$1 + x + x^4$$



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

Η ακολουθία δοκιμών που δημιουργείται από κάθε LFSR όταν τα αρχικά τους περιεχόμενα τίθενται στο {0001}

Hybrid LFSR (1/2)

- Έστω ένα πολυώνυμο $\alpha(x) = 1 + b(x) + c(x)$
- Το παραπάνω πολυώνυμο είναι πλήρως decomposable εάν τα $b(x)$ και $c(x)$ δεν έχουν κοινούς όρους και υπάρχει ένας ακέραιος j ο οποίος ικανοποιεί την σχέση

$$c(x) = x^j b(x) \text{ όπου } j \geq 1$$

Hybrid LFSR (2/2)

- Αν το $f(x)$ είναι πλήρως decomposable έτσι ώστε να ισχύει $f(x) = 1 + b(x) + x^j b(x)$ τότε μπορεί να κατασκευαστεί ένα hybrid top-bottom LFSR από το πολυώνυμο:

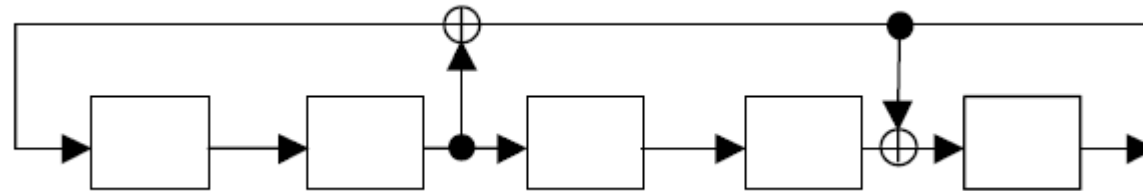
$$s(x) = 1 + \wedge x^j + x^j b(x)$$

όπου το $\wedge x^j$ συμβολίζει ότι η πύλη XOR της οποίας η μία είσοδος προέρχεται από την j -οστή βαθμίδα εξόδου του LFSR συνδέεται στο μονοπάτι ανάδρασης.

- Αν το $f(x)$ είναι πλήρως decomposable έτσι ώστε να ισχύει $f(x) = b(x) + x^j b(x) + x^n$ τότε μπορεί να κατασκευαστεί ένα hybrid bottom-top LFSR από το πολυώνυμο:

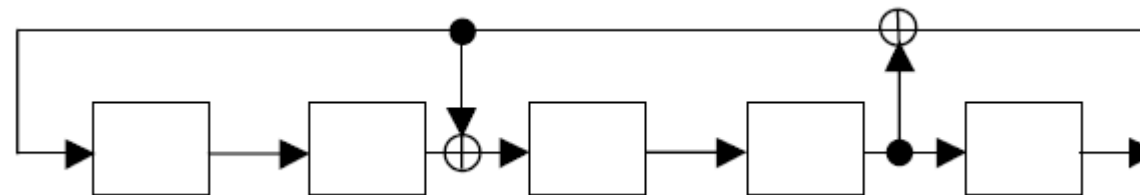
$$s(x) = b(x) + \wedge x^{n-j} + x^n$$

5-stage hybrid LFSRs



five-stage top-bottom LFSR

$$s(x) = 1 + x^2 + x^4 + x^5 \text{ για } f(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 \text{ όπου } b(x) = x^2 + x^3 \text{ και } j = 2$$



five-stage bottom-top LFSR

$$s(x) = 1 + x^2 + x^4 + x^5 \text{ για } f(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^5 \text{ όπου } b(x) = 1 + x^2, n = 5 \text{ και } j = 1$$

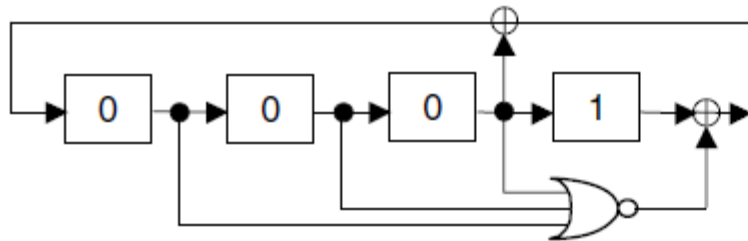
Εξαντλητική Δοκιμή

Εξαντλητική δοκιμή

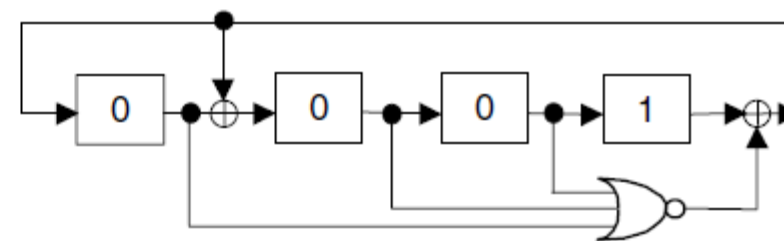
- Εξαντλητική δοκιμή
 - Εφαρμογή 2^n δυνατών προτύπων δοκιμής σε ένα n-εισόδων συνδυαστικό κύκλωμα υπό δοκιμή
- Γεννήτρια εξαντλητικών προτύπων δοκιμής
 - Binary counter
 - Complete LFSR

Complete LFSR

- Complete LFSR (CFSR): LFSR μέγιστου μεγέθους το οποίο περιλαμβάνει και την all-zero κατάσταση



4-stage standard CFBSR



4-stage modular CFBSR

- Εισάγεται μια πύλη XOR στο τελευταίο στάδιο του LFSR και μία πύλη NOR με $n-1=3$ εισόδους από τα 3 πρώτα στάδια του LFSR η οποία χρησιμοποιείται ως ένας zero-detector.
- Με αυτήν την διαμόρφωση τα CFBSRs μεταπηδούν στην κατάσταση all-zero $\{0000\}$ μετά την κατάσταση $\{0001\}$

Απόδοση εξαντλητικής δοκιμής

- Η εξαντλητική δοκιμή εγγυάται ότι όλα τα ανιχνεύσιμα συνδυαστικά σφάλματα θα ανιχνευθούν
- Ο χρόνος δοκιμής μπορεί να είναι απαγορευτικά μεγάλος αν το πλήθος των εισόδων είναι μεγαλύτερο από 20

Ψευδοτυχαία Δοκιμή

Ψευδοτυχαία Δοκιμή

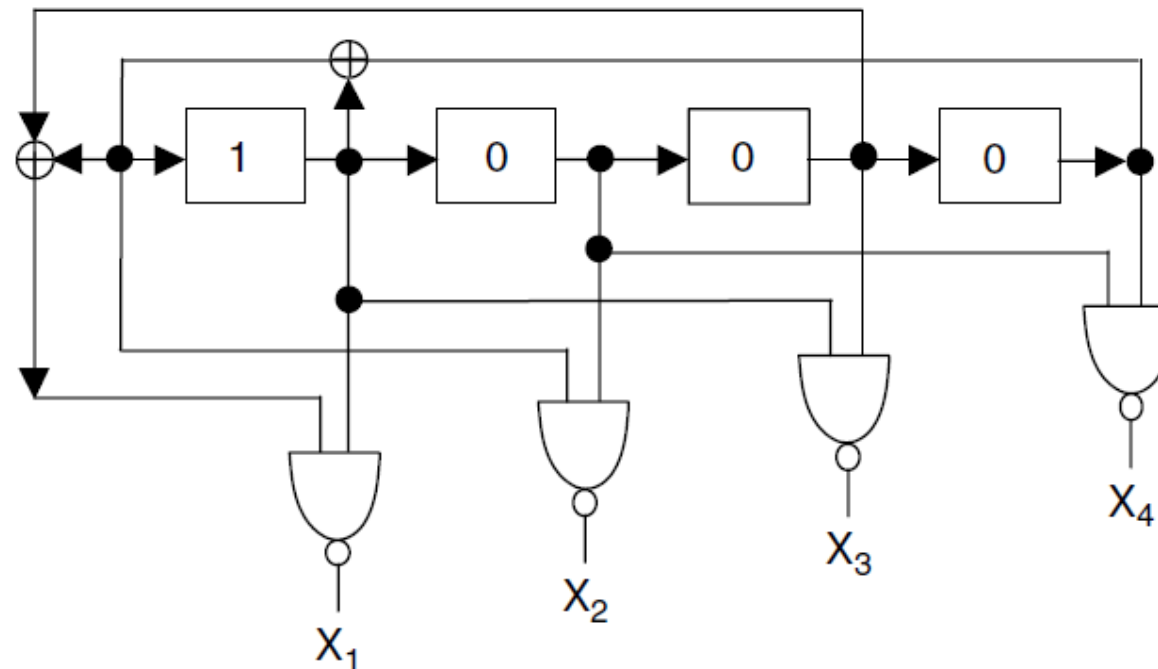
- Ψευδοτυχαία γεννήτρια προτύπων δοκιμής
- Εφαρμόζεται τόσο σε συνδυαστικά όσο και σε ακολουθιακά κυκλώματα
- Μειώνεται το μέγεθος της δοκιμής αλλά υποβαθμίζεται η κάλυψη σφαλμάτων
- Δύσκολος ο καθορισμός του απαιτούμενου μεγέθους της δοκιμής και της κάλυψης σφαλμάτων
- Τεχνικές
 - Maximum-length LFSR
 - Weighted LFSR
 - Cellular Automata

Maximum-Length LFSR

- Τεχνική εύκολη στην υλοποίηση
- Μπορεί να υλοποιηθεί με standard, modular, hybrid LFSR
- Κάθε LFSR δημιουργεί μια ακολουθία με 0.5 πιθανότητα παραγωγής 1's σε κάθε έξοδο
- Random-pattern resistant πρόβλημα: η πιθανότητα ένας κόμβος να πάρει τυχαία την τιμή 0 ή 1 ή η πιθανότητα να παρατηρηθεί η τιμή ενός κόμβου σε μία κύρια έξοδο του κυκλώματος είναι χαμηλή.
 - Για παράδειγμα η πιθανότητα να λάβουν την τιμή 0 όλες οι εισοδοί μιας πύλης OR 5 εισόδων είναι $1/32$.

Weighted LFSR

- Αποτελείται από ένα LFSR και ένα συνδυαστικό κύκλωμα.
- Το συνδυαστικό κύκλωμα εισάγεται ανάμεσα στην έξοδο του LFSR και το CUT για να αυξηθεί η συχνότητα εμφάνισης μιας λογικής τιμής μειώνοντας την συχνότητα εμφάνισης των άλλων λογικών τιμών



Ερωτήσεις



Πηγές

- Fay Talan, “VLSI Test Principles and Architectures”.