

Μανδαλωτής Ανθεκτικός σε SEU που Επιδρούν σε Πολλα-  
πλούς Κόμβους

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

υποβάλλεται στην ορισθείσα

από τη Συνέλευση

του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

Εξεταστική Επιτροπή

από τον

Ευάγγελο Παπαρσένο

ως μέρος των υποχρεώσεων για την απόκτηση του

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΜΕ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ

ΣΤΑ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Πολυτεχνική Σχολή

Ιωάννινα 2025

Εξεταστική επιτροπή:

- **Γεώργιος Τσιατούχας**, Καθηγητής Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (Επιβλέπων)
- **Χρυσοβαλάντης Καβουσιανός**, Καθηγητής Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- **Γεωργία Τσιριμώκου**, Επικ. Καθηγητής Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Τσιατούχα, καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για την εξαιρετική επιστημονική καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και τη συνεχή υποστήριξή του σε όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για την στήριξη και κατανόηση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Ευχαριστιες                                                                    | 0         |
| Περιεχόμενα                                                                    | i         |
| Καταλογος Εικόνων                                                              | iii       |
| Καταλογος Πινακων                                                              | v         |
| Γλωσσαρι                                                                       | vi        |
| Περίληψη                                                                       | vii       |
| Extended Abstract                                                              | ix        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1    Εισαγωγή</b>                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1   Στόχοι .....                                                             | 1         |
| 1.2   Δομή της Διατριβής.....                                                  | 2         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2    Θεωρητικο Υποβαθρο</b>                                        | <b>4</b>  |
| 2.1   Εισαγωγή .....                                                           | 4         |
| 2.2   Διάφορες Μεταξύ Ήπιων και Μόνιμων σφαλμάτων.....                         | 6         |
| 2.3   Αίτιες Εμφάνισης Ήπιων Λαθών .....                                       | 7         |
| 2.3.1   Κοσμική Ακτινοβολία .....                                              | 7         |
| 2.3.2   Ακτινοβολία α (Alpha particles) .....                                  | 9         |
| 2.4   Επιδράσεις στα Ολοκληρωμένα Κυκλώματα.....                               | 10        |
| 2.5   Παράγοντες που Επηρεάζουν τα Single Event Upsets.....                    | 11        |
| 2.5.1   Linear Energy Transfer (LET).....                                      | 11        |
| 2.5.2   Χαρακτηριστικά του Κυκλώματος.....                                     | 12        |
| 2.6   Μοντελοποίηση Διαταραχής Προερχόμενης από Ακτινοβολία .....              | 12        |
| 2.7   Σημασία στη Σύγχρονη Τεχνολογία .....                                    | 14        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3    Τεχνικές Αντιμετώπισης    μιας Διαταραχής Απλου Συμβαντος</b> | <b>16</b> |
| 3.1   Εισαγωγή .....                                                           | 16        |
| 3.2   Ο Μανδαλωτής MURLAV .....                                                | 17        |
| 3.3   Ο Μανδαλωτής QR-R11C2 .....                                              | 20        |

|                   |                                                                                                                                       |           |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4               | Ο Μανδαλωτής LCQRL .....                                                                                                              | 23        |
| 3.5               | Ο Μανδαλωτής QNURHL .....                                                                                                             | 26        |
| 3.6               | Ο Μανδαλωτής LDAVPM .....                                                                                                             | 28        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> | <b>Προτεινόμενος Μανδαλωτής Ανθεκτικός σε Πολλαπλούς Κόμβους</b>                                                                      | <b>31</b> |
| 4.1               | Εισαγωγή .....                                                                                                                        | 31        |
| 4.2               | Περιγραφή του Προτεινομένου Μανδαλωτή .....                                                                                           | 32        |
| 4.3               | Περιγραφή Λειτουργίας του Προτεινόμενου Μανδαλωτή .....                                                                               | 35        |
| 4.4               | Επίδραση Διαταραχών Απλού Συμβάντος, εξ Αιτίας της Ακτινοβολίας, στους Κόμβους του Μανδαλωτή .....                                    | 36        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> | <b>Πειραματικά Αποτελέσματα</b>                                                                                                       | <b>44</b> |
| 5.1               | Σχεδίαση του Προτεινόμενου Μανδαλωτή .....                                                                                            | 44        |
| 5.2               | Χαρακτηρισμός Προτεινόμενου Μανδαλωτή και Συγκρίσεις .....                                                                            | 46        |
| 5.3               | Επαλήθευση Ανοχής και Ανάκτησης του Προτεινόμενου Μανδαλωτή σε μια Διαταραχή Απλού Συμβάντος που Επηρεάζει έως Τέσσερις Κόμβους ..... | 49        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> | <b>Συμπεράσματα</b>                                                                                                                   | <b>55</b> |
|                   | <b>Βιβλιογραφία</b>                                                                                                                   | <b>57</b> |
|                   | <b>Δημοσιεύσεις Συγγραφέα</b>                                                                                                         | <b>1</b>  |
|                   | <b>Συντομο Βιογραφικό</b>                                                                                                             | <b>2</b>  |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

---

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 2.1: Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών από πρόσκρουση σωματιδίου υψηλής ενέργειας σε τρανζίστορ ..                                             | 5  |
| Εικόνα 2.2:Σχηματισμός συνθέτων καταρρακτών δευτερογενών σωματιδίων.....                                                                               | 8  |
| Εικόνα 2.3:Η δομή ενός σωματιδίου άλφα. ....                                                                                                           | 9  |
| Εικόνα 2.4:Μοντέλο διπλού εκθετικού παλμού.....                                                                                                        | 13 |
| Εικόνα 2.5: Ποσοστά διαταραχών απλού , διπλού, τριπλού και πολλαπλών Bit σε στοιχεία μνήμης διαφορετικών τεχνολογιών.....                              | 15 |
|                                                                                                                                                        |    |
| Εικόνα 3.1: Αναστροφέας διπλής εισόδου. (a) Σχηματικό, (b) Σχηματικό της Clock-Gated έκδοσης. (c) Πίνακας αληθείας του αναστροφέα διπλής εισόδου. .... | 17 |
| Εικόνα 3.2: Η Δομή του μανδαλωτή MURLAV. ....                                                                                                          | 18 |
| Εικόνα 3.3: Προσομοιώσεις διαταραχών τεσσάρων κόμβων του MURLAV.....                                                                                   | 19 |
| Εικόνα 3.4: Σχηματικό από $i$ γραμμές, $j$ στήλες ενός πίνακα LCM. ....                                                                                | 20 |
| Εικόνα 3.5: Σχηματικό του μανδαλωτή QR-R11C2.....                                                                                                      | 21 |
| Εικόνα 3.6:Προσομοιώσεις διαταραχών τεσσάρων κόμβων του QR-R11C2.....                                                                                  | 22 |
| Εικόνα 3.7: (a) Σχηματικό της SIM0. (b) Σχηματικό των υπολοίπων SIMs. (c) Σχηματικό του μανδαλωτή LCQRL. ....                                          | 24 |
| Εικόνα 3.8: Προσομοιώσεις διαταραχών τεσσάρων κόμβων του LCQRL. ....                                                                                   | 25 |
| Εικόνα 3.9: Σχηματικό του μανδαλωτή QNURHL. ....                                                                                                       | 26 |
| Εικόνα 3.10: Προσομοιώσεις διαταραχών τεσσάρων κόμβων του QNURHL. ....                                                                                 | 27 |
| Εικόνα 3.11: Σχηματικό του μανδαλωτή LDAVPM. ....                                                                                                      | 28 |
| Εικόνα 3.12: Προσομοιώσεις QNU διαταραχών του LDAVPM.....                                                                                              | 30 |
|                                                                                                                                                        |    |
| Εικόνα 4.1: Η τοπολογία του προτεινόμενου μανδαλωτή. ....                                                                                              | 32 |
| Εικόνα 4.2: Η δομή του στοιχείου C - Element δυο εισόδων. ....                                                                                         | 33 |
| Εικόνα 4.3: α) Η δομή της πύλης διέλευσης β) Η δομή του τρισταθή αναστροφέα δυο εισόδων .....                                                          | 33 |
| Εικόνα 4.4: Λειτουργία ανάδρασης των δεδομένων του dice1. ....                                                                                         | 34 |
|                                                                                                                                                        |    |
| Εικόνα 5.1: Η δομή του μανδαλωτή dice.....                                                                                                             | 45 |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 5.2: Κυματομορφές κατά την κανονική λειτουργία του προτεινομένου μανδαλωτή                                                  | 46 |
| Εικόνα 5.3: Αποτελέσματα της προσομοίωσης για την επίδραση μιας διαταραχής απλού συμβάντος σε έναν κόμβο του μανδαλωτή.....        | 51 |
| Εικόνα 5.4: Αποτελέσματα της προσομοίωσης για την επίδραση μιας διαταραχής απλού συμβάντος σε δύο κόμβους του μανδαλωτή .....      | 52 |
| Εικόνα 5.5:Αποτελέσματα της προσομοίωσης για την επίδραση μιας διαταραχής απλού συμβάντος σε τρεις κόμβους του μανδαλωτή .....     | 53 |
| Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα της προσομοίωσης για την επίδραση μιας διαταραχής απλού συμβάντος σε τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή ..... | 54 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 5.1: Συγκρίσεις αξιοπιστίας μεταξύ των ανθεκτικών μανδαλωτών για διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει έως και τέσσερις κόμβους ταυτόχρονα..... | 47 |
| Πίνακας 5.2: Συγκριτική παρουσίαση των επιδόσεων των μανδαλωτών.....                                                                                      | 48 |
| Πίνακας 5.3: Ποσοστιαίες συγκρίσεις αναμεσά στους μανδαλωτές .....                                                                                        | 49 |



## ΓΛΩΣΣΑΡΙ

---

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

MNUs: Multiple Node Upsets

SEUs: Single Event Upsets

QNUs: Quadruple Node Upsets

TNUs: Triple Node Upsets

DNUs: Double Node Upsets

SNUs: Single Node Upsets

SEEs: Single Event Effects

SoC: System on Chip

ECC: Error Correction Code

TG: Transmission Gate

PDP: Power Delay Product

APDP: Area Power Delay Product

MURLAV: Multiple-Node-Up Recovery Latch

QR-R11-C2: Quadruple-Node-Upset Self-Recoverable Latch Design Based on Looped C-Element Matrix

LCQRL: Low-Cost Quadruple-Node-Upsets Resilient Latch

QNURHL: Quadruple-Node-Up-Recoverable Hardened Latch

LDAVPM: Latch Design with Algorithm-based Verification Protected against Multiple-Node Upsets

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Παπαρσένος Ευάγγελος, Δ.Μ.Σ. στη Μηχανική Δεδομένων και Υπολογιστικών Συστημάτων,  
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων,  
Ιούνιος 2025

Μανδαλωτής Ανθεκτικός σε SEU που Επιδρούν σε Πολλαπλούς Κόμβους

Επιβλέπων: Γεώργιος Τσιατούχας, Καθηγητής

Η συνεχής κλιμάκωση της τεχνολογίας CMOS προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στις επιδόσεις και την ενεργειακή απόδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, αλλά ταυτόχρονα έχει επιφέρει σοβαρές προκλήσεις αξιοπιστίας. Μεταξύ αυτών των προκλήσεων, τα ήπια λάθη (soft errors) που προκαλούνται από την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας και των σωματιδίων άλφα αποτελούν σήμερα έναν από τους κυριότερους μηχανισμούς αστοχίας, ιδίως στα στοιχεία μνήμης όπως οι μανδαλωτές και τα flip-flops. Στις σύγχρονες νανομετρικές τεχνολογίες η πρόσκρουση ενός σωματιδίου μπορεί να επηρεάσει ταυτόχρονα πολλαπλούς κόμβους, οδηγώντας σε διαταραχές πολλαπλών κόμβων (Multiple-Node Upsets – MNUs), με πιο κρίσιμες περιπτώσεις τις διαταραχές σε έως και τέσσερις κόμβους (Quadruple-Node Upsets – QNUs).

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη συμπεριφορά των μανδαλωτών υπό την επίδραση διαταραχών απλού συμβάντος (Single Event Upsets – SEUs) όταν βρίσκονται σε λειτουργία μνήμης, με έμφαση στα σενάρια που επηρεάζουν έως και τέσσερις κόμβους. Αρχικά αναλύονται οι φυσικοί μηχανισμοί πρόκλησης τέτοιων διαταραχών, όπως η ακτινοβολία και η συλλογή φορτίου, και παρουσιάζεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των υφιστάμενων τεχνικών ανοχής σε ήπια λάθη.

Στη συνέχεια προτείνεται μια νέα τοπολογία μανδαλωτή, σχεδιασμένη για πλήρη ανθεκτικότητα έναντι των QNUs. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός βασίζεται σε συνδυασμό πυλών μετάδοσης, δομών C (C-elements) και πολλαπλών βρόχων ανατροφοδότησης, επιτρέποντας την απομόνωση των κόμβων που επηρεάστηκαν και την καθολική αποκατάσταση της ορθής λογικής τους κατάστασης σε κάθε πιθανή περίπτωση QNU.

Η λειτουργικότητα του μανδαλωτή και η ανοχή του σε ήπια λάθη επαληθεύτηκαν μέσω προσομοιώσεων σε σχετικό κύκλωμα μανδαλωτή το οποίο σχεδιάστηκε σε εμπορική τεχνολογία CMOS των 28nm. Τα αποτελέσματα έδειξαν πλήρη ανάκαμψη από όλα τα πιθανά σενάρια διαταραχών, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία της προτεινόμενης λύσης. Τέλος, παρουσιάζεται συγκριτική αξιολόγηση με άλλες σχεδιάσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας με παρόμοια στόχευση, ως προς την καθυστέρηση διάδοσης σήματος, την κατανάλωση ισχύος, την επιφάνεια πυριτίου καθώς και τους συνδυαστικούς δείκτες απόδοσης, γινόμενο ισχύος-καθυστέρησης (Power-Delay Product) και γινόμενο επιφάνειας-ισχύος-καθυστέρησης (Area-Power-Delay Product). Η προτεινόμενη λύση επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ ανθεκτικότητας και απόδοσης, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές υψηλής κρισιμότητας όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική τεχνολογία, πυρηνική τεχνολογία και τα αυτόνομα συστήματα.

## EXTENDED ABSTRACT

---

Evangelos Paparsenos, M.Sc. in Data and Computer Systems Engineering, Department of Computer Science and Engineering, School of Engineering, University of Ioannina, Greece,  
June 2025

Multiple Node Upset SEU Tolerant Latch

Advisor: Yiorgos Tsiatouhas, Professor

The continuous scaling of CMOS technology offers significant improvements in the performance and energy efficiency of integrated circuits, but at the same time it has brought about serious reliability challenges. Among these challenges, soft errors caused by the effect of cosmic rays and alpha particles are currently one of the main failure mechanisms, especially in memory elements such as latches and flip-flops. In modern nanoscale technologies, the impact of a particle can simultaneously affect multiple nodes, leading to multiple-node upsets (MNU), with more critical cases up to four nodes (Quadruple-Node Upsets – QNUs).

This paper examines the behavior of latches under the influence of single event upsets (SEUs) when they are in memory mode, with emphasis on scenarios affecting up to four nodes. Initially, the physical mechanisms of such disturbances, such as radiation and charge collection, are analyzed, and a literature review of existing soft fault tolerance techniques is presented.

Then, a new latch topology is proposed, designed for full resilience against QNUs. The proposed design is based on a combination of transmission gates, C-elements and multiple feedback loops, allowing the isolation of the affected nodes and the global restoration of their correct logic state in any possible QNU case.

The functionality of the latch and its soft fault tolerance were verified through simulations on a relevant latch circuit designed in commercial 28nm CMOS technology. The results showed full recovery from all possible disturbance scenarios, confirming the reliability of the proposed solution. Finally, a comparative evaluation is presented with other designs in the international literature with similar targets, in terms of signal propagation delay, power consumption, silicon area as well as the combined performance indicators, Power-Delay Product and Area-Power-Delay Product. The proposed solution achieves a balance between

robustness and performance, making it suitable for highly critical applications such as aerospace, medical technology, nuclear technology and autonomous systems.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Στόχοι

### 1.2 Δομή της Διατριβής

---

### 1.1 Στόχοι

Με την τεχνολογία ημιαγωγών να κλιμακώνεται συνεχώς, η απόδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων βελτιώνεται σημαντικά και η κατανάλωση ισχύς ελαττώνεται ραγδαία [1]. Ωστόσο, εμφανίζονται συχνότερα ήπια λάθη (soft errors), ένας τύπος λάθους που συναντώνται σε ηλεκτρονικά συστήματα, ιδιαίτερα σε συστήματα μνήμης (μανδαλωτές και flip-flops), λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η κοσμική ακτινοβολία και η ακτινοβολία σωματιδίων άλφα από τα υλικά συσκευασίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [2]. Στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής πυκνότητας, η πρόσκρουση σωματιδίων υψηλής ενέργειας στο πυρίτιο μπορεί να αλλάξει τις λογικές τιμές πολλαπλών κόμβων ταυτόχρονα μέσα στα στοιχεία μνήμης (μανδαλωτές), καθιστώντας τα ευάλωτα. Αυτό επιφέρει τελικά την αλλαγή της αποθηκευμένης κατάστασης σε μια μνήμη (bit flipping), με αποτέλεσμα την εν συνεχεία εσφαλμένη λειτουργία του συστήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί με τα ήπια λάθη που προκύπτουν μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος (single event effect - SEE) εξ αιτίας ακτινοβολίας και πιο συγκεκριμένα λάθη που εμφανίζονται σε έναν μανδαλωτή (Lacth) όταν αυτός βρίσκεται σε κατάσταση μνήμης. Αρχικά θα αναφερθούν οι τρόποι με τους οποίους δημιουργούνται οι διαταραχές αυτές σε έναν μανδαλωτή και εν συνεχεία θα μελετηθούν τεχνικές

αντιμετώπισης των ήπιων λαθών οι οποίες έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία σε περιπτώσεις μιας διαταραχής απλού συμβάντος που θα επηρεάζει έως και τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή.

Ακολουθώντας, στην εργασία θα προταθεί μια τεχνική σχεδίασης για έναν ανθεκτικό μανδαλωτή ο οποίος παρέχει ανοχή στα ήπια λάθη και έχει την ικανότητα ανάκτησης της αρχικής κατάστασης στους εσωτερικούς του κόμβους ύστερα από μια διαταραχή απλού συμβάντος η οποία ενδέχεται να επηρεάσει έως τέσσερις κόμβους του κυκλώματος.

Με την εκτέλεση προσομοιώσεων σε μανδαλωτή ο οποίος έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με την προτεινόμενη τεχνική στην τεχνολογία CMOS της UMC στα 28nm, επαληθεύτηκε αρχικά η κανονική λειτουργία του μανδαλωτή και εν συνεχεία η ανθεκτικότητα του στις διαταραχές απλού συμβάντος καθώς και η δυνατότητα αποκατάστασης των εσωτερικών του κόμβων ακόμη και όταν η διαταραχή επηρεάσει μέχρι και τέσσερις κόμβους. Τέλος παρουσιάζονται συγκρίσεις με άλλους σχετικούς μανδαλωτές στη διεθνή βιβλιογραφία, αναφορικά με την καθυστέρηση (ταχύτητα λειτουργίας), την κατανάλωση ισχύος, την απαιτούμενη επιφάνεια που καταλαμβάνει στον κρύσταλλο του πυριτίου, το γινόμενο καθυστέρησης επί κατανάλωσης ισχύος, το γινόμενο επιφάνειας πυριτίου επί καθυστέρησης επί κατανάλωσης ισχύος και την ταχύτητα ανάκτησης της εξόδου του μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος. Οι συγκρίσεις ανέδειξαν την υπεροχή της προτεινόμενης σχεδίασης, ως προς κάποιους από τους ανωτέρω παράγοντες, σε σχέση με ανταγωνιστικές τεχνικές σχεδίασης ανθεκτικών στην ακτινοβολία μανδαλωτών στη διεθνή βιβλιογραφία.

## **1.2 Δομή της Διατριβής**

Η διπλωματική εργασία είναι χωρισμένη σε έξι κεφάλαια. Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει το θεωρητικό υπόβαθρο δηλαδή το πως μπορεί να προκληθεί μια διαταραχή απλού συμβάντος εξαιτίας ακτινοβολίας με κύριες αιτίες την ακτινοβολία σωματιδίων άλφα και την κοσμική ακτινοβολία. Επίσης αναλύει τις επιδράσεις ακτινοβολίας στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, τους παράγοντες που επηρεάζουν τα Single Event Upset, την μοντελοποίηση διαταραχής προερχομένης από ακτινοβολία και την σημασία στη σύγχρονη τεχνολογία.

Ακολουθώντας, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται υπάρχουσες τεχνικές στη βιβλιογραφία για τη σχεδίαση μανδαλωτών ανθεκτικών σε διαταραχές απλού συμβάντος που επηρεάζουν έως και τέσσερις κόμβους ταυτόχρονα.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει και αναλύει λεπτομερώς την προτεινομένη σχεδιαστική τεχνική του μανδαλωτή για την αντιμετώπιση διαταραχών απλού συμβάντος που επηρεάζουν έως και τέσσερις κόμβους του.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στα πειραματικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τις σχετικές μετρήσεις με την εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής για τη σχεδίαση ενός μανδαλωτή και παρουσιάζει συγκρίσεις σε σχέση με άλλες τεχνικές που πραγματεύονται την αντιμετώπιση μιας διαταραχής απλού συμβάντος που επηρεάζει έως και τέσσερις κόμβους ενός μανδαλωτή.

Τέλος το έκτο κεφάλαιο κλείνει με τα συμπεράσματα της εργασίας και τις πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

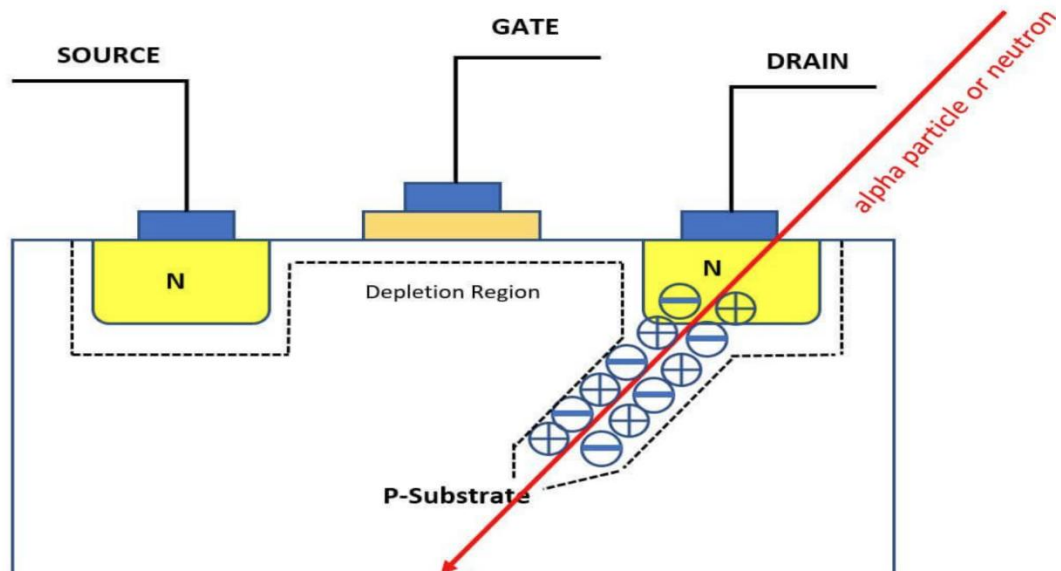
### ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

- 
- 2.1 Εισαγωγή
  - 2.2 Διάφορες Μεταξύ Ήπιων και Μόνιμων Λαθών
  - 2.3 Αίτιες Εμφάνισης των Ήπιων Λαθών
  - 2.4 Επιδράσεις στα Ολοκληρωμένα Κυκλώματα
  - 2.5 Παράγοντες που Επηρεάζουν τα Single Event Upsets
  - 2.6 Μοντελοποίηση Διαταραχής Προερχομένης από Ακτινοβολία
  - 2.7 Σημασία στη Σύγχρονη Τεχνολογία
- 

### 2.1 Εισαγωγή

Η συνεχής πρόοδος στην κλιμάκωση της ολοκλήρωσης στην CMOS τεχνολογία (Complementary Metal Oxide Semiconductor), που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έχει επιφέρει εντυπωσιακή βελτίωση στην απόδοση των κυκλωμάτων τις τελευταίες δεκαετίες. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων τεχνολογιών, όπως οι μειωμένες διαστάσεις, οι χαμηλές τάσεις τροφοδοσίας και τα μειωμένα παρασιτικά φαινόμενα, αν και προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως αυξημένη απόδοση και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, έχουν ταυτόχρονα δημιουργήσει σοβαρά ζητήματα αξιοπιστίας στη λειτουργία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [3] [4] [5]. Η κατηγορία των κυκλωμάτων που επηρεάζεται περισσότερο από αυτά τα ζητήματα είναι οι μονάδες μνήμης (μανδαλωτές και flip flops). Λόγω της αυξανόμενης ενσωμάτωσής τους σε συστήματα SoC (System on Chip), η αξιοπιστία τους καθίσταται καθοριστική. Οι υπάρχουσες λύσεις δεν είναι επαρκείς για τις μελλοντικές απαιτήσεις, ειδικά σε κρίσιμες εφαρμογές όπως στην αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, και οι ιατρικές εφαρμογές [6]. Η ανάγκη για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών που διασφαλίζουν την αξιοπιστία είναι πλέον επιτακτική.

Τα λάθη που δημιουργούνται από εξωτερικούς παράγοντες και συναντάμε σε συστήματα υψηλής κλίμακας ολοκλήρωσης κατηγοριοποιούνται σε μονιμά (hard error) και ήπια (soft error). Θα αναλυθεί παρακάτω εκτενώς οι κυρίες διαφορές της κάθε κατηγορίας. Τα ήπια λάθη αποτελούν προσωρινά λάθη στην λογική απόκριση που προκαλούνται από εξωγενείς παράγοντες και επηρεάζουν τα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα, χωρίς να προκαλείται μόνιμη ζημιά στη συσκευή. Αυτά τα λάθη δημιουργούνται όταν εξωτερικές ακτινοβολίες ή σωματίδια υψηλής ενέργειας αλληλοεπιδρούν με το υπόστρωμα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Όταν σωματίδια συγκρούονται με το υπόστρωμα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, χάνουν την κινητική τους ενέργεια και δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στις περιοχές αγωγιμότητας του υλικού. Τα δημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών διαχέονται κατά μήκος της διαδρομής του σωματιδίου, όπως απεικονίζεται και στην εικόνα (Εικόνα 2.1). Η έκβαση αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από την κατάσταση της πύλης του τρανζίστορ, που καθορίζει αν το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής (ON) ή αποκοπής (OFF). Στην κατάσταση ON, δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή, καθώς τα φορτία απομακρύνονται μέσω των αγωγών τροφοδοσίας. Αντίθετα, όταν το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση OFF, τα φορτία συσσωρεύονται στον κόμβο υποδοχής του τρανζίστορ μέσω διαδικασιών διάχυσης [7] γεγονός που μπορεί να επιφέρει αλλαγή στην πολικότητά τους. Αυτό σημαίνει ότι ένα λάθος συμβαίνει κυρίως όταν το τρανζίστορ είναι στην αποκοπή.



Εικόνα 2.1: Δημιουργία Ζευγών Ηλεκτρονίων-Οπών από Πρόσκρουση Σωματιδίου Υψηλής Ενέργειας σε Τρανζίστορ [8].

Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση των μνημών, η παρουσία ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή της πρόσκρουσης μπορεί να μετακινήσει φορείς κίνησης προς τον κόμβο εξόδου ενός κυκλώματος, όπου εάν το εισερχόμενο φορτίο υπερβεί ένα κρίσιμο όριο ( $Q_{crit}$ ), τότε τα αποθηκευμένα δεδομένα επηρεάζονται οδηγώντας το σύστημα σε αστάθεια [8]. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως διαταραχή απλού συμβάντος (Single Event Upset - SEU) και οδηγεί στην εμφάνιση ήπιων λαθών.

## **2.2 Διάφορες Μεταξύ Ήπιων και Μόνιμων σφαλμάτων.**

Η κατανόηση των διαφορών μεταξύ των ανωτέρω λαθών είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό και τη συντήρηση αξιόπιστων συστημάτων. Τα ήπια λάθη προκαλούνται από προσωρινές δυσλειτουργίες που δεν επιφέρουν μόνιμη βλάβη στο υλικό. Αυτά τα λάθη επηρεάζουν τα δεδομένα ή την λογική κατάσταση των κυκλωμάτων, αλλά το υλικό παραμένει άθικτο [9]. Οι αιτίες εμφάνισης των ήπια λάθη συνδέονται με εξωτερικούς παράγοντες, όπως η κοσμική ακτινοβολία και τα σωματίδια άλφα (θα αναλυθούν παρακάτω), τα οποία μπορούν να αλλοιώσουν την λογική κατάσταση που βρίσκεται ένα κελί μνήμης ή η τιμή στην έξοδο μιας λογικής πύλης [10]. Τα ήπια λάθη είναι προσωρινά και μπορούν να αναιρούνται στον επόμενο κύκλο ρολογιού. Δεν απαιτείται φυσική παρέμβαση στο υλικό. Συνοψίζοντας τα ήπια σφάλματα μπορεί να οδηγήσουν σε προσωρινά λάθη δεδομένων, όπως λανθασμένες τιμές σε μνήμη ή την εσωτερική κατάσταση ενός επεξεργαστή, αλλά δεν προκύπτουν από μόνιμη βλάβη. Ωστόσο, σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως σε δορυφόρους ή ιατρικό εξοπλισμό ή στρατιωτικό εξοπλισμό, μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις.

Αντίθετα, τα μόνιμα λάθη είναι μόνιμες βλάβες που προκύπτουν από ελαττώματα, φυσικές φθορές ή καταστροφές στο υλικό, απαιτώντας επισκευή ή αντικατάσταση για την αποκατάσταση της λειτουργίας. Τα μόνιμα σφάλματα οφείλονται σε εσωτερικούς παράγοντες, όπως κατασκευαστικές ατέλειες, φθορά ή γήρανση, και μηχανικές καταπονήσεις. Τα μόνιμα λάθη είναι μόνιμα και απαιτούν φυσική επισκευή ή αντικατάσταση των εξαρτημάτων για την αποκατάσταση της λειτουργίας. Συνοψίζοντας τα μόνιμα λάθη οδηγούν σε οριστική δυσλειτουργία του συστήματος ή τμήματός του, απαιτώντας περισσότερο χρόνο και κόστος για την αποκατάσταση [11]. Παρακάτω στον Πίνακα 2. 1 βλέπουμε συγκεντρωτικά τις διάφορες μεταξύ των ήπιων και μόνιμων σφαλμάτων.

Πίνακας 2.1: Διάφορες Μεταξύ των Ήπιων και Μόνιμων Λαθών.

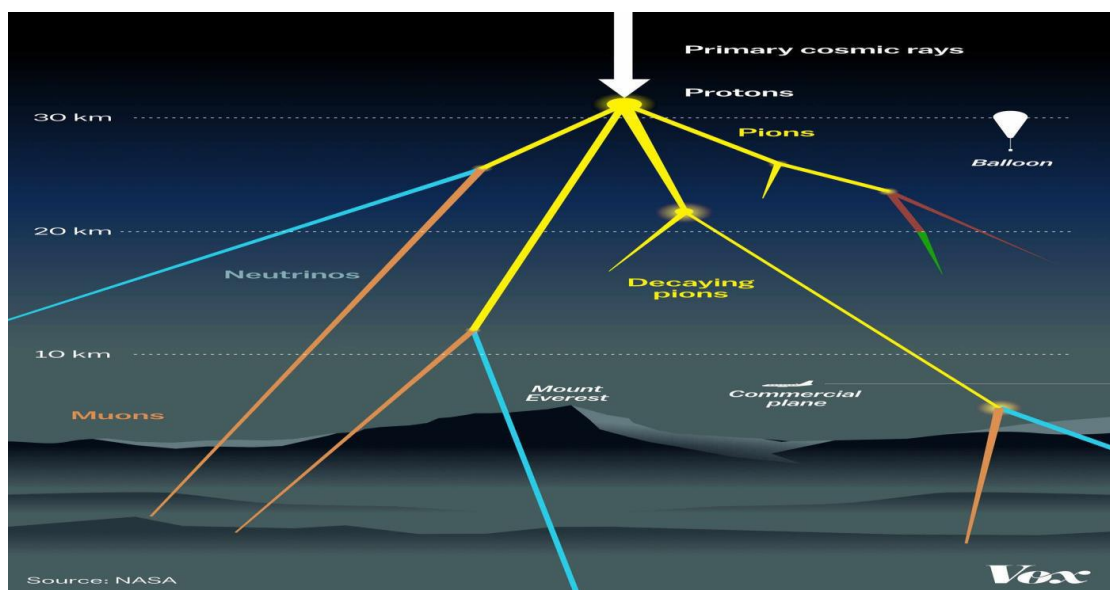
| Χαρακτηριστικό | Ήπια Λάθη                            | Μόνιμα Λάθη                                       |
|----------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Φύση           | Προσωρινή                            | Μόνιμη                                            |
| Αιτίες         | Κοσμική ακτινοβολία, άλφα σωματίδια  | Ελαττώματα, φυσικές βλάβες, υπερθέρμανση, γήρανση |
| Αντίκτυπος     | Αναστρέψιμο μέσω διόρθωσης δεδομένων | Απαιτείται αντικατάσταση υλικού                   |
| Εμφάνιση       | Τυχαία                               | Συνήθως σταδιακή                                  |
| Παραδείγματα   | SEU                                  | Βραχυκυκλώματα και ανοικτοκυκλώματα               |

## 2.3 Αίτιες Εμφάνισης Ήπιων Λαθών

### 2.3.1 Κοσμική Ακτινοβολία

Η κοσμική ακτινοβολία αποτελεί μία από τις κύριες αιτίες εμφάνισης ήπιων λαθών στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα. Αποτελείται από υψηλής ενέργειας σωματίδια, όπως πρωτόνια, άλφα σωματίδια και βαρέα ιόντα, που προέρχονται από πηγές όπως ο Ήλιος (ηλιακή ακτινοβολία) και εξωγαλαξιακές πηγές (γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία) [11]. Καθώς αυτά τα σωματίδια διαπερνούν την ατμόσφαιρα της Γης, αλληλεπιδρούν με τα ατομικά συστατικά της, δημιουργώντας δευτερεύοντα σωματίδια όπως νετρόνια. Τα δευτερεύοντα αυτά σωματίδια αποτελούν τη βασική αιτία για ήπια λάθη στις συσκευές που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης. Τα ήπια λάθη που οφείλονται στην κοσμική ακτινοβολία προκαλούνται μέσω ενός συγκεκριμένου μηχανισμού. Τα νετρόνια, ένα από τα βασικά δευτερεύοντα σωματίδια (Εικόνα 2.2), αλληλεπιδρούν με το πυρίτιο στα ολοκληρωμένα κυκλώματα και προκαλούν τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Τα παραγόμενα φορτία διαπερνούν στην περιοχή του κυκλώματος, και μπορούν να αλλάξουν την κατάσταση ενός bit από 0 σε 1 ή το αντίστροφο [10]. Επιπλέον, η σμίκρυνση των τρανζίστορ στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα αυξάνει την ευαισθησία σε τέτοιους μηχανισμούς. Οι μικρότερες διαστάσεις (π.χ., 7nm και 5nm) μειώνουν το απαιτούμενο φορτίο για την αλλοίωση ενός bit, αυξάνοντας την πιθανότητα εμφάνισης ήπιων λαθών [12].

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την πιθανότητα εμφάνισης ήπιων λαθών λόγω κοσμικής ακτινοβολίας περιλαμβάνουν το υψόμετρο, το μαγνητικό πεδίο της Γης, και το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων. Σε μεγαλύτερα υψόμετρα, όπως στις περιπτώσεις αεροσκαφών ή δορυφόρων, η μειωμένη πυκνότητα της ατμόσφαιρας επιτρέπει σε περισσότερα σωματίδια να φτάσουν στα ηλεκτρονικά συστήματα, αυξάνοντας την πιθανότητα ήπιων λαθών [11]. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο της Γης λειτουργεί προστατευτικά έναντι της κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά σε περιοχές κοντά στους πόλους, όπου το πεδίο είναι ασθενέστερο, η προστασία αυτή μειώνεται. Τέλος, τα σωματίδια υψηλής ενέργειας ( $>10$  MeV) είναι ιδιαίτερα επιβλαβή, καθώς έχουν αυξημένη πιθανότητα να διαπεράσουν τα υλικά των κυκλωμάτων και να προκαλέσουν λάθη [10].

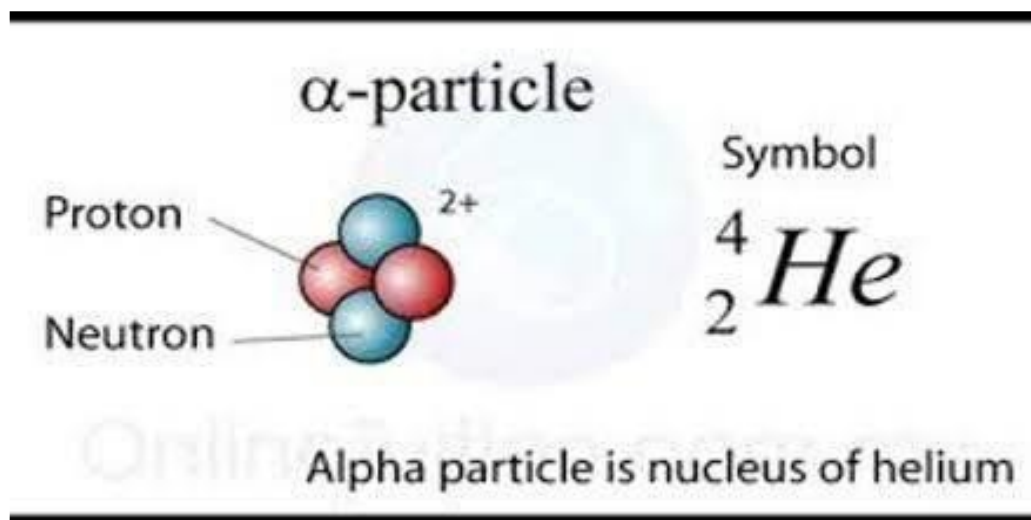


Εικόνα 2.2: Σχηματισμός Συνθέτων Καταρρακτών Σωματιδίων.

Οι συνέπειες αυτών των φαινομένων είναι σημαντικές, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής αξιοπιστίας όπως δορυφόροι, αεροσκάφη και ιατρικός εξοπλισμός. Η χρήση τεχνικών όπως οι κωδικοί διόρθωσης σφαλμάτων (ECC) είναι κρίσιμη για την ανίχνευση και τη διόρθωση των ήπιων λαθών, ενώ οι σχεδιαστικές αρχές που ελαχιστοποιούν την έκθεση σε κοσμική ακτινοβολία συμβάλλουν στη μείωση των επιπτώσεων [12].

### 2.3.2 Ακτινοβολία α (Alpha particles)

Η ακτινοβολία άλφα αποτελεί έναν από τους παράγοντες που προκαλούν ήπια λάθη σε σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα. Τα σωματίδια άλφα (Εικόνα 2.3) είναι βαριά, θετικά φορτισμένα σωματίδια, αποτελούμενα από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια (δηλαδή πυρήνες ηλίου). Αυτά εκπέμπονται κατά τη ραδιενεργό διάσπαση βαρέων στοιχείων, όπως το ουράνιο και το θόριο [13]. Στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, τα σωματίδια άλφα προέρχονται κυρίως από ραδιενεργές προσμείξεις στα υλικά συσκευασίας (encapsulation materials) ή από μολυσμένα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Όταν τα σωματίδια άλφα διαπερνούν την ενεργή περιοχή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, προκαλούν ιονισμό των ατόμων του υλικού, δημιουργώντας ένα νέφος ηλεκτρικού φορτίου. Αυτό το φορτίο μπορεί να επηρεάσει την κατάσταση των bits σε μνήμες ή την κατάσταση λογικών κυκλωμάτων [14]. Το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο σε σύγχρονες τεχνολογίες μικρής κλίμακας (όπως τα 7nm και 5nm), όπου η απαιτούμενη ποσότητα φορτίου για την αλλοίωση ενός bit είναι πολύ μικρότερη [9]. Έτσι, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα γίνονται πιο ευάλωτα σε τέτοια φαινόμενα.



Εικόνα 2.3: Η Δομή ενός Σωματιδίου Άλφα.

Η πιθανότητα εμφάνισης ήπιων λαθών από σωματίδια άλφα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Πρώτον, η καθαρότητα των υλικών παίζει κρίσιμο ρόλο. Η χρήση καθαρότερων υλικών κατά την κατασκευή μειώνει τις ραδιενεργές προσμείξεις που παράγουν σωματίδια άλφα. Δεύτερον, η πυκνότητα των κυκλωμάτων αυξάνει την ευαισθησία, καθώς τα μικρότερα τρανζίστορ είναι πιο ευάλωτα σε αλλοιώσεις δεδομένων. Επιπλέον, η χρήση

προστατευτικών υλικών συσκευασίας μπορεί να εμποδίσει τη διείσδυση σωματιδίων άλφα στην ενεργή περιοχή του κυκλώματος, μειώνοντας τον κίνδυνο.

Οι συνέπειες των λαθών που προκαλούνται από σωματίδια άλφα μπορεί να είναι σημαντικές, ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, όπως τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, οι δορυφορικές εφαρμογές, και οι ιατρικές συσκευές. Για την αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων, χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως οι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων (ECC) για την ανίχνευση και τη διόρθωση αυτών των σφαλμάτων [9]. Παράλληλα, η χρήση καθαρότερων υλικών, καθώς και οι μέθοδοι "σκλήρυνσης" hardening αποτελούν αποτελεσματικές προσεγγίσεις. Οι μέθοδοι hardening περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό ανθεκτικών κυκλωμάτων (Radiation-hardened design), τη χρήση πλεοναστικών δομών, όπως η Triple Modular Redundancy (TMR), και την ενσωμάτωση ειδικών υλικών που μειώνουν την ευαισθησία σε ακτινοβολία. Αυτές οι τεχνικές συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της εμφάνισης ήπιων λαθών και διασφαλίζουν την αξιοπιστία των συστημάτων σε κρίσιμες εφαρμογές [15], [14].

## **2.4 Επιδράσεις στα Ολοκληρωμένα Κυκλώματα**

Τα SEU είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την αξιοπιστία των σύγχρονων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, καθώς επηρεάζουν τη λειτουργικότητά τους χωρίς να προκαλούν μόνιμες βλάβες. Τα SEU επηρεάζουν διάφορες περιοχές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Στις μνήμες, όπως οι DRAM και SRAM, τα SEU μπορούν να οδηγήσουν σε αλλοίωση δεδομένων (π.χ. αλλαγή του περιεχομένου ενός bit), δηλ. στη δημιουργία ήπιων λαθών. Στα λογικά κυκλώματα, τα SEU προκαλούν παροδικές μεταβάσεις σήματος ή "glitches", τα οποία, εάν συλληφθούν από τα στοιχεία μνήμης, μπορούν να οδηγήσουν και πάλι σε ήπια λάθη και λανθασμένη λειτουργία του συστήματος. Για την αντιμετώπιση των SEU, αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές, όπως:

- Κώδικες διόρθωσης λαθών (ECC): Οι ECC χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και διόρθωση λαθών στις μνήμες .
- Σχεδιασμός ανθεκτικός σε ακτινοβολία (Radiation-hardened design): Περιλαμβάνει τη χρήση ειδικών υλικών και τεχνικών για τη μείωση της ευαισθησίας των κυκλωμάτων.
- Πλεονασμός (Redundancy): Περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές όπως η Διπλή ή Τριπλή Πλεονασματική Υπολογιστική (Double/Triple Modular Redundancy DMR/TMR) στην

οποία γίνεται χρήση πολλαπλών αντιγράφων δεδομένων ή κυκλωμάτων για την ανίχνευση και αποκατάσταση λαθών.

Οι επιπτώσεις των SEU ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Σε κρίσιμες εφαρμογές όπως δορυφορικά συστήματα, ιατρικές συσκευές και data centers, η αξιοπιστία είναι ζωτικής σημασίας, και η διαχείριση αυτών των επαγόμενων λαθών γίνεται κρίσιμη.

## **2.5 Παράγοντες που Επηρεάζουν τα Single Event Upsets**

Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση των SEUs είναι η γραμμική μεταφορά ενέργειας (Linear Energy Transfer - LET). Επιπρόσθετα η σμίκρυνση των τρανζίστορ, η μείωση της τάσης τροφοδοσίας και η αύξηση της πυκνότητας των κυκλωμάτων καθιστούν τα κυκλώματα πιο ευάλωτα σε SEUs, καθώς το κρίσιμο φορτίο  $Q_{crit}$  μειώνεται σημαντικά.

### **2.5.1 Linear Energy Transfer (LET)**

Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες είναι η γραμμική μεταφορά ενέργειας (Linear Energy Transfer - LET), που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ενέργειας που αποθέτουν τα σωματίδια στο υλικό. Η ενέργεια ενός σωματιδίου καθορίζει την ικανότητά του να προκαλεί Single Event Upsets (SEUs). Το LET περιγράφει την ενέργεια που μεταφέρει ένα σωματίδιο σε ένα υλικό ανά μονάδα μήκους. Το LET μετριέται σε μονάδες  $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  και χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της ικανότητας ενός σωματιδίου να προκαλεί SEUs δεδομένου του υλικού του υποστρώματος. Υπάρχει μια τιμή κατωφλίου LET ( $LET_{th}$ ), κάτω από την οποία ένα σωματίδιο δεν προκαλεί SEU. Αυτή η τιμή εξαρτάται από το υλικό και εν γένει την τεχνολογία. Στο πυρίτιο, η ενέργεια 3,6 eV ( $1 \text{ eV} = 10^{-19} \text{ J}$ ) είναι η ελάχιστη απαραίτητη για να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής μέσω της διάσπασης της ζώνης σθένους (via band-to-band excitation). Όταν ένα σωματίδιο υψηλής ενέργειας, όπως ένα βαρύ ιόν, διαπερνά το υλικό, μεταφέρει ενέργεια στο υλικό κατά μήκος της διαδρομής του. Αυτή η ενέργεια οδηγεί σε ιονισμό, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Το συνολικό φορτίο που παράγεται εξαρτάται από το LET και την ποσότητα του υλικού που επηρεάζεται. Αυτά τα φορτία μπορούν να συσσωρευτούν στο κανάλι ενός τρανζίστορ, οδηγώντας στη δημιουργία μεταβάσεων και δυνητικά σε αναστροφή ενός bit [5].



Συνοψίζοντας, η γραμμική μεταφορά ενέργειας αποτελεί μια θεμελιώδη παράμετρο για την κατανόηση της ευαισθησίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η υψηλή τιμή LET συνδέεται με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης SEUs. Η μέτρηση και ο έλεγχος του LET είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό αξιόπιστων και ανθεκτικών συστημάτων, ιδιαίτερα για εφαρμογές όπως οι διαστημικές αποστολές και τα στρατιωτικά συστήματα.

### **2.5.2 Χαρακτηριστικά του Κυκλώματος**

Η συνεχής σμίκρυνση της κλίμακας των τρανζίστορ, η μείωση της τάσης τροφοδοσίας και η αυξανόμενη πυκνότητα των κυκλωματικών στοιχείων στα σύγχρονα κυκλώματα έχουν οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των συστημάτων στις διαταραχές από σωματίδια υψηλής ενέργειας.

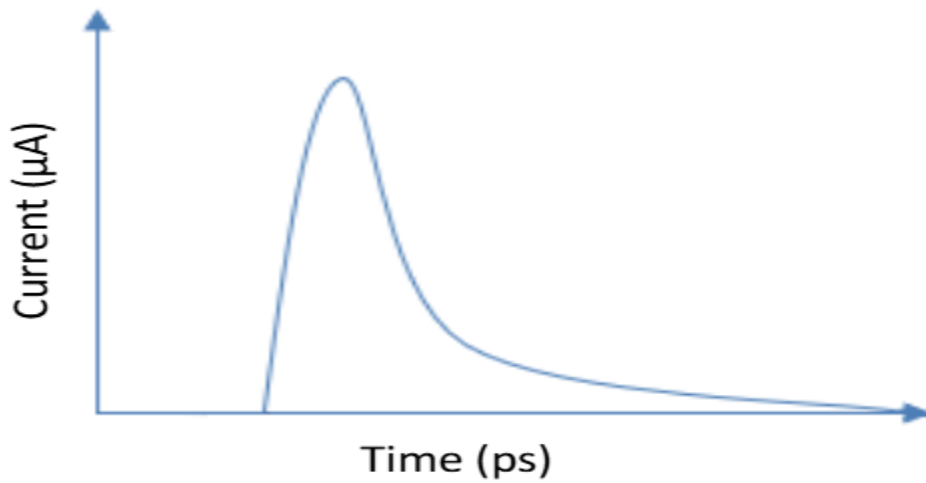
Αρχικά, η σμίκρυνση της τεχνολογικής κλίμακας μειώνει τις διαστάσεις των τρανζίστορ, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της χωρητικότητας των κόμβων και κατ' επέκταση στη μείωση του κρίσιμου φορτίου ( $Q_{crit}$ ). Ως αποτέλεσμα, τα κυκλώματα γίνονται πιο ευάλωτα, καθώς μικρότερα φορτία μπορούν πλέον να προκαλέσουν αλλαγές στη λογική κατάστασή τους [2]. Επιπλέον οι μικρότερες γεωμετρίες οδηγούν σε αυξημένη πιθανότητα πολλαπλών διαταραχών bit (Multiple Bit Upsets - MBUs), καθώς ένα μεμονωμένο σωματίδιο μπορεί να επηρεάσει πολλαπλές περιοχές του κυκλώματος λόγω της εγγύτητας των στοιχείων. Έτσι έχουμε την ταυτόχρονη συλλογή φορτίου από κοντινά τρανζίστορ γεγονός που είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες γένεσης MBUs σε πυκνά κυκλώματα [16]. Επιπρόσθετα η μείωση της τάσης τροφοδοσίας ( $V_{dd}$ ), αν και επιδιώκεται για την εξοικονόμηση ενέργειας, έχει επίσης αρνητικές επιπτώσεις. Με μικρότερο  $V_{dd}$ , το  $Q_{crit}$  μειώνεται περαιτέρω, καθιστώντας τα κυκλώματα ακόμα πιο ευαίσθητα στις διαταραχές από σωματίδια υψηλής ενέργειας.

## **2.6 Μοντελοποίηση Διαταραχής Προερχόμενης από Ακτινοβολία**

Η μοντελοποίηση των διαταραχών που προκαλούνται από ακτινοβολία είναι κρίσιμη για την κατανόηση και τον σχεδιασμό ανθεκτικών συστημάτων, ειδικά στις τεχνολογίες νανοκλίμακας. Οι τεχνικές που υπάρχουν για την αντιμετώπιση των ήπιων λαθών μπορούν να προσομοιωθούν μέσω του εργαλείου SPICE. Για την επαλήθευση της ανθεκτικότητας των κυκλωμάτων στην ακτινοβολία, είναι απαραίτητο να γίνει μοντελοποίηση των SEUs. Ένα SEU μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας παλμός ρεύματος μικρής διάρκειας που επηρεάζει έναν

συγκεκριμένο κόμβο (ή και περισσότερους ταυτόχρονα) του κυκλώματος [17]. Το φορτίο που προκαλείται από το SEU εκφράζεται με το ολοκλήρωμα του ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο.

Η διάρκεια της ανόδου του παλμού είναι συνήθως μικρή (μεταξύ 0.1 ps και 10 ps), ενώ η διάρκεια καθόδου είναι μεγαλύτερη (μεταξύ 10 ps και 200 ps). Αυτά τα μοντέλα είναι σημαντικά για την ανάλυση της συμπεριφοράς των κυκλωμάτων υπό την επίδραση σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Ένα πολύ γνωστό μοντέλο που μας δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης υψηλής ακρίβειας αναφορικά με την επίδραση των SEU, είναι το μοντέλο εκθετικού παλμού ρεύματος, που εφαρμόζεται με τη χρήση κατάλληλης πηγής ρεύματος. Ακολουθώς απεικονίζεται (Εικόνα 2.4) το σχετικό μοντέλο διπλού εκθετικού παλμού ρεύματος [18] για την προσομοίωση της επίδρασης ενός SEU.



Εικόνα 2.4: Μοντέλο Διπλού Εκθετικού Παλμού.

Ο παλμός ρεύματος που προκαλείται από την ακτινοβολία μοντελοποιείται συνήθως με τη χρήση ενός διπλού εκθετικού παλμού ρεύματος, ο οποίος περιγράφεται από μια συγκεκριμένη μαθηματική εξίσωση [17]:

$$I_{particle}(t) = \frac{Q_{coll}}{\tau\alpha - \tau\beta} (e^{-t/\tau\alpha} - e^{-t/\tau\beta})$$

Το συλλεγόμενο φορτίο ( $Q_{coll}$  ή  $Q_{total}$ ) αντιπροσωπεύει το συνολικό φορτίο που συλλέγεται σε έναν κόμβο λόγω της πρόσκρουσης ενός σωματιδίου. Υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα του ρεύματος που δημιουργείται από το σωματίδιο ( $I_{particle}$ ) στο χρόνο:

$$Q_{coll} = \int_0^t I_{particle}(t) dt$$

Το  $Q_{coll}$  επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως η ενέργεια των προσκρουόμενων σωματιδίων, η γωνία πρόσκρουσης, και οι ιδιότητες του κυκλωματικού στοιχείου, όπως το μέγεθος του τρανζίστορ και η συγκέντρωση των προσμίξεων. Οι χρονικές σταθερές  $\tau_a$  και  $\tau_b$  περιγράφουν την άνοδο και την πτώση του παλμού ρεύματος. Η  $\tau_a$  περιγράφει το ρυθμό ανόδου του παλμού ρεύματος, ο οποίος αντιστοιχεί στην ταχεία δημιουργία και συλλογή των ζευγών ηλεκτρονίου-οπής αμέσως μετά την πρόσκρουση του σωματιδίου, ενώ η  $\tau_b$  σχετίζεται με το ρυθμό πτώσης του ρεύματος, καθώς οι φορείς επανασυνδέονται ή διαχέονται στο πυρίτιο [20].

Το κρίσιμο φορτίο ( $Q_{crit}$ ) ορίζεται ως η ελάχιστη ποσότητα φορτίου που απαιτείται για να προκληθεί αναστροφή bit ή αλλαγή της λογικής κατάστασης σε έναν κόμβο κυκλώματος. Το  $Q_{crit}$  εξαρτάται από την τεχνολογία υλοποίησης του κυκλώματος και τα χαρακτηριστικά του, όπως η τάση τροφοδοσίας και η χωρητικότητα του κόμβου.

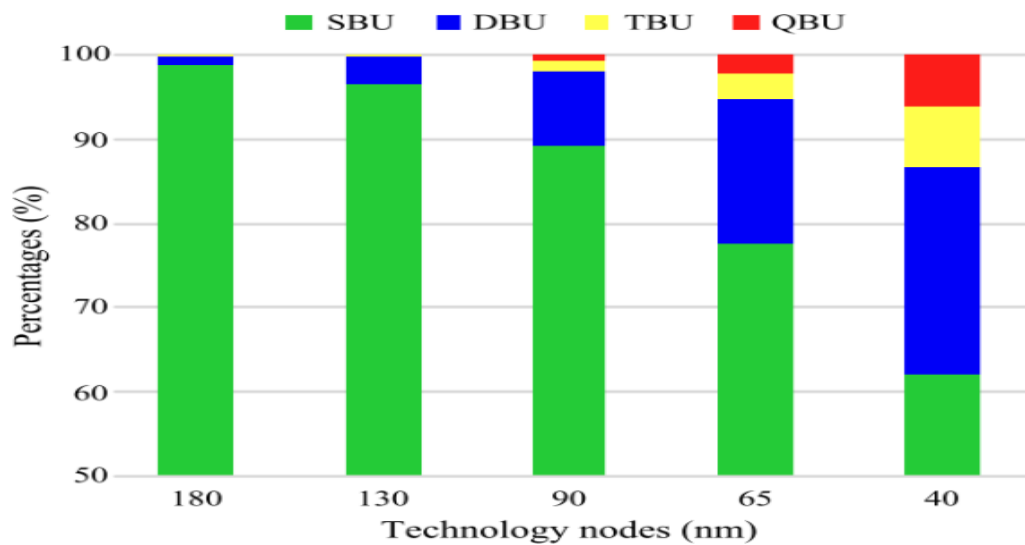
Στις περιπτώσεις όπου το  $Q_{coll}$  υπερβαίνει το  $Q_{crit}$ , δημιουργούνται οι συνθήκες για την εμφάνιση ήπιων λαθών. Στις σύγχρονες τεχνολογίες, η πιθανότητα εμφάνισης αυτών των σφαλμάτων έχει αυξηθεί, καθώς το  $Q_{crit}$  στους κόμβους έχει μειωθεί λόγω της μείωσης της τάσης τροφοδοσίας και του μεγέθους των τρανζίστορ, γεγονός που συνεπάγεται μείωση της χωρητικότητας των ακροδεκτών τους.

## 2.7 Σημασία στη Σύγχρονη Τεχνολογία

Στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα λόγω της συνεχούς μείωσης της κλίμακας των τρανζίστορ οι αστοχίες λόγω Single Event Upsets (SEUs) αποτελούν περίπου το 80% όλων των λαθών που προκαλούνται από ακτινοβολία, σύμφωνα με καταγεγραμμένα στατιστικά δεδομένα [21]. Στα μπλοκ μνήμης, όταν ένα SEU επηρεάζει έναν μόνο κόμβο, προκαλεί ένα διαταραχή απλού κόμβου (Single-Node-Upset - SNU). Ωστόσο, όταν το SEU επηρεάζει πολλούς κόμβους, δημιουργείται μια διαταραχή πολλαπλών κόμβων (Multiple-Node-Upset, MNU), το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει διαταραχή διπλών κόμβων (Double-Node-Upset - DNUs), διαταραχή τριπλών κόμβων (Triple-Node-Upset- TNUs) και διαταραχή τετραπλών κόμβων (Quad-Node-Upset - QNUs).

Τα MNUs είναι πλέον συχνό φαινόμενο στις μνήμες νανοκλίμακας, λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των κόμβων του κυκλώματος [22]. Πολυάριθμες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί όπως αναφέρεται στις πηγές [21], [22], [13], [23] και όπως βλέπουμε στην Εικόνα 2.5 το

ποσοστό των MNUs λόγω SEUs αυξήθηκε από 5,3% στην τεχνολογία CMOS των 180 nm σε 46% στη τεχνολογία των 40 nm.



Εικόνα 2.5: Ποσοστά Διαταραχών Απλού, Διπλού, Τριπλού και Πολλαπλών Bit σε Στοιχεία Μνήμης Διαφορετικών Τεχνολογιών.

Οι παραδοσιακές τεχνικές σκλήρυνσης (hardening) με χρήση πλεονασμού, όπως η τριπλή πλεοναστική αρθρωτή σχεδίαση (Triple Modular Redundancy - TMR), παρουσιάζουν σημαντική μείωση της αξιοπιστίας όταν καλούνται να αντιμετωπίσουν περιστατικά MNUs.

Για κρίσιμα συστήματα που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, η ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνικών μετριασμού των MNUs είναι απαραίτητη προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία τους.

### ΜΙΑΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΑΠΛΟΥ ΣΥΜΒΑΝΤΟΣ

---

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| 3.1 | Εισαγωγή              |
| 3.2 | Ο Μανδαλωτής MURLAV   |
| 3.3 | Ο Μανδαλωτής QR-R11Q2 |
| 3.4 | Ο Μανδαλωτής LCQRL    |
| 3.5 | Ο Μανδαλωτής QNURHL   |
| 3.6 | Ο Μανδαλωτής LDAVPM   |

---

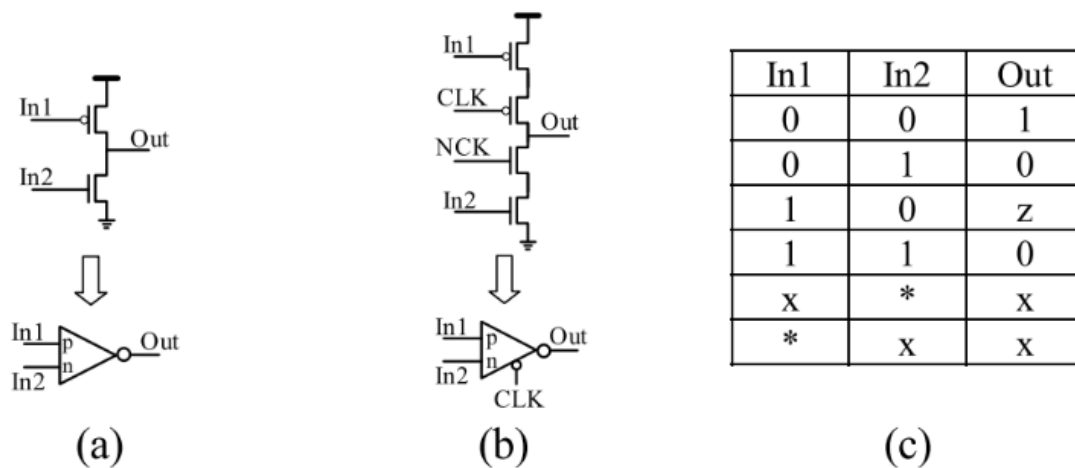
#### 3.1 Εισαγωγή

Τα QNUs περιγράφουν διαταραχές που επιδρούν ταυτόχρονα σε τέσσερις κόμβους ενός κυκλώματος ή μνήμης από ένα και μόνο γεγονός, όπως η πρόσκρουση ενός σωματιδίου υψηλής ενέργειας. Προκαλούνται από σωματίδια ακτινοβολίας που δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τα οποία διαμοιράζονται σε κοντινούς κόμβους λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των κυκλωματικών στοιχείων του κυκλώματος [4]. Τα QNUs είναι πιο πιθανό να συμβούν σε τεχνολογίες νανοκλίμακας, όπου οι κόμβοι βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Με την ελάττωση του μεγέθους των τρανζίστορ και την αύξηση της πυκνότητας των κυκλωμάτων, το ποσοστό αυτών των φαινομένων αυξάνεται σημαντικά. Οι επιπτώσεις που έχουν τα QNUs είναι πιο δύσκολο να ανιχνευθούν και να διορθωθούν, σε σχέση με τα απλά SNUs ή DNU). Επίσης μπορούν να προκαλέσουν ταυτόχρονα σφάλματα σε πολλές μονάδες ενός κυκλώματος, γεγονός που καθιστά τις παραδοσιακές τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων, όπως η Triple Modular Redundancy (TMR), λιγότερο αποτελεσματικές [19]. Συνεπώς σε εφαρμογές υψηλής ασφάλειας, όπως στην αεροδιαστημική, στην ιατρική ή στην αυτοκινητοβιομηχανία, η εμφάνιση QNUs μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες.

Απαιτούνται προηγμένες τεχνικές ανοχής λαθών, όπως βελτιωμένες αρχιτεκτονικές κυκλωμάτων ή νέα υλικά, για να αντιμετωπιστούν τα QNUs αποτελεσματικά.

### 3.2 Ο Μανδαλωτής MURLAV

Ο μανδαλωτής MURLAV (Multiple-Node-Up Recovery Latch) [20] Εικόνα 3.2 αποτελεί μια τοπολογία, που αναπτύχθηκε για να προσφέρει ανθεκτικότητα σε διαταραχές πολλαπλών κόμβων (Multiple-Node Upsets - MNUs) και να εξασφαλίσει την αξιόπιστη λειτουργία σε περιβάλλοντα υψηλής ακτινοβολίας. Η σχεδίαση βασίζεται σε αναστροφείς διπλής εισόδου (Dual-Input Inverters - DIs) και στις πύλες μετάδοσης (Transmission Gates - TGs), οι οποίες συνεργάζονται για την απομόνωση και την ανάκαμψη από λάθη.



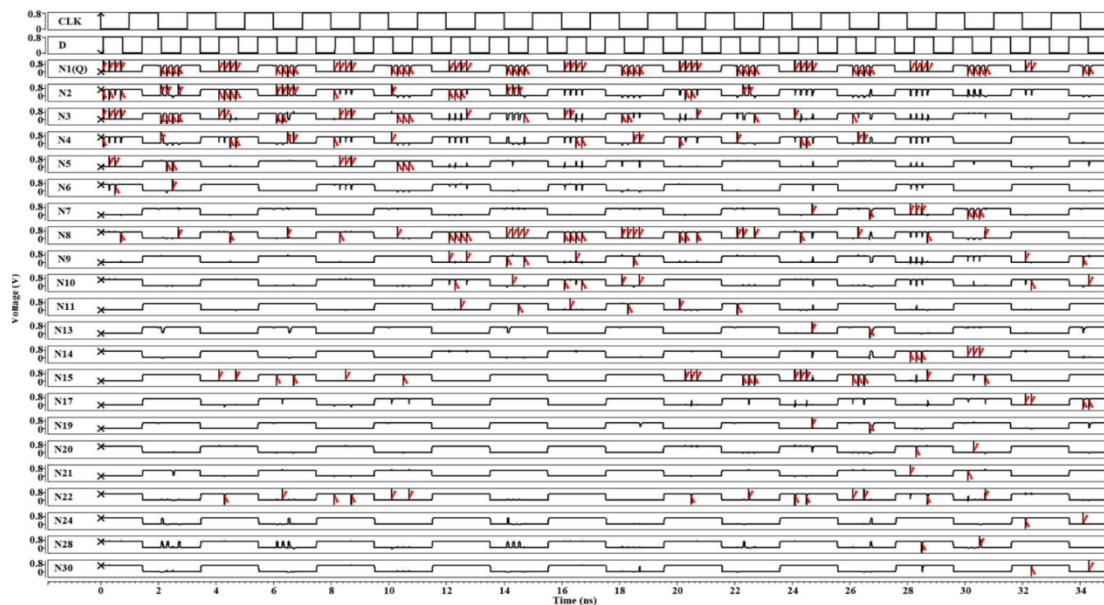
Εικόνα 3.1: Αναστροφέας Διπλής Εισόδου. (a) Σχηματικό, (b) Σχηματικό της Clock-Gated Έκδοσης. (c) Πίνακας Αληθείας του Αναστροφέα Διπλής Εισόδου.

Ο σχεδιασμός του μανδαλωτή MURLAV αξιοποιεί αναστροφείς διπλής εισόδου (Εικόνα 3.1) και ειδικότερα σχεδιάζεται με χρήση 30 αναστροφών διπλής εισόδου που είναι διατεταγμένοι σε έξι στήλες, με πέντε αναστροφείς ανά στήλη. Κάθε αναστροφέας λαμβάνει δύο εισόδους (In1, In2) και παράγει μία έξοδο. Οι έξοδοι κάθε στήλης συνδέονται με τις εισόδους των αναστροφών της επόμενης στήλης, δημιουργώντας βρόχους επανατροφοδότησης. Αυτοί οι βρόχοι διασφαλίζουν τη σταθερότητα του συστήματος και την ανάκαμψη από διαταραχές πολλαπλών κόμβων.



Ο μανδαλωτής MURLAV έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ανθεκτικότητα σε διαταραχές πολλαπλών κόμβων, όπως : διαταραχή σε έναν κόμβο (SNUs), διαταραχή σε δύο κόμβους (DNUs) , διαταραχή σε τρεις κόμβους (TNUs) και διαταραχή σε τέσσερις κόμβους (QNUs).

Επίσης ο μανδαλωτής MURLAV προσφέρει ανάκαμψη από QNUs. Όταν συμβεί μια διαταραχή, οι βρόχοι επανατροφοδότησης απομονώνουν και διορθώνουν τις εσφαλμένες λογικές τιμές που έχουν προκύψει. Οι σωστές τιμές στους γειτονικούς κόμβους προωθούνται για να αποκαταστήσουν τη συνολική σταθερότητα του μανδαλωτή. Στην Εικόνα 3.3 βλέπουμε τις προσομοιώσεις που έχουν κάνει οι συγγραφείς και αφορούν όλες τις πιθανές διαταραχές τεσσάρων κόμβων, επαληθεύοντας την ανθεκτικότητα του σχεδιασμού τους.



Εικόνα 3.3: Προσομοιώσεις Διαταραχών Τεσσάρων Κόμβων του MURLAV.

Ο μανδαλωτής MURLAV σύμφωνα με τους σχεδιαστές του προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες σχεδιάσεις μανδαλωτών με τις οποίες έχει συγκριθεί όπως: υψηλή ανθεκτικότητα δηλαδή είναι ικανό να ανακάμπτει πλήρως από QNUs, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη λειτουργία σε περιβάλλοντα υψηλής ακτινοβολίας. Επίσης μειώνει την επιφάνεια πυριτίου κατά 34% και την καθυστέρηση μετάδοσης κατά 15% σε σύγκριση με άλλες λύσεις με τις οποίες συγκρίθηκε, διατηρώντας παράλληλα χαρακτηριστικά αξιοπιστίας, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως στην αεροδιαστημική τεχνολογία και σε ιατρικές συσκευές.

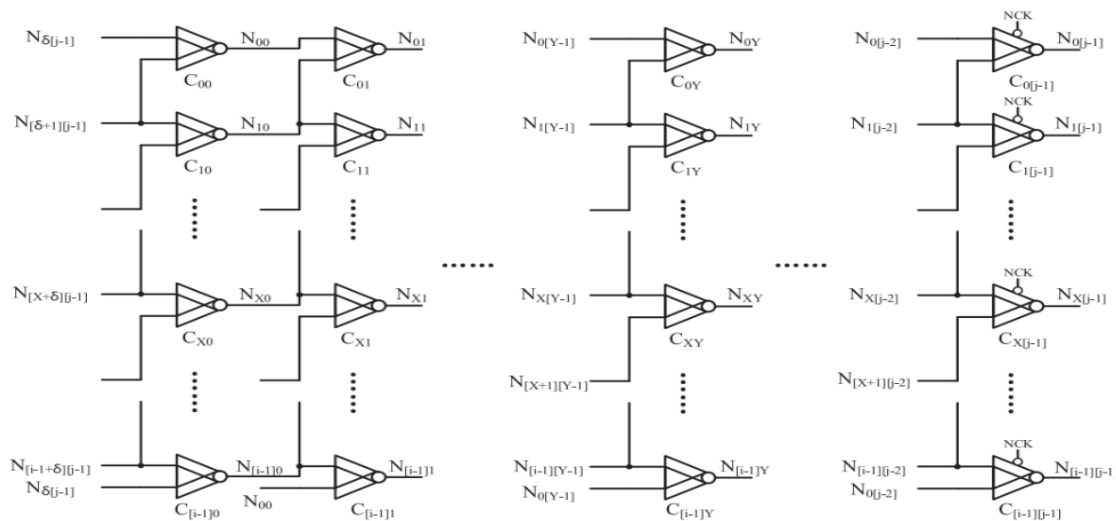
Κλείνοντας, ο μανδαλωτής εμφανίζει και κάποια τρωτά σημεία όπως η πολυπλοκότητα σχεδιασμού του διότι ο πίνακας των 30 αναστροφών αυξάνει την πολυπλοκότητα και το



κόστος της υλοποίησης. Επίσης, παρουσιάζει αυξημένη κατανάλωση ενέργειας εξ αιτίας της χρήσης πολλαπλών βρόχων επανατροφοδότησης καθώς και αυξημένο χρόνο ανάκαμψης σε περίπτωση διαταραχής QNU.

### 3.3 Ο Μανδαλωτής QR-R11C2

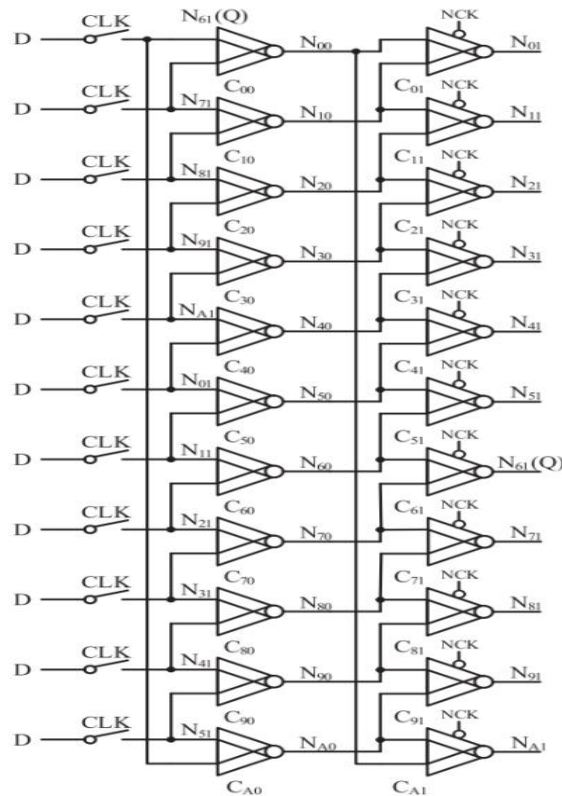
Ο μανδαλωτής QR-R11C [24] 2 είναι ένας ανθεκτικός μανδαλωτής που βασίζεται σε έναν πίνακα από C-Elements (Εικόνα 3.4) με δομή που προσφέρει ανθεκτικότητα σε διαταραχές τεσσάρων κόμβων (QNUs). Η κύρια αρχιτεκτονική και σχεδιαστική λεπτομέρεια του συγκεκριμένου μανδαλωτή υλοποιείται από πίνακα αποτελούμενο από C-Elements ( Looped C-element Matrix- LCM).



Εικόνα 3.4: Σχηματικό από  $i$  Γραμμές,  $j$  Στήλες ενός Πίνακα LCM.

Ο πίνακας αποτελείται από 11 γραμμές και 2 στήλες, δημιουργώντας ένα δίκτυο με ετερογενή διασύνδεση. Η σύνδεση μεταξύ των στηλών περιλαμβάνει κυκλικούς βρόχους επανατροφοδότησης, οι οποίοι διασφαλίζουν ότι οι λανθασμένες λογικές καταστάσεις διορθώνονται καθώς διαδίδονται μέσα στον πίνακα των C-Element. Τα C-Elements λόγω του σχεδιασμού τους δρουν ως φίλτρα, διατηρώντας τη σωστή λογική κατάσταση ακόμα και όταν οι εισοδοί τους διαφέρουν.

Ο μανδαλωτής (Εικόνα 3.5) επιπρόσθετα αποτελείται και από 11 πύλες μετάδοσης οι οποίες ελέγχουν τη ροή δεδομένων από την είσοδο προς στον πίνακα των C-Element και απομονώνουν την είσοδο κατά τη λειτουργία μνήμης. Αυτό αποτρέπει φαινόμενα όπως η ανταγωνιστική ροή ρεύματος, μειώνοντας την κατανάλωση ισχύος και τις καθυστερήσεις.



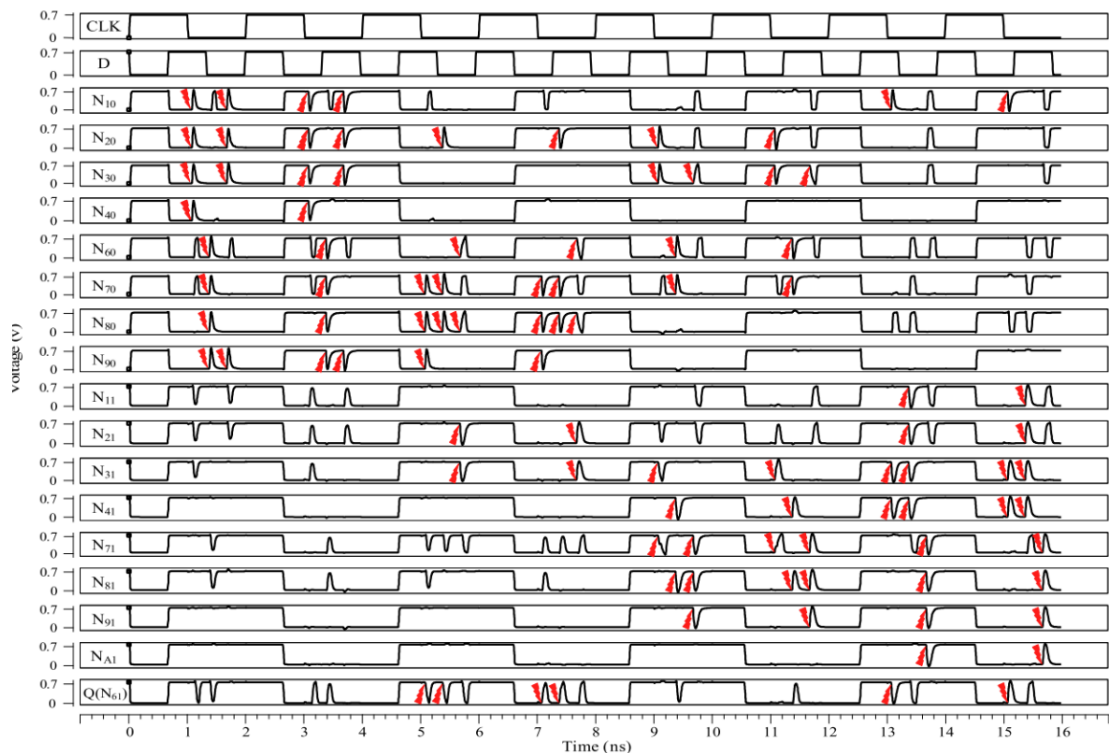
Εικόνα 3.5: Σχηματικό του Μανδαλωτή QR-R11C2.

Ο παραπάνω σχεδιασμός μέσω του πίνακα διαθέτει κυκλικούς βρόχους, οι οποίοι συνδέουν τις τελευταίες στήλες με τις πρώτες διασφαλίζοντας ότι οι κόμβοι μπορούν να ανακάμψουν από διαταραχές απλού συμβάντος μέσω συνεχούς διόρθωσης.

Ο μανδαλωτής QR-R11C2 λειτουργεί σε δύο καταστάσεις:

- **Λειτουργία Διαφάνειας (Transparent Mode):** Όταν το σήμα ρολογιού είναι ενεργό, οι πύλες μετάδοσης επιτρέπουν την είσοδο δεδομένων στον πίνακα. Όλοι οι κόμβοι ενημερώνονται διαδοχικά με τις νέες τιμές που προέρχονται από την είσοδο (D). Οι τιμές των κόμβων προωθούνται μέσω των C-Elements, διασφαλίζοντας τη σωστή αρχικοποίηση ολοκλήρου του μανδαλωτή εσωτερικά.
- **Λειτουργία μνήμης (Memory Mode):** Όταν το σήμα ρολογιού είναι ανενεργό, οι πύλες μετάδοσης κλείνουν, απομονώνοντας τον πίνακα των C-Element από την είσοδο δεδομένων. Οι τιμές που αποθηκεύτηκαν εσωτερικά στον μανδαλωτή κατά τη λειτουργία διαφάνειας διατηρούνται μέσω των βρόχων επανατροφοδότησης. Αυτό εξασφαλίζει την ακεραιότητα των δεδομένων ακόμη και σε περιπτώσεις διαταραχών απλού συμβάντος.

Ο QR-R11C2 μανδαλωτής προσφέρει ανθεκτικότητα στις διαταραχές απλού συμβάντος, αντιμετωπίζοντας πολλαπλά σενάρια σφαλμάτων. Σε περίπτωση διαταραχής τεσσάρων κόμβων, ο μανδαλωτής QR-R11C2 αποκαθιστά τις λανθασμένες τιμές μέσω των κυκλικών βρόχων και της διαδικασίας επανατροφοδότησης της λογικής τιμής. Στην Εικόνα 3.6 βλέπουμε όλες τις προσομοιώσεις που έχουν κάνει οι συγγραφείς και οι οποίες αφορούν διαταραχές τεσσάρων κόμβων, επαληθεύοντας την ανθεκτικότητα του σχεδιασμού τους. Το κύκλωμα αποκαθιστά τις λανθασμένες τιμές εντός ενός κύκλου ρολογιού, καθώς η δομή επανατροφοδότησης του πίνακα C-Elements επιτρέπει τη συνεχή διόρθωση των λανθασμένων λογικών τιμών. Για την αντιμετώπιση απλούστερων διαταραχών πολλαπλών κόμβων επίσης ο QR-R11C2 είναι πλήρως ανθεκτικός σε διαταραχή σε έναν κόμβο (SNUs), διαταραχή σε δύο κόμβους (DNUs), διαταραχή σε τρεις κόμβους (TNUs), διασφαλίζοντας αξιοπιστία για ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων.



Εικόνα 3.6: Προσομοιώσεις Διαταραχών Τεσσάρων Κόμβων του QR-R11C2.

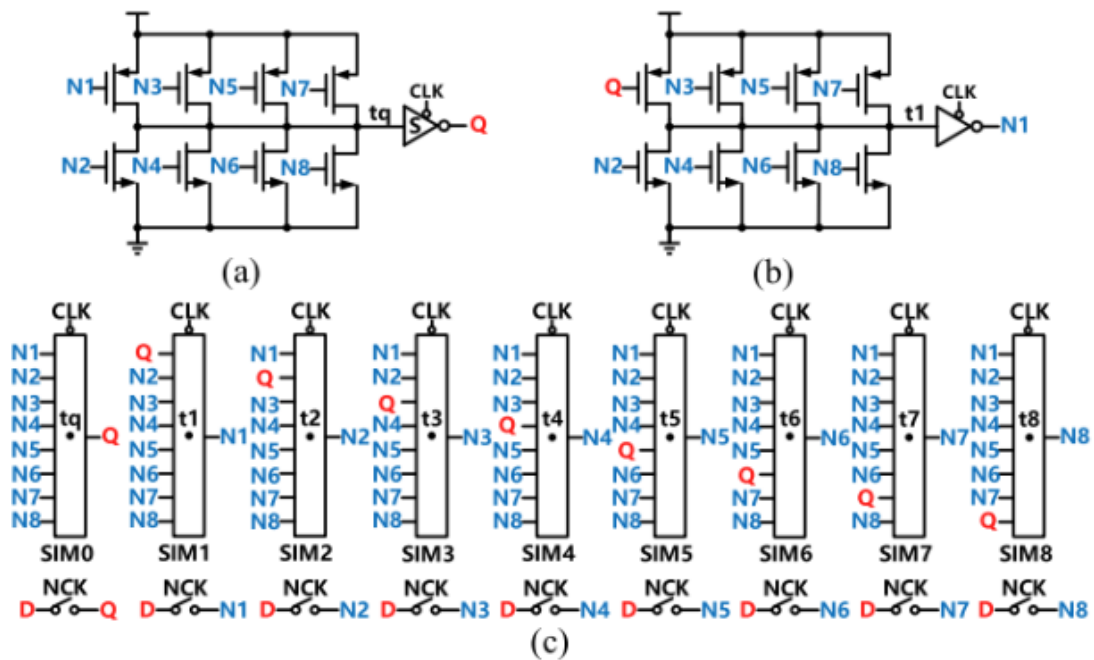
Συνοψίζοντας ο σχεδιασμός του ανωτέρω μανδαλωτή εξασφαλίζει ότι τα λάθη απομονώνονται και διορθώνονται αποτελεσματικά, αποτρέποντας τη διάδοσή τους σε ολόκληρο τον μανδαλωτή. Ο QR-R11C2 παρουσιάζει σύμφωνα με τους σχεδιαστές του πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες σχεδιάσεις όπως αξιοπιστία διότι το κύκλωμα μπορεί να ανακάμψει πλήρως από οποιαδήποτε διαταραχή τεσσάρων κόμβων (QNU). Επιπρόσθετα προσφέρει

μειωμένη κατανάλωση ισχύος κατά 46% και μειωμένο γινόμενο επιφάνειας-ισχύος-καθυστερήσης κατά 40%, σε σύγκριση με άλλες λύσεις με τις οποίες συγκρίθηκε. Το χαμηλότερο κόστος σε ισχύ και καθυστέρηση σε σύγκριση με άλλες σχεδιάσεις καθιστά τη συγκεκριμένη υλοποίηση ιδανική για εφαρμογές με περιορισμένους πόρους. Ο χρόνος αρχικοποίησης (setup time) είναι σημαντικά μικρότερος, επιτρέποντας γρήγορη λειτουργία και μειωμένες καθυστερήσεις.

Κλείνοντας ο μανδαλωτής εμφανίζει και κάποια τρωτά σημεία, όπως το υψηλό κόστος σε επιφάνεια πυριτίου, καθώς διαθέτει πολύπλοκο πίνακα των 11 γραμμών και 2 στηλών που αυξάνει το κόστος παραγωγής. Επίσης, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη καθυστέρηση εξ αιτίας της δομής επανατροφοδότησης.

### **3.4 Ο Μανδαλωτής LCQRL**

Ο μανδαλωτής LCQRL [25] (Low-Cost Quadruple-Node-Upsets Resilient Latch), συνδυάζει αξιοπιστία και χαμηλό κόστος για την διόρθωση επιδράσεων ενός SEU σε πολλαπλούς κόμβους (MNUs). Ο LCQRL σχεδιάστηκε με στόχο την ανθεκτικότητα σε διαταραχές τεσσάρων κόμβων (QNUs), μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας. Η δομή του συγκεκριμένου μανδαλωτή (Εικόνα 3.7) αποτελείται από εννέα Soft-Errors-Interceptive Modules (SIMs) που χρησιμοποιούν μια διπλού επιπέδου προσέγγιση για την αποτροπή λαθών. Κάθε SIM ενσωματώνει οκτώ CMOS τρανζίστορ και έναν αναστροφέα (με χρονισμό), εξασφαλίζοντας αποδοτική διόρθωση λαθών. Δεν χρησιμοποιούνται παραδοσιακά στοιχεία, όπως τα Dual Interlocked Storage Cells (DICE) και τα C-Elements (CE), που ενδεχόμενα αυξάνουν την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ενέργειας. Οι SIMs σχηματίζουν βρόχους επανατροφοδότησης που διασφαλίζουν την αποκατάσταση των δεδομένων ακόμη και σε περιπτώσεις πολλαπλών διαταραχών απλού συμβάντος. Επιπρόσθετα ο σχεδιασμός αποτελείται και εννέα πύλες μετάδοσης (Transmission Gates) που χρησιμοποιούνται για τη τροφοδοσία της εισόδου και την απομόνωση της κατά τη λειτουργία μνήμης.



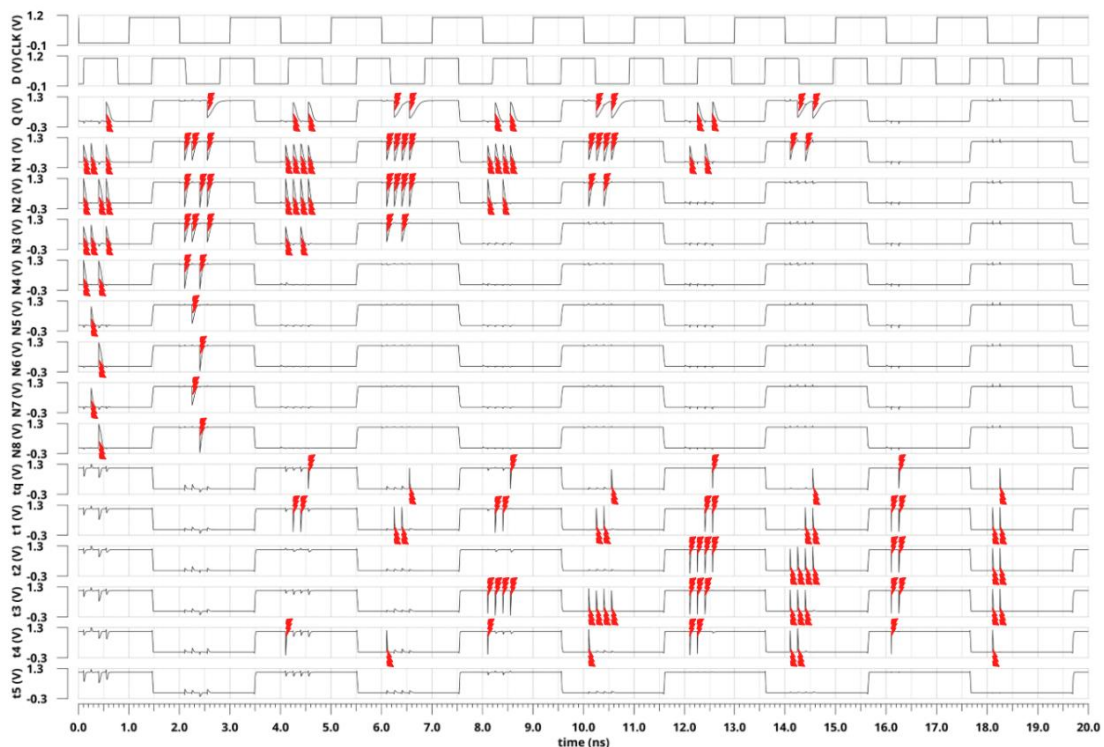
Εικόνα 3.7: (α) Σχηματικό της SIM0. (β) Σχηματικό των Υπολοίπων SIMs. (γ) Σχηματικό του Μανδαλωτή LCQRL.

Ο μανδαλωτής LCQRL λειτουργεί σε δύο καταστάσεις:

- **Λειτουργία Διαφάνειας (Transparent Mode):** Όταν το ρολόι (CLK) είναι ανενεργό, οι πύλες μετάδοσης άγουν. Το σήμα εισόδου (D) μεταφέρεται στους κόμβους και στην έξοδο (Q), ενώ οι εσωτερικοί κόμβοι (N1-N8) αρχικοποιούνται στις σωστές τιμές. Η άμεση σύνδεση από την είσοδο (D) στην έξοδο (Q) μειώνει την καθυστέρηση μετάδοσης και την κατανάλωση ενέργειας.
- **Λειτουργία μνήμης (Memory Mode):** Όταν το ρολόι (CLK) είναι ενεργό, οι πύλες μετάδοσης δεν άγουν, απομονώνοντας την είσοδο. Η σταθερότητα των δεδομένων διασφαλίζεται μέσω των βρόχων επανατροφοδότησης, που χρησιμοποιούν τους κόμβους (N1-N8) και τους SIMs για να διατηρούν τις σωστές λογικές τιμές, ανεξαρτήτως της εισόδου του μανδαλωτή.

Ο μανδαλωτής LCQRL έχει σχεδιαστεί για πλήρη ανθεκτικότητα σε διαταραχές μονού κόμβου, διπλού κόμβου, τριπλού κόμβου, και τετραπλού κόμβου. Αυτό επιτυγχάνεται αξιοποιώντας το γεγονός ότι κάθε SIM μπορεί να διορθώσει έως και τέσσερις διαταραχές κόμβων του μέσω των βρόχων επανατροφοδότησης. Τα λάθη που επηρεάζουν τους κόμβους τροφοδοτούνται πίσω στο σύστημα και διορθώνονται από τα γειτονικά SIMs. Οδηγώντας τον

μανδαλωτή LCQRL να αποκαθιστά οποιοδήποτε συνδυασμό τεσσάρων λαθών, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα της εξόδου (Q) ανεξαρτήτως της θέσης των διαταραχών. Στην Εικόνα 3.8 βλέπουμε όλες τις προσομοιώσεις που έχουν κάνει οι συγγραφείς αναφορικά με διαταραχές που επιδρούν σε τέσσερις κόμβους, επαληθεύοντας την ανθεκτικότητα του σχεδιασμού τους.



Εικόνα 3.8: Προσομοιώσεις Διαταραχών Τεσσάρων Κόμβων του LCQRL.

Επιπρόσθετα οι σχεδιαστές του επισημαίνουν ότι ο συγκεκριμένος μανδαλωτής εμφανίζει χαμηλή ευαισθησία στις κατασκευαστικές διακυμάνσεις (process variations), καθώς και οι διακυμάνσεις τάσης (voltage) και θερμοκρασίας (temperature), εξασφαλίζοντας σταθερή απόδοση υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

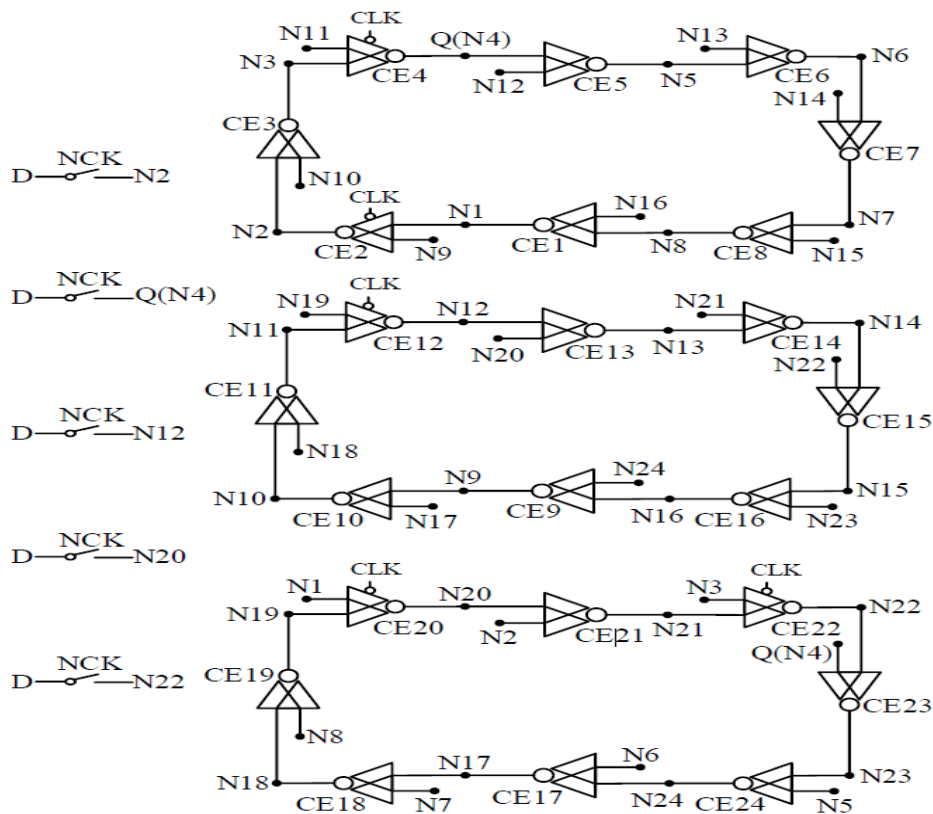
Ο LCQRL παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι των υφιστάμενων λύσεων με τις οποίες έχει συγκριθεί σημειώνοντας χαμηλότερη κατανάλωση πόρων. Συγκεκριμένα προσφέρει μείωση της επιφάνειας πυριτίου κατά 47.8% και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 63%. Όσον αφορά την απόδοση ο μανδαλωτής μειώνει το γινόμενο Area-Power-Delay (APDP) κατά 75.5%.

Κλείνοντας, εμφανίζει και κάποια τρωτά σημεία όπως αυξημένη κατανάλωση ισχύος και μεγάλο χρόνο αποκατάστασης της εξόδου Q μετά από μια διαταραχή απλού συμβαντος.

### 3.5 Ο Μανδαλωτής QNURHL

Ο μανδαλωτής QNURHL (Quadruple-Node-Up-Recoverable Hardened Latch) [26] είναι μια αρχιτεκτονική μανδαλωτή σχεδιασμένη για πλήρη ανθεκτικότητα και ανάκαμψη από διαταραχές τεσσάρων κόμβων (QNUs). Ο QNURHL απαρτίζεται από 24 διασυνδεδεμένα C-Elements (CEs) και πέντε πύλες μετάδοσης (TGs). Σε αντίθεση με άλλες υλοποιήσεις, δεν χρησιμοποιεί DICE ή αναστροφείς, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και διατηρώντας χαμηλό κόστος σε ενέργεια και επιφάνεια.

Η δομή του μανδαλωτή (Εικόνα 3.9) αποτελείται από τρεις ομάδες των 8 C-Elements (CE1-CE8, CE9-CE16, CE17-CE24), οι οποίες διασυνδέονται μεταξύ τους ώστε κάθε κόμβος να λαμβάνει τιμές από κόμβους της ίδιας και άλλης ομάδας. Αυτή η ετερογενής διασύνδεση δημιουργεί βρόχους επανατροφοδότησης που εξασφαλίζουν την απομόνωση και διόρθωση των λαθών.



Εικόνα 3.9: Σχηματικό του Μανδαλωτή QNURHL.

Ο μανδαλωτής QNURHL λειτουργεί σε δύο καταστάσεις:

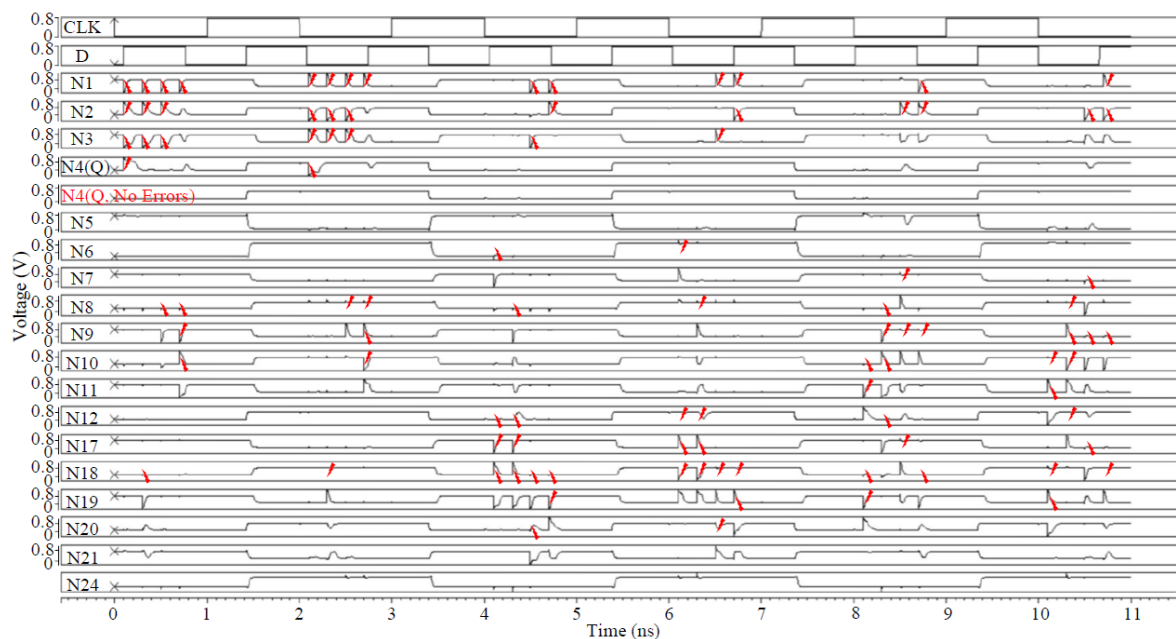


- Λειτουργία Διαφάνειας (Transparent Mode): Όταν το σήμα ρολογιού είναι ενεργό, οι πύλες μετάδοσης άγουν και η τιμή της εισόδου (D) μεταδίδεται στους κόμβους N2, N4 (Q), N12, N20 και N22. Μέσω της μετάδοσης μέσα από τα C-Elements, οι υπόλοιποι κόμβοι λαμβάνουν τις σωστές τιμές, ολοκληρώνοντας την αρχικοποίηση του μανδαλωτή.
- Λειτουργία Μνήμης (Memory Mode): Όταν το σήμα ρολογιού είναι ανενεργό, οι πύλες μετάδοσης δεν άγουν, απομονώνοντας την είσοδο. Οι βρόχοι επανατροφοδότησης εντός των ομάδων C-Elements διατηρούν τις αποθηκευμένες τιμές, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα της εξόδου (Q) ακόμη και σε περίπτωση πολλαπλών λαθών.

Ο QNURHL έχει σχεδιαστεί ώστε να ανακάμπτει πλήρως από κάθε πιθανό συνδυασμό διαταραχών τεσσάρων κόμβων. Οι συγγραφείς αξιολόγησαν την ανθεκτικότητα του μανδαλωτή μέσω τεσσάρων κρίσιμων περιπτώσεων (U1–U4):

- U1: Και οι τέσσερις διαταρασσόμενοι κόμβοι ανήκουν στην ίδια ομάδα.
- U2: Τρεις κόμβοι διαταράσσονται στην ίδια ομάδα και ένας σε άλλη ομάδα.
- U3: Διαταράσσονται από δύο κόμβοι σε δύο διαφορετικές ομάδες.
- U4: Ένας κόμβος σε κάθε μία από τις τέσσερις ομάδες.

Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που έγιναν για τις παραπάνω περιπτώσεις, επαληθεύοντας πλήρως τη δυνατότητα ανάκαμψης από QNU.



Εικόνα 3.10: Προσομοιώσεις Διαταραχών Τεσσάρων Κόμβων του QNURHL.

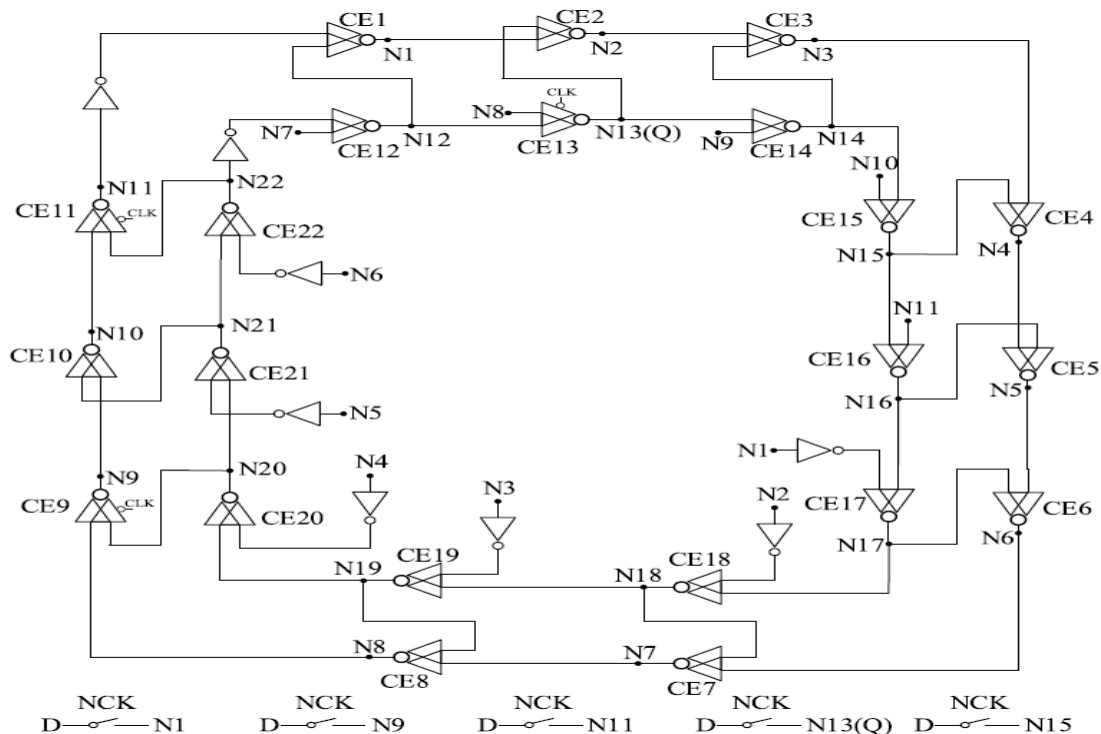


Ο μανδαλωτής QNURHL εμφανίζει πλεονεκτήματα έναντι άλλων σχεδιάσεων όπως πλήρης ανθεκτικότητα και ανάκαμψη από QNUs, ακόμα και σε κρίσιμα σενάρια με επηρεασμένους κόμβους σε πολλές ομάδες, μείωση επιφάνειας πυριτίου κατά 11% και μείωση κατανάλωσης ισχύος κατά 16% σε σύγκριση με προηγούμενες υλοποιήσεις όπως ο QRHL.

Κλείνοντας, ο μανδαλωτής QNURHL εμφανίζει και κάποια τρωτά σημεία, όπως η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω των 24 C-Elements που απαιτούν προσεκτική σχεδίαση και δρομολόγηση.

### 3.6 Ο Μανδαλωτής LDAVPM

Ο μανδαλωτής LDAVPM (Latch Design with Algorithm-based Verification Protected against Multiple-Node Upsets) [27] σχεδιάστηκε για να προσφέρει αξιόπιστη λειτουργία και πλήρη ανάκαμψη από διαταραχές τεσσάρων κόμβων (QNUs) σε περιβάλλοντα υψηλής ακτινοβολίας. Η σχεδίαση βασίζεται αποκλειστικά σε C-Elements (CEs), οργανωμένα σε δύο διασυνδεδεμένους βρόχους που σχηματίζουν δύο στιβάδες με συνολικά 22 CEs και 8 αναστροφείς. Η τοπολογία περιλαμβάνει πολλαπλούς βρόχους επανατροφοδότησης που εξασφαλίζουν την ανθεκτικότητα σε MNUs.



Εικόνα 3.11: Σχηματικό του Μανδαλωτή LDAVPM.

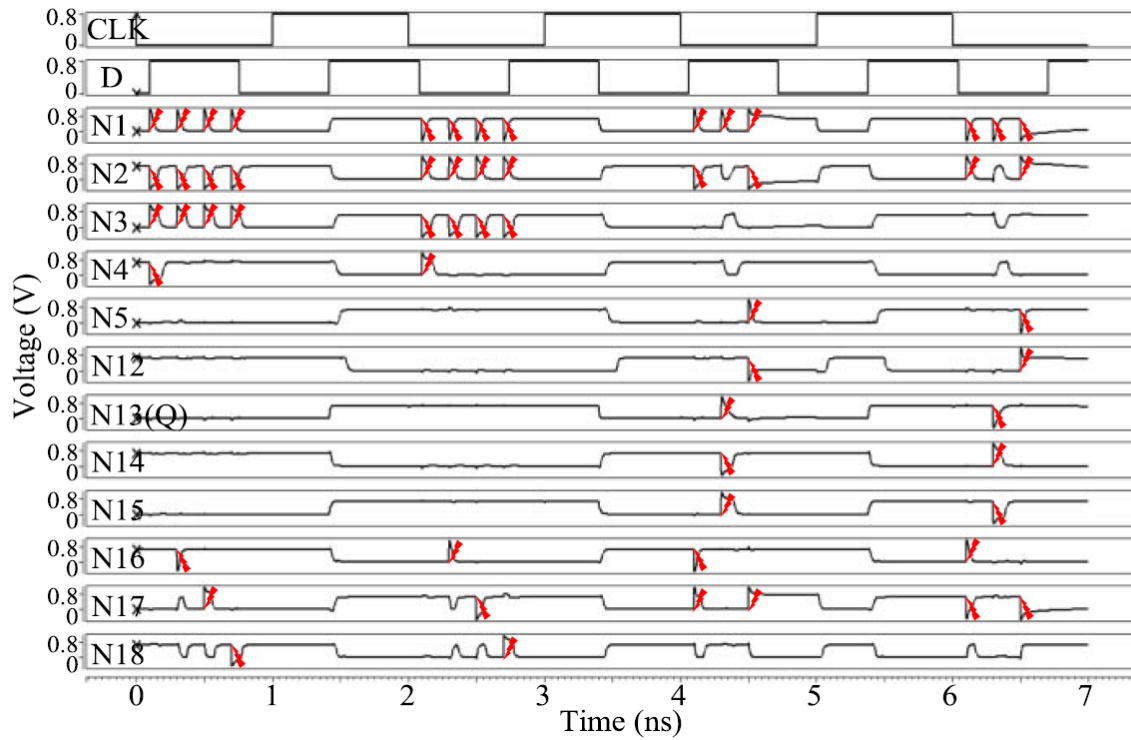
Η εξωτερική στιβάδα του κυκλώματος αποτελείται από 11 C-Elements και έναν αναστροφέα, ενώ η εσωτερική στιβάδα αποτελείται από 11 C-Elements και επτά αναστροφείς. Η χρήση των αναστροφέων εξασφαλίζει τη σωστή λογική μετάδοση των δεδομένων μεταξύ των C-Elements.

Ο μανδαλωτής LDAVPM λειτουργεί σε δύο καταστάσεις:

- Λειτουργία Διαφάνειας (Transparent Mode): Όταν το ρολόι είναι ενεργό, οι πύλες άγουν και η τιμή της εισόδου (D) μεταφέρεται σε επιλεγμένους κόμβους (N1, N9, N11, N13 (Q) και N15), από όπου επεκτείνεται στο υπόλοιπο κύκλωμα μέσω των C-Elements. Το CE13 διαθέτει μηχανισμό clock-gating για να μειώσει την κατανάλωση ισχύος και την καθυστέρηση.
- Λειτουργία Μνήμης (Hold Mode): Όταν το ρολόι είναι ανενεργό, η είσοδος απομονώνεται, και η έξοδος Q τροφοδοτείται μέσω του CE13. Οι εσωτερικοί βρόχοι επανατροφοδότησης εξασφαλίζουν την αποθήκευση και διατήρηση των τιμών, ακόμα και σε περίπτωση διαταραχών.

Ο μανδαλωτής LDAVPM έχει πλήρη ανθεκτικότητα σε διαταραχές μονού κόμβου, διπλού κόμβου, τριπλού κόμβου, και τετραπλού κόμβου.

Προσομοιώσεις (Εικόνα 3.12) επιβεβαιώνουν πλήρη ανάκαμψη από κάθε πιθανό QNU, ακόμα και σε σενάρια όπως 4 κόμβοι στην ίδια ομάδα (π.χ. N1–N4), 3 κόμβοι στην ίδια ομάδα και 1 σε άλλη ομάδα (π.χ. N1–N3, N16), από δύο κόμβοι σε δύο διαφορετικές ομάδες (π.χ. N1, N2, N16, N17).



Εικόνα 3.12: Προσομοιώσεις QNU Διαταραχών του LDAVPM.

Στα πλεονεκτήματα του μανδαλωτή είναι η πλήρης ανάκαμψη από QNUs και η μικρές απαιτήσεις σε επιφάνεια πυριτίου σε σχέση με άλλους QNU-ανθεκτικούς μανδαλωτές (π.χ. μικρότερη από τον QRHIL).

Κλείνοντας, εμφανίζει και κάποια τρωτά σημεία, όπως αυξημένη κατανάλωση ισχύος λόγω των πολλαπλών ενεργών βρόχων επανατροφοδότησης. Επίσης, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη καθυστέρηση εξ αιτίας της δομής επανατροφοδότησης.

### ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΣ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

---

#### 4.1 Εισαγωγή

#### 4.2 Περιγραφή του προτεινομένου μανδαλωτή

#### 4.3 Περιγραφή λειτουργίας του προτεινομένου μανδαλωτή

#### 4.4 Επίδραση διαταραχών απλού συμβάντος εξ αίτιας της ακτινοβολίας στους κόμβους του μανδαλωτή

---

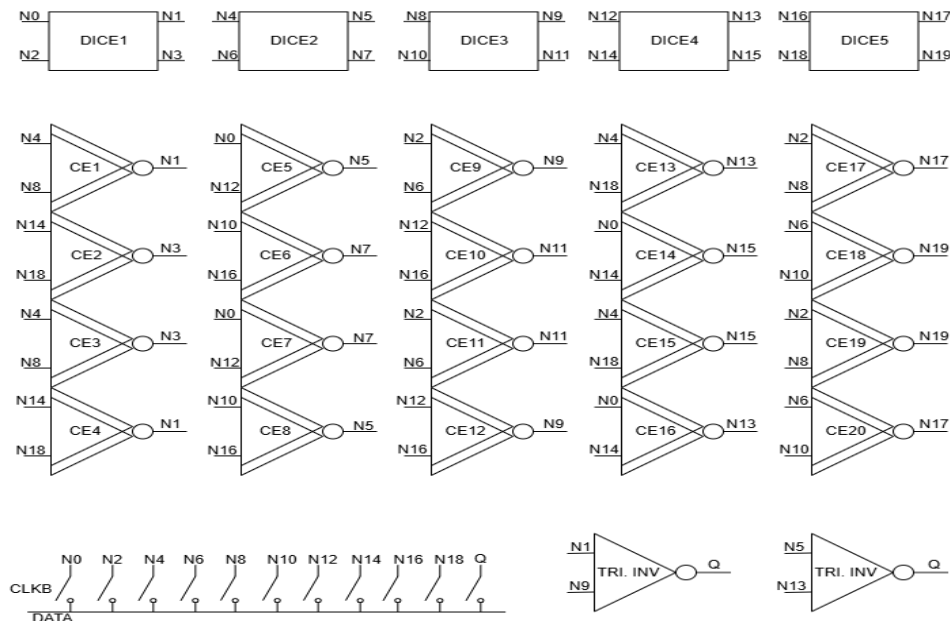
#### 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνουμε έναν μανδαλωτή ανθεκτικό και με δυνατότητα πλήρους ανάκτησης της αρχικής του κατάστασης σε διαταραχή απλού συμβάντος (εξ' αίτιας ακτινοβολίας) που θα επηρεάζει έως και τέσσερις κόμβους του ταυτόχρονα. Η προτεινόμενη σχεδίαση έχει σαν στόχο να βελτιώσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός ανθεκτικού μανδαλωτή, όπως είναι η κατανάλωση ισχύος, η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος, η επιφάνεια πυριτίου αλλά και ο χρόνος αποκατάστασης της εξόδου του μανδαλωτή μετά από ένα συμβάν. Η δομή του προτεινόμενου μανδαλωτή στηρίζεται σε πέντε μανδαλωτές dice, είκοσι C-Elements δυο εισόδων, δυο τρισταθή αναστροφείς δυο εισόδων και έντεκα πύλες διέλευσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Με την κατάλληλη συνδεσμολογία και μεγέθη των τρανζίστορ των χρησιμοποιούμενων δομικών στοιχείων, έχουμε την επίτευξη των στόχων μας.

Μετά την παρουσίαση του κυκλώματος θα περιγραφεί η κανονική λειτουργία του μανδαλωτή είτε στην κατάσταση διαφάνειας είτε στην κατάσταση μνήμης. Ακολούθως, θα επισημανθούν όλες οι δυνατές περιπτώσεις στις οποίες μια διαταραχή απλού συμβάντος θα μπορούσε να επηρεάσει είτε έναν απλό κόμβο, είτε δυο κόμβους, είτε τρεις κόμβους είτε και τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή ταυτόχρονα. Θα καταγραφούν αναλυτικά σε κάθε

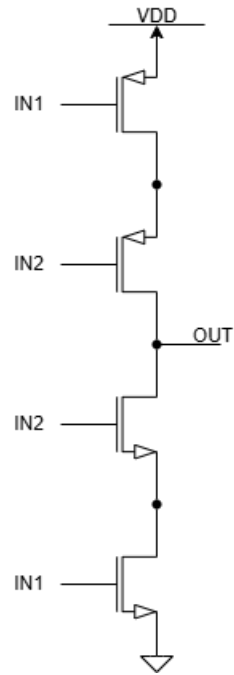
περίπτωση οι κόμβοι που θα επηρεαστούν καθώς και η αντίδραση του μανδαλωτή σε κάθε μια κατάσταση ξεχωριστά.

## 4.2 Περιγραφή του Προτεινομένου Μανδαλωτή



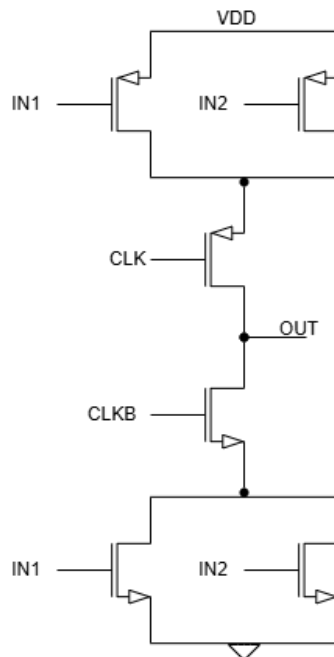
Εικόνα 4.1: Η Τοπολογία του Προτεινόμενου Μανδαλωτή.

Στην εργασία προτείνουμε έναν μανδαλωτή για την αντιμετώπιση διαταραχών απλού συμβάντος οι οποίες επηρεάζουν μέχρι και τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή. Η τοπολογία του μανδαλωτή, παρουσιάζετε στην Εικόνα 4.1. Βασίζεται στη χρήση δύο δομικών στοιχείων, τον μανδαλωτή dice [28] (Εικόνα 5.1) και το C-Element (Εικόνα 4.2). Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από πέντε μανδαλωτές dice και είκοσι C-Element, μαζί με έντεκα πύλες διέλευσης και δυο πρωτότυπους τρισταθείς αναστροφείς δύο εισόδων (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.2: Η Δομή του Στοιχείου C - Element Δυο Εισόδων.

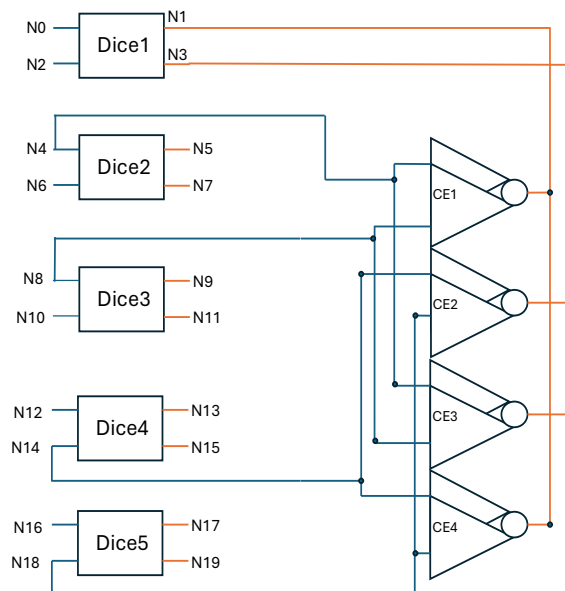
Για διευκόλυνση θα ονομάσουμε τα πέντε dice ως dice1, dice2, dice3, dice4 και dice5, ενώ τα C-elements αντίστοιχα ως CE(1-20) και τις πύλες διελεύσεις (transmission gates – TG) ως TG(1-11). Σε όλους τους μανδαλωτές dice τα δεδομένα εισόδου εισάγονται από την είσοδο D μέσω των πυλών διελεύσεις TG1-10 οι οποίες οδηγούν τους κόμβους N0, N2, N4, N6, N8, N10, N12, N14, N16 και N18.



Εικόνα 4.3: Η Δομή του Τρισταθή Αναστροφέα Δυο Εισόδων.

Ακολουθώς, τα C-element1-20 έχουν σαν είσοδο τους, τα ζεύγη κόμβων (N4, N8), (N14, N18), (N0, N12), (N10, N16), (N2, N6), (N12, N16), (N4, N18), (N0, N14), (N2, N8), (N6, N10) ανά δυο αντίστοιχα, και σαν έξοδό τους, τους κόμβους N1, N3, N5, N7, N9, N11, N13, N15, N17 και N19 αντίστοιχα. Δηλαδή για κάθε περιττό κόμβο καθενός dice(N1, N3, ..., N19) υπάρχουν δυο C-Elements που τον οδηγούν με εισόδους που προέρχονται και από τα τέσσερα εναπομείναντα dice. Αυτός ο σχεδιασμός βοηθάει όταν και οι δυο εισόδους από κάποιο C-Element επηρεαστούν από μια διαταραχή απλού συμβάντος και συνεπώς αλλάξει η έξοδος του, να υπάρχει ακόμη ένα C-Element με σωστές τιμές στις εισόδους του ώστε να ανταγωνιστεί την λάθος λογική τιμή της εξόδου, δίνοντας χρόνο στα υπόλοιπα dices, C-Elements να διορθώσουν τους επηρεασμένους κόμβους.

Τέλος, οι δυο τρισταθής αναστροφείς, οι οποίοι έχουν σαν είσοδο τους τα ζεύγη κόμβων (N1, N9) και (N5, N13) ελέγχονται από το σήμα ρολογιού (CLK και CLK\_BAR), και τροφοδοτούν την έξοδο (Q) του μανδαλωτή. Η έξοδος Q είναι επίσης συνδεδεμένη με την πύλη διέλευσης TG11 έτσι ώστε να οδηγείται άμεσα από τα δεδομένα εισόδου (D) στην κατάσταση διαφάνειας του μανδαλωτή, ώστε να μειωθεί η καθυστέρηση (delay D-to-Q) εγγραφής νέων δεδομένων. Στην κατάσταση μνήμης του μανδαλωτή όλοι οι μανδαλωτές dice αποθηκεύουν την ίδια τιμή.



Εικόνα 4.4: Λειτουργία Ανάδρασης των Δεδομένων του dice1.

Στον σχεδιασμό μας, κάθε dice οδηγείται από τέσσερα C-elements κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι δυνατή η αλλαγή των δεδομένων του εξ αιτίας μιας διαταραχή απλού

συμβάντος η οποία θα επηρεάσει έως και τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή. Συγκεκριμένα τα τέσσερα C-elements επιβάλουν συνεχώς στο οδηγούμενο dice τα δεδομένα που δέχονται στην είσοδό τους από τα αλλά τέσσερα dice. Στην Εικόνα 4.4 βλέπουμε την λειτουργία ανάδρασης των δεδομένων του dice1, τα CE1 και CE3 δέχονται στις εισόδους τους δεδομένα από τα dice2 και dice3 και εγγράφουν τους κόμβους N1 και N3 του dice1. Επιπρόσθετα τα CE2 και CE4 δέχονται στις εισόδους τους δεδομένα από τα dice4 και dice5 και εγγράφουν και αυτά τους κόμβους N1 και N3 του dice1 αντίστοιχα.

Συνεπώς, αν τα δεδομένα ενός μανδαλωτή dice αλλοιωθούν εξ αιτίας μιας διαταραχής απλού συμβάντος τα ορθά δεδομένα των άλλων τεσσάρων μανδαλωτών dice θα διορθώσουν την αλλοιωμένη τιμή.

### 4.3 Περιγραφή Λειτουργίας του Προτεινόμενου Μανδαλωτή

Ο μανδαλωτής δέχεται στην είσοδό του D τα δεδομένα που του παρέχονται από την συνδυαστική λογική και το σήμα ρολογιού (CLK) το οποίο είναι το σήμα που χρονίζει το ολοκληρωμένο κύκλωμα. Η έξοδός του είναι ο κόμβος Q (βλ. Εικόνα 4.1).

- Κατάσταση διαφάνειας(CLK=1).

Όταν το ρολόι είναι στο λογικό 1 τότε ο μανδαλωτής μπαίνει σε κατάσταση διαφάνειας δηλαδή η λογική τιμή που έχει το σήμα D οδηγεί την έξοδο Q. Αρχικά, τα δεδομένα εισόδου εισέρχονται μέσω των πυλών διέλευσης TG1..10 και εγγράφουν τους κόμβους N0, N2, N4, N6, N8, N10, N12, N14, N16 και N18 των dice1..5 αντίστοιχα. Τα δεδομένα εισόδου οδηγούν και τα C-Elements τα οποία αντιστρέφουν την λογική τιμή, και την εγγράφουν στους μανδαλωτές dice1..5 στους κόμβους με τη συμπληρωματική τιμή N1, N3, N5, N7, N9, N11, N13, N15, N17 και N19. Η ανεστραμμένη λογική τιμή φτάνει και στις εισόδους (κόμβους N1, N9) και (κόμβους N5, N13) των τρισταθών αναστροφέων. Επειδή όμως αυτοί εκ του σχεδιασμού δεν είναι ενεργοί στην κατάσταση διαφάνειας, δεν επιβάλλετε η λογική τιμή στην έξοδο του μανδαλωτή Q. Είναι η πύλη διέλευσης TG11 η οποία επιβάλλει στην έξοδο Q του μανδαλωτή τη νέα λογική τιμή.

- Κατάσταση μνήμης(CLK=0).

Όταν το ρολόι είναι στο λογικό 0 τότε ο μανδαλωτής μπαίνει στην κατάσταση μνήμης. Δηλαδή παύει να δέχεται ερεθίσματα από την είσοδο των δεδομένων D και κρατάει την λογική τιμή που είχε τη χρονική στιγμή πριν μπει ο μανδαλωτής στην κατάσταση αυτή. Αυτή η



συμπεριφορά προκύπτει καθώς παύουν να άγουν οι πύλες διέλευσης. Επακόλουθα κλειδώνουν την τωρινή τους λογική τιμή οι μανδαλωτές dice, τα C-Elements και οι τρισταθείς αναστροφείς αρά και η έξοδος Q παραμένει σταθερή στην τρέχουσα τιμή.

Στην κατάσταση αυτή είναι ενεργοί οι τρισταθείς αναστροφείς οδηγώντας ισχυρά την έξοδο Q του μανδαλωτή.

#### **4.4 Επίδραση Διαταραχών Απλού Συμβάντος, εξ Αιτίας της Ακτινοβολίας, στους Κόμβους του Μανδαλωτή**

Σε αυτήν την υποενότητα θα παρουσιάσουμε την επίδραση των διαταραχών απλού συμβάντος (εξ αιτίας ακτινοβολίας) στους κόμβους και κατ' επέκταση στη λειτουργία του μανδαλωτή. Η μελέτη θα καταδείξει τη δυνατότητα δημιουργίας ή μη, ήπιων λαθών στο μανδαλωτή. Συγκεκριμένα θα αναλύσουμε όλες εκείνες τις δυνατές περιπτώσεις όπου μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη επίδραση της διαταραχής σε έως και τέσσερις κόμβους του προτεινομένου μανδαλωτή. Μας ενδιαφέρουν επιδράσεις οι οποίες προκαλούν μεταβολή στην τάση ενός τουλάχιστον κόμβου η οποία ξεπερνάει το κατώφλι μετάβασης των οδηγούμενων κυκλωματικών στοιχείων από τον κόμβο αυτό. Στην περίπτωση μας το κατώφλι μετάβασης των δομικών στοιχείων του μανδαλωτή έχει τεθεί στην τιμή  $V_{dd}/2$ . Εξ αιτίας της συμμετρίας του μανδαλωτή έχουμε τις διακριτές περιπτώσεις όπου επηρεάζεται ένας απλός κόμβος, επηρεάζονται δυο κομβοί, επηρεάζονται τρεις κομβοί, και επηρεάζονται τέσσερις κομβοί.

##### **Ακολουθούν οι περιπτώσεις που επηρεάζεται ένας απλός κόμβος:**

- Να προσβληθεί ο κόμβος Q του μανδαλωτή. Σε αυτήν την περίπτωση θα εμφανίσει μια στιγμιαία μεταβολή της αποθηκευμένης λογικής τιμής της εξόδου Q. Στην συνέχεια η έξοδος Q θα διορθωθεί από τους τρισταθείς αναστροφείς και όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή.
- Να υπάρξει ένας εσωτερικός κόμβος που θα προσβληθεί, έστω ο κόμβος N0 στο dice1. Σε αυτήν την περίπτωση, το dice1 του οποίου προσβλήθηκε ένας κόμβος δεν θα χάσει την αποθηκευμένη λογική τιμή διότι ένας μανδαλωτής dice ανακτά την αποθηκευμένη λογική τιμή μετά από την επίδραση ενός απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του. Συνεπώς όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή (state recovery). Το ίδιο ισχύει για κάθε άλλο εσωτερικό κόμβο του μανδαλωτή εξ αιτίας της συμμετρίας του κυκλώματος.

Συνεπώς, ο προτεινόμενος μανδαλωτής έχει ανοχή σε απλά συμβάντα που επηρεάζουν έναν κόμβο και παράλληλα ανακτά πλήρως την αρχική του κατάσταση μετά το συμβάν.

#### **Ακολουθούν οι περιπτώσεις που επηρεάζονται δυο κόμβοι:**

- Να υπάρξουν δυο κόμβοι που θα προσβληθούν στο ίδιο dice, έστω ο κόμβος N0 και N2 στο dice1. Σε αυτήν την περίπτωση στο dice1 του οποίου προσβλήθηκαν δυο κόμβοι η αποθηκευμένη λογική τιμή θα αλλάξει Όμως τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά φέρει τη σωστή λογική τιμή. Συνεπώς, με διαφορετικές τιμές στις εισόδους τους, η έξοδός τους θα βρεθεί σε κατάσταση υψηλής εμπέδησης και θα διατηρήσει την αρχική σωστή τιμή. Τα υπόλοιπα C-elements δεν θα επηρεαστούν καθώς οι μανδαλωτές dice που τα οδηγούν δεν έχουν επηρεαστεί. Ως αποτέλεσμα, τα τέσσερα C-elements που οδηγούν τους κόμβους N1 και N3 στο dice1 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους με συνέπεια να επιβάλουν την ορθή τιμή στους κόμβους του προσβεβλημένου dice1 επαναφέροντας την αρχική αποθηκευμένη τιμή. Συνεπώς θα διορθωθεί το dice1 και όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή (state recovery).
- Να υπάρξουν δυο κόμβοι διαφορετικών μανδαλωτών dice που θα προσβληθούν, έστω ο κόμβος N0 στο dice1 και ο κόμβος N4 στο dice2. Σε αυτήν την περίπτωση το dice1 όπως και το dice2 που προσβλήθηκαν σε έναν μόνο κόμβο τους δεν θα αλλάξουν την αποθηκευμένη λογική τιμή, διότι ένας μανδαλωτής dice ανακτά την αποθηκευμένη λογική τιμή μετά από ένα χτύπημα απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του. Συνεπώς όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή.
- Να υπάρξουν δυο κόμβοι που θα προσβληθούν, ο ένας να είναι σε ένα μανδαλωτή dice, έστω ο κόμβος N0 στο dice1 και ο άλλος να είναι η έξοδος Q του συνολικού μανδαλωτή. Σε αυτήν την περίπτωση το dice1 που προσβλήθηκε σε έναν κόμβο του δεν θα υποστεί αλλαγή της αποθηκευμένης λογικής τιμής, διότι ένας μανδαλωτής dice ανακτά την αποθηκευμένη λογική τιμή μετά από ένα διαταραχή απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του. Η έξοδος Q θα εμφανίσει μια στιγμιαία μεταβολή της λογικής τιμής λόγω της προσβολής της. Στην συνέχεια η έξοδος Q θα διορθωθεί από τους τρισταθείς αναστροφείς και όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή.

- Να υπάρξουν δυο κόμβοι διαφορετικών μανδαλωτών dice που θα προσβληθούν, και συγκεκριμένα η ειδική περίπτωση να προσβληθούν κομβοί σε δυο dice έτσι ώστε να αλλάξει η τιμή στην έξοδο ενός C-element, έστω ο κόμβος N4 στο dice2 και ο κόμβος N8 στο dice3. Σε αυτήν την περίπτωση το dice2 όπως και το dice3 που προσβλήθηκαν σε έναν μόνο κόμβο τους δεν θα αλλάξουν την αποθηκευμένη λογική τιμή, διότι ένας μανδαλωτής dice ανακτά την αποθηκευμένη λογική τιμή μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του. Όμως θα επηρεαστεί η είσοδος δυο C-Element (CE1, CE3) αλλάζοντας την έξοδο τους. Τα CE2 και CE4 που οδηγούν και αυτά τους ιδίους κόμβους θα ανταγωνιστούν τις εξόδους των C-Element με την λάθος τιμή έως ότου τα dice ολοκληρώσουν τη διαδικασία ανάκτησης της σωστής τιμής σε όλους του κόμβους τους. Ως αποτέλεσμα θα επανέλθουν στις αρχικές τους τιμές οι έξοδοι των C-element που επηρεάστηκαν από το συμβάν. Συνεπώς όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή.

Όλα τα υπόλοιπα ζεύγη κόμβων του μανδαλωτή είναι ισοδύναμα με κάποια από τις προηγούμενες περιπτώσεις και συνεπώς ο προτεινόμενος μανδαλωτής έχει ανοχή σε απλά συμβάντα που επηρεάζουν δύο κόμβους και παράλληλα ανακτά πλήρως την αρχική του κατάσταση μετά το συμβάν.

#### **Ακολουθούν οι περιπτώσεις που επηρεάζονται τρεις κόμβοι:**

- Υπάρχουν δυο κόμβοι σε ένα μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε οι κόμβοι N0 και N2 (κόμβοι με ίδια λογική τιμή) στο dice1 που θα προσβληθούν και ένας κόμβος σε κάποιο δεύτερο dice, έστω ο κόμβος N4 στο dice2. Σε αυτήν την περίπτωση στο dice1 το οποίο προσβλήθηκε σε δυο κόμβους του θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή, ενώ το dice2 του οποίου προσβλήθηκε μόνο ένας κόμβος δεν θα επηρεαστεί και δεν θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή σε αυτό. Σε αυτήν την περίπτωση τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Συνεπώς, με διαφορετικές τιμές στις εισόδους τους, η έξοδός τους θα βρεθεί σε κατάσταση υψηλής εμπέδησης και θα διατηρήσει την αρχική σωστή τιμή. Τα υπόλοιπα C-elements δεν θα επηρεαστούν. Ως αποτέλεσμα, τα τέσσερα C-elements που οδηγούν το dice1 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους με συνέπεια να επιβάλουν την ορθή τιμή στους κόμβους

του προσβεβλημένου dice1 και να επαναφέρουν τη σωστή λογική τιμή που αποθηκεύεται σε αυτό. Συνεπώς, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή (state recovery).

- Να υπάρξουν τρεις κόμβοι σε ένα μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε στο dice1 οι κόμβοι N0 και N2 (κόμβοι με ιδιά λογική τιμή) και ακόμη ο κόμβος N1. Σε αυτήν την περίπτωση, στο dice1 θα υπάρξει αλλαγή της λογικής τιμής η οποία είναι αποθηκευμένη σε αυτό. Τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Ως αποτέλεσμα, τα τέσσερα C-elements που οδηγούν το dice1 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους με συνέπεια να επιβάλουν την ορθή τιμή στους κόμβους του προσβεβλημένου dice1. Συνεπώς, θα διορθωθεί η αποθηκευμένη τιμή στο dice1 και όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή (state recovery).
- Να υπάρξουν δυο κόμβοι σε ένα μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε στο dice1 οι κόμβοι N0 και N2 (κόμβοι με ιδιά λογική τιμή) και να προσβληθεί και η έξοδος Q του μανδαλωτή. Σε αυτήν την περίπτωση η αποθηκευμένη τιμή του dice1 θα αλλάξει. Όπως και νωρίτερα, τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος και τρίτος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Τα υπόλοιπα C-elements δεν θα επηρεαστούν. Ως αποτέλεσμα, τα τέσσερα C-elements που οδηγούν το dice1 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους και θα επιβάλουν την ορθή τιμή στους κόμβους του προσβεβλημένου dice1. Η έξοδος Q θα εμφανίσει μια μεταβολή της λογικής της τιμής έως ότου επανέλθει. Και σε αυτή την περίπτωση, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).
- Να υπάρξει ένας κόμβος σε τρία dice που θα προσβληθεί έτσι ώστε να επηρεαστεί η τιμή στην έξοδο τεσσάρων C-element. Έστω ο κόμβος N2 για το dice1 και N4 για το dice2 και ο κόμβος N8 από το dice3. Σε αυτήν την ειδική περίπτωση που θα προσβληθούν οι είσοδοι τεσσάρων C-element (CE1, CE3, CE17, CE19), θα εμφανιστεί μια στιγμιαία μεταβολή της λογικής τιμής στον κόμβο εξόδου τους, δηλ. στους κόμβους N1, N3, N17 και N19, όμως επειδή τους κόμβους αυτούς τους οδηγούν επίσης τα τέσσερα C-element (CE2, CE4, CE18, CE20) που έχουν τις σωστές τιμές στην είσοδο τους θα επιβάλουν την σωστή τιμή στους κόμβους, σε ανταγωνισμό με τα λανθασμένα C-element έως

όπου τα dice διορθώσουν τους προσβεβλημένους κόμβους. Έτσι το dice1, dice2 όπως και το dice3 προσβλήθηκαν σε έναν μόνο κόμβο τους δεν θα αλλάξει σε αυτά η αποθηκευμένη λογική τιμή. Και σε αυτή την περίπτωση, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).

- Να υπάρξουν δυο κόμβοι σε δυο μανδαλωτές dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε στο dice2 ο κόμβος N4 και στο dice3 ο κόμβος N8 και να προσβληθεί και η έξοδος Q του μανδαλωτή. Σε αυτήν την περίπτωση το dice2 όπως και το dice3 που προσβλήθηκαν σε έναν μόνο κόμβο τους δεν θα χάσουν την αποθηκευμένη λογική τιμή, διότι ένας μανδαλωτής dice ανακτά την αποθηκευμένη λογική τιμή μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του. Όμως θα επηρεαστεί η είσοδος δυο C-element (CE1, CE3) εμφανίζοντας μια στιγμιαία μεταβολή της λογική τιμής στον κόμβο εξόδου τους, δηλ. στους κόμβους N1 και N3. Όμως επειδή τους κόμβους αυτούς τους οδηγούν επίσης τα δυο C-element (CE2, CE4) που έχουν τις σωστές τιμές στην είσοδο τους θα επιβάλουν την σωστή τιμή στους κόμβους, σε ανταγωνισμό με τα λανθασμένα C-element έως ότου τα dice διορθώσουν τους προσβεβλημένους κόμβους. Και σε αυτή την περίπτωση, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).

Όλες οι υπόλοιπες τριπλέτες κόμβων του μανδαλωτή είναι ισοδύναμες με κάποια από τις προηγούμενες περιπτώσεις και συνεπώς ο προτεινόμενος μανδαλωτής έχει ανοχή σε απλά συμβάντα που επηρεάζουν τρεις κόμβους και παράλληλα ανακτά πλήρως την αρχική του κατάσταση μετά το συμβάν.

#### **Ακολουθούν οι περιπτώσεις που επηρεάζονται τέσσερις κόμβοι:**

- Να υπάρξουν τέσσερις κόμβοι σε ένα μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε στο dice1 οι κόμβοι N0 και N2 (κόμβοι με ίδια λογική τιμή) και ακόμη οι κόμβοι N1 και N3 (επίσης κόμβοι με ίδια λογική τιμή). Σε αυτήν την περίπτωση, στο dice1 θα υπάρξει αλλαγή της λογικής τιμής η οποία είναι αποθηκευμένη σε αυτό. Τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Συνεπώς, θα διορθωθεί η αποθηκευμένη τιμή στο dice1 και όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή (state recovery).

- Υπάρχουν δυο κόμβοι σε ένα μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε οι κόμβοι N0 και N2 (κόμβοι με ίδια λογική τιμή) στο dice1 που θα προσβληθούν και δυο κόμβοι σε κάποιο δεύτερο dice, έστω χωρίς βλάβη της γενικότητας οι κόμβοι N4 και N6 στο dice2 (επίσης κόμβοι με ίδια λογική τιμή). Σε αυτήν την περίπτωση στο dice1 το οποίο προσβλήθηκε σε δυο κόμβους του θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή, όμοια και το dice2 του οποίου προσβλήθηκαν δυο κόμβοι θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή. Τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους έναν από τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Τα C-elements (CE9,CE11) έχουν σαν είσοδο τους κόμβους που προσβλήθηκαν ενώ τα C-elements (CE10 και CE12 που οδηγούν το ίδιο dice) έχουν τις σωστές τιμές ανταγωνιζόμενα τα επηρεασμένα C-elements έως ότου οι κομβοί εισόδου των τελευταίων επανέλθουν στην σωστή λογική τιμή. Ως αποτέλεσμα, και τα τέσσερα C-elements που οδηγούν το dice1 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους με συνέπεια να επιβάλουν την ορθή τιμή στους κόμβους του προσβεβλημένου dice1 όπως και του dice2 και να επαναφέρουν τη σωστή λογική τιμή που αποθηκεύεται σε αυτά. Συνεπώς, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).
- Να υπάρξουν τέσσερις κόμβοι σε τέσσερα διαφορετικά dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε στο dice1 ο κόμβος N0, στο dice2 ο κόμβος N4, στο dice3 ο κόμβος N8 και στο dice4 ο κόμβος N12. Σε αυτήν την περίπτωση τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους έναν από τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Τα C-elements (CE1, CE3, CE5, CE7) έχουν σαν είσοδο τους κόμβους που προσβλήθηκαν ενώ τα C-elements (CE2, CE4, CE10 και CE12 που οδηγούν το ίδιο dice) έχουν τις σωστές τιμές, ανταγωνιζόμενα τα επηρεασμένα C-elements έως ότου οι κομβοί εισόδου των τελευταίων επανέλθουν στην σωστή λογική τιμή τους από τα dice. Τα υπόλοιπα C-elements δεν θα επηρεαστούν. Έπειτα κάθε μανδαλωτής dice θα διορθώσει την αποθηκευμένη λογική τιμή και συνεπώς όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).
- Να υπάρξει ένας κόμβος εντός τριών διαφορετικών dice που θα προσβληθεί καθώς και η έξοδος Q. Έστω ο κόμβος N0 για το dice1 και N4 για το dice2 και ο κόμβος N8 από το dice3. Σε αυτήν την περίπτωση τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους έναν από τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους

διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Τα C-elements (CE9,CE11) έχουν σαν είσοδο τους κόμβους που προσβλήθηκαν ενώ τα C-elements (CE10 και CE12 που οδηγούν το ίδιο dice) έχουν τις σωστές τιμές ανταγωνιζόμενα τα επηρεασμένα C-elements έως ότου οι κομβοί εισόδου των τελευταίων επανέλθουν στην σωστή λογική τιμή. Οι κομβοί N0, N4 και N8 θα επανέλθουν διότι είναι κομβοί διαφορετικών μανδαλωτών dice. Ως αποτέλεσμα, και τα τέσσερα C-elements που οδηγούν το dice3 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους. Και σε αυτή την περίπτωση, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).

- Υπάρχουν δυο κόμβοι σε ένα μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε οι κόμβοι N0 και N2 (κόμβοι με ιδιά λογική τιμή) στο dice1 και δυο κόμβοι σε δυο διαφορετικά dice, έστω οι κόμβοι N8 και N12 στο dice3 και dice4 αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση στο dice1 το οποίο προσβλήθηκε σε δυο κόμβους του θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή, ενώ στα αλλά δυο dice δεν θα υπάρξει κάποια αλλαγή στην λογική τους τιμή. Τα C-elements (CE5, CE7, CE17, CE19) έχουν σαν είσοδο τους κόμβους που προσβλήθηκαν ενώ τα C-elements (CE6, CE8, CE18 και CE20 που οδηγούν το ίδιο dice) έχουν τις σωστές τιμές, ανταγωνιζόμενα τα επηρεασμένα C-elements έως ότου οι κομβοί εισόδου των τελευταίων επανέλθουν στην σωστή λογική τιμή από τα dice. Τα υπόλοιπα C-elements δεν θα επηρεαστούν. Ως αποτέλεσμα, και τα τέσσερα C-elements που οδηγούν το dice1 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους με συνέπεια να επιβάλουν την ορθή τιμή στους κόμβους του προσβεβλημένου dice1 και να επαναφέρουν τη σωστή λογική τιμή που αποθηκεύεται σε αυτό. Συνεπώς, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).
- Να υπάρξουν τρεις κόμβοι σε έναν μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε στο dice1 οι κόμβοι N0, N2 και N3 και η έξοδος Q του μανδαλωτή. Σε αυτήν την περίπτωση στο dice1 το οποίο προσβλήθηκε σε τρεις κόμβους του θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή, ενώ η έξοδος Q θα εμφανίσει μια στιγμιαία μεταβολή της λογικής τιμής της. Όπως είναι αναμενόμενο τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στη σωστή λογική τιμή. Συνεπώς, θα διορθωθεί η αποθηκευμένη τιμή στο dice1 και όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν στην σωστή τιμή (state recovery).

- Να υπάρξουν τρεις κόμβοι σε έναν μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε στο dice1 οι κόμβοι N0, N2 και N3 και ένας κόμβος σε άλλο dice έστω στο dice2 ο κόμβος N4. Σε αυτήν την περίπτωση στο dice1 το οποίο προσβλήθηκε σε τρεις κόμβους του θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή, ενώ το dice2 που προσβλήθηκε σε έναν μόνο κόμβο του δεν θα χάσει την αποθηκευμένη λογική τιμή, διότι ένας μανδαλωτής dice ανακτά την αποθηκευμένη λογική τιμή μετά από μία διαταραχή απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του. Έπειτα τα C-elements που έχουν ως εισόδους τους κόμβους που έχουν επηρεαστεί δεν θα αλλάξουν λογική τιμή στην έξοδό τους διότι ο δεύτερος κόμβος εισόδου σε καθένα από αυτά είναι στην σωστή λογική τιμή. Συνεπώς, θα διορθωθεί η αποθηκευμένη τιμή στο dice1 και όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).
- Υπάρχουν δυο κόμβοι σε ένα μανδαλωτή dice που θα επηρεαστούν, ας υποθέσουμε οι κόμβοι N0 και N2 (κόμβοι με ίδια λογική τιμή) στο dice1, ένας κόμβος σε διαφορετικό dice έστω στο dice2 ο κόμβος N4 καθώς τέλος και η έξοδος Q του μανδαλωτή. Σε αυτήν την περίπτωση στο dice1 το οποίο προσβλήθηκε σε δυο κόμβους του θα υπάρξει αλλαγή στην αποθηκευμένη λογική τιμή, ενώ το dice2 που προσβλήθηκε σε έναν μόνο κόμβο του δεν θα χάσει την αποθηκευμένη λογική τιμή, διότι ένας μανδαλωτής dice ανακτά την αποθηκευμένη λογική τιμή μετά από μία διαταραχή απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του. Ως αποτέλεσμα, και τα τέσσερα C-elements που οδηγούν το dice1 θα έχουν τις σωστές τιμές στις εξόδους τους με συνέπεια να επιβάλουν την ορθή τιμή στους κόμβους του προσβεβλημένου dice1 και να επαναφέρουν τη σωστή λογική τιμή που αποθηκεύεται σε αυτό. Η έξοδος Q θα εμφανίσει μια στιγμιαία μεταβολή της λογικής τιμής της. Τελικά, όλοι οι κόμβοι του μανδαλωτή θα ανακτήσουν τη σωστή τιμή (state recovery).

Όλες οι υπόλοιπες τετραπλές διαταραχές κόμβων του μανδαλωτή είναι ισοδύναμες με κάποια από τις προηγούμενες περιπτώσεις και συνεπώς ο προτεινόμενος μανδαλωτής έχει ανοχή σε απλά συμβάντα που επηρεάζουν τέσσερις κόμβους και παράλληλα ανακτά πλήρως την αρχική του κατάσταση μετά το συμβάν.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα μελετηθεί πειραματικά η ανοχή προτεινόμενου μανδαλωτή σε διαταραχές απλού συμβάντος που επηρεάζουν έναν απλό κόμβο, δυο κόμβους, τρεις κόμβους καθώς και τέσσερις κόμβους ταυτόχρονα.



---

**5.1 Σχεδίαση του προτεινόμενου μανδαλωτή.**

**5.2 Χαρακτηρισμός προτεινόμενου μανδαλωτή και συγκρίσεις**

**5.3 Επαλήθευση ανοχής και ανάκτησης του προτεινόμενου μανδαλωτή σε μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει μέχρι και τέσσερις κόμβους**

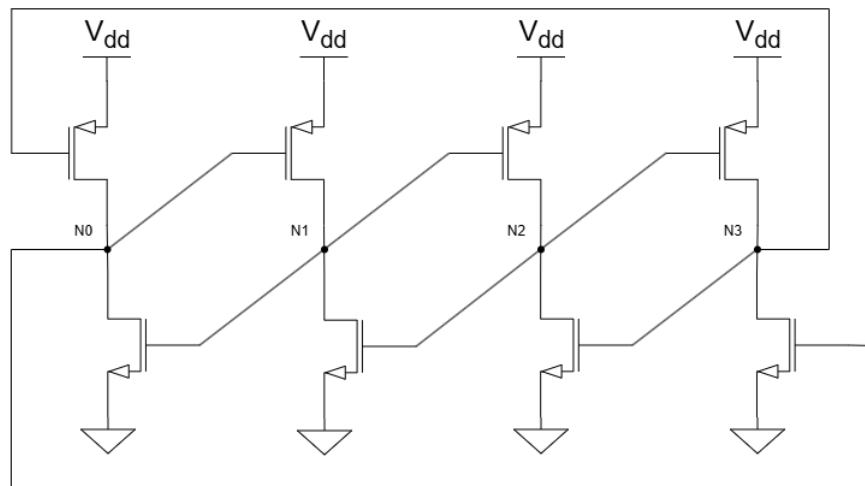
---

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά θα επαληθευτεί πειραματικά η ανοχή του προτεινόμενου μανδαλωτή σε διαταραχές απλού συμβάντος (εξαιτίας ακτινοβολίας) οι οποίες επηρεάζουν έως και τέσσερις κόμβους του κυκλώματος και θα διαπιστωθεί η ικανότητα ανάκτησης της αρχικής λογικής τιμής σε όλους του κόμβους του. Ακολούθως θα χαρακτηριστεί ο μανδαλωτής και θα συγκριθούν οι επιδόσεις του με εκείνες άλλων μανδαλωτών στη βιβλιογραφία οι οποίοι επίσης προσφέρουν δυνατότητες ανοχής σε ήπια λάθη με ταυτόχρονη δυνατότητα ανάκτησης της τιμής σε έως τέσσερις επηρεαζόμενους κόμβους.

### **5.1 Σχεδίαση του Προτεινόμενου Μανδαλωτή.**

Ο προτεινόμενος μανδαλωτής με ανοχή σε διαταραχή απλού συμβάντος (εξαιτίας ακτινοβολίας), σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας την τεχνολογία 28nm CMOS της UMC, με τάση τροφοδοσίας  $V_{dd}=1V$ . Στις προσομοιώσεις που ακολούθησαν η θερμοκρασία ήταν στους 27 βαθμούς Κελσίου και η συχνότητα του ρολογιού στα 500MHz (περίοδος ρολογιού 2ns). Για τη σχεδίαση χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Virtuoso της Cadence και για τις προσομοιώσεις ο προσομοιωτής Spectre επίσης της Cadence. Τα C-Elements που υπάρχουν στον προτεινόμενο μανδαλωτή υλοποιούνται σύμφωνα με την Εικόνα 4.2 από δύο τρανζίστορ pmos με διαστάσεις  $W/L=200nm/30nm$  και δύο τρανζίστορ nmos με διαστάσεις  $W/L=150nm/30nm$ .

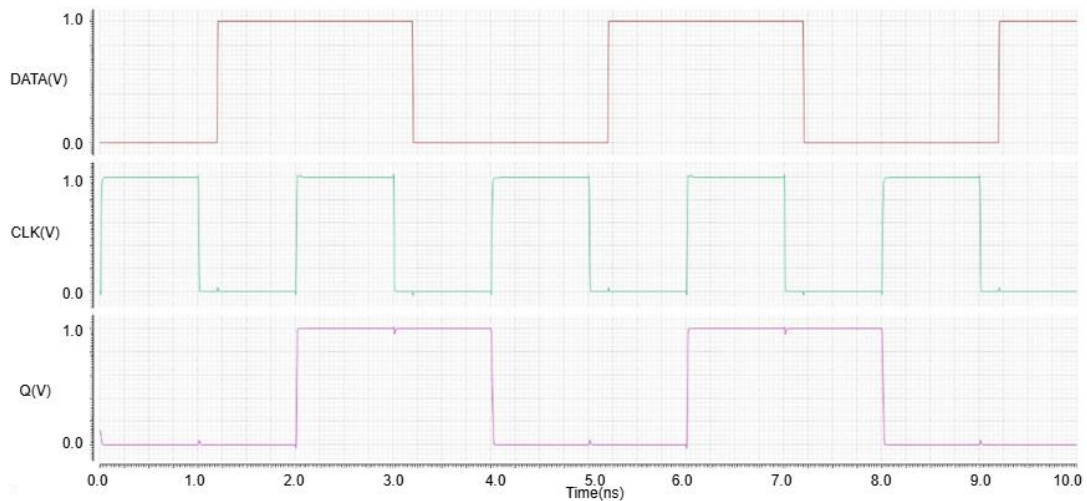
Επιπρόσθετα, οι μανδαλωτές dice υλοποιούνται σύμφωνα με την Εικόνα 5.1 από τέσσερα τρανζίστορ pmos , από αυτά τα δυο pmos τρανζίστορ που συνδέονται στους κόμβους n0 και n2 έχουν διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$  με τα τρανζίστορ nmos που συνδέονται στους αντίστοιχους κόμβους να έχουν διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/60\text{nm}$ , ενώ τα υπόλοιπα δυο τρανζίστορ pmos που συνδέονται στους κόμβους n1 και n3 να έχουν διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$  (ελάχιστο μέγεθος της τεχνολογίας) και τα τρανζίστορ nmos που συνδέονται στους αντίστοιχους κόμβους να έχουν διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ . Για τις πύλες διέλευσης (Εικόνα 4.3) το pmos τρανζίστορ έχει διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ , ενώ το nmos τρανζίστορ έχει διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ , εκτός από την πύλη διέλευσης που οδηγεί την έξοδο του μανδαλωτή η οποία έχει διαστάσεις  $W/L=300\text{nm}/30\text{nm}$ , ενώ το nmos τρανζίστορ έχει διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ . Κλείνοντας, στους τρισταθείς αναστροφείς (Εικόνα 4.3) τα pmos τρανζίστορ έχουν διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ , ενώ τα nmos τρανζίστορ έχουν διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ .



Εικόνα 5.1: Η Δομή του Μανδαλωτή dice.

Πρέπει να σημειωθεί πως στην έξοδο του μανδαλωτή αλλά και στους μανδαλωτές της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν έχει προστεθεί ένας φόρτος ώστε να είναι πιο ρεαλιστικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αυτός ο φόρτος αποτελείται από τέσσερις αναστροφείς που τροφοδοτούνται από την έξοδο του μανδαλωτή, με το pmos τρανζίστορ να έχει διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ , ενώ το nmos τρανζίστορ να έχει διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ . Επίσης, το σήμα ρολογιού τροφοδοτεί τους μανδαλωτές μέσα από έναν απομονωτή (buffer).

Η Εικόνα 5.2 παρουσιάζει την προσομοίωση κατά τον κανονικό τρόπο (normal mode) λειτουργίας του προτεινομένου μανδαλωτή. Όπως αποδεικνύεται, η λειτουργία του προτεινόμενου μανδαλωτή είναι πανομοιότυπη με αυτή ενός συμβατικού μανδαλωτή.



Εικόνα 5.2: Κυματομορφές κατά την Κανονική Λειτουργία του Προτεινομένου Μανδαλωτή.

## 5.2 Χαρακτηρισμός Προτεινόμενου Μανδαλωτή και Συγκρίσεις.

Οι αντίστοιχοι μανδαλωτές στη διεθνή βιβλιογραφία οι οποίοι έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουν σχεδιαστεί σε διαφορετικές τεχνολογίες (16nm ή 32nm κ.α).

Για πιο αντικειμενική σύγκριση του προτεινόμενου μανδαλωτή σε σχέση με τους υπάρχοντες μανδαλωτές της διεθνούς βιβλιογραφίας, οι αντίστοιχοι μανδαλωτές που έχουν αναφερθεί, υλοποιήθηκαν επίσης στην προαναφερθείσα τεχνολογία CMOS (UMC στα 28nm) με τις διαστάσεις των τρανζίστορ τους να είναι ανάλογες με αυτές που αναφέρονται στις αντίστοιχες εργασίες. Για περισσότερη κατανόηση θα αναφερθεί ένα παράδειγμα, έστω ότι ένας μανδαλωτής έχει υλοποιηθεί από τους σχεδιαστές του σε τεχνολογία 22nm (ελάχιστο πλάτος = 45nm, ελάχιστο μήκος = 22nm) με τα pmos τρανζίστορ του να έχουν διαστάσεις  $W/L=90\text{nm}/22\text{nm}$  και τα nmos τρανζίστορ να έχουν διαστάσεις  $W/L=45\text{nm}/22\text{nm}$ . Στην τεχνολογία 28nm CMOS της UMC (ελάχιστο πλάτος = 100nm, ελάχιστο μήκος = 30nm) στην οποία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ο προτεινόμενος μανδαλωτής, ο αντίστοιχος μανδαλωτής της βιβλιογραφίας θα έχει pmos τρανζίστορ με διαστάσεις  $W/L=200\text{nm}/30\text{nm}$  και nmos τρανζίστορ με διαστάσεις  $W/L=100\text{nm}/30\text{nm}$ .

Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τις συγκρίσεις αξιοπιστίας μεταξύ των ανθεκτικών μανδαλωτών που μελετήθηκαν για διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει έως και τέσσερις κόμβους ταυτόχρονα. Στον πίνακα φαίνεται ότι όλοι οι μανδαλωτές προσφέρουν ανοχή στα ήπια λάθη και ανακτούν τις τιμές σε έως τέσσερις κόμβους που έχουν επηρεαστεί από διαταραχές απλού συμβάντος.

Πίνακας 5. 1: Συγκρίσεις Αξιοπιστίας Μεταξύ των Ανθεκτικών Μανδαλωτών για Διαταραχή Απλού Συμβάντος που Επηρεάζει έως και Τέσσερις Κόμβους Ταυτόχρονα.

| LATCHES  | SNU | DNU | TNU | QNU |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| QNURTH   | √   | √   | √   | √   |
| MURLAV   | √   | √   | √   | √   |
| QRR11C2  | √   | √   | √   | √   |
| LDAVPM   | √   | √   | √   | √   |
| LCQRL    | √   | √   | √   | √   |
| PROPOSED | √   | √   | √   | √   |

Ο χαρακτηρισμός και η παρουσίαση των συγκρίσεων απόδοσης για τους προαναφερθέντες σχεδιασμούς των μανδαλωτών μπορεί να βρεθεί στον Πίνακας 5.2. Ο χαρακτηρισμός βασίστηκε σε μεγέθη όπως η καθυστέρηση διάδοσης, η δυναμική κατανάλωση ισχύος, ο χρόνος αποκατάστασης της εξόδου Q του μανδαλωτή μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει τέσσερις κόμβους του. Επιπλέον, λήφθηκε υπόψιν η εκτιμώμενη επιφάνεια πυριτίου που καταλαμβάνουν αυτοί οι σχεδιασμοί αλλά και το γινόμενο καθυστέρησης διάδοσης σήματος επί την κατανάλωση ισχύος. Για την εκτίμηση της επιφάνειας πυριτίου που καταλαμβάνουν οι μανδαλωτές χρησιμοποιήθηκε η επιφάνεια του καναλιού κάθε τρανζίστορ σύμφωνα με την εξίσωση που ακολουθεί:

$$Area = \sum_{i=1}^{n1} L_{nMOS}(i) \times W_{nMOS}(i) + \sum_{i=1}^{n2} L_{pMOS}(i) \times W_{pMOS}(i)$$

Επιπρόσθετα, για το γινόμενο της καθυστέρησης διάδοσης του σήματος με την κατανάλωση ισχύος (power-delay product - PDP) και για το γινόμενο της επιφάνειας πυριτίου, της καθυστέρησης διάδοσης σήματος και της κατανάλωσης ισχύος (area-power-delay product - APDP), χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις :

$$PDP = Power \times Delay$$

$$APDP = Area \times Power \times Delay$$

Η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος υπολογίστηκε από τη μετάβαση του ρολογιού από την κατάσταση μνήμης στην κατάσταση διαφάνειας του μανδαλωτή μέχρι την εμφάνιση της νέας τιμής στην έξοδο Q, λαμβάνοντας υπόψιν την χειρότερη περίπτωση για την άνοδο ή την πτώση του σήματος.

Η κατανάλωση ισχύος στους μανδαλωτές υπολογίστηκε κατά την κανονική τους λειτουργία (χωρίς την παρουσία διαταραχών εξ αιτίας της ακτινοβολίας) και για χρόνο προσομοίωσης 10ns με περίοδο ρολογιού 2ns.

Πίνακας 5.2: Συγκριτική Παρουσίαση των Επιδόσεων των Μανδαλωτών.

| LATCHES     | De-<br>lay<br>(ps) | Power<br>(μW) | Area<br>(μm <sup>2</sup> ) | Re-<br>covery<br>Time Q (ps) | PDP<br>(ps x μW) | APDP<br>(μm <sup>2</sup> x<br>ps x μW) |
|-------------|--------------------|---------------|----------------------------|------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| QNURTH[26]  | 6,36               | 11,05         | 0,522                      | 82,73                        | 70,28            | 36,68                                  |
| MURLAV[20]  | 4,98               | 11,27         | 0,36                       | 41,04                        | 56,12            | 20,21                                  |
| QRR11C2[24] | 10,41              | 18,67         | 1,188                      | 68,42                        | 194,35           | 230,89                                 |
| LDAVPM[27]  | 5,09               | 9,23          | 0,54                       | 67,73                        | 46,98            | 25,37                                  |
| LCQRL[25]   | 10,15              | 18,38         | 0,607                      | N/A                          | 186,55           | 113,24                                 |
| PROPOSED    | <b>2,81</b>        | <b>14,22</b>  | <b>0,678</b>               | <b>32,51</b>                 | <b>39,95</b>     | <b>27,09</b>                           |

Για να καταστεί πιο εύληπτη η σύγκριση των μανδαλωτών της βιβλιογραφίας σε σχέση με τον προτεινόμενο μανδαλωτή, παρουσιάζεται ο Πίνακας 5.3 με την ποσοστιαία μείωση που επιτυγχάνει η προτεινόμενη σχεδίαση αναφορικά με την καθυστέρηση διάδοσης Δ(delay), την κατανάλωσης ισχύος Δ(power cons.), το γινόμενο καθυστέρησης επί την κατανάλωση ισχύος Δ(PDP), το γινόμενο επιφάνειας πυριτίου επί καθυστέρησης επί την κατανάλωση ισχύος Δ(APDP) της εκτιμώμενης επιφάνειας πυριτίου Δ(area) και του χρόνου αποκατάστασης της εξόδου μετά από ένα TNU Δ(recovery). Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν ως ακολούθως:

$$\Delta = \frac{\text{Συγκρινόμενος Μανδαλωτής} - \text{Προτεινόμενος Μανδαλωτής}}{\text{Συγκρινόμενος Μανδαλωτής}} \times 100\%$$

Τα θετικά ποσοστά της μεταβολής σημαίνουν ότι ο προτεινόμενος μανδαλωτής εμφανίζει χαμηλότερη επιφάνεια πυριτίου, κατανάλωση ενέργειας, καθυστέρηση, χρόνο

αποκατάστασης εξόδου και PDP από τους άλλους μανδαλωτές. Τα αρνητικά ποσοστά της μεταβολής σημαίνουν ότι ο προτεινόμενος μανδαλωτής εμφανίζει υψηλότερη επιφάνεια πυριτίου, κατανάλωση ενέργειας, καθυστέρηση, χρόνο αποκατάστασης εξόδου και PDP από τους άλλους μανδαλωτές.

Πίνακας 5.3: Ποσοστιαίες Συγκρίσεις Αναμεσά στους Μανδαλωτές.

| LATCHES  | $\Delta(\text{delay})$<br>% | $\Delta(\text{area})$ % | $\Delta(\text{power cons.})$ % | $\Delta(\text{PDP})$<br>% | $\Delta(\text{APDP})$ % | $\Delta(\text{recovery})$<br>% |
|----------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| QNURTH   | 50,08                       | -29.88                  | -28.68                         | 43.15                     | 26.14                   | 60.70                          |
| MURLAV   | 41,36                       | -88.33                  | -26.17                         | 28.81                     | -34.04                  | 20.78                          |
| QR-R11C2 | 71,95                       | 42.98                   | 23.83                          | 79.45                     | 88.26                   | 52.48                          |
| LDAVPM   | 42,63                       | -25.55                  | -54.06                         | 14.96                     | -6.77                   | 52.01                          |
| LCQRL    | 71,23                       | -11.70                  | 22.63                          | 78.58                     | 76.07                   | N/A                            |
| AVERAGE  | 55,45                       | -22.50                  | -12.49                         | 78.98                     | 29.93                   | 46.49                          |

### 5.3 Επαλήθευση Ανοχής και Ανάκτησης του Προτεινόμενου Μανδαλωτή σε μια Διαταραχή Απλού Συμβάντος που Επηρεάζει έως Τέσσερις Κόμβους

Για να αποδειχθεί η ικανότητά του προτεινόμενου μανδαλωτή να παρέχει ανοχή και ανάκτηση της σωστής τιμής των κόμβων του σε διαταραχές απλού συμβάντος πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις, εστίασαν σε μια διαταραχή απλού συμβάντος η οποία επηρεάζει ταυτόχρονα έναν, δυο, τρεις και τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή. Σε αυτά τα πειράματα, μια πηγή ελεγχόμενου ρεύματος χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της επίδρασης μιας πρόσκρουσης σωματιδίου σε έναν κόμβο κυκλώματος. Στη μελέτη υιοθετήθηκε το μοντέλο διπλού εκθετικού παλμού ρεύματος (it) που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέγιστη σωρευτική τιμή ρεύματος επιλέγεται να είναι 20 mA. Αυτή η τιμή ρεύματος είναι επαρκής ώστε να επικυρώσει την αποδοτική λειτουργία του κυκλώματος υπό ακραίες συνθήκες μιας διαταραχής απλού συμβάντος εξ αίτιας ακτινοβολίας που επιδρά σε έναν κόμβο. Μια τέτοια υψηλή τιμή ρεύματος αιχμής εξασφαλίζει την ανοσία του προτεινόμενου μανδαλωτή σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών σωματιδίων. Ο σχετικός

παλμός παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η σταθερά χρόνου ανόδου (rt) επιλέγεται να είναι 0,1ps ενώ η σταθερά χρόνου πτώσης (ft) είναι 3ps [26]. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα, ότι ο προτεινόμενος μανδαλωτής έχει την ικανότητα ανοχής και ανάκτησης από την επίδραση ενός απλού συμβάντος που επηρεάζει έως και τέσσερις κόμβους ταυτόχρονα.

Η ανοχή στα ήπια λάθη του προτεινόμενου μανδαλωτή ελέγχεται και αξιολογείται εξαντλητικά αναφορικά με όλες τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς υπάρχει η πιθανότητα η διαταραχή απλού συμβάντος να επηρεάσει ταυτόχρονα οποιουσδήποτε τέσσερις κόμβους. Συνεπώς, έχουν πραγματοποιηθεί κατάλληλες προσομοιώσεις για όλες τις περιπτώσεις όπου επηρεάζονται ένας, δύο, τρεις και τέσσερις κόμβοι. Ανεξάρτητα από το αν η διαταραχή απλού συμβάντος εξ αίτιας ακτινοβολίας επηρεάζει έναν κόμβο, ένα ζεύγος κόμβων, τρεις κόμβους, είτε τέσσερις κόμβους η συνολική έγχυση φορτίου εξ αιτίας της πρόσκρουσης του σωματιδίου παραμένει η ίδια. Επομένως, σε περίπτωση διαταραχής απλού συμβάντος που θα επηρεάσει έναν κόμβο του μανδαλωτή θεωρείται ότι η συνολική έγχυση φορτίου κατανέμεται όλη σε έναν κόμβο του μανδαλωτή με αποτέλεσμα ο επηρεασμένος κόμβος να δέχεται παλμό ρεύματος με μέγιστη τιμή ίση με 20 mA. Σε περίπτωση διαταραχής απλού συμβάντος που θα επηρεάσει δυο κόμβους του μανδαλωτή θεωρείται χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι η συνολική έγχυση φορτίου κατανέμεται εξίσου και στους δυο κόμβους με αποτέλεσμα κάθε επηρεασμένος κόμβος να δέχεται παλμό ρεύματος με μέγιστη τιμή ίση με 10mA. Σε περίπτωση διαταραχής απλού συμβάντος που θα επηρεάσει τρεις κόμβους του μανδαλωτή θεωρείται ότι η συνολική ενέργεια κατανέμεται εξίσου στους τρεις επηρεαζόμενους κόμβους. Ως αποτέλεσμα κάθε επηρεασμένος κόμβος να δέχεται παλμό ρεύματος με μέγιστη τιμή ίση με 6,6mA. Ενώ σε περίπτωση διαταραχής απλού συμβάντος που θα επηρεάσει τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή θεωρείται ότι η συνολική ενέργεια κατανέμεται εξίσου στους τρεις επηρεαζόμενους κόμβους. Ως αποτέλεσμα κάθε επηρεασμένος κόμβος να δέχεται παλμό ρεύματος με μέγιστη τιμή ίση με 5mA.

Παρακάτω έχουμε τις διακριτές περιπτώσεις ανάλογα, αν η διαταραχή απλού συμβάντος εξ αίτιας ακτινοβολίας επηρεάζει έναν κόμβο, ένα ζεύγος κόμβων, τρεις κόμβους, και τέσσερις κόμβους

Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις περιπτώσεις μιας διαταραχής απλού συμβάντος που επηρεάζει έναν κόμβο του προτεινόμενου μανδαλωτή. Όπως συζητήθηκε, χρειάζεται μόνο να εξεταστούν οι περιπτώσεις όπου δύο ενδεικτικοί μεμονωμένοι κόμβοι (π.χ. Q και N0) επηρεάζονται αντίστοιχα από μια διαταραχή

απλού συμβάντος. Όπως φαίνεται στις εικόνα, την χρονική στιγμή 1,3 ns και 1,6 ns (δηλαδή, όταν  $Q = 0$  και  $N0 = 0$ ) και την χρονική στιγμή 3,3 ns και 3,6 ns (δηλαδή, όταν  $Q = 1$  και  $N0 = 1$ ), συμβαίνει μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει αντίστοιχα στους κόμβους  $Q$  και  $N0$  με τον παλμό ρεύματος για την μοντελοποίηση της επίδρασης της διαταραχής απλού συμβάντος να είναι ίσος με 20mA σε κάθε περίπτωση. Γίνεται αντιληπτό ότι οι κόμβοι που επηρεάζονται και στις δυο υποπεριπτώσεις από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επιδρά σε έναν κόμβο μπορούν να επανέλθουν μόνοι τους και να ανακτήσουν την αρχική σωστή τιμή. Επιπρόσθετα, για τις συμπληρωματικές καταστάσεις των παραπάνω κόμβων, πραγματοποιήθηκαν επίσης οι αντίστοιχες προσομοιώσεις. Όπως είχε προβλεφθεί, οι παραπάνω κόμβοι μπορούν επίσης να ανακτήσουν την αρχική τους κατάσταση μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει έναν κόμβο του μανδαλωτή.



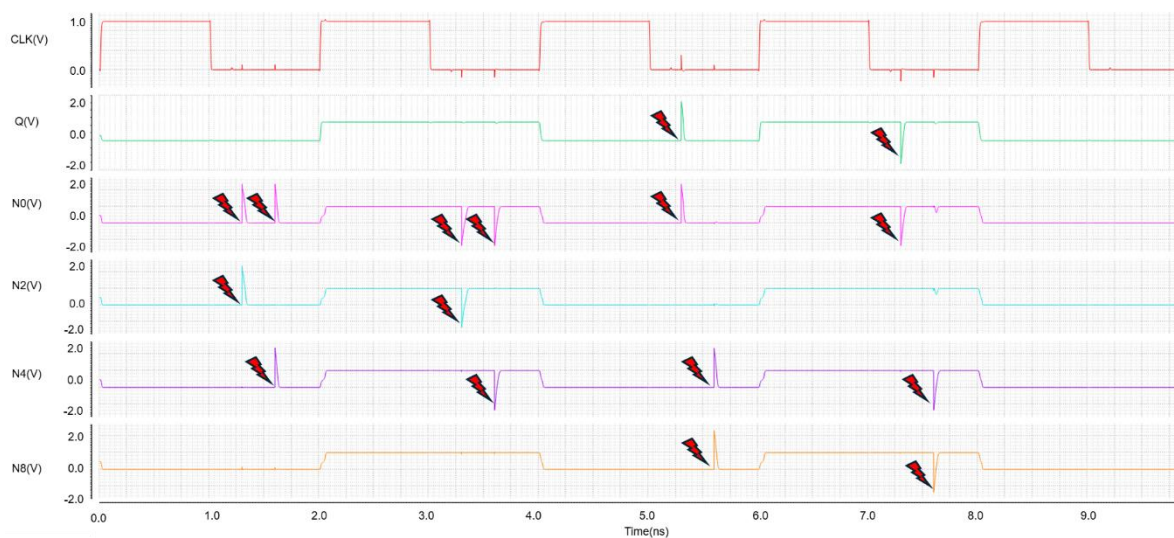
Εικόνα 5.3: Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για την Επίδραση μιας Διαταραχής Απλού Συμβάντος σε έναν Κόμβο του Μανδαλωτή.

Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις περιπτώσεις μιας διαταραχής απλού συμβάντος που επηρεάζει δυο κόμβους του προτεινομένου μανδαλωτή ταυτόχρονα. Όπως συζητήθηκε χρειάζεται να εξεταστούν οι περιπτώσεις όπου ταυτόχρονα δύο κόμβοι (π.χ.  $N0$  και  $N2$ ,  $N0$  και  $N4$ ,  $Q$  και  $N0$ ,  $N4$  και  $N8$ ) επηρεάζονται αντίστοιχα από μια διαταραχή απλού συμβάντος. Όπως φαίνεται στην εικόνα, τις χρονικές στιγμές 1,3ns, 1,6ns, 5,3ns και 5,6ns (δηλαδή, όταν  $N0=N2=N4=Q=0$ ), συμβαίνει μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει τους κόμβους  $\langle N0, N2 \rangle$ ,  $\langle N0, N4 \rangle$ ,  $\langle N0, Q \rangle$  και  $\langle N4, N8 \rangle$  αντίστοιχα, με τον παλμό ρεύματος για την μοντελοποίηση της επίδρασης της διαταραχής απλού συμβάντος



να είναι ίσος με 10,5mA για κάθε κόμβο. Επίσης, συμπληρωματικά τις χρονικές στιγμές 3,3ns, 3,6ns, 7,3ns και 7,6ns (δηλαδή, όταν  $N0=N2=N4=Q=1$ ), συμβαίνει μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει τους ιδίους κόμβους οι οποίοι όμως φέρουν τη συμπληρωματική τιμή.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι κόμβοι που επηρεάζονται από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επιδρά σε δυο κόμβους μπορούν να ανακτήσουν την αρχική τιμή. Επιπρόσθετα, για τις συμπληρωματικές καταστάσεις των παραπάνω κόμβων, πραγματοποιήθηκαν επίσης οι αντίστοιχες προσομοιώσεις. Όπως είχε προβλεφθεί, οι παραπάνω κόμβοι μπορούν επίσης να ανακτήσουν την αρχική τους κατάσταση μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει δυο κόμβους του μανδαλωτή.

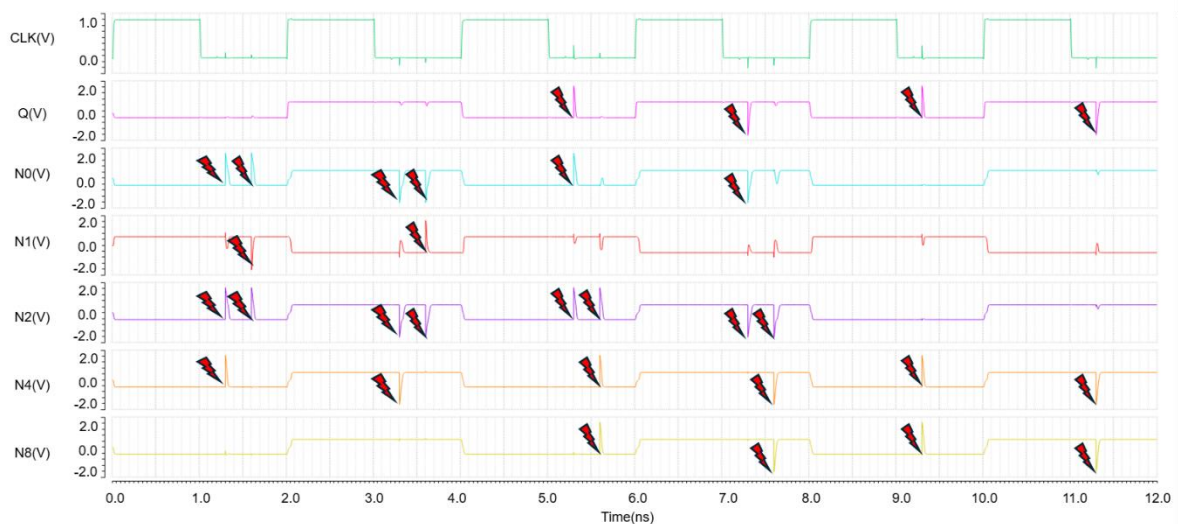


Εικόνα 5.4: Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για την Επίδραση μιας Διαταραχής Απλού Συμβάντος σε Δύο Κόμβους του Μανδαλωτή.

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για περιπτώσεις μιας διαταραχής απλού συμβάντος που επηρεάζει ταυτόχρονα τρεις κόμβους του προτεινόμενου μανδαλωτή. Όπως συζητήθηκε χρειάζεται να εξεταστούν οι περιπτώσεις όπου ταυτόχρονα τρεις ενδεικτικοί μεμονωμένοι κόμβοι (π.χ.  $\langle N0, N2 \text{ και } N4 \rangle$ ,  $\langle N0, N1 \text{ και } N2 \rangle$ ,  $\langle N0, N2 \text{ και } Q \rangle$ ,  $\langle N2, N4 \text{ και } N8 \rangle$  και  $\langle N4, N8 \text{ και } Q \rangle$ ) επηρεάζονται αντίστοιχα από μια διαταραχή απλού συμβάντος. Όπως φαίνεται στην εικόνα, τις χρονικές στιγμές 1,3ns, 1,6ns, 5,3ns, 5,6ns και 9,3ns (δηλαδή, όταν  $N1=1, Q=N0=N2=N4=N8=0$ ), συμβαίνει μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει αντίστοιχα στους κόμβους  $\langle N0, N2, N4 \rangle$ ,  $\langle N0, N1, N2 \rangle$ ,  $\langle N0, N2, Q \rangle$ ,  $\langle N2, N4, N8 \rangle$  και  $\langle N4, N8, Q \rangle$  με τον παλμό ρεύματος για την μοντελοποίηση της επίδρασης της διαταραχής απλού συμβάντος να είναι ίσος με 6,6mA σε κάθε κόμβο. Επίσης συμπληρωματικά τις χρονικές στιγμές 3,3ns, 3,6ns, 7,3ns, 7,6ns και 11,3ns (δηλαδή, όταν  $N1=0$

, $N_0=N_2=N_4=Q=1$ ), συμβαίνει μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει τους ιδίους κόμβους όμως σε συμπληρωματική τιμή.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι κόμβοι που επηρεάζονται από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επιδρά σε τρεις κόμβους μπορούν να αποκαταστήσουν την αρχική τιμή. Επιπρόσθετα, για τις συμπληρωματικές καταστάσεις των παραπάνω κόμβων, πραγματοποιήθηκαν επίσης οι αντίστοιχες προσομοιώσεις. Όπως είχε προβλεφθεί, οι παραπάνω κόμβοι μπορούν επίσης να ανακτήσουν την αρχική κατάστασή τους μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει τρεις κόμβους του μανδαλωτή.

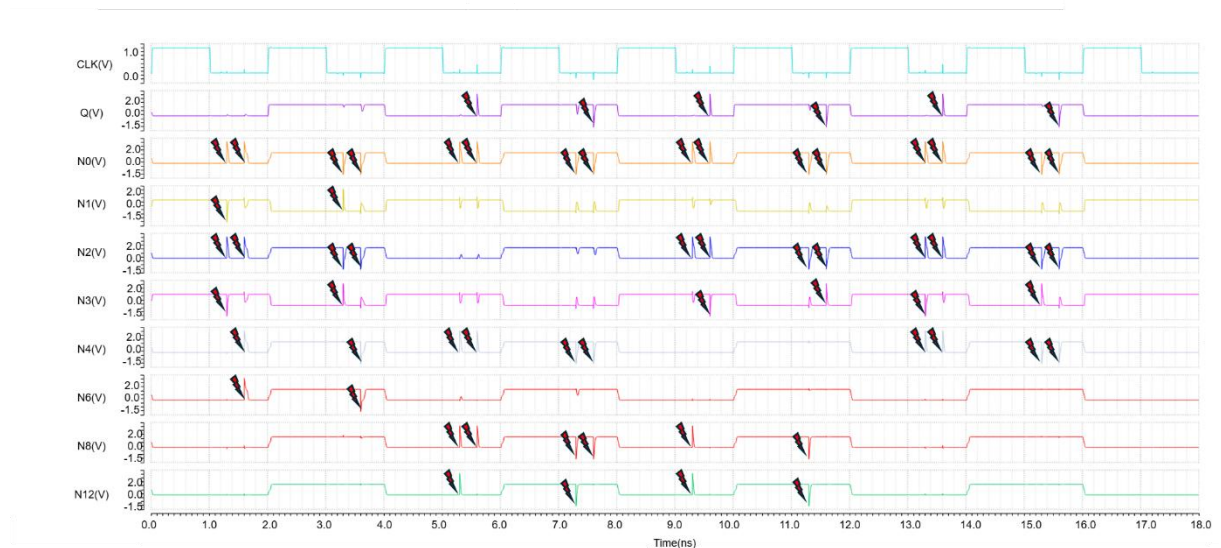


Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για την Επίδραση μιας Διαταραχής Απλού Συμβάντος σε Τρεις Κόμβους του Μανδαλωτή.

Στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για περιπτώσεις μιας διαταραχής απλού συμβάντος που επηρεάζει ταυτόχρονα τέσσερις κόμβους του προτεινομένου μανδαλωτή. Όπως συζητήθηκε χρειάζεται να εξεταστούν περιπτώσεις όπου ταυτόχρονα τέσσερις κόμβοι (π.χ.  $\langle N_0, N_1, N_2 \text{ και } N_3 \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_4 \text{ και } N_6 \rangle$ ,  $\langle N_0, N_4, N_8 \text{ και } N_{12} \rangle$ ,  $\langle N_0, N_4, N_8 \text{ και } Q \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_8 \text{ και } N_{12} \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_3 \text{ και } Q \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_3 \text{ και } N_4 \rangle$ , και  $\langle N_0, N_2, N_4 \text{ και } Q \rangle$ ) επηρεάζονται από μια διαταραχή απλού συμβάντος. Όπως φαίνεται στην εικόνα, τις χρονικές στιγμές 1,3ns, 1,6ns, 5,3ns, 5,6ns, 9,3ns, 9,6ns, 13,3ns και 13,6ns (δηλαδή, όταν  $N_1=N_3=1$ ,  $Q=N_0=N_2=N_4=N_8=N_{12}=0$ ), συμβαίνει μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει αντίστοιχα στους κόμβους  $\langle N_0, N_1, N_2, N_3 \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_4, N_6 \rangle$ ,  $\langle N_0, N_4, N_8, N_{12} \rangle$ ,  $\langle N_0, N_4, N_8, Q \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_8, N_{12} \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_3, Q \rangle$ ,  $\langle N_0, N_2, N_3$ ,

$N4>$ , και  $<N0, N2, N4, Q>$  με τον παλμό ρεύματος για την μοντελοποίηση της επίδρασης της διαταραχής απλού συμβάντος να είναι ίσος με 5mA σε κάθε κόμβο. Επίσης συμπληρωματικά τις χρονικές στιγμές 3,3ns, 3,6ns, 7,3ns, 7,6ns, 11,3ns, 11,6ns, 15,3ns, 15,6ns (δηλαδή, όταν  $N1=N3=0$ ,  $Q=N0=N2=N4=N8=N12=1$ ), συμβαίνει μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει τους ίδιους κόμβους οι οποίοι όμως βρίσκονται σε συμπληρωματική τιμή.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι κόμβοι που επηρεάζονται από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επιδρά σε τέσσερις κόμβους μπορούν να αποκαταστήσουν την αρχική τιμή. Επιπρόσθετα, για τις συμπληρωματικές καταστάσεις των παραπάνω κόμβων, πραγματοποιήθηκαν επίσης οι αντίστοιχες προσομοιώσεις. Όπως είχε προβλεφθεί, οι παραπάνω κόμβοι μπορούν επίσης να ανακτήσουν την αρχική κατάστασή τους μετά από μια διαταραχή απλού συμβάντος που επηρεάζει τέσσερις κόμβους του μανδαλωτή.



Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα της Προσομοίωσης για την Επίδραση μιας Διαταραχής Απλού Συμβάντος σε Τέσσερις Κόμβους του Μανδαλωτή.

Στο πεδίο των νανομετρικών τεχνολογιών, τα στοιχεία μνήμης είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην εμφάνιση ήπιων λαθών τα οποία προκαλούνται από διαταραχές απλού συμβάντος εξαιτίας ακτινοβολίας και επηρεάζουν ταυτόχρονα έναν, δύο, τρεις ή τέσσερις κόμβους του κυκλώματος. Καθώς η τεχνολογία CMOS συνεχίζει να κλιμακώνεται προς τα κάτω, η ανάγκη για αξιόπιστα ολοκληρωμένα συστήματα αυξάνει. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει την αρχιτεκτονική ενός μανδαλωτή (latch), ο οποίος είναι σε θέση να διατηρήσει τη σωστή λογική του κατάσταση ακόμη και όταν μια διαταραχή απλού συμβάντος επηρεάσει ταυτόχρονα έως τέσσερις κόμβους. Ο σχεδιασμός του μανδαλωτή αξιοποιεί την τεχνική του πλεονασμού, βασιζόμενος σε πολλαπλή ανατροφοδότηση της λογικής πληροφορίας εντός της δομής του. Συγκεκριμένα, ο μανδαλωτής αποτελείται από πέντε dice μανδαλωτές και είκοσι στοιχεία C (C-Elements), τα οποία επανατροφοδοτούν διαρκώς τη λογική τιμή προς τους dice μανδαλωτές κατά τη διάρκεια της κατάστασης μνήμης.

Για τη βελτίωση της ταχύτητας και της αποδοτικότητας, στο κύκλωμα ενσωματώνονται και δύο τρισταθείς αναστροφείς, οι οποίοι συμβάλλουν στη μείωση της καθυστέρησης διάδοσης και της κατανάλωσης ισχύος, διοχετεύοντας την είσοδο του σήματος απευθείας στην έξοδο όταν ο μανδαλωτής βρίσκεται σε κατάσταση διαφάνειας. Αλλά επιπρόσθετα η χρήση τους βοηθά στην γρήγορη ανάκαμψη της εξόδου του μανδαλωτή μετά από μια διαταραχή γεγονός το οποίο είναι κρίσιμο για τέτοιου είδους κυκλώματα

Ο προτεινόμενος μανδαλωτής διακρίνεται για την υψηλή αξιοπιστία του κατά τη διάρκεια λειτουργίας και έχει τη δυνατότητα αυτόματης αποκατάστασης της σωστής τιμής στην έξοδό του αλλά και τους εσωτερικούς κόμβους έπειτα από μια διαταραχή απλού συμβάντος η οποία επηρεάζει έως και τέσσερις κόμβους.

Η εργασία περιλαμβάνει συγκριτική αξιολόγηση του νέου μανδαλωτή σε σχέση με άλλους μανδαλωτές από τη διεθνή βιβλιογραφία, με βάση προσομοιώσεις που εξετάζουν παραμέτρους όπως: καθυστέρηση διάδοσης, κατανάλωση ισχύος, επιφάνεια πυριτίου, χρόνος αποκατάστασης εξόδου, το γινόμενο καθυστέρησης-κατανάλωσης ισχύος (PDP) και το γινόμενο επιφάνειας-καθυστέρησης-κατανάλωσης ισχύος (APDP).

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν την ικανότητα του προτεινόμενου σχεδιασμού να αντέχει και να ανακτάται την αρχική του κατάσταση ύστερα από διαταραχές απλού συμβάντος οι οποίες προσβάλλουν έως τέσσερις κόμβους, ενώ αποδίδει σημαντικά καλύτερα σε βασικές παραμέτρους σε σχέση με άλλες προτάσεις της βιβλιογραφίας. Παρά το γεγονός ότι καταλαμβάνει κατά 22,5% μεγαλύτερη επιφάνεια και καταναλώνει κατά 12,49% περισσότερη ενέργεια, επιτυγχάνει μείωση καθυστέρησης κατά 55,45%, μείωση του PDP κατά 78,98%, του APDP κατά 29,93% και γρηγορότερη αποκατάσταση της εξόδου Q κατά 46,49% σε σχέση με την μέση τιμή των μανδαλωτών της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν.

Τέλος, πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις της παρούσας έρευνας περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μανδαλωτών με ακόμα υψηλότερη ανθεκτικότητα, χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος ή/και βελτιωμένες επιδόσεις αναφορικά με την καθυστέρηση διάδοσης σήματος και το χρόνο ανάκτησης της αρχικής κατάστασης του μανδαλωτή μετά από την επίδραση μιας διαταραχής απλού συμβάντος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] H. Xu, C. Sun, L. Zhou, H. Liang και Z. Huang, «Design of a Highly Robust Triple-Node-Upset Self-Recoverable Latch,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 113622-113630, 2021.
- [2] M. Grosso, H. Guzman-Miranda και M. A. Aguirre, «M. Grosso, H. Guzman-Miranda and M. A. Aguirre, "Exploiting Fault Model Correlations to Accelerate SEU Sensitivity Assessment," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 1, pp. 142-148, Feb. 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2226096.,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, VOL. 9, NO. 1,, 2013.
- [3] R. Baumann, «Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies,» 305-316 2005.
- [4] T. Heijmen, P. Roche, G. Gasiot, K. R. Forbes και D. Giot, «A Comprehensive Study on the Soft-Error Rate of Flip-Flops From 90-nm Production Libraries,» *IEEE Trans. Dev. Mat. Rel.*, vol. 7, no. 1, pp. 84–96, 2007.
- [5] E. P. Dodd, R. M. Shaneyfelt, R. J. Schwank και A. J. Felix, «Current and Future Challenges in Radiation Effects on CMOS Electronics,» *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 57, no. 4, pp. 1747–1763,, 2010.
- [6] N. Ευταξιόπουλος-Σαρρής, «Soft and hard error tolerant techniques for memory elements in modern nanometer technologies,» *Διδακτορική Εργασία*, 2016.
- [7] Nicolaidis και Michael, «Soft Errors in Modern Electronic Systems,» Springer, 2011.
- [8] JEDEC Standard JESD89A, «"Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices",» Oct. 2006.

- [9] T. Calin, M. Nicolaidis και R. Velazco, «Upset hardened memory design for submicron CMOS technology,» pp. 2874-287, Dec. 1996.
- [10] P. Shivakumar και e. al, «Modeling the Effect of Technology Trends on the Soft Error Rate of Combinational Logic,» pp. 389-398., 2002.
- [11] J. Ziegler και W. Lanford, «The effect of cosmic rays on computer memories,» p. 776–788, 1979.
- [12] E. Normand, «Single event upset at ground level,» *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, no. 6, pp. 2742-2750, 1996.
- [13] A. Wood και A. Dixit, «The impact of new technology on soft error rates,» *International Reliability Physics Symposium*, pp. 5B.4.1-5B.4.7, 2011.
- [14] R. Baumann, «Soft errors in advanced semiconductor devices—Part I: The three radiation sources,» *EEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 1, no. 1, pp. 17-22, 2001.
- [15] S. Borkar, «Designing reliable systems from unreliable components: the challenges of transistor variability and degradation,» *Micro, IEEE*, vol. 25, no. 6, pp. 10–16, 2005.
- [16] L. Massengill, «Analysis of Single Event Effects in High-Density SRAM Technologies,» *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 65, no. 8, pp. 2174-2181, 2018.
- [17] L. Zeng και P. Beckett, «Soft Error Rate Estimation in Deep Sub-micron CMOS,» in *Pacific Rim Int. Symp. Dependable Computing*, 2007.
- [18] L. B. Freeman, «Critical charge calculations for a bipolar SRAM array,» *IBM J. Research and Develop.*, vol. 40, no. 1, pp. 119–129, 1996.
- [19] P. Roche, J.-L. Autran, G. Gasiot και D. Munteanu, «Technology downscaling worsening radiation effects in bulk: SOI to the rescue,» in *Int. Electron Devices Meeting*, 2013.

- [20] A. Yan και et al., «MURLAV: A Multiple-Node-Upset Recovery Latch and Algorithm-Based Verification Method,» *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 43, no. 7, pp. 2205-2214, 2024.
- [21] Y. Li, X. Cheng, C. Tan και e. al, «A robust hardened latch featuring tolerance to double-node-upset in 28nm CMOS for spaceborne application,» *IEEE Trans Circuits Syst II*, p. 1619–23, 2020.
- [22] E. Ibe, H. Taniguchi και Y. Yahagi, «Impact of scaling on neutron-induced soft error in SRAMs from a 250 nm to a 22 nm design rule,» *IEEE Trans on Electron Devices*, p. 1527–38, 2010.
- [23] V. Ferlet-Cavrois, . L. W. Massengill και P. Gouker, «Single Event Transients in Digital CMOS—A Review,» *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, no. 3, pp. 1767-1790, June 2013.
- [24] Z. Huang και a. et, «Overhead Optimized and Quadruple-Node-Upset Self-Recoverable Latch Design Based on Looped C-Element Matrix,» *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, τόμ. 59, p. 99367, 2023.
- [25] L. He και et al., «A Low-Cost Quadruple-Node-Upsets Resilient Latch Design,» *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 32, no. 10, pp. 1930-1939, 2024.
- [26] A. Yan, C. Zhou και T. Ni, «Cost-Optimized and Highly Robust Latches Providing Complete Quadruple-Node-Upset Tolerance and Recovery with Algorithm based Verifications,» *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025.
- [27] A. Yan, Z. Li και J. Cui, «LDAVPM: A Latch Design and Algorithm-Based Verification Protected Against,» *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTER-AIDED DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS*, VOL. 42, NO. 6, June 2023.
- [28] Nicolaidis και Michael, «Upset hardened memory design for submicron CMOS technology.,» *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 43, no. 6, , p. 2874–2878, 1996.



- [29] X. A.Yan, «Design of a triple-node-upset self-recoverable latch for aerospace applications in harsh radiation environments,» *IEEE Trans. Aerosp. Elec- tron. Syst.*, vol. 56, no. 2, p. 1163–1171, 2020.

E. Paparsenos and Y. Tsiatouhas, "Triple-Node-Upset Recoverable Radiation-Hardened by Design Latch," 2024 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET), Thessaloniki, Greece, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/PACET60398.2024.10497044.

Evangelos Paparsenos, Yiorgos Tsiatouhas, Radiation-hardened latch design with triple-node-upset recoverability, AEU - International Journal of Electronics and Communications, Volume 187,2024,155539, ISSN14348411, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155539>.

## ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

---

Ο Παπαρσένος Ευάγγελος γεννήθηκε τον Δεκέμβριο στην Λάρισα το 1998. Αποφοίτησε το 2023 από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωάννινων. Τον Φεβρουάριο του 2024 εγγράφηκε στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Μηχανικής Δεδομένων και Υπολογιστικών Συστημάτων.