

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

Ηλεκτρομετανάστευση

Electromigration

**Διπλωματική εργασία**

Φλώρος Γεώργιος

**Επιβλέποντες καθηγητές:** Σταμούλης Γεώργιος  
Καθηγητής

Ευμορφόπουλος Νέστωρ  
Επίκουρος Καθηγητής

Βόλος Ιούνιος 2013

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

Ηλεκτρομετανάστευση

Electromigration

**Διπλωματική εργασία**

Φλώρος Γεώργιος

**Επιβλέποντες καθηγητές:** Σταμούλης Γεώργιος  
Καθηγητής

Ευμορφόπουλος Νέστωρ  
Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την διμελή εξεταστική επιτροπή την 27<sup>η</sup> Ιουνίου 2013

.....  
Σταμούλης Γ.  
Καθηγητής

.....  
Ευμορφόπουλος Ν.  
Επίκουρος Καθηγητής

Διπλωματική Εργασία για την απόκτηση του Διπλώματος του Μηχανικού Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

.....  
Φλώρος Γεώργιος  
Διπλωματούχος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Copyright © Floros Georgios, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Σε όλους όσους βοήθησαν για την ολοκλήρωση της διπλωματικής  
64 65 73 70 6f 69 6e 61

## Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Σταμούλη Γεώργιο κύριο επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας και τον έτερο επιβλέποντα κύριο Ευμορφόπουλο Νέστωρα. Οι συμβουλές τους δεν ήταν σημαντικές μόνο για την διπλωματική εργασία αλλά και για ολόκληρη την ακαδημαϊκή μου πορεία.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας αλλά και τους διδάσκοντες του ΤΜΗΥΤΔ για την πολύτιμη γνώση που μου πρόσφεραν.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια. Η βοήθεια τους ήταν υπερπολύτιμη.

# Περιεχόμενα

## Κατάλογος σχημάτων

## Περίληψη

<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>8</b>
1.1 Περιγραφή του προβλήματος .....	8
1.2 Σκοπός της διπλωματικής .....	9
1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής.....	9
<b>Ηλεκτρομετανάστευση.....</b>	<b>10</b>
2.1 Βασική φυσική ηλεκτρομετανάστευσης.....	10
2.2 Μοντέλο υπολογισμού.....	13
2.3 Σχεδιαστικοί παράμετροι.....	14
<b>Εμπορικά Εργαλεία.....</b>	<b>18</b>
<b>Υλοποίηση εργαλείου.....</b>	<b>19</b>
4.1 Προσέγγιση με μέγιστο ρεύμα.....	19
4.2 Προσέγγιση με στοχαστικό μοντέλο .....	20
4.3 Αλγόριθμος ελέγχου παραβάσεων.....	22
4.4 Αλγόριθμος MTTF .....	23
4.5 Επισκόπηση του αλγορίθμου.....	24
<b>Πειραματική αξιολόγηση .....</b>	<b>27</b>
5.1 Αποτελέσματα κυκλωμάτων ISCAS .....	27
5.2 Αξιολόγηση.....	42
<b>Επίλογος .....</b>	<b>43</b>
6.1 Συζήτηση .....	43
6.2 Μελλοντικές προεκτάσεις.....	43
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>45</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2.1: Λόγοι “μετανάστευσης” σε υλικά

Εικόνα 2.2: Δυνάμεις οδήγησης ηλεκτρονίων

Εικόνα 2.3: Ανοιχτοκύκλωμα και βραχυκύκλωμα

Εικόνα 2.4: Ενέργεια ενεργοποίησης για τον χαλκό

Εικόνα 2.5: Εξέλιξη των τεχνολογίας των ολοκληρωμένων.

Εικόνα 2.6: Σχέση ηλεκτρομετανάστευσης και μεγέθους με σταθερό ρεύμα και θερμοκρασία.

Εικόνα 2. 7: Πρόβλημα ηλεκτρομετανάστευσης σε επαφές.

Εικόνα 2.8: Πυκνότητα ρεύματος σε γωνίες (a)90°, (b) 135° και (c) 150°.

Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής διαδικασία ηλεκτρομετανάστευσης

Εικόνα 5.1: Αποτελέσματα για το κύκλωμα c1355 και για n=1. Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

Εικόνα 5.2: Αποτελέσματα για το κύκλωμα c1355 και για n=2. Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

Εικόνα 5.3: Αποτελέσματα για το κύκλωμα c6288 και για n=1. Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

Εικόνα 5.4: Αποτελέσματα για το κύκλωμα c6288 και για n=2. Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

## Περίληψη

Η ηλεκτρομετανάστευση αρχίζει να γίνεται ένα από τα κύρια προβλήματα αξιοπιστίας στον σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το πρόβλημα δημιουργείται από τη μεγάλη πυκνότητα του ρεύματος στις διασυνδέσεις του κυκλώματος. Επιπρόσθετα η συνεχόμενη μείωση του μεγέθους των ολοκληρωμένων και η ταυτόχρονη αύξηση των ρευμάτων που ρέουν στους ημιαγωγούς έχουν δημιουργήσει προκλήσεις στην σχεδίαση τους με παραμέτρους λαμβάνοντας υπόψη την ηλεκτρομετανάστευση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός εργαλείου που ελέγχει τυχόν παραβάσεις στην σχεδίαση του κυκλώματος λόγω της ηλεκτρομετανάστευσης και υπολογίζεται το mean time to failure με βάση τον τύπο του Black. Τέλος στους υπολογισμούς λαμβάνεται πληροφορία και εκτός του μέγιστου ρεύματος.



# **Abstract**

Electromigration is starting to be one of the most significant problems considering reliability in integrated circuits design. The problem is provoked by the large current density in the circuit interconnections. Furthermore, the continuous reduction of the size of the integrated and the simultaneous increase of the currents flowing in semiconductors have introduced challenges in the design with parameters, always taking into consideration electromigration.

In the present thesis is being introduced the implementation of a tool that controls any violations in circuits design due to electromigration and also calculates the mean time to failure based upon the type of Black. Finally, in the realization of the calculations is taken into account information, besides the maximum current.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Το πρόβλημα της ηλεκτρομετανάστευσης έχει παρατηρηθεί πολύ παραπάνω από 100 χρόνια από το Γάλλο φυσικό Geradin. Παρόλη την παλαιότητα της ανακάλυψης οι επιστήμονες άρχισαν να ασχολούνται με το φαινόμενο από το 1966 και μετά όταν τα πρώτα ολοκληρωμένα κυκλώματα κυκλοφόρησαν στο εμπόριο. Λίγα χρόνια αργότερα γράφτηκε από τον Jim Black της Motorola η πιο σημαντική εξίσωση (Black's equation). Από τότε μέχρι και σήμερα η εξίσωση του Black χρησιμοποιείται κατά κόρον χωρίς να έχει βρεθεί ένα πιο αξιόπιστο μοντέλο υπολογισμού.

Το φαινόμενο της ηλεκτρομετανάστευσης δημιουργείται από τις συνεχείς συγκρούσεις ηλεκτρονίων που με το χρόνο συσσωρεύουν μέταλλο στη μία πλευρά της ένωσης ενώ από την άλλη το αδυνατίζουν καταλήγοντας να σπάσει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται ανοιχτοκύκλωμα και ουσιαστικά το κύκλωμα χαλάει. Το πρόβλημα αυτό γίνεται φανερό στα ολοκληρωμένα κυκλώματα όπου το μέγεθος των τρανζίστορ συνεχώς μειώνεται ενώ αντίθετα η πυκνότητα ρεύματος αυξάνει όλο και περισσότερο. Έτσι οι σχεδιαστές κυκλωμάτων θα πρέπει να λαμβάνουν γνώση συγκεκριμένων παραμέτρων πριν την τελική υλοποίηση.

Γι αυτό έχει δημιουργηθεί ένα ευρύ φάσμα εργαλείων αξιοπιστίας. Ένα από αυτά είναι η δημιουργία εργαλείων που παρέχουν πληροφορία στους σχεδιαστές VLSI για τον έλεγχο της ηλεκτρομετανάστευσης. Αυτή η πληροφορία χωρίζεται σε δύο κομμάτια, στον έλεγχο για τυχόν παραβάσεις στην σχεδίαση και στον υπολογισμό του μέσου χρόνου αποτυχίας. Για τον υπολογισμό των παραπάνω χρειάζεται ο συνδυασμός και άλλων εργαλείων CAD που παρέχουν στο σχεδιαστή γνώση για την εξαγωγή των παρασιτικών στοιχείων του κυκλώματος, την ανάλυση πτώσης τάσης και την προσομοίωση του για τον υπολογισμό των τάσεων σε όλους τους κόμβους.

Είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι παρόλο που υπάρχουν προγραμματιστές EDA που ασχολούνται με αυτό το πρόβλημα είναι πιο πιθανό ένα κύκλωμα να σταματήσει τη λειτουργία του από βομβαρδισμό ακτινών  $\Gamma$  παρά από την ηλεκτρομετανάστευση. Ενδεικτικό είναι ότι στα τόσα χρόνια εμπορίου στην βιομηχανία ημιαγωγών το μόνο πρόβλημα που έχει καταγραφεί είναι στα τέλη

του 1980 από την Western Digital όταν και κάποια desktop της εταιρείας παρουσίασαν προβλήματα μετά από 12 με 18 μήνες.

## **1.2 Σκοπός της διπλωματικής**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει ένα θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από το πρόβλημα και να υλοποιήσει ένα εργαλείο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από σχεδιαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Εκτός από την κλασσική προσέγγιση, βάση του μέγιστου ρεύματος, για τον υπολογισμό του μέσου χρόνου αποτυχίας του κυκλώματος έχει υλοποιηθεί και υπολογισμός του χρόνου με στοχαστικές διαδικασίες. Επιπρόσθετα παρατίθεται και μία συγκριτική μελέτη των δύο μεθόδων με πίνακες αποτελεσμάτων.

Τέλος είναι σημαντικό να παρουσιαστεί η συνεχώς αυξανόμενη αναγκαιότητα ώστε να δίνεται έμφαση στην σχεδίαση VLSI με περισσότερες παραμέτρους αξιοπιστίας.

## **1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής**

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια θεωρητική παρουσίαση του φαινομένου της ηλεκτρομετανάστευσης τόσο σαν θεωρία αλλά και η εφαρμογή της στη θεωρία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση εμπορικών εργαλείων που υπάρχουν.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε και η δομή του εργαλείου. Ακόμα παρατίθεται η θεωρία στην οποία βασίστηκε η υλοποίηση με ένα στοχαστικό μοντέλο.

Στο κεφάλαιο 5 δίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε κάποια κυκλώματα ISCAS κάτω από διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 γίνεται συζήτηση γύρω από το εργαλείο καθώς και γύρω από τις μελλοντικές βελτιώσεις και προεκτάσεις του.

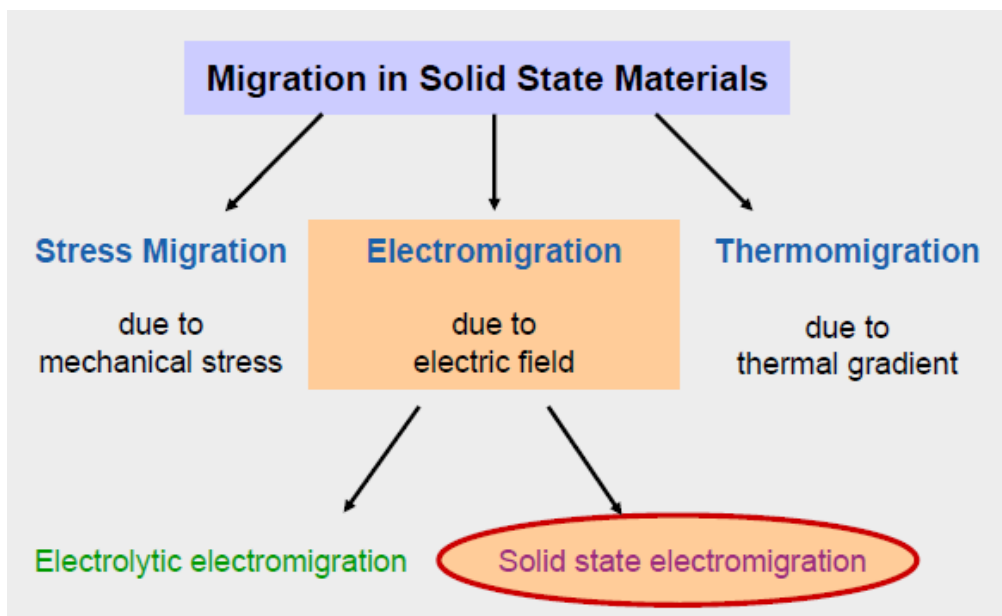
## Κεφάλαιο 2

### Ηλεκτρομετανάστευση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθεται η θεωρία που χρειάζεται ο αναγνώστης για να κατανοήσει το πρόβλημα και να μπορεί να εμβαθύνει στην υλοποίηση του εργαλείου.

#### 2.1 Βασική φυσική ηλεκτρομετανάστευσης

Αρχίζοντας την συγγραφή της διπλωματικής θέλουμε να δώσουμε μια θεωρητική άποψη για την ηλεκτρομετανάστευση η οποία αποτελεί έναν από τα προβλήματα αξιοπιστίας και έναν από τους τρεις λόγους “μετανάστευσης” σε στερεά υλικής κατάστασης.

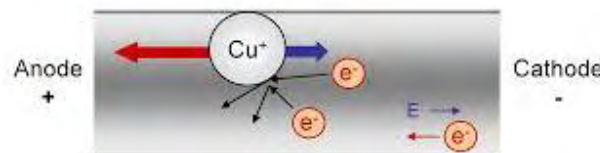


Εικόνα 2.1: Λόγοι “μετανάστευση” σε υλικά

Ηλεκτρομετανάστευση είναι η σταδιακή μετατόπιση των ατόμων μετάλλου σε έναν ημιαγωγό. Αυτό συμβαίνει όταν η τρέχουσα πυκνότητα ρεύματος είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει την ολίσθηση των μεταλλικών ιόντων προς την κατεύθυνση της ροής ηλεκτρονίων και χαρακτηρίζεται από την πυκνότητα ροής ιόντων.

Έτσι όταν στους μεταλλικούς αγωγούς στην επιφάνεια του ημιαγωγίμου υλικού εφαρμόζεται υψηλή ένταση ρεύματος οι συνεχείς συγκρούσεις στα άτομα του αλουμινίου (Al) ή του χαλκού (Cu) αναγκάζουν κρυστάλλους από αυτό να κινηθούν στην κατεύθυνση πρόσπτωσης. Με τον χρόνο δημιουργείται συγκέντρωση μετάλλου στην μία πλευρά μίας ένωσης και στην άλλη πλευρά η ένωση αδυνατίζει και καταλήγει να σπάσει.

Πιο συγκεκριμένα από πλευράς φυσικής. Το ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος μιας διασύνδεσης όταν λειτουργεί και έχουμε κίνηση ιόντων σύμφωνα με την κατεύθυνση της ροής ηλεκτρονίων (δηλαδή από την κάθοδο προς την άνοδο). Αυτή η ροή των ατόμων προκαλείται με ηλεκτρομετανάστευση, η οποία μπορεί να περιγραφεί ως η αυτοδιάχυση ιόντων σε απόκριση με ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η ατομική ροή είναι κυρίως το αποτέλεσμα δύο αντίθετων δυνάμεων οδήγησης, της δύναμης ανέμου ( $F_{wind}$ ), όπου τα ιόντα κινούνται στην κατεύθυνση του ηλεκτρονίου ροής και ενός πίσω στρες ( $F_{stress}$ ) που σπρώχνει τα ιόντα προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 2.2: Δυνάμεις οδήγησης ηλεκτρονίων

Η ατομική ροή περιγράφεται από τη σχέση:

$$J = -\frac{DC}{kT} (ZeE - \Omega \frac{\partial \sigma}{\partial x})$$

Όπου  $D$  είναι η ικανότητα διάχυσης,  $C$  είναι η συγκέντρωση του άτομα,  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann,  $T$  είναι η θερμοκρασία,  $Z$  είναι πραγματικός αριθμός,  $e$  είναι η θεμελιώδης ηλεκτρονική επιβάρυνση,  $E$  είναι το ηλεκτρικό πεδίο, το  $X$  είναι η ατομική ένταση και  $\frac{\partial \sigma}{\partial x}$  είναι η κλίση πίεσης κατά μήκος της γραμμής.

Το μοντέλο που αναλύει την πίεση που δημιουργείται στις μεταλλικές γραμμές του κυκλώματος περιγράφεται από τον Kohronen. Για να περιγραφεί το φαινόμενο αυτό με μία έκφραση χρησιμοποιείται αρχικά η σχέση του τοπικού στρες της μεταλλικής γραμμής με την συγκέντρωση ατόμου. Αυτή είναι:

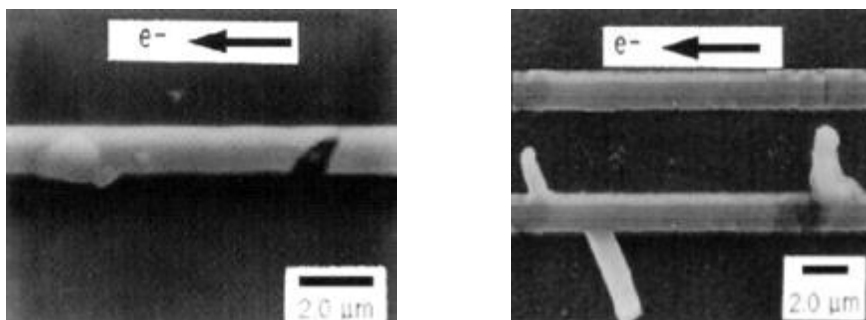
$$\frac{dC}{C} = - \frac{d\sigma}{B}$$

όπου το B είναι το μέτρο ελαστικότητας του μετάλλου. Αντικαθιστώντας την εξίσωση συνέχειας στην γραμμή κατεύθυνσης και κάνοντας πράξεις καταλήγουμε στην σχέση:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{DB\Omega}{kT} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{ZeE}{\Omega} \right) \right)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να λυθεί αναλυτικά μόνο κάτω από συγκεκριμένες υποθέσεις. Έτσι αυτή η σχέση προσεγγίζεται από αριθμητικές προσομοιώσεις και χρησιμοποιείται από εργαλεία για να υπολογίσουν την πίεση λόγω ηλεκτρομετανάστευσης που εμφανίζεται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Από αυτό το φαινόμενο μπορούν να προκύψουν δύο πιθανότητες αποτυχίας. Η μία είναι η εξερχόμενη ροή ιόντων να υπερβαίνει την εισερχόμενη ροή ιόντων με αποτέλεσμα το ανοιχτοκύκλωμα, ουσιαστικά δημιουργείται κενό στο κύκλωμα. Η δεύτερη περίπτωση είναι η δημιουργία υψώματος. Δηλαδή η εισερχόμενη ροή ιόντων υπερβαίνει την εξερχόμενη, έχοντας ως αποτέλεσμα το βραχυκύκλωμα. Οι εικόνες παρακάτω δείχνουν αυτά τα δύο φαινόμενα.



Εικόνα 2.3: Ανοιχτοκύκλωμα και βραχυκύκλωμα λόγω ηλεκτρομετανάστευσης.

Το φαινόμενο εμφανίζεται κυρίως σε κομμάτια του κυκλώματος που ρέει ένα μεγάλο σταθερό ρεύμα συνεχόμενα. Για αυτό τον λόγο τα αναλογικά

κυκλώματα και οι γραμμές του τροφοδοτικού στα ψηφιακά κυκλώματα είναι τα πιο ευαίσθητα κομμάτια. Βέβαια όταν δεν είναι σταθερό το ρεύμα αλλά εναλλασσόμενο, όπως για παράδειγμα στα ψηφιακά κυκλώματα υπάρχουν και κρύσταλλοι που κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση και δημιουργείται το φαινόμενο της “αυτοίωσης”. Δηλαδή εάν η φορά του ρεύματος αλλάζει τότε μειώνεται η πιθανότητα να δημιουργηθεί πρόβλημα λόγω ηλεκτρομετανάστευσης καθώς οι κρύσταλλοι ουσιαστικά που μετακινούνται επιστρέφουν στη θέση τους.

## 2.2 Μοντέλο υπολογισμού

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο τύπος του Black είναι ο πιο σημαντικό τύπος στις διάφορες μελέτες που έχουν γίνει γύρω από αυτό το θέμα. Αναλυτικά η εξίσωση για το μέσο χρόνο αποτυχίας του κυκλώματος είναι:

$$MTTF = AJ^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

Όπου A είναι μία σταθερά που υπολογίζεται με βάση την διατομή που συνδέονται, J είναι η πυκνότητα ρεύματος, E<sub>a</sub> είναι η ενέργεια ενεργοποίησης του κάθε υλικού (παράδειγμα στην εικόνα 2.2), k είναι η σταθερά Boltzmann, T είναι η θερμοκρασία και τέλος το n είναι ένας συντελεστής κλιμάκωσης που σύμφωνα με τον Black είναι συνήθως 2. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής κλιμάκωσης σε διάφορα εργαλεία είναι 1,2 και 3.

Diffusion path	E <sub>A</sub> (eV)
Bulk Cu	2.2
Dislocations	1.2-1.5
Grain Boundaries	0.88-0.95
Surface	0.8-0.9

Εικόνα 2.4 Ενέργεια ενεργοποίησης για τον χαλκό

Αν και ο τύπος αυτός στηρίζεται σε παρατηρήσεις του Black δίνει πολύ ακριβή αποτελέσματα και δεν προκύπτει κάποιο πιο αξιόπιστο μοντέλο υπολογισμού. Τα διάφορα εργαλεία υπολογίζουν αυτό το χρόνο χρησιμοποιώντας μόνο την μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που ρέει στο κύκλωμα. Η παραδοχή αυτή γίνεται για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί καθώς προς το

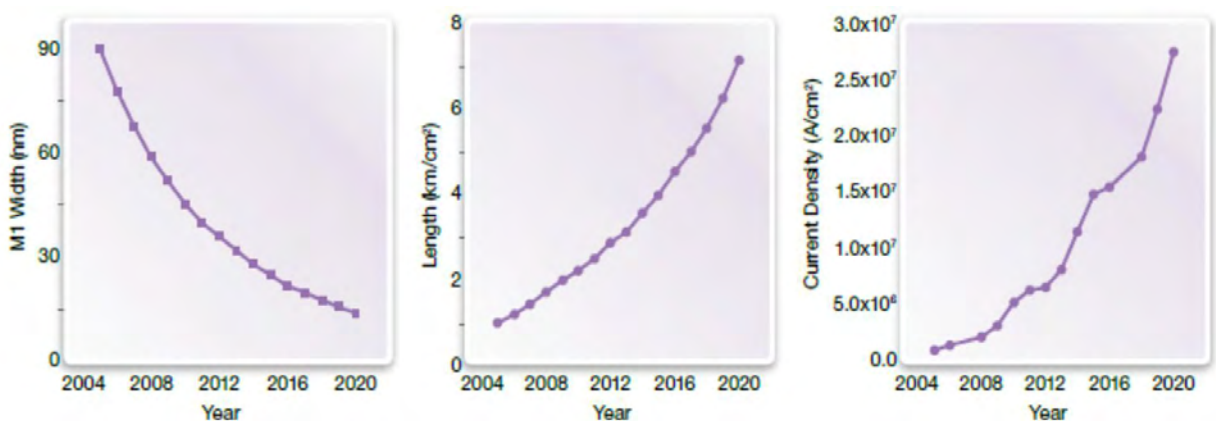
παρόν η ηλεκτρομετανάστευση δεν δημιουργεί τόσο μεγάλο πρόβλημα που θα χρυσίμενε ένα πιο σύνθετο μοντέλο.

Επιπρόσθετα το μέγιστο ρεύμα έχει και έναν ακόμα λόγο που χρησιμοποιείται. Λαμβάνοντας την ανάλυση πτώση τάσης (IR-drop analysis) είναι σημαντικό να προσομοιωθεί το κύκλωμα και να υπολογιστεί το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρεύσει κάθε κλάδο για να καταστεί σαφές εάν το καλώδιο μπορεί να αντέξει το ρεύμα που θα το διαπεράσει. Προφανώς εάν υπάρχει κάποια παραβίαση το κύκλωμα πρέπει να επανασχεδιαστεί και να επαναληφθεί αυτή η διαδικασία.

Καταλήγοντας είναι φανερό ότι οι υπολογισμοί του εργαλείου πρέπει να επικεντρωθούν σε δύο κομμάτια. Τόσο στον υπολογισμό του MTF όσο και στην αντοχή του κυκλώματος στο μέγιστο ρεύμα που μπορεί να το διαπεράσει.

## 2.3 Σχεδιαστικοί παράμετροι

Σε αυτήν την παράγραφο η εργασία επικεντρώνεται στη φυσική σχεδίαση των ολοκληρωμένων με παραμέτρους που επηρεάζουν την ηλεκτρομετανάστευση. Όπως αναφέρει και ο νόμος του Moore το μέγεθος των τρανζίστορ μειώνεται εκθετικά. Αυτό δημιουργεί μεγαλύτερες ανάγκες για κατανάλωση ρεύματος καθώς υπάρχουν περισσότερα και μεγαλύτερα καλώδια σε αντίθεση με το εμβαδό των διατομών που συνεχώς μειώνεται. Στο σχήμα γίνεται φανερή η πρόοδος της τεχνολογίας.



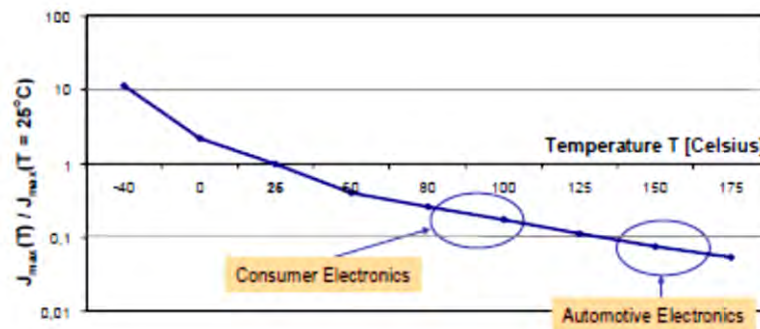
Εικόνα 2.5: Εξέλιξη των τεχνολογίας των ολοκληρωμένων.

Έτσι οι κύριες σχεδιαστικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνει κάποιος υπόψη είναι το υλικό, το μέγεθος, το μήκος και η θερμοκρασία του καλωδίου.



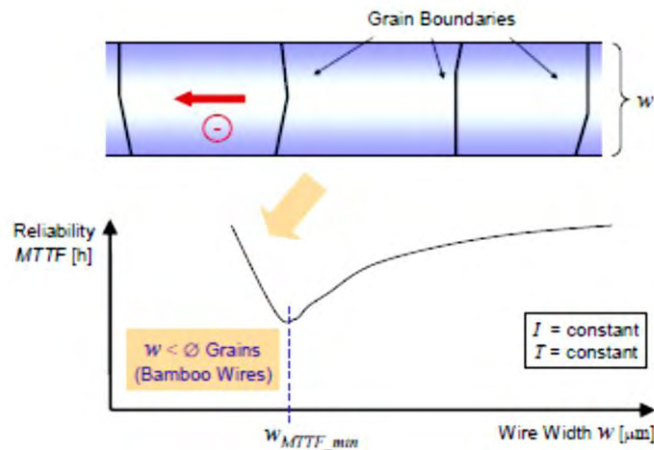
Αναλύοντας τις παραπάνω παραμέτρους σημαντικό ρόλο στην παραγωγή αξιόπιστων κυκλωμάτων λόγω ηλεκτρομετανάστευσης έπαιξε η αντικατάσταση του αλουμινίου με χαλκό. Ο χαλκός σαν υλικό μπορεί να αντέξει περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη ένταση ρεύματος από ότι το αλουμίνιο. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγαλύτερη ενέργεια ενεργοποίησης που προκαλείται από την ανώτερη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, καθώς και το υψηλότερο σημείο τήξης του.

Άλλη παράμετρος που επηρεάζει πολύ τον τύπο του Black είναι η θερμοκρασία. Όπως φαίνεται και στην εξίσωση (1) εμφανίζεται στο εκθέτη παίζοντας μεγάλο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Ακόμα από την στιγμή που βρίσκεται στην ίδια μεριά με την πυκνότητα ρεύματος, φαίνεται ότι από την στιγμή που αυξάνεται η θερμοκρασία θα πρέπει να μειωθεί η πυκνότητα ρεύματος. Για παράδειγμα εάν αυξήσουμε την θερμοκρασία από 25° στους 125° τότε θα πρέπει να μειώσουμε την πυκνότητα ρεύματος περίπου 90%.



Εικόνα 2.6: Σχέση ρεύματος θερμοκρασίας

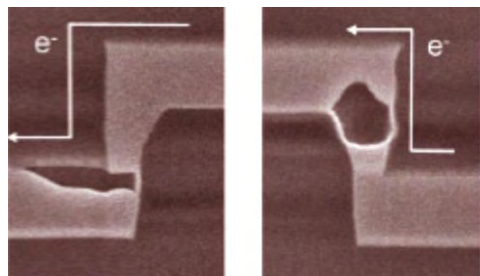
Βέβαια σημαντική παράμετρος που συνδέεται άρρηκτα με την θερμοκρασία είναι και το πλάτος του καλωδίου. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω της μείωσης του μεγέθους αυξάνεται η πυκνότητα του καλωδίου και μετά αυξάνεται η θερμοκρασία στις διασυνδέσεις λόγω του Joule heating. Όμως δεν είναι το μοναδικό πρόβλημα που δημιουργεί η μείωση μεγέθους του καλωδίου. Προφανώς όσο μεγαλύτερο πλάτος έχει το καλώδιο τόσο μικρότερη είναι η πυκνότητα ρεύματος και προφανώς αυξάνεται το MTTF του ολοκληρωμένου. Ο προηγούμενος κανόνας όμως δεν ισχύει πάντα. Υπάρχουν περιπτώσεις που παρόλο την μεγάλη μείωση του πλάτους του καλωδίου η αντίσταση στην ηλεκτρομετανάστευση αυξάνεται. Η αντίφαση αυτή προκαλείται από τη θέση των grain boundaries του ολοκληρωμένου. Τότε δημιουργείται το λεγόμενο φαινόμενου μπαμπού. Δηλαδή σε ένα τόσο στενό σύρμα όπως σε μία δομή μπαμπού το ρεύμα κινείται κάθετα σε ολόκληρο το σύρμα. Η εικόνα κάνει το παραπάνω να γίνει πιο κατανοητό.



Εικόνα 2.7: Σχέση ηλεκτρομετανάστευσης και μεγέθους με σταθερό ρεύμα και θερμοκρασία.

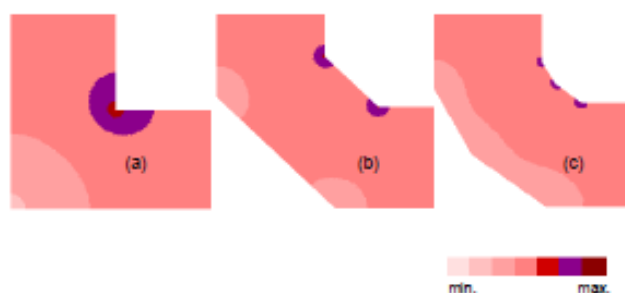
Γίνεται αντιληπτό ότι το βέλτιστο μέγεθος καλωδίου είναι όταν είναι αρκετά μικρό ώστε να εμφανίζεται η δομή μπαμπού. Βέβαια αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Το πιο κύριο παράδειγμα είναι οι γραμμές καλωδίου του power grid που χρειάζεται να περνάει πολύ ρεύμα και έτσι δεν είναι δυνατό να σχεδιαστούν τόσο μικρές. Τέλος όσο αναφορά το μέγεθος του καλωδίου οι σχεδιαστές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους την διαφορά της πραγματικής υλοποίησης του κυκλώματος από το πώς θα ήταν ιδανικά. Προφανώς λοιπόν για έλεγχο αξιοπιστίας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το χειρότερο σενάριο.

Τελειώνοντας την περιγραφή των παραμέτρων που επηρεάζουν την ηλεκτρομετανάστευση αξίζει να αναφερθεί ο ρόλος του μήκους του καλωδίου και των γωνιών που σχηματίζουν τα καλώδια ή οι επαφές.



Εικόνα 2.8 :Πρόβλημα ηλεκτρομετανάστευσης σε επαφές.

Ένα μεγάλο καλώδιο έχει συνήθως περισσότερες γωνίες και αυτό μειώνει των παράγοντα A που περιγράφεται στην εξίσωση του Black. Έτσι είναι πιο συμφέρον να υπάρχουν μικρά καλώδια που αποτελούνται από ευθείες γραμμές. Τέλος σημαντικές είναι και οι επαφές του κυκλώματος. Δηλαδή σχεδιάζοντας μια επαφή είναι σημαντικό να κάνουμε κάποιες τροποποιήσεις ώστε μια γωνία  $90^\circ$  να μετατρέπεται σε  $135^\circ$ .



Εικόνα 2.9: Πυκνότητα ρεύματος σε γωνίες (a)  $90^\circ$ , (b)  $135^\circ$  και (c)  $150^\circ$ .

Σε αυτήν την ενότητα έγινε μία ανασκόπηση των σχεδιαστικών παραμέτρων που πρέπει να έχει γνώση ένας σχεδιαστής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το εργαλείο που υλοποιήθηκε δεν προσφέρει τέτοιες αναλύσεις σαν έξοδο, απλά θεωρήθηκε σημαντικό για τον αναγνώστη να γνωρίζει κάποιες τεχνικές λεπτομέρειες. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τα παραπάνω μπορούν να δημιουργηθούν κυκλώματα με μεγάλη αντοχή στην ηλεκτρομεταμόρφωση.

## Κεφάλαιο 3

### Εμπορικά Εργαλεία

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια να γίνει μια παρουσίαση κάποιων εργαλείων ηλεκτρομετανάστευσης. Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται χρήση της λέξης προσπάθεια, καθώς δεν υπάρχουν εργαλεία CAD που προορίζονται αμιγώς για τον υπολογισμό της ηλεκτρομετανάστευσης.

Συνήθως κάποιος πολύ απλοϊκός αλγόριθμος ηλεκτρομετανάστευσης ενσωματώνεται σε κάποιο εργαλείο IR-drop analysis ή σε κάποιο προσομοιωτή κυκλωμάτων που ελέγχει για τυχόν παραβάσεις στην σχεδίαση. Έτσι εκτός από αυτή την πληροφορία δεν έχουμε καθόλου γνώση για το mean time to failure. Στην αγορά των εργαλείων CAD έχει επικρατήσει αυτή η λογική καθώς όπως αναφέρθηκε και πιο πριν δεν υπάρχουν ακόμα προβλήματα λόγω ηλεκτρομετανάστευσης όσο αφορά το χρόνο ζωής ενός κυκλώματος.

Εξαίρεση αποτελεί η Synopsys με το RailMill. Το RailMill είναι ενσωματωμένο σε ένα πακέτο εργαλείων αξιοπιστίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Παρέχει στον χρήστη αναλυτικές πληροφορίες για την αντοχή του κυκλώματος όχι μόνο για την ηλεκτρομετανάστευση αλλά και για ότι άλλο θα χρειαστεί ένας σχεδιαστής κυκλωμάτων.

Αντίθετα με τις εταιρίες του εμπορίου, εργαλεία υπολογισμού για την αντοχή του κυκλώματος στην ηλεκτρομετανάστευση έχουν σχεδιαστεί σε ακαδημαϊκό επίπεδο. Τα δύο γνωστότερα είναι ο BERT και ο iTEM. Από αυτά τα δύο ο BERT που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο Berkley είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος προσομοιωτής ηλεκτρομετανάστευσης.

Ο BERT υπολογίζει την κατανομή όλων των πυκνοτήτων ρευμάτων σε ολόκληρο το κύκλωμα και υπολογίζει το μέσο χρόνο αποτυχίας για όλες τις διασυνδέσεις. Η υλοποίηση που στηρίζεται αυτός ο προσομοιωτής λαμβάνει υπόψη της πολύ απλές φυσικές παραμέτρους του κυκλώματος ώστε να επιταχυνθούν οι υπολογισμοί.

Καταλήγοντας αυτή η ενότητα θέλει να τονίσει την έλλειψη εργαλείων αξιοπιστίας που παρέχουν αναλύσεις στον τομέα της ηλεκτρομετανάστευσης.

## Κεφάλαιο 4

### Υλοποίηση εργαλείου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε και η θεωρία που βασίζεται ώστε να γίνει η ανάλυση όλων των πιθανών τιμών μίας διασύνδεσης με στοχαστικές διαδικασίες.

#### 4.1 Προσέγγιση με μέγιστο ρεύμα

Οι προσέγγιση με μέγιστο ρεύμα είναι αρκετά απλή και δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας μόνο την τιμή του μέγιστου ρεύματος που θα περάσει από τον κλάδο.

Πριν αναλυθούν περαιτέρω λεπτομέρειες είναι σημαντικό να γίνει μια εισαγωγή για την δημιουργία ενός προσομοιωτή κυκλωμάτων, ευρέως γνωστό με το όνομα spice. Πριν προχωρήσουμε σε οποιαδήποτε ανάλυση για ηλεκτρομετανάστευση χρειάζεται να γίνει η επίλυση των παρασιτικών στοιχείων του κυκλώματος.

Δηλαδή στο πρώτο στάδιο του αλγορίθμου έχοντας σαν είσοδο το spice αρχείο και τις κυματομορφές ρεύματος γίνεται επίλυση με transient analysis και υπολογίζονται οι τάσεις σε κάθε κόμβο. Αυτό το κομμάτι μπορεί είτε να θεωρηθεί μέρος του προβλήματος είτε να χρησιμοποιείται κάποιο εμπορικό εργαλείο spice για να πάρουμε αυτά τα αποτελέσματα. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής υλοποιείται ένας spice like προσομοιωτής που δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ανάμεσα από διάφορες μεθόδους.

Έτσι δίνοντας το RLC αρχείο και τις κυματομορφές ρεύματος μπορεί να επιλεγεί η λύση του συστήματος είτε με παραγοντοποίηση LU κανονικών ή αραιών πινάκων είτε με επαναληπτικές μεθόδους, στην συγκεκριμένη περίπτωση οι επαναληπτικές μέθοδοι που έχουν υλοποιηθεί είναι η conjugate gradient (CG) για επίλυση συστημάτων με κυρίαρχη διαγώνιο είτε η bi conjugate gradient (Bi CG). Τέλος προσφέρεται για την επίλυση της transient analysis των συστημάτων η μέθοδος trapezoidal η backward Euler.

Με το τέλος της επίλυσης έχουμε ανάλογα με το βήμα που επιλέγουμε τις αντίστοιχες τιμές των τάσεων για κάθε χρονική στιγμή που επιλύεται το σύστημα. Είναι σημαντικό το βήμα που επιλέγουμε να μην είναι ούτε αρκετά μεγάλο αλλά ούτε και πολύ μικρό. Πιο συγκεκριμένα το μεγάλο βήμα θα

οδηγούσε στην απώλεια πληροφορίας καθώς θα μπορούσαμε να παραλείψουμε την χρονική στιγμή που θα εμφανιστεί το μέγιστο ρεύμα. Από την αντίθετη μεριά το μικρό βήμα θα οδηγούσε σε πολλές επιλύσεις συστημάτων με τις ίδιες τιμές αυξάνοντας το χρόνο εκτέλεσης του εργαλείου.

Συνεχίζοντας όμως με το πρόβλημα της ηλεκτρομεταναστευσης δεν είναι η τιμή της τάσης για κάθε χρονική στιγμή αυτή που μας ενδιαφέρει. Αυτό που θέλουμε να κρατήσουμε είναι το ρεύμα που διαρρέει τους κλάδους. Έτσι για κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται η διαφορά δυναμικού δύο κόμβων και διαιρείται προς την αντίσταση που υπάρχει. Προφανώς λόγω της RC φύσης του κυκλώματος, αφού πρόκειται κυρίως για power grid, μας ενδιαφέρουν μόνο οι αντιστάσεις. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι πηγές ρεύματος συνδέονται με την γείωση και καθορίζουν συγκεκριμένο ρεύμα που θα περάσει από τον κλάδο, και οι πυκνωτές δεν συμπεριφέρονται όπως τα άλλα παρασιτικά στοιχεία που επιτρέπουν το ρεύμα να περνάει.

Μετά το βήμα που περιγράφηκε έχουμε πλέον υπολογίσει το ρεύμα για κάθε χρονική στιγμή σε όλους τους κλάδους. Έχοντας επιλέξει την επιλογή με το μέγιστο ρεύμα το μόνο που χρειαζόμαστε είναι ο έλεγχος εάν το τωρινό ρεύμα είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο. Στο τέλος της προσομοίωσης του κυκλώματος θα έχουμε τα μέγιστα ρεύματα ολόκληρου του κυκλώματος που θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενα στάδια που περιγράφονται παρακάτω.

Τελειώνοντας αυτή την υποενότητα αξίζει να επαναλάβουμε ότι αυτή η υλοποίηση είναι η πιο απλή σε απαιτήσεις. Χρησιμοποιεί λίγη μνήμη καθώς για κάθε κλάδο κρατάμε μόνο μια τιμή και αν διαχωρίσει κανείς την προσομοίωση του κυκλώματος ελάχιστου υπολογισμούς. Βέβαια στα αρνητικά της είναι η ελάχιστη γνώση που έχουμε για τα ρεύματα σε κάθε κόμβο.

## 4.2 Προσέγγιση με στοχαστικό μοντέλο

Έχοντας περιγράψει στην προηγούμενη ενότητα την εκδοχή του αλγορίθμου με μέγιστο ρεύμα, που είναι και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη, παρουσιάζουμε μία μέθοδο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Η μέθοδος θεωρεί τα διάφορα ρεύματα των κλάδων σε κάθε χρονική στιγμή τυχαία και δημιουργεί μια στοχαστική διαδικασία. Η προσέγγιση αυτή υλοποιήθηκε καθώς είναι πολύ πεσιμιστικό να λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο το μέγιστο ρεύμα. Άλλωστε είναι πιθανό να εμφανίζεται ελάχιστες χρονικές στιγμές και να μην δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Πριν προχωρήσουμε όμως περαιτέρω στον αλγόριθμο κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια επανάληψη βασικών γνώσεων στοχαστικών διαδικασιών. Στοχαστική διαδικασία ορίζεται ως η αντιστοίχιση τυχαίων τιμών του δειγματικού χώρου σε συναρτήσεις. Μια στοχαστική διαδικασία μπορεί να γραφεί ως  $X(t, \omega)$  όπου  $t$  είναι η παράμετρος, και στην περίπτωση του προβλήματος που μελετάμε είναι ο χρόνος, ενώ  $\omega$  είναι τα στοιχεία του δειγματικού χώρου.

Έχοντας δώσει τον ορισμό μια στοχαστικής πρέπει να αναφέρουμε μία πολύ σημαντική ιδιότητα που έχει χρησιμοποιηθεί. Αυτή είναι η στασιμότητα, που μπορεί να απλοποιήσει τους υπολογισμούς της μέσης τιμής και της διασποράς. Στάσιμη θεωρείται μια στοχαστική διαδικασία που δεν εξαρτάται από την αρχική στιγμή της δειγματοληψίας παρά μόνο από τις χρονικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων τους. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$F_{X(t_1), \dots, X(t_k)}(x_1, \dots, x_k) = F_{X(t_1+\tau), \dots, X(t_k+\tau)}(x_1, \dots, x_k)$$

Υπάρχουν δύο κατηγορίες στασιμότητας. Η στάσιμη με την αυστηρή έννοια και η στάσιμη με την ευρεία έννοια. Στην πρώτη περίπτωση η μέση τιμή και η διασπορά είναι ίσες με ένα σταθερό αριθμό ενώ στη δεύτερη μόνο η μέση τιμή παραμένει σταθερή.

Αυτό που είναι σημαντικό για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί είναι να θεωρήσουμε την στοχαστική διαδικασία από της διάφορες κυματομορφές που έχουμε ως είσοδο μια στάσιμη στοχαστική διαδικασία. Η απόδειξη αυτή συνεπάγεται του θεωρήματος του Boronkon για τα renovating events. Βέβαια και χωρίς την χρήση του θεωρήματος μπορεί κάποιος εύκολα να παρατηρήσει ότι τηρούνται οι αναγκαίες συνθήκες για να είναι η στοχαστική στάσιμη. Δηλαδή οι κυματομορφές ρεύματος αρχίζουν να επαναλαμβάνονται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιώντας πλέον τις ιδιότητες της στασιμότητας μπορούμε να προχωρήσουμε στην ουσία του αλγορίθμου.

Βάσει λοιπόν αυτής της προσέγγισης δεν αλλάζουμε κάτι στο στάδιο υπολογισμού των τάσεων και των ρευμάτων στους κόμβους και κλάδους αντίστοιχα. Αυτό όμως που αλλάζει είναι ότι δεν αναζητάμε το μέγιστο ρεύμα σε κάθε χρονική στιγμή αλλά το μέσο. Έτσι λοιπόν μετά την επίλυση πρέπει να έχουμε γνώση των όλων των ρευμάτων που υπολογίστηκαν.

Στη συνέχεια και αφού εξηγήθηκε γιατί είναι στάσιμη η στοχαστική διαδικασία πρέπει να υπολογίσουμε τη μέση τιμή της σε κάθε χρονική στιγμή. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε υπολογίσει το μέσο ρεύμα κάθε χρονικής στιγμής. Σε σύγκριση με τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος έχουμε καλύτερη εικόνα για το ρεύμα που διαπερνάει το κύκλωμα που ελέγχουμε.

Προφανώς έχει διαφορά ο υπολογισμός της ηλεκτρομετανάστευσης προσεγγίζοντας το πρόβλημα με μέσο ρεύμα και με μέγιστο ρεύμα. Η

επιλογή του μέσου ρεύματος είναι πιο λογική από τη στιγμή που το κύκλωμα δεν θα λειτουργεί συνέχεια με μέγιστο ρεύμα. Έτσι μπορούμε να έχουμε μια πιο σωστή άποψη για το mean time to failure. Βέβαια είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι αυτός ο χρόνος είναι ιδιαίτερα μεγάλος και με το μέγιστο ρεύμα οπότε προς το παρόν θεωρούμε ότι αυτή η μέθοδος θα γίνει χρήσιμη στα επόμενα χρόνια που θα μειωθεί και άλλο το μέγεθος των κυκλωμάτων.

Τέλος σημαντική αναφορά αξίζει να γίνει για την μικρή διαφορά υπολογιστικής δύναμης και μνήμης που χρειάζονται ο υπολογισμός των μέσων ρευμάτων. Αρχικά διαχειρίζοντας σωστά την μνήμη μπορούμε να μην κρατάμε όλα τα πιθανά ενδεχόμενα για κάθε χρονική στιγμή. Λόγω του ότι δεν μας ενδιαφέρει η γνώση των καθεαυτών τιμών μπορούμε να προσθέτουμε κάθε φορά το αποτέλεσμα και στο τέλος να διαιρέσουμε με τον αριθμό των δειγμάτων. Συνεπώς δεν απαιτούνται πολλές παραπάνω πράξεις αλλά και η μνήμη που χρειάζεται είναι ίδια με την προσέγγιση του μέγιστου ρεύματος.

### **4.3 Αλγόριθμος ελέγχου παραβάσεων**

Αφού έχουμε πλέον τελειώσει με τους υπολογισμούς πρέπει σε πρώτο στάδιο να γνωρίζουμε εάν το κύκλωμα δεν έχει παραβάσεις σε σχέση με την ηλεκτρομετανάστευση. Δηλαδή θέλουμε να ελέγξουμε εάν το ρεύμα που περνάει στους κλάδους δεν κάνει τον αγωγό να σπάσει.

Σε αυτό το στάδιο χρειάζεται να γνωρίζουμε τα specifications του κυκλώματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το standard LEF και DEF. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο το LEF αρχείο που περιγράφει την πλήρη φυσική διάταξη ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, δηλαδή τις παραμέτρους με τις οποίες έχει σχεδιαστεί.

Σε αυτό το κομμάτι του αλγορίθμου μας ενδιαφέρει μόνο το μέγιστο ρεύμα. Δηλαδή η παραβίαση της πυκνότητας ρεύματος που μπορεί να αντέξει ο κλάδος γίνεται με την σύγκριση της μέγιστης πυκνότητας ρεύματος που πέρασε από το ολοκληρωμένο.

Έτσι αφού στις προηγούμενες υποενότητες περιγράφηκε πώς να επιλύεται το κύκλωμα και υπολογίζεται το μέγιστο ρεύμα, σε αυτό το στάδιο χρειάζεται να βρούμε την πυκνότητα. Η τιμές τις πυκνότητας μπορεί να διαφέρουν προφανώς στα διαφορετικά επίπεδα του κυκλώματος. Υπολογίζουμε λοιπόν όλες τις πυκνότητες ρεύματος σε και ελέγχουμε τις τιμές με τις σχεδιαστικές παραμέτρους.



Οι έξοδος αυτού του σταδίου δίνει στον χρήστη αναλυτικά του αποτελέσματα σε περίπτωση που υπήρχε παραβίαση, οπότε το κύκλωμα πρέπει να ξανασχεδιαστεί. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα να παρέχονται αναλυτικοί οι πυκνότητες ρεύματος σε κάθε κλάδο και σε αντιπαραβολή οι τιμές που μπορεί να αντέξει η γραμμή του καλωδίου.

Αυτό το κομμάτι του αλγορίθμου είναι σημαντικό καθώς δίνει λεπτομερή ανάλυση εάν το κύκλωμα μπορεί να λειτουργήσει έτσι όπως σχεδιάστηκε. Προφανώς οι υπολογισμοί για το mean time to failure δεν έχουν κάποια σημασία εάν δεν περάσει πρώτα αυτό το κομμάτι.

#### 4.4 Αλγόριθμος MTTF

Στα προηγούμενα κομμάτια περιγράφηκε η δυνατότητα που παρέχει το εργαλείο να δίνει αναλυτικά αποτελέσματα για την αντοχή των γραμμών διασύνδεσης του καλωδίου στην ηλεκτρομετανάστευση.

Πλέον αφού ένα κύκλωμα έχει περάσει τα προηγούμενα στάδια είναι σκόπιμο να εξετάσουμε το mean time to failure. Όπως έχει αναφερθεί και πρωτύτερα ο υπολογισμός αυτής της τιμής γίνεται με τον εμπειρικό τύπο που έχει δημιουργήσει ο Black και φαίνεται στην εξίσωση (1). Οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε κλάδο του κυκλώματος και παρέχεται ως έξοδος αναλυτικά το MTTF για κάθε κλάδο αλλά και για ολόκληρο το κύκλωμα. Προφανώς η δεύτερη τιμή είναι η μικρότερη από όλες όσες υπολογίστηκαν. Εάν σπάσει μία διασύνδεση στην πραγματικότητα δεν σημαίνει ότι θα χαλάσει εξ' ολοκλήρου το κύκλωμα. Για παράδειγμα σε ένα power grid θα μπορούσαμε να σπάσει μία διασύνδεση άλλα το κύκλωμα να συνέχιζε να λειτουργεί κανονικά. Απλά οι άλλοι κλάδοι θα είχαν μεγαλύτερη επιβάρυνση. Βέβαια σε όλη την βιβλιογραφία και στην παρούσα εργασία θεωρείται ως μέσος χρόνος αποτυχίας του κυκλώματος ο χρόνος ο οποίος θα χαλάσει μία διασύνδεση.

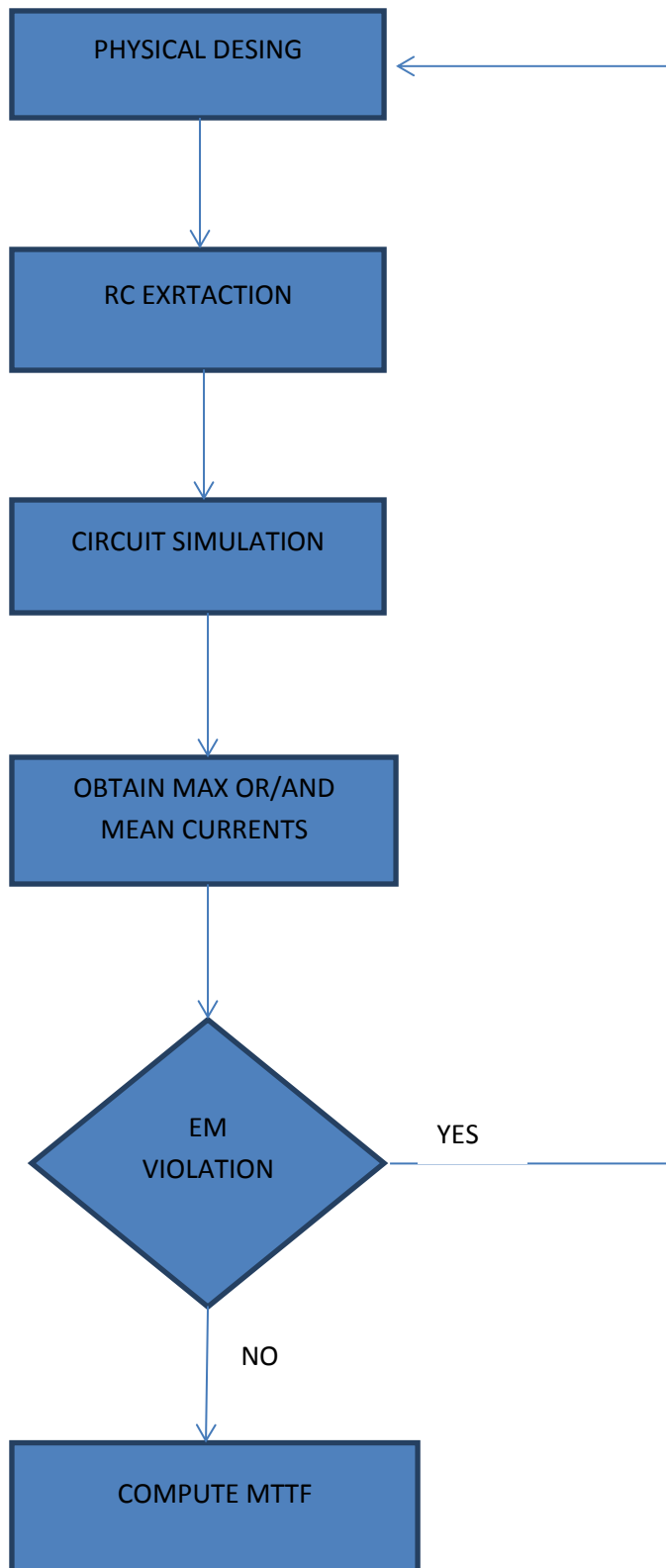
Ο υπολογισμός του MTTF θα γίνεται συνεχώς και πιο σημαντικός, όπως περιγράψαμε αναλυτικά, κάνοντας αυτό το κομμάτι αναπόσπαστο μέρος του εργαλείου. Σε αυτό το στάδιο γίνεται και ο διαχωρισμός εάν θα γίνουν οι υπολογισμοί με μέγιστο ή με μέσο ρεύμα. Αυτή η δυνατότητα γίνεται ώστε αφενός μεν να μπορεί να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα του εργαλείου με άλλες υλοποιήσεις, καθώς ο υπολογισμός αυτού του τύπου γίνεται με μέγιστο ρεύμα όσο αναφορά άλλες υλοποιήσεις που μπορεί να βρεθούν, όσο και γιατί είναι σημαντικό να εισάγουμε τον υπολογισμό με μέσο ρεύμα.

Θεωρούμε ότι οι επιλογή με μέσο ρεύμα δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα καθώς λαμβάνει υπόψη όλες τις τιμές ρευμάτων που μπορούν να διαπεράσουν έναν κλάδο, από τη στιγμή που το μέγιστο ρεύμα μπορεί να μην εμφανίζεται συχνά.

#### **4.5 Επισκόπηση του αλγορίθμου**

Σε αυτήν την υποενότητα δίνεται ολόκληρος ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε και σε μορφή ψευδοκώδικα, αλλά και ένα διάγραμμα ροής για την σχεδίαση ολοκληρωμένων με έλεγχο ηλεκτρομετανάστευσης. Γενικά εάν ένα μέρος του κυκλώματος ή ένα ολοκληρωμένο δεν καταφέρει να περάσει τον έλεγχο για τυχόν παραβάσεις τότε πρέπει να επανασχεδιαστεί. Γενικά στην βιομηχανία μαζί με τον έλεγχο για παραβάσεις κατά την προσημείωση υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις που θεωρούν πως για να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα πρέπει να γίνει current driven placement. Αυτή η κατηγορία placement δεν αναλύεται σε αυτή την διπλωματική

Έτσι το διάγραμμα ροής της διαδικασίας της ηλεκτρομετανάστευσης θα είναι ως εξής:



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής διαδικασία Ηλεκτρομετανάστευσης

Αφού περιγράφηκε η διαδικασία της ηλεκτρομετανάστευσης σε μορφή διαγράμματος δίνεται σε ψευδοκώδικα ο αλγόριθμος όπως περιγράφηκε και αναλύθηκε σε προηγούμενες υποενότητες.

Αναλυτικά ο αλγόριθμος:

---

```
1: Algorithm electromigration
2: Input: Extraction, current waveforms, physical specifications
3: Output: Violation due to electromigration, MTTF
4: mna= Build_mna_System(extraction,current waveforms);
5: nodeVoltages= perform_transient_analysis(mna);
6: interconnectCurrentDensity= compute_current_density(nodeVoltages);
7: violation= check_for_violation(interconnectCurrentDensity, physical
    Specifications);
8: if(violations>1) then
9:     return(Violation_Problem);
10: else
11:     If(max_current_approach==1) then
12:         maxCurrent=get_max_current(interconnectCurrentDensity);
13:         MTTF_statistics= compute_MTTF(maxCurrent, physical
            specifications);
14:         return(OK);
15:     else
16:         meanCurrent=compute_mean_current(interconnectCurrentD
            ensity);
17:         MTTF_statistics= compute_MTTF(meanCurrent, physical
            specifications);
18:         return(OK);
```

---

## Κεφάλαιο 5

### Πειραματική αξιολόγηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται πίνακες αποτελεσμάτων για διάφορες εκδοχές του αλγορίθμου.

#### 5.1 Αποτελέσματα κυκλωμάτων ISCAS

Η πειραματική αξιολόγηση έγινε με τα κυκλώματα c1355 με περίοδο 0.25 nanosecond και με το κύκλωμα c6288 με περίοδο 10 nanosecond. Θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα για υπολογισμούς με μέγιστο και μέσο ρεύμα. Οι κυματομορφές ρεύματος είναι αποτέλεσμα του Nanopower. Στους υπολογισμούς δεν ενσωματώθηκε ο παράγοντας A ενώ η θερμοκρασία θεωρήθηκε ότι είναι 105 βαθμοί Κελσίου.

Αρχίζοντας από το κύκλωμα c1355 το οποίο αποτελείται από 618 διασυνδέσεις που περιέχουν αντίσταση παραθέτουμε κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα που υπολογίστηκαν με τους εξής συνδυασμούς. Αρχικά το mean time to failure υπολογίζεται για κάθε κλάδο που περιέχει αντίσταση χρησιμοποιώντας το μέγιστο μέσο ρεύμα και το μέγιστο ρεύμα.

Πριν παραθέσουμε τα αποτελέσματα είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι μέγιστο ρεύμα θεωρείται το μέγιστο ρεύμα που έχει διαρρεύσει την αντίσταση κατά την διάρκεια της προσημείωσης, μέσο μέγιστο είναι από όλα τα μέγιστα για κάθε περίοδο ο μέσος όρος τους. Ενώ στην περίπτωση της στοχαστικής διαδικασίας έχουμε το μέσο μέγιστο που είναι από το μέσο όρο της στοχαστικής για κάθε περίοδο το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση για όλες τις χρονικές στιγμές και τέλος το ολικό μέσο είναι από την μέση τιμή της στοχαστικής το μέσο ρεύμα από όλες τις χρονικές στιγμές.

Ενδεικτικά κάποια δειγματοληπτικά αποτελέσματα για αρχικά για  $n=1$  και μετά για  $n=2$ . Ακόμα τα διαγράμματα είναι ταξινομημένα από τον μικρότερο χρόνο αποτυχίας προς το μεγαλύτερο.

Για n=1 και χρησιμοποιώντας μέγιστο ρεύμα:

Όνομα	Μέγιστο	Μέγιστο μέσο
R_603_236_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_235_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_234_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_233_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_232_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_231_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_230_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_229_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_228_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_227_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_226_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_225_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_224_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_223_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_222_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_221_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_220_s0	3.450139e+008	3.918235e+008
R_603_219_s40	1.510723e+019	1.380598e+019
R_603_218_s0	1.734187e+019	1.667487e+019
R_603_217_s0	2.081024e+019	2.032250e+019
R_603_216_s0	2.364800e+019	2.322571e+019
R_603_215_s0	2.295247e+019	2.268558e+019
R_603_214_s0	2.295247e+019	2.295247e+019
R_603_213_s0	3.001477e+019	2.408592e+019
R_603_212_s0	2.053642e+019	2.242483e+019
R_603_211_s0	3.251600e+019	2.567052e+019
R_603_210_s0	2.601280e+019	2.268558e+019
R_603_209_s0	2.601280e+019	2.295247e+019
R_603_208_s0	2.295247e+019	2.295247e+019
R_603_207_s0	7.758201e+019	6.845471e+019
R_602_205_s216	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_602_204_s0	1.300640e+020	1.300640e+020
R_602_203_s0	4.335466e+019	4.537116e+019
R_602_202_s0	5.574171e+019	4.877400e+019
R_602_201_s0	5.202560e+019	5.419333e+019
R_602_200_s0	2.601280e+019	2.709667e+019
R_602_199_s0	1.926874e+019	1.806444e+019
R_602_198_s0	1.445155e+019	1.327184e+019
R_602_197_s0	1.182400e+019	1.102237e+019
R_602_196_s0	9.634370e+018	9.032222e+018
R_602_195_s0	8.391225e+018	7.979386e+018
R_602_194_s0	8.129000e+018	7.930731e+018
R_602_193_s0	7.225777e+018	7.030486e+018

R_602_192_s0	8.436597e+018	7.866786e+018
R_602_191_s0	8.129000e+018	7.835180e+018
R_602_190_s0	7.030486e+018	6.881693e+018
R_602_189_s0	7.503704e+018	6.918308e+018
R_602_188_s0	7.432228e+018	6.918298e+018
R_602_187_s0	7.030486e+018	6.918298e+018
R_602_186_s0	6.585519e+018	6.106291e+018
R_602_185_s0	6.613423e+018	6.096750e+018
R_602_141_s0	4.141172e+005	3.113978e+005
R_602_140_s0	4.141172e+005	3.113978e+005
R_602_139_s0	4.141172e+005	3.113978e+005
R_602_138_s0	4.141172e+005	3.113978e+005
R_602_137_s0	4.141172e+005	3.113978e+005
R_602_136_s0	4.141172e+005	3.113978e+005
R_602_135_s0	4.141172e+005	3.113978e+005

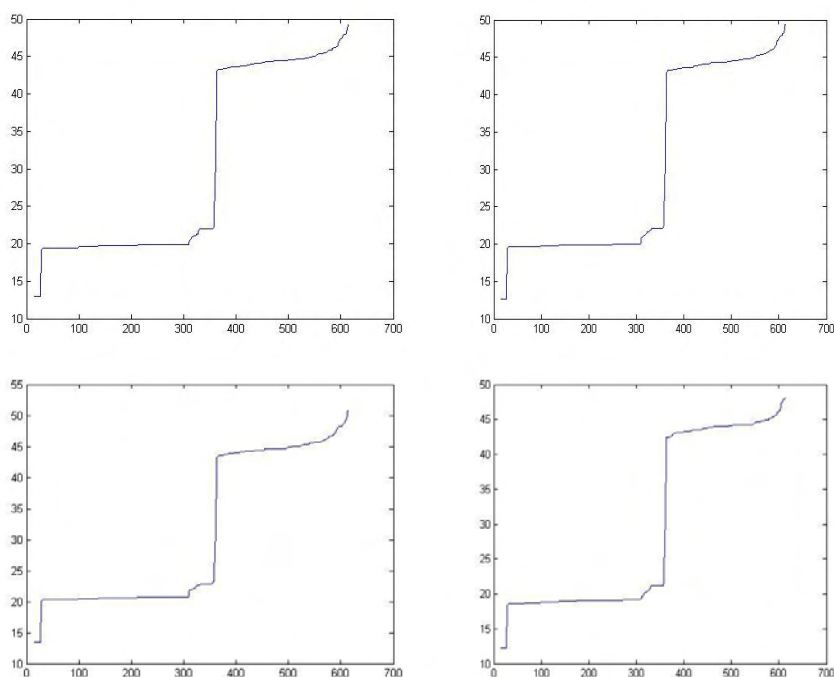
Για n=1 και χρησιμοποιώντας την στοχαστική:

Όνομα	Ολικό μέσο	Μέσο μέγιστο
R_603_236_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_235_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_234_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_233_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_232_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_231_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_230_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_229_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_228_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_227_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_226_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_225_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_224_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_223_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_222_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_221_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_220_s0	8.003946e+008	1.532579e+008
R_603_219_s40	1.852472e+019	1.095274e+019
R_603_218_s0	2.397493e+019	1.083867e+019
R_603_217_s0	3.696312e+019	1.300640e+019
R_603_216_s0	5.176676e+019	1.625800e+019
R_603_215_s0	4.264393e+019	1.625800e+019
R_603_214_s0	4.371899e+019	1.625800e+019
R_603_213_s0	4.908075e+019	1.625800e+019
R_603_212_s0	4.434000e+019	1.625800e+019
R_603_211_s0	5.100549e+019	1.625800e+019

R_603_210_s0	4.758439e+019	1.625800e+019
R_603_209_s0	4.701108e+019	1.625800e+019
R_603_208_s0	4.577032e+019	1.625800e+019
R_603_207_s0	2.216629e+020	2.909325e+019
R_602_205_s216	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_602_204_s0	4.729600e+020	3.251600e+019
R_602_203_s0	7.225777e+019	2.438700e+019
R_602_202_s0	7.062298e+019	4.877400e+019
R_602_201_s0	6.756571e+019	3.251600e+019
R_602_200_s0	3.411515e+019	1.625800e+019
R_602_199_s0	2.414181e+019	1.300640e+019
R_602_198_s0	1.871424e+019	8.129000e+018
R_602_197_s0	1.452215e+019	9.290285e+018
R_602_196_s0	1.218398e+019	6.503200e+018
R_602_195_s0	1.057431e+019	6.503200e+018
R_602_194_s0	1.043643e+019	6.503200e+018
R_602_193_s0	9.281998e+018	5.419333e+018
R_602_192_s0	1.055644e+019	6.293429e+018
R_602_191_s0	1.031231e+019	5.912000e+018
R_602_190_s0	9.306905e+018	5.419333e+018
R_602_189_s0	9.249010e+018	5.419342e+018
R_602_188_s0	8.985423e+018	4.645143e+018
R_602_187_s0	9.199929e+018	4.645143e+018
R_602_186_s0	8.189783e+018	5.002461e+018
R_602_185_s0	8.210247e+018	4.877400e+018
R_602_141_s0	6.842614e+005	2.205587e+005
R_602_140_s0	6.842614e+005	2.205587e+005
R_602_139_s0	6.842614e+005	2.205587e+005
R_602_138_s0	6.842614e+005	2.205587e+005
R_602_137_s0	6.842614e+005	2.205587e+005
R_602_136_s0	6.842614e+005	2.205587e+005
R_602_135_s0	6.842614e+005	2.205587e+005



Και τα αντίστοιχα διαγράμματα τους σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 5.1: Αποτελέσματα για το κύκλωμα c1355 και για  $n=1$ . Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

Για  $n=2$  και χρησιμοποιώντας μέγιστο ρεύμα:

Όνομα	Μέγιστο	Μέγιστο μέσο
R_603_236_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_235_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_234_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_233_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_232_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_231_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_230_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_229_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_228_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_227_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_226_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_225_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_224_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_223_s0	2.380692e+015	3.070514e+015

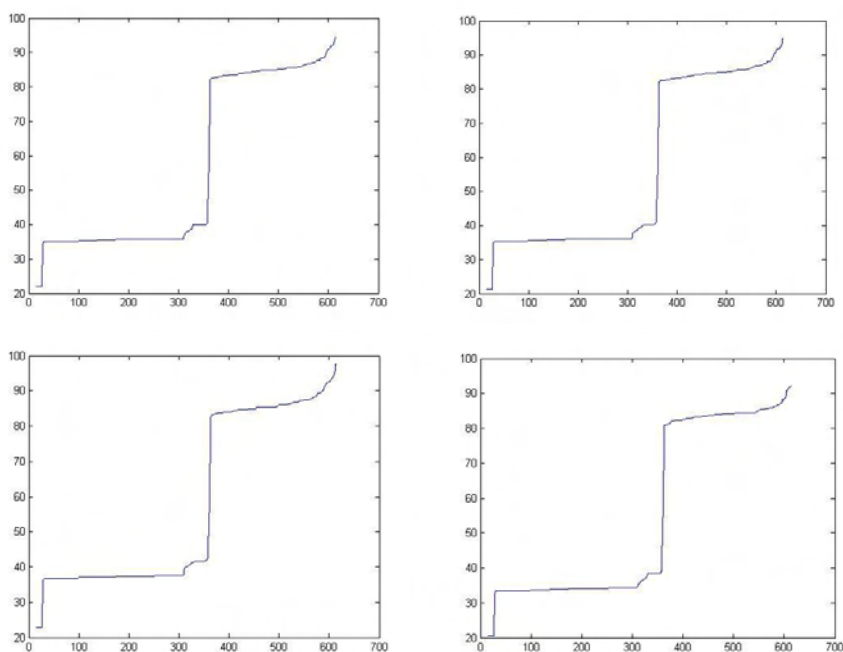
R_603_222_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_221_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_220_s0	2.380692e+015	3.070514e+015
R_603_219_s40	4.564568e+036	3.812100e+036
R_603_218_s0	6.014806e+036	5.561026e+036
R_603_217_s0	8.661321e+036	8.260079e+036
R_603_216_s0	1.118456e+037	1.078867e+037
R_603_215_s0	1.053632e+037	1.029271e+037
R_603_214_s0	1.053632e+037	1.053632e+037
R_603_213_s0	1.801773e+037	1.160264e+037
R_603_212_s0	8.434891e+036	1.005746e+037
R_603_211_s0	2.114580e+037	1.317952e+037
R_603_210_s0	1.353331e+037	1.029271e+037
R_603_209_s0	1.353331e+037	1.053632e+037
R_603_208_s0	1.053632e+037	1.053632e+037
R_603_207_s0	1.203794e+038	9.372096e+037
R_602_205_s216	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_602_204_s0	3.383328e+038	3.383328e+038
R_602_203_s0	3.759254e+037	4.117084e+037
R_602_202_s0	6.214277e+037	4.757806e+037
R_602_201_s0	5.413326e+037	5.873834e+037
R_602_200_s0	1.353331e+037	1.468459e+037
R_602_199_s0	7.425687e+036	6.526482e+036
R_602_198_s0	4.176949e+036	3.522833e+036
R_602_197_s0	2.796139e+036	2.429854e+036
R_602_196_s0	1.856422e+036	1.631621e+036
R_602_195_s0	1.408253e+036	1.273412e+036
R_602_194_s0	1.321613e+036	1.257930e+036
R_602_193_s0	1.044237e+036	9.885547e+035
R_602_192_s0	1.423523e+036	1.237726e+036
R_602_191_s0	1.321613e+036	1.227801e+036
R_602_190_s0	9.885547e+035	9.471539e+035
R_602_189_s0	1.126111e+036	9.572598e+035
R_602_188_s0	1.104760e+036	9.572568e+035
R_602_187_s0	9.885547e+035	9.572568e+035
R_602_186_s0	8.673811e+035	7.457357e+035
R_602_185_s0	8.747474e+035	7.434071e+035
R_602_141_s0	3.429861e+009	1.939372e+009
R_602_140_s0	3.429861e+009	1.939372e+009
R_602_139_s0	3.429861e+009	1.939372e+009
R_602_138_s0	3.429861e+009	1.939372e+009
R_602_137_s0	3.429861e+009	1.939372e+009
R_602_136_s0	3.429861e+009	1.939372e+009
R_602_135_s0	3.429861e+009	1.939372e+009

Για  $n=2$  και χρησιμοποιώντας την στοχαστική:

Όνομα	Ολικό μέσο	Μέσο μέγιστο
R_603_236_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_235_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_234_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_233_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_232_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_231_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_230_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_229_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_228_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_227_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_226_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_225_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_224_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_223_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_222_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_221_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_220_s0	1.281263e+016	4.697599e+014
R_603_219_s40	6.863307e+036	2.399251e+036
R_603_218_s0	1.149595e+037	2.349534e+036
R_603_217_s0	2.732545e+037	3.383328e+036
R_603_216_s0	5.359596e+037	5.286451e+036
R_603_215_s0	3.637010e+037	5.286451e+036
R_603_214_s0	3.822700e+037	5.286451e+036
R_603_213_s0	4.817840e+037	5.286451e+036
R_603_212_s0	3.932071e+037	5.286451e+036
R_603_211_s0	5.203120e+037	5.286451e+036
R_603_210_s0	4.528548e+037	5.286451e+036
R_603_209_s0	4.420084e+037	5.286451e+036
R_603_208_s0	4.189844e+037	5.286451e+036
R_603_207_s0	9.826887e+038	1.692835e+037
R_602_205_s216	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_602_204_s0	4.473823e+039	2.114580e+037
R_602_203_s0	1.044237e+038	1.189451e+037
R_602_202_s0	9.975211e+037	4.757806e+037
R_602_201_s0	9.130251e+037	2.114580e+037
R_602_200_s0	2.327686e+037	5.286451e+036
R_602_199_s0	1.165654e+037	3.383328e+036
R_602_198_s0	7.004458e+036	1.321613e+036
R_602_197_s0	4.217856e+036	1.726188e+036
R_602_196_s0	2.968988e+036	8.458321e+035
R_602_195_s0	2.236320e+036	8.458321e+035
R_602_194_s0	2.178381e+036	8.458321e+035

R_602_193_s0	1.723110e+036	5.873834e+035
R_602_192_s0	2.228771e+036	7.921449e+035
R_602_191_s0	2.126874e+036	6.990348e+035
R_602_190_s0	1.732370e+036	5.873834e+035
R_602_189_s0	1.710884e+036	5.873853e+035
R_602_188_s0	1.614756e+036	4.315470e+035
R_602_187_s0	1.692774e+036	4.315470e+035
R_602_186_s0	1.341451e+036	5.004924e+035
R_602_185_s0	1.348163e+036	4.757806e+035
R_602_141_s0	9.364273e+009	9.729227e+008
R_602_140_s0	9.364273e+009	9.729227e+008
R_602_139_s0	9.364273e+009	9.729227e+008
R_602_138_s0	9.364273e+009	9.729227e+008
R_602_137_s0	9.364273e+009	9.729227e+008
R_602_136_s0	9.364273e+009	9.729227e+008
R_602_135_s0	9.364273e+009	9.729227e+008

Και τα αντίστοιχα διαγράμματα τους σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 5.2: Αποτελέσματα για το κύκλωμα c1355 για  $n=2$ . Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

Το επόμενο κύκλωμα είναι πιο μεγάλο, το c6288, και αποτελείται από 4133 διασυνδέσεις που περιέχουν αντίσταση. Κάνοντας την ίδια ανάλυση παρατίθενται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα.

Για n=1 και χρησιμοποιώντας μέγιστο ρεύμα:

Όνομα	Μέγιστο	Μέγιστο μέσο
R_4138	3.593874e+016	7.115871e+016
R_4137	6.845474e+016	6.777019e+017
R_4136	3.422737e+015	3.388510e+016
R_4135	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4134	6.845474e+016	6.777019e+017
R_4133	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4132	3.422737e+015	3.388510e+016
R_4131	6.845474e+016	6.777019e+017
R_4130	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4129	3.422737e+015	3.388510e+016
R_4128	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4127	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4126	6.845474e+016	6.777019e+017
R_4125	3.422737e+015	3.388510e+016
R_4124	6.845474e+016	6.777019e+017
R_4123	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4122	3.422737e+015	3.388510e+016
R_4121	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4120	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4119	6.845474e+016	3.388510e+017
R_4118	3.422737e+015	1.129503e+016
R_4117	5.134117e+015	9.326194e+015
R_4116	8.416113e+008	8.761913e+008
R_80130_98460_v135	9.901313e+009	1.030814e+010
R_8130_98460_v143	9.901288e+009	1.030811e+010
R_80130_92860_v136	6.672715e+009	6.946883e+009
R_8130_92860_v144	6.672666e+009	6.946831e+009
R_80130_87260_v137	1.444222e+009	1.580956e+009
R_8130_87260_v145	1.067908e+009	1.204724e+009
R_80130_81660_v138	6.446733e+009	6.708849e+009
R_8130_81660_v146	6.446687e+009	6.708798e+009
R_80130_76060_v139	5.060468e+010	1.435293e+011
R_8130_76060_v147	6.461748e+009	6.726814e+009
R_80130_70460_v140	6.111838e+009	6.369644e+009
R_8130_70460_v148	6.111812e+009	6.369615e+009
R_80130_64860_v142	5.718895e+009	5.966387e+009
R_8130_64860_v150	5.718862e+009	5.966350e+009
R_80130_59260_v141	5.761927e+009	6.017238e+009
R_8130_59260_v149	5.761890e+009	6.017198e+009

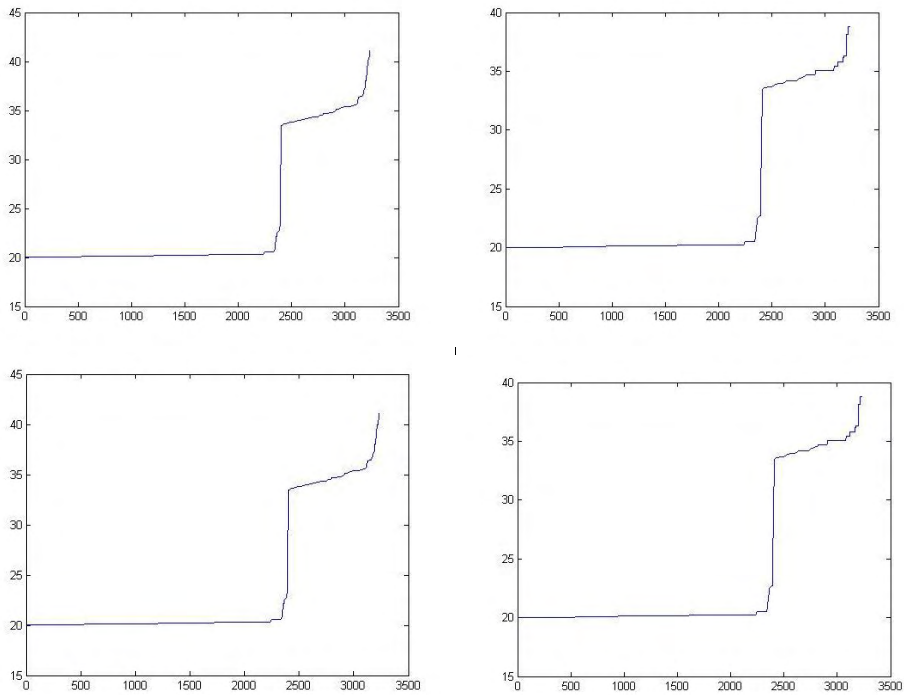
R_80130_53660_v122	1.203738e+009	1.323463e+009
R_8130_53660_v129	5.630900e+009	5.891658e+009
R_80130_48060_v121	5.579742e+009	5.817719e+009
R_8130_48060_v128	2.191534e+008	2.330048e+008
R_80130_42460_v123	7.025145e+009	7.361827e+009
R_8130_42460_v130	7.025092e+009	7.361770e+009
R_80130_36860_v124	6.234940e+009	6.549982e+009
R_8130_36860_v131	6.234905e+009	6.549944e+009
R_80130_31260_v126	6.134008e+009	6.461180e+009
R_8130_31260_v133	6.133975e+009	6.461143e+009
R_80130_25660_v125	6.795738e+009	7.178630e+009
R_8130_25660_v132	6.795694e+009	7.178581e+009
R_80130_20060_v127	7.149827e+009	7.590411e+009
R_8130_20060_v134	1.310702e+009	1.454076e+009
R_80130_14460_v115	1.462069e+009	1.607452e+009

Για  $n=1$  και χρησιμοποιώντας την στοχαστική:

Όνομα	Ολικό μέσο	Μέσο μέγιστο
R_4138	7.122994e+016	3.593874e+016
R_4137	6.777019e+017	6.845474e+016
R_4136	3.388510e+016	3.422737e+015
R_4135	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4134	6.777019e+017	6.845474e+016
R_4133	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4132	3.388510e+016	3.422737e+015
R_4131	6.777019e+017	6.845474e+016
R_4130	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4129	3.388510e+016	3.422737e+015
R_4128	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4127	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4126	6.777019e+017	6.845474e+016
R_4125	3.388510e+016	3.422737e+015
R_4124	6.777019e+017	6.845474e+016
R_4123	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4122	3.388510e+016	3.422737e+015
R_4121	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4120	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4119	3.388510e+017	6.845474e+016
R_4118	1.131389e+016	3.422737e+015
R_4117	9.326194e+015	5.134117e+015
R_4116	8.761913e+008	8.416113e+008
R_80130_98460_v135	1.030814e+010	9.901313e+009
R_8130_98460_v143	1.030811e+010	9.901288e+009
R_80130_92860_v136	6.946883e+009	6.672715e+009

R_8130_92860_v144	6.946831e+009	6.672666e+009
R_80130_87260_v137	1.580956e+009	1.444222e+009
R_8130_87260_v145	1.204724e+009	1.067908e+009
R_80130_81660_v138	6.708849e+009	6.446733e+009
R_8130_81660_v146	6.708798e+009	6.446687e+009
R_80130_76060_v139	1.435293e+011	5.060468e+010
R_8130_76060_v147	6.726814e+009	6.461748e+009
R_80130_70460_v140	6.369644e+009	6.111838e+009
R_8130_70460_v148	6.369615e+009	6.111812e+009
R_80130_64860_v142	5.966387e+009	5.718895e+009
R_8130_64860_v150	5.966350e+009	5.718862e+009
R_80130_59260_v141	6.017238e+009	5.761927e+009
R_8130_59260_v149	6.017198e+009	5.761890e+009
R_80130_53660_v122	1.323463e+009	1.203738e+009
R_8130_53660_v129	5.891658e+009	5.630900e+009
R_80130_48060_v121	5.817719e+009	5.579742e+009
R_8130_48060_v128	2.330048e+008	2.191534e+008
R_80130_42460_v123	7.361827e+009	7.025145e+009
R_8130_42460_v130	7.361770e+009	7.025092e+009
R_80130_36860_v124	6.549982e+009	6.234940e+009
R_8130_36860_v131	6.549944e+009	6.234905e+009
R_80130_31260_v126	6.461180e+009	6.134008e+009
R_8130_31260_v133	6.461143e+009	6.133975e+009
R_80130_25660_v125	7.178630e+009	6.795738e+009
R_8130_25660_v132	7.178581e+009	6.795694e+009
R_80130_20060_v127	7.590411e+009	7.149827e+009
R_8130_20060_v134	1.454076e+009	1.310702e+009
R_80130_14460_v115	1.607452e+009	1.462069e+009

Και τα αντίστοιχα διαγράμματα τους σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 5.3: Αποτελέσματα για κύκλωμα c6288 και n=1. Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

Για n=2 και χρησιμοποιώντας μέγιστο ρεύμα:

Όνομα	Μέγιστο	Μέγιστο μέσο
R_4138	2.583187e+031	1.012712e+032
R_4137	9.372103e+031	9.185598e+033
R_4136	2.343026e+029	2.296400e+031
R_4135	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4134	9.372103e+031	9.185598e+033
R_4133	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4132	2.343026e+029	2.296400e+031
R_4131	9.372103e+031	9.185598e+033
R_4130	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4129	2.343026e+029	2.296400e+031
R_4128	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4127	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4126	9.372103e+031	9.185598e+033
R_4125	2.343026e+029	2.296400e+031
R_4124	9.372103e+031	9.185598e+033



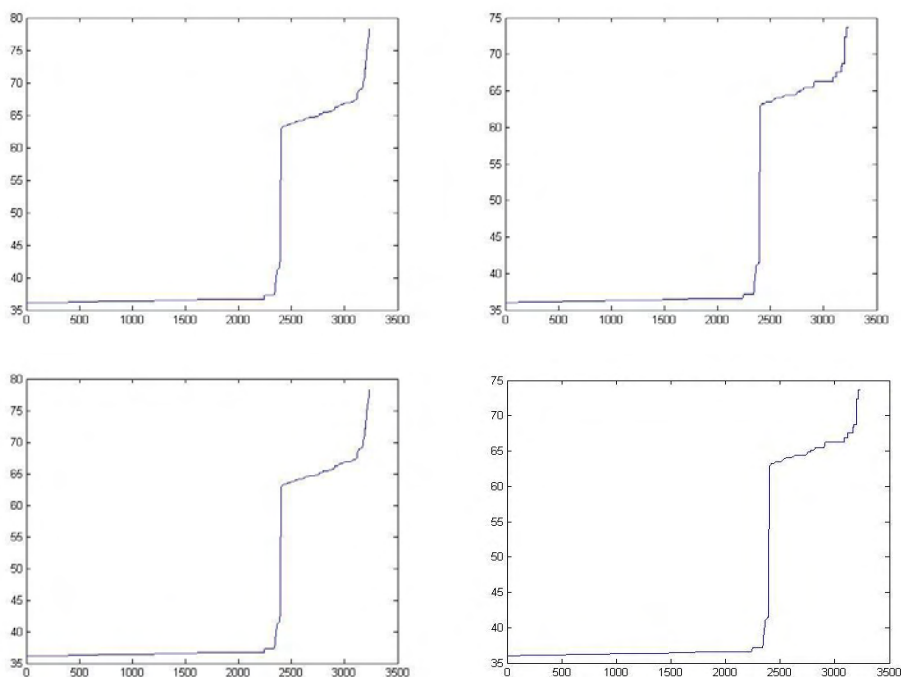
R_4123	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4122	2.343026e+029	2.296400e+031
R_4121	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4120	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4119	9.372103e+031	2.296400e+033
R_4118	2.343026e+029	2.551555e+030
R_4117	5.271832e+029	1.739558e+030
R_4116	1.416619e+016	1.535422e+016
R_80130_98460_v135	1.960720e+018	2.125153e+018
R_8130_98460_v143	1.960710e+018	2.125143e+018
R_80130_92860_v136	8.905024e+017	9.651837e+017
R_8130_92860_v144	8.904895e+017	9.651691e+017
R_80130_87260_v137	4.171553e+016	4.998844e+016
R_8130_87260_v145	2.280855e+016	2.902721e+016
R_80130_81660_v138	8.312074e+017	9.001730e+017
R_8130_81660_v146	8.311954e+017	9.001593e+017
R_80130_76060_v139	5.121667e+019	4.120135e+020
R_8130_76060_v147	8.350838e+017	9.050006e+017
R_80130_70460_v140	7.470914e+017	8.114472e+017
R_8130_70460_v148	7.470850e+017	8.114400e+017
R_80130_64860_v142	6.541153e+017	7.119554e+017
R_8130_64860_v150	6.541077e+017	7.119467e+017
R_80130_59260_v141	6.639960e+017	7.241431e+017
R_8130_59260_v149	6.639875e+017	7.241335e+017
R_80130_53660_v122	2.897969e+016	3.503110e+016
R_8130_53660_v129	6.341408e+017	6.942328e+017
R_80130_48060_v121	6.226704e+017	6.769170e+017
R_8130_48060_v128	9.605646e+014	1.085825e+015
R_80130_42460_v123	9.870531e+017	1.083930e+018
R_8130_42460_v130	9.870382e+017	1.083913e+018
R_80130_36860_v124	7.774894e+017	8.580452e+017
R_8130_36860_v131	7.774809e+017	8.580354e+017
R_80130_31260_v126	7.525211e+017	8.349370e+017
R_8130_31260_v133	7.525130e+017	8.349275e+017
R_80130_25660_v125	9.236410e+017	1.030654e+018
R_8130_25660_v132	9.236291e+017	1.030640e+018
R_80130_20060_v127	1.022401e+018	1.152287e+018
R_8130_20060_v134	3.435879e+016	4.228674e+016
R_80130_14460_v115	4.275290e+016	5.167807e+016

Για  $v=2$  και χρησιμοποιώντας την στοχαστική:

Όνομα	Ολικό μέσο	Μέσο μέγιστο
R_4138	1.014741e+032	2.583187e+031
R_4137	9.185598e+033	9.372103e+031
R_4136	2.296400e+031	2.343026e+029
R_4135	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4134	9.185598e+033	9.372103e+031
R_4133	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4132	2.296400e+031	2.343026e+029
R_4131	9.185598e+033	9.372103e+031
R_4130	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4129	2.296400e+031	2.343026e+029
R_4128	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4127	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4126	9.185598e+033	9.372103e+031
R_4125	2.296400e+031	2.343026e+029
R_4124	9.185598e+033	9.372103e+031
R_4123	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4122	2.296400e+031	2.343026e+029
R_4121	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4120	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000
R_4119	2.296400e+033	9.372103e+031
R_4118	2.560082e+030	2.343026e+029
R_4117	1.739558e+030	5.271832e+029
R_4116	1.535422e+016	1.416619e+016
R_80130_98460_v135	2.125153e+018	1.960720e+018
R_8130_98460_v143	2.125143e+018	1.960710e+018
R_80130_92860_v136	9.651837e+017	8.905024e+017
R_8130_92860_v144	9.651691e+017	8.904895e+017
R_80130_87260_v137	4.998844e+016	4.171553e+016
R_8130_87260_v145	2.902721e+016	2.280855e+016
R_80130_81660_v138	9.001730e+017	8.312074e+017
R_8130_81660_v146	9.001593e+017	8.311954e+017
R_80130_76060_v139	4.120135e+020	5.121667e+019
R_8130_76060_v147	9.050006e+017	8.350838e+017
R_80130_70460_v140	8.114472e+017	7.470914e+017
R_8130_70460_v148	8.114400e+017	7.470850e+017
R_80130_64860_v142	7.119554e+017	6.541153e+017
R_8130_64860_v150	7.119467e+017	6.541076e+017
R_80130_59260_v141	7.241431e+017	6.639960e+017
R_8130_59260_v149	7.241335e+017	6.639875e+017
R_80130_53660_v122	3.503110e+016	2.897969e+016
R_8130_53660_v129	6.942328e+017	6.341407e+017
R_80130_48060_v121	6.769170e+017	6.226704e+017
R_8130_48060_v128	1.085825e+015	9.605646e+014

R_80130_42460_v123	1.083930e+018	9.870531e+017
R_8130_42460_v130	1.083913e+018	9.870382e+017
R_80130_36860_v124	8.580452e+017	7.774894e+017
R_8130_36860_v131	8.580354e+017	7.774809e+017
R_80130_31260_v126	8.349370e+017	7.525211e+017
R_8130_31260_v133	8.349275e+017	7.525130e+017
R_80130_25660_v125	1.030654e+018	9.236410e+017
R_8130_25660_v132	1.030640e+018	9.236291e+017
R_80130_20060_v127	1.152287e+018	1.022401e+018
R_8130_20060_v134	4.228674e+016	3.435879e+016
R_80130_14460_v115	5.167807e+016	4.275290e+016

Και τα αντίστοιχα διαγράμματα τους σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 5.4: Αποτελέσματα για κύκλωμα c6288 και  $n=2$ . Πάνω δεξιά ολικό μέγιστο και αριστερά μέγιστο μέσο. Κάτω αριστερά το ολικό μέσο και δεξιά το μέσο μέγιστο.

## 5.2 Αξιολόγηση

Στην παραπάνω ενότητα παραθέσαμε τα αποτελέσματα για δύο κυκλώματα με διαγράμματα και ενδεικτικά αποτελέσματα. Είναι φανερό ότι οι λύσεις που λαμβάνουν υπόψη τους περισσότερη πληροφορία εκτός από το μέγιστο ρεύμα δίνουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής στο κύκλωμα. . Βέβαια σε κάθε περίπτωση αυτός ο χρόνος είναι πάρα πολύ μεγάλος αν και δεν έχει ενσωματωθεί στους υπολογισμούς η τιμή του  $A$  που μπορεί να κυμαίνεται ανάμεσα σε 0 και 1, χωρίς το μηδέν.

Για να φανεί η διαφορά και να τονιστεί η ανάγκη να μην λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο το μέγιστο ρεύμα θα πρέπει να έχουμε μεγαλύτερα κυκλώματα ώστε να αυξάνεται η ανάγκη τροφοδοσίας ρεύματος. Όμως ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να καταλάβουμε την διαφορά και την αναγκαιότητα της χρήσης στο μέλλον πιο αξιόπιστων μεθόδων όσο αφορά το μέγιστο ρεύμα, από τη στιγμή που το ολικό μέσο ρεύμα δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα και κατά την άποψη μας τα πιο ρεαλιστικά.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι τα κυκλώματα ελέχθησαν για παραβάσεις στην πυκνότητα ρεύματος που περνάει για κάθε στιγμή βάσει συγκεκριμένων specifications. Τα αποτελέσματα γενικά είχαν μεγάλη απόσταση και δεν διαπιστώθηκαν προβλήματα. Για να γινόταν κάτι τέτοιο το ρεύμα θα έπρεπε να αυξηθεί πολύ περισσότερο από 100 φορές.

# Κεφάλαιο 6

## Επίλογος

Τελειώνοντας την διπλωματική είναι σκόπιμο να γίνει μια ανασκόπηση γύρω από τα προβλήματα που προέκυψαν, αλλά και από τις μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

### 6.1 Συζήτηση

Η ηλεκτρομετανάστευση με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών γίνεται ένα σοβαρό πρόβλημα στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η ταχεία μείωση του συνολικού μέγεθος των κυκλωμάτων ( η state of the art κατάσταση είναι 20nm) και η αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος θα κάνει τους σχεδιαστές να μελετήσουν σε μεγαλύτερο βάθος το πρόβλημα. Αναγκαία θα γίνει και η παροχή εργαλείων αξιοπιστίας που θα επιλύουν πιο σύνθετα μοντέλα ώστε να μπορούν να παρέχουν και πιο ακριβή αποτελέσματα.

Βέβαια επειδή γίνονται πολλές αλλαγές και στα υλικά από τα οποία δημιουργούνται τα VLSI δεν θα πρέπει να αποκλειστεί και η πιθανότητα να εισαχθούν αλλά υλικά με περισσότερη αντοχή.

Κάνοντας μια ανασκόπηση της διπλωματικής δίνεται στον αναγνώστη η δυνατότητα κατανόησης του προβλήματος και ο πλήρης αλγόριθμος υπολογισμού της αντοχής του κυκλώματος στην ηλεκτρομετανάστευση.

### 6.2 Μελλοντικές προεκτάσεις

Η δουλειά που έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας μπορεί να βελτιστοποιηθεί και να γίνει ένα πλήρες εργαλείο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ώστε να δίνει αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια.

Αρχικά είναι μείζονος σημασίας να γίνει ένα profile του κώδικα και να βρεθούν τα απαιτητικά κομμάτια του. Η βελτιστοποίηση τέτοιων κομματιών είναι σημαντική καθώς τα power grid των σύγχρονων κυκλωμάτων αποτελούνται από εκατομμύρια κόμβους. Συνεπώς θα πρέπει να γίνεται σωστή διαχείριση της μνήμης και της υπολογιστικής ισχύος ώστε να ρεαλιστική η χρησιμοποίηση του εργαλείου.

Επίσης με την πάροδο του χρόνου είναι σημαντικό να υλοποιηθούν πιο πολύπλοκα μοντέλα για τον υπολογισμό των φυσικών παραμέτρων της εκάστοτε τεχνολογίας. Προφανώς η βελτίωση προς αυτή την κατεύθυνση θα κάνει το εργαλείο ανταγωνιστικό ως προς τα υπόλοιπα που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3, αλλά και για οποιαδήποτε εμπορική λύση διατεθεί στο μέλλον στο εμπόριο.

Το κύριο μοντέλο υπολογισμού που πρέπει να υλοποιηθεί είναι το μοντέλο του Kohronen που δίνει μία σχέση για την πίεση που δέχεται η μεταλλική γραμμή λόγω ηλεκτρομετανάστευσης. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε αυτή την παράμετρο καθώς έτσι θα μπορέσουμε να αναλύσουμε κομμάτια του ολοκληρωμένου που ενώ μπορεί να μην παρουσιάζουν παραβάσεις να έχουν πιθανότητες να δημιουργήσουν σφάλμα στο κύκλωμα, καθώς οι σχεδιαστικές παράμετροι των τρανζίστορ, των καλωδίων και άλλων κομματιών μπορεί να διαφέρουν αρκετά από την πραγματική υλοποίηση.

Για να υποστηριχθούν βέβαια όλα τα παραπάνω μοντέλα υπολογισμού και με την αύξηση των κόμβων και άρα και των κυματομορφών ρευμάτων θα είναι χρήσιμη και πιο δυνατοί στατιστικοί αναλυτές. Για παράδειγμα θα μπορούσε να γίνει η ενσωμάτωση μίας συνάρτησης υπολογισμού του μέγιστου ρεύματος με θεωρία ακραίων τιμών. Ουσιαστικά αυτό θα γίνει απαραίτητο για να μην χρειαστεί να επιλύουμε εξοντωτικά όλο το κύκλωμα, αλλά να μπορούμε να έχουμε μία καλή εκτίμηση μέσα σε κάποιες επαναλήψεις.

Ακόμα επειδή όλα τα εμπορικά εργαλεία αξιοπιστίας του παρέχουν γραφικές διεπαφές με το χρήστη για να είναι πιο φιλικά προς αυτόν, είναι σημαντικό να επεκταθεί το εργαλείο και προς αυτή την κατεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο θα ήταν χρήσιμο να αστικοποιηθούν και τα αποτελέσματα έχοντας σαν έξοδο ένα layout του κυκλώματος με κοκκινισμένες τις γραμμές καλωδίου που έχουν πρόβλημα η είναι κοντά στα όρια.

Τέλος χωρίς να έχει μικρότερη σημασία από τα προηγούμενα είναι σημαντική η αξιολόγηση του εργαλείου από πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα. Ουσιαστικά έχοντας μοντέλα υπολογισμού και τύπους δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι αν δεν επαληθευτούν στην πραγματικότητα. Άλλωστε και ο τύπος του Black βασίζεται σε εμπειρικές παρατηρήσεις του ίδιου.

## Βιβλιογραφία

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Electromigration>
- [2] [www.synopsys.com](http://www.synopsys.com)
- [3] "IA Blech", "Electromigration in thin aluminum films on titanium nitride", 1976, "Journal of Applied Physics"
- [4] Black, J.R. (September 1969). "Electromigration Failure Modes in Aluminium Metallization for Semiconductor Devices". *Proc. of the IEEE* **57** (9): 1587–94
- [5] "JR Black", " Electromigration —A brief survey and some recent results", 1969, *IEEE Trans. on Electron Devices* **16** (4): 338–347
- [6] KN Tu", "Recent advances on Electromigration in very-large-scale-integration of interconnects", 2003, "Journal of Applied Physics"
- [7] Baccelli, F. and Br6maud, P., Elements of Queuing Theory (Springer-Vedag, 1994).
- [8] Hau-Riege, Ch. S. An introduction to Cu electromigration. *Microel.Reliab.*, vol. 44 (2004), pp. 195–205.
- [9] J. Lienig: "Introduction to Electromigration-Aware Physical Design", *Proc. of the Int. Symposium on Physical Design (ISPD) 2006*, pp. 39–46, April 2006.
- [10] R. H. Tu and E. Rosenbaum, ``Berkeley Reliability Tools-BERT," *IEEE Trans. on Computer Aided Design of IC and Sys.*, vol. 12, no. 10, pp. 1524-1534, 1993.
- [11] C. C. Teng, Y. K. Cheng, E. Rosenbaum, and S. M. Kang, ``iTEM: A Temperature-Dependent Electromigration Reliability Diagnosos Tool," *IEEE Trans. on Computer Aided Design of IC and Sys.*, vol. 16, no. 8, pp. 882-893, 1993.

- [12] Changsup Ryu; Kee-Won Kwon; Loke, A.L.S.; Haebum Lee; Nogami, T.; Dubin, V.M.; Kavari, R.A.; Ray, G.W.; Wong, S.S.; (June 1999). "Microstructure and Reliability of Copper Interconnects". *IEEE Transactions on Electron Devices* **46** (6): 1113–9
- [13] Vaigar, A. V., Mhaisalkar, S. G., and Krishnamoorthy, A. Electromigration behavior of dual-damascene Cu interconnects – Structure, width, and length
- [14] Korhonen MA, Borgesen P, Tu KN, Li C-Y. *J Appl Phys* 1993;73:790.
- [15] Christine S. Hau-Riege, "Introductory Invited Paper An introduction to Cu electromigration" *Microelectronics Reliability* 44 (2004) 195–205
- [16] [http://www.ispd.cc/slides/slides\\_backup/ispd06/2-1.pdf](http://www.ispd.cc/slides/slides_backup/ispd06/2-1.pdf)
- [17] <http://schroder.personal.asu.edu/Electromigration.pdf>