



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ  
ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου  
κυκλώματος στα 30 GHz**

**Ματθαίος - Νικόλαος Γ. Κολλάρος**

**Επιβλέπων: Καθηγητής Πασχάλης Αντώνης**

**ΑΘΗΝΑ**

**Ιούλιος 2024**

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz: Μια ολοκληρωμένη μελέτη

**ΚΟΛΛΑΡΟΣ ΜΑΤΘΑΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**  
Α.Μ.: MM244

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Καθηγητής Πασχάλης Αντώνης

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ** Καθηγητής Γκιζόπουλος Δημήτριος  
Καθηγητής Πασχάλης Αντώνης  
Καθηγητής Συβρίδης Δημήτριος

Ιούλιος 2024

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική αφορά την ανάλυση και ερευνά κυκλωμάτων ομοεπίπεδων επαγωγών υψηλών συχνοτήτων, Η σύγχρονη ανάπτυξη της τεχνολογίας αυξάνει συνεχώς την ζήτηση κυκλωμάτων υψηλών συχνοτήτων, λόγω της ευρείας χρήσης τους σε απαραίτητες εφαρμογές. Η άρτια λειτουργία συστημάτων radars, Rfid και δορυφορικών επικοινωνιών είναι μόνο μερικά παραδείγματα της αναγκαιότητας ανάπτυξης τέτοιων εξελιγμένων κυκλωμάτων, ικανών να αυξήσουν την απόδοση και ταχύτητα όλων των παραπάνω εφαρμογών. Αρχικά θα τεθεί ένα βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που κρίνεται απαραίτητο πριν προβούμε σε προσομοιώσεις διαφόρων τύπου επαγωγέα με στόχο λειτουργίας συχνότητας τα 30 GHz. Το θεωρητικό υπόβαθρο βασίζεται στην ανάλυση θεμελιωδών εννοιών μαγνητισμού, υλικών και φαινομένων επαγωγής. Ακολουθεί η ανάλυση των απαραίτητων στοιχείων σχεδιασμού και δοκιμαστικές προσομοιώσεις. Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση πηνίων που θα παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά σε συχνότητα 30GHz, θα γίνουν με την πλατφόρμα Advanced Design System (ADS). Τέλος συζητούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το κεφάλαιο προσομοιώσεων με την διπλωματική να ολοκληρώνεται με μια σύντομη παράθεση μελλοντικών βημάτων που πιθανών θα εξελίξουν περαιτέρω την μέχρι στιγμής ερευνά που έχει αναπτυχθεί.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Προσομοίωση ομοεπίπεδων επαγωγέων

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Ομοεπίπεδος επαγωγός, υψηλές συχνότητες, ADS

## **ABSTRACT**

This thesis concerns the analysis and research of high frequency coplanar induction circuits, The modern development of technology continuously increases the demand for high frequency circuits, due to their wide use in necessary applications. The precise operation of radars, Rfid and satellite communications systems are just a few examples of the necessity of developing such sophisticated circuits, capable of increasing the performance and speed of all the above applications. Initially, a preliminary theoretical background will be established, which is considered as a necessary step, before we proceed with various types of simulations, with the aim of operating at a frequency of 30 GHz. The theoretical background is based on the analysis of basic concepts of magnetism, materials and induction phenomena. This is followed by the analysis of the necessary design elements and test simulations. The design and simulation of coils that will exhibit inductive behavior at a frequency of 30GHz will be done with the Advanced Design System (ADS) platform. Finally, the results obtained from the simulations chapter are discussed, with the thesis concluding with a short list of future steps that are likely to further develop the research that has been developed so far.

**SUBJECT AREA:** Simulation of coplanar inductors

**KEYWORDS:** Coplanar Inductors, high frequencies, ADS

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους με στήριξαν σε όλη την ακαδημαϊκή μου σταδιοδρομία. Η οικογένειά μου στάθηκε ως η ασπίδα και το δίκτυ ασφαλείας για όλα αυτά τα χρόνια, παρέχοντας την τόσο αναγκαία ψυχική υποστήριξη για να ακολουθήσω τα όνειρά μου. Ως εκ τούτου, πρέπει να τους εκφράσω τη βαθύτατη εκτίμησή μου, καθώς αποτελούν το θεμέλιο για την ακαδημαϊκή μου πορεία. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την εκλιπούσα καθηγήτρια Ευαγγελία Καραγιάννη για την καθοδήγηση στα πρώτα μου εκπαιδευτικά και επαγγελματικά βήματα και την υποψήφια διδάκτωρ Γιαννουσοπούλου Μαρκέλα του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ενέργειας και Ασφάλειας για την πολύτιμη ερευνητική καθοδήγηση στην πορεία του μεταπτυχιακού μου. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την ιδιαίτερη εκτίμηση μου στους επιβλέποντες καθηγητές μου, Γκιζόπουλο Δημήτριο. Πασχάλη Αντώνη και Συβρίδη Δημήτριο. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όσους πίστεψαν σε εμένα αλλά δυστυχώς είτε ξεχνάω είτε δεν μπορώ, λόγο χώρου, να αναφέρω.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Υπόβαθρο και κίνητρα μελέτης.....	12
1.2 Ερευνητικοί στόχοι:.....	13
1.3 Δομή διπλωματικής: .....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΗ ΝΟΜΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ.....	15
2.1 Ο Νόμος Του Ampere.....	15
2.2 Νόμος Faraday Και Νόμος Lenz.....	16
2.3 Νόμος του Gauss .....	17
2.4 Μαγνητικά Υλικά .....	18
2.5 Φερρομαγνητικά Υλικά.....	18
2.6 Παραμαγνητικά Υλικά.....	20
2.7 Διαμαγνητικά Υλικά .....	20
2.8 Διαδικασία Μαγνήτισης.....	20
2.9 Υστέρηση.....	21
2.10 Μαγνητική Διαπερατότητα $\mu$ .....	23
2.11 Δινορεύματα .....	25
2.12 Φαινόμενο Γειτνίασης.....	25
2.13 Βασικοί κανόνες Μαγνητικών Κυκλωμάτων .....	26
2.14 Επαγωγή: Ορισμοί.....	28
2.15 Αυτεπαγωγή και Αμοιβαία Επαγωγή .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ .....	31
3.1 Σχεδιασμος για ομοεπίπεδους επαγωγείς On-Chip:.....	31
3.2 Θεωρήσεις σχεδιασμού για ομοεπίπεδους επαγωγείς On-Chip: .....	31
3.3 Σχεδιασμός και Τεχνικές βελτιστοποίησης.....	34
3.4 Παράδειγμα επαγωγέα.....	34
3.5 Εξισώσεις επαγωγής .....	35

3.6 Παρασιτική δυνατότητα.....	37
3.7 Συχνότητα συντονισμού.....	39
3.8 Μηχανισμοί απωλειών.....	40
3.4 Επιλογή λογισμικού προσομοίωσης.....	41
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>42</b>
4.1 Ανάλυση προσομοιωμένων σχεδίων ομοεπίπεδων επαγωγέων στα 30 GHz:.....	42
4.2 Προετοιμασία προσομοίωσης.....	43
4.3 Αποτελέσματα.....	54
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>63</b>
5.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	63
5.2 Μελλοντικά βήματα.....	63
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>64</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΗ ΝΟΜΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ</b> .....	<b>15</b>
2.1 Αναπαράσταση του νόμου του Ampere.....	15
2.2 Δακτυλιοειδής πυρήνας. ....	16
2.3 Αναπαράσταση του νόμου του Faraday .....	17
2.4 Αναπαράσταση του νόμου του Lenz .....	18
2.5 Καμπύλες μαγνήτισης μαγνητικών υλικών. ....	18
2.6 Φερρομαγνητικές περιοχές.....	19
2.7 Τείχη Bloch.....	19
2.8 Διαδικασία μαγνήτισης με μετατόπιση τειχών και περιστροφή της διεύθυνσης των τομών Weiss .....	20
2.9 Καμπύλη υστέρησης. ....	22
2.10 Καμπύλες μαγνήτισης μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών .....	23
2.11 Μείωση της διατομής του αγωγού λόγω του επιδερμικού φαινομένου.....	25
2.12 Φαινόμενο γειννίαςσης .....	26
2.13 Μαγνητικός πυρήνας με διάκενο .....	26
2.14 Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα της εικόνας 2-13 .....	27
2.15 Αναπαράσταση του νόμου Gauss.....	28
2.16 Γραφική αναπαράσταση αντιστρεπτής επαγωγής. ....	29
2.17 Γραφική αναπαράσταση Διαφορικής επαγωγής και επαγωγής χορδής. ....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ</b> .....	<b>31</b>
3.1 Τετράγωνος σπειροειδής επαγωγέας.....	32
3.2 Εξαγωνικός σπειροειδής επαγωγέας .....	32
3.3 Οκταγωνικός σπειροειδής επαγωγέας.....	33
3.4 Κυκλικός σπειροειδής επαγωγέας .....	33
3.5 Παράδειγμα σχεδιασμού επαγωγέα.....	34
3.6 Παράδειγμα σχεδιασμού παρασιτισμός .....	37
3.7 Παράδειγμα σχεδιασμού παρασιτισμός .....	37
3.8 Παράδειγμα σχεδιασμού παρασιτισμός .....	38
3.9 Παράδειγμα σχεδιασμού συχνότητα συντονισμού .....	39



3.10 Παράδειγμα σχεδιασμού συχνότητα συντονισμού .....	39
3.11 Παράδειγμα σχεδιασμού Μηχανισμοί απωλειών συντονισμού .....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>42</b>
4.1 Το μενού για επιλογή του CoilSys.....	42
4.2 Το μενού για επιλογή κατασκευή επαγωγή .....	43
4.3 Πηνίο οκταγωνικής γεωμετρίας 3,5 περιελίξεων. ....	44
4.4 Το κουμπί 3D EM Preview Without EM Setup Preprocessing. ....	44
4.5 Το κομμάτι αγωγού .....	44
4.6 Το τρισδιάστατο μοντέλο πριν την αλλαγή .....	45
4.7 Το τρισδιάστατο μοντέλο πριν την αλλαγή .....	45
4.8 Ο αρχικός αγωγός αφού αυξήσαμε την x διάσταση.....	45
4.9 Τα επικολλημένα bridgehead, metal1 και bridgefoot. ....	45
4.10 Δισδιάστατο μοντέλο. ....	46
4.11 Τρισδιάστατο μοντέλο. ....	46
4.12 Το κουμπί Insert Pin. ....	47
4.13 metal1 στην είσοδο (δεξιά πλευρά του μοντέλου).....	47
4.14 metal1 στην έξοδο (αριστερή πλευρά του μοντέλου). ....	47
4.15 Τελικό μοντέλο.....	47
4.16 Το κουμπί Port Editor .....	48
4.17 Τα Pins πριν την αλλαγή.....	48
4.18 Τα Pins μετά την αλλαγή. ....	48
4.19 Το κουμπί EM Simulator Settings. ....	48
4.20 Επιλέγουμε ανάλυση FEM (Finite Element Method). ....	49
4.21 Το μενού Frequency Plan συμπληρωμένο. ....	49
4.22 Το μενού επιλογών αφού πατήσουμε Insert > Template .....	50
4.23 Γραφική παράσταση της αυτεπαγωγής.....	50
4.24 Από αριστερά προς τα δεξιά είναι bridgefoot, bridgehead, metal1 και τελικό pad .....	51
4.25 Το μενού του Plane .....	51
4.26 Τα pads πριν το metal1 Plane δισδιάστατο μοντέλο με όλα τα bridgefoot .....	52
4.27 Τα pads πριν το metal1 Plane τρισδιάστατο μοντέλο με όλα τα bridgefoot .....	52

4.28 Μετά το metal1 Plane .....	52
4.29 Αφού κάνουμε Flatten και σβήσουμε τον αγωγό στο κέντρο .....	52
4.30 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	54
4.31 Η Αυτεπαγωγή L.....	54
4.32 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	55
4.33 Η Αυτεπαγωγή .....	55
4.34 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	56
4.35 Η Αυτεπαγωγή .....	56
4.36 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	57
4.37 Η Αυτεπαγωγή .....	57
4.38 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	58
4.39 Η Αυτεπαγωγή: .....	58
4.40 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	59
4.41 Η κυματομορφή της Αυτεπαγωγής L. ....	59
4.42 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	60
4.43 Η κυματομορφή της Αυτεπαγωγής L. ....	60
4.44 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	61
4.45 Η κυματομορφή της Αυτεπαγωγής L. ....	61
4.46 Το δισδιάστατο μοντέλο.....	62
4.47 Η κυματομορφή της Αυτεπαγωγής L. ....	62



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στον 21<sup>ο</sup> αιώνα η τεχνολογική επανάσταση έχει εισχωρήσει σε κάθε πτυχή της ζωής των ανθρώπων. Από τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα μέχρι τα RFID chip και τους δορυφόρους GPS. Ένας από τους λόγους που συμβαίνει αυτό είναι η συνεχόμενη μείωση των διαστάσεων των στοιχείων και η αύξηση των συχνοτήτων (τεχνολογίες 4G και 5G, Ka band δορυφορικές επικοινωνίες κ.α.) στα στοιχεία αυτά. Όσο τα ηλεκτρονικά κυκλώματα γίνονται πιο μικρά, όλο και πιο συχνά τα παραδοσιακά πηνία δεν επαρκούν για να καλύψουν τις ανάγκες μας. Σε αυτή την ανεπάρκεια βοηθάει η μείωση της απόδοσής των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αλλά και η απώλεια σήματος που προκαλείτε λόγω αποστάσεων από την πηγή.

Τα on-chip coplanar (συνεπίπεδα ή ομοεπίπεδα) πηνία βοηθούν στην επίλυση αυτών των προβλημάτων λόγο

- α) καλύτερης ενσωμάτωσης επειδή κατασκευάζονται πάνω στο πυρίτιο
- β) μικρότερες απώλειες σήματος επειδή είναι κοντά στα ενεργά στοιχεία
- γ) καλύτερη βελτιστοποίηση των κυκλωμάτων λόγο αυξημένης προσαρμοστικότητας στην κατασκευή
- δ) καλύτερη αξιοποίηση χώρου επειδή τα on-chip παθητικά στοιχεία θα ακολουθούν την κλίμακα των ενεργών στοιχείων

Σε αυτή τη διπλωματική θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα Advanced Design System (ADS) για να σχεδιάσουμε και να προσομοιώσουμε ένα πηνίο που θα παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά σε συχνότητα 30GHz. Θα γίνει αναφορά στις αρχές των on-chip συνεπίπεδων πηνίων και θα αναφερθεί όλη η διαδικασία βήμα, βήμα. Στο τέλος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και θα προταθούν πιθανά μελλοντικά βήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Υπόβαθρο και κίνητρα μελέτης

Η εξέλιξη της σύγχρονης τεχνολογίας υψηλών συχνοτήτων είναι ένα συνεχώς αναπτυσσόμενο πεδίο τα τελευταία έτη. Η υπάρχουσα ανάγκη για την άρτια, γρήγορη και αξιόπιστη λειτουργία συσκευών υψηλών συχνοτήτων δημιουργεί ένα ιδανικό περιβάλλον ανάπτυξης και έρευνας.

Η παρούσα διπλωματική καλείτε να συμβάλει σε αυτό το ταχέως εξελισσόμενο πεδίο με την μελέτη προσομοιώσεων δόμησης συνεπίπεδων επαγωγών ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος υψηλής συχνότητας. Η μελέτη περιλαμβάνει την μοντελοποίηση και αξιολόγηση της απόδοσης και βελτιστοποίηση του επαγωγού για εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Προτού εμβαθύνουμε στην ανάλυση του απαραίτητου θεωρητικού υποβάθρου, όπως αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια, θα αποπειραθούμε να δώσουμε μια πολύ απλουστευμένη εισαγωγική εξήγηση του εγχειρήματος και των ορών που κρίνονται βασικοί και απαραίτητοι για την κατανόηση της παρούσας επιστημονικής διπλωματικής.

Οι επαγωγοί υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούμενοι σε ολοκληρωμένα κυκλώματα ραδιοσυχνοτήτων Radio Frequency Integrated Circuits (RFICs), αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας. Η ομαλή λειτουργία των κινητών τηλέφωνων, συστημάτων ασύρματης σύνδεσης όπως Wi-Fi και Bluetooth καθώς και η ακριβής λειτουργία συστημάτων Radar και Gps είναι μόνο λίγα από τα παραδείγματα της χρησιμότητάς τους. Η ομαλή και γρήγορη λειτουργία όλων των παραπάνω όμως απαιτεί, όπως είναι φυσικό, πληθώρα δεδομένων υψηλής ακρίβειας και ταχύτητας. Η κατασκευή και ενσωμάτωση ενός μικροσκοπικού ηλεκτρονικού εξαρτήματος ομοεπιπέδων επαγωγών υψηλής συχνότητας σε τσιπ φαίνεται να αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση όσον αφορά την εκπλήρωση των συγχρόνων τεχνολογικών απαιτήσεων.

Ας αναλύσουμε λοιπόν τις βασικές εννοιές του σχεδιασμού ομοεπιπέδων επαγωγών σε τσιπ. Αρχικά ο όρος ομοεπίπεδος (Coplanar), αφορά την διάταξη του επαγωγά. Βασικά χαρακτηριστικά του όπως η αντίσταση και η επαγωγή διαμορφώνονται καταλληλά από την τοποθέτηση των αγωγών σε όμοιο επίπεδο πάνω στο τσιπ. Ο επαγωγός με απλά λογία θα μπορούσε να περιγράψει ως ένα εξάρτημα, που κατά τη διάρκεια ροής ηλεκτρικού ρεύματος έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια σε μαγνητικό πεδίο. Ο σχεδιασμός, η ενσωμάτωση και η κατασκευή ενός ομοεπιπέδου επαγωγού ως μέρος ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος (Integrated circuit), διασφαλίζει την ακριβή και αποτελεσματική λειτουργία σε υψηλές συχνότητες.

Ουσιαστικά, η χρησιμότητα των ομοεπιπέδων επαγωγών υψηλών συχνοτήτων, αφορά την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή μαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Με την αποθήκευση και ελευθέρωση των απαραίτητων ποσοτήτων ενέργειας, συμβάλει σημαντικά στην ομαλή διατήρηση ηλεκτρικής ροής σε ένα κύκλωμα.

Το μικρό μέγεθος, καθώς και η άμεση σύνδεσή σε τσιπ, μειώνει αισθητά την απαιτούμενη απόσταση που διανύουν τα ηλεκτρικά σήματα, με άμεσο αποτέλεσμα και την μείωση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, ο σχεδιασμός ομοεπιπέδων επαγωγών σε κλειστό κύκλωμα έχει ως πλεονέκτημα την αυξημένη δυνατότητα φιλτραρίσματος ανεπιθύμητων σημάτων, συμβάλλοντας σημαντικά στον ακριβή συντονισμό και την ομαλή λειτουργία ενός κυκλώματος.

## 1.2 Ερευνητικοί στόχοι:

Ως αρχικός ερευνητικός στόχος της παρούσας πτυχιακής διπλωματικής, τίθεται η κάλυψη όλων βασικών αρχών και κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό ομοεπίπεδων επαγωγέων (on-chip coplanar inductors) που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες, όπως τα 30 GHz. Η μελέτη περιλαμβάνει επίσης μοντελοποίηση και αξιολόγηση απόδοσης επαγωγών για εφαρμογές υψηλής συχνότητας.

Το παραπάνω επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας χρήσης υπολογιστικών μοντέλων ικανών να προβλέψουν τον τρόπο συμπεριφοράς του επαγωγέα υπό ορισμένες συνθήκες, χωρίς τη φυσική κατασκευή του στοιχείου.

Κυριος στόχος της μεταπτυχιακής διπλωματικής είναι η επιτυχημένη ανάπτυξη αποδοτικών επαγωγέων ικανών να λειτουργούν αποτελεσματικά σε πολύ υψηλές συχνότητες, όπως τα 30 GHz.

## 1.3 Δομή διπλωματικής:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στο θέμα της μεταπτυχιακής διπλωματικής. Αναπτύσσεται η σημασία και αναγκαιότητα του άριου σχεδιασμού επαγωγών υψηλής συχνότητας και τέλος τίθενται οι βασικοί ερευνητικοί στόχοι της διπλωματικής.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η βασική θεωρία γύρω από τις έννοιες μαγνητισμού, υλικών και φαινομένων σχετικών με την επαγωγή υψηλής τάσης.

Το τρίτο κεφάλαιο, έχοντας πλέον καλύψει τις βασικές θεωρητικές έννοιες, αναλύονται οι βασικές έννοιες σχεδιασμού, όπως είναι η γεωγραφική διάταξη και η παρασιτική δυνατότητα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθεται ο τελικός σχεδιασμός και η προσομοίωση πηνίων ικανών να παρουσιάσουν επαγωγική συμπεριφορά σε συχνότητα 30GHz. Οι προσομοιώσεις γίνονται με χρήση της πλατφόρμας Advanced Design System (ADS).

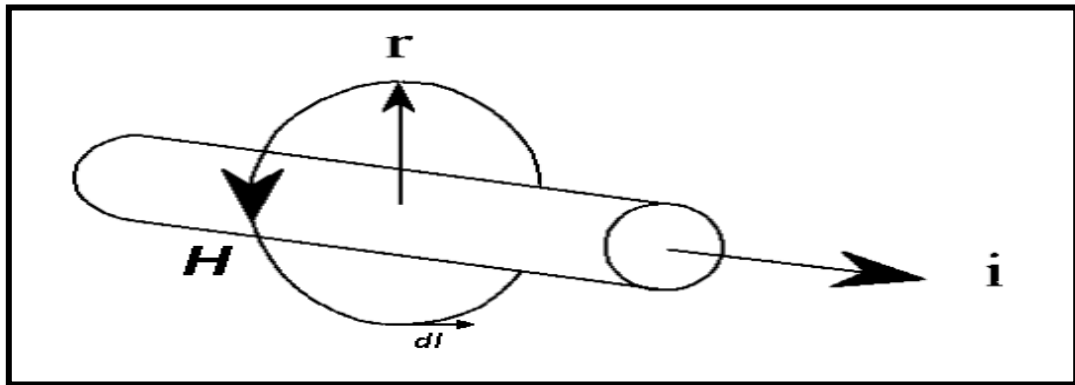
Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και τέλος παρατίθενται μελλοντικά βήματα που θεωρούνται χρήσιμα για της συνέχιση του ερευνητικού εγχειρήματος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βασική Νόμοι Μαγνητισμού

### 2.1 Ο Νόμος Του Ampere

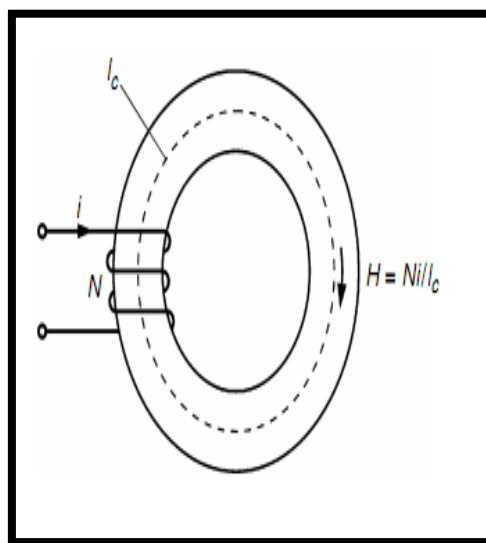
Κάθε ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο έντασης της οποίας, η μονάδα στο SI είναι τα Αμπερελίγματα ανά μέτρο [At/m]. Σύμφωνα με το νόμο του Ampere (Εικόνα 2.1 και εξίσωση 2.1) το ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε μια διαδρομή κλειστού τύπου είναι ίση με το συνολικό ρεύμα όπως περικλείεται από το μαγνητικό πεδίο του αγωγού.



Εικόνα 2.1 Αναπαράσταση του νόμου του Ampere.

$$\oint \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = \mu_0 \mathbf{i}, \quad \text{Νόμος Ampere (2.1)}$$

Σε περίπτωση που τα ρεύματα φέρονται από αγωγούς σε τύλιγμα με  $N$  σπείρες και ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό (ή κάποιου άλλου είδους υλικό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας), τότε το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται μέσα στον πυρήνα και η διαδρομή ολοκλήρωσης, είναι το μέσο μήκος του πυρήνα  $l_c$  (Εικόνα 3.2)



Εικόνα 2.2 Δακτυλιοειδής πυρήνας.



Συνεπώς, με κατάλληλη επίλυση του νόμου του Ampere έχουμε:

$$\boxed{Hl_c = Ni} \quad (2.2)$$

Όπου

**H** είναι το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου [**At/m**]

**dl** είναι το διάνυσμα μήκους της κλειστής διαδρομής με φορά τη διεύθυνση του **H** [**m**]

**l** είναι το μήκος της περιφέρειας της κλειστής διαδρομής [**m**]

**i** είναι το ρεύμα που ρέει στον αγωγό [**A**]

**N** είναι ο αριθμός περιελίξεων [**Καθαρός αριθμός**]

**l<sub>c</sub>** είναι το μέσο μήκος της μαγνητικής διαδρομής [**m**]

Η μέχρι στιγμής ανάλυση υποδεικνύει ότι, όταν ένας αγωγός είναι τυλιγμένος γύρω από πυρήνα καταλληλά κατασκευασμένο από μαγνητικό υλικό, το πεδίο περιορίζεται στον πυρήνα και είναι ανάλογο με την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του χρησιμοποιούμενου υλικού. Σε αυτή την περίπτωση το πεδίο ονομάζεται πεδίο **B** και είναι το ίδιο πεδίο εντός του χρησιμοποιούμενου υλικού, με βασική διαφορά την ένταση του πεδίου η οποία υπολογίζεται με βάση τον τύπο που παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.3.

Η μαγνητική διαπερατότητα ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την δυνατότητα κάθε υλικού να υποστηρίξει μέσα του ένα μαγνητικό πεδίο:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_{σχ} \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (2.3)$$

Όπου

**μ = μ<sub>0</sub>μ<sub>σχ</sub>** είναι η ειδική μαγνητική διαπερατότητα του κάθε μαγνητικού υλικού

**μ<sub>0</sub>** είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού **μ<sub>0</sub> = 4π \* 10<sup>-7</sup> H/m**

**μ<sub>σχ</sub>** είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνητικού υλικού

Το πεδίο **B** αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως, πυκνότητα μαγνητικής ροής (*magnetic flux density*) ή μαγνητική επαγωγή (*magnetic induction*).

Όπως ένα ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μια ροή φορτίων ομοίως κάθε μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μια μαγνητική ροή, η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (εξίσωση 2.4):

$$\boxed{\Phi = \int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S}} \quad (2.4)$$

Όπου **Φ** η μαγνητική ροή και **dS** η στοιχειώδη μονάδα επιφάνειας της διατομής του πυρήνα.

Όταν το άνυσμα **B** είναι ομοιόμορφο και διέρχεται κάθετα σε όλη την επιφάνια **S** η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή (εξίσωση 2.5):

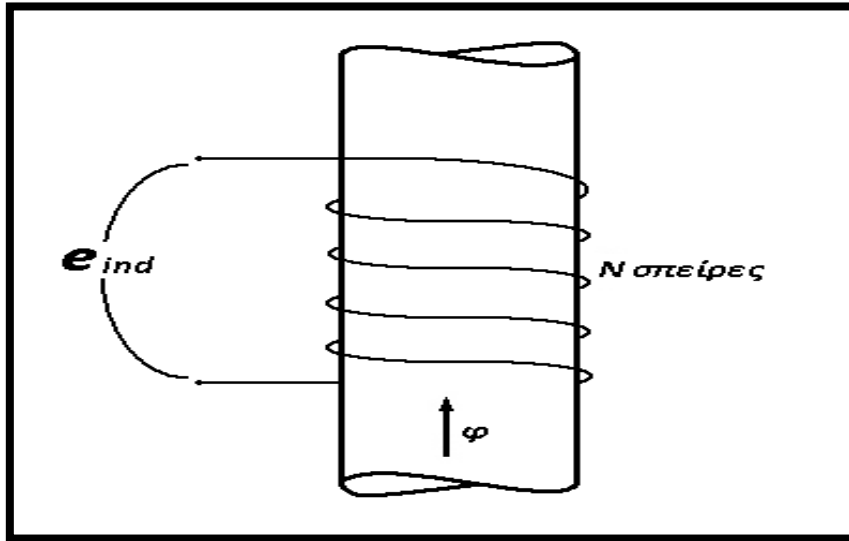
$$\boxed{\Phi = BS} \quad (2.5)$$

## 2.2 Νόμος Faraday Και Νόμος Lenz

Βάση του νομού Faraday όταν μια μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή περνά μέσα από **N** αριθμό σπειρών ενός τυλίγματος, επάγει μια τάση στα άκρα του. Εάν θέλουμε να υπολογίσουμε την τιμή της τάσης αυτής αξιοποιούμε την παρακάτω εξίσωση (εξίσωση 2.6):

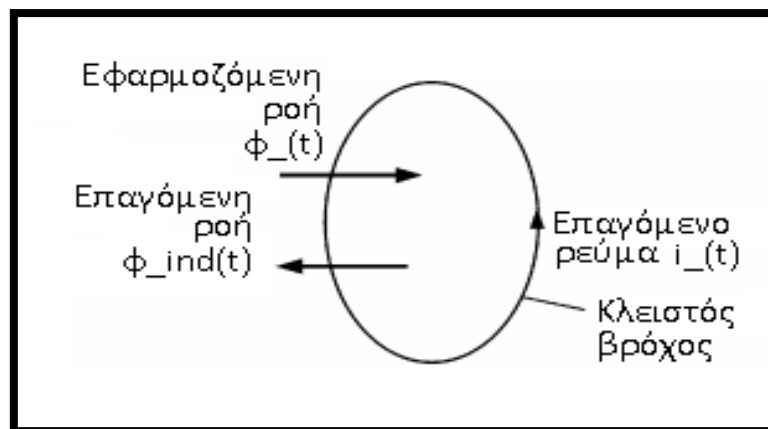
$$\mathbf{e}_{ind(t)} = -\mathbf{N} * \frac{d\phi(t)}{dt}, \quad \text{Νομος Faraday (2.6)}$$

Όπου  $\mathbf{e}_{ind(t)}$  η επαγόμενη τάση στα άκρα του τυλίγματος και  $\mathbf{N}$  ο αριθμός των σπειρών του όπως φαίνεται στην παρακατω εικόνα (εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 Αναπαράσταση του νόμου του Faraday

Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω εξίσωση (εξίσωση 2.6) ορίζεται αρνητικό πρόσημο πριν τον αριθμό σπειρών  $\mathbf{N}$ . Αυτό το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο νόμο του Lenz, (όπως αναπαρίσταται από την εικόνα 2.4) οποίος ορίζει πως κάθε χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή που διέρχεται από  $\mathbf{N}$  αριθμό σπειρών, τείνει να δημιουργήσει ένα ρεύμα τέτοιας φοράς, ώστε η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή που δημιουργείται είναι αντίθετη στην αρχική ροή.



Εικόνα 2.4 Αναπαράσταση του νόμου του Lenz.

## 2.3 Νόμος του Gauss

Ο νόμος του Gauss όσον αφορά τα μαγνητικά κυκλώματα ορίζει ότι, για οποιαδήποτε αυθαίρετης μορφής κλειστή επιφάνεια  $\mathbf{S}$ , η συνολική ροή εισόδου του όγκου που ορίζεται από την  $\mathbf{S}$  είναι ακριβώς ίση, με τη συνολική ροή που βγαίνει από τον όγκο. Συνεπώς η

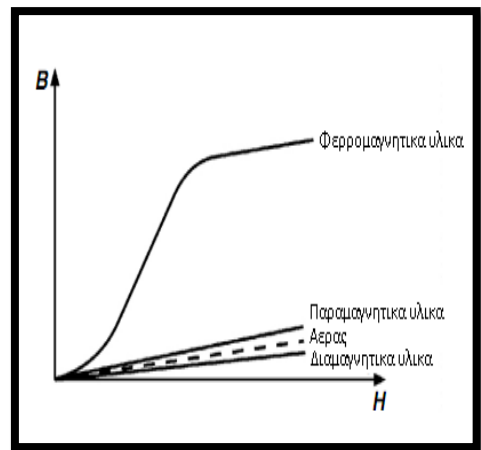
συνολική ροή διαμέσου της επιφάνειας  $S$ , όπως περιγράφεται από την εξίσωση 2.7, είναι μηδέν.

$$\int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (2.7)$$

## 2.4 Μαγνητικά Υλικά

Τα μαγνητικά υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες, βάση των μαγνητικών ιδιοτήτων τους. Οι τρεις αυτές κατηγορίες αφορούν τα Διαμαγνητικά υλικά, τα Παραμαγνητικά υλικά και τα Φερρομαγνητικά υλικά.

Οι τρεις αυτές κατηγορίες μαγνητικών υλικών παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Σημαντικές διαφορές παρατηρούνται στα εξής σημεία: Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούνται από άτομα, τα οποία δεν έχουν μόνιμες μαγνητικές στροφορμές. Αντίθετα, τα άτομα των παραμαγνητικών και φερρομαγνητικών υλικών αποτελούνται από άτομα τα οποία έχουν μόνιμες μαγνητικές στροφορμές. Επίσης, η μαγνητική διαπερατότητα κυμαίνεται κοντά στη μονάδα για τα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά ενώ, είναι εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές μεγαλύτερη για τα φερρομαγνητικά υλικά (Εικόνα 2.5, Εξίσωση 2.8) .



Εικόνα 2.5 Καμπύλες μαγνήτισης μαγνητικών υλικών.

$$\mu_{\sigma\chi} < \mu_0 \text{ διαμαγνητικά υλικά,} \quad \mu_{\sigma\chi} > \mu_0 \text{ παραμαγνητικά υλικά} \quad (2.8)$$

Τα παραπάνω μαγνητικά υλικά θα αναλυθούν εκτενέστερα στα υποκεφάλαια που ακολουθούν, μιας και η εις βάθος κατανόηση των ιδιοτήτων τους κρίνεται σημαντική για το εγχείρημα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής.

## 2.5 Φερρομαγνητικά Υλικά

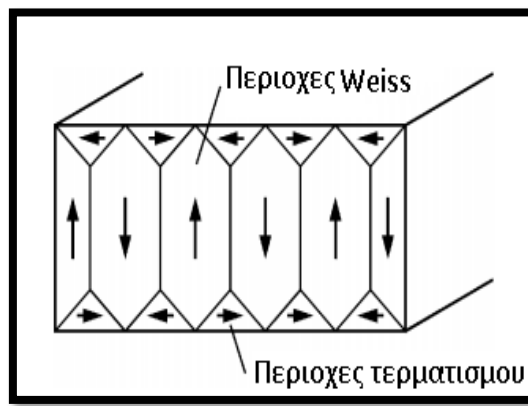
Με σκοπό την σωστή κατανόηση των ιδιοτήτων των φερρομαγνητικών υλικών, αποδίδεται μια περιληπτική εξήγηση της μαγνητικής συμπεριφοράς και της δομής των μετάλλων.

Κάθε ηλεκτρόνιο έχει ένα ηλεκτρικό φορτίο και την προσωπική του μαγνητική στροφορμή (spin)., Επίσης η περιστροφή του ηλεκτρινού γύρω από τον πυρήνα του ατόμου αποδίδει την ιδιότητα σε κάθε ηλεκτρόνιο να έχει μια ακόμα μαγνητική στροφορμή που ονομάζεται τροχιακή στροφορμή. Στα περισσότερα άτομα τα ηλεκτρόνια είναι κατανεμημένα με τέτοιο τρόπο ώστε, η ολική μαγνητική στροφορμή του ατόμου να είναι μηδέν. Παρολαυτα εάν

παρατηρήσουμε τον περιοδικό πίνακα διαπιστώνουμε ότι το περισσότερο από το ένα τρίτο των ατόμων, παρουσιάζει μη μηδενική μαγνητική στροφορμή.

Στα μέταλλα τα άτομα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, ορίζοντας τις μαγνητικές ιδιότητες όλου του υλικού. Σε μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων προκύπτει ότι οι μαγνητικές στροφορμές των ατόμων σε κρυσταλλικό πλέγμα είναι διασυνδεδεμένες από δυνάμεις σύζευξης. Εφόσον οι μαγνητικές στροφορμές, είναι παράλληλες στο κρυσταλλικό πλέγμα τότε αθροίζονται και έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα το φερρομαγνητικό φαινόμενο.

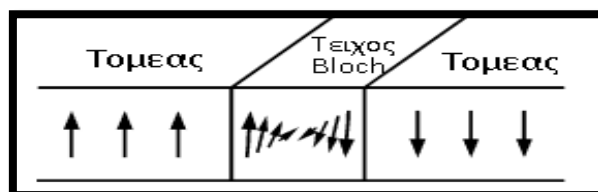
Διαπιστώνουμε ότι οι περισσότεροι ατομικοί μαγνήτες είναι παραλληλισμένοι αφού οι δυνάμεις σύζευξης στα φερρομαγνητικά υλικά τεχνικού ενδιαφέροντος είναι αρκετά δυνατές, ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου. Παρ' όλα αυτά, παρατηρούμε ότι ο παραλληλισμός αυτός δεν συμβαίνει σε όλη τη δομή του υλικού, αλλά μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές (τομείς) οι οποίες ονομάζονται “φερρομαγνητικές περιοχές” ή “τομείς Weiss” (εικόνα 2.6). Το μέγεθος των περιοχών κυμαίνεται από 0,001mm<sup>3</sup> μέχρι 1mm<sup>3</sup>.



Εικόνα 2.6 φερρομαγνητικές περιοχές.

Η άθροιση των επιμέρους ατομικών μαγνητών δίνει την δυνατότητα σε κάθε τομέα να περιέχει αρκετά άτομα ώστε να χαρακτηρίζεται από τη συνολική μαγνητική στροφορμή του. Με σκοπό την ελαχιστοποίηση του ολικού εξωτερικού πεδίου (με άμεσο αποτέλεσμα την διατήρηση της ενέργειας σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα), η διεύθυνση των περιοχών σε ένα μη μαγνητισμένο κρύσταλλο είναι τυχαίες προς όλες τις πιθανές κατευθύνσεις,. Το ολικό εξωτερικό πεδίο ελαχιστοποιείται επίσης από την παρουσία των “περιοχών τερματισμού” (εικόνα 2.6).

Σε κάθε κρύσταλλο οι περιοχές διαχωρίζονται από όρια τα οποία ονομάζονται “Τείχη περιοχών” ή “τείχη Bloch” πέραν των οποίων οι μαγνητικές στροφορμές των περιοχών αλλάζουν διεύθυνση (εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 Τείχη Bloch.

Ο παραπάνω μηχανισμός άθροισης των ατομικών μαγνητικών στροφορμών έχει ως αποτέλεσμα την μαγνήτιση των περιοχών στα φερρομαγνητικά υλικά. Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί ως μια ξεχωριστή (και ξεκάθαρα ορισμένη) για κάθε υλικό θερμοκρασία, η οποία ονομάζεται “θερμοκρασία Curie”  $T_c$ . Όταν η θερμοκρασία του υλικού, ξεπεράσει την θερμοκρασία Curie τότε οι θερμικές ταλαντώσεις των ατομικών μαγνητών αυξάνονται σημαντικά έως ότου ξεπεράσουν τις συζευγμένες δυνάμεις που κρατούν ευθυγραμμισμένους τους ατομικούς μαγνήτες των περιοχών.

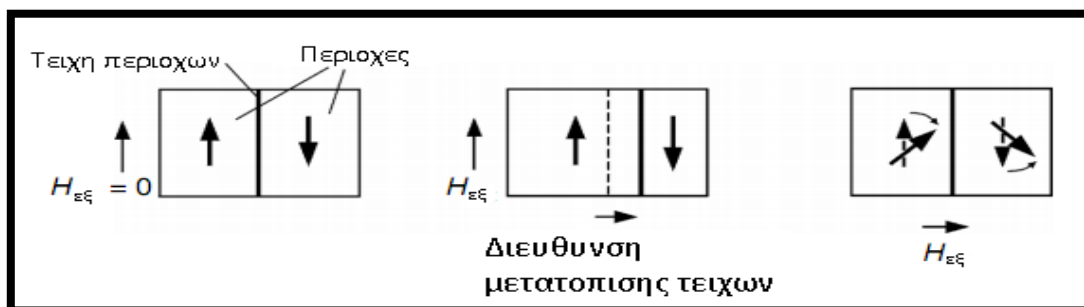
Όταν το φερρομαγνητικό υλικό ψηχθεί, οι μαγνητικές περιοχές επανέρχονται αλλά οι μαγνητικές στροφορμές θα είναι προσανατολισμένες τυχαία. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα το εξωτερικό πεδίο του υλικού να είναι μηδέν. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, όταν θερμανθεί ένα φερρομαγνητικό υλικό σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας Curie, επέρχεται η πλήρης απομαγνητοποίηση του.

## 2.6 Παραμαγνητικά Υλικά

Τα παραμαγνητικά υλικά, εξαιτίας της παρουσίας ατόμων με μόνιμες μαγνητικές στροφορμές, έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα, μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας. Αυτά τα άτομα αλληλοεπιδρούν πολύ αδύναμα μεταξύ τους και έχουν τυχαίες διευθύνσεις βάση της απουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η τοποθέτηση ενός παραμαγνητικού υλικού σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, διαμορφώνει καταλλήλως τις μαγνητικές στροφορμές ώστε να παραλληλίζονται με το πεδίο. Ο παραπάνω παραλληλισμός βρίσκεται σε ανταγωνισμό με τη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων, η οποία προδιαθέτει στη τυχαία διεύθυνση των μαγνητικών στροφορμών.

## 2.7 Διαμαγνητικά Υλικά

Ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αλλάζει την τροχιακή ταχύτητα των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα και κατά συνέπεια η μαγνητική στροφορμή των μαγνητικών δίπολων μεταβάλλεται. Σε περίπτωση που διαμαγνητικό υλικό τοποθετηθεί σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, επάγεται σε αυτό μια μικρή μαγνητική στροφορμή με διεύθυνση αντιπαράλληλη του εξωτερικού πεδίου. Αυτό δίνει την ιδιότητα στα μαγνητικά υλικά να απωθούνται από τους μαγνήτες. Σύμφωνα με το νόμο του Lenz, αυτά τα ηλεκτρόνια αντιτίθενται στις αλλαγές μαγνητικού πεδίου από το εξωτερικό πεδίο. Ανεξαρτητως του γεγονότος ότι ο διαμαγνητισμός είναι παρών σε όλα τα υλικά, η επίδρασή του είναι τόσο μικρή σε σχέση με τον φερρομαγνητισμό και τον παραμαγνητισμό, που παρατηρείται απουσία αυτών των δύο φαινομένων.



Εικόνα 2.8 Διαδικασία μαγνήτισης με μετατόπιση τειχών και περιστροφή της διεύθυνσης των τομέων Weiss

## 2.8 Διαδικασία Μαγνήτισης

Προκειμένου να εμβαθύνουμε περαιτέρω στη διαδικασία μαγνητισμού ενός υλικού θεωρούμε ένα μη μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό. Έστω λοιπόν, ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $H_{εξ}$  με διεύθυνση παράλληλη στις περιοχές των μαγνητικών

στροφορμών. Όσο αυξάνεται η ένταση του  $H_{εξ}$  παρατηρούμε ότι υπάρχει μετακίνηση στα τείχη των περιοχών (μετατόπιση τειχών). Αρχικά η διαδικασία αυτή γίνεται με αργό ρυθμό, έπειτα πιο γρήγορα και στο τέλος με άλματα. Με βάση την επιρροή του  $H_{εξ}$  οι μαγνητικές στροφορμές υπόκεινται σε ροπή, η οποία τείνει να τις ευθυγραμμίσει με τη διεύθυνση του  $H_{εξ}$ . Αμεσο αποτέλεσμα του παραπάνω είναι ότι τα τείχη των περιοχών μετακινούνται και οι περιοχές που ευθυγραμμίζονται με το  $H_{εξ}$  αυξάνονται από την κίνηση των τειχών μέσα στις περιοχές, με διεύθυνση αντίθετη του  $H_{εξ}$ . Η μαγνήτιση είναι η μέση τιμή των ατομικών μαγνητών ανά μονάδα όγκου του υλικού και όπως παρατηρείτε αυξάνεται.

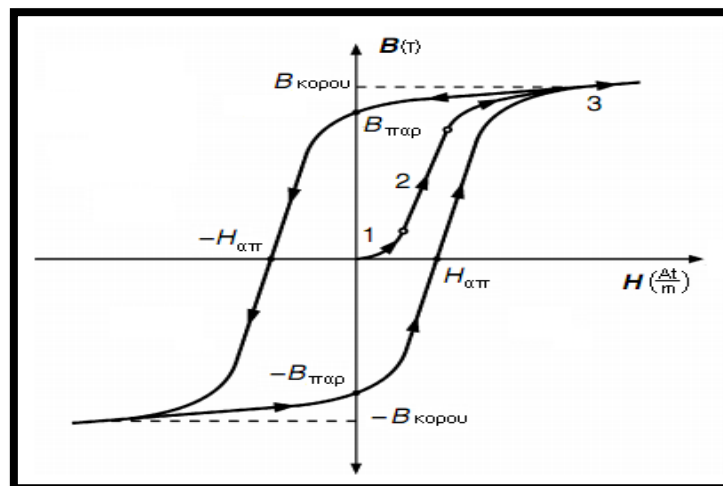
Εφόσον παρατηρείται μικρή ένταση στο εξωτερικό πεδίο, η μετατόπιση των τειχών των περιοχών είναι αντιστρεπτή. Στην περίπτωση όμως που το  $H_{εξ}$  είναι μεγαλύτερης έντασης, διαπιστώνεται μη ελαστική μετατόπιση των τειχών, η οποία με τη σειρά της προκαλεί υστέρηση όπως αναλύεται στο παρακάτω υποκεφάλαιο στη γραφική  $H - B$  του υλικού. Όταν υπερβαίνεται ένα συγκεκριμένο όριο του  $H_{εξ}$  τα τείχη των περιοχών πραγματοποιούν “άλματα Barkhausen”. Με αυτά τον τρόπο η περιοχή που έχει την ίδια διεύθυνση με το εφαρμοζόμενο πεδίο, απορροφά την παρακείμενη περιοχή με διεύθυνση αντίθετη του  $H_{εξ}$ .

Σε περίπτωση που υπάρξει περαιτέρω αύξηση της έντασης του εξωτερικού πεδίου, προκύπτει η διαδικασία της “περιστροφής περιοχών”. Οι περιοχές μαγνητικών στροφορμών περιστρέφονται με στόχο την αύξηση της ολικής μαγνήτισης, αποκτώντας έτσι τη διεύθυνση του  $H_{εξ}$ .

Η μετατόπιση τειχών, τα άλματα Barkhausen και η περιστροφή περιοχών περιλαμβάνονται στη διαδικασία μαγνητισμού. Στην περίπτωση των φερρομαγνητικών μετάλλων, η αρχική διαδικασία αποτελείται κυρίως από τη μετατόπιση τειχών και τα άλματα Barkhausen. Από την άλλη μεριά, η περιστροφή περιοχών συμβαίνει στο τέλος της διαδικασίας, για να γίνει και η τελική ευθυγράμμιση στην επιθυμητή διεύθυνση, όπως ορίζεται από το  $H_{εξ}$ .

## 2.9 Υστέρηση

Ας θεωρήσουμε έναν κυκλικό μαγνητικό πυρήνα με τυλίγματα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.9), προκειμένου να αναλύσουμε την καμπύλη μαγνήτισής του. Αρχικά το ρεύμα είναι μηδέν και δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, και κατά συνέπεια ούτε πυκνότητα μαγνητικής ροής. Όταν αρχίσει η αύξηση του ρεύματος στα τυλίγματα, θα αρχίσει και η δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου. Κατά το νόμο του Ampere. Η μικρή αυτή αρχική αύξηση “1” αντιστοιχεί σε αμετάβλητη μετακίνηση των τειχών των μαγνητικών τομέων του πυρήνα. Με περεταίρω αύξηση “2” του ρεύματος δημιουργείται, μεγαλύτερης έντασης μαγνητικό πεδίο και επομένως σε μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$



Εικόνα 2.9 Καμπύλη υστέρησης.

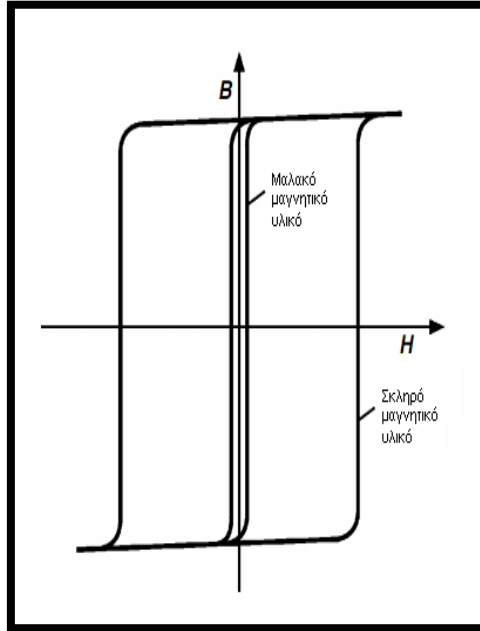
Αξίζει να σημειωθεί ότι, στο δεύτερο σκέλος της καμπύλης, η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής γίνεται με σημαντικά μεγαλύτερο ρυθμό με την αύξηση της έντασης του πεδίου  $\mathbf{H}$  και εξηγείται με τα προαναφερθέντα άλματα Barkhausen των τειχών των μαγνητικών τομέων. Περαιτέρω αύξηση της έντασης του πεδίου “3” οδηγεί, σε σχεδόν ασήμαντη αύξηση του  $\mathbf{B}$ . Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω εικόνα ως το τρίτο τμήμα της καμπύλης μαγνήτισης είναι σχεδόν επίπεδο. Η αύξηση της μαγνητικής ροής δεν είναι πλέον δυνατή με τον τρόπο της μετακίνησης των τειχών των τομέων και η οποιαδήποτε αύξηση του  $\mathbf{B}$  γίνεται πλέον, με την μέθοδο της περιστροφής περιοχών. Το υλικό σε αυτή την περιοχή, λέμε ότι έχει φτάσει στον κόρο (η μέγιστη δυνατή τιμή του  $\mathbf{B}$  “τιμή επαγωγής κόρου”  $\mathbf{B}_{\text{κορου}}$  έχει επιτευχθεί) καθώς όλες οι μαγνητικές περιοχές έχουν ευθυγραμμιστεί με τη διεύθυνση του πεδίου  $\mathbf{H}$ .

Με τη μείωση του  $\mathbf{H}$  σε μικρότερες τιμές δηλαδή την μείωση του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα, η πρώτη βασική παρατήρηση αφορά, την περιστροφή των περιοχών στις προτιμώμενες διευθύνσεις τους. Μια ακόμα βασική παρατήρηση αφορά τη μετακίνηση των τειχών μερικών περιοχών πίσω στις αρχικές τους θέσεις, αλλά σημαντικότερα σημειώνεται ότι οι περισσότερες περιοχές παραμένουν σταθερές στις θέσεις που έλαβαν, κατά τη διαδικασία της μετακίνησης τειχών. Κατανοούμε λοιπόν ότι, η μαγνητική επαγωγή δεν επανέρχεται πάνω στην καμπύλη που ακολουθούσε, αλλά υστερεί σε σχέση με την αρχική διαδρομή μαγνητισμού. Εξαιτίας της μη ελαστικής μετατόπισης τειχών των τομέων, η όπως αλλιώς ονομάζεται “παραμένοντας μαγνητισμός”  $\mathbf{B}_{\text{παρ}}$ , το  $\mathbf{H}$  μηδενίζεται και παραμένει μια ελάχιστη μαγνητική επαγωγή. Για τη μείωση του παραμένοντα μαγνητισμού πρέπει να εφαρμόζεται ένα αντίστροφο πεδίο  $\mathbf{H}$  έντασης, τέτοιας ώστε να εξαναγκάσει τα τείχη των τομέων στις αρχικές τους θέσεις. Η τιμή της έντασης του  $\mathbf{H}$  που χρειάζεται ώστε, να μηδενιστεί η μαγνητική επαγωγή ονομάζεται “απομαγνητίζουσα δύναμη”  $H_{\alpha\pi}$ . Από την άλλη μεριά, μια αύξηση του  $\mathbf{H}$  κατά την αντίθετη διεύθυνση, μας οδηγεί σε μια εκ νέου διαδικασία μαγνήτισης αντίθετης πλέον φορές με μια αρνητική τιμή επαγωγής κόρου  $-\mathbf{B}_{\text{κορου}}$  ( $|\mathbf{B}_{\text{κορου}}| = \mathbf{B}_{\text{κορου}}$ ). Το παραπάνω φυσικά βασίζεται στο γεγονός ότι το ρεύμα διέγερσης εναλλάσσεται συνεχώς κυκλικά ανάμεσα στις δύο ακραίες τιμές του, οι οποίες αντιστοιχούν στα δύο αντίθετα μέγιστα της έντασης του πεδίου  $\mathbf{H}$  με αποτέλεσμα την δημιουργία βρόχου υστέρησης (Εικόνα 2-9).

Ο βρόχος υστέρησης δίνει τη σχέση μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής  $\mathbf{B}$  και της έντασης του πεδίου  $\mathbf{H}$  για μια κλειστή αντιστρεπτή κυκλική μαγνήτιση του φερρομαγνητικού υλικού. Η μορφή του βρόχου υστέρησης είναι κατά βάση εξαρτώμενη από το

χρησιμοποιούμενο υλικό, αλλά επίσης, αν και σε μικρότερο βαθμό, εξαρτάται και από τη συχνότητα του ρεύματος διέγερσης. Το εμβαδό του βρόχου είναι η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα όγκου για κάθε περίοδο.

Σύμφωνα με την τιμή της απομαγνητίζουσας δύναμης  $H_{απ}$ , θα μπορούσαμε να διαχωρίσουμε τα μαγνητικά υλικά στις βασικές κατηγορίες, των μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών



**Εικόνα 2.10** Καμπύλες μαγνήτισης μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών.

Η κατασκευή μαλακών μαγνητικών πυρήνων χρήζει άκρας σημασίας για τη σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών και είναι απαραίτητη για πολλές συσκευές και εφαρμογές όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρονικά ισχύος. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά εκφράζουν μικρή τιμή απομαγνητίζουσας δύναμης. Ένα αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι τα μαλακά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από την ευκολία αλλαγής του προσανατολισμού των περιοχών μαγνητικής στροφορμής στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου.

Στην περίπτωση των σκληρών μαγνητικών υλικών οι μαγνήτες δημιουργούν μαγνητική ροή ακόμα και χωρίς την επιρροή από κάποιο εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο. Η χρήση τους θεωρείται εξίσου σημαντική στη βιομηχανία, καθώς είναι απαραίτητοι σε διάφορες εφαρμογές όπως στις γεννήτριες, σε αισθητήρες και στους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά, η όπως αλλιώς αποκαλούνται μόνιμοι μαγνήτες, εκφράζουν μεγάλη τιμή απομαγνητίζουσας δύναμης. Η αρχική διεύθυνση των μαγνητικών στροφορμών αντιστέκεται στις επιρροές πιθανών εξωτερικών πεδίων και εν αντιθέση με τα μαλακά υλικά, η απομαγνητίζουσα δύναμη είναι κατά πολύ ισχυρότερη. Μία τελευταία αξιοσημείωτη ιδιότητα όσον αφορά τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι η μεγάλη τιμή παραμένοντος μαγνητισμού  $B_{παρ}$ .

## 2.10 Μαγνητική Διαπερατότητα $\mu$

Η μαγνητική διαπερατότητα που αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι μια ιδιότητα των μαγνητικών υλικών, η οποία έχει διαφορετικές ερμηνείες ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες του ορισμού και της μέτρησής της.



Μαγνητική διαπερατότητα πλάτους  $\mu_{\pi\lambda}$ : Αφορά την σχετική διαπερατότητα υπό την επιρροή εξωτερικών εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων, η οποία αποδίδει τη σχέση μεταξύ της κορυφαίας τιμής της μαγνητικής επαγωγής  $\mathbf{B}$  και του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  και ορίζεται από τη σχέση:

$$\mu_{\pi\lambda} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\hat{\mathbf{B}}}{\hat{\mathbf{H}}} \quad (2.8)$$

Το  $\hat{\mathbf{B}}$  αποδίδει το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής που κατά μέσο όρο διέρχεται από την κάθετη διατομή του πυρήνα.  $\hat{\mathbf{H}}$  είναι το πλάτος του πεδίου που είναι παράλληλο στην επιφάνεια του πυρήνα.

Αρχική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\alpha\rho\chi}$ : Αφορά την σχετική διαπερατότητα για πολύ χαμηλά εφαρμοζόμενα στατικά μαγνητικά πεδία.

$$\mu_{\alpha\rho\chi} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta\mathbf{B}}{\Delta\mathbf{H}} (\Delta\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{0}) \quad (2.9)$$

Ενεργή μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\epsilon\nu}$ : Όταν παρατηρείται διάκενο στο μαγνητικό κύκλωμα, η εμφανής διαπερατότητα του κυκλώματος ονομάζεται, ή αλλιώς ενεργή μαγνητική διαπερατότητα, είναι πολύ χαμηλότερης τιμής από τη διαπερατότητα του ίδιου πυρήνα χωρίς παρατηρούμενο διάκενο. Βασικός παράγοντας επιρροής είναι η αρχική διαπερατότητα του υλικού, από τις διαστάσεις του πυρήνα και από το διάκενο. Για πυρήνες με σχετικά μικρό διάκενο η ενεργή διαπερατότητα δίνεται από την:

$$\mu_{\epsilon\nu} = \frac{\mu_{\alpha\rho\chi}}{1 + \frac{A_{\text{διακενου}}}{I_{\text{πυρήνα}}}} \quad (2.10)$$

Όπου  $A_{\text{διάκ}}$  είναι η κάθετη διατομή του διακένου  $I_{\text{πυρ}}$ , το ενεργό μήκος της μαγνητικής διαδρομής στον πυρήνα.

Κατά την περίπτωση που το διάκενο είναι μεγάλου μήκους ένα ποσοστό από τις ροές διαρρέει προς το εξωτερικό περιβάλλον, με φυσικό άμεσο αποτέλεσμα, την αυξημένη τιμή της ενεργού διαπερατότητας, σε σχέση με την εξίσωση 2.10. Η παραπάνω είναι ορθή μόνο εάν αμελήσουμε τη μαγνητική ροή διαρροής. Η ενεργός διαπερατότητα συναντάται και ως διαπερατότητα ισοδύναμου ομογενούς σπειροειδούς πυρήνα.

Αυξητική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\Delta}$ : Η αυξητική διαπερατότητα ορίζεται όταν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{H}_{AC}$  υπερτίθεται σε ένα στατικό μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{H}_{DC}$ . Υπολογίζεται από την:

$$\mu_{\Delta} = \left( \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta\mathbf{B}}{\Delta\mathbf{H}} \right)_{\mathbf{H}_{DC}} \quad (2.11)$$

Αντιστρεπτή μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\alpha\nu\tau}$ : Στην περίπτωση που το πλάτος του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}_{AC}$  είναι πολύ μικρό, η οριακή τιμή της αυξητικής διαπερατότητας  $\mu_{\Delta}$  ονομάζεται αντιστρεπτή μαγνητική διαπερατότητα.

$$\mu_{\alpha\nu\tau} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta\mathbf{B}}{\Delta\mathbf{H}}, \quad \Delta\mathbf{H}_{AC} \rightarrow \mathbf{0} \quad (2.12)$$

Μιγαδική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_{\mu\gamma}$ : Όταν ένας πυρήνας είναι φτιαγμένος από μαγνητικά υλικά δεν έχουμε ποτέ ιδανικές επαγωγές. Κάτω από ημιτονοειδή διέγερση, παρατηρείται μια αλλαγή φάσης μεταξύ των συνιστωσών της επαγωγής  $\mathbf{B}$  και του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$ . Με την αξιοποίηση μιας μιγαδικής ποσότητας για τη σχετική

Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

μαγνητική διαπερατότητα, όπως αυτή αποτελείται από ένα φανταστικό και ένα πραγματικό μέρος, αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται με ευκολία. Το φανταστικό μέρος της μιγαδικής διαπερατότητας σχετίζεται με τις απώλειες στο υλικό. Υπάρχουν δύο διαφορετικές μορφές της μιγαδικής διαπερατότητας  $\mu_{\mu\gamma}$ , η σειριακή αναπαράσταση και η παράλληλη αναπαράσταση, όπως αναλύονται παρακάτω.

Σειριακή αναπαράσταση σύμφωνα με το εν σειρά ισοδύναμο κύκλωμα του μαγνητικού στοιχείου.

$$\mu_{\mu\gamma} = \mu'_s - j\mu''_s \quad (2.13)$$

Όπου  $\mu'_s$  και  $\mu''_s$  το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της εν σειρά μιγαδικής αγωγιμότητας

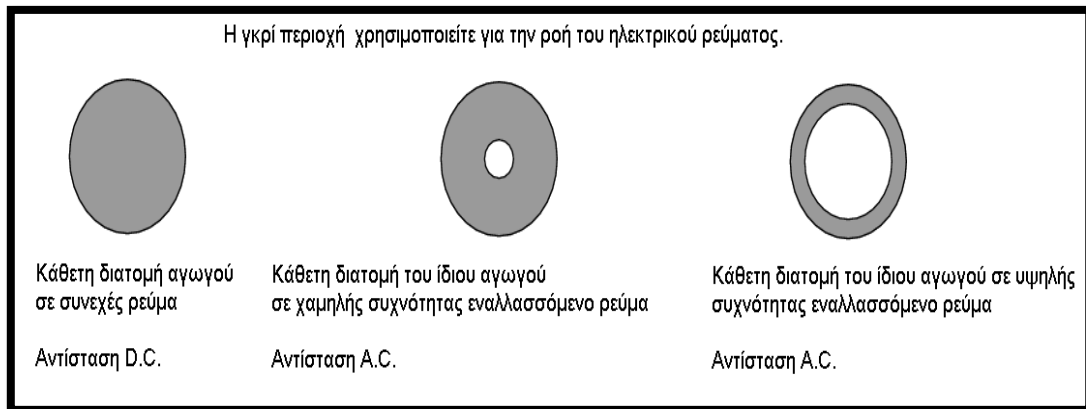
Παράλληλη αναπαράσταση σύμφωνα με το εν παραλλήλω ισοδύναμο κύκλωμα του μαγνητικού στοιχείου.

$$\frac{1}{\mu_{\mu\gamma}} = \frac{1}{\mu'_\pi} - j\frac{1}{\mu''_\pi} \quad (2.14)$$

Όπου  $\mu'_\pi$  και  $\mu''_\pi$  το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της εν παραλλήλω μιγαδικής αγωγιμότητας

## 2.11 Δινορεύματα

Τα δινορεύματα είναι στην ουσία παρασιτικά κυκλικά ρεύματα, που επάγονται στα τυλίγματα και τον πυρήνα και είναι υπεύθυνα για την πρόκληση ανεπιθύμητων απωλειών. Τα παρασιτικά κυκλικά αυτά ρεύματα δημιουργούνται μέσα σε αγωγίμα υλικά, όταν αυτά εκτίθενται σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε τις πιθανές περιοχές ροής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω κάθετης διατομής αγωγών.



Εικόνα 2.11 Μείωση της διατομής του αγωγού λόγω του επιδερμικού φαινομένου.

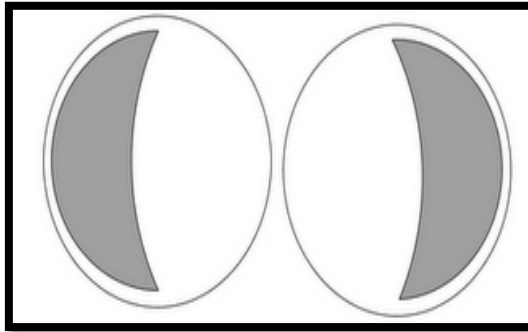
Τα δινορεύματα αποτελούν σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού και της άρτιας λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών συσκευών. Η ελαχιστοποίηση τους οδηγεί άμεσα στην βελτίωση απόδοση συστημάτων.

## 2.12 Φαινόμενο Γειτνίασης

Κατά την περίπτωση που δύο αγωγοί διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα, παρατηρούνται γύρω τους χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Αυτά τα μαγνητικά πεδία επάγουν παρασιτικά ρεύματα στους γειτονικούς αγωγούς. Αυτό ενισχύει τον ισχυρισμό ότι τα δινορεύματα σε έναν αγωγό είναι μεγαλύτερα όταν αυτός ο αγωγός

Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

περιτριγυρίζεται από άλλους αγωγούς και μικρότερα όταν είναι μόνος ή ακόμα και στο κέντρο μιας συναξονικής ομάδας αγωγών.



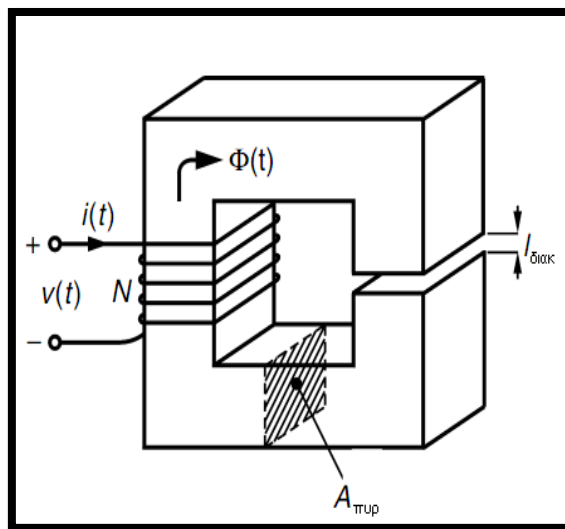
Εικόνα 2.12 Φαινόμενο γειτνίασης.

Το φαινόμενο γειτνίασης αποτελεί έναν ακόμα λόγο δημιουργίας δινορευμάτων. Το αποτέλεσμα του φαινομένου γειτνίασης είναι, η ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος μέσα στον αγωγό όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 2.12)

### 2.13 Βασικοί κανόνες Μαγνητικών Κυκλωμάτων

Βασική αιτία δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα ηλεκτρικό κυκλώματα, είναι η τάση ή όπως αλλιώς ονομάζεται η Ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Πάντα σε σχέση με τα υπάρχουσα μαγνητικά κυκλώματα παρατηρείται η παρουσία Μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ), Η ΜΕΔ είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία μαγνητικής ροής  $\Phi$ , (εικόνα 2.13) συμβολίζεται με  $\mathcal{F}$  και είναι ίση με την εφαρμοσμένη ένταση του ρεύματος στον πυρήνα και αποδίδεται από την παρακάτω εξίσωση (εξίσωση 2.15)

$$\mathcal{F} = Ni = Hl_c \quad [\text{Ampere} * \text{turns}] \quad (2.15)$$



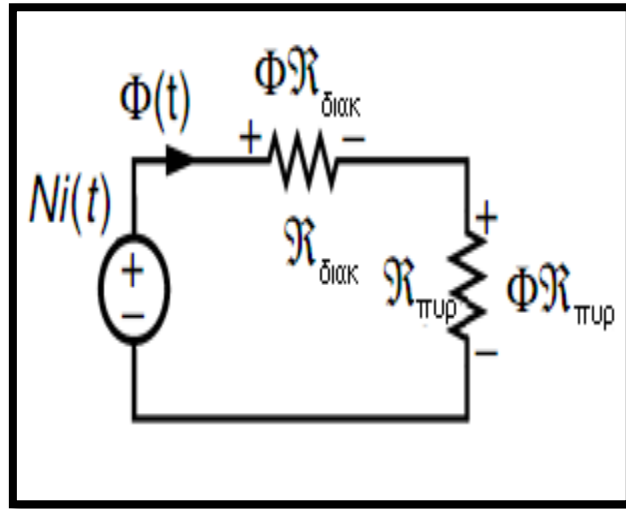
Εικόνα 2.13 Μαγνητικός πυρήνας με διάκενο.

Η σύνδεση της ΜΕΔ με τη μαγνητική ροή, ισοδύναμης του ηλεκτρικού ρεύματος, με βάση το νόμο του Ohm περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\mathcal{F} = \Phi \mathfrak{R} \quad (2.16)$$

Το  $\mathfrak{R}$  περιγράφει την μαγνητική αντίσταση (reluctance) του κυκλώματος. Οφείλουμε να τονίσουμε ότι είναι το μαγνητικό ανάλογο, της ηλεκτρικής αντίστασης. Χαρακτηρίζεται από μονάδες Ampere\*turns/Weber και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (εξίσωση 2.17):

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu A} \quad (2.17)$$



Εικόνα 2.14 Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα της εικόνας 2-13.

Για κυκλώματα διάκενου όπως απεικονίζονται στις Εικόνες 2.13 και 2.14, μπορούμε να διαχωρίσουμε σε δύο μέρη την εξίσωση του Ampere για το μέσο του μαγνητικού πυρήνα και του διάκενου και να καταλήξουμε στην εξής εξίσωση:

$$\mathbf{H}_{\text{πυρ}} \mathbf{l}_{\text{πυρ}} + \mathbf{H}_{\text{διάκ}} \mathbf{l}_{\text{διάκ}} = \mathbf{Ni} \quad (2.18)$$

Τα  $\mathbf{H}_{\text{πυρ}}$  και  $\mathbf{H}_{\text{διάκ}}$ , ορίζουν την ένταση του πεδίου στον πυρήνα και στο διάκενο αντίστοιχα, ενώ το  $\mathbf{l}_{\text{πυρ}}$  αντιστοιχεί στο μέσο μήκος της μαγνητικής διαδρομής στον πυρήνα και  $\mathbf{l}_{\text{διάκ}}$  στο ισοδύναμο μήκος της μαγνητικής διαδρομής διακένου.

Εάν εφαρμόσουμε τον νόμο του Gauss για μια διαδρομή κλειστού τύπου, η οποία διατρέχει τον πυρήνα και το διάκενο και συμπεριλαμβάνει τη συνολική επιφάνεια μετάβασης μεταξύ των δυο μπορεί να αποτυπωθεί μαθηματικά ως εξής:

$$\int \mathbf{B}_{\text{πυρ}} \, d\mathbf{S} + \int \mathbf{B}_{\text{διάκ}} \, d\mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (2.19)$$

Οπού αποφέρει:

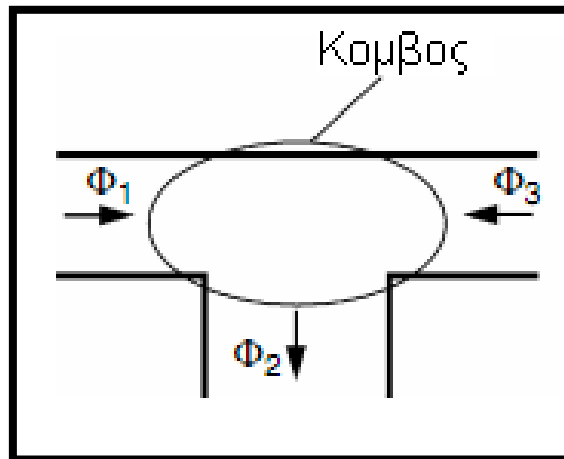
$$\Phi_{\text{πυρ}} = \Phi_{\text{διάκ}} = \Phi \quad (2.20)$$

$$\Phi_{\text{πυρ}} \mathfrak{R}_{\text{πυρ}} + \Phi_{\text{διάκ}} \mathfrak{R}_{\text{διάκ}} = \mathbf{Ni} \stackrel{(1)}{\Rightarrow} \Phi (\mathfrak{R}_{\text{πυρ}} + \mathfrak{R}_{\text{διάκ}}) = \mathbf{Ni} \quad (2.21)$$

Η μαγνητική ροή αντιστοιχεί σε  $\Phi_{\text{πυρ}}$ ,  $\Phi_{\text{διάκ}}$ , ενώ η μαγνητική αντίσταση στον πυρήνα και στο διάκενο αντιστοιχεί σε  $\mathfrak{R}_{\text{πυρ}}$ ,  $\mathfrak{R}_{\text{διάκ}}$ .

Οι εξισώσεις που αναλυθήκαν μόλις όμως έχουν εγκυρότητα μόνο όσον αφορά μικρά διάκενα. Περεταίρω μελέτη που συμπεριλαμβάνει μεγαλύτερου μήκους διάκενα, υποδεικνύει ότι η ροή τείνει να σκεδάζει προς το εξωτερικό περιβάλλον. Στα ηλεκτρικά

κυκλώματα δεν υπάρχει κάποιος πραγματικός μονωτής, αφού η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του αέρα μη μηδενική και ισούται με τη μονάδα.



Εικόνα 2.15 Αναπαράσταση του νόμου Gauss.

Εφαρμόζοντας αυτή τη φορά το νόμο Gauss, σε ένα μαγνητικό κόμβο (Εικόνα 2.15), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα αλγεβρικά αθροίσματα των ροών που εξέρχονται του κόμβου είναι μηδέν. Το παραπάνω μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

$$\int_S \mathbf{B} \, ds = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \varphi_i = 0 \quad (2.22)$$

Οφείλουμε να αναγνωρίσουμε την ομοιότητα σε σχέση με τον νόμο ρευμάτων του Kirchoff στα ηλεκτρικά κυκλώματα.

Εξαιτίας της μικρής διαφοράς στην κλίμακα τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας ένα ποσοστό σκεδάζει προς το εξωτερικό περιβάλλον και δεν συνδέει τη  $n$  με τη  $n + 1$  σπείρα του τυλίγματος. Η συγκεκριμένη ροή συναντάται αλλιώς και ως ροή διαρροής. Συνεπώς η μαγνητική ροή δεν μεταφέρεται εξολοκλήρου μέσα από το μαγνητικό υλικό.

Επομένως, ο νόμος του Faraday μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά ως εξής:

$$V_{(t)} = -N * \frac{d\varphi_{i(t)}}{dt} \quad (2.23)$$

Όπου  $\varphi_i$  η μαγνητική ροή σε κάθε σπείρα του τυλίγματος. Ακολούθως δύναται να ορίσουμε την πεπλεγμένη ροή  $\Psi$  ως, το άθροισμα των ροών κάθε σπείρας βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

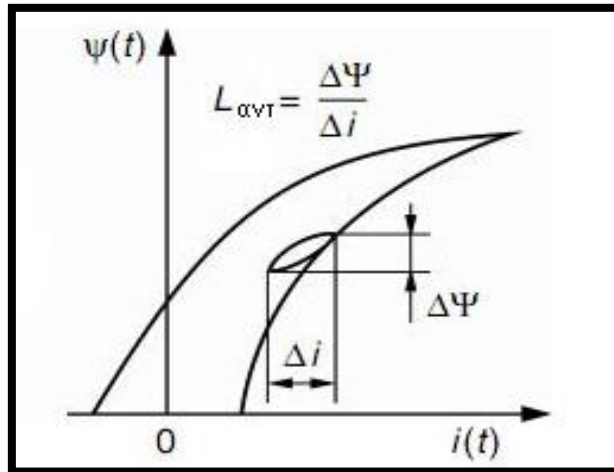
$$\Psi = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (2.24)$$

## 2.14 Επαγωγή: Ορισμοί

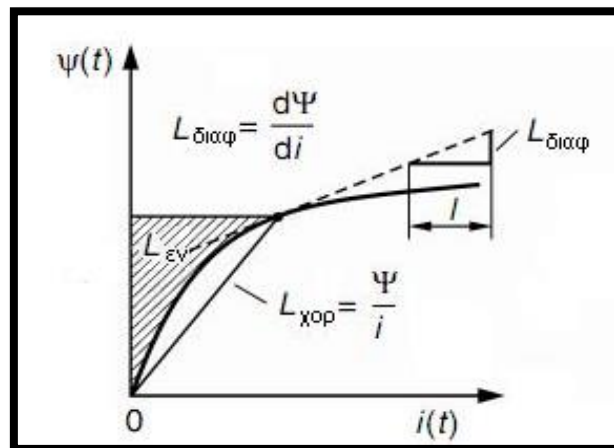
Η εξάρτηση από τη μη γραμμικότητα της  $\mathbf{B} - \mathbf{H}$  χαρακτηριστικής του υλικού, αποτελεί βασικό παράγοντα διαμόρφωσης όσον αφορά τον ορισμό επαγωγής.

Η Επαγωγή χορδής ή αλλιώς επαγωγή του εύρους  $L_{\text{χορ}}$  αφορά την κλίση της χορδής στην καμπύλη της πεπλεγμένης ροής  $\Psi = \Psi_{(t)}$  η επαγωγή του εύρους δίνεται από τον τύπο:

$$L_{\text{χορ}} = \frac{\Psi}{i} \quad (2.25)$$



Εικόνα 2.16 Γραφική αναπαράσταση αντιστρεπτής επαγωγής.



Εικόνα 2.17 Γραφική αναπαράσταση Διαφορικής επαγωγής και επαγωγής χορδής.

Ας αναλύσουμε λοιπόν εκτενέστερα τις δυο βασικές περιπτώσεις διαφορετικού τύπου επαγωγής όπως περιγράφονται από τις παραπάνω εικόνες (εικόνα 2.16 και εικόνα 2.17)

**Διαφορική επαγωγή  $L_{\text{διαφ}}$ :** Η διαφορική επαγωγή είναι η παράγωγος της πεπλεγμένης ροής. Η παραπάνω περίπτωση συναντάται όταν μικρά σήματα υπερτίθενται στο ρεύμα τύλιξης (εικόνα 218). Η διαφορική επαγωγή αποδίδεται από τον τύπο:

$$L_{\text{διαφ}} = \frac{d\Psi}{di} \quad (2.26)$$

Τα υλικά που παρουσιάζουν υστέρηση, παρατηρούμε την ύπαρξη ενός μικρού βρόχου. Το παραπάνω έχει ως επίπτωση μια μικρότερη επαγωγή χαμηλού σήματος, η οποία ονομάζεται αντιστρεπτή επαγωγή (εικόνα 217). Η αντιστρεπτή επαγωγή αποδίδεται από τον τύπο:

$$L_{\text{αντ}} = \frac{\Delta\Psi}{\Delta i} \quad (2.27)$$

Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

Εάν δεν συνυπολογίσουμε τις διάφορες πιθανές απώλειες, εν τέλη η διαφορική επαγωγή εκφράζει ίση τιμή με την αντιστρεπτή.

Ενεργή επαγωγή  $L_{ev}$  : Εάν ανατρέξουμε ξανά στην εικόνα 2.18 η σκιαγραφημένη περιοχή υποδεικνύει την αποθηκευμένη επαγωγική ενέργεια  $L_{ev}$ . Αυτή η επαγωγική ενέργεια ορίζεται ως εξής:

$$L_{ev} = \frac{2 \int_0^{\Psi} i d\Psi}{i^2} \quad (2.28)$$

Η σχέση ανάμεσα στις διαφορετικής μορφής επαγωγές, για μια κανονική καμπύλη κόρου είναι  $L_{\text{διαφ}} < L_{ev} < L_{\text{χορ}}$  η οποία είναι χρήσιμη στους μετατροπείς, οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια και μετά την εναποθέτουν στο φορτίο.

Για διαμορφωμένη επαγωγή όσον αφορά δοκιμή χωρίς φορτίο, πρώτα με ημιτονοειδές τάση  $\alpha$  (μη ημιτονοειδές ρεύμα) και έπειτα με ημιτονοειδές ρεύμα  $\beta$  (μη ημιτονοειδές τάση) ο υπολογισμός της ζητούμενης επαγωγής εκφράζεται ως εξής:

$$\alpha) L_V = \frac{V_{rms}}{\omega I_{rms}}, \quad \beta) L_I = \frac{V_{rms}}{\omega I_{rms}}, \quad \text{οπου } \omega = 2\pi f \quad (2.29)$$

Πλησίον του κόρου ενός πυρήνα, συχνά προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$L_{\text{διαφ}} < L_V < L_I < L_{\text{χορ}}. \quad (2.26)$$

## 2.15 Αυτεπαγωγή και Αμοιβαία Επαγωγή

Η αυτεπαγωγή  $L$  ορίζεται με βάση το λόγο της ροής, όπως παράγεται από μια σπείρα, ως προς το ρεύμα της σπείρας. Το παραπάνω μαθηματικά αποτυπώνεται ως εξής:

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = N^2\Lambda \quad (2.30)$$

Επιπρόσθετα, η μαγνητική σύζευξη ανάμεσα των τυλιγμάτων μιας μαγνητικής συσκευής εκφράζεται από την αμοιβαία επαγωγή  $M$  και ορίζεται από τον παρακάτω εξίσωση:

$$M = \frac{N_1\Phi_{12}}{i_2} = \frac{N_2\Phi_{21}}{i_1} \quad (2.31)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρατέθηκε το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο ομοεπίπεδων επαγωγών σε κλειστό κύκλωμα. Με την κατάκτηση μια στέρεας θεωρητικής βάσης, επόμενο βήμα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής είναι η πρακτική ανάλυση του τρόπου κατασκευής ενός ομοεπίπεδου επαγωγού. Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν, θα παρατεθεί αρχικά ο τρόπος κατασκευής και στη συνέχεια θα εμβαθύνουμε στις απαιτούμενες ενέργειες που είναι ωφέλιμο να μεριμνήσουμε, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη προσέγγιση και μεθοδολογία σχεδίασης.

### 3.1 Σχεδιασμός για ομοεπίπεδους επαγωγείς On-Chip:

Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν αναλύεται ο τρόπος κατασκευής ενός ομοεπίπεδου επαγωγού σε τσιπ.

Κατά την πρακτική κατασκευή ενός ομοεπίπεδου επαγωγού, πρώτο βήμα είναι η επιλογή υποστρώματος. Συνήθως επιλέγεται ως βασικό υπόστρωμα ένας δίσκος πυριτίου (silicon Si). Μέσω διαφόρων διαδικασιών χημικού καθαρισμού το υπόστρωμα πυριτίου καθαρίζεται από τυχόν ρύπους που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την άρτια λειτουργία του επαγωγού. Ακολούθως εναποτίθεται ένα μονωτικό στρώμα. Το μονωτικό αυτό στρώμα είναι μεταλλικό, Συνήθεις επιλογές, όσον αφορά τον τύπο μετάλλου, αποτελούν ο χαλκός και το αλουμίνιο. Πάνω σε αυτή τη μονωτική στρώση θα σχηματιστούν οι αγώγιμες διαδρομές του επαγωγού. Η επεξεργασία του λεπτού μεταλλικού μονωτικού υλικού, συνήθως γίνεται με την διαδικασία φυσικής εναπόθεσης ατμών. Επόμενο βήμα αποτελεί η επικάλυψη του λεπτού μεταλλικού υλικού με ένα φωτοευαίσθητο υλικό. Η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία στο υλικό αυτό, βοηθάει στην παραμονή του μετάλλου στις εκτεθειμένες περιοχές. Η παραπάνω διαδικασία επικάλυψης του υλικού με φωτοευαίσθητο υλικό και η έκθεση σημείων του σε υπεριώδη ακτινοβολία ονομάζεται φωτολιθογραφία. Τέλος με τη χρήση της μεθόδου χάραξης (χημικής ή πλάσματος) τα ανεπιθύμητα κομμάτια μετάλλου αφαιρούνται με τον δίσκο πυριτίου να έχει πλέον το τελικό σχέδιο/μοτίβο του επαγωγού.

Η επιλογή των υλικών κατασκευής φυσικά γίνεται με βάση την βέλτιστη απόδοση. Όμως και άλλες παράμετροι διαμορφώνουν την τελική επιλογή των υλικών. Η βασικότερη ίσως είναι το κόστος κατασκευής. Παρ' όλα αυτά τα συνηθέστερα επιλεγμένα υλικά και μέθοδοι κατασκευής αποτελούν τα προαναφερθέντα.

### 3.2 Θεωρήσεις σχεδιασμού για ομοεπίπεδους επαγωγείς On-Chip:

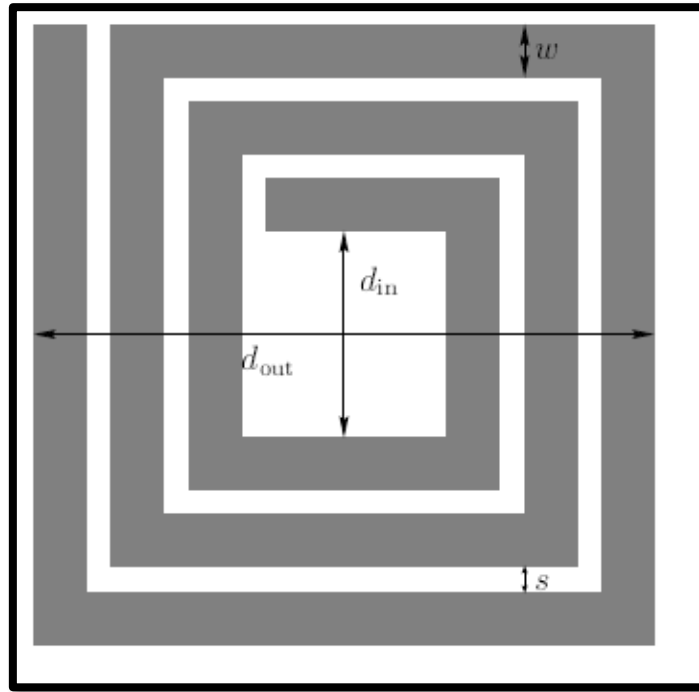
Έχοντας κατανοήσει πλέον το βασικό μαθηματικό υπόβαθρο και την διαδικασία φυσικής κατασκευής του επαγωγού μετά το σχεδιασμό του κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν κάποιες βασικές θεωρήσεις σχεδιασμού των ομοεπίπεδων επαγωγών.

Ας ερευνήσουμε λοιπόν τις πιθανές γεωμετρικές διατάξεις επαγωγών.

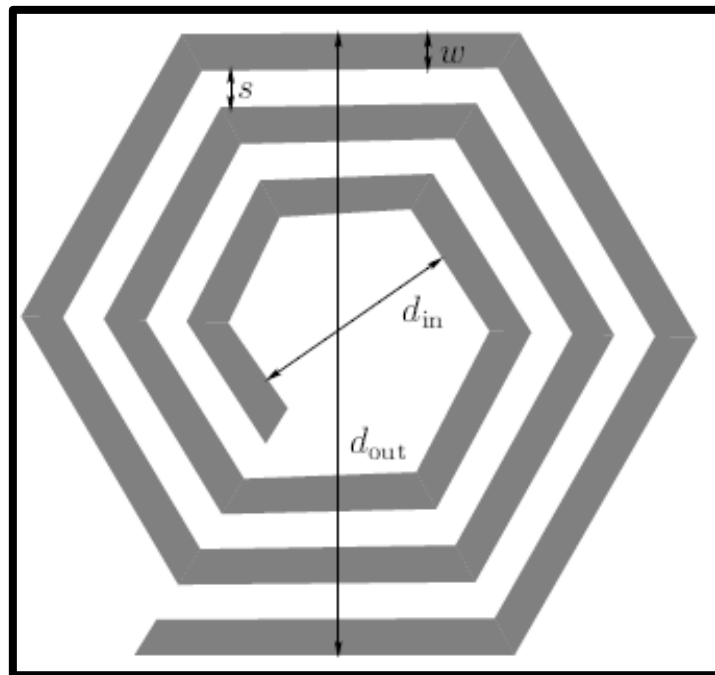
Όπως αναλύεται και στην έρευνα "The design, modeling and optimization of on-chip inductor and transformer circuits" (Sunderarajan S. Mohan), υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι σχεδιασμού.

Πιθανών ο βασικότερος γεωμετρικός σχεδιασμός επαγωγέα είναι ο γεωμετρικά τετράγωνος σπειροειδής επαγωγέας (Εικόνα 3.1). Κάποιες ακόμα επιλογές γεωμετρικού σχεδιασμού αποτελούν ο Εξαγωνικός σπειροειδής επαγωγέας (Εικόνα 3.2), ο Οκταγωνικός σπειροειδής επαγωγέας (Εικόνα 3.3) και τέλος ο κυκλικός σπειροειδής επαγωγέας (Εικόνα 3.4).

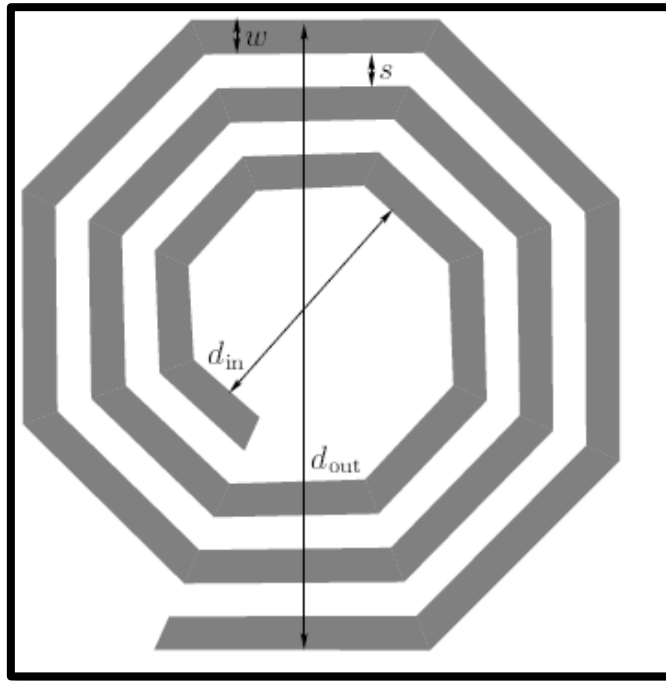




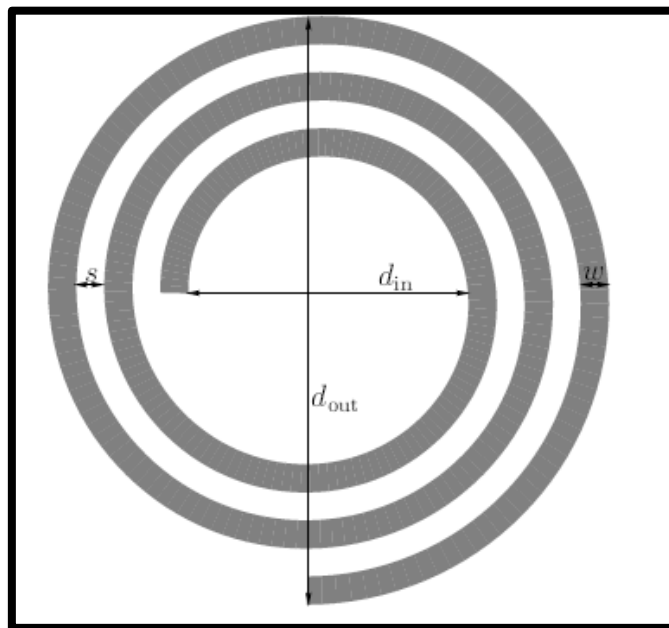
Εικόνα 3.1 Τετράγωνος σπειροειδής επαγωγέας



Εικόνα 3.2 Εξαγωνικός σπειροειδής επαγωγέας



Εικόνα 3.3 Οκταγωνικός σπειροειδής επαγωγέας



Εικόνα 3.4 Κυκλικός σπειροειδής επαγωγέας

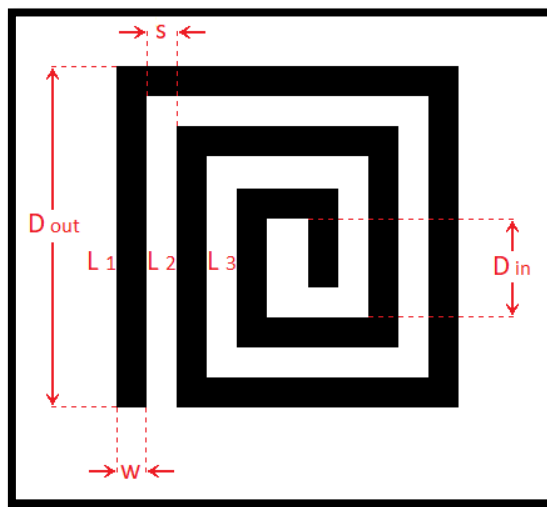
Όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η διαδικασία του σχεδιασμού οφείλει να πλαισιώνεται από μια ολοκληρωμένη ανάλυση των διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού. Ας υπενθυμίσουμε λοιπόν περιληπτικά τα σημεία κλειδιά ώστε να επιτευχθεί η άρτια ανάπτυξη αποδοτικών επαγωγέων, ικανών να λειτουργούν αποτελεσματικά σε πολύ υψηλές συχνότητες. Αρχικά η επιλογή υποστρώματος αποτελεί σημαντικό βήμα

καθώς επηρεάζει σημαντικά παράγοντες όπως είναι η διηλεκτρική σταθερά, οι απώλειες και η θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον σημείο κλειδί αποτελούν η επιλογή της γεωμετρικής διάταξης επαγωγού και οι διαστάσεις του αγωγού δηλαδή το μήκος το πλάτος και το πάχος. Ακόμα σημαντικό ρόλο παίζει η διαχείριση παρασιτικών επιρροών, βάση της διαμόρφωσης και διασύνδεσης που επιλέγεται κατά το σχεδιασμό. Η διαμόρφωση και η αντιμετώπιση της παρασιτικής χωρητικότητας διερευνάται περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3.3 Σχεδιασμός και Τεχνικές βελτιστοποίησης

Έχοντας πλέον καλύψει το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο, πορεία κατασκευής και σημεία κλειδιά σχεδιασμού, παρατίθεται ως παράδειγμα στην απλούστερη του μορφή η συμπεριφορά τετραγωνικού επαγωγέα. Συμπεριλαμβάνονται η ανάλυση βασικών εξισώσεων επαγωγής, επαγωγικής χωρητικότητας και μηχανισμού απωλειών. Τέλος αναφέρονται τα κύρια χαρακτηριστικά των βασικών γεωμετρικών σχεδιασμών.

### 3.4 Παράδειγμα επαγωγέα



Εικόνα 3.5 Παράδειγμα σχεδιασμού επαγωγέα

Ας μελετήσουμε διεξοδικότερα, βάση του παραπάνω παραδείγματος, την συμπεριφορά επαγωγής μεταξύ των  $L_1$ ,  $L_2$  και  $L_3$ . Αρχικά θεωρείται ότι:

$$L_3 \ll L_1 \quad (3.1)$$

$$M_{12} = \frac{L_2}{L_1}, \quad M_{13} = \frac{L_3}{L_1}, \quad M_{23} = \frac{L_3}{L_2} \quad (3.2)$$

Από την παραπάνω εξίσωση παρατηρούμε τις αμοιβαίες επαγωγές  $M$  όπως διαμορφώνονται βάση  $L_1$ ,  $L_2$  και  $L_3$ .

$$M_{13} \ll M_{12} \quad (3.3)$$

Η εξίσωση 3.3 αναδεικνύει ότι η επαγωγή μεταξύ των επαγωγών 1 και 3 είναι πολύ μικρότερη από την αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των επαγωγών 1 και 2.

$$L_{tot} = L_1 + L_2 + L_3 + M_{12} + M_{13} + M_{23} \quad (3.4)$$

Αυτή η εξίσωση αντιπροσωπεύει τη συνολική αυτεπαγωγή του συστήματος. περιλαμβάνει και τις δύο μεμονωμένες επαγωγές και οι αμοιβαίες επαγωγές. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μεμονωμένες και αμοιβαίες επαγωγές αυτεπαγωγές και τις αλληλεπιδράσεις τους μέσω αμοιβαίας σύζευξης προκύπτει η ολική αυτεπαγωγή.

$$\boxed{Turns = \frac{N(N + 1)}{2}} \quad (3.5)$$

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές αυτεπαγωγής είναι απαραίτητο να μελετηθεί ο συνολικός αριθμός στροφών/σπειρών. Η παραπάνω εξίσωση (εξίσωση 3.5) αποδίδει τον τύπο υπολογισμού, βάση του αριθμού στροφών ( $N$ ) σε μια περιέλιξη.

$$W \uparrow \rightarrow L \downarrow, \quad W \uparrow \rightarrow D_{in} \downarrow \text{ (mutual coupling } \downarrow \text{ because of larger spacing)} \quad (3.6)$$

Η εξίσωση 3.6 χρήζει άκρας σημασίας. Ως το πλάτος  $W$  της σπείρας αυξάνεται, η επαγωγή  $L$  μειώνεται. Η εξήγηση αυτού το φαινομένου είναι αρκετά απλή εφόσον μια φαρδύτερη σπείρα αυξάνει την απόσταση μεταξύ των στροφών. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της αμοιβαίας σύζευξης και συνεπώς της συνολικής αυτεπαγωγής.

Επιπλέον από το δεύτερο σκέλος της εξίσωσης 3.6 λαμβάνουμε τις εξής πληροφορίες: Όπως αναφέραμε στην ακριβώς προηγούμενη παράγραφο, Ένα μεγαλύτερο  $W$  έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των στροφών της σπείρας. Η αύξηση πλάτους  $W$  όμως, όπως είναι φυσικό, επηρεάζει την εσωτερική διάμετρο. Η μεγαλύτερη απόσταση μειώνει την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ γειτονικών στροφών της σπείρας, η οποία ακολούθως μειώνει τη συνολική αυτεπαγωγή και εν τέλη την αποτελεσματικότητα του επαγωγέα.

Μια καλή στρατηγική σχεδιασμού πηνίων είναι η μείωση της εξωτερικής διαμέτρου ( $D$  out). Ελαχιστοποιώντας το πλάτος  $W$  επιτυγχάνουμε την γενικότερη μείωση μεγέθους και συνεπώς επιτυγχάνουμε και την καλύτερη εφαρμογή σε τσιπ. Ποιο είναι το αποτέλεσμα όμως στην αντίσταση  $R$  και τον παράγοντα ποιότητας  $Q$ ;

$$W \uparrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow Q \downarrow, \quad W \uparrow \rightarrow C_{sub} \downarrow \quad (3.6)$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα όσον αφορά την στρατηγική σχεδιασμού. Μείωση του πλάτους συνεπάγεται με μείωση της αντίστασης σειράς ( $R$ ) του επαγωγέα, με ακόλουθο την βελτίωση του παράγοντα ποιότητας. Όσο το πλάτος στενεύει οδηγεί σε λιγότερο υλικό στη διαδρομή του επαγωγέα, γεγονός που μειώνει την αντίσταση. Επίσης μείωση του πλάτους οδηγεί σε μείωση χωρητικότητας του υποστρώματος ( $C_{sub}$ ) εφόσον η μικρότερη απόσταση μεταξύ των σπειροειδών στροφών αυξάνει την παρασιτική χωρητικότητα. Αύξηση του αριθμού των στροφών  $N$  ενισχύει την τιμή της επαγωγής, η οποία βοηθά στην επίτευξη των επιθυμητών επαγωγικών χαρακτηριστικών. Ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διαδικασία σχεδιασμού πρέπει να δοθεί στην απόσταση μεταξύ της εσωτερικής σπείρας και το πλάτος των στροφών. Η απόσταση θα πρέπει να διαχειρίζεται ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική απόσταση που θα μείωνε την αμοιβαία σύζευξη και τη συνολική επαγωγή.

### 3.5 Εξισώσεις επαγωγής

Η επαγωγή και ο συντελεστής ποιότητας ( $Q$ ) για έναν επαγωγέα στο τσιπ, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες γεωμετρικές παραμέτρους υπολογίζεται ως εξής:

$$L \approx 1.3 * 10^{-7} * \frac{A_m^{\frac{5}{3}}}{A_{tot}^{\frac{1}{6}} * w^{1.75} (w + s)^{0.25}} \quad (3.6)$$

$L$ : Αντιπροσωπεύει την επαγωγή του επαγωγέα.

$A_m$ : Εκφράζει την περιοχή του μετάλλου που χρησιμοποιείται στην περιέλιξη του επαγωγέα. Μια μεγαλύτερη μεταλλική επιφάνεια γενικά αυξάνει την αυτεπαγωγή.

$A_{tot}$ : Η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνει ο επαγωγέας, η οποία είναι περίπου ίση με την εξωτερική διάμετρο  $\epsilon$  τετράγωνο. Αυτό αντανακλά το φυσικό αποτύπωμα του επαγωγέα στο τσιπ.

$W$ : είναι όπως αναφέραμε και προηγουμένως το πλάτος του μεταλλικού ίχνους του επαγωγέα. Τα ευρύτερα ίχνη μειώνουν την αντίσταση έχουν όμως επιρροή και στην αυτεπαγωγή.

$S$ : Η απόσταση μεταξύ των στροφών του επαγωγέα. Η απόσταση  $S$  μειώνει την παρασιτική χωρητικότητα και την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στροφών, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την επαγωγή και τον παράγοντα ποιότητας.

$$A_m = \text{Metal area}, \quad A_{tot} = \text{Total inductor area } (\sim D_{out})$$

$$Q_{tot} \approx 4N[D_{out} - w - (N - 1)(w - s)] \quad (3.7)$$

$$L \approx 1.3 * 10^{-7} \frac{l_{tot}^{\frac{5}{3}}}{\left[\frac{l_{tot}}{4N} + w + (N - 1)(w + s)\right]^{\frac{1}{3}} * w^{0.083} * (w + s)^{0.25}} \quad (3.8)$$

Οι πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των ανωτέρω παραμέτρων ( $w$  και  $s$ ) απεικονίζουν τις διάφορες επιλογές που εμπλέκονται στο σχεδιασμό του πηνίου, όπως η είναι η εξισορρόπηση της επαγωγής, συντελεστή ποιότητας, μέγεθος και η αντίσταση.

Ας εμβαθύνουμε περεταίρω στα παραπάνω σε σχέση με το γεωμετρικό σχήμα τετραγώνου και οκταγώνου.

Η πρώτη εξίσωση αναλύει τον υπολογισμό της επαγωγής με βάση τις φυσικές σταθερές και τις εμπειρικές προσαρμογές για το σχήμα.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 D_{avg} * a_1}{7} \left( \ln \frac{a_2}{p} + a_3 p + a_4 \right) \quad (3.9)$$

$$D_{avg} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2}, \quad p = \frac{D_{out} - D_{in}}{D_{out} + D_{in}} \quad (3.10)$$

$$a_1 = 1.27, \quad a_2 = 2.07, \quad a_3 = 0.18, \quad a_4 = 0.13, \quad (3.11) \text{ Square shape}$$

$$a_1 = 1.07, \quad a_2 = 2.29, \quad a_3 = 0, \quad a_4 = 0.19, \quad (3.12) \text{ Octagonal shape}$$

$$L = 1.62 * 10^{-3} * D_{out}^{-1.21} * w^{-0.147} * D_{avg}^{2.4} * N^{1.78} * s^{-0.03}, \quad (3.13) \text{ Square shape}$$

$$L = 1.33 * 10^{-3} * D_{out}^{-1.21} * w^{-0.163} * D_{avg}^{2.43} * N^{1.75} * s^{-0.049}, \quad (3.14) \text{ Octagonal shape}$$

Οι εξισώσεις 3.11, 3.12, 3.13 και 3.14 είναι εμπειρικά μοντέλα ειδικά δομημένα για τετράγωνα και οκταγωνικούς επαγωγείς. Δείχνουν πώς η επαγωγή κλιμακώνεται με γεωμετρικές ιδιότητες όπως η εξωτερική διάμετρος, το πλάτος, ο αριθμός των στροφών καθώς και η απόσταση μεταξύ τους.

Η αυτεπαγωγή εξαρτάται από τον αριθμό των στροφών, την περιοχή που περικλείεται από τη σπείρα και το σχήμα.

Τετράγωνο: Γενικά, οι τετράγωνοι επαγωγείς έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη αυτεπαγωγή σε σύγκριση με τους εξαγωνικούς και οκταγωνικούς επαγωγείς με την ίδια επιφάνεια, αλλά έχουν επίσης υψηλότερη παρασιτική χωρητικότητα λόγω των πιο αιχμηρών γωνιών.

Εξαγωνικοί: Οι εξαγωνικοί επαγωγείς προσφέρουν μια καλή ισορροπία μεταξύ επαγωγής και μειωμένων παρασιτικών, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές όπου

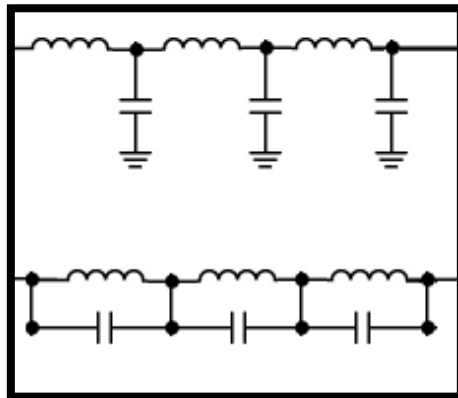
απαιτούνται μέτριες βελτιώσεις στον παράγοντα Q χωρίς σημαντική αύξηση της επιφάνειας.

Οκτάγωνο: Οι οκταγωνικοί επαγωγείς έχουν συνήθως χαμηλότερη παρασιτική χωρητικότητα και υψηλότερο παράγοντα Q λόγω της ομαλότερης γεωμετρίας τους, γεγονός που οδηγεί σε λιγότερο απότομες μεταβάσεις στη ροή του ρεύματος.

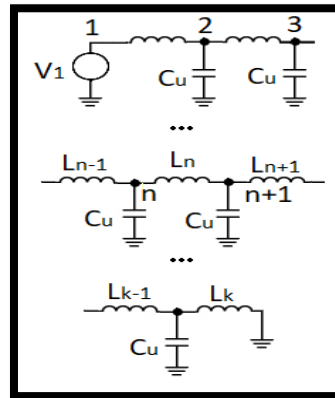
### 3.6 Παρασιτική δυνατότητα

Το παρασιτικό φαινόμενο εμφανίζεται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα εξαιτίας της εγγύτητας των αγώγιμων στοιχείων. Προκύπτει από τη φυσική διάταξη και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του επαγωγέα και αποτελεί εξέχον σημείο διαχείρισης της διαδικασίας στρατηγικού σχεδιασμού, ιδιαίτερα στην περίπτωση υψηλών συχνοτήτων όπως είναι τα 30 GHz. Επηρεάζουν την ποιότητα του σήματος μέσω παραμορφώσεων. Ακόμη, μη σωστή διαχείριση του παρασιτικού φαινομένου οδηγεί στην μείωση απόδοσης (μείωση του παράγοντα Q) και ενέργειας.

Ας δούμε σε πρακτικό επίπεδο κάποιες βασικές μαθηματικές εκφράσεις όσον αφορά την παρασιτική δυνατότητα.



Εικόνα 3.6 Παράδειγμα σχεδιασμού παρασιτισμός



Εικόνα 3.7 Παράδειγμα σχεδιασμού παρασιτισμός

Εάν επιχειρήσουμε να εμβαθύνουμε περαιτέρω όσον αφορά την παρασιτική δυνατότητα, προκύπτουν τα εξής:

Θεωρούμε ότι: Coupling  $\forall 2$  διαδοχικά πηνία

$$M \approx L_n \quad (3.15)$$

$$V_n = j\omega L_n I_n + \sum_{m=1}^{n-1} j\omega I_m M + \sum_{m=n+1}^k j\omega I_m M \stackrel{M=L_n}{\approx} \quad (3.16)$$

$$V_n = j\omega \sum_{m=1}^k I_m L_m \text{ ανεξάρτητη του } (n) \quad (3.17)$$

Όπου:

$V_n$  Η τάση στον κόμβο.

$j\omega L_n I_n$  Η πτώση τάσης αυτοεπαγωγής.

$\sum_{m=1}^{n-1} j\omega I_m M$  και  $\sum_{m=n+1}^k j\omega I_m M$  Το άθροισμα των τάσεων που προκαλούνται από ρεύματα ως αποτέλεσμα της αμοιβαίας επαγωγής

Εάν παρατηρήσουμε την εικόνα 3.7 μπορούμε να ισχυριστούμε ότι:

Η τάση στον κόμβο  $n$ , ισούται με:  $\left(\frac{u}{k}\right) V_1$  οπότε

$$E_n = \frac{1}{2} C_u \left(\frac{u}{k}\right)^2 V_1^2 \quad (3.18)$$

$$E_{\text{tot}} = \frac{1}{2} C_u \sum_{m=1}^k \left(\frac{u}{k}\right)^2 V_1^2 \quad (3.19)$$

$$E_{\text{tot}} = \frac{1}{2} C_u \frac{(k+1)(2k+1)}{6k} V_1^2 \quad (3.20)$$

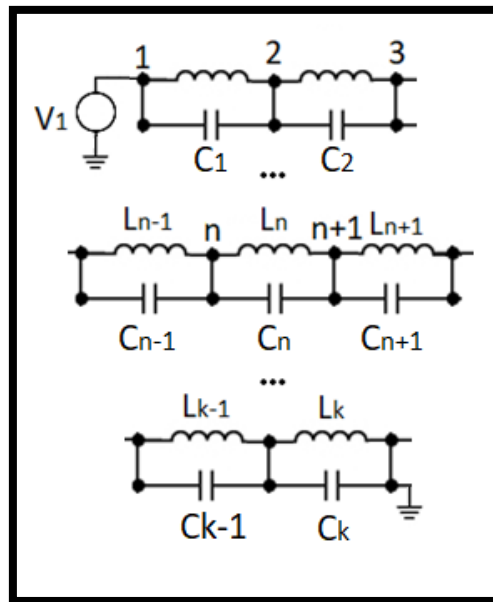
Αν  $k \rightarrow \infty$  και  $C_u \rightarrow 0$  έτσι ώστε  $kC_u$  ισούται με  $C_{\text{tot}}$  τότε

$$E_{\text{tot}} = \frac{C_{\text{tot}}}{3} V_1^2 \quad (3.21)$$

Από τα παραπάνω παίρνουμε:

$E_{\text{tot}}$  : Η συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ολόκληρο το δίκτυο πηνίων.

Η εξίσωση 3.20 εκφράζει το αποτέλεσμα άθροισης για μια συγκεκριμένη διαμόρφωση  $k$  κόμβων. Από την επομένη εξίσωση βλέπουμε ότι ο αριθμός των επαγωγέων όσο τινει στο άπειρο, και όσο η ατομική χωρητικότητα πλησιάζει το μηδέν, η συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται στο δίκτυο απλοποιείται ως:  $\frac{C_{\text{tot}}}{3} V_1^2$



**Εικόνα 3.8 Παράδειγμα σχεδιασμού παρασιτισμός**

Η συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ολόκληρο το σύστημα των πυκνωτών δίνεται πολλαπλασιάζοντας την ενέργεια σε έναν από τους κόμβους εκ του συνολικού αριθμού των πυκνωτών. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η συνολική ενέργεια εξακολουθεί να είναι αντιστρόφως ανάλογη του  $k$  όσο αυτό αυξάνεται, η συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα τείνει να μηδενίζεται.

$$\begin{cases} C_1 = C_2 = \dots = C_k = C_F \\ V_n = j\omega \sum_{m=1}^k I_m L_m \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_n = \frac{1}{k} C_F V_1^2$$

$$E_{tot} = k E_n = \frac{1}{2k} C_F V_1^2 \quad (3.22)$$

$$E_{tot} \rightarrow 0 \text{ όταν } k \rightarrow \infty$$

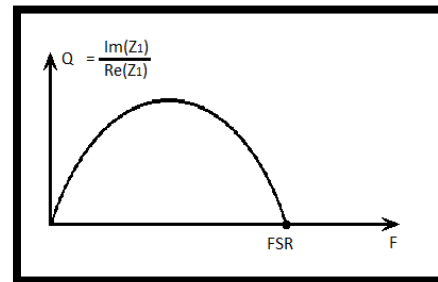
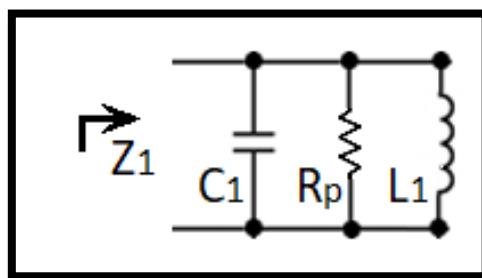
Για μεγάλο αριθμό σπειρών, η διαφορά δυναμικού μεταξύ διπλανών σπειρών μικραίνει, που σημαίνει ότι λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στον πυκνωτή  $C_F$

Από την παρακάτω εξίσωση (εξίσωση 3.23) παίρνουμε την ισοδύναμη χωρητικότητα ολόκληρου του συστήματος. Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η ισοδύναμη χωρητικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό των πυκνωτών.

$$C_{eq} = \frac{1}{k} C_F = \frac{1}{k} \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_k}{k} = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_{N^2-1}}{(N^2 - 1)^2} \quad (3.23)$$

### 3.7 Συχνότητα συντονισμού

Η συχνότητα συντονισμού είναι κρίσιμη για τον συντονισμό των κυκλωμάτων σε συγκεκριμένες συχνότητες. Στα κυκλώματα RF, επιτρέπει το σχεδιασμό φίλτρων και ταλαντωτών που λειτουργούν αποτελεσματικά στις επιθυμητές συχνότητες.



Εικόνα 3.9 Παράδειγμα σχεδιασμού συχνότητα συντονισμού

Εικόνα 3.10 Παράδειγμα σχεδιασμού συχνότητα συντονισμού

$$Q = \frac{R_p}{L_1 \omega} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{SR}^2}\right) \quad (3.23)$$

$$\omega_{SR} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3.24)$$

$$\text{Για } \omega \ll \omega_S \Rightarrow Q \approx \frac{R_p}{L_1 \omega} \quad (3.25)$$

$$\text{Όσο } \omega \rightarrow \omega_S \Rightarrow Q \rightarrow 0, \quad \left(Q \approx \frac{R_p}{L_1 \omega_1 R}\right) \quad (3.26)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  ενός επαγωγέα αποτελεί μέτρο της αποτελεσματικότητάς του στην αποθήκευση ενέργειας έναντι της διάχυσης ως θερμότητας. Σε χαμηλές συχνότητες ο παράγοντας ποιότητας καθορίζεται από την επαγωγή  $L$  και την παράλληλη αντίσταση  $R$ . Καθώς η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται και πλησιάζει τη συχνότητα αυτοσυντονισμού  $\omega$  ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  μειώνεται εφόσον οι επαγωγικές και οι χωρητικές αντιδράσεις έρχονται σε ισορροπία, οδηγώντας σε μεγαλύτερη διασπορά ενέργειας. Προσεγγίζοντας τη συχνότητα συντονισμού, το  $Q$  τείνει στο μηδέν, υποδεικνύοντας ότι το πηνίο χάνει την ικανότητά του να αποθηκεύει ενέργεια αποτελεσματικά.



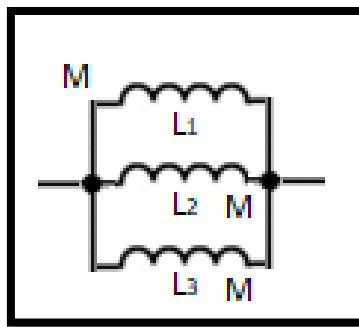
### 3.8 Μηχανισμοί απωλειών

Η ενέργεια διαχέεται ή χάνεται σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, με αποτέλεσμα μειωμένη απόδοση και απόδοση με διάφορους τρόπους. Στα κυκλώματα υψηλής συχνότητας, η κατανόηση και ο μετριασμός αυτών των απωλειών είναι ζωτικής σημασίας για να επιτύχουμε άρτια λειτουργία.

Ας μελετήσουμε τώρα τον παράγοντα ποιότητας  $Q$  ενός επαγωγέα, την σημασία του και μεθόδους βελτίωσής με μείωση της αντίστασης σε σειρά (εικόνα 3.19).

Το  $Q$  (όπως φαίνεται και από την εξίσωση 3.27) είναι ευθέως ανάλογο με την αυτεπαγωγή και τη συχνότητα λειτουργίας και αντιστρόφως ανάλογο με την αντίσταση σειράς. Η υψηλότερη αντίσταση έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη  $Q$ , υποδεικνύοντας περισσότερες απώλειες ενέργειας.

$$Q = \frac{L_1 \omega_0}{R_p} \quad (3.27)$$



Εικόνα 3.11 Παράδειγμα σχεδιασμού Μηχανισμοί απωλειών

Κατά το σχεδιασμό επαγωγέων, ένα συχνό στόχο αποτελεί η επίτευξη ενός παράγοντα ποιότητας που είναι διπλάσιος από την επιθυμητή τιμή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αναμενόμενης μείωσης  $Q$  λόγω άλλων μηχανισμών απώλειας στο κύκλωμα. Υψηλές τιμές ποιότητας  $Q$  σημαίνει ότι το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια πιο αποτελεσματικά.

Η επίδραση του “skin effect” κατά την ανάλυση μηχανισμού απωλειών είναι επίσης σημαντικός παράγοντας. Στις υψηλές συχνότητες το ρεύμα μέσω ενός αγωγού τείνει να ρέει στην επιφάνεια. Αφού ο ρεύμα ρέει διαμέσου μιας μικρότερης διατομής η αντίσταση μεγαλώνει.

$$R_{skin} = \frac{1}{\sigma \delta}, \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, \quad \sigma: \text{conductivity}, \quad \mu: \text{permeability} \quad (3.28)$$

Οι παράλληλες σπείρες μπορούν να μειώσουν την αντίσταση αν το βάθος του δέρματος υπερβαίνει το άθροισμα του πάχους του μεταλλικού σύρματος.

$$R_{eff} = R_o \left[ 1 + \frac{1}{10} \left( \frac{f}{f_{crit}} \right)^2 \right], \quad R_o: \text{DC resistance} \quad (3.29)$$

$$f_{crit} = \frac{3.1}{2\pi\mu} * \frac{w + s}{w^2} * f \quad (3.30)$$

Η επαγωγή και η χωρητικότητα διαφέρουν από την τιμή χαμηλής συχνότητας.

$$C_{tot} = \frac{R_o}{R_{eff}} C_o, \quad C_o: \text{Low frequency capacitance} \quad (3.31)$$

### 3.4 Επιλογή λογισμικού προσομοίωσης

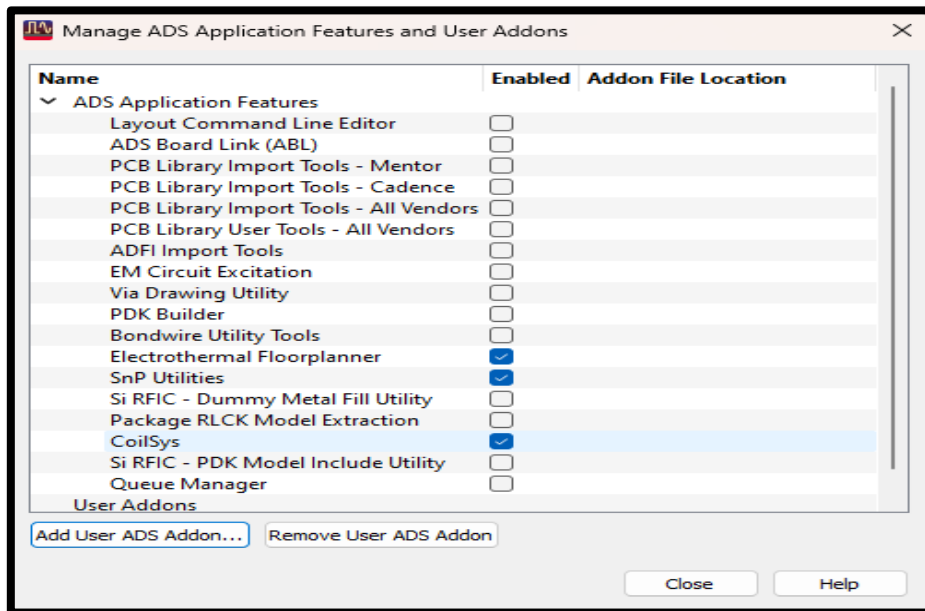
Το ADS (Advanced Design System) είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την προσομοίωση κυκλωμάτων υψηλών συχνοτήτων και ραδιοσυχνοτήτων. Τα εργαλεία προσομοίωσης και οι εκτενείς βιβλιοθήκες του το καθιστούν ιδανική επιλογή για τη μοντελοποίηση on-chip coplanar (συνεπίπεδων) επαγωγών. Το ADS προσφέρει δυνατότητες ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης που επιτρέπουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των επαγωγών σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Χρησιμοποιώντας το ADS, μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση των συνεπίπεδων επαγωγών, υπολογίζοντας βασικές παραμέτρους όπως η αυτεπαγωγή, ο συντελεστής Q και οι παρασιτικές χωρητικότητες. Το ADS έχει μια πληθώρα από επιλύτες αλλά σε αυτή τη διπλωματική θα χρησιμοποιήσουμε τον επιλύτη FEM (Finite Element Method).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 Ανάλυση προσομοιωμένων σχεδίων ομοεπίπεδων επαγωγέων στα 30 GHz:

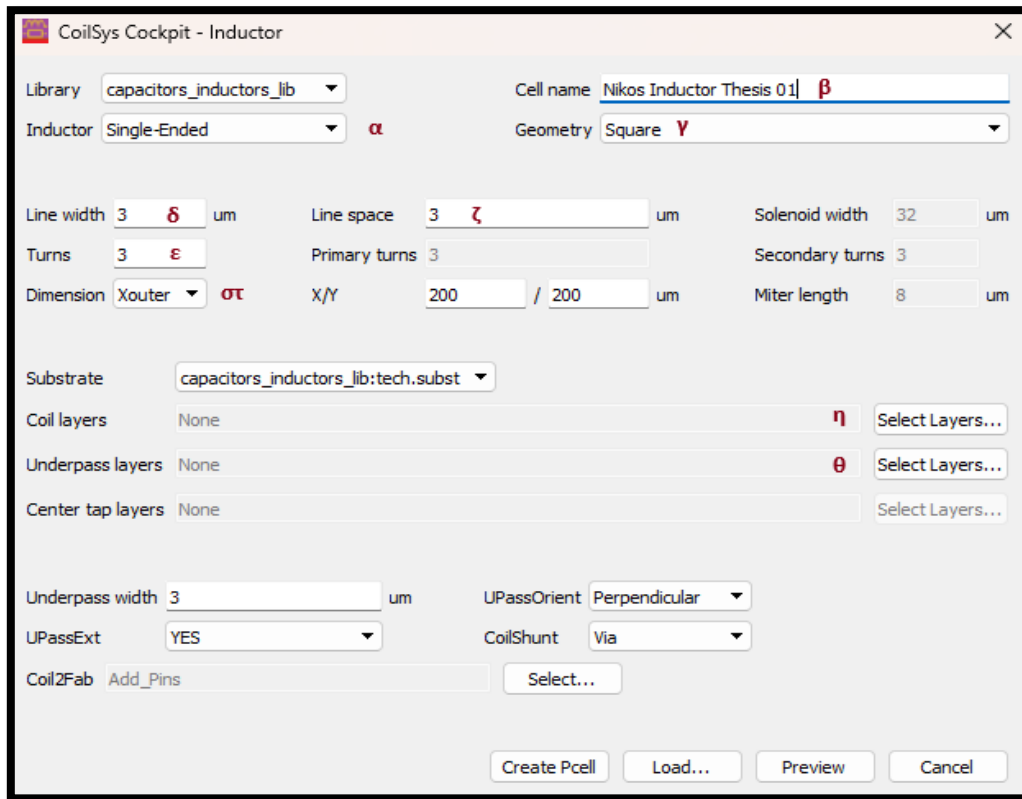
Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο για το σχεδιασμό και την προσομοίωση κυκλωμάτων θα χρησιμοποιήσουμε την πλατφόρμα ADS (Advanced Design System). Παρακάτω αναλύεται βήμα προς βήμα η διαδικασία πραγματοποίησης σχεδιασμού στο πρόγραμμα.

Το CoilSys είναι η πλατφόρμα, εντός του ADS, που χρησιμοποιούμε για την κατασκευή και την προσομοίωση συνεπίπεδων πηνίων και μετασχηματιστών. Μετά την εγκατάσταση αν δεν υπάρχει το CoilSys στο μενού, τότε πάμε Tools > App Manager και το επιλέγουμε από τη λίστα που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Το μενού για επιλογή του CoilSys

Ακολούθως για την κατασκευή πηνίου πάταμε CoilSys > Create Inductor Pcell και λαμβάνουμε το μενού που φαίνεται στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.2).



**Εικόνα 4.2 Το μενού για επιλογή του CoilSys**

Τα πράγματα που πρέπει να ξέρουμε είναι τα παρακάτω όπως φαίνεται στην από πάνω εικόνα (εικόνα 4.2). Όσα δεν αναφέρονται θα αφήνονται πάντα όπως είναι.

- α. Τύπος πηνίου. Επιλέγουμε πάντα Single-Ended για αυτεπαγωγή.
- β. Όνομα στοιχείου. Πρέπει να δοθεί για να μπορέσει να γίνει επιλογή στα η και θ.
- γ. Γεωμετρία στοιχείου. Υπάρχει τετραγωνική, οκταγωνική, κυκλική και Mitered Rectangular.
- δ. Πάχος περιελίξεων σε μικρόμετρα (um).
- ε. Αριθμός περιελίξεων. Δεν είναι απαραίτητο να είναι ακέραιος αριθμός.
- στ. Αν οι διαστάσεις x και y δηλώνουν την εσωτερική (Xinner) ή την εξωτερική (Xouter) διάμετρο του πηνίου..
- ζ. Απόσταση μεταξύ περιελίξεων σε μικρόμετρα (um).
- η. Επίπεδο περιελίξεων. Επιλέγουμε πάντα metal1.
- θ. Επίπεδο διαβάσεων. Οι διαβάσεις είναι ένα επίπεδο πάνω. Το χρησιμοποιούμε για να μπορέσουμε να βγούμε από τα αδιέξοδα που δημιουργούνται στο «δισδιάστατο» επίπεδο που σχεδιάζουμε. Επιλέγουμε πάντα Bridgehead.

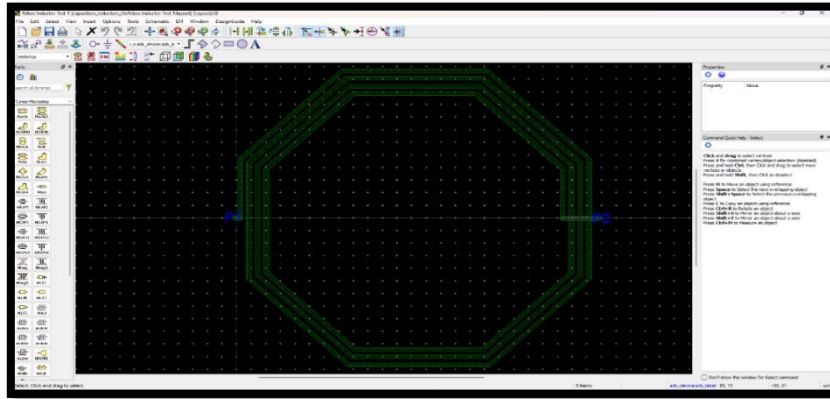
Ακολούθως για την κατασκευή πηνίου πάταμε CoilSys > Create Inductor Pcell).

## 4.2 Προετοιμασία προσομοίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξηγήσουμε τον τρόπο κατασκευής ενός μοντέλου. Όλα τα βήματα θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σε κάθε μοντέλο που θα προσομοιώσουμε. Στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων θα αναφέρονται συνοπτικά οι αρχικές επιλογές από το μενού του CoilSys.

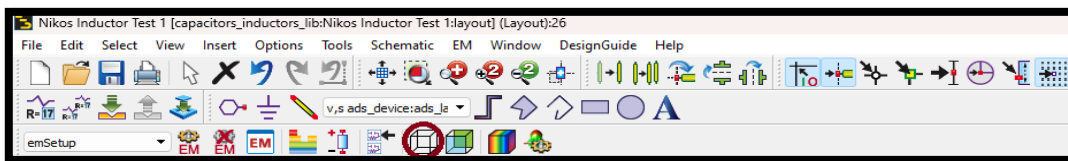
Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

Από τις αρχικές επιλογές της παραπάνω φωτογραφίας, αφού αλλάξουμε σε οκταγωνική γεωμετρία και πλήθος περιελίξεων 3.5, παίρνουμε το πηνίο που βλέπουμε στη εικόνα από κάτω (εικόνα 4.3).



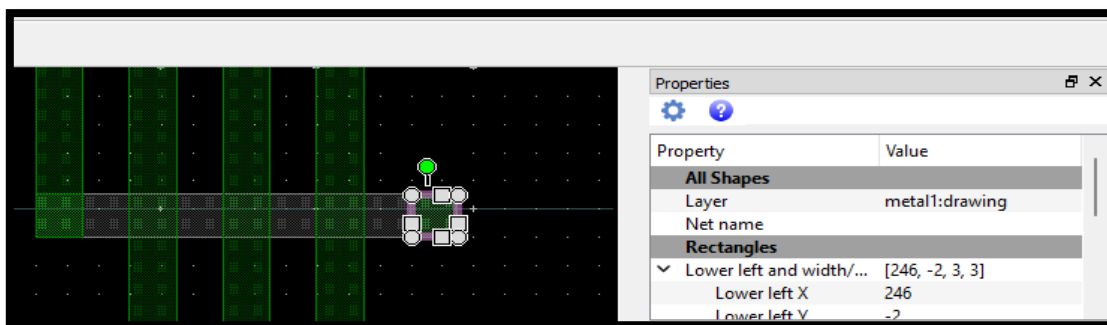
**Εικόνα 4.3 Τ Πηνίο οκταγωνικής γεωμετρίας 3,5 περιελίξεων.**

Αρχικά σβήνουμε τα pins P1 και P2. Έπειτα πατάμε στο 3D EM Preview Without EM Setup Preprocessing (εικόνα 4.4) για να δούμε το τρισδιάστατο μοντέλο και να εντοπίσουμε που χρειάζεται να συνδέσουμε το επίπεδο περιελίξεων metal1 με το επίπεδο διαβάσεων Bridgehead μέσω ενός Bridgefoot. Θα μας ζητήσει να σώσουμε το αρχείο γιατί κάναμε αλλαγές. Πατάμε Save. Το αποτέλεσμα φαίνεται πιο κάτω ( Εικόνα 4.6) όταν κοιτάμε ξανά το τρισδιάστατο μοντέλο για να επιβεβαιώσουμε ότι τοποθετήσαμε σωστά το Bridgefoot.



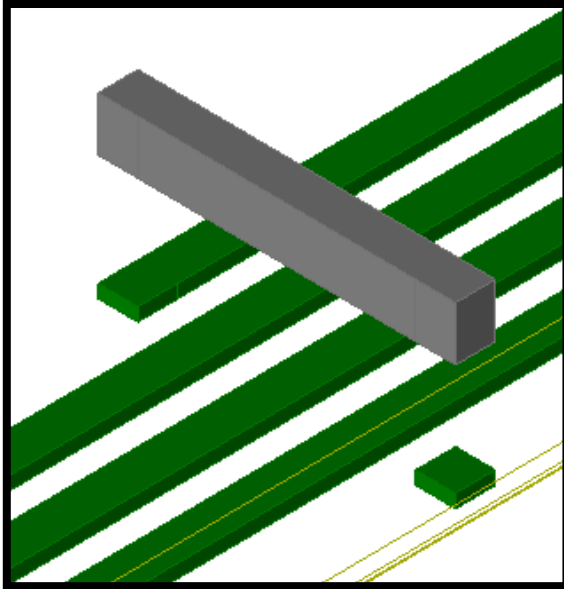
**Εικόνα 4.4 Τ Το κουμπί 3D EM Preview Without EM Setup Preprocessing.**

Μετά πρώτο μέλημα είναι να τοποθετηθεί όπου χρειάζεται το εν λόγω Bridgefoot. Για να γίνει αυτό πρέπει να επιλέξουμε το κομμάτι αγωγού στο σημείο που υπάρχει η διάβαση. Για να επιβεβαιώσουμε ότι είναι αγωγός πρέπει, στο μενού δεξιά, να βλέπουμε Layer metal1:drawing όπως φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα (εικόνα 4.5).

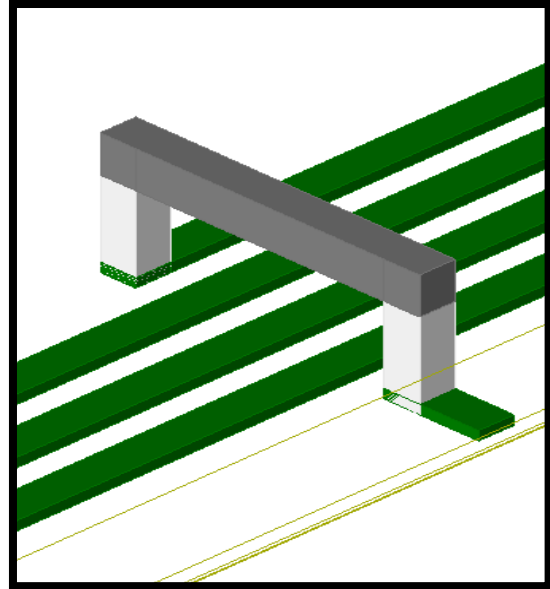


**Εικόνα 4.5 Το κομμάτι αγωγού επιλεγμένο. Στο μενού δεξιά φαίνεται ότι είναι αγωγός από το Layer -> metal1:drawing.Preprocessing.**

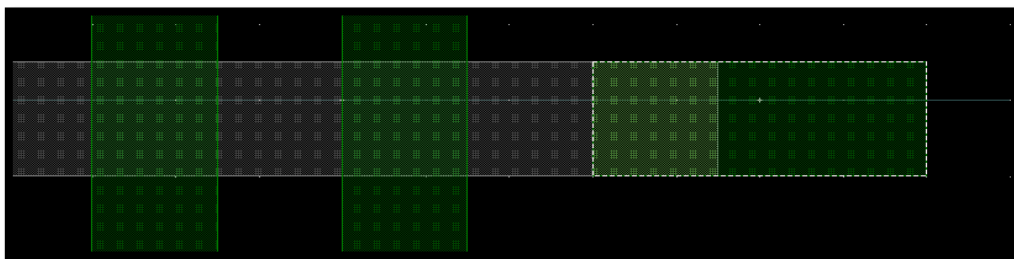
Προχωράμε σε αντιγραφή και επικόλληση με `ctrl + c`, `ctrl + v` και το τοποθετούμε επάνω στο κομμάτι `metal1` και στο νέο κομμάτι αλλάζουμε σε `Layer Bridgefoot:drawing`, Επιλέγουμε το `Bridgefoot` και `ctrl + c`, `ctrl + v` άλλη μια φορά στην άλλη πλευρά. Μετά επιλέγουμε ξανά τον αρχικό αγωγό στα αριστερά και τραβάμε για να αυξήσουμε την  $x$  διάσταση κρατώντας σταθερή την  $y$  (εικόνα 4.7). Τέλος κοιτάμε πάλι το τρισδιάστατο μοντέλο (εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.6 Το τρισδιάστατο μοντέλο πριν την αλλαγή φαίνεται ότι είναι αγωγός από το Layer -> `metal1:drawing.Preprocessing`.

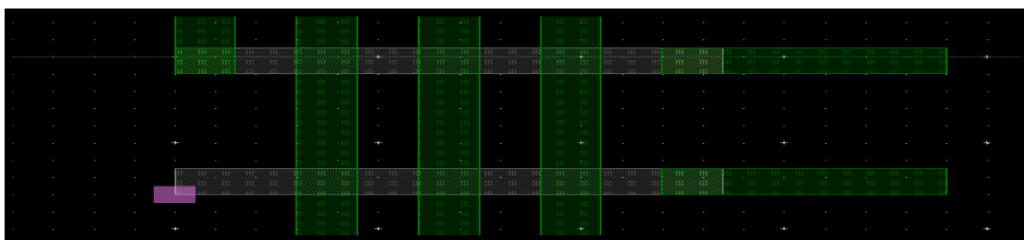


Εικόνα 4.7 Το τρισδιάστατο μοντέλο πριν την αλλαγή φαίνεται ότι είναι αγωγός από το Layer -> `metal1:drawing.Preprocessing`.



Εικόνα 4.8 Ο αρχικός αγωγός αφού αυξήσαμε την  $x$  διάσταση.ότι είναι αγωγός από το Layer -> `metal1:drawing.Preprocessing`.

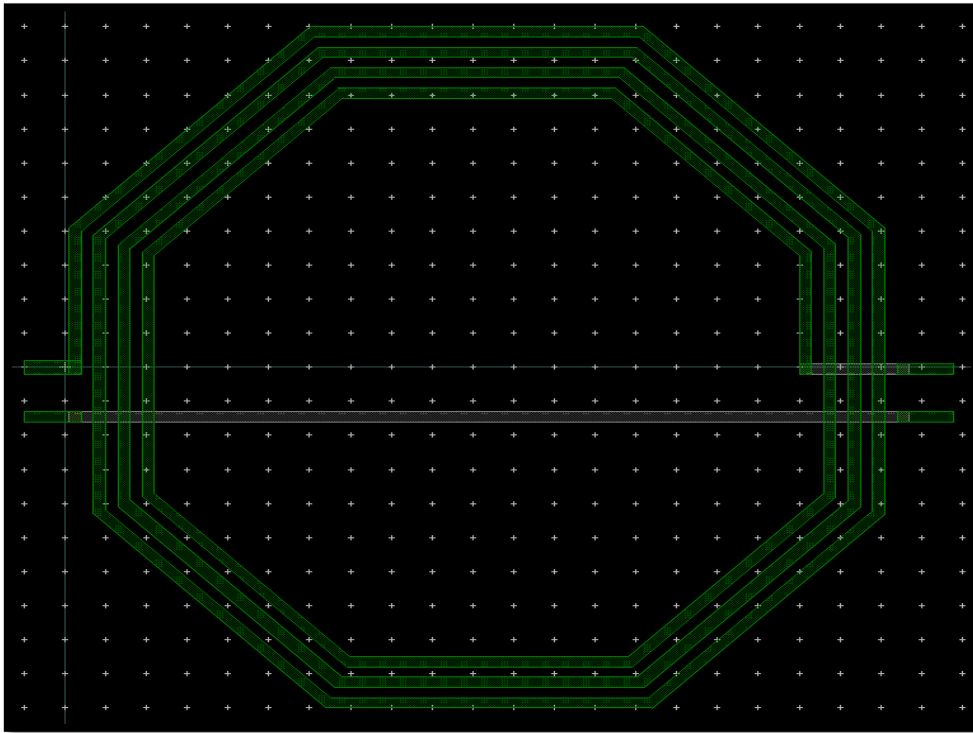
Έπειτα επιλέγουμε, από την δεξιά πλευρά, το `metal1`, το `bridgehead` και το `bridgefoot` και αντιγράφουμε. Κάνουμε επικόλληση και το λίγο πιο κάτω από το αρχικό όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 4.8)



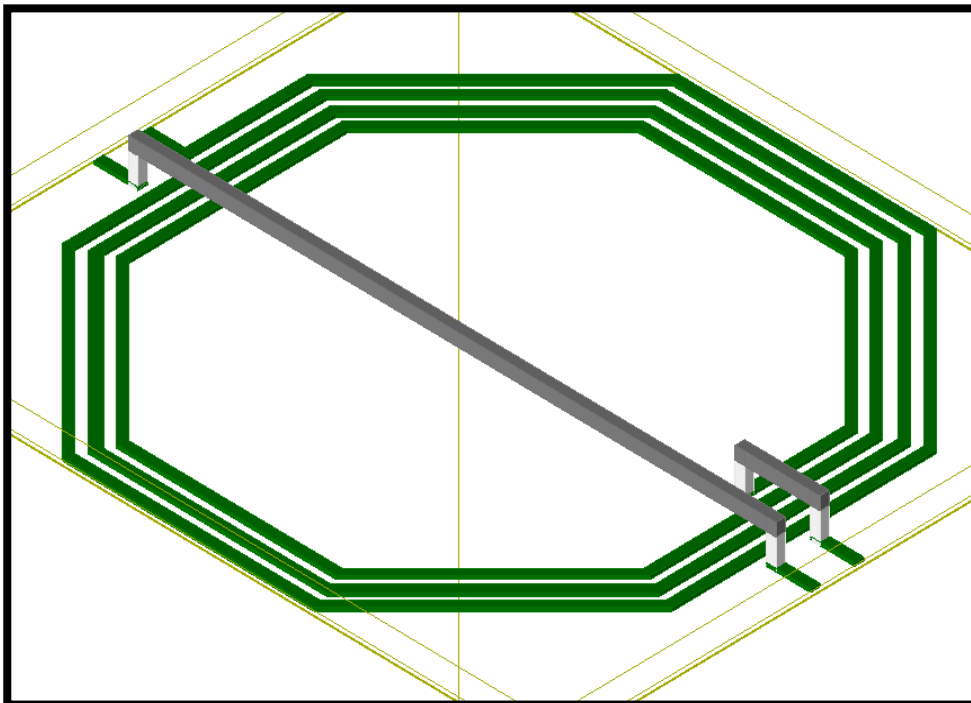
Εικόνα 4.9 Τα επικολλημένα `bridgehead`, `metal1` και `bridgefoot`.

Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

Μετά επιλέγουμε και τραβάμε το bridgehead αυξάνοντας την  $x$  διάσταση μέχρι  $x=1$ , αντιγράφουμε και επικολλούμε το bridgefoot στην δεξιά πλευρά και κάνουμε το ίδιο για το metal1. Κοιτάζοντας το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο μοντέλο το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στις εικόνες παρακάτω (εικόνες 4.10 και 4.11).

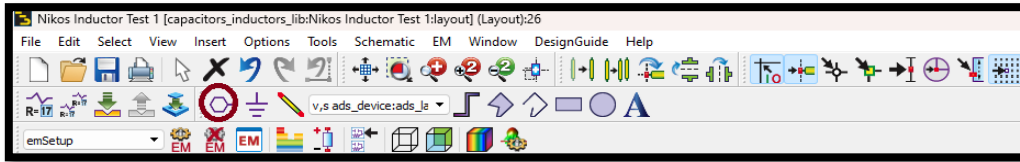


**Εικόνα 4.10 Δισδιάστατο μοντέλο.**



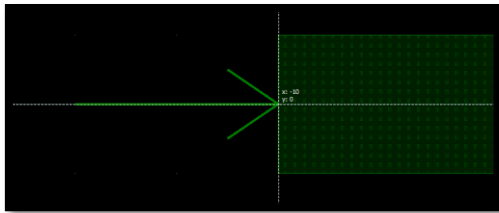
**Εικόνα 4.11 Τρισδιάστατο μοντέλο.**

Μετά πατάμε το Insert Pin (εικόνα 4.12) κουμπί για να βάλουμε καινούργια pins τα οποία είναι οι εισοδοι και έξοδοι του μοντέλου.

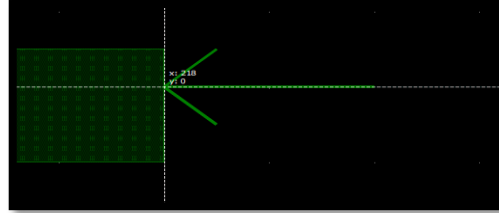


Εικόνα 4.12 Το κουμπί Insert Pin.

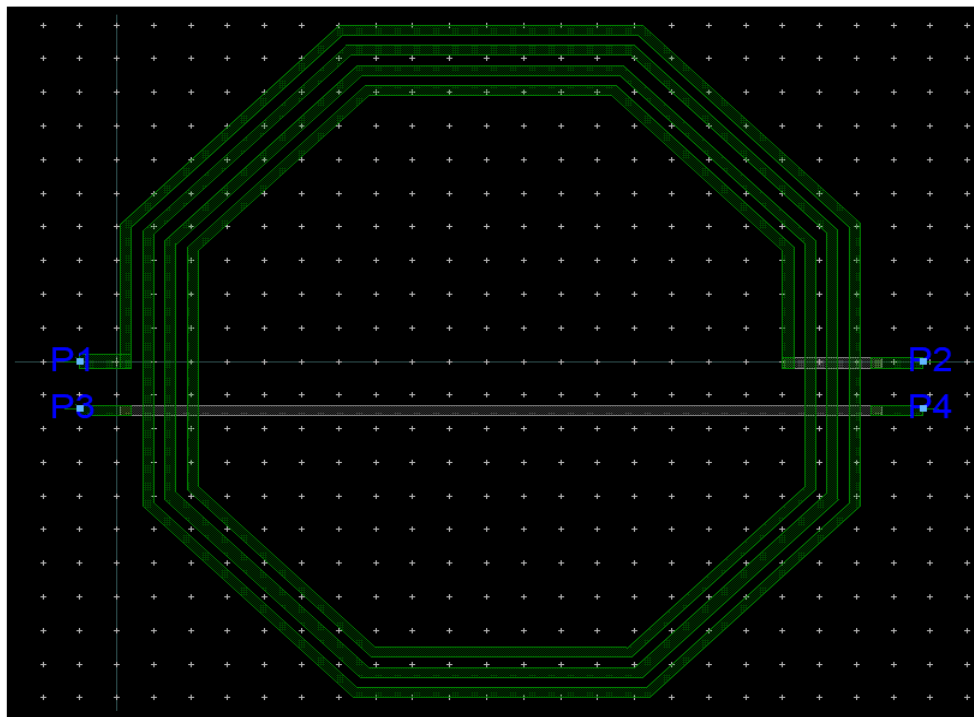
Θέτουμε τη μέγιστη μεγέθυνση και τα βάζουμε στην ίδια y συντεταγμένη να ακουμπάνε το metal1 αλλά να μην μπαίνει το βέλος μέσα στο πράσινο. Για να περιστρέψουμε το βέλος πατάμε ctrl + R (εικόνες 4.13 και 4.14).



Εικόνα 4.13 metal1 στην είσοδο (δεξιά πλευρά του μοντέλου).



Εικόνα 4.14 metal1 στην έξοδο (αριστερή πλευρά του μοντέλου).

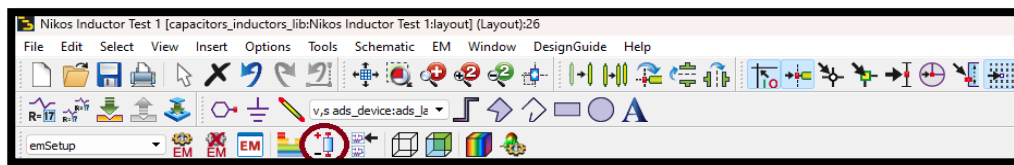


Εικόνα 4.15 Τελικό μοντέλο.

Βάζουμε τα P1 και P2 στην αρχή, στη δεξιά πλευρά, και στο τέλος του πηνίου σημειώνοντας και κρατώντας το ίδιο y και τα P2 και P3 στην αρχή και στο τέλος του παράλληλου αγωγού που φτιάξαμε πριν. Το τελικό μοντέλο φαίνεται στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.15).

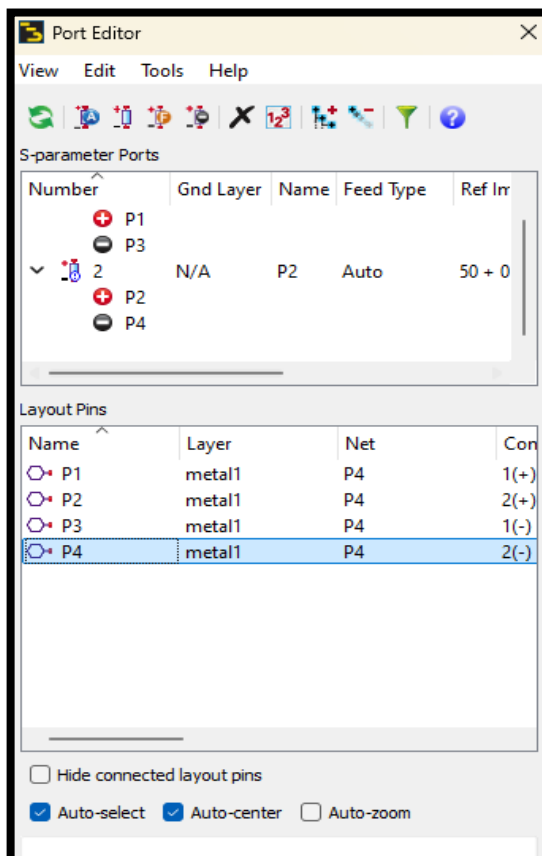


Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

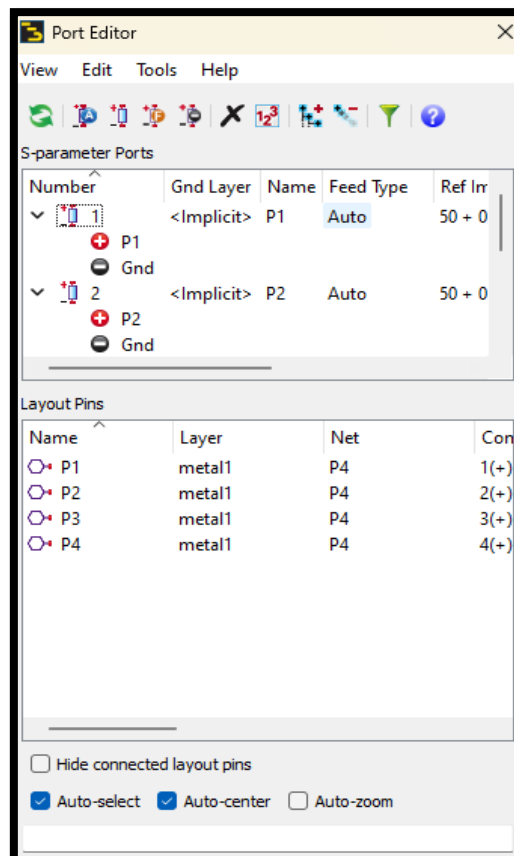


Εικόνα 4.16 Το κουμπί Port Editor

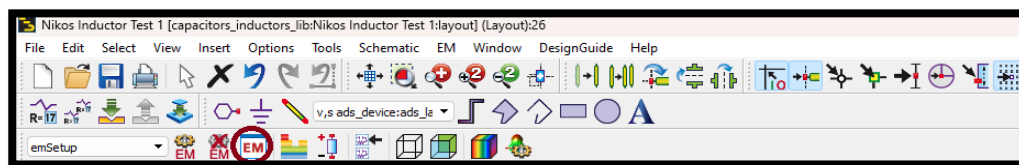
Μετά πατάμε το Port Editor (εικόνα 4.16) για να αλλάξουμε τα Pins. Βάζουμε το P3 στον αρνητικό πόλο του P1 και το P4 στον αρνητικό πόλο του P2 (εικόνες 4.17 και 4.18).



Εικόνα 4.17 Τα Pins πριν την αλλαγή.



Εικόνα 4.18 Τα Pins μετά την αλλαγή.

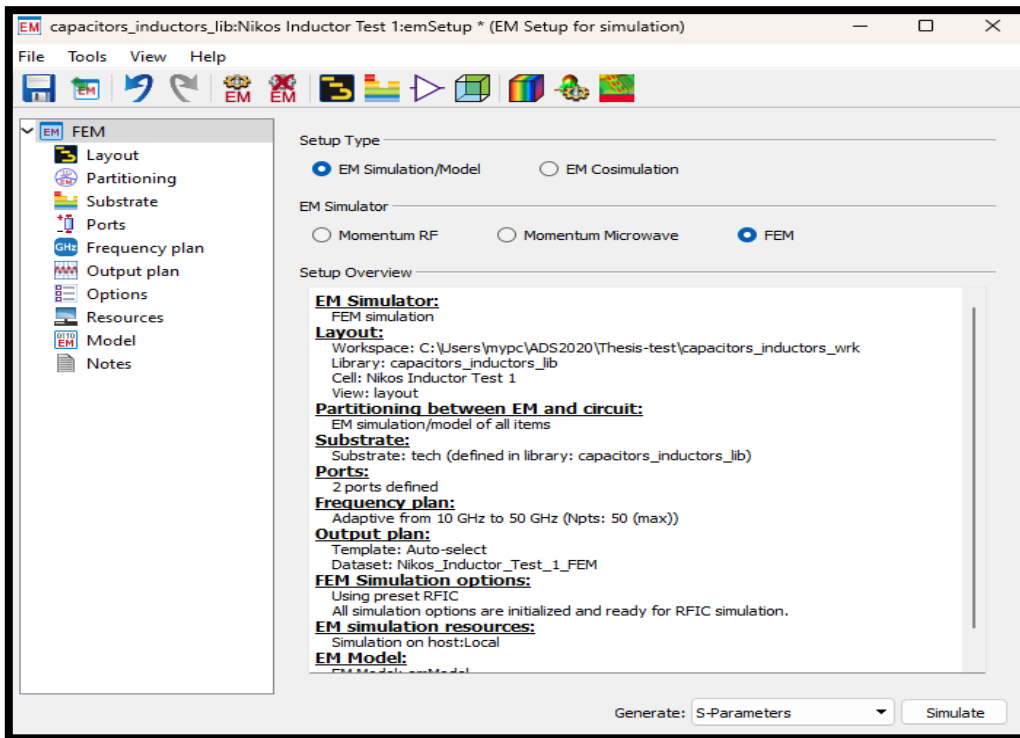


Εικόνα 4.19 Το κουμπί EM Simulator Settings.

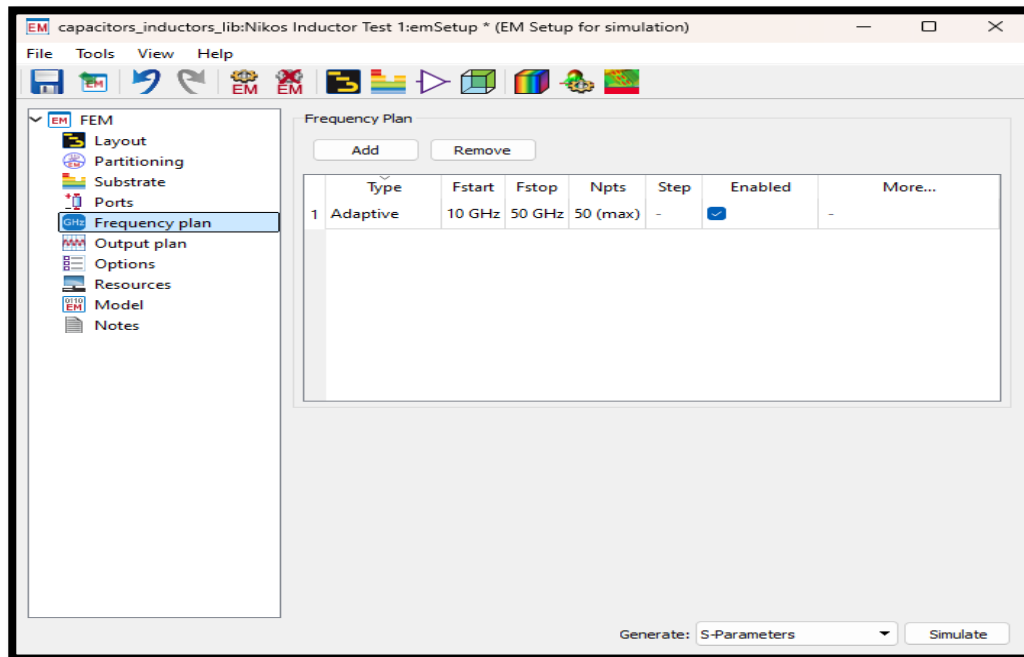
Ακολούθως πατάμε το κουμπί EM Simulation Settings (εικόνα 4.19) για να ανοίξει το μενού επιλογών προσομοίωσης.

Και στο μενού επιλέγουμε EM Simulator > FEM (εικόνα 4.20).

Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

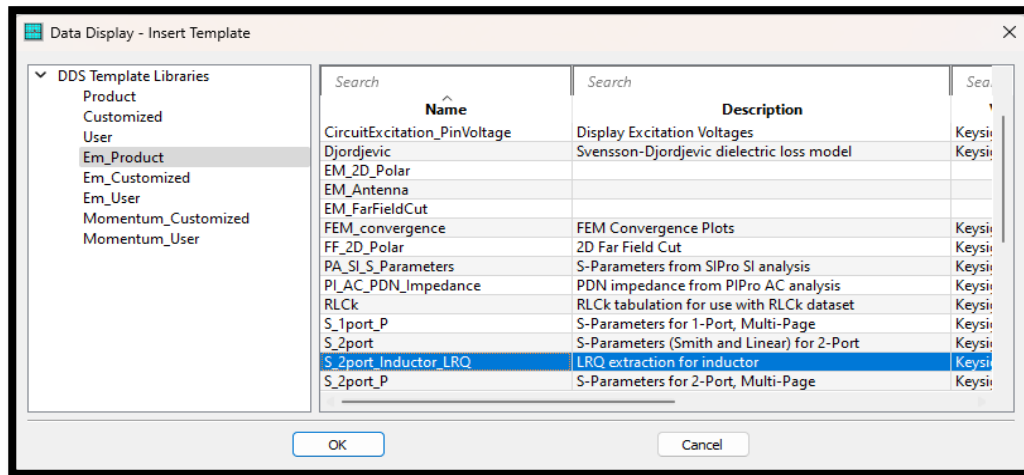


Εικόνα 4.20 Επιλέγουμε ανάλυση FEM (Finite Element Method).



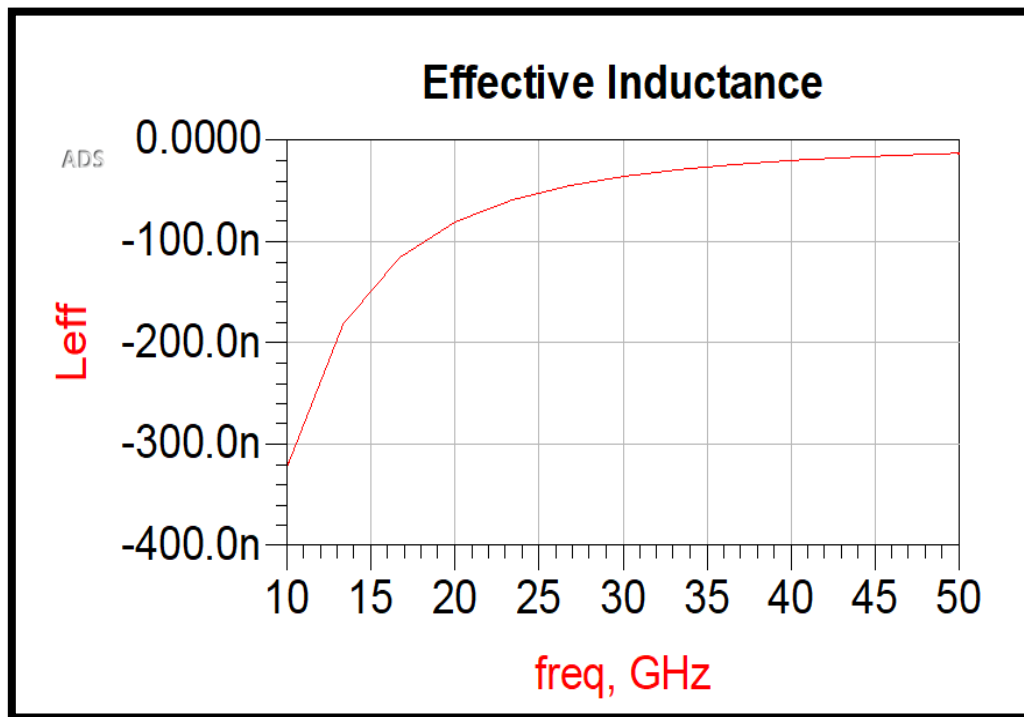
Εικόνα 4.21 Το μενού Frequency Plan συμπληρωμένο.

Στο Frequency plan (εικόνα 4.21) θέτουμε Fstart = 10 GHz, Fstop = 50 GHz για να συμπεριλάβουμε στο εύρος συχνοτήτων τα επιθυμητά 30GHz και πλήθος σημείων Npts = 50, και πατάμε Simulate.



Εικόνα 4.22 Το μενού επιλογών αφού πατήσουμε Insert > Template

Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση, για να ελέγξουμε τα αποτελέσματα, από τις 2 σελίδες αποτελεσμάτων που μας εμφανίζει επιλέγουμε αυτήν με τη γραφική Discrete Frequencies vs. Fitted (AFS or Linear), σβήνουμε τα αποτελέσματα που έχει και πατάμε Insert > Template και από τη λίστα επιλέγουμε S\_2port\_Inductor\_LRQ (εικόνα 4.22)



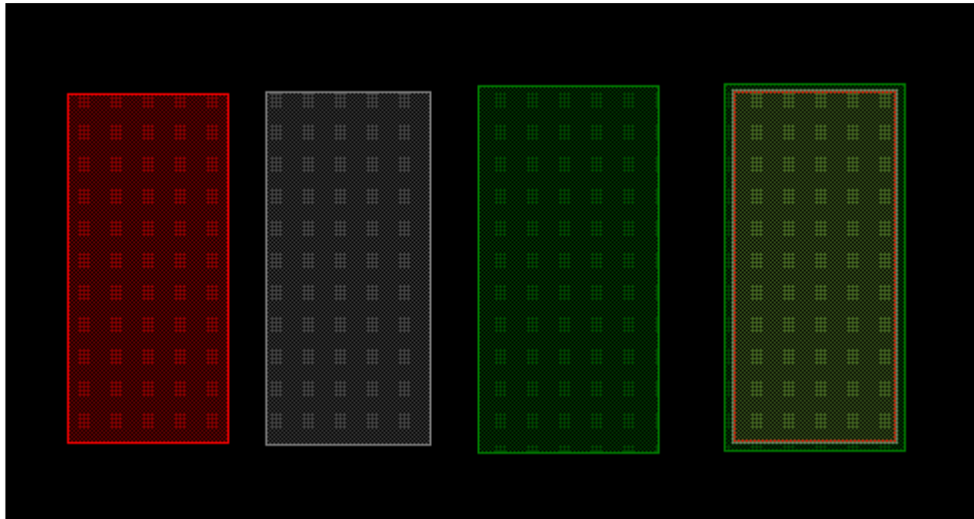
Εικόνα 4.23 Γραφική παράσταση της αυτεπαγωγής.

Τέλος, κοιτάμε την γραφική της αυτεπαγωγής  $L_{eff}$  (εικόνα 4.23) όπου από το πρόσημο διακρίνουμε αν το μοντέλο λειτουργεί σαν επαγωγή (θετικός ημιάξονας) ή χωρητικότητα (αρνητικός ημιάξονας).

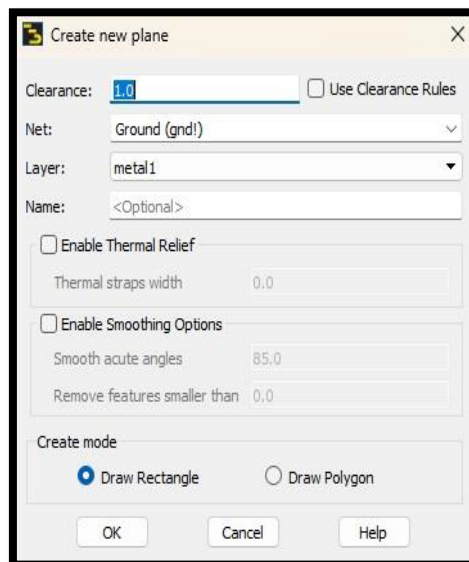
## Κατασκευή Pads 4.2

Τα pads είναι αγωγίμα κομμάτια που μας επιτρέπουν τη διασύνδεση του στοιχείου με τον εξωτερικό κόσμο. Για την κατασκευή των pads ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

Πρώτα θα φτιάξουμε τα 6 pads που θα χρειαστούμε. Αυτό το κάνουμε αντιγράφοντας ένα κομμάτι bridgefoot τρεις φορές και αλλάζοντας τις διαστάσεις τους. Μετά το αλλάζουμε το ένα από τα τρία σε bridgehead και το άλλο σε metal1 και αλλάζουμε πάλι τις διαστάσεις έτσι ώστε από το metal1 στο bridgehead και μετά στο bridgefoot να αυξάνονται οι διαστάσεις 2 με 5 μικρόμετρα τη φορά. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα από κάτω (εικόνα 4.24). Τα pads της γείωσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα παραλληλόγραμμα ενώ τα pads της εισόδου και εξόδου πρέπει να είναι τετράγωνα.



Εικόνα 4.24 Από αριστερά προς τα δεξιά είναι bridgefoot, bridgehead, metal1 και τελικό pad

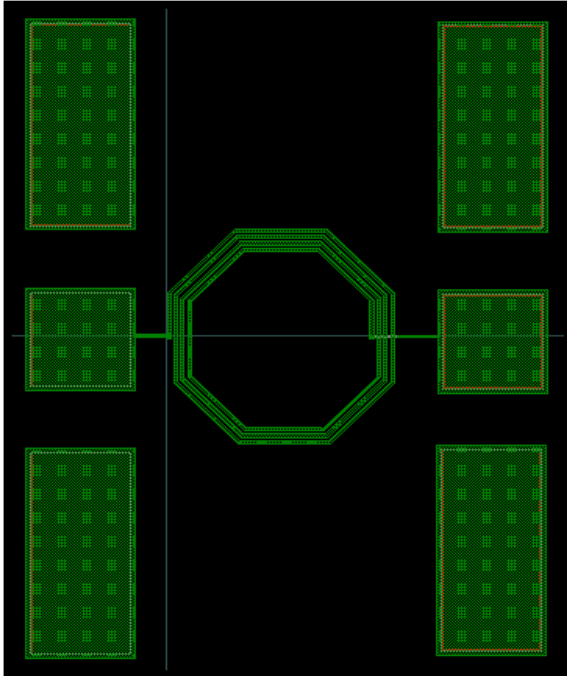


Εικόνα 4.25 Το μενού του Plane

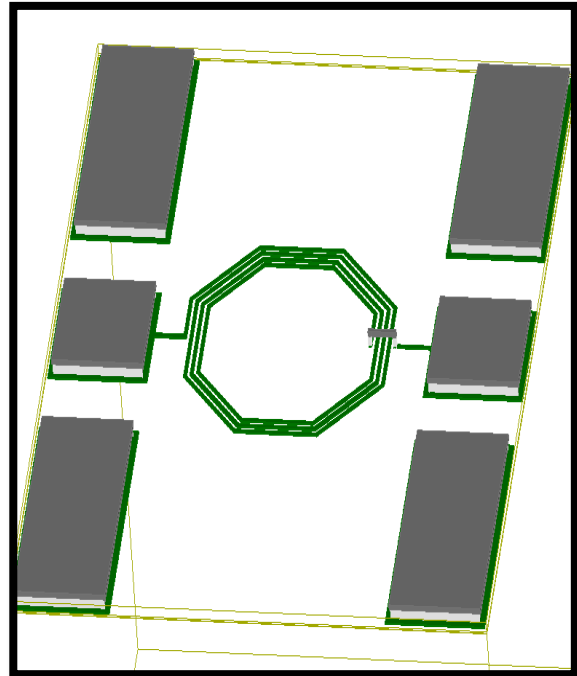
Τοποθετούμε τα pads που φτιάξαμε (έξι στο σύνολο. 2 τετράγωνα και 2 παραλληλόγραμμα) και κάνουμε τις συνδέσεις μεταξύ της εισόδου και της εξόδου αφήνοντας τα pads των γειώσεων χωρίς σύνδεση καθώς αυτά δια συνδεθούν από το plane.

Μετά πάμε **Insert > Plane** θα δούμε το μενού που φαίνεται στην εικόνα (εικόνα 4.25). Αλλάζουμε το **Clearance** (η απόσταση του αγωγού που θα φτιάξουμε από τους άλλους αγωγούς του μοντέλου), καθώς πρέπει να είναι η ίδια απόσταση που θέσαμε για την απόσταση μεταξύ περιελίξεων. Αυτό το βλέπουμε ανάλογα το μοντέλο. Στο **Layer** επιλέγουμε **metal1** καθώς θέλουμε να φτιάξουμε αγωγό.

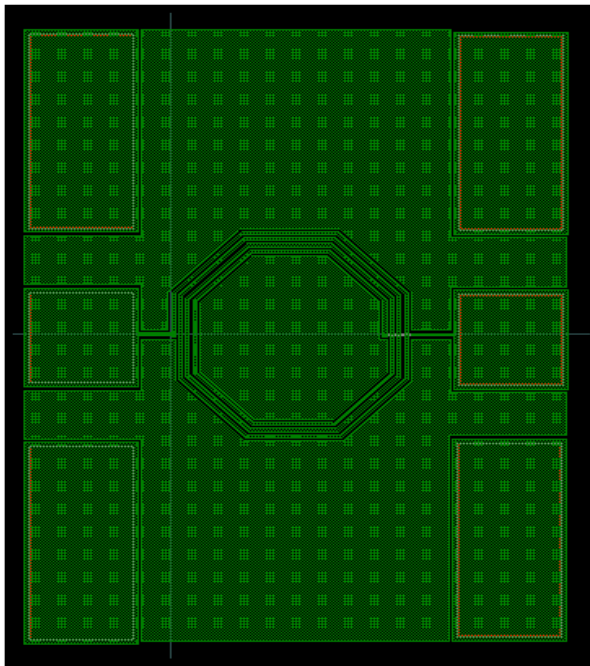
Από κάτω βλέπουμε το μοντέλο πριν βάλουμε το **Plane** (εικόνες 4.26 και 4.27).



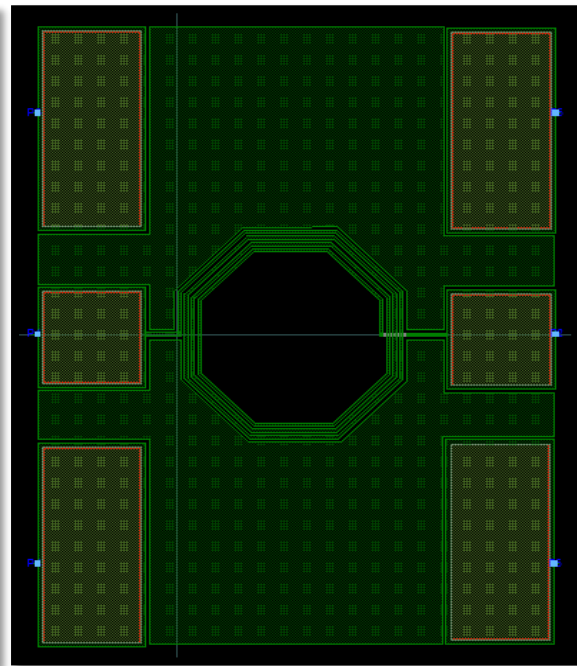
Εικόνα 4.26 Τα pads πριν το metal1 Plane  
δισδιάστατο μοντέλο με όλα τα bridgefoot



Εικόνα 4.27 Τα pads πριν το metal1 Plane  
τριδιάστατο μοντέλο με όλα τα bridgefoot



Εικόνα 4.28 Μετά το metal1 Plane



Εικόνα 4.29 Αφού κάνουμε Flatten και  
σβήσουμε τον αγωγό στο κέντρο

Προσομοίωση Ομοεπίπεδου Επαγωγέα ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 30 GHz

Στη συνέχεια πατάμε ok, με επιλεγμένο το Draw Rectangle, και διαγράφουμε ένα τετράγωνο που να καλύπτει όλο το στοιχείο, πατάμε Enter και παίρνουμε την παραπάνω (εικόνα 4.28).

Μετά πάμε Edit > Component > Flatten και επιλέγουμε Flatten one level of hierarchy και τέλος σβήνουμε τον μεσαίο αγωγό.

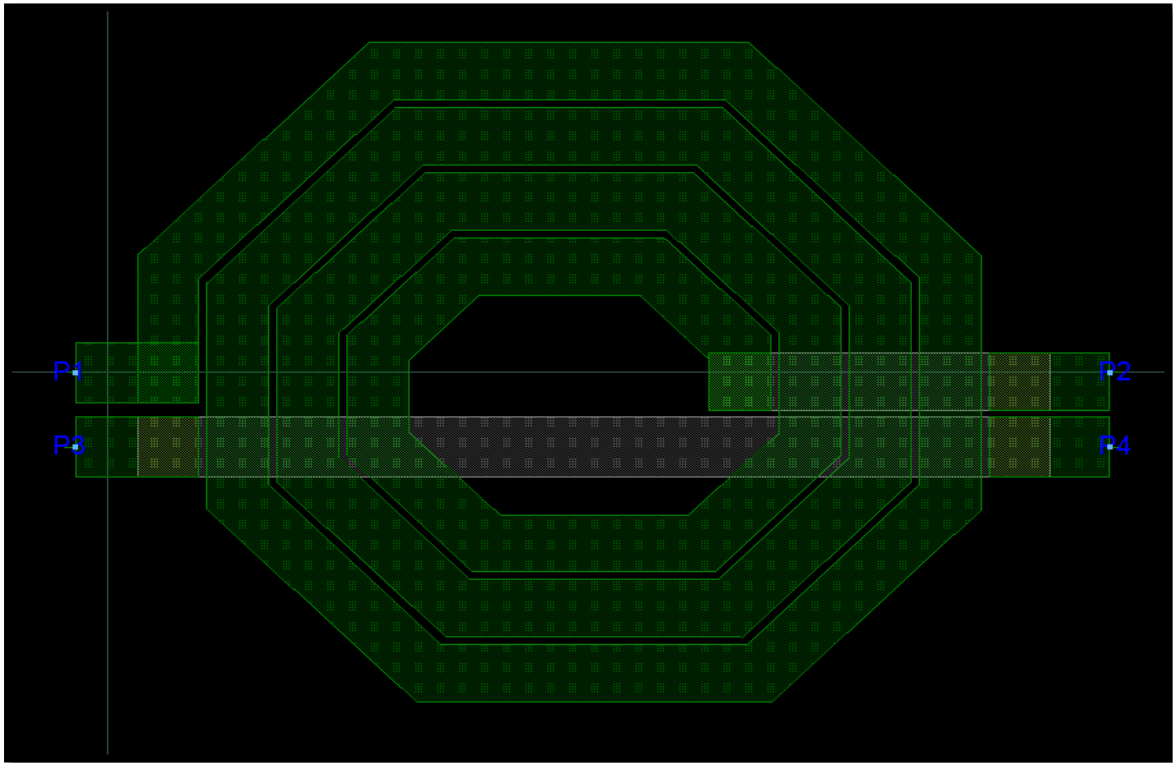
Αφού βάλουμε τα απαραίτητα pins (σε αυτή την περίπτωση θα χρειαστούμε 6 pins. 2 για είσοδο και έξοδο και 4 για τις γειώσεις) τα φτιάχνουμε κατάλληλα μέσω του Port Editor όπως είδαμε και πιο πάνω μόνο που αυτή τη φορά βάζουμε τα pins P3 και P4 στην γείωση του P1 και τα P5 και P6 στη γείωση του P2. Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε το τελικό σχήμα (εικόνα 4.29).

## 4.3 Αποτελέσματα

### A – Πηνίο 31 pH

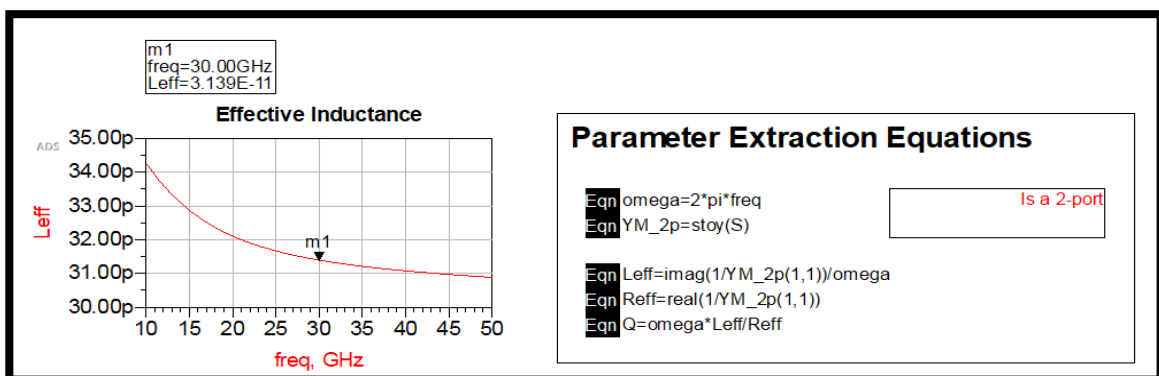
Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.30) βλέπουμε το κύκλωμα μιας πρώτης προσομοίωσης ενός πηνίου με τα εξής χαρακτηριστικά:

- α) πάχος γραμμής 23  $\mu\text{m}$
- β) απόσταση μεταξύ γραμμών 3  $\mu\text{m}$
- γ) πλήθος περιελίξεων 3.5
- δ) διαστάσεις X/Y 300/250 με εξωτερική διάμετρο



Εικόνα 4.30 Το δισδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.31) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά για όλο το εύρος συχνοτήτων και αυτεπαγωγή L στα 30 GHz περίπου ίση με 31 pH.

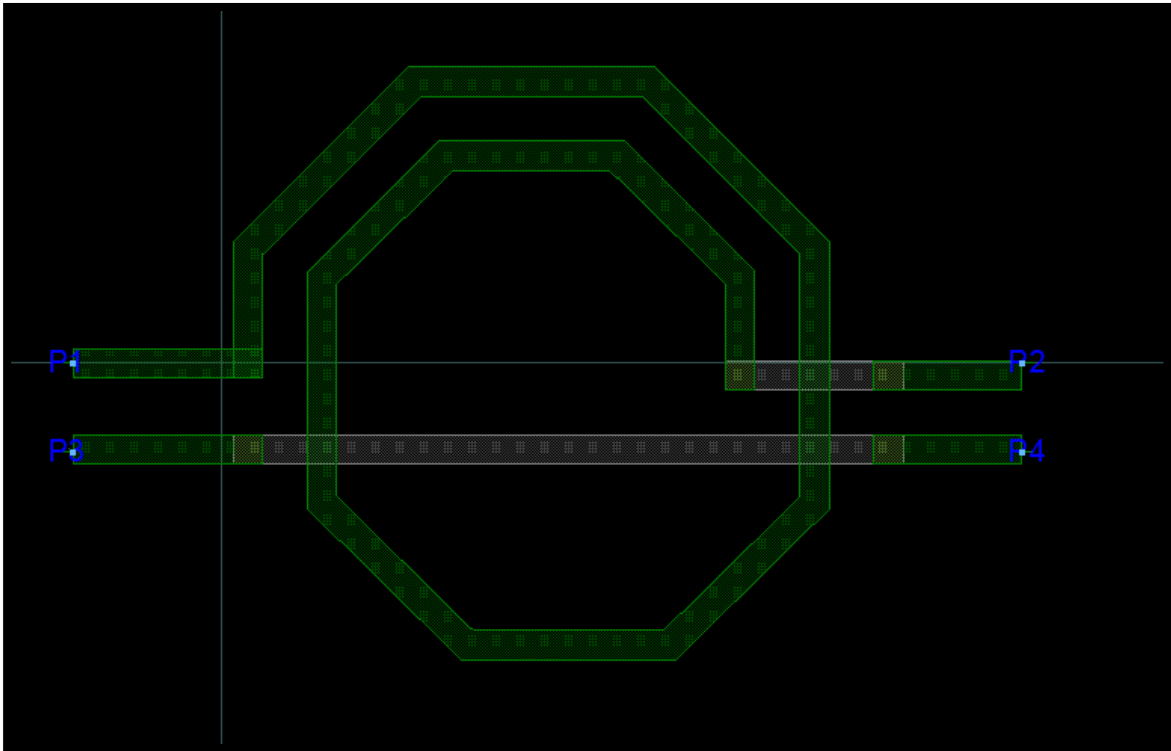


Εικόνα 4.31 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$

## B - Πηνίο 2,3 nH

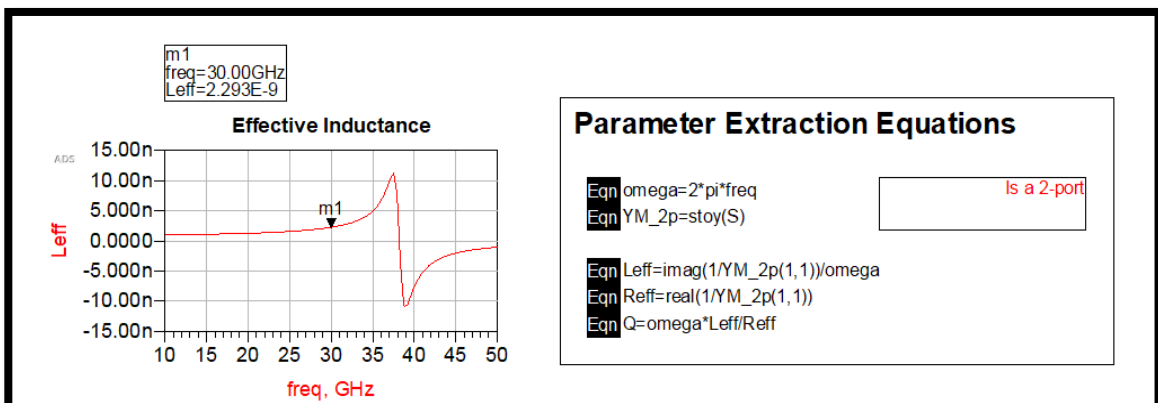
Ακόμη, στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.32) βλέπουμε το κύκλωμα μιας πρώτης προσομοίωσης ενός πηνίου με χαρακτηριστικά:

- α) πάχος γραμμής 10  $\mu\text{m}$
- β) απόσταση μεταξύ γραμμών 15  $\mu\text{m}$
- γ) πλήθος περιελίξεων 1.5
- δ) διαστάσεις X/Y 200/200  $\mu\text{m}$  με εξωτερική διάμετρο



Εικόνα 4.32 Το διδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.33) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά μέχρι τη συχνότητα 38 GHz όπου στο σημείο αυτό υπάρχει συντονισμός του κυκλώματος και αναστροφή συμπεριφοράς σε χωρητική. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 2300 pH.



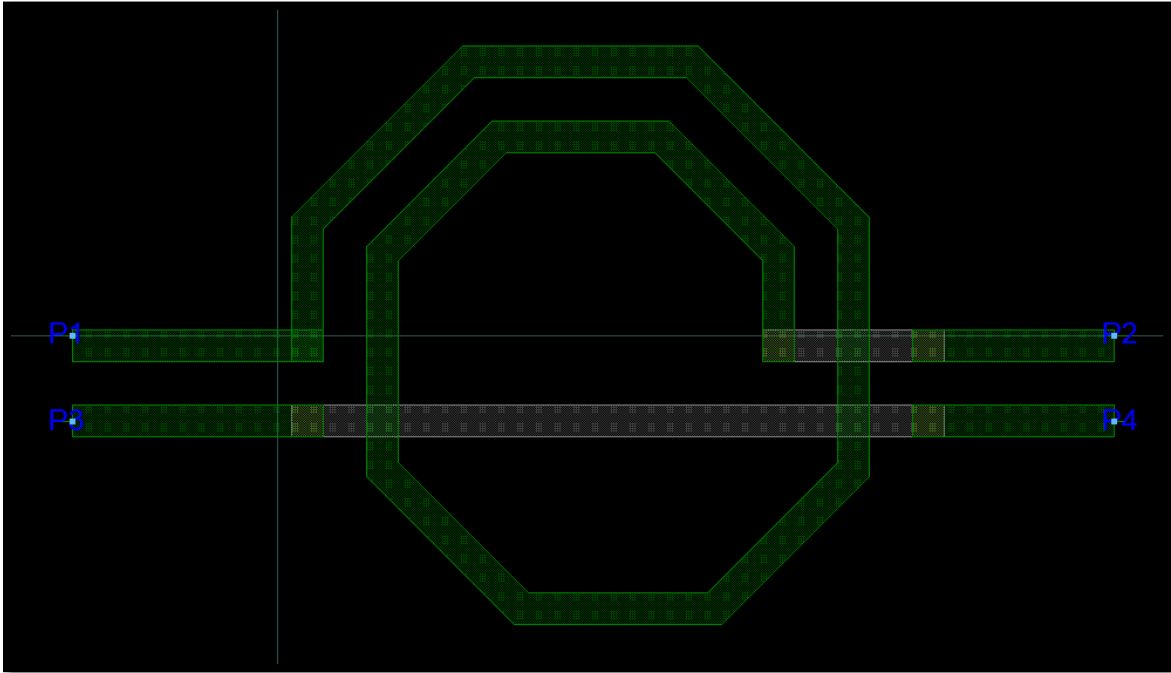
Εικόνα 4.33 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$



## Γ – Πηνίο 3 nH

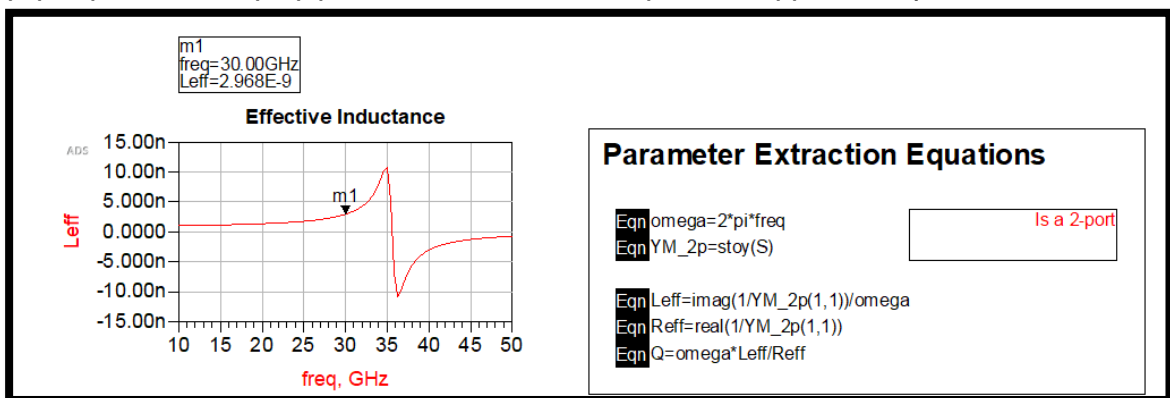
Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.34) βλέπουμε το κύκλωμα μιας πρώτης προσομοίωσης ενός πηνίου με χαρακτηριστικά:

- α) πάχος γραμμής 11  $\mu\text{m}$
- β) απόσταση μεταξύ γραμμών 15  $\mu\text{m}$
- γ) πλήθος περιελίξεων 1.5
- δ) διαστάσεις X/Y 200/200  $\mu\text{m}$  με εξωτερική διάμετρο



Εικόνα 4.34 Το δισδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.35) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά μέχρι τη συχνότητα 36 GHz όπου στο σημείο αυτό υπάρχει συντονισμός του κυκλώματος και αναστροφή συμπεριφοράς σε χωρητική. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 3000 pH.

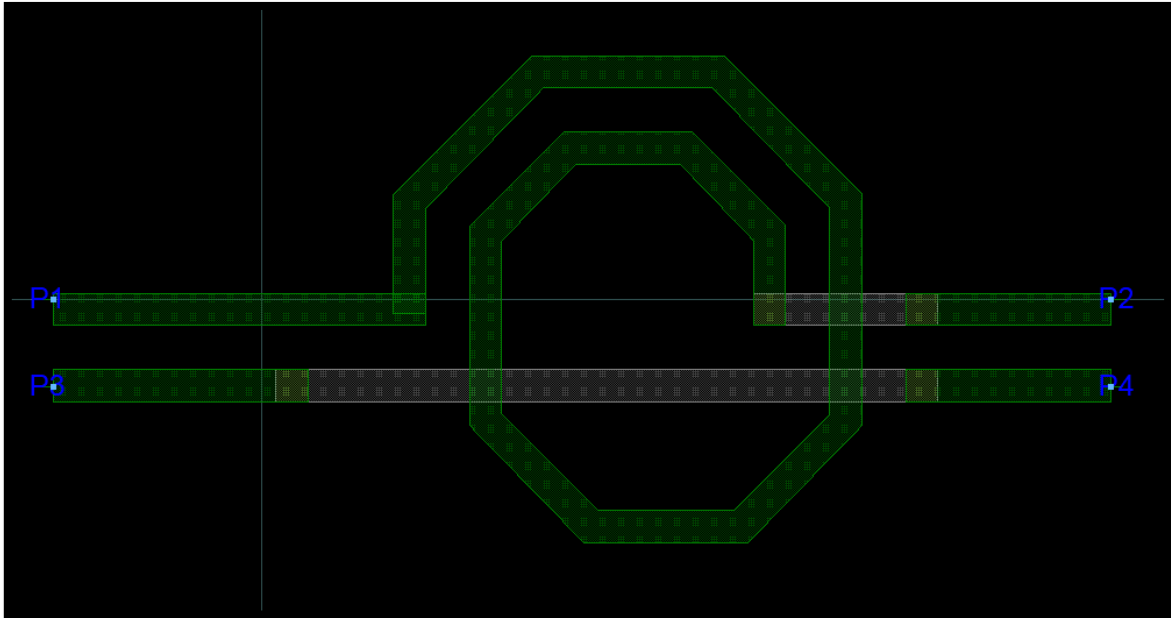


Εικόνα 4.35 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$

## $\Delta$ – Πηνίο 1,5 nH

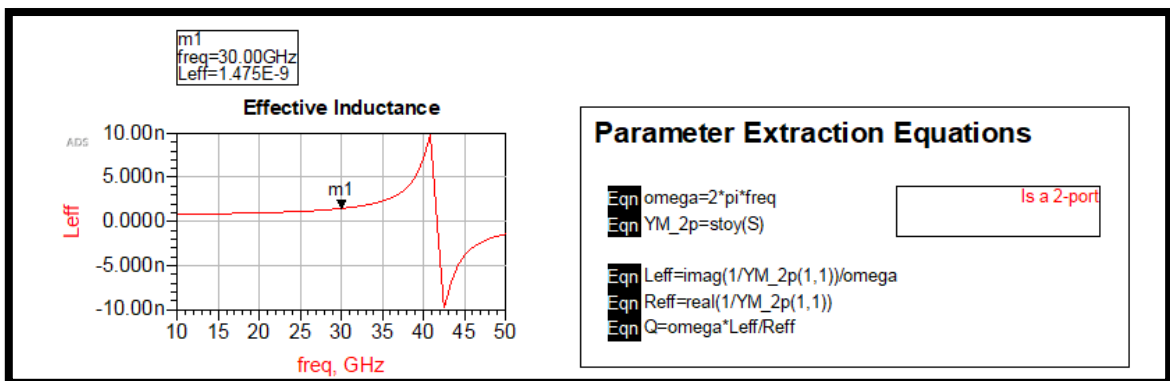
Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.36) βλέπουμε το κύκλωμα μιας πρώτης προσομοίωσης ενός πηνίου με χαρακτηριστικά:

- α) πάχος γραμμής 12  $\mu\text{m}$
- β) απόσταση μεταξύ γραμμών 15  $\mu\text{m}$
- γ) πλήθος περιελίξεων 1.5
- δ) διαστάσεις X/Y 170/160  $\mu\text{m}$  με εξωτερική διάμετρο



Εικόνα 4.36 Το δισδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.37) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά μέχρι τη συχνότητα 42 GHz όπου στο σημείο αυτό υπάρχει συντονισμός του κυκλώματος και αναστροφή συμπεριφοράς σε χωρητική. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 1500 pH.

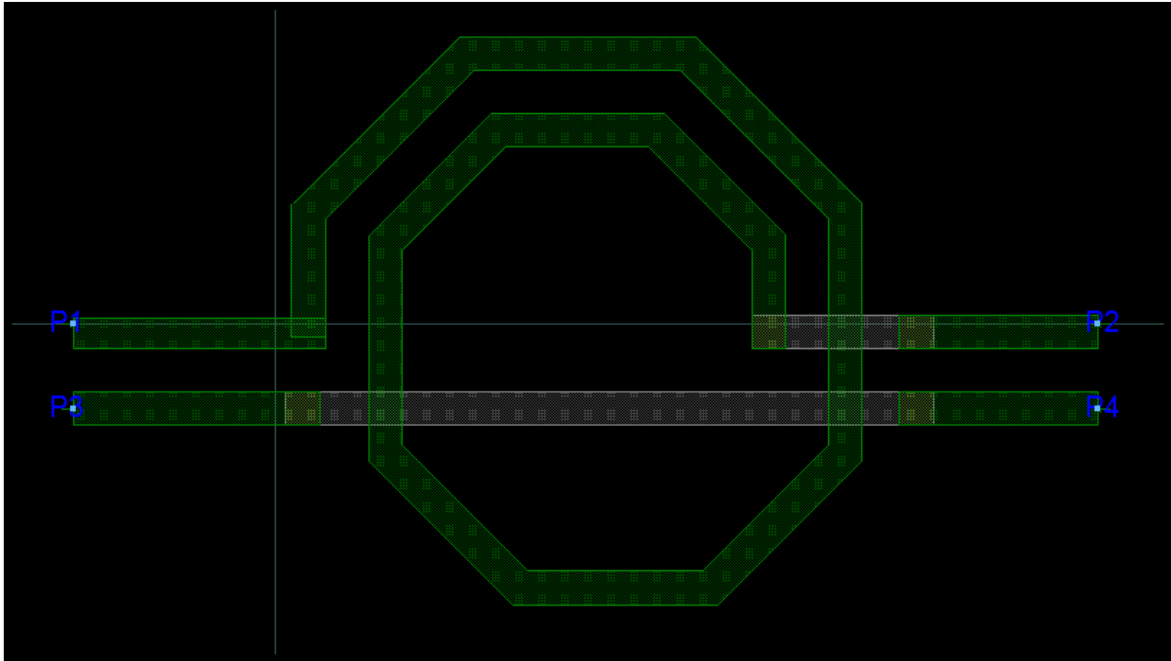


Εικόνα 4.37 Η αυτεπαγωγή  $L_{eff}$

## Ε – Πηνίο 2,8 nH

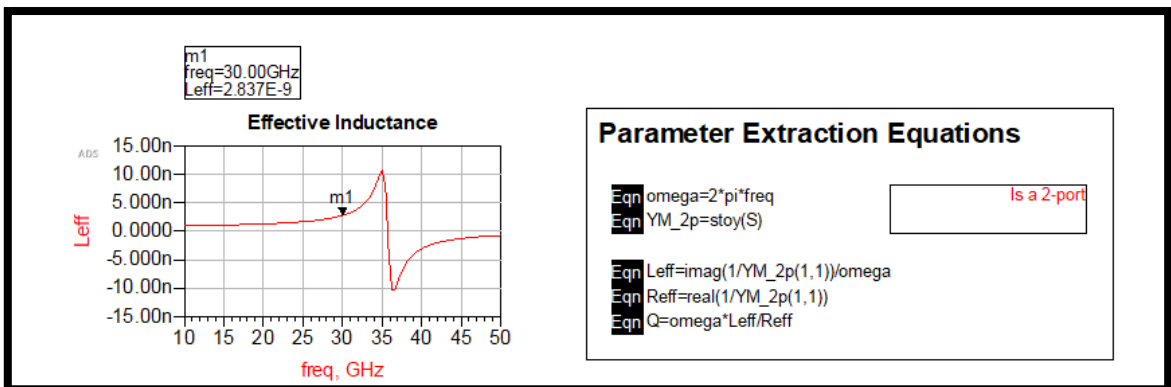
Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.38) βλέπουμε το κύκλωμα μιας πρώτης προσομοίωσης ενός πηνίου με χαρακτηριστικά:

- α) πάχος γραμμής 12  $\mu\text{m}$
- β) απόσταση μεταξύ γραμμών 15  $\mu\text{m}$
- γ) πλήθος περιελίξεων 1.5
- δ) διαστάσεις X/Y 200/200  $\mu\text{m}$  με εξωτερική διάμετρο



Εικόνα 4.38 Το δισδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.39) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά μέχρι τη συχνότητα 36 GHz όπου στο σημείο αυτό υπάρχει συντονισμός του κυκλώματος και αναστροφή συμπεριφοράς σε χωρητική. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 2800 pH.

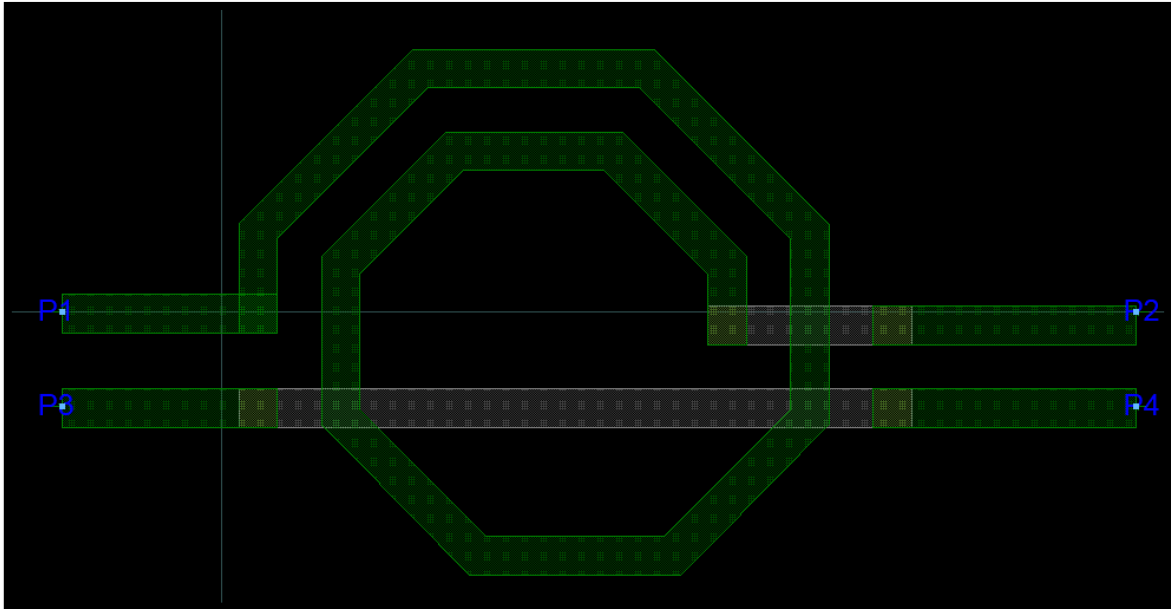


Εικόνα 4.39 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$

## ΣΤ – Πηνίο 1,7 nH

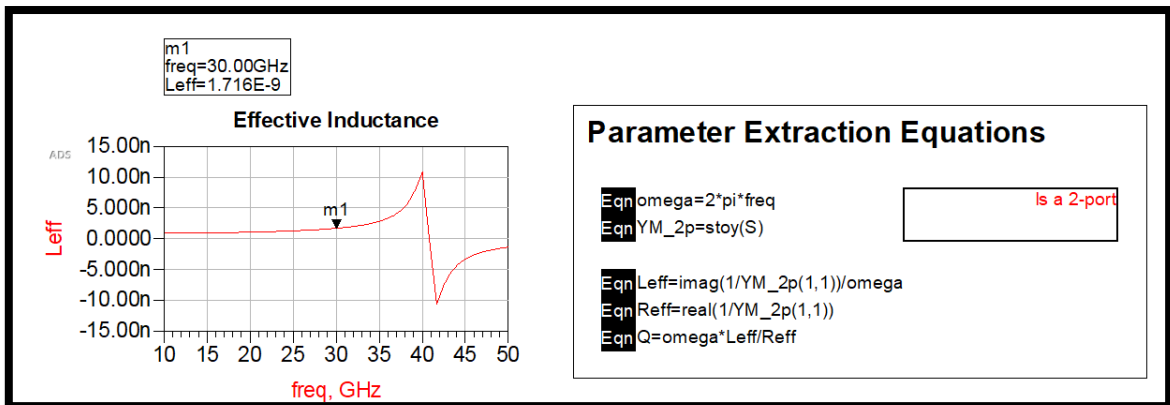
Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.40) βλέπουμε το κύκλωμα μιας πρώτης προσομοίωσης ενός πηνίου με χαρακτηριστικά

- α) πάχος γραμμής 13  $\mu\text{m}$
- β) απόσταση μεταξύ γραμμών 15  $\mu\text{m}$
- γ) πλήθος περιελίξεων 1.5
- δ) διαστάσεις X/Y 200/200  $\mu\text{m}$  με εξωτερική διάμετρο



Εικόνα 4.40 Το δισδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.41) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά μέχρι τη συχνότητα 41 GHz όπου στο σημείο αυτό υπάρχει συντονισμός του κυκλώματος και αναστροφή συμπεριφοράς σε χωρητική. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 1700 pH.

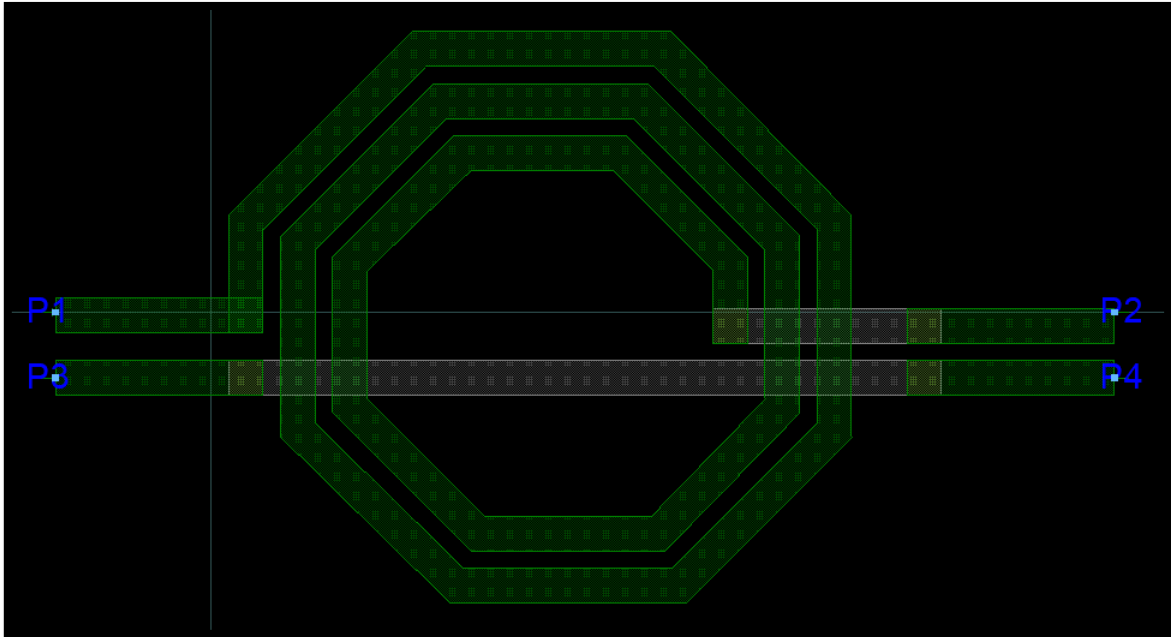


Εικόνα 4.41 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$

## Z – Πηνίο 1,2 nH

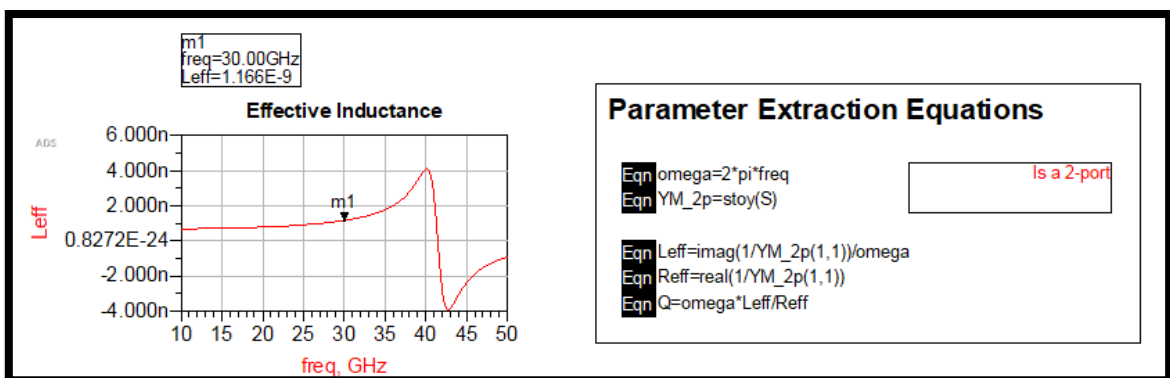
Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.42) βλέπουμε το κύκλωμα μιας πρώτης προσομοίωσης ενός πηνίου με χαρακτηριστικά

- α) πάχος γραμμής 10  $\mu\text{m}$
- β) απόσταση μεταξύ γραμμών 15  $\mu\text{m}$
- γ) πλήθος περιελίξεων 3.5
- δ) διαστάσεις X/Y 200/200  $\mu\text{m}$  με εξωτερική διάμετρο



Εικόνα 4.42 Το δισδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.43) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά μέχρι τη συχνότητα 42 GHz όπου στο σημείο αυτό υπάρχει συντονισμός του κυκλώματος και αναστροφή συμπεριφοράς σε χωρητική. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 1170 pH.

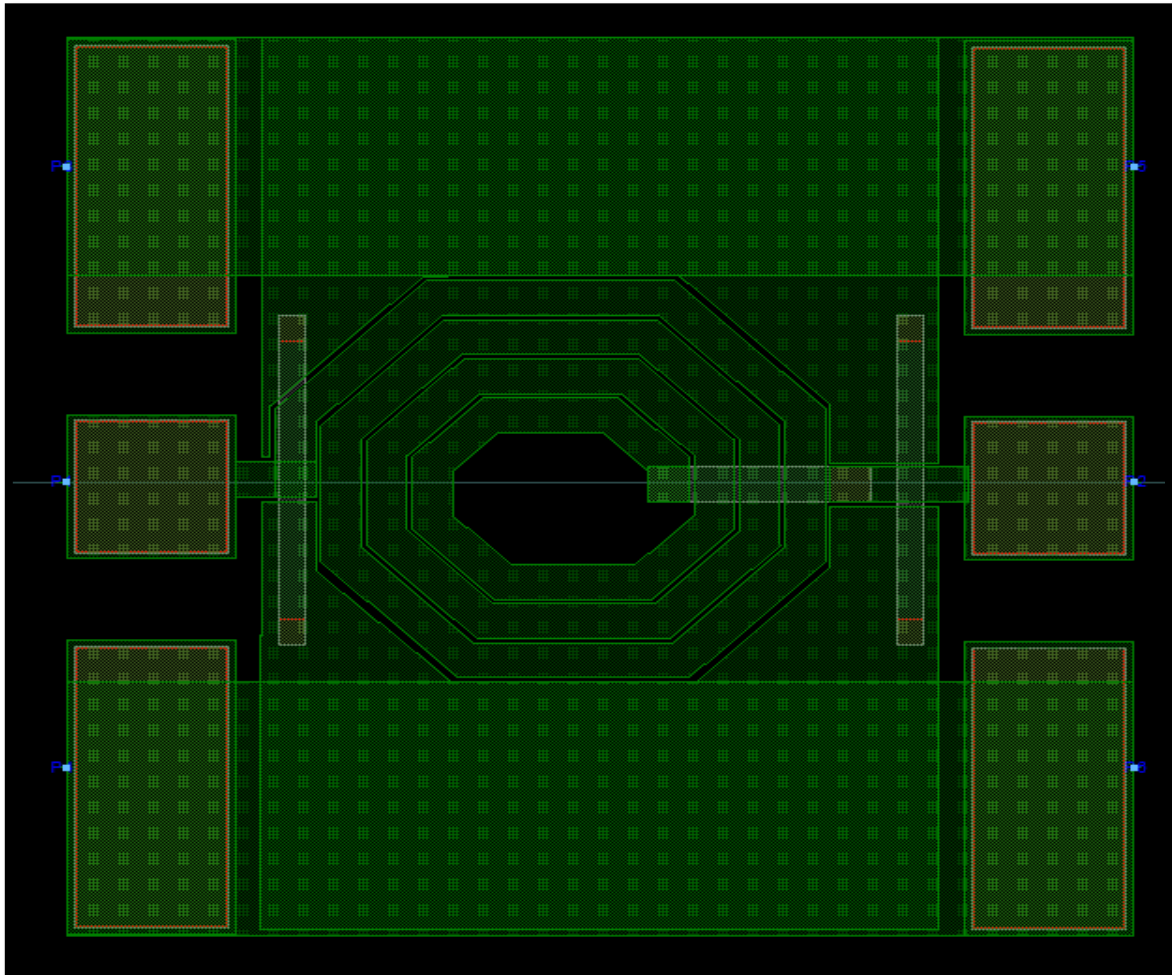


Εικόνα 4.43 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$

Οι παραπάνω προσομοιώσεις ενώ είναι επιτυχημένες με επαγωγική συμπεριφορά στοιχείου στην επιθυμητή συχνότητα των 30 GHz έχουν το μειονέκτημα ότι είναι ιδανικά στοιχεία γιατί δεν έχουν διασύνδεση με τον εξωτερικό κόσμο. Όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα φτιάξουμε αυτή τη διασύνδεση κατασκευάζοντας pads.

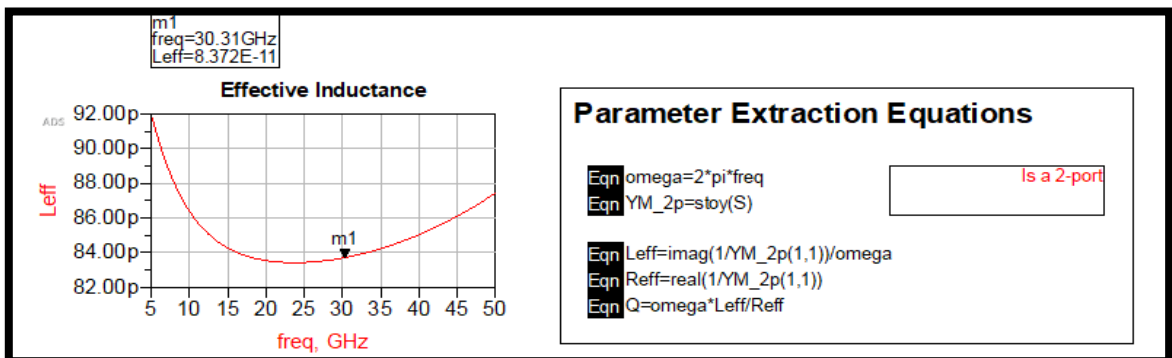
## H – Πηνίο 84 pH με pads

Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.44) βλέπουμε το πρώτο κύκλωμα που προσομοιώσαμε αφού έχει τοποθετηθεί μέσα στα pads που προσφέρουν σύνδεση με τον εξωτερικό κόσμο τόσο για την είσοδο όσο και για τη γείωση. Η απόσταση της γείωσης από τις περιελίξεις έχει διατηρηθεί ίδια με την απόσταση μεταξύ των σπειρών και είναι ίση με 3  $\mu\text{m}$ .



Εικόνα 4.44 Το διςδιάστατο μοντέλο

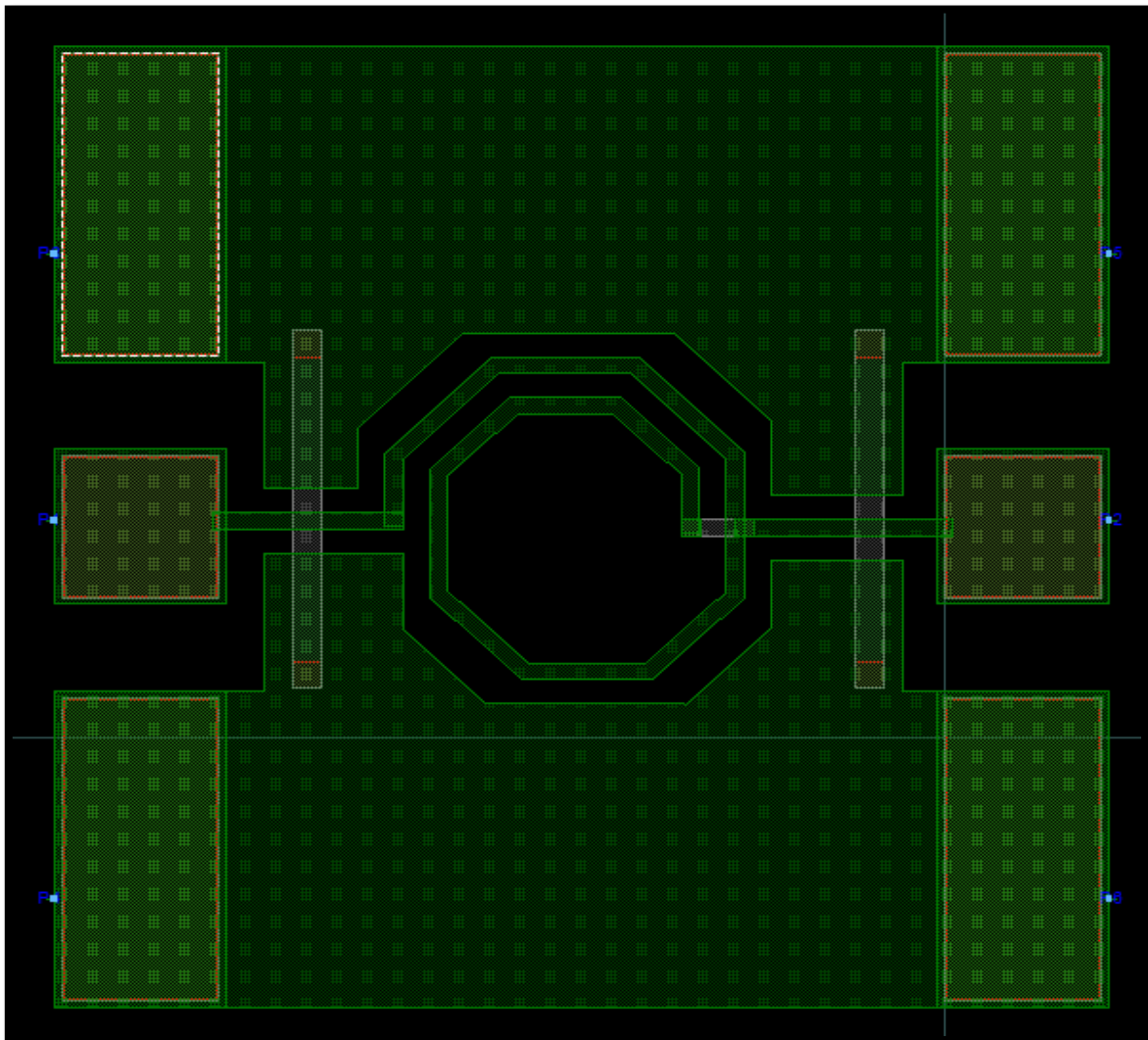
Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.45) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 84 pH.



Εικόνα 4.45 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$

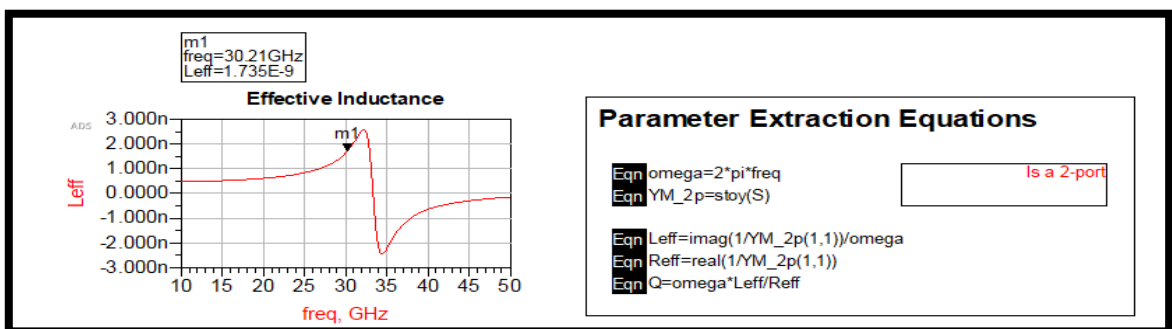
### Θ – Πηνίο 1,7 nH με pads

Στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.46) βλέπουμε το δεύτερο κύκλωμα που προσομοιώσαμε αφού έχει τοποθετηθεί μέσα στα. Η απόσταση της γείωσης από τις περιελίξεις έχει διατηρηθεί ίδια με την απόσταση μεταξύ των σπειρών και είναι ίση με 15  $\mu\text{m}$ .



Εικόνα 4.46 Το δισδιάστατο μοντέλο

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης στην από κάτω εικόνα (εικόνα 4.47) φαίνεται ότι το πηνίο παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά μέχρι τη συχνότητα 33 GHz όπου στο σημείο αυτό υπάρχει συντονισμός του κυκλώματος και αναστροφή συμπεριφοράς σε χωρητική. Η αυτεπαγωγή  $L$  στα 30 GHz είναι περίπου ίση με 1700 pH.



Εικόνα 4.47 Η αυτεπαγωγή  $L_{\text{eff}}$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 5.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα διπλωματική έγινε έρευνα, ανάλυση και προσομοίωση πηνίων ικανών να παρουσιάσουν επαγωγική συμπεριφορά σε συχνότητα 30GHz. Αρχικά τέθηκε ένα βασικό θεωρητικό πλαίσιο απαραίτητο για την σωστή κατανόηση και σχεδιασμό κυκλωμάτων υψηλών συχνοτήτων, όπως είναι ο μαγνητισμός και τα υλικά. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των προσομοιώσεων έγιναν με βάση τις επιλεγμένες παραμέτρους οκταγωνικής γεωμετρίας στο πρόγραμμα Advanced Design System. Παρακάτω αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα προσομοίωσης.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα λοιπόν, παρατηρούμε ότι στις πρώτες επτά προσομοιώσεις, χωρίς τη διασύνδεση pads, έχουμε σταθερά επαγωγική συμπεριφορά στοιχείου για την επιθυμητή συχνότητα, λόγω απώλειας των παρασιτικών χωρητικοτήτων που δημιουργούνται με την προσθήκη τους. Στις τελευταίες δύο προσομοιώσεις η συμπεριφορά παραμένει επαγωγική αλλά, στη μια περίπτωση, έχουμε μια μικρή αύξηση της αυτεπαγωγής λόγω της αλληλεπίδρασης των παρασιτικών επαγωγών και χωρητικοτήτων στο κύκλωμα. Τέλος, παρατηρούμε ότι στην δεύτερη περίπτωση έχουμε μια ραγδαία μείωση της αυτεπαγωγής  $L$  από τα 2300 pH στα 1170 pH αλλά και μια μετατόπιση της συχνότητας αναστροφής από τα 38 GHz στα 33 GHz.

### 5.2 Μελλοντικά βήματα

Βάση της ανάλυσης και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, ως χρήσιμα μελλοντικά βήματα συνέχειας της παραπάνω μελέτης, προτείνονται τα εξής:

Κατασκευή των αντίστοιχων στοιχείων και σύγκριση με τα δεδομένα από τις προσομοιώσεις

Μελέτη μετασχηματιστών με on-chip συνεπίπεδα πηνία

Μελέτη παρασιτικών και βελτιστοποίηση συμπεριφοράς του στοιχείου

Επαγωγική συμπεριφορά σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες

Προσομοίωση στοιχείου σε πραγματική εφαρμογή

Η εκπλήρωση των παραπάνω προτάσεων μπορεί να αποβεί χρήσιμη στην περαιτέρω βελτίωση της κατασκευής συνεπίεδων επαγωγών υψηλής συχνότητας σε τσιπ.



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ηλεκτρικές μηχανές AC/DC, Stephen Chapman, 3<sup>η</sup> έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ.

Ηλεκτρονικά Ισχύος, Mohan/Underland/Robbins, Β έκδοση, εκδοτικός οίκος ΤΖΙΟΛΑ.

Inductors and transformers for power electronics, Alex Van den Bossche/Vencislav Cekov Valchen, εκδοτικός οίκος Taylor & Francis Group.

Practical\_design\_of\_power\_supplies, Ron Lenk, IEEE Press.

Magnetics design for switching power supplies, Lloyd H. Dixon

Coplanar Waveguides and Microwave Inductors on Silicon Substrates Adolfo C. Reyes, Samir M. El-Ghazaly, Steve J. Dorn, Michael Dydyk, Dieter K. Schroder, and Howard Patterson, IEEE Press

Design and Modeling of Inductors, Capacitors and Coplanar Waveguides at Tens of GHz Frequencies 123 Naser Pour Aryan, Springer

Design of Low-Loss Coplanar Transmission Lines Using Distributed Loading for Millimeter-Wave Power Divider/Combiner Applications in 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS Technology Anwer Sayed Abd El-Hameed, Adel Barakat , Adel B. Abdel-Rahman, Ahmed Allam, and Ramesh K. Pokharel IEEE Press.

High Performance CPW Embedded Passive Components Using Photoimageable Thick Film Technology K. K. Samanta and I. D. Robertson Institute of Microwaves and Photonics, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds

Millimeter-wave Resonator Based on High Quality Factor Inductor and Capacitor based on Slow-Wave CPS Abdelhalim A. Saadi, Marc Margalef-Rovira, Youcef Amara and Philippe Ferrari, University Grenoble Alpes

A monolithic 1-55 GHz HEMT distributed amplifier in coplanar waveguide technology Roland Heilig, Detlev Hollmann, Guido Baumann Alcotel SEL AG, Pforzheim, Germany