



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ,
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Ανάπτυξη συστήματος επιτήρησης κατανομής εσωτερικών τάσεων
σε χάλυβες με την μέθοδο των μαγνητοσυστολικών γραμμών
καθυστέρησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λέκας Αλέξανδρος

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου Καθηγητής
Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Νοέμβριος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ,
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη συστήματος επιτήρησης κατανομής εσωτερικών τάσεων σε χάλυβες με την μέθοδο των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λέκας Αλέξανδρος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12/11/2021.

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Ιωάννης Γκόνος

Παναγιώτης
Τσαραμπάρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π

Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

Λέκας Αλέξανδρος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλέξανδρος Λέκας, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σε μια εποχή, όπου ο αυτοματισμός στη παραγωγή είναι ο κανόνας και όχι πλέον η εξαίρεση, κάθε βιομηχανία στηρίζεται πλέον σε αισθητήρες, οι οποίοι έχουν αντικαταστήσει για τα καλά τον ανθρώπινο παράγοντα. Πληθώρα δε αισθητήρων καταφέρνουν να μας δώσουν πληροφορίες πάνω σε θέματα, τα οποία ακόμα και ο άνθρωπος δε θα μπορούσε να ελέγξει. Ο πλήρης αυτοματισμός, λοιπόν, μας έχει οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης αισθητήρων ποιοτικού ελέγχου, ώστε να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα των μηχανημάτων. Μια τέτοια ενδιαφέρουσα μορφή αποτελεί και το σύστημα επιτήρησης κατανομής τάσεων στο εσωτερικό χάλυβα, το οποίο χρησιμοποιώντας την τεχνολογία μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης MDL (Magnetostrictive Delay Lines), μας υποδεικνύει, με μεγάλη ακρίβεια και με χαμηλό κόστος, τις κατασκευαστικές ατέλειες στον χάλυβα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθεί αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο των μαγνητικών αισθητήρων και της τεχνολογίας MDL. Ύστερα θα αναλυθούν τα κυκλώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του αισθητήρα και τέλος ακολουθούν τα πειραματικά αποτελέσματα που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο, μαζί με τα συμπεράσματα που βγάζουμε για την αποτελεσματικότητά του.

Λέξεις-κλειδιά: μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης, μαγνητικοί αισθητήρες, ποιοτικός έλεγχος χάλυβα

Abstract

In the modern times, where production automation is the norm and no longer the exception, every industry now relies on sensors, which have completely replaced the human factor. A plethora of sensors manage to give us information on issues that even humans could not control by themselves. This complete automation, therefore, has led us to the need to develop quality control sensors, in order to prevent possible machine errors. One such interesting form is the internal voltage distribution monitoring system, which using MDL (Magnetostrictive Delay Lines) technology, indicates to us, with great accuracy and low cost, the structural defects in steel. In this dissertation we will first analyse the theoretical background of magnetic sensors and MDL technology. Then the circuits used to make the sensor will be analysed and finally the experimental results that took place in the laboratory are gonna be discussed, along with the conclusions we draw about its effectiveness.

Keywords: Magnetostrictive Delay Lines, magnetic sensors, steel quality control

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Χριστοφόρου για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθόλη τη διάρκεια του χρόνου, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα στον τομέα των μαγνητικών αισθητήρων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους διδάκτορες Σπύρο Αγγελόπουλο και Παναγιώτη Πρίφτη για την πολύτιμη βοήθεια του τόσο στο εργαστήριο, όσο και στη σύνθεση της εργασίας μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συμφοιτητές μου, χωρίς την βοήθεια των οποίων δεν θα είχα φτάσει ως εδώ.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που μου έδωσε όλα τα εφόδια για να φτάσω μέχρι εδώ και που θα συνεχίσει να με στηρίζει στην πραγματοποίηση των ονείρων μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	11
1.1 Η έννοια του αισθητήρα	11
1.2 Μαγνητικός αισθητήρας	12
1.3 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης	13
1.4 Στόχος της εργασίας	14
Κεφάλαιο 2 – Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης	15
2.1 Μαγνητοσυστολή	15
2.2 Μαγνητοσυστολή σε ατομικό επίπεδο – Μαγνητικές Περιοχές	16
2.3 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων	17
2.4 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών	19
2.5 Μαγνητοσυστολικά υλικά – Άμορφα υλικά	22
2.6 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης – Τυπική διάταξη	22
2.6.1 Δημιουργία ελαστικού πλαμού	23
2.6.2 Διάδοση ελαστικού παλμού	25
2.6.3 Λήψη παλμού	26
2.7 Μοντελοποίηση MDL	28
2.8 Ιδιότητες MDL	31
2.8.1 Ανομοιομορφία	31
2.8.2 Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης	32
2.8.3 Καθυστέρηση απόκρισης	32
2.8.4 Υστέρηση	32
2.8.5 Ανάλυση	33
2.8.6 Πλάτος παλμού διέγερσης και απόκριση συχνότητας	33
2.8.7 Ανακλάσεις	33

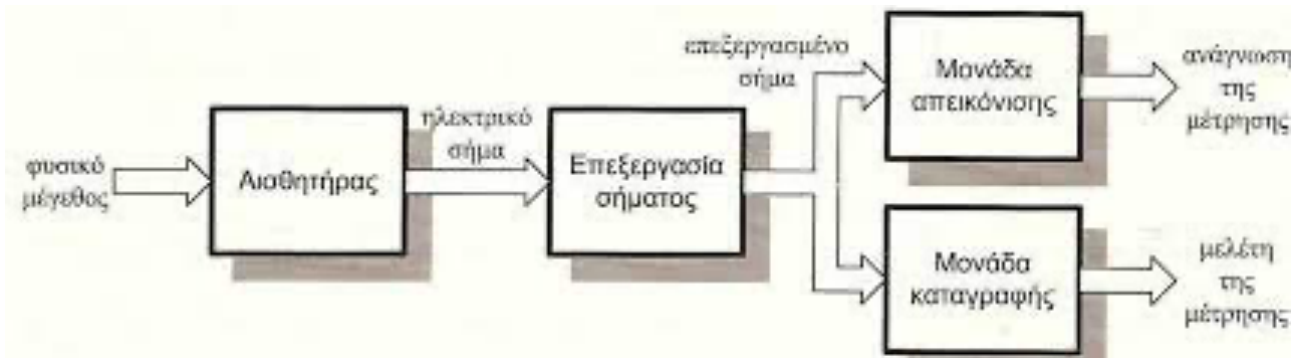
Κεφάλαιο 3- Κυκλώματα διαέγερσης και λήψης	35
3.1 Διάταξη αισθητήριου στοιχείου MDL	36
3.2 Κυκλωματική διάταξη διέγερσης	37
3.2.1 Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης	37
3.2.2 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης	38
3.2.2.1 Ποιοτική εξέταση κυκλώματος	38
3.2.2.2 Ανάλυση λειτουργίας MOSFET	39
3.2.2.3 Λειτουργία διόδου Schottky	42
3.2.2.4 Λειτουργία αντιστάσεων	42
3.2.2.5 Λειτουργία πυκνωτών	43
3.3 Κυματομορφές Κυκλώματος Διέγερσης	43
3.3.1 Κυματομορφή εισόδου	43
3.3.2 Κυματομορφή στην αντίσταση R1	44
3.3.3 Κυματομορφή στο πηνίο	45
3.4 Κύκλωμα λήψης	47
3.4.1 Προδιαγραφές κυκλώματος λήψης	47
3.4.2 Ανάλυση κυκλώματος λήψης	48
3.4.3 Ποιοτική εξέταση κυκλώματος	49
3.4.3.1 1 ^ο Στάδιο ενίσχυσης	50
3.4.3.2 2 ^ο Στάδιο ενίσχυσης	51
Κεφάλαιο 4 – Πειραματικά αποτελέσματα	53
Βιβλιογραφία	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής θα γίνει μια θεωρητική ανάλυση των αισθητήρων, εμβαθύνοντας στους μαγνητικούς και στους αισθητήρες θέσης. Εν συνεχεία, θα γίνει μια αναφορά στη τεχνολογία των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL) και τέλος θα παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος που οι τεχνολογίες αυτές μας βοηθούν στην επιτήρηση κατανομής εσωτερικών τάσεων σε χάλυβες.

1.1 Η έννοια του αισθητήρα

Ως αισθητήρα ονομάζουμε μια συσκευή, η οποία, λαμβάνοντας ένα ερέθισμα από το φυσικό περιβάλλον, ανταποκρίνεται σε αυτό, παράγοντας ένα σήμα που μπορεί να διαβάσει ο παρατηρητής. Δημιουργείται, δηλαδή, ένα σύστημα που τροφοδοτείται από τη φύση και παράγει μία έξοδο προς επεξεργασία από τον άνθρωπο. Οι εισοδοί ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση του αισθητήρα, με τις πιο συνήθεις μορφές στην καθημερινότητα μας να είναι μεγέθη όπως η θερμοκρασία, το φως, η πίεση και η υγρασία. Οι έξοδοι προκύπτουν είτε άμεσα είτε μέσω επεξεργασίας (π.χ από υπολογιστικά συστήματα, μικροελεγκτές κτλ) και παρουσιάζονται συνήθως στη μορφή αναλογικών και ψηφιακών σημάτων. Αυτή η σύνδεση της φύσης με τον άνθρωπο έχει καταστήσει τους αισθητήρες αναπόσπαστο εργαλείο στην προσπάθεια αποκρυπτογράφησης των μυστηρίων του κόσμου και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και τους έχει κάνει ιδιαίτερα χρήσιμους σε πολλές εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας, με αποτέλεσμα την δημιουργία ποικιλόμορφων αισθητήρων. Οι αισθητήρες χωρίζονται με βάση τη μορφή εισόδου και εξόδου (π.χ φωτοηλεκτρικοί, θερμοηλεκτρικοί), με βάση το πεδίο εφαρμογής (π.χ βιομηχανικοί, βιοιατρικοί), αλλά και με βάση το μέσο ανίχνευσης που χρησιμοποιούν (π.χ χημικοί, μαγνητικοί). Τέλος, οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από διάφορα μεγέθη (π.χ σφάλμα, ακρίβεια, ανοχή, απόκριση, καθυστέρηση), τα οποία πολλές φορές ορίζουν και την καταλληλότητα τους ή μη σε συγκεκριμένες εφαρμογές. [1]



Σχήμα 1.1 Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα [2]

1.2 Μαγνητικός αισθητήρας

Ως μαγνητικός αισθητήρας ορίζεται ένας αισθητήρας, μέσω του οποίου ανιχνεύονται μεταβολές στην μαγνητική ροή, την ισχύ και τη διεύθυνση ενός μαγνητικού πεδίου. Όπως περιγράφουν οι νόμοι του Michale Faraday και οι εξισώσεις του James Clerk Maxwell υπάρχει άρρηκτη σχέση μεταξύ μαγνητισμού και ηλεκτρισμού. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα περιβάλλεται πάντα από ένα μαγνητικό πεδίο και οποιαδήποτε μεταβολή σε ένα από τα δύο μεταφράζεται άμεσα σε μεταβολή του άλλου, σύμφωνα με την παρακάτω θεμελιώδη σχέση.

$$\nabla \times E = - \partial B / \partial t \quad (1.1)$$

Σήμερα η τεχνολογία μας επιτρέπει να διαθέτουμε ποικίλα είδη μαγνητικών αισθητήρων εκμεταλλευόμενοι φαινόμενα όπως το Fluxgate, το Hall effect, η μαγνητική επαγωγή, η μαγνητοσυστολή, η μαγνητοαντίσταση κ.α. Η ευρεία αυτή γκάμα των μαγνητικών αισθητήρων βρίσκει εφαρμογές τόσο στην βιομηχανία (π.χ αισθητήρες θέσης ρομποτικών βραχιόνων, ποιοτικός έλεγχος παραγωγής χάλυβα) όσο και στη καθημερινότητα των ανθρώπων (έλεγχος αεροδρομίου), παρότι πολλές φορές δε γνωρίζουμε την ύπαρξη τους.

Παρά την ήδη ραγδαία ανάπτυξη τους οι μαγνητικοί αισθητήρες εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον λόγω του μεγάλου περιθωρίου βελτίωσης τους (π.χ ακρίβεια), αλλά και του περιθωρίου χρήσης τους σε πολλές βιομηχανικές αλλά και ανθρώπινες δραστηριότητες. [3]

1.3 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης

Οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης(MDL) αποτελούν γραμμές, οι οποίες εκμεταλλευόμενες το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, καταφέρνουν να υπολογίσουν τη καθυστέρηση μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου, παρέχοντας έτσι χρήσιμες πληροφορίες για την εύρεση του κάθε φορά ζητούμενου μεγέθους. Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής αποτελεί απαραίτητο στοιχείο της τεχνικής αυτής, καθώς επιλέγοντας τα κατάλληλα σιδηρομαγνητικά υλικά, καταφέρνουμε να έχουμε διαστολή ή συστολή της γραμμής με την επίδραση μαγνητικού πεδίου και αντιστρόφως. Με απλά λόγια, στην τεχνική MDL επιδρούμε σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό με ένα δεδομένο σήμα, το οποίο το λαμβάνουμε στο τέλος αυτής και μέσω της καθυστέρησης άφιξης του σήματος καταφέρνουμε να υπολογίσουμε το επιθυμητό μέγεθος. Μπορούμε, λοιπόν, αυτή τη τεχνική να την χρησιμοποιήσουμε σε αισθητήρες θέσης, πίεσης, μηχανικής τάσης και μαγνητικού πεδίου. Είναι μια τεχνική, η οποία αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα με σχετικά μεγάλη ακρίβεια (ανάλογα την επιλογή των υλικών) και με μικρό κόστος, γεγονός που την κάνει ιδιαίτερα ελκυστική.

1.4 Στόχος της εργασίας

Στόχο της εργασίας αποτελεί η κατασκευή ενός αισθητήρα για την επιτήρηση κατανομής εσωτερικών τάσεων σε χάλυβες, ο οποίος θα εξοπλίσει το Εργαστήριο Αισθητήρων του ΕΜΠ. Μεγαλύτερη βάση, λοιπόν, δίνεται στο κατασκευαστικό κομμάτι της εργασίας καθώς και στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θα καταφέρουμε να πετύχουμε.

Στο πλαίσιο της κατασκευής του αισθητήρα γίνεται η ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου, τόσο των μαγνητικών μηχανισμών όσο και της τεχνικής των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL).

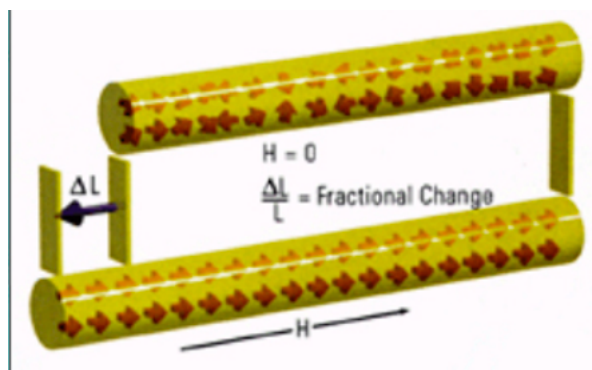
Τέλος, βασικό κομμάτι αυτής της εργασίας αποτελεί η παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων που γίνανε στο εργαστήριο, αλλά και η σκέψη και η τεχνική κατασκευής του ίδιου του αισθητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η τεχνική MDL. Αρχικά θα εξηγηθεί η θεωρία της μαγνητοσυστολής στα μαγνητοσυστολικά αλλά και στα άμορφα υλικά και εν συνεχεία θα παρουσιαστεί ο τρόπος και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας γραμμής καθυστέρησης.

2.1 Μαγνητοσυστολή

Θα μπορούσε με απλά λόγια να περιγραφεί η μαγνητοσυστολή ως εξής: Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου παράλληλα στη διεύθυνση ενός μαγνητοσυστολικού υλικού προκαλούνται μεταβολές στις φυσικές του διαστάσεις (διαστολή ή συστολή στον κατά μήκος άξονα και συστολή ή διαστολή στον κατά πλάτος άξονα αντίστοιχα). Αντιστρόφως, εάν ασκηθεί μηχανική τάση για την ελαστική παραμόρφωση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού τότε αυτό θα δημιουργήσει γύρω του μαγνητικό πεδίο. [4]

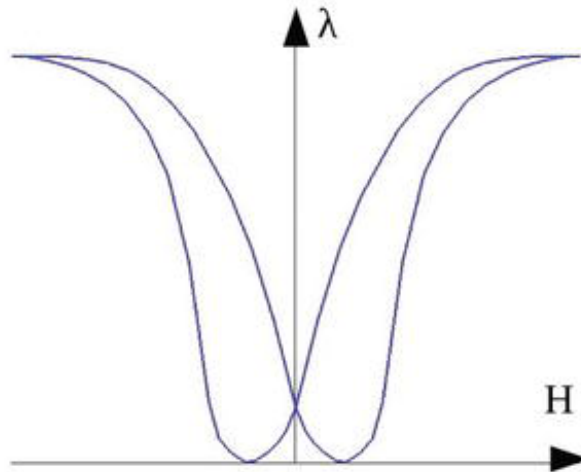


Σχήμα 2.1 Διαστολή υλικού κατά ΔL υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου H [5]

Η μαγνητοσυστολή λ μετριέται ως ποσοστό με τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

όπου ΔL η διαστολή ή συστολή του υλικού κατά μήκος της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου και L το φυσικό μήκος του υλικού . Παρατηρείται, δηλαδή, ότι το λ μπορεί ανάλογα το πεδίο που θα εφαρμοστεί να είναι και αρνητικό. Η γραφική παράσταση $\lambda(H)$ απεικονίζεται παρακάτω



Σχήμα 2.2 Συνάρτηση $\lambda(H)$ [6]

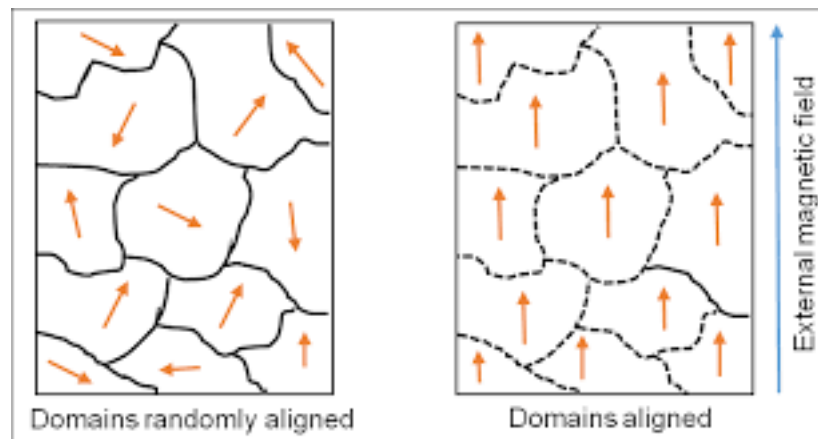
2.2 Μαγνητοσυστολή σε ατομικό επίπεδο - Μαγνητικές περιοχές

Η ανάλυση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής στο μικρόκοσμο είναι απαραίτητη για τη βαθύτερη κατανόηση της τεχνικής MDL. Σε ατομικό επίπεδο και χωρίς καμία επίδραση μαγνητικού πεδίου, υπάρχουν περιοχές εντός ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, οι οποίες έχουν την ίδια μαγνητική ροπή και χωρίζονται μεταξύ του από τοιχώματα (domain walls) όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται μαγνητικές περιοχές.

Με πιο απλά λόγια: Μακροσκοπικά ένα σιδηρομαγνητικό υλικό έχει μηδενική τιμή μαγνήτισης. Αν μπορούσε ωστόσο να εξεταστεί το υλικό μικροσκοπικά, θα φαινόταν πως κάθε κρύσταλλος είναι μαγνητισμένος. Υπάρχουν, δηλαδή, “άπειρες” περιοχές εντός του υλικού, με τέτοιο τρόπο μαγνητισμένες ώστε συνολικά η τιμή μαγνήτισης του υλικού να είναι μηδέν. Το φαινόμενο αυτό

λαμβάνει χώρα εντός του υλικού λόγω της ανάγκης του για ελαχιστοποίηση της μαγνητοστατικής ενέργειας.

Τέλος, αξιοσημείωτο είναι πως λόγω των μαγνητικών περιοχών παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των ιδιοτήτων των υλικών στο μακρόκοσμο και στο μικρόκοσμο.



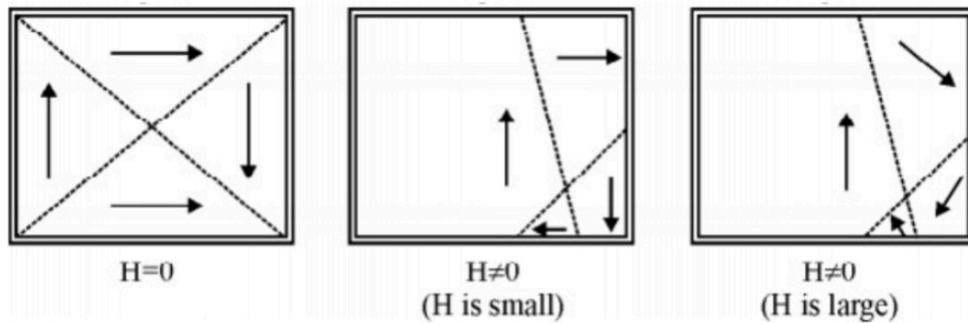
Εικόνα 2.3 Μικροσκοπική δομή μη μαγνητισμένου (αριστερά) και μαγνητισμένου σιδηρομαγνητικού υλικού (δεξιά) [7]

Όπως έχει προαναφερθεί παραπάνω οι μαγνητικές περιοχές χωρίζονται από τα μαγνητικά τοιχώματα. Κάθε μαγνητικό τοίχωμα αποτελείται από στρώματα μορίων, τα οποία δημιουργούν μοριακά δίπολα και περιστρέφονται ανάλογα την κατεύθυνση της εκάστοτε μαγνητικής περιοχής, έτσι ώστε πάντα να βρίσκονται σε ευθυγράμμιση μεταξύ τους. Αυτή η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών (Domain Rotation Dynamics) όπως και η διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων αποτελούν τις πιο σημαντικές ιδιότητες των μαγνητικών περιοχών και θα αναλυθούν παρακάτω στα υποκεφάλαια 2.3 και 2.4.

2.3 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων

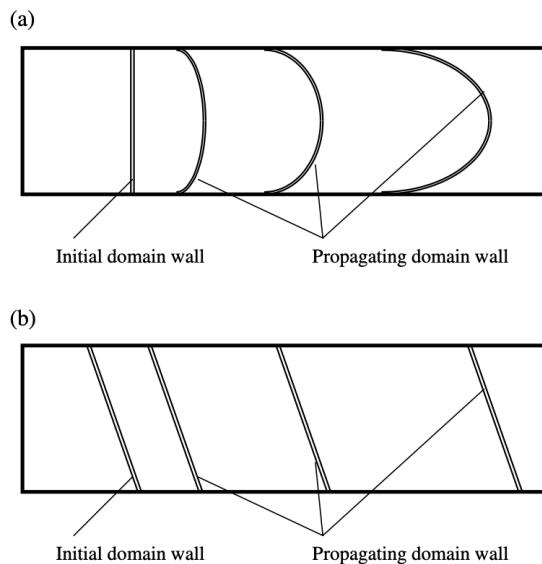
Το φαινόμενο διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων λαμβάνει χώρα όταν κατά την επίδραση μαγνητικού πεδίου τα μαγνητικά τοιχώματα κινούνται λόγω του μικρού τους μεγέθους σε σχέση με τις περιοχές. Ως αποτέλεσμα το μέγεθος των περιοχών, που είναι ήδη μαγνητισμένες προς τη κατεύθυνση του μαγνητικού

πεδίου, αυξάνεται σε βάρος των υπολοίπων περιοχών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4 Μαγνήτιση υλικού με διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων [8]

Ανάλογα με τα επίπεδα ενέργειας που βρίσκονται αποθηκευμένα μέσα στα μαγνητικά τοιχώματα, αυτά διαδίδονται είτε μέσω διόγκωσης (bowing) , σε περίπτωση που είναι εύκαμπτα (χαμηλής ενέργειας), είτε διαδίδονται πιο άκαμπτα (υψηλής ενέργειας), όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 2.5.



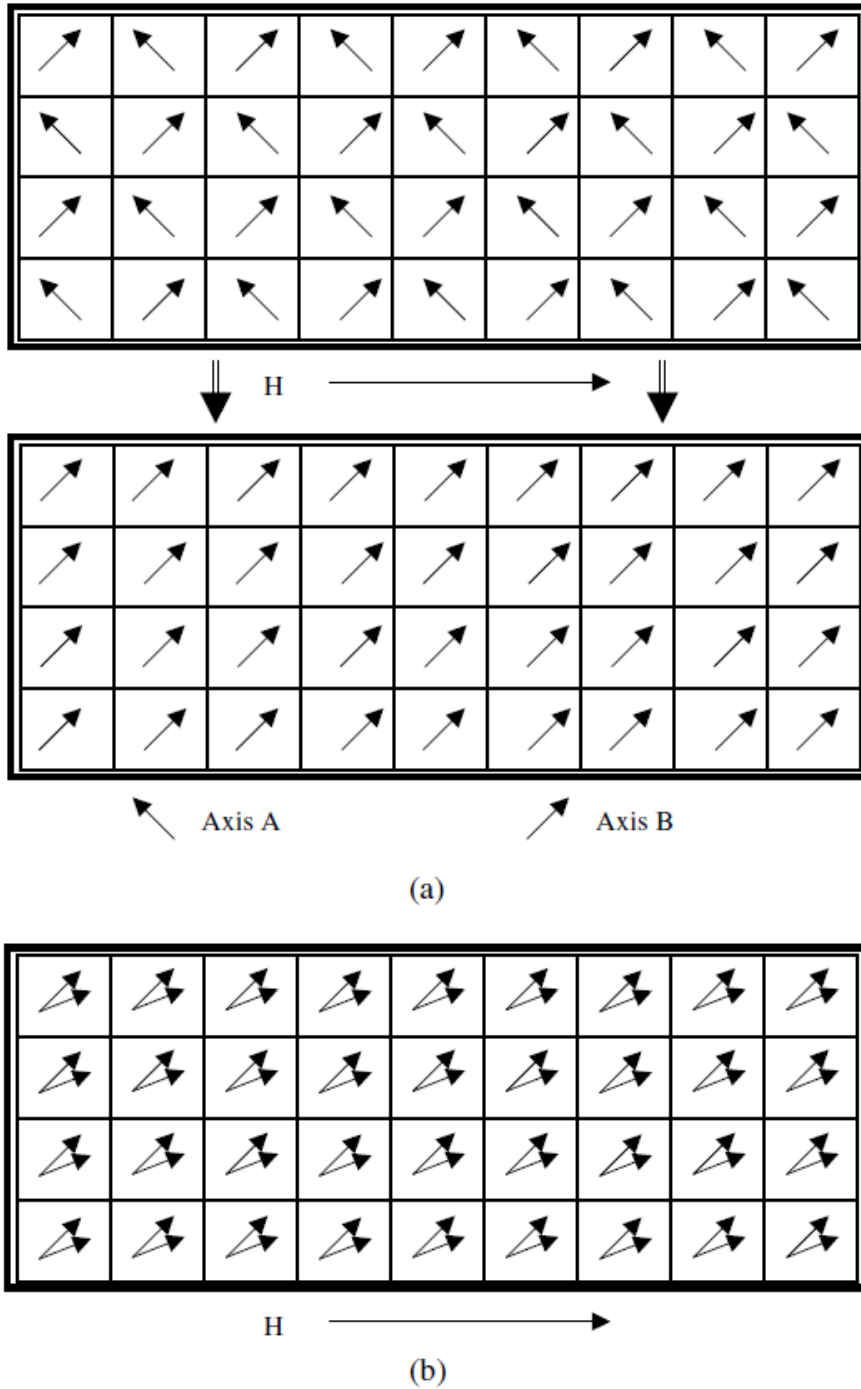
Σχήμα 2.5 Διάδοση με διόγκωση (πάνω) και άκαμπτα (κάτω) [8]

2.4 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών

Γνωστό γνώρισμα των μαγνητικών υλικών αποτελεί η ανισοτροπία. Ανάλογα με τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που ασκείται, το υλικό θα έχει διαφορετική αντίδραση, η οποία εξαρτάται από τη κρυσταλλική δομή του και από τις εσωτερικές μηχανικές τάσεις. Ορίζονται κατ' αυτό το τρόπο ορισμένοι άξονες, οι λεγόμενοι εύκολοι άξονες (easy axis), στη διεύθυνση των οποίων η μαγνήτιση του υλικού καθιστάται ευκολότερη. Λόγω της ύπαρξης των εύκολων αξόνων δημιουργούνται δύο είδη μαγνητικής περιστροφής, αυτά της αναστρέψιμης και της μη αναστρέψιμης.

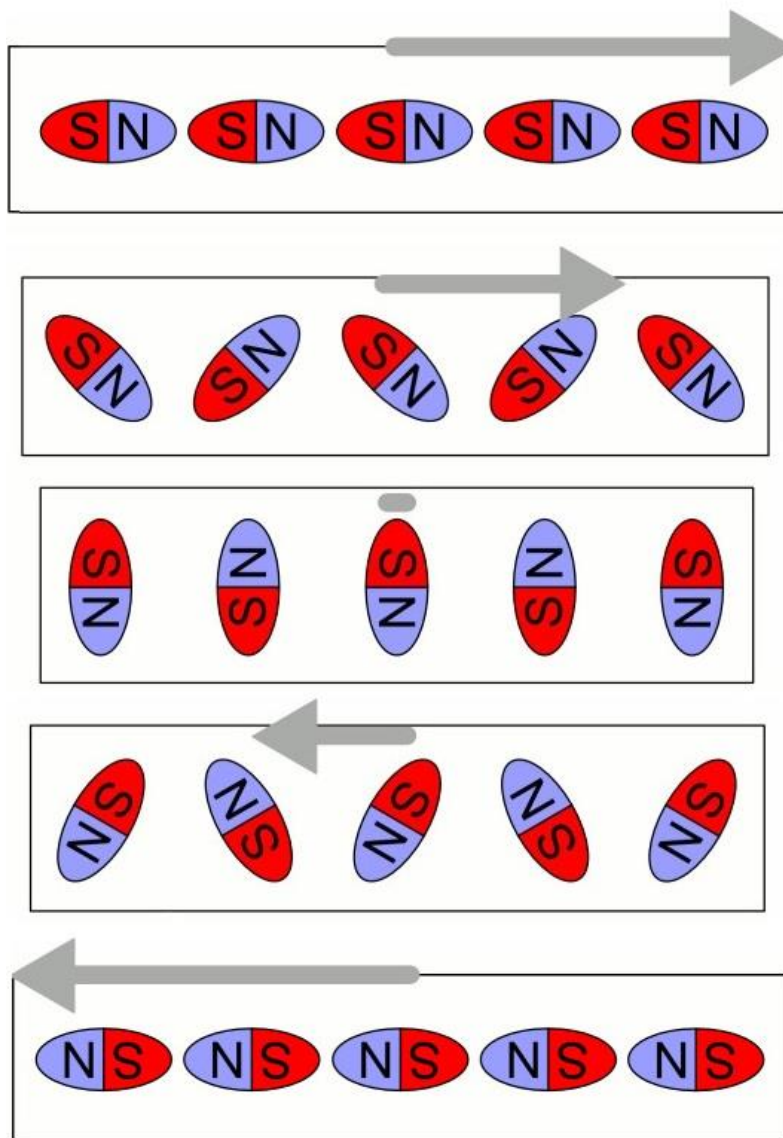
Η μη αναστρέψιμη περιστροφή λαμβάνει χώρα εφαρμόζοντας στο υλικό ένα μαγνητικό πεδίο H . Οι μαγνητικές περιοχές που ήταν προσανατολισμένες ως προς τον εύκολο άξονα A , περιστρέφονται και προσανατολίζονται σε έναν νέο εύκολο άξονα B , του οποίου η διεύθυνση πλησιάζει αυτή του ασκούμενου μαγνητικού πεδίου.

Ύστερα, λαμβάνει χώρα η αναστρέψιμη περιστροφή, κατά την οποία τα μαγνητικά δίπολα κάθε περιοχής, αναπροσανατολίζονται ξανά από τη διεύθυνση του εύκολου άξονα B και ταυτίζουν τη διεύθυνση τους με αυτή του μαγνητικού πεδίου H , έως ότου το μαγνητικό πεδίο που ασκείται γίνει μηδέν. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως μετά το μηδενισμό του μαγνητικού πεδίου, η διεύθυνση των μαγνητικών δίπολων δεν επανέρχεται ποτέ στην αρχική της κατάσταση, δηλαδή στη διεύθυνση του εύκολου άξονα A , αλλά επιστρέφουν στην αμέσως προηγούμενη, αυτή του εύκολου άξονα B . Το παραπάνω φαινόμενο γίνεται πλήρως κατανοητό στο παρακάτω σχήμα 2.6 .



Σχήμα 2.6 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών με άσκηση μαγνητικού πεδίου H [8]

Επακόλουθο των περιστροφών που αναλύθηκαν παραπάνω, αποτελεί η διαστολή ή η συστολή του μαγνητικού υλικού. Ειδικότερα, το ελλειψοειδές σχήμα των μαγνητικών περιοχών και ο αναπροσανατολισμός τους ως προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρίας του υλικού. Παρ' ότι η μαγνητοσυστολή αυτή λαμβάνει χώρα σε μικροσκοπικό επίπεδο, επιτρέπει εν τελεί τη διάδοση ελαστικών κυμάτων εντός του υλικού, χαρακτηριστικό που εκμεταλλεύεται στο έπακρο η τεχνική MDL.

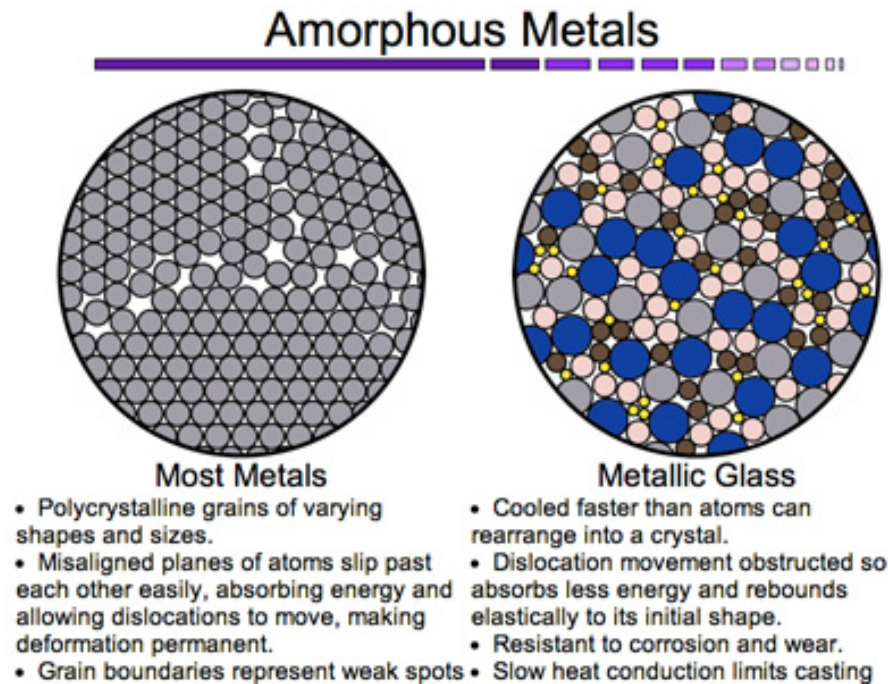


Σχήμα 2.7 Περιστροφή δίπολων ανάλογα της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου H (γκι βέλος), συστολή/διαστολή λόγω ελλειψοειδούς σχήματος [8]

2.5 Μαγνητοσυστολικά υλικά - Άμορφα υλικά

Όπως περιγράφηκε στην αρχή της εργασίας, ως μαγνητοσυστολικά υλικά ορίζονται τα υλικά, τα οποία διαστέλλονται ή συστέλλονται με την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου H . Πρακτικά, αυτό το χαρακτηριστικό συναντάται σε όλα τα μαγνητικά υλικά, ωστόσο κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη σταθερά μαγνητοσυστολής λ είτε ανάλογα με το μηχανισμό παραμόρφωσης του υλικού. Τα πιο συνήθη μαγνητοσυστολικά υλικά έχουν τιμές λ , οι οποίες κυμαίνονται από μερικά ppt (parts per billion) έως και μερικές δεκάδες ppm (parts per million), ενώ συνήθως αποτελούνται από κράματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε Fe - Co - Ni (σίδηρο, κοβάλτιο, νικέλιο), και ανάλογα με τη διαδικασία

παραγωγής τους διαφέρουν στην υστερική ή μη υστερική απόκριση της συνάρτησης $\lambda(H)$, που είχε αναφερθεί στην ενότητα 2.1. Η τεχνική MDL εφαρμόζεται αποκλειστικά σε μαγνητοσυστολικά υλικά με μη υστερική απόκριση της συνάρτησης $\lambda(H)$, και προτιμούνται συνήθως άμορφα υλικά, τα οποία πέραν του προαναφερθέντος κράματος, περιλαμβάνουν και Si - B - P (πυρίτιο, βόριο, φώσφορο). Τα υλικά αυτά, γνωστά στην αγορά και ως Metglas (Metallic Glass), παράγονται με τη μέθοδο της ταχείας ψύξης και έχουν χαρακτηριστικά όπως η ισοτροπία, η ομογενής δομή και η μαγνητική ευαισθησία σε μηχανικές τάσεις. [9]

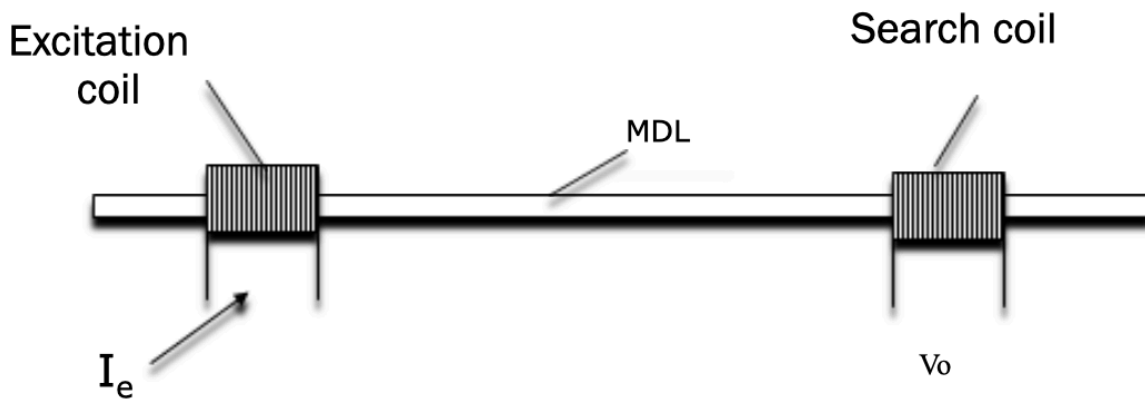


Σχήμα 2.8 Ομογένεια κρυσταλλικής δομής άμορφου υλικού σε σχέση με ένα απλό μέταλλο [10]

2.6 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης - Τυπική διάταξη

Έχοντας περιγράψει τα φαινόμενα της μαγνητοσυστολής, τα οποία εκμεταλλεύεται η τεχνική MDL, σκόπιμο κρίνεται να περιγραφεί η τυπική διάταξη μια μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης. Μια τέτοια διάταξη αποτελείται από ένα μέσο διέγερσης και ένα μέσο λήψης, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης. Το ρόλο των μέσων διέγερσης και λήψης, έχουν δύο σωληνοειδή πηνία, ενώ της γραμμής καθυστέρησης ένα μαγνητοσυστολικό υλικό. Η διάταξη λειτουργεί σε τρία στάδια: τη δημιουργία ενός ελαστικού παλμού, τη διάδοση του μέσω της

γραμμής καθυστέρησης και τέλος τη λήψη του παλμού, όπως φαίνεται στο

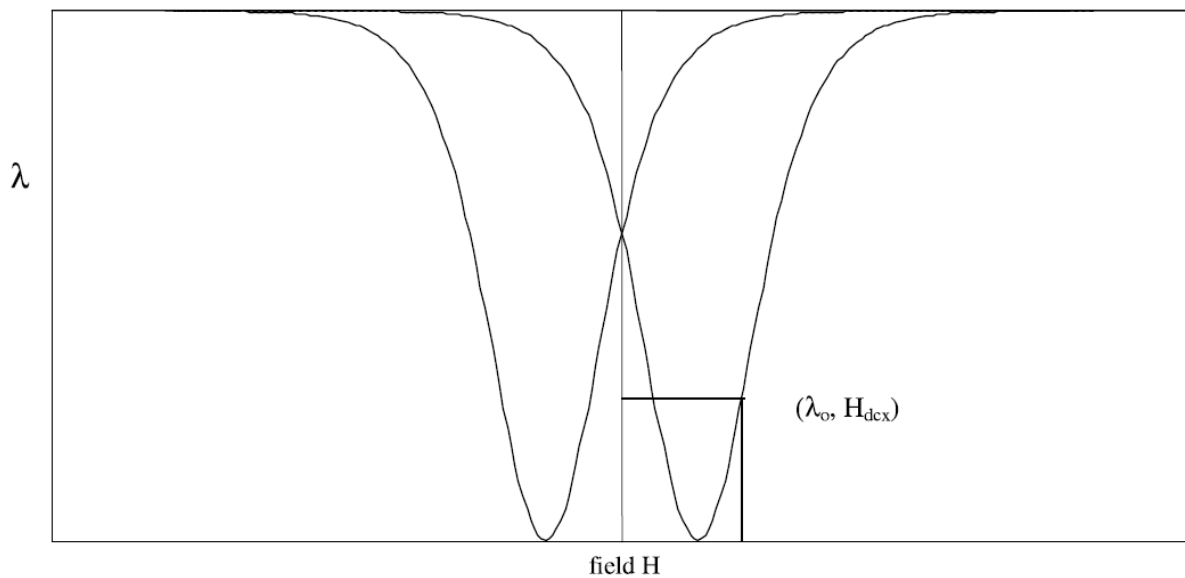


παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 2.9 Τυπική διάταξη μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης [11]

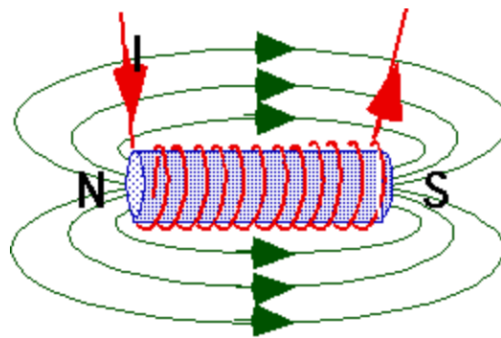
2.6.1 Δημιουργία ελαστικού παλμού

Όπως επεξηγήθηκε παραπάνω, με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητοσυστολικό υλικό, τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών αναπροσανατολίζονται στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Δίνοντας έτσι σταθερό ρεύμα στο πηνίο διέγερσης, δημιουργείται ως γνωστόν ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο πόλωσης H_{dcx} κατά μήκος της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης, έχοντας ως αποτέλεσμα την αλλαγή της γεωμετρίας του MDL κατά δl_0 , αφού περιστρέφονται τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών. Το αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται και κατά τη τροφοδοσία του πηνίου με παλμικό ρεύμα, δημιουργώντας μία παλμική μαγνητική ροή $H_e(t)$ κατά μήκος της γραμμής καθυστέρησης. Ωστόσο η παλμική μαγνητική ροή δημιουργεί εντός της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης μικροπαραμόρφωση, η οποία προκαλεί ένα ελαστικό κύμα, το οποίο διαδίδεται και στις δύο κατευθύνσεις του MDL .



Σχήμα 2.10 Εξάρτηση μικροπαραμορφώσεων από το μαγνητικό πεδίο [12]

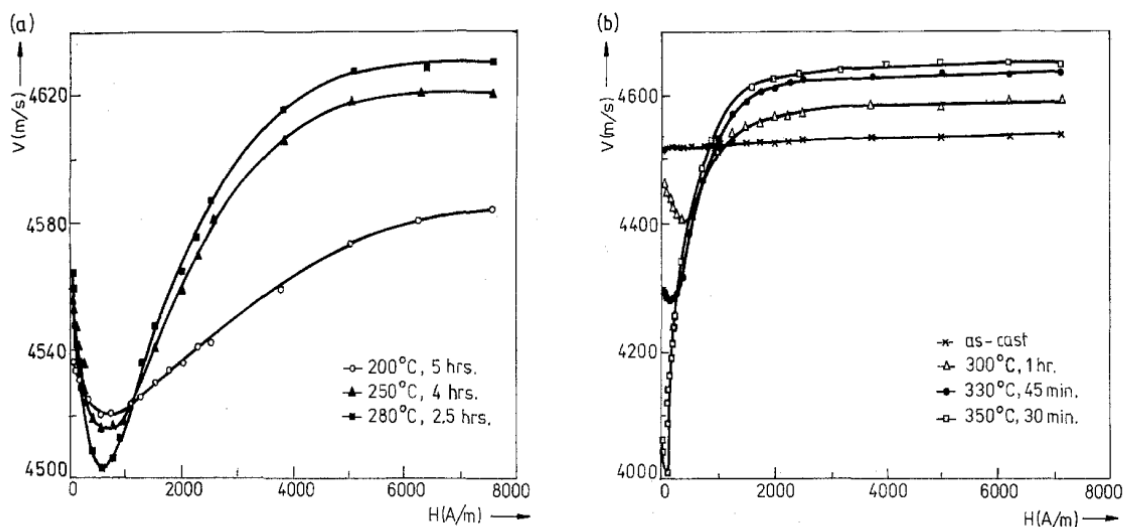
Σε κάθε περίπτωση, η τομή του MDL με το πυρήνα του πηνίου (όπου είναι συγκεντρωμένη η μαγνητική ροή του πηνίου), είναι η περιοχή στην οποία συμβαίνει η περιστροφή των περιοχών και η μικροπαραμόρφωση του υλικού.



Σχήμα 2.11 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου [13]

2.6.2 Διάδοση ελαστικού παλμού

Ο ελαστικός παλμός που προκαλείται από την παλμική διέγερση του πηνίου θα διαδοθεί με την διαμήκη ακουστική ταχύτητα του υλικού ως δύο διαμήκη κύματα, ίδιου πλάτους αλλά αντίθετης κατεύθυνσης, κινούμενα από το σημείο της διέγερσης προς τα δύο άκρα του μέσου διάδοσης, δηλαδή της γραμμής MDL που λειτουργεί ως ακουστικός κυματοδηγός. Η ταχύτητα αυτή στα άμορφα υλικά εξαρτάται από το πεδίο πόλωσης αλλά και την επεξεργασία του υλικού κατά την παραγωγή του όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Επίσης η διάδοση των κυμάτων στον κυματοδηγό παρουσιάζει απόσβεση ανάλογη της διανυόμενης απόστασης, και το κύμα ανακλάται προς τα πίσω με την άφιξη του στο άκρο του μέσου. Στα κλασσικά μαγνητοσυστολικά υλικά το βέλτιστο πλάτος της παλμικής μαγνητικής διέγερσης είναι της τάξης μερικών μικροδευτερολέπτων (microseconds), οπότε το μήκος κύματος (wavelength) του ελαστικού παλμού είναι της τάξης μερικών χιλιοστών (millimetres).



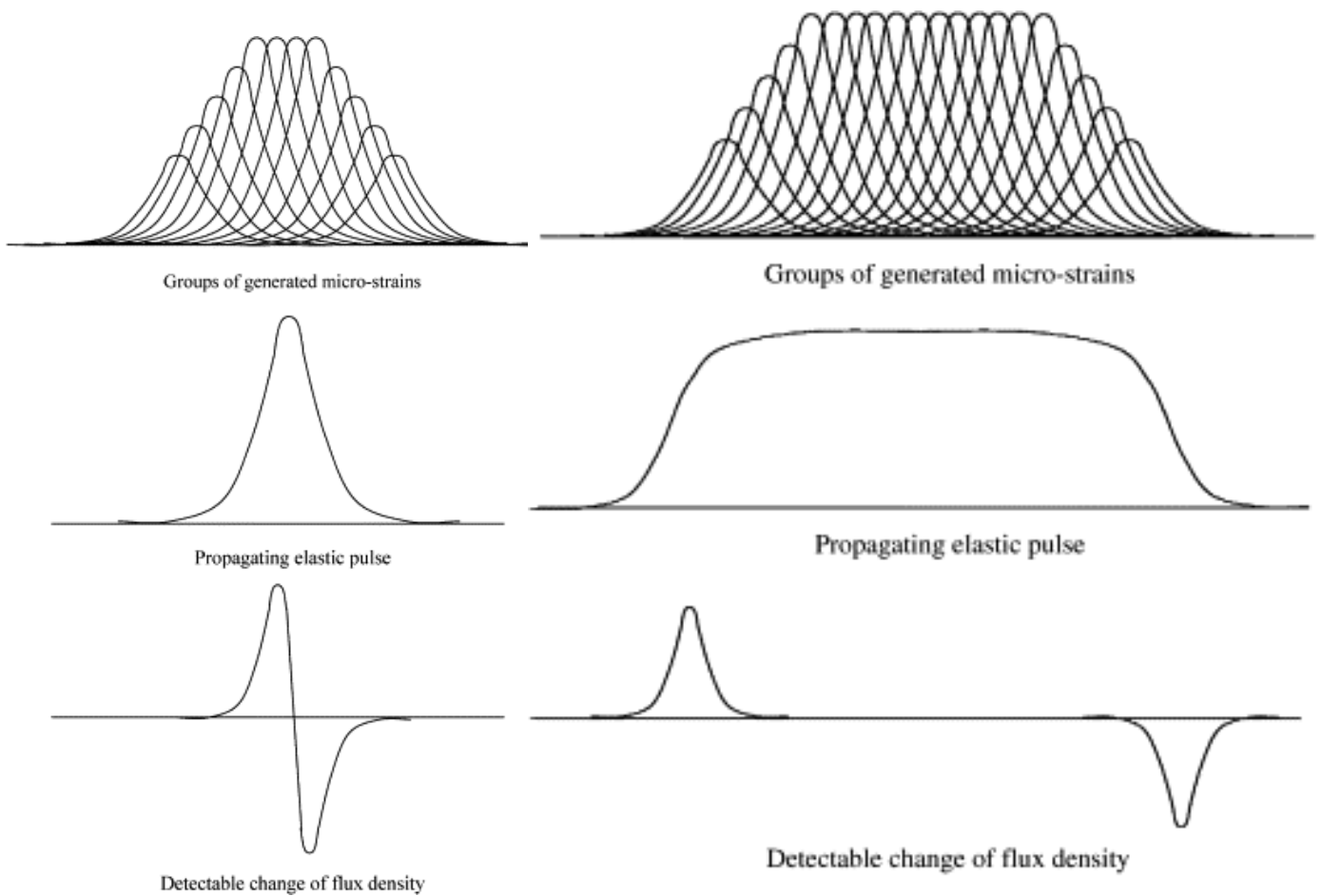
Σχήμα 2.12 Σχέση μαγνητικού πεδίου πόλωσης με διαμήκη ταχύτητα διάδοσης σε γραμμή από άμορφο σύρμα με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας. [8]

2.6.3 Λήψη Παλμού

Ο ελαστικός παλμός, κατά την πορεία του, αλλάζει τοπικά τη διεύθυνση μαγνήτισες των δίπολων του υλικού, δεδομένου πως αυτό είναι τοπικά μαγνητισμένο. Στην περίπτωση άμορφων πυρήνων δε χρειάζεται να υπάρξει επιπλέον πεδίο πόλωσης καθώς το μαγνητικό πεδίο της γης επαρκεί για να προκαλέσει αρκετά ισχυρή μαγνητική ροή πόλωσης. Το στατιστικό άθροισμα των απειροελάχιστων αλλαγών του προσανατολισμού των δίπολων προκαλεί μακροσκοπική αλλαγή της μαγνητικής ροής κατά μήκος του MDL. Αυτό είναι στην πραγματικότητα το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο. Τέλος στο πηνίο λήψης επάγεται τάση ανάλογη με την πρώτη παράγωγο της μαγνητικής ροής.

Συνοψίζοντας λοιπόν, το σύνθετο φαινόμενο μπορεί να χωριστεί σε 3 μέρη:

- επιβολή παλμικού μαγνητικού πεδίου από το μέσο διέγερσης: τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση του πεδίου και παρουσιάζουν μαγνητοσυστολή και προκαλούνται μικροπαραμορφώσεις στη γραμμή καθυστέρησης
- Το άθροισμα των μικροπαραμορφώσεων συνθέτει ελαστικό παλμό (διαθήκες μηχανικό κύμα) που διαδίδεται κατά μήκος του MDL με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα στο υλικό και παρουσιάζει απόσβεση ανάλογη της απόστασης
- Οι μικροπαραμορφώσεις επιβάλλονται στις γειτονικές περιοχές και προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα, ενώ αλλάζοντας την μαγνητική ροή κατα τον άξονα του MDL, επάγεται τάση στο πηνίο λήψης ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής.

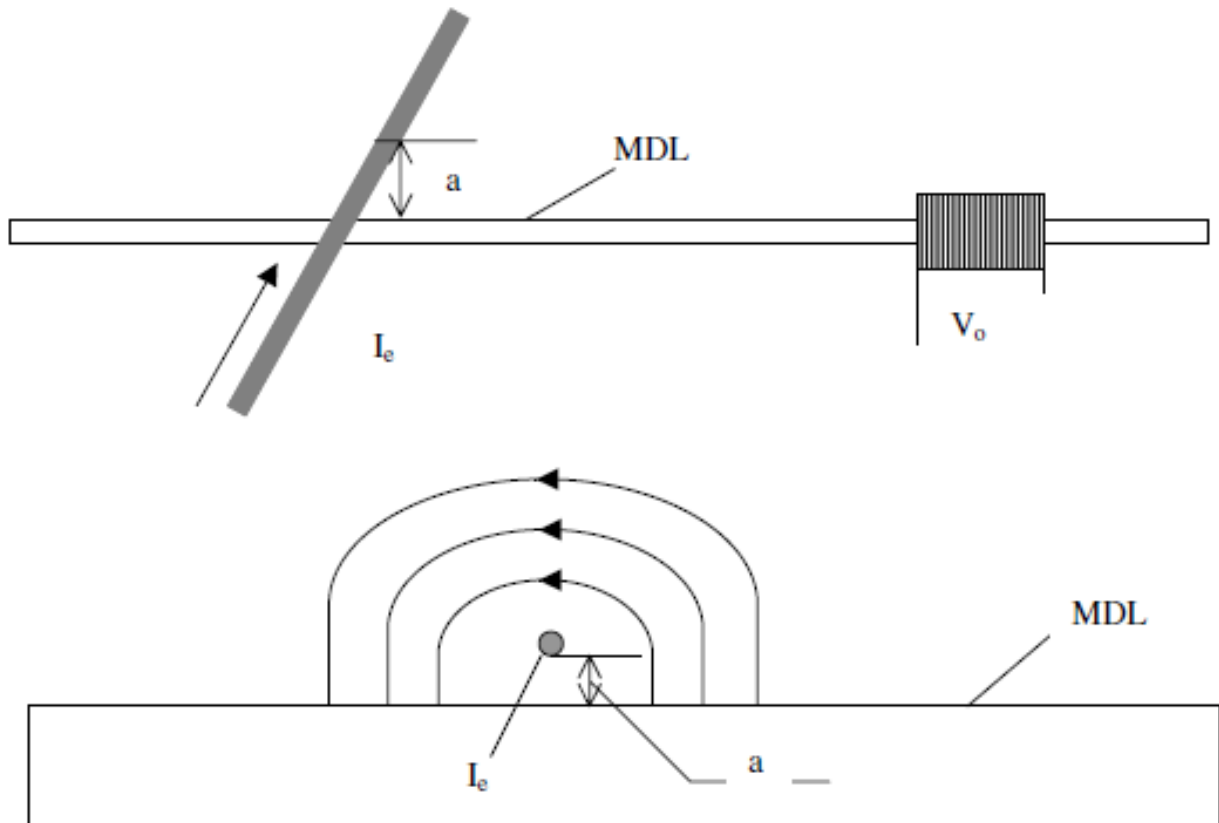


Σχήμα 2.13 Δημιουργία, διάδοση και λήψη παλμού από σύντομο (αριστερά) και παρατεταμένο (δεξιά) παλμό διέγερσης [14]

Οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης συνήθως αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μαγνητοσυστολικό υλικό, τις περισσότερες φορές για λόγους ευκολίας. Ωστόσο αφού παρουσιάζεται μαγνητικό φαινόμενο μόνο στη περιοχή διέγερσης και λήψη, η περιοχή του κυματοδηγού μπορεί να είναι φτιαγμένη από μη μαγνητικό υλικό, για παράδειγμα γυαλί ή κάποιο κεραμικό. Στη συνέχεια ακολουθεί η μοντελοποίηση της βασικής διάταξης MDL, με αυστηρότερο μαθηματικό τρόπο.

2.7 Μοντελοποίηση MDL

Για πιο πλήρη ανάλυση της βασικής διάταξης MDL, στο σημείο αυτό παρατίθεται το μοντέλο της όπως περιγράφεται στην βιβλιογραφία [8]. Στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση για λόγους απλότητας, θεωρείται ως διέγερση ένας αγωγός κάθετος στο άξονα της γραμμής MDL, τροφοδοτούμενος με παλμικό ρεύμα.



Σχήμα 2.14 Η τυπική διάταξη με διέγερση από έναν αγωγό κάθετο στον άξονα του MDL [14].

Το παλμικό πεδίο $H(x, t)$ κατα μήκος της γραμμής MDL, λόγω του παλμικού ρεύματος $I(t)$ είναι:

$$H(x, t) = f(x)I(t) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} I(t) \quad (2.2)$$

όπου a είναι η απόσταση του αγωγού παλμικού ρεύματος και του MDL. Το παλμικό ρεύμα $I(t)$ θεωρείται ότι αποτελείται από μία θετική κλίση στο χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq n_1 T$, από ένα σταθερό ρεύμα I_0 στο διάστημα $n_1 T \leq t \leq n_2 T$ και μια αρνητική κλίση από I_0 έως 0 στο διάστημα $n_2 T \leq t \leq n_3 T$, όπου T σταθερά χρόνου και n_i ακέραιος αριθμός.

Στηριζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα, στην περίπτωση υστερητικής συμπεριφοράς οι μικροπαραμορφώσεις οφειλόμενες στο παλμικό μαγνητικό πεδίο $H(x,t)$ μπορούν να εκφραστούν από το μοντέλο:

$$\lambda(H) = \lambda_s (1 - e^{-cH^2}) \quad (2.3)$$

όπου ο θετικός αριθμός c είναι μία προσαρμοστική παράμετρος και ο λ_s η σταθερά μαγνητοσυστολής κορεσμού.

Οι μικροτάσεις $\lambda(x, t)$ προκαλούμενες από την παροδική αύξηση του ρεύματος αθροίζονται σε ένα σύνολο τάσεων $Gr(x, t)$:

$$Gr(x, t) = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s (1 - \exp(-c \frac{(n \frac{I_0}{n_1})^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2})) \quad (2.4)$$

όπου v η διαμήκης ακουστική ταχύτητα του MDL. Με σταθερό ρεύμα οι μικροτάσεις αθροίζονται σε σύνολο τάσεων $Gs(x, t)$:

$$Gs(x, t) = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s (1 - \exp(-c \frac{I_0}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2})) \quad (2.5)$$

ενώ με παροδική μείωση του ρεύματος σε σύνολο $Gf(x, t)$:

$$Gr(x, t) = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s (1 - \exp(-c \frac{((n - n_3) \frac{I_0}{n_1})^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2})) \quad (2.6)$$

Αυτά τα σύνολα μικροτάσεων διαδίδονται κατά μήκος της μαγνητοσυστολικής γραμμής του MDL ως ελαστικός παλμός, που προκαλεί την αλλαγή της μαγνητικής ροής με την κίνηση του κατά μήκος του υλικού. Η αλλαγή της μαγνητικής ροής μπορεί να ανιχνευθεί από το πηνίο λήψης λόγω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ως ηλεκτρική τάση στα άκρα του. Η επαγωγική τάση αυτή ακολουθεί την πρώτη παράγωγο του ελαστικού παλμού, δηλαδή αυξάνεται όσο έχει ανοδική πορεία ο ελαστικός παλμός ως προς το πλάτος του, μηδενίζεται όσο ο παλμός διατηρεί σταθερή τιμή, και μειώνεται με την μείωση του πλάτους του ελαστικού παλμού. Επομένως στην περίπτωση σύντομης παλμικής διέγερσης, η μεταβολή στην μαγνητική ροή θα προκαλέσει τάση μορφής της παραγώγου ενός παλμού στα άκρα του πηνίου λήψης, ενώ αν η παλμική διέγερση έχει σταθερή κατάσταση για μεγαλύτερη διάρκεια τότε η πρώτη παράγωγος του ελαστικού παλμού χωρίζεται σε δύο αντίθετους ως προ το πρόσημο παλμούς, με αντίστοιχη τάση στα άκρα του πηνίου λήψης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13.

2.8 Ιδιότητες MDL

Υπάρχουν διάφορες ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών υλικών στις οποίες στηρίζεται η τεχνική MDL για την ανάπτυξη αισθητήρων. Επομένως είναι απαραίτητη η κατανόηση των ιδιοτήτων αυτών ώστε να γίνει κατάλληλη κατεργασία του μαγνητοσυστολικού υλικού τόσο κατά την παραγωγή του αλλά και κατά την ενσωμάτωση του στον αισθητήρα, για το βέλτιστο ταίριασμα του με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι ιδιότητες αυτές είναι οι ακόλουθες:

2.8.1 Ανομοιομορφία

Η διακύμανση της συνάρτησης ομοιομορφίας $V_0(x)$, δηλαδή της εξάρτησης της μέγιστης τάσης V_0 στο πηνίο λήψης από την απόσταση μεταξύ πηνίου διέγερσης και πηνίου λήψης, ορίζεται ως ανομοιομορφία (Non-uniformity). Με μεθόδους κατεργασίας όπως η μέθοδος ανόπτησης (stress-current annealing) και κανονικοποίησης (normalization) εξαλείφονται οι τοπικές τάσεις και διορθώνεται το φαινόμενο των μη ευθυγραμμισμένων μαγνητικών περιοχών που δημιουργούνται κατά την παραγωγή, με αποτέλεσμα την καλύτερη ομοιομορφία στο υλικό.

2.8.2 Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης

Η εξάρτηση της τάσης εξόδου του MDL στη επίδραση σταθερού μαγνητικού πεδίου ονομάζεται φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης (bias field effect) και είναι μια σημαντική ιδιότητα του MDL, καθώς ένα απροσδόκητο μαγνητικό πεδίο μπορεί να επιδράσει έντονα στην απόκριση μιας διάταξης και να καταστρέψει το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Επομένως το φαινόμενο αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την ανάπτυξη διατάξεων MDL και να υπάρξει μόνωση από την επίδραση εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, ή να γίνεται συνεχής μέτρηση της περιβαλλοντικής μαγνήτισης και να αντισταθμίζεται.

2.8.3 Καθυστέρηση απόκρισης

Καθυστέρηση απόκρισης (response delay) ορίζεται ως η χρονική διαφορά μεταξύ της στιγμής της διέγερσης και της λήψης του ελαστικού παλμού. Η χρονική διαφορά αυτή επηρεάζεται κυρίως από την σταθερότητα της ταχύτητας διάδοσης του ελαστικού παλμού στο μαγνητοσυστολικό υλικό της γραμμής MDL. Επομένως είναι απαραίτητη η σταθεροποίηση της ταχύτητας διάδοσης κατά μήκος του υλικού, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλες μεθόδους κατεργασίας του MDL ή με εφαρμογή πεδίου πόλωσης.

2.8.4 Υστέρηση

Υστέρηση (Hysteresis) ενός MDL είναι ένα υψηλά μη γραμμικό φαινόμενο και ορίζεται ως η διαφορά της συνάρτησης της τάσης εξόδου $V_0(I_e)$ μεταξύ των τιμών που παίρνει για μέγιστο παλμικό ρεύμα I_e και για μηδενικό ρεύμα I_e .

Με την χρήση άμορφων μαγνητοσυστολικών υλικών ως MDL η υστέρηση μπορεί να είναι πολύ μικρή, και περαιτέρω μείωση της μπορεί να επιτευχθεί με λειτουργία του MDL στην περιοχή κορεσμού.

2.8.5 Ανάλυση

Ανάλυση καλείται η μικρότερη απόσταση δύο κοντινών σημείων πάνω σε μια γραμμή καθυστέρησης, που όταν διεγερθούν μπορούν να προκαλέσουν διακριτούς παλμούς στη λήψη. Έρευνες έχουν δείξει πως σε κλασσικά μαγνητοσυστολικά υλικά η ανάλυση φτάνει τα 80mm ενώ σε άμορφα υλικά μετά από κατάλληλη επεξεργασία με τεχνικές ανόπτησης μπορεί να φτάσει το 1mm.

2.8.6 Πλάτος παλμού διέγερσης και απόκριση συχνότητας

Το πλάτος της τάσης εξόδου στη λήψη παρουσιάζει εκτός των άλλων εξάρτηση με τη διάρκεια και το εύρος ζώνης παλμού διέγερσης. Το βέλτιστο εύρος συχνοτήτων έχει καθοριστεί από σχετικές έρευνες και έχει δεχθεί πως το εύρος συχνοτήτων μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 10 MHz μετά από κατάλληλες τεχνικές ανόπτησης.

2.8.7 Ανακλάσεις

Παρουσιάζονται ανακλάσεις όταν ο ελαστικός παλμός φτάνει στο τέλος του κυματοδηγού, πράγμα που μειώνει την ευαισθησία και την ανάλυση των γραμμών καθυστέρησης. Η εξάλειψη τους επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο τερματισμό των γραμμών και σχεδίαση της γεωμετρίας της διάταξης.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθούν διατάξεις και θα παρουσιαστούν αποτελέσματα πειραμάτων με σκοπό τόσο να γίνουν αντιληπτές οι παραπάνω ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης, όσο και για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά που παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό αισθητήρα βασισμένο σε αυτές. Πριν γίνει όμως αυτό, θα παρουσιαστούν σε ένα κεφάλαιο τα ηλεκτρονικά κυκλώματα διέγερσης και λήψης που υλοποιήθηκαν.

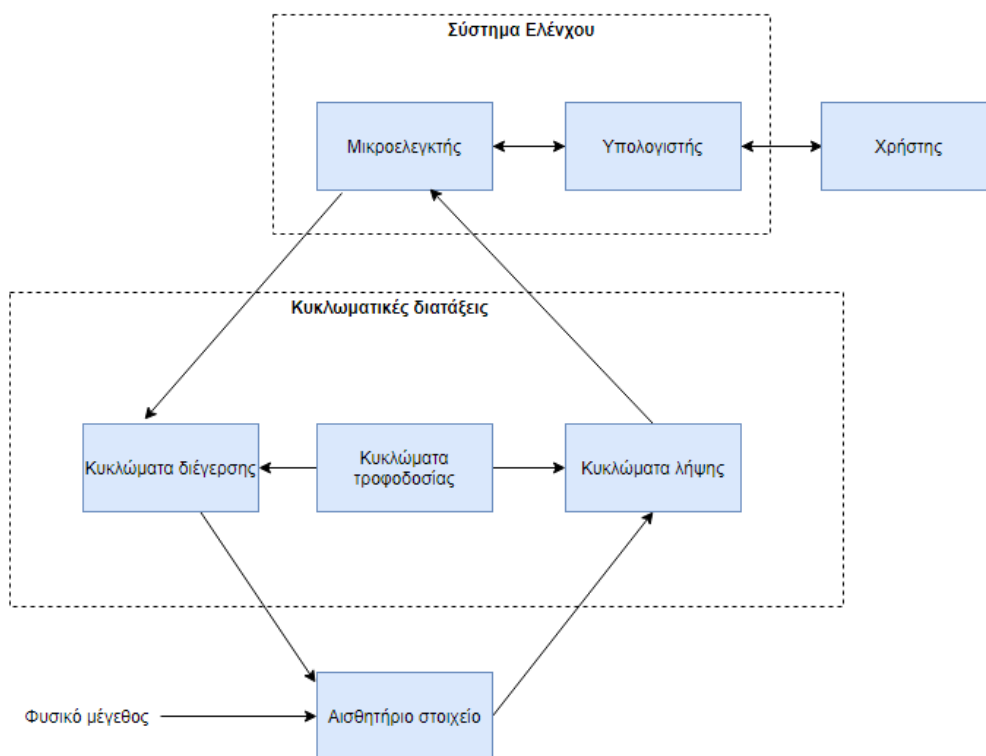
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΛΗΨΗΣ

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρας μπορεί να χωριστεί σε τρία υποσυστήματα:

(1) Το αισθητήριο στοιχείο που στηρίζεται σε μία συγκεκριμένη τεχνολογία για την μετατροπή ενός φυσικού μεγέθους σε ένα ηλεκτρικό σήμα.

(2) Τις κυκλωματικές διατάξεις που συμβάλλουν στην διέγερση του αισθητήριου στοιχείου, στην επεξεργασία του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του στοιχείου, καθώς και στην τροφοδοσία όλων των υποσυστημάτων του αισθητήρα.

(3) Το σύστημα ελέγχου που αποτελεί το λογικό στοιχείο του αισθητήρα και αλληλοεπιδρά με τον χρήστη αλλά και με τις κυκλωματικές διατάξεις προκειμένου να ρυθμιστεί η διέγερση και να επεξεργαστεί περαιτέρω και να αποθηκευτεί το σήμα εξόδου.



Σχήμα 3.1 Διαγραμματική απεικόνιση ενός αισθητήρα

3.1 Διάταξη αισθητήριου στοιχείου MDL

Το αισθητήριο στοιχείο είναι ταυτόσημο με την τυπική διάταξη MDL, όπως έχει οριστεί στην υποενότητα 2.6, αποτελείται δηλαδή από την μαγνητοσυστολική γραμμή, ένα σωληνοειδές πηνίο λήψης και ένα διέγερσης.

Το υλικό της γραμμής MDL διέρχεται μέσα από το πυρήνα των πηνίων και είναι άμορφο σύρμα FeSiB, που επιλέχθηκε για τις μαλακές μαγνητικές ιδιότητες του.

Το πηνίο διέγερσης αποτελείται από 5 περιελίξεις σύρματος χαλκού με διάμετρο 1 mm, ενώ η διάμετρος των περιελίξεων είναι 10 mm. Η αυτεπαγωγή L του πηνίου υπολογίστηκε σε 120,12 nH από τον τύπο:

$$L = N^2 \mu_0 \mu_r \left(\frac{D}{2} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot D}{d} \right) - 2 \right] \quad (3.1)$$

όπου N ο αριθμός των περιελίξεων, D η διάμετρος τους, d η διάμετρος του σύρματος και μ_0, μ_r οι σχετικές μαγνητικές διαπερατότητες του κενού και του χαλκού αντίστοιχα. Ο μικρός αριθμός σπειρών καθώς και η μικρή διάμετρος σύρματος επιλέχθηκαν προκειμένου να διατηρηθούν οι διαστάσεις του πηνίου όσο το δυνατόν μικρότερες ώστε το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο από την παλμική διέγερση να επιδρά σε περιορισμένη περιοχή της γραμμής MDL. Στην διάταξη που θα υλοποιηθεί, το πηνίο διέγερσης θα κινείται επί της γραμμής MDL.

Το πηνίο λήψης, το οποίο θα έχει σταθερή θέση, αποτελείται από 300 περιελίξεις χάλκινου σύρματος, με διάμετρο σύρματος 0.1 mm και η επαγωγή του υπολογίστηκε με τον τύπο στα 68,75 mH. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν αρκετά περισσότερες περιελίξεις προκειμένου να δημιουργηθεί ανιχνεύσιμη σε τιμή τάση στα άκρα του πηνίου, από την διάδοση του ελαστικού παλμού και την μεταβολή στην μαγνητική ροή που προκαλεί. Η επαγόμενη αυτή τάση περιγράφεται από τον τύπο:

$$V_L = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

όπου V_L η επαγόμενη τάση, N ο αριθμός των περιελίξεων του σωληνοειδούς, και $\frac{d\phi}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής. Από τον παραπάνω τύπο είναι προφανές ότι για δεδομένη μαγνητική ροή, η επαγόμενη τάση μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση του πλήθους των περιελίξεων.

3.2 Κυκλωματική διάταξη διέγερσης

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το πρώτο στάδιο της τεχνικής MDL περιλαμβάνει την δημιουργία ελαστικού παλμού στην μαγνητοσυστολική γραμμή με την τροφοδότηση παλμικού ρεύματος στο πηνίο διέγερσης. Στον αισθητήρα της παρούσας εργασίας η διαδικασία αυτή στηρίζεται σε συγκεκριμένη κυκλωματική διάταξη, της οποίας οι προδιαγραφές και η λειτουργία θα αναλυθούν παρακάτω.

3.2.1 Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης

Από την ανάλυση της τεχνικής MDL στο κεφάλαιο 2, προκύπτουν δεδομένες παράμετροι της διέγερσης, αλλά και παράμετροι οι οποίες για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας της διέγερσης είναι αναγκαίο να καθοριστούν πειραματικά. Οι δεδομένες παράμετροι είναι : (1) Εύρος παλμού διέγερσης της τάξης μερικών microseconds (μs), (2) Σύντομοι χρόνοι rise/fall του παλμού, (3) Ύπαρξη επαγωγικού φορτίου (σωληνοειδές πηνίο διέγερσης) , (4) Ρεύμα υψηλής τιμής στο πηνίο (τάξης A), ενώ οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι (5) η συχνότητα των διαδοχικών διεγέρσεων και (6) το ακριβές εύρος του παλμού.

Επομένως το κύκλωμα διέγερσης πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές όπως προκύπτουν από τις παραπάνω παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να είναι ικανό να διεγείρει το πηνίο με παλμικό ρεύμα μερικών μs ώστε και ο επαγόμενος ελαστικός παλμός να είναι σύντομος και να μην προκαλεί διαχωρίσιμους παλμούς τάσης στο πηνίο λήψης, ενώ οι χρόνοι rise/fall του ρευματικού παλμού πρέπει να είναι της τάξης των νανοδευτερολέπτων (ns) ώστε το προκαλούμενο παλμικό μαγνητικό πεδίο να φτάνει την μέγιστη και ελάχιστη τιμή του το γρηγορότερο δυνατό. Επίσης η ύπαρξη επαγωγικού φορτίου, το οποίο θα διαρρέεται από υψηλό ρεύμα για παραγωγή αντίστοιχου ισχυρού μαγνητικού πεδίου, προϋποθέτει ειδική κυκλωματική μεταχείριση για την αντιμετώπιση επαγωγικών κορυφών (inductive spikes) που προκαλούνται από την διακοπτική λειτουργία επαγωγικών φορτίων. Ταυτόχρονα το κύκλωμα

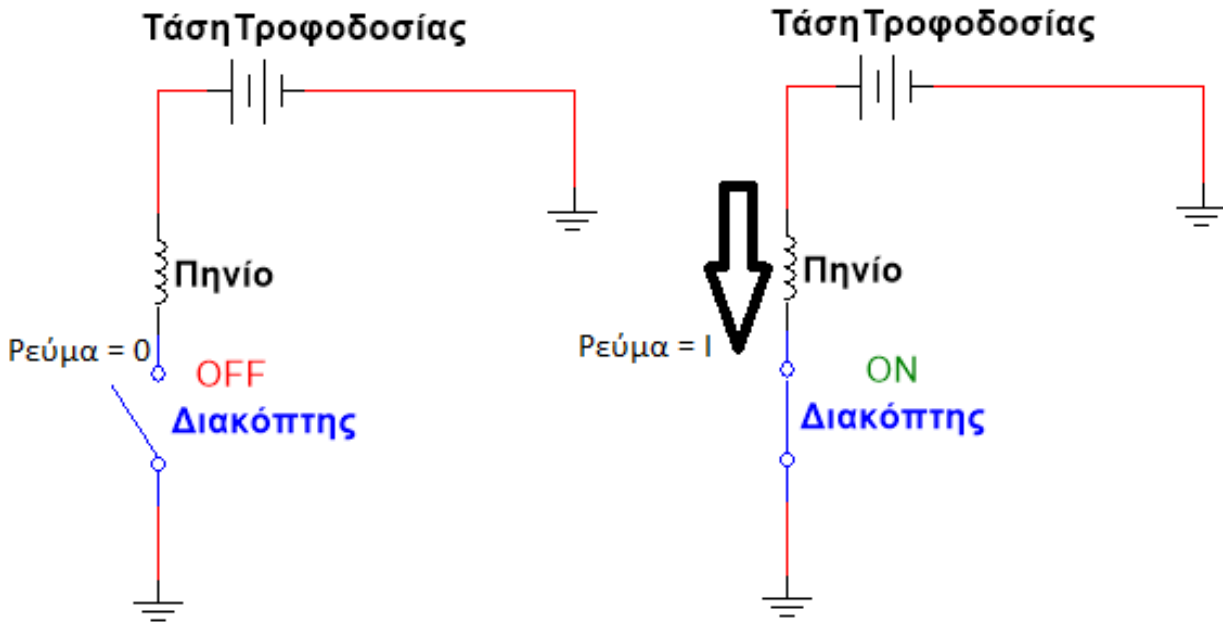
διέγερσης πρέπει να επιτρέπει την διαμόρφωση του ακριβούς εύρους του παλμού διέγερσης σε κλίμακα με όπως προσδιορίστηκε προηγουμένως, καθώς και την συχνότητα των διεγέρσεων, δηλαδή τον χρόνο μεταξύ διαδοχικών διεγέρσεων, αφού σε πολύ υψηλή συχνότητα υπάρχει ο κίνδυνος οι ανακλάσεις των ελαστικών παλμών προηγούμενων διεγέρσεων να παρεμβάλλουν με την ανίχνευση των επόμενων παλμών, ενώ σε πολύ χαμηλή συχνότητα θα δημιουργούν σημαντική χρονική καθυστέρηση μεταξύ των μετρήσεων του αισθητήρα και θα απαιτείται αρκετός χρόνος για πολλαπλές μετρήσεις. Τέλος το κύκλωμα θα πρέπει να λειτουργεί και σε διάφορες τιμές της τάσης τροφοδοσίας ώστε να καθοριστεί πειραματικά και το βέλτιστο ρεύμα που θα διαρρέει το πηνίο κατά την διέγερση του.

3.2.2 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης είναι στην ουσία ένα απλό διακοπτικό κύκλωμα, και αποτελείται από 2 αντιστάσεις (R_1, R_2), 1 πυκνωτές (C_1), ένα n-channel mosfet (Malaysia) σε λειτουργία διακόπτη, μία δίοδο Schottky (IN5817), και το σωληνοειδές πηνίο διέγερσης. Υπάρχει ακροδέκτης για την εισαγωγή εξωτερικού παλμικού σήματος για τον έλεγχο της διέγερσης, καθώς και ακροδέκτης για την τροφοδότηση του συνολικού κυκλώματος.

3.2.2.1 Ποιοτική εξέταση κυκλώματος

Εξετάζοντας το κύκλωμα ποιοτικά, σκοπός της διάταξης είναι να τροφοδοτήσει με παλμικό ρεύμα το πηνίο ώστε να παραγάγει με την σειρά του παλμικό μαγνητικό πεδίο. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του mosfet-διακόπτη, ο οποίος στην περιοχή λειτουργίας κορεσμού λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης, ενώ στην περιοχή αποκοπής σαν ανοιχτός διακόπτης. Επομένως με παλμικό άνοιγμα και κλείσιμο του mosfet-διακόπτη, το πηνίο θα συνδέεται και θα αποσυνδέεται με την γείωση (Ground) και έτσι θα διαρρέεται με αντίστοιχο παλμικό ρεύμα.

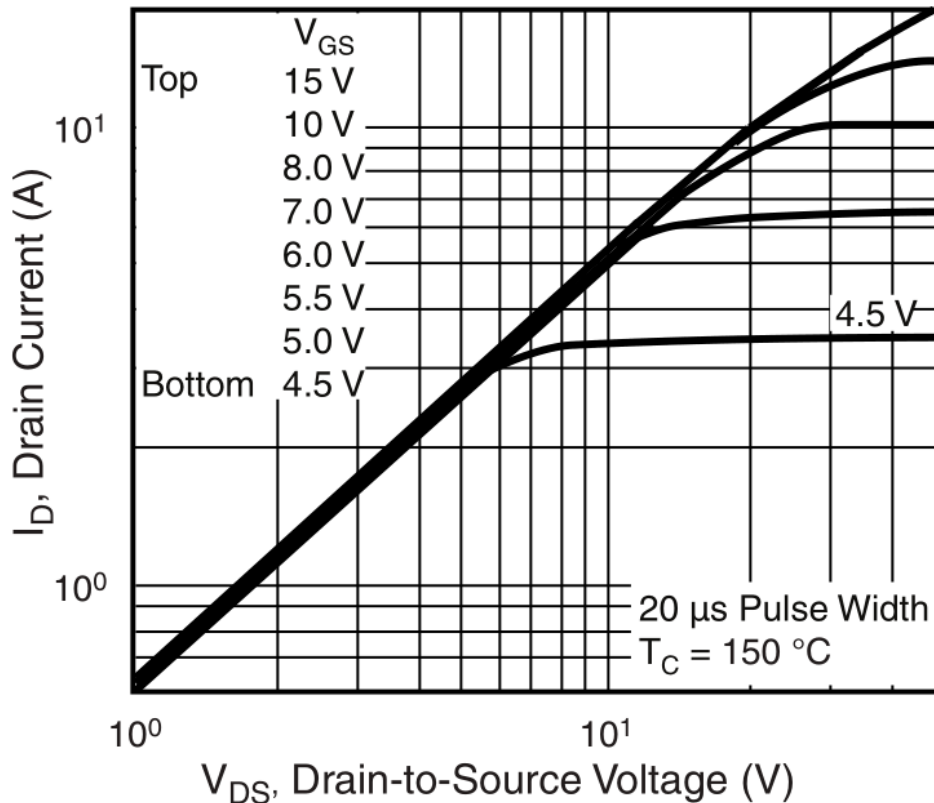


Σχήμα 3.4 Διακοπτική σύνδεση πηνίου με την γη για διέγερση του πηνίου με παλμικό ρεύμα

3.2.2.2 Ανάλυση λειτουργίας MOSFET

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην ποιοτική εξέταση του κυκλώματος, για την χρήση ενός mosfet ως ανοιχτού και κλειστού διακόπτη απαιτείται η λειτουργία του στην περιοχή αποκοπής (cut off region) και κορεσμού (saturation region) αντίστοιχα. Αποκοπή έχουμε για $V_{GS} < V_{TH}$ όπου G ο ακροδέκτης της πύλης (Gate) του mosfet, S ο ακροδέκτης της πηγής (Source) και V_{TH} η τάση κατωφλίου (threshold voltage). Στην περιοχή αποκοπής η εσωτερική αντίσταση του mosfet R_{DS} μεταξύ ακροδέκτη πηγής S και του ακροδέκτη D της υποδοχής (Drain) γίνεται τεράστια με αποτέλεσμα στην ουσία να δημιουργείται ανοιχτοκύκλωμα μεταξύ των δύο αυτών ακροδεκτών. Εναντίας για $V_{GS} > V_{TH}$ και $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ έχουμε κορεσμό του mosfet, η R_{DS} γίνεται πολύ μικρή και δημιουργείται ένα αγώγιμο κανάλι μεταξύ των ακροδεκτών της υποδοχής και της πηγής.

Η πύλη ενός mosfet έχει υψηλή χωρητικότητα και απαιτείται αντίστοιχα υψηλό ρεύμα για την γρήγορη πόλωση της, ενώ με ενίσχυση της τάσης του σήματος ελέγχου επιτυγχάνεται καλύτερη αγωγή και άρα μεγαλύτερη τιμή ρεύματος στο κανάλι μεταξύ υποδοχής και πηγής του mosfet όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5 από το datasheet για το IRF840.



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ρεύματος Drain προς Τάση Drain-Source (Datasheet IRF840)

3.2.2.3 Λειτουργία διόδου Schottky

Όταν ένα επαγωγικό φορτίο, όπως το πηνίο διέγερσης στην κυκλωματικής διάταξης, αποκόπτεται απότομα από την τροφοδοσία και ρεύμα σταματά να διέρχεται από αυτό, λόγω του νόμου του Lenz το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο του πηνίου, καθώς καταρρέει, προκαλεί ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης από αυτό κατά την τροφοδότηση του πηνίου. Έτσι δημιουργούνται υψηλές κορυφές αρνητικού δυναμικού (negative voltage spikes) στα άκρα του πηνίου καθώς τα φορτία δεν έχουν διέξοδο εκτόνωσης στο ανοικτό κύκλωμα που προκύπτει από την αποκοπή της τροφοδοσίας. Η κατάσταση αυτή είναι επικίνδυνη για τα εξαρτήματα του κυκλώματος καθώς οι κορυφές αυτές μπορεί να ξεπεράσουν της ακραίες τιμές λειτουργίες των εξαρτημάτων. Για τον λόγο αυτό τοποθετείται μία αντιπαράλληλη διάδος ελεύθερης διέλευσης (flyback/

freewheeling diode) στα άκρα του πηνίου η οποία προσφέρει εναλλακτικό μονοπάτι εκτόνωσης των φορτίων του αρνητικού δυναμικού χωρίς να επιδρά στην κανονική λειτουργία του υπόλοιπου κυκλώματος. Επιλέχθηκε Schottky δίοδος αντί συμβατικής, διότι απαιτείται όσο το δυνατόν χαμηλότερη τάση αγωγής, για γρήγορη αντίδραση στη ανάστροφη πόλωση που προκαλείται από το επαγωγικό φορτίο.

3.2.2.4 Λειτουργία αντιστάσεων

Η αντίσταση $R1$ συνδέει την πύλη του mosfet με την γη ώστε η πύλη να μην είναι 'στον αέρα' (floating) σε περίπτωση μη λειτουργίας του mosfet driver. Η $R2$ έχει τοποθετηθεί στο μονοπάτι του ρεύματος του πηνίου και έχει ένα άκρο της στην πηγή του mosfet και το άλλο στην γη. Με μέτρηση της τάσης στα άκρα της μπορεί λοιπόν να υπολογιστεί το ρεύμα που την διαρρέει, και άρα το ρεύμα στο πηνίο και να υπολογιστεί πειραματικά η βέλτιστη τιμή της τάσης τροφοδοσίας και των παραμέτρων του σήματος ελέγχου (συχνότητα, εύρος παλμού). Λόγω της τοποθεσίας της, η $R2$ αλλάζει την τιμή V_{GS} καθώς η υποδοχή του mosfet δεν είναι πλέον συνδεδεμένη με την γη απευθείας, αλλά λόγω της μικρής τιμής της αντίστασης η επίδραση αυτή είναι ελάχιστη.

3.2.2.5 Λειτουργία πυκνωτών

Η συστοιχία παράλληλων πυκνωτών με την τροφοδοσία έχουν τον ρόλο σταθεροποίησης της τάσης τροφοδοσίας και την αποφυγή βυθίσεων (Power supply voltage drops).

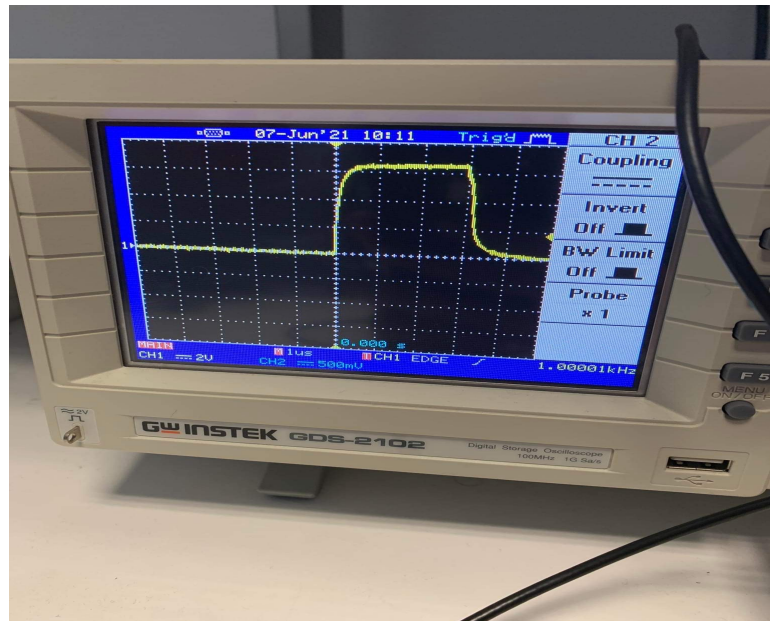
3.3 Κυματομορφές κυκλώματος διέγερσης

3.3.1 Κυματομορφή εισόδου

Την είσοδο του κυκλώματος την λαμβάνουμε από τη γεννήτρια του εργαστηρίου και πρόκειται για:

- τετραγωνικό παλμό
- συχνότητας 1KHz

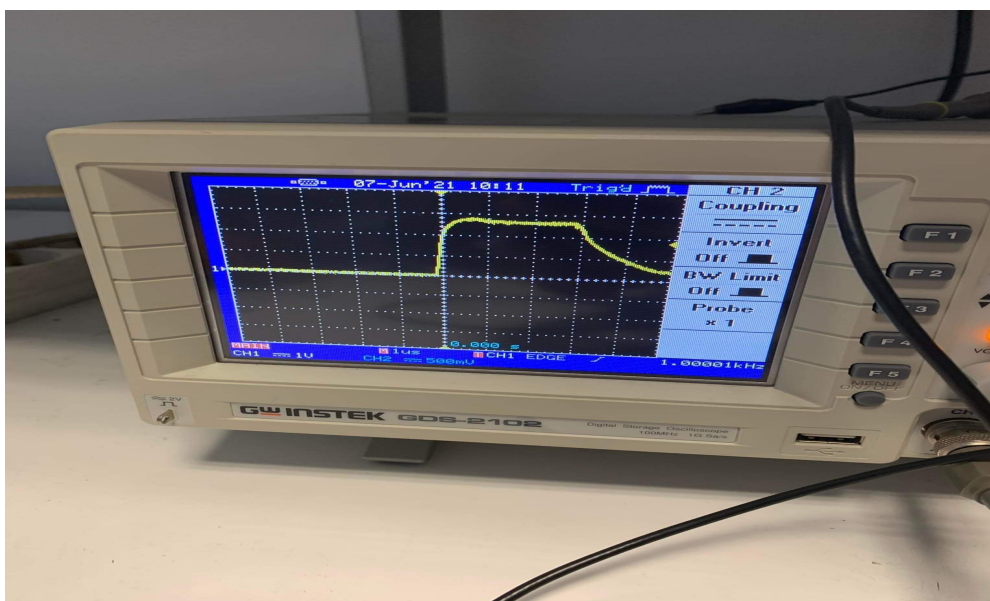
- πλάτους 5 Vpp
- Διάρκειας 3μs
- Rise/Fall Time 5ns



Σχήμα 3.5 Είσοδος κυκλώματος διέγερσης

3.3.2 Κυματομορφή στην αντίσταση R1

Στην αντίσταση R1 = 0,1 Ω λαμβάνουμε το εξής σήμα:

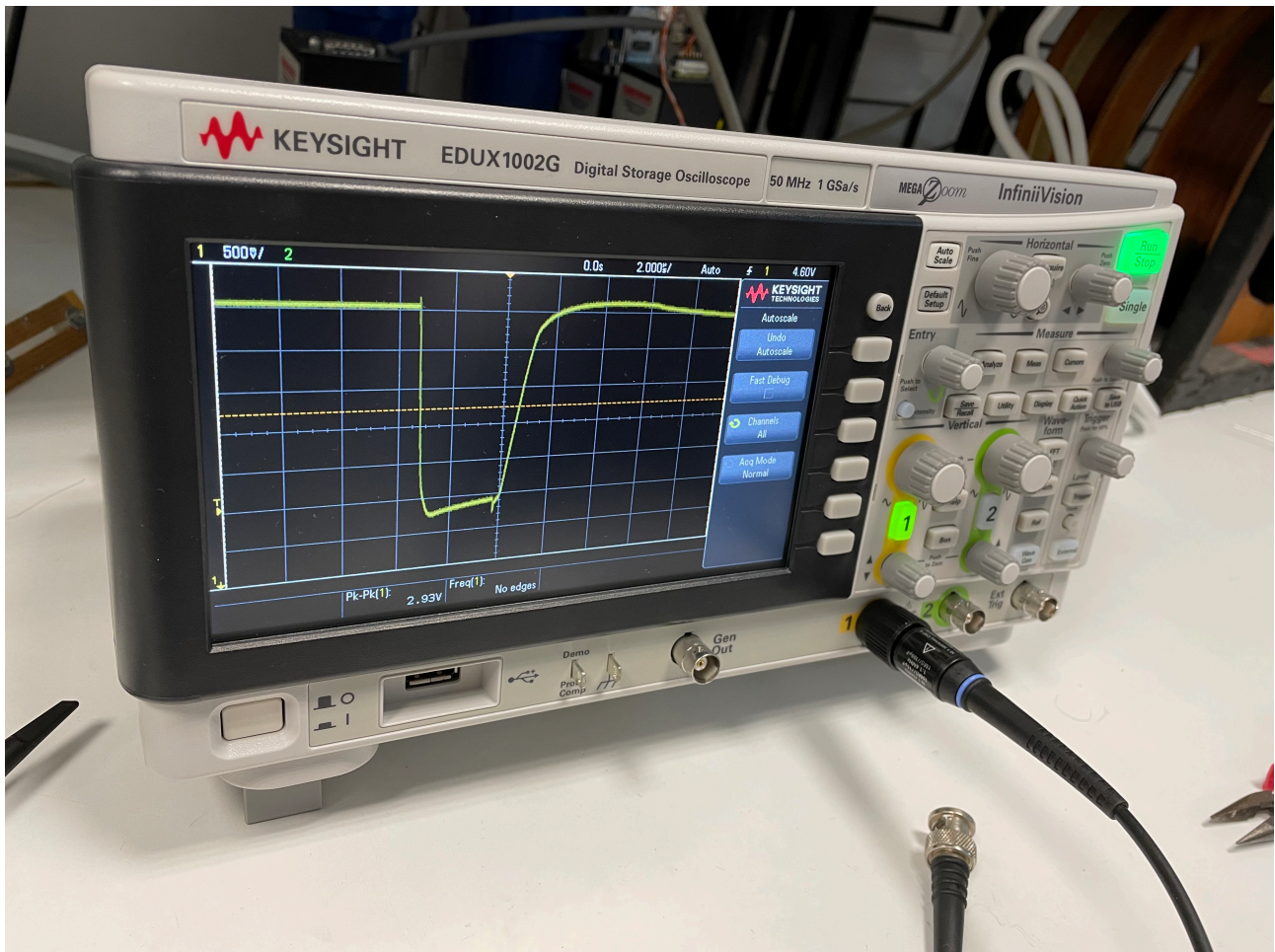


Σχήμα 3.6 Έξοδος αντίστασης R1

Παρατηρούμε ότι έχουμε σήμα πλάτους 3V και άρα έχουμε λόγω του νόμου του Ohm το επιθυμητό ρεύμα των 30 A.

3.3.3 Κυματομορφή στο πηνίο

Στο πηνίο του κυκλώματος διέγερσης λαμβάνεται η κάτωθι κυματομορφή:



Σχήμα 3.7 Έξοδος στο πηνίο

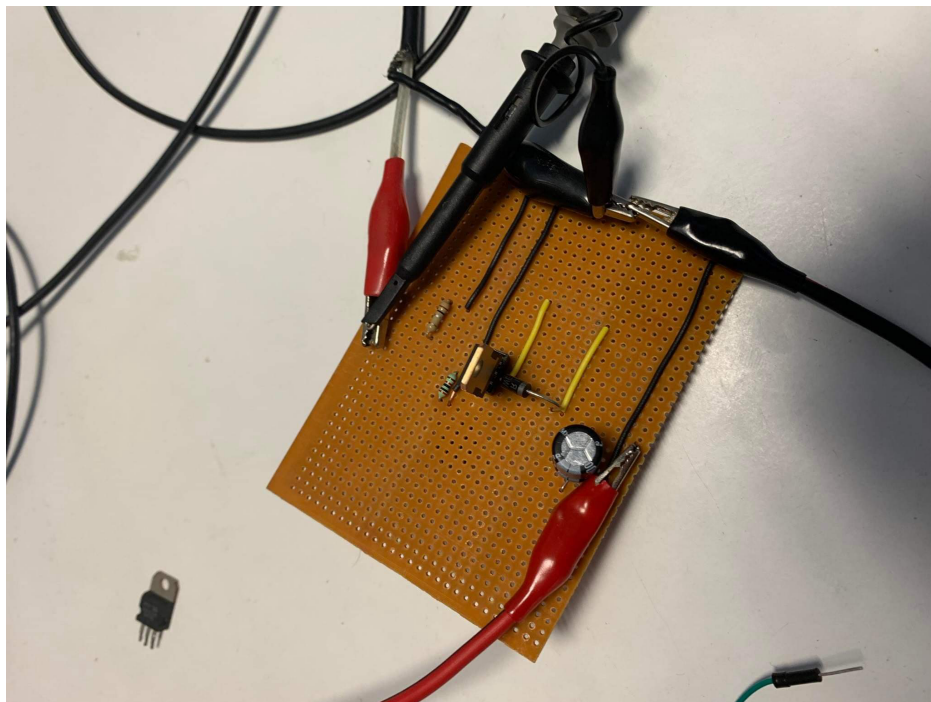
Παρατηρούμε ότι έχουμε παλμό πλάτους 3Vpp ακριβώς αντίθετο από την κυματομορφή στην αντίσταση R1, γεγονός που ικανοποιεί απόλυτα τις προσδοκίες μας, τόσο στο κομμάτι του πλάτους όσο και στο κομμάτι της μορφής του σήματος που λαμβάνουμε.

Σημείωση : Όλες οι παραπάνω κυματομορφές έχουν ληφθεί με Vcc στα 7V



Σχήμα 3.8 Τροφοδοτικό εργαστηρίου

Αρχικά το κύκλωμα διέγερσης κατασκευάστηκε σε πλακέτα δοκιμών (breadboard) ώστε να εξακριβωθεί η ορθή λειτουργία του και στον πραγματικό κόσμο. Στη συνέχεια το κύκλωμα κολλήθηκε σε πλακέτα και πήρε την εξής μορφή :



Σχήμα 3.9 Κύκλωμα διέγερσης

3.4 Κύκλωμα λήψης

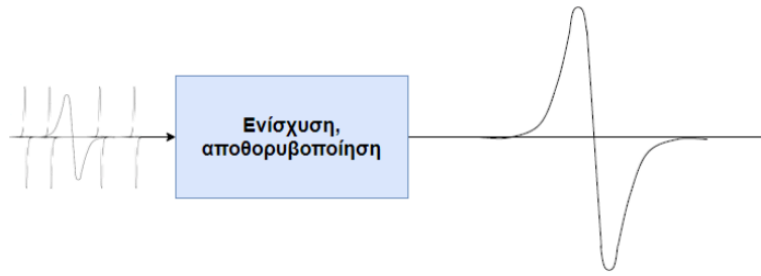
Με την άφιξη του ελαστικού παλμού στο πηνίο λήψης εμφανίζεται ένα αναλογικό σήμα στα άκρα του. Το σήμα αυτό δεν είναι σε κατάλληλη μορφή ώστε να το επεξεργαστεί ένα σύστημα ελέγχου όπως ένας μικροελεγκτής, και επομένως απαιτείται η διαμόρφωση του με χρήση κυκλωματικής διάταξης που θα αναλυθεί στην συνέχεια.

3.4.1 Προδιαγραφές κυκλώματος λήψης

Οι προδιαγραφές του κυκλώματος λήψης προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά του σήματος που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου.

Αρχικά μελετώντας στον παλμογράφο το σήμα λήψης, που αποτελεί και το σήμα εισόδου του κυκλώματος, παρατηρείται ότι είναι ένα αναλογικό σήμα δύο αντίθετων παλμών, αρκετά όμοιο με αυτό που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 της εργασίας κατά την μοντελοποίηση της τεχνικής MDL. Πιο συγκεκριμένα, η τάση του σήματος λήψης είναι της τάξης μερικών mV, και με μετασχηματισμό Fourier που πραγματοποιήθηκε βρέθηκε το ωφέλιμο φασματικό περιεχόμενο στην περιοχή 200-500 kHz. Επίσης στο σήμα εμφανίζεται θόρυβος ειδικά σε περιπτώσεις ύπαρξης εξωτερικών μαγνητικών πεδίων όπως κατά την ενεργοποίηση κάποιου κοντινού στο πηνίο μοτέρ.

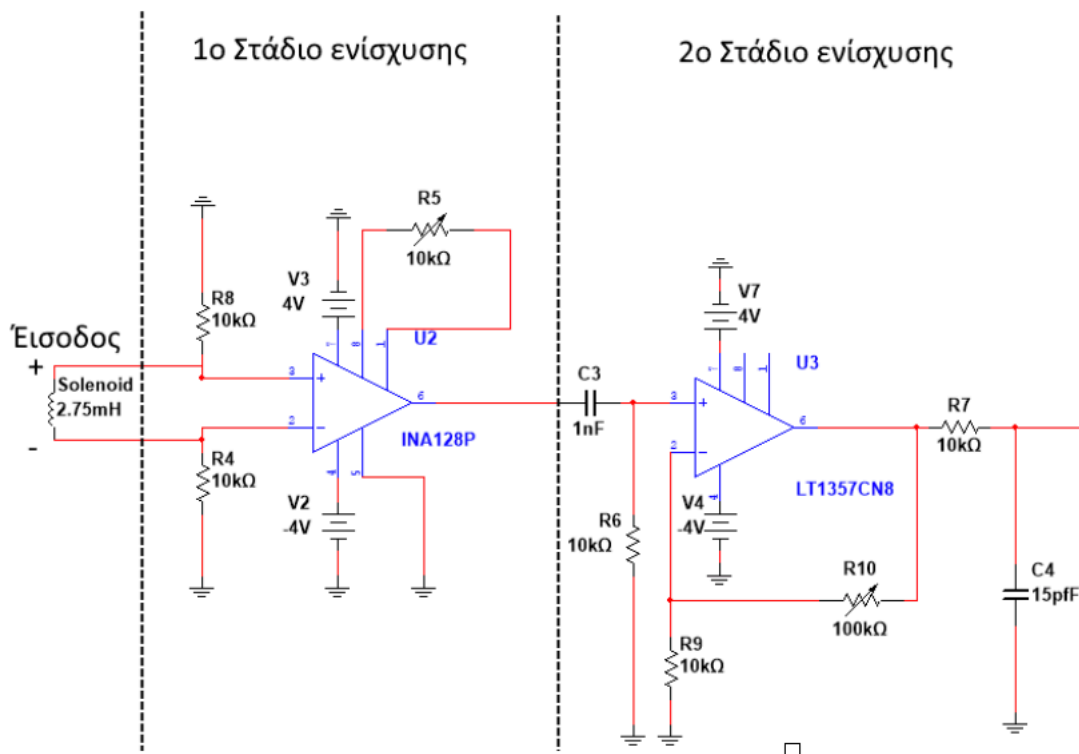
Έχοντας εξετάσει τα χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου και εξόδου του κυκλώματος, μπορεί να ξεκινήσει η ανάλυση των προδιαγραφών του. Το κύκλωμα λοιπόν πρέπει να είναι ικανό να ενισχύσει το σήμα εισόδου σε επίπεδα τάσης μερικών εκατοντάδων mV ή και μερικών V καθώς η αρχική του τάση των μερικών mV είναι πολύ χαμηλή για οποιαδήποτε επιπρόσθετη επεξεργασία. (1) Πρέπει δηλαδή να είναι ικανό ενίσχυσης του σήματος με κέρδος τουλάχιστον 100 ($G > 100$). (2) Ακόμη είναι αναγκαία η αποθορυβοποίηση του σήματος τόσο λόγω εξωτερικών μαγνητικών παρεμβολών που ανιχνεύει το πηνίο αλλά και από θόρυβο που προκαλείται από στοιχεία του ίδιου του κυκλώματος. (3)



Σχήμα 3.10 Ποιοτικό σχεδιάγραμμα του κυκλώματος λήψης

3.4.2 Ανάλυση κυκλώματος λήψης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το κύκλωμα λήψης αναλαμβάνει την διαμόρφωση του σήματος που ανιχνεύει το πηνίο λήψης στα άκρα του. Το κύκλωμα περιλαμβάνει πλήθος αντιστάσεων και πυκνωτών, αλλά ο πυρήνας του αποτελείται από δύο ολοκληρωμένα (INA128, LT1357) .



Σχήμα 3.11 Κυκλωματική διάταξη λήψης

3.4.3 Ποιοτική εξέταση κυκλώματος

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11, το κύκλωμα λήψης χωρίζεται σε δύο στάδια. Το αναλογικό σήμα από το πηνίο τροφοδοτείται στο πρώτο στάδιο ενίσχυσης, όπου πέρα από την αρχική ενίσχυση του πραγματοποιείται και άμβλυνση των συνιστωσών θορύβου. Στην συνέχεια εισέρχεται στο δεύτερο στάδιο ενίσχυσης όπου πραγματοποιείται για άλλη μια φορά ενίσχυση και αποθορυβοποίηση.

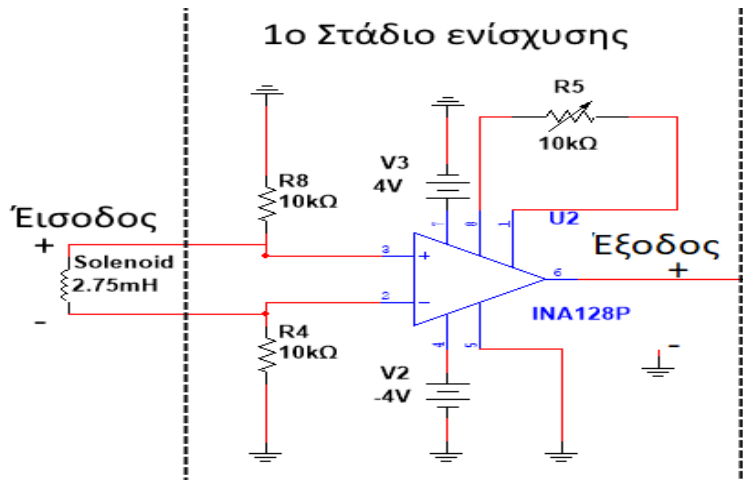
Στην συνέχεια θα αναλυθεί η λεπτομερή λειτουργία κάθε σταδίου, καθώς και ο λόγος διαμοιρασμού της ενίσχυσης και της αποθορυβοποίησης του σήματος σε δύο στάδια αντί σε ένα.

3.4.3.1 1^ο Στάδιο ενίσχυσης

Το πρώτο στάδιο ενίσχυσης αποτελείται από το ολοκληρωμένο ενισχυτή οργανολογίας (instrumentation amplifier) INA128, 2 αντιστάσεις (R_8, R_4) και την μεταβλητή αντίσταση R_5 . Το σήμα εισόδου από το πηνίο λήψης τροφοδοτείται στις διαφορικές εισόδους (ακροδέκτες 3,2) του ολοκληρωμένου και εξέρχεται ενισχυμένο από τον ακροδέκτη εξόδου 6. Το κέρδος της ενίσχυσης καθορίζεται από την μεταβλητή αντίσταση R_5 και τον τύπο:

$$G_1 = \frac{50k}{R_G} \quad (3.3)$$

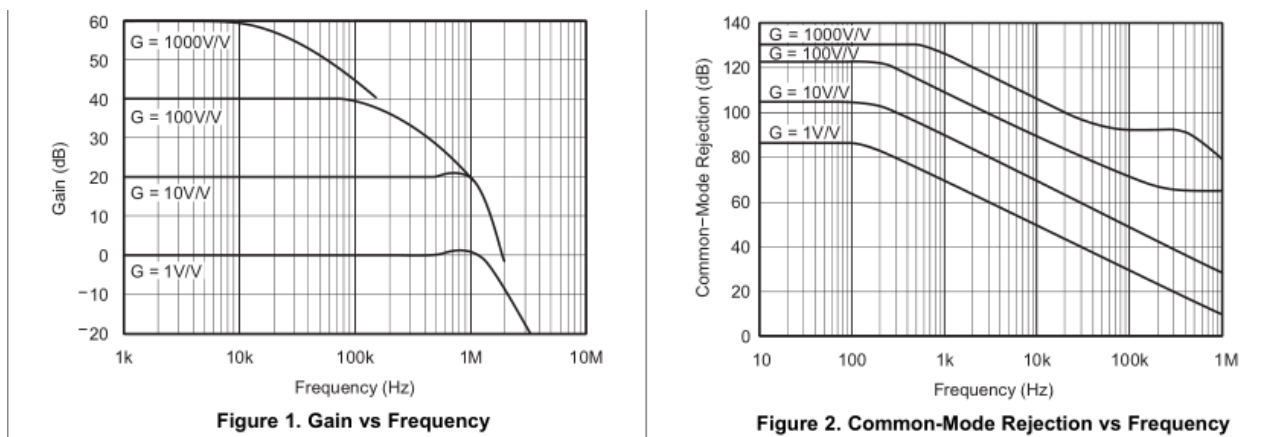
όπου R_G η αντίσταση που βλέπουν οι ακροδέκτες 1 και 8, δηλαδή την R_5 . Η θετική τροφοδοσία του ολοκληρωμένου είναι 4V και η αρνητική του -4V ως προς την γη, που αποτελεί και τάση αναφοράς και τροφοδοτείται στον ακροδέκτη 5. Οι αντιστάσεις R_8 και R_4 έχουν τον ρόλο της παροχής ρεύματος πόλωσης στις διαφορικές εισόδους.



3.12 1^ο Στάδιο ενίσχυσης

Πέρα από την ενίσχυση, το ολοκληρωμένο INA128 συμβάλλει και στην αποθρομβοποίηση του σήματος καθώς έχει υψηλό λόγο απόρριψης κοινού

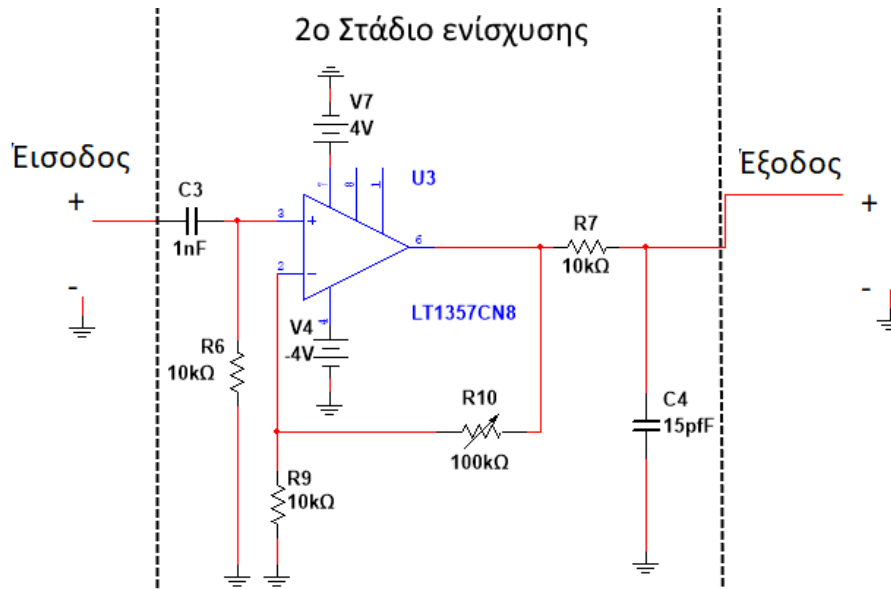
σήματος (CMRR), και ρυθμίζοντας κατάλληλα το κέρδος, θόρυβος με φασματικό περιεχόμενο μεγαλύτερης συχνότητας από το εύρος ζώνης του σήματος λήψης (200-500 kHz) θα βρεθεί στην μη γραμμική και φθίνουσα περιοχή της καμπύλης κέρδους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 Κέρδος (αριστερά) και CMRR (δεξιά) σε συνάρτηση με συχνότητα στο INA128

3.7.2.3 2ο Στάδιο ενίσχυσης

Το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης αποτελείται από το ολοκληρωμένο τελεστικό ενισχυτή LT1357, τρεις αντιστάσεις (R6,R9,R7), την μεταβλητή αντίσταση R10 και τους πυκνωτές C3 και C4.



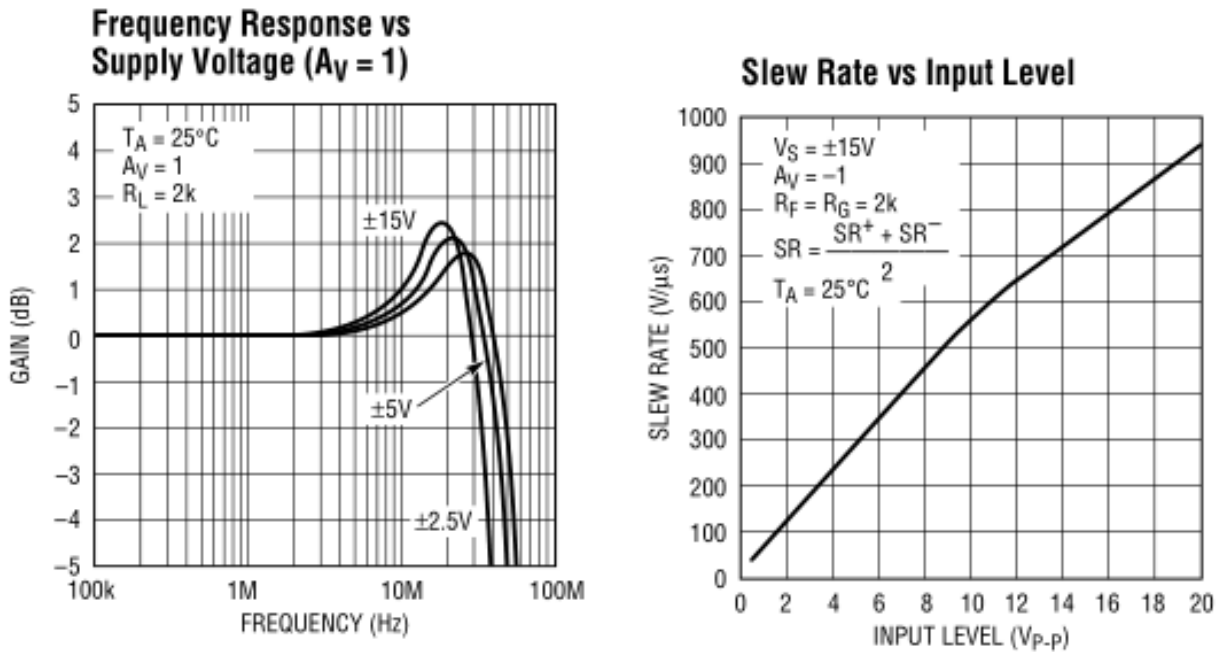
Σχήμα 3.14 2ο Στάδιο ενίσχυσης

Το σήμα που εξέρχεται από το πρώτο στάδιο τροφοδοτείται στο δίκτυο R-C (C3,R6) που είναι στην ουσία ένα απλό υπερπαρατό φίλτρο, με αποτέλεσμα να αποκόπτεται οποιαδήποτε DC συνιστώσα προερχόμενη από το προηγούμενο στάδιο ενίσχυσης. Στη συνέχεια το σήμα εισέρχεται στον ακροδέκτη 2, θετικής εισόδου του ολοκληρωμένου, και εξέρχεται ενισχυμένο από τον ακροδέκτη εξόδου 6. Ο ενισχυτής έχει μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία με κέρδος κλειστού βρόχου:

$$G_2 = 1 + \frac{R10}{R9} \quad (3.4)$$

το οποίο μπορεί να διαμορφωθεί αλλάζοντας την τιμή της μεταβλητής αντίστασης R10. Ύστερα από την ενίσχυση, το σήμα τροφοδοτείται σε άλλο ένα δίκτυο R-C (R7,C4) σε διάταξη βαθυπερατού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής 1 MHz ώστε να αμβλυνθούν περαιτέρω συνιστώσες θορύβου

υψηλών συχνοτήτων. Το ολοκληρωμένο LT1357 επιλέχθηκε λόγω των εξαιρετικών χαρακτηριστικών του όπως υψηλός ρυθμός μεταβολής εξόδου (slew rate), μεγάλο εύρος ζώνης κέρδους (gain bandwidth) καθώς και χαμηλού θορύβου εισόδου (input noise voltage), ώστε ανεξάρτητα από το κέρδος της ενίσχυσης να μην προκαλείται παραμόρφωση του σήματος εξόδου.



Σχήμα 3.15 Μοναδιαίο κέρδος σε συνάρτηση με την συχνότητα (αριστερά), ρυθμός μεταβολής εξόδου σε σχέση με τάση σήματος εισόδου (δεξιά) για το ολοκληρωμένο LT1357

Κεφάλαιο 4 - Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειράματα διενεργήθηκαν με την εξής σειρά:

Αρχικά κρατώντας σταθερό το πηνίο διέγερσης και απομακρύνοντας σταδιακά το πηνίο λήψης, ληφθήκαν μετρήσεις για το πλάτος και την καθυστέρηση του παλμού. Ύστερα με γνωστό το πλάτος σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ των πηνίων, χτυπήθηκε η ράβδος με διαφορετικές δυνάμεις σε διάφορα σημεία ώστε να μετρηθεί η διαφορά του παλμού, όταν η ράβδος είναι ελαττωματική.

Αρχικά παρατίθενται ξανά τα χαρακτηριστικά της εισόδου και του σήματος στο πηνίο διέγερσης, ώστε να είναι ξεκάθαρες οι αλλαγές.

Παλμός εισόδου:

$$V_{pp} = 4,76V$$

$$\text{Duty Cycle} = 4\mu s$$

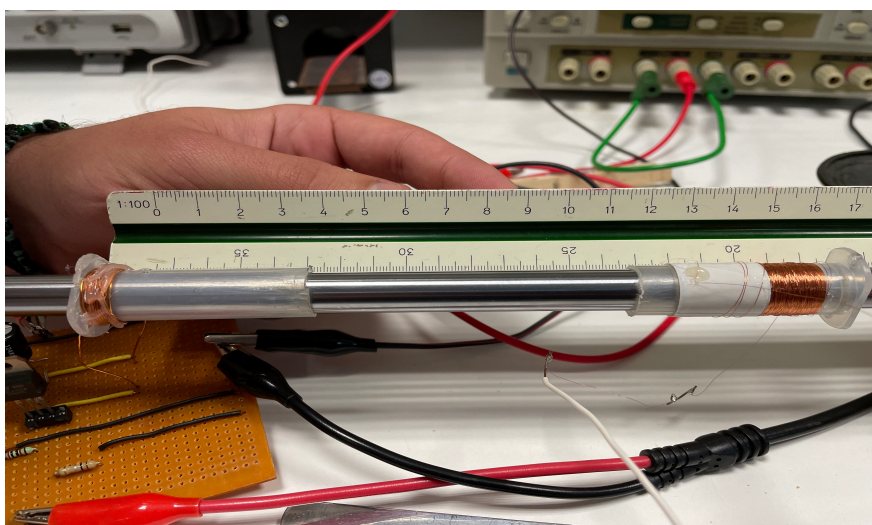
Παλμός στο πηνίο:

$$V_{pp} = 3,20 V$$

$$\text{Duty Cycle} = 5 \mu s$$

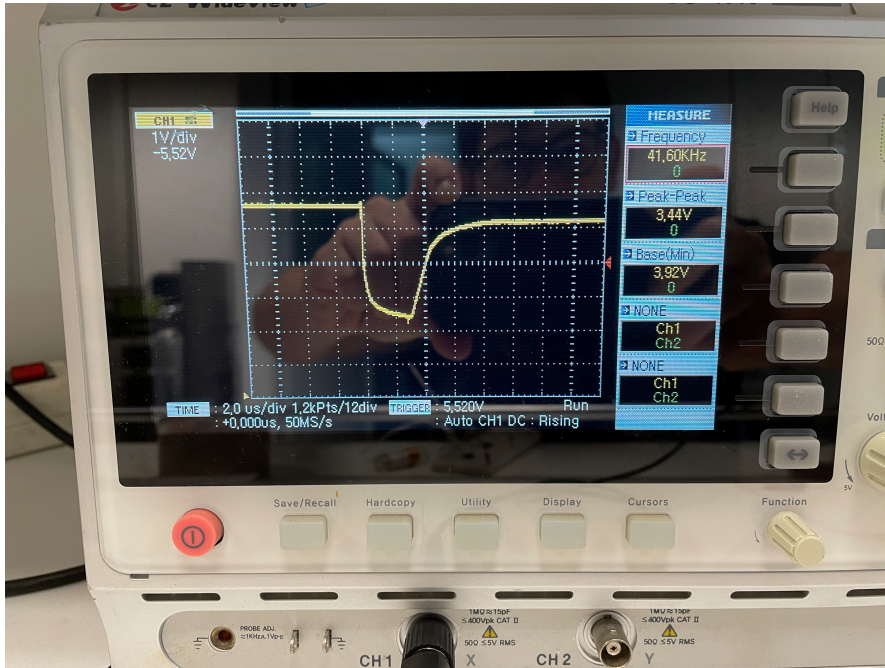
Για αρχή μετρήθηκε η τάση του παλμού με τη ράβδο μη χτυπημένη σε απόσταση 9cm. Το αποτέλεσμα ήταν 7.12 Volt

Η διάταξη για τη παραπάνω μέτρηση είχε τη κάτωθι μορφή:

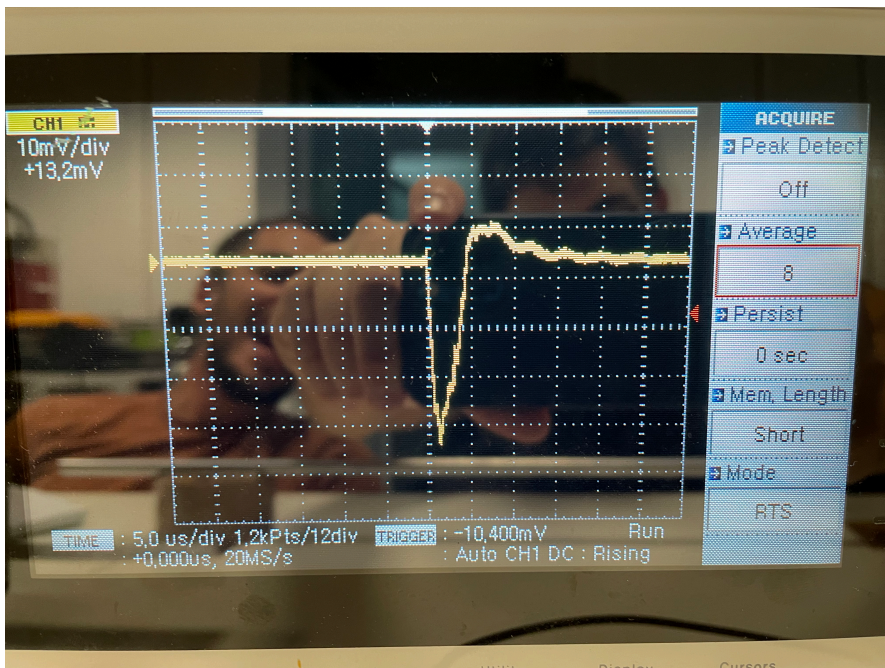


Σχήμα 4.1 Διάταξη διενέργειας πειραμάτων

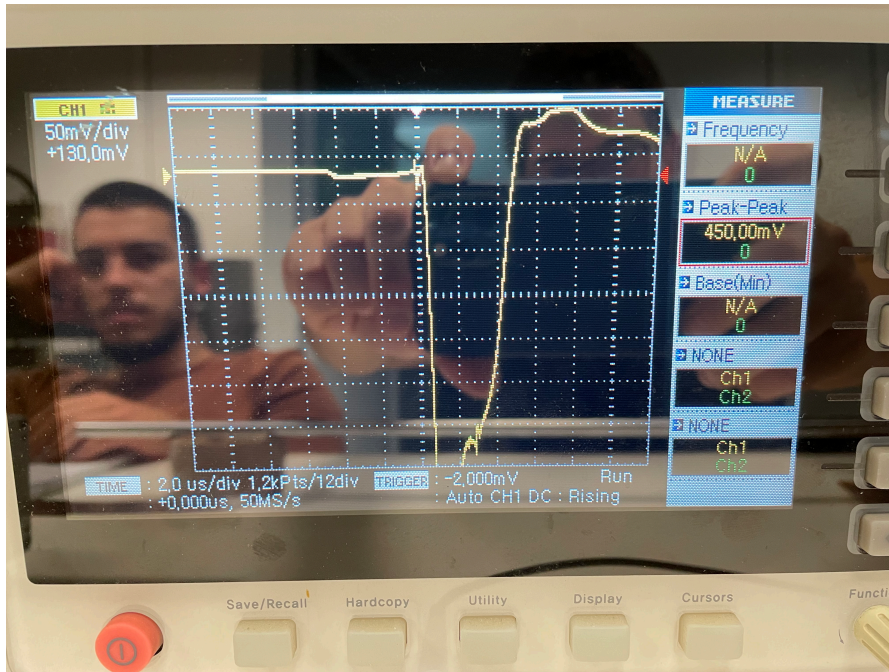
Τα σήματα τα οποία παρήχθησαν στα διάφορα στάδια του παλμού παρατίθενται παρακάτω:



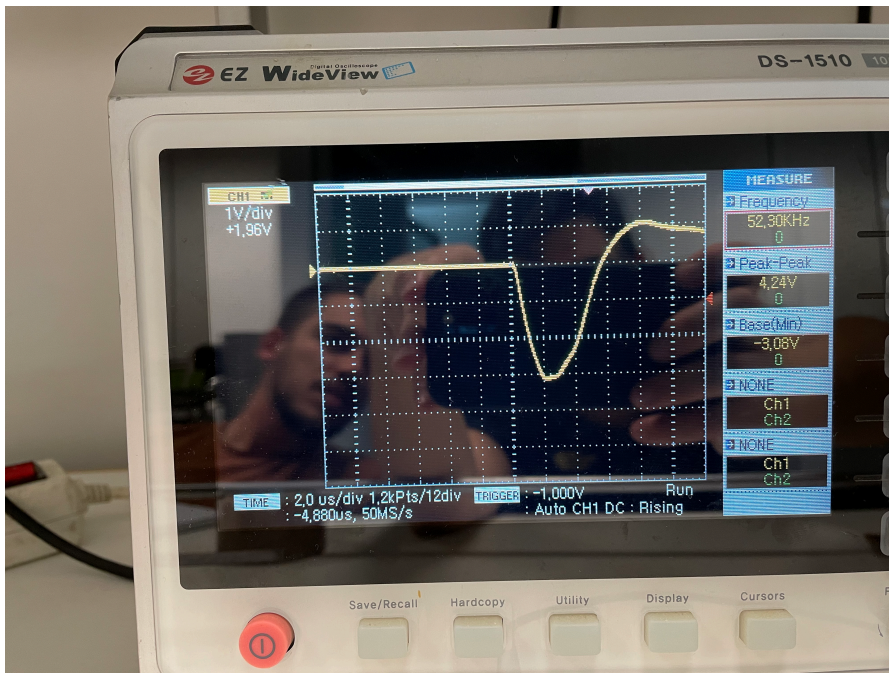
Σχήμα 4.2 Παλμός στο πηνίο διέγερσης



Σχήμα 4.3 Παλμός στο πηνίο λήψης



Σχήμα 4.3 Παλμός μετά το πρώτο στάδιο ενίσχυσης



Σχήμα 4.4 Παλμός μετά το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης

Με τη ράβδο χτυπημένη σε συγκεκριμένα κιλά και απόσταση στα 9 cm:

Πίνακας 4.1 Τάση εξόδου στην έξοδο του κυκλώματος λήψης σε διάφορες τιμές δύναμης χτυπήματος

Χτύπημα με σφυρί (kg) (Μέτρηση στην συνέχεια)	V _{pp} (Volt)
9	7,0
10	6,51
12	5,32
13	5,14
14	4,67
15	4,31
16	4,28
17	4,03
18	3,79
19	3,14
26	1,40
32	1,12

Παρατηρήθηκε ότι το η τάση μειώνεται θεαματικά όσο η δύναμη που ασκείται μεγαλώνει και επιτρέπεται να ελεγχθεί το αν ένας χάλυβας είναι χτυπημένος ή όχι.

Βιβλιογραφία

- [1] [https://eclass.uniwa.gr/modules/document/file.php/EE167/Παρουσίαση Μαθήματος/1. Section I_Introduction to Sensors.pdf](https://eclass.uniwa.gr/modules/document/file.php/EE167/Παρουσίαση_Μαθήματος/1._Section_I_Introduction_to_Sensors.pdf)
- [2] nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hle/2010/VerikokidisEmmanouil/attached-document-1275895025-523016-24283/Verikokidis2010.pdf
- [3] <https://www.elprocus.com/magnetic-sensor-working-and-its-applications/>
- [4] <https://riverglennapts.com/el/material/571-magnetostriction.html>
- [5] <https://www.innerspec.com/knowledge/lorentz-force-and-magnetostriction>
- [6] <https://www.intechopen.com/books/resonance/magneto-elastic-resonance-principles-modeling-and-applications>
- [7] https://www.brainkart.com/article/Magnetic-Materials_6823/
- [8] E. Hristoforou, “Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications”, *Measurement Science and Technology*, 14, R15-R47, 2003
- [9] <https://www.reade.com/products/amorphous-metals>
- [10] M.J. Dapino, “On magnetostrictive materials and their use in smart material transducers”. *Structural Engineering & Mechanics J.* 17. 1-28.
- [11] <https://slideplayer.gr/slide/2861190/>
- [12] E. Hristoforou, H. Chiriac, M. Neagu, “Pulse width effect on magnetostrictive amorphous ribbons and wires”, *physica status solidi*, Volume 143, 391,1994
- [13] http://physiclessons.blogspot.com/2013/03/blog-post_5.html
- [14] <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/52076/Αισθητήρας%20Θέσης%20MDL%20για%203d%20Printing%20Systems.pdf?sequence=1>

