



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αισθητήρας θέσης βασισμένος σε μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης για συστήματα 3d printing

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πανίδης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Αισθητήρας θέσης βασισμένος σε μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης
για συστήματα 3d printing**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Πανίδης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28^η Ιουλίου 2020.

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πάυλος-Πέτρος Σωτηριάδης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Κωνσταντίνος Πανίδης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Πανίδης, 2020.

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

Στην σύγχρονη εποχή η καθημερινότητα του ανθρώπου στηρίζεται σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό σε πληθώρα αισθητήρων, σε συστήματα δηλαδή που μεταφράζουν στοιχεία και οντότητες από τον φυσικό κόσμο, σε δεδομένα πιο διαχειρίσιμα ως προς την επεξεργασία, διευκολύνοντας την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με το περιβάλλον του. Δεδομένης λοιπόν της χρησιμότητας των συσκευών αυτών, δημιουργείται μια αυξανόμενη ανάγκη βελτίωσης της ακρίβειας αλλά και μείωσης του κόστους τους, μέσω της αξιοποίησης νέων τεχνολογιών. Μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή των αισθητήρων είναι η εύρεση της γραμμικής θέσης ενός αντικειμένου (αισθητήρας θέσης) που μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (Magnetostrictive Delay Lines- MDL) με ικανοποιητική ακρίβεια και σχετικά χαμηλό κόστος. Μια τέτοια εφαρμογή μπορεί να αξιοποιηθεί σε συστήματα που στηρίζονται στη γραμμική κίνηση, όπως 3d printing systems. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από τους μαγνητικούς αισθητήρες, καθώς και το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής στο οποίο στηρίζεται η τεχνολογία MDL. Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά στην τεχνολογία των 3d printers και στην ανάγκη των συστημάτων αυτών για χρήση αισθητήρων θέσης, και πώς μπορεί να καλυφθεί με την εκμετάλλευση των MDL. Ακολουθεί η ανάλυση των κυκλωμάτων στα οποία στηρίζεται ο αισθητήρας θέσης που θα υλοποιηθεί, καθώς και η περιγραφή της συνολικής διάταξης η οποία θα χρησιμοποιηθεί για πειραματισμούς αναφορικά στις ιδιότητες του MDL. Τέλος, αφιερώνεται ένα κομμάτι της εργασίας στην εξέταση της αποτελεσματικότητας του υλοποιημένου αισθητήρα θέσης και τον πιθανό τρόπο ενσωμάτωσής του σε ένα σύστημα 3d printer.

Λέξεις-κλειδιά: Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης, μαγνητικοί αισθητήρες, αισθητήρες θέσης, συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης, γραμμική κίνηση.

Abstract

In modern times human activity relies increasingly on numerous sensors, which are systems that translate elements from the natural world to data more manageable to process, facilitating human interaction with the surrounding environment. Taking into account the usefulness of these devices, a growing need develops to improve their accuracy and reduce their cost by implementing new technologies. An interesting application for sensors is sensing the linear position of an object (position sensor), something that can be achieved using the Magnetostrictive Delay Line (MDL) technology with satisfactory accuracy and relatively low cost. Such an application can be used in systems that rely on linear motion, like 3d printing systems.

In this diploma thesis, the theoretical background is laid out regarding magnetic sensors and the phenomenon of magnetostriction, in which the MDL technology is based. Furthermore, 3d printing system technology is mentioned and its need for position sensing, something that can be accomplished with MDL. Additionally, the circuits used in the developed position sensor will be analyzed along with the total experimental layout which will be used to study the MDL properties. Finally, a part of this thesis is dedicated to the examination of the effectiveness of the developed position sensor and its possible implementation in a 3d printing system.

Keywords: Magnetostrictive delay lines, magnetic sensors, position sensors, 3d printing systems, linear motion.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χριστοφόρου που μου έδωσε την ευκαιρία να πραγματοποιήσω την διπλωματική μου εργασία πάνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Σ. Αγγελόπουλο για την επιμέλεια και τις διορθώσεις του επί του κειμένου της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στον καλό μου φίλο και συνάδελφο Χ. Κορδαλή, ο οποίος πέρα από το να με φέρει σε επαφή με το αντικείμενο της εργασίας, μου πρόσφερε σημαντική βοήθεια και με την συνδρομή του ξεπεράστηκαν τεχνικά εμπόδια που προέκυψαν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που μου έδωσε με ανιδιοτέλεια όλα τα εφόδια για να καταφέρω τα όνειρα μου, καθώς και την σύντροφο μου Βιβή για την στήριξη της στις δύσκολες στιγμές.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Η έννοια του αισθητήρα.....	1
1.2 Μαγνητικός αισθητήρας.....	2
1.3 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης	2
1.4 3d Printing - Εφαρμογή MDL αισθητήρα θέσης σε σύστημα 3d Printing.....	3
1.5 Στόχος της εργασίας	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ	5
2.1 Μαγνητοσυστολή	5
2.2 Μαγνητοσυστολή σε ατομικό επίπεδο-Μαγνητικές περιοχές	6
2.3 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών	7
2.4 Μαγνητοσυστολικά υλικά - Άμορφα υλικά.....	10
2.5 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης MDL - Τυπική διάταξη.....	11
2.5.1 Δημιουργία ελαστικού Παλμού	11
2.5.2 Διάδοση ελαστικού παλμού	13
2.5.3 Λήψη παλμού.....	13
2.6 Μοντελοποίηση MDL.....	15
2.7 Ιδιότητες MDL.....	18
2.7.1 Ανομοιομορφία.....	18
2.7.2 Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης.....	18
2.7.3 Καθυστέρηση απόκρισης.....	18
2.7.4 Υστέρηση.....	19
2.7.5 Ανάλυση	19
2.7.6 Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας	19
2.7.7 Ανακλάσεις.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο - 3D PRINTING ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ	21

3.1	Τεχνολογίες 3d Printing και αρχές λειτουργίας	21
3.2	Αρχή λειτουργίας εκτυπωτών παραγωγής τηγμένου νήματος (FFF)	22
3.3	Προβλήματα κατά την διαδικασία εκτύπωσης στην τεχνολογία FFF	26
3.4	Χρήση αισθητήρα θέσης σε σύστημα 3d Printer	28
3.4.1	Αισθητήρας θέσης στην διαδικασία ζυγοστάθμισης (calibration)	28
3.4.2	Αισθητήρας θέσης σε σύστημα ανάδρασης	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο - Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ		31
3.5	Διάταξη αισθητήριου στοιχείου MDL	32
3.6	Κυκλωματική διάταξη διέγερσης	34
3.6.1	Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης	34
3.6.2	Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης	35
3.6.3	Προσομοίωση κυκλώματος διέγερσης	39
3.6.4	Κατασκευή και απόκριση κυκλώματος διέγερσης.	40
3.7	Κυκλωματική διάταξη λήψης	42
3.7.1	Προδιαγραφές Κυκλώματος λήψης	43
3.7.2	Ανάλυση Κυκλώματος λήψης	44
3.7.3	Προσομοιώσεις σταδίων	49
3.7.4	Κατασκευή και απόκριση κυκλώματος λήψης	52
3.8	Ο μικροελεγκτής της διάταξης του αισθητήρα	54
3.8.1	Παρουσίαση μικροελεγκτή Teensy 3.6	54
3.8.2	Λειτουργία μικροελεγκτή Teensy 3.6 στην διέγερση	56
3.8.3	Λειτουργία μικροελεγκτή Teensy 3.6 στην λήψη	56
3.8.4	Αλληλεπίδραση μικροελεγκτή με υπολογιστή	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο – Η ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΥΤΗΝ		59
4.1	Παρουσίαση συνολικής διάταξης	60
4.1.1	Μηχανολογικό μέρος συστήματος γραμμικής κίνησης	60
4.1.2	Κυκλωματικό μέρος συστήματος γραμμικής κίνησης	62

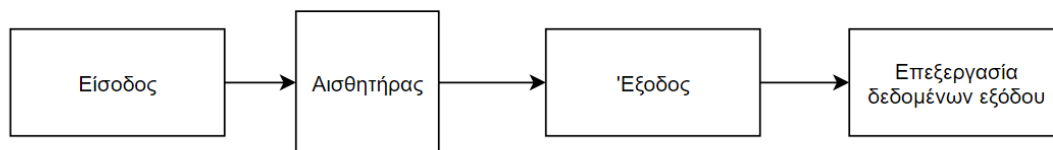
4.1.3	Λειτουργία συνολικής διάταξης	63
4.2	Μελέτη των ιδιοτήτων του MDL μέσω πειραμάτων πάνω στην διάταξη	64
4.2.1	Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης.....	64
4.2.2	Ανομοιομορφία.....	67
4.2.3	Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας	68
4.2.4	Υστέρηση.....	69
4.2.5	Καθυστέρηση απόκρισης και ταχύτητα διάδοσης ελαστικού παλμού	70
4.2.6	Ανακλάσεις.....	72
4.2.7	Ανάλυση.....	73
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ	75
5.1	Περιγραφή λειτουργίας αισθητήρα θέσης	75
5.2	Αξιολόγηση αισθητήρα.....	77
5.2.1	Εύρος (range)	77
5.2.2	Πιστότητα (accuracy)	78
5.2.3	Ακρίβεια (precision)	79
5.2.4	Ανάλυση (resolution)	80
5.3	Λειτουργία αισθητήρα θέσης σε σύστημα 3d Printing.....	81
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	85
6.1	Μαγνητική θωράκιση (Magnetic shielding)	85
6.2	Κυκλωματική απομόνωση επιμέρους κυκλωματικών διατάξεων	86
6.3	Καταπολέμηση θορύβου τροφοδοσίας	86
6.4	Χρήση δεύτερου πηνίου λήψης	86
6.5	Αντικατάσταση μικροελεγκτή με Field Programmable Gate Array (FPGA).....	87
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας θα εξεταστεί η έννοια του αισθητήρα, με επικέντρωση στον μαγνητικό αισθητήρα και τον αισθητήρα θέσης. Επίσης θα γίνει επιφανειακή αναφορά στην τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης στο πλαίσιο ενός μαγνητικού αισθητήρα θέσης και θα παρουσιαστεί συνοπτικά η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3d printing), από όπου θα προκύψει η χρησιμότητα ενσωμάτωσης, σε ένα τέτοιο σύστημα, ενός αισθητήρα θέσης.

1.1 Η έννοια του αισθητήρα

Αισθητήρας είναι μία συσκευή η οποία ανιχνεύει ή αντιδρά σε μια μορφή εισόδου από το φυσικό περιβάλλον και μεταφράζει την είσοδο αυτήν σε ένα σήμα, το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί ο άνθρωπος, είτε άμεσα είτε αφού προηγηθεί επιπρόσθετη επεξεργασία από κάποιο υπολογιστικό σύστημα, όπως ένας μικροελεγκτής. Η μορφή της εισόδου μπορεί να έχει ποικίλες μορφές όπως θερμοκρασία, πίεση, υγρασία και φως, ενώ μερικές από τις συνήθεις μορφές της εξόδου ενός αισθητήρα είναι ένα αναλογικό ή ψηφιακό σήμα τάσης ή μία οπτική ένδειξη. Αυτή η βασική αρχή του αισθητήρα, η μετατροπή δηλαδή ενός φαινομένου από μια μορφή ενέργειας σε μία άλλη, είναι που τον καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο με αμέτρητες εφαρμογές σε κάθε μορφή ανθρώπινης δραστηριότητας και έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών ειδών αισθητήρων. Τα είδη των αισθητήρων μπορούν να διαχωριστούν με πολλά κριτήρια, όπως με βάση την μορφή της εισόδου και εξόδου (φωτοηλεκτρικοί, θερμοηλεκτρικοί, ηλεκτροχημικοί, θερμό-οπτικοί), το πεδίο της εφαρμογής τους (βιομηχανία, ιατρική, αυτοκίνηση, οικιακή χρήση) αλλά και το μέσο ανίχνευσης του αισθητήρα, δηλαδή μόνο της μορφής της εισόδου (ηλεκτρικοί, βιολογικοί, χημικοί, μαγνητικοί) [1].



Σχήμα 1.1 Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα

1.2 Μαγνητικός αισθητήρας

Από την βιβλιογραφία [2] ο μαγνητικός αισθητήρας ορίζεται ως ένας αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαταράξεων και αλλαγών σε ένα μαγνητικό πεδίο όπως η ισχύς, η διεύθυνση αλλά και η μαγνητική ροή του πεδίου αυτού. Η βασική αρχή λειτουργίας ενός μαγνητικού αισθητήρα στηρίζεται στην άμεση σχέση του μαγνητισμού και του ηλεκτρισμού, στο γεγονός δηλαδή ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο περιβάλλει ηλεκτρικό ρεύμα και διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου μεταφράζονται σε διακυμάνσεις στο ηλεκτρικό ρεύμα που περιβάλλει το πεδίο, όπως προκύπτει από τους νόμους που όρισε ο Michael Faraday και αποτύπωσε σε εξισώσεις ο James Clerk Maxwell. Σήμερα υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες μαγνητικών αισθητήρων που στηρίζονται σε διάφορα μαγνητικά φαινόμενα όπως Fluxgate, Hall Effect, μαγνητοαντίστασης, μαγνητοσυστολής, μαγνητικής επαγωγής, και έχουν πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία (μαγνητικοί αισθητήρες γραμμικής/γωνιακής θέσης ρομποτικών βραχιόνων σε γραμμές παραγωγής) αλλά και στην καθημερινότητα μας (ανάγνωση δεδομένων σε HDD δίσκο οικιακού ηλεκτρονικού υπολογιστή). Η χρησιμότητα και το ενδιαφέρον ανάπτυξης των αισθητήρων αυτών αντικατοπτρίζεται και στο μερίδιο στην παγκόσμια αγορά που καθορίστηκε για το 2018 στα 2 δισεκατομμύρια δολάρια με προβλεπόμενη ετήσια ανάπτυξη της τάξης του 6.8% για τα έτη 2019 με 2025 [3].

1.3 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης

Οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDL) είναι μία τεχνική γραμμής καθυστέρησης που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Πιο συγκεκριμένα, σε μία διάταξη γραμμής καθυστέρησης, υπολογίζεται η χρονική διαφορά μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου για την μέτρηση του επιθυμητού μεγέθους, ενώ το

μαγνητοσυστολικό φαινόμενο είναι μία ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών όπου συστέλλονται ή διαστέλλονται με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου και αντιστρόφως. Επομένως, ένας αισθητήρας MDL μπορεί να υλοποιηθεί με διέγερση του σήματος εξόδου και λήψης του σήματος εισόδου μέσω μαγνητοσυστολής ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, και να υπολογιστεί το επιθυμητό μέγεθος με μέτρηση της χρονικής διαφοράς των δύο παραπάνω σημάτων. Αυτό το είδος αισθητήρων μπορεί να ενσωματωθεί σε εφαρμογές μέτρησης θέσης, μετατόπισης, μηχανικής τάσης και πίεσης αλλά και μαγνητικού πεδίου με ικανοποιητική ακρίβεια και χαμηλό κόστος και πολυπλοκότητα.

1.4 3d Printing - Εφαρμογή MDL αισθητήρα θέσης σε σύστημα 3d Printing

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει συγκεντρώσει η τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing) ως μια καινοτόμα και εύκολα προσβάσιμη τεχνολογία προσθετικής παρασκευής (additive manufacturing). Πλέον μέσω της τεχνολογίας αυτής, ένα οποιοδήποτε τρισδιάστατο μοντέλο, σχεδιασμένο σε έναν υπολογιστή, μπορεί να αποκτήσει φυσική υπόσταση και να κατασκευαστεί σε διάφορα είδη υλικών αν και συνηθίζεται η χρήση μιας μορφής πλαστικού. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα αυτής της κατασκευαστικής διαδικασίας είναι η ευελιξία τόσο στο είδος της πρώτης ύλης που θα χρησιμοποιηθεί όσο και στην γεωμετρία του τελικού προϊόντος, η οποία δεν περιορίζεται όπως στις συμβατικές μεθόδους παρασκευής (injection molding). Επίσης δίνει την δυνατότητα αστραπιαίας ανάπτυξης της παραγωγής σε σχέση με την εκκίνηση μιας γραμμής παραγωγής σε μία εργοστασιακή μονάδα και απαιτεί ελάχιστο αρχικό κόστος. Ενώ η τεχνολογία αυτή είναι γνωστή από την δεκαετία του 1980, εμπόδιο στη ανάπτυξη της αποτέλεσε η απουσία ισχυρού σχεδιαστικού λογισμικού για ανάπτυξη τρισδιάστατων σχεδίων, λόγω των χαμηλών δυνατοτήτων των υπολογιστικών συστημάτων της εποχής. Τα τελευταία χρόνια όμως με την πρόοδο των υπολογιστών και την εμφάνιση πληθώρας σχεδιαστικών λογισμικών, το 3d printing έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλές με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλου αριθμού 3d printing συστημάτων σε ιδιαίτερα προσβάσιμες τιμές και με υψηλές προδιαγραφές. Η πλειοψηφία των μηχανημάτων αυτών διαθέτουν 3 άξονες κίνησης, χωρίς όμως την χρήση κάποιου αισθητήρα για την ακριβή κίνηση σε κάθε άξονα, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα κατά την διαδικασία παρασκευής. Δεδομένου το ήδη χαμηλό κόστος ενός

τέτοιου μηχανήματος, ένας αισθητήρας γραμμικής θέσης MDL ενσωματωμένος σε κάθε άξονα του μηχανήματος αποτελεί κομψή και αποδοτική λύση και θα μελετηθεί στην συνέχεια της παρούσας εργασίας.

1.5 Στόχος της εργασίας

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, δίνεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, καθώς και της τεχνικής των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης στην οποία στηρίζεται η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα θέσης που θα υλοποιηθεί.

Επίσης γίνεται αναφορά στην τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης από την οποία θα προκύψει ο τρόπος και η χρησιμότητα ενσωμάτωσης του προτεινόμενου αισθητήρα θέσης σε ένα σύστημα 3d printing. Στην συνέχεια υλοποιείται μία απλή διάταξη προκειμένου να μελετηθεί πειραματικά η τεχνική MDL, και να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά της τεχνικής αυτής που θα αξιοποιηθούν στον προτεινόμενο αισθητήρα θέσης.

Τέλος, με τα δεδομένα που προκύπτουν από τους προηγούμενους πειραματισμούς αλλά και με λήψη επιπρόσθετων μετρήσεων, γίνεται μία προσπάθεια υλοποίησης του αισθητήρα θέσης, προσομοιώνοντας έναν από τους τρεις άξονες κίνησης ενός 3d printer, και εξάγονται συμπεράσματα τόσο ως προς την αποτελεσματικότητα του αισθητήρα αλλά και την εφαρμοστικότητα του σε ένα σύστημα 3d printing.

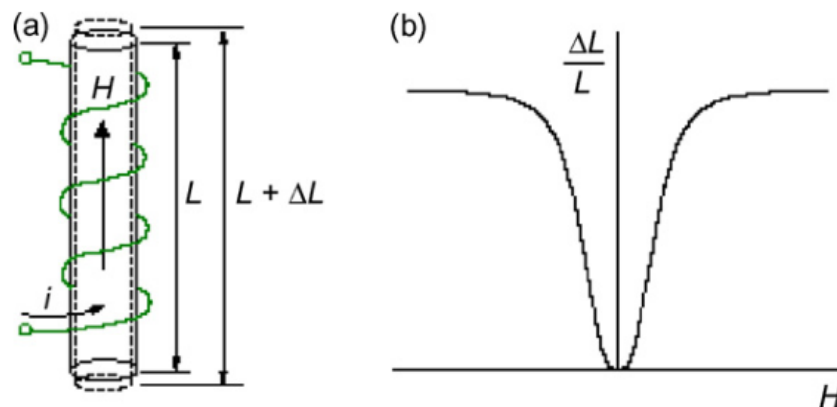
Συνοψίζοντας, πρέπει να αναφερθεί πως ο χαρακτήρας της εργασίας είναι κυρίως κατασκευαστικός, και στοχεύει στην εφαρμογή της θεωρίας που προκύπτει από την βιβλιογραφία σε έναν χρήσιμο αισθητήρα. Η παροχή διαφόρων υλικών όπως ο άμορφος πυρήνας, αλλά και σημαντικής τεχνογνωσίας και καθοδήγησης, έχει γίνει από το Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων του ΕΜΠ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει η εξήγηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής στο οποίο στηρίζεται η τεχνική MDL που θα αναλυθεί στην συνέχεια του κεφαλαίου. Επίσης γίνεται μία σύντομη αναφορά στα μαγνητοσυστολικά υλικά καθώς και στα άμορφα μαγνητοσυστολικά υλικά στα οποία εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό.

2.1 Μαγνητοσυστολή

Η μαγνητοσυστολή είναι μία ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών που προκαλεί την συστολή ή την διαστολή τους, όταν βρίσκονται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Η ιδιότητα της μαγνητοσυστολής επιτρέπει στα υλικά αυτά να μετατρέπουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε μηχανική αλλά και αντιστρόφως, μία μηχανική τάση ή καταπόνηση σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα [6].



Σχήμα 2.1 Διαστολή υλικού κατά ΔL υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου (a), συνάρτηση $\lambda(H)$ (b) [5]

Πιο συγκεκριμένα, η μαγνητοσυστολή μετριέται ως το ποσοστό

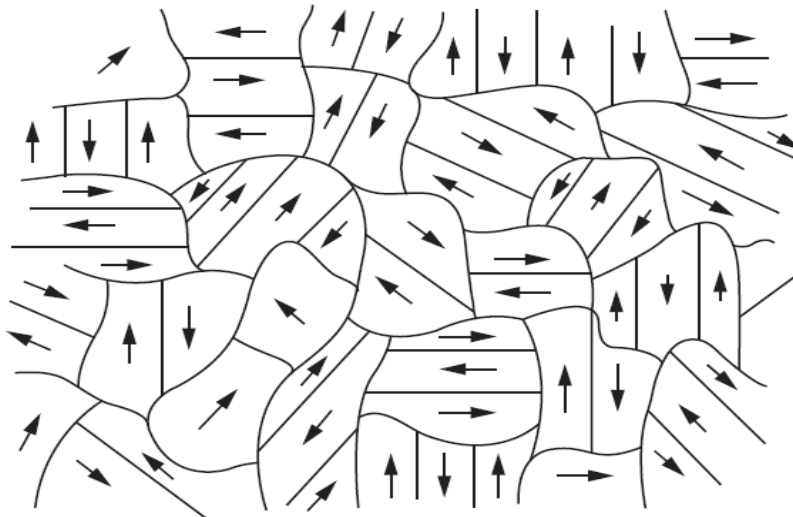
$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

όπου ΔL η συστολή ή διαστολή του υλικού κατά μήκος μιας δοσμένης κατεύθυνσης, και L το μήκος του υλικού στη μη-μαγνητισμένη κατάσταση. Αναλόγως με το αποτέλεσμα της

μαγνητοσυστολής, δηλαδή αν το υλικό διαστέλλεται ή συστέλλεται, το λ μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Το λ εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο H που εφαρμόζεται στο υλικό και έτσι σχηματίζεται η συνάρτηση $\lambda(H)$ η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2.1 [4].

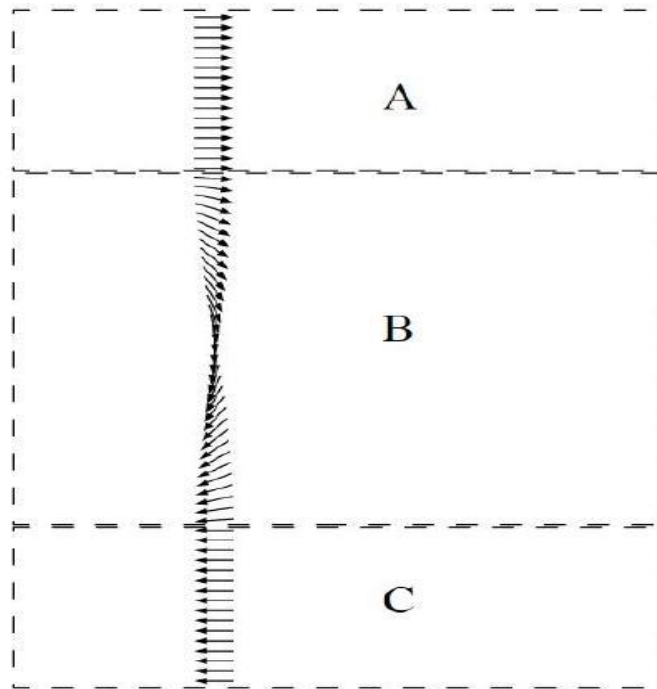
2.2 Μαγνητοσυστολή σε ατομικό επίπεδο-Μαγνητικές περιοχές

Για πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, χρειάζεται ανάλυση σε μικροσκοπικό επίπεδο. Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, αν δεν εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, υπάρχουν πολλές μικρές περιοχές που είναι μαγνητισμένες σε διάφορες διευθύνσεις, ώστε σε μεγάλη κλίμακα, η μέση μαγνήτιση του υλικού είναι μηδενική. Οι περιοχές αυτές ορίζονται ως μαγνητικές περιοχές (magnetic domains) και προκύπτουν από την ανάγκη του υλικού για ελαχιστοποίηση της μαγνητοστατικής του ενέργειας [7].



Σχήμα 2.2 Μικροσκοπική δομή μη μαγνητισμένου σιδηρομαγνητικού υλικού [7]

Οι μαγνητικές περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους από μαγνητικά τοιχώματα (domain walls) που είναι λεπτά στρώματα μορίων των οποίων τα μοριακά δίπολα σταδιακά περιστρέφονται ώστε να είναι ευθυγραμμισμένα με τις προσκείμενες μαγνητικές περιοχές [6]. Δύο ιδιαίτερα σημαντικοί μηχανισμοί των μαγνητικών περιοχών είναι η διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων (Domain wall Dynamics) και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών (Domain Rotation Dynamics). Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο μηχανισμός της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών, τον οποίο εκμεταλλεύεται η τεχνική του MDL, και θα αναλυθεί στην συνέχεια.



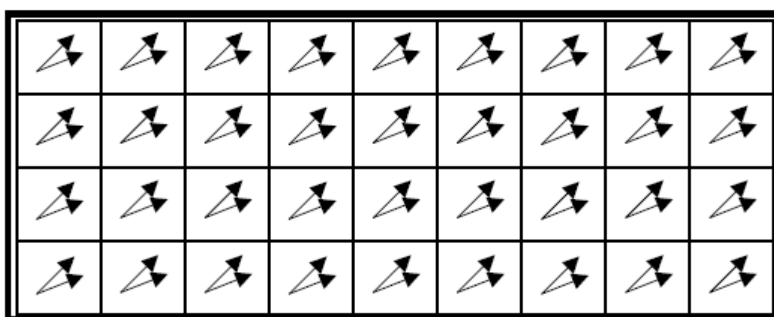
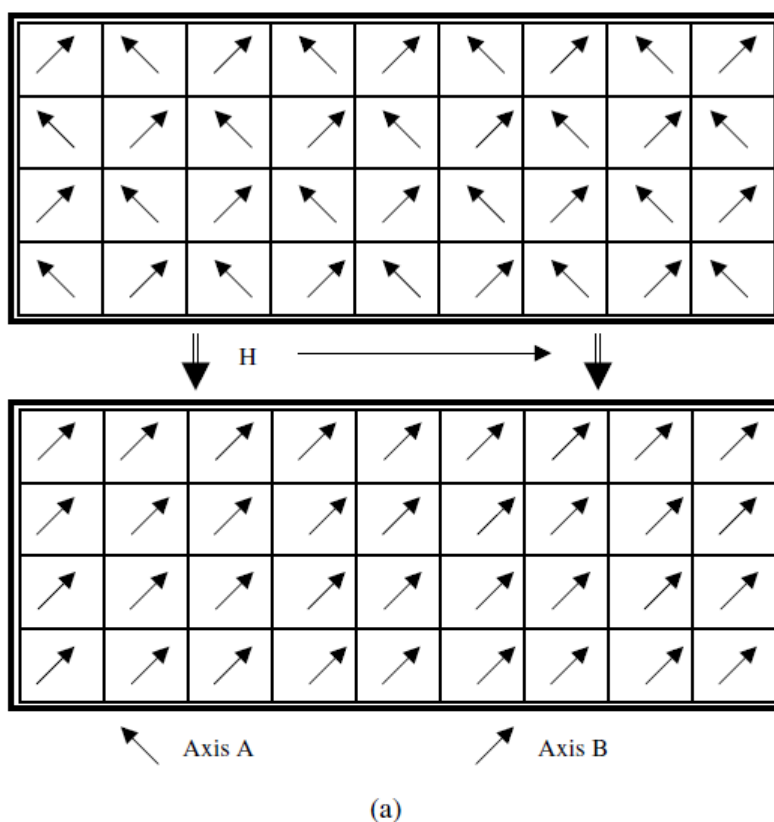
Σχήμα 2.3 Σταδιακή περιστροφή των μοριακών δίπολων του μαγνητικού τοιχώματος (B) προς εναρμόνιση με τις προσκείμενες μαγνητικές περιοχές (A) και (C) [6]

2.3 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών

Τα μαγνητικά υλικά αντιδρούν διαφορετικά σε ένα μαγνητικό πεδίο, ανάλογα με την διεύθυνση του. Το χαρακτηριστικό αυτό λέγεται μαγνητική ανισοτροπία και εξαρτάται από την δομή και το σχήμα των κρυστάλλων του υλικού, καθώς και από την ύπαρξη εσωτερικών μηχανικών τάσεων [9]. Προκύπτουν έτσι ευνοϊκότεροι άξονες ως προς την μαγνήτιση του υλικού που ορίζονται ως εύκολοι άξονες (easy axis), στην διεύθυνση των οποίων η μαγνήτιση του υλικού είναι ευκολότερη. Από την ύπαρξη των εύκολων αξόνων προκύπτουν δύο πεδία λειτουργίας του μηχανισμού της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών, της μη αναστρέψιμης περιστροφής και της αναστρέψιμης.

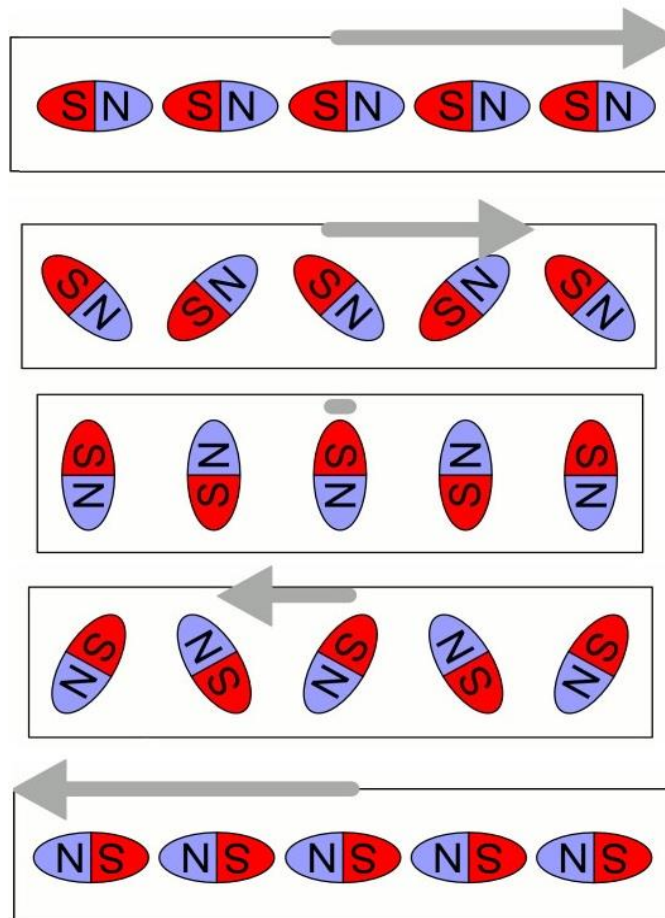
Η μη αναστρέψιμη περιστροφή προκύπτει όταν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H στο υλικό, και οι μαγνητικές περιοχές που είναι ευθυγραμμισμένες με έναν εύκολο άξονα A αναπροσανατολίζονται σε έναν άλλον, εύκολο άξονα B , ο οποίος προσεγγίζει περισσότερο ως προς την διεύθυνση, το μαγνητικού πεδίο H .

Αφού γίνει μη αναστρέψιμη περιστροφή των περιοχών, ακολουθεί η αναστρέψιμη περιστροφή όπου τα μαγνητικά δίπολα των περιοχών αναπροσανατολίζονται από την διεύθυνση του άξονα B, στην διεύθυνση της μαγνήτισης H, και διατηρούν την νέα διεύθυνση H μέχρι να μηδενιστεί το μαγνητικό πεδίο. Με τον μηδενισμό του μαγνητικού πεδίου, τα δίπολα επανέρχονται κατά κανόνα στην διεύθυνση του εύκολου άξονα B και όχι στην αρχική διεύθυνση του εύκολου άξονα A [8]. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται πιο ξεκάθαρα στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών με εύκολους άξονες A και B και διεύθυνση πεδίου H, (a) μη αντιστρέψιμη περιστροφή, (b) αντιστρέψιμη περιστροφή [8]

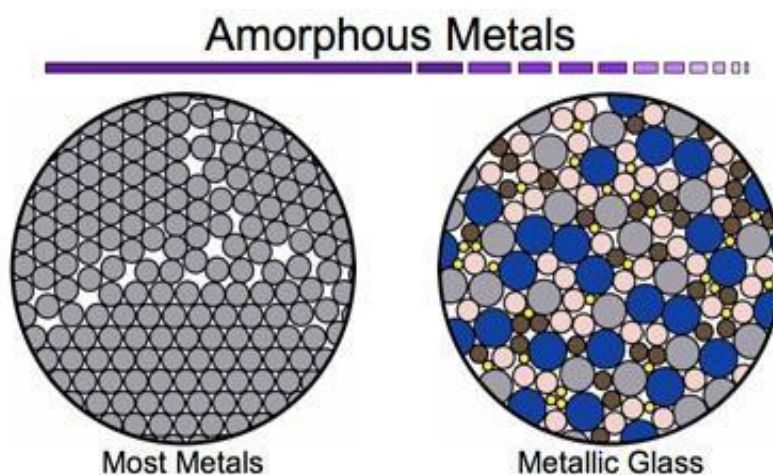
Αποτέλεσμα των δύο ειδών περιστροφής που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι η συστολή ή η διαστολή του υλικού, καθώς τα μαγνητικά δίπολα των περιοχών έχουν ελλειψοειδές σχήμα, και ο αναπροσανατολισμός τους ως προς την διεύθυνση της μαγνήτισης οδηγεί σε αλλαγή της γεωμετρίας του συνολικού υλικού. Αν και η μαγνητοσυστολή που προκύπτει είναι μικροσκοπικής κλίμακας, μπορεί να προκαλέσει την διάδοση ελαστικών κυμάτων στο υλικό, γεγονός που εκμεταλλεύεται η τεχνική MDL.



Σχήμα 2.5 Απλοϊκή απεικόνιση της περιστροφής δίπολων υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου (γκρι βέλος), συστολής και διαστολής λόγω του ελλειψοειδούς σχήματος των διπόλων

2.4 Μαγνητοσυστολικά υλικά - Άμορφα υλικά

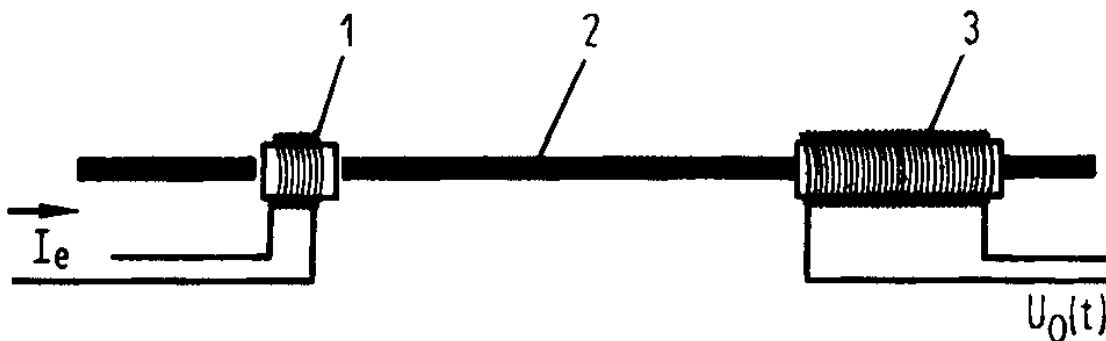
Όπως διαπιστώθηκε από τον ορισμό της μαγνητοσυστολής που δόθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, τα μαγνητοσυστολικά υλικά είναι υλικά στα οποία προκαλείται συστολή ή διαστολή των διαστάσεων τους υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Όλα τα μαγνητικά υλικά είναι στην πράξη μαγνητοσυστολικά και κατηγοριοποιούνται είτε ανάλογα με την σταθερά μαγνητοσυστολής λ_s είτε ανάλογα του μηχανισμού παραμόρφωσης του υλικού. Τα κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά έχουν τιμές λ που κυμαίνονται από μερικά ppb (parts per billion) ως μερικές δεκάδες ppm (parts per million) και περιλαμβάνουν κράματα πλούσια σε Fe-Co-Ni (σίδηρο, κοβάλτιο, νικέλιο) και χαρακτηρίζονται από υστερητική ή μη υστερητική απόκριση της συνάρτησης $\lambda(H)$, ανάλογα με την κατεργασία του υλικού κατά την παρασκευή του. Για αισθητήρες στηριζόμενους στο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο απαιτείται μη υστερητική συμπεριφορά της συνάρτησης $\lambda(H)$ και προτιμούνται άμορφα μαγνητοσυστολικά υλικά που πέρα από Fe-Co-Ni περιλαμβάνουν και άλλα μεταλλοειδή όπως Si (Πυρίτιο), B (Βόριο) ή P (Φώσφορο) [4]. Τα υλικά αυτά έχουν σχεδόν ιστροπική και ομογενή δομή και οι μαγνητικές τους ιδιότητες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε μηχανικές τάσεις [15]. Η παρασκευή τους πραγματοποιείται με την μέθοδο ταχείας ψύξης και είναι εμπορικά γνωστά με το όνομα Metglas (metallic glass) [16].



Σχήμα 2.6 Κρυσταλλική δομή συμβατικού μετάλλου (αριστερά) και άμορφου μαγνητοσυστολικού υλικού (δεξιά), όπου φαίνεται η ομογένεια της δομής του άμορφου υλικού σε σύγκριση με ένα απλό μέταλλο [17]

2.5 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης MDL - Τυπική διάταξη

Έχοντας αναλύσει τα χαρακτηριστικά του φαινομένου της μαγνητοσυστολής που αφορούν την τεχνική MDL, είναι πλέον δυνατή η περιγραφή της τεχνικής μέσω μιας τυπικής διάταξης. Η διάταξη αυτή όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7 αποτελείται από το μέσο διέγερσης, το μέσο λήψης και την μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης [11]. Το μέσο της διέγερσης και λήψης είναι ένα σωληνοειδές πηνίο, ενώ η γραμμή καθυστέρησης αποτελείται από ένα μαγνητοσυστολικό υλικό. Η λειτουργία της διάταξης χωρίζεται σε τρία διαδοχικά γεγονότα: στην δημιουργία ελαστικού παλμού, στην διάδοση του παλμού κατά μήκος της γραμμής καθυστέρησης και στην λήψη του παλμού.

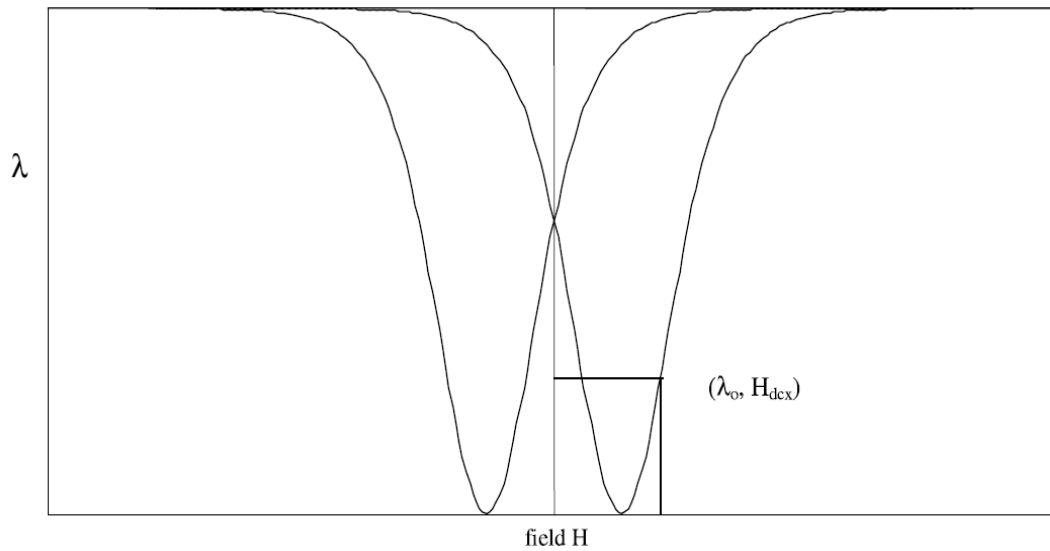


Σχήμα 2.7 Βασική διάταξη MDL: 1 Πηνίο διέγερσης, 2 Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης, 3 Πηνίο λήψης [11]

2.5.1 Δημιουργία ελαστικού Παλμού

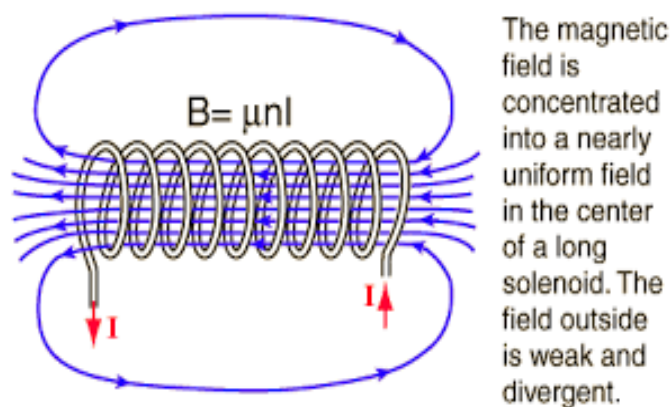
Όπως αναλύθηκε κατά την εξέταση του φαινομένου της μαγνητοσυστολής προηγουμένως, με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου, τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών του μαγνητοσυστολικού υλικού αναπροσανατολίζονται προς την κατεύθυνση του πεδίου. Επομένως με την τροφοδότηση του πηνίου διέγερσης με σταθερό ρεύμα, δημιουργείται σταθερό πεδίο πόλωσης H_{dcx} κατά μήκος του άξονα της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης και δημιουργία τοπικής μικροπαραμόρφωσης του MDL $\delta\lambda_0$, όπως φαίνεται στο σημείο $(\delta\lambda_0, H_{dcx})$ του σχήματος 2.8, καθώς περιστρέφονται τα δίπολα των τοπικών μαγνητικών περιοχών (μαγνητοσυστολικό φαινόμενο). Αντίστοιχα, μικροπαραμόρφωση του MDL $\delta\lambda(t)$ προκαλείται και με διέγερση του πηνίου με παλμικό ρεύμα, όπου δημιουργείται

παλμική μαγνητική ροή $He(t)$ παρόμοιας κυματομορφής με του ρεύματος, η οποία προστίθεται σε οποιαδήποτε προϋπάρχουσα μαγνητική ροή στο MDL. Σε αντίθεση όμως με την σταθερή πόλωση, μία μικροπαραμόρφωση οφειλόμενη σε παλμικό πεδίο προκαλεί την δημιουργία ελαστικού κύματος που διαδίδεται και στις δυο αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος του MDL [11].



Σχήμα 2.8 Καμπύλη $\lambda(H)$ -Εξάρτηση μικροπαραμορφώσεων από το μαγνητικό πεδίο [8]

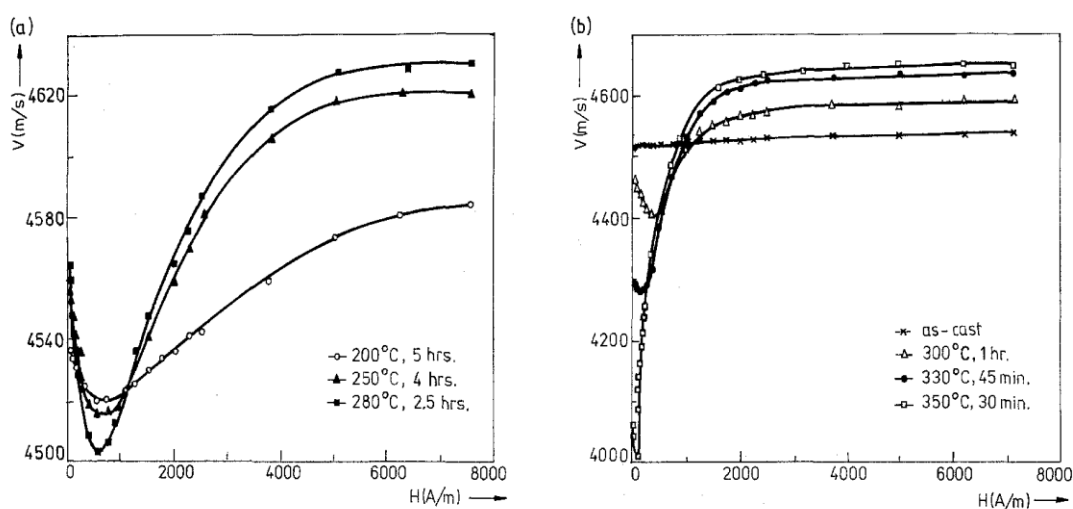
Και στις δύο περιπτώσεις διέγερσης, η περιστροφή των περιοχών, και η επακόλουθη τοπική μικροπαραμόρφωση του υλικού συμβαίνει στην τομή της γραμμής MDL, με τον πυρήνα του πηνίου, όπου είναι συγκεντρωμένη η μαγνητική ροή του πηνίου.



Σχήμα 2.9 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου [12]

2.5.2 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 [11]. 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) [8].

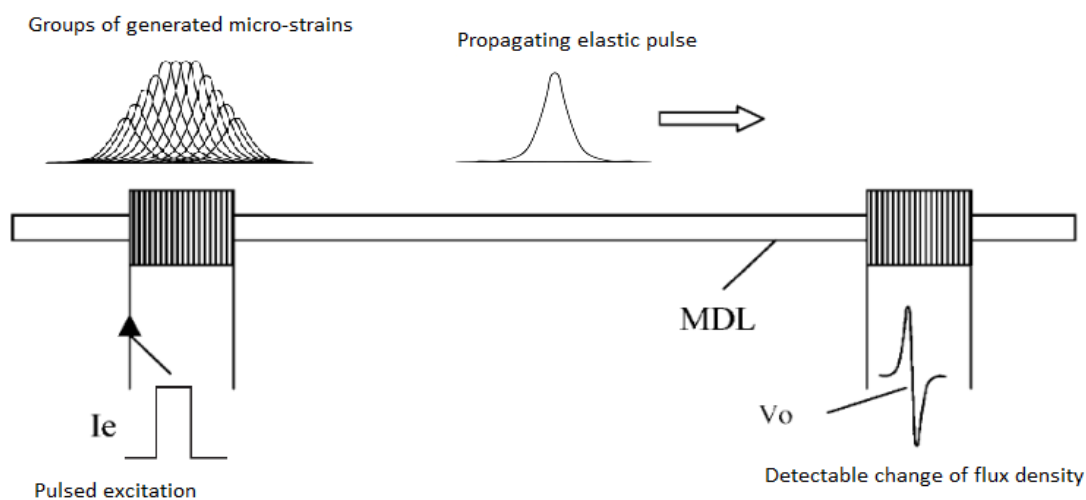


Σχήμα 2.10 Σχέση μαγνητικού πεδίου πόλωσης με διαμήκη ταχύτητα διάδοσης σε γραμμή από άμορφο σύρμα $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας [26].

2.5.3 Λήψη παλμού

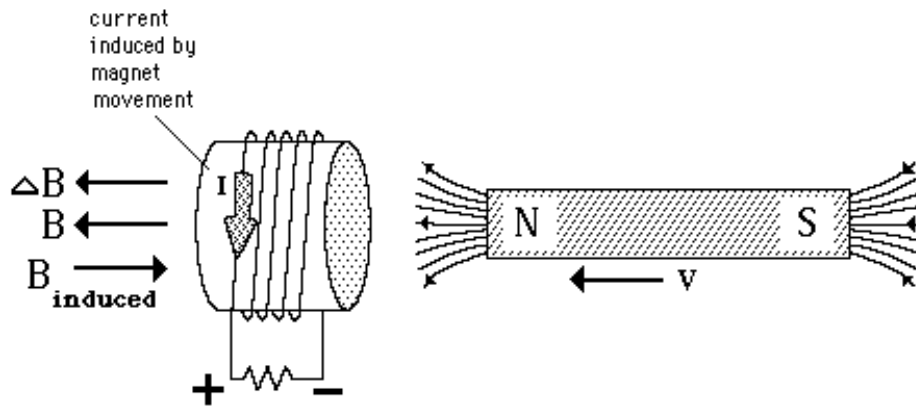
Καθώς διαδίδεται ο ελαστικό παλμός κατά μήκος του άξονα του MDL, αλλάζει την διεύθυνση μαγνήτισης των τοπικών μαγνητικών δίπολων, με προϋπόθεση το MDL να είναι τοπικά μαγνητικά πολωμένο. Στην περίπτωση που το MDL αποτελείται από άμορφο πυρήνα, η επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης επαρκεί για την μαγνητική πόλωση που απαιτείται

οπότε δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί επιπρόσθετο μαγνητικό πεδίο. Η συνολική μακροσκοπική μεταβολή της μαγνητικής ροής στον άξονα του MDL οφείλεται στο στατιστικό άθροισμα των απειροελάχιστων αναπροσανατολισμών των μαγνητικών δίπολων στην πορεία του διαδιδόμενου ελαστικού κύματος. Το φαινόμενο αυτό είναι στην πράξη το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο, και καθώς ο ελαστικός παλμός περνάει από την περιοχή του πηνίου λήψης, η μεταβολή στην μαγνητική ροή που προκαλείται ανιχνεύεται από το πηνίο ως παλμική τάση στα άκρα του, ανάλογη της πρώτης παραγώγου της μαγνητικής ροής [8].



Σχήμα 2.11 Απεικόνιση των τριών διαδοχικών γεγονότων της τεχνικής MDL στην τυπική διάταξη [14]

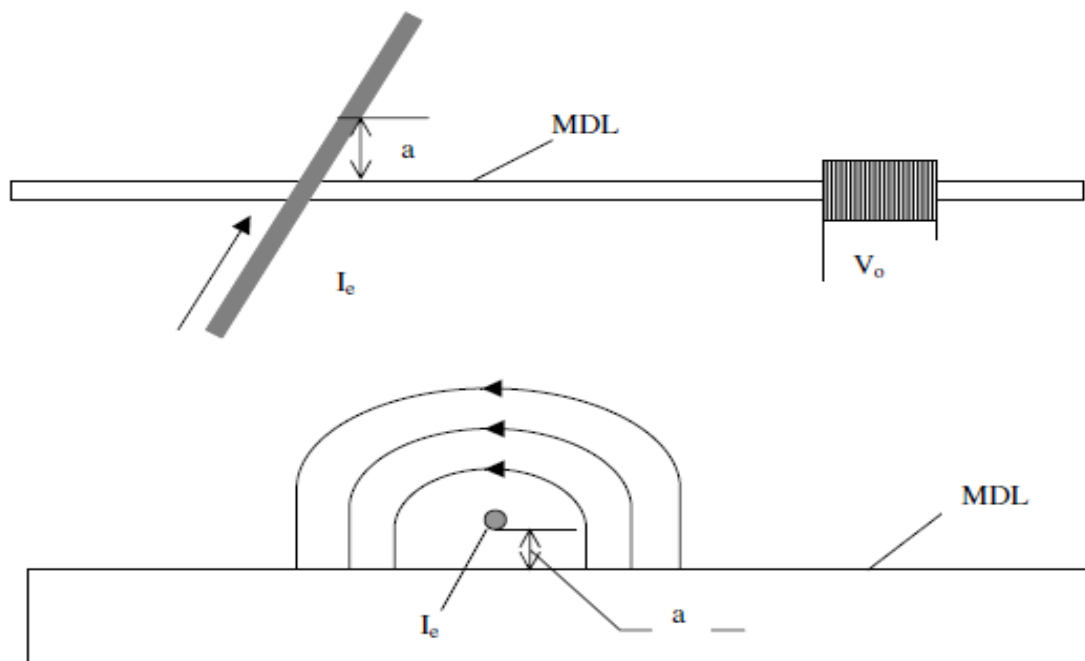
Η εμφάνιση της τάσης στα άκρα του πηνίου, λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής από το κινούμενο ελαστικό κύμα οφείλεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και αναπαρίσταται στο σχήμα 2.12 όπου το κινούμενο κύμα και η μεταβολή στην μαγνητική ροή που προκαλεί προσομοιώνεται από έναν μαγνήτη για λόγους απλότητας.



Σχήμα 2.12 Φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στο οποίο στηρίζεται το πηνίο λήψης για ανίχνευση του ελαστικού παλμού [13]

2.6 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 2.13 Η τυπική διάταξη με διέγερση από έναν αγωγό κάθετο στον άξονα του MDL [8]

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:

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

οπού 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 $Gr(x, t)$:

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

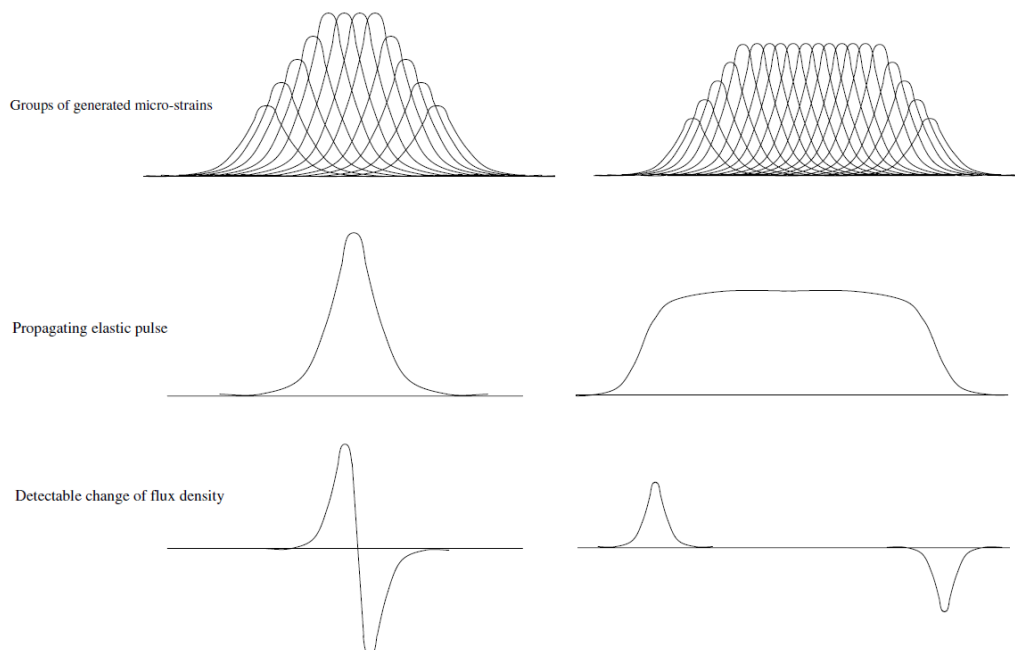
όπου v η διαμήκης ακουστική ταχύτητα του MDL. Με σταθερό ρεύμα οι μικροτάσεις αθροίζονται σε σύνολο τάσεων $Gs(x, t)$:

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

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 2.14.



Σχήμα 2.14 Δημιουργία, διάδοση και ανίχνευση μικροπαραμορφώσεων με σύντομο παλμό διέγερσης στα αριστερά, και μεγαλύτερης διάρκειας στα δεξιά [8]

2.7 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 [8]:

2.7.1 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.

2.7.2 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.

2.7.3 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.

2.7.4 Υστέρηση

Υστέρηση (Hysteresis) ενός MDL είναι ένα υψηλά μη γραμμικό φαινόμενο και ορίζεται ως η διαφορά της συνάρτησης της τάσης εξόδου $V_o(I_e)$ 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.

2.7.5 Ανάλυση

Ανάλυση (resolution) ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων διέγερσης του MDL ώστε να δημιουργηθούν δύο ξεχωριστοί ελαστικοί παλμοί οι οποίοι θα διαχωρίζονται και ως προς την ανίχνευση τους. Η ανάλυση ενός MDL μπορεί να βελτιωθεί σε άμορφα σύρματα κατάλληλη κατεργασία όπως με μαγνητική ανόπτηση.

2.7.6 Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας

Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας (Pulse width or frequency response) ορίζεται ως η εξάρτηση της παλμικής τάσης εξόδου στο εύρος ζώνης της παλμικής διέγερσης. Με χρήση κατάλληλων τεχνικών ανόπτησης η απόκριση συχνότητας μπορεί να αυξηθεί μέχρι και τα 10 MHz.

2.7.7 Ανακλάσεις

Καθώς ο ελαστικός παλμός φτάνει στο άκρο του κυματοδηγού, ανακλάται προς την αντίθετη κατεύθυνση και συνεχίζει να διασχίζει το μέσο διάδοσης. Η ανάκλαση (reflection) αυτή του παλμού μπορεί να μειώσει την ευαισθησία και την ανάλυση του MDL. Επομένως είναι απαραίτητη η εξάλειψη των ανακλάσεων κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο τερματισμό της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθώς και ορθό σχεδιασμό της γεωμετρίας της διάταξης.

Στο κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας θα διεξαχθούν διάφορα πειράματα και μετρήσεις πάνω στην κατασκευασμένη διάταξη με σκοπό να μελετηθούν οι παραπάνω ιδιότητες και στην πράξη. Επίσης από τα εξαγόμενα αποτελέσματα των μετρήσεων θα αναδειχθούν τα χαρακτηριστικά του MDL που μπορούν να αξιοποιηθούν από έναν αισθητήρα θέσης καθώς και αυτά που προκαλούν δυσκολίες και πώς μπορούν να ξεπεραστούν.

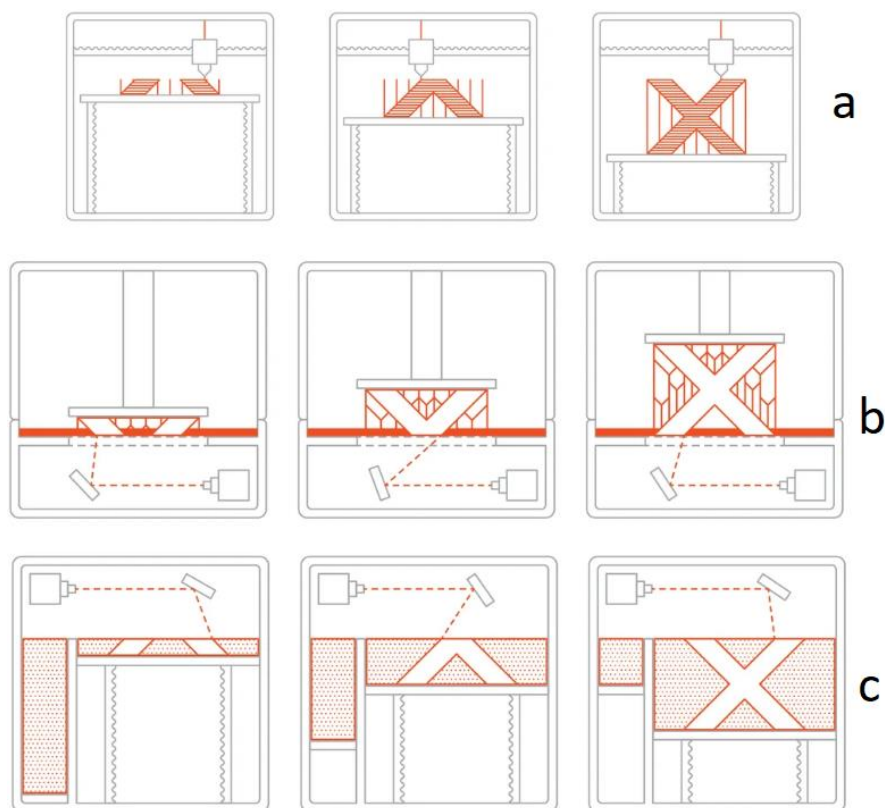
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - 3D PRINTING ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά σε μερικές τεχνολογίες 3d printing με επικέντρωση στους εκτυπωτές παραγωγής τηγμένου νήματος, όπου θα αναλυθεί η αρχή λειτουργίας τους καθώς και τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά την παρασκευαστική διαδικασία μέσω της τεχνολογίας αυτής, και πώς μπορεί να εφαρμοστεί ένας αισθητήρας θέσης MDL για την επίλυση τους.

3.1 Τεχνολογίες 3d Printing και αρχές λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή της εργασίας, η τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing) είναι μία διαδικασία προσθετικής παρασκευής ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες 3d printing με τις πιο γνωστές να είναι οι εκτυπωτές στερεολιθογραφίας (stereolithography-SLA), επιλεκτικής σύντηξης με laser (selective laser sintering-SLS) και εκτυπωτές παραγωγής τηγμένου νήματος (Fused filament fabrication-FFF). Οι διαφορετικές τεχνολογίες 3d printing διαφέρουν κυρίως στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η προσθετική διαδικασία καθώς και στην πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν για την παρασκευή του τελικού αντικειμένου. Για παράδειγμα, η τεχνολογία SLA χρησιμοποιεί ανακλαστικούς καθρέφτες για να στοχεύσει μία υπεριώδη ακτίνα λέιζερ η οποία στερεοποιεί την επιφάνεια υγρού ρητίνης, η τεχνολογία SLS χρησιμοποιεί επίσης την κατεύθυνση ακτίνας λέιζερ, αλλά διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), προκειμένου να συντήξει σωματίδια θερμοπλαστικής σκόνης νάυλον μεταξύ τους, ενώ η τεχνολογία FFF χρησιμοποιεί νήμα συνήθως θερμοπλαστικού υλικού το οποίο το τήκει και το εναποθέτει σε μία επίπεδη πλάκα όπου στερεοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου.



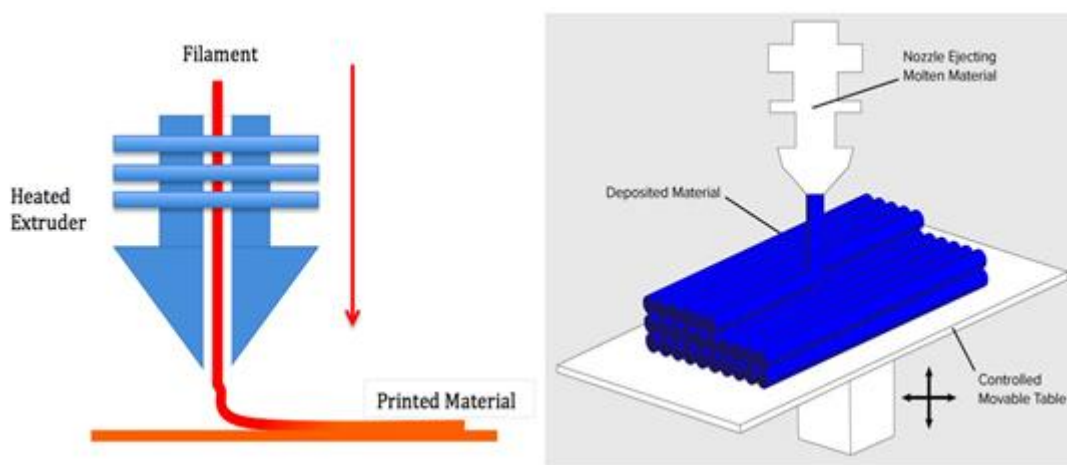
Σχήμα 3.1 Τρεις τεχνολογίες 3d Printing: a) FFF, b) SLA, c) SLS [18]

Οι τεχνολογίες 3d printing διαφέρουν μεταξύ τους και ως προς τις ικανότητες στην ανάλυση της εκτύπωσης αλλά και ως προς το κόστος. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θα αναλυθεί περαιτέρω η τεχνολογία εκτυπωτών παραγωγής τηγμένου νήματος (FFF) καθώς λόγω του χαμηλού τους κόστος και της απλότητας στην κατασκευή και λειτουργία τους, είναι οι πιο διαδεδομένοι στο εμπόριο.

3.2 Αρχή λειτουργίας εκτυπωτών παραγωγής τηγμένου νήματος (FFF)

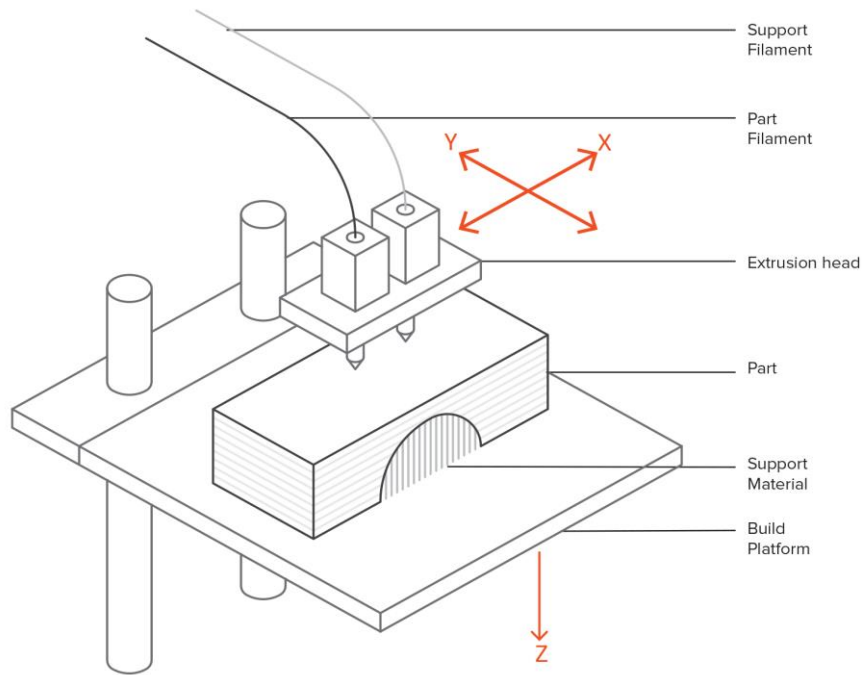
Ένας εκτυπωτής FFF αποτελείται από μία θερμαινόμενη κεφαλή, μία επίπεδη πλάκα εκτύπωσης η οποία μπορεί και αυτή να είναι θερμαινόμενη, και τρεις άξονες γραμμικής κίνησης, έναν για κάθε άξονα που ορίζεται από ένα τρισδιάστατο πεδίο (X-Y-Z). Η κεφαλή είναι προσκολλημένη σε ένα τρισδιάστατο σύστημα κίνησης που επιτρέπει, την σχετική ως προς το εκτύπωμα, κίνηση της στους άξονες X, Y και Z, και καθώς κινείται, η πρώτη ύλη τροφοδοτείται στην θερμαινόμενη κεφαλή όπου τήκεται και εναποτίθενται σε λεπτά νήματα σε προκαθορισμένα σημεία σε επίπεδη πλάκα, όπου ψύχεται και στερεοποιείται. Η

παρασκευή του συνολικού εκτυπώματος γίνεται στρωματικά (layer-by-layer), δηλαδή η κεφαλή θα μετακινηθεί στον άξονα Z μόνο αφού έχει ολοκληρώσει όλες τις απαραίτητες κινήσεις και εναποθέσει υλικό στο επίπεδο X-Y του στρώματος που βρίσκεται η εκτύπωση την δεδομένη στιγμή. Έχοντας λοιπόν ολοκληρώσει την εκτύπωση ενός στρώματος, η κεφαλή κινείται την προκαθορισμένη απόσταση στον άξονα Z και εκκινεί την εκτύπωση του επόμενου στρώματος, πάνω από το προηγούμενο. Καθώς κάθε στρώμα εναποτίθεται τηγμένο πάνω από το προηγούμενο που έχει σταθεροποιηθεί, συντήκονται μεταξύ τους και δημιουργούν ενιαίο υλικό. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέχρι να εναποτεθούν διαδοχικά όλα τα στρώματα του αντικειμένου προς εκτύπωση.



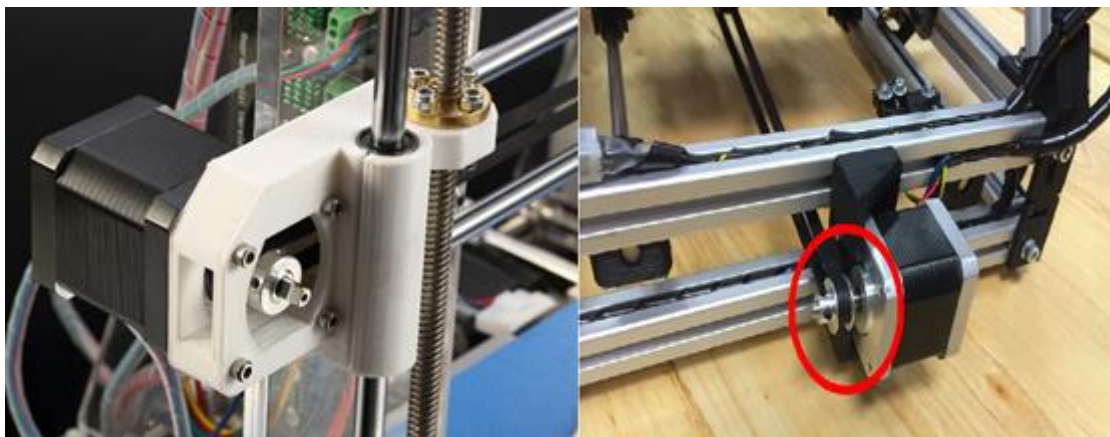
Σχήμα 3.2 Τήξη και εναπόθεση υλικού από την θερμαινόμενη κεφαλή (αριστερά) [19], απεικόνιση στρωματικής εκτύπωσης (δεξιά) [20]

Αναφορικά με το τρισδιάστατο σύστημα κίνησης της κεφαλής, το σύστημα αυτό μπορεί να έχει ποικίλες μορφές ανάλογα με την διάταξη του εκτυπωτή. Πρέπει να τονιστεί βέβαια ότι δεν είναι απαραίτητο να κινείται η κεφαλή και στους τρεις άξονες αρκεί όμως η σχετική κίνηση της κεφαλής σε σχέση με το εκτυπωμένο κομμάτι να είναι τρισδιάστατη. Για παράδειγμα, στο σχήμα 3.3 φαίνεται μία διάταξη στην οποία επιτυγχάνεται τρισδιάστατη εκτύπωση με κίνηση της κεφαλής στους άξονες X-Y και της επίπεδης πλάκας εκτύπωσης στον άξονα Z. Από την οπτική όμως του εκτυπωμένου κομματιού η κεφαλή κινείται και στους τρεις άξονες X-Y-Z.

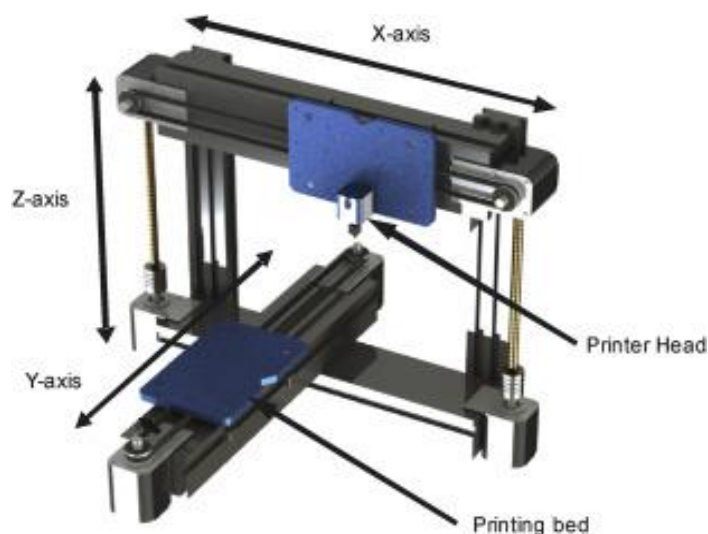


Σχήμα 3.3 Απεικόνιση τρισδιάστατης κίνησης κεφαλής σε 3d Printer [21]

Ανεξάρτητα της διάταξης της κίνησης στους τρεις άξονες, η μηχανολογική κατασκευή του συστήματος κίνησης συνήθως αποτελείται από σπειρωτούς κοχλίες, οδοντωτούς μάντες και κυλινδρικές ράβδους, ενώ η κίνηση πραγματοποιείται με χρήση βηματικών μοτέρ (stepper motor) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.

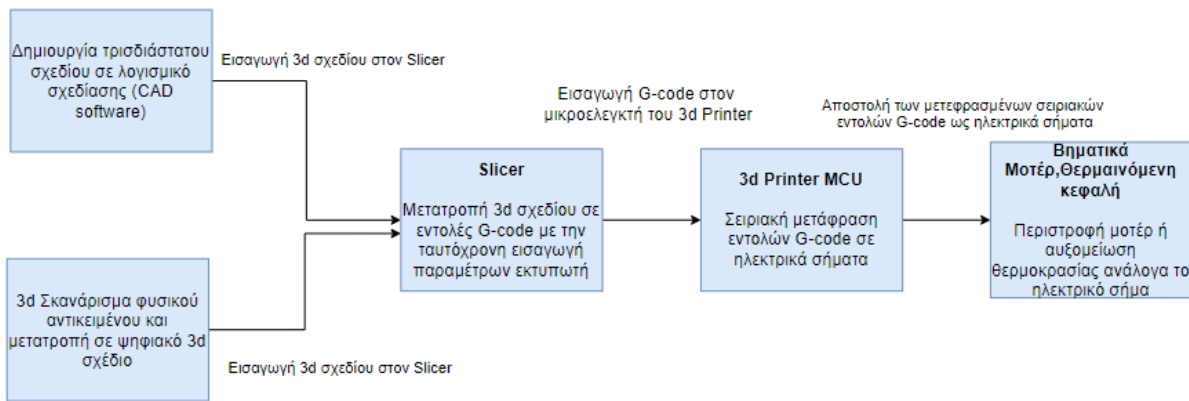


Σχήμα 3.4 Απεικόνιση μηχανικών μερών 3d printer



Σχήμα 3.5 3d Printer με κίνηση της κεφαλής στους άξονες X-Z και της επίπεδης πλάκας στον Y

Πέρα από τα μηχανολογικά εξαρτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ένας 3d printer αποτελείται και από ηλεκτρονικά μέρη. Το σημαντικότερο από αυτά είναι ένας μικροελεγκτής (microcontroller-MCU) ο οποίος δέχεται εντολές γλώσσας G-code από έναν υπολογιστή ή αποθηκευμένες σε μια κάρτα SD, και στηριζόμενος στο υλικολογισμικό του (firmware), μεταφράζει σειριακά τις εντολές αυτές σε ανάλογα ηλεκτρικά σήματα προκειμένου να ελέγξει την κίνηση των βηματικών μοτέρ καθώς και για να ελέγξει την θερμοκρασία της θερμαινόμενης κεφαλής ή πλάκας εκτύπωσης. Οι εντολές G-code παράγονται από ένα είδος λογισμικού που λέγεται slicer, το οποίο δέχεται τις παραμέτρους του εκτυπωτή και ένα τρισδιάστατο σχέδιο και δημιουργεί ένα αρχείο με όλες τις απαραίτητες εντολές G-code τις οποίες ο μικροελεγκτής χρειάζεται για την διαδικασία εκτύπωσης. Επομένως συνολικά η διαδικασία εκτύπωσης έχει τα εξής βήματα τα οποία φαίνονται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης

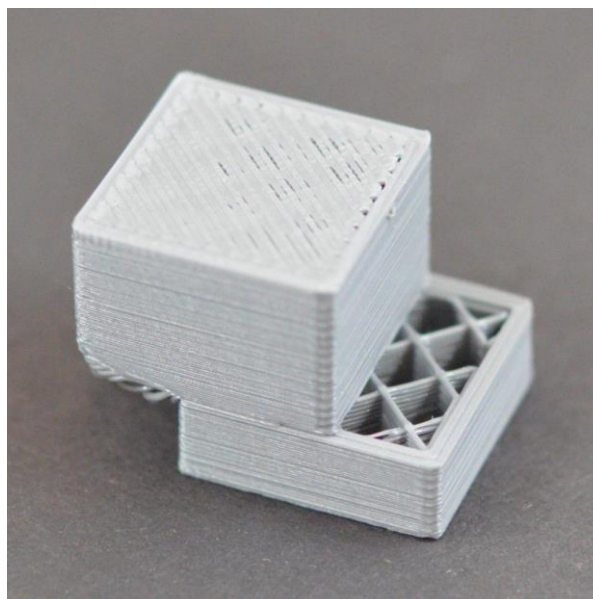
Σε έναν ορθά κατασκευασμένο και ρυθμισμένο εκτυπωτή FFF, η διαδικασία της εκτύπωσης δεν παρουσιάζει προβλήματα και είναι ομαλή. Οι εντολές G-code που παράγονται από τον slicer μεταφράζονται σειριακά σε σήματα ελέγχου από τον μικροελεγκτή που περιστρέφουν τα βηματικά μοτέρ και προκαλούν την γραμμική κίνηση των κινητών μερών του εκτυπωτή, καθώς τα μοτέρ είναι συζευγμένα με τους σπειρωτούς κοχλίες και οδοντωτούς ιμάντες της κατασκευής. Τα κινητά μέρη αυτά μπορεί να είναι η θερμαινόμενη κεφαλή, η επίπεδη πλάκα ή και ένας ολόκληρος άξονας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 ανάλογα την διάταξη κίνησης που έχει ο εκτυπωτής.

Επίσης στο υλικολογισμικό του εκτυπωτή είναι ορισμένες οι απαραίτητες παράμετροι που καθορίζουν κατά πόσο μετακινείται κάθε κινούμενο κομμάτι για κάθε περιστροφή των μοτέρ. Το σύστημα κίνησης υποθέτει ότι κάθε σειριακή εντολή πραγματοποιείται επιτυχώς, και ο μικροελεγκτής μετά από την αποστολή όλων των απαραίτητων σημάτων για την μετατόπιση ενός κινητού μέρους ανανεώνει την νέα θέση του ως το άθροισμα της προηγούμενης θέσης με τη μετατόπιση που πραγματοποιήθηκε.

3.3 Προβλήματα κατά την διαδικασία εκτύπωσης στην τεχνολογία FFF

Οι 3d Printers δεν διαθέτουν σύστημα ανάδρασης ώστε να επιβεβαιωθεί ότι ένα κινητό μέρος κινήθηκε πραγματικά στην θέση που πρέπει, επομένως σε περίπτωση που η κίνηση

είναι ανεπιτυχής, ο μικροελεγκτής θα ανανεώσει την νέα, αλλά μη συμβατή με την πραγματικότητα, θέση του κινητού μέρους, και θα συνεχίσει με την εκτέλεση των επόμενων διαδοχικών εντολών. Οι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν μία αστοχία στην κίνηση είναι αρκετοί όπως ανεπάρκεια στο ρεύμα τροφοδότησης των βηματικών μοτέρ, εσφαλμένες παράμετροι στο υλικολογισμικό του εκτυπωτή ή στο λογισμικό slicer, καθώς και ελαττωματική σύζευξη των μηχανικών μερών, όπως υπερβολική ή μη επαρκής σύσφιξη των οδοντωτών ιμάντων. Τα προβλήματα αυτά, πέρα από ανακρίβεια στην εκτύπωση μπορούν να προκαλέσουν και ολική καταστροφή του εκτυπώματος, καθώς ακόμα και στιγμιαία επίδραση ενός από των παραπάνω προβλημάτων, είναι αρκετό ώστε να ανανεωθεί, μετά από κίνηση, η θέση ενός κινητού μέρους με συντεταγμένες μη συμβατές με τις πραγματικές και να υπάρξει μετατόπιση όλων των επόμενων στρωμάτων (layer shift) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Από τα παραπάνω αναδεικνύεται η αναγκαιότητα ορθής ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας ενός 3d printer, καθώς και η ωφελιμότητα χρήσης συστήματος ανάδρασης σε έναν 3d printer.



Σχήμα 3.7 Layer shifting σε εκτύπωμα από 3d Printer [22]

3.4 Χρήση αισθητήρα θέσης σε σύστημα 3d Printer

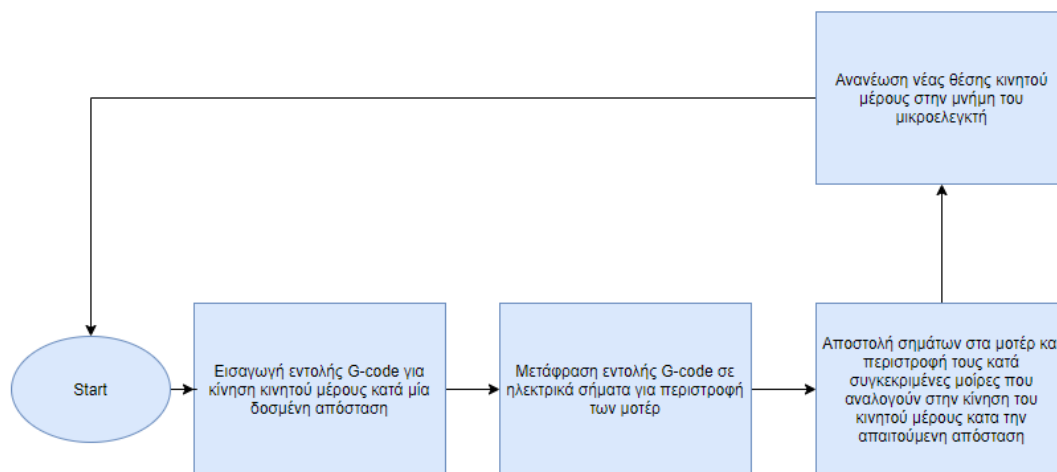
Στην προηγούμενη ενότητα διαπιστώθηκε η ανάγκη ζυγοστάθμισης των παραμέτρων λειτουργίας σε έναν 3d printer, καθώς και η ωφελιμότητα χρήσης συστήματος ανάδρασης στην κίνηση των κινητών μερών του εκτυπωτή στους άξονες του, πρακτικές που θα αναλυθούν στην συνέχεια.

3.4.1 Αισθητήρας θέσης στην διαδικασία ζυγοστάθμισης (calibration)

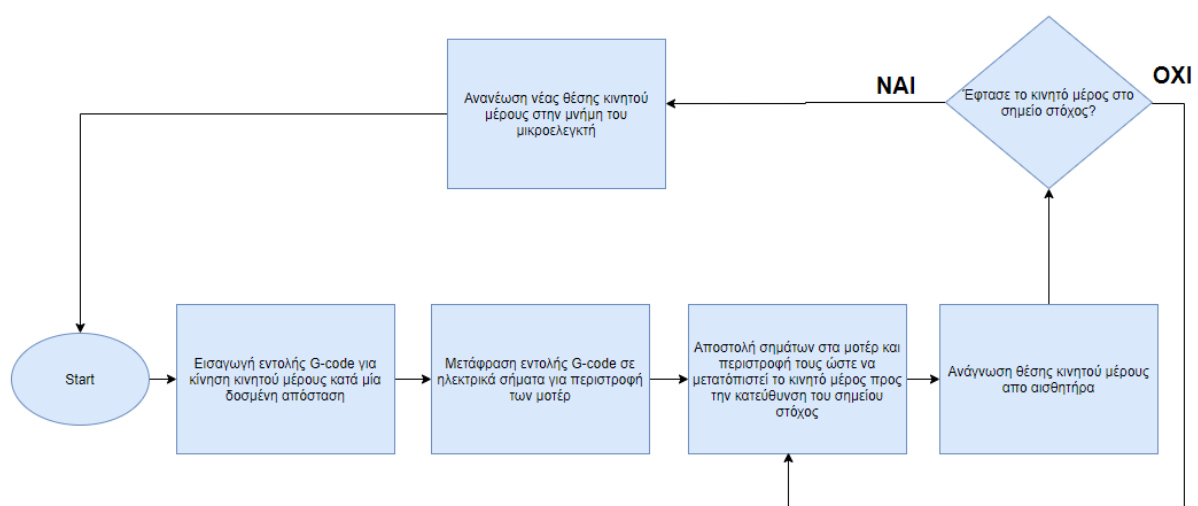
Στην πλειοψηφία των 3d printers του εμπορίου, πριν από την λειτουργία τους απαιτείται ο έλεγχος της ορθής κίνησης των αξόνων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται από τον χρήστη και δεν είναι αυτοματοποιημένη με αποτέλεσμα να υστερεί σε ακρίβεια και να είναι χρονοβόρα. Συνήθως πραγματοποιείται η εκτύπωση ενός δοκιμαστικού αντικειμένου γνωστής γεωμετρίας και διαστάσεων, όπως ένας κύβος, και συγκρίνονται οι διαστάσεις του τελικού αντικειμένου με αυτές του τρισδιάστατου σχεδίου του υπολογιστή. Σε περίπτωση απόκλισης της διάστασης σε κάποιον άξονα του αντικειμένου, ελέγχονται οι παράμετροι που αφορούν την γραμμική κίνηση του εκτυπωτή στον άξονα που υπάρχει απόκλιση και πραγματοποιείται για άλλη μια φορά η εκτύπωση του αντικειμένου με τις τροποποιημένες παραμέτρους. Η διαδικασία αυτή είναι αποτελεσματική αλλά αρκετά χρονοβόρα και στηρίζει την ακρίβεια της στο όργανο μέτρησης το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμαστικού εκτυπώματος. Η χρήση ενός αισθητήρα θέσης σε κάθε άξονα κίνησης του εκτυπωτή θα μπορούσε να αυτοματοποιήσει την διαδικασία ζυγοστάθμισης και να βελτιώσει την ακρίβεια της. Πριν από κάθε εκτύπωση, ο μικροελεγκτής του εκτυπωτή θα μπορούσε να εκτελέσει κινήσεις των κινητών μερών του και να συγκρίνει τις θέσεις στόχους με αυτές που μετρούν οι αισθητήρες θέσης. Σε περίπτωση ασυμφωνίας των στοχευμένων θέσεων με αυτές που επιστρέφουν οι αισθητήρες, ο μικροελεγκτής θα μπορούσε να ενημερώσει τον χρήστη για την απόκλιση καθενός άξονα κίνησης και να τον κατευθύνει στις απαραίτητες ενέργειες. Το όφελος της χρήσης αισθητήρα θέσης για την ζυγοστάθμιση των αξόνων έγκειται τόσο στην ταχύτητα εύρεσης της πιθανής απόκλισης στην κίνηση τους, καθώς οι μετρήσεις λαμβάνονται σχεδόν στιγμιαία από την ολοκλήρωση των δοκιμαστικών κινήσεων, αλλά και στην βελτίωση της ακρίβειας, αφού αναλαμβάνει ο αισθητήρας την μέτρηση του αποτελέσματος της κίνησης και αφαιρείται ο ανθρώπινος παράγοντας.

3.4.2 Αισθητήρας θέσης σε σύστημα ανάδρασης

Μια πιο κομψή χρήση ενός αισθητήρα θέσης σε 3d printer αποτελεί η ενσωμάτωσή του σε σύστημα ανάδρασης που θα ελέγχει την κίνηση των αξόνων. Η εντολή κίνησης πλέον δεν θα μεταφράζεται σε συγκεκριμένων μοιρών περιστροφή των μοτέρ, αλλά θα ενεργοποιεί την περιστροφή των μοτέρ μέχρι ο αισθητήρας να δώσει ένδειξη πραγματικής θέσης του κινητού μέρους ίδια με την θέση που όρισε η εντολή. Έτσι μπορεί να λειτουργήσει και ένα μη ζυγοσταθμισμένο σύστημα 3d printer καθώς ο έλεγχος της κίνησης πραγματοποιείται συνεχόμενα και όχι μόνο πριν από την εκτύπωση.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ροής λειτουργίας 3d Printer χωρίς ανάδραση



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα ροής λειτουργίας 3d Printer με ανάδραση

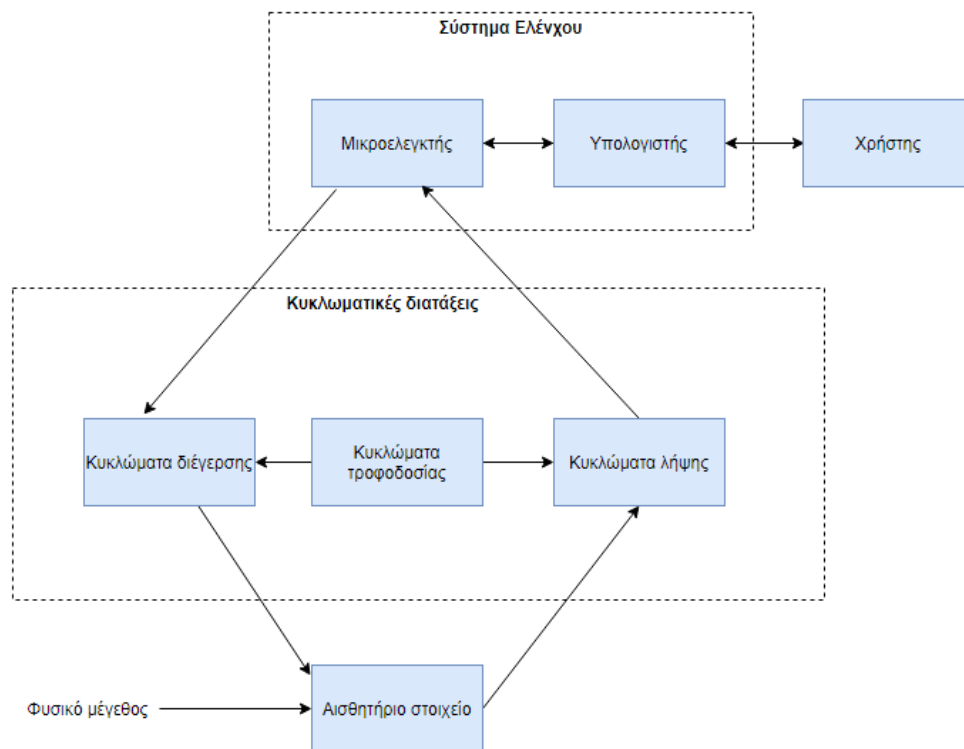
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Ένας 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 0.1 Διαγραμματική απεικόνιση ενός αισθητήρα

3.5 Διάταξη αισθητήριου στοιχείου MDL

Το αισθητήριο στοιχείο είναι ταυτόσημο με την τυπική διάταξη MDL, όπως έχει οριστεί στην υποενότητα 2.5, 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 0.1 mm, ενώ η διάμετρος των περιελίξεων είναι 1.55 mm. Η αυτεπαγωγή L του πηνίου υπολογίστηκε σε 68.7 nH από τον τύπο:

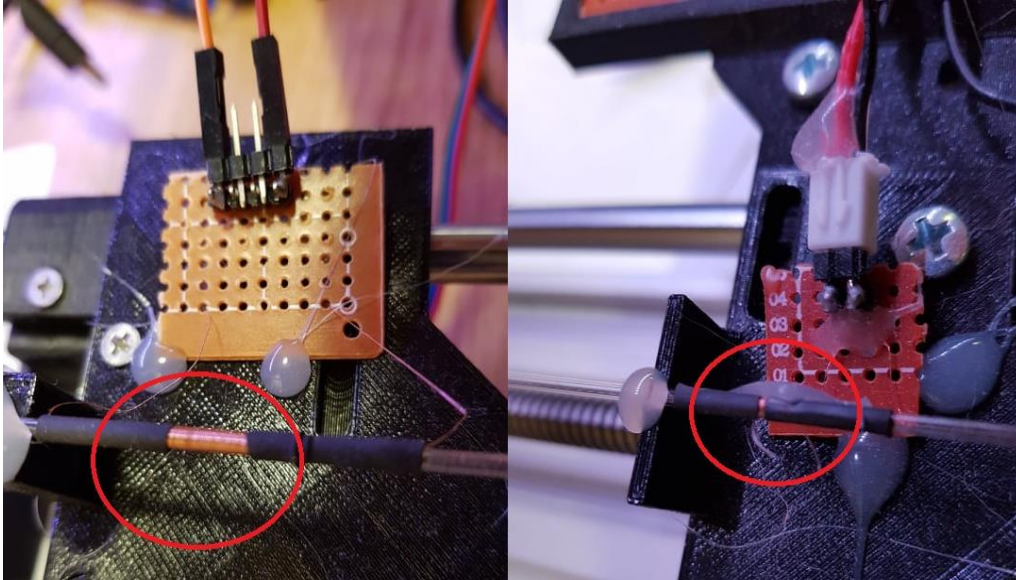
$$L = N^2 \mu_0 \mu_r \left(\frac{D}{2} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot D}{d} \right) - 2 \right] \quad (4.1)$$

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.

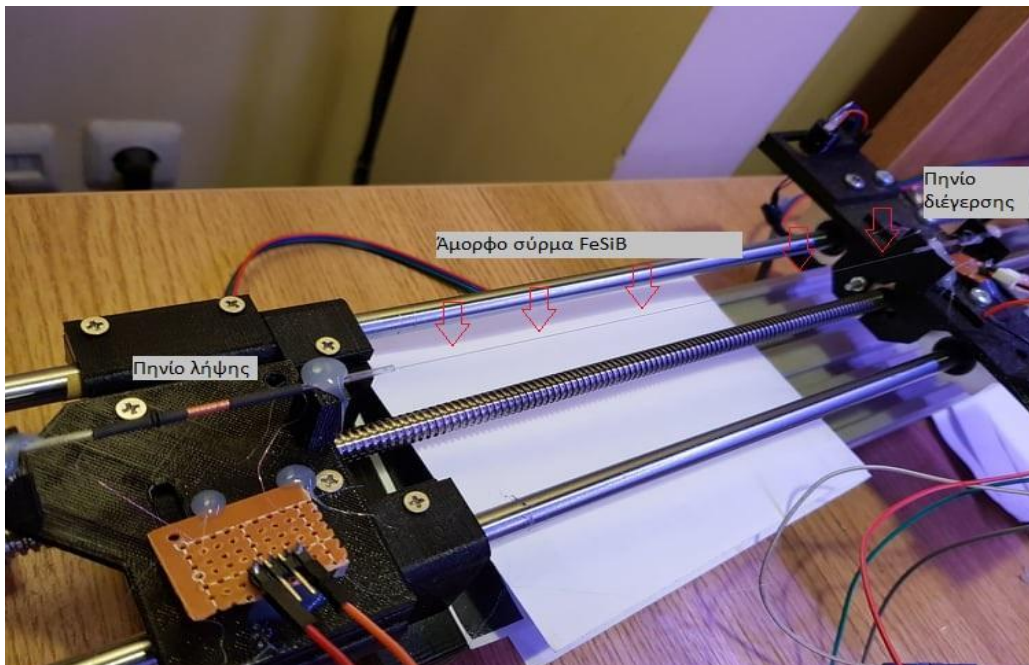
Το πηνίο λήψης, το οποίο θα έχει σταθερή θέση, αποτελείται από 100 περιελίξεις χάλκινου σύρματος, με ίδια διάμετρο σύρματος και περιελίξεων με το πηνίο διέγερσης, και η επαγωγή του υπολογίστηκε με τον τύπο 4.1 στα 2.75 mH. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν αρκετά περισσότερες περιελίξεις προκειμένου 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:

$$V_L = N \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.2)$$

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.



Σχήμα 0.2 Τα κατασκευασμένο ακίνητο πηνίο λήψης (αριστερά) και κινούμενο πηνίο διέγερσης (δεξιά)



Σχήμα 0.3 Η συνολική διάταξη MDL με το άμορφο σύρμα να διαπερνά το εσωτερικό των πηνίων

Το άμορφο σύρμα είναι αγκιστρωμένο στα δύο άκρα του με χρήση θερμόκολλας για την αποφυγή της κάμψης του, ενώ για λόγους ευκολίας στην κατασκευή, και τα δύο πηνία είναι τυλιγμένα γύρω από γυάλινα σωληνάκια.

3.6 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.

3.6.1 Προδιαγραφές κυκλώματος διέγερσης

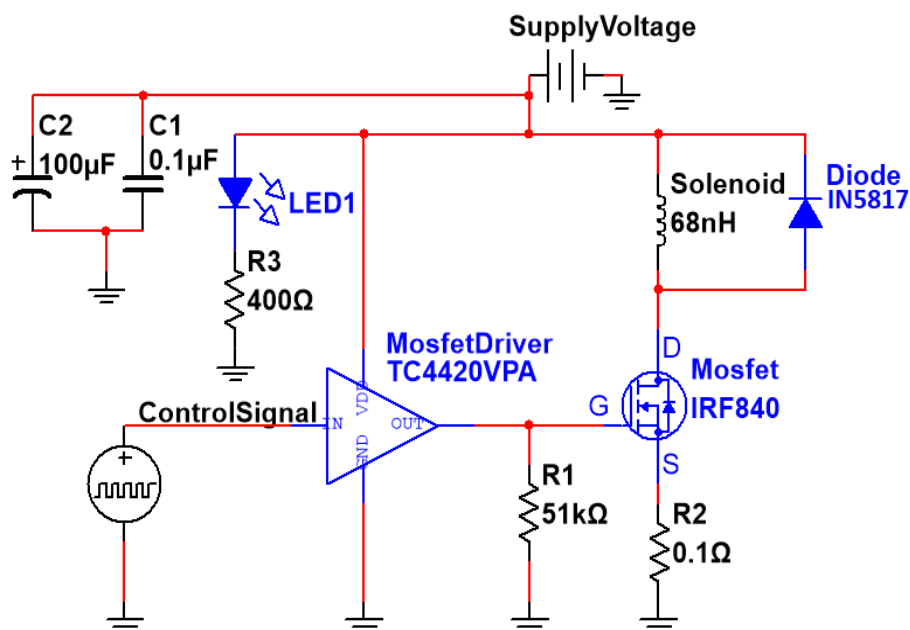
Από την ανάλυση της τεχνικής MDL στο κεφάλαιο 2, προκύπτουν δεδομένες παράμετροι της διέγερσης, αλλά και παράμετροι οι οποίες για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας της διέγερσης είναι αναγκαίο να καθοριστούν πειραματικά. Οι δεδομένες παράμετροι είναι : (1) Εύρος παλμού διέγερσης της τάξης μερικών microseconds (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 μς 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.

3.6.2 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης

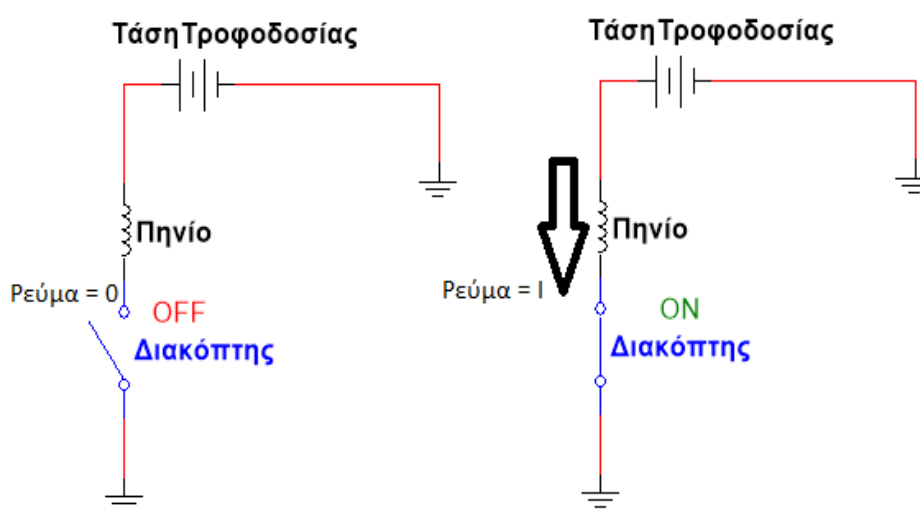
Το κύκλωμα διέγερσης είναι στην ουσία ένα απλό διακοπτικό κύκλωμα, και αποτελείται από 3 αντιστάσεις (R1,R2,R3), 2 πυκνωτές (C1,C2), ένα n-channel mosfet (IRF840) σε λειτουργία διακόπτη, ένα ολοκληρωμένο mosfet driver (TC4420), μία δίοδο Schottky (IN5817), ένα led και το σωληνοειδές (solenoid) πηνίο διέγερσης. Υπάρχει ακροδέκτης για την εισαγωγή εξωτερικού παλμικού σήματος για τον έλεγχο της διέγερσης, καθώς και ακροδέκτης για την τροφοδότηση του συνολικού κυκλώματος.



Σχήμα 0.4 Κυκλωματικό διάγραμμα κυκλώματος ενίσχυσης

3.6.2.1 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.



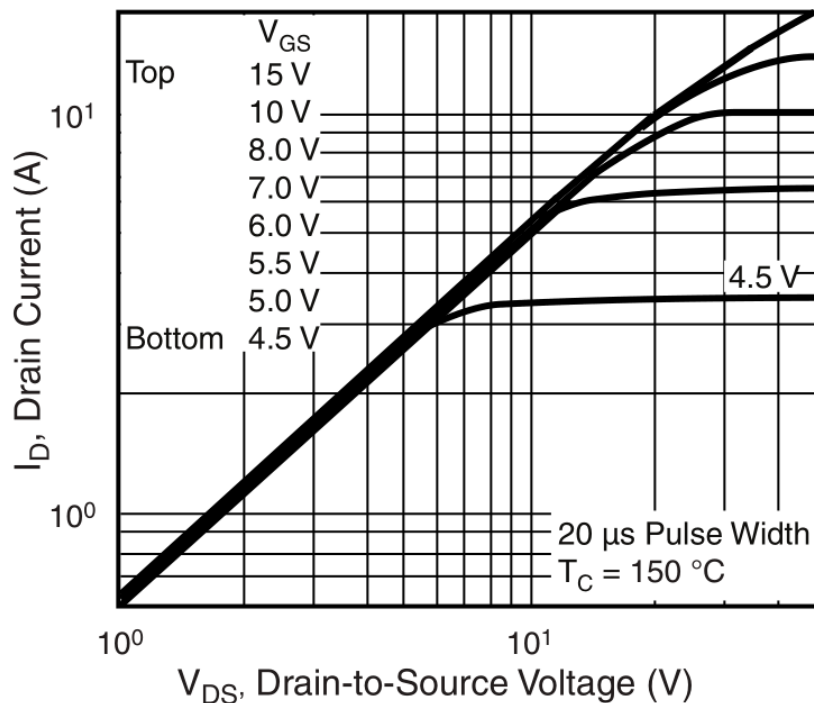
Σχήμα 0.5 Διακοπτική σύνδεση πηνίου με την γη για διέγερση του πηνίου με παλμικό ρεύμα

3.6.2.2 Ανάλυση λειτουργίας Mosfet και Mosfet driver

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.

Ο ρόλος του mosfet driver είναι να ενισχύσει το σήμα ελέγχου (control signal) σε επίπεδα τάσης και ρεύματος ώστε να ελεγχθεί η πύλη του mosfet αποτελεσματικά. 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 4.6 από το datasheet για το IRF840.



Σχήμα 0.6 Εξάρτηση ρεύματος υποδοχής mosfet από τάση V_{GS} και V_{DS}

Το ολοκληρωμένο TC4420 mosfet driver που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα διέγερσης της εργασίας έχει εύρος τάσης τροφοδοσίας από 4.5V έως τα 18V, και είναι ικανό να ενισχύσει το σήμα ελέγχου σε επίπεδο τάσης $V_{DD} - 0.025V$, όπου V_{DD} η τάση τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου, και σε ρεύμα κορυφής 6 A όπως προκύπτει από το datasheet. Από το ίδιο datasheet προκύπτει επίσης και ο γρήγορος χρόνος rise time και fall time στα 25 ns, ενώ από το datasheet του IRF840 mosfet προκύπτουν χρόνοι 23 ns και 25 ns για το mosfet αντίστοιχα. Επομένως τα στοιχεία αυτά πληρούν τις προδιαγραφές για χρόνους rise/fall της τάξης ns,

καθώς και για υψηλό ρεύμα στο πηνίο, όπως προκύπτει από το σχήμα όπου φαίνεται η τιμή του ισοδύναμου ρεύματος υποδοχής του mosfet.

3.6.2.3 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 διάδος αντί συμβατικής, διότι απαιτείται όσο το δυνατόν χαμηλότερη τάση αγωγής, για γρήγορη αντίδραση στη ανάστροφη πόλωση που προκαλείται από το επαγωγικό φορτίο.

3.6.2.4 Λειτουργία διόδου Led.

Το led στο κύκλωμα προσφέρει φωτεινή ένδειξη ύπαρξης τροφοδοσίας στο κύκλωμα.

3.6.2.5 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

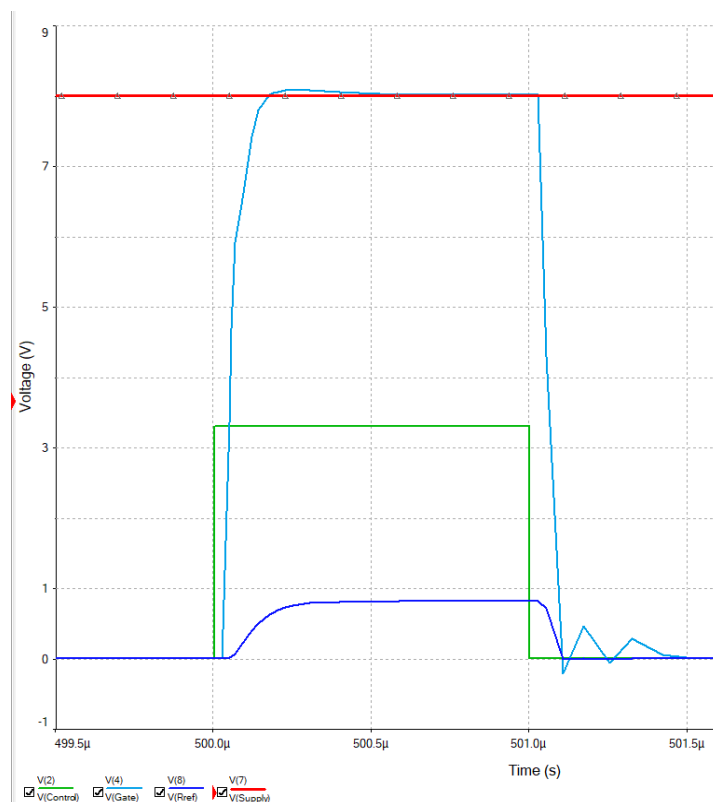
δεν είναι πλέον συνδεδεμένη με την γη απευθείας, αλλά λόγω της μικρής τιμής της αντίστασης η επίδραση αυτή είναι ελάχιστη.

3.6.2.6 Λειτουργία πυκνωτών.

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

3.6.3 Προσομοίωση κυκλώματος διέγερσης

Πραγματοποιήθηκε transient analysis του κυκλώματος στο λογισμικό SPICE NI Multisim 14.0, όπου με τάση τροφοδοσίας 8V, σήμα ελέγχου τετραγωνικό παλμό με θετικό πλάτος 3.3 V εμφανίστηκε παρόμοια παλμική τάση 0.816 V στην αντίσταση μέτρησης ρεύματος του πηνίου R2. Δεδομένου ότι $I_{coil} = I_{R2} = V_{R2}/R2$ και $R2 = 0.1 \Omega$, το ρεύμα του πηνίου κατά την αγωγή του mosfet υπολογίζεται στα 8.16 A.

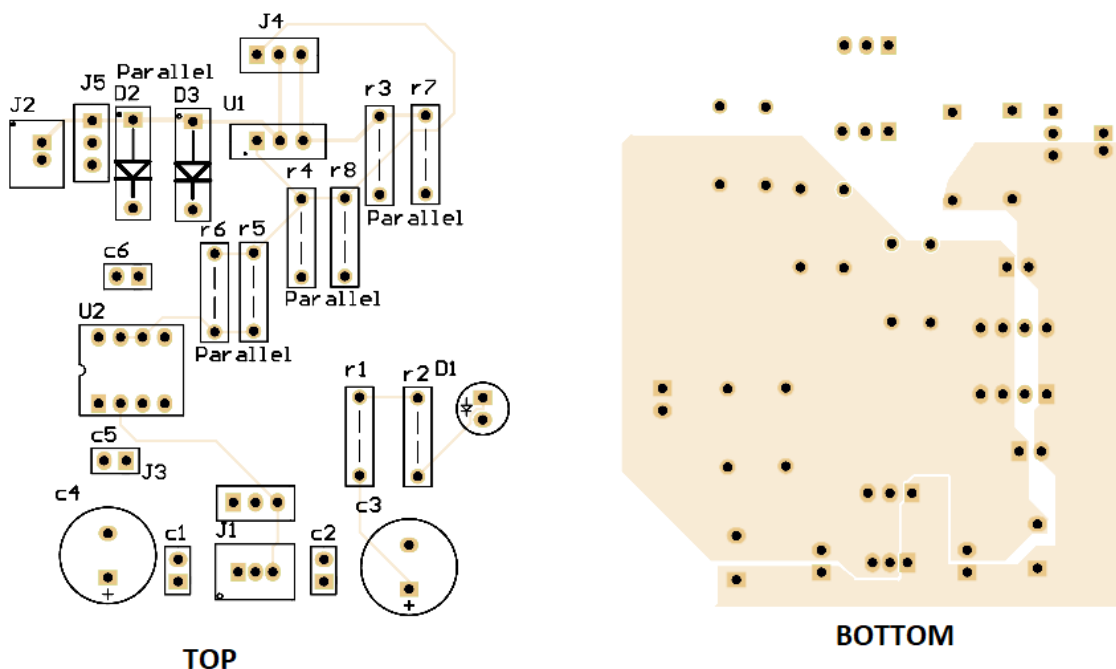


Σχήμα 0.7 Κυματομορφές του κυκλώματος διέγερσης όπως προέκυψαν από την προσομοίωση, τάση πύλης mosfet (κυανό χρώμα), σήμα ελέγχου (πράσινο), τάση στα άκρα της R2 (μπλε) και τάση τροφοδοσίας (κόκκινο)

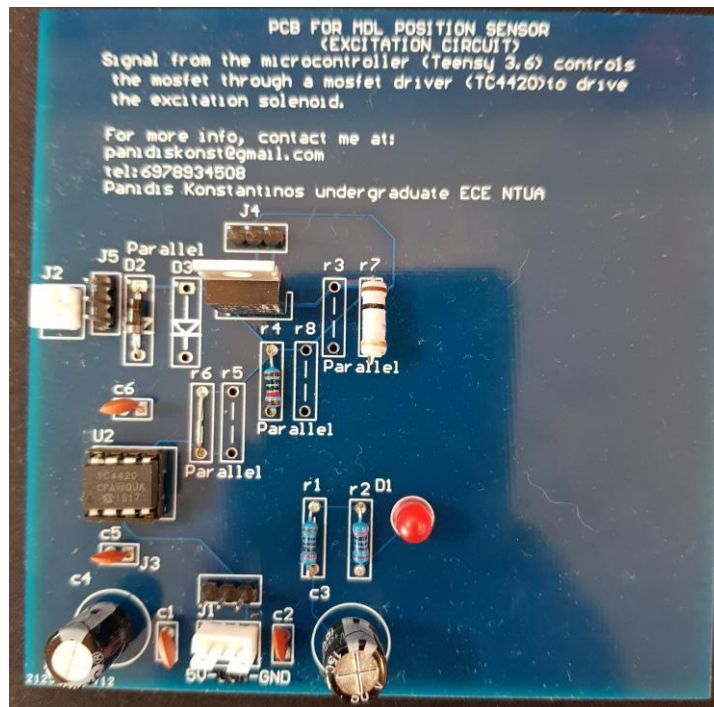
Στο παραπάνω γράφημα (σχήμα 4.7) που εξήχθη από το λογισμικό φαίνονται οι κυματομορφές του σήματος ελέγχου, της τάσης πύλης στο mosfet που προέκυψε από την ενίσχυση του σήματος ελέγχου από το mosfet driver, η τάση στα άκρα της R2 καθώς και η τάσης τροφοδοσίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ενισχυμένο σήμα ελέγχου εσφαλμένα ξεπερνά σε τιμή την τάση τροφοδοσίας κάτι που πιθανώς οφείλεται σε λανθασμένες παραμέτρους στο μοντέλο προσομοίωσης του mosfet driver. Πέρα από την παρατυπία αυτή, η προσομοίωση προσφέρει μία καλή εκτίμηση των πραγματικών κυματομορφών που θα εξεταστούν πειραματικά στην συνέχεια.

3.6.4 Κατασκευή και απόκριση κυκλώματος διέγερσης.

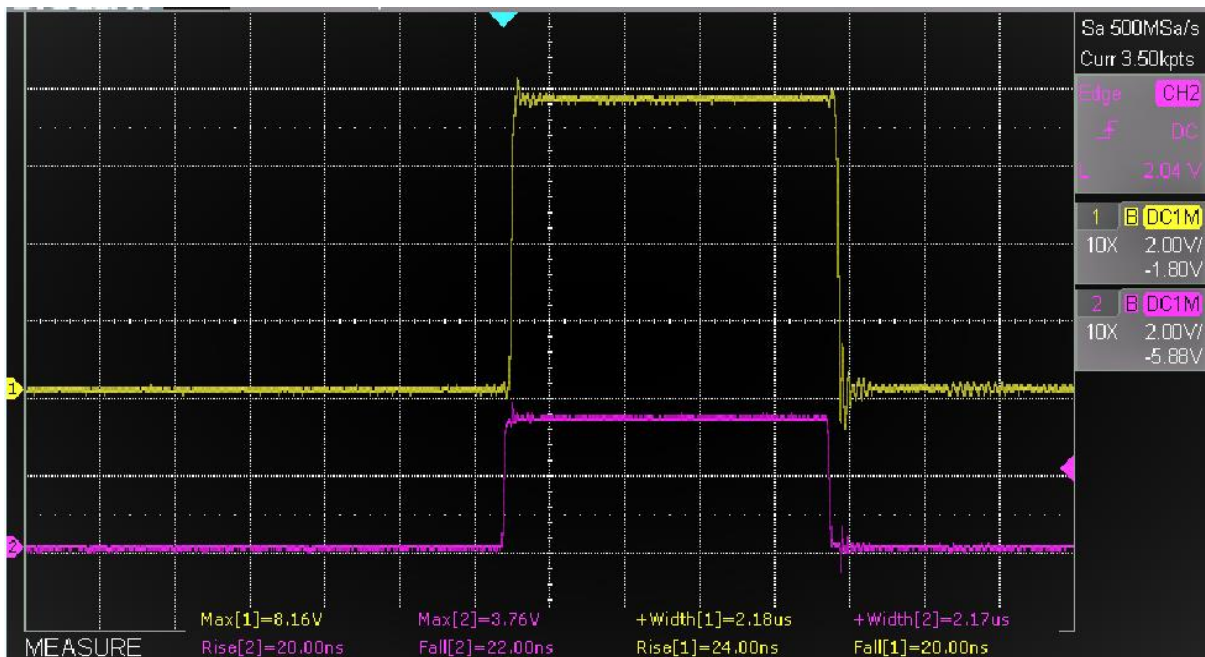
Αρχικά το κύκλωμα διέγερσης κατασκευάστηκε σε πλακέτα δοκιμών (breadboard) ώστε να εξακριβωθεί η ορθή λειτουργία του και στον πραγματικό κόσμο. Ύστερα ακολούθησε ο σχεδιασμός της τυπωμένης πλακέτας (Printed Circuit Board-PCB) στο λογισμικό Altium Designer. Η κατασκευή της τελικής πλακέτας πραγματοποιήθηκε από επαγγελματική υπηρεσία κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων του εξωτερικού.



Σχήμα 0.8 Κάτοψη και άνοψη του σχεδίου PCB του κυκλώματος διέγερσης



Σχήμα 0.9 Η τελική πλακέτα ύστερα από την συγκόλληση των στοιχείων

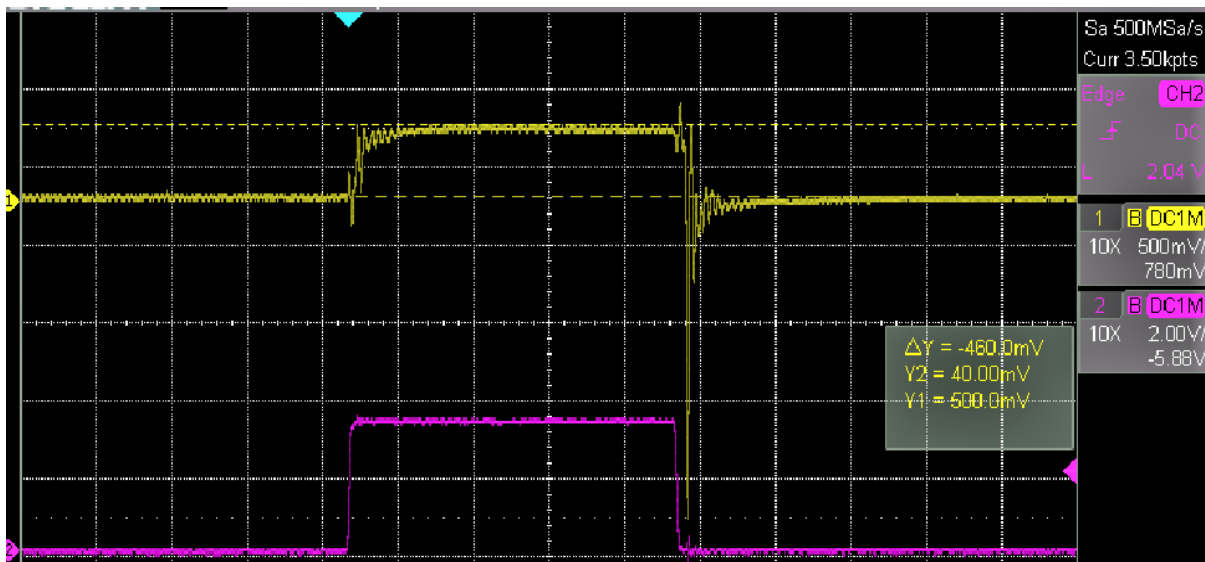


Σχήμα 0.10 Απεικόνιση Σήμα ελέγχου (μωβ) και σήμα εξόδου του mosfet driver (κίτρινο)

Στο σχήμα 4.10 απεικονίζεται στον παλμογράφο το σήμα ελέγχου που εισέρχεται στο κύκλωμα διέγερσης (μωβ) καθώς και το σήμα εξόδου του mosfet driver (κίτρινο). Όπως και στην ανάλυση του κυκλώματος στην προηγούμενη ενότητα, με τάση τροφοδοσίας τα 8V, ο

παλμός ελέγχου ανυψώνεται από τα 3.3 V στα 8.16 V για την καλύτερη οδήγηση του mosfet που ελέγχει το πηνίο. Στο σχήμα παρατηρούνται επίσης και οι γρήγοροι χρόνοι rise/fall του παλμού μετά την ανύψωση τάσης του, που είναι σχεδόν ταυτόσημοι του παλμού ελέγχου και είναι της τάξης των ns.

Αναφορικά στο παλμικό ρεύμα που διέρχεται από το πηνίο, η τάση στα άκρα της αντίστασης μεταξύ πηγής του mosfet και γης είχε τιμή 600 mV. Δεδομένου ότι η τιμή της αντίστασης είναι 0.1 Ω, το πλάτος του παλμικού ρεύματος που διέρχεται από το πηνίο διέγερσης θα είναι 6 A. Οι κορυφές αρνητικού δυναμικού λόγω του επαγωγικού φορτίου μειώθηκαν σημαντικά λόγω της διόδου Schottky αλλά δεν εξαλείφθηκαν πλήρως (σχήμα 4.11).



Σχήμα 0.11 Απεικόνιση σήματος ελέγχου (μωβ) και τάσης στα άκρα της αντίστασης μεταξύ πηγής mosfet και γης

3.7 Κυκλωματική διάταξη 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.

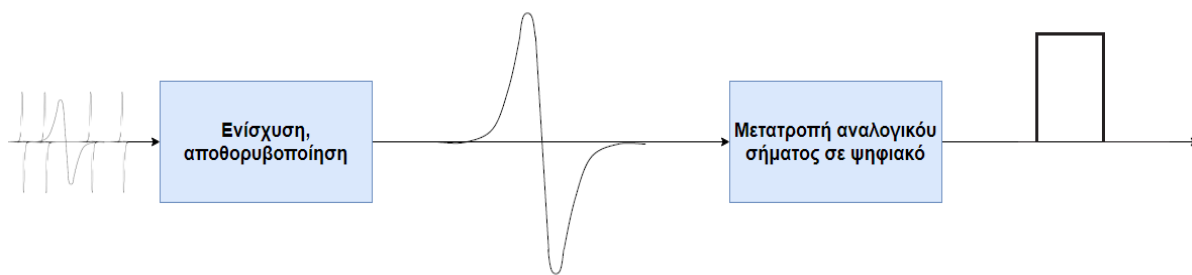
3.7.1 Προδιαγραφές Κυκλώματος λήψης

Οι προδιαγραφές του κυκλώματος λήψης προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά του σήματος που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου, καθώς και την μορφή στην οποία πρέπει να διαμορφωθεί ώστε ένας μικροελεγκτής να μπορεί να το επεξεργαστεί.

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.

Αναφορικά με την τελική μορφή του σήματος εισόδου μετά την διαμόρφωση του, δεδομένου ότι θα τροφοδοτηθεί σε είσοδο μικροελεγκτή για την περαιτέρω επεξεργασία, είναι αναγκαίο να έχει μορφή ψηφιακού παλμού με επίπεδο τάσης στα όρια ανοχής του μικροελεγκτή. Όπως θα αναφερθεί και αργότερα ο μικροελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί στον αισθητήρα της εργασίας δέχεται ψηφιακά σήματα των 3.3V και επομένως το διαμορφωμένο σήμα δεν πρέπει να ξεπερνάει την τάση αυτή κατά πολύ.

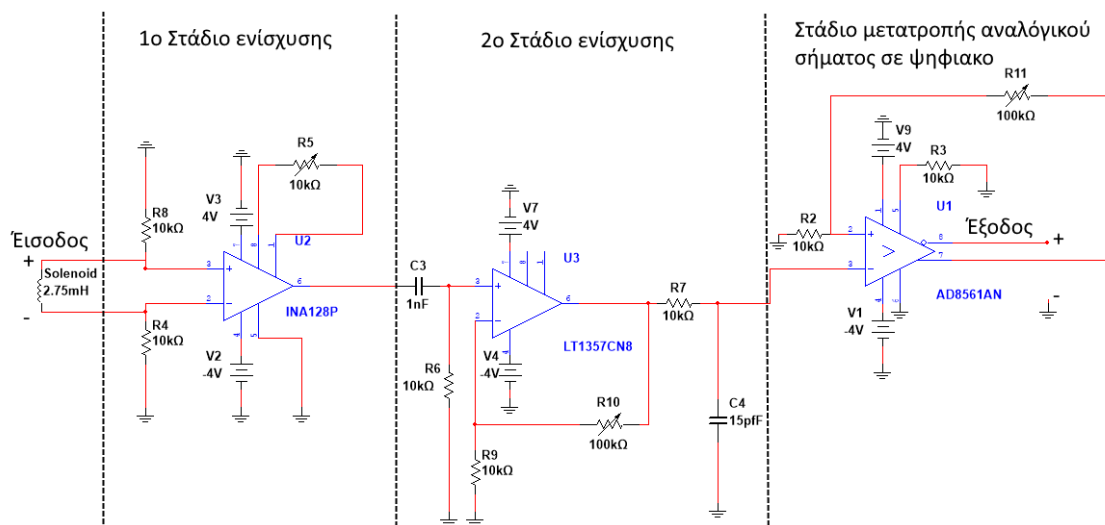
Έχοντας εξετάσει τα χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου και εξόδου του κυκλώματος, μπορεί να ξεκινήσει η ανάλυση των προδιαγραφών του. Το κύκλωμα λοιπόν πρέπει να είναι ικανό να ενισχύσει το σήμα εισόδου σε επίπεδα τάσης μερικών εκατοντάδων mV ή και μερικών V καθώς η αρχική του τάση των μερικών mV είναι 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 αποθρομβοποίηση του σήματος τόσο λόγω εξωτερικών μαγνητικών παρεμβολών που ανιχνεύει το πηνίο αλλά και από θόρυβο που προκαλείται από στοιχεία του ίδιου του κυκλώματος. (3) Τέλος το κύκλωμα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα μετατροπής του αναλογικού παλμού σε ψηφιακό παλμό με μέγιστη τάση 3.3 V ώστε να τροφοδοτηθεί αποτελεσματικά στον μικροελεγκτή.



Σχήμα 0.12 Ποιοτικό σχεδιάγραμμα του κυκλώματος λήψης

3.7.2 Ανάλυση Κυκλώματος λήψης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το κύκλωμα λήψης αναλαμβάνει την διαμόρφωση του σήματος που ανιχνεύει το πηνίο λήψης στα άκρα του, προκειμένου να μπορεί να το επεξεργαστεί ο μικροελεγκτής της συνολικής διάταξης. Το κύκλωμα περιλαμβάνει πλήθος αντιστάσεων και πυκνωτών, αλλά ο πυρήνας του αποτελείται από τρία ολοκληρωμένα (INA128, LT1357, AD8561).



Σχήμα 0.13 Κυκλωματική διάταξη λήψης

3.7.2.1 Ποιοτική εξέταση κυκλώματος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13, το κύκλωμα λήψης χωρίζεται σε τρία 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

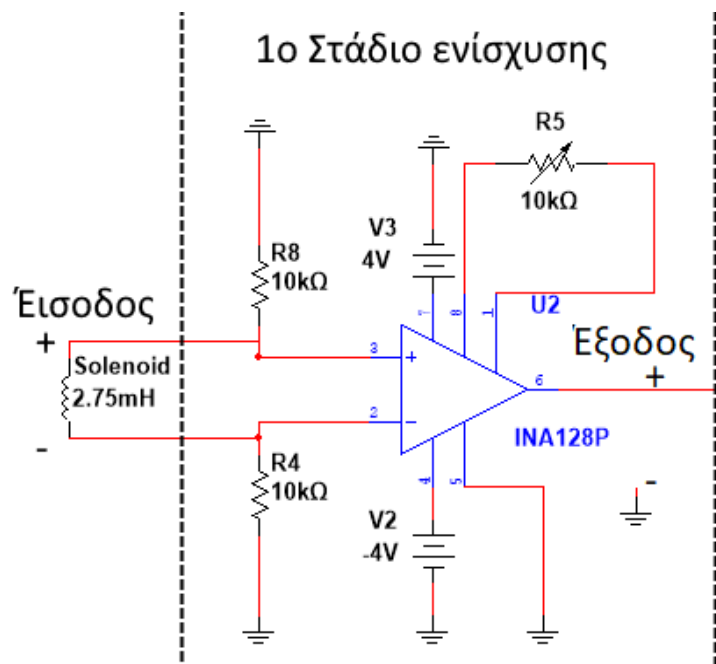
ενίσχυση και αποθρομβοποίηση. Τέλος, το ενισχυμένο και αποθρομβοποιημένο σήμα μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό, ώστε να είναι έτοιμο για επεξεργασία από τον μικροελεγκτή. Στην συνέχεια θα αναλυθεί η λεπτομερή λειτουργία κάθε σταδίου, καθώς και ο λόγος διαμοιρασμού της ενίσχυσης και της αποθρομβοποίησης του σήματος σε δύο στάδια αντί σε ένα.

3.7.2.2 1^ο Στάδιο ενίσχυσης

Το πρώτο στάδιο ενίσχυσης αποτελείται από το ολοκληρωμένο ενισχυτή οργανολογίας (instrumentation amplifier) INA128, 2 αντιστάσεις ($R8, R4$) και την μεταβλητή αντίσταση $R5$. 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 $R5$ και τον τύπο:

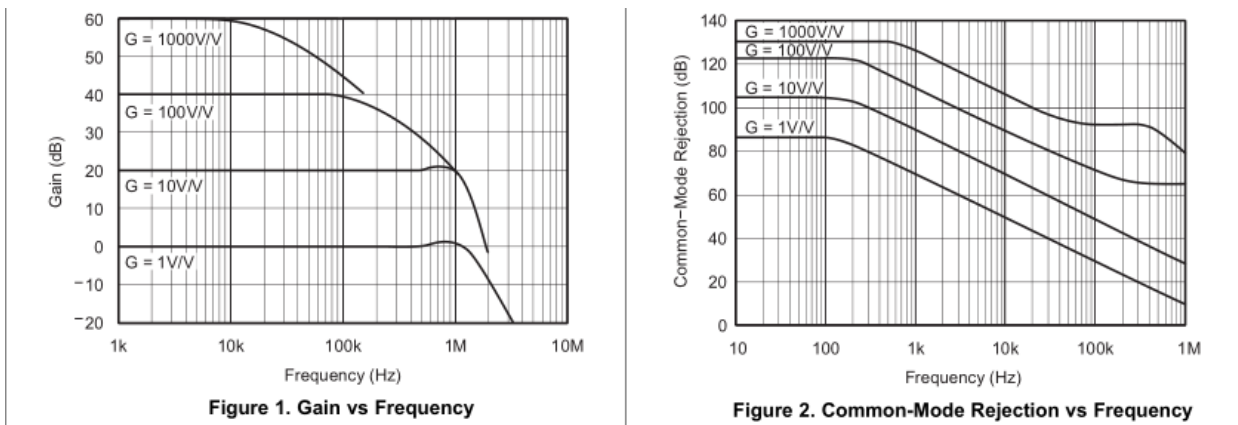
$$G_1 = \frac{50k}{R_G} \quad (4.1)$$

όπου R_G η αντίσταση που βλέπουν οι ακροδέκτες 1 και 8, δηλαδή την $R5$. 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 $R8$ και $R4$ έχουν τον ρόλο της παροχής ρεύματος πόλωσης στις διαφορικές εισόδους.



Σχήμα 0.10 1ο Στάδιο ενίσχυσης

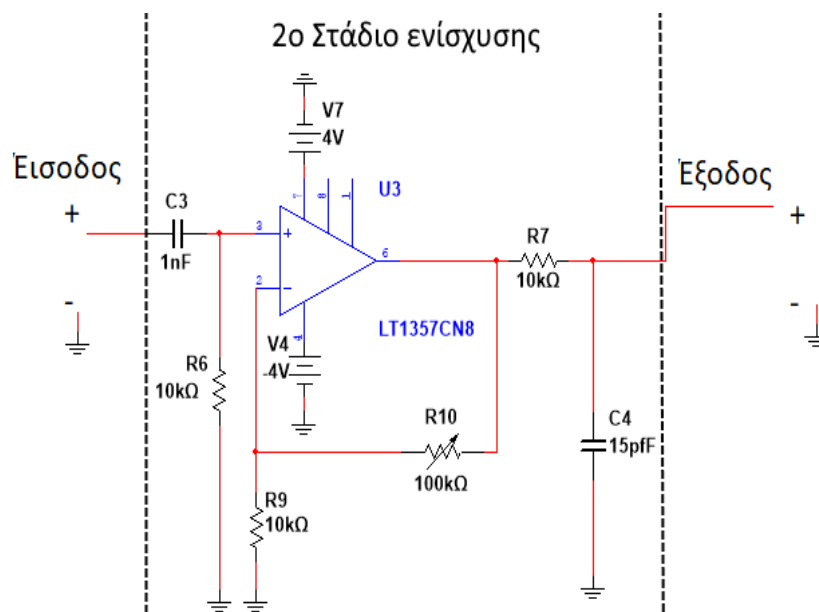
Πέρα από την ενίσχυση, το ολοκληρωμένο INA128 συμβάλλει και στην αποθρομβοποίηση του σήματος καθώς έχει υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος (CMRR), και ρυθμίζοντας κατάλληλα το κέρδος, θόρυβος με φασματικό περιεχόμενο μεγαλύτερης συχνότητας από το εύρος ζώνης του σήματος λήψης (200-500 kHz) θα βρεθεί στην μη γραμμική και φθίνουσα περιοχή της καμπύλης κέρδους όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15.



Σχήμα 0.15 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.

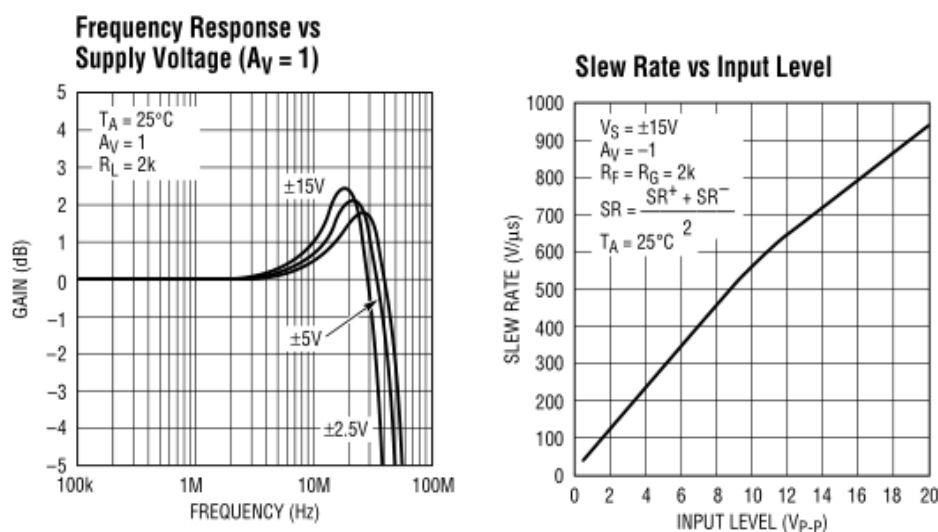


Σχήμα 0.16 2ο Στάδιο ενίσχυσης

Το σήμα που εξέρχεται από το πρώτο στάδιο τροφοδοτείται στο δίκτυο R-C (C3,R6) που είναι στην ουσία ένα απλό υπερβατικό 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:

$$G_2 = 1 + \frac{R_{10}}{R_9} \quad (4.2)$$

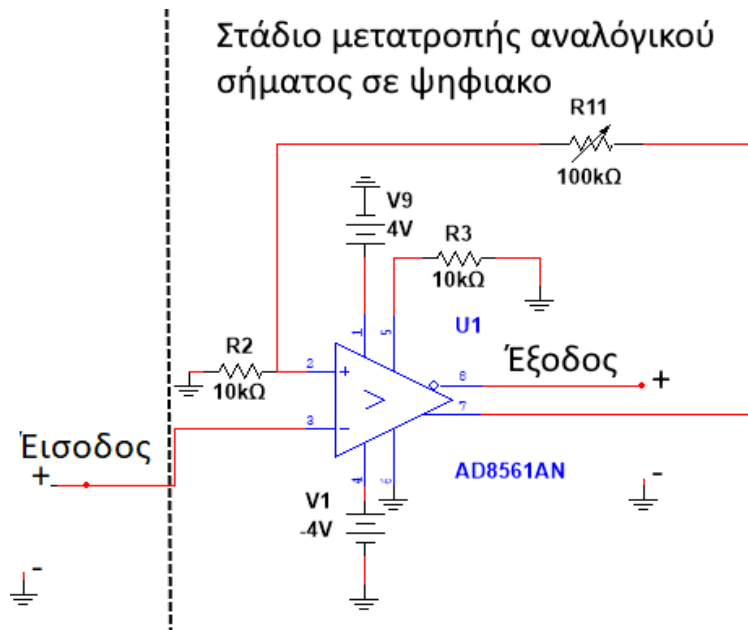
το οποίο μπορεί να διαμορφωθεί αλλάζοντας την τιμή της μεταβλητής αντίστασης R10. Ύστερα από την ενίσχυση, το σήμα τροφοδοτείται σε άλλο ένα δίκτυο R-C (R7,C4) σε διάταξη βαθυπερατού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής 1 MHz ώστε να αμβλυνθούν περαιτέρω συνιστώσες θορύβου υψηλών συχνοτήτων. Το ολοκληρωμένο 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 0.17 Μοναδιαίο κέρδος σε συνάρτηση με την συχνότητα (αριστερά), ρυθμός μεταβολής εξόδου σε σχέση με τάση σήματος εισόδου (δεξιά) για το ολοκληρωμένο LT1357

3.7.2.4 Στάδιο μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Το στάδιο αυτό αποτελείται από το ολοκληρωμένο ασύγκριτη (comparator) AD8561, δύο αντιστάσεις (R3,R2) και την μεταβλητή αντίσταση R11.



Σχήμα 0.18 Στάδιο μετατροπής αναλογικού σήματος
σε ψηφιακό

Το αρχικό αναλογικό σήμα λήψης έχει αποθρομβοποιηθεί και ενισχυθεί με συνολικό κέρδος $G_{total} = G_1 * G_2$, και είναι πλέον έτοιμο για την μετατροπή του σε ψηφιακό παλμό. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του ολοκληρωμένου AD8561 ως συγκριτή με υστέρηση. Το σήμα προερχόμενο από το προηγούμενο στάδιο τροφοδοτείται στην αρνητική είσοδο του συγκριτή, και όταν ξεπερνά το άνω κατώφλι τάσης V_{High} , η έξοδος λαμβάνει σταθερή τιμή κοντά στην θετική τροφοδοσία, η οποία πειραματικά βρέθηκε περίπου στα 3.3V. Όταν το σήμα καθώς πέφτει η τάση του, συναντήσει το κάτω κατώφλι V_{Low} , η έξοδος λαμβάνει τιμή 0V. Η τιμή του άνω κατωφλίου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{High} = (V_+ - 1 - V_{Ref}) \frac{R2}{R2 + R11} \quad (4.3)$$

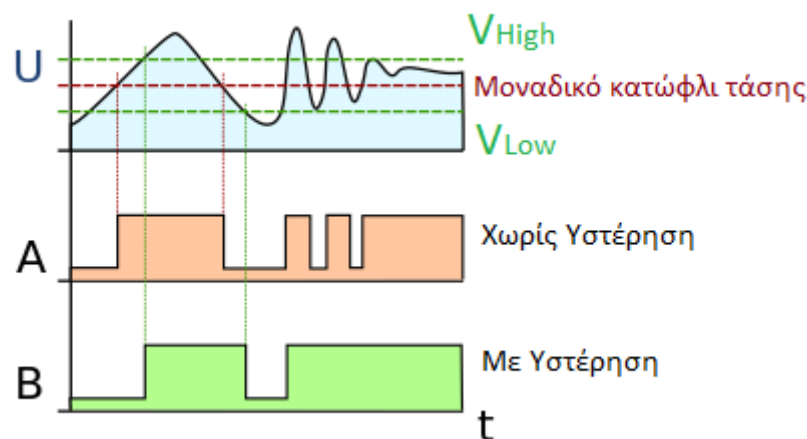
και του κάτω κατωφλίου από τον τύπο:

$$V_{Low} = V_{Ref} \left(1 - \frac{R2}{R2 + R11}\right) \quad (4.4)$$

όπου V_+ η θετική τάση τροφοδοσίας ($V_+ = 4V$) και V_{Ref} η τάση αναφοράς που συνδέεται στο αριστερό άκρο της αντίστασης R2 όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18 ($V_{Ref} = 0$). Επομένως το κάτω κατώφλι θα έχει τιμή $V_{Low} = 0V$ αφού $V_{Ref} = 0$, και το άνω κατώφλι θα μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας την τιμή της μεταβλητής αντίστασης R11 από τον τελικό τύπο:

$$V_{High} = 3 \cdot \frac{10k}{10k + R11} \quad (4.5)$$

Η $R3$ συνδέει τον ακροδέκτη 5 με την γη ώστε να απενεργοποιηθεί μια λειτουργία μανδάλωσης που περιλαμβάνει το ολοκληρωμένο. Η διάταξη με υστέρηση προτιμήθηκε αντί μιας ενός απλού συγκριτή με ένα μοναδικό κατώφλι, ώστε να μην γίνεται σκανδαλισμός (triggering) του ολοκληρωμένου σε περίπτωση εμφάνισης θορύβου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.19.

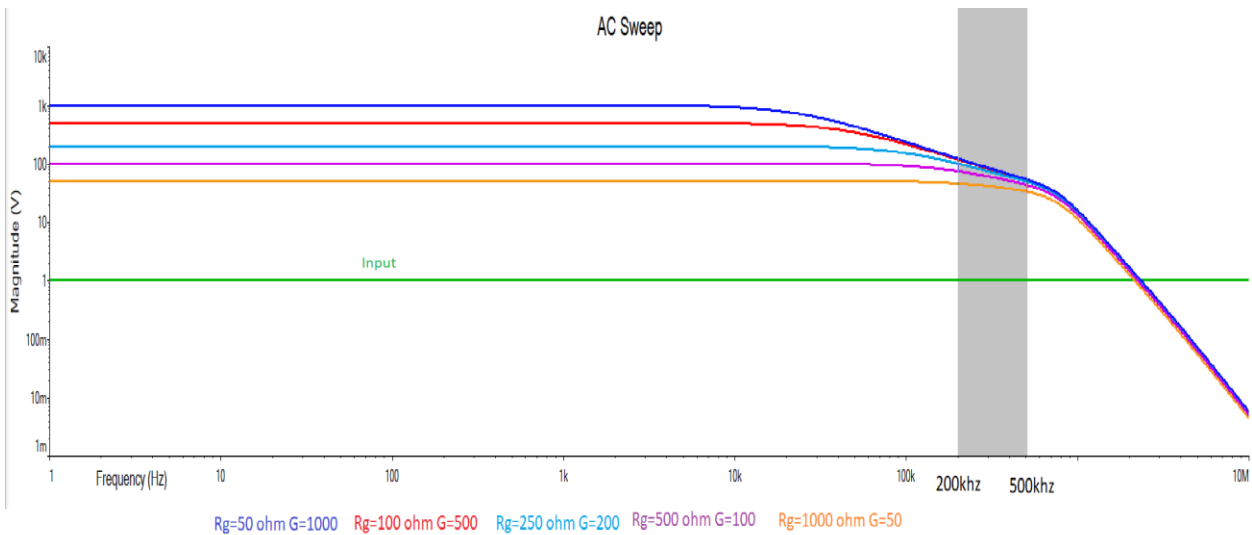


Σχήμα 0.19 Απεικόνιση σταθερότερου σκανδαλισμού σε συγκριτή με υστέρηση σε περιβάλλον θορύβου

3.7.3 Προσομοιώσεις σταδίων

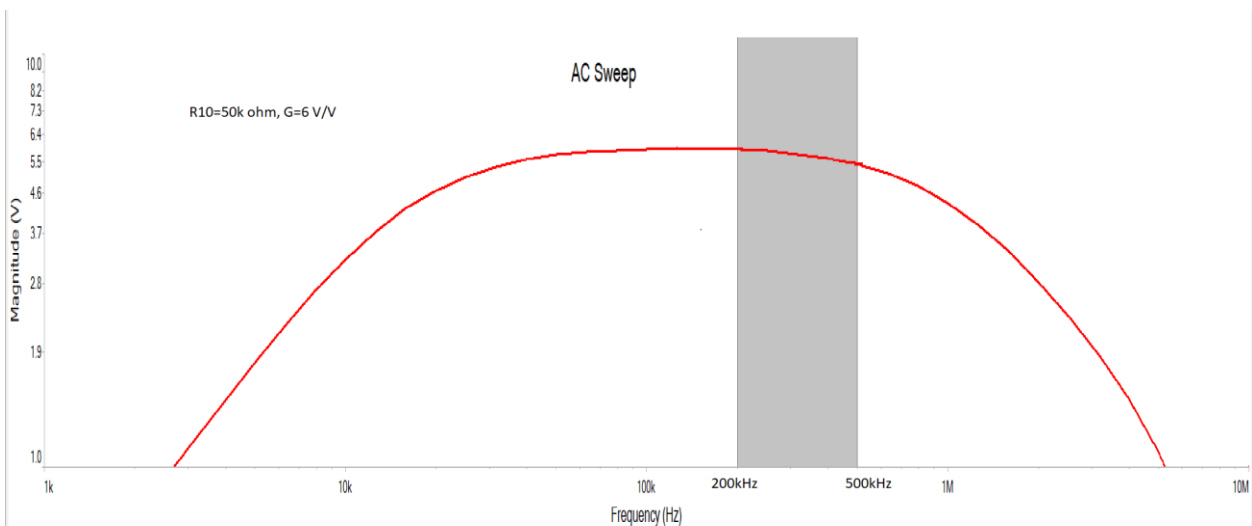
Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις ώστε να εμφανιστεί γραφικά η απόκριση κάθε σταδίου καθώς και να γίνει μία εκτίμηση της τιμής των μεταβλητών αντιστάσεων που καθορίζουν τα κέρδη στα στάδια ενίσχυσης, και την τάση κατωφλίου στον συγκριτή .

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση της απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας (AC Sweep) για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής αντίστασης $R5$ και επομένως διαφορετικές τιμές κέρδους του ενισχυτή. Γνωρίζοντας ότι το σήμα λήψης έχει φασματικό περιεχόμενο στην περιοχή 200-500 kHz , θα προτιμήσουμε την καμπύλη που έχει γραμμική μορφή στην περιοχή αυτή , δηλαδή την πορτοκαλί με κέρδος $G_{orange} = 50$ ή και την μωβ με κέρδος $G_{purple} = 100$.



Σχήμα 0.20 Απόκριση στο πεδίο της συχνότητας (AC Sweep) του πρώτου σταδίου, με τους δύο άξονες σε λογαριθμική κλίμακα

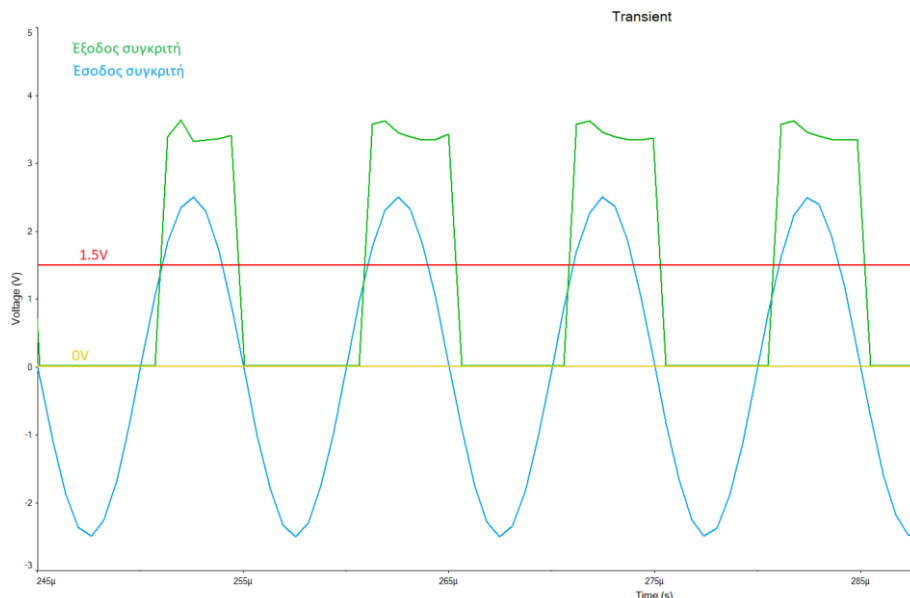
Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε επίσης ανάλυση της απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας (AC Sweep) με κέρδος ενίσχυσης $G=6$, ώστε να απεικονισθούν οι περιοχές αποκοπής από τον συνδυασμό του υπερυπερατού φίλτρου R-C στην είσοδο του σταδίου, και του βαθυπερατού φίλτρου R-C στην έξοδο.



Σχήμα 0.21 Απόκριση στο πεδίο της συχνότητας (AC Sweep) του δεύτερου σταδίου, με τους δύο άξονες σε λογαριθμική κλίμακα

Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση της απόκρισης στο πεδίο του χρόνου (transient analysis) για να παρασταθεί γραφικά ο σκανδαλισμός του συγκριτή καθώς το σήμα που προέρχεται από τα δύο προηγούμενα στάδια συναντά την τάση άνω κατώφλιου. Γνωρίζοντας ότι το σήμα εισόδου είναι της τάξης μερικών mV, και ότι επιθυμούμε ενίσχυση με κέρδος μεταξύ 50 και 100 στο πρώτο στάδιο, καθώς και ότι το ενισχυμένο σήμα δεν πρέπει να πλησιάσει την τιμή της τάσης τροφοδοσίας (-4V,4V) για ορθή λειτουργία των ενισχυτών, θα υποθέσουμε ότι $G_1 = 50$, $G_2 = 10$ και $G_{total} = G_1 * G_2 = 500$. Έτσι υποθετικό σήμα εισόδου μέγιστης τιμής 5 mV θα ενισχύεται στα 2.5 V. Λόγω αδυναμίας αναπαραγωγής του ακριβούς σήματος του πηνίου λήψης στο λογισμικό προσομοίωσης, θα αντικατασταθεί από έναν ημιτονικό παλμό καθώς στο πεδίο του χρόνου έχουν παρόμοια μορφή και δεν επηρεάζει το τρόπο σκανδαλισμού του συγκριτή.

Το σήμα λήψης ενδέχεται να μην φτάνει πάντα την μέγιστη τάση που περιμένουμε, και επομένως μας ενδιαφέρει ο σκανδαλισμός να γίνεται περίπου στην μέση της ανόδου του σήματος. Επίσης το κατώφλι δεν πρέπει να είναι και πολύ χαμηλό ώστε να μην προκαλείται σκανδαλισμός από θόρυβο που θα έχει αμβλυνθεί από τα προηγούμενα στάδια σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Για τους λόγους αυτούς, στην προσομοίωση επιλέχθηκε τιμή 10 kΩ της μεταβλητής αντίστασης R11 ώστε να προκύψει κατώφλι άνω τάσης στο 1.5 V.

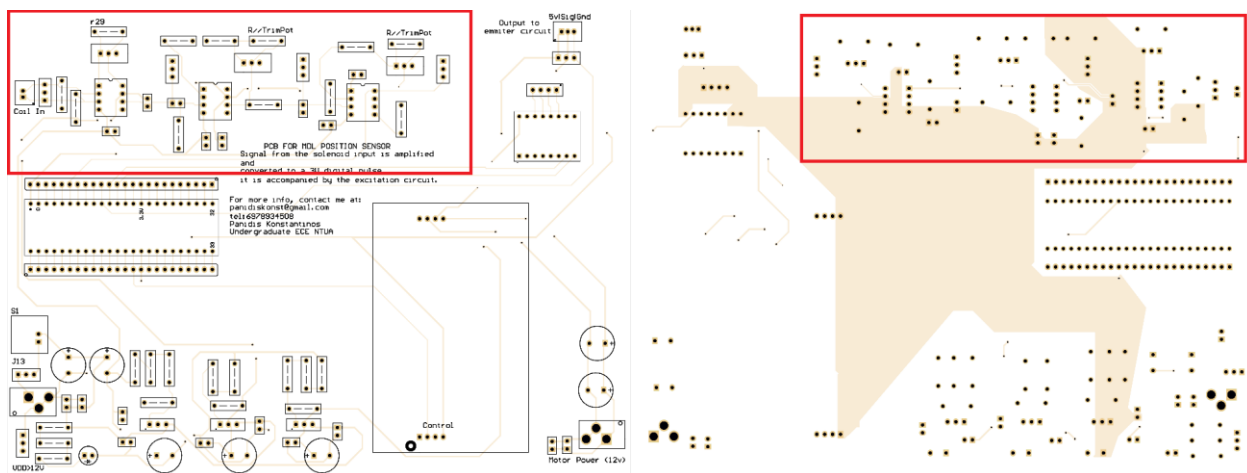


Σχήμα 0.22 Ανάλυση απόκρισης στο πεδίο του χρόνου τρίτου σταδίου, με κόκκινη γραμμή είναι το άνω κατώφλι σκανδαλισμού και με κίτρινο το κάτω, ενώ με μπλε η είσοδος και πράσινο η έξοδος του συγκριτή

Οι παραπάνω προσομοιώσεις προσφέρουν μια ενδεικτική εικόνα της λειτουργίας κάθε σταδίου του κυκλώματος λήψης. Η τελική τιμή των μεταβλητών αντιστάσεων, που ρυθμίζουν τα κέρδη των σταδίων ενίσχυσης και του άνω κατωφλιού του συγκριτή, θα καθοριστούν πειραματικά στο πραγματικό κύκλωμα όπου θα εξακριβωθεί και η ορθή λειτουργία του σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίστηκαν σε προηγούμενη ενότητα.

3.7.4 Κατασκευή και απόκριση κυκλώματος λήψης

Όπως και με το κύκλωμα διέγερσης, το κύκλωμα λήψης κατασκευάστηκε σε PCB ύστερα από τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του σε πλακέτα δοκιμών (breadboard). Για λόγους κόστους και απλότητας, στο PCB του κυκλώματος λήψης ενσωματώθηκαν και επιπρόσθετα κυκλώματα που αποτελούν μέρος την συνολικής διάταξης που θα εξεταστεί αργότερα στην εργασία.

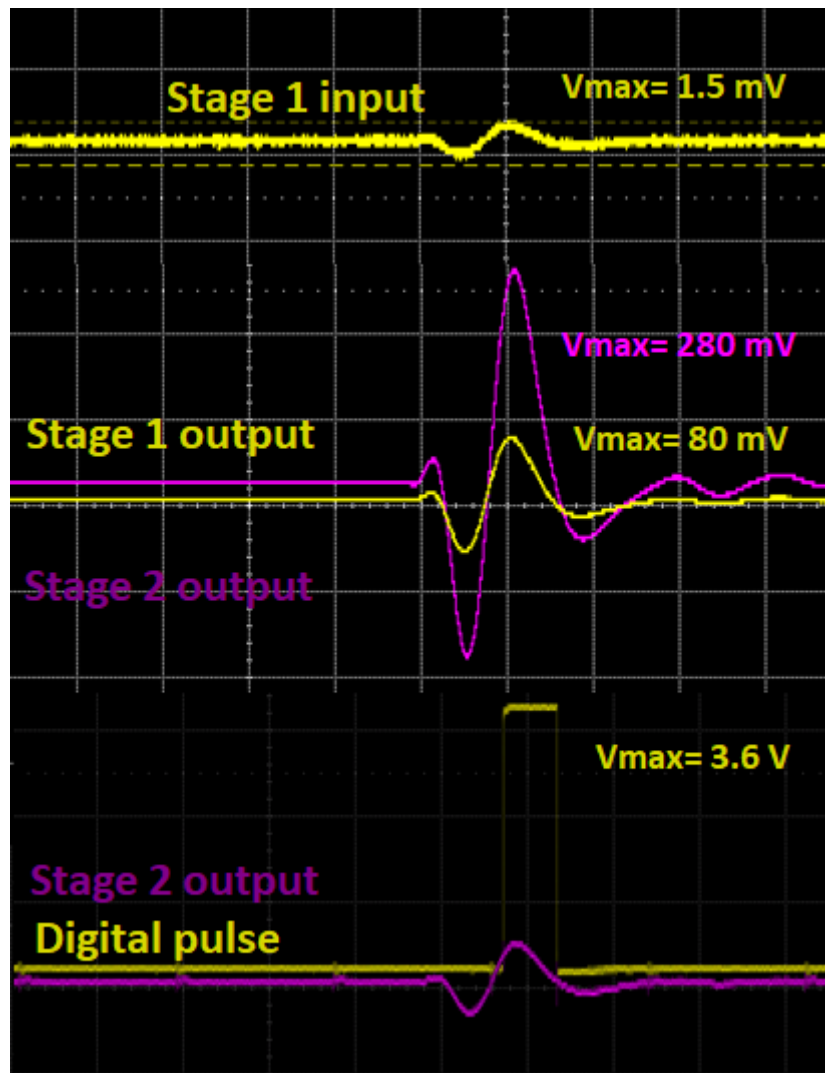


Σχήμα 0.23 Πρόσοψη και κάτοψη του PCB του κυκλώματος λήψης (επισημασμένο στο κόκκινο ορθογώνιο) και των επιπρόσθετων κυκλωμάτων της συνολικής διάταξης



Σχήμα 0.24 Κύκλωμα λήψης σε PCB ύστερα από την συγκόλληση των στοιχείων του

Τροφοδοτήθηκε το σήμα από το πηνίο λήψης στην είσοδο του κυκλώματος και παρατηρήθηκαν στον παλμογράφο οι έξοδοι κάθε σταδίου. Οι μεταβλητές αντιστάσεις ρυθμιστήκαν κατάλληλα ώστε να παραχθεί σταθερός ψηφιακός παλμός στην έξοδο του τελευταίου σταδίου. Από τις κυματομορφές του παρακάτω σχήματος, φανερώνεται η ορθή λειτουργία του κυκλώματος, δηλαδή επιβεβαιώνεται η ικανότητα του να ενισχύσει και να ψηφιοποιήσει το σήμα MDL. Πιο συγκεκριμένα, οι μεταβλητές αντιστάσεις ρυθμίστηκαν ώστε το πρώτο στάδιο να έχει κέρδος $G_1 = 53$, το δεύτερο να έχει κέρδος $G_2 = 3.5$, ενώ για τον συγκριτή στο τελικό στάδιο επιλέχθηκε τάση άνω κατωφλίου $V_{High} = 200\text{ mV}$. Οι τιμές των κερδών και του κατωφλίου επιλέχθηκαν για σκοπούς επίδειξης της λειτουργίας του κυκλώματος και ενδεχομένως να τροποποιηθούν σε αργότερα στάδια της εργασίας.



Σχήμα 0.25 Κυματομορφές σήματος MDL (πάνω), εξόδου πρώτου και δεύτερου σταδίου ενίσχυσης (μέση) και εξόδου δεύτερου σταδίου και σταδίου μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (κάτω)

3.8 Ο μικροελεγκτής της διάταξης του αισθητήρα

Η αισθητήρας θέσης που θα υλοποιηθεί στην παρούσα εργασία στηρίζεται στην καθυστέρηση απόκρισης της τεχνικής MDL. Με μέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ της χρονικής στιγμής της διέγερσης και της λήψης του ελαστικού παλμού, και με δεδομένη την ταχύτητα διάδοσης του παλμού στην γραμμή MDL, μπορεί να βρεθεί η θέση του κινούμενου πηνίου από τον τύπο:

$$X_{moving\ coil} = V_{pulse} * (t_{reception} - t_{excitation}) \quad (4.6)$$

όπου $X_{moving\ coil}$ η απόσταση του κινούμενου πηνίου από το ακίνητο, δηλαδή η θέση του ως προς το σημείο αναφοράς που ορίζει θέση του σταθερού πηνίου, V_{pulse} η ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού παλμού, η τιμή της οποίας βρίσκεται πειραματικά, και $t_{reception}$, $t_{excitation}$ οι χρονικές στιγμές της λήψης και της διέγερσης αντίστοιχα. Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση υπολογιστικού συστήματος το οποίο θα είναι ικανό να καταγράφει αυτούς τους δύο χρόνους ώστε να υπολογίζει την θέση του κινητού πηνίου. Στην διάταξη της εργασίας τον ρόλο αυτόν τον αναλαμβάνει ο μικροελεγκτής Teensy 3.6 ο οποίος θα παρουσιαστεί στην συνέχεια.

3.8.1 Παρουσίαση μικροελεγκτή Teensy 3.6

Το Teensy 3.6 είναι ένα προσιτό σύστημα ανάπτυξης μικροελεγκτή με 32 bit 180 MHz Cortex-M4 επεξεργαστή που περιλαμβάνει πλήθος αναλογικών και ψηφιακών ακροδεκτών εισόδου και εξόδου και ακολουθεί αρχιτεκτονική τάσης των 3.3V [23]. Το Teensy επίσης μπορεί να προγραμματιστεί σε γλώσσα C++ στο λογισμικό περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE, κάτι που επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη διαμόρφωση της λειτουργίας του μικροελεγκτή.



Σχήμα 0.26 Κάτοψη μικροελεγκτή Teensy 3.6 [23]

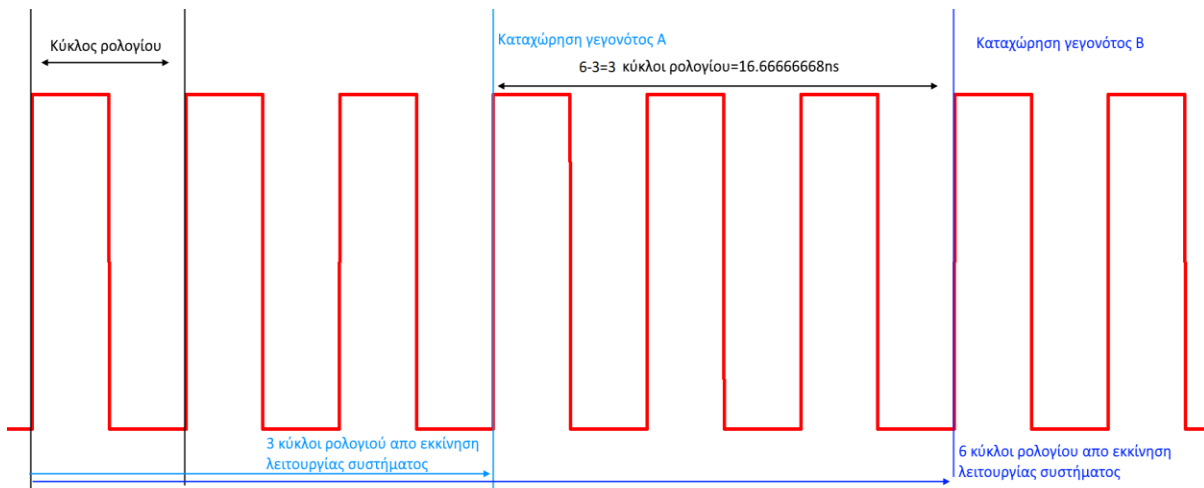
Στην εφαρμογή του αισθητήρα θέσης της εργασίας αξιοποιούνται κυρίως δύο δυνατότητες του συγκεκριμένου μικροελεγκτή.

Η πρώτη είναι η δυνατότητα χρήσης οποιοδήποτε ακροδέκτη εισόδου ως ακροδέκτη διακοπής υλικού (hardware interrupt). Στην διακοπή υλικού όταν ένα εξωτερικό σήμα εισέρχεται σε ένα συγκεκριμένο ακροδέκτη εισόδου ενός υπολογιστικού συστήματος, ο επεξεργαστής του συστήματος διακόπτει οποιαδήποτε διεργασία εκτελούσε εκείνη την στιγμή και ξεκινά την εκτέλεση μιας άλλης διεργασίας η οποία έχει καθοριστεί κατά τον προγραμματισμό του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα είναι ικανό να αλληλοεπιδρά με εξωτερικά σήματα χωρίς καθυστερήσεις και να εκτελούνται υπολογισμοί χρονικά ευαίσθητοι. Η δυνατότητα αυτή του teensy βρίσκει εφαρμογή κατά την λήψη του παλμού όπως και θα αναλυθεί αργότερα.

Η δεύτερη δυνατότητα που αξιοποιεί ο αισθητήρας είναι μέτρηση και αποθήκευση του πλήθους των κύκλων ρολογιού που έχουν παρέλθει από την εκκίνηση λειτουργίας του μικροελεγκτή. Δεδομένο ότι η συχνότητα λειτουργίας του επεξεργαστή του συστήματος είναι 180 MHz, θα υπάρχει νέος κύκλος ρολογιού (clock cycle) κάθε $t_{clock\ cycle} = 5.55555556\ ns$. Επομένως η μέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ δύο διαφορετικών χρονικά συμβάντων μπορεί να προκύψει από το τύπο:

$$\Delta t = (clock\ cycles_{second} - clock\ cycles_{first}) \cdot 5.55555556\ ns \quad (4.7)$$

όπου $clock\ cycles_{first}$ και $clock\ cycles_{second}$ οι μεταβλητές όπου αποθηκεύτηκαν οι κύκλοι ρολογιού που είχαν παρέλθει από την εκκίνηση λειτουργίας του μικροελεγκτή, μέχρι την στιγμή του πρώτου και δεύτερου γεγονότος αντίστοιχα. Στην λειτουργία αυτή στηρίζεται ο υπολογισμός της χρονικής διαφοράς μεταξύ της στιγμής της διέγερσης και της λήψης του ελαστικού παλμού και θα αναλυθεί επίσης αργότερα.



Σχήμα 0.27 Εύρεση χρονικής διαφοράς μεταξύ δύο γεγονότων A και B μετρώντας διαφορά πλήθος κύκλων ρολογιού από εκκίνηση του συστήματος

3.8.2 Λειτουργία μικροελεγκτή Teensy 3.6 στην διέγερση

Στην πλευρά της διέγερσης ο μικροελεγκτής έχει δύο ρόλους, ο πρώτος είναι η παραγωγή του σήματος ελέγχου του κυκλώματος διέγερσης, και ο δεύτερος είναι η καταχώρηση της χρονικής στιγμής της παραγωγής αυτής. Το σήμα ελέγχου είναι ένας τετραγωνικός παλμός τάσης 3.3V που εξέρχεται από έναν ακροδέκτη εξόδου του μικροελεγκτή, και το εύρος του παλμού μπορεί να έχει διάφορες τιμές με ελάχιστο όριο μερικές εκατοντάδες ns. Την στιγμή που εκτελείται η εντολή για δημιουργία του τετραγωνικού παλμού καταχωρείται στον μικροελεγκτή, ως υποθέσουμε στην μεταβλητή $clock\ cycles_{excitation}$, το πλήθος των κύκλων ρολογιού που έχουν παρέλθει από την εκκίνηση της λειτουργίας ώστε αργότερα να υπολογιστεί η απόσταση με τον τρόπο που ορίστηκε προηγουμένως. Ο τετραγωνικός παλμός ενεργοποιεί σχεδόν ακαριαία το διακοπτικό κύκλωμα και επομένως δεν υπάρχει καθυστέρηση στο πλήθος των κύκλων που καταχωρήθηκαν από τον πραγματικό χρόνο διέγερσης.

3.8.3 Λειτουργία μικροελεγκτή Teensy 3.6 στην λήψη

Με την άφιξη του ελαστικού παλμού στο πηνίο λήψης, το αναλογικό σήμα που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου μετατρέπεται σε έναν ψηφιακό παλμό και τροφοδοτείται σε έναν ακροδέκτη εισόδου του μικροελεγκτή ο οποίος έχει προγραμματιστεί ως θετικά

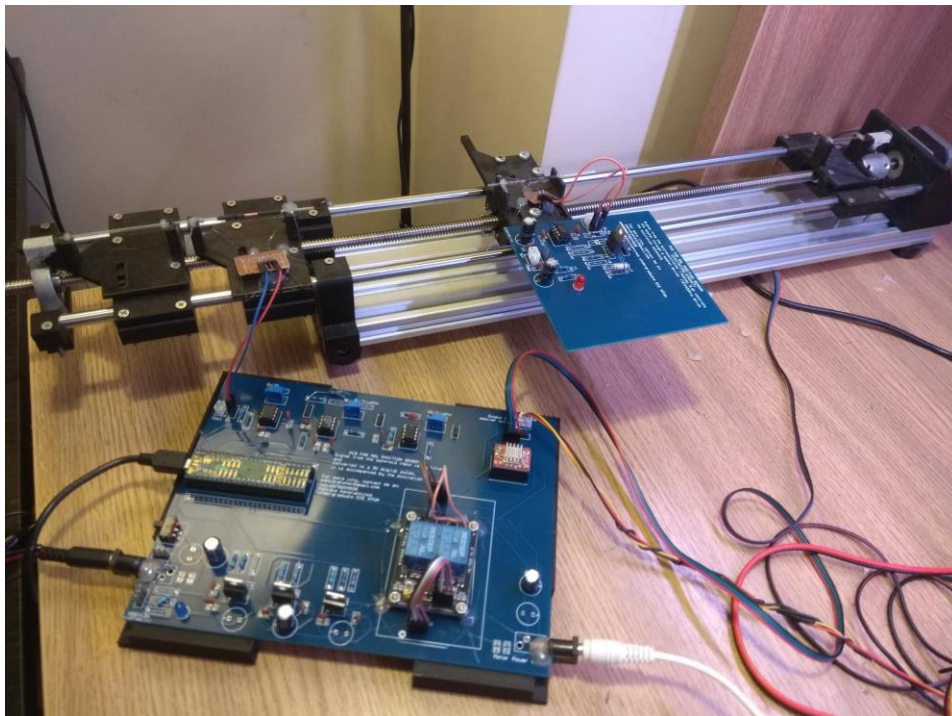
ακμοπυροδοτούμενη είσοδος διακοπής υλικού. Επομένως την στιγμή που ο ψηφιακός παλμός φτάσει την θετική ακμή του, ο μικροελεγκτής σταμάτα οποιαδήποτε τρέχουσα διεργασία και εκκινεί την εκτέλεση της ρουτίνας διακοπής (interrupt routine) όπου καταχωρείται, ως υποθέσουμε στην μεταβλητή *clock cycles_{reception}*, το πλήθος κύκλων ρολογιού που έχουν παρέλθει από την εκκίνηση λειτουργίας όπως και στην διέγερση. Έχοντας το πλήθος κύκλων ρολογιού από την στιγμή της εκκίνησης μέχρι τα συμβάντα της διέγερσης και της λήψης, μπορεί πλέον να υπολογιστεί και η χρονική διαφορά μεταξύ τους όπως διατυπώθηκε στην ενότητα 4.4.1 και στην συνέχεια να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων για δεδομένη ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού παλμού. Με την ολοκλήρωση της ρουτίνας διακοπής ο μικροελεγκτής επιστρέφει στην διεργασία που είχε σταματήσει προηγουμένως και συνεχίζει την λειτουργία του.

3.8.4 Αλληλεπίδραση μικροελεγκτή με υπολογιστή

Πέρα από τον έλεγχο της διέγερσης και τον υπολογισμό της χρονικής της διαφοράς από την στιγμή της λήψης, ο μικροελεγκτής της εργασίας έχει προγραμματιστεί ώστε να μπορεί να επικοινωνεί με υπολογιστή μέσω σειριακής σύνδεσης. Έτσι μπορούν να δοθούν εντολές στον αισθητήρα για την παραμετροποίηση των μετρήσεων, για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αυτών στον υπολογιστή, καθώς και για τον έλεγχο του βηματικού μοτέρ που θα περιλαμβάνει η συνολική διάταξη που θα παρουσιαστεί αργότερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – Η ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΥΤΗΝ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στην διάταξη του αισθητήρα θέσης που στηρίζεται στην τεχνική MDL και αναλύθηκε πώς ο μικροελεγκτής του αισθητήρα, με καταγραφή των χρόνων της στιγμής της διέγερσης και της λήψης, υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων. Για την εξακρίβωση όμως των αποτελεσμάτων του αισθητήρα, καθώς και για την καλύτερη διεξαγωγή πειραμάτων πάνω στην διάταξη του, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την πραγματική απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων, και να εξασφαλιστεί ότι η κίνηση του πηνίου διέγερσης είναι γραμμική και ακολουθεί τον άξονα που ορίζει η μαγνητοσυστολική γραμμή MDL. Για τους παραπάνω λόγους κατασκευάστηκε μία συνολική διάταξη που αποτελείται από τον αισθητήρα θέσης και ένα σύστημα γραμμικής κίνησης. Στην συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος λειτουργίας της διάταξης αυτής και θα διεξαχθούν πειράματα αναφορικά με τις ιδιότητες του MDL.



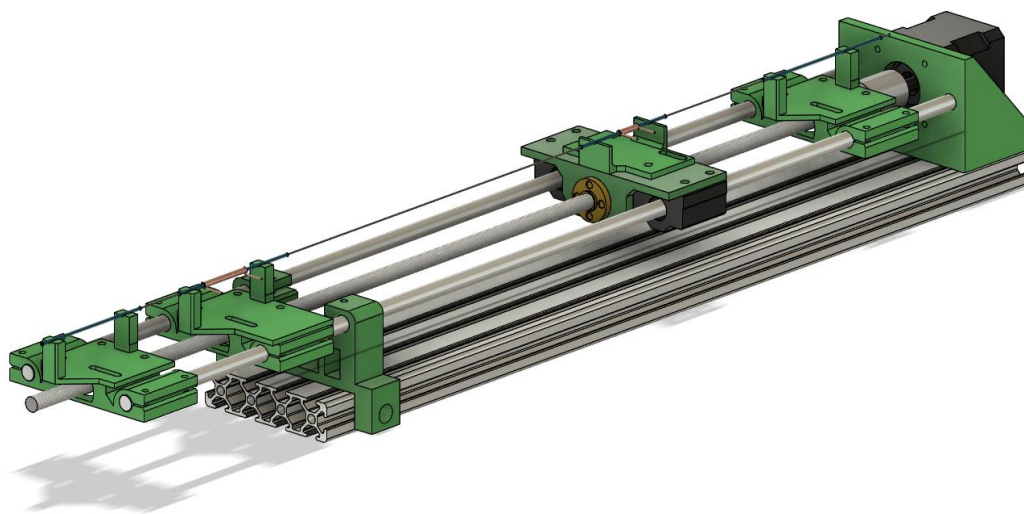
Σχήμα 4.1 Η συνολική διάταξη όπου πραγματοποιήθηκε η μελέτη των ιδιοτήτων MDL

4.1 Παρουσίαση συνολικής διάταξης

Η συνολική διάταξη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, περιλαμβάνει πέρα από τον αισθητήρα θέσης και ένα σύστημα γραμμικής κίνησης. Έχοντας ήδη εξετάσει την διάταξη του αισθητήρα θέσης, αρχικά θα περιγραφεί η κατασκευή και η λειτουργία του επιπρόσθετου συστήματος γραμμικής κίνησης, το οποίο μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το μηχανολογικό κομμάτι και το κυκλωματικό. Στην συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος λειτουργίας της συνολικής διάταξης και πώς διευκολύνει την διεξαγωγή πειραμάτων με την χρήση του αισθητήρα.

4.1.1 Μηχανολογικό μέρος συστήματος γραμμικής κίνησης

Η μηχανολογική πλευρά του συστήματος γραμμικής κίνησης αποτελείται από ομαλές ράβδους, έναν τραπεζοειδή κοχλία και περικόχλιο, δύο βάσεις γραμμικού ρουλεμάν, έναν αξονικό ζεύκτη, ένα βηματικό μοτέρ, διάφορα εκτυπωμένα (3d printed) εξαρτήματα, καθώς και από μία βάση προφίλ αλουμινίου.



Σχήμα 4.2 Το τρισδιάστατο σχέδιο του συστήματος γραμμικής κίνησης της συνολικής διάταξης

Τα εκτυπωμένα εξαρτήματα (με πράσινο χρώμα στο σχήμα) έχουν τον ρόλο να συνδέουν τα μηχανολογικά εξαρτήματα μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Οι ομαλές ράβδοι στηρίζονται σε δύο εκτυπωμένα κομμάτια και έτσι τα γραμμικά ρουλεμάν μπορούν να κινούνται επί των ράβδων κατά τον άξονα της γραμμής καθυστέρησης MDL. Τα δύο γραμμικά ρουλεμάν με την σειρά τους είναι συνδεδεμένα με την βάση στήριξης του κινητού πηνίου διέγερσης, καθώς και με το περικόχλιο. Έτσι, η περιστροφή του κοχλία, που διαπερνά

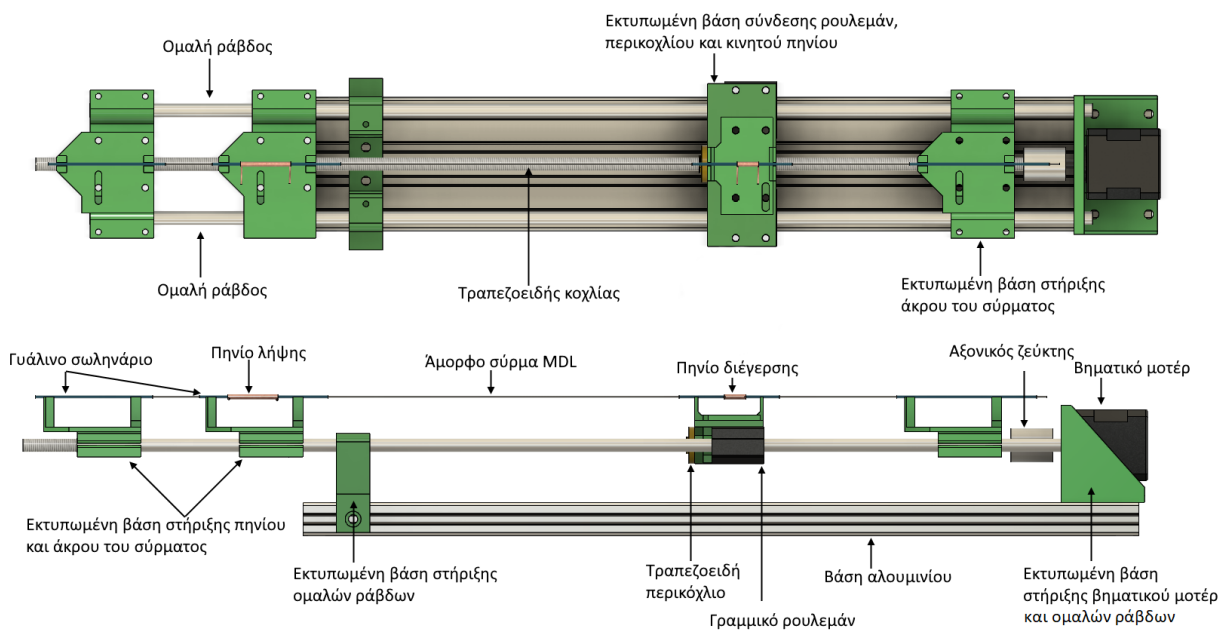
το σπείρωμα του περικοχλίου, έχει ως αποτέλεσμα την γραμμική μετατόπιση του κινητού πηνίου κατά μήκος του άξονα MDL. Η περιστροφή του κοχλία πραγματοποιείται λόγω της σύζευξης του με τον άξονα του βηματικού μοτέρ, το οποίο ελέγχεται από τον μικροελεγκτή όπως θα αναλυθεί κατά την εξέταση του κυκλωματικού μέρους του συστήματος κίνησης. Οι προδιαγραφές του κοχλία της κατασκευής ορίζουν ότι κάθε πλήρης περιστροφή του μεταφράζεται σε γραμμική μετατόπιση 2 mm του περικοχλίου, επομένως η σχέση γωνιακής περιστροφής του βηματικού μοτέρ με την γραμμική μετατόπιση του κινητού πηνίου ακολουθεί τον τύπο:

$$x = \frac{\varphi}{360} * 2mm \quad (5.1)$$

όπου φ η γωνία περιστροφής του μοτέρ σε μοίρες. Η ελάχιστη γωνία περιστροφής (βήμα) του βηματικού μοτέρ είναι 1.8°, επομένως η θεωρητική ανάλυση (resolution) της μετατόπισης του κινητού πηνίου της κατασκευής είναι 0.01 mm. Στην πράξη λόγω αδυναμιών του αξονικού συζεύκτη, περιστροφές λίγων μοιρών δεν μεταφράζονται αποτελεσματικά στην αντίστοιχη γραμμική μετατόπιση, επομένως για λόγους αξιοπιστίας, σαν ελάχιστο βήμα κίνησης του πηνίου διέγερσης θα επιλεγθεί το 0.1 mm. Η ακρίβεια της γραμμικής κίνησης προκύπτει από τον τύπο:

$$Accuracy_{linear\ motion} = \left(\frac{stepper\ motor\ accuracy}{360^\circ} \right) * \frac{Lead\ Screw\ pitch}{lead} \quad (5.2)$$

όπου stepper motor accuracy είναι η ακρίβεια περιστροφής του βηματικού μοτέρ και από την βιβλιογραφία ορίζεται σε $\pm 0.05^\circ$ [24], Lead screw pitch το βήμα του κοχλία (2 mm), και lead (2 mm) η αξονική μετατόπιση για περιστροφή του κοχλία κατά 360°. Επομένως η θεωρητική ακρίβεια της γραμμικής κίνησης διαμορφώνεται σε ± 0.00013 mm.



Σχήμα 4.3 Κάτοψη και πλάγια όψη της κατασκευής γραμμικής κίνησης

4.1.2 Κυκλωματικό μέρος συστήματος γραμμικής κίνησης

Στο σύστημα γραμμικής κίνησης, για την λειτουργία του βηματικού μοτέρ χρησιμοποιείται πρόσθετη κυκλωματική διάταξη που ονομάζεται οδηγός βηματικού μοτέρ (stepper motor driver). Το κύκλωμα αυτό απλοποιεί ιδιαίτερα τον έλεγχο του βηματικού μοτέρ και παρέχει το επαρκές ρεύμα που απαιτείται κατά την περιστροφή του άξονα του. Στην κατασκευή χρησιμοποιείται έτοιμη πλακέτα του εμπορίου που στηρίζεται στο ολοκληρωμένο A4988 Stepper Motor Driver. Η πλακέτα αυτή συνδέεται μεταξύ του βηματικού μοτέρ και του Teensy 3.6, που χρησιμοποιείται και για τις μετρήσεις στον αισθητήρα θέσης, και επιτρέπει στον μικροελεγκτή με απλό προγραμματισμό να ελέγξει την κατεύθυνση περιστροφής, καθώς και το πλήθος των βημάτων που θα περιστρέφεται ο άξονας του μοτέρ. Όμως ο βηματικός οδηγός, ακόμα και σε κατάσταση μη περιστροφής του βηματικού μοτέρ, ενεργοποιεί τα πηνία του μοτέρ με αποτέλεσμα να εμφανίζονται υψίσυχνες συνιστώσες θορύβου στο σήμα λήψης που ακόμα και με την αποθορυβοποίηση στα στάδια ενίσχυσης του κυκλώματος λήψης δεν αμβλύνονται ικανοποιητικά. Για τον λόγο αυτό, αλλά και για την γαλβανική απομόνωση των κυκλωμάτων του αισθητήρα από το κύκλωμα του οδηγού, στην συνολική διάταξη χρησιμοποιείται έτοιμη πλακέτα του εμπορίου με ρελέ η οποία αποκόπτει

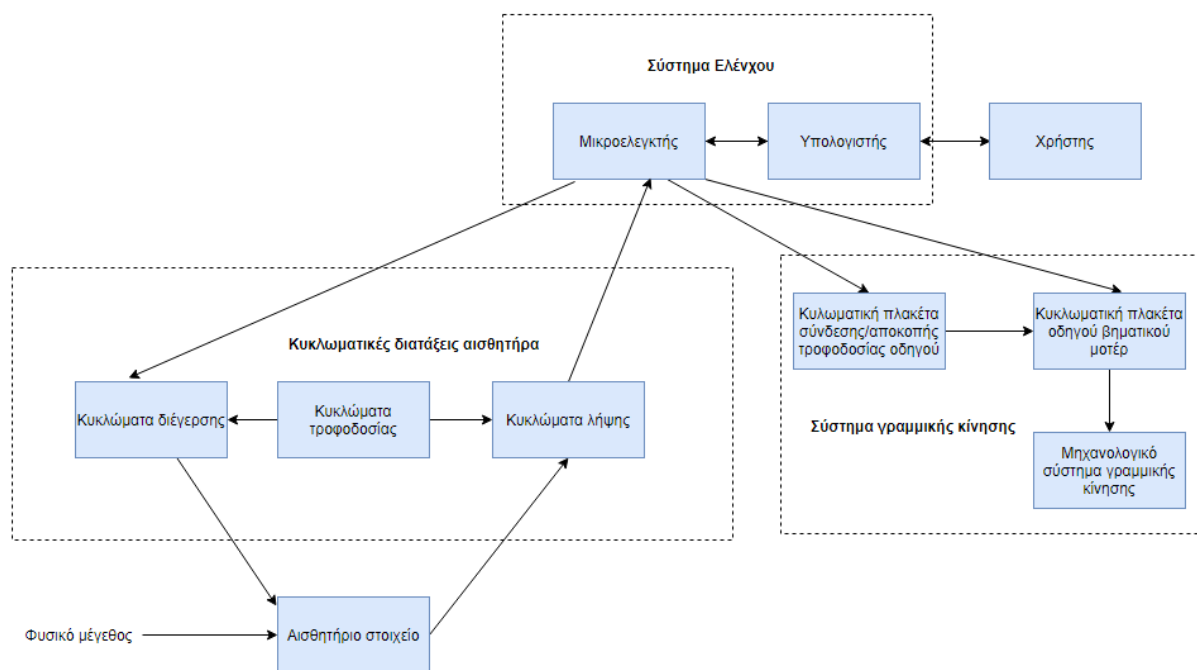
την τροφοδοσία του οδηγού κατά την λήψη μετρήσεων από τον αισθητήρα, και την επανασυνδέει όταν δεν λαμβάνονται μετρήσεις και απαιτείται η κίνηση του κινητού πηνίου στο σύστημα γραμμικής κίνησης.



Σχήμα 4.4 Πλακέτα οδηγού βηματικού μοτέρ (αριστερά) και πλακέτα σύνδεσης/αποκοπής κυκλώματος οδηγού του βηματικού μοτέρ (δεξιά)

4.1.3 Λειτουργία συνολικής διάταξης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο μικροελεγκτής πλέον, αλληλοεπιδρά και με το σύστημα γραμμικής κίνησης πέρα από τον υπολογιστή και την διάταξη του αισθητήρα. Έτσι με σειριακή επικοινωνία μέσω του υπολογιστή, μπορούμε να δώσουμε εντολές κίνησης του πηνίου διέγερσης με ακρίβεια αλλά και με εξασφαλισμένη γραμμικότητα κίνησης λόγω των μηχανολογικών ιδιοτήτων του συστήματος γραμμικής κίνησης. Επίσης με σειριακές εντολές, μέσω του μικροελεγκτή, μπορούμε να ελέγξουμε και παραμέτρους όπως πλάτος παλμού της διέγερσης, πλήθος και χρονική διαφορά μεταξύ των διεγέρσεων, αλλά και να ζητήσουμε λήψη μέτρησης, οπότε και θα επιστραφεί η χρονική διαφορά μεταξύ στιγμής διέγερσης και λήψης. Ο μικροελεγκτής είναι προγραμματισμένος να απενεργοποιεί το κύκλωμα του οδηγού κατά την διαδικασία λήψης μέτρησης για την αποφυγή μαγνητικών παρεμβολών από τα πηνία του βηματικού μοτέρ, και να το ενεργοποιεί κατά την λήψη εντολής για κίνηση του πηνίου διέγερσης.



Σχήμα 4.5 Σχηματικό διάγραμμα συνολικής διάταξης

4.2 Μελέτη των ιδιοτήτων του MDL μέσω πειραμάτων πάνω στην διάταξη

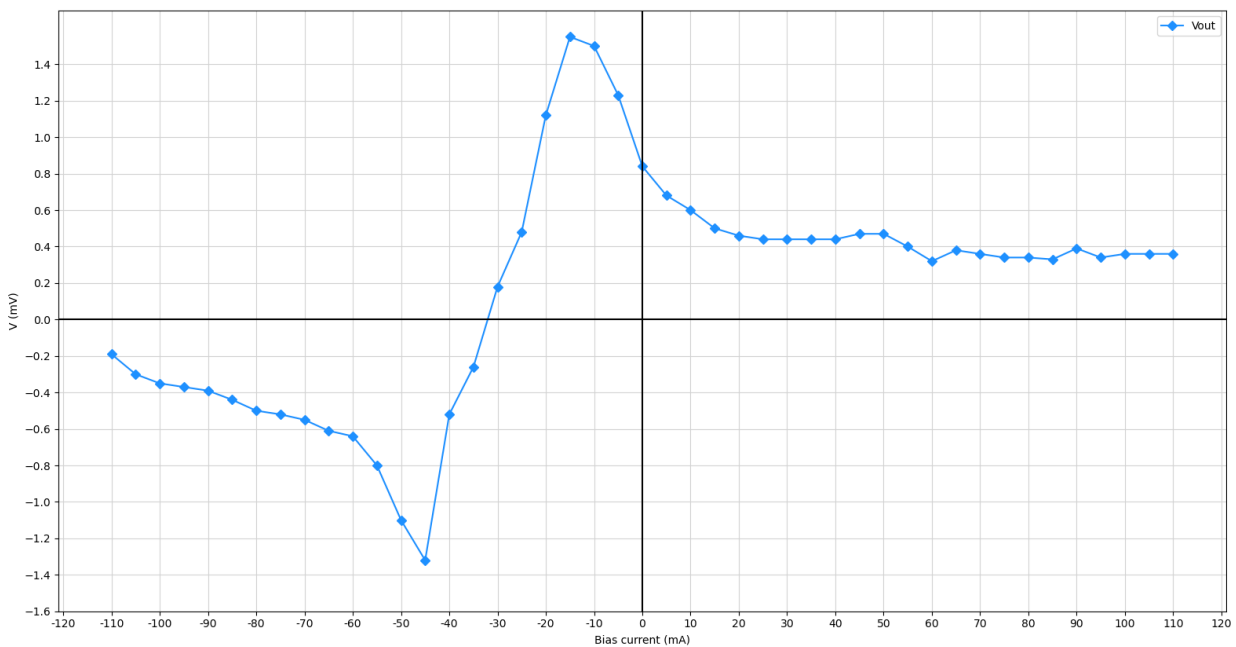
Στο κεφάλαιο 2 έγινε αναφορά στις ιδιότητες του MDL, και παρακάτω θα μελετηθούν πειραματικά πάνω στην συνολική διάταξη ώστε να εξακριβωθούν τόσο τα οφέλη αλλά και τα εμπόδια που προκαλούν οι ιδιότητες αυτές στην εφαρμογή του υλοποιημένου αισθητήρα θέσης.

4.2.1 Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης

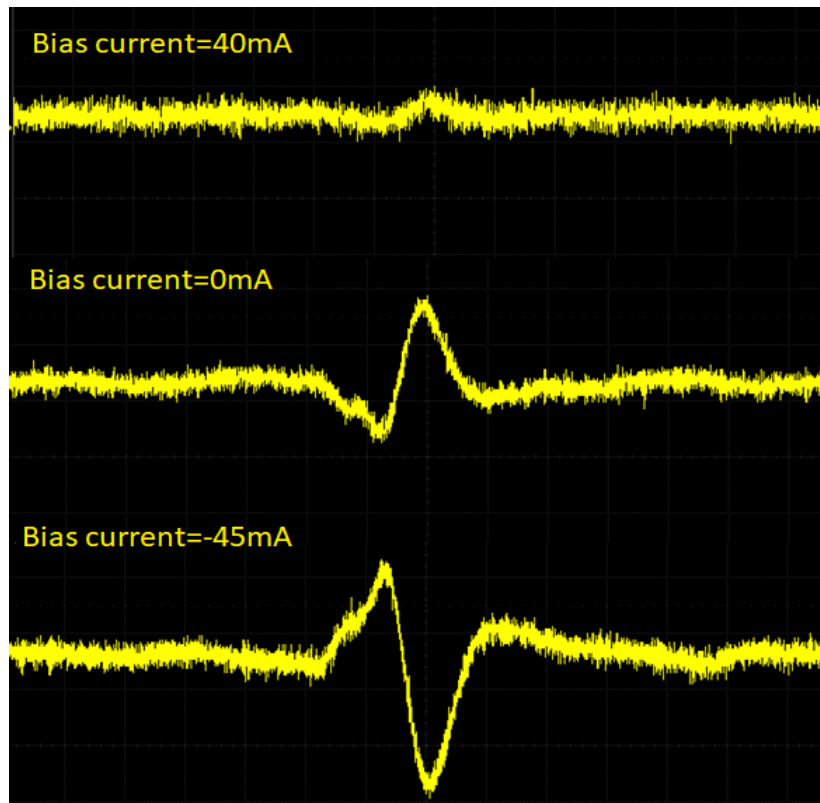
Η εξάρτηση της τάσης εξόδου του MDL στη επίδραση σταθερού μαγνητικού πεδίου ονομάζεται φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης (bias field effect). Για τις εφαρμογή σταθερού μαγνητικού πεδίου κατασκευάστηκε ένα επιπρόσθετο σωληνοειδές πηνίο 150 περιελίξεων από σύρμα χαλκού με διάμετρο 0.1 mm. Το πηνίο αυτό τυλίχθηκε γύρω από το πηνίο λήψης και θα τροφοδοτηθεί με σταθερό ρεύμα ώστε να προκαλέσει και σταθερό μαγνητικό πεδίο στην περιοχή της λήψης του MDL. Πραγματοποιήθηκαν 45 μετρήσεις της κορυφής της τάσης του σήματος λήψης μεταβάλλοντας το σταθερό ρεύμα του πηνίου πόλωσης από -110 mA έως 110 mA με βήμα 5 mA. Επιλέχθηκε η μέτρηση της τιμής του

δεύτερου παλμού καθώς έφτανε υψηλότερες ακραίες τιμές και η επίδραση του φαινομένου μαγνητικής πόλωσης ήταν πιο ευκρινής.

Από το γράφημα των μετρήσεων (σχήμα 5.6) φαίνεται ότι με μηδενικό ρεύμα πόλωσης, δηλαδή υπό την επίδραση μόνο του μαγνητικού πεδίου της γης, η γραμμή MDL πολώνεται ικανοποιητικά για την ανίχνευση του ελαστικού παλμού. Αυξάνοντας το ρεύμα και κατά συνέπεια το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο παρατηρείται μείωση της απόκρισης. Καθώς κινούμαστε προς τις αρνητικές τιμές του ρεύματος πόλωσης αρχικά η απόκριση φτάνει την κορυφαία τιμή της, στην συνέχεια μηδενίζεται και μετά τον μηδενισμό αντιστρέφεται η πολικότητα του σήματος.



Σχήμα 4.6 Εξάρτηση τάσης σήματος λήψης από σταθερό μαγνητικό πεδίο



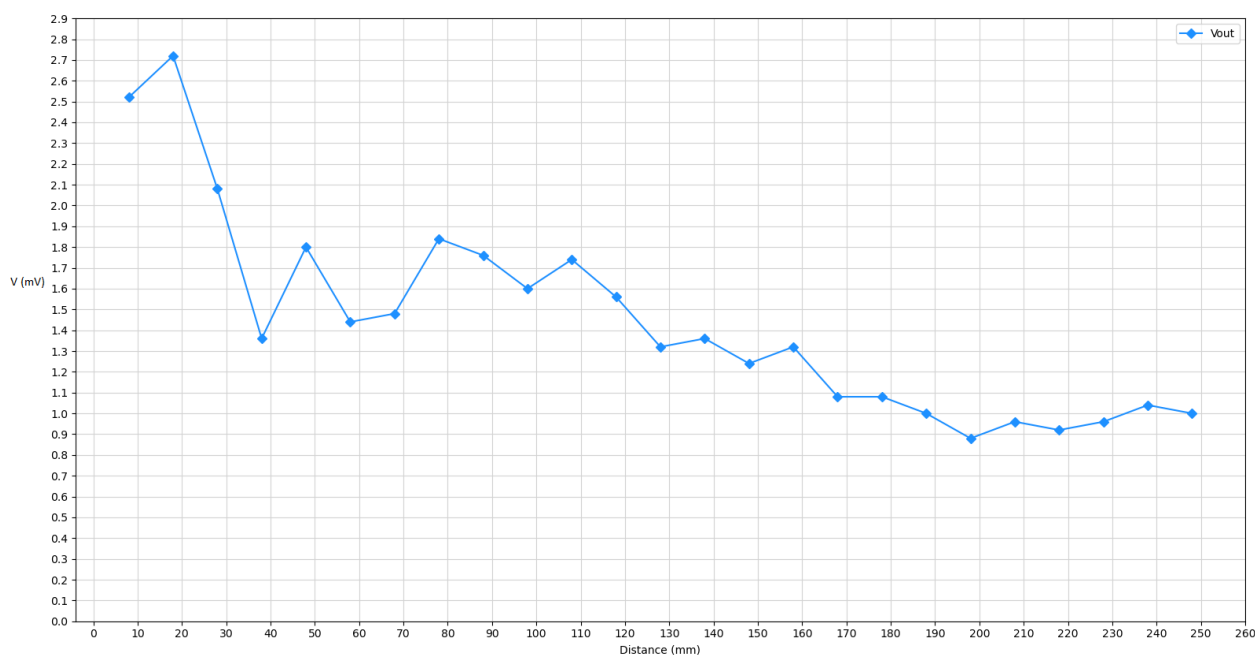
Σχήμα 4.7 Απεικόνιση της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου πόλωσης στο σήμα λήψης

Στην εφαρμογή του αισθητήρα θέσης της εργασίας, ο καθορισμός της θέσης στηρίζεται στην χρονική διαφορά του σήματος λήψης με διέγερσης. Το σήμα ανεξάρτητα από το ύψος της μέγιστης τιμής του ενισχύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακό παλμό και επομένως η αύξηση ή η μείωση της μέγιστης τιμής του δεν επηρεάζει αισθητά την ακρίβεια της μέτρησης. Αντιθέτως σε περίπτωση αντιστροφής της πολικότητας του, δεδομένου ότι υπάρχουν δύο αντίστροφοι παλμοί που απέχουν χρονικά μερικά μs , θα επηρεαστεί η ακρίβεια της μέτρησης καθώς θα ψηφιοποιηθεί διαφορετικός παλμός από αυτόν που αναμένεται. Τέλος, σε περίπτωση μηδενισμού του σήματος ο αισθητήρας δεν θα είναι ικανός να λάβει μέτρηση με αποτέλεσμα να μην είναι λειτουργικός υπό την επίδραση σταθερών μαγνητικών πεδίων με τιμή αντίστοιχη αυτής που προκαλείται από το πηνίο πόλωσης για τιμές κοντά στα -30 mA .

Συμπερασματικά η αποτελεσματικότητα του αισθητήρα επηρεάζεται από σταθερά μαγνητικά πεδία και επομένως πρέπει να μονωθεί μαγνητικά από το περιβάλλον λειτουργίας του.

4.2.2 Ανομοιομορφία

Η εξάρτηση της μέγιστης τάσης V_0 στο πηνίο λήψης από την απόσταση μεταξύ πηνίου διέγερσης και πηνίου λήψης, ορίζεται ως ανομοιομορφία. Για την πειραματική μελέτη της ιδιότητας αυτής λήφθηκαν 25 μετρήσεις της μέγιστης τιμής του σήματος λήψης στην συνολική διάταξη. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν από την θέση $x_0 = 80 \text{ mm}$, δηλαδή για απόσταση 8 cm μεταξύ πηνίου λήψης και διέγερσης, και με βήμα 10 mm μετρήθηκε η τάση του σήματος λήψης μέχρι την θέση $x_{24} = 248 \text{ mm}$. Η κίνηση του πηνίου διέγερσης πραγματοποιήθηκε με ακρίβεια με την χρήση του βηματικού μοτέρ, η αρχική όμως απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων μετρήθηκε με χρήση χάρακα και ενδέχεται να αποκλίνει από την πραγματική. Επίσης η τάση V_{out} μετρήθηκε απευθείας στα άκρα του πηνίου λήψης και δεν χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα λήψης.



Σχήμα 4.8 Εξάρτηση της μέγιστης τάσης στα άκρα του πηνίου λήψης από την απόσταση του από το πηνίο διέγερσης

Από τις παραπάνω μετρήσεις (σχήμα 5.8) είναι προφανής η απόσβεση του ελαστικού παλμού καθώς αυξάνεται η απόσταση που διανύει. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η πραγματική καμπύλη ανομοιομορφίας του MDL είναι πιο γραμμική απο αυτήν που προέκυψε απο τις μετρήσεις στην διάταξη της εργασίας. Οι διακυμάνσεις του γραφήματος στο σχήμα 4.8 οφείλονται σε τοπικές μηχανικές τάσεις που μπορούν να εξαλεθθούν με

θερμική κατεργασία και στην συνέχεια με ανόπτηση τάσης-ρεύματος (stress-current annealing) του υλικού της γραμμής MDL. Επίσης, η μεγάλη απόκλιση των τιμών σε περιοχές κοντά στο πηνίο λήψης σε σχέση με το υπόλοιπο μήκος της γραμμής MDL οφείλεται στην μαγνητική πόλωση της περιοχής μεταξύ των δύο πηνίων από την παλμική διέγερση του κινητού πηνίου. Στο πλαίσιο του αισθητήρα θέσης της εργασίας, όπως αναφέρθηκε κατά την εξέταση του bias field effect, η μέτρηση της θέσης δεν επηρεάζεται από την μέγιστη τάση του σήματος λήψης και επομένως η ανομοιομορφία έχει αμελητέα επίδραση στην αποτελεσματικότητα του αισθητήρα για μικρές αποστάσεις.

4.2.3 Πλάτος παλμού διέγερσης ή απόκριση συχνότητας

Η τάση εξόδου στο πηνίο λήψης εξαρτάται επίσης και από το πλάτος του παλμού διέγερσης. Πραγματοποιήθηκαν 4 διεγέρσεις με διαφορετικό εύρος παλμού διέγερσης και μελετήθηκε η απόκριση του πηνίου λήψης στον παλμογράφο (σχήμα 5.9).



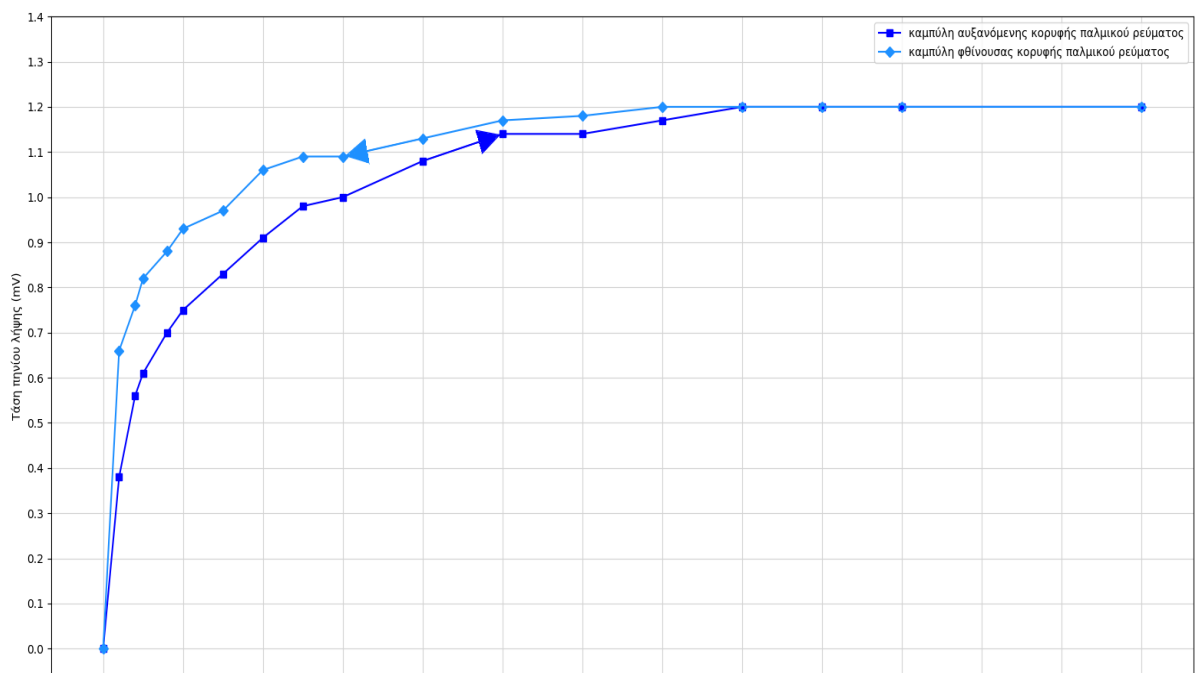
Σχήμα 4.9 Απεικόνιση του σήματος εξόδου για διαφορετικό εύρος παλμού διέγερσης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, η τάση εξόδου ακολουθεί την πρώτη παράγωγο της μαγνητικής ροής που προκαλεί ο διαδιδόμενος ελαστικός παλμός λόγω του αντίστροφου μαγνητοσυστολικού φαινομένου. Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται ο διαχωρισμός των δύο αντίστροφων παλμών με την αύξηση του εύρους του παλμού διέγερσης, όπως

εξετάστηκε και στην θεωρητική μελέτη του MDL. Για τις ανάγκες του αισθητήρα θέσης, δεν είναι επιθυμητός ο διαχωρισμός αυτός, καθώς μπορεί να προκληθεί σκανδαλισμός στο κύκλωμα λήψης και να δοθεί δεύτερος ψηφιακός παλμός στον μικροελεγκτή σε μικρό χρονικό διάστημα από τον επιθυμητό παλμό.

4.2.4 Υστέρηση

Υστέρηση ενός MDL είναι ένα υψηλά μη γραμμικό φαινόμενο και ορίζεται ως η διαφορά της συνάρτησης της τάσης εξόδου $V_o(I_e)$ μεταξύ των τιμών που παίρνει για μέγιστο παλμικό ρεύμα I_e και για μηδενικό ρεύμα I_e . Πραγματοποιήθηκαν 18 μετρήσεις της μέγιστης τιμής του σήματος στο πηνίο λήψης μεταβάλλοντας την κορυφή του παλμικού ρεύματος του πηνίου διέγερσης. Στο διάστημα τιμών από 0 έως 1 A η κορυφή παλμικού ρεύματος μεταβλήθηκε με βήμα 0.2 A, στο διάστημα 1 A έως 10 A με βήμα 1 A, και πραγματοποιήθηκε και μία μέτρηση με κορυφή παλμικού ρεύματος στα 13 A. Το εύρος του παλμού διέγερσης ορίστηκε στα 1.13 μ s. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν από 0 A, αυξάνοντας βηματικά την τάση τροφοδοσίας στο πηνίο διέγερσης μέχρι την τιμή ρεύματος 13 A. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή το ρεύμα μειωνόταν βηματικά από την τιμή 13 A μέχρι να μηδενιστεί. Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος στο πηνίο διέγερσης έγινε στα άκρα της αντίστασης στην πηγή του mosfet του κυκλώματος διέγερσης.

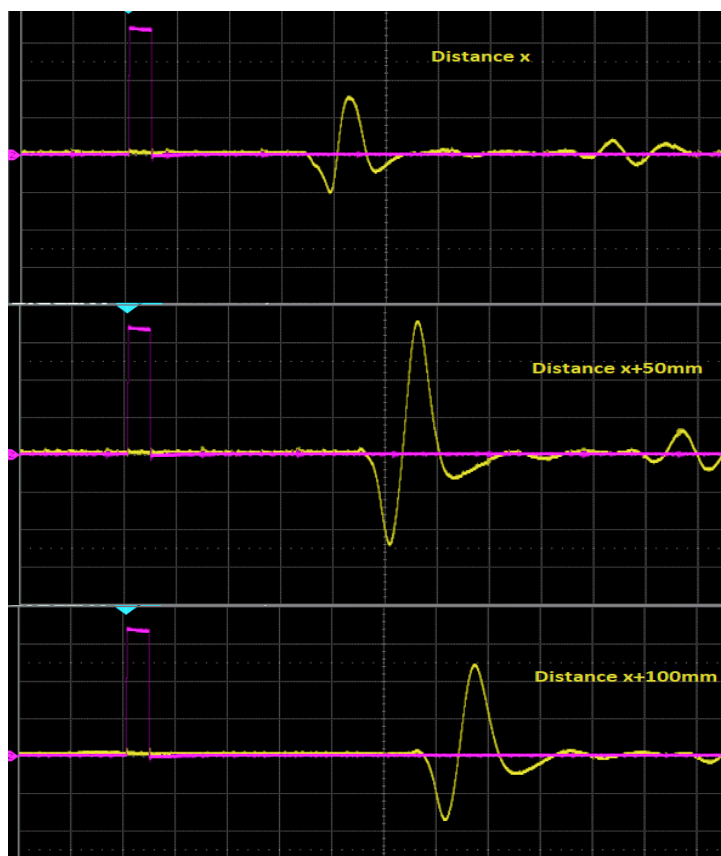


Σχήμα 4.10 Απεικόνιση της υστέρησης στο MDL της διάταξης

Από το παραπάνω γράφημα των μετρήσεων (σχήμα 5.10) φαίνεται η μη γραμμική απόκριση του MDL στην περιοχή ρεύματος διέγερσης 0 έως 8 A. Επίσης, παρατηρείται διαφοροποίηση της φθίνουσας από την αύξουσα καμπύλη που επιβεβαιώνει την εξάρτηση της απόκρισης σε προηγούμενη κατάσταση διέγερσης. Η υστέρηση αυτή είναι μικρής κλίμακας και δεν επηρεάζει την λειτουργικότητα του αισθητήρα θέσης, ιδιαίτερα για διέγερση με κορυφή παλμικού ρεύματος 8 A όπου και παρατηρείται ο κορεσμός του σήματος εξόδου.

4.2.5 Καθυστέρηση απόκρισης και ταχύτητα διάδοσης ελαστικού παλμού

Στην καθυστέρηση απόκρισης του MDL στηρίζεται ο αισθητήρας θέσης της εργασίας, δηλαδή εκμεταλλεύεται την χρονική διαφορά μεταξύ της στιγμής της διέγερσης και της λήψης του ελαστικού παλμού για τον προσδιορισμό της θέσης του κινητού στοιχείου στον άξονα του MDL.



Σχήμα 4.11 Απεικόνιση καθυστέρησης απόκρισης με αύξηση απόστασης μεταξύ πηνίων διέγερσης και λήψης. Μωβ χρώμα ο παλμός διέγερσης και κίτρινο χρώμα το σήμα MDL

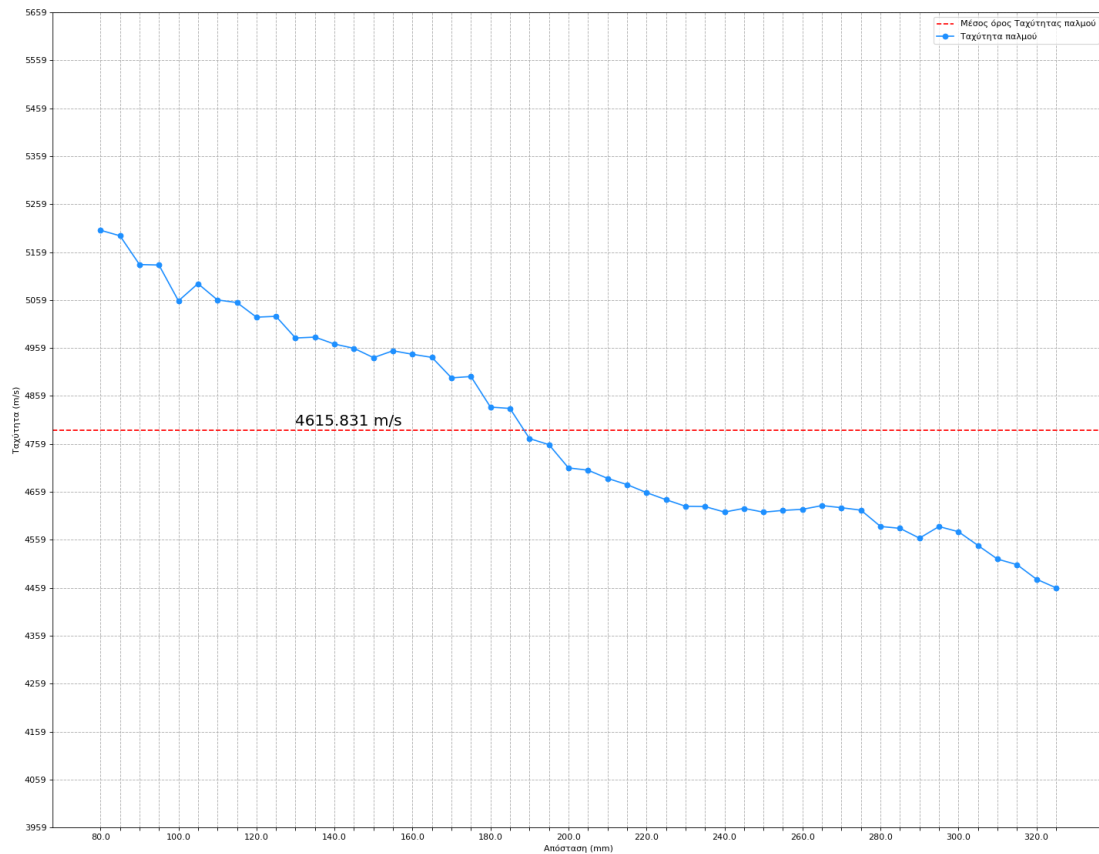
Στο σχήμα 5.11 φαίνεται η απόκριση της διάταξης για τρεις θέσεις του πηνίου διέγερσης. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της απόστασης μεταξύ του πηνίου διέγερσης και λήψης αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για την ανίχνευση του ελαστικού παλμού. Επομένως για τον προσδιορισμό της θέσης του κινούμενου πηνίου απαιτείται η εύρεση της ταχύτητας διάδοσης του παλμού ούτως ώστε να μπορεί να βρεθεί και η θέση από τον τύπο :

$$dx = v \cdot dt \quad (5.3)$$

Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης του ελαστικού παλμού στην γραμμή MDL θα πραγματοποιηθεί η αντίστροφη διαδικασία της εύρεσης της θέσης, δηλαδή θα μετρηθεί η καθυστέρηση απόκρισης σε θέσεις του σημείου διέγερσης όπου η απόσταση του από το πηνίο λήψης είναι γνωστή, και η ταχύτητα θα δοθεί από τον τύπο της ταχύτητας:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (5.4)$$

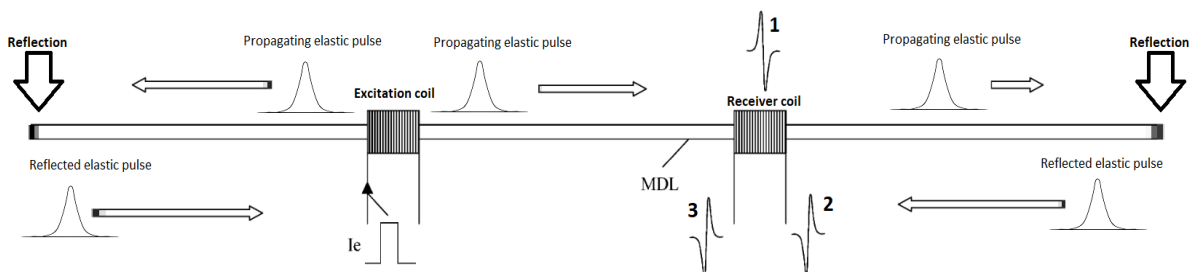
Ξεκινώντας από μία αρχική θέση $x_0 = 80 \text{ mm}$, και κινούμενοι με βήμα 5 mm , θα βρεθούν οι χρόνοι $t_{80}, t_{85}, t_{90} \dots t_{325}$ των θέσεων $x_{80}, x_{85} \dots x_{325}$, όπου t_i η καθυστέρηση απόκρισης του σήματος και x_i η θέση του κινητού πηνίου για κάθε βήμα της διαδικασίας. Στην συνέχεια θα βρεθεί η ταχύτητα v_i με την οποία έφτασε ο ελαστικός παλμός σε κάθε σημείο x_i της γραμμής από τον τύπο 5.4. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποτυπώθηκαν στο παρακάτω γράφημα (σχήμα 5.12) και παρατηρείται ότι η ταχύτητα διάδοσης δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων. Όπως και στην καμπύλη ανομοιομορφίας, οι διακυμάνσεις στις μετρήσεις της διάταξης οφείλονται σε τοπικές μηχανικές τάσεις. Επίσης η πραγματική καμπύλη ταχύτητας του ελαστικού παλμού στο MDL είναι πιο σταθερή και η φθίνουσα μορφή της στις μετρήσεις στην διάταξη της εργασίας, είναι αποτέλεσμα της μαγνητικής πόλωσης του υλικού της γραμμής λόγω της διέγερσης. Η πόλωση αυτή έχει μεγαλύτερη επίδραση στις μετρήσεις για μικρές αποστάσεις μεταξύ των δύο πηνίων, και ανάλογα αν το υλικό είναι θετικά ή αρνητικά μαγνητοσυστολικό, είτε σκληραίνει είτε μαλακώνει με αποτέλεσμα να αλλάζει και η ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού παλμού στην πολωμένη περιοχή.



Σχήμα 4.12 Ταχύτητα διάδοσης ελαστικού παλμού σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ πηνίου διέγερσης και λήψης

4.2.6 Ανακλάσεις

Με την διέγερση του κινητού πηνίου, προκαλούνται δύο ελαστικοί παλμοί αντίθετης κατεύθυνσης διάδοσης, οι οποίοι ανακλώνται με την άφιξη τους στα άκρα του μέσου διάδοσης. Κάθε ανακλώμενος παλμός ανιχνεύεται στο πηνίο λήψης με αντίστροφη πολικότητα σε σχέση με τον αρχικό λόγω της ανάκλασής του.



Σχήμα 4.13 Γραφική απεικόνιση των ανακλάσεων του ελαστικού παλμού στα δύο άκρα της γραμμής MDL. Στο πηνίο λήψης φτάνει πρώτα ο παλμός 1, και στην συνέχεια οι ανακλώμενοι παλμοί 2 και 3

Στην διάταξη της εργασίας, το ένα άκρο της γραμμής MDL βρίσκεται κοντά στο πηνίο λήψης (περίπου 15 cm), ενώ το άλλο σημαντικά μακρύτερα (45 cm). Στο σχήμα 5.14 φαίνεται ο αρχικός παλμός καθώς και η ανάκλαση από το άκρο της πλευράς του πηνίου λήψης. Η ανάκλαση από το άλλο άκρο της γραμμής δεν είναι ορατή καθώς τόσο λόγω ανάκλασης, αλλά και με την διάδοση στην γραμμή, εξασθενείται σημαντικά το πλάτος του ανακλώμενου παλμού.



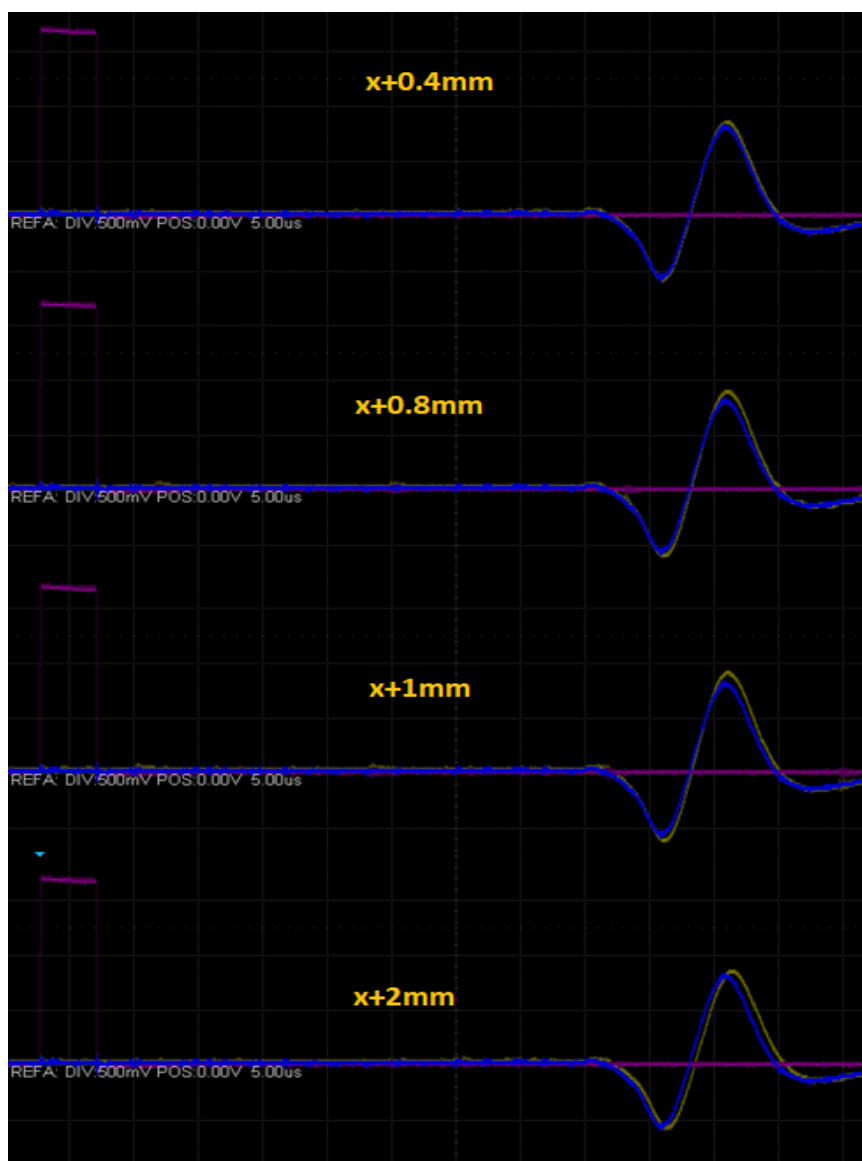
Σχήμα 4.14 Απεικόνιση στον παλμογράφο του ανιχνευόμενου και του ανακλώμενου παλμού, με επισήμανση της αναστροφής των κορυφών του ανακλώμενου παλμού

4.2.7 Ανάλυση

Για την εξέταση της ανάλυσης του MDL, εξετάστηκε η καθυστέρηση απόκρισης από διαδοχικά και κοντινά μεταξύ τους σημεία στην γραμμή MDL. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο τέτοιων σημείων όπου προκύπτει διαχωρίσιμη καθυστέρηση απόκρισης, δηλαδή διαφορετικοί ελαστικοί παλμοί, θα αποτελέσει και την ανάλυση του MDL.

Ξεκινώντας από μία θέση x και μετακινώντας το κινητό πηνίο με βήμα 0.1 mm, απεικονίστηκε στον παλμογράφο ταυτόχρονα το αρχικό σήμα λήψης από την θέση x , καθώς και τα σήματα που προέκυψαν από τις διαδοχικές μετατοπίσεις, αξιοποιώντας την λειτουργία του παλμογράφου SAVE/RECALL που αποθηκεύει και ανακαλεί προηγούμενες κυματομορφές.

Στο σχήμα 5.15 απεικονίζονται στιγμιότυπα της παραπάνω διαδικασίας, όπου με μπλε χρώμα απεικονίζεται η αρχική κυματομορφή στην θέση x, ενώ με κίτρινο η κυματομορφή που προκύπτει όταν το κινητό πηνίο έχει μετατοπιστεί μια δεδομένη απόσταση από την αρχική θέση x. Παρατηρείται ότι οι παλμοί δύο διαφορετικών θέσεων αρχίζουν να διαχωρίζονται για μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη των 0.4 mm, με πιο ξεκάθαρο διαχωρισμό για απόσταση μεγαλύτερη του 1 mm. Αξίζει να αναφερθεί ότι με από πλέξη της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης λόγω διέγερσης, καθώς και με κατάλληλη διεργασία του υλικού της γραμμής καθυστέρησης, η αβεβαιότητα και η ευαισθησία του MDL είναι της τάξης των 0.05 με 0.1 mm.



Σχήμα 4.15 Απεικόνιση στον παλμογράφο του σήματος λήψης για κοντινές μεταξύ θέσεις του πηνίου διέγερσης για την μελέτη της ανάλυσης του MDL

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

ΘΕΣΗΣ

Ύστερα από την περιγραφή της διάταξης του αισθητήρα καθώς και της συνολικής διάταξης, στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα αναλυθεί η λειτουργία και η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αισθητήρα θέσης. Για τον σκοπό αυτό θα αξιοποιηθεί το σύστημα γραμμικής κίνησης της συνολικής διάταξης και θα ληφθούν υπόψη και τα συμπεράσματα από την πειραματική μελέτη των ιδιοτήτων του MDL. Στην συνέχεια θα εξεταστεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης του αισθητήρα σε ένα σύστημα 3d printer τόσο για την βαθμονόμηση της γραμμικής κίνησης των αξόνων του, καθώς και σαν σύστημα ανάδρασης κατά την λειτουργία του.

5.1 Περιγραφή λειτουργίας αισθητήρα θέσης

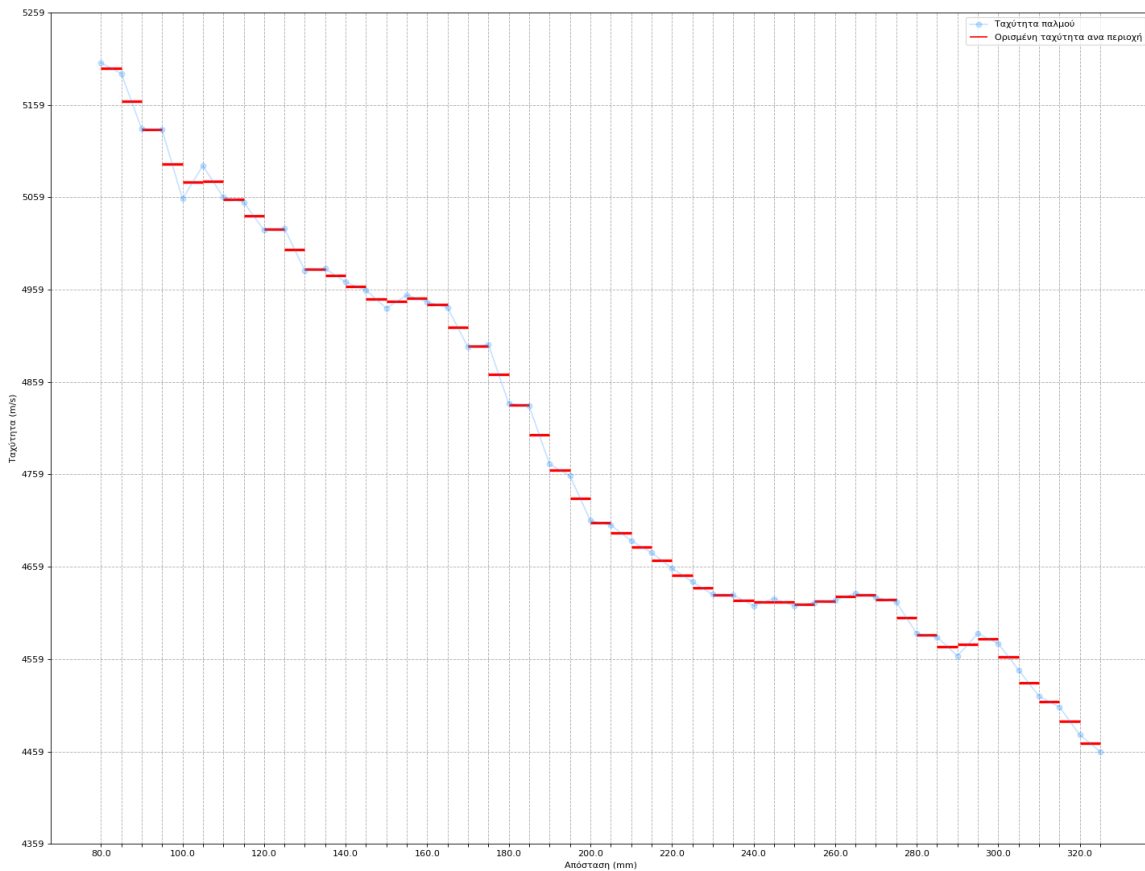
Ο αισθητήρας στηρίζεται στην ιδιότητα της καθυστέρησης απόκρισης του MDL. Πιο συγκεκριμένα, με την μέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ την στιγμής της διέγερσης και της λήψης, και με γνωστή πλέον την ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού παλμού όπως προέκυψε από την πειραματική μελέτη στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα μπορεί να προσδιοριστεί και η θέση του κινητού πηνίου από τον τύπο 5.3.

Από το γράφημα στο σχήμα 5.12 όμως είναι προφανές ότι η ταχύτητα δεν έχει σταθερή τιμή και η χρήση του μέσου όρου όλων των καταγεγραμμένων τιμών θα ήταν προβληματική υλοποίηση. Επομένως η γραμμή MDL θα χωριστεί σε διαστήματα μήκους 5mm, με άκρα κάθε διαστήματος τα σημεία του προηγούμενου γραφήματος όπου η ταχύτητα είναι γνωστή, και σε κάθε τέτοια περιοχή θα οριστεί ως ταχύτητα παλμού ο μέσος όρος των ταχυτήτων των άκρων του διαστήματος. Δηλαδή αν x_i με $i = 0,1,\dots,48$ τα σημεία του γραφήματος ταχύτητας και τα άκρα των διαστημάτων, με $x_0 = 80mm$ και $x_{48} = 325mm$, τότε στο διάστημα $[x_0, x_1]$ ή $[80mm, 85mm]$ θα αντιστοιχεί ταχύτητα:

$$v_{0,1} = \frac{v_0 + v_1}{2} \quad (6.)$$

όπου v_0 και v_1 οι ταχύτητα με την οποία έφτασε ο παλμός στα σημεία x_0 και x_1 αντίστοιχα. Έτσι προκύπτει το παρακάτω γράφημα (σχήμα 6.1) όπου απεικονίζει την ταχύτητα με την

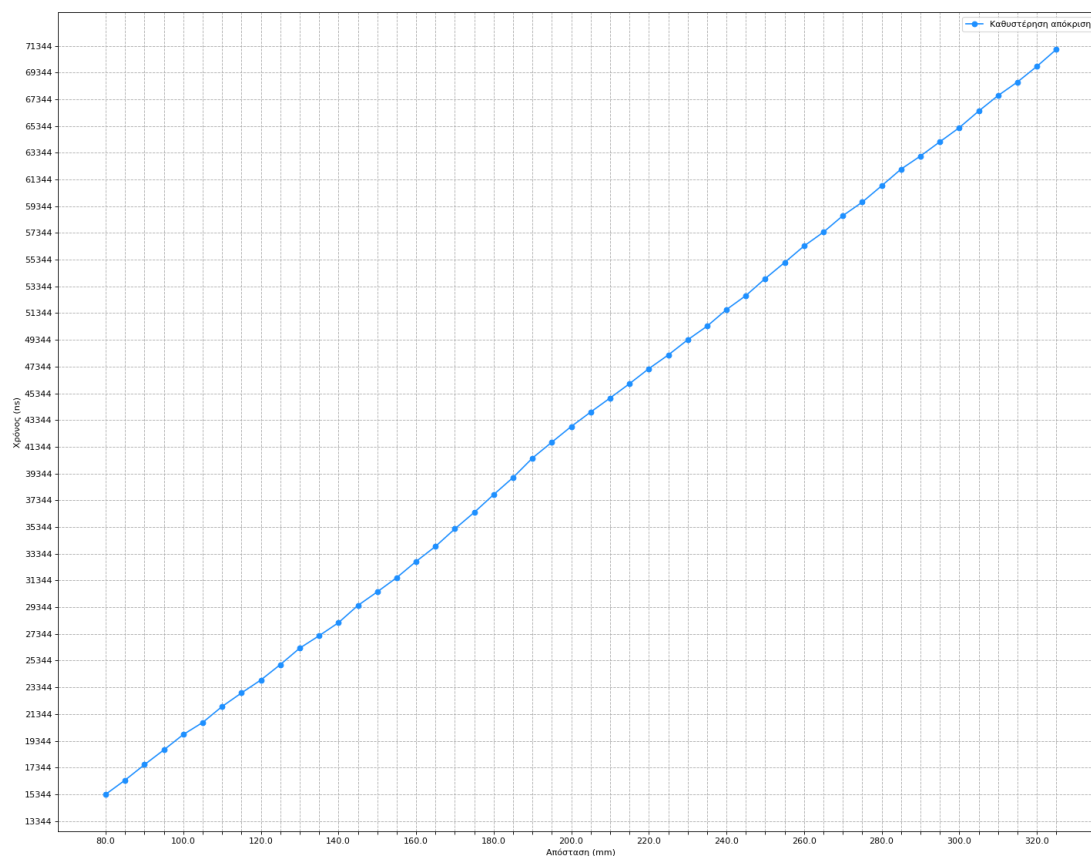
οποία ταξιδεύει ο ελαστικός παλμός στα σημεία των περιοχών που ορίστηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 5.1 Απεικόνιση ταχύτητας με την οποία ταξιδεύει ο ελαστικός παλμός στα σημεία των περιοχών που ορίστηκαν από τον διαμερισμό της γραμμής MDL σε διαστήματα των 5mm (κόκκινο) και η αρχική καμπύλη ταχύτητας (μπλε)

Έχοντας ορίσει την ταχύτητα με την οποία φτάνει ο παλμός σε κάθε περιοχή της γραμμής, απομένει να βρεθεί το κριτήριο το οποίο θα καθορίζει ποια ταχύτητα θα επιλεγεί για τον προσδιορισμό της θέσης του κινητού πηνίου, όταν λαμβάνεται η μέτρηση της καθυστέρησης της απόκρισης, δηλαδή της χρονικής διαφοράς μεταξύ διέγερσης και λήψης. Για τον σκοπό αυτό μετρήθηκε η καθυστέρηση της απόκρισης t_i , όταν το κινητό πηνίο διέγερσης βρέθηκε στα άκρα των παραπάνω διαστημάτων, δηλαδή στις θέσεις x_i , και τα αποτελέσματα αποτυπώθηκαν στο σχήμα 6.2. Πλέον μία νέα μέτρηση του αισθητήρα που θα επιστρέφει έναν χρόνο $dt = t_{receive} - t_{excite}$, θα μπορεί να συγκριθεί με τους χρόνους t_i και να προσδιοριστεί η περιοχή που βρίσκεται το κινητό πηνίο, και χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη ταχύτητα v_i της περιοχής, να βρεθεί η ακριβή θέση από τον τύπο:

$$x_{moving\ coil} = dt \cdot v_i \quad (6.2)$$



Σχήμα 5.2 Απεικόνιση της καθυστέρησης απόκρισης για θέσεις του κινητού πηνίου τα άκρα των ορισμένων διαστημάτων στην γραμμή MDL

5.2 Αξιολόγηση αισθητήρα

Η αποτελεσματικότητα του αισθητήρα θα αξιολογηθεί με τον καθορισμό των στατικών χαρακτηριστικών του όπως το εύρος, η πιστότητα, η ακρίβεια και η ανάλυση.

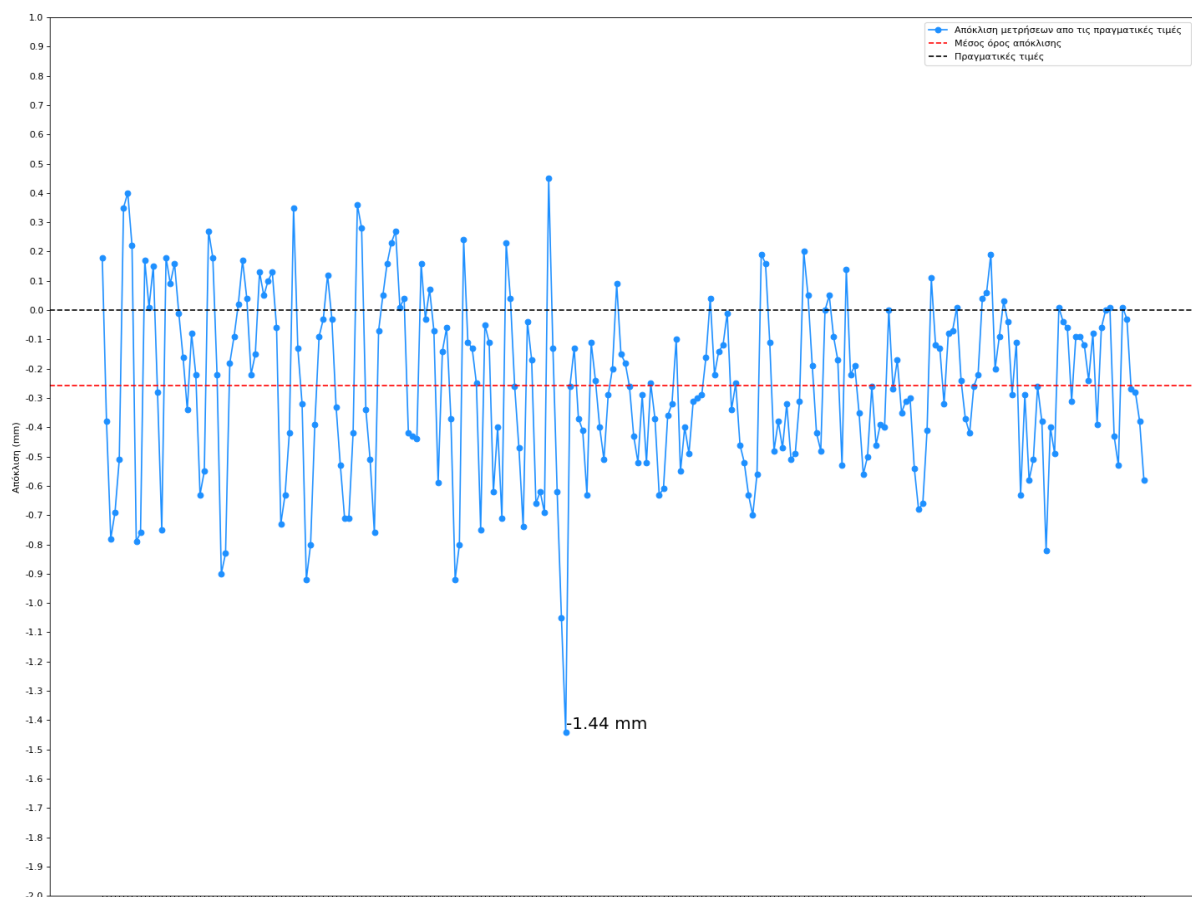
5.2.1 Εύρος (range)

Εύρος (range) ορίζεται ως η ελάχιστη και μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρηθεί. Το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα λόγω κατασκευής είναι από 80mm έως 325mm. Με επιμήκυνση της γραμμής MDL το εύρος θα μπορούσε να αυξηθεί εντός ορίων ώστε ο ελαστικός παλμός να μην αποσβένει λόγω απόστασης και να είναι ανιχνεύσιμος από το πηνίο λήψης. Αντιθέτως αύξηση του εύρους με μείωση του κάτω ορίου των 80mm θα ήταν προβληματική

επιλογή, καθώς λόγω εγγύτητας των δύο πηνίων, το bias field effect από την διέγερση θα είχε ακόμα μεγαλύτερη επίδραση στην λήψη του παλμού.

5.2.2 Πιστότητα (accuracy)

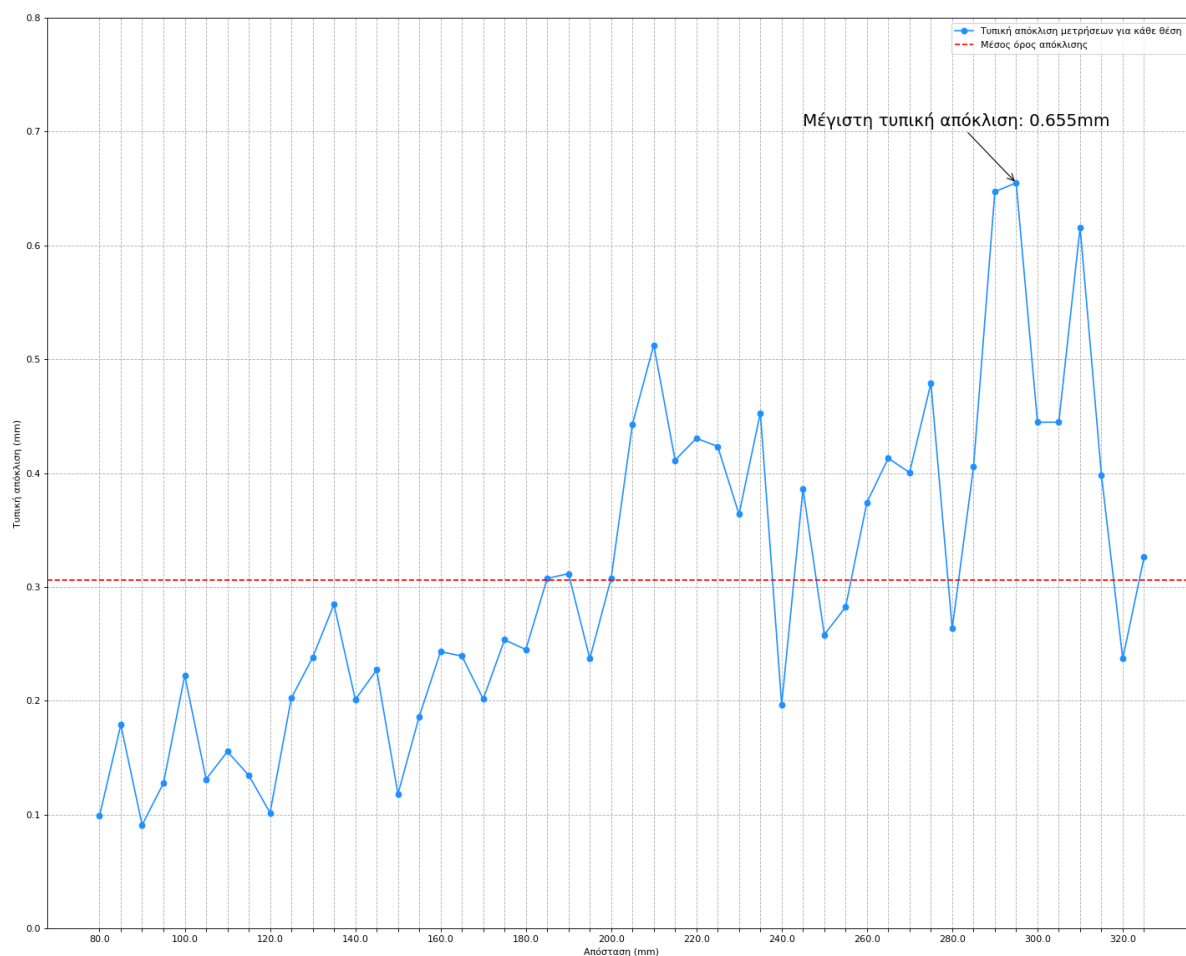
Η πιστότητα (accuracy) σχετίζεται με το πόσο οι μετρήσεις πλησιάζουν την φυσική πραγματικότητα. Πιο συγκεκριμένα, πιστότητα ορίζεται η μέγιστη απόκλιση που μπορεί να υπάρξει μεταξύ των μετρήσεων και των πραγματικών τιμών του μετρούμενου μεγέθους [24]. Για τον υπολογισμό της πιστότητας του αισθητήρα, το κινητό πηνίο μετακινήθηκε από την θέση 80mm στην θέση 325mm με βήμα 1mm. Σε κάθε βήμα συγκρίθηκε η μέτρηση θέσης που επέστρεψε ο αισθητήρας με την πραγματική θέση όπως αυτή ορίζεται από την ακρίβεια του συστήματος γραμμικής κίνησης της συνολικής διάταξης. Η απόκλιση των μετρήσεων από τις πραγματικές τιμές για κάθε θέση του κινητού πηνίου αποτυπωθήκαν γραφικά στο σχήμα 6.3. Από το γράφημα παρατηρείται ότι η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή απόκλιση είναι -1.44mm στην θέση 189mm, ενώ η μέση τιμή της απόκλισης είναι -0.258 mm.



Σχήμα 5.3 Απόκλιση των μετρήσεων απόστασης από τις πραγματικές τιμές για κάθε θέση του κινητού πηνίου ανά 1mm

5.2.3 Ακρίβεια (precision)

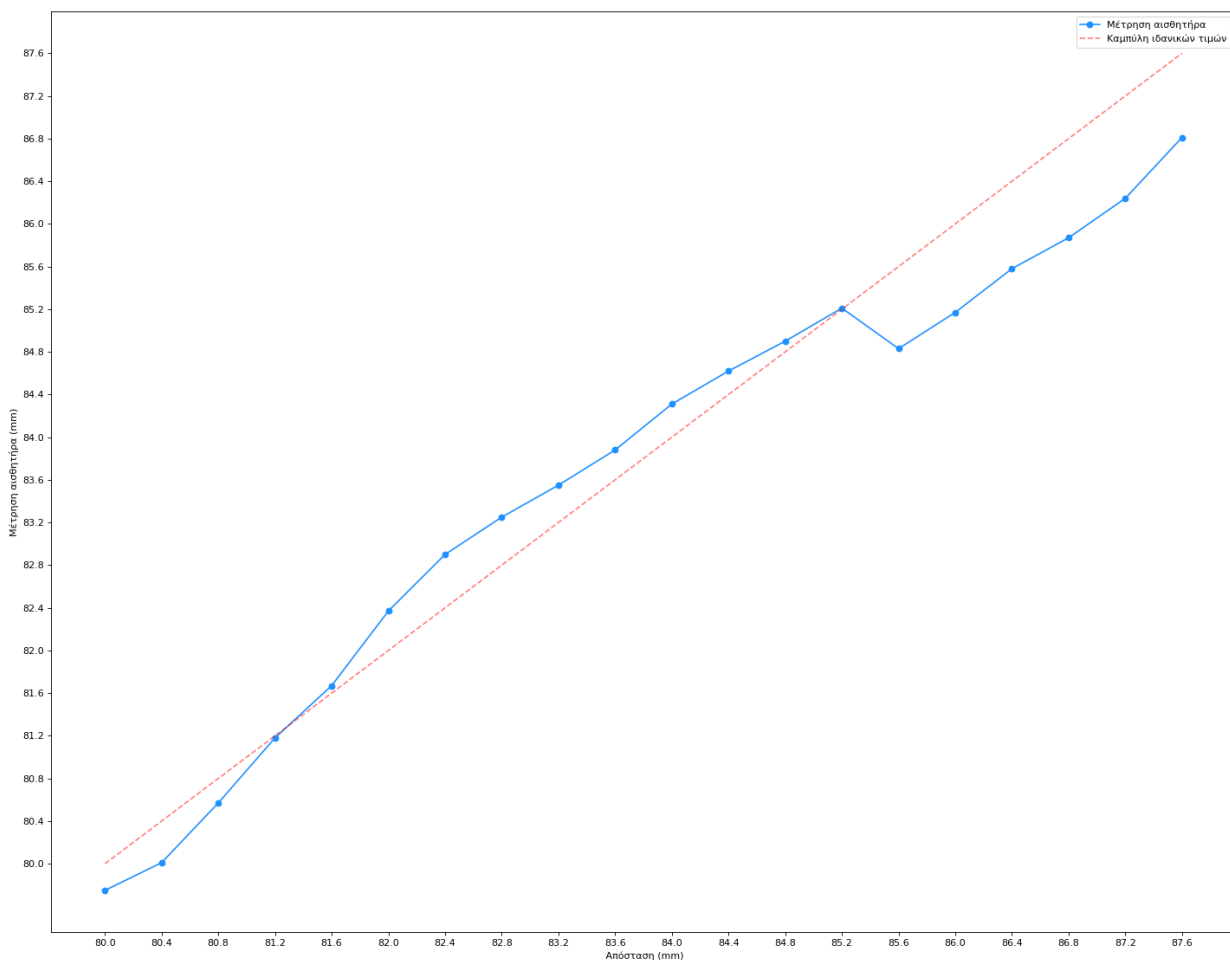
Ο όρος ακρίβεια (precision) εκφράζει τον βαθμό αναπαραγωγιμότητας μιας μέτρησης, δηλαδή πόσο μεγάλη είναι η διασπορά των αποτελεσμάτων για μεγάλο αριθμό μετρήσεων της ίδιας τιμής. Για τον προσδιορισμό της ακρίβειας για άλλη μια φορά το κινητό πηνίο μετακινήθηκε από την θέση 80mm στην θέση 325mm αλλά με βήμα 5mm. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε 5 φορές και συγκρίθηκαν οι μετρήσεις όλων των επαναλήψεων της διαδικασίας για κάθε θέση. Για την αξιολόγηση της διασποράς των μετρήσεων σε κάθε θέση θα χρησιμοποιηθεί ο στατιστικός όρος της τυπικής απόκλισης που εκφράζει πόσο αποκλίνουν τα δεδομένα ενός συνόλου από τον μέσο όρο του συνόλου. Έτσι προέκυψε το γράφημα στο σχήμα 6.4 όπου απεικονίζεται η τυπική απόκλιση των μετρήσεων όλων των επαναλήψεων, για κάθε θέση της γραμμής ανά 5mm. Από το γράφημα προκύπτει μέγιστη τυπική απόκλιση $\sigma_{max} = 0.6555mm$ στην θέση 295mm και ο μέσος όρος της τυπικής απόκλισης όλων των σημείων $\sigma_{mean} = 0.31mm$.



Σχήμα 5.4 Γράφημα της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων που προέκυψαν από τις 5 επαναλήψεις, για κάθε θέση της γραμμής ανά 5 mm

5.2.4 Ανάλυση (resolution)

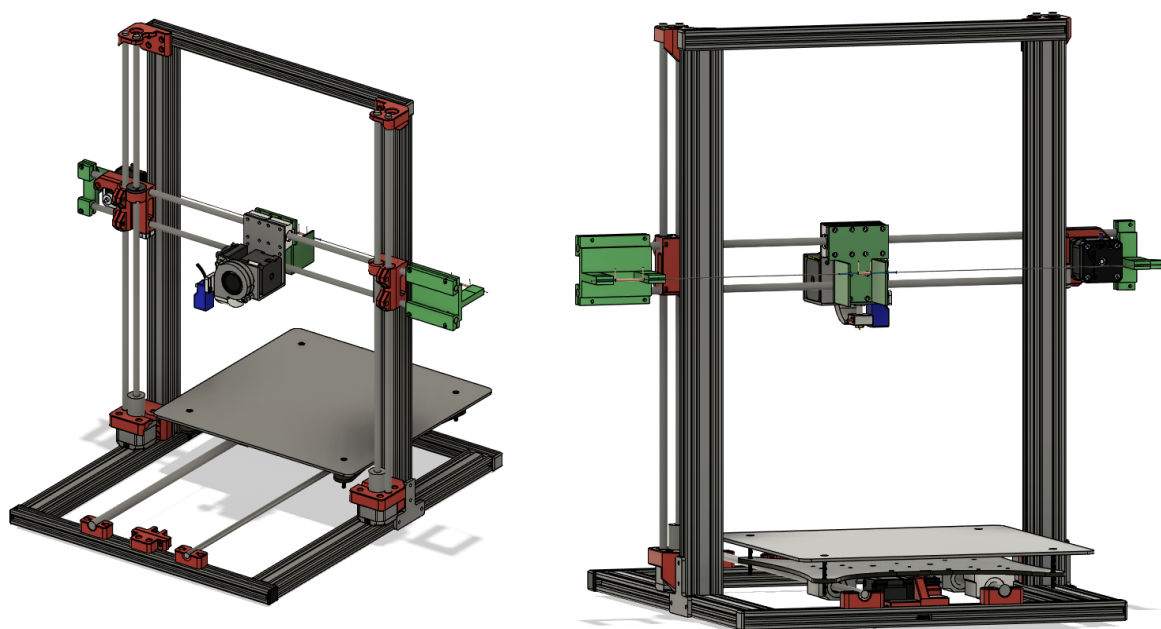
Ανάλυση ενός αισθητήρα είναι η ελάχιστη μεταβολή που μπορεί να ανιχνεύσει στην ποσότητα που μετράει. Στην υποενότητα 5.2 μελετήθηκε η ανάλυση του MDL και εκτιμήθηκε στα 0.4 mm, επομένως και η ανάλυση του αισθητήρα δεν μπορεί να είναι μικρότερη του 0.4 mm καθώς στηρίζεται στην τεχνική MDL. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της απόστασης για άλλη μια φορά σε ένα τυχαίο επιλεγμένο διάστημα [80mm, 87.6mm], εντός του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα, μετακινώντας το πηνίο με βήμα 0.4mm για κάθε μέτρηση. Από το γράφημα που προέκυψε (σχήμα 6.5), αποδεικνύεται η ικανότητα του αισθητήρα να ανιχνεύσει την μεταβολή της θέσης, χωρίς βέβαια ικανοποιητική πιστότητα σε συγκεκριμένα σημεία, και επομένως η ανάλυση μπορεί να οριστεί στα 0.4mm.



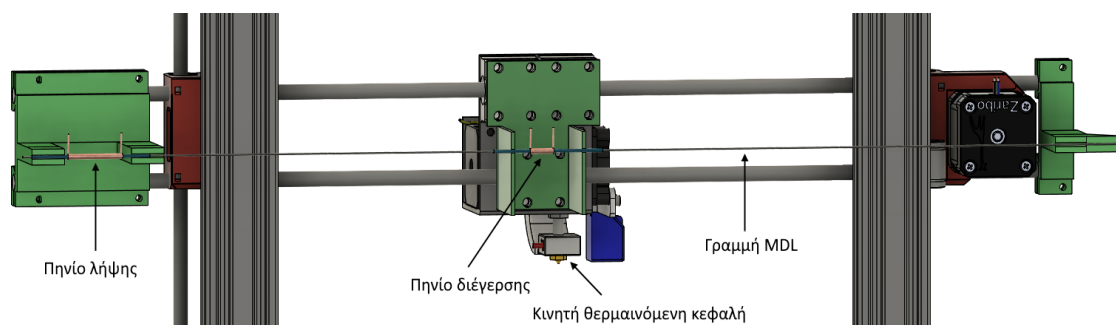
Σχήμα 5.5 Αποτελέσματα μετρήσεων για διαδοχικές μεταβολές της θέσης του κινητού πηνίου με βήμα 0.4mm

5.3 Λειτουργία αισθητήρα θέσης σε σύστημα 3d Printing

Ο αισθητήρας θέσης της εργασίας κατασκευαστικά θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε κάθε άξονα κίνησης ενός 3d Printer. Στο σχήμα 6.6 για λόγους ευκρίνειας αποτυπώνεται η τοποθέτηση του αισθητήρα για τον άξονα κίνησης X του συγκεκριμένου 3d Printer, και η ενσωμάτωση στους υπόλοιπους άξονες Y και Z θα μπορούσε να γίνει με ταυτόσημο τρόπο. Όπως και στην συνολική διάταξη που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πηνίο λήψης τοποθετείται στην άκρη του άξονα κίνησης και το πηνίο διέγερσης είναι προσδεμένο στο κινητό μέρος κάθε άξονα. Στο σχήμα 6.6 και 6.7 το πηνίο διέγερσης είναι συζευγμένο με την κινητή θερμαινόμενη κεφαλή και επομένως ο αισθητήρας έχει την ικανότητα μέτρησης της θέσης της κατά μήκος του άξονα κίνησης X.



Σχήμα 5.6 Δύο όψεις σχεδίου ενός 3d Printer με ενσωματωμένο αισθητήρα θέσης MDL στον άξονα κίνησης X [10]



Σχήμα 5.7 Κοντινή όψη του άξονα κίνησης X του 3d Printer με ενσωματωμένο αισθητήρα θέσης MDL

Όπως εξετάστηκε στο κεφάλαιο 3, ο αισθητήρας θέσης MDL θα μπορούσε να αξιοποιηθεί και για την βαθμονόμηση της κίνησης των αξόνων σε ένα σύστημα 3d Printer αλλά και ως σύστημα ανάδρασης για συνεχόμενο έλεγχο της κίνησης κατά την διαδικασία εκτύπωσης. Η πλειοψηφία όμως των 3d Printers έχει ανάλυση εκτύπωσης από 0.1mm έως 0.4mm που καθιστά την εφαρμογή αισθητήρα MDL μη δυνατή λόγω της μη ικανοποιητικής πιστότητας σε ανάλυση 0.4mm (σχήμα 6.5). Όμως σε συστήματα μεγαλύτερης κλίμακας με μικρότερη έμφαση στην ανάλυση εκτύπωσης και με προτεραιότητα την ταχύτητα και το μεγάλο μέγεθος εκτύπωσης, ο προτεινόμενος αισθητήρας θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στην βαθμονόμηση των αξόνων.



Σχήμα 5.8 Ανιχνεύσιμος παλμός στο πηνίο λήψης χωρίς παρεμβολές (πάνω) και με παρεμβολές από την λειτουργία βηματικού μοτέρ (κάτω)

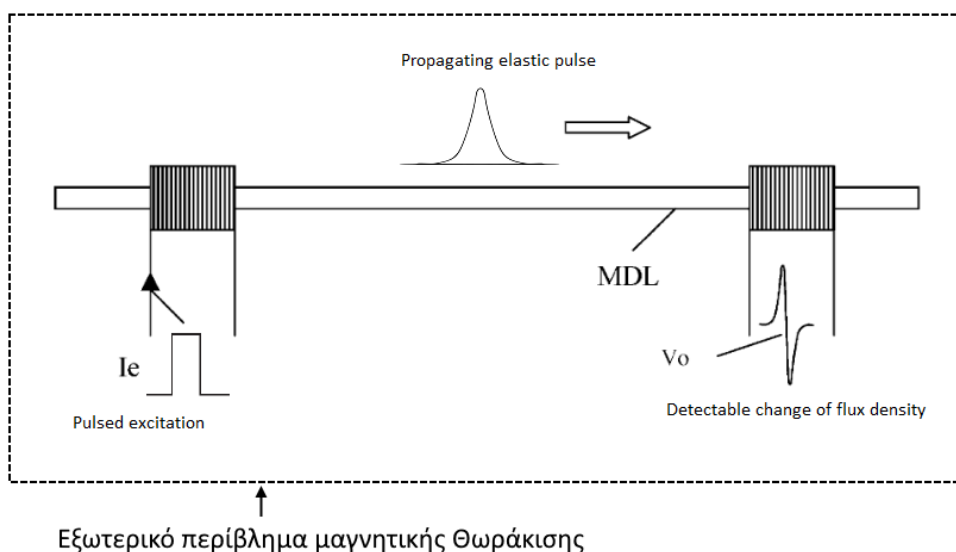
Αναφορικά με την υλοποίηση συστήματος ανάδρασης, ο αισθητήρας της εργασίας είναι ευάλωτος σε μαγνητικές παρεμβολές και δεν μπορεί να λάβει αξιόπιστες μετρήσεις κατά την λειτουργία του 3d Printer, καθώς τα βηματικά μοτέρ που μετακινούν τα κινητά μέρη των αξόνων προκαλούν μαγνητικό θόρυβο ο οποίος ανιχνεύεται από το πηνίο λήψης όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8. Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να καταπολεμηθεί με την μαγνητική θωράκιση (magnetic shielding) της διάταξης του αισθητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Συμπερασματικά ο αισθητήρας της εργασίας, με δεδομένη την πειραματική του φύση, εμφάνισε ενδιαφέροντα αποτελέσματα αναφορικά με την ικανότητα προσδιορισμού της θέσης του κινητού πηνίου. Αξιοποιώντας την τεχνική MDL επιτεύχθηκε η μέτρηση της θέσης με μέση τιμή της απόκλισης από την πραγματική μόλις -0.258 mm , ενώ η μέση διασπορά των μετρήσεων για κάθε θέση διαμορφώθηκε στα 0.31 mm . Οι αδυναμίες όμως της υλοποιούμενης διάταξης αποτρέπουν την εφαρμογή του αισθητήρα σε συστήματα 3d Printer, αλλά συγκεκριμένες βελτιώσεις θα μπορούσαν να αυξήσουν σημαντικά την ποιότητα των μετρήσεων και να επιτρέψουν την λειτουργία του και υπό αντίξοες συνθήκες όπως σε ένα μαγνητικά θορυβώδες περιβάλλον. Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα ακολουθήσουν οι προτεινόμενες βελτιώσεις.

6.1 Μαγνητική θωράκιση (Magnetic shielding)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μαγνητική φύση του αισθητήρα τον καθιστά ευαίσθητο σε εξωτερικές μαγνητικές παρεμβολές. Επομένως με μαγνητική θωράκιση της διάταξης μπορεί να επιτευχθεί μαγνητικά μονωμένο περιβάλλον λειτουργίας για σταθερότερη ανίχνευση του διαδεδομένου ελαστικού παλμού στο πηνίο λήψης (σχήμα 7.1).



Σχήμα 6.1 Απεικόνιση περιβλήματος μαγνητικής θωράκισης της διάταξης του αισθητήρα

6.2 Κυκλωματική απομόνωση επιμέρους κυκλωματικών διατάξεων

Μια επιπλέον βελτίωση αποτελεί η κυκλωματική απομόνωση των διαφόρων κυκλωματικών τμημάτων του αισθητήρα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε θόρυβος υψηλών συχνοτήτων στο κύκλωμα λήψης με την σύνδεση του μικροελεγκτή σε υπολογιστή. Επομένως με την χρήση οπτοζευκτών (optocoupler), ο ψηφιακός παλμός από το κύκλωμα λήψης θα μπορούσε να τροφοδοτηθεί στον μικροελεγκτή χωρίς την ύπαρξη κοινής γης, και έτσι ο θόρυβος από τον μικροελεγκτή δεν θα μεταφέρεται και στο ευαίσθητο κύκλωμα λήψης.

6.3 Καταπολέμηση θορύβου τροφοδοσίας

Για την λήψη των μετρήσεων για την τροφοδοσία χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες λιθίου λόγω της σταθερότητας στην τάση τροφοδοσίας, καθώς η χρήση εργαστηριακού τροφοδοτικού εισήγαγε θόρυβο κυμάτωσης (ripple noise) στα κυκλώματα του αισθητήρα. Συνεπώς για μεγαλύτερη ευελιξία στην τροφοδοσία θα μπορούσε να προστεθεί κύκλωμα πολλαπλασιαστή χωρητικότητας (capacitance multiplier) ώστε να αμβλύνεται ο θόρυβος αυτός.

6.4 Χρήση δευτέρου πηνίου λήψης

Μια επιπρόσθετη βελτίωση αποτελεί η προσθήκη δευτέρου πηνίου λήψης στο άλλο άκρο της γραμμής MDL ώστε να περιοριστεί η επίδραση από την πόλωση του υλικού της γραμμής λόγω της διέγερσης από το κινητό πηνίο. Για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των πηνίων λήψης και διέγερσης, η πολωμένη περιοχή αποτελεί μικρό μέρος του συνολικού μήκους που διαδίδεται ο ελαστικός παλμός και η ταχύτητα διάδοσης έχει πιο σταθερές τιμές. Επομένως με χρήση δευτέρου πηνίου λήψης, το πηνίο διέγερσης θα βρίσκεται είτε στην μέση της γραμμής, είτε σε απόσταση μεγαλύτερη της μέσης από τουλάχιστον ένα από τα δύο πηνία λήψης. Άρα με την επεξεργασία του ανιχνευόμενου παλμού μόνο από το πιο απόμακρο πηνίο λήψης σε κάθε μέτρηση, θα επιτευχθεί πιο σταθερή καμπύλη ταχύτητας διάδοσης του MDL που θα οδηγήσει και σε πιο ποιοτικές μετρήσεις θέσης.

6.5 Αντικατάσταση μικροελεγκτή με Field Programmable Gate Array (FPGA)

Ο μικροελεγκτής του αισθητήρα εκτελεί ικανοποιητικά τον σκοπό του αλλά δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση για την μέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ της στιγμής της διέγερσης και της λήψης. Η ρουτίνα διακοπής υλικού που εκτελείται με την άφιξη του ψηφιακού παλμού από το κύκλωμα λήψης, εκτελείται με μη σταθερή καθυστέρηση της τάξης μερικών εκατοντάδων ns. Για τον σκοπό της εργασίας μετρήθηκε η μέση τιμή διαδοχικών καθυστερήσεων της εκτέλεσης της ρουτίνας και υπολογίστηκε η μέση τιμή της στα 380 ns, η οποία αφαιρέθηκε από κάθε μέτρηση της χρονικής διαφοράς που υπολογίστηκε από τον μικροελεγκτή. Επομένως για καλύτερη ακρίβεια θα μπορούσε ο μικροελεγκτής να αντικατασταθεί από σύστημα συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA). Ένα τέτοιο σύστημα, με σωστό προγραμματισμό θα μπορούσε να επεξεργαστεί τον ψηφιακό παλμό του κυκλώματος λήψης με πιο αποτελεσματική και αξιόπιστη υλοποίηση διακοπής υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://www.electronicshub.org/different-types-sensors/>
- [2] <https://www.elprocus.com/magnetic-sensor-working-and-its-applications/>
- [3] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/magnetic-sensors-market>
- [4] E. Hristoforou, A. Ktena, “Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316 372–378, 2007
- [5] N.B. Ekreem, A.G. Olabi, T. Prescott, A. Rafferty, M.S.J. Hashmi, “An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties”, *Journal of Materials Processing Technology* 191 96–101, 2007
- [6] [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Magnetic_Properties/Magnetostriction](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Magnetic_Properties/Magnetostriction)
- [7] Feynman, Leighton, Sands, *The Feynman lectures on physics Vol. II*, Basic Books 1964
- [8] E. Hristoforou, “Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications”, *Measurement Science and Technology*, 14, R15-R47, 2003
- [9] A. Aharoni, *Introduction to the theory of ferromagnetism*, Oxford University Press, 1996
- [10] <https://github.com/MIKEYMCC/Crearibo>

- [11] E. Hristoforou, H. Chiriac, M. Neagu, "Pulse width effect on magnetostrictive amorphous ribbons and wires", *physica status solidi*, Volume 143, 391,1994
- [12] <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/magnetic/solenoid.html>
- [13] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>
- [14] E. Hristoforou, "Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 249 387–392,2002
- [15] J. Furthmüller, M. Fähnle, G. Herzer, " Theory of magnetostriction in amorphous and polycrystalline ferromagnets: I. Description of the formalism", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 69 79-88, 1987
- [16] M.J. Dapino, "On magnetostrictive materials and their use in smart material transducers". *Structural Engineering & Mechanics* J. 17. 1-28.
- [17] <https://3dprint.com/223235/slm-3d-printing-metallic-glass/>
- [18] <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [19] <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [20] <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [21] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [22] <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/layer-shifting/>
- [23] <https://www.pjrc.com/store/teensy36.html>

- [24] <https://www.thomsonlinear.com/en/products/motorized-lead-screws>
- [25] <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/13/sensor-terminology.html#:~:text=Back%20to%20top-,Accuracy,scale%20or%20in%20absolute%20terms.>
- [26] H. Chiriac, E. Hristoforou, Maria Neagu, I. Darie, Firuta Barariu, "Dependence of the sound velocity in $Fe_{77.5}Si_{7.5}Bi_{15}$ amorphous wires on the magnetic bias field" Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 157/158 229-230,1996