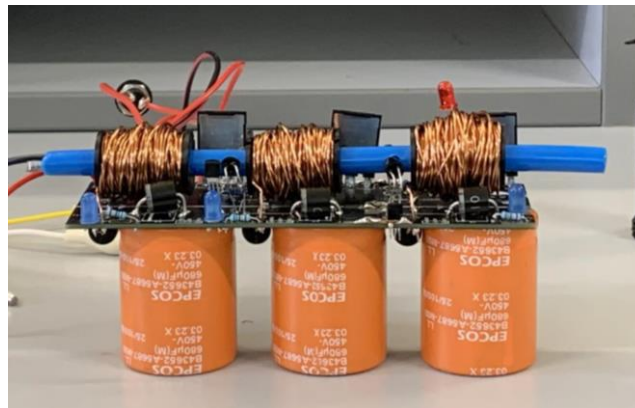


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση και υλοποίηση ενός ηλεκτρομαγνητικού
πυροβολικού συστήματος



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΠΕΤΙΚΑΣ

A.M. 518117

ΑΝΔΡΕΑΣ Σ. ΣΙΔΗΡΟΠΟΥΛΟΣ

A.M. 518134

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΙΟΡΔΑΝΗΣ ΚΙΟΣΚΕΡΙΔΗΣ

Τίτλος Π.Ε. Σχεδίαση και υλοποίηση ενός ηλεκτρομαγνητικού πυροβολικού συστήματος
Κωδικός Π.Ε. 23337

Όνοματεπώνυμο φοιτητών: Κωνσταντίνος Πετικός, Ανδρέας Σιδηρόπουλος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 19/11/2023

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 16/05/2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Κωνσταντίνου Πετικά και Ανδρέα Σιδηρόπουλου που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Η πτυχιακή εργασία με θέμα "Σχεδίαση, Κατασκευή και Ανάλυση της Λειτουργίας ενός Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης (EMA): Μια Προηγμένη Προσέγγιση στην Ηλεκτρομαγνητική Τεχνολογία για Πυροβολικά Συστήματα" αναλαμβάνει τη μελέτη και την ανάπτυξη ενός πλήρους συστήματος επιταχυντή σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιεί την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επιτάχυνσης. Είναι ένα σύστημα το οποίο επιταχύνει ένα σιδηρομαγνητικό αντικείμενο σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Η επιτάχυνση οφείλεται στην αξιοποίηση της δύναμης που αναπτύσσεται στο σιδηρομαγνητικό αντικείμενο εξαιτίας της μαγνητικής αντίδρασης.

Η πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της θεωρίας πίσω από τη λειτουργία των (EMA), τη σχεδίαση και την κατασκευή ενός πρωτότυπου μοντέλου, καθώς και στην ανάλυση της λειτουργίας του. Η εργασία μπορεί να επεκταθεί σε θέματα όπως ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός του (EMA), η ενσωμάτωση προηγμένων υλικών, η μείωση των απωλειών ενέργειας και η εφαρμογή του συστήματος σε πρακτικά σενάρια. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία θα συνδυάσει θεωρητική έρευνα, μοντελοποίηση και πειραματική ανάπτυξη για την κατανόηση και τη βελτίωση της τεχνολογίας του.

Πιο αναλυτικά το σύστημα (EMA) που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα. Το πρώτο τροφοδοτείται από μία μπαταρία, πολλαπλασιάζει την τάση μέσω μίας γεννήτριας υψηλής τάσης και φορτίζει ένα σύνολο από ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές. Το δεύτερο τμήμα μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος, η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια των πυκνωτών διοχετεύεται στα πηνία με σκοπό τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, το οποίο επιταχύνει το σιδηρομαγνητικό βλήμα. Για τον συγχρονισμό των πηνίων με το βλήμα χρησιμοποιούνται φωτοδιακόπτες, οι οποίοι ενεργοποιούν τα συγκεκριμένα ηλεκτρονικά ισχύος που απαιτούνται για την σειριακή έναυση των μαγνητικών παλμών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Επιταχυντής, σιδηρομαγνητικό, μαγνητικό πεδίο, ηλεκτρονικά ισχύος, φωτοδιακόπτες,

ABSTRACT

The thesis entitled "Design, Construction and Analysis of the Operation of a Magnetic Reaction Accelerator (EMA): an Advanced Approach to Electromagnetic Technology for Artillery Systems" undertakes the design and development of a complete ferromagnetic accelerator system using the principle of electromagnetic acceleration. It is a system that accelerates a ferromagnetic object to very high speeds. The acceleration is due to harnessing the force developed in the ferromagnetic object due to the magnetic reaction.

The thesis focuses on the study of the theory behind the operation of (EMA), design and construction of a prototype model, and analysis of its operation. The thesis can be extended to topics such as the optimized design of the (EMA), the integration of advanced materials, the reduction of energy losses and the application of the system in practical scenarios. In this way, the work will combine theoretical research, modelling and experimental development to understand and improve its technology.

More specifically, the system (EMA) presented in this paper is divided into two parts. The first one is powered by a battery, multiplies the voltage through a high voltage generator and charges a set of electrolytic capacitors. The second section through the power electronics, the stored electricity of the capacitors is fed to the coils in order to create a magnetic field, which accelerates the ferromagnetic projectile. To synchronize the coils with the projectile, photoelectric switches are used to activate the specific power electronics required for the serial triggering of the magnetic pulses.

KEYWORDS: Accelerator, ferromagnetic, magnetic field, power electronics, photoelectric switches,

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	2
ABSTRACT	3
1. Εισαγωγή	6
1.1 Στόχος της πτυχιακής εργασίας	7
1.2 Περιγραφή EMA.....	7
2. Θεμελιώδης αρχές ηλεκτρομαγνητισμού	8
2.1 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	8
2.2 Μαγνητικό πεδίο	9
2.3 Μαγνητική διαπερατότητα, μαγνήτιση, επιδεκτικότητα	9
2.4 Μαγνητική αντίδραση	10
2.5 Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού.....	10
2.6 Μαγνητικό πεδίο	11
2.7 Αυτεπαγωγή.....	12
2.8 Κατηγορίες και Ιδιότητες Μαγνητικών Υλικών	12
2.9 Βρόχος υστέρησης	13
2.10 Μαγνητική υστέρηση	14
2.11 Θερμοκρασία Curie.....	16
2.12 Συνεκτικό πεδίο.....	16
3. Ανάλυση Απωλειών και Συντελεστών Αυτεπαγωγής και Απόσβεσης σε Συστήματα EMA	18
3.1 Βασική λειτουργία σωληνοειδούς πηνίου	18
3.2 Πιθανές απώλειες EMA.....	19
3.3 Φαινόμενο αναρρόφησης ‘suck back’	20
3.4 Ελκτική δύναμη σωληνοειδούς.....	21
3.5 Συντελεστής απόσβεσης ζ	22
3.6 Συντελεστής αυτεπαγωγής.....	25
3.7 Απώλειες λόγω εσωτερικής ωμικής αντίστασης του πηνίου	26
3.8 Απώλειες λόγω υστέρησης	26
3.9 Απώλειες στα Θυρίστορ	27
3.10 Απώλειες δινορρευμάτων	27
3.11 Αντίσταση πηνίων	27
4. Σχεδιασμός και υλοποίηση του EMA	29
4.1 Σωληνοειδής εκτοξευτήρας	29

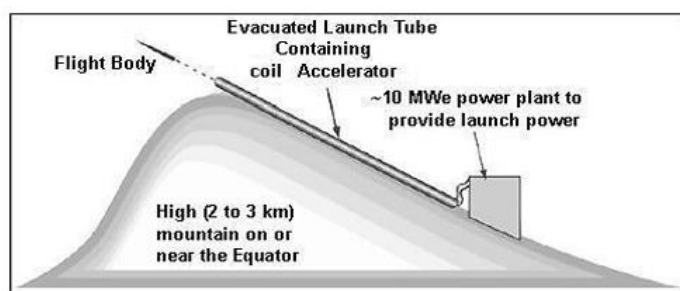
4.2 Προσανατολισμός σωληνοειδών.....	32
4.3 Πυκνωτές.....	32
4.4 Βλήμα.....	36
4.5 Σωληνοειδές.....	36
5. Σχεδιασμός ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του ΕΜΑ.....	37
5.1 Κύρια ημιαγώγιμα στοιχεία.....	37
5.2 Θυρίστορ 70TPS12.....	38
5.3 Τρανζίστορ S8050 BJT.....	42
5.4 Τροφοδοσία κυκλώματος.....	44
5.5 Έλεγχος του πηνίου με χρήση φωτοδιακόπτη.....	44
5.6 Δίοδοι.....	48
5.7 Κυκλωματικά διαγράμματα RLC του κυκλώματος και των πλακετών.....	52
5.8 Ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος ΕΜΑ.....	53
5.9 Απεικόνιση των εξαρτημάτων και της κατασκευής.....	58
5.10 Απεικόνιση της απόκρισης του κυκλώματος.....	62
6. Συμπεράσματα.....	63
6.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ/ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ.....	65

1.Εισαγωγή

Ο Επιταχυντής σιδηρομαγνητικών υλικών ο οποίος είναι βασισμένος στη μαγνητική αντίδραση είναι μια ιδέα η οποία υπάρχει από τις αρχές του 20ου αιώνα. Ο πρώτος λειτουργικός ευθύγραμμος Επιταχυντής Μαγνητικής Αντίδρασης (EMA) κατασκευάστηκε από τον Νορβηγό επιστήμονα Kristian Olaf Bernhard Birkeland το 1904. Ο επιταχυντής λειτούργησε, αλλά δεν παρήγαγε την υψηλή ταχύτητα κίνησης (600 m/s) που είχε προβλέψει. Η μέγιστη ταχύτητα που μπορούσε να πετύχει με τον πιο ισχυρό (EMA) ήταν 100 m/s, που μεταφράζεται σε πενιχρή εμβέλεια βλήματος 1 km. Από τότε και μέχρι τις αρχές του 1970 λίγες αναφορές και έρευνες υπάρχουν πάνω στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Τα τελευταία χρόνια όμως η συγκεκριμένη ιδέα κερδίζει το ενδιαφέρον όλο και περισσότερων επιστημόνων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην εξέλιξη των υπολογιστών και των ηλεκτρονικών ισχύος τα οποία έχουν μειώσει το κόστος κατασκευής καθώς και το κόστος της μοντελοποίησης.

Οι εφαρμογές του ευθύγραμμου (EMA) εκτείνονται από τον τομέα του διαστήματος, της ρομποτικής, του στρατού έως την καθημερινότητα. Ίσως η πιο ενδιαφέρουσα από αυτές, είναι η χρήση του ως συσκευή εκτόξευσης δορυφόρων στο διάστημα, αντικαθιστώντας έτσι τα συμβατικά συστήματα προώθησης. Τα συστήματα προώθησης πυραύλων με χημικά καύσιμα είναι ευρέως διαδεδομένα, έχουν υψηλή απόδοση και μεγάλη προωθητική δύναμη. Έπειτα είναι ακριβά και η αποθήκευσή τους χρήζει μεγάλης προσοχής καθώς περιέχουν ασταθή χημικά, τα οποία είναι βλαβερά για την υγεία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος.

Τα πλεονέκτημα του (EMA) έναντι άλλων συμβατικών συστημάτων προώθησης είναι ότι η λειτουργία του βασίζεται στην ηλεκτρική ενέργεια καθιστώντας τον φιλικό στο περιβάλλον και πολύ πιο οικονομικό ανά εκτόξευση σε σχέση με το κόστος των χημικών καυσίμων. Από προσομοιώσεις ενός τέτοιου συστήματος υπολογίζεται ότι το κόστος ανά εκτόξευση είναι 2000\$/kg [9], ενώ με τη χρήση χημικών καυσίμων απαιτείται το ποσό των 20000\$/kg. Ταυτόχρονα η μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος μπορεί να φτάσει το 100% σε περίπτωση που η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Σχήμα 1.1 Electromagnetic Rocket Launcher [1]

Παρόμοιες ονομασίες του συστήματος:

1. Ευθύγραμμος Επιταχυντής Μαγνητικής Αντίδρασης (Linear Reluctance Launcher)
2. Ηλεκτρομαγνητικός Επιταχυντής (Electromagnetic Launcher)
3. Επιταχυντής Σιδηρομαγνητικών Υλικών (Ferromagnetic Material Launcher)
4. Επιταχυντής Πηνίων (Coil Launcher)

1.1 Στόχος της πτυχιακής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαιτεί την σχεδίαση, τη μελέτη των χαρακτηριστικών και την κατασκευή ενός εκτοξευτή (launcher) σιδηρομαγνητικού βλήματος το οποίο κινείται κατά μήκος ενός σωλήνα εξαιτίας της δύναμης εξ επαγωγής. Περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και κατασκευή:

- συστοιχίας πυκνωτών
- πηνίων
- φωτοδιακοπών
- κυκλώματος ανύψωσης τάσης
- κυκλώματος μέτρησης ταχύτητας βλήματος

1.2 Περιγραφή EMA

Η συσκευή αποτελείται από τρία σωληνοειδή πηνία τα οποία διαρρέονται από παλμούς ρεύματος και δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο επιταχύνει ένα σιδηρομαγνητικό βλήμα. Τα πηνία είναι τυλιγμένα σε ένα καρούλι που χρησιμοποιείται για την στήριξή τους καθώς και για την κίνηση του βλήματος εντός αυτών. Στον EMA δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του πηνίου και του βλήματος καθώς το βλήμα κινείται λόγω της επαγωγής. Η ενέργεια του συστήματος είναι αποθηκευμένη μέσα σε ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές και στη συνέχεια μετατρέπεται σε μαγνητικό πεδίο γύρω από το πηνίο και στην κινητική ενέργεια που αποκτά το βλήμα. Το κύκλωμα πηνίων-πυκνωτών κλείνει μέσω των θυρίστορ που λειτουργούν ως διακόπτες. Η ενεργοποίηση των πηνίων στο σύστημα γίνεται από την μονάδα ελέγχου και απαιτεί παλμό ηλεκτρικής ισχύος. Ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει μόνο το 1ο τμήμα του συστήματος ενώ τα υπόλοιπα τμήματα ενεργοποιούνται αυτόματα όταν οι φωτοανιχνευτές του συστήματος εντοπίσουν ότι το βλήμα εισέρχεται προς το αντίστοιχο πηνίο. Επίσης το σύστημα αποτελείται από ένα τροφοδοτικό που τροφοδοτεί όλα τα υποσυστήματα με τις διάφορες τάσεις που αυτά απαιτούν, ενώ μπορεί να φορτίσει και τους πυκνωτές μέσω ενός μετασχηματιστή. Το σύστημα αποτελείται ακόμη από ένα DC-DC μετατροπέα τάσης ο οποίος τροφοδοτείται από μπαταρίες για την φόρτιση των πυκνωτών.

2. Θεμελιώδης αρχές ηλεκτρομαγνητισμού

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ίσως από τις πιο χρησιμοποιούμενες ενέργειες λόγω της ευκολίας με την οποία μεταφέρεται και χρησιμοποιείται.

2.1 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία βασίζεται στις τέσσερις εξισώσεις Maxwell στην εξίσωση της αρχής διατήρησης του φορτίου και στην εξίσωση Lorentz. Οι εξισώσεις αυτές σε ολοκληρωτική μορφή είναι:

Ο νόμος Faraday

$$Emf = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Ο νόμος του Ampere:

$$\oint \vec{B} * \vec{dl} = \mu_0 NI$$

Ο νόμος του Gauss για την ηλεκτρική ροή:

$$\int_S \vec{D} ds = \int_V \rho dV$$

Ο νόμος του Gauss για την μαγνητική ροή:

$$\int_S \vec{B} ds = 0$$

Η εξίσωση που εκφράζει την αρχή διατήρησης του φορτίου.

$$\int_S \vec{J} ds = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV$$

2.2 Μαγνητικό πεδίο

Ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι η κίνηση φορτίων, κάθε ρεύμα παράγει ένα μαγνητικό πεδίο. Όσο πιο ισχυρό το ρεύμα και όσο πιο μεγάλη η απόσταση από το ρεύμα, τόσο πιο ισχυρό το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό αναφέρεται και στον νόμο του Ampère. Τα μαγνητικά πεδία των ηλεκτρονίων σε ορισμένα υλικά καθώς αυξάνονται, δίνουν ένα συνολικό μαγνητικό πεδίο γύρω από το υλικό. Αυτός είναι και ο λόγος που ένας μόνιμος μαγνήτης έχει γύρω του ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί από την μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής B η οποία μετριέται σε (T) ή σε (Wb/m²), ή από την ένταση μαγνητικού πεδίου H (H/m). Και τα δύο αυτά μεγέθη είναι διανυσματικά. Η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών B , H δίνεται από την εξίσωση 2.1. Η σταθερά μ (Wb/mH) ονομάζεται μαγνητική διαπερατότητα:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.1)$$

2.3 Μαγνητική διαπερατότητα, μαγνήτιση, επιδεκτικότητα

Όπως είδαμε, η μαγνητική διαπερατότητα καθορίζει πόσο ισχυρή είναι η μαγνητική επαγωγή για μια συγκεκριμένη ένταση του μαγνητικού πεδίου. Όταν τοποθετήσουμε ένα υλικό μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε αυτό μεταβάλλει τη μαγνητική επαγωγή. Επομένως η μαγνητική διαπερατότητα είναι διαφορετική για κάθε υλικό. Ως σχετική μαγνητική διαπερατότητα ορίζουμε την σταθερά μ_r , η οποία δείχνει πόσο ισχυρότερη ή ασθενέστερη είναι η μαγνητική επαγωγή συγκριτικά με αυτή του κενού:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.2)$$

Η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ενός μαγνητικού πεδίου όταν εντός αυτού τοποθετηθεί ένα υλικό οφείλεται στα μόνιμα ή επαγόμενα μαγνητικά δίπολα των ατόμων του υλικού. Χωρίς εξωτερικό πεδίο, είναι κυρίως προσανατολισμένα τυχαία, αλλά όταν υποβάλλονται σε μαγνητικό πεδίο, τα δίπολα προσανατολίζονται ανάλογα, με αποτέλεσμα μαγνητικό πεδίο να παράγεται επίσης από το υλικό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται μαγνήτιση και έχει την ίδια μονάδα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, όπου M είναι η ένταση της μαγνήτισης:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu \vec{M} \quad (2.3)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ είναι η σταθερά που συνδέει τη μαγνήτιση και το μαγνητικό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα δείχνει τον βαθμό μαγνήτισης ενός υλικού ως απόκριση σε ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (2.4)$$

Και τα δύο μ_r και χ αναφέρονται στο βαθμό στον οποίο το υλικό ενισχύει το μαγνητικό πεδίο και η εξίσωση που τα συνδέει είναι η:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (2.5)$$

2.4 Μαγνητική αντίδραση

Σε ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα η σχέση μεταξύ, τάσης V , ρεύματος I και αντίστασης R δίνεται από το νόμο του Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.6)$$

Σε ένα μαγνητικό κύκλωμα υπάρχει πλήρη αντιστοιχία με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Στο ηλεκτρικό κύκλωμα η αιτία που προκαλεί το ρεύμα είναι η τάση ή αλλιώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη. Αντίστοιχα, στο μαγνητικό κύκλωμα η ποσότητα αυτή ονομάζεται μαγνητρεγερτική δύναμη (magnetomotive force-mmf):

$$mmf = NI \quad (2.7)$$

Όπου N ο αριθμός σπειρών του σωληνοειδούς και I το ρεύμα που το διαρρέει[7]. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα η ηλεκτρεγερτική δύναμη V προκαλεί ένταση ρεύματος I , αντίστοιχα στα μαγνητικά κυκλώματα η μαγνητική δύναμη προκαλεί μαγνητική ροή Φ . Τέλος η αντίσταση σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αντιστοιχεί στη μαγνητική αντίσταση/αντίδραση R (H^{-1}) ενός μαγνητικού κυκλώματος. Συνεπώς για κάθε μαγνητικό κύκλωμα ισχύει η συνάρτηση υπολογισμού της μαγνητικής αντίδρασης:

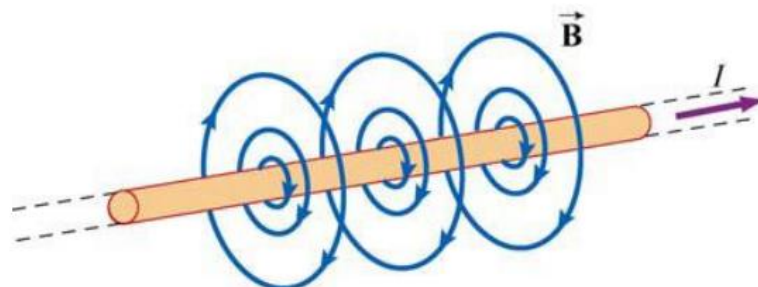
$$R = \frac{mmf}{\Phi} = \frac{L}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2.8)$$

Όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού που βρίσκεται μέσα στο σωληνοειδές, L το μήκος της μαγνητικής διαδρομής, A το εμβαδόν διατομής του πυρήνα του σωληνοειδούς.

2.5 Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού

Όταν ένας ευθύγραμμος αγωγός διαρρέεται από ρεύμα, τότε δημιουργείται γύρω του μαγνητικό πεδίο. Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής δίνεται από τον νόμο του Ampere σε κάθετη απόσταση r από τον αγωγό[10]:

$$|B| = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (2.9)$$

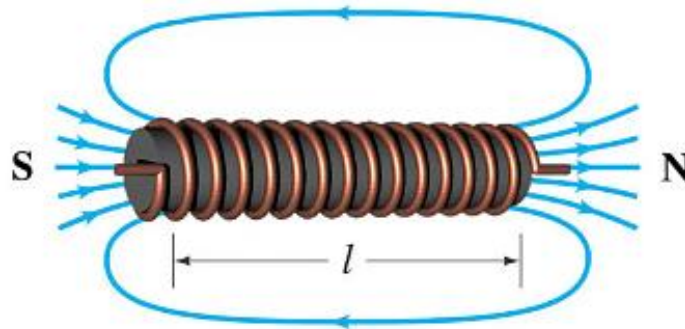


Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου γύρω από ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

2.6 Μαγνητικό πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού είναι ασθενές ακόμα και αν αυτός διαρρέεται από μεγάλες εντάσεις ρεύματος. Ωστόσο, όταν ένας ευθύγραμμος αγωγός είναι τυλιγμένος πυκνά, σε ελικοειδή μορφή δημιουργείται ένα σωληνοειδές το οποίο πολλαπλασιάζει το μαγνητικό πεδίο του. Το φαινόμενο αυτό καθιστά τους σωληνοειδείς αγωγούς εξαιρετικά χρήσιμους σε εφαρμογές όπως για παράδειγμα στους ηλεκτρικούς κινητήρες οι οποίοι απαιτούν ισχυρά μαγνητικά πεδία.

Με τη εφαρμογή του νόμου του Ampere στο σωληνοειδές έχουμε ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής του σωληνοειδούς Bx δίνεται από την εξίσωση 2.10

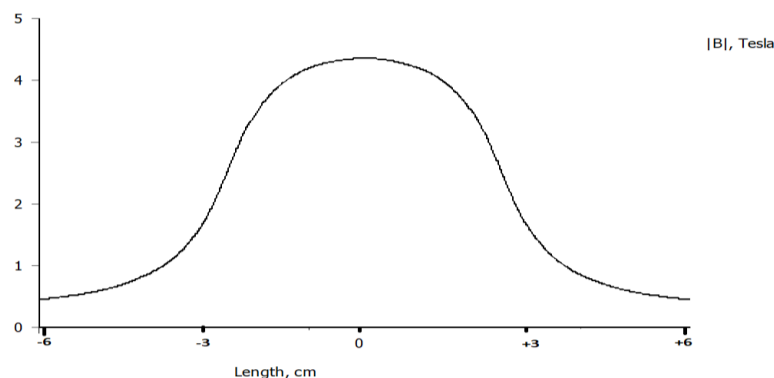


Σχήμα 2.2 Σωληνοειδές πηνίο.

$$B_x = \frac{1}{2} \mu_0 n I \left(\frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + R^2}} - \frac{x - x_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + R^2}} \right) \quad (2.10)$$

Όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, n ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους, R η ακτίνα σωληνοειδούς I το ρεύμα που διαρρέει το σωληνοειδές, L το μήκος σωληνοειδούς. Αν το σωληνοειδές αποτελείται από περισσότερα του ενός στρώματα τότε R η μέση ακτίνα σωληνοειδούς.

Στο Σχήμα 2.3 που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης 2.10 παρατηρείται ότι στο εσωτερικό του σωληνοειδούς και συγκεκριμένα στο κέντρο του το μαγνητικό πεδίο μεγιστοποιείται, ενώ στα άκρα και έξω από αυτό το μαγνητικό πεδίο είναι ασθενές.



Σχήμα 2.3. Γραφική αναπαράσταση πυκνότητας μαγνητικής ροής κατά μήκος του σωληνοειδούς πολλαπλών στρώσεων με $n=280$, $I=750$ A, $L=0,05$ m, $R=0,1$ m.

2.7 Αυτεπαγωγή

Η αυτεπαγωγή είναι φαινόμενο της φυσικής. Ως αυτεπαγωγή ονομάζεται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής κατά την οποία το σώμα που προκαλεί την επαγωγή είναι ταυτόχρονα και το σώμα στο οποίο επιδρά η επαγωγή. Εξ ου και το όνομα αυτ(ο)-επαγωγή. Το φαινόμενο είναι άμεσο επακόλουθο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και του κανόνα του Λέντς. Καθώς το ρεύμα στον σωληνοειδή αγωγό αυξάνεται, αυξάνεται ταυτόχρονα και η ροή του μαγνητικού πεδίου που τον διαπερνά. Η αυξανόμενη αυτή ροή με την σειρά της δημιουργεί ηλεκτρική τάση εξ επαγωγής στο κύκλωμα η οποία έχει φορά τέτοια ώστε να εναντιώνεται στην μεταβολή της μαγνητικής ροής που την προκαλεί. Από ενεργειακή άποψη η ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος μετατρέπεται εν μέρει και σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου αποσπώντας ενέργεια από το κύκλωμα. Αυτό λειτουργεί και αντίστροφα, δηλαδή όταν η ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος τείνει να μειωθεί, τότε γίνεται μετατροπή της ενέργειας μαγνητικού πεδίου σε ηλεκτρική καθυστερώντας τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ηλεκτρική τάση που αναπτύσσεται σε ένα σωληνοειδές λόγω αυτεπαγωγής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

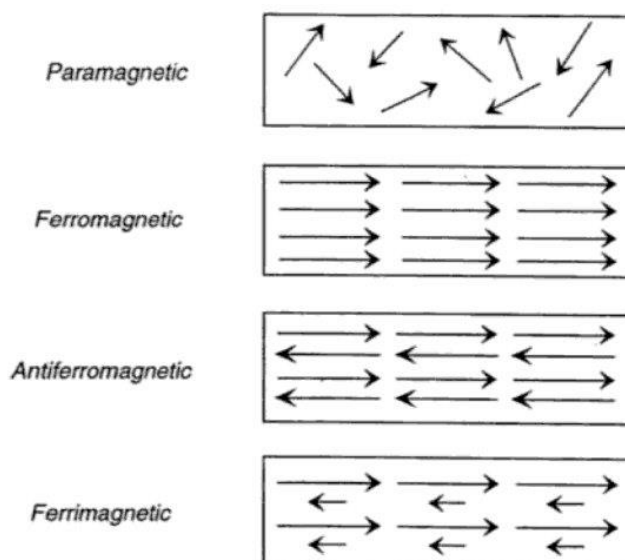
$$\varepsilon_L = -L \frac{di}{dt} \quad (2.11)$$

Δηλαδή η τάση από αυτεπαγωγή που αναπτύσσεται σε ένα σωληνοειδές είναι ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος που το διαρρέει.

2.8 Κατηγορίες και Ιδιότητες Μαγνητικών Υλικών

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατηγοριοποίησης των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών αφορά την απόκρισή τους στην παρουσία μαγνητικού πεδίου. Η διαπερατότητα και η επιδεκτικότητα χρησιμοποιούνται για την κατάταξη των υλικών σε κατηγορίες. Τα υλικά, τα οποία παρουσιάζουν κάποιας μορφής μαγνήτιση, ονομάζονται μαγνητικά.

Ανάλογα με τη συμπεριφορά του υλικού στην επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, δηλαδή με βάση την επιδεκτικότητα που παρουσιάζουν, αυτά χωρίζονται σε έξι κατηγορίες: τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά, τα σιδηρομαγνητικά, τα αντισιδηρομαγνητικά, τα σιδηριμαγνητικά και τα υπερπαραμαγνητικά υλικά. Απο αυτά θα μελετήσουμε περισσότερο τα σιδηρομαγνητικά καθώς αποτελούν βασικό ρόλο στην απόδοση και την λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών.



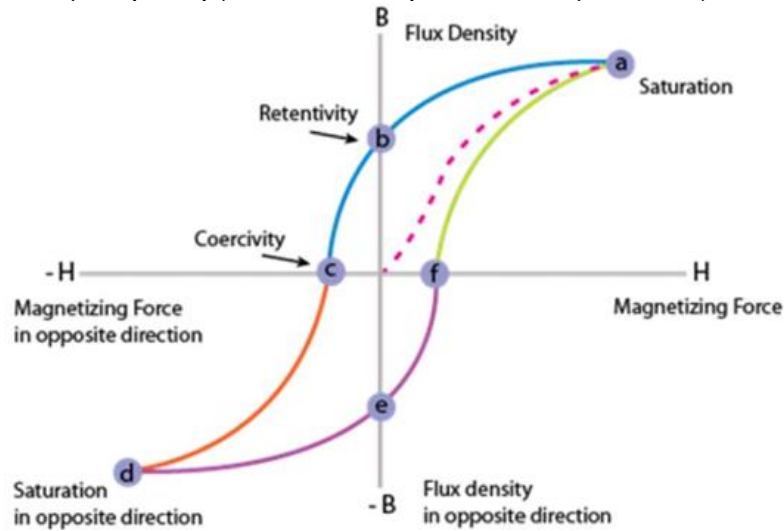
Σχήμα 2.4. Κατηγορίες μαγνητικών υλικών.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μαγνητίζονται έντονα όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο αλλά διατηρούν το μαγνητισμό τους και μετά την απομάκρυνσή του πεδίου. Με θέρμανση πάνω από τη θερμοκρασία Curie, την κρίσιμη θερμοκρασία μετατροπής ενός σιδηρομαγνητικού υλικού σε παραμαγνητικό, τα σιδηρομαγνητικά υλικά χάνουν το μόνιμο μαγνητισμό τους και μεταπίπτουν σε παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie για το μεταλλικό σίδηρο είναι 770°C και για το μαγνητίτη 580°C. Τα φυσικά σιδηρομαγνητικά σώματα είναι λίγα όπως ο μαγνητίτης, ο μαγνητοπυρίτης και ο μαγκεμίτης, ένα πολύμορφο του αιματίτη ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Οι κοινοί μαγνήτες δεν είναι φυσικοί. Είναι κράματα τα οποία έχουν υποβληθεί σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Τα σιδηρομαγνητικά ορυκτά διακρίνονται στην πραγματικότητα σε δύο ομάδες, τα σιδηρο(Fe^{2+})μαγνητικά και τα σιδηρο(Fe^{3+})μαγνητικά με βάση τον παράλληλο ή αντιπαράλληλο ευθυγραμμισμένο προσανατολισμό των μαγνητικών διπόλων. Οι μαγνητικές ιδιότητες των ορυκτών έχουν μεγάλη σημασία όχι μόνο για την μακροσκοπική αναγνώριση αυτών αλλά και για το διαχωρισμό από μείγμα, των διαμαγνητικών και παραμαγνητικών, όπως επίσης και των παραμαγνητικών ορυκτών μεταξύ τους με τη βοήθεια ειδικών μαγνητικών συσκευών (μαγνητικοί διαχωριστές).

2.9 Βρόχος υστέρησης

Σε ένα φερρομαγνητικό υλικό που μαγνητίζεται για πρώτη φορά, με εφαρμογή εξωτερικού πεδίου H , αυξάνεται η μαγνητική επαγωγή B προς τη διεύθυνση του πεδίου. Με αύξηση του πεδίου H , τα σύνορα των περιοχών μετατοπίζονται και η μαγνήτιση μεγαλώνει. Στο Σχήμα 2.5 φτάνοντας στο σημείο a , με επιπλέον αύξηση του μαγνητικού πεδίου, η επαγωγή B επηρεάζεται ελάχιστα. Στο σημείο a η επαγωγή είναι B_s (επαγωγή κόρου), η μαγνήτιση είναι M_s (μαγνήτιση κόρου) και οι μαγνητικές ροπές έχουν ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H και, επομένως, με αύξηση του πεδίου δεν επηρεάζεται η μαγνήτιση M , όπως και η μαγνητική επαγωγή. Η M_s εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου. (Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η M_s είναι ο αριθμός των ατόμων ανά μονάδα όγκου και το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού.) Στη συνέχεια, όσο το H ελαττώνεται, η καμπύλη μετακινείται προς το b , όπου το εξωτερικό πεδίο είναι μηδέν, αλλά η επαγωγή έχει τιμή B_r . Το υλικό σε αυτό το

σημείο θεωρείται μόνιμος μαγνήτης, γιατί υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση M_r χωρίς εξωτερικό πεδίο H . Η μαγνητική επαγωγή είναι κι αυτή παραμένουσα B_r . Με επιβολή πεδίου που αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται μέχρι το σημείο c , όπου μηδενίζεται ($B=0$), και, άρα, το υλικό απομαγνητίζεται. Το πεδίο είναι $-H_c$ και ονομάζεται συνεκτικό. Με αρνητική αύξηση του πεδίου, το υλικό φτάνει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά, στο σημείο d . Στη συνέχεια, με ελάττωση του εξωτερικού πεδίου, η καμπύλη διέρχεται απ' το σημείο e , Η καμπύλη διέρχεται από το σημείο e (όπου η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή είναι $-B_r$) μέσω της μείωσης του εξωτερικού πεδίου. Τέλος, με αύξηση του H , η καμπύλη του βρόχου περνάει από το f , όπου έχουμε συνεκτικό πεδίο H_c . Το εμβαδόν, που περικλείεται απ' τις γραμμές του βρόχου υστέρησης, ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου στο υλικό.

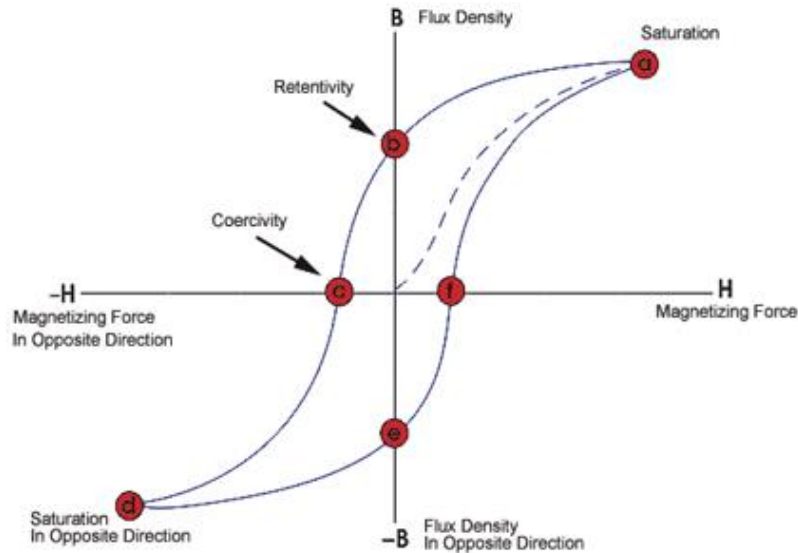


Σχήμα 2.5. Βρόχος υστέρησης.

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν στενούς βρόχους υστέρησης και έτσι το συνεκτικό τους πεδίο είναι μικρό. Συνεπώς, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και χρειάζεται να εφαρμοστεί μικρότερο πεδίο. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, υπό την επίδραση πεδίου, τα ιόντα έχουν μαγνητικές ροπές που προσανατολίζονται αντιπαράλληλα μεταξύ τους, αλλά επειδή τα μεγέθη των ιόντων διαφέρουν, προκύπτει κάποια συνισταμένη μαγνητική ροπή. Τέτοια υλικά είναι οι φερρίτες, δηλαδή οξειδία του σιδήρου με άλλα μέταλλα. Αυτά ισχύουν σε θερμοκρασίες κατώτερες μιας κρίσιμης τιμής (της θερμοκρασίας Curie). Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, το υλικό γίνεται παραμαγνητικό. Στον αντισιδηρομαγνητισμό, με επιβολή μαγνητικού πεδίου, πραγματοποιείται αντιπαράλληλος προσανατολισμός των μαγνητικών ατομικών ροπών και έτσι η μαγνητική ροπή αθροιστικά είναι μηδέν. Η διαφορά είναι ότι εδώ τα γειτονικά άτομα αντιτίθενται μεταξύ τους, ενώ στο σιδηρομαγνητισμό ενισχύονται. Ο μαγνητίτης (Fe_3O_4), ο αιματίτης (Fe_2O_3) και ο βουσίτης (FeO) απαρτίζουν τους φερρίτες οι οποίοι είναι κεραμικά οξειδία. Ο μαγνητίτης διαθέτει ιόντα σιδήρου σε δισθενή και τρισθενή οξειδωτική βαθμίδα και επομένως μπορεί να έχει οξειδωτικό ή αναγωγικό χαρακτήρα. Κρυσταλλώνεται σε ολοεδρία στο κυβικό σύστημα. Ο μαγκεμίτης ($\gamma-Fe_2O_3$) έχει παρόμοια δομή, με τη διαφορά ότι τα 5/6 των τετραεδρικών και οκταεδρικών θέσεων καταλαμβάνονται από άτομα σιδήρου. Η βασική τους διαφορά είναι ότι τα κατιόντα σιδήρου του μαγκεμίτη βρίσκονται όλα στην τρισθενή κατάσταση (Fe^{+3}).

2.10 Μαγνητική υστέρηση

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με την χάραξη του διαγράμματος της μαγνητικής επαγωγής B , συναρτήσεως του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H , που αποτελεί την καμπύλη του βρόχου υστέρησης. Εναλλακτικά, είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος μαγνήτισης, από το οποίο όμως λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κατάλληλο για μια δεδομένη εφαρμογή ή όχι.

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, ακολουθεί αρχικά τη διακεκομμένη γραμμή του Σχήματος 2.6, καθώς το εξωτερικό πεδίο αρχίζει να αυξάνεται. Είναι προφανές, ότι για ένα μεγάλο σχετικά εύρος τιμών του H , το B συνεχίζει διαρκώς να αυξάνεται. Φτάνοντας στο σημείο a , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή. Σε αυτό το σημείο, λέμε ότι το υλικό έχει φτάσει τη μαγνήτιση κορεσμού. Στη συνέχεια, καθώς το H αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται, η καμπύλη μετακινείται από το σημείο a στο b . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν είναι μηδέν. Το σημείο b παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης (retentivity) του υλικού. Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αρχίζει να λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή να αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο c μηδενίζεται. Το σημείο αυτό δίνει πληροφορίες για το συνεκτικό πεδίο του υλικού, (coercivity). Καθώς το πεδίο εξακολουθεί να αυξάνεται αρνητικά, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κορεσμού προς την αντίθετη φορά (σημείο d). Στη συνέχεια, το εξωτερικό πεδίο ελαττώνεται και η καμπύλη περνάει από το σημείο e , όπου αντιστοιχεί στην αντίσταση απομαγνήτισης της αντίστροφης φοράς. Παρατηρούμε ότι καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το H , η καμπύλη δεν θα περάσει ξανά από την αρχή των αξόνων, αλλά από το σημείο f , λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης (remanence).

2.11 Θερμοκρασία Curie

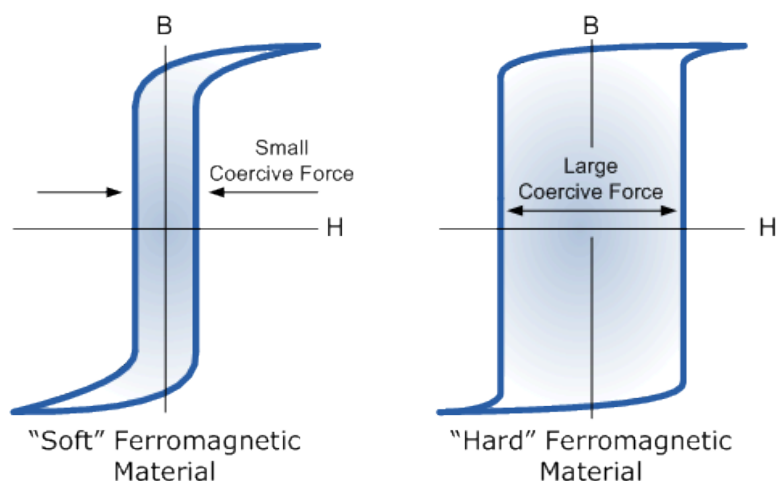
Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Έτσι οι μαγνητικές περιοχές μπορούν να ευθυγραμμιστούν ευκολότερα, αλλά τις αποτρέπει, επίσης, από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες εφόσον απομακρυνθεί το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες, η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie, τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραμάτων.

2.12 Συνεκτικό πεδίο

Το συνεκτικό πεδίο είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός σιδηρομαγνητικού υλικού να αντέχει ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο χωρίς να απομαγνητίζεται. Η συνδιακύμανση μετρίεται συνήθως σε μονάδες oersted ή αμπέρ/μέτρο και συμβολίζεται με H_C .

Μια ανάλογη ιδιότητα των υλικών, η ηλεκτρική συνδιακύμανση, είναι η ικανότητα ενός σιδηροηλεκτρικού υλικού να αντέχει ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο χωρίς να εκπολώνεται.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά με υψηλή συνδιακύμανση ονομάζονται μαγνητικά σκληρά και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών. Τα υλικά με χαμηλή συνδιακύμανση λέγονται μαγνητικά μαλακά. Τα τελευταία χρησιμοποιούνται σε πυρήνες μετασχηματιστών και πηνίων, κεφαλές εγγραφής, συσκευές μικροκυμάτων και μαγνητική θωράκιση. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι εκείνοι οι τύποι μαγνητικών υλικών που διατηρούν σταθερή μαγνητική ιδιότητα μετά την εφάπαξ μαγνήτιση. Ως εκ τούτου, τα σκληρά μαγνητικά υλικά αποκαλούνται μερικές φορές και ως μόνιμα μαγνητικά υλικά.



Σχήμα 2.7. Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

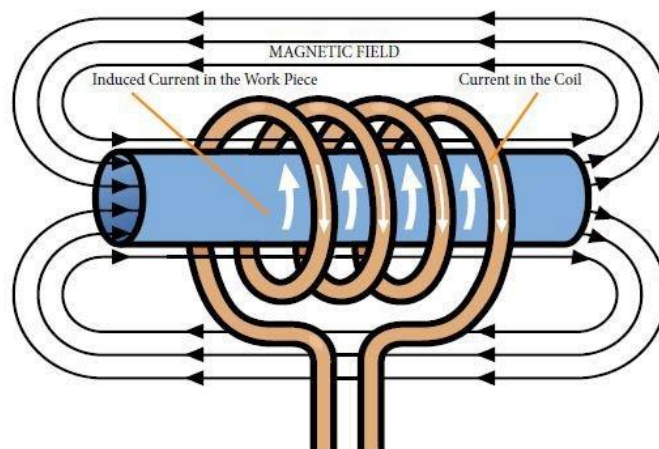
Τα σκληρά μαγνητικά υλικά έχουν υψηλή συνδιακύμανση και χαμηλή διαπερατότητα. Για το λόγο αυτό, είναι αρκετά δύσκολο να απομαγνητιστούν τα σκληρά μαγνητικά υλικά.

Η περιοχή του βρόχου υστέρησης για τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι μεγάλη, συνεπώς τα υλικά αυτά έχουν μεγάλες απώλειες υστέρησης. Αν και τα σκληρά μαγνητικά υλικά μπορούν να αποθηκεύσουν σχετικά υψηλή ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο. Στην πράξη, τα σκληρά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών. Μερικά κοινά παραδείγματα μόνιμων μαγνητικών υλικών είναι το κράμα AlNiCo, το κράμα FeCrCO, οι φερρίτες μόνιμου μαγνήτη κ.λπ.

3. Ανάλυση Απωλειών και Συντελεστών Αυτεπαγωγής και Απόσβεσης σε Συστήματα EMA

3.1 Βασική λειτουργία σωληνοειδούς πηνίου

Όταν ένα σωληνοειδές διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργείται γύρω του μαγνητικό πεδίο. Αν πλησιάσουμε κοντά στο εσωτερικό του σωληνοειδούς ένα σιδηρομαγνητικό υλικό τότε οι μαγνητικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου τείνουν να ολοκληρώνουν τον κύκλο τους μέσω του σιδηρομαγνητικού βλήματος εξαιτίας του ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα από αυτή του αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του σιδηρομαγνητικού βλήματος σε μαγνήτη με την ίδια πολικότητα με αυτή του μαγνητικού πεδίου του σωληνοειδούς. Συνεπώς προκύπτουν δύο μαγνήτες οι οποίοι έλκονται μεταξύ τους. Έτσι προκαλείται έλξη του βλήματος στο κέντρο του σωληνοειδούς λόγω της μαγνητικής αντίδρασης. Όταν το βλήμα φτάσει στο κέντρο πρέπει να αποκοπεί η ροή ρεύματος στο σωληνοειδές. Παύοντας έτσι να υπάρχει μαγνητικό πεδίο, το βλήμα μπορεί να συνεχίσει να κινείται ευθύγραμμα εντός του σωλήνα. Διαφορετικά αν διατηρήσουμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές το βλήμα εγκλωβίζεται εντός αυτού ή εξέρχεται από αυτό με πολύ μικρή ταχύτητα.



Σχήμα 3.1. Δομή σωληνοειδούς πηνίου.

Οι EMA μπορούν να αποτελούνται από ένα ή περισσότερα σωληνοειδή πηνία σε σειρά αποδίδοντας έτσι ακόμα μεγαλύτερη κινητική ενέργεια στο βλήμα με αποτέλεσμα να αποκτήσει μεγαλύτερες ταχύτητες. Βασικές προϋποθέσεις για την λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι ο σωστός χρονισμός, δηλαδή η παροχή ρεύματος στα πηνία την στιγμή που το βλήμα μόλις εισέρχεται εντός αυτών και η αποκοπή του όταν το μέσο του μήκους βλήματος και το μέσω του μήκους του σωληνοειδούς ευθυγραμμιστούν.

3.2 Πιθανές απώλειες EMA

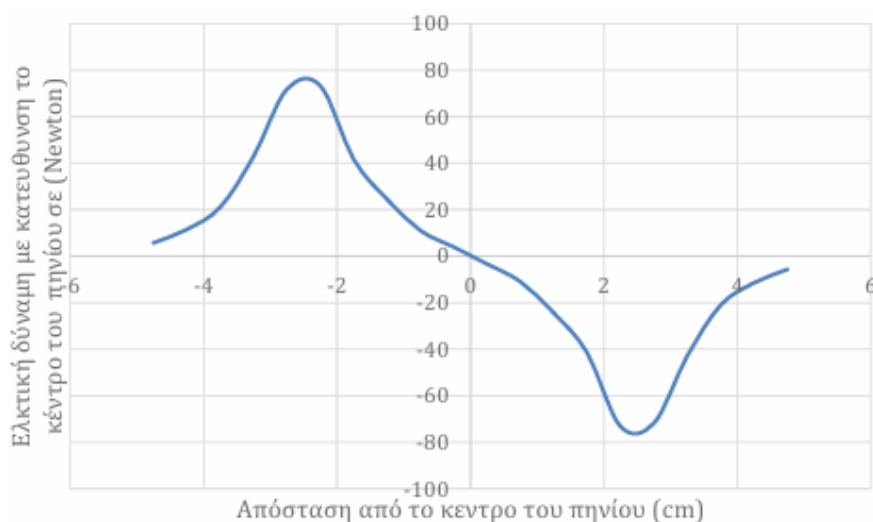
Οι απώλειες σε ένα EMA αναφέρονται στη διάχυση ενέργειας ή τη μείωση της απόδοσης που συμβαίνει κατά τη λειτουργία του συστήματος. Αυτές οι απώλειες μπορούν να συμβούν μέσω διαφόρων μηχανισμών και επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του. Μερικές από τις κύριες απώλειες είναι :

- **Απώλειες αντίστασης:** Η αντίσταση στα αγώγιμα υλικά της τ bobine και άλλων υλικών του κυκλώματος οδηγεί στην παραγωγή θερμότητας, με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας. Αυτές οι απώλειες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας υλικά υψηλής αγωγιμότητας και βελτιστοποιώντας τον σχεδιασμό της bobine και του κυκλώματος.
- **Απώλειες περιστρεφόμενων ρευμάτων:** Οι περιστρεφόμενες ρεύματα που προκαλούνται σε αγώγιμα υλικά, όπως το σφαιρίδιο ή οι κοντινές δομές, μπορούν να διαχέουν ενέργεια μέσω αντίστασης. Για να μειωθούν αυτές οι απώλειες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη αγώγιμα υλικά ή υλικά με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα στην περιοχή του EMA.
- **Απώλειες τριβής:** Η τριβή μεταξύ του σφαιριδίου και της κάνης ή μεταξύ κινούμενων συστατικών του συστήματος EMA οδηγεί σε απώλειες ενέργειας στη μορφή θερμότητας. Η λίπανση και ο προσεκτικός σχεδιασμός των συστατικών μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση των απωλειών τριβής.
- **Διαρροή μαγνητικού ρεύματος:** Κάποιο από το μαγνητικό ρεύμα που παράγεται από το πηνίο μπορεί να διαρρέει μακριά από την επιθυμητή διαδρομή, με αποτέλεσμα τη μείωση της αποδοτικότητας του EMA. Η κατάλληλη τεχνική σχεδίασης, όπως η χρήση υλικών με απομάκρυνση μαγνητικών πεδίων, μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των απωλειών διαρροής του μαγνητικού ρεύματος.
- **Απώλειες ακτινοβολίας:** Σε συστήματα EMA υψηλής ενέργειας, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να συμβάλει στις απώλειες ενέργειας. Η θωράκιση και η κατάλληλη μόνωση μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση των απωλειών ακτινοβολίας.
- **Φαινόμενο αναρρόφησης suck back:** Η σύρραψη συμβαίνει όταν η απότομη κατάρρευση του μαγνητικού πεδίου ελκύει το σφαιρίδιο προς τα πίσω, οδηγώντας σε απώλεια κινητικής ενέργειας.

3.3 Φαινόμενο αναρρόφησης ‘suck back’

Ο EMA βασίζει τη λειτουργία του στο γεγονός ότι η μαγνητική δύναμη εμφανίζεται για μικρό χρονικό διάστημα ως παλμός. Όμως είναι εξαιρετικά δύσκολο να συγχρονιστεί ο παλμός αυτός με την θέση του σιδηρομαγνητικού βλήματος εντός του σωληνοειδούς. Αν λοιπόν συνεχίσει να υπάρχει μαγνητικό πεδίο αφότου το κέντρο του βλήματος μόλις που περνά από το κέντρο του σωληνοειδούς, τότε η φορά της δύναμης που επιτάχυνε το βλήμα αντιστρέφεται, διατηρώντας όμως την ίδια διεύθυνση. Έτσι η δύναμη αποκτά φορά προς το κέντρο του σωληνοειδούς και επιβραδύνει το βλήμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται suck back.

Για την περαιτέρω κατανόηση του φαινομένου έγινε προσομοίωση με τη χρήση του προγράμματος FEMM (Finite Element Method Magnetics). Πρόκειται για ένα δωρεάν διαθέσιμο πρόγραμμα, το οποίο είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων από 2D μοντέλα που αφορούν τον ηλεκτρομαγνητισμό.



Σχήμα 3.2. Ελκτική δύναμη του πηνίου προς το κέντρο του.

Η γραφική αναπαράσταση της δύναμης που ασκείται στο σιδηρομαγνητικό βλήμα ως προς την απόσταση από το κέντρο του σωληνοειδούς, και προέκυψε αφότου έγινε η σχεδίαση και προσομοίωση του. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης το σωληνοειδές διαρρέεται από σταθερό ρεύμα. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αιτιολογείται ή τάση του σωληνοειδούς να έλκει στο κέντρο του τα σιδηρομαγνητικά μέταλλα, από όποια πλευρά του πηνίου βρεθούν. Επίσης είναι φανερό ότι η αρχική θέση του βλήματος δεν μπορεί να είναι στο κέντρο ή μακριά από τα άκρα του σωληνοειδούς καθώς η δύναμη που θα του ασκηθεί είναι σχεδόν ίση με το μηδέν.

Για την σωστή λειτουργία του EMA θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση ώστε η έναυση του παλμού ρεύματος $t_{\text{pulsestart}}$ να γίνει τη στιγμή $t_{\text{insertion}}$ που το βλήμα εισέρχεται στο πηνίο.

$$t_{\text{pulsestart}} = t_{\text{insertion}} \quad (3.1)$$

Για τον περιορισμό του φαινομένου suck back το RLC κύκλωμα, δηλαδή ο πυκνωτής και το πηνίο, πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα ώστε να ισχύει η σχέση 3.2

$$t_{I_{pulse\ cut-off}} \leq t_{alignment} \quad (3.2)$$

Όπου $t_{I_{pulse\ cut-off}}$ η χρονική στιγμή της αποκοπής του παλμού ρεύματος, $t_{alignment}$ η στιγμή που τα μέσα του μήκους πηνίου-βλήματος ευθυγραμμίζονται. Συνεπώς αν ισχύει η ανίσωση 3.2 τότε η δύναμη επαναφοράς που φαίνεται στο δεξί τμήμα στο Σχήμα 3.4 μηδενική.

3.4 Ελκτική δύναμη σωληνοειδούς

Ο EMA είναι ένας ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας στον οποίο η ηλεκτρική ενέργεια της πηγής μετατρέπεται σε μαγνητική και έπειτα σε κινητική και σε απώλειες:

$$dW_E = dW_{Magnetic} + dW_{loss} = dW_{Kinetic} + dW_{2loss}$$

Η αποθηκευμένη ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς δίνεται από την εξίσωση:

$$W_{M(x,t)} = \frac{1}{2} L(x) i^2(t) \quad (3.3)$$

Όπου L ο συντελεστής αυτεπαγωγής ο οποίος μεταβάλλεται συναρτήσει της απόστασης μεταξύ του μέσου του βλήματος x και του μέσου του σωληνοειδούς και i το ρεύμα που μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου t.

Επίσης ισχύει η εξίσωση του μέτρου της δύναμης F που ασκείται στο βλήμα συναρτήσει του έργου W:

$$F_{(x,t)} = \frac{dW_M(x,t)}{dx} \quad (3.4)$$

Έτσι εάν δεν λάβουμε υπόψιν τις απώλειες προκύπτει το μέτρο της δύναμης από τις εξισώσεις 3.2 και 3.3

$$F_{(x,t)} = \frac{1}{2} i^2(t) \frac{dL(x)}{dx} \quad (3.4)$$

Η εξίσωση 3.4 μας δίνει το μέτρο της δύναμης με την οποία το σωληνοειδές έλκει στο κέντρο του ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Η δύναμη αυτή εξαρτάται από την ένταση και το χρόνο του παλμού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο καθώς και από τον ρυθμό μεταβολής του συντελεστή αυτεπαγωγής ο οποίος μεταβάλλεται καθώς το βλήμα κινείται εντός του πηνίου.

Ακόμα η επιτάχυνση του σιδηρομαγνητικού βλήματος παρέχεται από την σχέση

$$\alpha = \frac{\mu_0(\mu_r - 1)(NI)^2 A}{2ml^2} \quad (3.5)$$

Όπου N ο αριθμός τυλιγμάτων του πηνίου, l το μήκος του πηνίου, A το εμβαδόν διατομής του σιδηρομαγνητικού βλήματος, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, m η μάζα του βλήματος, μ_r η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού και I το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο.

3.5 Συντελεστής απόσβεσης ζ

Ο συντελεστής απόσβεσης ζ επηρεάζει την απόκριση του RLC κυκλώματος:

$$\zeta = \frac{\alpha R}{\omega_0} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3.6)$$

Ένα κύκλωμα RLC σε σειρά βάση των συντελεστή ζ , μπορεί να είναι κρίσιμα αποσβεσμένο για $\zeta = 1$ όπου δεν έχουμε ταλάντωση, υποαποσβεσμένο για $\zeta < 1$ αλλά το φορτίο φτάνει γρήγορα στο 0 και υπεραποσβεσμένο για $\zeta > 1$.

Η απόκριση στην περίπτωση της μη-μηδενικής απόσβεσης προκύπτει λύνοντας την ομογενή διαφορική εξίσωση

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (3.7)$$

$$x(0) = x_0 \quad (3.8)$$

$$\dot{x}(0) = v_0 \quad (3.9)$$

με τις αρχικές συνθήκες 3.8 και 3.9. Αντικαθιστώντας στην διαφορική εξίσωση 3.7, προκύπτει ότι η άγνωστη λ ικανοποιεί την χαρακτηριστική εξίσωση

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_0\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (3.10)$$

Οι δύο ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης είναι

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (3.11)$$

Ανάλογα με την περιοχή των τιμών του συντελεστή απόσβεσης διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις λύσεων: (α) κρίσιμη απόσβεση ($|\zeta| = 1$), (β) υποκρίσιμη απόσβεση ($|\zeta| < 1$), και (γ) υπερκρίσιμη απόσβεση ($|\zeta| > 1$).

Στην περίπτωση αυτή η παράσταση $\zeta^2 - 1$ είναι αρνητική οπότε οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης είναι μιγαδικές και προκύπτουν από τη σχέση:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm i\omega_0\sqrt{1 - \zeta^2}$$

(α) Υποκρίσιμη Απόσβεση ($|\zeta| < 1$)

Στην περίπτωση αυτή η παράσταση $\zeta^2 - 1$ είναι αρνητική οπότε οι ρίζες της είναι μιγαδικές και δίνονται από τη σχέση:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm i\omega_0\sqrt{1 - \zeta^2}$$

Επομένως, η γενική λύση είναι της μορφής είναι άθροισμα λύσεων δίνεται από τη σχέση

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} = e^{-\zeta\omega_0 t} [Ae^{i\omega_d t} + Be^{-i\omega_d t}] \quad (3.12)$$

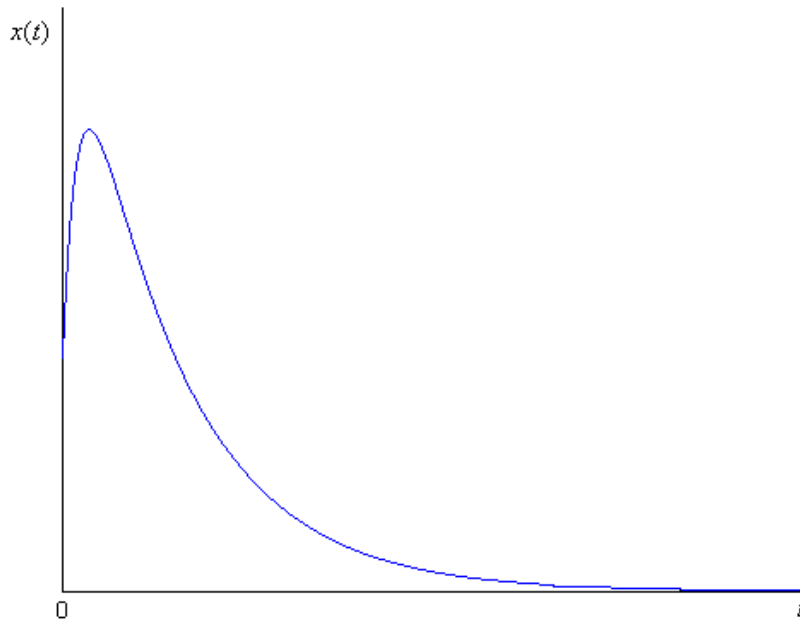
όπου $\omega_d = \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2}$, και οι σταθερές A και B είναι μιγαδικές συζυγείς ποσότητες με αποτέλεσμα η λύση $x(t)$ να είναι πραγματική. Οι ποσότητες A και B προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες.

(β) Υπερκρίσιμη Απόσβεση ($|\zeta| > 1$)

Στην περίπτωση αυτή οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης 3.10 είναι πραγματικές και ίσες με $\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1}$ οπότε η λύση παίρνει τη μορφή

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} [\alpha \cosh(\omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1}t) + \beta \sinh(\omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1}t)] \quad (3.13)$$

όπου \cosh και \sinh είναι τα υπερβολικά συνημίτονα και ημίτονα, αντίστοιχα. Οι σταθερές α και β προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες 3.8 και 3.9. Στην περίπτωση της υπερκρίσιμης απόσβεσης, η απόκριση της μάζας του ταλαντωτή δείχνεται στο Σχήμα 3.3 η απόκριση της μάζας αποσβένει χωρίς ταλάντωση.



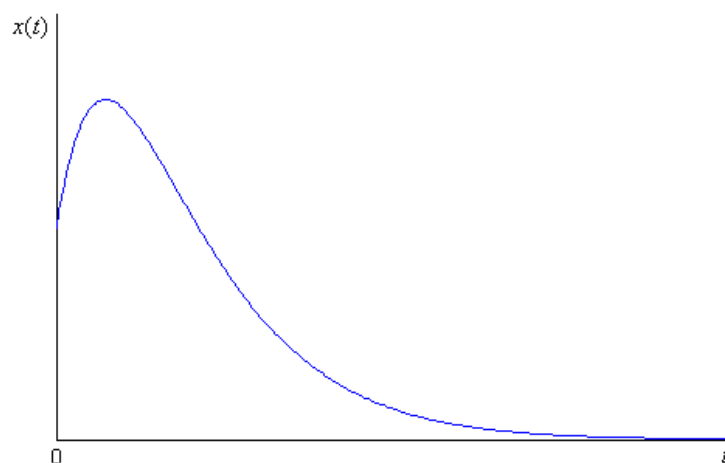
Σχήμα 3.3. Ελεύθερη ταλάντωση με απόσβεση για $\zeta > 1$

(γ) Κρίσιμη Απόσβεση ($|\zeta| = 1$)

Στην περίπτωση αυτή οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης 3.10 είναι ίδιες, $\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_0$, οπότε η απόκριση παίρνει την μορφή

$$x(t) = \alpha e^{-\zeta\omega_0 t} + \beta t e^{-\zeta\omega_0 t} \quad (3.14)$$

όπου οι σταθερές α και β προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες 3.8 και 3.9. Στην περίπτωση της υπερκρίσιμης απόσβεσης, η απόκριση της μάζας του ταλαντωτή δείχνεται στο Σχήμα 3.4 η απόκριση του συστήματος αποσβένει χωρίς ταλάντωση.



Σχήμα 3.4. Ελεύθερη ταλάντωση με απόσβεση για $\zeta = 1$

3.6 Συντελεστής αυτεπαγωγής

Ο συντελεστής αυτεπαγωγής του σωληνοειδούς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση ενός ΕΜΑ. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικός ο ακριβής υπολογισμός του. Όμως, καθώς το σιδηρομαγνητικό βλήμα κινείται εντός του σωληνοειδούς, ο συντελεστής αυτεπαγωγής μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης του βλήματος εντός σωληνοειδούς. Ο υπολογισμός της δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις [1]:

$$L(x) = L_m \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{l}x\right) \right] + L_{min} \quad (3.15)$$

Όπου x η απόσταση μεταξύ κέντρων σωληνοειδούς-βλήματος, l το μήκος του σωληνοειδούς. Η μέση τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής:

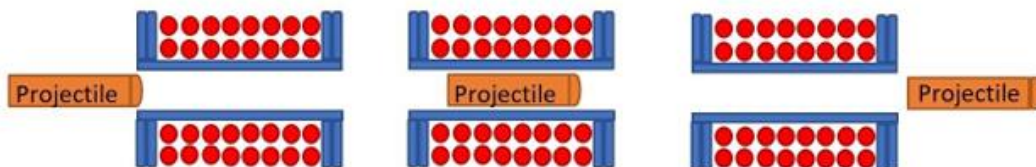
$$L_m = \frac{\mu_o R^2 N^2}{2\pi(6R + 9l + 10C)} \quad (3.16)$$

Όπου L η αυτεπαγωγή (H), N ο αριθμός σπειρών, R η μέση ακτίνα σωληνοειδούς (m), l το μήκος σωληνοειδούς (m), c το πάχος (εξωτερική – εσωτερική διάμετρο) σωληνοειδούς σε(m).

Η μέγιστη τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής είναι:

$$L_{max} = (L_{min} + \mu_r \frac{N^2}{i^2} S l_c) \quad (3.17)$$

Όπου l_c το μήκος του βλήματος, S το εμβαδόν διατομής του βλήματος, και μ_r η μαγνητική διαπερατότητα του βλήματος.



Σχήμα 3.5. Απεικόνιση του βλήματος στις θέσεις όπου μετριέται η αυτεπαγωγή καθώς κινείται στο σωληνοειδές.

3.7 Απώλειες λόγω εσωτερικής ωμικής αντίστασης του πηνίου

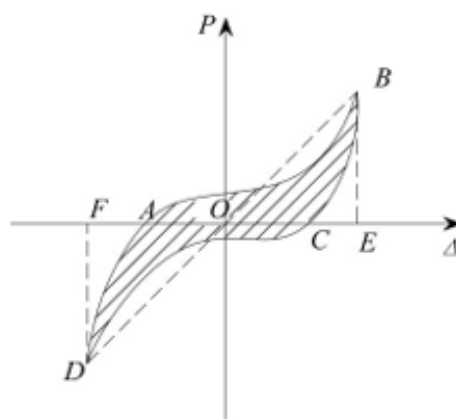
Οι απώλειες των πηνίων προκύπτουν από την εξίσωση και εξαρτώνται από το ρεύμα που τα διαρρέει και από την ωμική αντίσταση η οποία αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

$$L_{LOSScu} = i^2 R \quad (3.18)$$

3.8 Απώλειες λόγω υστέρησης

Οι απώλειες υστέρησης προκαλούνται από τον παραμένοντα μαγνητισμό ο οποίος πρέπει να υπερνικηθεί κάθε φορά που αλλάζει η πολικότητα της τάσης. Όσο πιο σκληρό είναι το υλικό του σιδηροπυρήνα τόσο περισσότερο παραμένοντα μαγνητισμό έχει και άρα περισσότερες απώλειες υστέρησης και δίνεται απο την σχέση:

$$W_{LOSShyst} = \int_0^c HdB \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.6. Απεικόνιση του εμβαδού του βρόγχου υστέρησης.

Η ενέργεια αυτή παριστάνεται από το εμβαδόν μεταξύ του τμήματος OA του παρθενικού κλάδου μαγνήτισης και του άξονα B όπως φαίνεται στο τμήμα OACO, Σχήμα 3.6. Κατά την έξοδο του σιδηρομαγνητικού υλικού από το μαγνητικό πεδίο διατηρεί μαγνητική ενέργεια που παριστάνεται από το εμβαδό ADOA. Έτσι, η ενέργεια των απωλειών υστέρησης, τις επόμενες φορές που θα μαγνητιστεί δίνεται από τη σχέση:

$$W_{LOSShyst} = \int_D^c HdB \quad (3.20)$$

Μετά το μαγνητικό κορεσμό η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου δεν βοηθά στην περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του βλήματος. Συνεπώς όλη η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάστηκε για να αυξηθεί το μαγνητικό πεδίο από το σημείο κορεσμού και έπειτα χάνεται σε μορφή θερμότητας μέσω των πηνίων.

3.9 Απώλειες στα Θυρίστορ

Οι απώλειες στα θυρίστορ δίνονται από την σχέση [2]:

$$W_{loss} = \int_0^{t_{pulse}} V_{T0} I_T dt \quad (3.21)$$

Όπου V_{T0} είναι η τάση στα άκρα του θυρίστορ, t_{pulse} η χρονική διάρκεια του παλμού ρεύματος, I_T το ρεύμα που διαρρέει το θυρίστορ.

3.10 Απώλειες δινορρευμάτων

Όταν το εναλλασσόμενο ρεύμα διέρχεται από το σύρμα, η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος στη διατομή του σύρματος είναι άνιση. Με την αύξηση της συχνότητας της αλλαγής του ρεύματος, το ρεύμα συγκεντρώνεται όλο και περισσότερο στην επιφάνεια του σύρματος και το ρεύμα μέσα στο καλώδιο γίνεται όλο και μικρότερο. Το φαινόμενο ονομάζεται δερματικό αποτέλεσμα.

Η αιτία του φαινομένου του δέρματος είναι τα δινορεύματα. Από το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, μπορεί να φανεί ότι ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο θα δημιουργηθεί γύρω από ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Όταν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διέρχεται από έναν αγωγό, ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο θα δημιουργηθεί μέσα και γύρω από τον αγωγό, προκαλώντας τη δημιουργία ενός επαγόμενου ρεύματος σε σχήμα δίνης μέσα στον αγωγό. Το δινορεύμα αναφέρεται ως δινορρεύμα.

Τα δινορρεύματα ή ρεύματα Eddy, είναι ρεύματα που δημιουργούνται στο εσωτερικό του πυρήνα και τον θερμαίνουν. Μειώνουμε αυτές τις απώλειες με ελασματοποίηση του πυρήνα και μόνωση αυτών δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερη αντίσταση στην ροή αυτών των ρευμάτων. Η εξίσωση είναι:

$$W_{loss_{eddy}} = K_e B_{max}^2 f^2 t^2 V \quad (3.22)$$

Όπου K_e σταθερά δινορρευμάτων, f η συχνότητα της εναλλαγής του μαγνητικού πεδίου, B η πυκνότητα της μαγνητικής ροής, t το πάχος του υλικού, V ο όγκος του υλικού.

3.11 Αντίσταση πηνίων

Επειδή τα πηνία δεν είναι ιδανικά, φέρνουν αντίσταση η οποία εξαρτάται από το μήκος του ανοιγμένου σύρματος του πηνίου και από το εμβαδόν διατομής του. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η 3.23:

$$R = \rho LA \quad (3.22)$$

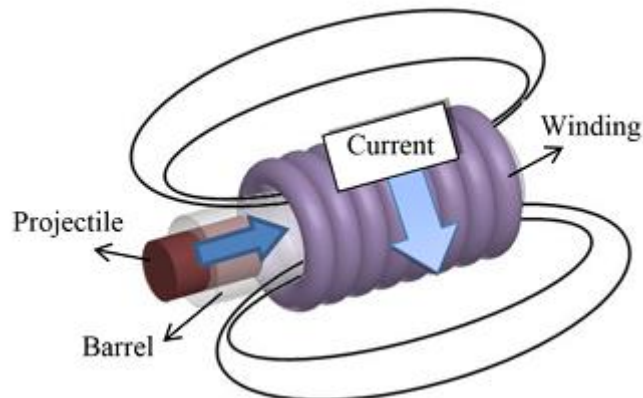
Όπου ρ ειδική αντίσταση του χαλκού, R η ωμική αντίσταση του αγωγού, A το εμβαδόν διατομής του χάλκινου σύρματος και L το μήκος του. Η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι $\rho=0,0175 \mu\Omega\text{m}$ σε θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Από την σχέση 3.22 προκύπτει η αντίσταση κάθε πηνίου στους $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Όμως η θερμοκρασία των πηνίων δεν παραμένει σταθερή και αυξάνεται όταν αυτά διαρρέονται από ρεύμα. Γι' αυτό λοιπόν λαμβάνεται υπόψη ο θερμικός συντελεστής α του χαλκού ο οποίος είναι $0,4041\%$ ανά βαθμό $^\circ\text{C}$.

4. Σχεδιασμός και υλοποίηση του EMA

4.1 Σωληνοειδής εκτοξευτήρας

Ένας απλός σωληνοειδής εκτοξευτής απροθυμίας με μία περιέλιξη αποτελείται από τρία μέρη όπως δίνεται παρακάτω:

- Βαρέλι: Ένας άδειος, μη μαγνητικός σωλήνας,
- Τύλιγμα (πηνίο): Ένα τύλιγμα που τυλίγεται γύρω από το βαρέλι (τύλιγμα στάτη),
- Πυρήνας (βλήμα): Ένας σιδηρομαγνητικός, κυλινδρικός, απλός πυρήνας προς εκτόξευση.



Σχήμα 4.1. Μέρη ενός σωληνοειδή εκτοξευτή και το μαγνητικό πεδίο λόγω του ρεύματος.

Τα μέρη ενός εκτοξευτή απροθυμίας φαίνονται στο Σχήμα 4.1. Όταν ένα ρεύμα διαρρέει το τύλιγμα, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το τύλιγμα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Όταν ένας σιδηρομαγνητικός πυρήνας υπάρχει μέσα στην κάννη και κοντά στο τύλιγμα, η μαγνητική ροή θα προσπαθήσει να ολοκληρώσει τον βρόχο της στον πυρήνα επειδή η διαπερατότητα του πυρήνα είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα. Ως αποτέλεσμα, η μαγνητική ροή ασκεί μια δύναμη στον πυρήνα για να μειώσει την απροθυμία του περιβάλλοντος και τον μετακινεί προς το κέντρο της περιέλιξης.

Ένας σωληνοειδής εκτοξευτής απροθυμίας είναι στην πραγματικότητα ένας ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας όπου η ηλεκτρική ενέργεια της ηλεκτρικής πηγής μετατρέπεται σε μαγνητική και μηχανική ενέργεια, όπως δίνεται στην εξίσωση

$$dW_e = dW_m + dW_f, dW_e = dW_m + dW_f \quad (4.1)$$

όπου dW_e , dW_m και dW_f είναι η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας (εκτός της χαμένης ενέργειας) που μεταφέρεται στο σύστημα, η ενέργεια που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και η ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος dt , αντίστοιχα.

Ενώ ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο, ένα μέρος της μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια αν αγνοηθούν οι απώλειες.

Εάν η κίνηση γίνεται σε συνθήκες σταθερού ρεύματος, το μηχανικό έργο που επιτελείται είναι η αύξηση της συνενεργείας. Επομένως, η ενέργεια που παράγεται από την ενέργεια είναι η μεγαλύτερη από την ενέργεια που παράγεται από την ενέργεια,

$$dW_m = dW'_f \quad (4.2)$$

Η συνενέργεια είναι η περιοχή μεταξύ του άξονα ρεύματος και της τροχιάς στη χαρακτηριστική τροχιά σύνδεσης ροής-ρεύματος και δίνεται ως εξής:

$$W'_f = \int_0^i \lambda di \quad (4.3)$$

όπου i και λ είναι το ρεύμα που εφαρμόζεται στο τύλιγμα και η σύνδεση ροής που εμφανίζεται στο τύλιγμα, αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά ρεύματος-σύνδεσης ροής μπορούν να γραφούν ως εξής για τη γραμμική κατάσταση:

$$\lambda = L(x)i \quad (4.4)$$

όπου $L(x)$ είναι η αυτεπαγωγή της περιέλιξης. Από τα 4.3 και 4.4 η συνενεργειακή ενέργεια μπορεί να δοθεί όπως για το γραμμικό σύστημα.

$$W_f = W'_f = \frac{1}{2}L(x)i^2 \quad (4.5)$$

Εάν η δύναμη προκαλεί τη μετατόπιση του βλήματος όσο dx είναι f_m τότε:

$$f_m = \frac{\partial W'_f(i, x)}{\partial x} \quad \text{constant } i \quad (4.6)$$

μπορεί να γραφτεί. Ως αποτέλεσμα, η δύναμη δίνεται με τη χρήση των 4.5 και 4.6 όπως παρακάτω [16]. Sen PC. Principles of Electric Machines and Power Electronics. New York, NY, USA: Wiley, 1989.

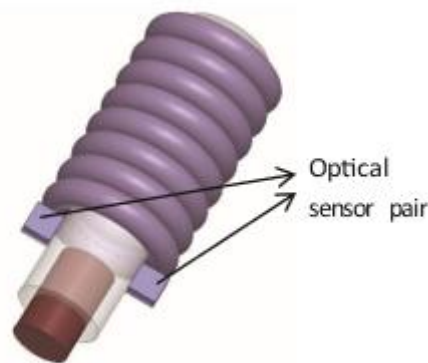
$$f_m = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2}L(x)i^2 \right) \quad \text{constant } i \quad (4.7)$$

Το μαγνητικό πεδίο που εμφανίζεται στο τύλιγμα κινεί τον πυρήνα μέσω του κέντρου του τυλίγματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Οι εκτοξευτές αυτεπαγωγής λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή της έλξης του πυρήνα προς το κέντρο της περιέλιξης και ο πυρήνας δεν ωθείται [8].

Όταν ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο, η ενέργεια της περιέλιξης πρέπει να αποκοπεί και η ενέργεια στο εσωτερικό της πρέπει να αποσβεστεί στον συντομότερο δυνατό χρόνο. Διαφορετικά, ο πυρήνας δεν μπορεί να εκτοξευθεί ή εκτοξεύεται αργά, επειδή ο πυρήνας θα τραβηχτεί και πάλι προς το κέντρο της περιέλιξης. Αυτό είναι το πιο κρίσιμο σημείο στο σχεδιασμό του εκτοξευτή απροσδιοριστίας. Επομένως, είναι απαραίτητος ένας αισθητήρας, ο οποίος αντιλαμβάνεται ότι ο πυρήνας έχει φθάσει στο κέντρο της περιέλιξης.

Εάν ο εκτοξευτής απροσδιοριστίας αποτελείται από περισσότερα του ενός τυλίγματα, κάθε τύλιγμα επηρεάζει τον πυρήνα όταν ενεργοποιείται. Σε αυτό το σύστημα, το κρίσιμο σημείο είναι ο χρονισμός. Όταν ο πυρήνας πλησιάζει στο επόμενο τύλιγμα, τότε το εν λόγω τύλιγμα πρέπει να ενεργοποιηθεί και η ενέργεια πρέπει να διακοπεί όταν φτάσει στο κέντρο του τυλίγματος και η ενέργεια της περιέλιξης θα πρέπει να αποσβένεται στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Η αποδοτικότητα του εκτοξευτή απροσδιοριστίας εξαρτάται από το χρόνο ροής του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα και το χρόνο απόσβεσης της ενέργειας στα τυλίγματα.

Ο χρονισμός της εφαρμογής και της αποκοπής της ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με την τοποθέτηση ενός ζεύγους οπτικού δέκτη-πομπού στην είσοδο της περιέλιξης, όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 4.2 Θέση τοποθέτησης του ζεύγους οπτικών αισθητήρων.

Η λειτουργία του εκτοξευτή απροσδιοριστίας είναι παρόμοια με εκείνη του κινητήρα απροσδιοριστίας. Η αυτεπίδραση μπορεί να οριστεί ως η αντίσταση έναντι του μαγνητικού πεδίου και εκφράζεται ως εξής [4] :

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} \quad (4.8)$$

όπου

l : μήκος της μαγνητικής διαδρομής (m)

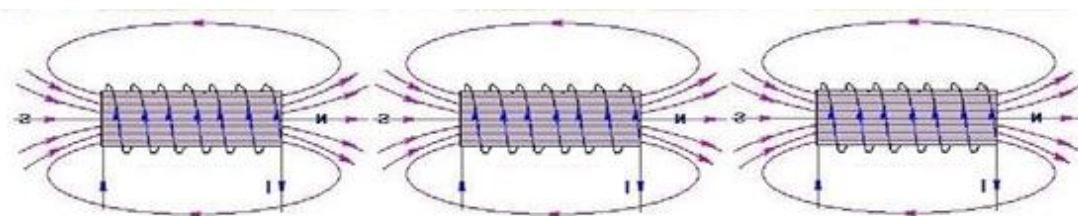
μ_r : σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

μ_0 : διαπερατότητα του αέρα (H/m)

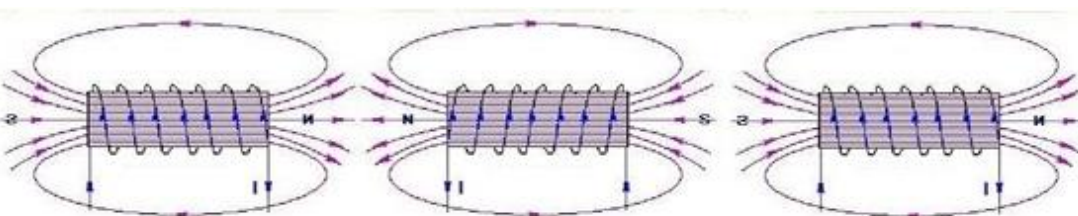
A : επιφάνεια διατομής όπου ρέει η μαγνητική ροή (m²)

4.2 Προσανατολισμός σωληνοειδών

Κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης, το βλήμα μαγνητίζεται από τα πηνία. Αν το μαγνητικό πεδίο σε όλα τα πηνία έχει τον ίδιο προσανατολισμό, η κατεύθυνση μαγνήτισης είναι η ίδια. Εάν όμως ο προσανατολισμός του μαγνητικού πεδίου είναι αντίστροφος από το προηγούμενο πηνίο και το βλήμα έχει κάποια παραμένουσα μαγνήτιση, τότε το βλήμα πρώτα απομαγνητίζεται και κατόπιν μαγνητίζεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται απώλειες λόγω υστέρησης στο βλήμα και η τελική κινητική του ενέργεια να είναι μειωμένη συγκριτικά με την περίπτωση όπου όλα τα πηνία έχουν κοινό προσανατολισμό. Οι απώλειες αυτές στην απόδοση του συστήματος είναι της τάξεως των 5-8% [6]. σε συστήματα EMA τριών πηνίων και αυξάνονται όσο αυξάνει ο αριθμός των πηνίων. Συνεπώς στο σύστημα που αναπτύχθηκε, λήφθηκε υπόψη το γεγονός αυτό και όλα τα πηνία συνδέθηκαν έτσι ώστε να έχουν κοινό μαγνητικό προσανατολισμό.



Σχήμα 4.3. Κοινός μαγνητικός προσανατολισμός των σωληνοειδών του EMA.



Σχήμα 4.4. Μη κοινός μαγνητικός προσανατολισμός των σωληνοειδών του EMA.

4.3 Πυκνωτές

Το καταλληλότερο στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας για το συγκεκριμένο σύστημα αποτελούν οι πυκνωτές. Σε σύγκριση με τις μπαταρίες μπορεί να αποθηκεύουν μικρότερα ποσά ενέργειας αλλά μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλές εντάσεις ρεύματος για μικρό χρονικό διάστημα και αυτό τα καθιστά κατάλληλα για την χρήση τους στον EMA. Ένα επιπλέον μέσο αποθήκευσης ενέργειας είναι το υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Δεν μπαίνουμε όμως σε διαδικασία σύγκρισης του με τα υπόλοιπα αποθηκευτικά μέσα, εξαιτίας του μεγάλου κόστους και του πολύπλοκου σχεδιασμού του. Αποτελεί όμως μια λύση για μια μεγάλη συσκευή EMA. Συνεπώς για την παροχή ρεύματος στον EMA έγινε η χρήση ηλεκτρολυτικών DC πυκνωτών [5] οι οποίοι συνδέθηκαν κατάλληλα μεταξύ τους και χωρίστηκαν σε τρεις ισοδύναμους πυκνωτές.

Οι συνδέσεις τους έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν δύο βασικές προϋποθέσεις:

- Πρώτον την σωστή κατανομή της τάσης μεταξύ των πυκνωτών όταν συνδέονται σε σειρά. Η ανοχή στις χωρητικότητες μεταξύ των πυκνωτών σε σειρά προκαλεί άνιση κατανομή της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα τους.
- Δεύτερον η μέγιστη τάση φόρτισης να μην υπερβαίνει την μέγιστη DC τάση λειτουργίας των πυκνωτών.

Αν κάποια από τις δυο παραπάνω προϋποθέσεις δε ικανοποιούνται τότε είναι βέβαιο ότι θα προκληθεί ανεπανόρθωτη καταστροφή των πυκνωτών. Επίσης οι πυκνωτές παρουσιάζουν ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η αντίσταση αυτή ναι μεν είναι πολλή μικρή, της τάξεως των $m\Omega$, αλλά συνδέοντας σε σειρά τους πυκνωτές η συνολική αντίσταση πολλαπλασιάζεται. Μικρές μεταβολές της αντίστασης μπορούν να επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος καθώς η τάση και το ρεύμα είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα. Έτσι για την διατήρηση της ισοδύναμης αντίστασης που παρουσιάζουν οι πυκνωτές σε χαμηλά επίπεδα προσπαθήσαμε να αποφύγουμε τη σύνδεση πολλών πυκνωτών σε σειρά.

Οι συνολικές χωρητικότητες υπολογίστηκαν με τη χρήση των εξισώσεων 4.9 και 4.10 σε σειρά και παράλληλα και την αναγραφόμενη τιμή χωρητικότητας των πυκνωτών. Η πραγματική τιμή υπολογίστηκε με τη χρήση πολύμετρου με δυνατότητα υπολογισμού χωρητικότητας πυκνωτών. Όλες οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1

Συνάρτηση υπολογισμού χωρητικότητας πυκνωτών σε σειρά.

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (4.9)$$

Συνάρτηση υπολογισμού χωρητικότητας πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση.

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4.10)$$

Εξίσωση που δίνει την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια των πυκνωτών.

$$W_{store} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.11)$$

	1 ^{ος} Πυκνωτής	2 ^{ος} Πυκνωτής	3 ^{ος} Πυκνωτής
Μέγιστη τάση	450 V	450V	450V
Χωρητικότητα (θεωρητική)	680 μ F	680 μ F	680 μ F
Χωρητικότητα (πραγματική)	640 μ F	660 μ F	635 μ F
Αποθηκευμένη ενέργεια στα 450V	64.800 J	66.825 J	64.294 J
ESR	0.16 Ω	0.16 Ω	0.16 Ω

Specifications and characteristics in brief

Rated voltage V_R	450 V DC							
Surge voltage V_S	$1.10 \cdot V_R$							
Rated capacitance C_R	270 ... 820 μ F							
Capacitance tolerance	$\pm 20\%$ \triangleq M							
Dissipation factor $\tan \delta$ (20 °C, 120 Hz)	$\tan \delta \leq 0.2$							
Leakage current I_{leak} (5 min, 20 °C)	$I_{leak} \leq 0.3 \mu\text{A} \cdot \left(\frac{C_R}{\mu\text{F}} \cdot \frac{V_R}{V}\right)^{0.7} + 4 \mu\text{A}$							
Self-inductance	Approx. 20 nH							
Useful life ¹⁾ 105 °C; V_R ; $I_{AC,R}$	> 3000 h	Requirements: $ \Delta C/C \leq 20\%$ of initial value $\tan \delta \leq 2$ times initial specified limit $I_{leak} \leq$ initial specified limit						
Voltage endurance test 105 °C; V_R	2000 h	Requirements: $ \Delta C/C \leq 10\%$ of initial value $\tan \delta \leq 1.3$ times initial specified limit $I_{leak} \leq$ initial specified limit						
Vibration resistance test	To IEC 60068-2-6, test Fc: Frequency range 10 Hz ... 2 kHz, displacement amplitude max. 0.375 mm, acceleration max. 5 g, duration 3 x 4 h. Capacitor mounted by its body which is rigidly clamped to the work surface.							
Characteristics at low temperature test	Max. impedance ratio at 100 Hz	<table border="1"> <tr> <td>$\frac{V_R}{Z_{-25\text{ °C}} / Z_{20\text{ °C}}}$</td> <td>450</td> </tr> <tr> <td>$\frac{Z_{-25\text{ °C}}}{Z_{20\text{ °C}}}$</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>$\frac{Z_{-40\text{ °C}}}{Z_{20\text{ °C}}}$</td> <td>17</td> </tr> </table>	$\frac{V_R}{Z_{-25\text{ °C}} / Z_{20\text{ °C}}}$	450	$\frac{Z_{-25\text{ °C}}}{Z_{20\text{ °C}}}$	7	$\frac{Z_{-40\text{ °C}}}{Z_{20\text{ °C}}}$	17
$\frac{V_R}{Z_{-25\text{ °C}} / Z_{20\text{ °C}}}$	450							
$\frac{Z_{-25\text{ °C}}}{Z_{20\text{ °C}}}$	7							
$\frac{Z_{-40\text{ °C}}}{Z_{20\text{ °C}}}$	17							
IEC climatic category	To IEC 60068-1: 25/105/56 (-25 °C/+105 °C/56 days damp heat test) The capacitors can be operated in the temperature range of -40 °C to +105 °C but the impedance at -40 °C must be taken into consideration.							
Sectional specification	IEC 60384-4							
Reference standard	AEC-Q200 ²⁾							

1) Refer to chapter "General technical information, 5 Useful life" on how to interpret useful life.

2) Refer to chapter "General technical information, 2.3 AEC-Q200 standard" for further details.

4.4 Βλήμα

Το βλήμα που απαιτείται για την μέγιστη απόδοση του EMA πρέπει να έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η μαγνητική διαπερατότητα, τόσο ισχυρότερη είναι η μαγνήτιση που μπορεί να δεχθεί. Συνεπώς επιλέξαμε το υλικό του βλήματος να είναι ο σίδηρος. Το δεύτερο σημείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο βλήμα είναι η μάζα του. Πολύ ελαφρά βλήματα επιταχύνονται ταχύτερα και σε υψηλότερες ταχύτητες. Τέλος, το βλήμα πρέπει να έχει μεγάλο μήκος και μικρή διάμετρο και να μην έχει αιχμηρό σημείο, καθώς προστίθεται επιπλέον βάρος με ελάχιστη επιπλέον ώθηση. Το χειρότερο δυνατό βλήμα είναι σφαιρικό, καθώς συγκεντρώνει τη μέγιστη δυνατή μάζα στο μικρότερο δυνατό όγκο και έτσι επιτυγχάνει μικρότερη επιτάχυνση.

4.5 Σωληνοειδές

Το σωληνοειδές είναι από τα πιο βασικά μέρη του EMA. Η κατασκευή του έγινε με κριτήριο την μεγιστοποίηση την έντασης του μαγνητικού πεδίου. Οι διαστάσεις του σωληνοειδούς δηλαδή η εσωτερική διάμετρος, το πάχος και το μήκος του είναι τρεις παράμετροι οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στο πόσο μεγάλη η μικρή θα είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου γύρω από το σωληνοειδές. Όμως η εσωτερική διάμετρος είναι προκαθορισμένη καθώς είναι η εξωτερική διάμετρος της σωλήνας στήριξης 3 mm. Συνεπώς απομένει η εύρεση του μήκους και του πάχους του.

Γνωρίζουμε πως το μήκος του σωληνοειδούς είναι άμεσα συνδεδεμένο με το μήκος του βλήματος. Για μέγιστη απόδοση πρέπει να ισχύει για το μήκος του βλήματος [3]:

$$75\% * L_{coil} \leq L_{bullet} \leq 100\% * L_{coil} \quad (4.12)$$

Έτσι με βάση τα διαθέσιμα βλήματα και τη σχέση 4.12 το μήκος των σωληνοειδών είναι $L=3$ cm. Τέλος το πάχος καθορίζεται από τους περιορισμούς λόγω του συντελεστή αυτεπαγωγής και της αντίστασης του σωληνοειδούς.

Επίσης περιορισμός προκύπτει και από την μέγιστη ικανότητα ισχύος που μπορούν να διαχειριστούν τα ημιαγωγικά στοιχεία. Οι ποσότητες του χάλκινου σύρματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι σύρμα μήκους 14 m με 150 ± 3 τυλίγματα.

Για τα τρία πηνία χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 42 m χάλκινου σύρματος πάχους 0.8mm

5. Σχεδιασμός ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του EMA

5.1 Κύρια ημιαγωγικά στοιχεία

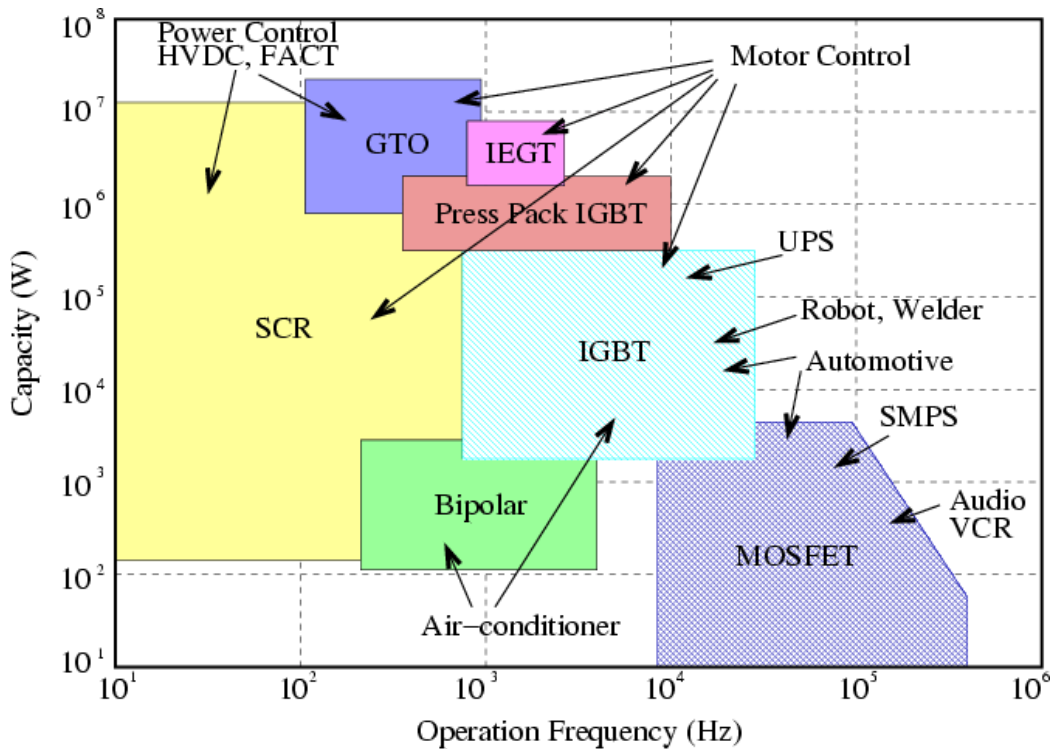
Τα ημιαγωγικά στοιχεία αποτελούν βασικά στοιχεία στην ηλεκτρονική και ηλεκτρική μηχανική λόγω της ικανότητάς τους να ελέγχουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η επανάσταση στην τεχνολογία των ημιαγωγών άνοιξε νέους ορίζοντες στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων ελέγχου. Από τους πρώτους αναλογικούς ενισχυτές έως τα σύγχρονα μικροεπεξεργαστικά συστήματα, τα ημιαγωγικά στοιχεία διαδραμάτισαν καίριο ρόλο στην εξέλιξη της τεχνολογίας.

Στην αγορά υπάρχουν διάφοροι τύποι ημιαγωγικών στοιχείων, κάθε ένας από τους οποίους διαχειρίζεται διαφορετικά ποσά ενέργειας και διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά, καθιστώντας τον κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές. Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου τέθηκαν τα παρακάτω κριτήρια:

- Η τάση που αντέχει στα άκρα του το ημιαγωγικό στοιχείο.
- Το μέγιστο ρεύμα που αντέχει το στοιχείο.
- Χρόνος αντοχής στο μέγιστο ρεύμα.
- Τιμή και διαθεσιμότητα των υλικών στην αγορά.

Τα κύρια ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος περιλαμβάνουν τους διακόπτες ισχύος MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) και IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Οι διακόπτες αυτοί χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση και αντοχή σε υψηλές τάσεις και ρεύματα. Χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες[12]:

- MOSFET
- IGBT
- GTO θυρίστορ
- SCR θυρίστορ



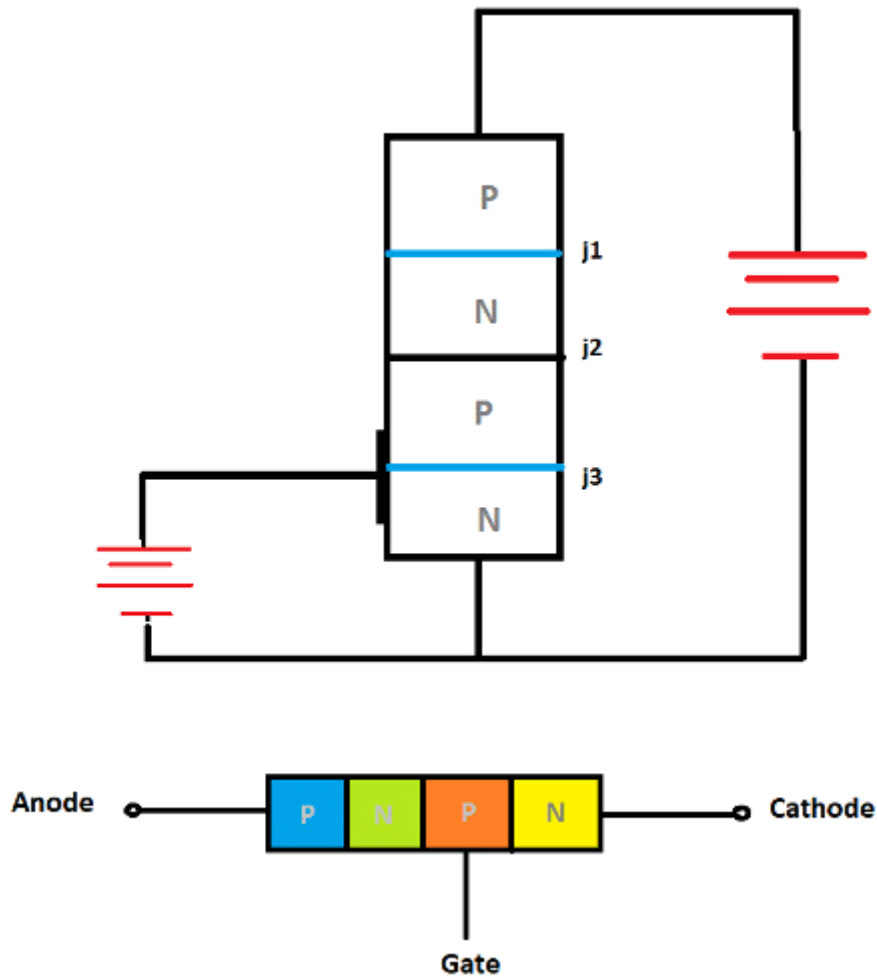
Σχήμα 5.1. Περιοχές λειτουργίας ημιαγώγιμων στοιχείων.

Βλέποντας το διάγραμμα 5.1 μπορούμε να συμπεράνουμε πως τα MOSFET απορρίπτονται ενώ οι υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις (IGBT, GTO thyristor, SCR thyristor) μας καλύπτουν. Όμως το υψηλό κόστος και η μικρή διαθεσιμότητα των GTO thyristor και των IGBT τα καθιστά απαγορευτικά για την παρούσα εργασία. Συνεπώς καταλήξαμε στα SCR thyristor αφού διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες ρεύματος και τάσης με αρκετά χαμηλό κόστος.

5.2 Θυρίστορ 70TPS12

Τα θυρίστορ τριών επαφών, γνωστά και ως SCR (Silicon Controlled Rectifier), αποτελούν ένα σημαντικό ημιαγωγικό στοιχείο με ευρεία εφαρμογή στην ηλεκτρονική και ηλεκτρική μηχανική. Η ανάπτυξή τους επιτρέπει τον έλεγχο μεγάλων ρευμάτων με χρήση χαμηλής ενεργοποίησης, κάτι που τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές όπως οι μετατροπείς ενέργειας, οι ελεγκτές φορτίου, οι διακόπτες, οι έλεγχοι φωτισμού και πολλές άλλες.

Το SCR λειτουργεί ως διακόπτης που ελέγχεται από την τροφοδοσία ενός γραμμικού κυκλώματος. Μέσω μιας σταθερής τάσης ή ρεύματος, το SCR παραμένει ανενεργό, αλλά όταν λάβει ένα σήμα ενεργοποίησης, γίνεται αγωγικός και παραμένει έτσι έως ότου ο ρεύμας διακοπεί. Η ικανότητά του να διατηρεί την κατάσταση αγωγιμότητας και να παραμένει ενεργός μέχρι να καταναλωθεί η ενέργεια του, το καθιστά εξαιρετικά χρήσιμο σε εφαρμογές που απαιτούν σταθερό έλεγχο και μεγάλη αντοχή.

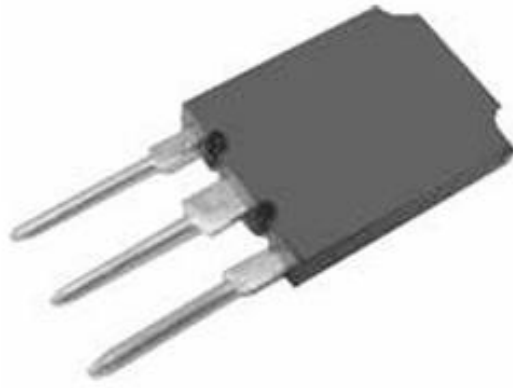


Σχήμα 5.2.Κύκλωμα ενός SCR θυρίστορ PNPN.

Η μετάβαση από την κατάσταση ορθής αποκοπής στην κατάσταση αγωγιμότητας σε ένα ορθά πολωμένο το θυρίστορ γίνεται με την εισαγωγή ρεύματος πύλης εφαρμόζοντας παλμό θετικής τάσης μεταξύ των ακροδεκτών της πύλης και της καθόδου.

Εφόσον το θυρίστορ βρεθεί σε κατάσταση αγωγιμότητας συμπεριφέρεται σαν δίοδος που άγει και πλέον δεν υπάρχει έλεγχος στο στοιχείο.

Οι απαιτούμενες συνθήκες για να βρεθεί πάλι σε κατάσταση ορθής αποκοπής και να απενεργοποιηθεί είναι το ορθό ρεύμα να μειωθεί κάτω από το επίπεδο του ρεύματος συγκράτησης I_H .



Super-247



1 (K) (G) 3

Σχήμα 5.3. Το θυρίστορ 70TPS12 και το κύκλωμα του.

Το θυρίστορ που επιλέξαμε είναι το 70TPS12 μπορεί να αντέξει ημιτονοειδής παλμούς έως 1200 A για 10 ms με εφαρμογή τάσης στην άνοδο, 1400 A για 10 ms χωρίς την εφαρμογή τάσης στην άνοδο και με μέγιστες τάσεις 1400-1600 V.

Voltage Ratings

Part Number	V_{RRM}/V_{ORM} , max. repetitive peak and off-state voltage V	V_{RSM} , maximum non repetitive peak reverse voltage V	I_{RRM}/I_{ORM} 125°C mA
70TPS12	1200	1300	15
70TPS16	1600	1700	

Absolute Maximum Ratings

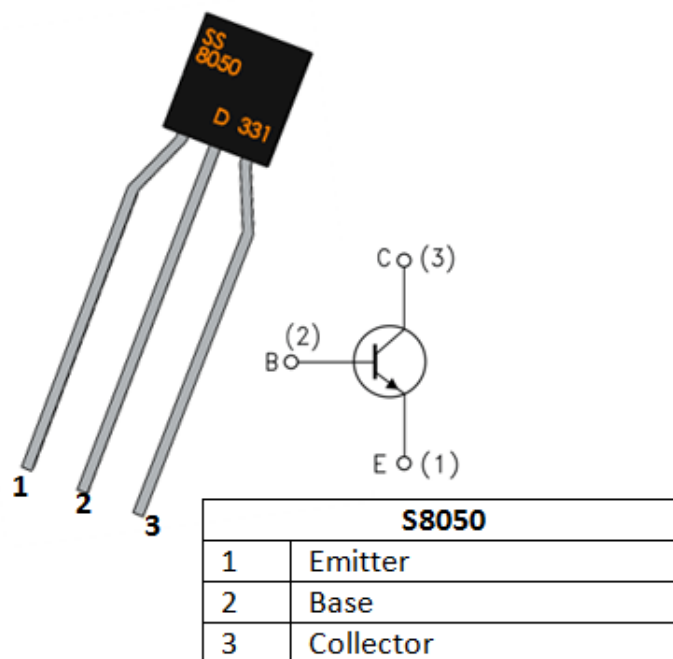
Parameters	70TPS..	Units	Conditions	
$I_{T(AV)}$ Max. Average On-state Current	70	A	@ $T_C = 82^\circ\text{C}$, 180° conduction half sine wave	
$I_{T(RMS)}$ Max. Continuous RMS On-state Current As AC switch	75		Lead current limitation	
I_{TSM} Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current	1200	A	10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied	Initial $T_J = T_J \text{ max.}$
	1400		10ms Sine pulse, no voltage reapplied	
I^2t Max. I^2t for Fusing	7200	A^2s	10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied	
	10200		10ms Sine pulse, no voltage reapplied	
I^2vt Max. I^2vt for Fusing	102000	A^2Vs	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied	
$V_{T(TO)1}$ Low Level Value of Threshold Voltage	0.916	V	$T_J = 125^\circ\text{C}$	
$V_{T(TO)2}$ High Level Value of Threshold Voltage	1.21			
r_{t1} Low Level Value of On-state Slope Resistance	4.138	mΩ		
r_{t2} High Level Value of On-state Slope Resistance	3.43			
V_{TM} Max. Peak On-state Voltage	1.4	V	@ 100A, $T_J = 25^\circ\text{C}$	
di/dt Max. Rate of Rise of Turned-on Current	150	A/μs	$T_J = 25^\circ\text{C}$	
I_H Max. Holding Current	200	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$	
I_L Max. Latching Current	400			
I_{RRM}/I_{ORM} Max. Reverse and Direct Leakage Current	1.0	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$	$V_R = \text{rated } V_{RRM}/V_{ORM}$
I_{CRM} Max. Rate of Rise	15		$T_J = 125^\circ\text{C}$	
dv/dt Max. Rate of Rise	500	V/μs	$T_J = 125^\circ\text{C}$	

5.3 Τρανζίστορ S8050 BJT

Τα BJT (Bipolar Junction Transistors) είναι ηλεκτρονικές συσκευές ημιαγωγών που έχουν ένα σημαντικό ρόλο στον τομέα της ηλεκτρονικής, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές, από ενισχυτές ηλεκτρονικού σήματος μέχρι κυκλώματα εναλλαγής και ψηφιακής λογικής. Ως τριών επιπέδων συσκευές, τα BJT αποτελούνται από δύο διαφορετικούς τύπους ημιαγωγών, P-type και N-type, που συνδυάζονται για να δημιουργήσουν μια δομή πολλαπλών επιπέδων.

Τα BJT μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως ενισχυτές είτε ως διακόπτες, ανάλογα με την εφαρμογή. Στη λειτουργία ενισχυτή, μικρές αλλαγές στο ρεύμα ή στην τάση εισόδου μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες αλλαγές στο ρεύμα εξόδου ή στην τάση, ενώ στη λειτουργία διακόπτη, το BJT μπορεί να αποκοπεί εντελώς από το κύκλωμα ως απόκριση σε μια ελέγχουσα τάση.

Η δομή και ο τρόπος λειτουργίας των BJT τους καθιστούν καίριας σημασίας για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών στην ηλεκτρονική, και η κατανόηση των βασικών τους χαρακτηριστικών είναι ουσιώδης για τους σχεδιαστές κυκλωμάτων



Σχήμα 5.5. Το BJT transistor S8050 και το κύκλωμα του.

Για τρανζίστορ επιλέχθηκε το S8050 το οποίο συνδέεται με την πύλη του θυρίστορ ώστε να μπορεί να ελέγχει τότε θα ενεργοποιείται και τότε θα απενεργοποιείται. Στην άλλη άκρη του το τρανζίστορ συνδέεται και ελέγχεται από την έξοδο του αισθητήρα υπερύθρων.

Voltage Ratings

Part Number	V_{RRM}/V_{DRM} , max. repetitive peak and off-state voltage V	V_{RSM} , maximum non repetitive peak reverse voltage V	I_{RRM}/I_{DRM} 125°C mA
70TPS12	1200	1300	15
70TPS18	1800	1700	

Absolute Maximum Ratings

Parameters	70TPS..	Units	Conditions			
$I_{T(AV)}$ Max. Average On-state Current	70	A	@ $T_C = 82^\circ\text{C}$, 180° conduction half sine wave			
$I_{T(RMS)}$ Max. Continuous RMS On-state Current As AC switch	75		Lead current limitation			
I_{TSM} Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current	1200	A	10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied	Initial $T_J = T_{J\text{max}}$.		
	1400		10ms Sine pulse, no voltage reapplied			
I^2t Max. I^2t for Fusing	7200	A^2s	10ms Sine pulse, rated V_{RRM} applied			
	10200		10ms Sine pulse, no voltage reapplied			
$I^2\sqrt{t}$ Max. $I^2\sqrt{t}$ for Fusing	102000	$A^2\sqrt{s}$	t = 0.1 to 10ms, no voltage reapplied			
$V_{T(TO1)}$ Low Level Value of Threshold Voltage	0.918	V	$T_J = 125^\circ\text{C}$			
$V_{T(TO2)}$ High Level Value of Threshold Voltage	1.21					
$r_{\theta 1}$ Low Level Value of On-state Slope Resistance	4.138	mΩ				
$r_{\theta 2}$ High Level Value of On-state Slope Resistance	3.43					
V_{TM} Max. Peak On-state Voltage	1.4	V	@ 100A, $T_J = 25^\circ\text{C}$			
di/dt Max. Rate of Rise of Turned-on Current	150	A/μs	$T_J = 25^\circ\text{C}$			
I_H Max. Holding Current	200	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$			
I_L Max. Latching Current	400					
I_{RRM} Max. Reverse and Direct	1.0	mA	$T_J = 25^\circ\text{C}$	$V_R = \text{rated } V_{RRM}/V_{DRM}$		
I_{DRM} Leakage Current	15		$T_J = 125^\circ\text{C}$			
dv/dt Max. Rate of Rise	500	V/μs	$T_J = 125^\circ\text{C}$			

Σχήμα 5.6. Datasheet απο το BJT τρανζίστορ S8050.

5.4 Τροφοδοσία κυκλώματος

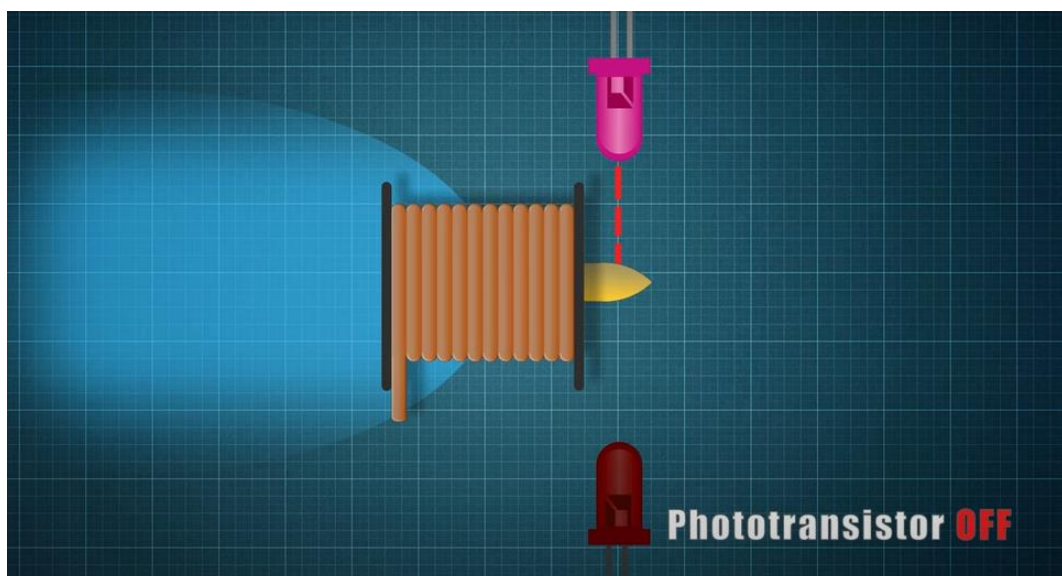
Το τροφοδοτικό του κυκλώματος μας αποτελείται από έναν μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Ο μετασχηματιστής ανύψωσης λαμβάνει την τροφοδοσία του από 3 μπαταρίες των 3.6 V με μέγιστο ρεύμα τα 20 A, οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε σειρά και την ανυψώνει από 12 V στα 450 V. Οι μπαταρίες παρέχουν τροφοδότηση σε όλα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα του EMA όπως επίσης και τον ανυψωτή που παρέχει υψηλή τάση στα πηνία και στους πυκνωτές.

Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής επιλέχτηκε διότι γνωρίζοντας πως η μέγιστη τάση που μπορούν να δεχθούν οι πυκνωτές στα άκρα τους είναι $450 V_{maxDC}$. Συνεπώς ισχύει ότι $450V_{DC} \div \sqrt{2} \cong 318.19V_{rms}$ είναι η μέγιστη τάση εξόδου που θα πρέπει να παρέχει ο μετασχηματιστής το πλήρως ανορθωμένο σήμα εξόδου στη συνέχεια συνδέεται στα άκρα των τριών ισοδύναμων πυκνωτών καθώς επίσης και στα πηνία.

Έτσι προκύπτουν δύο γραμμές εξόδου: 450 V και 12 V. Η γραμμή 12 V τροφοδοτεί τον μικροελεγκτή, τα led, τους τελεστικούς ενισχυτές και τους παλμούς εισόδου στα θυρίστορ.

5.5 Έλεγχος του πηνίου με χρήση φωτοδιακόπτη

Παίρνοντας το σήμα από τον ανιχνευτή φωτοτρανζίστορ το εφαρμόζουμε σε ένα κύκλωμα ελέγχου που ελέγχει ένα θυρίστορ. Αυτό το θυρίστορ είναι συνδεδεμένο με το πηνίο, ώστε να μπορούμε να ενεργοποιούμε και να απενεργοποιούμε το ρεύμα την χρονική στιγμή που το βλήμα περνάει μέσα από το πηνίο. Όταν η σφαίρα περάσει από την δέσμη φωτός που παράγει το υπέρυθρο led ο φωτοανιχνευτής που βρίσκεται απέναντι ενεργοποιείται και διακόπτει μέσω του BJT τρανζίστορ το ρεύμα, ώστε το βλήμα να μπορεί να συνεχίσει στην άλλη πλευρά. Έτσι με αυτό τον τρόπο μεταφέρουμε το μαγνητικό πεδίο από το πρώτο στο δεύτερο πηνίο και ούτω καθεξής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7. Η απενεργοποίηση του φωτοανιχνευτή την χρονική στιγμή που το βλήμα περνάει μέσα από το πηνίο διακόπτοντας την δέσμη του υπεριώδους led.

Τέλος ως πηγή φωτός χρησιμοποιήθηκε ένα υπέρυθρο Led όπου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει 850 nm είναι ανιχνεύσιμο από τη φωτοδίοδο. Ουσιαστικά ο φωτοδιακόπτης που χρησιμοποιήσαμε είναι τύπου (through-scan) [11], ανιχνεύει την διέλευση του βλήματος καθώς τη στιγμή που αυτό διέρχεται μέσω αυτού και αποκόπτει τη φωτεινή ακτινοβολία μεταξύ της πηγής Led και της φωτοδίοδου. Στον EMA η χρήση του φωτοδιακόπτη έγινε στο σύστημα ενεργοποίησης των σταδίων 2 και 3.

Device Selection Guide

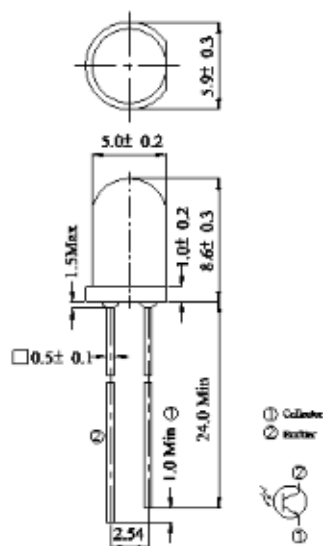
Chip Materials	Lens Color
GaAlAs	water clear

Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Continuous Forward Current	I _F	100	mA
Peak Forward Current(*1)	I _{FP}	1.0	A
Reverse Voltage	V _R	5	V
Operating Temperature	T _{opr}	-25 ~ +85	°C
Storage Temperature	T _{stg}	-40 ~ +100	°C
Soldering Temperature(*2)	T _{sol}	260	°C
Power Dissipation at (or below) 25°C Free Air Temperature	P _d	150	mW

Notes: *1:I_{FP} Conditions--Pulse Width ≤ 100μs and Duty ≤ 1%.
*2:Soldering time ≤ 5 seconds.

Package Dimensions



- Notes: 1.All dimensions are in millimeters
 2.Tolerances unless dimensions ± 0.25 mm

Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Units
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	30	V
Emitter-Collector-Voltage	V_{EC0}	5	V
Collector Current	I_C	20	mA
Operating Temperature	T_{opr}	-25 ~ +85°C	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +85°C	°C
Lead Soldering Temperature	T_{sol}	260	°C
Power Dissipation at (or below) 25°C Free Air Temperature	P_c	75	mW

Notes: *1:Soldering time ≤ 5 seconds.

Σχήμα 5.9. Datasheet φωτοανιχνευτή PT334-6C.

5.6 Δίοδοι

Οι δίοδοι είναι θεμελιώδη εξαρτήματα της σύγχρονης ηλεκτρονικής, που χρησιμεύουν ως κρίσιμα δομικά στοιχεία σε ένα ευρύ φάσμα κυκλωμάτων και συσκευών. Η δίοδος είναι μια διάταξη ημιαγωγού που επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς μία κατεύθυνση, ενώ το εμποδίζει προς την αντίθετη κατεύθυνση, λειτουργώντας έτσι ως μονόδρομη βαλβίδα για το ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τις διόδους απαραίτητες για εργασίες όπως η ανόρθωση, η οποία μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC), η αποδιαμόρφωση σήματος και η ρύθμιση τάσης. Οι δίοδοι κυκλοφορούν σε διάφορους τύπους, όπως οι τυπικές δίοδοι πυριτίου, οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED), οι δίοδοι Zener και οι δίοδοι Schottky, καθεμία από τις οποίες έχει σχεδιαστεί για να εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες. Η κατανόηση των βασικών αρχών και εφαρμογών των διόδων είναι ζωτικής σημασίας για όσους ασχολούνται με την ηλεκτρονική και την ηλεκτρολογία, καθώς διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργικότητα και την αποδοτικότητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Δίοδος FR607

Η δίοδος FR607 είναι ένας ανορθωτής ταχείας αποκατάστασης γνωστός για την αποδοτική του απόδοση σε εφαρμογές μετατροπής ισχύος και υψηλής συχνότητας. Ακολουθούν τα βασικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές της FR607:

- Τάση αναστροφής (V_R): Η δίοδος FR607 μπορεί να αντέξει μέγιστη αντίστροφη τάση 1.000 βολτ, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές υψηλής τάσης.
- Ρεύμα προς τα εμπρός (I_F): Διαθέτει μέγιστο μέσο ρεύμα εμπρόσθιας ροής 6 αμπερ, επιτρέποντάς της να διαχειρίζεται σημαντικά φορτία ρεύματος χωρίς υποβάθμιση.
- Πτώση τάσης προς τα εμπρός (V_F): Σε ρεύμα 6 αμπερ, η πτώση τάσης προς τα εμπρός είναι τυπικά περίπου 1,3 βολτ. Αυτή η χαμηλή πτώση τάσης εξασφαλίζει αποτελεσματική λειτουργία με ελάχιστη απώλεια ισχύος.
- Χρόνος αποκατάστασης (t_{rr}): Ένα από τα καθοριστικά χαρακτηριστικά του FR607 είναι ο γρήγορος χρόνος αποκατάστασης περίπου 500 νανοδευτερολέπτων, ο οποίος του επιτρέπει να μεταβαίνει γρήγορα και αποτελεσματικά σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας.
- Τύπος συσκευασίας: Ο FR607 διατίθεται συνήθως σε συσκευασία DO-201AD, παρέχοντας στιβαρή μηχανική σταθερότητα και ευκολία τοποθέτησης.

Δίοδος 6A10

Η δίοδος 6A10 είναι ένας ανορθωτής γενικής χρήσης σχεδιασμένος για τυπικές εργασίες ανόρθωσης σε τροφοδοτικά και άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές της 6A10:

- Τάση αναστροφής (V_R): Η δίοδος 6A10 είναι ικανή να αντέχει μέγιστη αντίστροφη τάση 1.000 βολτ, παρόμοια με την FR607, γεγονός που την καθιστά ευέλικτη για χρήση σε διάφορες εφαρμογές υψηλής τάσης.
- Ρεύμα προς τα εμπρός (I_F): Αυτή η δίοδος μπορεί να διαχειριστεί μέγιστο μέσο ρεύμα εμπρόσθιας ροής 6 αμπέρ, εξασφαλίζοντας ότι μπορεί να υποστηρίξει σημαντικές απαιτήσεις ρεύματος σε διάφορα κυκλώματα.
- Πτώση τάσης προς τα εμπρός (V_F): Η πτώση τάσης προς τα εμπρός για την 6A10 είναι τυπικά περίπου 1,1 βολτ σε ρεύμα προς τα εμπρός 6 αμπέρ. Αυτή η χαμηλή τάση εμπρόσθιας τάσης συμβάλλει στην αποτελεσματική διαχείριση ισχύος.
- Χρόνος ανάκτησης (t_{rr}): Σε αντίθεση με τον FR607, ο 6A10 δεν χαρακτηρίζεται ειδικά από γρήγορο χρόνο αποκατάστασης, καθιστώντας τον πιο κατάλληλο για εφαρμογές όπου η ταχύτητα είναι λιγότερο κρίσιμη.
- Τύπος συσκευασίας: Ο 6A10 διατίθεται συνήθως σε συσκευασία DO-201AD, παρόμοια με τον FR607, η οποία εξασφαλίζει αξιόπιστη απόδοση και εύκολη ενσωμάτωση σε κυκλώματα.

Σύγκριση και εφαρμογές

Τόσο οι δίοδοι FR607 όσο και οι δίοδοι 6A10 έχουν σχεδιαστεί για να διαχειρίζονται υψηλές τάσεις και ρεύματα, καθιστώντας τις κατάλληλες για ανόρθωση ισχύος σε μετατροπές εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, τροφοδοτικά και διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές. Ωστόσο, ο γρήγορος χρόνος αποκατάστασης της FR607 την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπου είναι απαραίτητη η ταχεία μεταγωγή. Αντίθετα, ο 6A10 χρησιμεύει ως ένας στιβαρός ανορθωτής γενικής χρήσης για τυπικές εργασίες ανόρθωσης όπου η ταχύτητα δεν αποτελεί πρωταρχικό μέλημα.

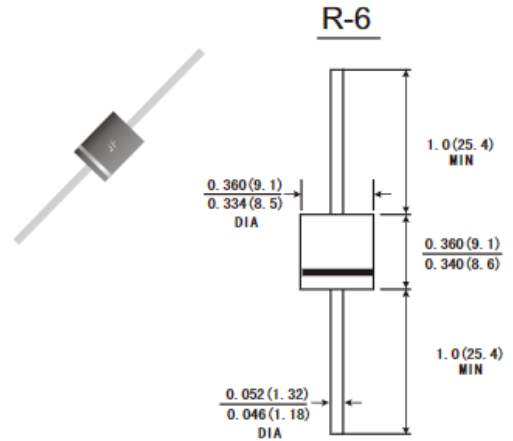
Η κατανόηση των ειδικών χαρακτηριστικών και των βέλτιστων εφαρμογών κάθε τύπου διόδου βοηθά στην επιλογή του κατάλληλου εξαρτήματος για μια συγκεκριμένη ηλεκτρονική σχεδίαση, εξασφαλίζοντας τόσο την αποδοτικότητα όσο και την αξιοπιστία στην τελική εφαρμογή.

FEATURES

- The plastic package carries Underwrites Laboratory
- Flammability Classification 94V-0
- High forward current capability
- High surge current capability
- Construction utilizes void-free molded plastic technique
- High temperature soldering guaranteed:260°C/10 seconds at terminals
- Component in accordance to RoHs 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC

MECHANICAL DATA

- *Case:* R-6 molded plastic body
- *Terminals:* Plated axial lead, solderable per MIL-STD-750,method 2026
- *Polarity:* Color band denotes cathode end
- *Mounting Position:* Any
- *Weight:* 0.07ounce, 2.1 grams



Dimensions in inches and (millimeters)

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified ,Single phase ,half wave 60Hz, ,resistive or inductive load. For capacitive load, derate by 20%.)

	Symbols	6A05	6A1	6A2	6A3	6A4	6A6	6A8	6A10	Unis
Maximum recurrent peak reverse voltage	VRRM	50	100	200	300	400	600	800	1000	Volts
Maximum RMS voltage	VRMS	35	70	140	210	280	420	560	700	Volts
Maximum DC blocking voltage	VDC	50	100	200	300	400	600	800	1000	Volts
Maximum average forward rectified current 0.375"(9.5mm) lead length TA=60°C	I(AV)	6.0								Amps
Peak forward surge current (8.3ms half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)	IFSM	250.0								Amps
Maximum instantaneous forward voltage at 6.0 A	VF	0.95								Volts
Maximum reverse current at rated DC blocking voltage	IR	TA =25°C	10.0							μA
		TA =100°C	400.0							
Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle Average .375" (9.5mm) Lead Length @TA=75°C	HTIR	5.0								μA
Typical thermal resistance (Note 2)	Rθ JA	35.0								°C/W
Typical junction capacitance (Note 1)	CJ	90								pF
Operating and Storage temperature range	TJ TSTG	-65 to+150								°C

Note: 1.Measured at 1MHz and applied reverse voltage of 4.0V D. C .
2.Mounton Cu-Pad Size 16mm×16mm on P. C. B.

FR601 – FR607

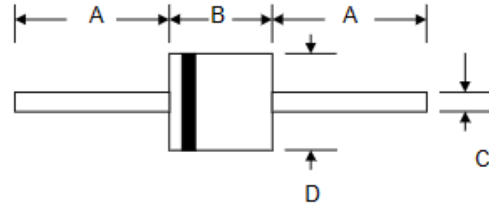
6.0A FAST RECOVERY RECTIFIER

Features

- Diffused Junction
- Low Forward Voltage Drop
- High Current Capability
- High Reliability
- High Surge Current Capability

Mechanical Data

- Case: Molded Plastic
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Weight: 2.1 grams (approx.)
- Mounting Position: Any
- Marking: Type Number
- Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant



R-6		
Dim	Min	Max
A	25.4	—
B	8.60	9.10
C	1.20	1.30
D	8.60	9.10
All Dimensions in mm		

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ $T_A=25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristic	Symbol	FR601	FR602	FR603	FR604	FR605	FR606	FR607	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
RMS Reverse Voltage	$V_R(RMS)$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @ $T_A = 55^{\circ}\text{C}$	I_O	6.0							A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I_{FSM}	200							A
Forward Voltage @ $I_F = 6.0\text{A}$	V_{FM}	1.2							V
Peak Reverse Current @ $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ At Rated DC Blocking Voltage @ $T_A = 100^{\circ}\text{C}$	I_{RM}	10 200							μA
Reverse Recovery Time (Note 2)	t_r	150			250	500		nS	
Typical Junction Capacitance (Note 3)	C_j	100							pF
Operating Temperature Range	T_j	-65 to +125							$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65 to +150							$^{\circ}\text{C}$

*Glass passivated forms are available upon request

- Note: 1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case
2. Measured with $I_F = 0.5\text{A}$, $I_R = 1.0\text{A}$, $I_{RR} = 0.25\text{A}$. See figure 5.
3. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V D.C.

5.8 Ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος EMA

Με βάση το σχήμα 5.12 η λειτουργία του κυκλώματος είναι:

Πρώτο στάδιο

1. Παροχή ρεύματος και φόρτιση:

- Τροφοδοτικό 450V: Η υψηλή τάση (450V) χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των πυκνωτών.
- C1 (πυκνωτής 680μF): Αποθηκεύει την ενέργεια από το τροφοδοτικό 450V.
- D2 (Δίοδος 6A10): Αποτρέπει την αντίστροφη ροή ρεύματος για την προστασία του τροφοδοτικού.

2. Ενεργοποίηση του πηνίου:

- Κουμπί πίεσης (Push): Εκκινεί την ακολουθία πυροδότησης.
- R1 (5MΩ) και R2 (100Ω): Σχηματίζουν έναν διαιρέτη αντιστάσεων για τον έλεγχο της τάσης πύλης του T1.
- T1 (Θυρίστορ 70TPS12): Λειτουργεί ως διακόπτης για την εκφόρτιση του C1 μέσω του COIL1.
- COIL1: Το πηνίο της πρώτης βαθμίδας που παράγει μαγνητικό πεδίο για την επιτάχυνση του βλήματος.
- D1 (δίοδος FR607G): Προστατεύει από την αντίστροφη ηλεκτροκινητική δύναμη (EMF) που δημιουργείται όταν το πηνίο απενεργοποιείται.

3. Ένδειξη και οθόνη:

- LED1 (μπλε LED): Δείχνει πότε το πρώτο στάδιο είναι ενεργό.
- Οθόνη1 (βύσμα): Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση με μια οθόνη ή άλλες ενδείξεις.

Δεύτερο στάδιο

1. Παροχή ρεύματος και φόρτιση:

- 450V Παροχή ρεύματος: Χρησιμοποιείται για τη φόρτιση πυκνωτών.
- C2 (πυκνωτής 680μF): Αποθηκεύει ενέργεια για το δεύτερο στάδιο.
- D3 (δίοδος 6A10): Προστατεύει το τροφοδοτικό εμποδίζοντας την αντίστροφη ροή ρεύματος.

2. Ενεργοποίηση του πηνίου:

- Q3 (3QG): Ελέγχεται από το κύκλωμα της δεύτερης βαθμίδας για την εναλλαγή της διαδρομής εκφόρτισης.
- T2 (θυρίστορ 70TPS12): Αλλάζει για την εκφόρτιση του C2 μέσω του COIL2 όταν ενεργοποιηθεί.
- COIL2: Το πηνίο του δεύτερου σταδίου για την περαιτέρω επιτάχυνση του βλήματος.
- D4 (Δίοδος FR607G): Προστατεύει από την αντίστροφη ηλεκτρομαγνητική τάση όταν το πηνίο είναι απενεργοποιημένο.

3. Ένδειξη και οθόνη:

- U1 (Αντίσταση 100R), R5 (10KΩ), R4 (5MΩ), R6 (2KΩ): Έλεγχος της τάσης πύλης των Q3 και T2.
- LED2 (μπλε LED), LED3 (κόκκινη LED), LED4 (IR LED), LED5 (λευκή LED): Διάφορες ενδείξεις για το δεύτερο στάδιο.
- Οθόνη1 (βύσμα): Παρόμοια με το πρώτο στάδιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς προβολής.

Συνολική λειτουργία

Φόρτιση:

- Και τα δύο στάδια φορτίζουν τους αντίστοιχους πυκνωτές τους (C1 και C2) χρησιμοποιώντας την παροχή 450V.
- Οι δίοδοι (D2, D3) αποτρέπουν το ανάστροφο ρεύμα και προστατεύουν την τροφοδοσία.

Ακολουθία πυροδότησης:

- **Πρώτο στάδιο:** Όταν πατηθεί το μπουτόν, ενεργοποιείται το T1, εκφορτίζοντας το C1 μέσω του COIL1, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο που προωθεί το βλήμα.
- **Δεύτερο στάδιο:** Αφού το βλήμα περάσει από το πρώτο στάδιο, το δεύτερο στάδιο ενεργοποιείται από το Q3 και το T2, εκφορτίζοντας το C2 μέσω του COIL2 για την περαιτέρω επιτάχυνση του βλήματος.

Ενδείξεις:

- Οι λυχνίες LED (LED1, LED2, LED3, LED4, LED5) παρέχουν οπτικές ενδείξεις των σταδίων και της ετοιμότητας.

Με βάση το σχήμα 5.13 το κύκλωμα λειτουργεί ως εξής:

Κύρια εξαρτήματα:

- Τμήμα υψηλής τάσης (450V)
- D1 (δίοδος 6A10): Εξασφαλίζει τη ροή ρεύματος προς μία κατεύθυνση, αποτρέποντας την οπισθοροή προς την παροχή ρεύματος.
- C2 (πυκνωτής 680μF): Αποθηκεύει ενέργεια υψηλής τάσης από το τροφοδοτικό για να εκφορτιστεί μέσω του πηνίου.

Μηχανισμός μεταγωγής

- T1 (θυρίστωρ 70TPS12): Λειτουργεί ως διακόπτης για την εκφόρτιση του πυκνωτή μέσω του πηνίου όταν ενεργοποιηθεί.

- Q3 (3QG): Ελέγχει την πύλη του T1 για την έναρξη της ακολουθίας πυροδότησης.
- ΠΗΝΙΟ2: Ηλεκτρομαγνητικό πηνίο που παράγει το μαγνητικό πεδίο για την προώθηση του βλήματος.
- D2 (Δίοδος FR607G): Προστατεύει από το οπίσθιο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται όταν το COIL2 απενεργοποιείται.

Κύκλωμα ελέγχου και ενδείξεων

- R1 (Αντίσταση 5MΩ): Τραβάει την πύλη του T1 σε υψηλή τάση, εξασφαλίζοντας ότι είναι απενεργοποιημένη έως ότου την ενεργοποιήσει το Q3.
- LED1 (μπλε LED): Δείχνει ότι η βαθμίδα είναι έτοιμη ή ενεργή.
- Οθόνη1 (βύσμα): Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόσθετη ένδειξη οθόνης ή κατάστασης.

Τμήμα ενεργοποίησης και αισθητήρων (δεύτερο μπλοκ)

- Q1 (τρανζίστορ SS8050): Ελέγχει τον μηχανισμό ενεργοποίησης του Q3.
- R2 (2KΩ), R3 (100Ω), R4 (10KΩ): Αντιστάσεις για την πόλωση και τον έλεγχο της ροής ρεύματος.
- LED2 (κόκκινη λυχνία LED), LED3 (λευκή λυχνία LED): Υποδεικνύουν διάφορες καταστάσεις, όπως ετοιμότητα για πυροδότηση ή ενεργοποίηση βαθμίδας.
- F01 (PT334-6B): Πιθανώς ένας οπτικός αισθητήρας (π.χ. φωτοτρανζίστορ) που ανιχνεύει τη διέλευση του βλήματος, ενεργοποιώντας το επόμενο στάδιο ή υποδεικνύοντας την επιτυχή εκτόξευση.
- R5 (2KΩ): Αντίσταση pull-up για τον οπτικό αισθητήρα.
- LED4 (LED IR): Λυχνία LED υπερύθρων που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το φωτοτρανζίστορ για την ανίχνευση του βλήματος.

Συνολική λειτουργία

Φάση φόρτισης:

- Ο πυκνωτής (C2) φορτίζεται στα 450V μέσω του D1. Η διόδος διασφαλίζει ότι ο πυκνωτής φορτίζεται σωστά χωρίς να εκφορτίζεται πίσω στο τροφοδοτικό.

Ετοιμότητα και ένδειξη:

- Η λυχνία LED1 (μπλε) ανάβει για να υποδεικνύει ότι η βαθμίδα είναι φορτισμένη και έτοιμη.
- Η πύλη του θυρίστορ (T1) τραβιέται ψηλά από το R1, κρατώντας το κλειστό μέχρι να ενεργοποιηθεί.

Ενεργοποίηση του πηνίου:

- Όταν ενεργοποιείται το Q3, τραβάει την πύλη του T1 χαμηλά, επιτρέποντάς του να αγωγιμοποιηθεί.
- Στη συνέχεια, το T1 εκφορτίζει τον πυκνωτή (C2) μέσω του COIL2, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο που εκτοξεύει το βλήμα.
- Το D2 προστατεύει το κύκλωμα από την αντίρροπη ΗΕΔ που δημιουργείται από το COIL2 όταν το ρεύμα σταματά να ρέει.

Ανίχνευση και έλεγχος:

- Ο οπτικός αισθητήρας (F01) με την υπέρυθη λυχνία LED (LED4) και τη σχετική αντίσταση (R5) ανιχνεύει πότε το βλήμα περνάει.
- Αυτός ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργοποίηση του Q1, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να ενεργοποιήσει το Q3, προετοιμάζοντας το κύκλωμα για τον επόμενο κύκλο πυροδότησης ή ενεργοποιώντας το επόμενο στάδιο.
- Οι λυχνίες LED2 (κόκκινη) και LED3 (λευκή) παρέχουν οπτικές ενδείξεις για τις διάφορες καταστάσεις του κυκλώματος.

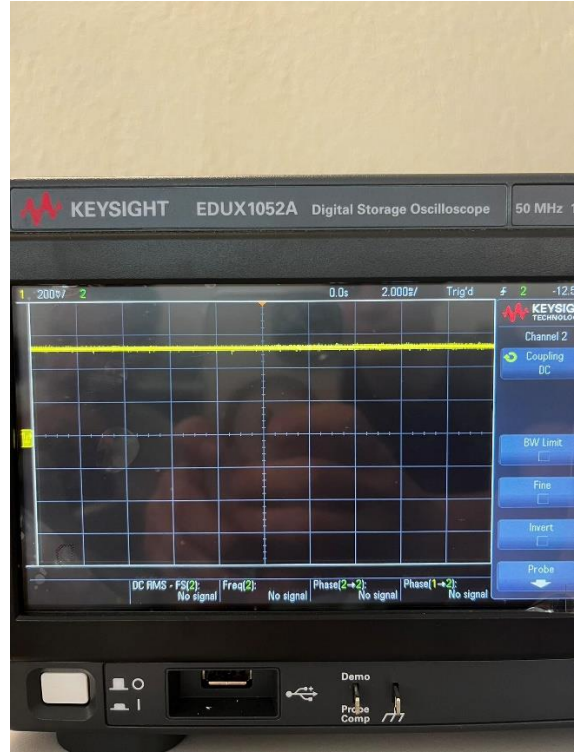
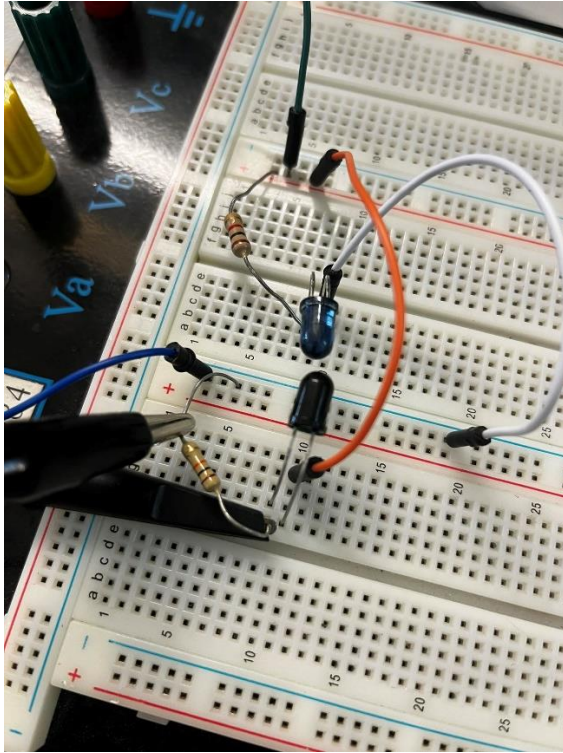
5.9 Απεικόνιση των εξαρτημάτων και της κατασκευής



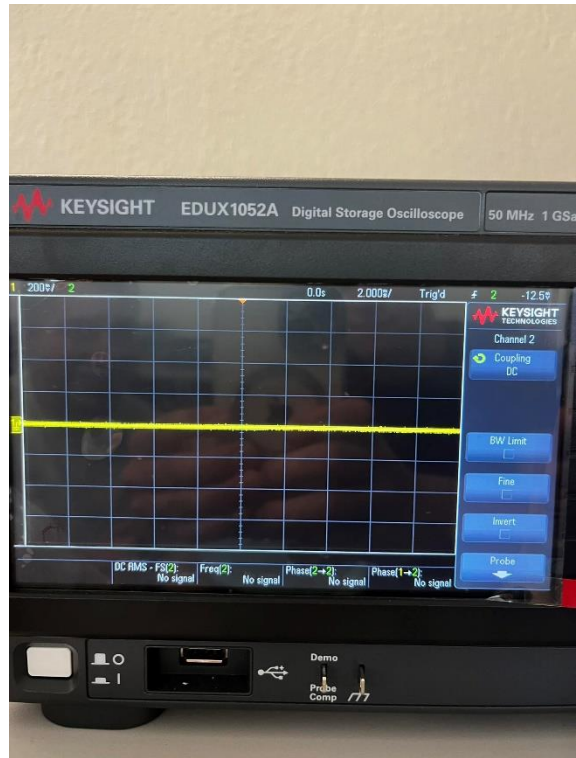
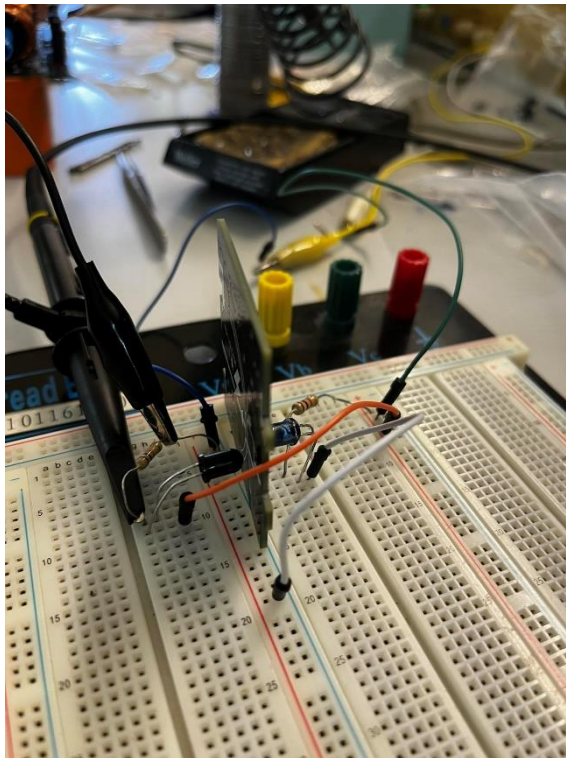
Σχήμα 5.14. Εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του EMA.



Σχήμα 5.15. Αριστερά: Η εκτύπωση από το καρούλι που τυλίγεται το πηνίο με χρήση 3D εκτυπωτή. Δεξιά: Το εκτυπωμένο καρούλι με την χρήση 3D εκτυπωτή για τη δημιουργία των πηνίων.



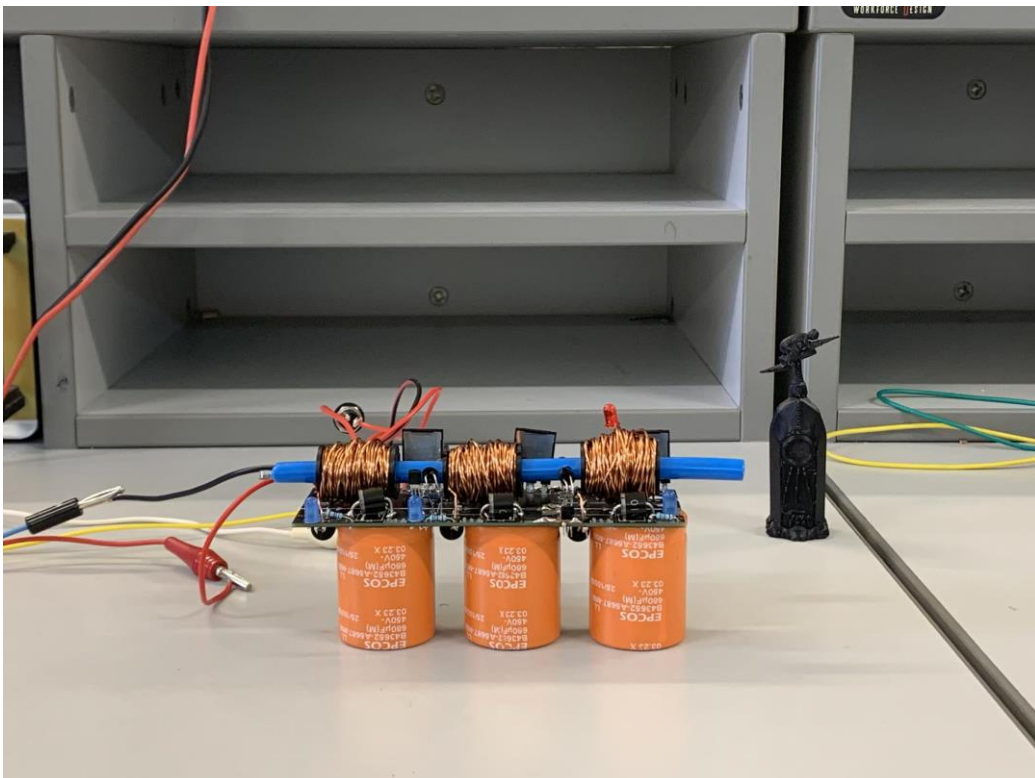
Σχήμα 5.16. Αριστερά: Κύκλωμα για έλεγχο λειτουργίας των φωτοδιόδων χωρίς εμπόδιο. Δεξιά: Σήμα από τον φωτοανιχνευτή Κλίμακες: 2sec/div, 200mV/div.



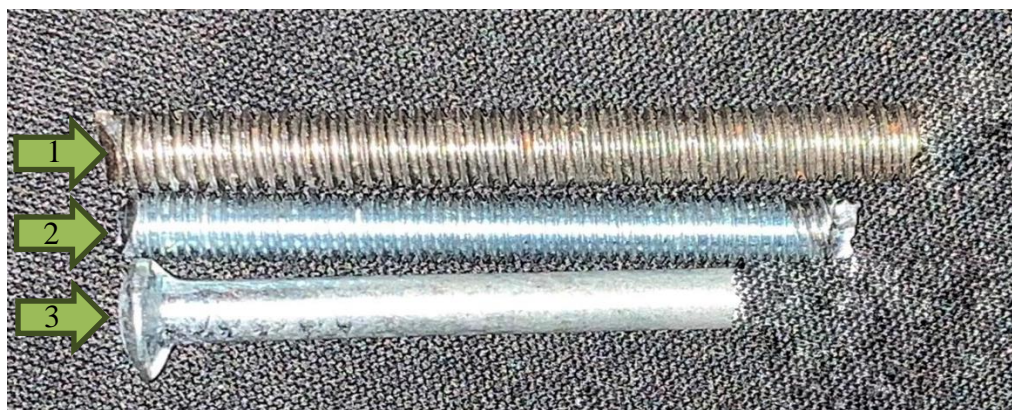
Σχήμα 5.17. Αριστερά: Κύκλωμα για έλεγχο λειτουργίας των φωτοδιόδων με εμπόδιο για διακοπή της δέσμης φωτός. Δεξιά: Σήμα από τον φωτοανιχνευτή Κλίμακες: 2sec/div, 200mV/div.



Σχήμα 5.18. Διάτρηση ανοιγμάτων στον σωλήνα του EMA.



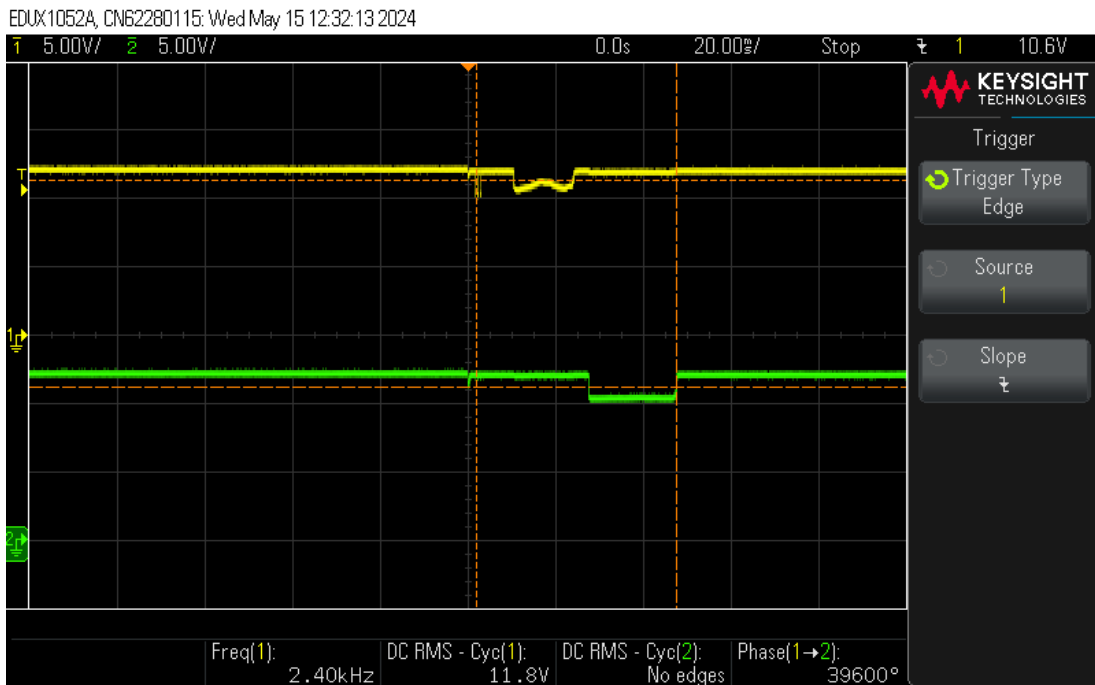
Σχήμα 5.19. Ολοκληρωμένη κατασκευή του EMA.



Σχήμα 5.20. Σιδηρομαγνητικά βλήματα. (1): $L=5mm$, (2): $L=4mm$ (3): $L=5mm$.

5.10 Απεικόνιση της απόκρισης του κυκλώματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και οι μετρήσεις που εξήχθησαν από το σύστημα που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 5.20. Παλμός ενεργοποίησης του φωτοανιχνευτή του πρώτου (κίτρινο) σταδίου και του δεύτερου (πράσινο) κατά την διέλευση του βλήματος από την δέσμη του υπεριώδους led.

Για να αποκτήσουμε τις παραπάνω πληροφορίες τοποθετήθηκαν φωτοδιακόπτες στην είσοδο και στην έξοδο του κάθε πηνίου. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις λήφθηκαν με αρχική τάση φόρτισης των πυκνωτών στα 250 V και με την λειτουργία και των τριών Stages το ένα μετά το άλλο.

Επίσης οι μικροί παλμοί που εμφανίζονται μπροστά από τους παλμούς ανίχνευσης του βλήματος οφείλονται στις ανακλάσεις φωτός λόγω της διάφανης σωλήνας και της λείας επιφάνειας του βλήματος. Το γεγονός αυτό όμως δεν καθυστερεί την ενεργοποίηση των θυρίστρον.

6. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με μεγάλη επιτυχία ένα ολοκληρωμένο σύστημα Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκαν διάφορα προβλήματα και περιορισμοί αλλά και οι δυνατότητες του συστήματος. Βεβαίως όλα τα προβλήματα αντιμετωπίστηκαν ώστε να καταλήξουμε σε ένα πλήρως λειτουργικό αποτέλεσμα.

Συνοψίζοντας, για να φέρουμε εις πέρας τον στόχο της εργασίας ακολουθήσαμε τα παρακάτω βήματα. Αρχικά μελετήθηκε η θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου καθώς και οι αρχές λειτουργίας των EMA. Μετά από τις απαραίτητες προσομοιώσεις, σχεδιάστηκαν τόσο τα μεταλλικά όσο και τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος. Έγινε η κατασκευή και η διασύνδεση όλων των επιμέρους τμημάτων και έπειτα η αποσφαλμάτωση της συσκευής ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία της. Τέλος έγιναν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις για να υπολογιστεί η απόδοση του EMA.

Το παρόν σύστημα μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη πλατφόρμα για περαιτέρω πειραματισμό και έρευνα. Είναι εύκολη η προσθήκη επιπλέον Stages για την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων. Αξιοσημείωτο είναι ότι η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει επαναληπτικά για δεκάδες φορές μέσα σε διάστημα μιας ημέρας χωρίς να αντιμετωπίσει καμία δυσλειτουργία.

6.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Μελλοντικά, θα μπορούσαν να γίνουν αλλαγές και προσθήκες στο σύστημα με στόχο τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης και την αύξηση της τελικής ταχύτητας του βλήματος. Τόσο η απόδοση όσο και η ταχύτητα μπορούν να βελτιωθούν αν γνωρίζουμε κάθε στιγμή κατά τη λειτουργία του συστήματος, ποια είναι η θέση του βλήματος εντός των πηνίων. Έτσι θα μπορούσαμε να ενεργοποιήσουμε το σύστημα την κατάλληλη στιγμή, αλλά και να αποκόψουμε το ρεύμα τη στιγμή που τα κέντρα βλήματος και σωληνοειδούς ταυτίζονται.

Για να γίνει όμως αυτό θα πρέπει να γίνουν οι εξής αλλαγές-προσθήκες:

- Θα πρέπει να υπάρχει ακριβής γνώση της θέσης του βλήματος: Για τον έλεγχο της θέσης του βλήματος εντός των σωληνοειδών προτείνεται η χρήση ενός ραντάρ μικροκυμάτων τοποθετημένο στην είσοδο της σωλήνας. Έτσι παρατηρώντας τις αλλαγές στη συχνότητα και το μήκος κύματος των μικροκυμάτων “Doppler effect” θα μπορούσαμε να γνωρίζουμε τη θέση του βλήματος καθώς και την ταχύτητά του ανά πάσα στιγμή. Βέβαια είναι απαραίτητη η χρήση ενός αρκετά γρήγορου υπολογιστικού συστήματος το οποίο θα εκτελεί αλγορίθμους για την επεξεργασία των σημάτων εξόδου του ραντάρ.
- Να υπάρξει αύξηση της τάσης - χωρητικότητας: Η αύξηση της τάσης είναι αναγκαία για την επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων του βλήματος. Υψηλότερη τάση επιτρέπει τη μεγαλύτερη ροή ρευμάτων από τα πηνία, έτσι μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτερες εντάσεις μαγνητικού πεδίου. Κάτι τέτοιο όμως προϋποθέτει να μεν νέους πυκνωτές υψηλότερης χωρητικότητας που να αντέχουν τη νέα τάση αλλά και την κατασκευή ενός ισχυρότερου DC-DC converter για την αύξηση της τάσης.
- Να μπορεί να γίνεται ανάκτηση ενέργειας: Αν εφαρμοστεί σύστημα που αποκόπτει το ρεύμα στα πηνία τότε η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο χάνεται σε μορφή θερμότητας από τη στιγμή που γίνεται η αποκοπή του ρεύματος. Βασιζόμενοι στο γεγονός αυτό μια πρόταση για την βελτιστοποίηση της απόδοσης θα ήταν η ανάκτηση της ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε μαγνητικό πεδίο στο πηνίο σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο.
- Τέλος η τοποθέτηση ενός σιδηρομαγνητικού κελύφους: Με τη χρήση σιδηρομαγνητικού κελύφους γύρω από τα πηνία ενισχύεται ο συντελεστής αυτεπαγωγής του κάθε πηνίου και η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγει. Επίσης κατευθύνεται και περιορίζεται η μαγνητική ροή κοντά στο πηνίο και έτσι αποφεύγουμε τις μαγνητικές παρεμβολές στα ηλεκτρονικά υποσυστήματα του EMA.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ/ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

1. A. Mosallanejad and A. Shoulaie, "Calculation of coil inductance in tubular linear reluctance motor using three dimensional fem," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 9, pp. 271–276, 2011.
2. ABB, "Switching Losses for Phase Control and Bi-Directionally Controlled Thyristors," *ABB Appl. note*, p. 9, 2007.
3. Barry Hansen, "Modeling Projectile Length with FEMM," 2005. [Online].
4. Bresie DA, Andrews JA. Design of a reluctance accelerator. *IEEE T Magn* 1991; 27: 623-627.
5. C. Dubilier, "Aluminum Electrolytic Capacitor Application Guide," *Technology*, no. 864, pp. 1–22, 2011.
6. J. ŽAMBERSKÝ, "Electromagnetic Pulse Accelerator of Projectiles," 2015.
7. M. J. Harris, M. Shaikh, B. T. Bristoll, K. Vine, and P. A. Bartlett, "The Efficiency of a Two-Stage Reluctance Accelerator Through Pulse Shaping," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 121–127, 2017.
8. Mosallanejad A, Shoulaie A. A novel structure to enhance magnetic force and velocity in tubular linear reluctance motor. *Turk J Elec Eng & Comp Sci* 2012; 20: 1063-1076.
9. R. . Nirmal.A.S, "Electromagnetic rocket launcher," vol. 7, no. 1, pp. 117–121, 2014.
10. W. Halliday, Resnick, ΦΥΣΙΚΗ-Μηχανική-Κυματική-Θερμοδυναμική Ηλεκτρομαγνητισμός-Οπτική. Gutenberg, 2014.
11. ΚΑΛΑΙΤΖΑΚΗΣ ΚΩΣΤΑΣ-ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ ΕΥΤΥΧΗΣ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ. 2010.
12. Στέφανος Ν. Μανιάς, Ηλεκτρονικά Ισχύος, 2nd edition. Αθήνα: Συμεών, 2017.