



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

# **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**

**Δημητρακόπουλος Δημήτριος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**  
**Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)**  
**Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος**  
**Διδάκτωρ Σεργάκη Ελευθερία**

**Χανιά Οκτώβριος 2018**



---

## Πρόλογος

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας και για την μεγάλη ελευθερία των επιλογών που μου έδωσε κατά την εκπόνηση του συστήματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ απευθύνω στην οικογένεια μου για την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια καθώς χάρη σε αυτούς κατάφερα να σπουδάσω το αντικείμενο που με ενδιέφερε. Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω τον συνάδελφο και φίλο μου Μανώλη Ανδριανάκη για την πολύ σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε, παρέχοντας μου όργανα μέτρησης απαραίτητα για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

---

## Περίληψη

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πλήρους συστήματος επιταχυντή σιδηρομαγνητικών υλικών βασισμένο σε μαγνητική αντίδραση. Πιο συγκεκριμένα ο Επιταχυντής Μαγνητικής Αντίδρασης (EMA) είναι μια συσκευή η οποία επιταχύνει ένα σιδηρομαγνητικό αντικείμενο σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Η επιτάχυνση που πετυχαίνει, οφείλεται στην αξιοποίηση της δύναμης που αναπτύσσεται στο σιδηρομαγνητικό αντικείμενο εξαιτίας της μαγνητικής αντίδρασης.

Πριν την κατασκευή και τις μετρήσεις του συστήματος έγινε η ανάλυση των βασικών αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού καθώς και της λειτουργίας του EMA. Επίσης έγιναν όλες οι απαραίτητες μοντελοποιήσεις και μελέτες για την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής απόδοσης της συσκευής και της μακροζωίας των ηλεκτρονικών και μεταλλικών τμημάτων της.

Πιο αναλυτικά το σύστημα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία λαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από μία μπαταρία, πολλαπλασιάζει την τάση και φορτίζει ένα σύνολο από ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές. Έπειτα μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος, η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια των πυκνωτών διοχετεύεται στα πηνία με σκοπό τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, το οποίο επιταχύνει το σιδηρομαγνητικό υλικό-βλήμα. Για τον συγχρονισμό των πηνίων με το βλήμα χρησιμοποιούνται οι κατάλληλοι αισθητήρες-φωτοδιακόπτες, οι οποίοι ενεργοποιούν τα συγκεκριμένα ηλεκτρονικά ισχύος που απαιτούνται για την σειριακή έναυση των μαγνητικών παλμών. Οι ταχύτητες των σιδηρομαγνητικών βλημάτων μετριοούνται με χρήση ενός ακόμη φωτοδιακόπτη και ενός μικροελεγκτή και προβάλλονται σε οθόνη. Το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτέλεσε και το μοναδικό όργανο για την μέτρηση των ταχυτήτων του Επιταχυντή και μέσω αυτού εξήχθη ένα μεγάλο μέρος μετρήσεων που αφορούν την απόδοση του.

Λέξεις Κλειδιά: Επιταχυντής, μαγνητική αντίδραση, σιδηρομαγνητικό αντικείμενο, ηλεκτρομαγνητισμός, μαγνητικό πεδίο, φωτοδιακόπτες, ηλεκτρονικά ισχύος.



---

# Abstact

---

This diploma thesis deals with the design and construction of a complete Ferromagnetic Materials Accelerator system based on magnetic reluctance. In particular, the Magnetic Reluctance Accelerator (MRA) is a device that accelerates a ferromagnetic object at very high speeds. The acceleration is based to the utilization of the force developed in the ferromagnetic object due to the magnetic reaction.

Before the construction and measurements of the system, the basic principles of electromagnetism as well as the operation of MRA were analyzed. All necessary simulations and studies have also been carried out to ensure the maximum possible performance of the device and the longevity of its electronic and metal parts.

The system presented in this thesis takes the electricity from a battery, multiplies the voltage and charges a set of electrolytic capacitors. Then through the power electronic, the stored electrical energy from the capacitors is fed to the coils for the purpose of generating a magnetic field, which accelerates the ferromagnetic projectile. For synchronization of the coils with the projectile, the appropriate photoelectric sensors are applied, which activate the specific power electrons required for the serial ignition of the magnetic pulses. The speed of the projectiles are measured by using another photoelectric sensor and a microcontroller and finally displayed on a screen. This particular subsystem was also the only instrument for measuring the speeds of the Accelerator, and through it a great deal of measurements related to its performance were extracted.

Keywords: Accelerator, magnetic reluctance, ferromagnetic object, electromagnetism, magnetic field, photo switches, power electronics.



---

# Περιεχόμενα

---

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα .....	1
1. Εισαγωγή .....	4
1.1 Στόχος της διπλωματικής εργασίας .....	5
1.2 Περιγραφή EMA.....	5
1.3 Σχετικές εργασίες.....	6
1.4 Δομή κειμένου της παρούσας εργασίας.....	7
2. Βασικές 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 σωληνοειδούς .....	11
2.7 Αυτεπαγωγή.....	12
2.8 Υλικά και μαγνητισμός.....	12
2.8.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά .....	13
2.8.2 Μαγνητική υστέρηση .....	13
2.8.3 Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά .....	14
3. Βασικές αρχές λειτουργίας Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης (EMA).....	16
3.1 Είδη ευθύγραμμων Επιταχυντών .....	16
3.2 Ανάλυση λειτουργίας Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης .....	17
3.3 Ελκτική δύναμη σωληνοειδούς .....	18
3.4 Φαινόμενο αναρρόφησης “suck back” .....	19
3.5 Ανάλυση του EMA ως RLC κύκλωμα. ....	20
3.6 Συντελεστής απόσβεσης .....	22
3.7 Συντελεστής αυτεπαγωγής σωληνοειδούς.....	23
3.8 Απώλειες ενέργειας στον EMA .....	24
3.8.1 Απώλειες λόγω ωμικής αντίστασης των πηνίων .....	24
3.8.2 Απώλειες δινορρευμάτων .....	24
3.8.3 Απώλειες λόγω υστέρησης.....	25
3.8.4 Απώλειες στα Θυρίστορ .....	26



4.	Σχεδιασμός και υλοποίηση μεταλλικών τμημάτων και του RLC κυκλώματος .....	28
4.1	Υλικά πυρήνα σωληνοειδούς.....	28
4.2	Βλήμα.....	30
4.3	Σωληνοειδές.....	31
4.3.1	Αντίσταση πηνίων .....	31
4.3.2	Παράμετροι σωληνοειδών EMA .....	33
4.3.3	Προσανατολισμός σωληνοειδών .....	34
4.4	Αποθήκευση ενέργειας .....	35
4.5	Προσομοίωση απόκρισης του κυκλώματος RLC .....	36
5.	Σχεδιασμός ηλεκτρονικών κυκλωμάτων Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης .....	40
5.1	Ημιαγώγιμα στοιχεία .....	40
5.1.1	Θυρίστορ .....	41
5.1.2	MOSFET ισχύος.....	42
5.1.3	Οδήγηση πύλης.....	43
5.2	Τροφοδοτικό .....	44
5.2.1	Υποσύστημα υποβιβασμού τάσης.....	45
5.3	Φωτοδιακόπτης .....	46
5.4	Αντιστροφέας.....	48
5.5	Κυκλωματικά διαγράμματα RLC κυκλώματος και πλακέτας ελέγχου .....	49
5.6	Μικροελεγκτής .....	50
5.7	Σύστημα μέτρησης ταχύτητας βλήματος.....	51
5.8	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης .....	53
5.8.1	Βασικές αρχές λειτουργίας Step up DC/DC Converter.....	53
5.8.2	Ο μετατροπέας που υλοποιήθηκε .....	55
5.9	Απεικόνιση της συσκευής.....	59
6.	Πειραματικές μετρήσεις Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης.....	62
6.1	Απόκριση κυκλώματος RLC .....	62
6.2	Δράση μαγνητικού πεδίου και θέση βλήματος εντός σωληνοειδούς .....	64
6.3	Παλμοί πλακέτας ελέγχου .....	65
6.4	Μετρήσεις ταχύτητας EMA.....	66
6.5	Μετρήσεις απόδοσης EMA .....	69
6.6	Επίδραση στην ταχύτητα του EMA από την απόσταση του βλήματος από το κέντρο του σωληνοειδούς.....	70
7.	Συμπεράσματα.....	72
7.1	Μελλοντικές προεκτάσεις και βελτιώσεις .....	72
	Βιβλιογραφία.....	74

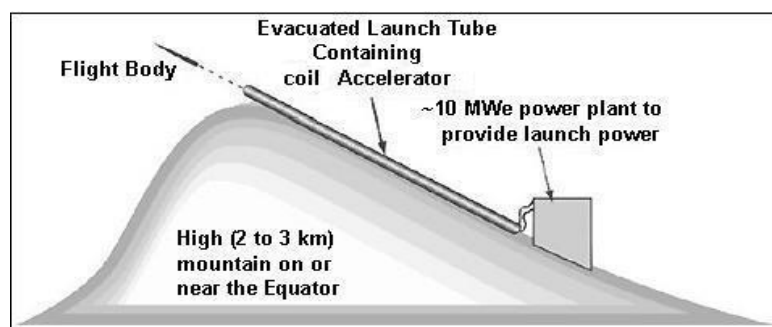


# 1. Εισαγωγή

Ο Επιταχυντής σιδηρομαγνητικών υλικών βασισμένος σε μαγνητική αντίδραση είναι μια ιδέα που υπάρχει για σχεδόν έναν αιώνα. Ο πρώτος λειτουργικός ευθύγραμμος Επιταχυντής Μαγνητικής Αντίδρασης κατασκευάστηκε από τον Νορβηγό επιστήμονα Kristian Olaf Bernhard Birkeland το 1904. 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. Αυτό οφείλεται στην εξέλιξη των υπολογιστών και των ηλεκτρονικών ισχύος που έχει καταστήσει την μοντελοποίηση και αντίστοιχα το κόστος κατασκευής του εφικτό.

Οι εφαρμογές του ευθύγραμμου (EMA) εκτείνονται από τον τομέα του διαστήματος, της ρομποτικής, του στρατού έως την καθημερινότητα. Η πιο ενδιαφέρουσα από αυτές, είναι η χρήση του ως συσκευή εκτόξευσης δορυφόρων μικρού μεγέθους 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. Όμως είναι ακριβά, η αποθήκευσή τους χρήζει μεγάλης προσοχής εξαιτίας του ότι περιέχουν ασταθή χημικά, τα οποία είναι επίσης βλαβερά για την υγεία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος. Επίσης δεν υπάρχει δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τους και η αναλογία του φορτίου που μεταφέρουν προς τη μάζα των καυσίμων (propellant mass fraction) είναι μικρότερη του 1%.

Τα πλεονέκτημα του EMA έναντι των συμβατικών συστημάτων προώθησης είναι ότι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας τον καθιστά φιλικό στο περιβάλλον και πολύ πιο οικονομικό ανά εκτόξευση σε σχέση με το κόστος των χημικών καυσίμων. Επίσης μπορεί να επιτευχθεί η επαναχρησιμοποίηση του συστήματος προώθησης, αλλά και μεγαλύτερες τιμές του propellant mass fraction. Από προσομοιώσεις ενός τέτοιου συστήματος υπολογίζεται ότι το κόστος ανά εκτόξευση είναι 2000\$/kg [1], 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. Βέβαια και ένα υβριδικό σύστημα εκτόξευσης, το οποίο θα εκμεταλλεύεται αρχικά την ηλεκτρική ενέργεια και μετά από ένα υψόμετρο θα χρησιμοποιεί την χημική ενέργεια είναι σίγουρα μια αρκετά ενδιαφέρουσα ιδέα.



Σχήμα 1.1 Electromagnetic Rocket Launcher [1].

Άλλες εφαρμογές αυτού του συστήματος είναι η αντικατάσταση της πυρίτιδας σε διατρητικές συσκευές χειρός που χρησιμοποιούνται στην κατασκευαστική βιομηχανία, καθιστώντας αυτές πιο ασφαλείς προς χρήση. Επίσης η χρήση του συναντάται σε συρόμενες πόρτες, παράθυρα, κοπτικά και κρουστικά μηχανήματα.

Διάφορες ονομασίες συστήματος

- I. Ευθύγραμμος Επιταχυντής Μαγνητικής Αντίδρασης (Linear Reluctance Launcher)
- II. Ηλεκτρομαγνητικός Επιταχυντής (Electromagnetic Launcher)
- III. Επιταχυντής Σιδηρομαγνητικών Υλικών (Ferromagnetic Material Launcher)
- IV. Επιταχυντής Πηνίων (Coil Launcher)

## 1.1 Στόχος της διπλωματικής 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
- κυκλώματος οδήγησης των Stages (RLC κύκλωμα)

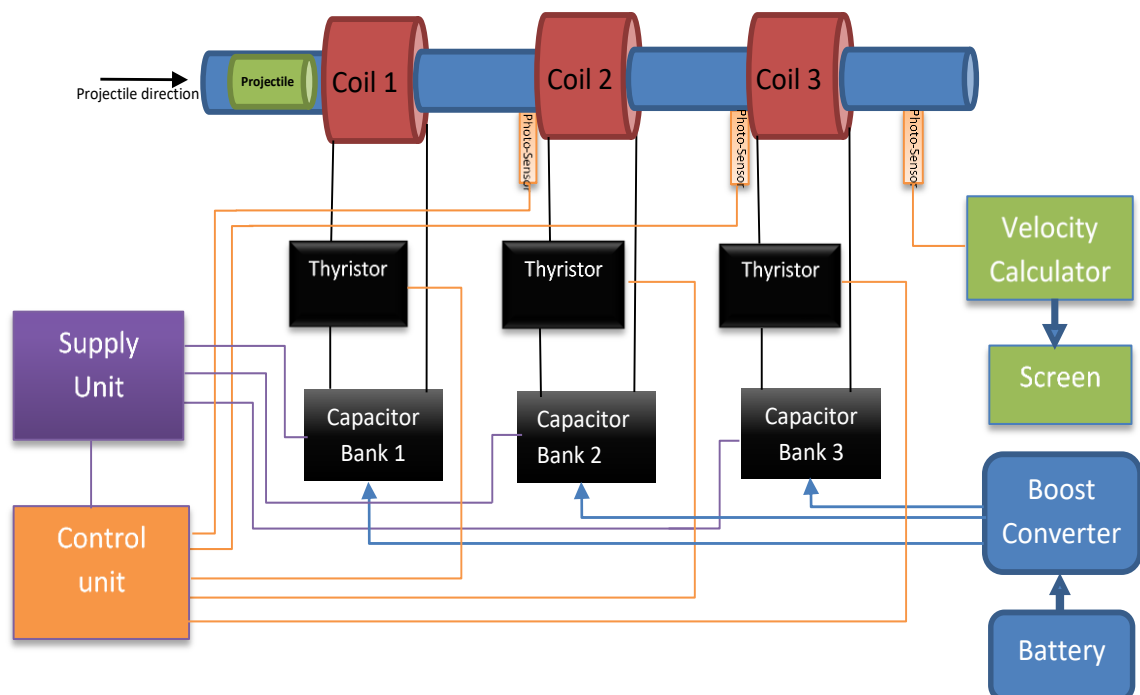
Οι στόχοι της εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

1. Σχεδιασμός, μοντελοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή ενός συστήματος επιτάχυνσης βλήματος βασισμένο σε επαγόμενη δύναμη λόγω μαγνητικής αντίδρασης.
2. Προσδιορισμό σχέσης μεγεθών: στάθμης τάσης στην συστοιχία πυκνωτών, αριθμού ενεργών RLC σταδίων, μήκους βλήματος και αρχικής θέσης του βλήματος σε σχέση με την απόδοση του EMA.
3. Επίτευξη υψηλού λόγου απόδοσης του EMA προς το συνολικό κόστος της συσκευής.
4. Βελτιστοποίηση της απόδοσης του EMA για τα διαθέσιμα ηλεκτρονικά κυκλώματα και μεταλλικά μέρη.

## 1.2 Περιγραφή EMA

Το Σχήμα 1.2 παρουσιάζει τη δομή του συστήματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Συνοπτικά, η συσκευή αποτελείται από τρία σωληνοειδή πηνία (Coil 1, 2, 3) τα οποία διαρρέονται από παλμούς ρεύματος και δημιουργούν μαγνητικό πεδίο, το οποίο επιταχύνει ένα σιδηρομαγνητικό βλήμα (projectile). Τα πηνία είναι τυλιγμένα γύρω από μια σωλήνα που χρησιμοποιείται για την στήριξή τους καθώς και για την κίνηση του βλήματος εντός αυτής. Στον EMA δεν υπάρχει επαφή μεταξύ πηνίου και βλήματος καθώς το βλήμα κινείται λόγω επαγόμενης δύναμης σε αυτό. Η ενέργεια του συστήματος είναι αποθηκευμένη μέσα σε ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές (Capacitor Bank 1, 2, 3) 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 θυρίστωρ που λειτουργούν ως διακόπτες. Η ενεργοποίηση των πηνίων του συστήματος χρειάζεται παλμό ηλεκτρικής ισχύος και γίνεται μέσω της μονάδας ελέγχου (control unit). Ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει μόνο το 1<sup>ο</sup>

στάδιο του συστήματος, δηλαδή μόνο το 1<sup>ο</sup> κύκλωμα πηνίου-πυκνωτή. Τα υπόλοιπα δύο στάδια ενεργοποιούνται αυτόματα όταν οι αισθητήρες του συστήματος ανιχνεύσουν ότι το βλήμα εισέρχεται προς το εκάστοτε πηνίο. Η ταχύτητα του βλήματος υπολογίζεται από ένα μικροελεγκτή και έναν αισθητήρα και εν συνεχεία προβάλλεται σε μια οθόνη. 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 step-up DC-DC converter το οποίο τροφοδοτείται από μία μπαταρία για την φόρτιση των πυκνωτών στην απαιτούμενη τάση. Ο κατάλληλος σχεδιασμός των χαρακτηριστικών των RLC κυκλωμάτων μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση του EMA. Η απόδοση της μετατροπής ενέργειας του πηνίου ορίζεται ως το ποσοστό του λόγου της ενέργειας που μετατρέπεται σε κινητική στο βλήμα προς την ενέργεια που αποταμιεύεται στην συστοιχία πυκνωτών.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα της συσκευής που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

### 1.3 Σχετικές εργασίες

Στα άρθρα [2],[3] γίνεται η οικονομική ανάλυση των ευθύγραμμων επιταχυντών σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα αλλά και η αναφορά των περιβαλλοντολογικά πλεονεκτήματα των EMA. Στο [4] μελετάται μέσω προσομοίωσης το μοντέλο ενός EMA ενός σταδίου. Δίνεται η σχέση της επιτάχυνσης με την τάση και της τελικής ταχύτητας σε σχέση με τις σπείρες του πηνίου. Στο [5] αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο EMA και συγκρίνεται με τις μετρήσεις που προκύπτουν από μια μικρής κλίμακας κατασκευή. Στην εργασία [6] μετριέται η επίδραση της σχεδίασης και του υλικού του βλήματος στην απόδοση του EMA. Στα ερευνητικά άρθρα [7], [8] πραγματοποιούνται μετρήσεις πάνω σε EMA 3ων σταδίων, όμοιο με της παρούσας εργασίας από τις οποίες προκύπτει η επίδραση του μήκους του βλήματος στην απόδοση των EMA. Στο [9] αναλύονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των EMA και προτείνονται πιθανά κυκλώματα τα οποία μπορούν να αποτελέσουν τα υποσυστήματα ενός EMA. Στο ερευνητικό άρθρο [10], έπειτα από πειραματικές μετρήσεις προτείνεται μια πρωτότυπη τεχνική αύξηση της απόδοσης του Επιταχυντή μέσω της αύξησης του μήκους των πηνίων. Τέλος το

μαθηματικό μοντέλο στο άρθρο [11] δίνει με πολύ μεγάλη προσέγγιση τον συντελεστή αυτεπαγωγής του συστήματος πηνίου-βλήματος.

## 1.4 Δομή κειμένου της παρούσας εργασίας

Η δομή αυτής της εργασίας είναι η εξής:

Στο 2ο κεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών, δεδομένου ότι ο EMA είναι μια ηλεκτρική μηχανή.

Στο 3ο κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια εισαγωγή στα είδη των Επιταχυντών. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας EMA. Αναλύονται η δύναμη επιτάχυνσης και το φαινόμενο αναρρόφησης (suck-back). Επίσης μελετάται ο Επιταχυντής ως απλοποιημένο κύκλωμα RLC, ο συντελεστής αυτεπαγωγής των σωληνοειδών καθώς και οι απώλειες ενέργειας του Επιταχυντή.

Το 4ο κεφάλαιο, περιλαμβάνει την μοντελοποίηση και προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου και του κυκλώματος RLC για την εύρεση των χαρακτηριστικών των στοιχείων από τα οποία θα αποτελείται ο Επιταχυντής. Επίσης περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των μεταλλικών τμημάτων του συστήματος με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης του συστήματος.

Στο 5ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της σχεδίασης των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του Επιταχυντή. Αναφέρονται όλα τα υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται, οι βασικές αρχές λειτουργίας τους καθώς και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε υποσύστημα.

Στο 6ο κεφάλαιο παρατίθεται το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων, τα οποία συλλέχθηκαν κατά τη λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον πραγματοποιούνται όλες οι απαραίτητες συγκρίσεις, ώστε να διαπιστωθεί το σημείο βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος.

Στο 7ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και οι πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις του συστήματος.

## 2. Βασικές αρχές ηλεκτρομαγνητισμού

---

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας κυρίως λόγω της ευκολίας και της αποδοτικότητας με την οποία μεταφέρεται διανέμεται και χρησιμοποιείται. Οι ηλεκτρικές μηχανές (ηλεκτρικοί κινητήρες και ηλεκτρικές γεννήτριες) αποτελούν τις βασικές συνιστώσες σε ένα σύστημα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και αντίστροφα. Οι μέθοδοι δημιουργίας των μαγνητικών πεδίων, η κατανομή τους στο εσωτερικό των ηλεκτρικών μηχανών καθώς και ο τρόπος αλληλεπίδρασης τους, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες μιας και το μαγνητικό πεδίο αποτελεί το μέσον για τη σύζευξη και τη μεταφορά της ενέργειας μεταξύ ενός ηλεκτρικού και ενός μηχανικού συστήματος .

### 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[12]:

Ο νόμος του Faraday:

$$\oint_c \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \vec{B} d\vec{l}$$

Ο νόμος του Ampere:

$$\oint_c \vec{H} d\vec{l} = \int_s \vec{J} d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int_s \vec{D} d\vec{s}$$

Ο νόμος του Gauss για την ηλεκτρική ροή:

$$\int_s \vec{D} d\vec{s} = \int_v \rho dV$$

Ο νόμος του Gauss για την μαγνητική ροή:

$$\int_s \vec{B} d\vec{s} = 0$$

Η εξίσωση που εκφράζει την αρχή διατήρησης του φορτίου.

$$\int_s \vec{J} d\vec{s} = - \frac{d}{dt} \int_v \rho dV$$

Και τέλος η εξίσωση Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

## 2.2 Μαγνητικό πεδίο

Ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί με δύο τρόπους. Ένας τρόπος είναι η χρήση κινούμενων ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων, όπως είναι το ρεύμα που διαρρέει ένα σύρμα και δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Ο άλλος τρόπος είναι με τη χρήση στοιχειωδών σωματιδίων όπως τα ηλεκτρόνια, καθώς τα σωματίδια αυτά έχουν ένα ενδογενές μαγνητικό πεδίο γύρω τους. Τα μαγνητικά πεδία των ηλεκτρονίων σε ορισμένα υλικά καθώς προστίθεται, 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 ( $\text{Wb/m}^2$ ), 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  $\mu$  ( $\text{Wb/mH}$ ) που συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη 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 κάποιο υλικό μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε αυτό μεταβάλλει τη μαγνητική επαγωγή. Συνεπώς η μαγνητική διαπερατότητα είναι διαφορετική για κάθε υλικό. Ορίζουμε ως σχετική μαγνητική διαπερατότητα την σταθερά, 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  $\chi$  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  $\mu_r$  και  $\chi$  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 μαγνητεγερτική δύναμη (magnetomotive force-mmf):

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

Όπου  $N$  ο αριθμός σπειρών του σωληνοειδούς και  $I$  το ρεύμα που το διαρρέει[13].

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $V$  προκαλεί ένταση ρεύματος  $I$ , αντίστοιχα στα μαγνητικά κυκλώματα η μαγνητική δύναμη προκαλεί μαγνητική ροή  $\Phi$ . 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[13]:

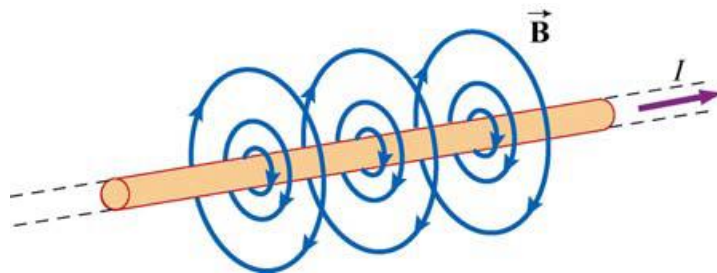
$$R = \frac{mmf}{\Phi} = \frac{L}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2.8)$$

Όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,  $\mu_r$  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[14]:

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

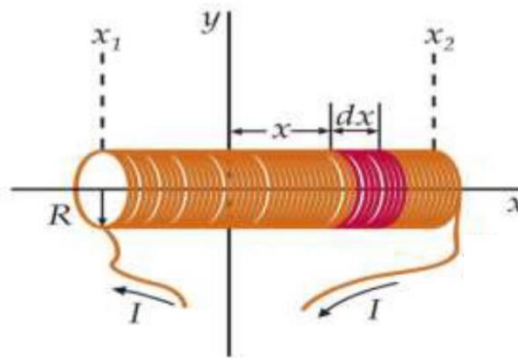


Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου γύρω από ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

## 2.6 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Το μαγνητικό πεδίο ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού είναι ασθενές ακόμα και αν αυτός διαρρέεται από μεγάλες εντάσεις ρεύματος. Ωστόσο, όταν ένας ευθύγραμμος αγωγός τυλιχθεί πυκνά, σε ελικοειδή μορφή με σκοπό τη δημιουργία ενός σωληνοειδούς τότε το μαγνητικό πεδίο του πολλαπλασιάζεται. Το φαινόμενο αυτό καθιστά τους σωληνοειδείς αγωγούς εξαιρετικά χρήσιμους σε εφαρμογές που απαιτούνται ισχυρά μαγνητικά πεδία, όπως για παράδειγμα στους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Με τη εφαρμογή του νόμου του Ampere στο σωληνοειδές έχουμε ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής του σωληνοειδούς  $B_x$  δίνεται από την εξίσωση 2.10 [15].

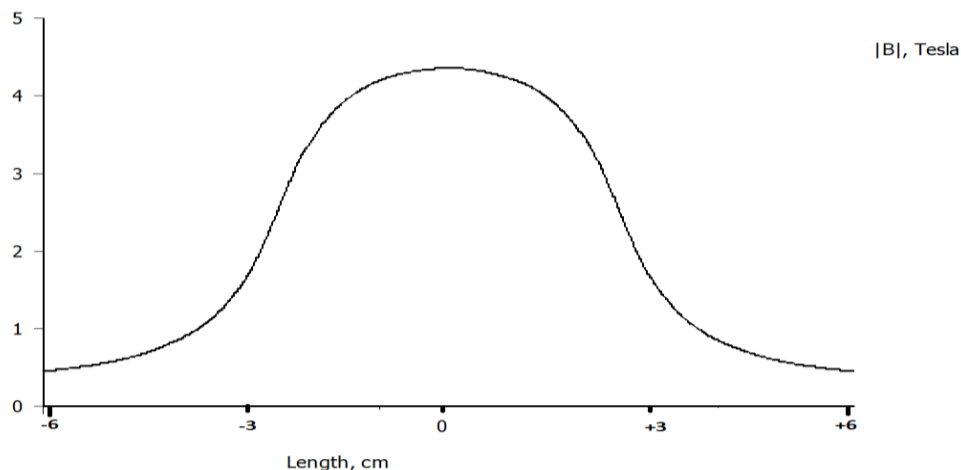


Σχήμα 2.2 Σωληνοειδές.

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

Όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,  $n$  ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους,  $I$  το ρεύμα που διαρρέει το σωληνοειδές,  $L$  το μήκος σωληνοειδούς,  $R$  η ακτίνα 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

Ως αυτεπαγωγή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο, σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, το σώμα που προκαλεί φαινόμενο μαγνητικής επαγωγής είναι ταυτόχρονα και το σώμα στο οποίο επιδρά η επαγωγή. Καθώς το ρεύμα στον σωληνοειδή αγωγό αυξάνεται, αυξάνεται παράλληλα και η επαγόμενη ροή του μαγνητικού πεδίου. 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. Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου αποσπώντας ενέργεια από το ηλεκτρικό 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.

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

Η τάση από αυτεπαγωγή χρήζει μεγάλη προσοχή καθώς επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των ηλεκτρικών μηχανών. Εξαρτάται από τον συντελεστή αυτεπαγωγής του πηνίου  $L$  (H) καθώς και από την μεταβολή του ρεύματος. Ένας τρόπος για τον έλεγχο της είναι η κατασκευή πηνίων με μικρό ή μεγάλο συντελεστή αυτεπαγωγής αναλόγως τις σχεδιαστικές απαιτήσεις.

Ο συντελεστής αυτεπαγωγής διαφέρει από πηνίο σε πηνίο. Εξαρτάται από τη γεωμετρία του πηνίου π.χ. (σωληνοειδές, κωνικό, επίπεδο, πολυστρωματικό ή μονοστρωματικό, διάμετρο,  $\tau$  μήκος, πάχος) και τον αριθμό των τυλιγμάτων του.

## 2.8 Υλικά και μαγνητισμός

Όλα τα υλικά παρουσιάζουν μαγνητική δραστηριότητα. Με βάση τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  τα διάφορα υλικά κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, στα διαμαγνητικά ( $\mu_r < 1$ ), στα παραμαγνητικά ( $\mu_r > 1$ ) και στα σιδηρομαγνητικά υλικά ( $\mu_r \gg 1$ ). Από όλα αυτά θα μελετήσουμε μόνο τα σιδηρομαγνητικά καθώς παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση των ηλεκτρικών μηχανών.

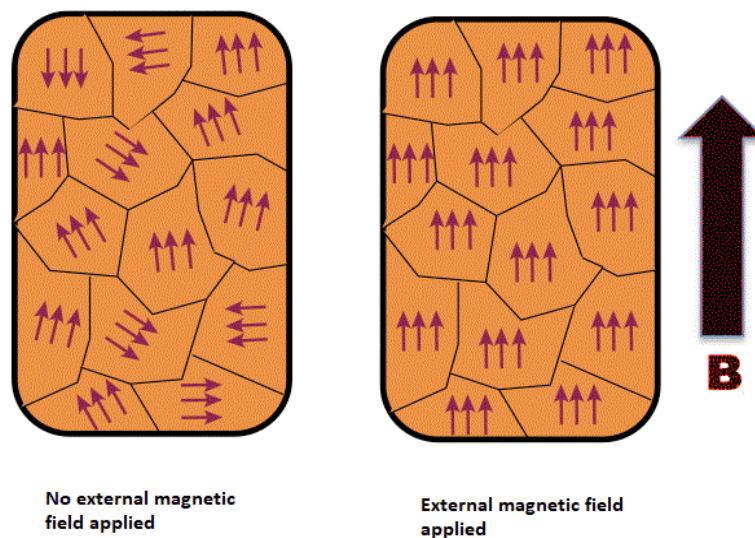
Πίνακας 2.1 Σχετικές μαγνητικές διαπερατότητες [16]		
Υλικό	Τύπος	$\mu_r$
Χάλυβας	Διαμαγνητικό	0,9999
Χαλκός	Διαμαγνητικό	0,9999
Νερό	Διαμαγνητικό	0,9999
Κενό	Μη-μαγνητικό	1
Αλουμίνιο	Παραμαγνητικό	1,00002
Μαλακός Χάλυβας (0,2 C)	Σιδηρομαγνητικό	2000
Σίδηρος (0,2 προσμίξεις)	Σιδηρομαγνητικό	5000
Καθαρός σίδηρος (0,05 προσμίξεις)	Σιδηρομαγνητικό	200000
Superalloy (5 Mo, 79 Ni)	Σιδηρομαγνητικό	1000000

### 2.8.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά καθίστανται εξαιρετικά χρήσιμα σε εφαρμογές που απαιτείται ενίσχυση της έντασης μαγνητικών πεδίων καθώς πολλαπλασιάζουν την ένταση τους κατά τον παράγοντα  $\mu_r$  που τα χαρακτηρίζει. Με τη χρήση τους μπορούμε να πετύχουμε μεγάλες πυκνότητες μαγνητικής ροής, με σχετικά χαμηλά επίπεδα τιμών μαγνητεγερτικών δυνάμεων. Επίσης μπορούν να περιορίσουν και να καθοδηγήσουν την μαγνητική ροή σε συγκεκριμένα μονοπάτια. Εξαιτίας λοιπόν των προαναφερόμενων δυνατοτήτων τους είναι αυτά με τα οποία ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία. Ορισμένα από αυτά είναι ο σίδηρος, και κράματα σιδήρου με νικέλιο, κοβάλτιο ή αλουμίνιο και άλλα μέταλλα .

Ο σιδηρομαγνητισμός εκδηλώνεται στο γεγονός ότι ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, π.χ. από ένα σωληνοειδές, μπορεί να προκαλέσει τη ευθυγράμμιση των μαγνητικών δίπολων του σιδηρομαγνητικού υλικού προς την κατεύθυνση αυτού του πεδίου. Ως αποτέλεσμα της επίδρασης αυτής μέσα στο σιδηρομαγνητικό υλικό τα μαγνητικά πεδία των επιμέρους δίπολων προστίθενται στο αρχικό δίνοντας έτσι στο υλικό μεγαλύτερη πυκνότητα ροής από εκείνη που θα υπήρχε αν το μαγνητικό πεδίο δρούσε μόνο του.

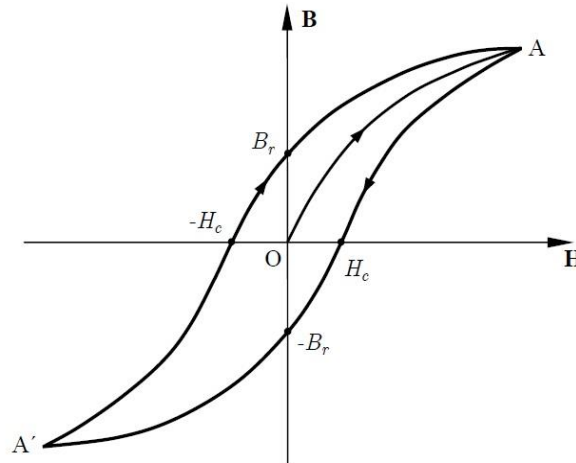
Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν την τάση να παραμένουν μαγνητισμένα σε κάποιο βαθμό αφού υποβληθούν σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και αυτό στη συνέχεια σταματήσει να δρά. Αυτή η τάση να ‘θυμούνται την μαγνητική ιστορία τους’ ονομάζεται υστέρηση μαγνητική υστέρηση.



Σχήμα 2.4 Προσανατολισμός μαγνητικών δίπολων σιδηρομαγνητικού υλικού αριστερά χωρίς και δεξιά υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

### 2.8.2 Μαγνητική υστέρηση

Σε όλα τα μη μαγνητικά υλικά και στο κενό η μαγνητική διαπερατότητα είναι σταθερή και αυτό συνεπάγεται τη γραμμική σχέση μεταξύ της πυκνότητας μαγνητικής ροής και της έντασης μαγνητικού πεδίου. Αντιθέτως στα σιδηρομαγνητικά υλικά η σχέση  $B=f(H)$  εμφανίζει έντονη μη γραμμικότητα και αυτό οφείλεται σε δύο φαινόμενα στον κορεσμό και στη μαγνητική υστέρηση.



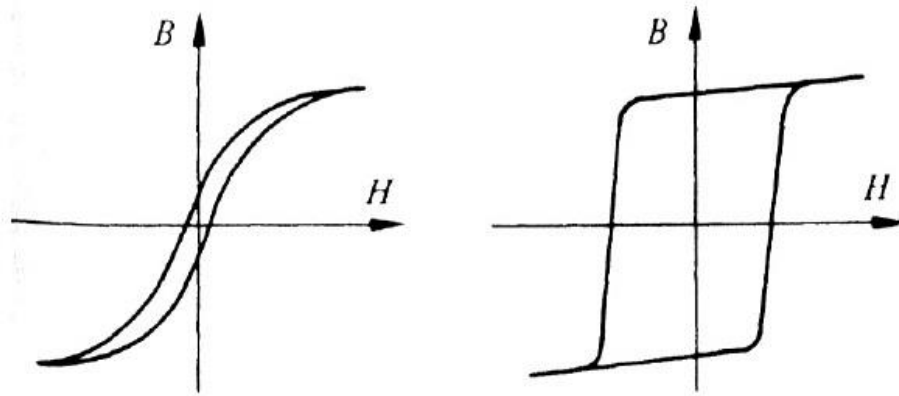
Σχήμα 2.5 Βρόγχος μαγνητικής υστέρησης όπου  $B$  το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο,  $H$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται.

Η μαγνητική υστέρηση είναι ένας βασικός παράγοντας στην απόδοση των ηλεκτρικών κινητήρων. Η αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου πέραν του σημείου κόρου των σιδηρομαγνητικών υλικών ενός ηλεκτρικού κινητήρα δεν επιφέρει την αύξηση της ταχύτητας του καθώς η πυκνότητα της μαγνητικής ροής δεν αυξάνεται περαιτέρω.

Σε ένα μαγνητικό υλικό η σχετική μαγνητική διαπερατότητα χαρακτηρίζει το μέγεθος της μαγνήτισης του. Συνεπώς σε ένα έντονα κορεσμένο υλικό η μαγνητική διαπερατότητα πλησιάζει την τιμή  $\mu_0$  δηλαδή την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού. Στην περίπτωση αυτή η μαγνητική συμπεριφορά του κορεσμένου σιδηρομαγνητικού υλικού δεν διαφέρει σε τίποτα από εκείνη ενός οποιουδήποτε μη μαγνητικού υλικού.

### 2.8.3 Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά

Τα υλικά στα οποία ο βρόχος υστέρησης έχει μεγάλο εμβαδόν χαρακτηρίζονται ως σκληρά μαγνητικά υλικά Σχήμα 2.6(α). Τα υλικά αυτά είναι κατάλληλα για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, διότι έχουν μεγαλύτερη παραμένουσα μαγνήτιση και ταυτόχρονα απαιτούν μεγαλύτερη τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου για την πλήρη απομαγνήτισή τους. Τα πιο γνωστά υλικά είναι το νεοδύμιο και το κράμα σιδήρου και βορίου τα οποία χρησιμοποιούνται ως μαγνήτες. Αντίθετα στα λεγόμενα μαλακά μαγνητικά υλικά στα οποία το εμβαδόν βρόχου υστέρησης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στα σκληρά μαγνητικά υλικά, διαθέτουν μικρότερη παραμένουσα μαγνήτιση και απαιτούν μικρότερες εντάσεις απομαγνήτισης Σχήμα 2.6(β). Επιπλέον οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης είναι μικρότερες. Με βάση τις παραπάνω ιδιότητες είναι προφανές ότι στην απόδοση των ηλεκτρικών μηχανών πέρα από τη μαγνητική διαπερατότητα έχει σημασία και η σκληρότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 2.6 Καμπύλες μαγνητικής υστέρησης. (α) Μαλακό μαγνητικό υλικό (β) Σκληρό μαγνητικό υλικό.

## 3. Βασικές αρχές λειτουργίας Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης (EMA)

---

### 3.1 Είδη ευθύγραμμων Επιταχυντών

Προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του EMA, παρακάτω γίνεται μια εισαγωγή στα είδη των Επιταχυντών. Οι ευθύγραμμοι ηλεκτρομαγνητικοί Επιταχυντές μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους:

**Επιταχυντής ράγας:** Οι Επιταχυντές ράγας (Rail Launcher)[3] αποτελούνται από δύο παράλληλες αγωγίμες ράγες και έναν αγωγό που έρχεται σε επαφή με αυτές. Την στιγμή που παρέχουμε ηλεκτρικό ρεύμα στις ράγες ο αγωγός κλείνει το βρόγχος ρεύματος και κινείται ευθύγραμμα ανάμεσα στις δύο ράγες. Ουσιαστικά, η ροή ρεύματος στις ράγες έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μαγνητικού πεδίου γύρω από αυτές σύμφωνα με το νόμο του Ampere. Επειδή ο αγωγός είναι μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, προκαλείται επάνω του δύναμη Laplace και έτσι επιτυγχάνεται η κίνηση του αγωγού. Σε σύγκριση με ένα Επιταχυντή πηνίων, ο Επιταχυντής ράγας έχει υψηλότερη ταχύτητα βλήματος και είναι πιο αποτελεσματικός, αλλά το απαιτούμενο ρεύμα είναι πάρα πολύ υψηλό, της τάξεως  $10^6$  A.

**Επιταχυντές πηνίων:** Οι Επιταχυντές πηνίων (Coil Launcher)[1] αποτελούνται από ένα τυλιγμένο πηνίο σε κενό κύλινδρο και ένα βλήμα. Στους επιταχυντές πηνίων, η τριβή μεταξύ του σωλήνα και του βλήματος είναι μικρή. Επομένως, στο σύστημα επιτάχυνσης δεν προκαλείται ζημιά. Οι Επιταχυντές πηνίων μπορούν να μελετηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας τους. Αυτοί είναι οι εξής:

- **Επιταχυντής επαγωγής:** Στον Επιταχυντή επαγωγής (Induction Coil Launcher), το μη σιδηρομαγνητικό βλήμα προωθείται καθώς ασκείται σε αυτό δύναμη Lorentz. Ο Επιταχυντής επαγωγής στηρίζει τη λειτουργία του στα επαγόμενα δινορρεύματα στο βλήμα. Επίσης η αρχική θέση του βλήματος πρέπει να είναι κοντά στο κέντρο του πηνίου για την μεγιστοποίηση της ταχύτητας του καθώς η δύναμη που ασκείται σε αυτό το προωθεί έξω από το πηνίο.
- **Επιταχυντής μαγνητικής αντίδρασης:** Ο Επιταχυντής μαγνητικής αντίδρασης έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με τους κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης. Στον Επιταχυντή μαγνητικής αντίδρασης το σιδηρομαγνητικό βλήμα είναι έξω από το πηνίο και έλκεται στο μέσον του πηνίου εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου. Σε σύγκριση με τον Επιταχυντή επαγωγής, η αποτελεσματικότητά του είναι μεγαλύτερη και η εκτόξευση μπορεί να ικανοποιηθεί με μικρότερα ρεύματα.

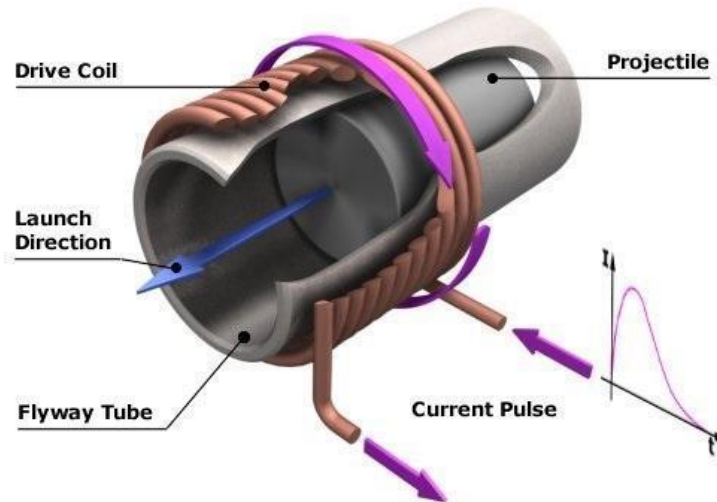
Όλα τα είδη των επιταχυντών που προαναφέρθηκαν είναι ικανά να αναπτύξουν ταχύτητες εκτόξευσης της τάξεως των 6 έως 10 km/s. Σε κάθε περίπτωση απαιτούνται μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Υποθέτοντας ότι η μάζα του εκτοξευόμενου αντικειμένου είναι 10-100 kg, τότε η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ 2 και 12 GJ.



### 3.2 Ανάλυση λειτουργίας Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης

Ένας απλός EMA ενός σωληνοειδούς αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

- Τη σωλήνα: ένας κενός κύλινδρος.
- Το σωληνοειδές: (στάτης) πηνίο κατασκευασμένο από χάλκινο μονωμένο σύρμα τυλιγμένο γύρω από τη σωλήνα.
- Το βλήμα: (δρομέας) κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό .



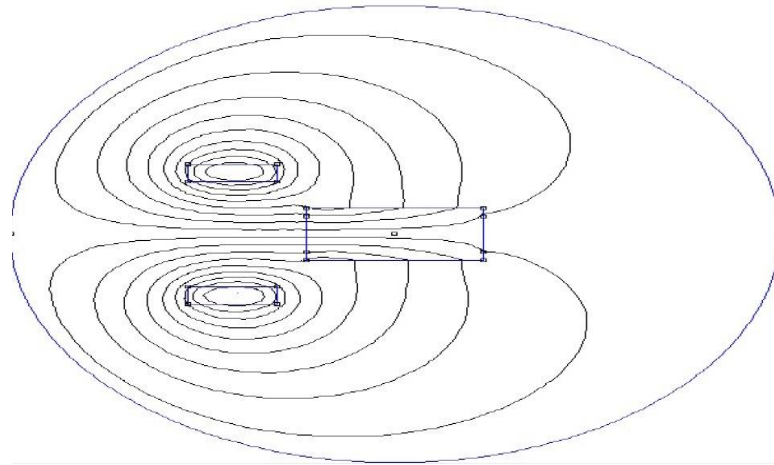
Σχήμα 3.1. Δομή απλού Επιταχυντή μαγνητικής αντίδρασης ενός πηνίου [12].

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 (Σχήμα 3.2), 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 (Σχήμα 3.3).

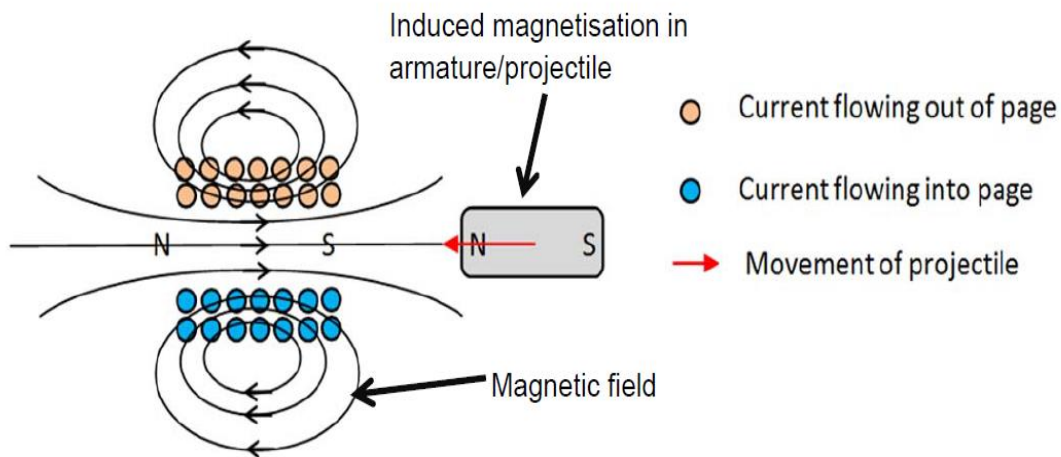
Το φαινόμενο της μαγνητικής αντίδρασης προκαλεί την έλξη του βλήματος στο κέντρο του σωληνοειδούς, όπου η μαγνητική αντίδραση είναι μικρή. Όταν το βλήμα φτάσει στο κέντρο πρέπει να αποκοπεί η ροή ρεύματος στο σωληνοειδές. Παύοντας έτσι να υπάρχει μαγνητικό πεδίο, το βλήμα μπορεί να συνεχίσει να κινείται 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.

Οι EMA μπορούν να αποτελούνται από ένα ή περισσότερα σωληνοειδή σε σειρά αποδίδοντας έτσι ακόμα μεγαλύτερη κινητική ενέργεια στο βλήμα κάνοντας το να αποκτήσει πολύ μεγάλες 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.





Σχήμα 3.2 Απεικόνιση δυναμικών γραμμών μαγνητικού πεδίου με τη χρήση του προγράμματος FEMM σε EMA.



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση μαγνητικών πόλων μαγνητικού πεδίου, κατεύθυνση βλήματος και ροή ρεύματος σωληνοειδούς σε EMA [17].

### 3.3 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:

$$W_E = W_{Magnetic} + W_{1loss} = W_{Kinetic} + W_{2loss}$$

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

$$W_M(x, t) = \frac{1}{2} L(x) i^2(t) \quad (3.1)$$

Όπου  $L$  ο συντελεστής αυτεπαγωγής ο οποίος μεταβάλλεται συναρτήσει της απόστασης  $x$  μεταξύ του μέσου του βλήματος 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  $W$ :

$$F(x, t) = \frac{dW_M(x, t)}{dx} \quad (3.2)$$

Έτσι αν αγνοήσουμε τις απώλειες προκύπτει το μέτρο της δύναμης από την 3.1 και 3.2 ότι:

$$F(x, t) = \frac{1}{2} i^2(t) \frac{dL(x)}{dx} \quad (3.3)$$

Η εξίσωση 3.3 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.

Επίσης η επιτάχυνση του σιδηρομαγνητικού βλήματος δίνεται από την σχέση[7]:

$$a = \frac{\mu_0(\mu_r - 1)(NI)^2 A}{2ml^2} \quad (3.4)$$

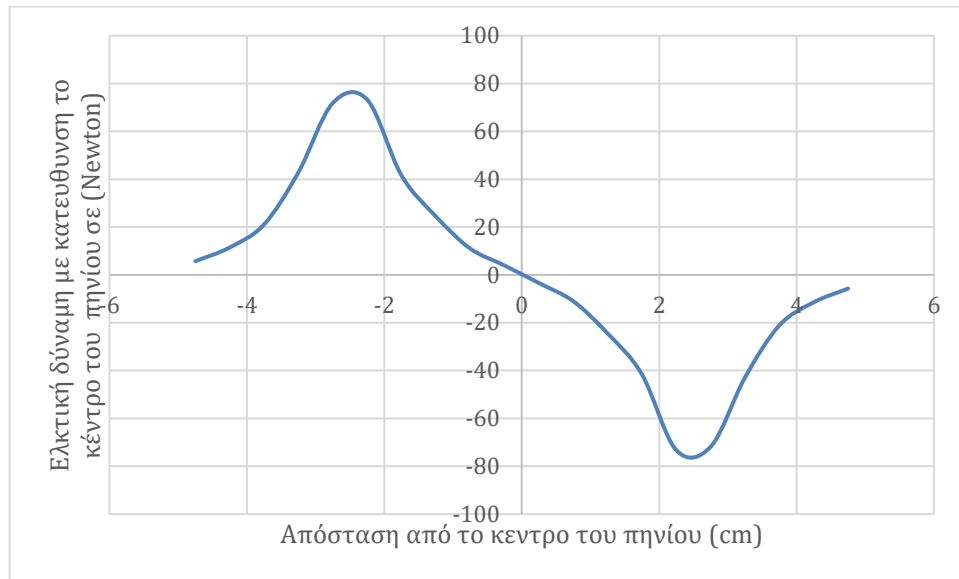
Όπου  $N$  ο αριθμός τυλιγμάτων του πηνίου,  $I$  το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο,  $A$  το εμβαδόν διατομής του σιδηρομαγνητικού βλήματος,  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,  $\mu_r$  η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού,  $m$  η μάζα του βλήματος και  $l$  το μήκος του πηνίου.

### 3.4 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 αόφτου 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. Συνεπώς έγινε η δυσδιάστατη σχεδίαση του συστήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Η γραφική αναπαράσταση της δύναμης που ασκείται στο σιδηρομαγνητικό βλήμα ως προς την απόσταση από το κέντρο του σωληνοειδούς δίνετε από το Σχήμα 3.4. και προέκυψε αόφτου έγινε η σχεδίαση και προσομοίωση του Σχήματος 3.2. 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 διότι η δύναμη που θα του ασκηθεί είναι σχεδόν μηδενική.



Σχήμα 3.4 Ελκτική δύναμη πηνίου ως προς το κέντρο του.

Για την σωστή λειτουργία του EMA θα πρέπει να ισχύει η σχέση 3.5 α ώστε η έναυση του παλμού ρεύματος  $t_{Ipulse\_start}$  να γίνει τι στιγμή  $t_{insertion}$  που το βλήμα εισέρχεται στο πηνίο.

$$t_{Ipulse\_start} = t_{insertion} \quad (3.5 \alpha)$$

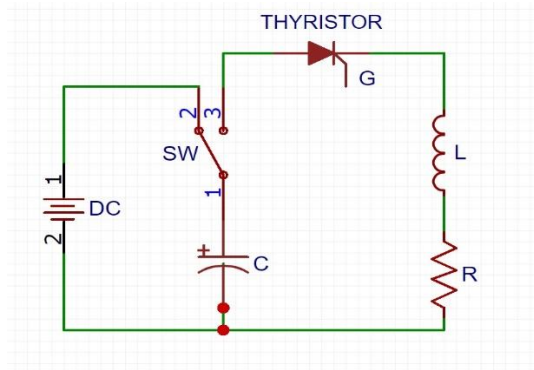
Για τον περιορισμό του φαινομένου suck back το RLC κύκλωμα, δηλαδή ο πυκνωτής και το πηνίο, πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα ώστε να ισχύει η σχέση 3.5 β.

$$t_{Ipulse\_cut-off} \leq t_{alignment} \quad (3.6 \beta)$$

Όπου  $t_{Ipulse\_cut-off}$  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 3.5β τότε η δύναμη επαναφοράς που φαίνεται στο δεξί τμήμα στο Σχήμα 3.4 μηδενική.

### 3.5 Ανάλυση του EMA ως RLC κύκλωμα.

Ουσιαστικά ο EMA είναι μία ειδική περίπτωση των κυκλωμάτων RLC σε σειρά. Ενεργοποιώντας τα θυρίστωρ το κύκλωμα κλείνει και έχουμε ροή ρεύματος. Η μορφή του παλμού ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα εξαρτάται από τις τιμές των στοιχείων RLC. Ως γνωστόν τα πηνία και οι πυκνωτές παρουσιάζουν μια μεταβατική απόκριση και δεν αποκρίνονται όπως οι αντιστάτες, στους οποίους η μεταβολή τάσης σημαίνει άμεση μεταβολή ρεύματος. Συνεπώς παρακάτω γίνεται θεωρητική ανάλυση της απόκρισης του κυκλώματος με σκοπό την εύρεση των ιδανικών τιμών RLC.



Σχήμα 3.5 Κύκλωμα RLC.

Εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα του Σχήματος 3.5 έχουμε:

$$V_C + V_L + V_R = 0 \quad (3.7)$$

Είναι γνωστό ότι για τον πυκνωτή, το πηνίο και την αντίσταση ισχύει:

$$V_C = \frac{Q}{C} \quad (3.7)$$

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (3.8)$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (3.9)$$

$$V_R = Ri \quad (3.10)$$

Με αντικατάσταση των παραπάνω στην εξίσωση και έπειτα από μια απλή παραγωγή, προκύπτει η διαφορική εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα RLC :

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{i(t)}{LC} = 0 \quad (3.11)$$

Η οποία μέσω μετασχηματισμού La Place γίνεται:

$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (3.8)$$

Η (3.8) με τις αντικαταστάσεις:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad (3.13)$$

Μετατρέπεται στην:

$$s^2 + 2as + \omega_0^2 = 0 \quad (3.9)$$

Η ποσότητα  $\alpha$  ονομάζεται σταθερά απόσβεσης και καθορίζει την εξασθένιση των ταλαντώσεων. Η ποσότητα  $\omega_0$  ονομάζεται γωνιακή συχνότητα συντονισμού και καθορίζει τη συχνότητα ταλαντώσεων ενώ η  $\omega_d$  είναι η φυσική κυκλική συχνότητα συντονισμού.

Οι λύσεις της 3.14 δίνονται από:

$$s = -a \pm \sqrt{a^2 - \omega_0^2} \quad (3.15)$$

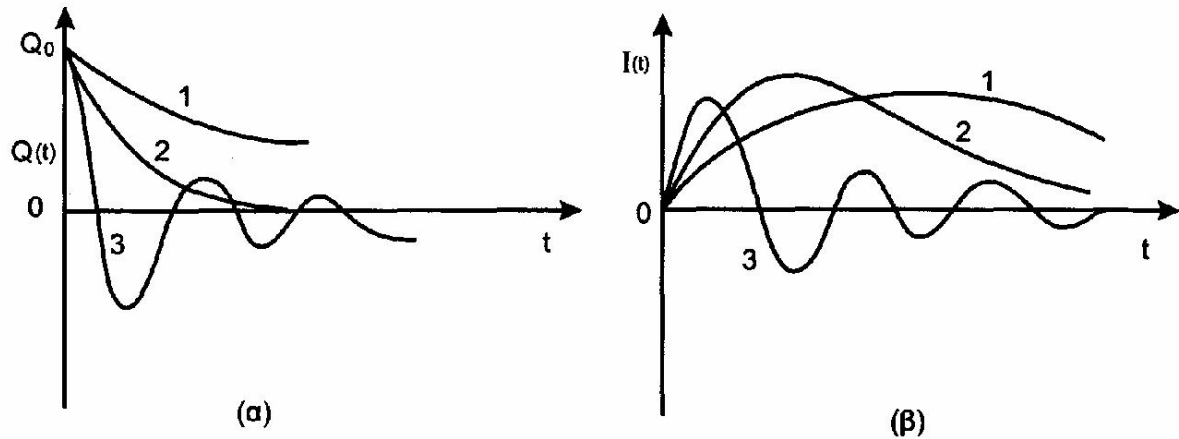
Επίσης γνωρίζουμε ότι ο όρος εντός της τετραγωνικής ρίζας μπορεί να είναι θετικός, μηδέν ή αρνητικός. Άρα καταλήγουμε σε τρεις περιπτώσεις όπου  $a > \omega_0$ ,  $a = \omega_0$  και  $a < \omega_0$ .

### 3.6 Συντελεστής απόσβεσης

Η απόκριση του RLC κυκλώματος εξαρτάται από το συντελεστή απόσβεσης  $\zeta$ :

$$\zeta = \frac{a}{\omega_0} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3.16)$$

Βάση τον συντελεστή  $\zeta$ , ένα κύκλωμα RLC σε σειρά μπορεί να είναι υποαποσβεννύμενο για  $\zeta < 1$ , κρίσιμα αποσβεννύμενο για  $\zeta = 1$  όπου δεν έχουμε ταλάντωση αλλά το φορτίο φτάνει γρηγορά στο 0 και υπεραποσβεννύμενο για  $\zeta > 1$ .



Σχήμα 3.6 α) Χρονική εξάρτηση για το φορτίο  $Q(t)$  στις τρεις περιπτώσεις (1) υπεραποσβεννύμενο, (2) κρίσιμα αποσβεννύμενο, (3) υποαποσβεννύμενο. β) Χρονική εξάρτηση του ρεύματος  $I(t)$  για τις ίδιες τρεις περιπτώσεις.

Πίνακας 3.1 Κυματομορφές ρεύματος ανά είδος ταλάντωσης	
Είδος Ταλάντωσης	Κυματομορφή ρεύματος
Υποαποσβεννύμενη ( $a < \omega_0$ )	$I(t) = \frac{E}{L\omega_d} e^{-at} \sin(\omega_d t)$
Κρίσιμα αποσβεννύμενη ( $a = \omega_0$ )	$I(t) = \frac{E}{L} t e^{-at}$
Υπεραποσβεννύμενη ( $a > \omega_0$ )	$I(t) = \frac{E}{2L\sqrt{a^2 - \omega_0^2}} (e^{s_2 t} - e^{s_1 t})$

Είναι προφανές από το Σχήμα 3.6 ότι ένα υπεραποσβεννύμενο κύκλωμα δεν είναι επιθυμητό καθώς έχουμε μεγάλη διάρκεια παλμού ρεύματος και το φορτίο τείνει αργά στο μηδέν. Υψηλές εντάσεις ρεύματος επιτυγχάνονται σε αποσβεννύμενο κύκλωμα. Όμως προκαλούνται παλμοί ρεύματος αντιστροφής πολικότητας του αρχικού. Οι παλμοί αυτοί θα πρέπει να

απαλειφθούν, διαφορετικά μπορούν να καταστρέψουν τους πυκνωτές σε περίπτωση που αυτοί είναι κατασκευασμένοι να λειτουργούν μόνο σε συνεχείς τάσης. Επομένως για την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων στον ΕΜΑ είναι επιθυμητό ένα υποαποσβεννύμενο σύστημα και μας απασχολεί μόνο το χρονικό διάστημα  $0 < t < \frac{2\pi}{\omega_d}$  του παλμού ρεύματος.

### 3.7 Συντελεστής αυτεπαγωγής σωληνοειδούς

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 [11]:

$$L(x) = L_m \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{l}x\right) \right] + L_{min} \quad (3.10)$$

Όπου  $x$  η απόσταση μεταξύ κέντρων σωληνοειδούς-βλήματος,  $l$  το μήκος του σωληνοειδούς.

Η μέση τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής:

$$L_m = \frac{L_{max} - L_{min}}{2} \quad (3.11)$$

Η ελάχιστη τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής:

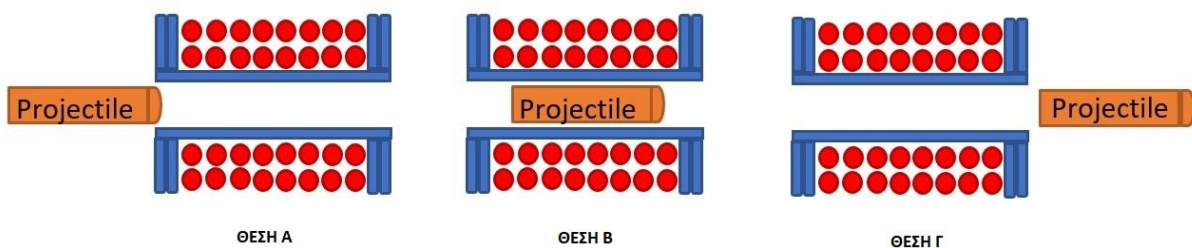
$$L_{min} = \frac{\mu_0 R^2 N^2}{2\pi(6R + 9l + 10C)} \quad (3.12)$$

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).

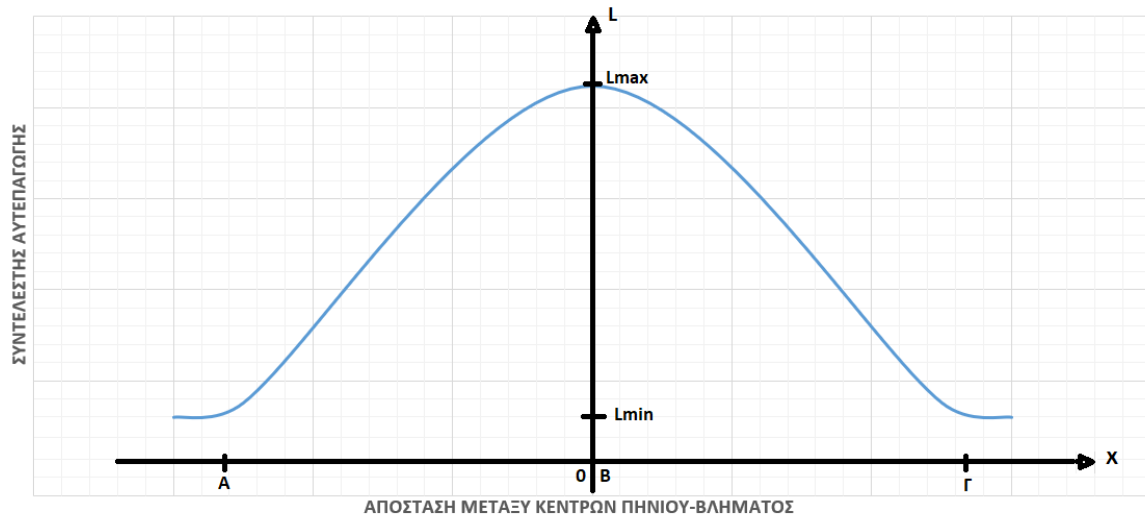
Η μέγιστη τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής:

$$L_{max} = \left( L_{min} + \mu_r \frac{N^2}{l^2} S l_c \right) \quad (3.13)$$

Όπου  $S$  το εμβαδόν διατομής του βλήματος,  $l_c$  το μήκος του βλήματος και  $\mu_r$  η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού βλήματος.



Σχήμα 3.7 Απεικόνιση των θέσεων του βλήματος στις οποίες μετριέται η αυτεπαγωγή καθώς το βλήμα κινείται εντός του σωληνοειδούς.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα απεικόνισης συντελεστή αυτεπαγωγής για τις διάφορες θέσεις του βλήματος εντός σωληνοειδούς.

### 3.8 Απώλειες ενέργειας στον ΕΜΑ

#### 3.8.1 Απώλειες λόγω ωμικής αντίστασης των πηνίων

Οι απώλειες των πηνίων δίνονται από την παρακάτω εξίσωση και είναι προφανές ότι εξαρτώνται από το ρεύμα που τα διαρρέει και από την ωμική αντίσταση η οποία αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας.

$$W_{LOSS_{cu}} = i^2 R \quad (3.21)$$

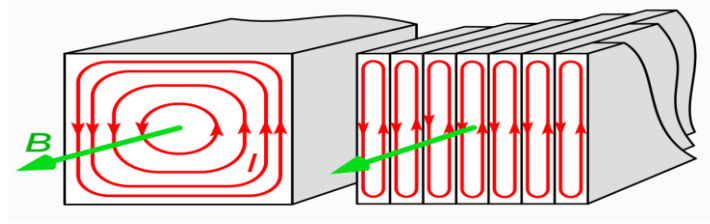
#### 3.8.2 Απώλειες δινορρευμάτων

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό υπόκειται σε χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή σύμφωνα με το νόμο του Faraday επάγονται ηλεκτρικές τάσεις σε όλα τα πιθανά κλειστά μονοπάτια που περικλείουν τη μαγνητική ροή. Αποτέλεσμα των επαγόμενων τάσεων είναι η δημιουργία ρευμάτων στα αντίστοιχα κλειστά μονοπάτια. Τα ρεύματα αυτά είναι γνωστά ως δινορρέυματα (eddy currents), τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν μαγνητική ροή η οποία τείνει να αντιδράσει στο αίτιο που τα δημιουργήσε, δηλαδή στην μαγνητική ροή του πεδίου. Για την αντιστάθμιση της απομαγνητίζουσας επίδρασης θα πρέπει να αυξηθεί η μαγνητική δύναμη του τυλίγματος. Η ροή των δινορρευμάτων εντός του σιδηρομαγνητικού υλικού προκαλεί τις λεγόμενες απώλειες δινορρευμάτων όπου ένα μέρος της ενέργειας του πεδίου μετατρέπεται σε θερμότητα στις ολικές αντιστάσεις των βρόχων που διατρέχουν τα ρεύματα. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών αυτών το σιδηρομαγνητικό υλικό κατασκευάζεται από μονωμένα ελάσματα αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αντίσταση στη ροή δινορρευμάτων και περιορίζοντας το μήκος των βροχών. Επιπλέον κατάλληλη πρόσμιξη του σιδηρομαγνητικού υλικού με πυρίτιο έχει αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής αντίστασης και τον περιορισμό του μεγέθους των ρευμάτων.

Εξίσωση απωλειών λόγω δινορρευμάτων:

$$W_{LOSS_{eddy}} = K_e B_{max}^2 f^2 t^2 V \quad (3.14)$$

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

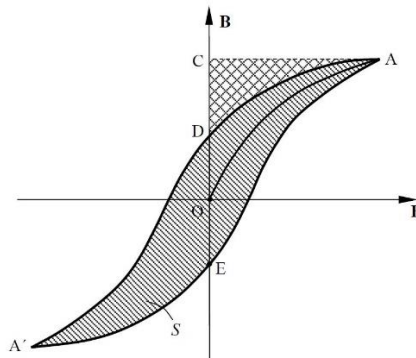


Σχήμα 3.9 Απεικόνιση δινορρευσμάτων.

### 3.8.3 Απώλειες λόγω υστέρησης

Η ανά μονάδα όγκου δαπανώμενη ενέργεια για τη μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού από μια αρχικά αμαγνήτιστη κατάσταση  $O$  μέχρι το σημείο κορεσμού  $A$ , δίνεται από το ολοκλήρωμα[16]:

$$W_{LOSS_{hyst}} = \int_0^C H dB \quad (3.15)$$



Σχήμα 3.10 Εμβαδά βρόγχου υστέρησης.

Η ενέργεια αυτή παριστάνεται από το εμβαδόν μεταξύ του τμήματος  $OA$  του παρθενικού κλάδου μαγνήτισης και του άξονα  $B$  (τμήμα  $OACO$ , Σχήμα 3.10). 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:

$$W_{LOSS_{hyst}} = \int_D^C H dB \quad (3.16)$$

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.



### 3.8.4 Απώλειες στα Θυρίστορ

Οι απώλειες στα θυρίστορ δίνονται από την σχέση [18]:

$$W_{loss} = \int_0^{t_{pulse}} V_{T0} I_T dt \quad (3.17)$$

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



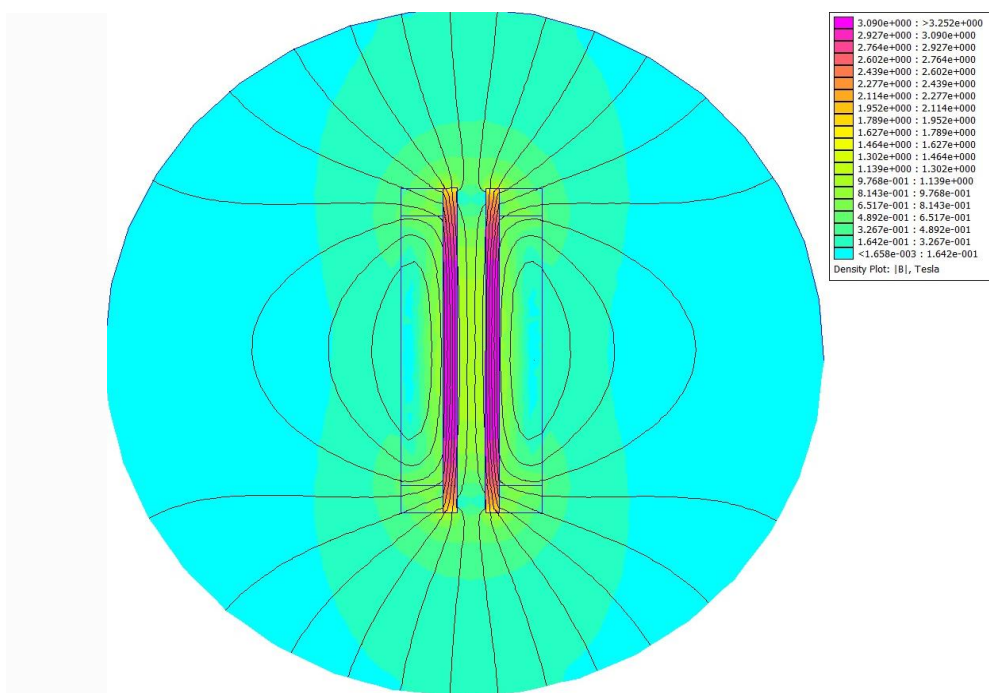
## 4. Σχεδιασμός και υλοποίηση μεταλλικών τμημάτων EMA και του RLC κυκλώματος

Στο κεφάλαιο αυτό όλα τα μεταλλικά τμήματα του EMA συναρμολογούνται και πρέπει να ταιριάζουν απόλυτα. Η μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα το οποίο εξαρτάται από παράγοντες όπως το υλικό του βλήματος, οι συνδυαστικές διαστάσεις που πρέπει να έχει το πηνίου και το βλήμα και από τις τιμές του RLC κυκλώματος.

### 4.1 Υλικά πυρήνα σωληνοειδούς

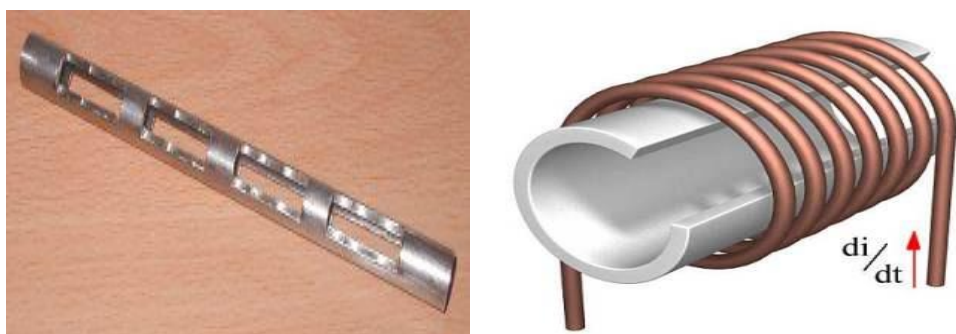
Για την εύρεση του ιδανικού υλικού το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως βάση στήριξης των σωληνοειδών, προσομοιώθηκαν οι τρεις κατηγορίες μετάλλων: σιδηρομαγνητικά, παραμαγνητικά και διαμαγνητικά. Οι προσομοιώσεις των μαγνητικών πεδίων έγιναν με το πρόγραμμα FEMM. Και στις τρεις περιπτώσεις το πάχος των τοιχωμάτων της σωλήνας ήταν ίδιο (1,5 mm), η εσωτερική διάμετρος (7 mm), η εξωτερική (10 mm), το μήκος των πηνίων ήταν (50 mm) και το μήκος της κάθε ροδέλας είναι (5 mm), τοποθετημένες μια στο άνω και μια στο κάτω μέρος του πηνίου.

Από την προσομοίωση στο Σχήμα 4.1 με σωλήνα κατασκευασμένη από σιδηρομαγνητικό μέταλλο παρατηρείται μεγάλη πυκνότητα μαγνητικής ροής εντός του μετάλλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη επιθυμητή μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο κέντρο του σωληνοειδούς, που μπορεί να φτάσει έως και το 100%, σε σχέση με την περίπτωση όπου ο πυρήνας δεν είναι σιδηρομαγνητικός.

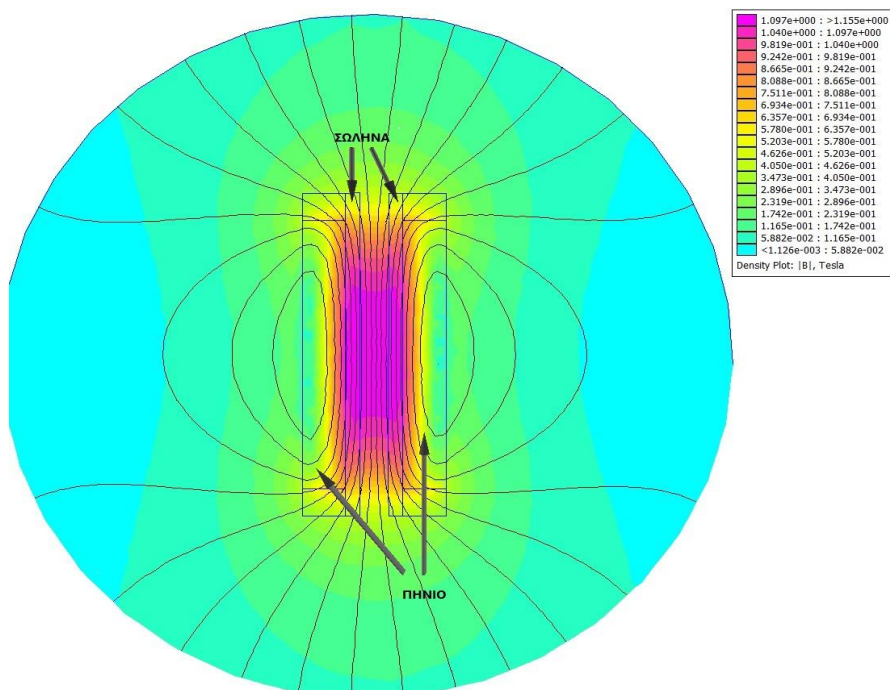


Σχήμα 4.1α Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς με σιδηρομαγνητικό πυρήνα στο FEMM.

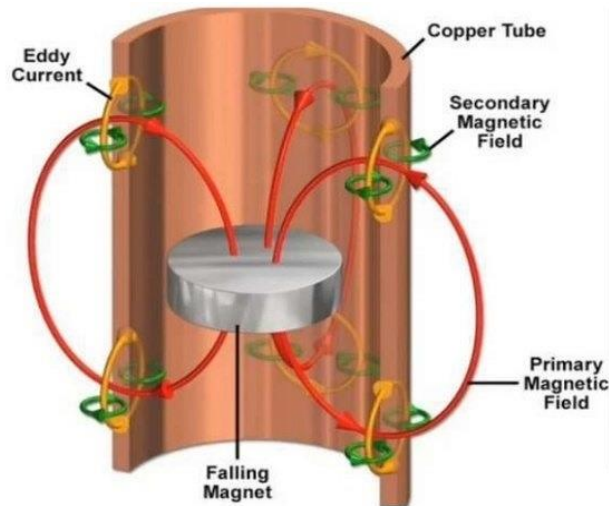
Διαμαγνητικά μέταλλα όπως ο χαλκός, ο χάλυβας και παραμαγνητικά υλικά όπως το τιτάνιο και το αλουμίνιο δεν μαγνητίζονται. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ξεκάθαρα ότι δεν επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο. Παρόλα αυτά είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και δημιουργούν το φαινόμενο του μαγνητικού φρένου (eddy current brake) Σχήμα 4.3. Μετά την έξοδο από το πρώτο σωληνοειδές, το βλήμα συνεχίζει να διατηρεί κάποια μαγνήτιση. Το κινούμενο μαγνητικό πεδίο που φέρει το βλήμα δημιουργεί δινορρεύματα στη σωλήνα. Τα ρεύματα αυτά με τη σειρά τους δημιουργούν μαγνητικά πεδία που αντιτίθενται στο αρχικό μαγνητικό πεδίο που τα δημιούργησε. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της κίνησης του βλήματος εντός του σωλήνα. Μια τεχνική για τον περιορισμό των δινορρευμάτων είναι η δημιουργία κάθετων τομών κατά μήκος της σωλήνας [9].



Σχήμα 4.1b Απεικόνιση σωλήνας με κάθετες τομές κατά το μήκος της με σκοπό τον περιορισμό των δινορρευμάτων κατά τη λειτουργία του EMA.



Σχήμα 4.2. Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς με διαμαγνητικό, παραμαγνητικό και μη-μαγνητικό πυρήνα στο FEMM.



Σχήμα 4.3 Κινούμενος μαγνήτης εντός χάλκινου σωλήνα-Μαγνητικό φρένο.[19]

Κατά την κατασκευή του EMA χρησιμοποιείται πλαστική διάφανη σωλήνα καθώς τα πλαστικά συγκαταλέγονται στα μη-μαγνητικά υλικά με  $\mu_r = 1$ , δεν επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο και είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος. Η διάφανη σωλήνα επιτρέπει επίσης την οπτική επαφή με το βλήμα. Η συγκεκριμένη διάφανη σωλήνα επιλέχθηκε καθώς ήταν αυτή με το μικρότερο πάχος τοιχωμάτων που βρέθηκε στην αγορά και ταυτόχρονα ικανή να αντέξει τις δυνάμεις που απαιτεί η κατασκευή και η λειτουργία του EMA.

Κλείνοντας με τη μελέτη των μετάλλων του σωλήνα σε μια εφαρμογή του EMA με πολλά πηνία όπου συναντώνται μεγάλες ταχύτητες βλήματος συνίσταται η χρήση ατσάλινου σωλήνα. Η ατσάλινη σωλήνα μπορεί να αντέξει πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις και τριβές χωρίς να φθαρεί σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υλικά που προσομοιώθηκαν. Ταυτόχρονα μπορεί να έχει αρκετά λεπτά τοιχώματα επιτρέποντας ακόμα μεγαλύτερη μαγνητική σύζευξη σωληνοειδούς-βλήματος.

## 4.2 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.

Κατά των πειραματισμό μας με το EMA όλα τα βλήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυλινδρικά. Επίσης όλα τα βλήματα είχαν την ίδια διάμετρο  $R=6\text{mm}$  η οποία είναι ένα χιλιοστό μικρότερη από την εσωτερική διάμετρο της σωλήνας προς αποφυγή των τριβών. Στον Πίνακα 4.1 αναφέρονται τα μήκη και οι μάζες των δύο διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως βλήματα.

Πίνακας 4.1 Μήκος και μάζα βλημάτων	
Μήκος	Μάζα σε (g)
6 cm	12,26
5 cm	11,02
4 cm	8,58
3 cm	6,39

### 4.3 Σωληνοειδές

Το σωληνοειδές είναι απ' τα πιο βασικά μέρη του ΕΜΑ. 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 (10 mm). Συνεπώς απομένει η εύρεση του μήκους και του πάχους του.

Το μήκος του σωληνοειδούς είναι άμεσα συνδεδεμένο με το μήκος του βλήματος. Για μέγιστη απόδοση πρέπει να ισχύει για το μήκος του βλήματος [20]:

$$75\% \times L_{\pi\eta\nu} \leq L_{\beta\lambda} \leq 100\% \times L_{\pi\eta\nu} \quad (4.1)$$

Έτσι με βάση τα διαθέσιμα βλήματα και τη σχέση (4.1) το μήκος των σωληνοειδών είναι  $L=5$  cm. Τέλος το πάχος καθορίζεται από τους περιορισμούς λόγω του συντελεστή αυτεπαγωγής και της αντίστασης του σωληνοειδούς, που πρέπει να μείνουν εντός των ορίων που αναφέρονται στο κεφάλαιο 4.2. Επίσης περιορισμός προκύπτει και από την μέγιστη ικανότητα ισχύος που μπορούν να διαχειριστούν τα ημιαγωγικά στοιχεία. Όμως στη διάθεσή μας είχαμε συγκεκριμένες ποσότητες χάλκινου σύρματος:

- σύρμα με μήκος 30 m και εμβαδόν διατομής  $1,04 \text{ mm}^2$
- σύρμα με μήκος 16 m και εμβαδόν διατομής  $0,823 \text{ mm}^2$

Έτσι για το πρώτο και το δεύτερο πηνίο χρησιμοποιήθηκε σύρμα 15 m και εμβαδόν διατομής  $1,04 \text{ mm}^2$  και για το τρίτο πηνίο χρησιμοποιήθηκε όλο το διαθέσιμο σύρμα με μήκος 16 m και εμβαδόν διατομής  $0,823 \text{ mm}^2$ .

#### 4.3.1 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.

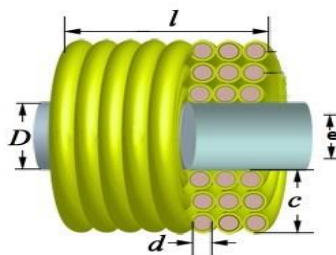
Η σχέση που συνδέει όλα τα παραπάνω είναι η 4.2.

$$R = \rho LA \quad (4.2)$$

Όπου  $R$  η ωμική αντίσταση του αγωγού,  $\rho$  η ειδική αντίσταση του χαλκού,  $L$  το μήκος και  $A$  το εμβαδόν διατομής του χάλκινου σύρματος. Η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι  $\rho=0,0175 \text{ }\mu\Omega\text{m}$  σε θερμοκρασία  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Από την σχέση 4.2 προκύπτει η αντίσταση κάθε πηνίου στους

25 °C. Όμως η θερμοκρασία των πηνίων δεν παραμένει σταθερή και αυξάνεται όταν αυτά διαρρέονται από ρεύμα. Γι' αυτό λοιπόν λαμβάνεται υπόψη ο θερμικός συντελεστής  $\alpha$  του χαλκού ο οποίος είναι 0,4041% ανά βαθμό °C.

### 4.3.2 Παράμετροι σωληνοειδών EMA



Σχήμα 4.4. Πολυστρωματικό σωληνοειδές.

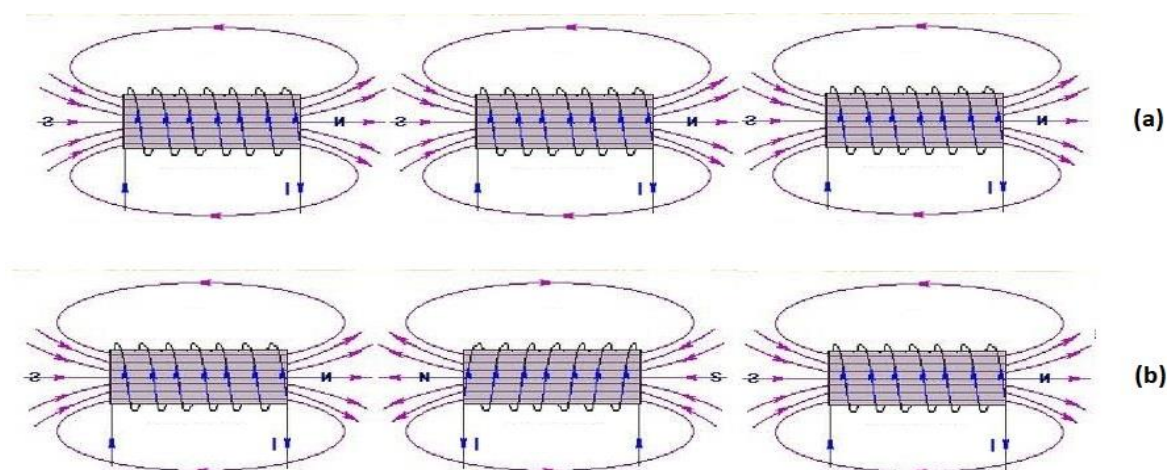
<b>Πίνακας 4.2 Παράμετροι διαστάσεων πειραματικών σωληνοειδών EMA</b>			
	<b>Σωληνοειδές 1</b>	<b>Σωληνοειδές 2</b>	<b>Σωληνοειδές 3</b>
<b>Διάμετρος D:</b>	10 mm	10 mm	10 mm
<b>Μήκος της περιέλιξης l:</b>	50,2 mm	49,8 mm	49,5 mm
<b>Πάχος του σωληνοειδούς c:</b>	6,9 mm	7,2 mm	6,75 mm
<b>Διάμετρο σύρματος d:</b>	1,15 mm	1,15 mm	1,04 mm
<b>Εμβαδόν διατομής A:</b>	1,04 mm <sup>2</sup>	1,04 mm <sup>2</sup>	0,823 mm <sup>2</sup>
<b>Αριθμός σπειρών σωληνοειδούς:</b>	273±3	273±3	294±3
<b>Αριθμός στρωμάτων:</b>	6	6	6
<b>Εσωτερική διάμετρος e:</b>	7 mm	7 mm	7 mm
<b>Συνολικό μήκος σωληνοειδούς:</b>	15 m	15 m	16 m



Πίνακας 4.3 Αντίσταση και συντελεστής αυτεπαγωγής			
	Σωληνοειδές 1	Σωληνοειδές 2	Σωληνοειδές 3
Αντίσταση R στους 25 °C:	0,258 Ω	0,258 Ω	0,340 Ω
Αντίσταση R στους 45 °C:	0,278 Ω	0,278 Ω	0,355 Ω
Ελάχιστη τιμή συντελεστή L	380 μH	397 μH	426 μH
Μέγιστη τιμή συντελεστή L	2,12 mH	2,17 mH	2,33 mH
Μέση τιμή συντελεστή L	1,25 mH	1,28 mH	1,38 mH

### 4.3.3 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% [8] 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 4.5. (α) κοινός μαγνητικός προσανατολισμός των σωληνοειδών ενός EMA, (β) μη κοινός μαγνητικός προσανατολισμός.

## 4.4 Αποθήκευση ενέργειας

Το καταλληλότερο στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας για το συγκεκριμένο σύστημα αποτελούν οι πυκνωτές. Συγκριτικά με τις μπαταρίες μπορεί να αποθηκεύουν μικρότερα ποσά ενέργειας αλλά το γεγονός ότι μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλές εντάσεις ρεύματος για μικρό χρονικό διάστημα τα καθιστά κατάλληλα για την χρήση τους στον ΕΜΑ. Ένα επιπλέον μέσο αποθήκευσης ενέργειας είναι το υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES). 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 ΕΜΑ.

Συνεπώς για την παροχή ρεύματος στον ΕΜΑ έγινε η χρήση ηλεκτρολυτικών DC πυκνωτών[21] 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 (Equivalent Series Resistance-ESR) η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η αντίσταση αυτή να μην είναι πολλή μικρή, της τάξεως των mΩ, αλλά συνδέοντας σε σειρά τους πυκνωτές η συνολική αντίσταση πολλαπλασιάζεται. Ακόμα και πολύ μικρές μεταβολές της αντίστασης επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος καθώς η τάση και το ρεύμα είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα στους ΕΜΑ. Συνεπώς για την διατήρηση της ESR σε χαμηλά επίπεδα προσπαθήσαμε να αποφύγουμε τη σύνδεση πολλών πυκνωτών σε σειρά.

Οι συνολικές χωρητικότητες υπολογίστηκαν με τη χρήση των εξισώσεων 4.3 και 4.4 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 4.4.

Συνάρτηση υπολογισμού χωρητικότητας πυκνωτών σε σειρά.

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (4.3)$$

Συνάρτηση υπολογισμού χωρητικότητας πυκνωτών σε παράλληλη σύνδεση.

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4.4)$$

Εξίσωση που δίνει την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια των πυκνωτών.

$$W_{store} = \frac{1}{2} C V^2 \quad (4.3)$$

<b>Πίνακας 4.4 Παράμετροι Πυκνωτών</b>			
	<b>1<sup>η</sup> τράπεζα</b>	<b>2<sup>η</sup> τράπεζα</b>	<b>3<sup>η</sup> τράπεζα</b>
<b>Μέγιστη τάση</b>	400 V	400 V	400 V
<b>Αναγραφόμενη χωρητικότητα</b>	5000 $\mu\text{F}$	2800 $\mu\text{F}$	2500 $\mu\text{F}$
<b>Πραγματική χωρητικότητα</b>	4520 $\mu\text{F}$	2570 $\mu\text{F}$	1920 $\mu\text{F}$
<b>Αποθηκευμένη ενέργεια στα 360 V</b>	292,9 Joule	166,5 Joule	124,5 Joule
<b>ESR</b>	0,09 $\Omega$	0,063 $\Omega$	0,08 $\Omega$

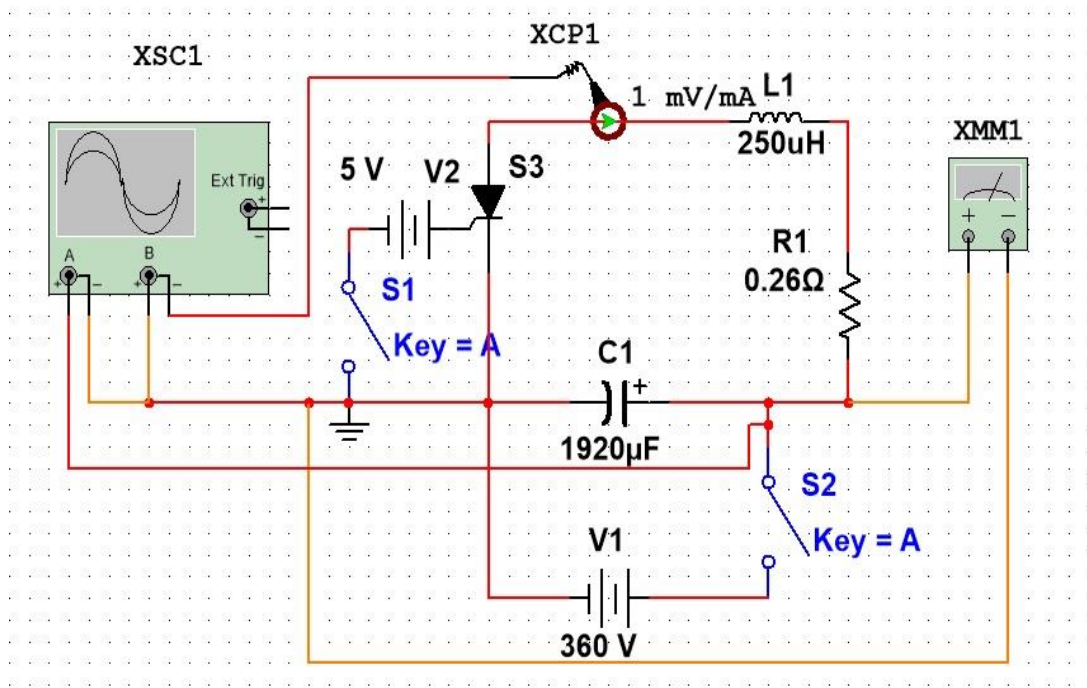
#### 4.5 Προσομοίωση απόκρισης του κυκλώματος RLC

<b>Πίνακας 4.5 Στοιχεία κυκλωμάτων RLC</b>				
	<b>Αντίσταση R</b>	<b>Αυτεπαγωγή L</b>	<b>Χωρητικότητα C</b>	<b>Συντελεστής <math>\zeta</math></b>
<b>Κύκλωμα RLC 1<sup>st</sup> stage</b>	0,35	1,25 mH	4520 $\mu\text{F}$	0,332
<b>Κύκλωμα RLC 2<sup>nd</sup> stage</b>	0,32	1,28 mH	2570 $\mu\text{F}$	0,226
<b>Κύκλωμα RLC 3<sup>rd</sup> stage</b>	0,44	1,38 mH	1920 $\mu\text{F}$	0,259

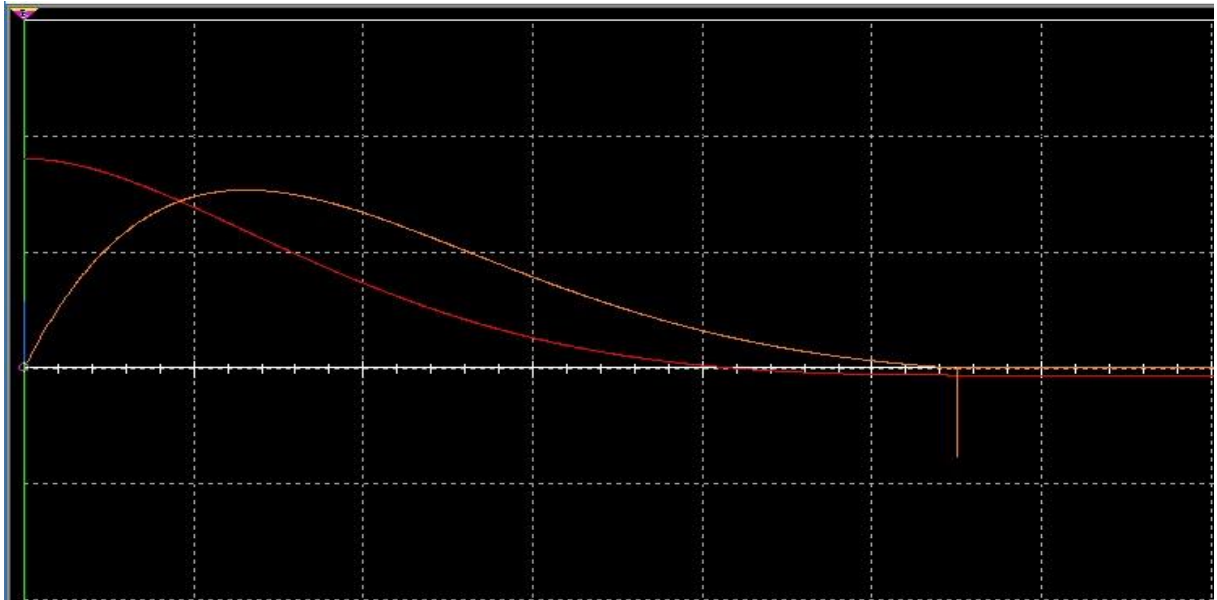
Η προσομοίωση του κυκλώματος έγινε με τη χρήση του προγράμματος Multisim. Πρόκειται για ένα εμπορικό πρόγραμμα το οποίο περιέχει μεγάλη βιβλιοθήκη με ηλεκτρονικά εξαρτήματα έτσι ο χρήστης μπορεί να πετύχει πολύ υψηλή ακρίβεια στην προσομοίωση του κυκλώματος του.

Οι παρακάτω κυματομορφές προέκυψαν έπειτα από την προσομοίωση του κυκλώματος στο Σχήμα 4.6. Αρχικά ο διακόπτης S1 είναι ανοικτός, ο διακόπτης S2 είναι κλειστός και ο πυκνωτής φορτίζεται. Στη συνέχεια ανοίγουμε το διακόπτη S2 και κλείνουμε τον S1 δίνοντας έτσι έναυση στο θυρίστορ. Την στιγμή αυτή λαμβάνουμε τον παλμό ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές και τον παλμό τάσης στα άκρα του. Η προσομοίωση του κυκλώματος έγινε για το κάθε ένα από τα τρία κυκλώματα RLC που αποτελούν τον EMA χρησιμοποιώντας κάθε φορά τις χαρακτηριστικές τιμές R, L, C.

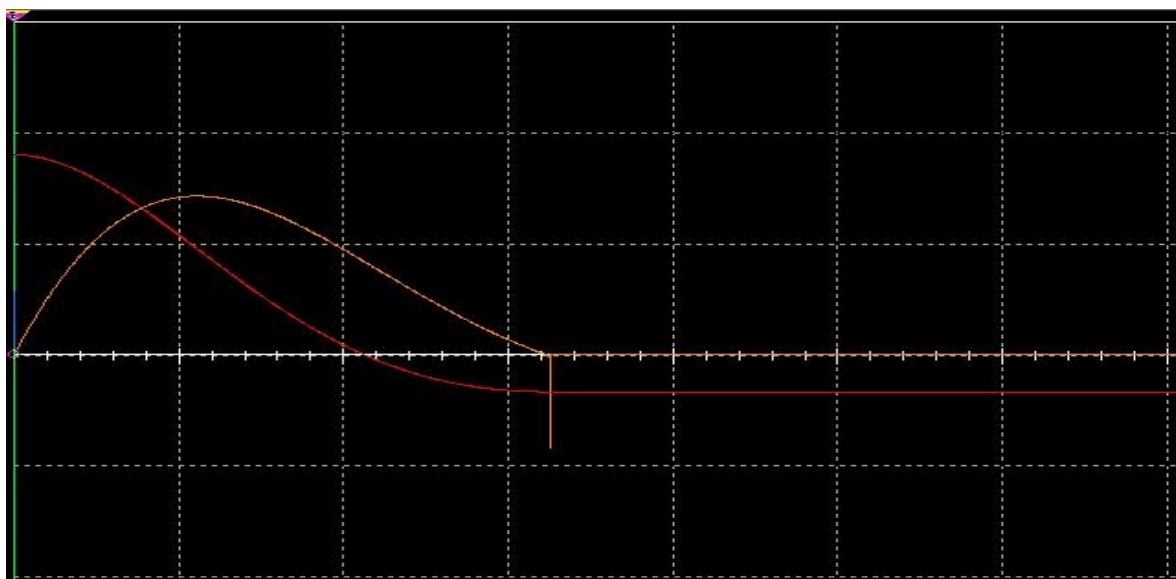
Η κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε στα μετρικά όργανα: (και 1 ms/div).



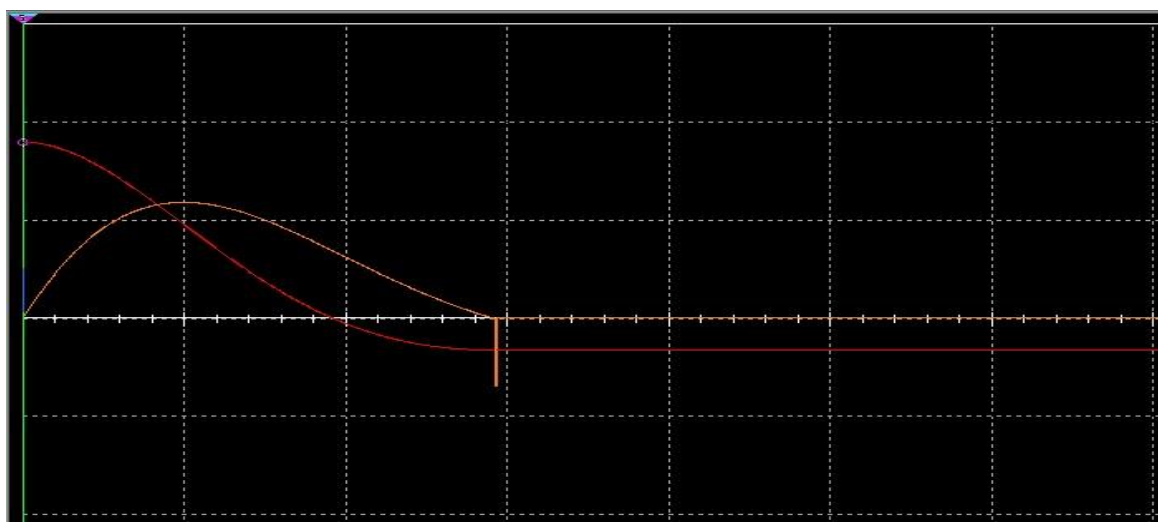
Σχήμα 4.6 Συνδεσμολογία κυκλώματος που προσομοιώνεται στο Multisim. Οι αναγραφόμενες τιμές αφορούν το Stage 1. XSC1 ο παλμογράφος, XCP1 η αμπερομετρική πένσα, XMM1 το πολύμετρο.



Σχήμα 4.7 Απεικόνιση προσομοιωμένων παλμών ρεύματος-τάσης για το κύκλωμα RLC του 1<sup>ου</sup> σταδίου. Κατακόρυφος άξονας: 200 V/div, 200 A/div. Οριζόντιος άξονας: 1 ms/div.



Σχήμα 4.8 Απεικόνιση προσομοιωμένων παλμών ρεύματος-τάσης για το κύκλωμα RLC του 2<sup>ου</sup> σταδίου. Κατακόρυφος άξονας: 200 V/div, 200 A/div. Οριζόντιος άξονας: 1 ms/div.



Σχήμα 4.9 Απεικόνιση προσομοιωμένων παλμών ρεύματος-τάσης για το κύκλωμα RLC του 3<sup>ου</sup> σταδίου. Κατακόρυφος άξονας: 200 V/div, 200 A/div. Οριζόντιος άξονας: 1 ms/div.

Πίνακας 4.6 Μέγιστη ένταση και διάρκεια παλμών ρεύματος		
	Μέγιστη Τιμή Ρεύματος (A)	Διάρκεια Παλμού Ρεύματος (ms)
RLC Stage 1	306	5,4
RLC Stage 2	286	3,2
RLC Stage 3	268	2,8

Από τις τρεις παραπάνω κυματομορφές των ρευμάτων η διάρκεια των παλμών που βλέπουμε, είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εμφανίζεται μαγνητικό πεδίο γύρω από κάθε πηνίο. Συνεπώς βλέπουμε για πόσο χρόνο έδρασε η δύναμη έλξης από τα πηνία στο βλήμα.



## 5. Σχεδιασμός ηλεκτρονικών κυκλωμάτων Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης

---

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται λόγος για όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και κυκλώματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη λειτουργία του EMA. Αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους, αναφέρονται τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέχθηκαν και σχεδιάστηκαν ώστε να λειτουργούν σε σύνδεση μεταξύ τους.

### 5.1 Ημιαγώγιμα στοιχεία

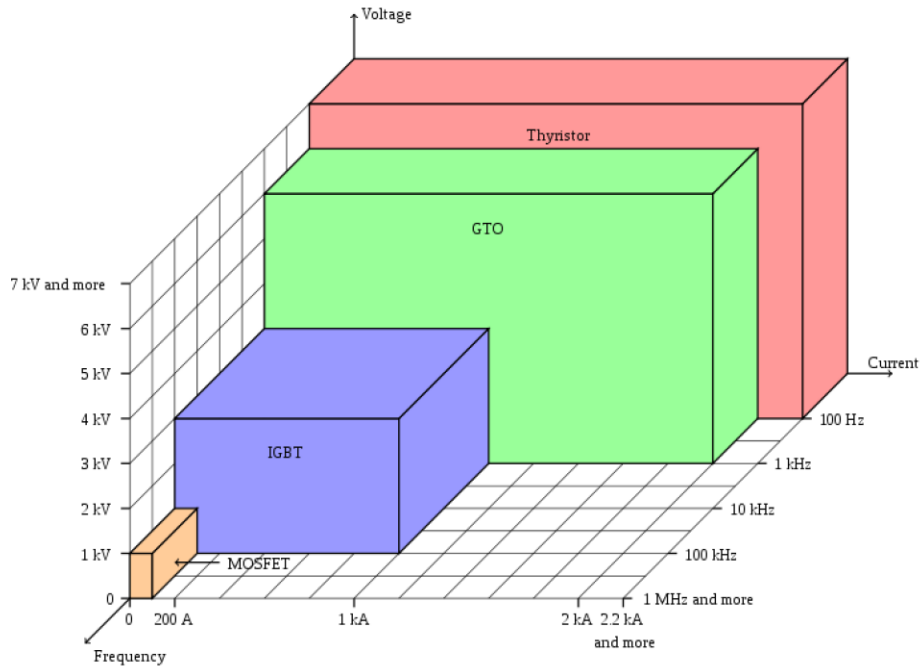
Υπάρχουν διάφοροι τύποι ημιαγωγικών στοιχείων στην αγορά. Ο κάθε τύπος διαχειρίζεται διαφορετικά ποσά ενέργειας και έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, τα οποία τον καθιστούν κατάλληλο σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου τέθηκαν τα εξής κριτήρια :

- η τάση που αντέχει στα άκρα του το ημιαγωγικό στοιχείο
- το μέγιστο ρεύμα που αντέχει το στοιχείο
- ο χρόνος που μπορεί να αντέξει το μέγιστο ρεύμα
- το κόστος και η διαθεσιμότητα του στοιχείου στην αγορά

Τα κύρια ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- MOSFET
- IGBT
- GTO θυρίστορ
- SCR θυρίστορ

Στο Σχήμα 5.1 φαίνονται σε διάγραμμα οι περιοχές λειτουργίας της κάθε κατηγορίας ημιαγωγών ανάλογα με το ρεύμα, την τάση και τη διακοπτική συχνότητα που λειτουργούν.



Σχήμα 5.1 Περιοχές λειτουργίας ημιαγωγικών στοιχείων [22].

Στην κατασκευή της παρούσας εργασίας η μέγιστη τάση λειτουργίας είναι τα 360 V, το μέγιστο ρεύμα είναι περίπου 300-400 A ανά στάδιο ενώ η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας δεν θα μας απασχολήσει. Κοιτάζοντας το παραπάνω διάγραμμα 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 θυρίστορ 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.

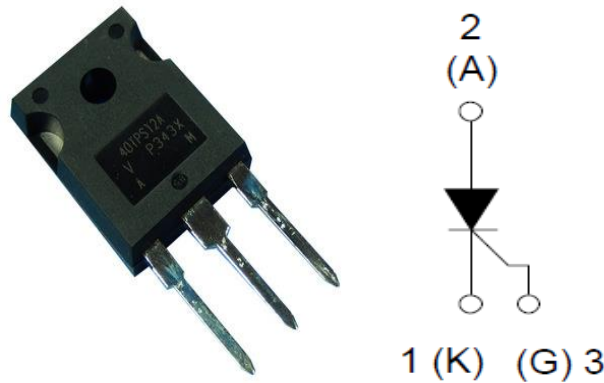
### 5.1.1 Θυρίστορ

Τα θυρίστορ τριών επαφών, γνωστά και ως SCR (silicon controlled rectifier)[22], [23] είναι τα πιο κοινά εξαρτήματα από αυτά που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα ελέγχου ισχύος. Τα SCR χαρακτηρίζονται από δύο καταστάσεις την έναυση (αγωγιμότητα) και την σβέση (αποκοπή). Επιπλέον επιτρέπουν την ροή ρεύματος προς μια μόνο κατεύθυνση, από την άνοδο προς την κάθοδο. Τα συμβατικά θυρίστορ σχεδιάζονται χωρίς ικανότητα ελεγχόμενης σβέσης. Η μετάβαση από την κατάσταση ορθής αποκοπής στην κατάσταση αγωγιμότητας εφόσον το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο 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  $I_H$ .

Τα θυρίστορ που επιλέχθηκαν για τον έλεγχο των ρευμάτων του συστήματος του EMA είναι τα 40TPS12A[24]. Τα συγκεκριμένα αντέχουν ημιτονοειδής παλμούς 500 A για 10 ms με επανατοποθέτηση τάσης στην άνοδο έπειτα από της σβέση και παλμούς 600 A για 10 ms χωρίς επανατοποθέτηση τάσης στην άνοδο. Για την αύξηση της ικανότητας ελέγχου ισχύος, και με σκοπό να αποφευχθεί η λειτουργία τους στις οριακές τιμές, συνδέθηκαν σε κάθε στάδιο 4 θυρίστορ παράλληλα. Ο παλμός έναυσης τους δίνεται από MOSFET που βρίσκονται



στην πλακέτα ελέγχου. Από την στιγμή που θα δοθεί ο παλμός έναυσης μέχρι την ενεργοποίηση των θυρίστωρ υπάρχει μια αμελητέα καθυστέρηση 1μs.

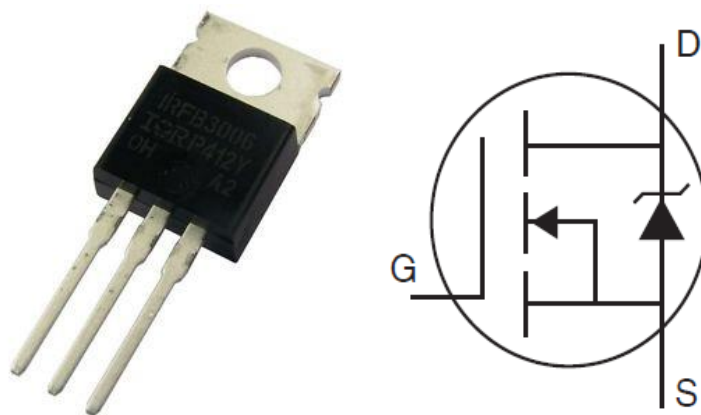


Σχήμα 5.2 Φωτογραφία και ισοδύναμο κύκλωμα θυρίστωρ 40TPS12A.

### 5.1.2 MOSFET ισχύος

Για τον ταχύ έλεγχο των ρευμάτων οδήγησης της πύλης των θυρίστωρ καθίσταται αναγκαία η χρήση ενός ακόμη ημιαγωγίου στοιχείου. Η τάση και το ρεύμα που απαιτείται για την έναυση των θυρίστωρ είναι  $V_{GT} = 2,5 \text{ V}$  και αντίστοιχα  $I_{GT} = 150 \text{ mA}$  ανά θυρίστωρ. Με βάση τα κριτήρια που προαναφέραμε για την προκείμενη περίπτωση τα καταλληλότερα στοιχεία είναι τα MOSFET ισχύος.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτείται η σύνδεση του MOSFET στην πλευρά υψηλής ισχύος. Συνήθως χρησιμοποιούνται MOSFET τύπου P σε τέτοιες περιπτώσεις όμως παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση, επομένως έχουν υψηλότερη (περίπου τριπλάσια) απώλεια ισχύος συγκριτικά με ένα MOSFET τύπου N αντίστοιχου μεγέθους. Επίσης το γεγονός ότι τα MOSFET τύπου P είναι πιο ακριβά από τα N τύπου και τα δεύτερα τα είχαμε ήδη στη διάθεση μας, χρησιμοποιήσαμε τρία MOSFET IRFB3006PbF[25]. Τα συγκεκριμένα είναι MOSFET εμπλουτισμένου τύπου, διαύλου N και συνδέθηκαν έτσι ώστε ένα να οδηγούν τα σήματα έναυσης ανά τέσσερα θυρίστωρ.



Σχήμα 5.3 Φωτογραφία και ισοδύναμο κύκλωμα MOSFET IRFB3006PbF.

### 5.1.3 Οδήγηση πύλης

Η οδήγηση του MOSFET IRFB3006PbF στην χαμηλής ισχύος πλευρά υλοποιείται αρκετά εύκολα από ένα μικροελεγκτή αφού έχει  $V_{GS(th)} = 4\text{ V}$ . Όμως στην προκείμενη περίπτωση η οδήγηση του MOSFET στην πλευρά υψηλής ισχύος απαιτεί τη δημιουργία τάσης πύλης υψηλότερη από την τάση τροφοδοσίας. Για την σωστή ενεργοποίηση του MOSFET πρέπει να ισχύει:

$$V_{GS} = V_{Load} + V_{GS(ON)} \quad (5.1)$$

Ισχύει ότι:

$$V_{Load} = V_{GT} = 2,5\text{ V} \quad (5.2)$$

$$V_{GS(ON)} = V_{GS(th)} = 4\text{ V} \quad (5.3)$$

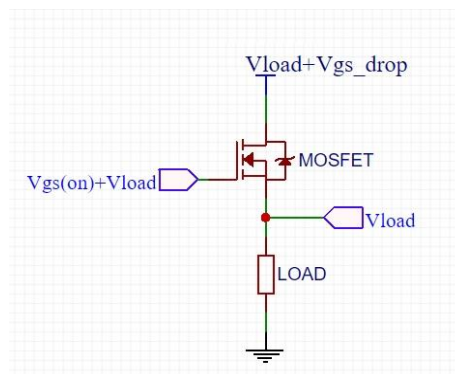
Οπότε η ελάχιστη απαιτούμενη τάση για την ενεργοποίηση του μεταξύ Gate και Source είναι:

$$V_{GS} = 4 + 2,5 = 6,5\text{ V} \quad (5.4)$$

Επίσης η πτώση τάσης V:

$$V_{GS(Drop)} = I_D \times R_{ds(ON)} = 0,6\text{ A} \times 0,0025\ \Omega = 0,0015 \quad (5.5)$$

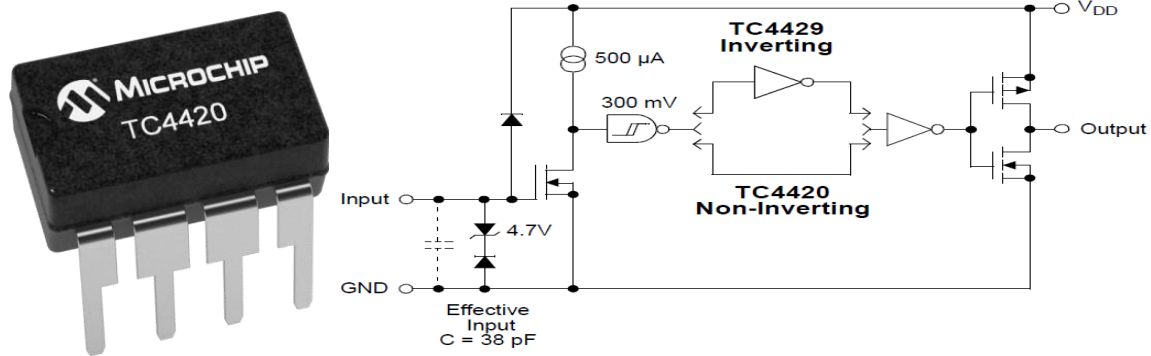
Όμως η τιμή 0,0015 είναι αμελητέα.



Σχήμα 5.4 Τάσεις στο MOSFET για οδήγηση σε High Side.

Η ανάγκη αυτή για τάση υψηλότερη από την τάση τροφοδοσίας ικανοποιείται με την εφαρμογή της τεχνικής που ονομάζεται “Bootstrap”. Η εφαρμογή του κυκλώματος Bootstrap δεν ήταν απαραίτητη οπότε και χρησιμοποιήθηκε οδηγός πύλης[26] για την οδήγηση της πύλης των MOSFET.

Ως οδηγός πύλης χρησιμοποιείται το TC4420[27]. Ο συγκεκριμένος οδηγός μπορεί να παρέχει τάση έως 20 V και παλμούς ρεύματος έως 6 A επιτυγχάνοντας έτσι πολύ μικρούς χρόνους (25 ns) ενεργοποίησης των MOSFET.

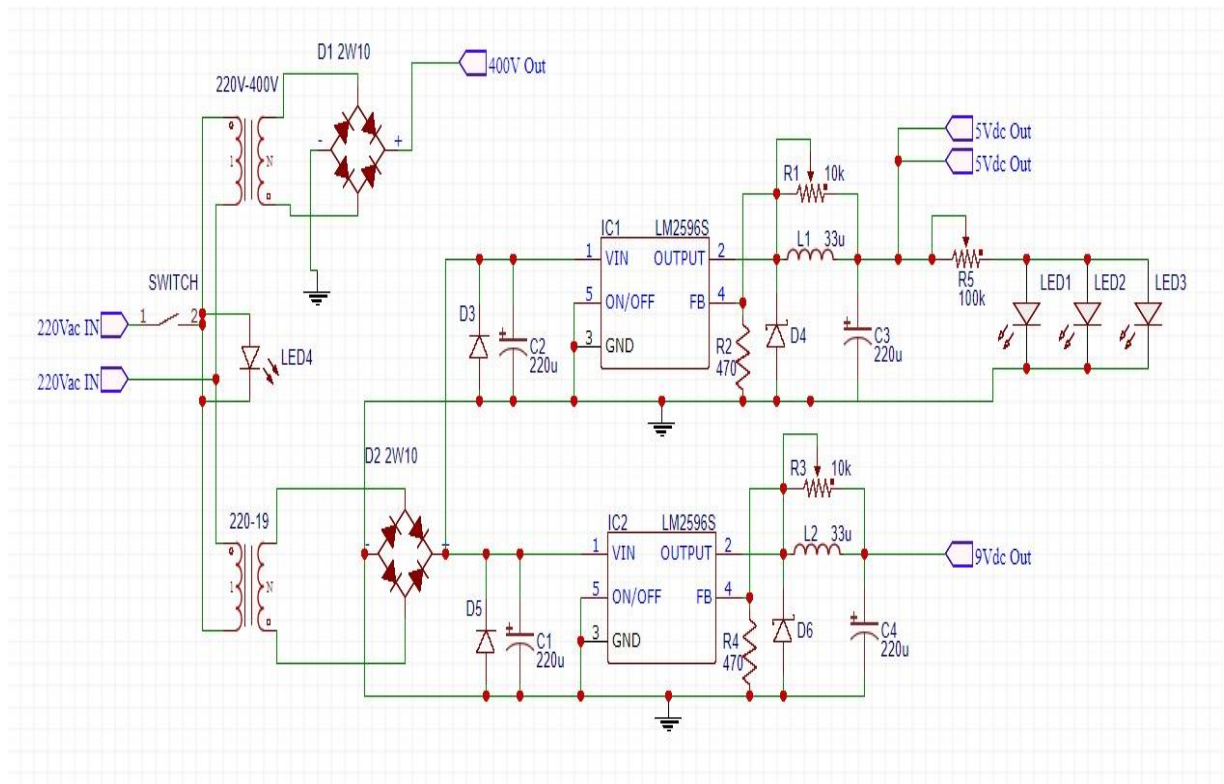


Σχήμα 5.5 Φωτογραφία και ισοδύναμο κύκλωμα οδηγού πύλης TC4420.

## 5.2 Τροφοδοτικό

Το τροφοδοτικό αποτελείται από δύο μετασχηματιστές, έναν ανύψωσης και έναν υποβιβασμού τάσης. Ο μετασχηματιστής ανύψωσης λαμβάνει την τάση του δικτύου και την ανυψώνει από τα  $220 V_{rms}$  στα  $280 V_{rms}$ . Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής επιλέχτηκε διότι γνωρίζοντας πώς η μέγιστη τάση που μπορούν να δεχθούν οι πυκνωτές στα άκρα τους είναι  $400 V_{max(DC)}$ . Συνεπώς ισχύει ότι  $400 V_{DC} \div \sqrt{2} \cong 280 V_{rms}$  είναι η μέγιστη τάση εξόδου που θα πρέπει να παρέχει ο μετασχηματιστής. Έπειτα έχουμε την γέφυρα ανόρθωσης η οποία ανορθώνει πλήρως την τάση. Το πλήρως ανορθωμένο σήμα εξόδου στη συνέχεια συνδέεται στα άκρα των τριών ισοδύναμων πυκνωτών. Όμοια ο μετασχηματιστής υποβιβασμού μειώνει την τάση δικτύου στα  $19 V_{rms}$ . Στη συνέχεια μια δεύτερη γέφυρα ανόρθωσης ανορθώνει την τάση και την παρέχει σε ένα πυκνωτή  $1000 \mu F$  όπου επιτυγχάνεται η εξομάλυνση της τάσης με έξοδο  $19 V_{rms} \times \sqrt{2} = 26,9 V_{DC}$ . Τέλος τα δυο υποσυστήματα DC-DC converter λαμβάνουν τα  $26,9 V_{DC}$  και τα υποβιβάζουν σε  $5 V_{DC}$  και  $9 V_{DC}$ .

Έτσι προκύπτουν τρεις γραμμές εξόδου:  $396 V$ ,  $5 V$  και  $9 V$ . Η γραμμή  $5 V$  τροφοδοτεί τον μικροελεγκτή, τα led, τους τελεστικούς ενισχυτές και τους παλμούς εισόδου στα θυρίστορ. Η γραμμή  $9 V$  τροφοδοτεί τους οδηγούς πύλης των MOSFET.



Σχήμα 5.6 Κυκλωματικό διάγραμμα τροφοδοσίας του EMA.

### 5.2.1 Υποσύστημα υποβιβασμού τάσης

Για την τροφοδοσία όλων των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του EMA απαιτείται ο υποβιβασμός της τάσης εξόδου που προέρχεται από την πλήρη ανόρθωση του μετασχηματιστή. Για τη επιλογή του συστήματος υποβιβασμού τάσης είχαμε να επιλέξουμε ανάμεσα στους σταθεροποιητές τάσης και στους DC-DC buck converter. Αρχικά έγινε χρήση σταθεροποιητών τάσης για κάθε γραμμή. Χρησιμοποιήσαμε έναν LM7805 για την γραμμή που απαιτείται έξοδος 5 V και έναν LM7809 για την γραμμή που απαιτείται έξοδος 9 V. Όμως λόγω των μεγάλων απωλειών σε θερμότητα:

1.  $P_{\text{loss}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{out}}) \times I_{\text{out}} = (26,9 \text{ V} - 5 \text{ V}) \times 0,2 \text{ A} = 4,38 \text{ W}$  για το LM7805
2.  $P_{\text{loss}} = 3,5 \text{ W}$  για το LM7809

Η υπερθέρμανση τους ήταν αναπόφευκτη και απαιτεί τη χρήση ψύξης. Οπότε αποφασίστηκε η χρήση των DC-DC buck converter [28] που έχουν μικρότερες απώλειες και θερμαίνονται ελάχιστα.

Έτσι χρησιμοποιήθηκε το έτοιμο υποσύστημα LM2596 [29] με απόδοση 86%. Η τάση εξόδου του υποσυστήματος καθορίζεται από την εξίσωση 5.6, έτσι μεταβάλλοντας την αντίσταση  $R_2$  του ποτενσιόμετρου μπορεί να κυμανθεί εύκολα μεταξύ 1,23 V και 25 V.

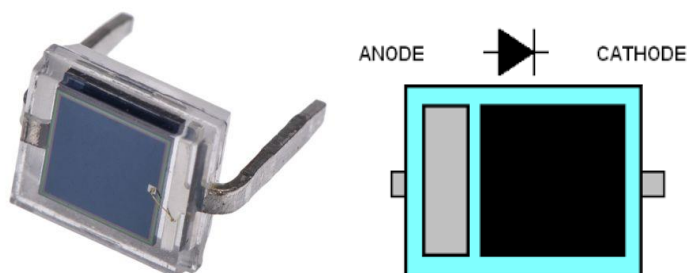
$$V_0 = 1.23 \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (5.6)$$



Σχήμα 5.7. Module LM2596.

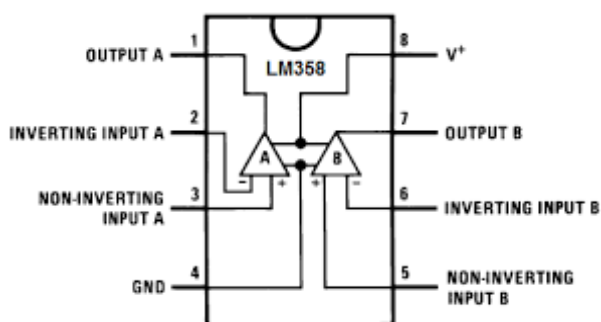
### 5.3 Φωτοδιακόπτης

Ένας φωτοδιακόπτης αποτελείται από ένα αισθητήρα οπτικής ακτινοβολίας, μια πηγή φωτός και ένα ενισχυτή σήματος. Η σχεδίαση του φωτοδιακόπτη έγινε έχοντας ως πρώτη προτεραιότητα η ταχύτητα απόκρισης του να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Έτσι επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τη φωτοдиодο BPW34 [30] με χρόνο απόκρισης 100 ns.



Σχήμα 5.8 Φωτοδιόδος BPW34.

Για την ενίσχυση του σήματος της φωτοδιόδου επιλέξαμε τον τελεστικό ενισχυτή LM358P. Το ολοκληρωμένο chip που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει δύο βαθμίδες ενίσχυσης από τις οποίες χρησιμοποιήσαμε μόνο τη μια, καθώς ήταν αρκετή για την ενίσχυση του σήματος της φωτοδιόδου.

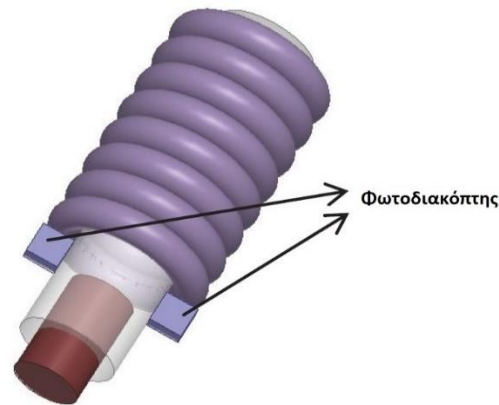


Σχήμα 5.9 Οι ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή LM358P[31].

Τέλος ως πηγή φωτός χρησιμοποιήθηκε ένα κόκκινο Led όπου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει (610 nm) είναι ανιχνεύσιμο από τη φωτοδίοδο.

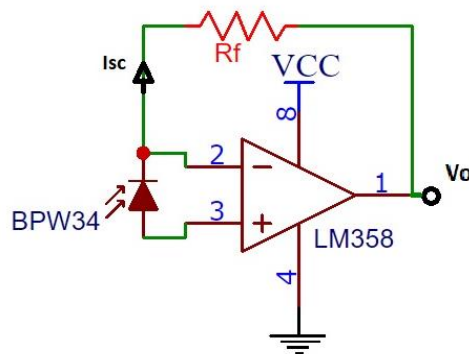
Ουσιαστικά ο φωτοδιακόπτης που χρησιμοποιήσαμε είναι τύπου (through-scan)[32], ανιχνεύει την διέλευση του βλήματος καθώς τη στιγμή που αυτό διέρχεται μέσω αυτού και αποκόπτει τη φωτεινή ακτινοβολία μεταξύ της πηγής Led και της φωτοδίοδου.

Στον EMA η χρήση του φωτοδιακόπτη έγινε στο σύστημα ενεργοποίησης των σταδίων 2 και 3, όσο και στο σύστημα μέτρησης της ταχύτητας του βλήματος.



Σχήμα 5.10 Απεικόνιση θέσης φωτοδιακόπτη σε σχέση με το σωληνοειδές του EMA.

Λόγω του τελεστικού ενισχυτή η φωτοδίοδος λειτουργεί με μηδενική τάση στα άκρα της, οπότε διαρρέεται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ), το οποίο είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος της οπτικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη δίοδο. Ο τελεστικός ενισχυτής ουσιαστικά ενισχύει το σήμα (ρεύμα) της φωτοδίοδου και το μετατρέπει σε τάση (current to voltage amplifier).



Σχήμα 5.11 Κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή και φωτοδίοδου.

Η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή δίνεται από την σχέση:

$$V_{out} = -I_{sc}R_f \quad (5.7)$$

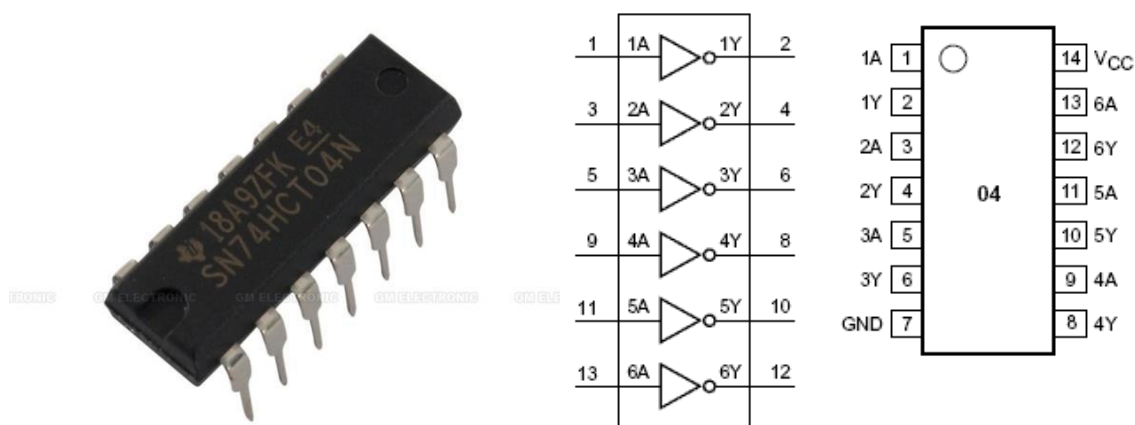
Ουσιαστικά ο φωτοδιακόπτης σχεδιάστηκε βασιζόμενος στο ότι η τάση εξόδου θέλουμε να έχει δύο καταστάσεις:

1. Να είναι λογικό 1 δηλαδή  $2V \leq V_{out} \leq 5V$  όταν ανιχνεύσει το βλήμα.
2. Να είναι λογικό 0 δηλαδή  $V \leq V_{out} \leq 0.8V$  όταν δεν το έχει ανιχνεύσει.

Όμως συμβαίνει το αντίθετο και οφείλεται στο ρεύμα βραχυκύκλωσης της φωτοδιόδου που μεγιστοποιείται όταν προσπίπτει επάνω της η ακτινοβολία του led. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η αντιστροφή του σήματος εξόδου του τελεστικού ενισχυτή.

## 5.4 Αντιστροφέας

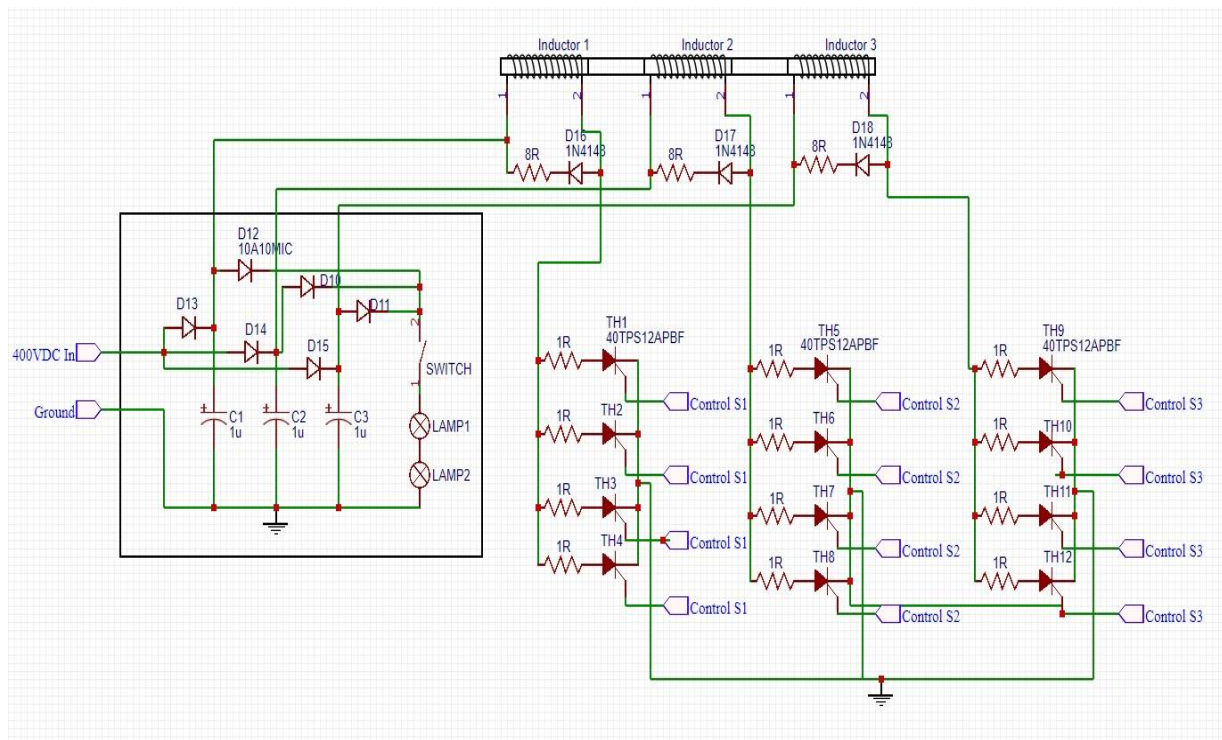
Τα σήματα που παράγει ο τελεστικός ενισχυτής οδηγούνται πρώτα στον αντιστροφέα, όπου αντιστρέφονται. Η αντιστροφή απαιτείται επειδή η έξοδος του φωτοδιακόπτη είναι συνεχώς λογικό 1 δηλαδή 5V, που οφείλεται στο ότι η φωτοδιόδοι δέχονται συνεχώς φωτεινή ακτινοβολία από τα led. Έτσι με τη χρήση του αντιστροφέα παράγονται παλμοί λογικού 1 μόνο όταν αποκοπεί η ακτινοβολία από το βλήμα και το σήμα αυτό στέλνεται στιγμιαία στον εκάστοτε οδηγό πύλης. Ο αντιστροφέας είναι ο 74HCT04, αποτελείται από 6 CMOS πύλες NOT και η τροφοδοσία του είναι 5V.



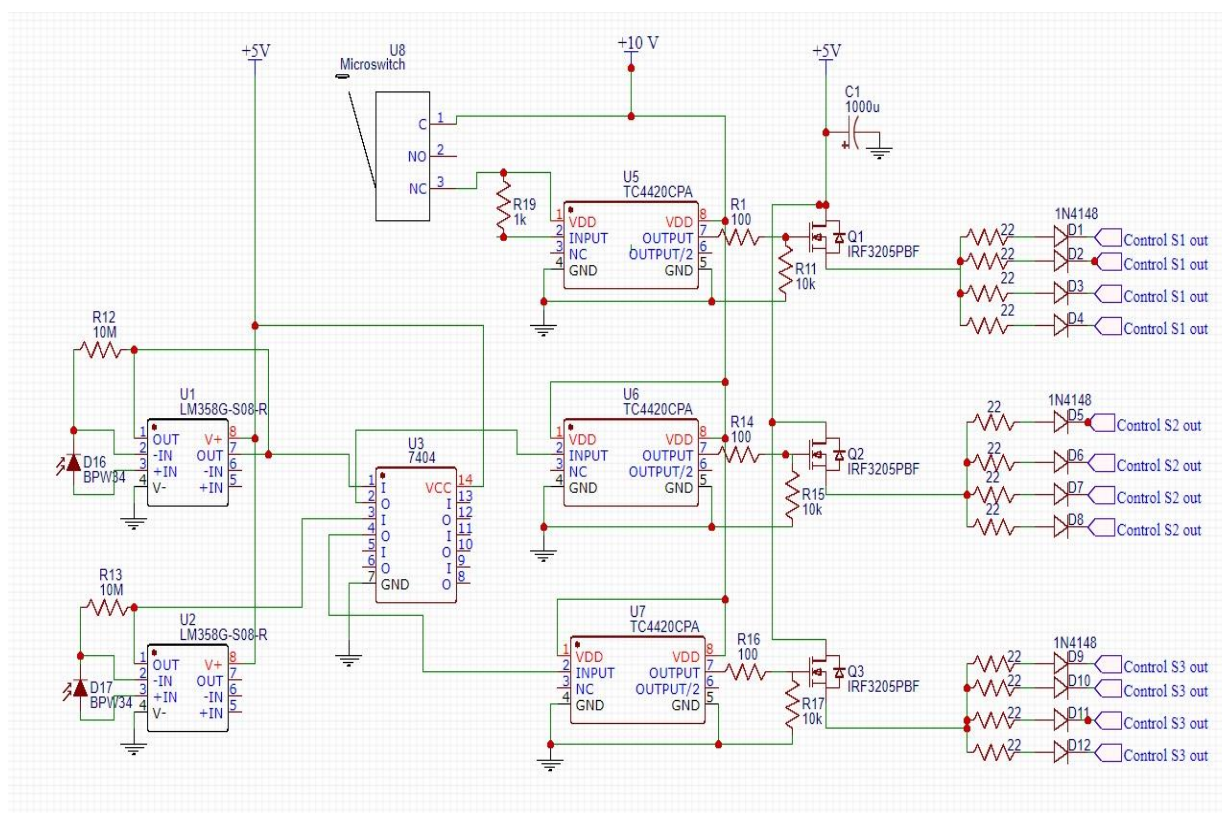
Σχήμα 5.12 Αντιστροφέας 74HCT04.



## 5.5 Κυκλωματικά διαγράμματα RLC κυκλώματος και πλακέτας ελέγχου



Σχήμα 5.13 Κυκλωματικό διάγραμμα συνδέσεων πηνίων, πυκνωτών και θυρίστωρ.



Σχήμα 5.14 Κυκλωματικό διάγραμμα πλακέτας ελέγχου θυρίστωρ.

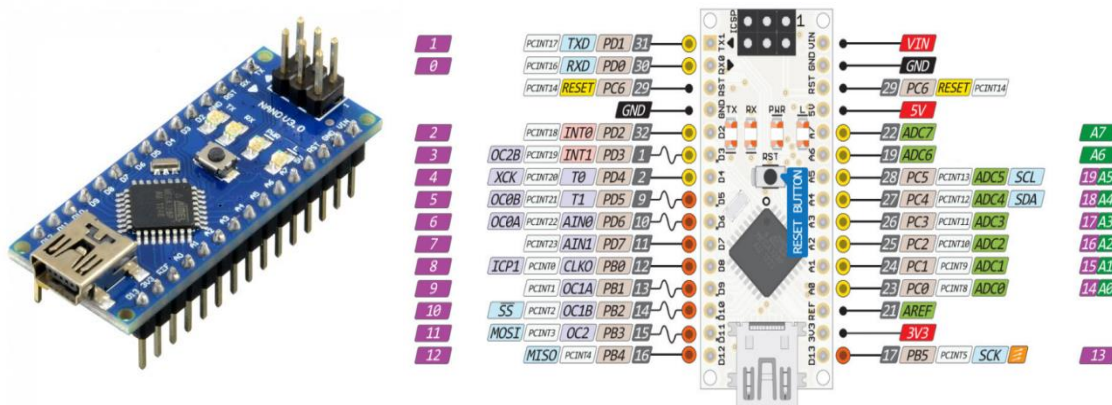


## 5.6 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι το ArduinoNano, με τον μικροεπεξεργαστή ATmega328p ο οποίος κατασκευάζεται από την Atmel. Είναι ένας απλός, χαμηλής ισχύος, χαμηλού κόστους μικροελεγκτής που ικανοποιεί όλες τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Διαθέτει 23 ακροδέκτες εισόδου / εξόδου οι οποίοι επαρκούν σε αριθμό για τις γραμμές επικοινωνίας που απαιτούνται από κάθε μία από τις περιφερειακές συσκευές του συστήματος. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής είναι ίδιος με το Arduino Uno, το οποίο ήταν η αναπτυξιακή πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς για την ανάπτυξη και τη δοκιμή του συστήματος. Στο τελικό σύστημα όμως χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής Nano λόγω των μικρότερων διαστάσεών του. Οι λειτουργίες οι οποίες εκτελεί είναι οι εξής:

- πυροδότηση του συστήματος
- έναυση-διακοπή φόρτισης πυκνωτών
- υπολογισμός της ταχύτητας του βλήματος
- απεικόνιση της ταχύτητας σε οθόνη

Ο μικροελεγκτής διαθέτει μνήμη flash 32 Kbytes που επιτρέπει τον προγραμματισμό και τον επαναπρογραμματισμό του. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης του είναι η συμβατότητά του με το περιβάλλον προγραμματισμού Arduino. Αυτή η ολοκληρωμένη πλατφόρμα ανάπτυξης επιτρέπει τη γραφή, τη δοκιμή και την αποσφαλμάτωση του κώδικα. Το Arduino Software (IDE) υποστηρίζει τη γλώσσα C ++ που χρησιμοποιήθηκε ως γλώσσα προγραμματισμού. Ο προγραμματισμός περιλάμβανε διάφορες λειτουργίες που σχεδιάστηκαν για την εκτέλεση της συγκεκριμένης εργασίας. Στον πυρήνα του μικροελεγκτή ο προγραμματισμός είναι η κύρια λειτουργία. Αυτή η λειτουργία λειτουργεί ως άπειρος βρόχος κατά την εκκίνηση μέχρι να σβήσει ο μικροελεγκτής. Πρόσθετες λειτουργίες καλούνται και χρησιμοποιούνται για εργασίες όπως η φόρτιση των πυκνωτών, η πυροδότηση του πηνίου και η μέτρηση της ταχύτητας των βλημάτων.



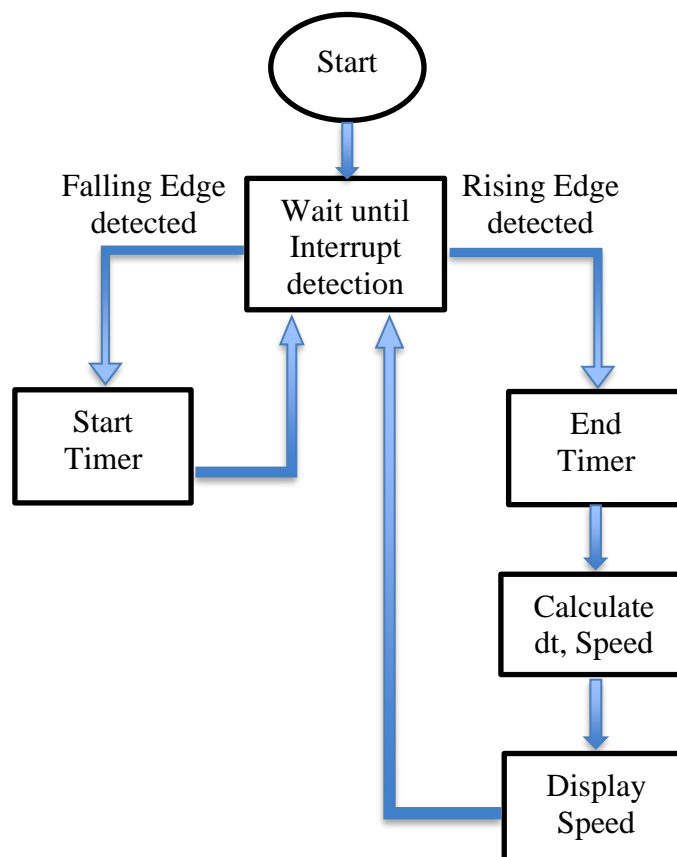
Σχήμα 5.15 Arduino ATmega328 Nano.

## 5.7 Σύστημα μέτρησης ταχύτητας βλήματος

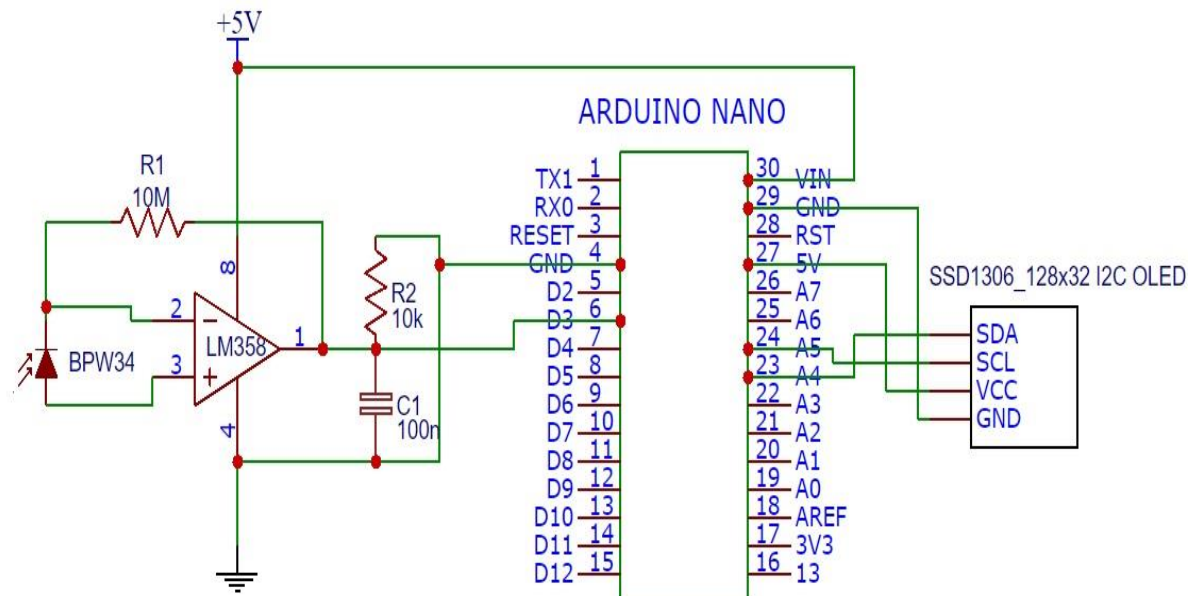
Η βασική ιδέα πάνω στην οποία βασίστηκε το σύστημα μέτρησης ταχύτητας του βλήματος, είναι ότι γνωρίζοντας το μήκος του και το χρονικό διάστημα διέλευσης του από ένα σημείο, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα φωτοδιακόπτη, ένα μικροελεγκτή, μία οθόνη και ένα τελεστικό ενισχυτή. Ο φωτοδιακόπτης ανιχνεύει την διέλευση του βλήματος καθώς τη στιγμή που αυτός διέρχεται μέσω αυτού αποκόπτει τη φωτεινή ακτινοβολία της πηγής (led) για χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . Στη συνέχεια το σήμα της φωτοδιόδου ενισχύεται μέσω ενός τελεστικού ενισχυτή ρεύματος σε τάση, πριν αυτό σταλεί στον μικροελεγκτή ο οποίος εν συνεχεία υπολογίζει τη χρονική διάρκεια του παλμού (λογικό 0) και την προβάλλει στην οθόνη.

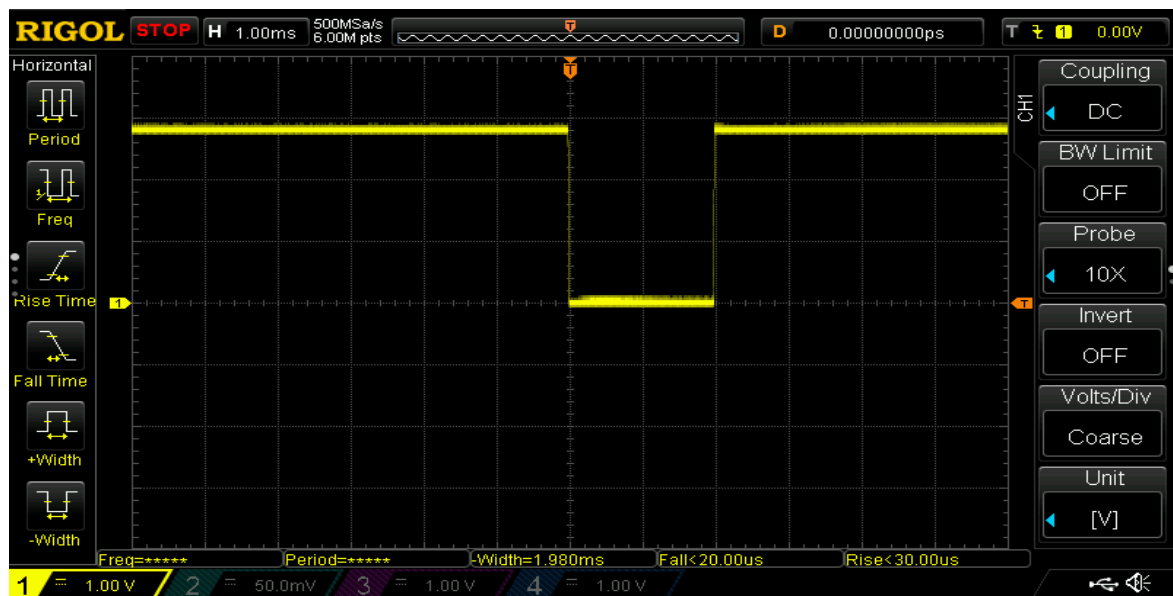
Το χρονικό διάστημα μεταξύ του 'Falling Edge' και του 'Rising Edge' του παλμού εισόδου στο Arduino Pin D2 είναι το χρονικό διάστημα διέλευσης του βλήματος μέσω του φωτοδιακόπτη. Για τον ταχύτερο υπολογισμό της χρονικής διάρκειας του συγκεκριμένου παλμού έγινε χρήση της δυνατότητας interrupt του μικροελεγκτή. Έτσι έχουμε άμεση απόκριση στην αναγνώριση των ακμών του σήματος εισόδου και στη μέτρηση της διάρκειας του παλμού. Τέλος η οδήγηση της οθόνης έγινε μέσω της χρήσης έτοιμων βιβλιοθηκών για την ταχύτερη ολοκλήρωση του συστήματος.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου που εκτελεί ο μικροελεγκτής του συστήματος μέτρησης ταχύτητας βλήματος.



Σχήμα 5.17 Κυκλωματικό διάγραμμα Συστήματος Μέτρησης Ταχύτητας Βλήματος.



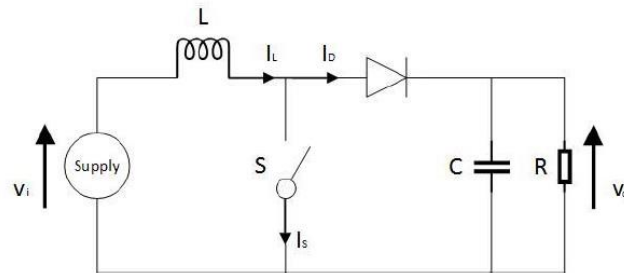
Σχήμα 5.18. Παλμός εξόδου τελεστικού ενισχυτή φωτοδιακόπτη κατά την αναγνώριση του βλήματος.

Η απόκλιση στη μέτρηση της διάρκειας παλμού από παραπάνω συστήματος μέτρησης ταχύτητας σε σχέση με τον παλμογράφο είναι κατά μέσο όρο  $\pm 8 \mu s$ . Συνεπώς οι μετρήσεις της ταχύτητας που έγιναν με το σύστημα αυτό προσεγγίζουν στο 99,01% τις μετρήσεις με χρήση παλμογράφου.

## 5.8 Μετατροπéας ανύψωσης τάσης

Στην προσπάθεια να μετατρέψουμε το όλο σύστημα σε μια φορητή συσκευή που τροφοδοτείται από μπαταρίες, το μόνο πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι η ανύψωση της τάσης της μπαταρίας στην απαιτούμενη τάση για τη φόρτιση των πυκνωτών. Το ότι η μπαταρίες παρέχουν DC τάση και οι πυκνωτές απαιτούν DC τάση για τη φόρτισή τους, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι απαιτείται μετατροπéας ανύψωσης συνεχούς τάσης σε συνεχή (Step up DC-DC converter) [28].

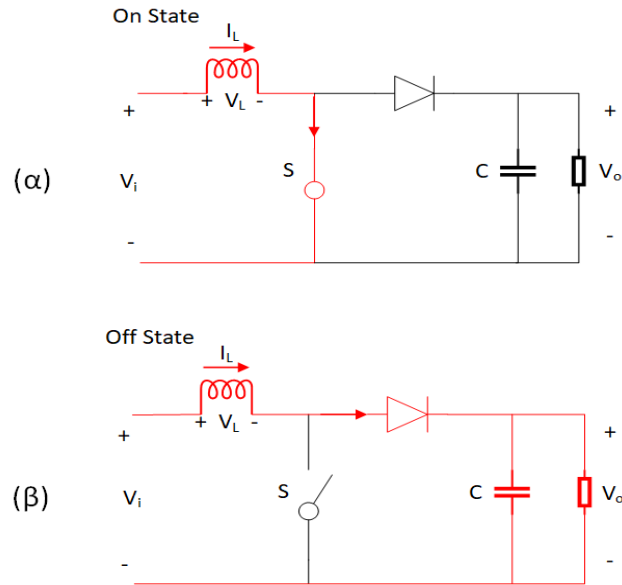
### 5.8.1 Βασικές αρχές λειτουργίας Step up DC/DC Converter



Σχήμα 5.19 Απλοποιημένο κύκλωμα boost converter.

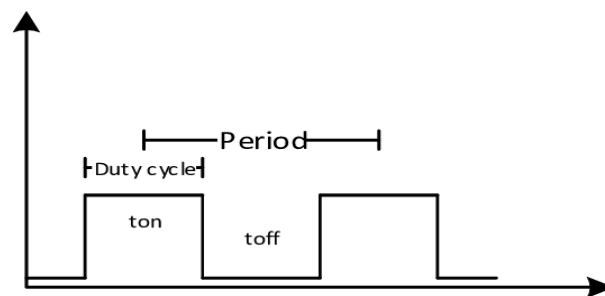
Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα ρέει μέσω του πηνίου και το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια σε μορφή μαγνητικού πεδίου το οποίο δημιουργείται γύρω του. Η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει, έτσι η έξοδος είναι απομονωμένη από την είσοδο. Όταν ανοίξει ο διακόπτης, η τάση αλλάζει πολικότητα. Μόλις η τάση του πηνίου γίνει ίση με  $V_i - V_o$ , η διόδος πολώνεται ορθά και η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή και το πηνίο στο φορτίο R.

Όταν ο διακόπτης ανοίξει, Σχήμα 5.20 (β), η ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το πηνίο προστίθεται σε αυτήν της πηγής και διοχετεύεται μέσω της διόδου D στο φορτίο. Συνεπώς, όταν ανοίξει ο διακόπτης το πηνίο γίνεται πηγή τάσης ίδιας πολικότητας με την πηγή εισόδου, οπότε η συνολική τάση εξόδου (στο φορτίο) προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν της εισόδου (πηγής). Όταν ο διακόπτης κλείσει, Σχήμα 5.20 (α), τότε το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια, ενώ ο πυκνωτής θα παρέχει την τάση και την ενέργεια στο φορτίο. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου, η ανάστροφα πολωμένη διόδος εμποδίζει τον πυκνωτή να αποφορτιστεί προς τον διακόπτη.



Σχήμα 5.20 Συμπεριφορά μετατροπέα DC/DC τύπου Boost όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (α), και όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός (β).

Γενικά, στους μετατροπείς DC/DC, η μέση τάση εξόδου ελέγχεται ώστε να πάρει την επιθυμητή τιμή. Ο έλεγχος αυτός γίνεται ελέγχοντας τον χρόνο που ένας διακόπτης είναι κλειστός ( $t_{on}$ ) και ανοικτός ( $t_{off}$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20.



Σχήμα 5.21 Απεικόνιση Duty cycle μέσω ελέγχου ON/OFF.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου  $V_o$ , εξαρτάται από τα  $t_{on}$  και  $t_{off}$ . Μία μέθοδος ελέγχου της τάσης εξόδου είναι η μεταγωγή του διακόπτη (switching) με σταθερή συχνότητα ( $f_s = 1/T_s$ ) αλλάζοντας τη διάρκεια που ο διακόπτης είναι ανοικτός ( $t_{on}$ ) έτσι ώστε το  $T_s$  να είναι σταθερό  $T_s = t_{on} + t_{off}$ . Αυτή η μέθοδος λέγεται Pulse Width Modulation (PWM) και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Μια άλλη μέθοδος είναι να αλλάζει η συχνότητα (άρα και η περίοδος) μεταγωγής (switching) και η διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t_{on}$  (Frequency Modulation).

Η αναλογία του χρόνου που είναι ανοικτός ο διακόπτης σε σχέση με την περίοδο του παλμού, λέγεται σχετική διάρκεια αγωγής ( $D$ ):

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} 100\% \quad (5.8)$$

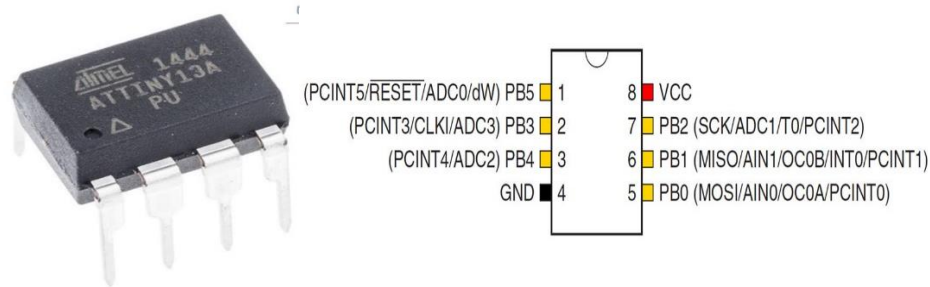
Οι μετατροπείς DC/DC έχουν δύο διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας:

1. **Ασυνεχής αγωγή ρεύματος:** Όταν ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης λειτουργεί σε συνεχή λειτουργία, το ρεύμα του πηνίου ( $I_L$ ) δεν πέφτει ποτέ στο μηδέν.

2. **Συνεχής αγωγή ρεύματος:** Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα του πηνίου πέφτει στο μηδέν κατά τη διάρκεια ενός τμήματος της περιόδου μεταγωγής. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν το φορτίο του μετατροπέα είναι μικρό.

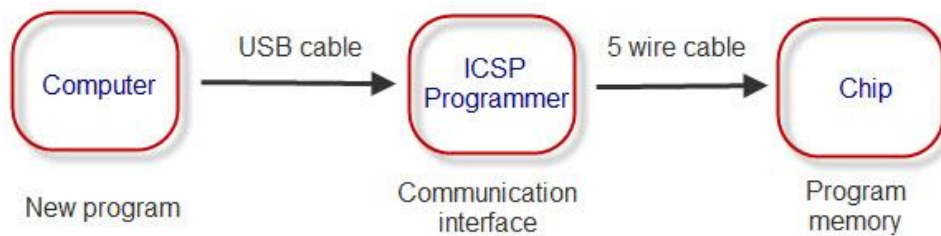
### 5.8.2 Ο μετατροπέας που υλοποιήθηκε

Ο μετατροπέας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με στόχο την αύξηση της τάσης από μια μπαταρίας μολύβδου-οξέος 12 V, στα 360 V για τη φόρτιση των πυκνωτών. Για τον έλεγχο του εύρους του παλμού (PWM) έγινε η χρήση του ATTINY13a PU[33] το οποίο είναι ένας μικροελεγκτής AVR 8-bit.



Σχήμα 5.22 Ο μικροελεγκτής ATTINY13a PU

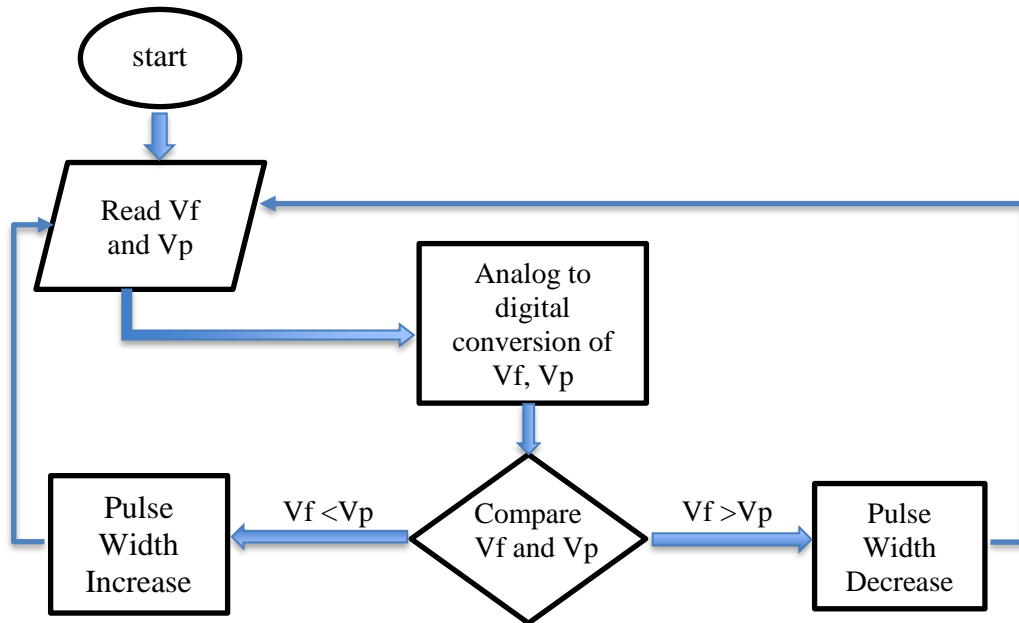
Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έγινε μέσω του Arduino ISP.



Σχήμα 5.23 Διαδικασία προγραμματισμού μικροελεγκτή ATTINY13a.

Ο αλγόριθμος που εκτελεί ο μικροελεγκτής ελέγχει αν η τάση ανατροφοδότησης είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση που καθορίζεται από τον χρήστη μέσω του ποτενσιόμετρου, διαμορφώνει κατάλληλα το εύρος του παλμού ώστε να επιτευχθεί η συγκεκριμένη στάθμη τάσης. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που εκτελεί ο μικροελεγκτής δίνεται στο Σχήμα 5.24.





Σχήμα 5.24 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που εκτελεί ο μικροελεγκτής του step-up converter για τον έλεγχο στάθμης της τάσης εξόδου.

Επιπλέον κατά την κατασκευή του boost converter έγινε η χρήση τοροειδούς πηνίου. Στα τοροειδή πηνία η μαγνητική ροή είναι κλειστή, συνεπώς δεν επάγονται ρεύματα στα υπόλοιπα ηλεκτρονικά κυκλώματα που βρίσκονται κοντά στο πηνίο. Έτσι αποφεύγουμε τυχόν παρασιτικά φαινόμενα τα οποία θα επηρέαζαν την ορθή λειτουργία των κοντινών κυκλωμάτων.

Το διακοπτικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα IGBT [34]. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το IRGP4066D [35] ικανό να αντέξει έως 600 V στα άκρα του. Η ψύξη του στοιχείου ήταν απαραίτητη αφού  $V_{CE(ON)} = 1,7 \text{ V}$  και  $I_C = 2,7 \text{ A}$  έχουμε ότι η εκλυόμενη θερμότητα είναι 4,6 Watt.

Η μέτρηση της απόδοσης έγινε γνωρίζοντας την τάση (12 V) και το ρεύμα (2,1 A) στην είσοδο του μετατροπέα, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια εισόδου που είναι:

$$12 \text{ V} \times 2,1 \text{ A} = 25,2 \text{ W}_{\text{input}}$$

Επίσης γνωρίζουμε ότι οι πυκνωτές που φορτίζονται από τον μετατροπέα μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια ίση με 584 J στα 360 V. Έτσι μετρώντας τη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την φόρτιση των πυκνωτών από τα 0 V στα 360 V και είναι 50 sec, γνωρίζουμε την ενέργεια που παρέχει στην εξόδου του ο μετατροπέας:

$$584 \text{ J} / 50 \text{ sec} = 11,68 \text{ W}_{\text{output}}$$

Η απόδοση του συστήματος υπολογίστηκε ότι είναι:

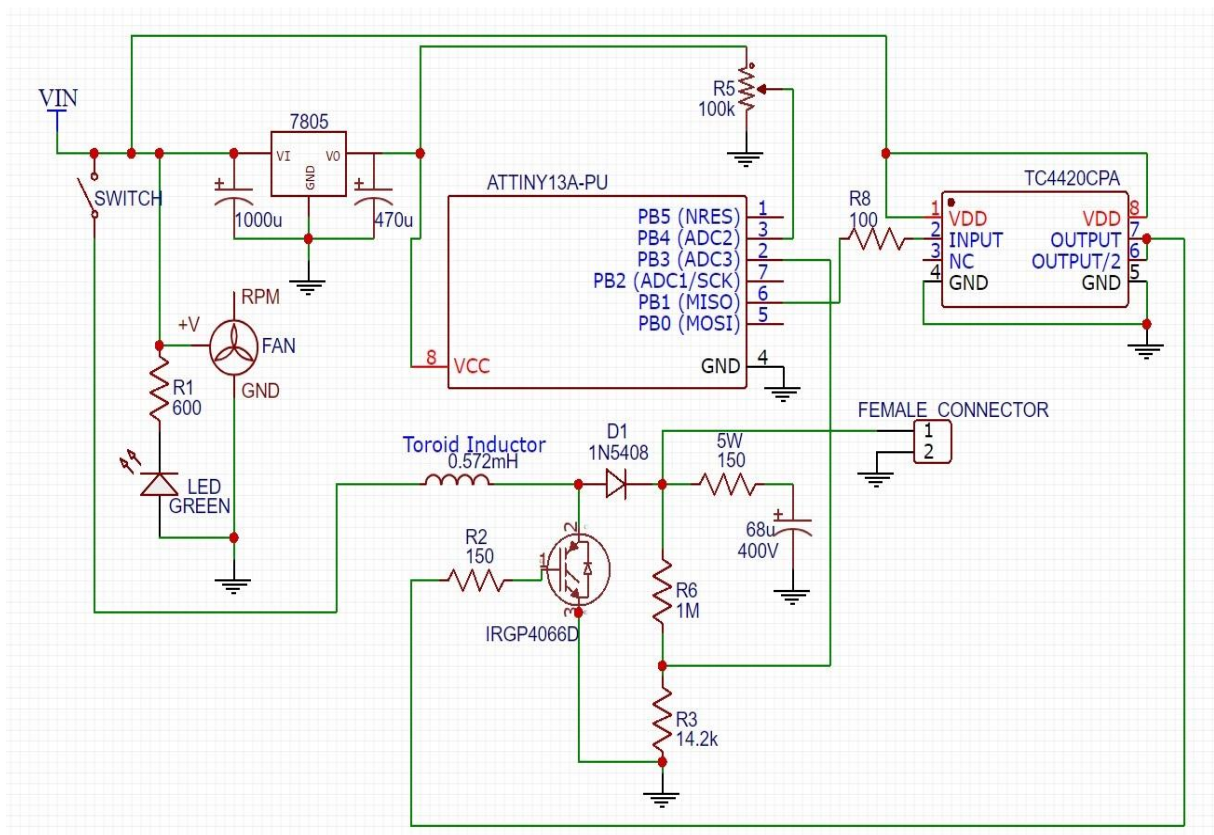
$$11,68 \text{ W}_{\text{output}} / 25,2 \text{ W}_{\text{input}} \approx 46\%$$

η οποία για την συγκεκριμένη τοπολογία είναι αρκετά ικανοποιητική αφού η συχνότητα είναι χαμηλή, στα 2500 hz και η τάση εξόδου είναι 26 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την τάση εισόδου.

Οι απώλειες ισχύος οφείλονται σε:

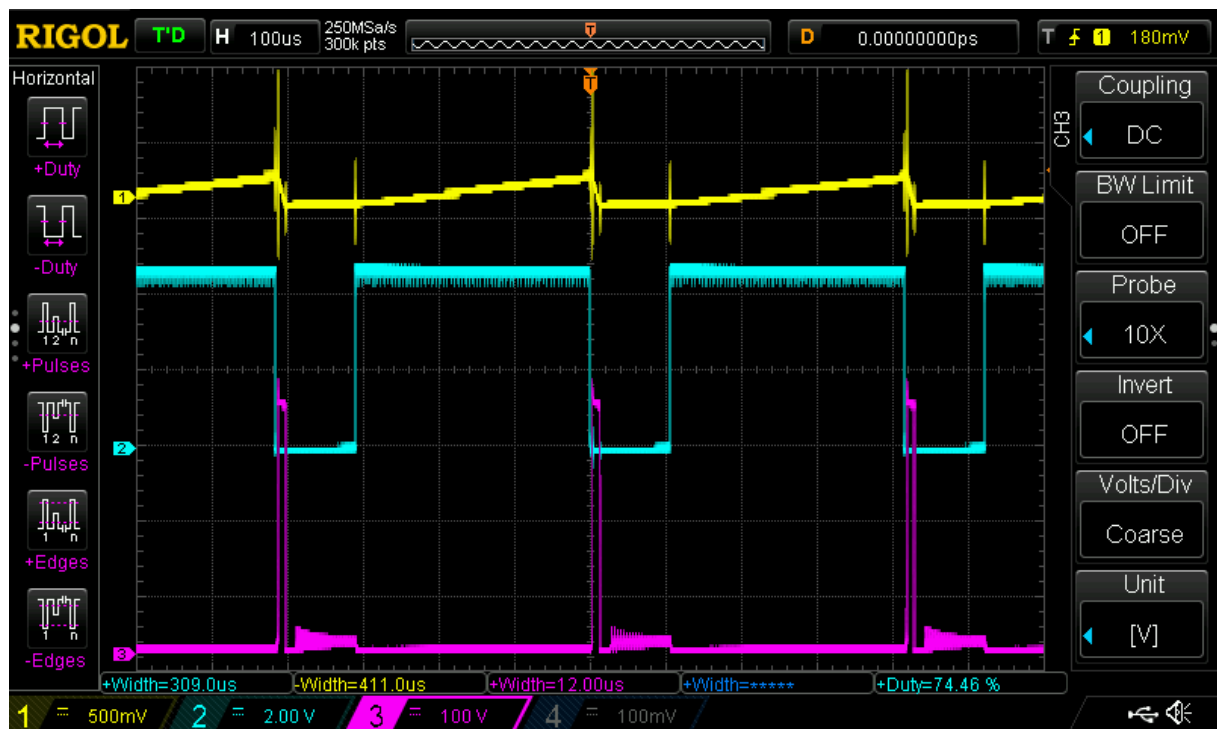
- απώλειες αγωγιμότητας του IGBT και της διόδου
- απώλειες μετάβασης του IGBT και της διόδου
- αντίσταση του πηνίου

Ο οδηγός πύλης tc4420 χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση του σήματος εξόδου του μικροελεγκτή. Χωρίς τη χρήση του οδηγού πύλης ήταν αδύνατη η οδήγηση του IGBT αφού το ρεύμα και η τάση εξόδου του μικροελεγκτή ήταν σε χαμηλότερα επίπεδα από τα απαιτούμενα. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μία διόδος γρήγορης ανάκτησης (fast-recovery diode) για την μείωση των απωλειών και την αύξηση της απόδοσης του μετατροπέα.



Σχήμα 5.25 Κυκλωματικό διάγραμμα Boost Converter.

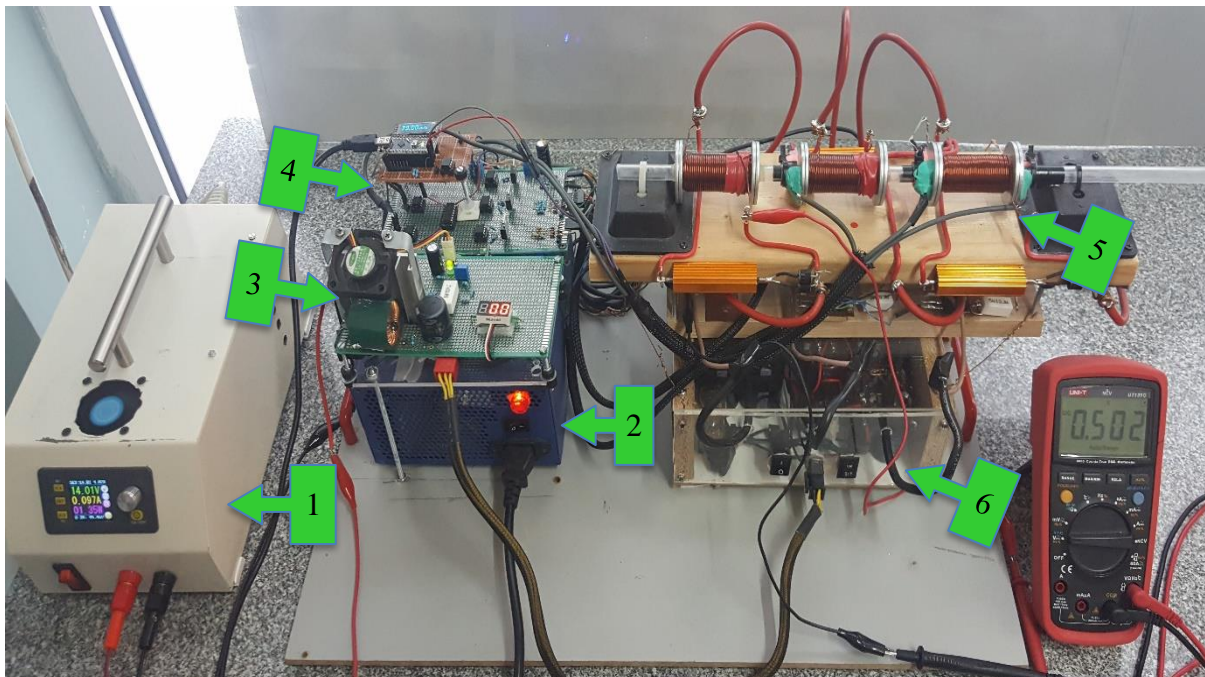




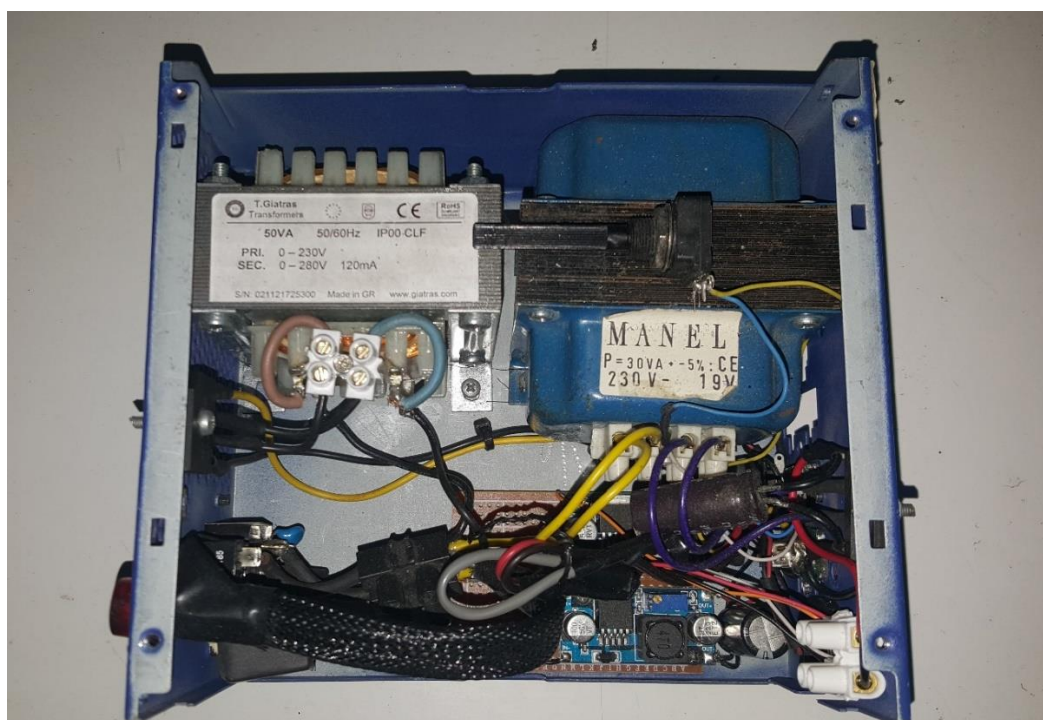
Σχήμα 5.26 Ρεύμα πηνίου (κίτρινος παλμός), παλμός οδήγησης IGBT (γαλάζιος παλμός), τάση στο συλλέκτη του IGBT (μωβ παλμός).

Παρατηρείται ότι η παρασιτική χωρητικότητα του IGBT και της διόδου σε συνδυασμό με τον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή και το πηνίο δημιουργούν ένα μη επιθυμητό κύκλωμα συντονισμού RLC. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού δημιουργείται η συγκεκριμένη φθίνουσα ταλάντωση η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.26 στον μωβ παλμό.

## 5.9 Απεικόνιση της συσκευής

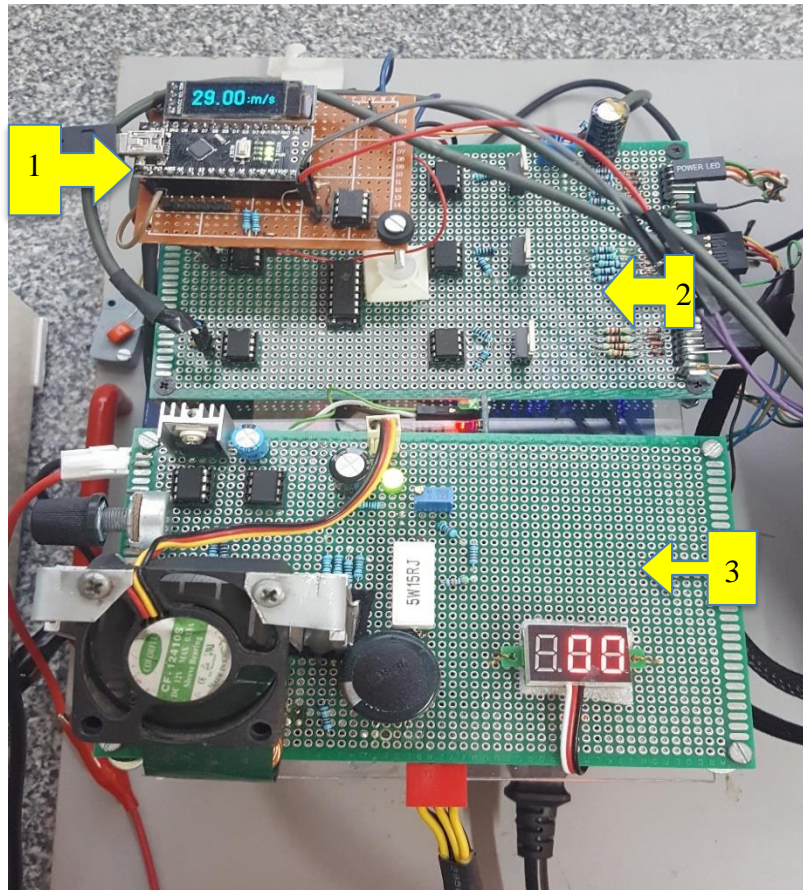


Σχήμα 5.27 Συνολική απεικόνιση συσκευής EMA. (1): τροφοδοτικό πάγκου για την τροφοδοσία του μετατροπέα, (2): τροφοδοτικό υποσυστημάτων EMA, (3): μετατροπέας boost converter, (4): πλακέτα ελέγχου και σύστημα μέτρησις ταχύτητας βλήματος, (5): σωληνοειδή πηνία EMA, (6): τράπεζα πυκνωτών.

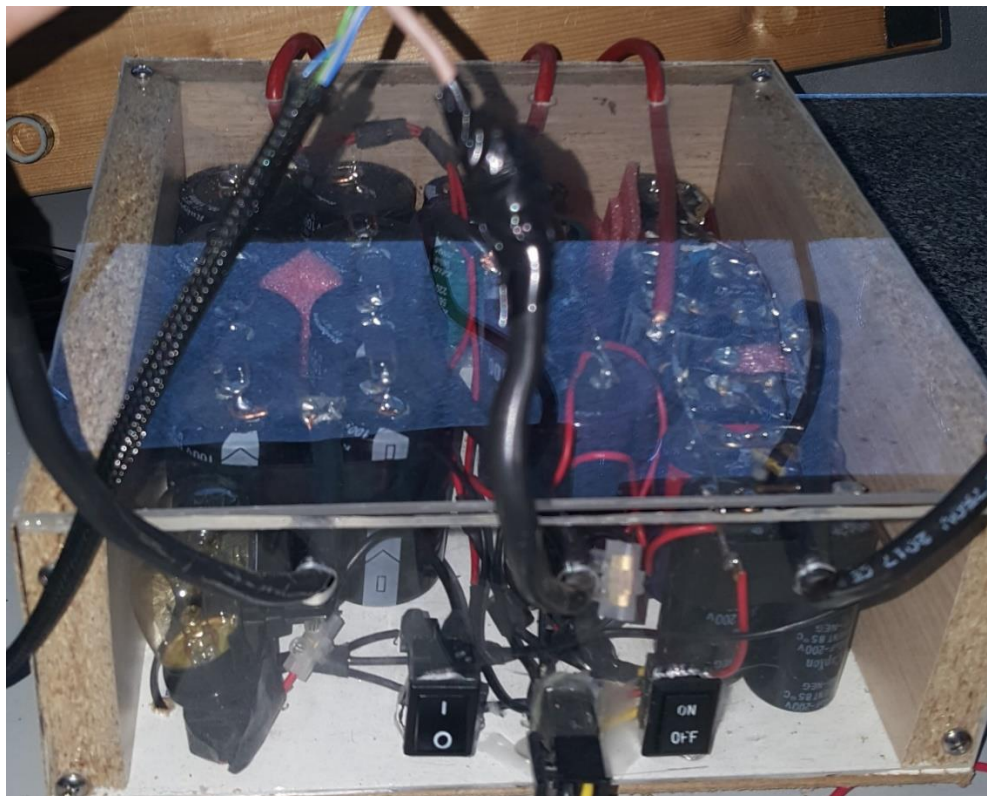


Σχήμα 5.28 Τροφοδοτικό EMA.

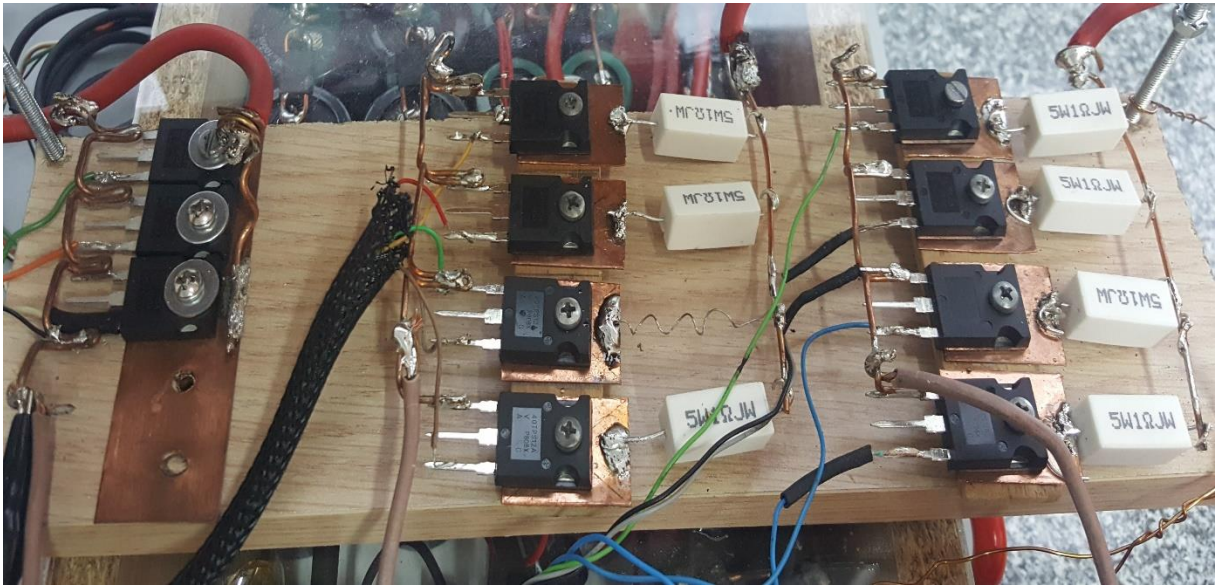




Σχήμα 5.29 (1): Σύστημα μέτρησης ταχύτητας βλήματος, (2): πλακέτα ελέγχου, (3): boost Converter.



Σχήμα 5.30 Πυκνωτές.



Σχήμα 5.31 Θυρίστορ.



Σχήμα 5.32 Σιδηρομαγνητικά βλήματα. (1):  $L=0,06$ , (2):  $L=0,05$ , (3):  $L=0,04$ , (4):  $L=0,03$ .



## 6. Πειραματικές μετρήσεις Επιταχυντή Μαγνητικής Αντίδρασης

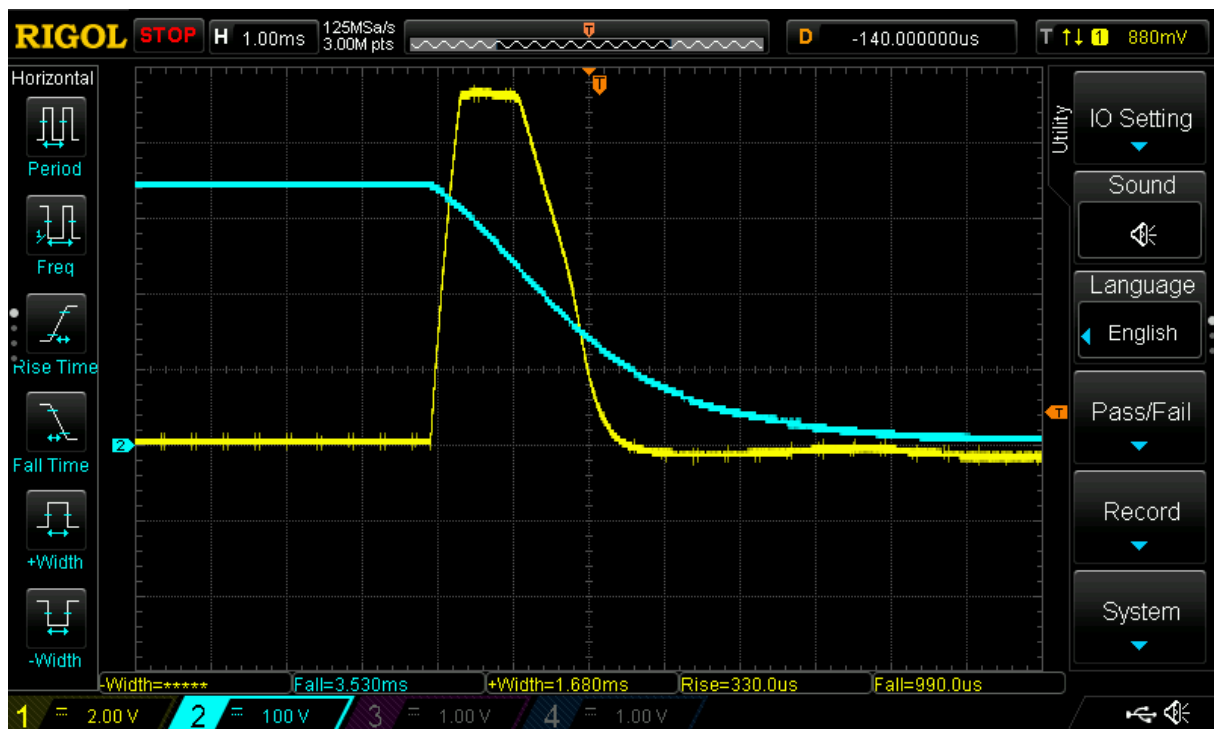
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και οι μετρήσεις που εξήχθησαν από το σύστημα που αναπτύχθηκε.

### 6.1 Απόκριση κυκλώματος RLC

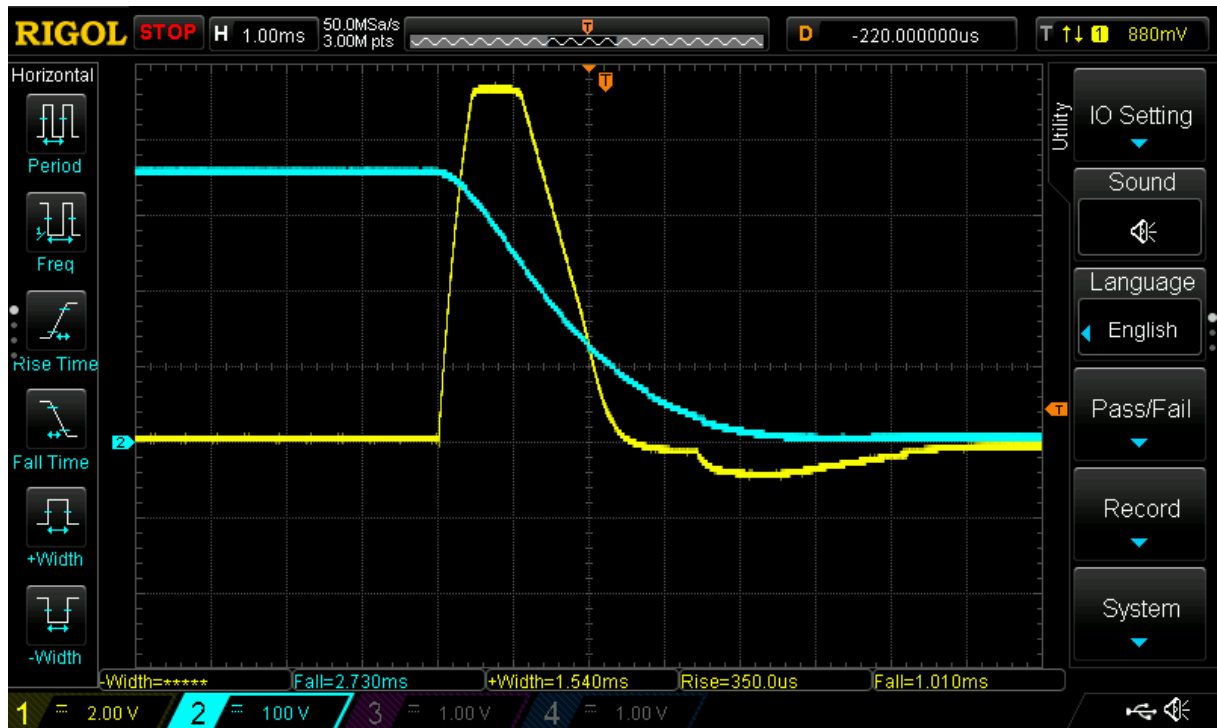
Παρακάτω δίνονται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης σε κάθε stage του EMA.

- Κίτρινος Παλμός: απεικονίζεται η κυματομορφή του ρεύματος.
- Μπλε Παλμός: η κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πυκνωτή.

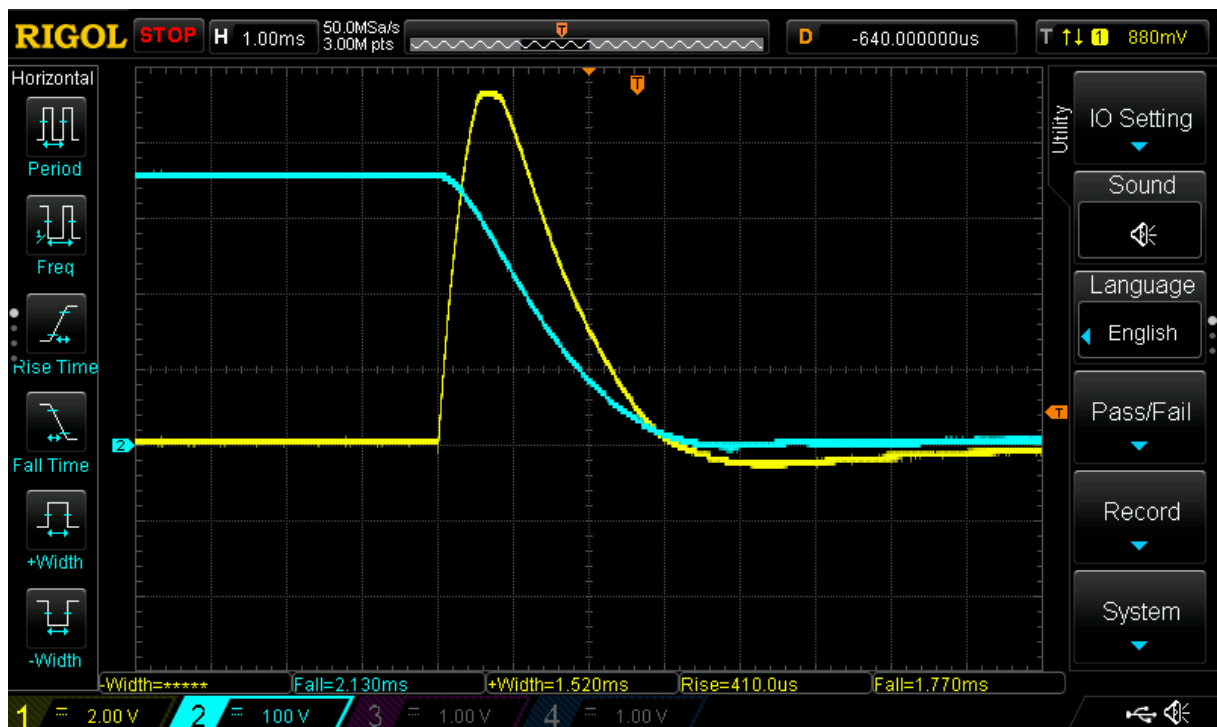
Οι μετρήσεις του ρεύματος έγιναν με αμπερομετρική τσιμπίδα (30 A/1 V).



Σχήμα 6.1 Κυματομορφές ρεύματος και τάσης 1<sup>ο</sup> σταδίου. Κλίμακες: 1 ms /div, (κίτρινος παλμός): 60 A/div, (γαλάζιος παλμός): 100 V/div.



Σχήμα 6.2 Κυματομορφές ρεύματος και τάσης 2<sup>ο</sup> σταδίου. Κλίμακες: 1 ms /div, (κίτρινος παλμός): 60 A/div, (γαλάζιος παλμός): 100 V/div.



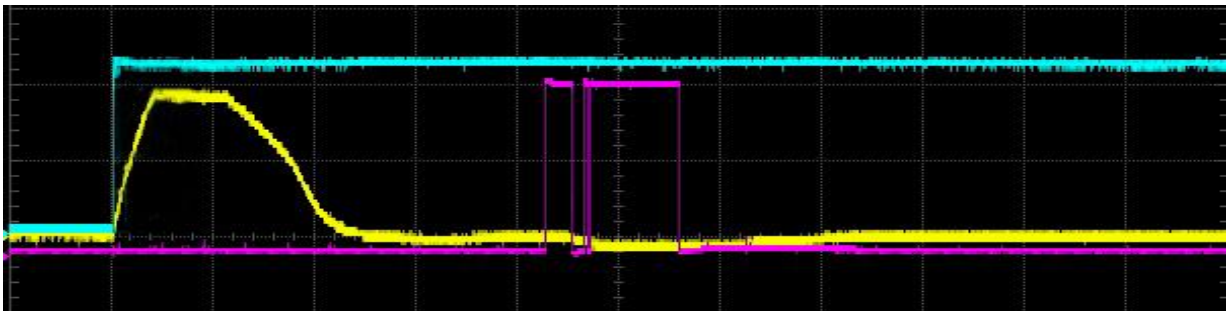
Σχήμα 6.3 Κυματομορφές ρεύματος και τάσης 3<sup>ο</sup> σταδίου. Κλίμακες: 1 ms /div, (κίτρινος παλμός): 60 A/div, (γαλάζιος παλμός): 100 V/div.

## 6.2 Δράση μαγνητικού πεδίου και θέση βλήματος εντός σωληνοειδούς

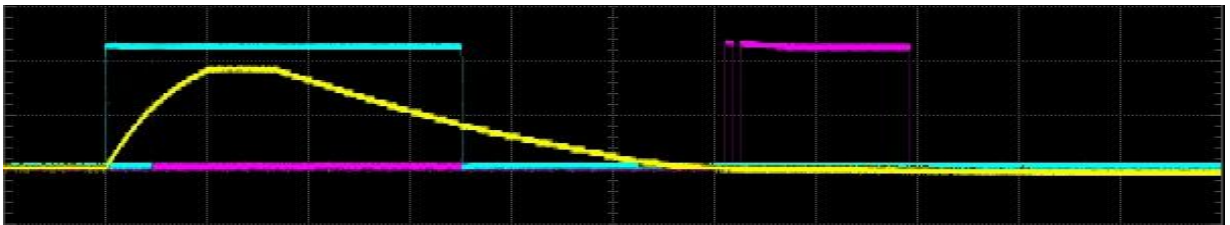
Οι παρακάτω μετρήσεις έγιναν με σκοπό τον έλεγχο του φαινομένου suck back για τα τρία στάδια. Ουσιαστικά πρόκειται για το στάδιο ελέγχου σωστής λειτουργίας της συσκευής. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να γνωρίζουμε τις εξής πληροφορίες:

1. Την χρονική στιγμή εισόδου του βλήματος στο σωληνοειδές (γαλάζιος παλμός).
2. Την χρονική στιγμή εξόδου του βλήματος από το σωληνοειδές (μωβ παλμός).
3. Την διάρκεια του παλμού ρεύματος στο πηνίο, που έμμεσα δηλώνει τη διάρκεια που έδρασε η ελκτική δύναμη στο βλήμα (κίτρινος παλμός).

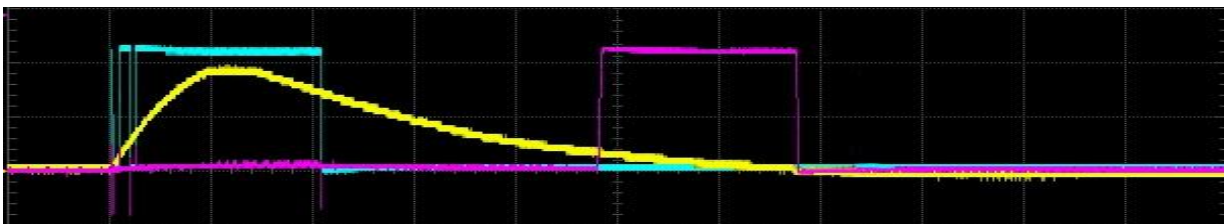
Για να αποκτήσουμε τις παραπάνω πληροφορίες τοποθετήθηκαν φωτοδιακόπτες στην είσοδο και στην έξοδο του κάθε πηνίου. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις λήφθηκαν με αρχική τάση φόρτισης των πυκνωτών στα 360 V και με την λειτουργία και των τριών Stages το ένα μετά το άλλο.



Σχήμα 6.4 Stage 1, time division 1 ms/div.



Σχήμα 6.5 Stage 2, time division 0,5 ms/div.

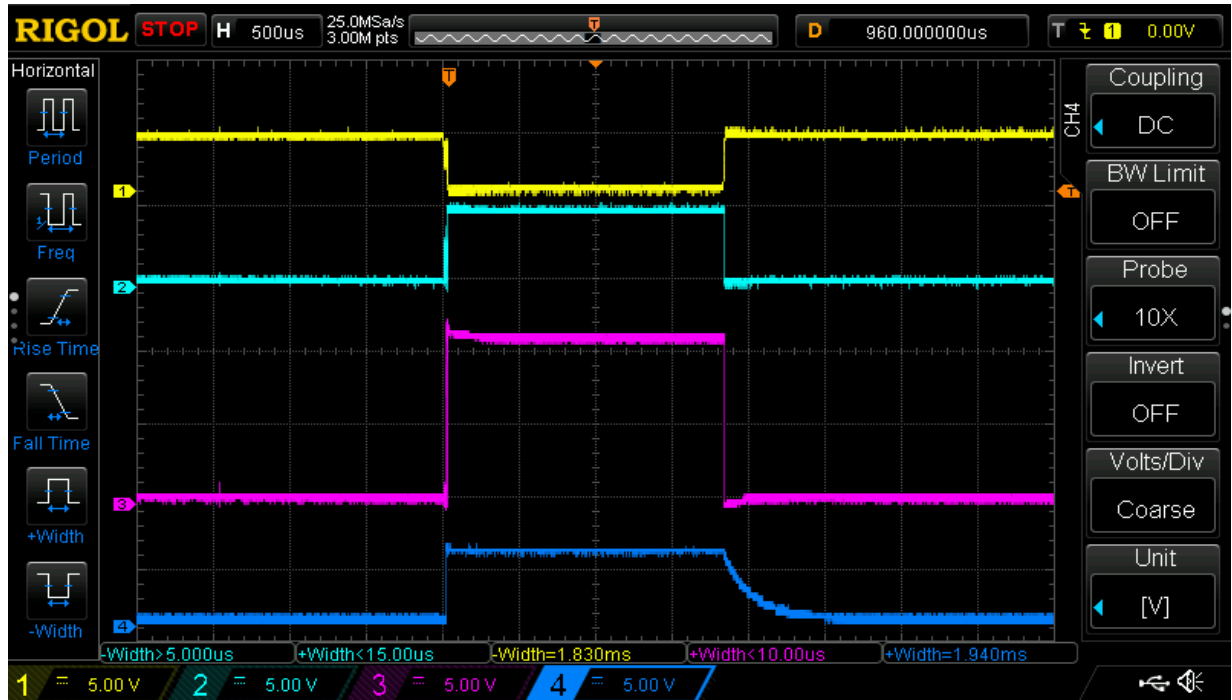


Σχήμα 6.6 Stage 3, time division 0,5 ms/div.

Από τα σχήματα 6.4 και 6.5 παρατηρούμε ότι η ελκτική δύναμη στα stage 1 και stage 2 προσέφερε μόνο επιτάχυνση στο βλήμα, ενώ στο Σχήμα 6.6 stage 3 παρατηρούμε μια μικρή επιβράδυνση στο βλήμα αφού ο παλμός ρεύματος δεν έχει μηδενιστεί τη στιγμή που το βλήμα εξέρχεται από το πηνίο του stage 3. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συσκευή λειτουργεί σωστά και δεν απαιτείται κάποια αλλαγή. Αν πάραυτα είναι επιθυμητή προτείνεται η ελάττωση της χωρητικότητας του πυκνωτή ή η μείωση της αντίστασης του πηνίου του 3<sup>ου</sup> σταδίου. 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 θυρίστωρ.

### 6.3 Παλμοί πλακέτας ελέγχου



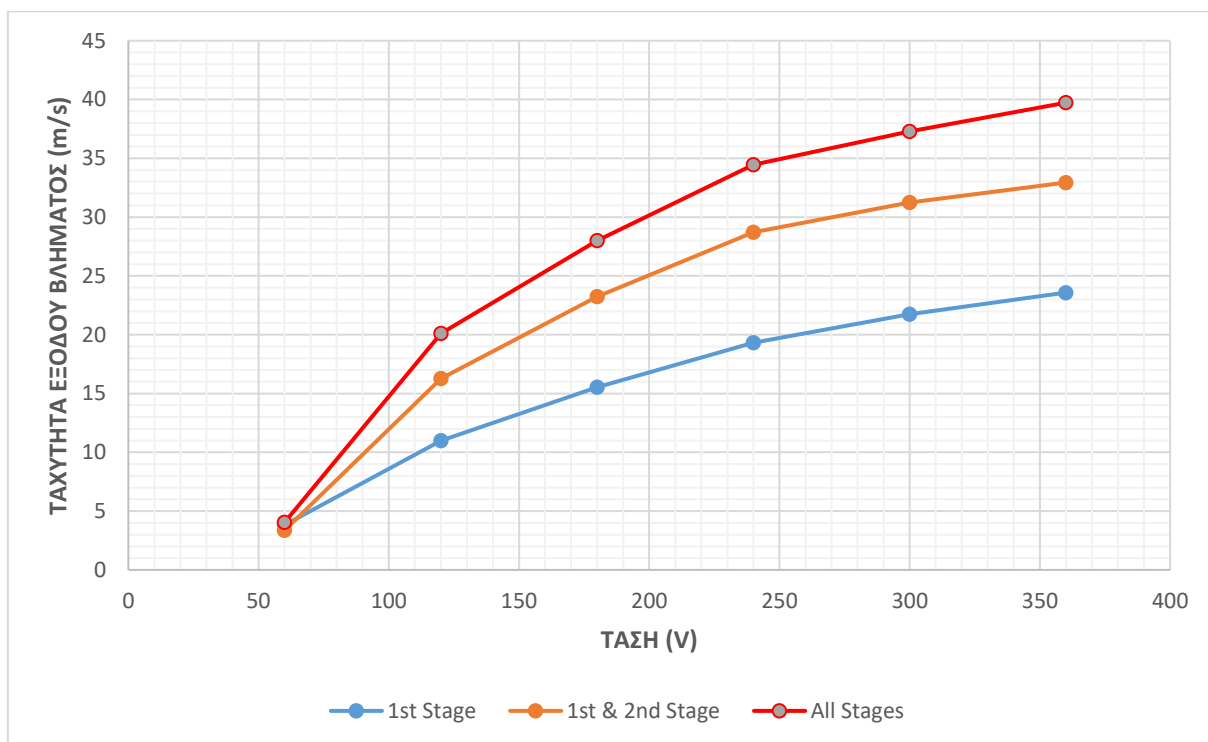
Σχήμα 6.7 Παλμοί πλακέτας ελέγχου τη χρονική στιγμή που το βλήμα διέρχεται του φωτοδιακόπτη.

Στο Σχήμα 6.7 φαίνονται τα τέσσερα στάδια της πλακέτας ελέγχου όπου το σήμα δημιουργείται, αντιστρέφεται και ενισχύεται. Αναλυτικά οι παλμοί:

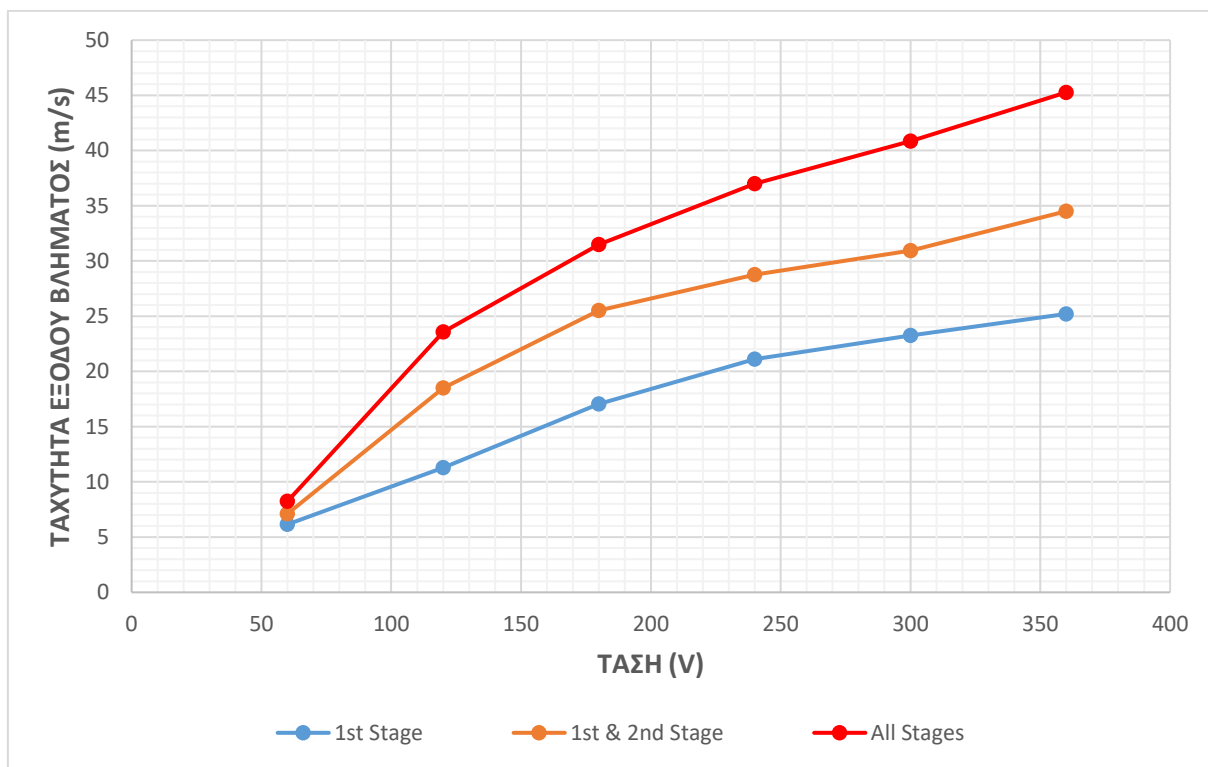
- Κίτρινος παλμός: Είναι ο παλμός που προέρχεται από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή όταν γίνει ανίχνευση του βλήματος.
- Γαλάζιος παλμός: Είναι ο παλμός εξόδου του αντιστροφέα όπου αντιστρέφεται το σήμα του τελεστικού ενισχυτή.
- Μωβ παλμός: Είναι ο ενισχυμένος παλμός τον οποίο λαμβάνουμε στην έξοδο του MOSFET driver και πηγαίνει στην πύλη του MOSFET για την οδήγησή του στην πλευρά υψηλής ισχύος.
- Μπλε παλμός: Είναι ο παλμός που ενεργοποιεί τα θυρίστωρ.



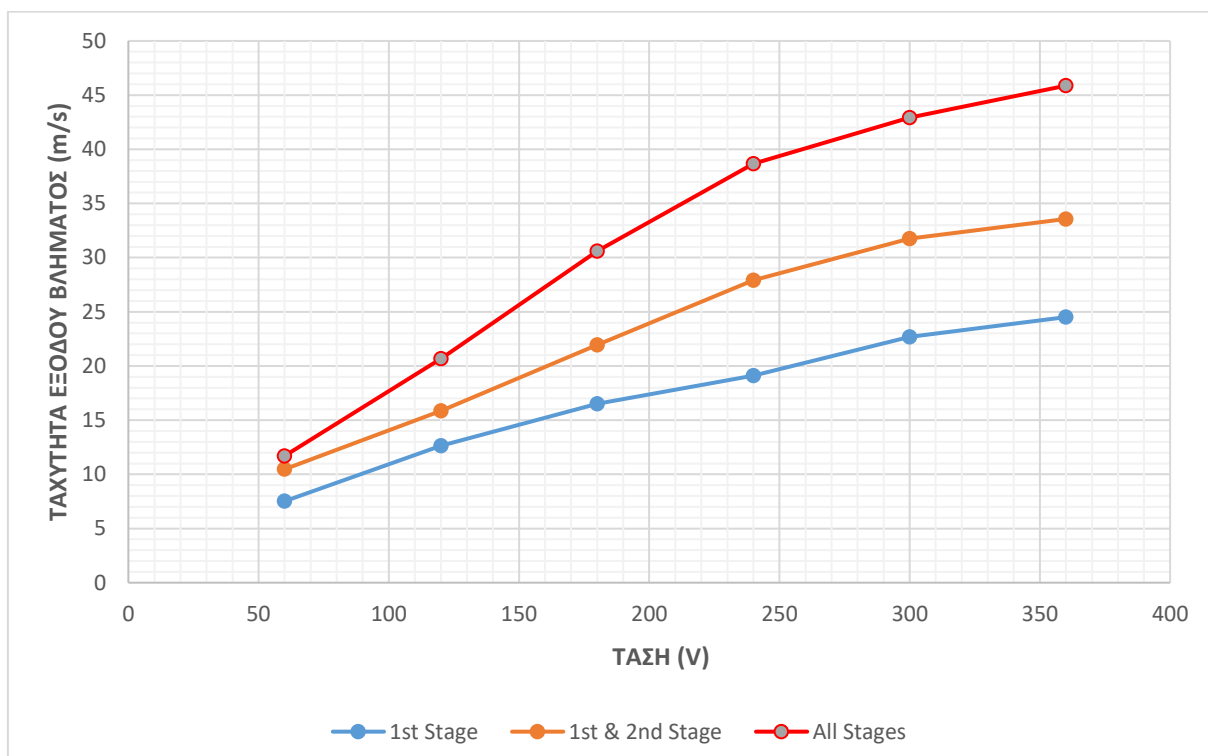
## 6.4 Μετρήσεις ταχύτητας ΕΜΑ



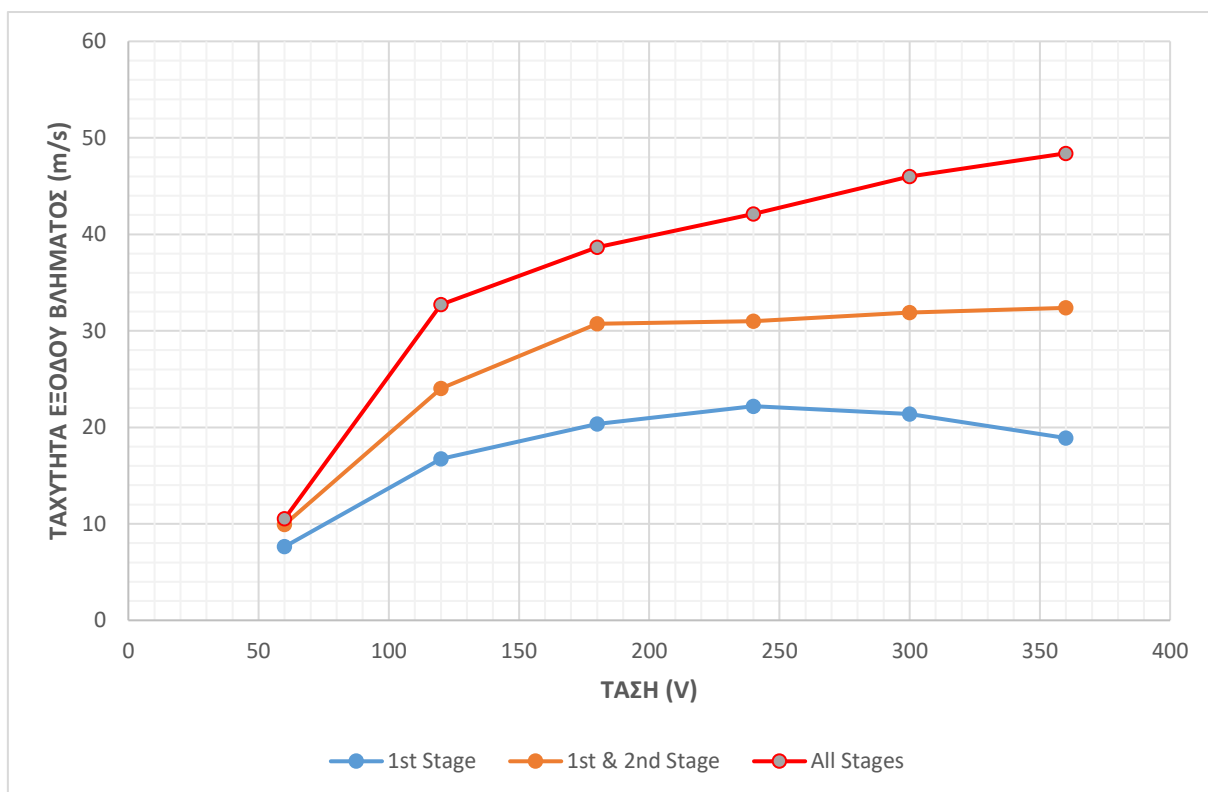
Σχήμα 6.8 Ταχύτητα εξόδου βλήματος ( $L=0.06m$ ) για τις διάφορες τάσεις με τη χρήση ενός, δύο και τριών σταδίων του Επιταχυντή.



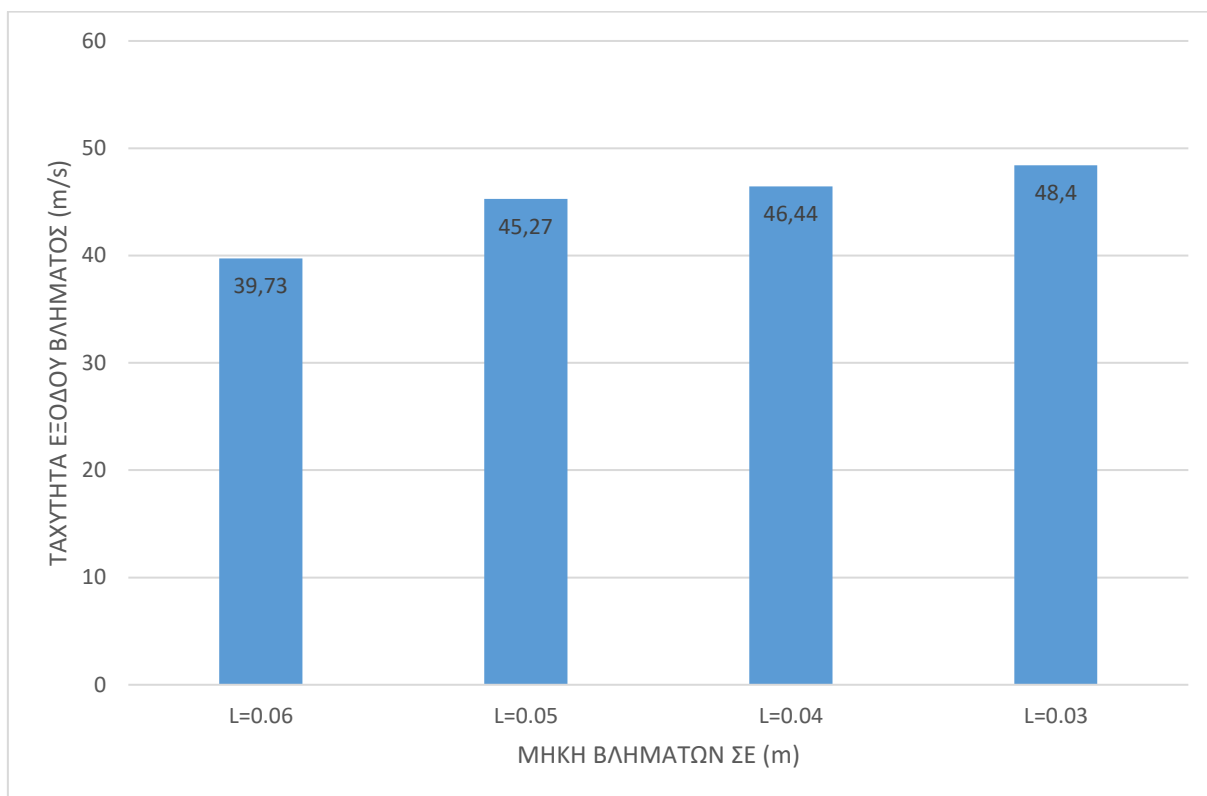
Σχήμα 6.9 Ταχύτητα εξόδου βλήματος ( $L=0.05m$ ) για τις διάφορες τάσεις με τη χρήση ενός, δύο και τριών σταδίων του επιταχυντή.



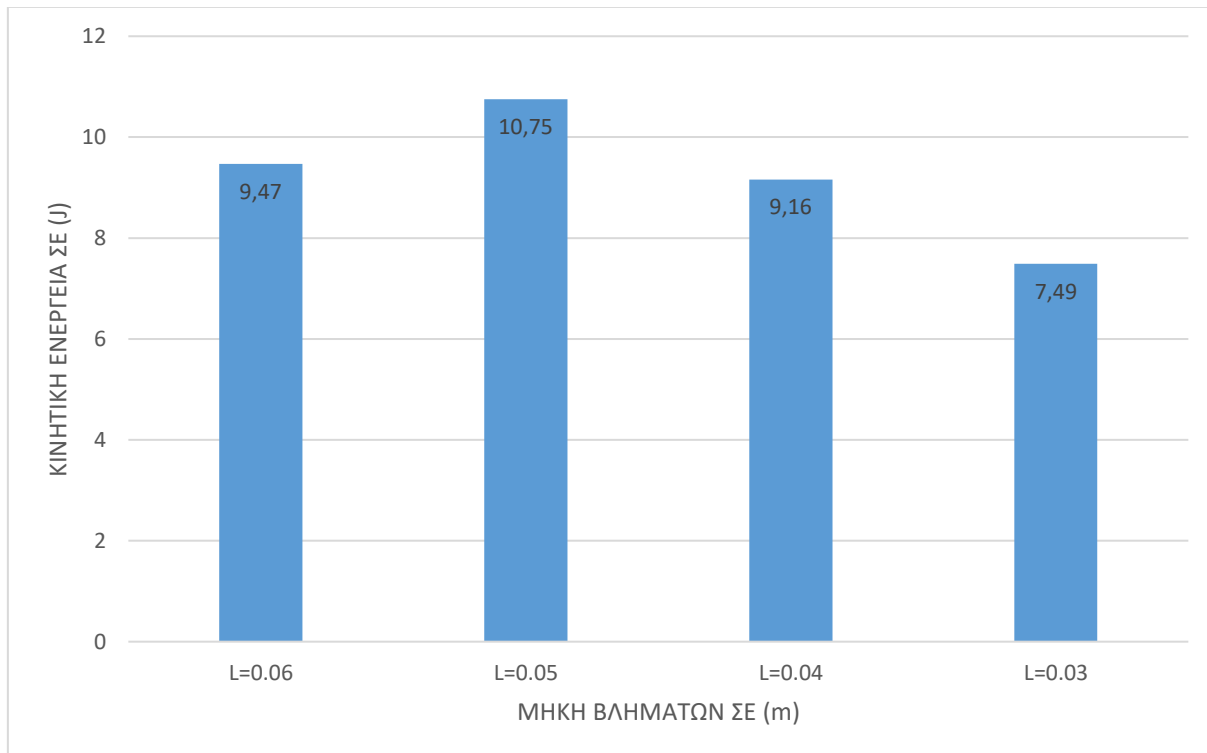
Σχήμα 6.10 Ταχύτητα εξόδου βλήματος ( $L=0.04m$ ) για τις διάφορες τάσεις με τη χρήση ενός, δύο και τριών σταδίων του Επιταχυντή.



Σχήμα 6.11 Ταχύτητα εξόδου βλήματος ( $L=0.03m$ ) για τις διάφορες τάσεις με τη χρήση ενός, δύο και τριών σταδίων του Επιταχυντή.



Σχήμα 6.12 Απεικόνιση ταχυτήτων εξόδου ανά βλήμα σε τάση 360 V.



Σχήμα 6.13 Απεικόνιση κινητικής ενέργειας ανά βλήμα σε τάση 360 V.

Από τα παραπάνω σχήματα 6.8 έως και 6.13 παρατηρείται αρχικά η επίδραση στην ταχύτητα από το κάθε επιπλέον στάδιο που χρησιμοποιήθηκε καθώς και από την αύξηση της τάσης.

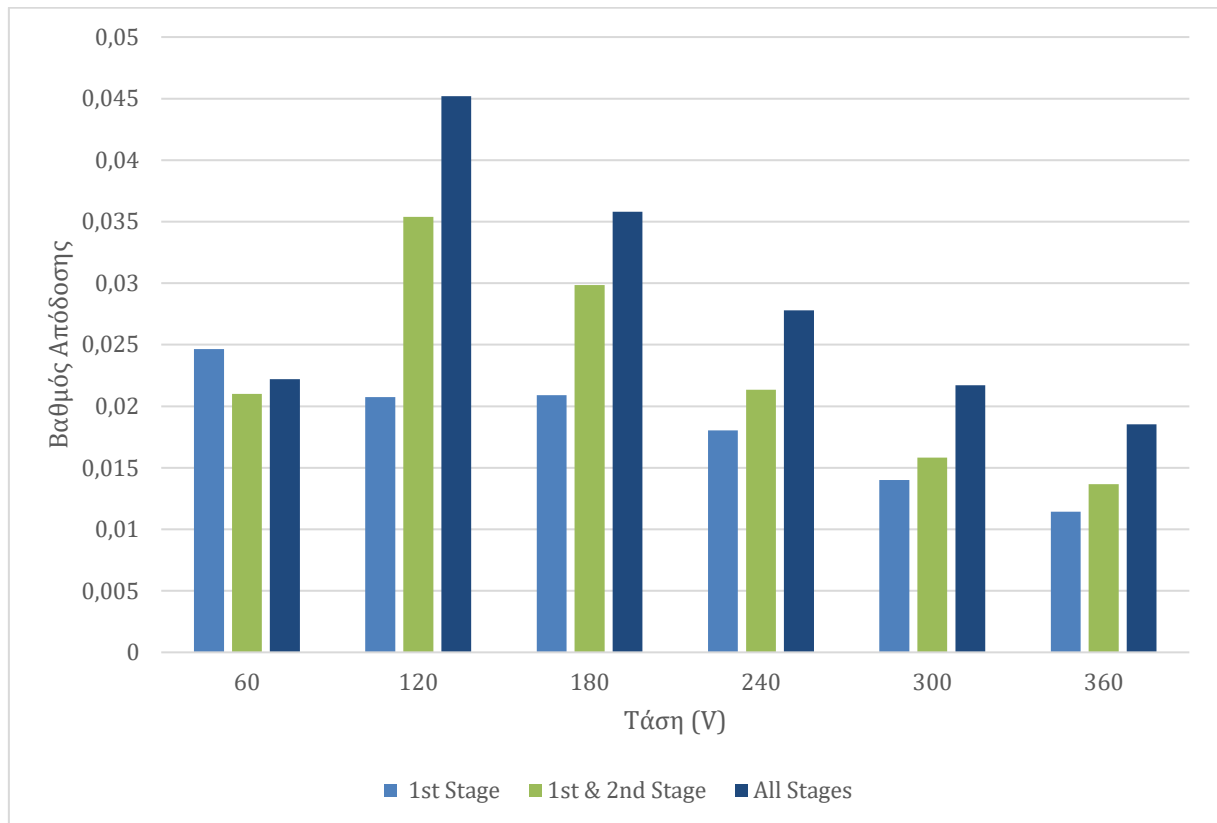
Τέλος γνωρίζοντας τη διάρκεια του παλμού ρεύματος ( $t=0,0024$  s) και τη μέγιστη ταχύτητα βλήματος (25 m/s με  $L=0,05$  m), η μέγιστη επιτάχυνση που επιτεύχθηκε από τον Επιταχυντή είναι  $10416 \text{ m/s}^2$ .

## 6.5 Μετρήσεις απόδοσης EMA

Η απόδοση του EMA δίνεται από την εξίσωση [13]:

$$n = \frac{K.E.}{U} = \frac{mu_{exit}^2}{C(V_{before}^2 - V_{after}^2)} \quad (6.1)$$

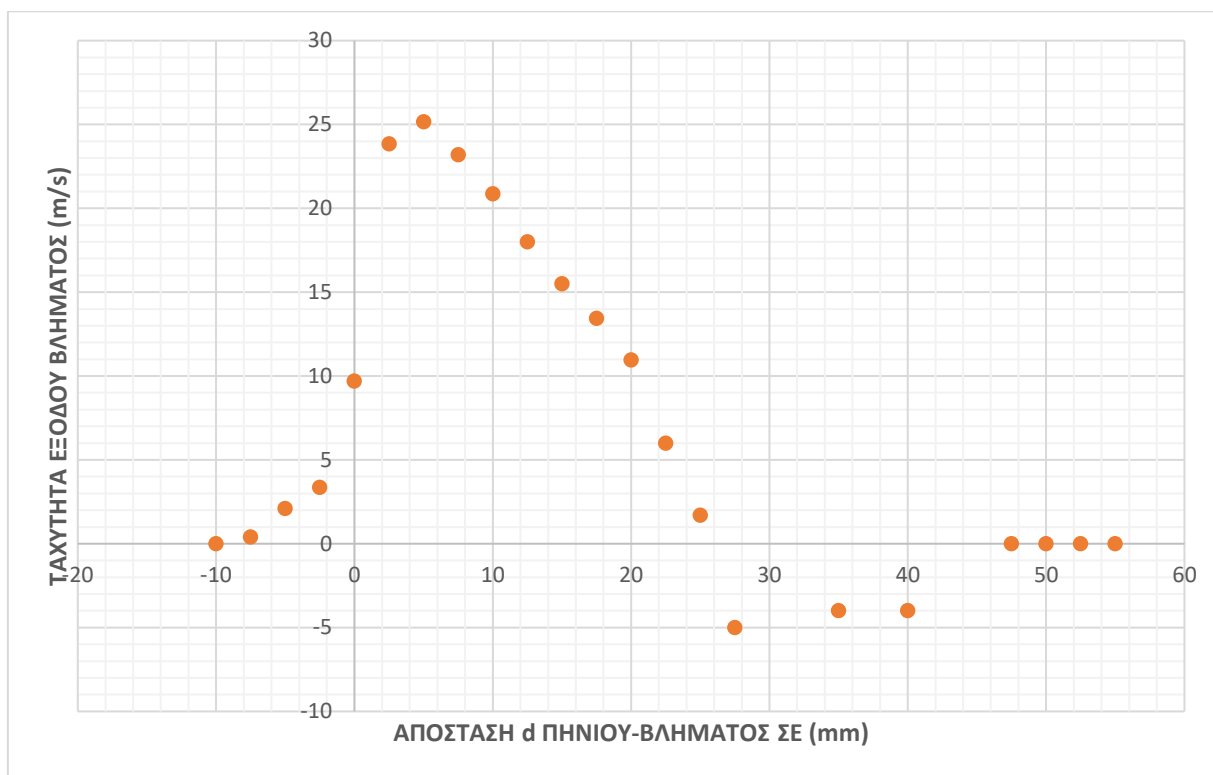
Όπου  $m$  η μάζα του βλήματος,  $C$  η χωρητικότητα των πυκνωτών,  $V$  η τάση στα άκρα των πυκνωτών,  $u$  η ταχύτητα εξόδου του βλήματος.



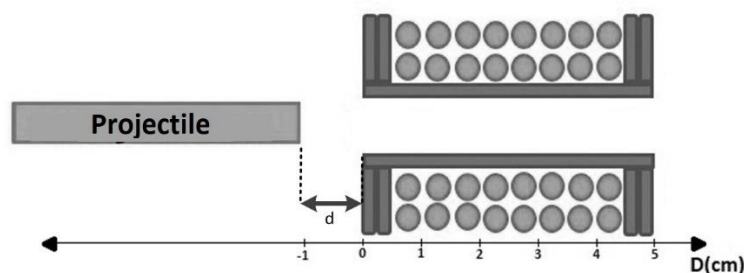
Σχήμα 6.14 Μετρήσεις απόδοσης του EMA για τις διάφορες τάσεις, με τη χρήση βλήματος ( $L=0.05m$ ).

Αρχικά παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης μειώνεται όσο αυξάνει η τάση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις απώλειες ενέργειας του EMA, οι οποίες αυξάνονται όσο αυξάνει η τάση. Επίσης η απόδοση του EMA κυμαίνεται μεταξύ (1.1% και 4.5%) και συγκριτικά με τις πειραματικές κατασκευές των EMA της βιβλιογραφίας [7][13][36] η απόδοση του EMA της παρούσας εργασίας είναι ίση και σε κάποιες μετρήσεις κατά 1-2% μεγαλύτερη.

## 6.6 Επίδραση στην ταχύτητα του ΕΜΑ από την απόσταση του βλήματος από το κέντρο του σωληνοειδούς



Σχήμα 6.15 Διάγραμμα θέσης βλήματος και της ταχύτητας εξόδου του.



Σχήμα 6.16 Βοηθητικό σχήμα για την κατανόηση της απόστασης d πηνίου - βλήματος.

Σε αυτό το πείραμα οι μετρήσεις έγιναν με βήμα 2.5 mm και με βλήμα μήκους  $L=0,05$  m αφού με αυτό μετρήθηκε η μέγιστη απόδοση. Ως βήμα ορίζεται η απόσταση μεταξύ των αρχικών θέσεων από τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις. Η απόσταση  $d$  ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της αρχής του πηνίου (σημείο 0) και της μύτης του βλήματος. Σε κάθε μέτρηση η αρχική τάση των πυκνωτών ήταν στα 360 V. Επίσης καταγράψαμε όλες τις μετρήσεις με τη χρήση μόνο του 1ου πηνίου.

Από το Σχήμα 6.15 διαπιστώνεται ότι η ταχύτητα εξόδου του βλήματος εξαρτάται άμεσα από την απόσταση μεταξύ αυτού και του σωληνοειδούς. Μια μικρή απόκλιση  $\pm 2$  mm από την θέση στην οποία η ταχύτητα μεγιστοποιείται ( $x=5$  mm) επιφέρει μεγάλη μείωση της ταχύτητας εξόδου. Αν το βλήμα τοποθετηθεί αρχικά μακριά έξω από το πηνίο, η πυκνότητα

της μαγνητικής ροής είναι μικρή, συνεπώς και η ελκτική δύναμη είναι μικρή, με αποτέλεσμα η ταχύτητα του βλήματος να μην είναι η βέλτιστη (2ο τεταρτημόριο γραφήματος). Δεξιά της βέλτιστης θέσης (1ο τεταρτημόριο) εισάγοντας το βλήμα εντός του σωληνοειδούς παρατηρούμε ότι η ταχύτητα μειώνεται παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, αλλά η συγκεκριμένη μείωση οφείλεται στο φαινόμενο suck-back. Στο (4ο τεταρτημόριο) μετρήθηκε αρνητική ταχύτητα καθώς το βλήμα έλκεται στο κέντρο του σωληνοειδούς, το περνά και έπειτα έλκεται πάλι προς το κέντρο αποκτώντας αρνητική ταχύτητα διότι το μαγνητικό πεδίο συνεχίζει να επιδρά για κάποια ms ακόμα. Τέλος οι τέσσερις μετρήσεις κοντά στα 50 mm όπου έχουμε μηδενική ταχύτητα επιβεβαιώνουν ότι η ελκτική δύναμη από το πηνίο είναι μηδενική όταν το βλήμα βρίσκεται στο κέντρο του πηνίου.

## 7. 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 ΕΜΑ. 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 ΕΜΑ.

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 καθώς και οι αλλαγές ή προσθήκες στον κώδικα των μικροελεγκτών. Αξιοσημείωτο είναι ότι η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει επαναληπτικά για δεκάδες φορές μέσα σε διάστημα μιας ημέρας χωρίς να αντιμετωπίσει καμία δυσλειτουργία. Το γεγονός αυτό είναι αρκετά ικανοποιητικό, αν αναλογιστούμε ότι χρησιμοποιήθηκαν χαμηλής ποιότητας εξαρτήματα για την οικονομική διευκόλυνση μας και σε αρκετές περιπτώσεις μεταχειρισμένα.

### 7.1 Μελλοντικές προεκτάσεις και βελτιώσεις

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:

- Αποκοπή ρεύματος: Για την αποκοπή του ρεύματος προτείνεται η χρήση GTO θυρίστορ ή ισχυρά IGBT ώστε να αποκόψουμε τη ροή ρεύματος στο πηνίο. Επίσης μια άλλη οικονομικότερη αλλά λιγότερο αποδοτική πρόταση θα ήταν η υλοποίηση ενός συστήματος εξαναγκασμένης σβέσης (μετάβασης) των ήδη εγκατεστημένων στο σύστημα SCR θυρίστορ.
- 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.

- Αύξηση 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.
- 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 ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε μαγνητικό πεδίο στο πηνίο σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο.
- Τοποθέτηση 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.



## Βιβλιογραφία

---

- [1] R. . Nirmal.A.S, “Electromagnetic rocket launcher,” vol. 7, no. 1, pp. 117–121, 2014.
- [2] G. Roesler, “Mass Estimate for a Lunar Resource Launcher Based on Existing Terrestrial Electromagnetic Launchers,” *Machines*, vol. 1, no. 1, pp. 50–62, 2013.
- [3] I. R. McNab, “Launch to space with an electromagnetic railgun,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 1 I, pp. 295–304, 2003.
- [4] T. Sandhya and P. M. Rao, “An Approach for Electromagnetic Linear,” vol. 5, no. X, pp. 1161–1166, 2017.
- [5] G. W. Slade, “A simple unified physical model for a reluctance accelerator,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 11, pp. 4270–4276, 2005.
- [6] J. Holzgrafe, N. Lintz, N. Eyre, J. Patterson, and F. W. Olin, “Effect of Projectile Design on Coil Gun Performance Coil Gun Theory,” 2012.
- [7] F. Daldaban and V. Sari, “The optimization of a projectile from a three-coil reluctance launcher,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 4, pp. 2771–2788, 2016.
- [8] J. ŽAMBERSKÝ, “Electromagnetic Pulse Accelerator of Projectiles,” 2015.
- [9] James Paul, “Coilgun Systems,” 2001. [Online]. Available: <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/index.html>. [Accessed: 01-Apr-2018].
- [10] L. M. Cooper, A. R. Van Cleef, B. T. Bristoll, and P. A. Bartlett, “Reluctance accelerator efficiency optimization via pulse shaping,” *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1145–1150, 2014.
- [11] 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.
- [12] Stephen J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*. Τζιόλα, 2012.
- [13] 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.
- [14] W. Halliday, Resnick, *ΦΥΣΙΚΗ-Μηχανική-Κυματική-Θερμοδυναμική-Ηλεκτρομαγνητισμός-Οπτική*. Gutenberg, 2014.
- [15] S. Khandekar, “Coilgun : Simulation and Analysis,” vol. 3, no. 3, pp. 37–43, 2016.
- [16] D. A. John D. Kraus, *Electromagnetics with applications*, 5th ed. 2014.
- [17] I. Repository, “Electromagnetic flyer plate technology and development of a novel current distribution sensor,” 2014.
- [18] ABB, “Switching Losses for Phase Control and Bi-Directionally Controlled Thyristors,” *ABB Appl. note*, p. 9, 2007.
- [19] T. Culver, J. Tyme, and M. Don, “Eddy Current Brake Design for Operation with Extreme Back-drivable Eddy Current Motor:,” 2010.
- [20] Barry Hansen, “Modeling Projectile Length with FEMM,” 2005. [Online]. Available: [https://www.coilgun.info/femm/femm\\_projectile\\_length.htm](https://www.coilgun.info/femm/femm_projectile_length.htm). [Accessed: 26-Apr-2018].

- [21] C. Dubilier, “Aluminum Electrolytic Capacitor Application Guide,” *Technology*, no. 864, pp. 1–22, 2011.
- [22] Στέφανος Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, 2nd edition. Αθήνα: Συμεών, 2017.
- [23] I. Teccor Electronics, *Thyristor Design Guide -Triggering and Gate Characteristics of Thyristors*. .
- [24] IRF, “Phase Control SCR 40TPS12A,” pp. 1–7.
- [25] IOR, “Power MOSFET IRFB3006PBF,” pp. 1–9, 2014.
- [26] Laszlo Balogh, “Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits,” no. April 2002, pp. 1–48, 2017.
- [27] Microchip, “6A High-Speed MOSFET Drivers TC4420/TC4429,” <Http://Www.Farnell.Com/Datasheets/1685592.Pdf>, pp. 1–22, 2012.
- [28] L. Wuidart, “Topologies for Switched Mode Power Supplies,” pp. 1–18.
- [29] TI, “LM2596 Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator,” no. December 1997, 1999.
- [30] V. Semiconductors, “Silicon PIN Photodiode BPW34,” vol. 2.1, no. 81521, pp. 1–5, 2011.
- [31] IRF, “Low Power Dual Operational Amplifier LM358,” pp. 1–8, 2007.
- [32] ΚΑΛΑΙΤΖΑΚΗΣ ΚΩΣΤΑΣ-ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ ΕΥΤΥΧΗΣ, *ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ*. 2010.
- [33] Atmel, “ATtiny13A Datasheet,” vol. 2, pp. 1–77.
- [34] J. Dodge and J. Hess, “IGBT Tutorial,” *Advanced Power Technol.*, pp. 1–15, 2002.
- [35] IRF, “INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR IRGP4066PbF,” pp. 1–10, 2010.
- [36] T. Barrera and R. Beard, “Exploration and verification analysis of a Linear Reluctance Accelerator,” *EML 2014 - 2014 17th Int. Symp. Electromagn. Launch Technol.*, pp. 3–8, 2014.

