

**Τ. Ε. Ι. Πάτρας  
Τμήμα Ηλεκτρολογίας**

**Πτυχιακή Εργασία  
Αριθμός 432**

**"Μελέτη Βηματικού Κινητήρα"**

Εισηγητής:  
Αντωνόπουλος Γεώργιος



Σπουδαστής:  
Φιορέτος Σπυρίδων

**Πάτρα - Ιούνιος '99**

ΑΡΙΘΜΟΣ  
ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ 3223

## Πρόλογος

Η εργασία αυτή εξετάζει τον βηματικό κινητήρα σαν μέρος ενός συστήματος ελέγχου ανοικτού βρόχου.

Αρχικά γίνεται αναφορά στην κατασκευή και στον τρόπο λειτουργίας του κινητήρα και στην συνέχεια, μέσω μιάς σειράς εργαστηριακών ασκήσεων γίνεται η διερεύνηση των ορίων λειτουργίας του.

Έτσι βλέπουμε που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον κινητήρα και που είναι αδύνατη η χρήση του.

## Περιεχόμενα

1. Ορολογία	σελ. 5
2. Ο βηματικός κινητήρας	
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγν. αντίστασης	9
2.3 Ο υβριδικός βηματικός κινητήρας	15
2.4 Μέθοδοι διέγερσης	20
3. Ακριβής τοποθέτηση του φορτίου.	
Στατική λειτουργία του κινητήρα	
3.1 Εισαγωγή	23
3.2 Χαρακτηριστικές στατικής λειτουργίας	24
3.3 Επιλογή της μεθόδου διέγερσης	29
4. Δυναμική λειτουργία του κινητήρα	
4.1 Χαρακτηριστικές ροπής αποσυγχρονισμού (pull-out) - ταχύτητας	31
4.2 Μηχανικός συντονισμός	39
4.3 Απόσβεση	43
5. Μονοπολική και διπολική οδήγηση	
5.1 Γενικά	49
5.2 Μονοπολική οδήγηση	50
5.3 Διπολική οδήγηση	53
5.4 Τα " διπλά " τυλίγματα	55

6. Κυκλώματα οδήγησης	
6.1 Οδήγηση διπλής τάσης (bilevel driver)	59
6.2 Chopper driver	62
7. Έλεγχος ανοικτού βρόχου	66
8. Περιγραφή της εκπαιδευτικής μονάδας SD 1664	
8.1 Γενικά	72
8.2 Λειτουργικές μονάδες	73
8.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά	77
9. Πειράματα	79
Πείραμα 1 Αρχικός προγραμματισμός λειτουργίας	84
Πείραμα 2 Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, μέγιστη ταχύτητα pull out	89
Πείραμα 3 Μέγιστη συχνότητα εκκίνησης	93
Πείραμα 4 Μέγιστη ροπή στρέψης εκκίνησης	97
Πείραμα 5 Χαρακτηριστικές ροπής στρέψης pull out, χαρακτηριστικές περιστροφικής λειτουργίας	99
Πείραμα 6 Χαρακτηριστικές ροπής στρέψης pull in torque	106
Πείραμα 7 Συντονισμός	110
Πείραμα 8 Χαρακτηριστικές με φορτίο αδράνειας	116
Πείραμα 9 Ροπή στρέψης συγκράτησης	118
Πείραμα 10 PPS - Pulse Positioning System	121
Πείραμα 11 Ανακεφαλαίωση	128
10. Παράρτημα	133
10.1 Υπολογισμός starting rate	
10.2 Γραμμική επιτάχυνση	
10.3 Σχεδίαση μονοπολικού κυκλώματος οδήγησης	

**10.4 Διπολική οδήγηση**

**10.5 Φορτίο συνδεδεμένο στον κινητήρα με leadscrew**

**11. Εφαρμογές**

## 1. Ορολογία

**Detend torque:** Η ροπή αυτή εμφανίζεται μόνο σε κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη και ορίζεται σαν η μέγιστη στατική ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον άξονα ενός \μη διεγερμένου κινητήρα χωρίς να προκαλέσει συνεχή περιστροφή (Ncm).

**Ροπή στρέψης συγκράτησης (Holding torque):** Η μέγιστη σταθερή ροπή στρέψης που μπορεί να εφαρμοσθεί εξωτερικώς στον άξονα ενός βηματικού κινητήρα υπό διέγερση , χωρίς να προκαλέσει συνεχή περιστροφή (Ncm).

**Θέση ηρεμίας ή θέση ισορροπίας:** Ορίζεται σαν η θέση στην οποία ένας διεγερμένος κινητήρας έρχεται σε ηρεμία εν κενώ.

**Απόκλιση (Deviation):** Η μεταβολή της θέσης του άξονα του κινητήρα σε σχέση με την θέση ισορροπίας, όταν μία ορισμένη ροπή στρέψης εφαρμοσθεί στον άξονα του υπό διέγερση κινητήρα (μοίρες).

**Pull in :** Ο όρος αυτός περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία ο βηματικός κινητήρας "σπρώχνεται εντός " συγχρονισμού.

**Pull out :** Ο όρος αυτός περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία ο βηματικός κινητήρας "σπρώχνεται εκτός " συγχρονισμού.

**Maximum pull in rate (speed) :** Ο μέγιστος ρυθμός εναλλαγής (ταχύτητα) στον οποίο ο κινητήρας εν κενώ μπορεί να εκκινήσει και να συγχρονισθεί χωρίς να χάνει βήματα (steps/sec, rev/min).

**Maximum pull out rate (speed)** : Ο μέγιστος ρυθμός εναλλαγής (ταχύτητα) , τον οποίο ο κινητήρας εν κενώ, μπορεί να ακολουθήσει χωρίς να χάνει βήματα (steps/sec, rev/min).

**Μέγιστη ροπή στρέψης εργασίας** : Η μέγιστη ροπή στρέψης που μπορεί να παραχθεί από τον κινητήρα (Ncm).

**Overshoot** : Το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης του δρομέα γύρω από την τελική του θέση ισορροπίας, μετά την διακοπή των παλμών εναλλαγής (μοίρες).

**Φάση**: Κάθε τύλιγμα στα άκρα του οποίου είναι συνδεδεμένη τάση τροφοδοσίας.

**Pull in rate (speed)**: Η μέγιστη ταχύτητα στην οποία ο κινητήρας υπό φορτίο μπορεί να εκκινήσει χωρίς να χάνει βήματα (steps/sec, rev/min).

**Pull in torque (ροπή στρέψης pull in)**: Η μέγιστη ροπή στρέψης υπό την οποία ο βηματικός κινητήρας μπορεί να εκκινήσει και να έλθει σε συγχρονισμό (Ncm).

**Pull out rate (speed)**: Η μέγιστη ταχύτητα στην οποία ο κινητήρας υπό φορτίο μπορεί να λειτουργήσει χωρίς να χάνει βήματα (steps/sec, rev/min).

**Pull out torque (ροπή στρέψης pull out)**: Η μέγιστη ροπή στρέψης που μπορεί να εφαρμοσθεί στον δρομέα του κινητήρα, χωρίς να χαθεί ο συγχρονισμός (Ncm).

**Πεδίο εκκίνησης (start range)**: Το εύρος των ταχυτήτων υπό τις οποίες ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει δίχως να χάνει βήματα.

**Πεδίο περιστροφής (slew range)**: Το εύρος των ταχυτήτων υπό τις οποίες ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί και να περιστρέφεται προς μία μόνο κατεύθυνση, χωρίς να χάνει βήματα, αλλά δεν μπορεί να



σταματήσει και να επανεκκινήσει, ούτε να αλλάξει κατεύθυνση περιστροφής.

**Γωνία βήματος:** Η ονομαστική γωνία στην οποία ο άξονας του κινητήρα πρέπει να περιστραφεί μεταξύ δυο διαδοχικών θέσεων ισορροπίας (μοίρες).

**Stepping rate:** Ο αριθμός των θέσεων ισορροπίας που προσπερνούνται από ένα σταθερό σημείο του δρομέα σε χρόνο 1sec (steps/sec).

**PPS, Pulse positioning system:** Η δυνατότητα μορφοποίησης του κάθε παλμού σε δυό νέους των οποίων το εύρος και η εσωτερική καθυστέρηση μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να βελτιστοποιηθεί η κίνηση του δρομέα.

## 2. Ο βηματικός κινητήρας

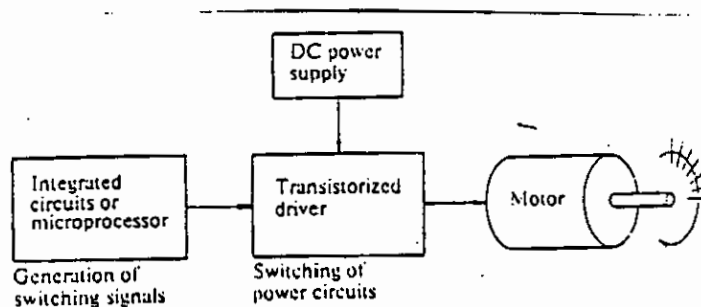
### 2.1 Εισαγωγή

Ο βηματικός κινητήρας είναι η ηλεκτρική μηχανή που μετατρέπει μια ψηφιακή ηλεκτρική είσοδο σε μηχανική κίνηση. Δηλαδή ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται κατά μια σταθερή γωνία για κάθε παλμό που

εφαρμόζεται στην είσοδο του συστήματος. Συγκρινόμενο με άλλες συσκευές που μπορούν να παρουσιάσουν την ίδια ή παρόμοια λειτουργία, ένα σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιεί βηματικό κινητήρα έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

1. Δεν χρειάζεται κλάδος ανατροφοδότησης για τον έλεγχο της θέσης ή για τον έλεγχο της ταχύτητας. Έτσι τα περισσότερα συστήματα οδήγησης βηματικού κινητήρα είναι ανοικτού βρόχου.
2. Το σφάλμα θέσης του δρομέα είναι μη αθροιστικό.
3. Οι βηματικοί κινητήρες είναι συμβατοί με τον σύγχρονο ψηφιακό εξοπλισμό.

Στο σχήμα 2.1.1. φαίνεται ένα σύστημα οδήγησης βηματικού κινητήρα. Από τις πρώτες μέρες της ανάπτυξης των βηματικών κινητήρων ένας μεγάλος αριθμός τύπων κινητήρα εμφανίστηκε αλλά γρήγορα διαπιστώθηκε ότι αν θέλουμε ο κινητήρας να παράγει σημαντική ροπή στρέψης για ένα λογικό όγκο στην κατασκευή τότε και ο στάτης της μηχανής και ο δρομέας θα έπρεπε να διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό δοντιών ώστε έτσι να μεταφέρεται υψηλή ποσότητα μαγνητικής ροής.



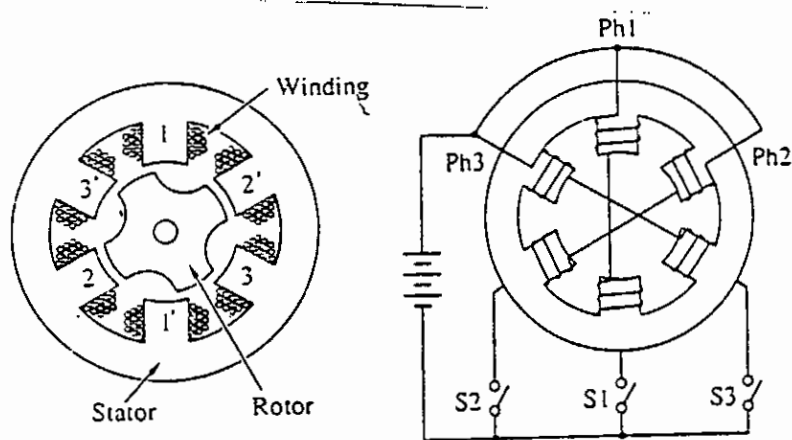
Σχ. 2.1.1 Σύστημα οδήγησης βηματικού κινητήρα

Η ακριβής τοποθέτηση του δρομέα γενικά επιτυγχάνεται από την μαγνητική ευθυγράμμιση των δοντιών του στάτη και του δρομέα . Την παραπάνω απαίτηση καλύπτουν δύο τύποι βηματικού κινητήρα. Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και ο υβριδικός βηματικός κινητήρας. Η περιστροφική κίνηση του επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής στην διέγερση των τυλιγμάτων του κινητήρα. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η σημαντικότερη ιδιότητα του βηματικού κινητήρα είναι η ικανότητά του να "μεταφράζει" τις μεταβολές στην διέγερση των τυλιγμάτων του σε επακριβώς καθορισμένες προωθήσεις του δρομέα (βήματα). Η μεταβολή στην διέγερση των τυλιγμάτων (φάσεων) του κινητήρα γίνεται μέσω ηλεκτρονικών διακοπών.

## **2.2 Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης**

Στον τύπο αυτό το μαγνητικό πεδίο παράγεται αποκλειστικά από την ροή ρεύματος στα τυλίγματα του κινητήρα. Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (*variable reluctance stepping motor*, VR motor), μπορεί να θεωρηθεί από τους βασικότερους τύπος βηματικού κινητήρα.

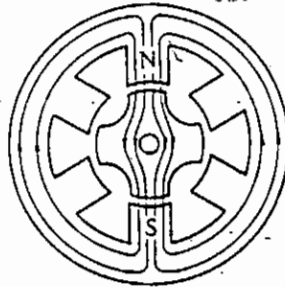
Μία τομή ενός απλού κινητήρα αυτής της κατηγορίας φαίνεται στο σχήμα 2.2.1.



Σχ. 2.2.1 Τομή βηματικού κινητήρα

Πρόκειται για έναν τριφασικό κινητήρα με έξι δόντια στο στάτη. Κάθε ζεύγος δοντιών στάτη που απέχουν 180 μοίρες μεταξύ τους ανήκουν στην ίδια φάση. Ο δρομέας έχει τέσσερα δόντια. Τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από υλικά με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα ώστε να επιτρέπουν την διέλευση υψηλής ποσότητας μαγνητικής ροής ακόμα και στην περίπτωση που εφαρμόζεται χαμηλή μαγνητοενεργτική δύναμη. Στην περίπτωση του κινητήρα που εξετάζουμε τα δόντια 1, 2 και 3 του στάτη σχηματίζουν βόρειο πόλο ενώ τα δόντια 1', 2' και 3' νότιο όταν έχουμε ροή ρεύματος μέσα από τα αντίστοιχα τυλίγματα. Το ρεύμα στο κάθε τύλιγμα (στην κάθε φάση) ελέγχεται από τους αντίστοιχους διακόπτες ON/OFF. Εάν

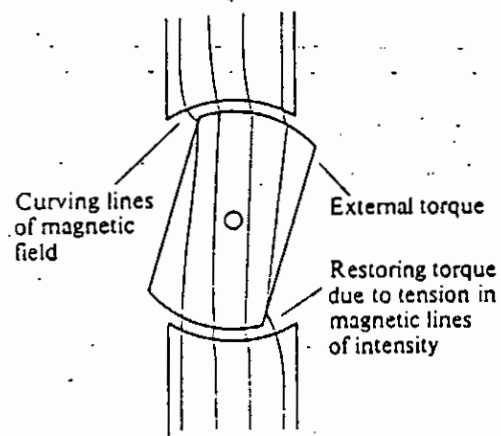
έχουμε ροή ρεύματος στη φάση 1, ή αλλιώς αν η φάση 1 είναι υπό διέγερση (ο S1 κλειστός), τότε η μαγνητική ροή θα εμφανίζεται όπως στο σχήμα 2.2.2.



Σχ. 2.2.2 Θέση ηρεμίας με τη φάση 1 υπό διέγερση

Ο δρομέας τότε θα τοποθετηθεί έτσι ώστε τα δόντια 1 και 1' του στάτη και δύο οποιαδήποτε από τα δόντια του δρομέα να ευθυγραμμιστούν μεταξύ τους. Όταν συμβεί αυτό η μαγνητική αντίσταση ελαχιστοποιείται οπότε έχουμε μια κατάσταση ηρεμίας (ή κατάσταση ισορροπίας). Εάν ο δρομέας τείνει να απομακρυνθεί από την θέση ισορροπίας εξ' αιτίας της εφαρμογής εξωτερικής ροπής στρέψης στον άξονά του, μια ροπή στρέψης επαναφοράς θα εμφανιστεί όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.3. Εδώ η εξωτερική ροπή έχει εφαρμοσθεί έτσι ώστε να περιστρέψει τον άξονα κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού (cw). Η μετατόπιση του δρομέα στην κατεύθυνση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την καμπύλωση των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου στις άκρες των

δοντιών και του στάτη και του δρομέα . Οι δυναμικές γραμμές έχουν την τάση να συμπεριφέρονται σαν ελαστικές χορδές, να τεντώνονται δηλαδή όσο το δυνατόν περισσότερο, οπότε έτσι δημιουργείται μια ροπή στρέψης επαναφοράς η οποία δρά έτσι ώστε να επαναφέρει τον δρομέα σε ευθυγράμμιση με τον στάτη.

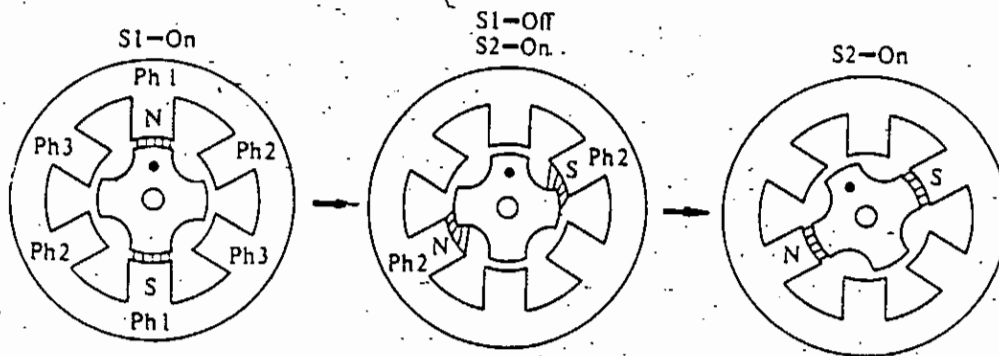


Σχ. 2.2.3 Εμφάνιση ροπής στρέψης

Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα , όταν τα δόντια του δρομέα και του στάτη είναι σε μη ευθυγράμμιση στην υπό διέγερση φάση, η μαγνητική αντίσταση είναι μεγάλη.

Ο κινητήρας VR εργάζεται με τέτοιον τρόπο ώστε η μαγνητική αντίσταση να ελαχιστοποιείται. Ας δούμε τι θα συμβεί εάν αποδιεγερθεί η φάση 1 και διεγερθεί η φάση 2. Η μαγνητική αντίσταση στην υπό διέγερση φάση θα είναι μεγάλη οπότε τότε ο δρομέας θα μετακινηθεί κατά γωνία βήματος 30 μοιρών σε φορά αντίθετη των δεικτών του

ρολογιού (ccw), έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μαγνητική αντίσταση. Η κίνηση αυτή κατά μία γωνία για κάθε μεταβολή στη διέγερση ονομάζεται βήμα. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 2.2.4.



Σχ. 2.2.4 Μεταβολή της διέγερσης αντιστοιχεί σε προώθηση του ρότορα

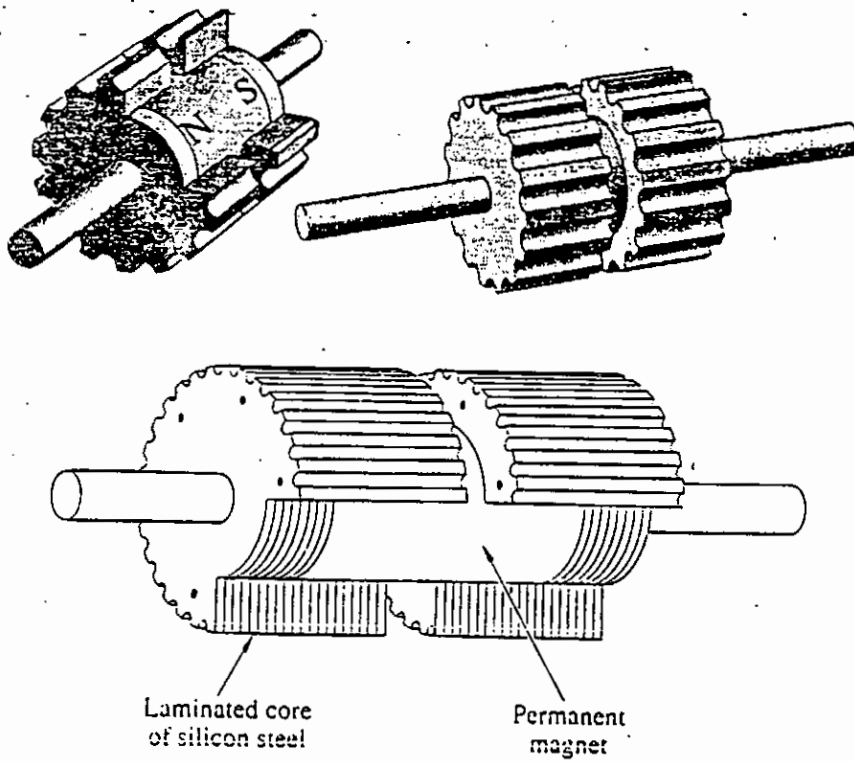
Στη συνέχεια διέγερση της φάσης 3 (ο S3 κλειστός) έχει σαν αποτέλεσμα άλλο ένα βήμα ccw οπότε για συνεχόμενη περιστροφή στην ccw κατεύθυνση η διαδοχή στην διέγερση των φάσεων είναι 1, 2, 3, 1, 2, 3,... .Ομοίως περιστροφή στην cw κατεύθυνση μπορεί να επιτευχθεί με διαδοχή 1, 3, 2, 1, 3, 2, 1, ... . Παρατηρούμε ότι για τον κινητήρα που εξετάζουμε η περιστροφή του δρομέα γίνεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση, από αυτήν της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των τριών φάσεων σε έναν κινητήρα VR είναι ο ελάχιστος που απαιτείται ώστε να έχουμε περιστροφή προς κάθε κατεύθυνση. Το μήκος του βήματος

μπορεί να εκφρασθεί σε σχέση με τον αριθμό των φάσεων και με τον αριθμό των δοντιών του δρομέα. Για έναν  $N$  - φασικό κινητήρα η διαδοχή στην διέγερση των φάσεων (1 κύκλος) παράγει  $N$  βήματα και στο τέλος των  $N$  βημάτων η διέγερση επιστρέφει στο αρχικό ζεύγος δοντιών στάτη (στην αρχική φάση). Τα δόντια του δρομέα είναι ευθυγραμμισμένα με τα δόντια του στάτη που ανήκουν στην υπό διέγερση φάση μόνο που ο δρομέας έχει μετακινηθεί κατά απόσταση ίση με την απόσταση δύο διαδοχικών δοντιών του (1 rotor tooth pitch). Για δρομέα με  $p$  δόντια η απόσταση των δύο διαδοχικών δοντιών είναι  $360/p$  μοίρες και ο δρομέας μετακινείται για την απόσταση αυτή σε  $N$  βήματα. Άρα : Μήκος βήματος =  $360/Np$  (μοίρες). Έτσι για κινητήρα με 3 φάσεις και 4 δόντια δρομέα το μήκος βήματος (γωνία βήματος) είναι 30 μοίρες ενώ για κινητήρα με 4 φάσεις και 6 δόντια η γωνία βήματος γίνεται 15 μοίρες. Συνηθισμένος είναι ο τύπος τετραφασικού VR κινητήρα με  $p=50$  και άρα βήμα 1.8 μοίρες.



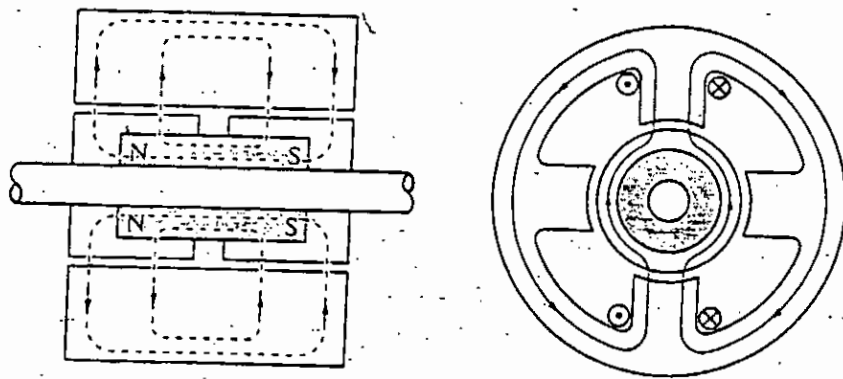
### 2.3 Ο υβριδικός βηματικός κινητήρας

Ο υβριδικός βηματικός κινητήρας έχει μόνιμο μαγνήτη στηριγμένο στο δρομέα.



Σχ. 2.3.1 Κατασκευή του δρομέα του υβριδικού κινητήρα

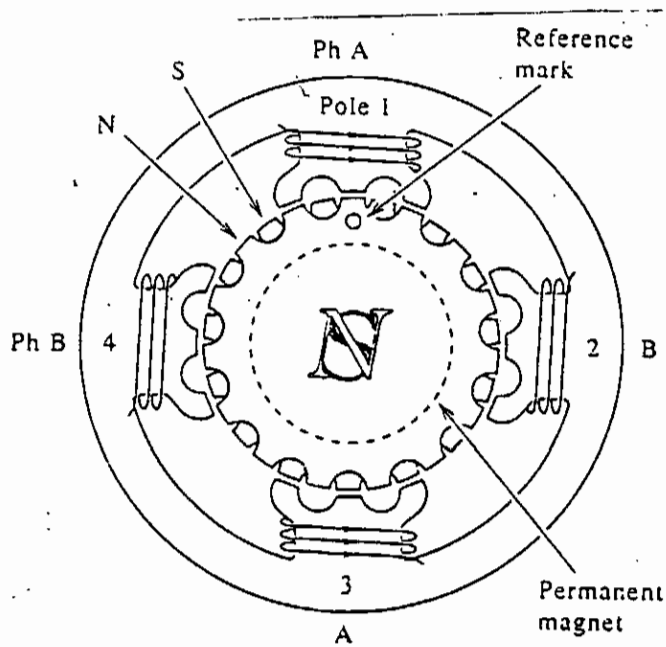
Ο όρος "υβριδικός" προέρχεται από το γεγονός ότι ο κινητήρας λειτουργεί κάτω από τις συνδυασμένες αρχές λειτουργίας ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη και ενός κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.



Σχ. 2.3.2 Μαγνητική ροή στον κινητήρα

Έτσι πετυχαίνουμε υψηλή ροπή στρέψης και μικρό βήμα από σχετικά μικρό μέγεθος κατασκευής. Εδώ η κατασκευή του στάτη είναι ή ίδια ή παρόμοια με αυτήν ενός κινητήρα VR. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του υβριδικού βηματικού κινητήρα είναι στην κατασκευή του δρομέα. Εδώ ο δρομέας αποτελείται από δύο "οδοντωτούς τροχούς". Ο ένας τροχός είναι μετατοπισμένος σε σχέση με τον άλλο κατά απόσταση ίση με το ήμισυ της απόστασης δύο διαδοχικών δοντιών (σχήμα 2.3.1). Ο μόνιμος μαγνήτης είναι τοποθετημένος μεταξύ των τροχών έτσι ώστε ο ένας τροχός να είναι ο βόρειος πόλος

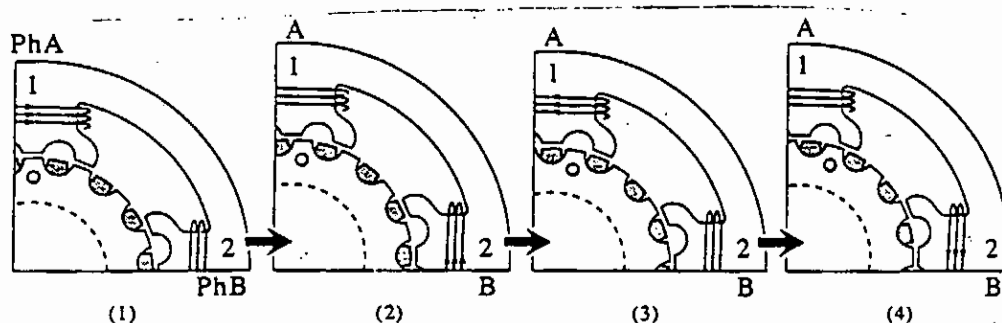
ενώ ο άλλος ο νότιος πόλος. Εδώ ο μόνιμος μαγνήτης είναι η κύρια πηγή της μαγνητικής ροής και τα d.c. ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του κινητήρα κατευθύνουν την ροή αυτή κατά μήκος εναλλακτικών διαδρομών.



Σχ. 2.3.3 Τομή διφασικού υβριδικού κινητήρα

Στο σχήμα 2.3.2. φαίνονται τα "μονοπάτια" της ροής στον κινητήρα. Καθώς ο ευρύτερα διαδεδομένος τύπος υβριδικού κινητήρα είναι ο διφασικός κινητήρας ας εξετάσουμε την αρχή λειτουργίας αυτού του τύπου βάση του σχήματος 2.3.3. Εδώ έχουμε τέσσερις πόλους στον στάτη. Το τύλιγμα στον πόλο 1 και αυτό στον πόλο 3 είναι συνδεδεμένα σε σειρά και αποτελούν την φάση A. Η φάση A είναι υπό διέγερση.

Ομοίως τα τυλίγματα στους πόλους 2 και 4 αποτελούν την φάση Β. Όταν παρατηρούμε τον δρομέα από ένα σταθερό σημείο (reference mark), η περιφέρειά του εμφανίζεται σαν μία εναλλαγή των βορείων και νοτίων πόλων αν και στην περίπτωση μας οι βόρειοι πόλοι είναι κοντύτερα στον παρατηρητή από ότι οι νότιοι. Στο σχήμα 2.3.4 παρουσιάζεται η διαδικασία της κίνησης του δρομέα καθώς τα ρεύματα στα τυλίγματα του κινητήρα εναλλάσσονται σύμφωνα με την διαδοχή *one phase on* (μία φάση υπό διέγερση κάθε φορά).



Σχ. 2.3.4 Λειτουργία *one phase on* διφασικού υβριδικού κινητήρα.

Στήν θέση (1) η φάση Α είναι υπό διέγερση. Το ρεύμα στα τυλίγματα έχει τέτοια φορά ώστε στον πόλο 1 του στάτη να έχουμε μαγνητικό νότιο πόλο οπότε τα δόντια του πόλου αυτού έλκουν τους βόρειους πόλους του δρομέα. Ταυτόχρονα στον πόλο 3 που ανήκει στην ίδια φάση έχουμε μαγνητικό βόρειο πόλο άρα και ευθυγράμμιση με τους νότιους πόλους του δρομέα. Στη συνέχεια το ρεύμα ρέει στο τυλίγμα της φάσης Β με την πολικότητα που φαίνεται στην θέση (2). Εκεί

σχηματίζεται βόρειος πόλος που έλκει τους νότιους πόλους του δρομέα οπότε ο δρομέας θα μετακινηθεί κατά απόσταση ίση με το ένα τέταρτο της απόστασης μεταξύ δυο διαδοχικών δοντιών του ώστε να έχουμε ευθυγράμμιση των δοντιών στάτη - δρομέα στους πόλους 2 και 4 που ανήκουν στην υπό διέγερση φάση. Στη συνέχεια το ρεύμα επανέρχεται στην φάση A αλλά με διαφορετική κατεύθυνση (πολικότητα). Τότε στον πόλο 1 του στάτη σχηματίζεται μαγνητικός βόρειος πόλος (πρίν είχαμε νότιο) οπότε ο δρομέας μετακινείται ξανά για απόσταση ίση με το 1/4 της απόστασης δύο διαδοχικών δοντιών ώστε να έλθουμε στην κατάσταση (3). Όταν το ρεύμα διεγείρει ξανά την φάση B επίσης με διαφορετική πολικότητα απ' ότι πρίν ο δρομέας (οι βόρειοι πόλοι του) έλκονται από τον νότιο πόλο 2 του στάτη και έτσι ο δρομέας μετακινείται κατά την ίδια απόσταση. Παρατηρούμε ότι περιστροφή του δρομέα  $cw$  γίνεται με την εξής αλληλουχία στην διέγερση: A+, B+, A-, B-, A+, B+,..... . Περιστροφή  $ccw$  μπορεί να γίνει για την διαδοχή A+, B-, A-, B+, A+, B-, κ.τ.λ. Το μήκος του βήματος μπορεί να εκφρασθεί σε σχέση με τον αριθμό των δοντιών του δρομέα,  $p$ . Ένας πλήρης κύκλος στην διέγερση των φάσεων αποτελείται απο τέσσερις καταστάσεις (A+, B+, A-, B-) και παράγει τέσσερα βήματα. Στη συνέχεια η διέγερση επανέρχεται στην κατάσταση A+, αλλά ο δρομέας έχει μετακινηθεί κατά διάστημα ίσο με την απόσταση δύο διαδοχικών δοντιών του (1 rotor tooth pitch). Αυτή η απόσταση είναι  $360/p$  μοίρες και αντιστοιχεί σε τέσσερα βήματα. Άρα μήκος βήματος  $=90/p$  μοίρες.

## 2.4 Μέθοδοι διέγερσης

Ο βηματικός κινητήρας είναι η ηλεκτρική μηχανή που "μεταφράζει" τις μεταβολές στην διέγερση των φάσεων του σε μετακινήσεις του δρομέα (βήματα). Κάθε μεταβολή στη διέγερση των φάσεων έχει σαν αποτέλεσμα την πραγματοποίηση ενός βήματος. Παραπάνω είδαμε την περίπτωση στην οποία μία μόνο φάση του κινητήρα ήταν υπό διέγερση κάθε φορά. Όμως οι φάσεις και του υβριδικού κινητήρα και του κινητήρα VR είναι ηλεκτρικά απομονωμένες μεταξύ τους και κάθε φάση διεγείρεται από ξεχωριστό κύκλωμα οδήγησης συνεπώς είναι δυνατόν να διεγείρουμε περισσότερες από μία φάσεις ταυτόχρονα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις βασικότερες μέθοδοι διέγερσης των φάσεων ενός βηματικού κινητήρα.

### Διέγερση μίας φάσης (one phase on)

Εδώ μία μόνο φάση του κινητήρα είναι υπό διέγερση κάθε φορά.

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	■				■				■
Phase 2		■				■			
Phase 3			■				■		
Phase 4				■				■	
Pulses									

Σχ. 2.4.1 Διέγερση μίας φάσης τετραφασικού κινητήρα VR

Στο παραπάνω σχήμα 2.4.1 φαίνεται η διαδοχή στην διέγερση σε λειτουργία one phase on για τετραφασικό κινητήρα VR. Τα σκιασμένα

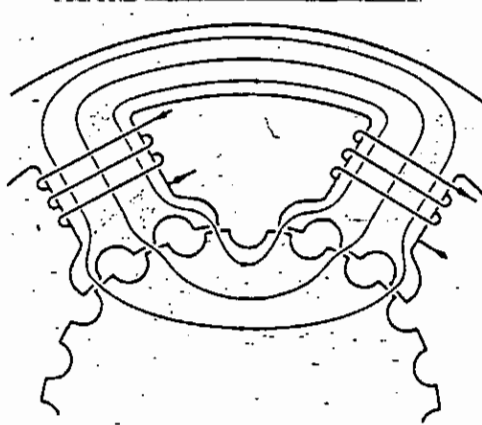
τμήματα του πίνακα αντιπροσωπεύουν την υπό διέγερση φάση ενώ τα λευκά τμήματα δείχνουν τις φάσεις στις οποίες δεν έχουμε ροή ρεύματος και άρα δεν είναι υπό διέγερση. Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται cw στην διαδοχή 1, 2, 3, 4, ..., θα περιστρέφεται ccw αν αντιστρέψουμε την διαδοχή στην διέγερση δύο οποιονδήποτε φάσεων.

Διέγερση δύο φάσεων (two phase on)

Η λειτουργία του κινητήρα κατά την οποία δύο από τις φάσεις του είναι ταυτόχρονα υπό διέγερση ονομάζεται λειτουργία two phase on. Η διαδοχή στην διέγερση για την περίπτωση 4-φασικού κινητήρα VR φαίνεται στο σχήμα 2.4.2. Όσον αφορά την θέση ισορροπίας του δρομέα παρατηρούμε (σχήμα 2.4.3) ότι με δύο φάσεις υπό διέγερση η θέση ισορροπίας είναι μεταξύ των θέσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στην ξεχωριστή διέγερση της κάθε φάσης.

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	■	■			■	■			■
Phase 2		■	■			■	■		
Phase 3			■	■			■	■	
Phase 4	■			■	■			■	■

Σχ. 2.4.2 Διέγερση two phase on τετραφασικού κινητήρα VR



Σχ. 2.4.3 Θέση ηρεμίας με διέγερση *two phase on*

#### Διέγερση μισού βήματος ( half step)

Πρόκειται για την μέθοδο διέγερσης που είναι συνδιασμός των δύο παραπάνω μεθόδων. Έτσι για 3-φασικό κινητήρα με φάσεις A, B, C η διέγερση γίνεται με την εξής σειρά: A, AB, B, BC, C, CA, A,... . Κάθε μεταβολή στην διέγερση έχει ως αποτέλεσμα την προώθηση του δρομέα για απόσταση ίση με το μισό του ενός βήματος. Συνήθως διέγερση *half step* χρησιμοποιούν οι κινητήρες με μονό αριθμό φάσεων. Στην περίπτωση διφασικού υβριδικού κινητήρα η διέγερση *half step* γίνεται ως εξής. A+, A+B+, B+, A-B+, A-, A-B-, B-, A+B-, A+...

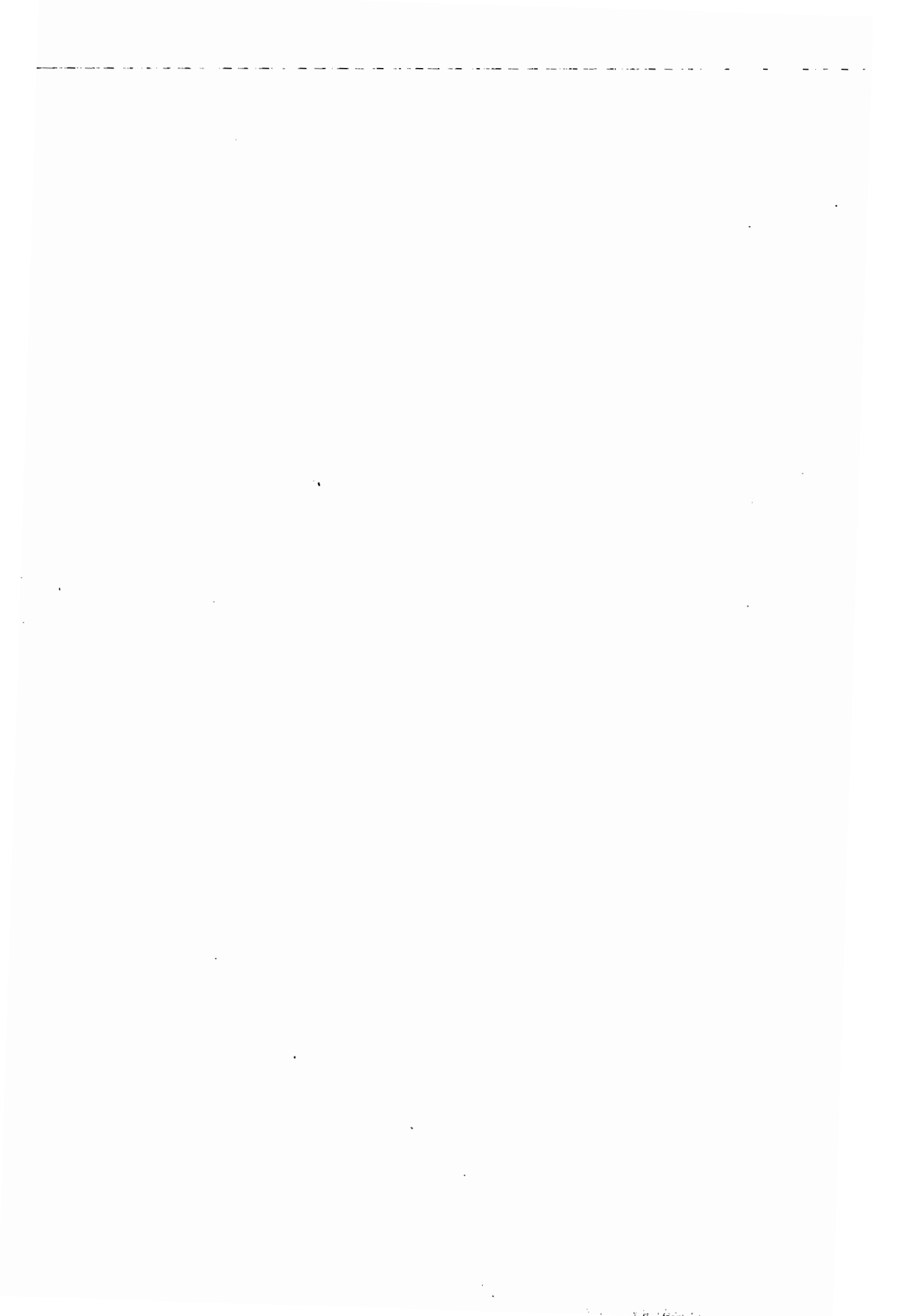


### **3. Ακριβής τοποθέτηση του φορτίου.**

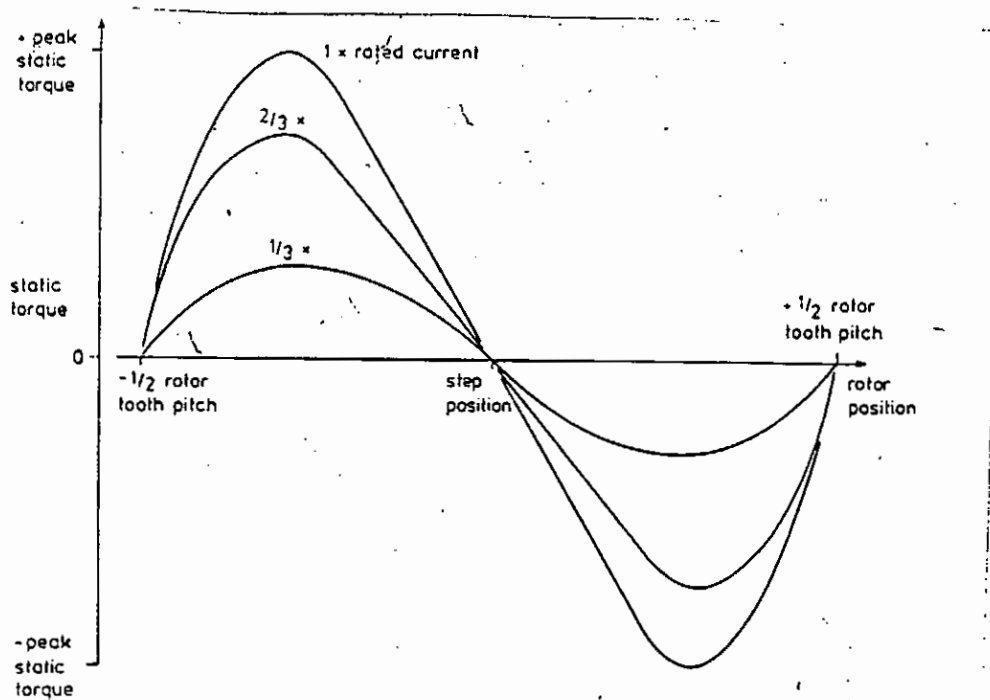
#### **Στατική λειτουργία του κινητήρα.**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Οι περισσότερες εφαρμογές του βηματικού κινητήρα, αφορούν την ακριβή τοποθέτηση ενός μηχανικού φορτίου. Η τοποθέτηση εξωτερικού φορτίου στον άξονα του κινητήρα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός μικρού σφάλματος στην θέση του δρομέα όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε κατάσταση στατικής λειτουργίας. Ο κινητήρας πρέπει να αναπτύξει αρκετή ροπή ώστε να εξισορροπήσει την ροπή του φορτίου και γι' αυτό ο δρομέας μετατοπίζεται κατά μία μικρή γωνία από την αναμενόμενη θέση ισορροπίας. Το επακόλουθο σφάλμα στην τοποθέτηση εξαρτάται από την ροπή του φορτίου αλλά είναι ανεξάρτητο του αριθμού των βημάτων που είχε εκτελέσει ο κινητήρας πριν έλθει στην κατάσταση στατικής λειτουργίας, είναι δηλαδή μη αθροιστικό. Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση του δρομέα κάτω από συνθήκες στατικής λειτουργίας συχνά καθορίζει τον κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί.



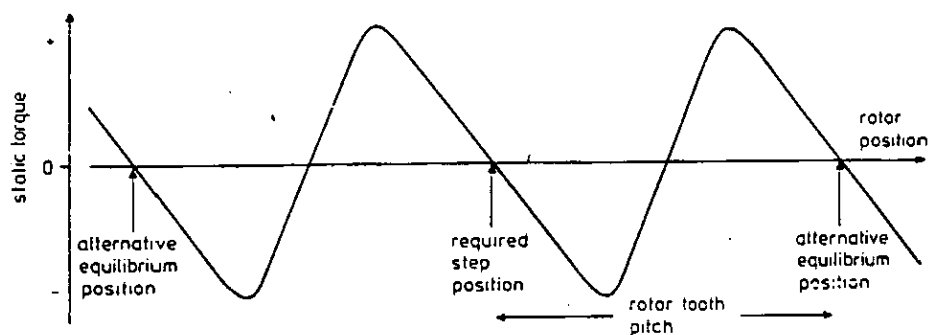
εναλλακτική θέση ισορροπίας. Η θέση αυτή θα απέχει από την αρχική θέση απόσταση ίση ή πολλαπλάσια της απόστασης δυο διαδοχικών δοντιών δρομέα (σχήμα 3.2.2).



Σχ. 3.2.1 Χαρακτηριστικές στατικής ροπής / θέσης δρομέα

Εάν μία εξωτερική ροπή στρέψης εφαρμοσθεί στον κινητήρα, τότε ο δρομέας πρέπει να πάρει μία θέση στην οποία ο κινητήρας παράγει αρκετή ροπή για να εξισορροπήσει την ροπή στρέψης του φορτίου και έτσι να παραμείνει σε κατάσταση ισορροπίας. Η μέγιστη ροπή στρέψης

που μπορεί να παράγει ο κινητήρας, άρα και η μέγιστη εξωτερική ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα κατά την στατική λειτουργία είναι ίση με την ροπή στρέψης συγκράτησης του κινητήρα.



Σχ. 3.2.2 Χαρακτηριστικές στο καθορισμένο ρεύμα

Εάν το φορτίο εφαρμόσει ροπή μεγαλύτερη από την ροπή στρέψης συγκράτησης τότε ο κινητήρας δεν μπορεί να κρατήσει το φορτίο στην θέση που έχει καθοριστεί από τις μεταβολές στην διέγερση. Το σφάλμα στη θέση του δρομέα που προκαλείται από την ροπή λόγω του φορτίου μπορεί να υπολογισθεί απ' ευθείας από την χαρακτηριστική στατικής λειτουργίας. Το σχήμα 3.2.3 δείχνει την χαρακτηριστική κινητήρα με οκτώ δόντια στον δρομέα ( $1 \text{ rotor tooth pitch} = 45 \text{ degrees}$ ) και ροπή στρέψης συγκράτησης ίση με  $1,2 \text{ Nm}$  για το καθορισμένο ρεύμα στο τύλιγμα. Με ροπή λόγω φορτίου ίση με  $0,75 \text{ Nm}$  ο δρομέας πρέπει να μετακινηθεί για περίπου  $8$  μοίρες από την θέση ισορροπίας του έως

όπου η ροπή του κινητήρα αντισταθμίζει το φορτίο. Ένας υπολογισμός στο σφάλμα αυτό μπορεί να γίνει αν η χαρακτηριστική στατικής ροπής/θέσης δρομέα, προσεγγιστεί από ένα ημίτονο. Τότε για κινητήρα με  $\rho$  δόντια στον δρομέα και holding torque  $T_{pk}$  σε μία μετατόπιση  $\theta$  από την αρχική θέση, η ροπή που παράγεται από τον κινητήρα είναι ίση με  $T = -T_{pk}\sin\rho\theta$ .

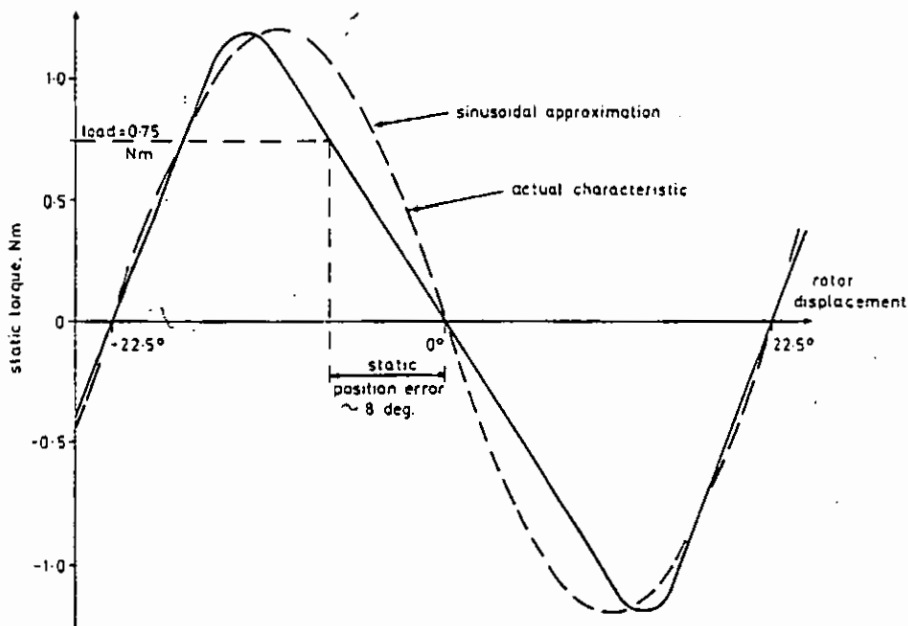


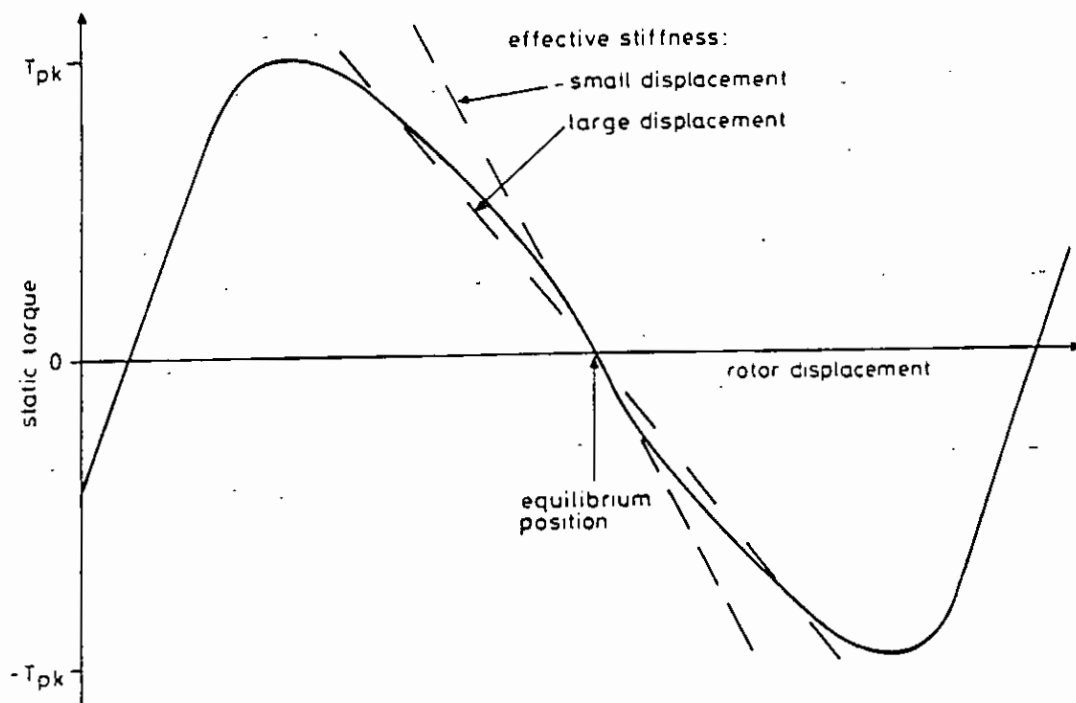
Fig. 3.2 Derivation of the static position error from the static torque characteristic

Σχ. 3.2.3 Υπολογισμός του σφάλματος στην μετατόπιση του δρομέα από την χαρακτηριστική στατικής λειτουργίας

Όταν μια ροπή φορτίου  $T_L$  εφαρμοσθεί στον δρομέα, τότε έχουμε μετατόπιση για γωνία  $\theta_0$ . Στην θέση αυτή οι ροπές του φορτίου και του κινητήρα είναι ίσες:  $T_L = T = -T_{pk} \sin \rho \theta_0$ .

Συνεπώς είναι:  $\theta_0 = [\sin^{-1}(-T_L/T_{pk})]/\rho$ .

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι το σφάλμα στην τοποθέτηση μπορεί να ελαττωθεί αυξάνοντας την ροπή στρέψης συγκράτησης είτε με την εκλογή άλλου κινητήρα ή χρησιμοποιώντας διαφορετική μέθοδο διέγερσης.



Σχ. 3.2.4 Υπολογισμός με βάση την κλίση της χαρακτηριστικής.

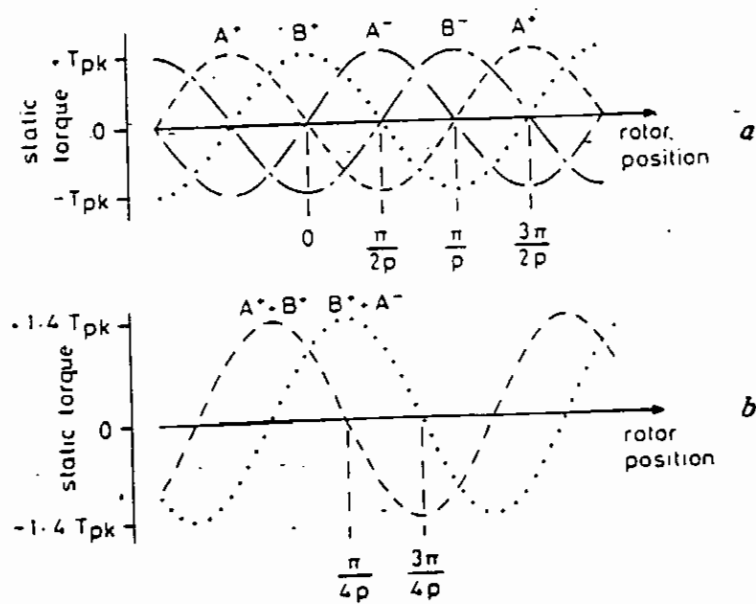
Επίσης αποτέλεσμα θα έχουμε με αύξηση του αριθμού  $p$ . Μία άλλη μέθοδος υπολογισμού είναι μέσω της κλίσης της ευθείας που είναι εφαπτόμενη στην καμπύλη στο σημείο που εκείνη διέρχεται από τη θέση ισορροπίας. Για παράδειγμα στο σχήμα η χαρακτηριστική προσεγγίζεται από μια ευθεία με κλίση  $T'$ . Τότε η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας θα είναι ίση με  $T = -T'\theta$ . Για ροπή στρέψης φορτίου  $T_L$  είναι:  $T_L = T = -T'\theta$ . Έτσι για την γωνία που μετατοπίζεται ο δρομέας έχουμε:  $\theta_e = -T_L / T'$ . (Σχήμα 3.2.4).

Κινητήρας με μεγάλη "κλίση" αναπτύσσει μεγάλη ροπή για μικρές μετατοπίσεις από την θέση ισορροπίας.

### 3.3 Επιλογή της μεθόδου διέγερσης

Τα τυλίγματα των φάσεων και στον υβριδικό και στον κινητήρα VR είναι μεταξύ τους ηλεκτρικά απομονωμένα. Έτσι μπορούμε να διεγείρουμε περισσότερες από μία φάσεις ταυτόχρονα. Εάν με τον τρόπο αυτό μπορεί να αυξηθεί η ροπή στρέψης συγκράτησης του κινητήρα τότε θα βελτιωθεί και η ακρίβεια στην τοποθέτηση του φορτίου. Στον υβριδικό βηματικό κινητήρα υπάρχουν δύο φάσεις που μπορούν να διεγερθούν είτε από ρεύμα θετικής κατεύθυνσης είτε από ρεύμα αρνητικής κατεύθυνσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιεί ο κινητήρας το "διπλό" τύλιγμα, ή στα τυλίγματα υπάρχει μεσαία λήψη τότε μπορούμε

να θεωρήσουμε τον κινητήρα σαν τετραφασικό με κάθε φάση να διεγείρεται από ρεύμα μονής κατεύθυνσης. Εάν έχουμε σειριακή αλληλουχία στην διέγερση των φάσεων τότε τέσσερα βήματα εκτελούνται ώστε να μετακινηθεί ο δρομέας απόσταση ίση με την απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών δοντιών του. Άρα κάθε βήμα αντιστοιχεί στο  $1/4$  της παραπάνω απόστασης. Στο σχήμα 3.3.1. βλέπουμε τις χαρακτηριστικές στατικής ροπής / θέσης δρομέα σε μία αμοιβαία μετατόπιση ίση με το μήκος ενός βήματος. Στις χαρακτηριστικές έχει γίνει ημιτονοειδής προσέγγιση.



Σχ. 3.3.1 Χαρακτηριστικές στατικής λειτουργίας για υβριδικό κινητήρα

*a.* Διέγερση one phase on

*b.* Διέγερση two phase on



Είναι,  $T_{A+} = -T_{PK}\sin(\rho\theta)$ ,  $T_{A-} = -T_{PK}\sin(\rho\theta-\pi)$ ,  $T_{B+} = -T_{PK}\sin(\rho\theta-\pi/2)$ ,  
 και  $T_{B-} = -T_{PK}\sin(\rho\theta-3\pi/2)$ , όπου  $T_{A+}$  είναι η ροπή που παράγεται σε  
 θέση του δρομέα  $\theta$  όταν η φάση A διεγείρεται από ρεύμα θετικής  
 κατεύθυνσης. Η επίδραση της διέγερσης ενός ζεύγους φάσεων  
 ταυτόχρονα φαίνεται στο σχήμα όπου η ροπή στρέψης συγκράτησης  
 βελτιώνεται κατά τον παράγοντα 1.4 σε σχέση με την διέγερση one  
 phase on.

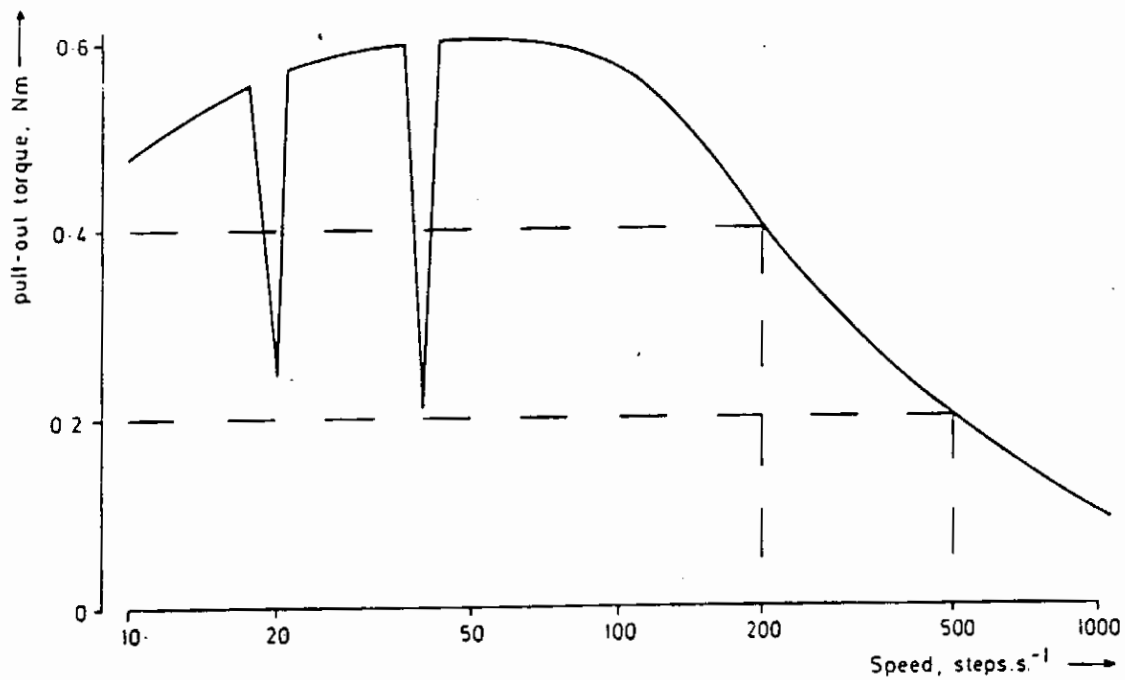
$$T_{A+B+} = T_{A+} + T_{B+} = -T_{PK}\sin(\rho\theta-\pi/4)\cos(\pi/4) = -1.4 T_{PK}\sin(\rho\theta-\pi/4).$$

#### 4. Δυναμική λειτουργία του κινητήρα

##### 4.1 Χαρακτηριστικές ροπής pull out - ταχύτητας

Εάν ο βηματικός κινητήρας χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει την θέση  
 ενός μηχανικού φορτίου χρειάζεται να γνωρίζουμε πόση ροπή μπορεί  
 να αναπτύξει ο κινητήρας κατά την επιτάχυνση, την επιβράδυνση και  
 κατά την λειτουργία σε σταθερή ταχύτητα. Πρέπει να είμαστε σίγουροι  
 ότι ο κινητήρας μπορεί να αναπτύξει αρκετή ροπή ώστε να  
 αντισταθμίσει την ροπή του φορτίου και να επιταχύνει την αδράνεια του  
 συστήματος. Επίσης χρειάζεται να γνωρίζουμε την μέγιστη ταχύτητα

που μπορεί ο κινητήρας να οδηγήσει το δεδομένο φορτίο. Οι πληροφορίες αυτές παρέχονται υπό μορφή ενός γραφήματος γνωστού σαν χαρακτηριστικές ροπής pull out / ταχύτητας. Οι χαρακτηριστικές αυτές δείχνουν την μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας στην κάθε ταχύτητα λειτουργίας του.



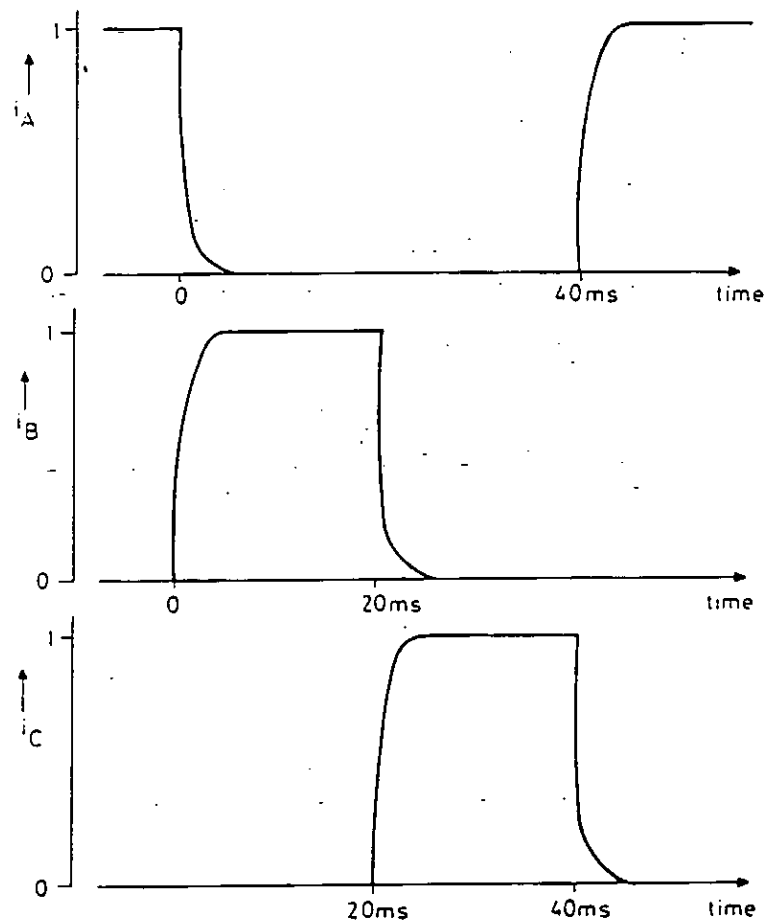
Σχ. 4.1.1 Χαρακτηριστικές ροπής στρέψης pull out / ταχύτητας

Η ροπή αυτή ονομάζεται ροπή pull out γιατί εάν η ροπή του φορτίου ξεπεράσει την τιμή αυτή τότε ο δρομέας του κινητήρα "τραβιέται εκτός" συγχρονισμού με το μαγνητικό πεδίο και τότε ο κινητήρας σταματάει (pull out = τραβώ έξω). Ο βηματικός κινητήρας στην περίπτωση των χαρακτηριστικών του σχήματος 4.1.1. μπορεί να οδηγήσει ένα φορτίο που ασκεί ροπή 0.2 Nm σε όλες τις ταχύτητες έως 500 steps/sec, αφού η ροπή pull out ξεπερνά την ροπή του φορτίου για όλο αυτό το εύρος ταχυτήτων. Όμως για φορτίο 0.4 Nm η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας θα πρέπει να περιορισθεί στα 200steps/sec. Για ένα δεδομένο φορτίο η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα υπό το φορτίο αυτό αναφέρεται σαν ταχύτητα pull out (pull out rate). Έτσι για το φορτίο 0.2 Nm η ταχύτητα pull out είναι 500 steps/sec. Στις "χαμηλές" ταχύτητες το ρεύμα στα τυλίγματα του κινητήρα παίρνει γρήγορα την καθορισμένη τιμή του μόλις διεγείρεται η αντίστοιχη φάση και διατηρεί την τιμή αυτή για τον περισσότερο χρόνο που η εν λόγω φάση είναι υπό διέγερση. Οι κυματομορφές του ρεύματος υπό αυτές τις συνθήκες φαίνονται στο σχήμα 4.1.2

Πρόκειται για τριφασικό κινητήρα με διέγερση one phase on. Εδώ η σταθερά χρόνου των τυλιγμάτων (1ms) είναι πολύ μικρότερη από το χρονικό διάστημα που κάθε φάση μένει υπό διέγερση(20ms).

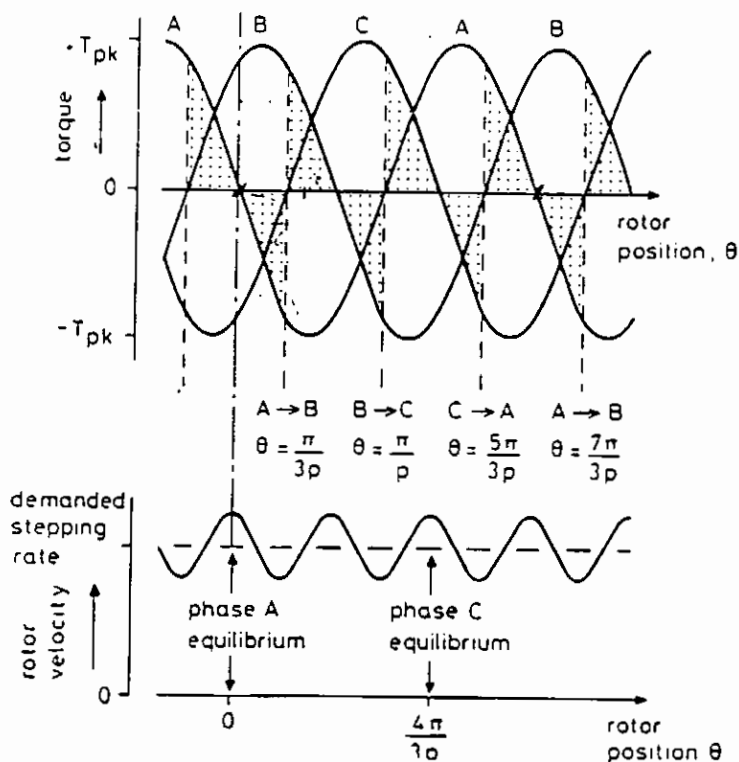
Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ροπή pull out του κινητήρα μπορεί να προκύψει από τις χαρακτηριστικές στατικής λειτουργίας για το συγκεκριμένο τύπο διέγερσης (one phase on). Για σταθερή λειτουργία του κινητήρα χωρίς φορτίο η θέση του δρομέα τις στιγμές που έχουμε μεταβολή στη διέγερση φαίνεται στο σχήμα 4.1.3. Θεωρούμε τη στιγμή που ο δρομέας διέρχεται από την θέση ισοροπίας με την φάση A υπό διέγερση ( $\theta=0$ ). Τότε η ταχύτητά του είναι η μέγιστη. Καθώς ο δρομέας

κινείται προς τα εμπρός η ροπή που παράγεται από τον κινητήρα είναι αρνητική και έτσι το σύστημα επιβραδύνει έως ότου ο δρομέας φτάσει στην θέση  $\theta = \pi/3$  όπου και η ταχύτητά του γίνεται η ελάχιστη. Στο σημείο εκείνο η διέγερση αλλάζει από την φάση A στη φάση B και τώρα ο κινητήρας παράγει θετική ροπή, προκαλώντας την επιτάχυνση του συστήματος προς την θέση ισορροπίας της φάσης B στο σημείο



Σχ. 4.1.2 Ρεύμα στα τυλίγματα 3 - φασικού κινητήρα, για λειτουργία σε χαμηλή ταχύτητα

Η ταχύτητα του δρομέα αυξάνει κάτω απο την επίδραση της θετικής ροπής και στη θέση ισορροπίας η ταχύτητα του δρομέα γίνεται ξανά μέγιστη.

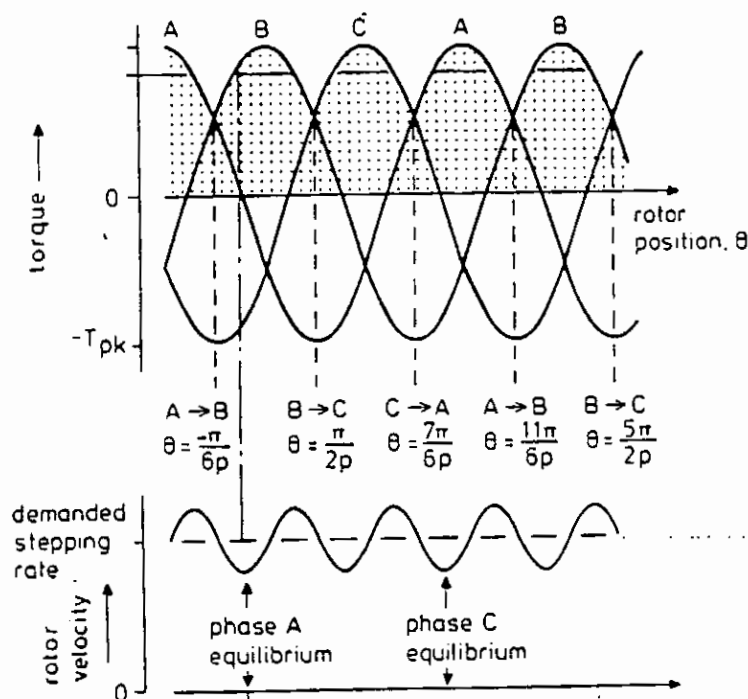


Σχ. 4.1.3 Θέση του δρομέα τις στιγμές μεταβολής της διέγερσης για μηδενικό φορτίο

Ο κύκλος τότε επαναλαμβάνεται με τον κινητήρα να παράγει αρνητική ροπή μόλις ξεπεραστεί η θέση ισορροπίας της φάσης B και η διέγερση αλλάζει από την φάση B στην φάση C στην θέση  $\theta = \pi/p$ . Κατά τη διάρκεια που η κάθε φάση είναι υπό διέγερση ο κινητήρας παράγει ίση

ποσότητα θετικής και αρνητικής ροπής, άρα δεν έχουμε την παραγωγή καθαρής ροπής. Η ροπή του κινητήρα εξισορροπεί την (μηδενική) ροπή του φορτίου άρα δεν υπάρχει ροπή για να επιταχυνθεί ο κινητήρας, ο οποίος συνεχίζει την λειτουργία του με σταθερή ταχύτητα. Μία μικρή αύξηση στο φορτίο έχει σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνση του δρομέα (φρενάρισμα), άρα όταν θα αλλάξει η διέγερση ο δρομέας θα έχει καλύψει μικρότερη απόσταση από ότι στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργούσε εν κενώ. Έτσι κατά το χρονικό διάστημα που η κάθε φάση είναι υπό διέγερση ο κινητήρας παράγει περισσότερη θετική από αρνητική ροπή και έτσι υπάρχει καθαρή ροπή η οποία αντισταθμίζει την ροπή του φορτίου άρα ο κινητήρας συνεχίζει να λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα. Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση όπου εφαρμόζεται στον κινητήρα ροπή ίση με την ροπή pull out (για την ταχύτητα που λειτουργεί ο κινητήρας). Τότε πρέπει να παραχθεί η μέγιστη διαθέσιμη ροπή. Το σχήμα 4.1.4 δείχνει ότι ο δρομέας επιβραδύνεται από το φορτίο, οπότε ο κινητήρας παράγει θετική ροπή για όλο το διάστημα που διαρκεί η διέγερση της κάθε φάσης. Η θέση ισορροπίας δεν πετυχαίνεται ποτέ από τον δρομέα αφού περισσότερη ροπή μπορεί να παραχθεί μεταβάλλοντας την διέγερση ώστε να διεγερθεί η επόμενη φάση. Βλέπουμε ότι η διέγερση μεταφέρεται από την φάση Α στην φάση Β στην θέση  $\theta = -\pi/6$  δηλαδή πριν ο δρομέας ξεπεράσει την θέση ισορροπίας της φάσης Α. Για όσο διάστημα η ροπή που παράγει ο κινητήρας είναι χαμηλότερη από την ροπή του φορτίου το σύστημα επιβραδύνει. Αντίθετα όσο η ροπή του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ροπή του φορτίου ο δρομέας επιταχύνει. Η μέση τιμή της ροπής

που παράγει η μηχανή είναι ίση με την ροπή pull out έτσι ώστε να αντισταθμιστεί η ροπή του φορτίου.



Σχ. 4.1.4 Θέση του δρομέα τις στιγμές μεταβολής της διέγερσης για πλήρες φορτίο.

Κάθε επιπλέον αύξηση στο φορτίο έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της ροπής που παράγει ο κινητήρας που τώρα δεν μπορεί να "σηκώσει" το φορτίο και έτσι τίθεται εκτός συγχρονισμού και σταματάει. Έχοντας καθορίσει τις θέσεις που πρέπει να αλλάζει η διέγερση ώστε να μεγιστοποιείται η ροπή της μηχανής μπορούμε να υπολογίσουμε την ροπή pull out. Αν λάβουμε υπ' όψιν μας την χαρακτηριστική της

φάσης A έχουμε:  $T_A = -T_{pk} \sin(\rho\theta)$ . Η φάση A διεγείρεται στη θέση του δρομέα  $\theta = -5\pi/6\rho$  και αποδιεγείρεται στη θέση  $\theta = -\pi/6\rho$  έτσι ώστε να αποδίδεται η μέγιστη ροπή. Έτσι η ροπή pull out για τον συγκεκριμένο κινητήρα με τον συγκεκριμένο τύπο διέγερσης είναι η μέση τιμή της ροπής  $T_A$  για το παραπάνω διάστημα.

$$\text{Pull out torque} = \frac{\int_{-5\pi/6\rho}^{-\pi/6\rho} -T_{pk} \sin(\rho\theta) d\theta}{-\pi/6\rho - (-5\pi/6\rho)} = 0.83 T_{pk}$$

Είναι το 83% της ροπής στρέψης συγκράτησης.

Πιο πάνω είδαμε την εξάρτηση της ροπής στρέψης συγκράτησης από την μέθοδο διέγερσης. Έτσι προκύπτει το ερώτημα. "Ποία μέθοδο διέγερσης πρέπει να επιλέξουμε ώστε να μεγιστοποιηθεί η ροπή pull out ;". Από το σχήμα 4.1.4 φαίνεται ότι η συνολική ροπή που παράγει ο κινητήρας μεγιστοποιείται εάν κάθε φάση διεγείρεται οποτεδήποτε μπορεί να συνισφέρει μια συνιστώσα θετικής ροπής. Αφού οι χαρακτηριστικές ροπής/ θέσης δρομέα είναι συμμετρικές σε σχέση με τον άξονα του μηδενός, κάθε φάση πρέπει να είναι υπό διέγερση για τον μισό κύκλο διέγερσης. Αυτό αντιστοιχεί στη διέγερση half step για μηχανές με μονό αριθμό φάσεων. Πχ για έναν τριφάσιο κινητήρα η διέγερση γίνεται με την έξης διαδοχή. A, AB, B, BC, C, CA, A,.... . Παρατηρούμε ότι η φάση A είναι υπό διέγερση για τον μισό κύκλο διέγερσης που αρχίζει με την A υπό διέγερση και τελειώνει με τις CA υπό διέγερση. Τα ίδια συμβαίνουν και με τις υπόλοιπες φάσεις.

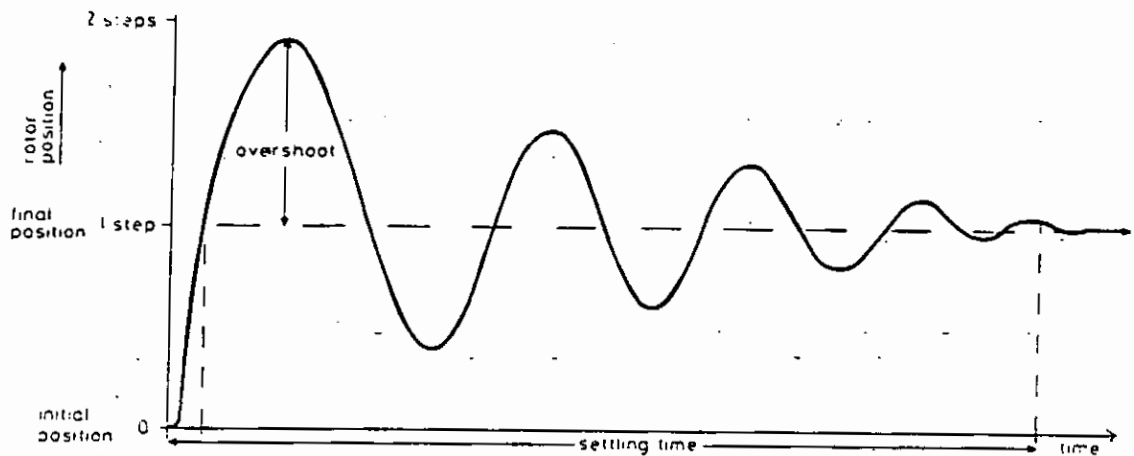


Μηχανές με ζυγό αριθμό φάσεων πρέπει να έχουν τις μισές από τις φάσεις τους υπό διέγερση κάθε στιγμή. Έτσι για υβριδικό κινητήρα η ροπή pull out παίρνει την μέγιστη τιμή της για διέγερση two phase on με την εξής αλληλουχία. A+B+, B+A-, A-B-, B-A+, A+B+,.....

#### 4.2 Μηχανικός συντονισμός

Κατά την λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, ο κινητήρας έρχεται σε ηρεμία στην προβλεπόμενη θέση ισορροπίας μετά από την κάθε μεταβολή στην διέγερση. Η απόκριση του συστήματος στην κάθε μεταβολή στην διέγερση (γνωστή και σαν απόκριση single step) χαρακτηρίζεται ως ταλαντωτική. Μία τυπική απόκριση single step φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.2.1. Σε εφαρμογές που απαιτούν συχνά ακριβή τοποθέτηση του φορτίου αυτή η αργά αποσβηνόμενη απόκριση είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα. Η συχνότητα της ταλάντωσης μπορεί να προβλεφθεί για κάθε συνδιασμό κινητήρα-φορτίο από τις χαρακτηριστικές στατικής λειτουργίας υπό τον όρο ότι το σύστημα έχει χαμηλή ικανότητα στην απόσβεση. Σε μια θέση του δρομέα  $\theta$  από την θέση ισορροπίας η ροπή του κινητήρα είναι ίση με  $-T'\theta$ , όπου  $T'$  είναι η κλίση της χαρακτηριστικής. Εάν δεν υπάρχει ροπή στρέψης εξ' αιτίας του φορτίου τότε αυτή η ροπή χρησιμοποιείται για να επιταχύνει την αδράνεια του συστήματος (κινητήρας- φορτίο). Συνεπώς έχουμε ότι.  $-T'\theta = J(\frac{d^2\theta}{dt^2})$  ή  $J(\frac{d^2\theta}{dt^2}) + T'\theta = 0$ . Αυτή είναι

εξίσωση απλής αρμονικής κίνησης. Έτσι η ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης του δρομέα γύρω από τη θέση ισορροπίας είναι.



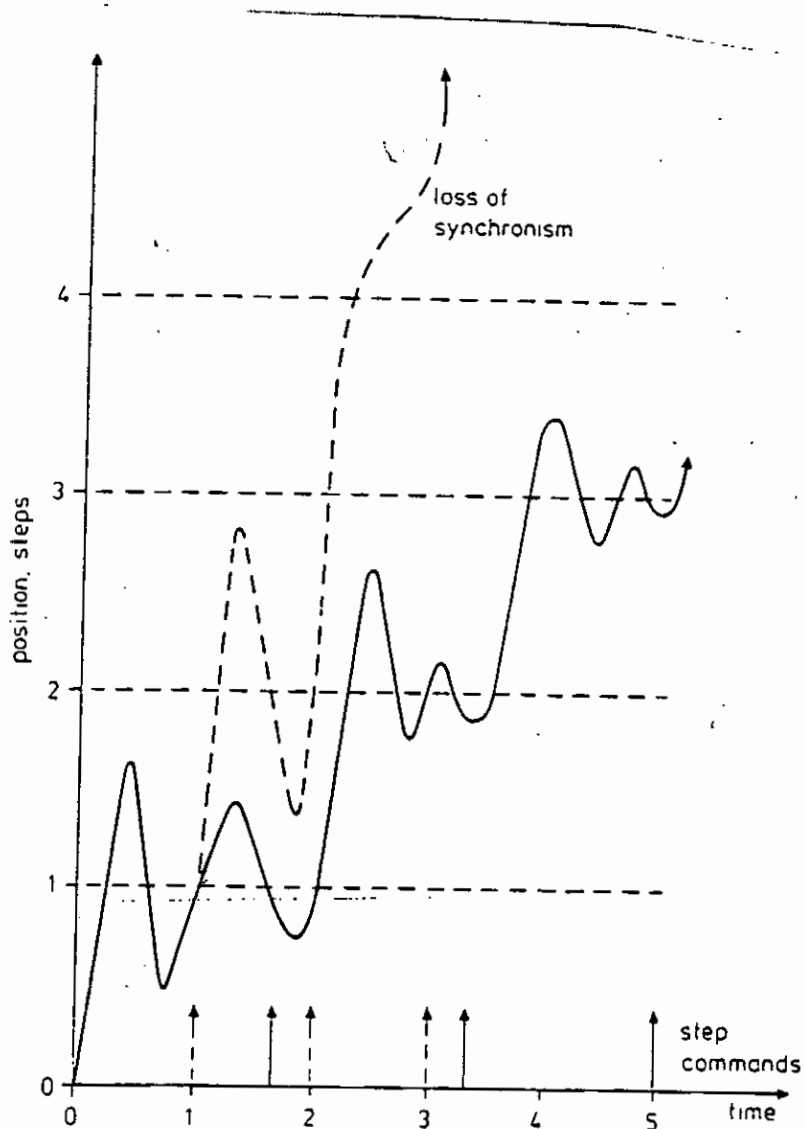
Σχ. 4.2.1 Απόκριση single step

$$\text{ιδιοσυχνότητα} = f_n = (T'/J)^{1/2} / 2\pi.$$

Η παραπάνω ανάλυση γίνεται με την προϋπόθεση ότι δεν έχουμε καθόλου απόσβεση στην ταλαντωτική κίνηση. Στην πράξη υπάρχει μια απόσβεση λόγω των τριβών στο σύστημα οπότε ο δρομέας έρχεται στην θέση ισορροπίας όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.1. Στο ίδιο σχήμα επίσης φαίνονται και οι παράμετροι της απόκρισης single step. Έτσι χρόνος ανόδου (rise time) είναι ο χρόνος που απαιτείται από τον κινητήρα για να φτάσει για πρώτη φορά την προβλεπόμενη θέση

ισορροπίας πράγμα που γίνεται με την μέγιστη ταχύτητα. Συνεπώς το σύστημα ξεπερνά τον "στόχο" αφού ταλαντώνεται σαν ένα εκκρεμές γύρω από την προβλεπόμενη θέση ισορροπίας και το πλάτος της ταλάντωσης εκφράζεται σαν ποσοστό % του συνολικού μήκους βήματος. Τέλος ο χρόνος αποκατάστασης (settling time) είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα ώστε το πλάτος της ταλάντωσης να βρίσκεται στα πλαίσια του 5% σε σχέση με την θέση ισορροπίας. Μία σημαντική συνέπεια της ταλάντωσης αυτής του δρομέα είναι η εμφάνιση φαινομένων συντονισμού για ταχύτητες ίσες με την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης του δρομέα. Το παρακάτω σχήμα 4.2.2, δείχνει δύο διαφορετικές αποκρίσεις του δρομέα που κάθε μια αντιστοιχεί και σε διαφορετική ταχύτητα. Στην πρώτη περίπτωση η ταχύτητα είναι περίπου 0.6 φορές η ιδιοσυχνότητα και γι' αυτό ο δρομέας βρίσκεται πίσω από την προβλεπόμενη θέση ισορροπίας και έτσι έχει χαμηλή ταχύτητα όταν λαμβάνει χώρα η μεταβολή στην διέγερση. Έτσι έχουμε μια ομοιόμορφη απόκριση σε κάθε βήμα. Στην δεύτερη περίπτωση η ταχύτητα είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα και έτσι ο δρομέας βρίσκεται στην θέση ισορροπίας και έχει θετική ταχύτητα στο τέλος του πρώτου βήματος. Σαν αποτέλεσμα αυτής της ταχύτητας η απόκριση στο δεύτερο βήμα θα είναι περισσότερο ταλαντωτική. Ο δρομέας ταλαντώνεται περισσότερο σε σχέση με την θέση ισορροπίας και το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνει όσο εκτελούνται επιτυχώς διαδοχικά βήματα μέχρι που ο δρομέας να φτάσει να προπορεύεται ή να επιπορεύεται από την απαιτούμενη θέση για απόσταση μεγαλύτερη από το ήμισυ της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών δοντιών (δρομέα). Μόλις το πλάτος της ταλάντωσης ξεπεράσει την απόσταση αυτή η ροπή στρέψης που παράγει ο κινητήρας προκαλεί την κίνηση

του δρομέα προς μία εναλλακτική θέση ισορροπίας η οποία απέχει από την αρχική (και αναμενόμενη) θέση απόσταση ίση με το ήμισυ της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών δοντίων δρομέα.



Σχ. 4.2.2 Απόκριση σε συχνότητες κοντά στην ιδιοσυχνότητα του δρομέα

Τώρα έχει χαθεί η αντιστοιχία μεταξύ των μεταβολών στην διέγερση και των θέσεων του δρομέα. Εδώ οι κινητήρες με μεγάλο αριθμό φάσεων έχουν πλεονέκτημα, καθώς το μήκος βήματος είναι μικρό ποσοστό του 1 rotor tooth pitch. Έτσι εδώ μπορούν να "χαθούν" περισσότερα βήματα χωρίς ο κινητήρας να χάσει το συγχρονισμό του. Η συμπεριφορά αυτή του συστήματος οδηγεί στο "χάσιμο" της ροπής του κινητήρα σε συγκεκριμένες ταχύτητες όπως φαίνεται από τα βυθίσματα στις χαρακτηριστικές pull out. Οι ταχύτητες στις οποίες αυτά τα βυθίσματα μπορούν να λάβουν χώρα μπορούν να προβλεφθούν αν η ιδιοσυχνότητα είναι γνωστή. Γενικά ισχύει ότι συχνότητες συντονισμού =  $f_n / \kappa$ , όπου  $f_n$  = ιδιοσυχνότητα και  $\kappa = 1, 2, 3, \dots$ . Έτσι κινητήρας με ιδιοσυχνότητα ίση με 100 Hz αναμένεται να παρουσιάζει βυθίσματα στις συχνότητες των 100, 50, 33, 25 Hz ..., κτλ.

#### 4.3 Απόσβεση

Είναι ανεπιθύμητο το να διακόπτεται η ομαλή λειτουργία του κινητήρα εξ' αιτίας συντονισμού και αστάθειας. Γι' αυτό στα συστήματα με βηματικούς κινητήρες χρησιμοποιούμε διάφορες μεθόδους ώστε να πετυχαίνουμε την απόσβεση των ταλαντώσεων ή τουλάχιστον να τις περιορίζουμε τόσο ώστε να μην επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούμε είναι μηχανικά με μεταβολή της εξωτερικής αδράνειας και τριβής, ηλεκτρικά με

μεταβολή του τύπου διέγερσης καθώς και με χρήση της μεθόδου back phasing .

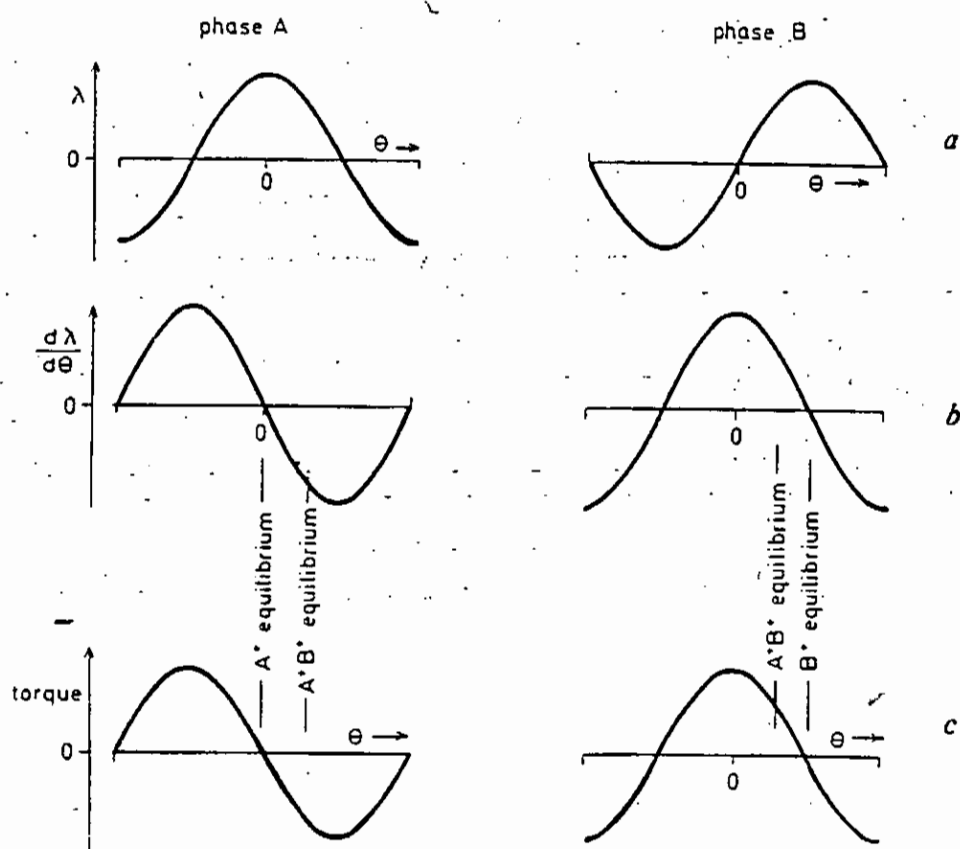
#### Μηχανικά συστήματα απόσβεσης

Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά σε κινητήρες VR, είναι χρήσιμο και κατάλληλο το να χρησιμοποιούμε μηχανικά συστήματα απόσβεσης. Το κυριότερο στοιχείο ενός τέτοιου συστήματος είναι ένας σφόνδυλος ο οποίος συνδέεται με τον άξονά του κινητήρα μέσω τριβής ή υδραυλικά μέσω κάποιου υγρού. Περίπτωση τέτοιου συστήματος απόσβεσης είναι ο VICID.

#### Ηλεκτρομαγνητική απόσβεση

Ο βασικός σκοπός κάθε συστήματος απόσβεσης είναι να εξαγάγει την αποθηκευμένη μηχανική ενέργεια η οποία παρουσιάζεται υπό τη μορφή κινητικής και δυναμικής ενέργειας. Στα συστήματα ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης η μηχανική ενέργεια μεταφέρεται στο ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα και καταναλώνεται στις ωμικές αντιστάσεις του κυκλώματος. Αυτή η μεταφορά επιτυγχάνεται μέσω των τάσεων που επάγονται στα τυλίγματα των φάσεων κατά την τάλαντωση του δρομέα. Αν έχουμε διέγερση μίας φάσης (one phase on) όταν ο δρομέας βρίσκεται στην θέση ισορροπίας η μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι μηδέν. Κατά την ταλάντωση του δρομέα γύρω από τη θέση αυτή έχουμε μικρές μεταβολές της μαγνητικής ροής και τότε η τάση εξ' επαγωγής στα τυλίγματα των φάσεων του κινητήρα θεωρείται αμελητέα. Ας θεωρήσουμε την περίπτωση που έχουμε διέγερση δύο φάσεων (two phase on). Τώρα η θέση ισορροπίας του δρομέα είναι μεταξύ των δύο θέσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν σε διέγερση one phase on, οπότε η μεταβολή της μαγνητικής ροής σε συνάρτηση με τη θέση του δρομέα είναι μεγαλύτερη από πριν (σχήμα 4.3.1).

Οπότε αν ο δρομέας ταλαντώνεται γύρω από αυτή τη θέση ισορροπίας θα εμφανίζεται μια σημαντική τάση εξ' επαγωγής στα τυλίγματα του κινητήρα με συχνότητα ίση με τη συχνότητα της ταλάντωσης. Μέσω αυτής της τάσης γίνεται η εξαγωγή της μηχανικής ενέργειας και επιτυγχάνεται η ηλεκτρομαγνητική απόσβεση.



Σχ. 4.3.1 Μεταβολή της μαγνητικής ροής με τη θέση του δρομέα

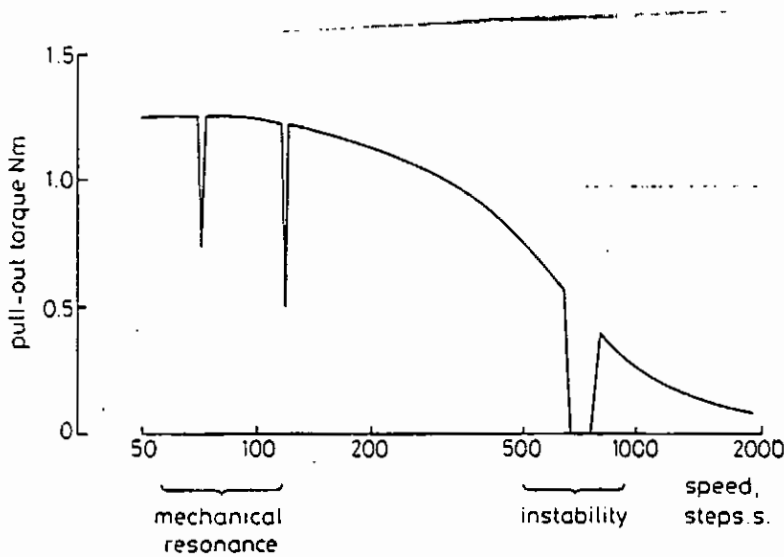
Αυτές οι τάσεις παράγουν a.c. συνιστώσες ρεύματος που επικάθονται στην σταθερή d.c. συνιστώσα του φασικού ρεύματος. Αυτές οι a.c. συνιστώσες προκαλούν επι πλέον απώλειες ισχύος στις ωμικές αντιστάσεις κατά την ταλάντωση του δρομέα οπότε χρειάζεται μηχανική ενέργεια για να καλύψει τις απώλειες αυτές. Εάν η φασική αντίσταση είναι υψηλή η a.c. συνιστώσα δεν θα είναι μεγάλη οπότε και οι απώλειες ισχύος  $I^2R$  θα είναι και αυτές χαμηλές. Αντίθετα αν η αντίσταση είναι χαμηλή η a.c. συνιστώσα θα είναι υψηλή αλλά τότε θα έχουμε "λίγη" ωμική αντίσταση για να καταναλωθεί ισχύς. Για τον υβριδικό βηματικό κινητήρα η βέλτιστη τιμή της αντίστασης της φάσης δίνεται από τη σχέση :  $R = (T / J)^{1/2} L (1+K / 2)$ , όπου  $K$ = συντελεστής με τιμές 0.25 - 1.0

#### Μέθοδος back phasing

Ο συντονισμός και η αστάθεια είναι ταλαντωτικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία του βηματικού κινητήρα. Ο συντονισμός είναι μηχανικό φαινόμενο και εξαρτάται από τον σχεδιασμό του δρομέα, το σχήμα των δοντιών, την αδράνεια του δρομέα αλλά και από το φορτίο. Η αστάθεια σε αντίθεση με τον συντονισμό είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο το οποίο συνήθως εμφανίζεται σε υψηλότερες ταχύτητες. Η επίδραση τέτοιων φαινομένων πάνω στο σύστημα είναι το χάσιμο της ροπής του κινητήρα σε καθορισμένες συχνότητες όπως φαίνεται από τα βυθίσματα στις χαρακτηριστικές pull out (βλέπε σχήμα 4.3.2). Ομοίως με βυθίσματα αναπαρίσταται και η αστάθεια. Η μονάδα SD 1664 διδάσκει το πώς να ξεπερνάμε τις επιδράσεις του συντονισμού. Αυτό γίνεται μέσω του Pulse Positioning System (PPS) . Το σύστημα αυτό παρέχει μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης (back phasing) οπότε έτσι



ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις του συντονισμού και της αστάθειας στο σύστημα. Σύμφωνα με τη μέθοδο back phasing η απόσβεση επιτυγχάνεται προσθέτοντας ένα " μισό βήμα " προς τα πίσω για κάθε "ολόκληρο βήμα " προς τα εμπρός. Συγκεκριμένα πρώτα δίνουμε εντολή στον δρομέα να προχωρήσει ένα βήμα προς τα εμπρός και στη συνέχεια πριν ο δρομέας φτάσει στην προκαθορισμένη θέση δίνουμε νέο παλμό ο οποίος αντιστοιχεί στην κίνησή του δρομέα προς τα πίσω για μισό βήμα και αυτό προκαλεί την επιβράδυνση του δρομέα.



Σχ. 4.3.2 Πεδία συντονισμού και αστάθειας

Μόλις σταματήσει η επιβράδυνση του δρομέα και πριν αυτός αρχίσει να πηγαίνει προς τα πίσω δίνουμε νέο παλμό ο οποίος " κλειδώνει " το δρομέα στη θέση που βρίσκεται. Στη διαδικασία αυτή είναι πολύ

σημαντικό η ρύθμιση του ανάστροφου παλμού να γίνει έτσι ώστε ο δρομέας μόλις που να φτάσει την τελική (προκαθορισμένη) του θέση πρίν ξεκινήσει την ανάστροφη κίνηση. Έτσι ο επόμενος παλμός θα κρατήσει τον δρομέα στην τελική του θέση με την ελάχιστη δύναμη ταλάντωση. Στη μονάδα SD 1664 η απόσβεση μέσω της μεθόδου back phasing γίνεται μέσω των ποτενσιομέτρων PPS. Μέσω αυτών είναι δυνατόν να ρυθμίσουμε το πότε θα εφαρμοσθεί ο ανάστροφος παλμός καθώς και ποία θα είναι η διάρκειά του.

## 5. Μονοπολική και διπολική οδήγηση

### 5.1 Γενικά

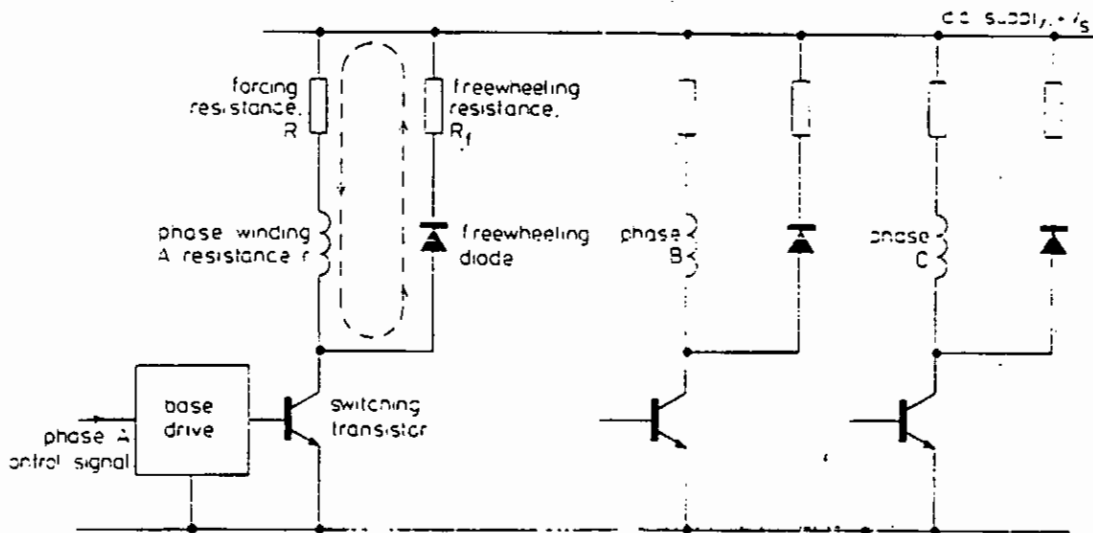
Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχει τουλάχιστον 3 φάσεις, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η περιστροφή του και  $\omega$  και  $c\omega$ . Το ρεύμα στις φάσεις του κινητήρα μας ενδιαφέρει να μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ των φάσεων χωρίς στην περιπτώση αυτή να μας ενδιαφέρει η πολικότητα του ρεύματος στο τύλιγμα. Δηλαδή μας αρκεί ένα ρεύμα μονής κατεύθυνσης. Τα κυκλώματα οδήγησης που παράγουν ρεύματα μονής κατεύθυνσης ονομάζονται μονοπολικά κυκλώματα και η μέθοδος που χρησιμοποιεί τέτοια κυκλώματα μονοπολική οδήγηση (unipolar drive). Στην περίπτωση που έχουμε υβριδικό βηματικό κινητήρα ή κάθε τύπο κινητήρα που περιλαμβάνει μόνιμο μαγνήτη η πολικότητα του ρεύματος είναι σημαντική και εδώ απαιτείται η οδήγηση του κινητήρα να γίνεται από κυκλώματα που παράγουν ρεύματα διπλής κατεύθυνσης. Τα κυκλώματα αυτά ονομάζονται διπολικά και η μέθοδος οδήγησης με τέτοια κυκλώματα διπολική οδήγηση ( bipolar drive ). Καί στις δύο παραπάνω μεθόδους οδήγησης χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί διακόπτες κυρίως τρανζίστορ BJT ( bipolar junction transistor ), MOSFET και IGBT. Όταν το BJT λειτουργεί σαν διακόπτης πρέπει να

έλθει αρχικά σε κατάσταση κόρου ώστε να αρχίσει να άγει. Στην κατάσταση κόρου η ενίσχυση του ρεύματος είναι αμελητέα. Για να σταματήσει να άγει το BJT πρέπει να έλθει σε κατάσταση αποκοπής. Τα ίδια περίπου ισχύουν και για τα MOSFET μόνο που έδω απαιτείται χαμηλότερης ισχύος σήμα για να αρχίσει να άγει το MOSFET σε σχέση με το BJT. Τα IGBT συνήθως αντικαθιστούν τα MOSFET σε περιπτώσεις που έχουμε υψηλές τάσεις και υψηλά ρεύματα.

## 5.2 Μονοπολική οδήγηση

Όπως σημειώσαμε προηγουμένως μονοπολική οδήγηση έχουμε όταν το ρεύμα ρέει μέσα από τα τυλίγματα του κινητήρα με μια κατεύθυνση μόνο. Ένα κύκλωμα κατάλληλο για μονοπολική οδήγηση το οποίο χρησιμοποιείται σε τριφασικό κινητήρα VR φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.2.1. Το τύλιγμα κάθε φάσης του κινητήρα διεγείρεται από ένα ξεχωριστό κύκλωμα οδήγησης, το οποίο ελέγχεται από ένα χαμηλής ισχύος "σήμα ελέγχου φάσης". Το τύλιγμα διεγείρεται μόλις το τρανζιστορ αρχίσει να άγει, έλθει δηλαδή σε κατάσταση κόρου οδηγούμενο από το ρεύμα βάσης. Υπό αυτές τις συνθήκες η συνολική d.c. τάση τροφοδοσίας εφαρμόζεται κατά μήκος του σε σειρά συνδιασμού του τυλίγματος της φάσης και της εξωτερικής ωμικής αντίστασης  $R$ , αφού η πτώση τάσης κατά μήκος του τρανζιστορ όταν αυτό άγει είναι μικρή (περίπου 0.1 V). Η d.c. τάση τροφοδοσίας  $V_s$  έχει

επιλεγεί έτσι ώστε να παράγει την καθορισμένη ένταση ρεύματος  $I$  όταν εφαρμόζεται στην συνολική ωμική αντίσταση της φάσης που είναι ίση με το άθροισμα της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος  $r$  και της εξωτερικής ωμικής αντίστασης  $R$ . Έτσι ισχύει ότι:  $V_s = I(R+r)$ . Η εξωτερική αυτή ωμική αντίσταση τοποθετείται για τον εξής λόγο. Το τύλιγμα της φάσης έχει σχετικά υψηλό συντελεστή αυτεπαγωγής  $L$  οπότε η σταθερά χρόνου του κύκλωματος  $L/r$  είναι μεγάλη.



Σχ. 5.2.1 Μονοπολικό κύκλωμα οδήγησης

Έτσι η αύξηση του ρεύματος στην καθορισμένη τιμή του γίνεται αρκετά αργά για ικανοποιητική λειτουργία του κινητήρα κυρίως στις υψηλές ταχύτητες. Προσθέτοντας την εξωτερική ωμική αντίσταση  $R$ , μαζί με μία ανάλογη αύξηση στην τάση τροφοδοσίας ελαττώνουμε την σταθερά

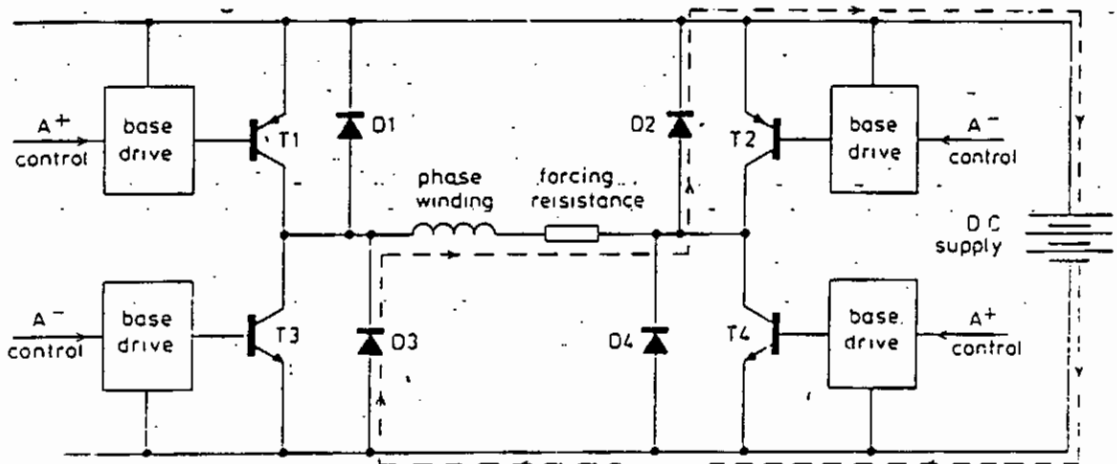
χρόνου του κυκλώματος σε  $L / (R+r)$  πετυχαίνοντας έτσι καλύτερη λειτουργία του κινητήρα σε ευρύτερη περιοχή ταχυτήτων. Πράγματι για τάση τροφοδοσίας  $V_s$ , αυτεπαγωγή  $L$  και ωμική αντίσταση τυλίγματος  $r$  η αύξηση του ρεύματος στο τύλιγμα γίνεται εκθετικά σύμφωνα με την σχέση  $i = V_s / r (1 - e^{-\omega t})$ . Η σταθερά χρόνου  $L / r$  δείχνει το χρόνο που χρειάζεται το ρεύμα για να πάρει το 63% της τελικής τιμής του στο τύλιγμα  $V_s / r$ . Έτσι για ένα τύλιγμα σχεδιασμένο για 5V, 2A με  $r = 2.5 \Omega$  και  $L = 8 \text{ mH}$  έχουμε ότι η σταθερά χρόνου είναι  $8 \text{ mH} / 2.5 \Omega = 3.2 \text{ ms}$ . Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα παίρνει την τελική τιμή του μετά από χρόνο 5ms. Έτσι για να λειτουργεί ικανοποιητικά ο κινητήρας θα πρέπει η ταχύτητά του να περιοριστεί στα 200 steps/sec, ταχύτητα σχετικά μικρή. Εάν προσθέσουμε εξωτερική ωμική αντίσταση  $R=10\Omega$  και τώρα η τάση τροφοδοσίας γίνει 25V, η νέα σταθερά χρόνου του τυλίγματος θα είναι  $8 \text{ mH} / (10 + 2.5) \Omega = 0,64 \text{ msec}$ . Έτσι τώρα ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 1000 steps/sec. Όμως παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι η απλούστερη έχει το μειονέκτημα των μεγάλων απωλειών ισχύος στις ωμικές αντιστάσεις. Μία άλλη συνέπεια της αυτεπαγωγής του τυλίγματος είναι το ότι το φασικό ρεύμα δεν μπορεί να διακοπεί ακαριαία. Όταν το τρανζίστορ σταματήσει να άγει τότε το ρεύμα αμέσως πηγαίνει στο μηδέν και επομένως η κλίση  $di/dt$  πηγαίνει στο μείον άπειρο. Επειδή όμως η τάση της αυτεπαγωγής είναι ίση με  $L(di/dt)$ , τότε η τάση αυτή γίνεται άπειρη. Η τάση αυτή εμφανίζεται μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού του τρανζίστορ και είναι πολύ πιθανό να το καταστρέψει. Η πιθανότητα αυτή αποφεύγεται με την παροχή ενός εναλλακτικού "μονοπατιού" για το ρεύμα γνωστό σαν κύκλωμα ελευθέρως διέλευσης. Μόλις το τρανζίστορ σταματήσει να άγει το φασικό ρεύμα μπορεί να συνεχίσει να

ρέει δια μέσου του μονοπατιού αυτού το οποίο παρέχουν η δίοδος ελευθέρως διέλευσης (με την πολικότητα του σχήματος ) και η ωμική αντίσταση ελευθέρως διέλευσης  $R_f$ . Δηλαδή το ρεύμα του φορτίου δεν διακόπτεται με το άνοιγμα του διακόπτη και επομένως το πρόβλημα της άπειρης τάσης δεν παρουσιάζεται. Έτσι εάν το ρεύμα είχε πάρει την καθορισμένη τιμή του στο τύλιγμα η μέγιστη τάση μεταξύ συλλέκτη - εκπομπού στο τρανζίστορ  $V_{ce \max}$  εμφανίζεται τη στιγμή που το τρανζίστορ παύει να άγει. Είναι  $V_{ce \max} = V_s + R_f I$ , αν αμελήσουμε την πτώση τάσης κατά μήκος της διόδου. Αυτή είναι η τάση που εμφανίζεται στο τρανζίστορ και όχι η άπειρη τάση της αυτεπαγωγής. Στη συνέχεια το ρεύμα αποσβαίνεται στο κύκλωμα ελευθέρως διέλευσης. Όσο πιά μεγάλη είναι η τιμή της  $R_f$  τόσο γρηγορότερα αποσβαίνει το ρεύμα αλλά τότε αυξάνει και το δυναμικό του συλλέκτη οπότε τότε θα χρειαστούμε τρανζίστορ για αντοχή σε μεγαλύτερη τάση.

### 5.3 Διπολική οδήγηση.

Στο σχήμα 5.3.1 φαίνεται το διπολικό κύκλωμα οδήγησης το οποίο αναφέρεται στην οδήγηση μιας φάσης βηματικού κινητήρα, συνήθως υβριδικού ή κινητήρα μόνιμου μαγνήτη. Το κύκλωμα αυτό έχει την ονομασία bridge driver (γέφυρα). Τα τρανζίστορ άγουν σε ζεύγη σύμφωνα με την επιθυμητή πολικότητα του ρεύματος στο τύλιγμα της φάσης. Έτσι για "θετική" διέγερση του τυλίγματος τα τρανζίστορ που

άγουν είναι τα T1 και T4, έτσι ώστε το ρεύμα να κυκλοφορήσει από την πηγή, διαμέσω του T1 στο τύλιγμα και στην σε σειρά ωμική αντίσταση και διαμέσω του T4 πίσω στην πηγή. Στην αντίθετη περίπτωση άγουν τα T2 και T3 οπότε και αντιστρέφεται η κατεύθυνση του ρεύματος στο τύλιγμα. Μια γέφυρα από τέσσερις διόδους είναι συνδεδεμένη αντιπαράλληλα με τα τρανζίστορ, παρέχοντας το μονοπάτι για τα ρεύματα ελεύθερας διέλευσης. Στην περίπτωση που εξετάζουμε αμέσως μετά το σβήσιμο των T1 και T4 το ρεύμα ακολουθεί το μονοπάτι μέσω των διόδων D2 και D3.



Σχ. 5.3.1 Κύκλωμα γέφυρας για διπολική οδήγηση

Το μονοπάτι αυτό συμπεριλαμβάνει και την πηγή τροφοδοσίας οπότε ένα ποσοστό της ενέργειας που αποθηκεύτηκε στην αυτεπαγωγή κατά το χρονικό διάστημα που ήταν κλειστοί οι διακόπτες T1 και T4 επιστρέφει στην τροφοδοσία. Η επιφερόμενη βελτίωση στην συνολική απόδοση του συστήματος αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα της

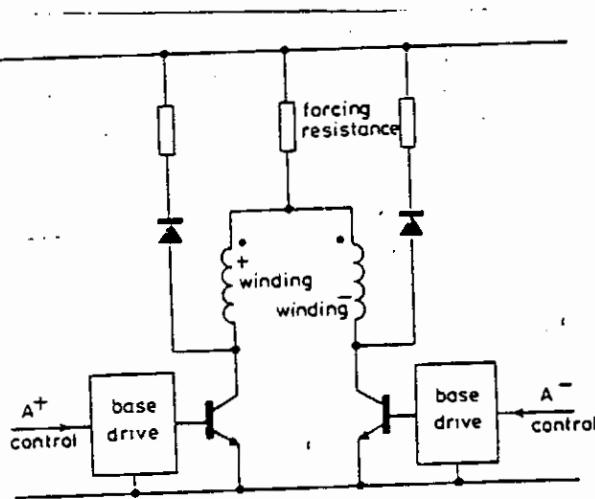


διπολικής οδήγησης σε σχέση με την μονοπολική οδήγηση. Πράγματι η απόδοση του κινητήρα είναι μεγαλύτερη εάν όλα τα τυλίγματα του είναι συνεχώς υπό διέγερση, σε σχέση με την περίπτωση κατά την οποία το κάθε τύλιγμα διεγείρεται μόνο για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα. Για το λόγο αυτό βηματικοί κινητήρες μεγάλης ισχύος (1KW), συμπεριλαμβανομένων και κινητήρων VR, τροφοδοτούνται από διπολικά κυκλώματα. Τα ρεύματα ελευθέρως διέλευσης κατά την διπολική οδήγηση αποσβαίνουν γρηγορότερα απ' ό τι στην μονοπολική οδήγηση αφού αντιτίθενται στην συνεχή τάση τροφοδοσίας. Έτσι εδώ δέν είναι απαραίτητο το να συμπεριλάβουμε πρόσθετες αντιστάσεις ελευθέρως διέλευσης.

#### 5.4 Τα " διπλά " τυλίγματα

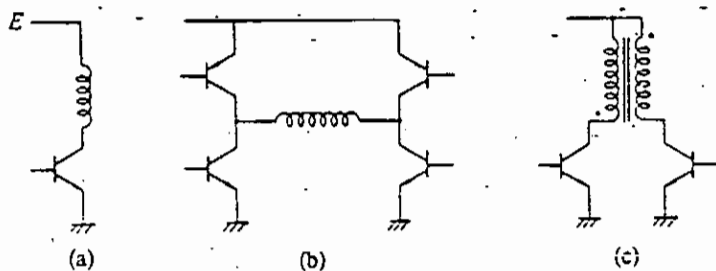
Ο ορισμός που δίνεται για τα " διπλά " τυλίγματα ( bifilar windings ) είναι ο εξής. Bifilar winding = περιέληξη από δύο μονωμένους αγωγούς πλάι - πλάι ώστε το ρεύμα μέσω αυτών να ρέει αντίθετα. Παραπάνω είδαμε ότι το κύκλωμα της γέφυρας απαιτεί τέσσερα ζευγάρια τρανζίστορ / διόδων για την οδήγηση κάθε φάσης, ενώ ένα απλό μονοπολικό κύκλωμα οδήγησης απαιτεί μόνο ένα ζεύγος ανά φάση. Συνεπώς το κόστος του κυκλώματος οδήγησης στην πρώτη περίπτωση είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι στην δεύτερη. Για παράδειγμα ένας διφασικός υβριδικός κινητήρας για να οδηγηθεί από bridge driver

απαιτούνται οκτώ ζεύγη τρανζίστορ / διόδων, αλλά ένας τριφάσικος κινητήρας VR μπορεί να οδηγηθεί μόνο από τρία ζεύγη τρανζίστορ / διόδων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε το διπλό τύλιγμα για τη διέγερση του οποίου χρησιμοποιούμε μονοπολικά κυκλώματα οδήγησης. Η ροή ρεύματος διπλής κατεύθυνσης σε ένα τύλιγμα παράγει ένα αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο διπλής κατεύθυνσης στους πόλους του στάτη του κινητήρα. Με το διπλό τύλιγμα το ίδιο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με δύο περιελίξεις οι οποίες γίνονται κατά την αντίθετη έννοια.



Σχ. 5.4.1 Μονοπολικό κύκλωμα οδήγησης για μια φάση κινητήρα με bifilar windings

Ανάλογα με την επιθυμητή κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μία από τις δύο περιελίξεις που αποτελούν το διπλό τύλιγμα διεγείρεται από ένα ρεύμα μονής κατεύθυνσης. Στο σχήμα 5.4.1 φαίνεται ότι το πεδίο που παράγεται από ένα " θετικό " ρεύμα σε ένα συμβατικό τύλιγμα, το ίδιο πεδίο παράγεται από την διέγερση της περιέλιξης ( + ) του διπλού τυλίγματος από θετικό ρεύμα, ενώ το πεδίο που παράγεται από ένα " αρνητικό " ρεύμα σε συμβατικό τύλιγμα παράγεται από την διέγερση της περιέλιξης ( - ) του διπλού τυλίγματος επίσης από θετικό ρεύμα. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω το bifilar winding για μία φάση μπορεί να διεγείρεται από ξεχωριστά μονοπολικά κυκλώματα όπως αυτά που εξετάσαμε στην παράγραφο της μονοπολικής οδήγησης. Όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το κύκλωμα του σχήματος όπου έχουμε κοινή την εξωτερική ωμική αντίσταση που χρησιμεύει για την ταχύτερη αύξηση και απόσβεση του ρεύματος. Συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι η διέγερση των φάσεων σε ένα βηματικό κινητήρα μπορεί να γίνει με μία από τις τρεις μεθόδους που φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 5.4.2.



Σχ. 5.4.2 Βασικά κυκλώματα διέγερσης

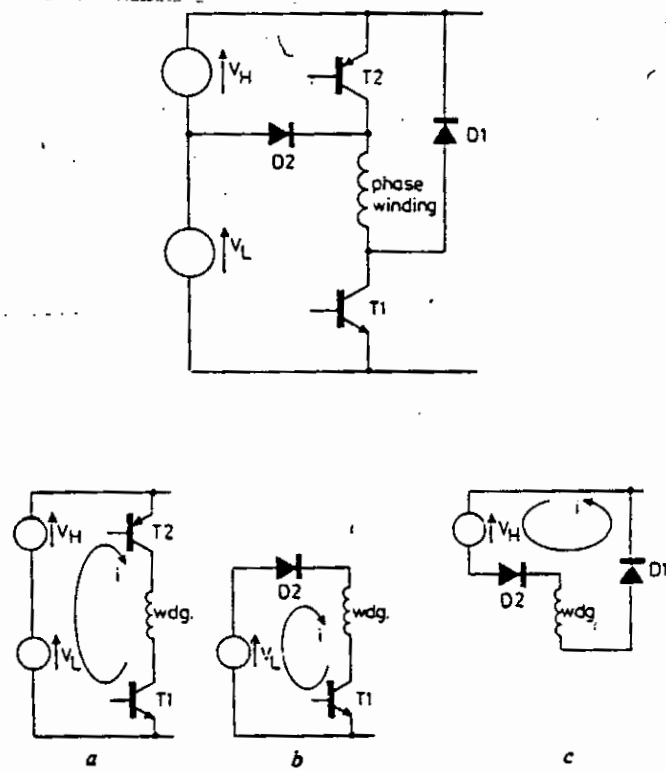
Εαν συμβατικό τύλιγμα χρησιμοποιείται στην περίπτωση (α), τότε η πολικότητα είναι πάντα βόρεια ή νότια. Εδώ η πολικότητα δεν εναλλάσσεται. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μονοπολική διέγερση και χρησιμοποιείται ευρέως σε κινητήρες VR. Στο κύκλωμα (β), το οποίο είναι γνωστό σαν γέφυρα, η κατεύθυνση του ρεύματος στο τύλιγμα μπορεί και εναλλάσσεται. Εδώ όμως απαιτούνται τέσσερις διακόπτες ανά φάση. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται σαν διπολική διέγερση. Το κύκλωμα (c) δείχνει το κύκλωμα οδήγησης ενός bifilar winding. Οι δύο μικρές τελείες σημαίνουν ότι το ένα τύλιγμα διεγείρει ένα βόρειο πόλο ενώ το άλλο ένα νότιο πόλο, ενώ το ρεύμα είναι μονής κατεύθυνσης. Έτσι εδώ πετυχαίνουμε διπολική διέγερση (οδήγηση) από μονοπολικά κυκλώματα άρα ελαττώνουμε και τον αριθμό των διακοπών.

## 6. Κυκλώματα οδήγησης

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο βασικά κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για να αυξήσουν την απόδοση του κινητήρα στις υψηλές ταχύτητες.

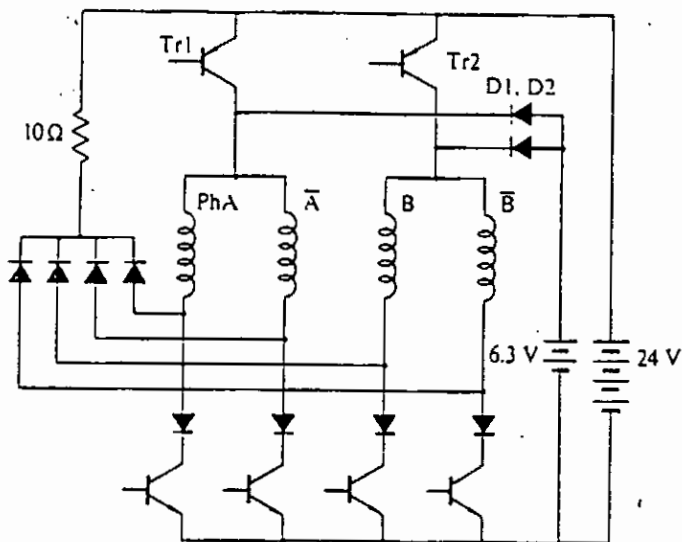
### 6.1 Οδήγηση διπλής τάσης (bilevel drive )

Στο κύκλωμα αυτό έχουμε δύο τάσεις τροφοδοσίας. Μία υψηλή τάση τροφοδοσίας χρησιμοποιείται όταν το ρεύμα στο τυλίγμα της φάσης αρχίζει να ρέει αλλά και κατά την διακοπή του, ενώ μία χαμηλότερη τάση διατηρεί το ρεύμα στην καθορισμένη τιμή του για το διάστημα κατά το οποίο η φάση είναι υπό διέγερση. Στο παρακάτω σχήμα 6.1.1 φαίνεται ο bilevel driver για μονοπολική οδήγηση. Όταν θέλουμε να διεγερθεί η αντίστοιχη φάση άγουν και τα δυο τρανζίστορ T1 και T2 συνεπώς η τάση που εφαρμόζεται στο τυλίγμα της φάσης είναι ίση με το άθροισμα των δύο τάσεων τροφοδοσίας ( $V_L + V_H$ ) Εδώ η διόδος D2 είναι πολωμένη ανάστροφα λόγω της τάσης  $V_H$  αφού η κάθοδος της διόδου είναι σε υψηλότερο δυναμικό από την άνοδο. Εδώ δεν υπάρχει σε σειρά με το τυλίγμα αντίσταση περιορισμού ρεύματος το οποίο (ρεύμα) έτσι αρχίζει να αυξάνει προς μία τιμή η οποία είναι πολλαπλάσια της καθορισμένης τιμής του. Όμως μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα το τρανζίστορ T2 παύει να άγει και έτσι το ρεύμα ρέει από την πηγή τροφοδοσίας  $V_L$ , δια μέσω της διόδου D2 που τώρα είναι πολωμένη ορθά και μέσω του T1. Επίσης το ρεύμα στο τυλίγμα διατηρείται στην καθορισμένη τιμή του με την βοήθεια της τάσης  $V_L$  η οποία έχει επιλεγεί έτσι ώστε  $V_L / r = \text{rated current}$ , όπου  $r = \eta$  ωμική αντίσταση του τυλίγματος. Στο τέλος του διαστήματος διέγερσης της φάσης το τρανζίστορ T1 παύει να άγει και τώρα το ρεύμα ρέει διαμέσου των διόδων D1 και D2.



Σχ. 6.1.1 Η οδήγηση διπλής τάσης

Εδώ θεωρούμε ότι η απόσβεση του ρεύματος γίνεται πολύ γρήγορα καθώς η τάση  $V_H$  συμπεριλαμβάνεται στο κύκλωμα ελεύθερας διέλευσης.



Σχ. 6.1.2 *Bilevel driver* για οδήγηση διφασικού υβριδικού κινητήρα με διέγερση *two phase on*

Εδώ ο πιο βασικός λόγος που χρησιμοποιούμε την υψηλή τάση τροφοδοσίας είναι για να μειωθεί ο χρόνος στον οποίο το ρεύμα πέρνει την καθορισμένη τιμή του στο τύλιγμα. Από την σχέση  $E = L(di/dt)$ ,

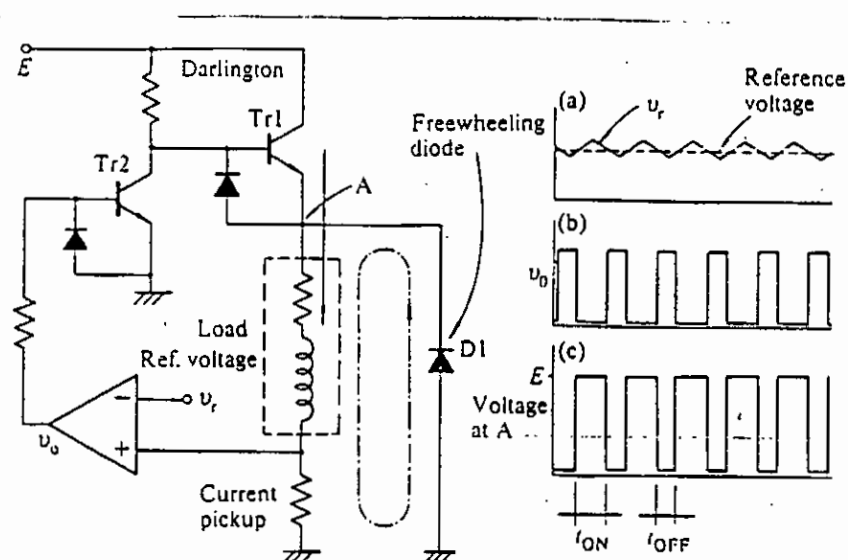
έχουμε ότι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος είναι ανάλογος με την τάση με σταθερά αναλογίας  $L$ . Συνεπώς για μια ραγδαία μεταβολή του ρεύματος χρειάζεται η εφαρμογή μίας πολύ μεγάλης τάσης. Έτσι για ένα τυλίγμα με  $L = 8\text{mH}$ , η εφαρμογή τάσης  $V_H = 50\text{V}$  σημαίνει ότι ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος είναι  $50/8 = 6,25 \text{ A/msec}$  αν αμελήσουμε την πτώση τάσης κατά μήκος της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος. Έτσι το ρεύμα φτάνει στην καθορισμένη τιμή του (2A) μετά από 0.3 msec χρόνος αρκετά μικρότερος από αυτόν που πετυχαίνουμε με τα " συμβατικά " κυκλώματα οδήγησης. Αν η ωμική αντίσταση του τυλίγματος είναι  $2,5 \Omega$ , το ρεύμα αν η τάση  $V_H$  διατηρηθεί θα φτάσει στα 20 A καταστρέφοντας τον κινητήρα. Έτσι τώρα με τον τρόπο που περιγράφηκε η τάση γίνεται  $V_L = 5\text{V}$  ακριβώς τη στιγμή που το ρεύμα φτάνει στα 2A. Στο πιο πάνω σχήμα 6.1.2 διακρίνεται ο bilevel driver για διφασικό υβριδικό κινητήρα με διέγερση two phase on.

## 6.2 Chopper driver

Ο βασικός τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.2.1.



Εδώ το επαγωγικό φορτίο που είναι τροφοθετημένο μέσα στο τετράγωνο από τις διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύει ένα πλήρες μονοπολικό κύκλωμα οδήγησης. Η τάση που λαμβάνεται στην ωμική αντίσταση pick up συγκρίνεται με την τάση αναφοράς μέσω ενός τελεστικού ενισχυτή που λειτουργεί σαν συγκριτής με υψηλό κέρδος. Η τάση αναφοράς είναι το άθροισμα μίας τριγωνικής ή ημιτονικής συνιστώσας υψηλής συχνότητας και μίας DC συνιστώσας με την οποία ουσιαστικά συγκρίνεται η τάση που λαμβάνουμε στην αντίσταση pick up.

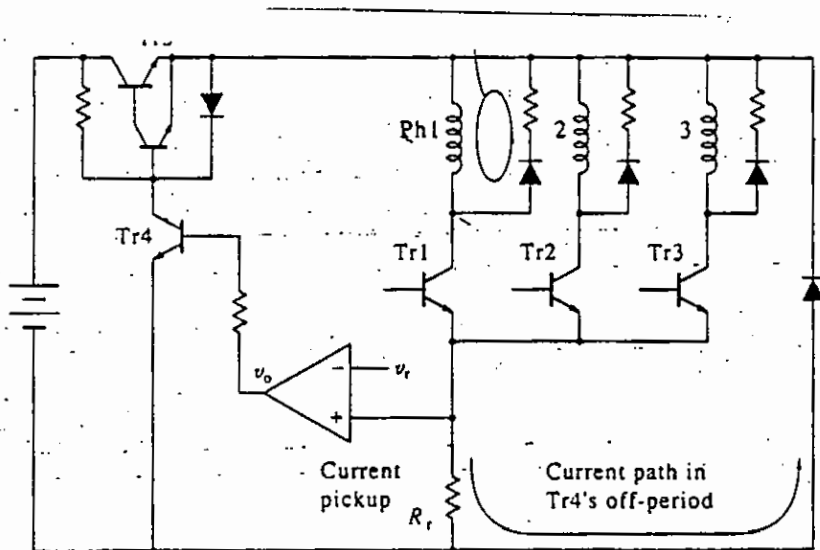


Σχ. 6.2.1 Chopper driver και κυματομορφές

Εάν η DC συνιστώσα της τάσης αναφοράς και η τάση pick up πάρουν σχεδόν την ίδια τιμή, η κυματομορφή της εξόδου του ενισχυτή θα είναι

ένας τετραγωνικός παλμός όπως φαίνεται στο σχήμα. Επειδή το κέρδος του ενισχυτή είναι μεγάλο η τάση εξόδου παίρνει τιμές που μπορούν να οδηγήσουν ένα τρανζίστορ από τον κόρο στην αποκοπή και αντίστροφα. Το σήμα της εξόδου του ενισχυτή αντιστρέφεται από το T2 (που είναι σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού) και στη συνέχεια τροφοδοτείται στην βάση του T1 έτσι ώστε να το οδηγήσει στην λειτουργία ON / OFF. Όταν το τρανζίστορ T1 άγει (καταστάση ON) το ρεύμα κυκλοφορεί από την πηγή τροφοδοσίας στο φορτίο, δηλαδή στο τύλιγμα του κινητήρα ενώ όταν το T1 δεν άγει (κατάσταση OFF) το ρεύμα στο φορτίο συνεχίζει να ρέει μέσω της διόδου ελευθέρως διέλευσης D1. Με τον τρόπο αυτό η τάση στο φορτίο "τεμαχίζεται" γι' αυτό το κυκλώμα ονομάζεται chopper. Σημαντικό πλεονέκτημα του chopper είναι το ότι το ρεύμα παίρνει και διατηρεί την καθορισμένη τιμή του στο κύκλωμα αρκετά γρήγορα και με τη χρήση μίας μόνο πηγής τροφοδοσίας, ενώ και οι απώλειες ισχύος είναι χαμηλές. Στο παρακάτω σχήμα 6.2.2 φαίνεται αναλυτικά ο chopper driver. Μόλις το T1 αρχίζει να άγει (μην μπερδευτεί με το T1 του προηγούμενου σχήματος) το ρεύμα αρχίζει να ρέει στο τύλιγμα και επίσης να πλησιάζει την καθορισμένη τιμή του. Όμως η τάση στην αντίσταση  $R_r$  δεν ξεπερνά την τάση αναφοράς οπότε τα T4 και T5 άγουν άρα η τάση τροφοδοσίας συνεχίζει να εφαρμόζεται στο τύλιγμα και αυτό συμβαίνει μέχρι την χρονική στιγμή που η ένταση του ρεύματος ξεπερνά για πρώτη φορά την καθορισμένη τιμή. Τότε τα T4 και T5 παύουν να άγουν και το ρεύμα αρχίζει να πέφτει. Έτσι το ρεύμα τώρα βρίσκεται σε μία περιοχή τιμών γύρω από την τιμή  $V_r / R_r$  οπότε τα T4 και T5 οδηγούνται σε κατάσταση ON / OFF. Όταν το T1 σβήσει το ρεύμα της φάσης αποσβαίνει στον

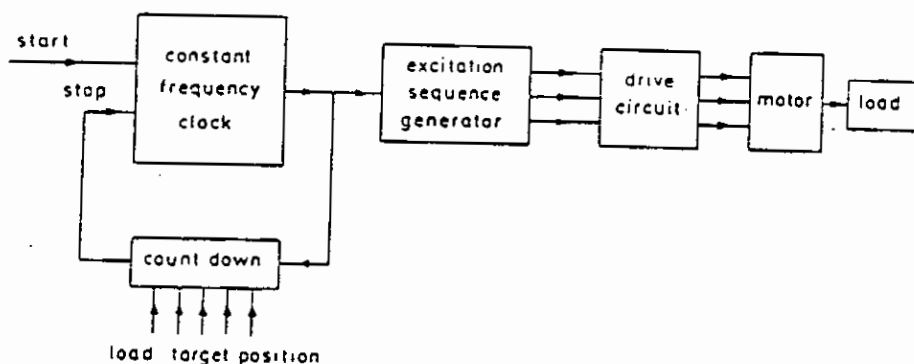
κλάδο ελευθέρας διέλευσης που είναι τοποθετημένος παράλληλα στο τύλιγμα.



Σχ. 6.2.2 Chopper driver

## 7. Έλεγχος ανοικτού βρόχου

Ο βηματικός κινητήρας χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για προγραμματιζόμενο έλεγχο. Ο σκοπός είναι να επιτευχθεί η σωστή τοποθέτηση του φορτίου του άξονα του κινητήρα. Εδώ ο κινητήρας δεν εργάζεται μόνος αλλά είναι μέρος ενός συστήματος μέσω του οποίου γίνεται η σωστή τοποθέτηση του φορτίου του άξονα του κινητήρα. Στα συστήματα αυτά συνήθως δεν απαιτείται ανάδραση ούτε για τον έλεγχο της θέσης του άξονα ούτε για τον έλεγχο της ταχύτητας. Πρόκειται δηλαδή για συστήματα ανοικτού βρόχου. Μια απλή και συνηθισμένη μορφή τέτοιου συστήματος είναι ένα σύστημα μέσω του οποίου εφαρμόζεται μια σταθερή ταχύτητα στον κινητήρα μέχρι την στιγμή που το φορτίο του άξονα του φτάσει στην προκαθορισμένη θέση. Τις περισσότερες φορές η περιστροφή του κινητήρα ξεκινάει από μία χαμηλή ταχύτητα και ακολουθεί επιτάχυνση του κινητήρα στην τελική ταχύτητα περιστροφής. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 7.1.



Σχ. 7.1 Σύστημα ελέγχου βηματικού κινητήρα ανοικτού βρόχου

Η γεννήτρια μέσω της οποίας γίνεται η διαδοχή στην διέγερση των φάσεων παράγει τα σήματα ελέγχου φάσης και διεγείρεται από τους παλμούς εντολής οι οποίοι με τη σειρά τους προέρχονται από μία παλμογεννήτρια (clock) σταθερής συχνότητας. Αυτό το " ρολόι " εκκινεί από το σήμα START και το αποτέλεσμα είναι ο κινητήρας να τρέχει με μία ταχύτητα ίση με τη συχνότητα της παλμογεννήτριας. Για να σταματήσει το ρολόι εφαρμόζεται το σήμα STOP οπότε σταματάει η λειτουργία του κινητήρα. Από τα παραπάνω μπορούμε να πούμε πώς το σύστημα ανοικτού βρόχου αποτελείται από τρεις κύριες βαθμίδες. Η πρώτη βαθμίδα είναι η παλμογεννήτρια (ρολόι) η οποία παράγει τους παλμούς οι οποίοι στέλνονται στην είσοδο της δεύτερης βαθμίδας που είναι η γεννήτρια διαδοχής (excitation sequence generator). Αυτή η βαθμίδα μπορεί να ονομαστεί και "λογικός ακολουθητής " (Logic sequencer). Ο λογικός ακολουθητής είναι ένα λογικό κύκλωμα το οποίο ελέγχει την διέγερση των τυλιγμάτων σειριακά, ανταποκρινόμενο στους παλμούς εντολής βήματος, δηλαδή στην έξοδο της παλμογεννήτριας. Η έξοδος του λογικού ακολουθητή δίνεται σαν είσοδος στον motor driver. Συνεπώς η τρίτη βαθμίδα του συστήματος (motor driver) είναι η βαθμίδα που ανταποκρινόμενη στις εξόδους του ακολουθητή καθορίζει το αν θα περάσει ρεύμα από το τυλιγμα μιάς φάσης του κινητήρα ή όχι, ελέγχει δηλαδή την παροχή του ρεύματος στον κινητήρα. Η πιο απλή μέθοδος σύνδεσης της μίας βαθμίδας με την άλλη είναι η απ' ευθείας σύνδεση. Εάν η συχνότητα της παλμογεννήτριας είναι πολύ υψηλή τότε ο κινητήρας είναι ανίκανος να επιταχύνει την αδράνεια του φορτίου που είναι τοποθετημένο στον αξονά του στην αντίστοιχη ταχύτητα οπότε το σύστημα είτε αποτυγχάνει εντελώς να λειτουργήσει ή χάνει βήματα

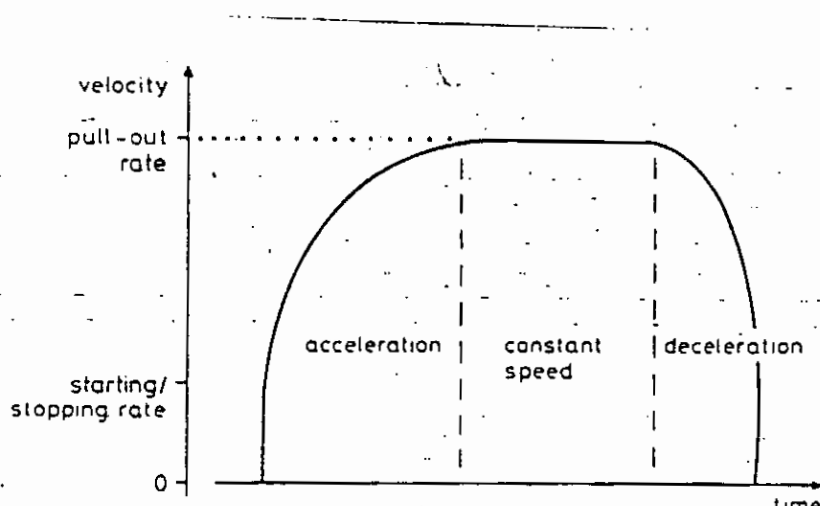
κατά την εκκίνηση. Η μέγιστη ταχύτητα στην οποία ο κινητήρας μπορεί να ανταποκριθεί χωρίς να χάνει βήματα ενώ βρίσκεται αρχικά σε στάση ονομάζεται *starting rate*. Στη συνέχεια ακολουθεί επιτάχυνση στην ταχύτητα *pull out rate* που θεωρείται σαν η σταθερή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Ομοίως η ταχύτητα *stopping rate* είναι η μέγιστη ταχύτητα στην οποία μπορούμε να διακόψουμε την λειτουργία του κινητήρα χωρίς αυτός να ξεπεράσει την προκαθορισμένη θέση. Συνήθως οι ταχύτητες *starting / stopping rate* ταυτίζονται ή υπάρχει πολύ μικρή διαφορά μεταξύ τους. Η ταχύτητα *starting rate* υπολογίζεται θεωρητικά με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών στατικής λειτουργίας.

$$\text{Proκύπτει η σχέση } \text{Starting rate} = [(T_M - T_L) / J (\theta_s - \theta_0)]^{1/2}$$

(βλ. παράρτημα).

Το γράφημα της ταχύτητας σε σχέση με το χρόνο καθώς ο κινητήρας μετακινείται μεταξύ αρχικής και τελικής θέσης είναι κοινώς γνωστό σαν "προφίλ ταχύτητας" (*velocity profile*). Σχετικό είναι το σχήμα 7.2. Ένας τρόπος για την παραγωγή των προφίλ ταχύτητας είναι με την χρήση ενός ταλαντωτή ελεγχόμενου από τάση. Η τάση αυτή παράγεται από ένα αναλογικό κύκλωμα. Στο κύκλωμα του σχήματος 7.3 βλέπουμε ότι προφίλ ταχύτητας με γραμμική επιτάχυνση και επιβράδυνση παράγονται μέσω της ολοκλήρωσης ενός σήματος το οποίο υφίσταται όταν ο κινητήρας πρόκειται να επιταχυνθεί και παύει να υφίσταται όταν είναι απαιτούμενη η επιβράδυνση του κινητήρα. Με τον κινητήρα αρχικά σε στάση η προκαθορισμένη θέση φορτώνεται σε έναν αντίστροφο μετρητή και στη συνέχεια το σήμα START εφαρμόζεται και στις δύο εισόδους της πύλης AND. Τότε η είσοδος του ολοκληρωτή ολισθαίνει από την κατάσταση LOW στην κατάσταση HIGH και έτσι ξεκινάει η ολοκλήρωση. Η σταθερά χρόνου του ολοκληρωτή είναι

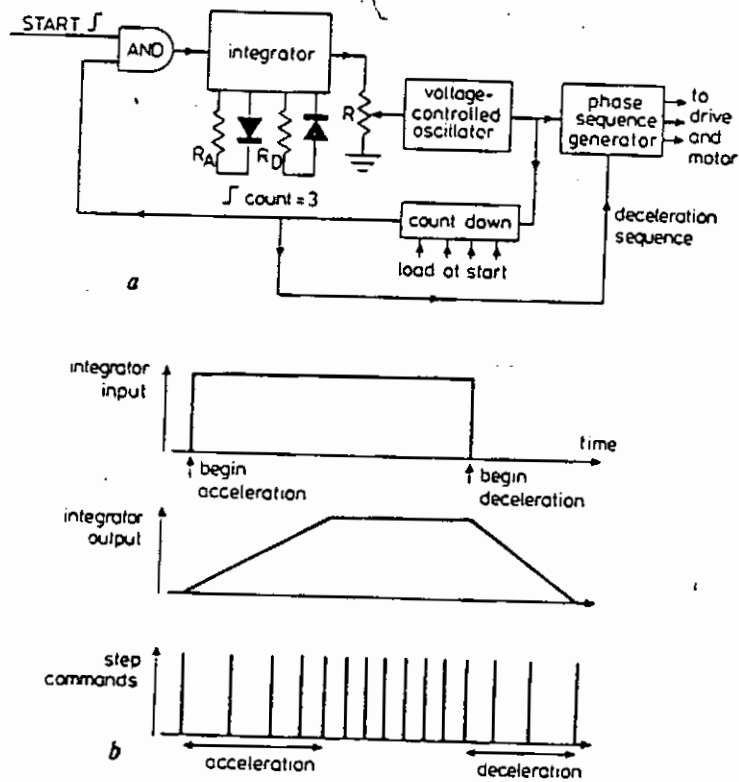
μεταβαλλόμενη και ρυθμίζεται μέσω της χρονικά ρυθμιζόμενης αντίστασης  $R_A$  ώστε να πάρουμε τον απαιτούμενο ρυθμό επιτάχυνσης (ποτενσιόμετρο acc στον driver). Τότε η είσοδος στον ταλαντωτή θα είναι μια γραμμική "ράμπα" με την κατάλληλη κλίση.



Σχ. 7.2 Velocity profile σε έναν βηματικό κινητήρα

Ο ταλαντωτής τότε παράγει τους παλμούς εντολής βήματος σε έναν γραμμικά αυξανόμενο ρυθμό. Το ποτενσιόμετρο  $R$  ρυθμίζεται ώστε να μεταβάλλει την μέγιστη τάση εισόδου του ταλαντωτή και έτσι ελέγχει την ταχύτητα ως προς την μέγιστη τιμή της. Οι παλμοί απο την έξοδο του ταλαντωτή πηγαίνουν στην επόμενη βαθμίδα του συστήματος αλλά επίσης και στον αντίστροφο μετρητή, ο οποίος καταγράφει την στιγμιαία τοποθέτηση του συστήματος σε σχέση με το στόχο. Σε ένα προκαθορισμένο αριθμό βημάτων απο το στόχο ο αντίστροφος μετρητής στέλνει σήμα LOW στην μία είσοδο της πύλης AND οπότε και η έξοδος της πύλης γίνεται LOW. Τότε η έξοδος του ολοκληρωτή

ακολουθεί την πορεία που φαίνεται στο σχήμα. Οι ρυθμοί της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους γιατί οι αντιστάσεις  $R_A$  και  $R_D$  (ποτενσιόμετρο dec στον driver) είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.

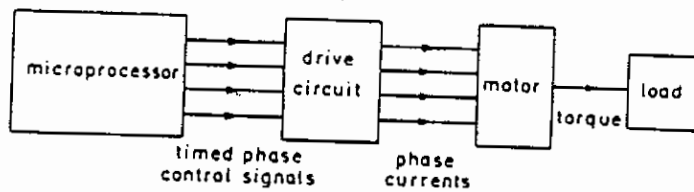


Σχ.7.3 Αναλογική επιτάχυνση / επιβράδυνση



Η έξοδος του ολοκληρωτή μόλις ξεκινήσει η επιβράδυνση εφαρμόζεται στην είσοδο του ταλαντωτή ο οποίος παράγει τους παλμούς εντολής βήματος σε έναν επιβραδυνόμενο ρυθμό σύμφωνα και με την κλίση της ράμπας. Συνήθως η ράμπα επιβράδυνσης είναι πιο γρήγορη από την ράμπα επιτάχυνσης και έτσι συμβαίνει και στον SD1664.

Τέλος στο παρακάτω σχήμα 7.4 φαίνεται έλεγχος ανοικτού βρόχου από μικρουπολογιστή.



Σχ. 7.4 Ο έλεγχος γίνεται από μικρουπολογιστή

## 8. Περιγραφή της εκπαιδευτικής μονάδας SD 1664

### 8.1 Γενικά

Η συσκευή SD 1664 είναι προϊόν της Σουηδικής TERCO. Πρόκειται για μία μονάδα μέσω της οποίας γίνεται η οδήγηση του βηματικού κινητήρα και έτσι μπορούμε να δούμε τις εφαρμογές του κινητήρα αλλά και τα σχετικά με αυτόν προβλήματα. Ο βηματικός κινητήρας έχει πολλές εφαρμογές και ταυτόχρονα αποτελεί και μία αρκετά οικονομική λύση αλλά δυστυχώς παρουσιάζονται παράγοντες που διακόπτουν την ομαλή λειτουργία του. Μέσω της μονάδας SD 1664 μπορούμε να δούμε το πώς ξεπερνάμε προβλήματα όπως ο μηχανικός συντονισμός, το χάσιμο βημάτων, η αστάθεια και το πως ελαττώνεται το πλάτος της ταλάντωσης του δρομέα γύρω από την καθορισμένη θέση ισορροπίας μετά τη διακοπή της παλμοσειράς. Το πλήρες σετ SD 1664 αποτελείται από την μονάδα ελέγχου με όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά, καθώς και από έναν βηματικό κινητήρα με σύστημα φρεναρίσματος, μια ενσωματωμένη ταχογεννήτρια και έναν μετατροπέα ροπής στρέψης. Επίσης διαθέτει και δύο διαφορετικούς σφονδύλους οι οποίοι μπορούν να προσαρμοσθούν στον άξονα του κινητήρα.

## 8.2 Λειτουργικές μονάδες

Στο εμπρόσθιο μέρος της μονάδας ελέγχου απεικονίζονται τα κύρια λειτουργικά τμήματα μερικά από τα οποία βρίσκονται εντός πλαισίου για περισσότερη έμφαση στις λειτουργίες τους.

A. Στο μέσο μπορούμε να διακρίνουμε τον βηματικό κινητήρα με τα τυλίγματά του μαζί με την DC τάση τροφοδοσίας. Πρόκειται για έναν διφασικό υβριδικό βηματικό κινητήρα με μεσαία λήψη.

B. Στην επάνω αριστερά περιοχή απεικονίζονται τα κυκλώματα ελέγχου της ακολουθίας των παλμών μαζί με τις εξόδους ισχύος για την περίπτωση μονοπολικής οδήγησης.

C. Στην κάτω αριστερά περιοχή απεικονίζονται τα κυκλώματα ελέγχου της ακολουθίας των παλμών μαζί με τις εξόδους ισχύος για την περίπτωση διπολικής οδήγησης.

D. Στην κάτω μεσαία περιοχή της μονάδας ελέγχου βρίσκεται εντός πλαισίου το block DRIVE όπου γίνεται η επιλογή μεταξύ μονοπολικής και διπολικής οδήγησης.

E και F. Στην έξω επάνω αριστερά περιοχή και στην έξω κάτω αριστερά περιοχή έχουμε διπλά ποτενσιόμετρα τα οποία ανήκουν στο σύστημα Pulse Positioning, για μονοπολική ή διπολική οδήγηση αντίστοιχα.

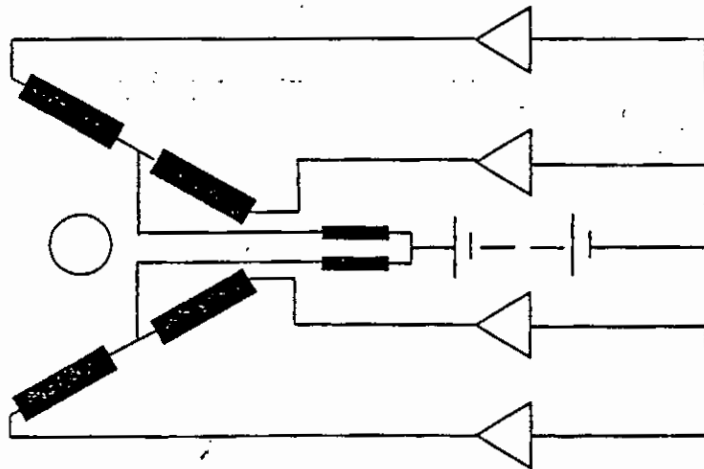
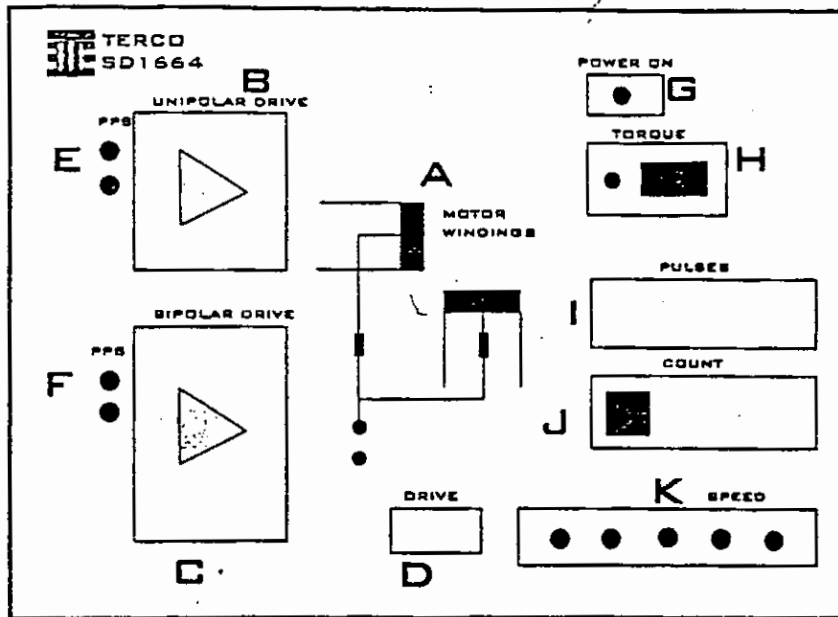
G. Στην έξω επάνω δεξιά περιοχή υπάρχει ενδίκτική λυχνία που ανάβει όταν η κύρια παροχή ισχύος είναι συνδεδεμένη.

Η. Κάτω από την λυχνία βρίσκεται το block TORQUE. Η LED οθόνη των τριών ψηφίων δείχνει την ροπή στρέψης σε Nm. Η μέθοδος μέτρησης της ροπής στρέψης βασίζεται στην κάμψη μίας ράβδου πάνω στην οποία είναι προσαρμοσμένος ένας μετρητής τάνυσης (μετρητής κάμψης). Μετά από 15 λεπτά περίπου τα ηλεκτρονικά της μονάδας έχουν έλθει σε μία σταθερή κατάσταση και τότε μπορεί να γίνει μια πιθανή ρύθμιση του μηδενός σε ότι αφορά την ένδειξη της ροπής στρέψης. Πριν από την πιθανή ρύθμιση πρέπει να είμαστε σίγουροι ότι ο κινητήρας είναι εν κενώ. Επίσης βλέπουμε και ένα κουμπί ρύθμισης από όπου μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο λειτουργίας του κινητήρα. Έτσι επιλέγουμε τη θέση 1 για ρύθμιση ταχύτητας χειροκίνητα από το ποτενσιόμετρο speed, την θέση 2 για προγραμματιζόμενο έλεγχο του κινητήρα και την θέση 3 για λειτουργία με τοποθέτηση του δρομέα βήμα προς βήμα.

I. Στο κεντρικό δεξιό τμήμα βρίσκεται το block PULSES. Ο αριστερός επιλογέας ελέγχει την κατεύθυνση της περιστροφής του δρομέα (cw/ccw). Εάν πρόκειται να μετρούνται τα βήματα τότε η ρύθμιση αυτή θα πρέπει να γίνει στο παρακάτω block.

J. Το block COUNT ελέγχει τον αριθμό των περιστροφών από την ρύθμιση του ειδικού διακόπτη στην επιθυμητή θέση. Ο επιλογέας start/stop είναι για την εκκίνηση και για το σταμάτημα του κινητήρα. Ο επιλογέας retardation on/ off υποδηλώνει το εάν θέλουμε μια μη ελεγχόμενη στάση του κινητήρα ή μια στάση με ράμπα όταν λειτουργούμε τον κινητήρα με προγραμματιζόμενο έλεγχο (θέση 2 του σχετικού κομβίου ρύθμισης). Η θέση load χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει την έναρξη μιας προγραμματιζόμενης δοκιμής. Τέλος υπάρχει και το κομβίο reset.

Κ. Στο έξω κάτω αριστερό τμήμα βρίσκεται το block SPEED. Μέσω των πέντε ποτενσιόμετρων μπορούμε να θέσουμε τις παραμέτρους της ταχύτητας ως έξης. Το ποτενσιόμετρο speed max./ min. χρησιμοποιείται μόνο όταν ελέγχουμε τις στάσεις και εκκινήσεις του κινητήρα απο το χέρι. Το ποτενσιόμετρο αυτό ενεργοποιείται μόνο όταν ο επιλογέας λειτουργίας βρίσκεται στη θέση 1. Τότε δεν είναι ενεργοποιημένο κανένα απο τα τέσσερα παρακάτω ποτενσιόμετρα. Το ποτενσιόμετρο base speed ρυθμίζει την αρχική ταχύτητα από την οποία ξεκινάει η ράμπα επιτάχυνσης έως την ταχύτητα run speed η οποία είναι η τελική ταχύτητα και η οποία ρυθμίζεται απο το αντίστοιχο ποτενσιόμετρο. Το ποτενσιόμετρο acceleration (επιτάχυνση) χρησιμοποιείται για να δώσει μια λογική ράμπα επιτάχυνσης λαμβάνοντας υπ' όψιν και την αδράνεια του φορτίου έτσι ώστε να μην έχουμε χάσιμο βημάτων. Αντίστοιχη είναι και η χρήση του ποτενσιόμετρου reterdation (επιβράδυνση). Η ράμπα της επιβράδυνσης είναι κατά κανόνα πιο απότομη από την ράμπα της επιτάχυνσης. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω τα ποτενσιόμετρα base speed, run speed, acceleration και reterdation ενεργοποιούνται μόνο για την περίπτωση λειτουργίας του κινητήρα με προγραμματιζόμενο έλεγχο (θέση 2 του σχετικού διακόπτη).



Control panel SD 1664

### 8.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

#### SD 1664

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1. Μέγιστη ταχύτητα          | 3.0 KHz  |
| 2. Ονομαστική μετρήσιμη ροπή | +/- 100 Ncm                                      |
| 3. Τρεις τύποι λειτουργίας   | A. Συνεχόμενη<br>B. Ελεγχόμενη<br>C. Βήμα - Βήμα |

4. Δύο τύποι συστημάτων οδήγησης. Μονοπολική και διπολική. Η μονάδα έχει διάφορες δυνατότητες όπως PPS on/ off, half/ full step και περιστροφή cw/ccw.

Όταν ο επιλογέας λειτουργίας βρίσκεται στην θέση 1 τότε ο κινητήρας στρέφεται με μια ταχύτητα σύμφωνα με το ποτενσιόμετρο speed. Όταν έχουμε προγραμματιζόμενη λειτουργία είναι δυνατόν να θέσουμε απο πριν τον αριθμό των περιστροφών του δρομέα, τις ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και την μέγιστη ταχύτητα. Στην λειτουργία single step ο δρομέας μετακινείται κατά ένα βήμα κάθε φορά που πιέζουμε το μπουτόν single step.

Ο εξοπλισμός επίσης περιλαμβάνει

- Μονάδα ελέγχου
- Πρότυπο βηματικό κινητήρα
- Δύο σφόνδylους με διαφορετική αδράνεια
- Μπάρα για μετρήσεις ροπής στρέψης
- Εργαστηριακό manual

Γενικές πληροφορίες	Μονάδα ελέγχου	Βηματ. Κινητήρας
Διαστάσεις (mm)	500 X 340 X 300	300 X 190 X120
Βάρος (Kg)	12	5
Τάση τροφοδοσίας	220-240 VAC 50/60 Hz	
Λόγος στροφών άξονα κινητήρα/ άξονα εξόδου		1:1
Αριθμός πόλων δρομέα		50
Προώθηση του δρομέα		1.8 μοίρες

**Motor data**

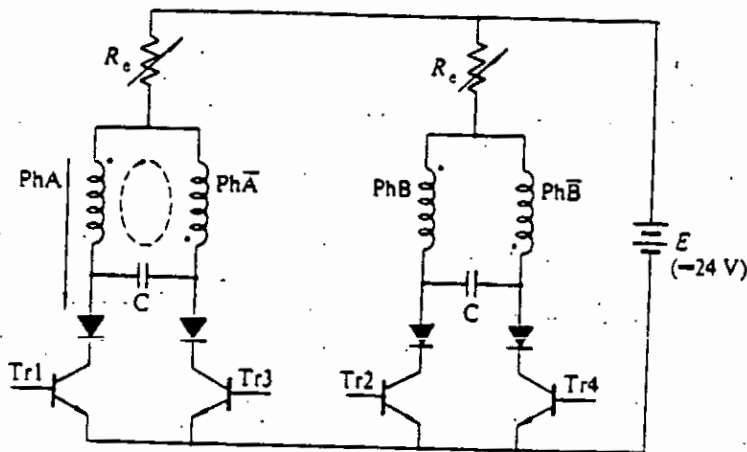
- Διφασικός υβριδικός βηματικός κινητήρας με μεσαία λήψη

- Βήμα	1.8 μοίρες
- Τάση	1.8 V
- Ρεύμα	4.8 A
- Αντίσταση τυλίγματος	0.39 Ω
- Αυτεπαγωγή τυλίγματος	1.5 mH
- Ροπή στρέψης συγκράτησης	10.8 Kg cm
- Αδράνεια δρομέα	0.52 Kg <sup>m</sup> <sup>2</sup>
- Βάρος	1.4 Kgr



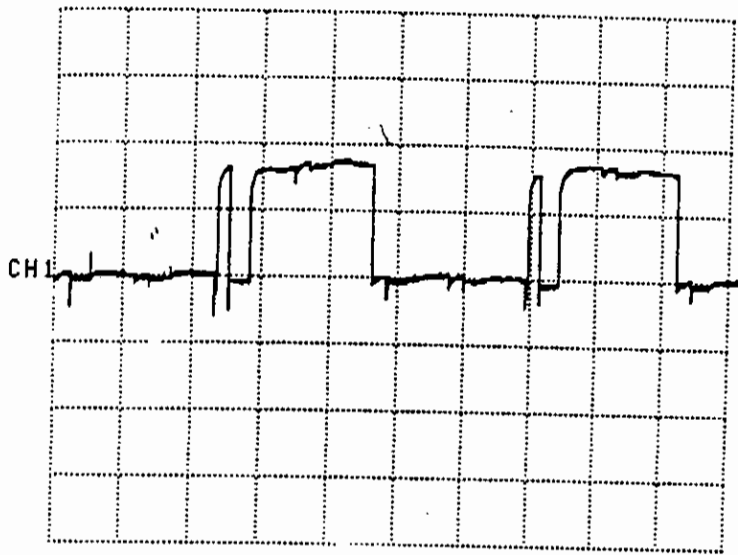
## 9. Πειράματα

Στις εργαστηριακές ασκήσεις που ακολουθούν χρησιμοποιούμε έναν διφασικό υβριδικό κινητήρα με bifilar windings. Στην μονοπολική οδήγηση αυτό ισοδυναμεί με το σαν να έχουμε τέσσερις φάσεις τις (A+, A-, B+, B-) κάθε μία από τις οποίες διεγείρεται από ένα μονοπολικό ρεύμα. Η μέθοδος διέγερσης είναι two phase on. Στην διέγερση two phase on η αλληλουχία στην διέγερση των φάσεων για cw rotation είναι η εξής: A+B+ / A-B+ / A-B- / A+B- / A+B+ / κλπ. Δηλαδή ένας πλήρης κύκλος διέγερσης περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις και παράγει τέσσερα βήματα του δρομέα. Στην περίπτωση της μονοπολικής οδήγησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα οδήγησης όπως αυτό του σχήματος 9.1.



Σχ. 9.1 Μονοπολική οδήγηση

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο bi-level driver του σχήματος 6.1.2. Στο παρακάτω παλμογράφημα (σχ.9.2) απεικονίζεται η παλμοδότηση ενός εκ των τυλιγμάτων του κινητήρα.

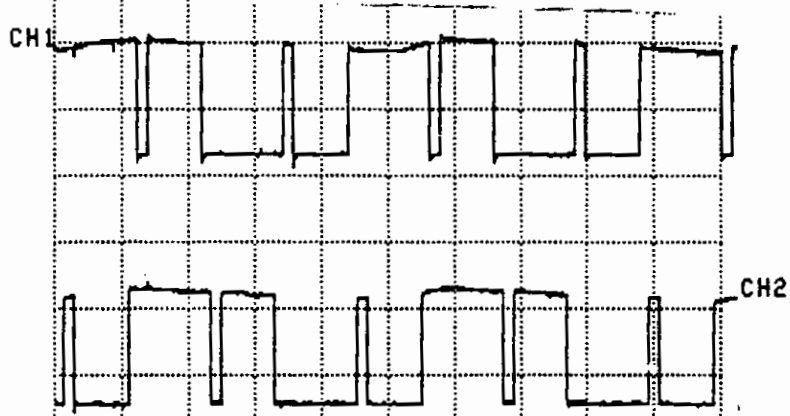


Σχ. 9.2 Παλμοί στον παλμογράφο

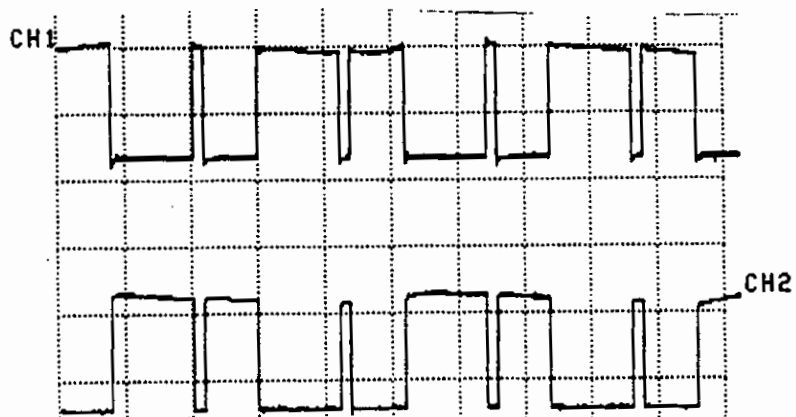
Βλέπουμε την κυματομορφή της τάσης στα άκρα του τυλιγματος και την συχνότητα με την οποία διεγείρεται το τύλιγμα αυτό. Για να βρούμε την συχνότητα του ρολογιού πολλαπλασιάζουμε την συχνότητα αυτή επί τέσσερα. Στην περίπτωση διπολικής οδήγησης χρησιμοποιείται κύκλωμα γέφυρας όπως αυτό του σχήματος 9.3. Ο SD1664 χρησιμοποιεί δύο τέτοιες γέφυρές μία για κάθε μία από τις δύο φάσεις του υβριδικού βηματικού κινητήρα. Οι παλμοί στις γέφυρες δέν δίνονται ταυτόχρονα αλλά δίνονται με τέτοιο χρονισμό έτσι ώστε να υπάρχει διαφορά φάσης στην τάση στα τυλίγματα του κινητήρα. Σχετικά με την παλμοδότηση είναι τα παρακάτω παλμογραφήματα.



1. Παλμοδότηση στις γέφυρες

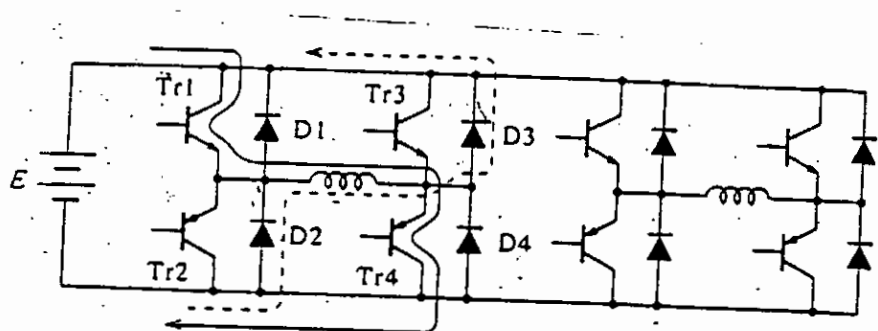


2. Τάση στα τυλίγματα του κινητήρα

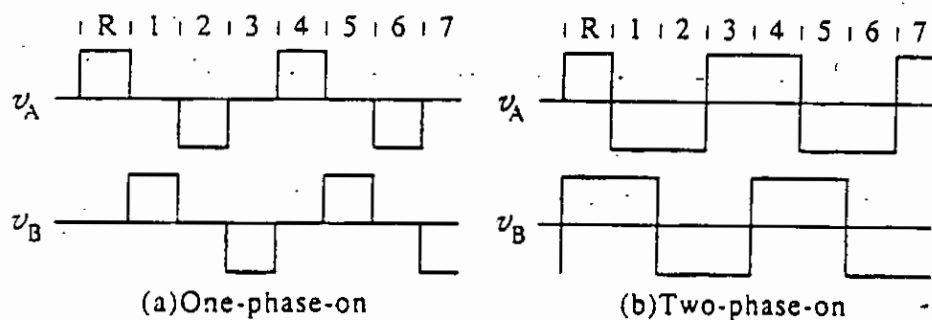


3. Τα τρανζίστορ άγουν εναλλάξ

Ο κινητήρας έχει bifilar windings προκειμένου να γίνει η διπολική οδήγηση τα τυλίγματα θα πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους όπως στο σχήμα 9.4 έτσι ώστε τα τυλίγματα A+ και A- να δημιουργούν μαγνητικό πεδίο της ίδιας φοράς σε κάθε έναν από τους πόλους του στάτη.

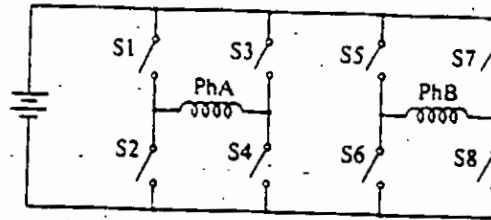


Σχ. 9.3α Γέφυρα για διφασικό υβριδικό κινητήρα

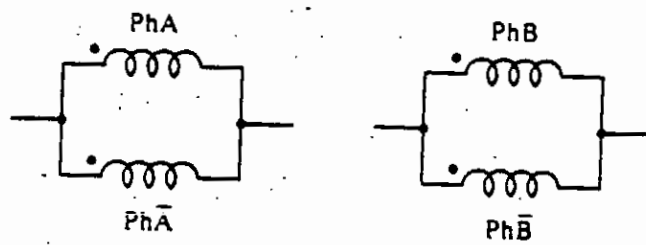


Σχ. 9.3β Τάση που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του κινητήρα

	R	1	2	3	4	5
S1	■		■	■	■	
S2		■				■
S3		■	■			■
S4	■			■	■	
S5	■			■	■	
S6			■			
S7			■	■		
S8	■			■	■	



Σχ. 9.3γ Παλμοδότηση των τρανζίστορ S1 - S8 της γέφυρας



Σχ. 9.4 Πως συνδεσμοποιούνται τα bifilar windings για διπολική οδήγηση.

## Πείραμα 1

### Αρχικός προγραμματισμός λειτουργίας

#### Αντικείμενο

Να μάθουμε τον πρακτικό χειρισμό του SD 1664, την στοιχειώδη επίδραση των διαφόρων συστημάτων ελέγχου πάνω στον κινητήρα, μαζί με τους τρεις διαφορετικούς τύπους λειτουργίας. Χειροκίνητη, προγραμματιζόμενη και λειτουργία βήμα - βήμα.

#### Εκτέλεση

*Μορφή 3. Λειτουργία βήμα - βήμα.*

1. Τοποθετούμε τον mode selector στην θέση 3. Παρατηρούμε προσεκτικά τη θέση του άξονα του κινητήρα.

2. Χρησιμοποιούμε το μπουτόν " single step " έτσι ώστε να στραφεί ο δρομέας ακριβώς μια πλήρη στροφή. Πόσα βήματα χρειαζόμαστε για τις 360 μοίρες;..... το οποίο σημαίνει ότι η προώθηση του δρομέα είναι ίση με ..... μοίρες ανά βήμα.
3. Ομοίως με τον διακόπτη cw /ccw στη θέση caw.

*Μορφή 1. Χειροκίνητος έλεγχος της ταχύτητας.*

4. Τοποθετούμε τον διακόπτη επιλογής λειτουργίας (mode selector) στη θέση 1.
5. Τρέχουμε τον κινητήρα στην περιοχή απο την στάση έως την μέγιστη ταχύτητα μέσω του ποτενσιομέτρου speed. Το ποτενσιόμετρο είναι λογαριθμικό ώστε να είναι δυνατόν να έχουμε έναν ακριβή έλεγχο στις χαμηλές ταχύτητες αλλά και την δυνατότητα να ελέγχουμε τον κινητήρα εξίσου καλά και στις υψηλές ταχύτητες. Διαπιστώνουμε την επίδραση των μονοπολικών ποτενσιομέτρων PPS και στον φυσικό τομέα (περιστροφή του άξονα, θόρυβος, δονύσεις) και ηλεκτρικά στον παλμογράφο.
6. Επαναλαμβάνουμε αλλά με διπολική οδήγηση. Εδώ μεταβάλλουμε την συνδεσμολογία του παλμογράφου.

*Μορφή 2. Προγραμματιζόμενος έλεγχος.*

Ο βηματικός κινητήρας χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για προγραμματιζόμενο έλεγχο. Ο σκοπός είναι να επιτευχθεί η ακριβής τοποθέτηση μιας εργαλειομηχανής ή οποιουδήποτε αλλού είδους βιομηχανικού εξοπλισμού. Ο έλεγχος αυτός συνήθως γίνεται μέσω ενός

μικρουπολογιστή στον οποίο δίνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες. Ο μικρουπολογιστής και το σύστημα οδήγησης του κινητήρα θα κάνουν μαζί όχι μόνο την τοποθέτηση του άξονα του κινητήρα αλλά επίσης και κατά τον σωστό τρόπο σε ότι αφορά την επιτάχυνση, την επιβράδυνση, την ανώτατη ταχύτητα, τις στάσεις και τις επανεκκινήσεις. Μπορούμε να προκαθορίσουμε τον αριθμό των περιστροφών χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες του τμήματος COUNT.

7. Ρυθμίζουμε την αρχική ταχύτητα μέσω του ποτενσιόμετρου base speed το οποίο αρχικά τοποθετούμε στο 10 - 20%. Η μέγιστη ταχύτητα ρυθμίζεται από το ποτενσιόμετρο run speed. Επιλέγουμε 50%.

8. Θέτουμε τα ποτενσιόμετρα acc και retard στο 50%

9. Για να τρέξει ο κινητήρας τον προκαθορισμένο αριθμό περιστροφών ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

a. ο mode selector στη θέση 2

b. ο διακόπτης START / STOP σε θέση STOP.

c. Πιέζουμε τα μπουτόν RESET και LOAD και θέτουμε τον διακόπτη σε θέση START.

Τότε ο κινητήρας στρέφεται για τόσες στροφές όσες είχαμε προκαθορίσει.

Δοκιμάζουμε διαφορετικές ρυθμίσεις στα ποτενσιόμετρα και ελέγχουμε ότι ο κινητήρας δεν περιστρέφεται ούτε για περισσότερες ούτε για λιγότερες στροφές από το καθορισμένο.

10. Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία με διπολική οδήγηση.

11. Η ράμπα της επιβράδυνσης είναι πολύ " απότομη ". Σε ποία ταχύτητα / συχνότητα θα παρατηρηθεί ο δρομέας να ξεπερνάει την



καθορισμένη θέση ισορροπίας κατά την διακοπή της παλμοσειράς?  
 .....Hz.

### Σημείωση

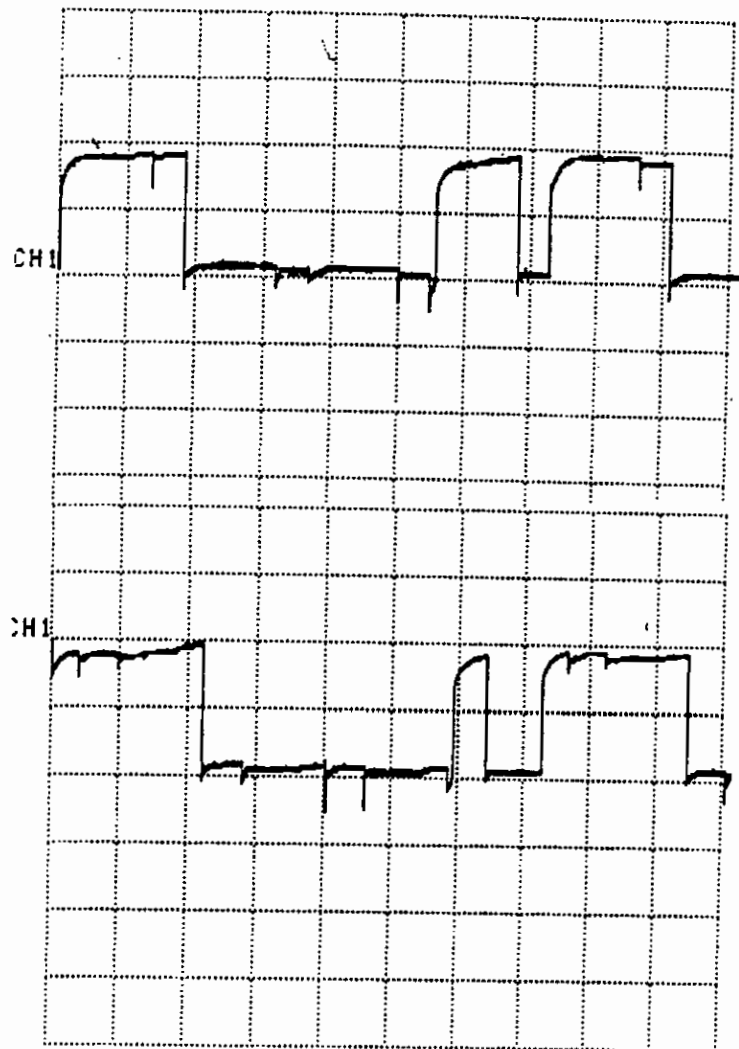
Ο δρομέας του κινητήρα έχει 50 πόλους (δόντια). Άρα η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων είναι ίση με 1 rotor tooth pitch =  $360 / 50 = 7.2$  μοίρες. Άρα το ένα βήμα είναι ίσο με 1.8 μοίρες. Αυτό σημαίνει ότι για μία πλήρη περιστροφή ο δρομέας εκτελεί 200 βήματα.

Για να περιστραφεί ο κινητήρας ccw η διέγερση των φάσεων είναι η εξής. A+B- / A-B- / A-B+ / A+B+ / A+B- / ..... . Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την περιστροφή cw αρκεί να αναστρέψουμε την διέγερση μεταξύ των φάσεων B+ και B- .

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί κυρίως σε χαμηλές ταχύτητες είναι πιθανόν να αντιμετωπίσει προβλήματα συντονισμού. Ο μηχανικός συντονισμός είναι ένα ταλαντωτικό φαινόμενο που επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Ο συντονισμός συμβαίνει σε ορισμένες συχνότητες και γίνεται αντιληπτός από θορύβους, δονήσεις κ.τ.λ. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τα ποτενσιόμετρα PPS μπορούμε να εξαλείψουμε σε μεγάλο βαθμό την επίδραση του συντονισμού στο σύστημα. Το σύστημα PPS επιδρά και στην κυματομορφή της τάσης στα τυλίγματα των φάσεων του κινητήρα όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

Στο σύστημά μας η stopping rate μετρήθηκε έμμεσα μέσω της starting rate και για κινητήρα εν κενώ βρέθηκε ίση με 670 Hz unipolar και 960 Hz bipolar. Τέλος μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο κινητήρας φτάνει ευκολότερα την μέγιστη ταχύτητα μέσω του προγραμματιζόμενου

ελέγχου παρά με χειροκίνητο έλεγχο. Αυτό συμβαίνει γιατί στην επιτάχυνση του κινητήρα μέσω ράμπας οι παλμοί δίνονται με κατάλληλο χρονισμό κάτι που είναι πολύ δύσκολο να γίνει με το ποτενσιόμετρο speed.



*Επίδραση των ποτενσιομέτρων PPS. Ρυθμίσεις 0% και 50% αντίστοιχα*

## Πείραμα 2

**Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, μέγιστη ταχύτητα pull out.**

### Αντικείμενο

Ο βηματικός κινητήρας έχει ένα ορισμένο πεδίο λειτουργίας και χειρισμού. Δηλαδή λειτουργεί εντός συγκεκριμένων ορίων και κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Στο πείραμα αυτό θα γίνει μέτρηση της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής καθώς και της μέγιστης ταχύτητας pull out. Μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής σημαίνει να δούμε το πού ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί εφόσον ισχύουν τα παρακάτω. Ο κινητήρας είναι εν κενώ, χωρίς να πραγματοποιεί στάσεις και επανεκκινήσεις και χωρίς μεταβολές της φοράς περιστροφής. Μέτρηση της ταχύτητας pull out σημαίνει να δούμε μέχρι ποία συχνότητα μπορούμε να εκκινούμε και να σταματάμε τον κινητήρα εν κενώ. Η λειτουργία με μονοπολική / διπολική οδήγηση θα επιδράσει πάνω στην συμπεριφορά του συστήματος.

## Εκτέλεση

1. Συνδέουμε τον μετρητή συχνότητας ή τον παλμογράφο μεταξύ ενός μονοπολικού κυκλώματος οδήγησης και της γής. Προσέχουμε ο κινητήρας να είναι εν κενώ.

### *Υπολογισμός πεδίων συχνότητας*

Με τον διακόπτη επιλογής τύπου λειτουργίας (mode selector ) στην θέση 1 ο κινητήρας τρέχει συνεχώς και η ταχύτητα μπορεί και ρυθμίζεται με το ποτενσιόμετρο speed.

2. Στρέφουμε το ποτενσιόμετρο speed  $\omega$  από το ελάχιστο (min speed) και αυξάνουμε την ταχύτητα σιγά - σιγά χωρίς στάσεις και επανεκκινήσεις έως ότου ο κινητήρας σταματήσει να περιστρέφεται. Σημειώνουμε τη συχνότητα αυτή. Σε κάποιες συχνότητες θα λάβουν χώρα μηχανικοί συντονισμοί. Σ' αυτές τις συχνότητες μπορεί να προκληθεί το σταμάτημα του κινητήρα ή το χάσιμο βημάτων. Οι

κρίσιμες αυτές συχνότητες αποκαλύπτονται κάνοντας έναν ισχυρό θόρυβο.

3. Παρατηρούμε και σημειώνουμε τις συχνότητες αυτές καθώς και την συχνότητα στην οποία ο κινητήρας παύει να λειτουργεί.

4. Όπως παραπάνω με τη διαφορά ότι τώρα σταματάμε και στη συνέχεια επανεκκινούμε τον κινητήρα αυξάνοντας κάθε φορά τη συχνότητα. Η στάση και η επανεκκίνηση του κινητήρα γίνεται εάν τοποθετούμε τον mode selector μεταξύ των θέσεων 1 και 2.

5. Σημειώνουμε την μέγιστη ταχύτητα όπου είμαστε ικανοί να επανεκκινήσουμε τον κινητήρα.

6. Πώς επηρεάζονται οι συντονισμοί από την χρήση των ποτενσιομέτρων PPS;

7. Βρείτε μια ρύθμιση στο PPS, ώστε να μπορούμε να τρέξουμε τον κινητήρα από την ελάχιστη στην μέγιστη ταχύτητα χωρίς χάσιμο βημάτων.

18. Εκτελούμε ακριβώς την παραπάνω διαδικασία με διπολική οδήγηση

### Αποτελέσματα

#### *Unipolar mode*

Συχνότητες συντονισμού. \_\_\_\_\_

Ταχύτητα περιστροφής. \_\_\_\_\_

Ταχύτητα pull out. \_\_\_\_\_

*Bipolar mode*

Συχνότητες συντονισμού. \_\_\_\_\_

Ταχύτητα περιστροφής. \_\_\_\_\_

Ταχύτητα pull out. \_\_\_\_\_

*Σημείωση*

Το σύστημα Pulse Positioning παρέχει μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης η οποία αποβλέπει στον περιορισμό του πλάτους της ταλάντωσης του δρομέα. Έτσι μπορεί να μειωθεί η τάση του συστήματος να συντονίζεται. Ρυθμίζοντας τα ποτενσιόμετρα PPS, μπορούμε να επιτύχουμε τη βέλτιστη ηλεκτρομαγνητική απόσβεση. Σε ένα σύστημα βηματικού κινητήρα συντονισμοί εμφανίζονται σε συχνότητες ίσες με την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης του δρομέα καθώς και στις υποαρμονικές της συχνότητας αυτής. Στο σύστημα που εξετάζουμε η ιδιοσυχνότητα είναι ίση με 400 Hz. Στη συχνότητα αυτή αναμένεται ο κύριος συντονισμός. Όμως καθώς η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνει σιγά - σιγά απο το μηδεν συντονισμοί θα εμφανιστούν πρώτα στις υποαρμονικές της ιδιοσυχνότητας. Άρα αναμένουμε συντονισμούς και στα 200, 133, 100,80,..... Hz. Αυτά ισχύουν και για μονοπολική και για διπολική οδήγηση. Έαν σε κάθε μία απο της παραπάνω συχνότητες κάνουμε ρύθμιση των ποτενσιομέτρων PPS, μπορούμε να αποτρέψουμε την εμφάνιση συντονισμών και έτσι να

αποφύγουμε την διακοπή της ομαλής λειτουργίας του κινητήρα (χάσιμο βημάτων, δονήσεις του συστήματος κ.τ.λ). Επιταχύνοντας τον κινητήρα σε υψηλότερες ταχύτητες μπορούμε να φτάσουμε την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που είναι περίπου 3KHz. Η ταχύτητα που μπορεί να σταματάει και να επανακινεί ο κινητήρας είναι για τη μέν μονοπολική οδήγηση 670 - 700 Hz για δε την διπολική οδήγηση στα 960 + Hz.

### **Πείραμα 3**

#### **Μέγιστη συχνότητα εκκίνησης**

#### **Αντικείμενο**

Να μετρηθεί η μέγιστη συχνότητα εκκίνησης του κινητήρα εν κενώ, με μικρό φορτίο και με περισσότερο φορτίο. Με άλλα λόγια να διαπιστωθεί η επίδραση του φορτίου στην συχνότητα εκκίνησης του κινητήρα. Θα δούμε εαν υπάρχουν διαφορές μεταξύ μονοπολικής και διπολικής οδήγησης.

## Εκτέλεση

### *Μονοπολική οδήγηση*

1. Ελέγχουμε ότι ο κινητήρας είναι εν κένω.
2. Εκκινούμε τον κινητήρα με το ποτενσιόμετρο speed αρχικά κοντά στο minimum, στη συνέχεια σταματάμε και επανεκκινούμε τον κινητήρα ( με χρήση του mode selector μεταξύ των θέσεων 1 και 2). Εάν ο κινητήρας εκκινήσει χωρίς πρόβλημα, αυξάνουμε την ταχύτητα και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία. Συνεχίζουμε όπως παραπάνω έως ότου βρούμε την μέγιστη συχνότητα από την οποία ο κινητήρας εκκινεί κανονικά.
3. Δίνουμε στον κινητήρα ένα χαμηλό φορτίο και επαναλαμβάνουμε το βήμα 2.
4. Φορτίζουμε τον κινητήρα ακόμα περισσότερο και επαναλαμβάνουμε.
5. Τέλος φορτίζουμε με σχετικά υψηλό φορτίο και επαναλαμβάνουμε.
6. Συμπληρώνουμε το σχετικό πίνακα μετρήσεων.

### *Διπολική οδήγηση*

7. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 1 - 6.



Σχεδιάστε διάγραμμα τοποθετώντας την συχνότητα στον άξονα Y και την ροπή στον άξονα X και χρησιμοποιήστε τις μετρήσεις του πίνακα για την χάραξη των χαρακτηριστικών. Χαράξτε στο ίδιο διάγραμμα τις χαρακτηριστικές και για την μονοπολική και για την διπολική οδήγηση. Ποίες τυπικές διαφορές παρουσιάζονται μεταξύ των δύο τύπων οδήγησης.

### Σημείωση

Η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση συστήματος με αδράνεια J είναι

$$\text{η εξής: } T_M - T_L = J d^2\theta / dt^2 \Rightarrow T_M - T_L = J d\omega / dt$$

$$\Rightarrow T_M - T_L = \theta_s J df / dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_M - T_L = \theta_s J (f_2 - f_1) / dt. (1)$$

Όπου  $\theta_s$  η γωνία βήματος του κινητήρα σε rad.

Έστω ότι ροπή φορτίου  $T_L$ , εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα. Τότε κατά τη στατική λειτουργία του κινητήρα θα προκαλείται μετατόπιση  $\theta_1$  από την προκαθορισμένη θέση ισορροπίας. Μόλις εφαρμοσθεί ο πρώτος παλμός τότε έχουμε την μεταβολή στη διέγερση των φάσεων του κινητήρα και τότε η ροπή του κινητήρα γίνεται  $T_M$  που είναι μεγαλύτερη από την  $T_L$ . Η διαφορά  $T_M - T_L$  χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τον κινητήρα. Αν το φορτίο αυξηθεί άρα η ροπή του γίνει

ιση με  $T_{L2} > T_{L1}$  τότε και η μετατόπιση του άξονα του κινητήρα κατά τη στατική λειτουργία θα γίνει  $\theta_2 > \theta_1$ . Τότε η διαφορά  $T_M - T_{L2}$  θα είναι μικρότερη οπότε απο την (1) προκύπτει ότι η μέγιστη ταχύτητα (η  $f_1$ ) στην οποία μπορεί να εκκινήσει ο κινητήρας όταν αυξηθεί το φορτίο είναι μικρότερη. Αν η αύξηση στο φορτίο επιφέρει αύξηση της αδράνειας του συστήματος τότε έχουμε επίσης ελάττωση στην ταχύτητα. Παρακάτω βλέπουμε πίνακα μετρήσεων που δείχνει ότι η αύξηση στο φορτίο επιφέρει την μείωση της μέγιστης συχνότητας εκκίνησης.

#### **Πίνακας μετρήσεων**

##### *Μονοπολική οδήγηση*

Φορτίο (Ncm)	Μέγιστη συχνότητα (Hz)
0	700
10	530
45	120
70 +	0

##### *Διπολική οδήγηση*

Φορτίο (Ncm)	Μέγιστη συχνότητα (Hz)
0	960
45	500
80	7
100 +	0

#### Πείραμα 4

#### Μέγιστη ροπή στρέψης εκκίνησης

#### Αντικείμενο

Η ροπή αυτή εναλλακτικά λέγεται και μέγιστη ροπή στρέψης pull in και ορίζεται σαν η μέγιστη ροπή φορτίου υπό την οποία ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει και να συγχρονιστεί με μια παλμοσειρά συγκεκριμένης συχνότητας, συνήθως 10 Hz. Η συχνότητα αυτή είναι πολύ μικρή για αρκετά συστήματα βηματικού κινητήρα (όπως αυτό που εξετάζουμε) , οπότε μια άλλη μάλλον χαμηλή συχνότητα πρέπει να εκλεγεί, έστω 20Hz. Η μέτρηση της ροπής θα γίνει σε αυτή τη συχνότητα

#### Εκτέλεση.

*Μέγιστη ροπή στρέψης εκκίνησης - Μονοπολική οδήγηση.*

1. Εκκινούμε τον κινητήρα εν κενώ με συχνότητα 20 Hz και εάν η εκκίνηση είναι OK τότε τον σταματούμε ( ο mode selector μεταξύ των θέσεων 1 και 2 ).

2. Αυξάνουμε το φορτίο, επανεκκινούμε και ξανασταματάμε τον κινητήρα. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία, αυξάνοντας την ροπή βήμα - βήμα έως ότου ο κινητήρας να μην μπορεί να εκκινήσει. Η ροπή αυτή είναι η μέγιστη ροπή εκκινήσεις του κινητήρα.

#### *Διπολική οδήγηση*

7. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 1 έως 6 με διπολική οδήγηση.

#### **Πίνακας μετρήσεων**

<b>Τύπος λειτουργίας</b>	<b>Μέγιστη ροπή στρέψης (Ncm)</b>
<i>Μονοπολική οδήγηση</i>	<b>65</b>
<i>Διπολική οδήγηση</i>	<b>100</b>

#### **Ερώτηση**

Τι θα συμβεί εάν επιλέξουμε μία άλλη συχνότητα.

## Πείραμα 5

Χαρακτηριστικές ροπής στρέψης pull out, χαρακτηριστικές περιστροφικής λειτουργίας.

### Αντικείμενο

Σε προηγούμενα πειράματα εξετάσαμε τον βηματικό κινητήρα εν κενώ και υπό φορτίο. Στο πείραμα αυτό θα επεκτείνουμε την διερεύνηση του πεδίου λειτουργίας του βηματικού κινητήρα από το πεδίο " pull out " όπου είχαμε τις στάσεις και τις επανεκκινήσεις του κινητήρα στο πεδίο περιστροφικής λειτουργίας και θα πάρουμε τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές περιστροφικής λειτουργίας (slewing characteristics). Το πεδίο περιστροφικής λειτουργίας είναι η περιοχή λειτουργίας του κινητήρα χωρίς στάσεις και επανεκκινήσεις, με τον κινητήρα να λειτουργεί υπό φορτίο. Εδώ δηλαδή δεν έχουμε απαιτήσεις για στάση, επανεκκίνηση και αναστροφή στη φορά περιστροφής του κινητήρα. Οι χαρακτηριστικές που θα προκύψουν δείχνουν την σχέση μεταξύ του φορτίου του κινητήρα και της μέγιστης αντίστοιχης ταχύτητας. Οι χαρακτηριστικές επηρεάζονται από τον τύπο του κυκλώματος οδήγησης, από το κομπλάρισμα, από τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται και από άλλους παράγοντες.

## Εκτέλεση

### *Μονοπολική οδήγηση*

1. Εκκινούμε τον κινητήρα περίπου στα 100 Hz με ένα λογικό φορτίο περίπου 50 Ncm. Αυξάνουμε την συχνότητα έως ότου ο κινητήρας σταματήσει να λειτουργεί. Η συχνότητα αυτή είναι η μέγιστη στην οποία ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει υπό το συγκεκριμένο φορτίο.
2. Παραπάνω είδαμε ότι ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει υπό φορτίο 50 Ncm στα 100Hz. Αυτό αποτελεί ένα σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Με βάση αυτό το σημείο λειτουργίας του κινητήρα μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις όπως παραπάνω επιλέγοντας μεγαλύτερο φορτίο στις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ όταν πλησιάζουμε στην μέγιστη ταχύτητα ( συχνότητα) το φορτίο όλο και μικραίνει.
3. Παρατηρείστε τι θα γίνει εαν ρυθμίσουμε τα ποτενσιόμετρα PPS.

### Παρατήρηση

Συνήθως υπάρχουν προβλήματα στην παρατήρηση της συχνότητας στην οποία μπορεί ο κινητήρας να " σηκώσει " ένα δεδομένο φορτίο. Είναι καλύτερο να εργασθούμε ως εξής. Θέτουμε ως δεδομένη μία συχνότητα την περίοδο της οποίας μπορούμε εύκολα να διαβάσουμε στον παλμογράφο και στη συνέχεια παρατηρούμε τη ροπή στρέψης καθώς αυξάνουμε το φορτίο μέχρι να χαθεί ο συγχρονισμός και να σταματήσει ο κινητήρας.

### *Διπολική οδήγηση*

4. Επιλέγουμε bipolar mode και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία.
5. Σχεδιάστε διάγραμμα με τα αποτελέσματα της μονοπολικής οδήγησης τοποθετώντας την ροπή στρέψης στον άξονα Y και την συχνότητα στον άξονα X
6. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστε και την χαρακτηριστική που προέκυψε κατά την διπολική οδήγηση και παρατηρήστε τις διαφορές που λαμβάνουν χώρα.

### **Ερωτήσεις**

Με ποιόν τρόπο επιδρά η δυνατότητα ρύθμισης του PPS, πάνω στις καμπύλες κατά την μονοπολική οδήγηση;

Με ποιόν τρόπο επιδρά το PPS, πάνω στις καμπύλες κατά την διπολική οδήγηση;

### *Σημείωση*

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι χαρακτηριστικές pull out torque για έναν βηματικό κινητήρα. Φαίνεται ότι ο κινητήρας θα έχει προβλήματα

στη λειτουργία του στις συχνότητες εκείνες στις οποίες παρατηρούνται τα " βυθίσματα " στην καμπύλη. Τα βυθίσματα αυτά λαμβάνουν χώρα σε πολλά συστήματα βηματικού κινητήρα και προκαλούνται από τον μηχανικό συντονισμό στο συνδυασμό κινητήρας - φορτίο. Η συμπεριφορά αυτή του συστήματος οδηγεί στο χάσιμο της ροπής του κινητήρα στις συχνότητες αυτές, όπως φαίνεται και από τα βυθίσματα. Η ηλεκτρομαγνητική απόσβεση που παρέχεται μέσω των ποτενσιομέτρων PPS, έχει σαν αποτέλεσμα την άρση της επίδρασης του συντονισμού στο κύκλωμα οπότε δεν θα έχουμε το χάσιμο της ροπής του κινητήρα στις συχνότητες συντονισμού πράγμα που θα έχει σαν αποτέλεσμα την " κανονικοποίηση " της χαρακτηριστικής.

#### Πίνακας μετρήσεων

##### *Μονοπολική οδήγηση*

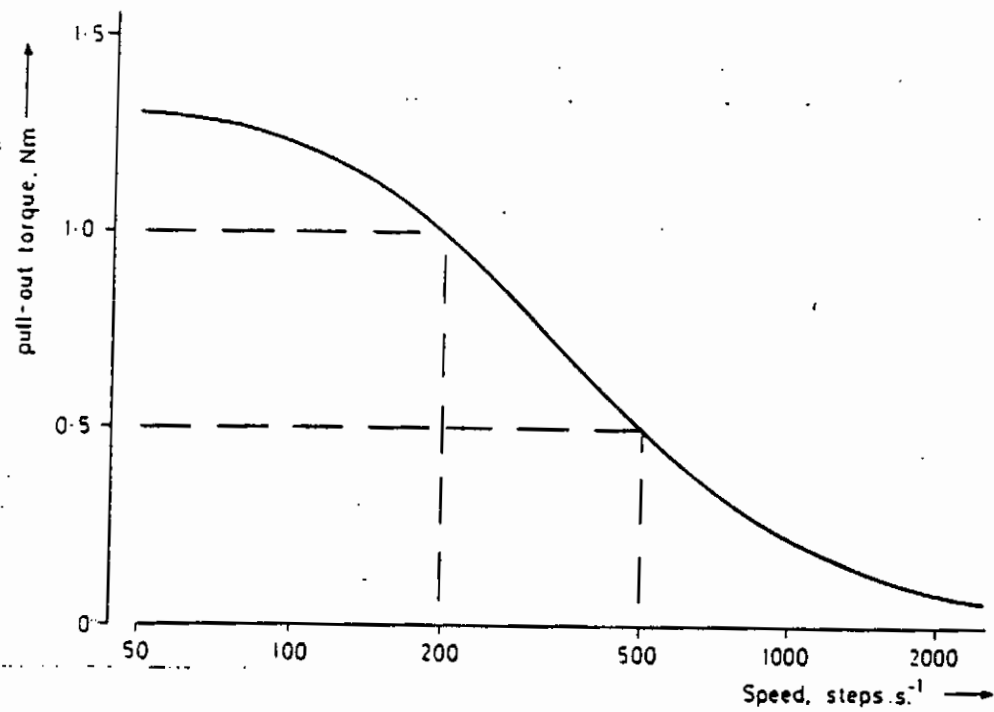
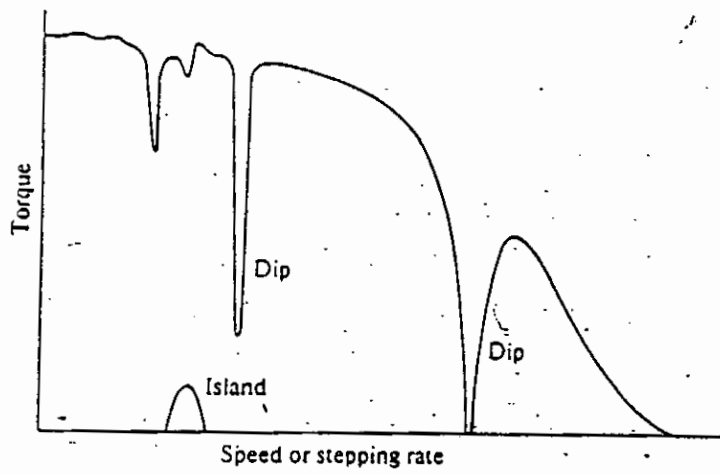
Συχνότητα (Hz)	Ροπή στρέψης (Ncm)
10	70
20	70
40	65
50	65
100	64
200	64
400	41



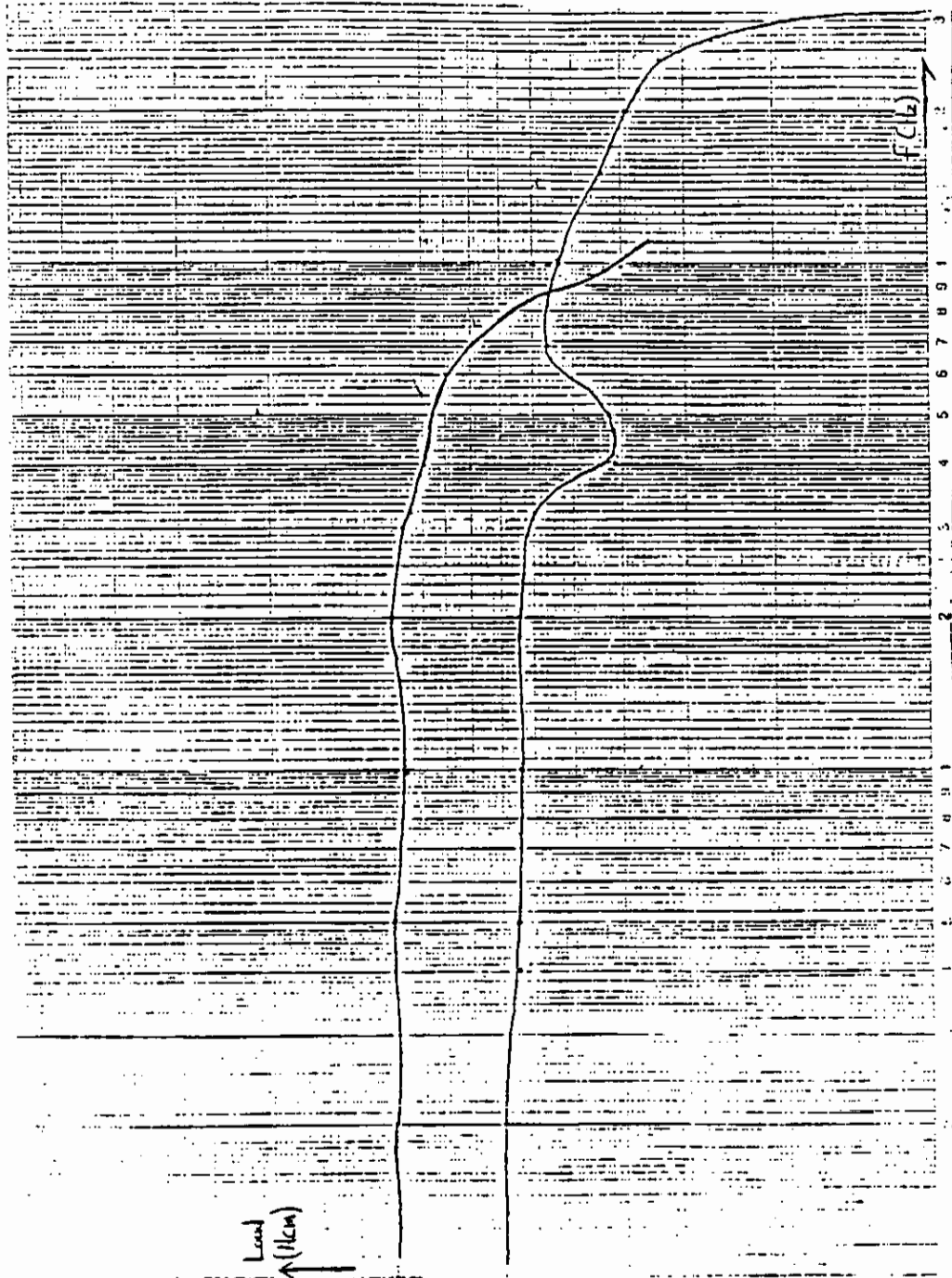
	103
500	42
1K	53
1.5K	43
2K	39
2.5K	33
2.75K	26

*Διπολική οδήγηση*

Συχνότητα (Hz)	Ροπή στρέψης (Ncm)
10	115
20	115
40	115
50	115
100	110
200	115
300	110
400	100
500	95
600	90
760	70
830	57
950	46



Πραγματικές και " κανονικοποιημένες " χαρακτηριστικές



Χαρακτηριστικές pull out torque

Με τις παραπάνω μετρήσεις χαράζουμε την χαρακτηριστική pull out torque του κινητήρα. Τα ποτενσιόμετρα PPS είχαν σταθερό setting και ίσο με 50%

## **Πείραμα 6**

### **Χαρακτηριστικές pull in torque**

#### **Αντικείμενο**

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής στρέψης pull in - ταχύτητας αναφέρονται στο μέγιστο φορτίο υπό το οποίο ο βηματικός κινητήρας μπορεί να εκκινήσει και να σταματήσει χωρίς χάσιμο βημάτων για διάφορες ταχύτητες. Αντικείμενο του πειράματος είναι η χάραξη αυτών των χαρακτηριστικών.

#### **Εκτέλεση**

##### *Μονοπολική οδήγηση*

1. Θέτουμε μια λογική συχνότητα και στη συνέχεια αυξάνουμε το φορτίο έως ότου η ικανότητα επανεκκίνησης του κινητήρα να χαθεί.

Αυτό γίνεται με την εξής διαδικασία. Εάν ο κινητήρας εκκινεί κανονικά στη συχνότητα που έχουμε τοποθετήσει τότε τον σταματάμε, αυξάνουμε κατά ένα βήμα το φορτίο, επανεκκινούμε και ξανασταματάμε. Αυτό έως ότου ο κινητήρας να μην μπορεί να επανεκκινήσει.

2. Στη συνέχεια για να σχηματιστεί η χαρακτηριστική καμπύλη λαμβάνουμε και άλλες τέτοιες μετρήσεις ξεκινώντας από τις χαμηλότερες συχνότητες και πλησιάζοντας στις υψηλές συχνότητες και στην μέγιστη συχνότητα υπό την οποία μπορεί να επανεκκινήσει ο κινητήρας.

3. Εξετάζουμε την επίδραση του μονοπολικού PPS.

#### *Διπολική οδήγηση*

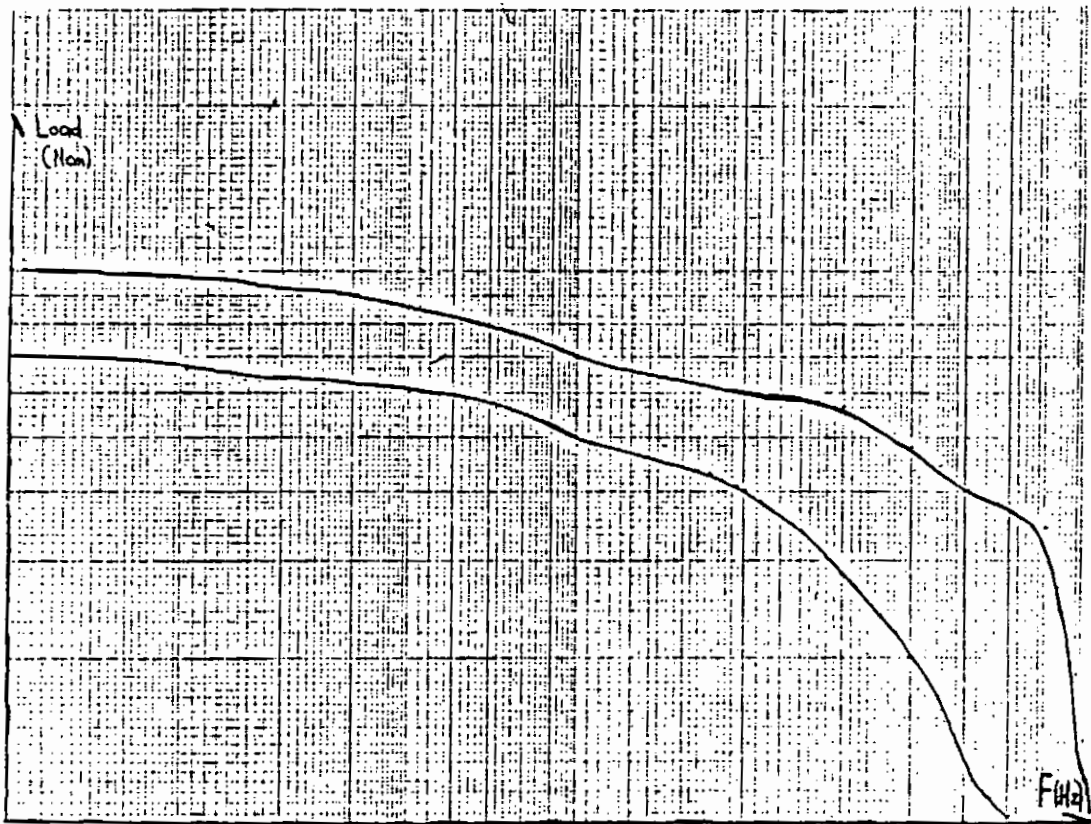
4. Εκτελούμε τα παραπάνω βήματα 1 και 2 και εξετάζουμε την επίδραση του διπολικού PPS.

5. Σχεδιάστε την χαρακτηριστική κατά την μονοπολική οδήγηση τοποθετώντας την ροπή στρέψης στον άξονα Y και την συχνότητα στον άξονα X.

6. Ομοίως και με την χαρακτηριστική κατά την διπολική οδήγηση. Οι δυο καμπύλες να τοποθετηθούν στο ίδιο διάγραμμα.

#### **Ερωτήσεις**

Με ποιόν τρόπο επιδρά η δυνατότητα ρύθμισης του PPS πάνω στις καμπύλες κατά τη μονοπολική οδήγηση;



Χαρακτηριστικές pull in torque

Με ποιόν τρόπο επιδρά το PPS πάνω στις καμπύλες κατά την διπολική οδήγηση;

### Πίνακας μετρήσεων

#### Μονοπολική οδήγηση

Συχνότητα (Hz)	Ροπή στρέψης (Ncm)
10	70
50	60
100	48
200	40
300	27
400	20
500	12
600	5

#### Διπολική οδήγηση

Συχνότητα (Hz)	Ροπή στρέψης (Ncm)
10	100
50	85
100	70
200	60

110

300	56
400	48
500	40
600	38
700	34
800	12

Με τις παραπάνω μετρήσεις χαράσσουμε τις χαρακτηριστικές pull in torque του κινητήρα. Τα ποτενσιόμετρα PPS σταθερά στο 50%.

### **Πείραμα 7**

#### **Συντονισμός**

#### **Αντικείμενο**

Λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι ο βηματικός κινητήρας είναι μια μηχανή που αποτελείται από κινητό και ακίνητο μέρος, που επιταχύνεται και επιβραδύνεται από ηλεκτομαγνητικές δυνάμεις, μπορούμε να πούμε ότι είναι βέβαιη η ταλάντωσή του γύρω από την καθορισμένη θέση ισορροπίας. Σε ορισμένες συχνότητες η ταλαντωτική



συμπεριφορά δεν αποσβαίνει ικανοποιητικά. Τότε ο κινητήρας σταματά να λειτουργεί, χάνει βήματα ή δεν μπορεί να εκκινήσει. Ο συντονισμός εξαρτάται από το μηχανικό σχεδιασμό. Το σχήμα των δοντιών του δρομέα, την αδράνεια του δρομέα, την τριβή αλλά επίσης και από το φορτίο. Αδράνεια του φορτίου, υστέρηση στον μηχανισμό μετάδοσης κ.τ.λ. Το σχήμα και η σχεδίαση των ηλεκτρικών παλμών που δίνονται στα κυκλώματα οδήγησης παίζει επίσης ρόλο στην τάση του να δημιουργούνται φαινόμενα συντονισμού. Οι ταλαντώσεις συνήθως αποσβαίνουν μέσω τριβών, με υδραυλικά μέσα, με αέρια μέσα, ή με συνδιασμό των παραπάνω. Στην περίπτωση μας έχουμε τους εξής τρόπους για να ελαχιστοποιήσουμε το πρόβλημα του συντονισμού. Μηχανικά με μεταβολή της εξωτερικής αδράνειας και τριβής και ηλεκτρικά με μεταβολή του τύπου διέγερσης ή με χρήση του συστήματος Pulse Positioning. Φυσικά θα λειτουργήσουμε τον κινητήρα με μονοπολική και δίοπολική οδήγηση. Θα διαπιστώσουμε σε ποιές συχνότητες παρατηρούμε συντονισμούς και ποιό φορτίο τριβής μπορεί να αποσβέσει τις ταλαντώσεις στις συχνότητες αυτές.

## **Εκτέλεση**

### *Μονοπολική οδήγηση.*

1. Βεβαιωνόμαστε πώς ο κινητήρας είναι εν κενώ.

Αυξάνουμε την ταχύτητα σιγά - σιγά και παρατηρούμε τις συχνότητες που σημειώνεται συντονισμοί. Τα ποτενσιόμετρα PPS έχουν αρχική θέση στο 50%.

2. Επαναλαμβάνουμε το βήμα 1 αλλά προσπαθούμε να βρούμε την βέλτιστη ρύθμιση στα ποτενσιόμετρα PPS ώστε εάν είναι δυνατόν να απαλείψουμε τις συχνότητες συντονισμού. Περιγράφουμε την ρύθμιση ως εξής: upper 25%, lower 50%.
3. Επαναλαμβάνουμε το βήμα 2 αλλά αυτή τη φορά αυξάνουμε το φορτίο στον κινητήρα κάθε φορά που συναντάμε συχνότητα συντονισμού. Σημειώνουμε την απαραίτητη ροπή για την απόσβεση των ταλαντώσεων.

#### **Παρατήρηση 1**

Οι παρακάτω πίνακες μετρήσεων έχουν ο καθένας 12 γραμμές. 4 για μηδενικό φορτίο αδράνειας, 4 για τον μικρό σφόνδυλο ( ένδειξη 1 ) και 4 για το συνολικό φορτίο αδράνειας (ένδειξη 3I). Σημειώνουμε τις συχνότητες για κάθε περίπτωση.

#### **Παρατήρηση 2**

Συνήθως υπάρχει τουλάχιστον μια συγκεκριμένη συχνότητα εντός του πεδίου λειτουργίας του κινητήρα όπου το φορτίο έχει την τάση να τίθεται εκτός φάσης τελείως μέσω αρκετά ισχυρών ταλαντώσεων. Επίσης υπάρχουν δύο τουλάχιστον συχνότητες όπου χάνονται βήματα. Αυτές οι συχνότητες χαρακτηρίζονται απο έναν ήχο σαν "σφυροκόπημα ". Προσπαθήστε να βρείτε τις συχνότητες αυτές.

#### **Παρατήρηση 3**

Η απόσβεση μέσω του φορτίου τριβής έτσι όπως αυτό εφαρμόζεται στον κινητήρα δεν είναι μια καλή μέθοδος απόσβεσης αλλά είναι μία ένδειξη των δυνατοτήτων που υπάρχουν.

*Διπολική οδήγηση*

Επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα χρησιμοποιώντας διπολική οδήγηση.

**Πίνακας μετρήσεων***Μονοπολική οδήγηση*

Η στήλη *εν κενώ* συμπληρώνεται από τις συχνότητες συντονισμού.

Η στήλη *PPS optimized* από τις ρυθμίσεις στα ποτενσιόμετρα PPS στις οποίες πετυχαίνουμε την βέλτιστη απόσβεση

	<i>εν κενώ</i>	<i>PPS optimized</i>
	(Hz)	(upper %, lower %)
resonance	100	50 , 0
resonance	133	100 , 0
resonance	200	100 , 100
resonance	400	100 , 100
resonance	1 100	100 , 0

resonance		133	100	,	0
resonance		200	75	,	75
resonance		400	100	,	100
resonance	3	100	100	,	50
resonance	3	133	100	,	0
resonance	3	200	75	,	75
resonance	3	400	100	,	100

*Διπολική οδήγηση.*

		<i>εν κενώ</i>		<i>PPS optimized</i>
		(Hz)		(upper %, lower %)
resonance		100	50	, 100
resonance		133	50	, 100
resonance		200	50	, 100
resonance		400	50	, 100
resonance		100	50	, 100
resonance		133	50	, 100
resonance		200	50	, 100
resonance		400	50	, 100
resonance	3	100	50	, 100
resonance	3	133	50	, 100
resonance	3	200	50	, 100
resonance	3	400	50	, 100

### Ερωτήσεις

- a. Γιατί υπάρχουν περισσότερες απο μια συχνότητες συντονισμού;
- b. Γιατί ο συντονισμός αποσβαίνει απο την τριβή;
- c. Πως επιδρούν τα ποτενσιόμετρα PPS, στον συντονισμό;
- d. Πως επιδρά ένα υδραυλικό σύστημα απόσβεσης;
- e. Ποιές διαφορές υπάρχουν μεταξύ μονοπολικής και διπολικής οδήγησης;

### Σημείωση

Ένας από τους σημαντικότερους μηχανικούς αποσβέστες είναι ο VCID ( viscously coupled inertia damper ). Ο VCID αποτελείται από έναν αδρανειακό σφόνδυλο ο οποίος βρίσκεται εντός ενός κυλινδρικού περιβλήματος. Το περίβλημα είναι άκαμπτα συνδεδεμένο με τον άξονα του κινητήρα. Τα δύο αυτά μέλη μπορούν και στρέφονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Το μεταξύ τους κενό είναι μικρό και γεμάτο από ένα υγρό με βάση τη σιλικόνη. Έτσι κάθε σχετική κίνηση του ενός μέλους σε σχέση με το άλλο οδηγεί στην εμφάνιση ελκτικών δυνάμεων και στα δύο μέλη. Ας υποθέσουμε ότι ο δρομέας ταλαντώνεται. Έαν ο αδρανειακός σφόνδυλος έχει μεγάλη αδράνεια, τότε θα τείνει να

περιστρέφεται σε μια σταθερή ταχύτητα. Αρα θα ταλαντώνεται και με διαφορετική ταχύτητα από ότι ο δρομέας. Η τριβή γενικά αντιστέκεται σε κάθε μεταβολή στην ταχύτητα και έτσι αποσβαίνει η ταλάντωση.

### **Πείραμα 8**

#### **Χαρακτηριστικές με φορτίο αδράνειας**

##### **Αντικείμενο**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αδράνεια του φορτίου επηρεάζει κατά πολύ την λειτουργία του συστήματος. Εάν υπάρχει αρκετός χρόνος διαθέσιμος, τότε τα πειράματα 1 - 7 θα πρέπει να γίνουν και με την χρήση του φορτίου αδράνειας και τότε θα σημειωθούν σημαντικές παρατηρήσεις. Ειδικά στην περίπτωση εκτέλεσης του πειράματος του συντονισμού η συχνότητα θα πρέπει να αυξάνει αρκετά σιγότερα σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν είχαμε το φορτίο αδράνειας.

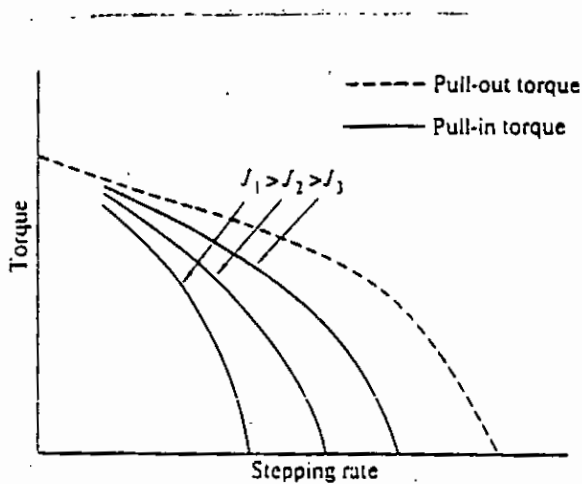
##### **Έξτρα εξοπλισμός**

Οι δύο αδράνειακοί σφόνδυλοι και τα σχετικά εργαλεία.

##### **Εκτέλεση**

1. Εφαρμόζουμε στον άξονα του κινητήρα τον μεγάλο σφόνδυλο και επαναλαμβάνουμε τα πειράματα 1 - 7 εάν ο χρόνος το επιτρέπει.

2. Συγκρίνεται τα προβλήματα συντονισμού με και χωρίς το σφόνδυλο. Παρατηρείστε ότι χρειάζεται να αυξάνουμε τη συχνότητα πολύ πιο προσεκτικά απο πριν.
  3. Τι συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν απο τα αποτελέσματα;
  4. Χρησιμοποιούμε προγραμματιζόμενη λειτουργία και όλους τους συνδιασμούς φορτίου αδράνειας. Είναι δυνατόν να εκτελέσει το σύστημα τον καθορισμένο αριθμό περιστροφών;
  5. Που εμφανίζονται προβλήματα; Κατά την επιτάχυνση ή κατα την επιβράδυνση; Κάντε σύγκριση μεταξύ μονοπολικής και διπολικής οδήγησης.
- Ποιές οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ ενός φορτίου με χαμηλή αδράνεια και ενός φορτίου με υψηλή αδράνεια.



Επίδραση της αδράνειας στις καμπύλες pull in

## Πείραμα 9

### Ροπή στρέψης συγκράτησης

#### Αντικείμενο

Είναι σημαντικό το να έχει ο βηματικός κινητήρας την ικανότητα να διατηρεί την θέση του. Αυτό σημαίνει ότι η ροπή στρέψης συγκράτησης θα πρέπει να είναι υψηλότερη από την ροπή στρέψης pull in και την ροπή στρέψης pull out. Συνήθως ένα σύστημα του οποίου μέρος αποτελεί ο βηματικός κινητήρας δεν είναι εντελώς απαλλαγμένο από τανύσεις στους άξονες, αλλά υπάρχει και η περίπτωση να μεταφερθούν και να επιδράσουν σε αυτό και δυνάμεις εξ' αιτίας του φορτίου.

#### Εκτέλεση.

1. Προσαρμόζουμε την μεγάλη μάζα ( το μεγάλο σφόνδυλο ) στον άξονα εξόδου. Προσαρμόζουμε τον χαραγμένο άξονα στον σφόνδυλο και επιλέγουμε την λειτουργία single step. Φέρνουμε τον άξονα σε θέση όπου αυτός είναι οριζόντιος. Τοποθετούμε την μικρή μάζα ( μικρότερο σφόνδυλο ) σε μία ακίδα κοντά στην μεγάλη μάζα.



2. Μετακινούμε τον μικρό σφόνδυλο σιγά - σιγά κατά μήκος του άξονα εως ότου ξεπεράσουμε την ροπή στρέψης συγκράτησης και σημειώνουμε το σημείο. Επαναφέρουμε τον άξονα σε οριζόντια θέση μέσω της λειτουργίας single step.
3. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία άλλες δύο φορές και υπολογίζουμε την ροπή στρέψης συγκράτησης.
4. Είναι : ροπή = μήκος x βάρος. Το μήκος μεταξύ δύο διαδοχικών ακίδων του βαθμολογιμένου άξονα είναι ίσο με 10 mm. Το βάρος του σφονδύλου είναι 0,92 Kgr. και η ακτίνα του είναι 6,0 cm που σημαίνει ότι το πρώτο σημείο χάραξης της ράβδου που είναι προσαρμοσμένη στην περιφέρεια του σφονδύλου ισοδυναμεί με ένα μοχλό μήκους 7cm. Η συνισφορά στη ροπή στρέψης αυτής της ράβδου είναι 19,5 Ncm και  $g = 9,81$ .
5. Τα παραπάνω ισχύουν για μονοπολική / διπολική οδήγηση.

### Πίνακας μετρήσεων.

#### Ροπή στρέψης συγκράτησης (Ncm)

#### Μονοπολική οδήγηση

Ροπή στρέψης συγκράτησης = μήκος x βάρος

Μέτρηση 1 \_\_\_\_\_

Μέτρηση 2 \_\_\_\_\_  
 Μέτρηση 3 \_\_\_\_\_  
 Μέση τιμή \_\_\_\_\_

#### Διπολική οδήγηση

Μέτρηση 1 \_\_\_\_\_  
 Μέτρηση 2 \_\_\_\_\_  
 Μέτρηση 3 \_\_\_\_\_  
 Μέση τιμή \_\_\_\_\_

#### Σημείωση

Είναι Ροπή στρέψης συγκράτησης =  $9,5\text{cm} \times 0,92 \times 9,81 + 19,5 \text{ Ncm} = 105\text{Ncm}$ .

Αυτή είναι η ροπή στρέψης συγκράτησης στη μονοπολική οδήγηση.

Για την διπολική οδήγηση αντίστοιχα έχουμε:

$$\underline{14,5 \text{ cm}} \times 0,92 \times 9,81 + 19,5 \text{ Ncm} = 150 \text{ Ncm}.$$

Αρα κατά τη διπολική οδήγηση παρατηρούμε σημαντική αύξηση της ροπής στρέψης συγκράτησης του κινητήρα. Γενικά όσο πιο μεγάλη είναι η ροπή στρέψης συγκράτησης τόσο μικρότερο είναι το σφάλμα στην τοποθέτηση του δρομέα.

## Πείραμα 10

### PPS - Pulse Positioning System

#### Αντικείμενο

Όταν λειτουργούμε το σύστημα σε συχνότητες σημαντικά χαμηλότερες από την σταθερά χρόνου του κινητήρα υπάρχει σοβαρή πιθανότητα να γίνει παροχή πρόσθετων παλμών ώστε να βελτιωθεί η τοποθέτηση του δρομέα. Σε χαμηλές ταχύτητες, η αστάθεια που παρουσιάζεται και που οφείλεται στον εσωτερικό συντονισμό μπορεί να εξαφανιστεί μέσω μιάς μορφής ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται back phasing. Η απόσβεση επιτυγχάνεται προσθέτοντας ένα μισό βήμα σε κατεύθυνση προς τα πίσω για κάθε βήμα με κατεύθυνση προς τα εμπρός. Αρχικά δίνουμε παλμό που αντιστοιχεί σε κίνηση του δρομέα για ένα ολόκληρο βήμα προς τα εμπρός και στη συνέχεια προτού ο δρομέας φτάσει στην νέα θέση, δίνουμε έναν παλμό ο οποίος προκαλεί κίνηση του δρομέα για μισό βήμα προς τα πίσω. Αυτό προκαλεί την επιβράδυνση του δρομέα. Μόλις σταματήσει η επιβραδυνόμενη κίνηση του δρομέα προς τα εμπρός και πριν αυτός αρχίσει να πηγαίνει προς τα πίσω δίνουμε νέο παλμό με κατεύθυνση προς τα εμπρός οπότε κλειδώνουμε τον δρομέα στη θέση που βρισκόταν. Στον SD 1664, η απόσβεση γίνεται μέσω του συστήματος Pulse Positioning. Με τα δύο

ποτενσιόμετρα είναι δυνατόν το να ρυθμίσουμε το που ακριβώς θα εφαρμοσθεί ο ανάστροφος παλμός ( back phasing pulse) και το πόση ακριβώς θα είναι η διάρκειά του. Υπάρχουν ασφαλώς και προβλήματα απο τα οποία το σημαντικότερο είναι το πρόβλημα του ελέγχου της μορφής των παλμών για όσο αυξάνεται η συχνότητα. Στο πείραμα αυτό θα μελετήσουμε την δυνατότητα ελέγχου των παλμών ηλεκτρονικά καθώς και την επίδραση στον κινητήρα:

### **Εκτέλεση**

1. Μελετήστε τα σχήματα 12.1 - 12.3 προσεκτικά. Παρατηρήστε το ότι είναι οι χρόνοι T1 και T2 που ρυθμίζονται απο τα ποτενσιόμετρα PPS. Ο χρόνος T είναι ο χρόνος για το βήμα και έτσι θα ρυθμίζεται απο το ποτενσιόμετρο speed. Οι χρόνοι T1 και T2 είναι σε ποσοστά % του χρόνου T.

### **Μονοπολική οδήγηση**

2. Κάντε μια επιλογή απο τέσσερις διαφορετικές συχνότητες. Μια αρκετά χαμηλή, μια όσο μεγάλη γίνεται για σταθερή λειτουργία και δύο συχνότητες ενδιάμεσα. Βρείτε τις συχνότητες αυτές απλώς τρέχοντας τον κινητήρα με τον mode selector στη θέση 1 και με ένα λογικό φορτίο περίπου 20 Ncm.

Συνδέστε τον παλμογράφο με δύο κανάλια σε μία επιλογή απο τους διακόπτες SW1 - SW4.

3. Δώστε διάφορες ρυθμίσεις στα ποτενσιόμετρα PPS και παρατηρείστε την επίδρασή τους στην κυματομορφή.
4. Σε μία συχνότητα η λειτουργία του PPS θα διακοπεί. Βρείτε τη συχνότητα αυτή.
5. Για κάθε μελετηθήσα συχνότητα, προσπαθείστε να βρείτε τα όρια ελέγχου των: T1 και T2 σε ποσοστά % του αντίστοιχου χρόνου T.

#### *Διπολική οδήγηση*

7. Εκτελέστε τα βήματα 2 - 6 επιλέγοντας διπολική οδήγηση.

#### **Πίνακας μετρήσεων**

##### *Μονοπολική οδήγηση*

Frequency (Hz)	range T1 % - %	range T2 % - %
100	0 - 20	10 - 30
200	0 - 50	20 - 50
500	0 - 100	40 - 100

*Διπολική οδήγηση*

Frequency ( Hz)	range T1 % - %	range T2 % - %
<b>200</b>	<b>50 - 70</b>	<b>0 - 20</b>
<b>240</b>	<b>40 - 60</b>	<b>10 - 20</b>
<b>500</b>	<b>0</b>	<b>10 - 40</b>

Δώστε τις παλμοσειρές για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- a. μονοπολική οδήγηση με ενεργό το PPS.
- b. μονοπολική οδήγηση με ανενεργό το PPS.
- c. διπολική οδήγηση με ενεργό το PPS.
- d. διπολική οδήγηση με ανενεργό το PPS.

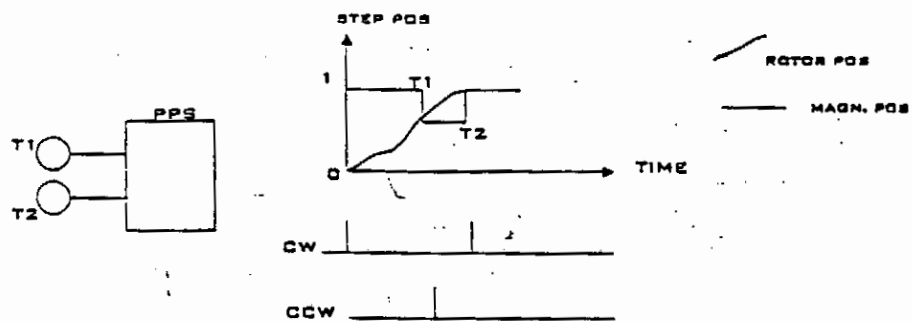
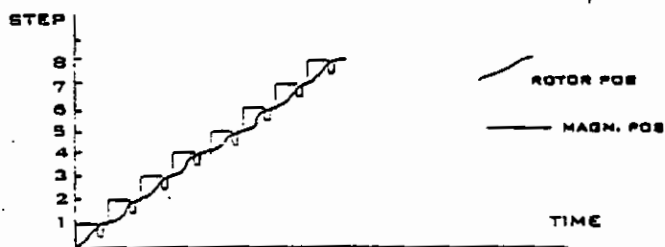
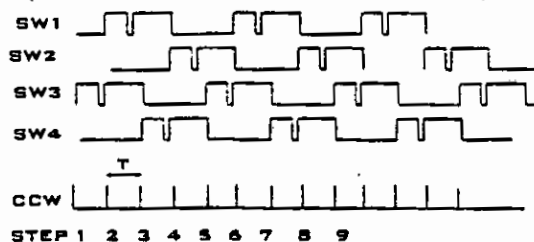
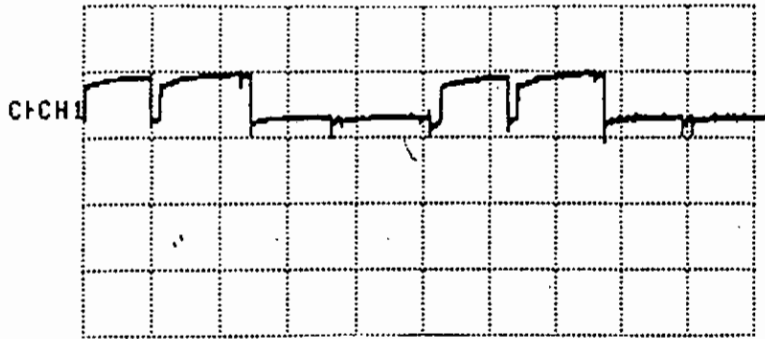


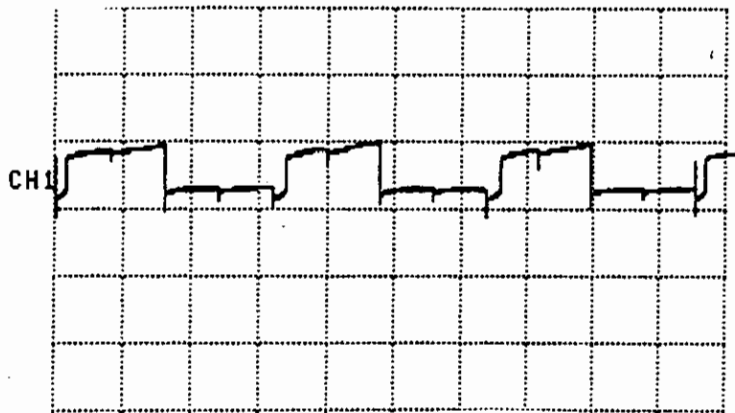
FIGURE 12.1



$\Sigma$ x. 12.1, 12.2, 12.3

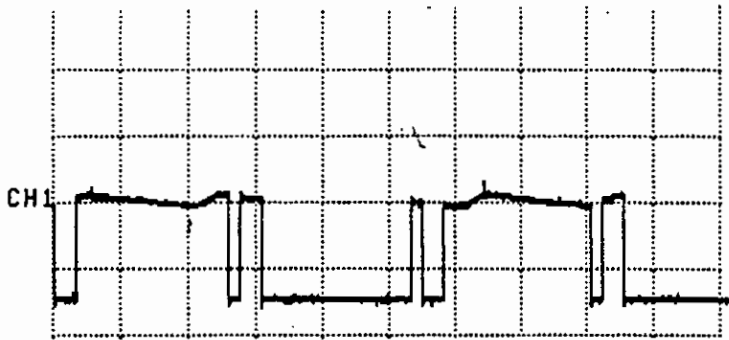


**a. Μονοπολική οδήγηση με ενεργό το PPS**

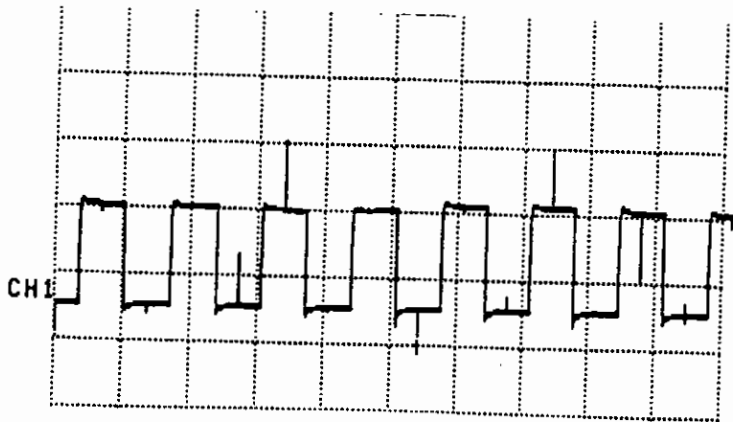


**b. Μονοπολική οδήγηση με ανενεργό το PPS**





**γ. Διπολική οδήγηση με ενεργό το PPS**



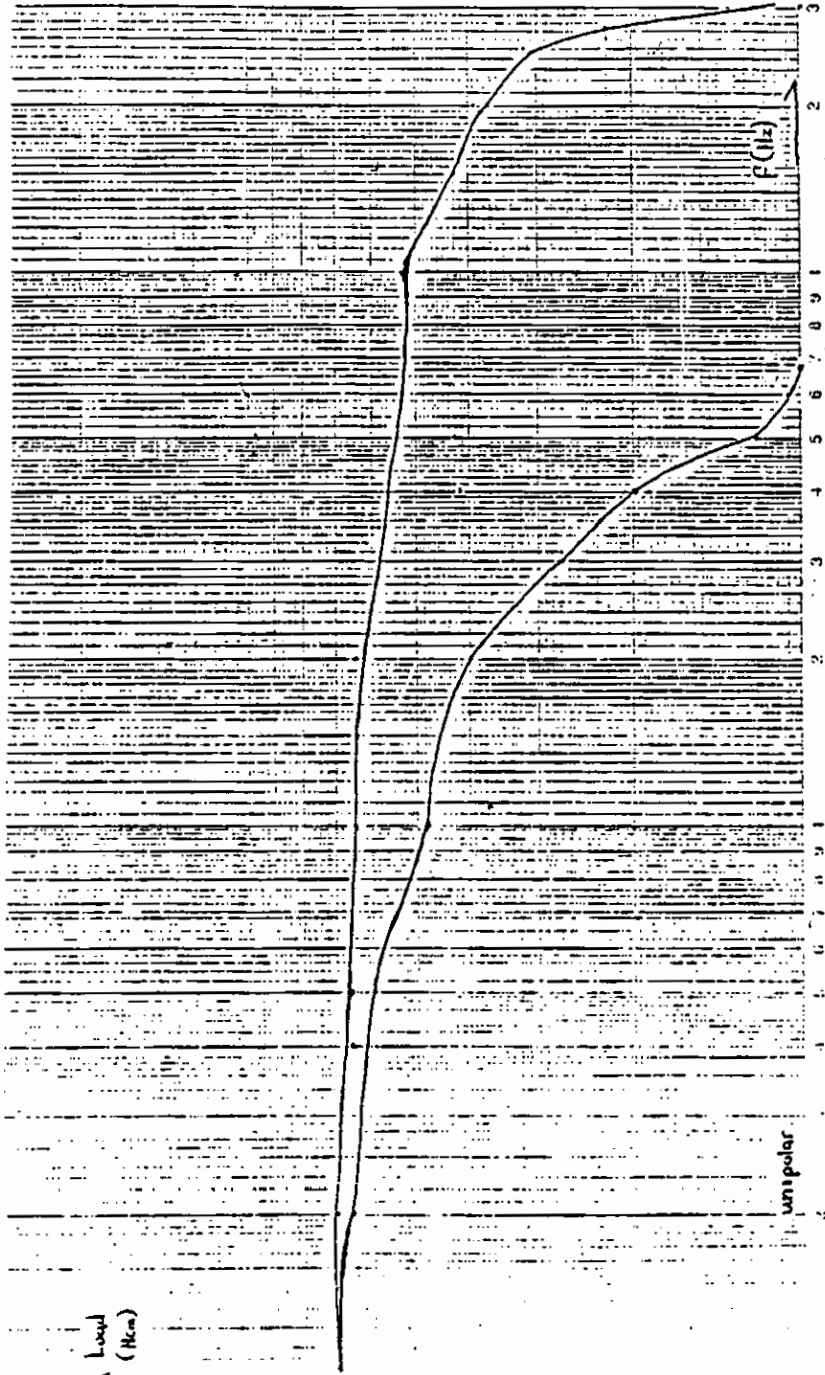
**δ. Διπολική οδήγηση με ανενεργό το PPS**

**Πείραμα 11****Ανακεφαλαίωση****Αντικείμενο**

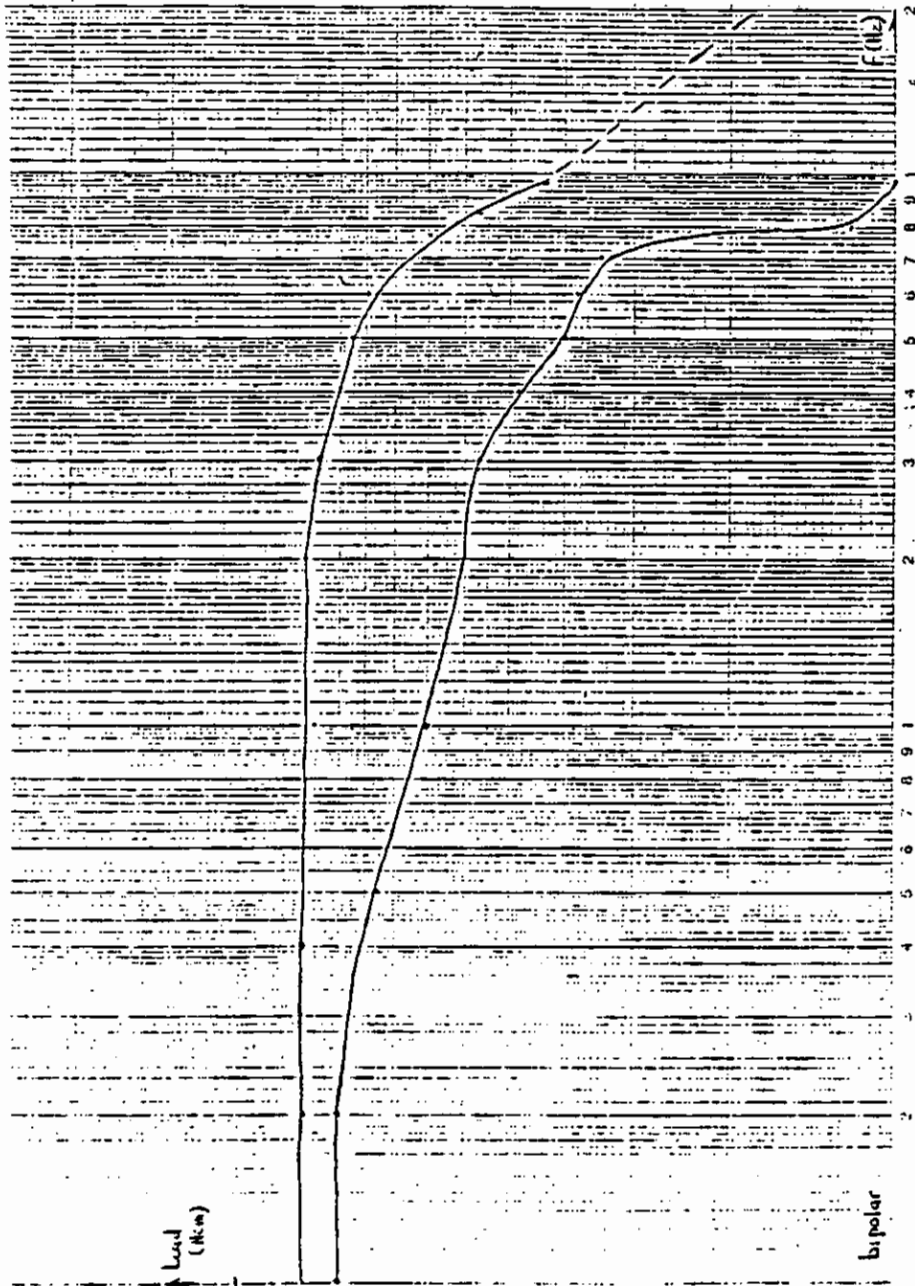
Να γίνει ανακεφαλαίωση των δυνατοτήτων που παρουσιάζει ο βηματικός κινητήρας αλλά επίσης να επισημανθεί το που είναι ακατάλληλη ή και αδύνατη η χρήση του.

**Εκτέλεση**

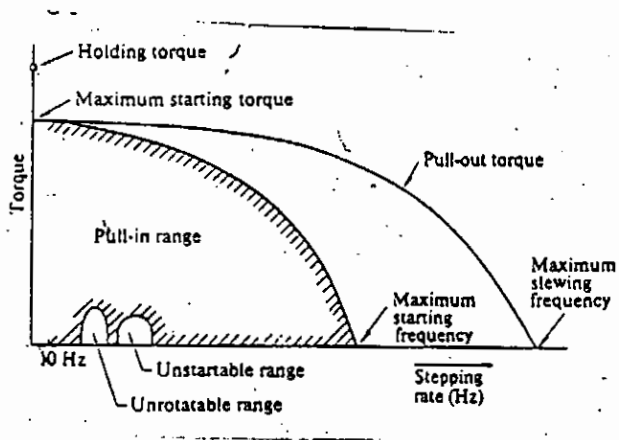
1. Τι συμπεράσματα μπορούν να βγούν για τη χρήση του κινητήρα σε διαφορετικά ήδη φορτίου.
2. Σχεδιάστε διάγραμμα όπου να δείχνονται συνολικά τα στοιχεία των μετρήσεων (πεδίο εκκίνησης, πεδίο περιστροφής ) ώστε να προκύψει το πλήρες λειτουργικό διάγραμμα του κινητήρα.



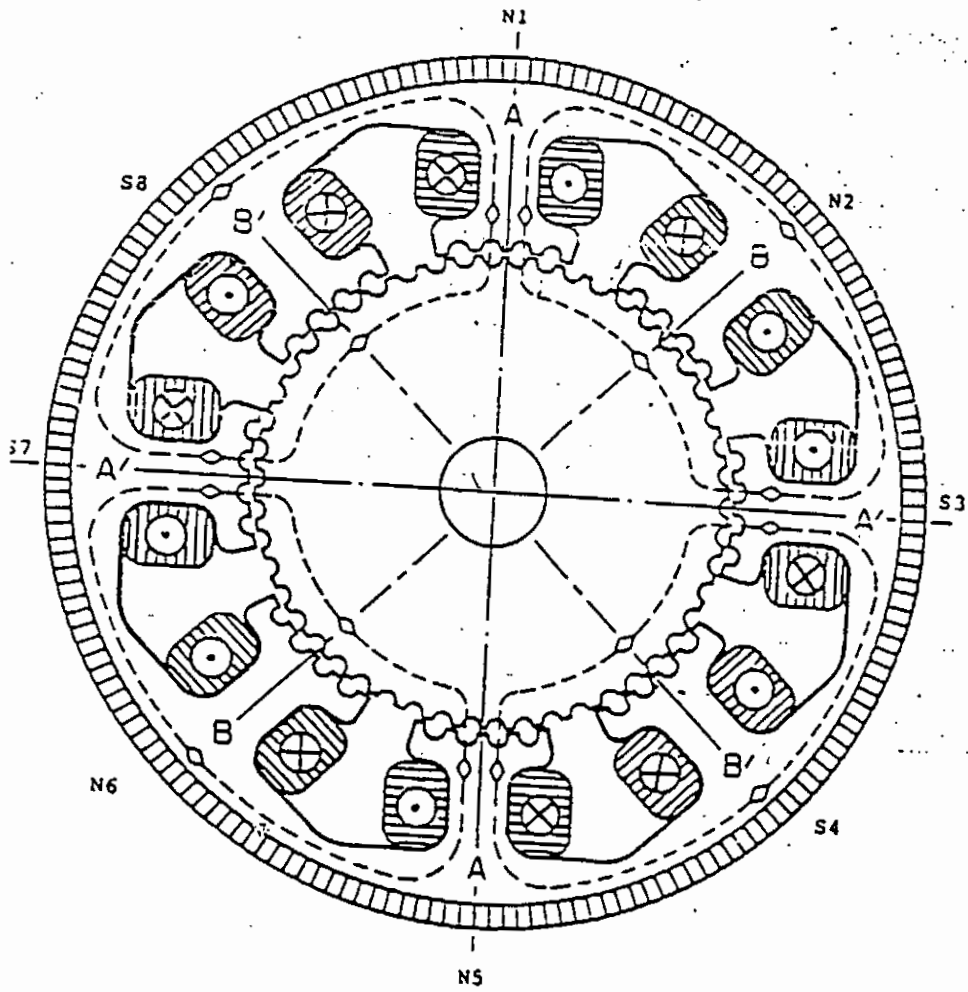
Λειτουργικό διάγραμμα, μονοπολική οδήγηση



Λειτουργικό διάγραμμα, διπολική οδήγηση



Τυπικές δυναμικές χαρακτηριστικές

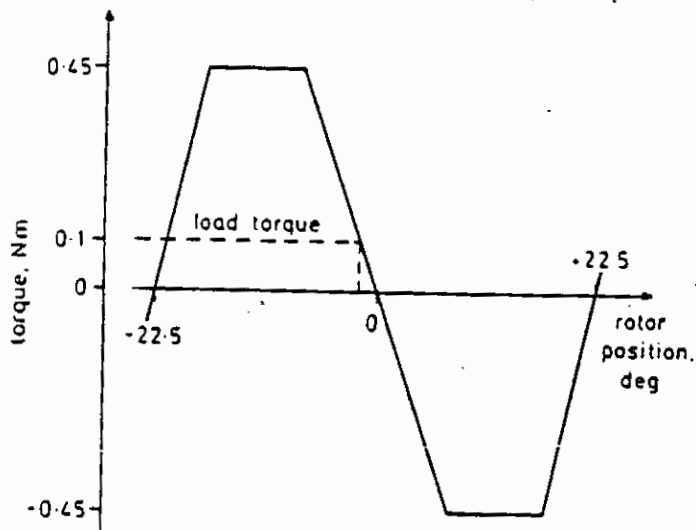


Ο υβριδικός διφασικός βηματικός κινητήρας της μονάδας SD1664

## 10. Παράρτημα

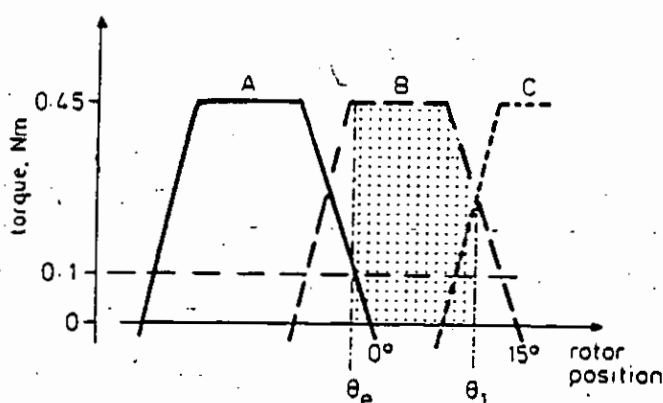
## 10.1 Υπολογισμός starting rate

Τριφασικός βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχει μήκος βήματος 15 μοίρες και μία του φάση είναι υπο διέγερση στο καθορισμένο ρεύμα. Η αντίστοιχη χαρακτηριστική στατικής λειτουργίας δίνεται στο σχήμα. Υπολογίστε την starting rate για φορτίο αδράνειας  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Kg}\pi^2$  και ροπής στρέψης 0.1 Nm.



Χαρακτηριστική static torque / rotor position

Το πρώτο βήμα είναι να χαράξουμε τις χαρακτηριστικές στατικής λειτουργίας για κάθε μία από τις τρεις φάσεις του κινητήρα. Οι χαρακτηριστικές θα είναι μετατοπισμένες μεταξύ τους κατά 15 μοίρες όπως φαίνεται στο σχήμα.



#### Χαρακτηριστικές και για τις τρεις φάσεις

Το σφάλμα στην τοποθέτηση του φορτίου κατά την στατική λειτουργία μπορεί να υπολογισθεί από τις χαρακτηριστικές με γραφική μέθοδο αν φέρουμε μια γραμμή που αντιστοιχεί σε φορτίο 0.1 Nm. Η γραμμή αυτή τέμνει την χαρακτηριστική περίπου 2 μοίρες από την θέση ισορροπίας, οπότε  $\theta_e = -2$  μοίρες =  $-0.035$  rad. Το σημείο διασταύρωσης για τις χαρακτηριστικές των φάσεων B και C βρίσκεται στο σημείο  $\theta_1 = 10.5$  μοίρες =  $0.117$  rad. Η μέση ροπή στρέψης που παράγει ο κινητήρας καθώς ο ρότορας μετακινείται μεταξύ των θέσεων  $\theta_e$  και  $\theta_1$  είναι ίση με το εμβαδόν της γραμμοσκιασμένης περιοχής (σχήμα ) αν διαιρεθεί με την διανυόμενη απόσταση. Καθώς τα όρια της περιοχής είναι ευθείες γραμμές το εμβαδόν υπολογίζεται εύκολα.

$$E = (0.45 \times 9.5) + [(0.45 + 0.27) \times 3/2] \text{ Nmdegrees} = 53.5 \text{ Nmdegrees.}$$

$$\text{και } T_M = E / \text{απόσταση} = 53.5 / (10.5 + 2.0) \text{ Nm} = 0.428 \text{ Nm.}$$



Είναι : Starting rate =  $[(T_M - T_L) / J (\theta_1 - \theta_0)]^{1/2} = 104 \text{ steps / s}$

Άρα starting rate = 104 steps / s.

## 10.2 Γραμμική επιτάχυνση

Πόση ροπή στρέψης  $T_M$  απαιτείται για να επιταχύνει ο βηματικός κινητήρας ένα φορτίο αδράνειας  $J = 10^{-4} \text{ kgm}^2$  από  $\omega_1 = 100 \text{ rad / s}$  σε  $\omega_2 = 300 \text{ rad / s}$  σε χρόνο  $0.1 \text{ s}$

Η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση του συστήματος είναι η

$$T_M - T_L = J (d^2\theta / dt^2) \text{ ή } T_M - T_L = J (d\omega / dt) \text{ αφού } \omega = d\theta / dt.$$

Είναι  $T_L = 0$  οπότε  $T_M = J (d\omega / dt)$

Έχουμε ότι,  $d\omega / dt = (300 - 100) / 0.1 = 2 \times 10^3 \text{ rad/s}$  οπότε θα είναι

$$T_M = J (d\omega / dt) = 0.2 \text{ Nm}$$

Άρα ο βηματικός κινητήρας χρειάζεται να μπορεί να αναπτύξει ροπή στρέψης ίση με  $T_M = 0.2 \text{ Nm}$ .

### 10.3 Σχεδίαση μονοπολικού κυκλώματος οδήγησης

3 - φασικός βηματικός κινητήρας VR έχει ωμική αντίσταση τυλίγματος ίση με  $1 \Omega$ , ενώ η αυτεπαγωγή της κάθε φάσης είναι  $40 \text{ mH}$ . Η καθορισμένη τιμή του ρεύματος όταν αυτό διαρρέει το τύλιγμα της κάθε φάσης είναι  $2\text{A}$ . Σχεδιάστε ένα μονοπολικό κύκλωμα οδήγησης το οποίο να έχει σταθερά χρόνου  $2\text{ms}$  κατά την έναυση και  $1 \text{ms}$  κατά τη σβέση.

Έχουμε ότι : σταθερά χρόνου =  $L/R = \tau$ . Στην έναυση θέλουμε  $\tau = 2\text{ms}$ .

Άρα  $L/R = 2\text{ms}$  οπότε  $R = 40\text{mH} / 2\text{ms} = 20 \Omega$ .

Αυτή είναι η συνολική ωμική αντίσταση της φάσης. Η Ωμική αντίσταση του τυλίγματος είναι  $1 \Omega$ . Έτσι χρειαζόμαστε εξωτερική πρόσθετη ωμική αντίσταση  $R_1 = 19 \Omega$ . Η d.c τάση με την οποία χρειάζεται να τροφοδοτηθεί το κύκλωμα είναι  $V = 2\text{A} \times 20\Omega = 40 \text{V}$ . Μειονέκτημα οι υψηλές απώλειες ισχύος στην  $R_1$  ίσες με  $76\text{W}$ . Στην σβέση θέλουμε σταθερά χρόνου  $\tau = 1\text{ms}$ . Άρα  $R = 40 \Omega$ . Αυτή είναι η συνολική ωμική αντίσταση του κυκλώματος ελευθέρως διέλευσης. Συνεπώς θέλουμε  $R_1 = 20\Omega$ . Αυτή είναι η τιμή της αντίστασης ελευθέρως διέλευσης.

### 10.4 Διπολική οδήγηση

Κινητήρας με αυτεπαγωγή φάσης 40mH και καθορισμένη τιμή στο φασικό ρεύμα ίση με 2A χειρίζεται απο διπολικό δίνερ με τάση τροφοδοσίας 40V και συνολική φασική αντίσταση 20Ω. Κατά την σβέση υπολογίστε τον χρόνο που χρειάζεται το ρεύμα για να πέσει στο μηδέν και το ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας μαγνητικού πεδίου που επιστρέφει στην τροφοδοσία.

Κατά τη σβέση το φασικό ρεύμα αποσβαίνει εκθετικά απο την αρχική τιμή του των +2A προς μία τελική τιμή -2A. Η σταθερά χρόνου είναι ίση με  $T = L/R = 2\text{ms}$ . Θεωρούμε οτι η σβέση ξεκινάει στη χρονική στιγμή  $t = 0$ . Τότε για το φασικό ρεύμα προκύπτει η σχέση:

$$i = 2e^{-t/T} - 2(1 - e^{-t/T}) = -2 + 4e^{-t/T}$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να προσεγγιστεί απο την

$$i = -2 + 4(1 - t/T) = 2 - 4(t/T)$$

Για  $i = 0$  είναι  $i = 2 - 4(t/T) = 0 \Rightarrow t = 1\text{ms}$ .

Αρα το ρεύμα πέρνει την τιμή μηδέν μετά απο χρόνο 1ms.

Η στιγμιαία ισχύς που επιστρέφει στην τροφοδοσία είναι ίση με  $V \times i$

Για το χρονικό διάστημα  $t = 1\text{ms}$  θα είναι:

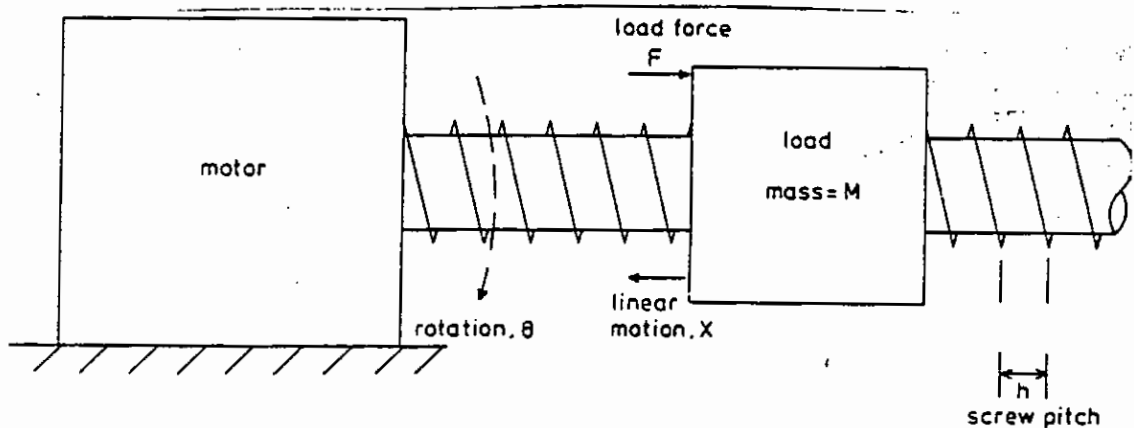
$$\text{Ενέργεια που επιστρέφει} = \int_0^t v i dt = \int_0^t 40(2 - 4t/T) dt = 40 \text{ mJ}$$

Η ενέργεια που αποθηκεύτηκε στην αυτεπαγωγή είναι  $1/2 Li^2 = 80\text{mJ}$

Αρά κατά τη σβέση επιστρέφει στην τροφοδοσία το 50% της ενέργειας.

### 10.5 Φορτίο συνδεδεμένο στον κινητήρα με leadscrew

Σε μερικές εφαρμογές του βηματικού κινητήρα απαιτείται αυξητική γραμμική κίνηση.



#### *Κινητήρας συνδεδεμένος με το φορτίο με leadscrew*

Έχουν για αυτό το σκοπό αναπτυχθεί γραμμικοί βηματικοί κινητήρες αλλά πολλά γραμμικά φορτία οδηγούνται από περιστροφικούς κινητήρες με τη βοήθεια της ειδικής βίδας - οδηγού (leadscrew). Ορίζουμε σαν βήμα  $h$  την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακώσεων της βίδας. Τότε μια πλήρης περιστροφή του κινητήρα προκαλεί την μετακίνηση του φορτίου κατά  $h$ . Οπότε για μία γωνιακή

μετατόπιση  $\theta$  θα ισχύει ότι  $\theta/2\pi = x/h$ , όπου  $x$  το διάστημα που αντιστοιχεί στην γωνιακή μετατόπιση  $\theta$  (βλ. σχήμα). Θεωρούμε ότι ο κινητήρας είναι φορτισμένος με φορτίο μάζας  $M$ . Τότε η ροπή φορτίου  $T_L$  προκαλεί την μετακίνηση του ρότορα του κινητήρα κατά  $\theta$  πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα την ευθύγραμμη μετατόπιση του φορτίου κατά  $x$ . Η απόσταση  $x$  είναι το σφάλμα στην τοποθέτηση του φορτίου. Το έργο της ροπής  $T_L$  είναι  $T_L\theta$  και έχουμε ότι  $T_L\theta = Fx$  όπου  $F$  η δύναμη του φορτίου. Έχουμε ότι  $T_L\theta = Fx \Rightarrow T_L = Fh / 2\pi$ . Έτσι για  $F = 9$  KN και  $h = 0.5$  mm έχουμε ότι  $T_L = 0.75$  Nm. Αυτή είναι η ροπή του φορτίου. Τότε για το σφάλμα στην τοποθέτηση του φορτίου αν θεωρήσουμε ότι οι χαρακτηριστικές λειτουργίας του κινητήρα είναι αυτές του σχήματος έχουμε ότι. Ροπή φορτίου 0.75 Nm παράγει περιστροφικό σφάλμα 8 μοιρών. Μέσω της σχέσης  $\theta / 2\pi = x / h$  προκύπτει ότι  $x = 0.011$  mm. Άρα για το συγκεκριμένο φορτίο το σφάλμα στην τοποθέτηση είναι 0.011mm.

## 11. Εφαρμογές

Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις σημαντικότερες εφαρμογές των βηματικών κινητήρων.

**Σε περιφεριακά υπολογιστών.**

Αυτή είναι από τις κύριες περιοχές για τις εφαρμογές των βηματικών κινητήρων. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα περιφεριακών για υπολογιστές. Η

εξάπλωση των desktop και laptop υπολογιστών κατά την δεκαετία '80 επέφερε την εξέλιξη κινητήρων για χρήση στα συστήματα οδήγησης των δισκετών και στους εκτυπωτές. Πράγματι υπάρχουν διάφορα είδη εκτυπωτών όπου οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε σκοπούς όπως η τροφοδοσία του χαρτίου, η περιστροφή του τροχού με τους χαρακτήρες κ.τ.λ. Ευρεία χρήση γίνεται και σε σχεδιογράφους (plotters). Εδώ η κίνηση του βηματικού κινητήρα μεταφέρεται στην γραφίδα μέσω ενός μηχανισμού που χρησιμοποιεί ένα ειδικό ανοξειδοτο σύρμα. Σε plotters που χρησιμοποιούνται στην αναπαραγωγή αρχιτεκτονικών σχεδίων, σχεδίων ολοκληρωμένων και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ένας βηματικός κινητήρας μετακινεί το χαρτί κατά μήκος του άξονα Y ενώ ένας άλλος βηματικός κινητήρας μετακινεί την γραφίδα κατά μήκος του άξονα X. Ακόμα από τις σημαντικότερες χρήσεις του βηματικού κινητήρα είναι στα συστήματα οδήγησης μαλακών και σκληρών δίσκων.

### **Σε εργαλειομηχανές**

Τις σημαντικότερες εφαρμογές τους οι βηματικοί κινητήρες τις βρίσκουν σε πλάνες, σε υφαντουργικές μηχανές και γενικά σε μηχανές όπου απαιτείται ακριβής τοποθέτηση του αντικειμένου που θέλουμε να καταργαστούμε και στους τρεις άξονες.

### **Σε μηχανές γραφείου**

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε φωτοτυπικά μηχανήματα στο μηχανισμό σμίκρυνσης / μεγέθυνσης των αντιγράφων

και σε συσκευές FAX, όπου βηματικοί κινητήρες οδηγούν το τύμπανο και τη γραφίδα της συσκευής.

**Εφαρμογές στην τεχνολογία των ημιαγωγών.**

Για την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται ειδικοί βηματικοί κινητήρες που έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να παρέχουν ακριβή τοποθέτηση σε συνθήκες κενού.

**Εφαρμογές σε διαστημόπλοια και δορυφόρους**

Σημαντικές εφαρμογές βρίσκουν οι βηματικοί κινητήρες ακόμα και στην διαστημική τεχνολογία.

**Βιβλιογραφία**

1. **Stepping motors and their microprocessor controls**  
Takashi Kenjo and Akira Sygawara
2. **Stepping motors. A guide to modern theory and practice**  
P.P Acamley
3. **The stepper motor**  
SD 1664 manual and experiments  
Wilhelm Liander, Lief Delstam  
1994

