

Επιβλέπων: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Καθηγητής Εφαρμογών

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ
ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

**STUDY AND CONSTRUCTION OF STEPPER MOTOR
DRIVER SYSTEM**



**Πτυχιακή Εργασία:
Δραγούνη Ηρακλή (41917)
Κρητικού Ευάγγελου (41590)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι να εξηγήσει το τρόπο λειτουργίας ενός βηματικού κινητήρα και ενός από τα συστήματα οδήγησης του.

Ξεκινώντας, κάνουμε μια αναφορά στα βασικά ηλεκτρονικά που χρησιμοποιήθηκαν στο κατασκευαστικό κομμάτι. Στη συνέχεια αναφέρουμε γενικά τρόπους οδήγησης βηματικών κινητήρων και μετά αναλύουμε αυτό τον τύπο ηλεκτρικών μηχανών διακριτών βημάτων κάνοντας αναφορές σε εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία τους.

Τέλος αναλύουμε το σύστημα οδήγησης το οποίο επιλέξαμε προς μελέτη και κατασκευή συμπεριλαμβανομένων εικόνων, κατασκευαστικών σχεδίων και φυλλαδίων τεχνικών προδιαγραφών των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιήθηκαν.

ABSTRACT

The purpose of this study is to explain the way which stepper motors operate and one of its driving systems.

In the beginning, we refer to basic electronics which were used in the constructional part of our study. Thereafter, we mention general information about stepper motor's driving systems and then we analyze that type of discrete steps electrical motors by making a reference to the equations which describe their operation.

Finally, we analyze our own driving system which we selected to study and construct, including images, constructional schemes and datasheets of the electronics were used.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τον κύριο Ηρακλή Βυλλιώτη για την πολύτιμη βοήθεια του στη περάτωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας αλλά και για τη γνώση που μας μετέδωσε στη συνολική διάρκεια φοίτησής μας μέσω των διαλέξεων του.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τη βιβλιοθήκη του ιδρύματος Ευγενίδου για τη πολύτιμη συνεισφορά του στο βιβλιογραφικό μας υλικό.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την στήριξη τους καθ'όλη τη διάρκεια φοίτησης μας, και ειδικότερα στον κύριο Γιώργο Δραγούνη που με τη τεχνογνωσία του συνέβαλε σημαντικά στην εκπόνηση του κατασκευαστικού μέρους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:.....

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ηλεκτρονικά

- 1.1 Η χρήση των ηλεκτρονικών στα συστήματα οδήγησης **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 1.2 Δίοδος..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 1.3 Τρανζίστορ **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 1.4 Χρονοστής 555 **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 1.5 Λογικές Πύλες..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 1.6 Στοιχεία μνήμης Flip-Flop **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 1.7 Οπτοαπόμονωτές (Optocoupler)..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βηματικοί κινητήρες (Μόνιμη κατάσταση – δυναμική κατάσταση)

- 2.1 Είδη βηματικών κινητήρων **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 2.2 Εξισώσεις φυσικής βηματικών κινητήρων.... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 2.3 Εξάρτηση των παραμέτρων κινητήρων από τον αριθμό των σπειρών και από τη διάμετρο του σύρματος **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 2.4 Θερμικά χαρακτηριστικά **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 2.5 Απόδοση βηματικών κινητήρων **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
 - 2.5.1 Συντονισμός..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
 - 2.5.2 Στατική λειτουργία..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
 - 2.5.3 Δυναμική συμπεριφορά **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 2.6 Δυναμική του δρομέα..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 2.7 Χαρακτηριστικά Ροπής **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συστήματα οδήγησης βηματικών κινητήρων

- 3.1 Γενικά περί συστημάτων οδήγησης βηματικών κινητήρων **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης**
- 3.2 Ρυθμός και είδη βηματισμού..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
 - 3.2.1 Ρυθμός βηματισμού 12
 - 3.2.2 Κλασματικός βηματισμός..... 12
- 3.3 Βασικά κυκλώματα οδήγησης **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 3.4 Ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- 3.5 Λογισμικό ελέγχου βηματικού κινητήρα..... 12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση του κυκλώματός μας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Datasheets

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βηματικός κινητήρας είναι μια ηλεκτρομηχανική διάταξη της οποίας ο άξονας περιστρέφεται σε διακριτά σταθερά βήματα, που ποικίλουν σε αριθμό, παίρνοντας παλμούς τάσης συγκεκριμένης ακολουθίας στους ακροδέκτες εισόδου του.

Οι βηματικοί κινητήρες είναι σχετικοί με τους σύγχρονους κινητήρες υπό την άποψη ότι, η κίνηση του δρομέα καθορίζεται από την συχνότητα των ρευμάτων στα τυλίγματα του οπλισμού, αλλά διαφέρουν σε δύο σημαντικά σημεία. Πρώτον τα τυλίγματα του στάτη δεν είναι ούτε κατά προσέγγιση ημιτονικά διανεμημένα · δεύτερον η τροφοδοσία δεν είναι ημιτονοειδής AC αλλά μεταγωγικό DC. Όπως υποδηλώνει και το όνομα του, η λειτουργία ενός βηματικού κινητήρα είναι να στρέφει τον δρομέα με ένα ακριβές γωνιακό βήμα, όταν ένα ή περισσότερα τυλίγματα του στάτη, μεταγωγικά διαρρέονται από ρεύμα. Το τύμπανο μπορεί να οδηγηθεί σε υψηλή ταχύτητα εναλλάσσοντας τα ρεύματα γρηγορότερα : **βέβαια και πάλι το μέγεθος που ελέγχεται είναι η γωνιακή θέση παρά η ταχύτητα.**

Πέρα από το βηματικό κινητήρα βασικός ορισμός για την παρούσα εργασία είναι αυτός των συστημάτων ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων αφού το κύριο αντικείμενο της είναι η μελέτη ενός τέτοιου. Σαν σύστημα οδήγησης κινητήρων θα μπορούσαμε να ονομάσουμε όλες εκείνες τις βαθμίδες, είτε ηλεκτρονικές είτε ηλεκτρομηχανικές, που συμβάλουν στην παραγωγή και στην διαμόρφωση σημάτων χαμηλής ισχύος και σε συνδυασμό με τις ενισχυτικές βαθμίδες έχουν σκοπό τον έλεγχο ενός κινητήρα, εννοώντας τη ρύθμιση ταχύτητας (στροφών), ροπής, θέσης και φοράς περιστροφής.

Στον βηματικό κινητήρα τα τυλίγματα τροφοδοτούνται από έναν ελεγκτή που εναλλάσσει διαδοχικά τα ρεύματα, σε απόκριση των παλμών εισόδου. Κάθε παλμός στον ελεγκτή προκαλεί μια απότομη αλλαγή στα ρεύματα των τυλιγμάτων του κινητήρα, τα οποία στρέφουν το τύμπανο **ένα βήμα**. Αν οι παλμοί εφαρμόζονται σε χαμηλή συχνότητα επανάληψης, τα ρεύματα των τυλιγμάτων θα παραμένουν σταθερά, με την εναλλαγή των παλμών και το τύμπανο θα έρχεται σε αδράνεια μετά από κάθε βήμα. Για υψηλό ρυθμό “βηματισμού” ο κινητήρας θα κινείται συνεχόμενα, αν και η ταχύτητα του δε θα είναι σταθερή, και τότε θα συμπεριφέρεται σαν συμβατικός σύγχρονος κινητήρας.

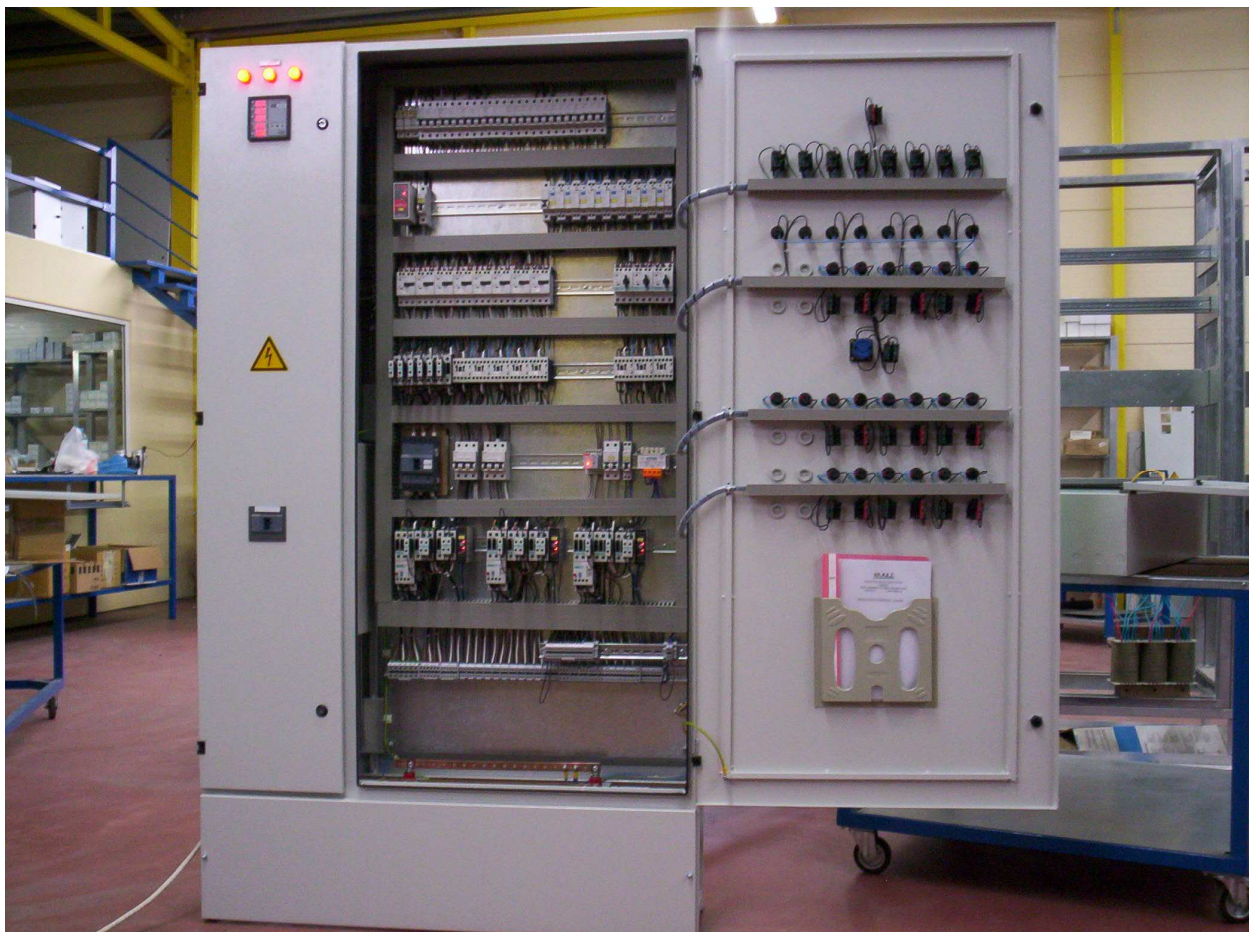
Η ανταπόκριση μεταξύ των βημάτων του τυμπάνου και των εισερχόμενων παλμών κάνει τους βηματικούς κινητήρες ιδανικούς για ψηφιακό έλεγχο. Εφαρμογές όπως

αναλογικά ρολόγια quartz, εκτυπωτές , οδηγοί κεφαλών σε σκληρούς δίσκους , και πολλά εργαλεία βασισμένα σε ελεγχόμενους μηχανισμούς . Οι βηματικοί κινητήρες κατασκευάζονται από μεγάλη κλίμακας που ξεκινά από λίγα miliwatts μέχρι δεκάδες kilowatts και αναμένεται με το πέρασμα των ετών να αντικαταστούν ολοένα και περισσότερο τις συμβατικές μηχανές AC και DC σε πολλές εφαρμογές ελέγχου .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

1.1 ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

Η χρήση των ηλεκτρονικών στο χώρο των συστημάτων ελέγχου κινητήρων, είναι ένα επίτευγμα μεγάλης σημασίας για του μηχανικούς. Με την πάροδο των ετών η απαιτήσεις για γρήγορα, ακριβή και αυτοματοποιημένα αποτελέσματα και διαδικασίες στις γραμμές παραγωγής, γίνονται ολοένα μεγαλύτερες. Παλαιότερα τέτοιες γραμμές "στήνονταν" θα λέγαμε με βάση το κλασσικό αυτοματισμό. Πριν μερικές δεκαετίες η πλειοψηφία των ελεγκτηρίων διατάξεων στους αυτοματισμούς, ήταν εξ ολοκλήρου ηλεκτρομηχανικές και υλοποιούνταν με αυτόματους διακόπτες (relay).



Εικόνα 1 Τυπικό βιομηχανικό σύστημα κλασσικού αυτοματισμού.

Το πρώτο μεγάλο βήμα προς τα σημερινά δεδομένα ήταν η προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC). Τα PLC είναι ηλεκτρονικές διατάξεις ενσωματωμένων συστημάτων μνήμης και επεξεργασίας. Λειτουργούν με βάση ένα κώδικα-πρόγραμμα που σκοπό είχαν και έχουν να αντικαταστούν τα κυκλώματα ελέγχου των διακοπών ισχύος.



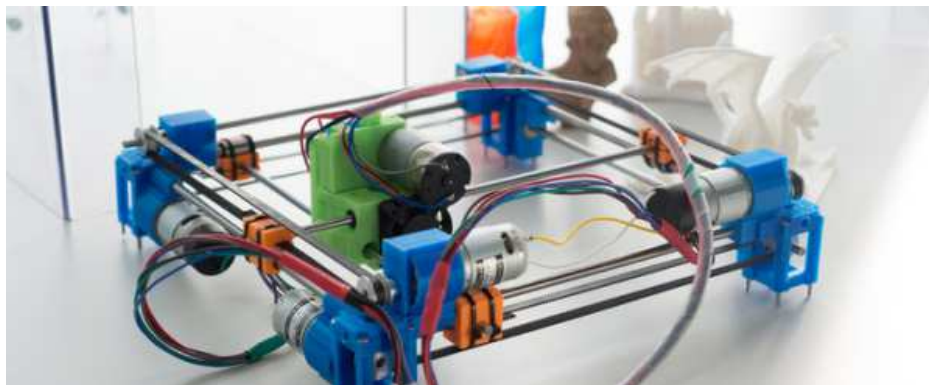
Εικόνα 2 Προγραμματιζόμενος ελεγκτής (PLC)S7 της Siemens

Πέρα όμως από τις βιομηχανικές εφαρμογές, τα ηλεκτρονικά ενσωματώθηκαν με τους κινητήρες σε όλο το φάσμα της τεχνολογίας. Τέτοιες τεχνολογικές εφαρμογές είναι τα σερβοσυστήματα και οι σερβοελεγκτές σε κινητήρες χαμηλής έως μέτριας ισχύος.



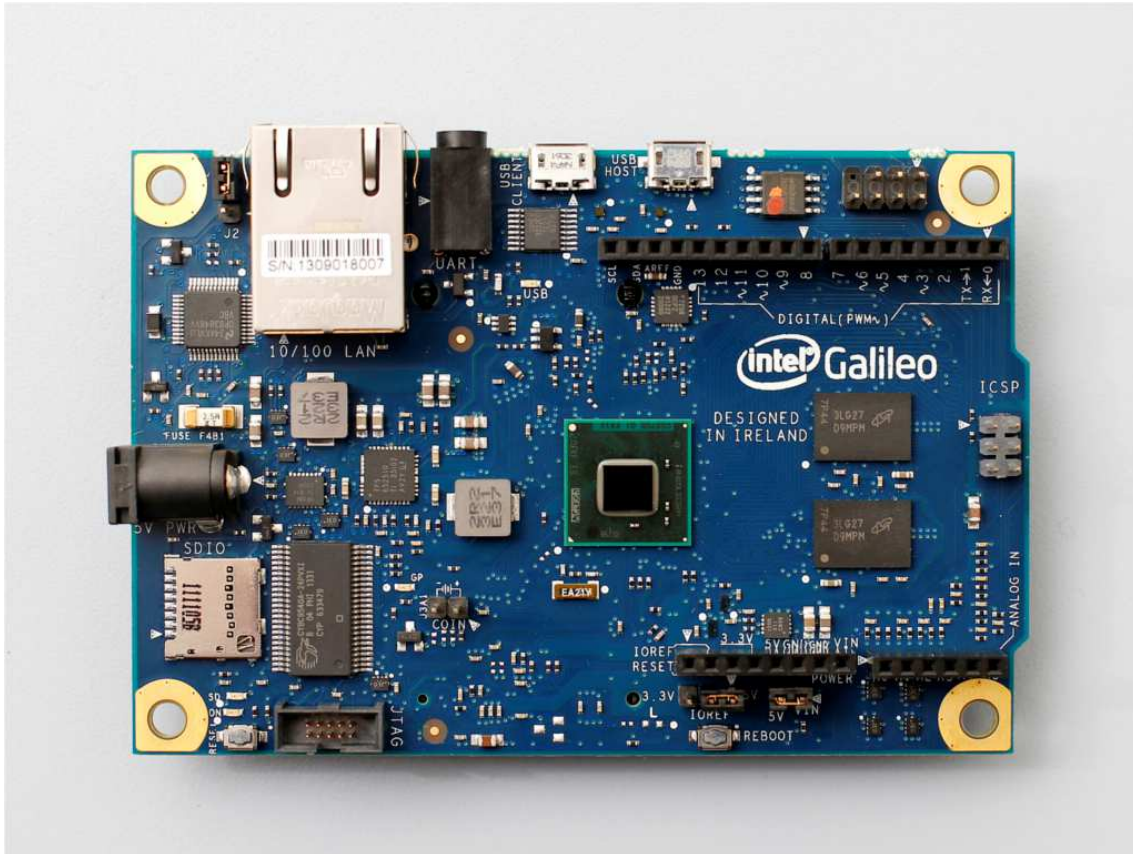
Εικόνα 3 Σερβοσύστημα με τον ελεγκτή του.

Επίσης ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου βηματικών κινητήρων σε μηχανήματα εκτύπωσης και σάρωσης



Εικόνα 4 Συστοιχία βηματικών κινητήρων συστήματος 3Dεκτύπωσης

ή εφαρμογές ακόμα μικρότερης ισχύος όπως κινητήρια συστήματα οδήγησης οπτικών δίσκων (CD) και συστήματα μνήμης (HDD). Τέλος, με την απίστευτη ταχύτητα μετάδοσης της τεχνολογίας και με το χαμηλό κόστος παραγωγής έτοιμων - onboard λύσεων είναι εύκολο να κατασκευάσουμε μικρά συστήματα οδήγησης κινητήρων χαμηλής ισχύος με μικροελεγκτές και επεξεργαστές κορυφαίων εταιρειών στο χώρο των ηλεκτρονικών όπως Motorola, Intel, Microchip, Atmel και άλλες.



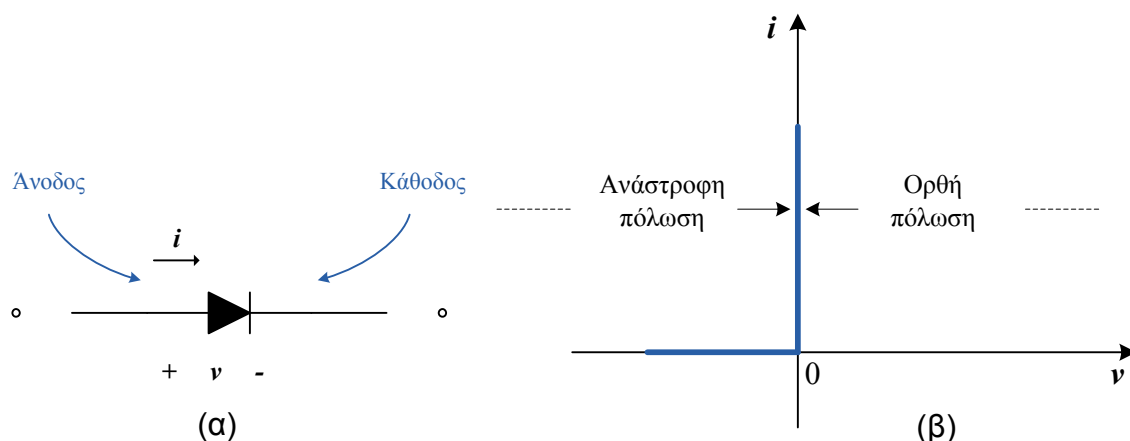
Εικόνα 5 Development board προγραμματισμού Galileo της Intel

1.2 ΔΙΟΔΟΣ

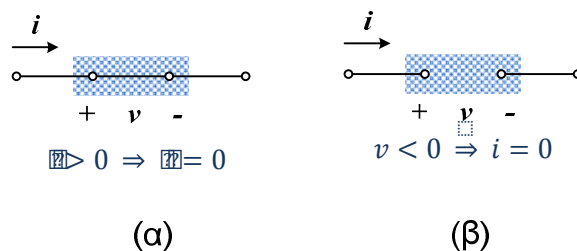
Ένα από τα πλέον θεμελιώδεις και απλά μη γραμμικά κυκλωματικά στοιχεία είναι οι δίοδοι. Όμοια με μια αντίσταση, η δίοδος έχει δύο ακροδέκτες. Ωστόσο, ανόμοια με την αντίσταση, για την οποία η σχέση μεταξύ ρεύματος που τη διαρρέει και της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα της είναι γραμμική, η δίοδος έχει μη γραμμική χαρακτηριστική ρεύματος τάσης ($i-v$).

Οι δίοδοι έχουν πολλές εφαρμογές από τις οποίες η πλέον διαδεδομένη είναι η χρήση τους στη σχεδίαση ανορθωτικών (κυκλωμάτων που μετατρέπουν από ac σε dc). Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε κυρίως με δίοδους πυριτίου και θα στοχεύσουμε στις ανορθωτικές τους ιδιότητες.

Θα ξεκινήσουμε λοιπόν περιγράφοντας μια ιδανική δίοδο. Η ιδανική δίοδος θεωρείται το στοιχειωδέστερο απ' όλα τα μη γραμμικά κυκλωματικά στοιχεία. Πρόκειται για ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών, με το κυκλωματικό σύμβολο που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1(α) και η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης ($i-v$) που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1(β). Η χαρακτηριστική της ιδανικής δίοδου μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής: Εάν εφαρμοστεί αρνητική τάση στη δίοδο (ως προς τη φορά που επισημαίνεται στο σχήμα 1.2(α), δεν ρέει ρεύμα και η δίοδος συμπεριφέρεται σαν ανοιχτό κύκλωμα σχήμα 1.2(β). Σ' αυτήν τη περίπτωση λέμε ότι η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, ή ότι λειτουργεί κατά την ανάστροφη φορά. Μια ιδανική δίοδος έχει μηδενικό ρεύμα όταν λειτουργεί κατά την ανάστροφη φορά και λέγεται ότι είναι σε απόκοπή (cutoff, ή απλώς off).



Σχήμα 1.1 (α) το κυκλωματικό σύμβολο δίοδου (β) η χαρακτηριστική $i-v$



Σχήμα 1.2 (α) το ισοδύναμο κύκλωμα κατά την ανάστροφη φορά (β) το ισοδύναμο κύκλωμα κατά την ορθή φορά

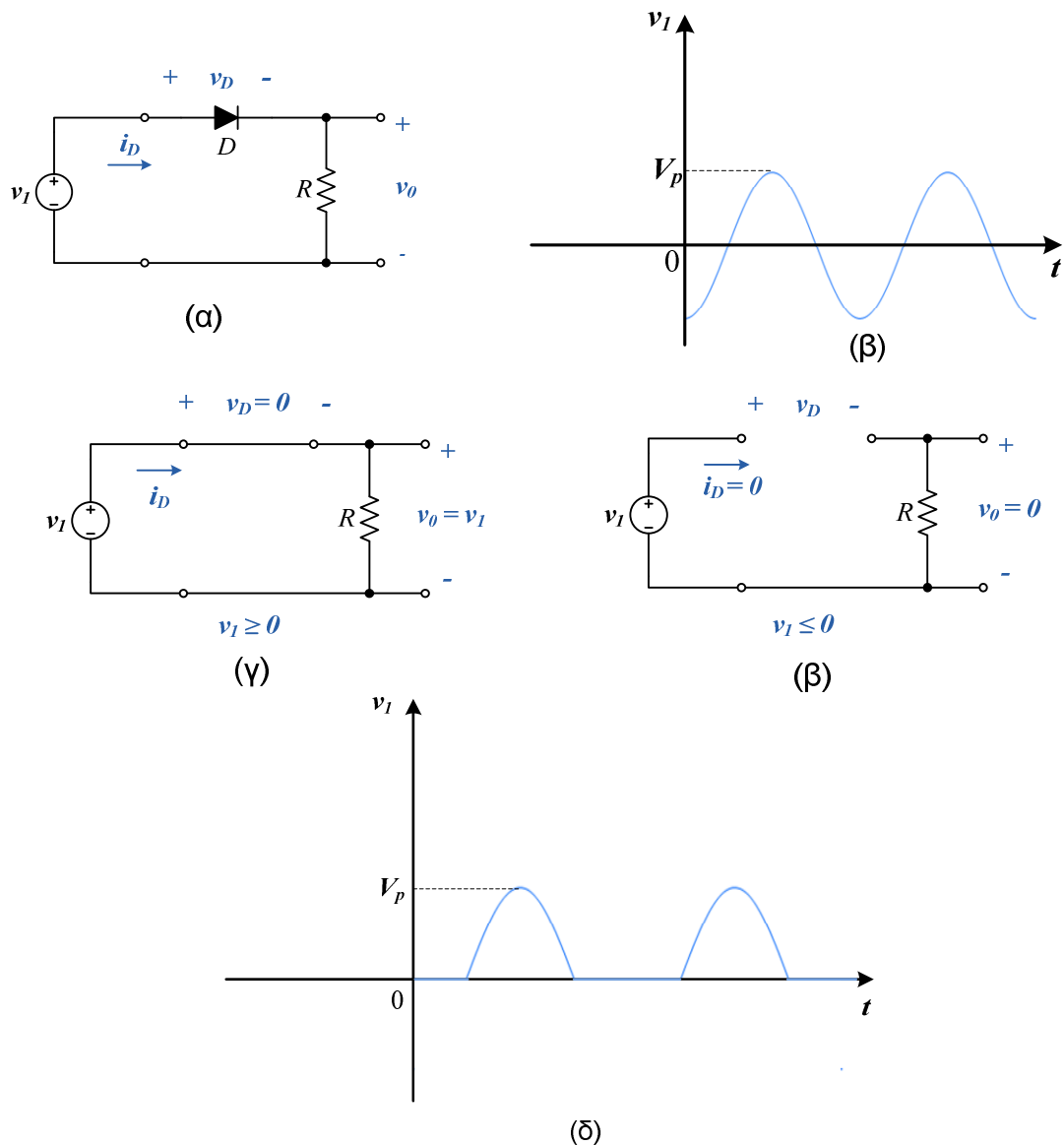
Εάν εφαρμοστεί θετικό ρεύμα στην ιδανική δίοδο ως προς τη φορά που επισημαίνεται στο σχήμα 1.2(α), στα άκρα της διόδου εμφανίζεται μηδενική πτώση τάσης. Με άλλα λόγια, η ιδανική δίοδος συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα κατά την ορθή φορά Σχήμα 1.2(α), δηλαδή επιτρέπει τη διέλευση οποιουδήποτε ρεύματος χωρίς πτώσεις τάσης και λέμε ότι είναι ορθά πολωμένη, ή απλώς ότι άγει (on).

Ο θετικός ακροδέκτης της διόδου απόκαλείται άνοδος και ο αρνητικός κάθοδος, ορολογία που προέρχεται από την εποχή των διόδων κενού. Η χαρακτηριστική $i-v$ της ιδανικής διόδου (που άγει κατά τη μια φορά και όχι την άλλη) αιτιολογεί τη χρήση του βέλους στο κυκλωματικό σύμβολο της.

Η χαρακτηριστική $i-v$ της ιδανικής διόδου είναι εξαιρετικά μη γραμμική. Αποτελείται από δύο ευθύγραμμα τμήματα, σε γωνία 90° μεταξύ τους. Μια μη γραμμική χαρακτηριστική που απαρτίζεται από ευθύγραμμα τμήματα αποκαλείται τμηματικά γραμμική. Εάν ένα στοιχείο με τμηματικά γραμμική χαρακτηριστική χρησιμοποιηθεί σε μια ορισμένη εφαρμογή με τρόπο ώστε το σήμα στους ακροδέκτες του να μεταβάλλεται μόνο κατά μήκος ενός από τα γραμμικά τμήματα της χαρακτηριστικής του, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το στοιχείο επιδεικνύει γραμμική συμπεριφορά στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εν αντιθέσει, εάν η μεταβολή του σήματος εκτείνεται σε περισσότερα από ένα τμήματα της χαρακτηριστικής, δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε γραμμική ανάλυση στο συγκεκριμένο κύκλωμα.

Μια απλή εφαρμογή της διόδου, η οποία αξιοποιεί την ακραία μη γραμμική συμπεριφορά της, είναι το κύκλωμα του ανορθωτή του σχήματος 1.3(α). Το κύκλωμα αποτελείται από τη δίοδο \mathbf{D} και την αντίσταση \mathbf{R} συνδεδεμένες εν σειρά. Εδώ θα υποθέσουμε ότι η τάση εισόδου \mathbf{v}_1 είναι το ημιτονοειδές του σχήματος 1.3(β), καθώς και ότι η δίοδος είναι ιδανική. Κατά τη διάρκεια των θετικών ημικυκλίων (ημιπεριόδων) της ημιτονοειδούς εισόδου, η θετική \mathbf{u}_1 υποχρεώνει το ρεύμα να ρέει κατά την ορθή φορά διαμέσου της διόδου. Κατά συνέπεια, η τάση της εισόδου, \mathbf{v}_D , θα είναι πολύ μικρή - στην ιδανική περίπτωση, μηδενική. Άρα, το ισοδύναμο του κυκλώματος θα είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3(γ) και η τάση στην έξοδο, \mathbf{v}_o , θα είναι ίση με την τάση

εισόδου, v_1 . Απεναντίας, κατά τη διάρκεια των αρνητικών ημιπεριόδων της v_1 η δίοδος δεν θα άγει συνεπώς, το κύκλωμα θα έχει το ισοδύναμο παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3(δ) και η v_o θα είναι μηδενική. Δηλαδή, η τάση εξόδου θα ακολουθεί την κυματομορφή του σχήματος 1.3(ε). Παρατηρούμε ότι, ενώ η v_1 εναλλάσσεται σε πολικότητα και έχει μηδενική μέση τιμή, η v_o έχει θετική πολικότητα και πεπερασμένη μέση τιμή - δηλαδή, μια dc συνιστώσα. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το κύκλωμα του σχήματος 1.3(α) ανορθώνει το σήμα και γι'αυτό αποκαλείται ανορθωτής (rectifier). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή dc σημάτων από ac.



Σχήμα 1.3 (α) Κύκλωμα ανορθωτή. (β) Κυματομορφή εισόδου (γ) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν $v_1 \geq 0$ (δ) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν $v_1 \leq 0$ (ε) Κυματομορφή εξόδου.

1.3 ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Το τρανζίστορ (αγγλικά: transistor), στα ελληνικά κρυσταλλοτρίοδος και παλαιότερα κρυσταλλολυχνία, είναι διάταξη ημιαγωγών στερεάς κατάστασης, η οποία βρίσκει διάφορες εφαρμογές στην ηλεκτρονική, μερικές εκ των οποίων είναι η ενίσχυση, η σταθεροποίηση τάσης, η διαμόρφωση συχνότητας, η λειτουργία ως διακόπτης και ως μεταβλητή ωμική αντίσταση. Το τρανζίστορ μπορεί, ανάλογα με την τάση με την οποία πολώνεται, να ρυθμίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που απορροφά από συνδεδεμένη πηγή τάσης. Τα τρανζίστορ κατασκευάζονται είτε ως ξεχωριστά ηλεκτρονικά εξαρτήματα είτε ως τμήματα κάποιου ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Το transistor έχεις τρεις περιοχές με προσμείξεις. Η κάτω περιοχή ονομάζεται εκπομπός, η μεσαία βάση και η πάνω συλλέκτης. Το τρανζίστορ μπορείς να κατασκευαστεί σαν μία NPN η σαν μία PNP διάταξη. Το τρανζίστορ έχει δύο επαφές. Μία ανάμεσα στον εκπομπό και τη βάση και μία ανάμεσα στη βάση και το συλλέκτη. Επομένως ένα transistor είναι όμοιο με δύο διόδους. Ο εκπομπός με τη βάση σχηματίζουν τη μία δίοδο και ο συλλέκτης με τη βάση την άλλη. Ονομάζουμε δίοδο εκπομπού την κάτω δίοδο και δίοδο συλλέκτη την πάνω.

Σε κάθε περιοχή απογύμνωσης το φράγμα δυναμικού είναι περίπου 0,7V στους 26°C.

Όταν ένα τρανζίστορ βρίσκεται σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού και λειτουργεί στη γραμμική περιοχή του συμπεριφέρεται ως ενισχυτής τάσης. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό κύκλωμα ενισχυτή τάσης. Ο πυκνωτής C1 απομονώνει το κύκλωμα από ανεπιθύμητα συνεχή δυναμικά της εξόδου του προηγούμενου κυκλώματος. Οι αντιστάσεις R1, R2 σχηματίζουν ένα διαιρέτη τάσης που μας εξασφαλίζει το DC δυναμικό που χρειάζεται για την πόλωση του τρανζίστορ, ώστε το σημείο λειτουργίας του να βρίσκεται στη γραμμική περιοχή. Το τρανζίστορ είναι συνδεδεμένο σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού. Η αντίσταση R3 είναι η αντίσταση συλλέκτη. Η αντίσταση R4 είναι η αντίσταση εκπομπού και χρησιμεύει για τη σταθεροποίηση του ρεύματος πόλωσης. Ο πυκνωτής C3 παρουσιάζεται ως βραχυκύκλωμα στο AC και βοηθάει στην αύξηση της ενίσχυσης. Ο C2 απομονώνει το κύκλωμα του ενισχυτή από συνεχή δυναμικά της επόμενης βαθμίδας. Αρχικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο πυκνωτής C3 δεν υπάρχει στο κύκλωμα και να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του κυκλώματος χωρίς αυτόν.

Η εφαρμογή εναλλασσόμενης τάσης στην είσοδο, έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται το δυναμικό V_{BB} , που εξασφαλίσαμε με το διαιρέτη τάσης R1, R2 στη βάση του τρανζίστορ και να μετατοπίζεται παράλληλα η ευθεία φόρτου στο τμήμα εισόδου ώστε να μεταβάλλεται

έτσι το ρεύμα βάσης i_B . Η τομή της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική εισόδου του τρανζίστορ μας δίνει το μέγεθος της μεταβολής αυτής. Η μεταβολή του ρεύματος βάσης, στη συνέχεια, έχει ως συνέπεια να μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ πάνω στην ευθεία φόρτου του τμήματος εξόδου και να μεταβάλλεται έτσι αναλόγως και το ρεύμα συλλέκτη και η τάση v_{CE} . Η τομή της ευθείας φόρτου με τις χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ μας δίνει το μέγεθος της μεταβολής αυτής. Έτσι η εναλλασσόμενη τάση της εισόδου εμφανίζεται στην έξοδο ενισχυμένη κατά ένα παράγοντα A . Επειδή όταν αυξάνει η τάση εισόδου αυξάνει και το ρεύμα εισόδου, με αποτέλεσμα να αυξάνει το ρεύμα συλλέκτη, να μειώνεται η τάση v_{ce} και να μειώνεται έτσι η τάση εξόδου, ο ενισχυτής παρουσιάζει μια διαφορά φάσης 180° μεταξύ εισόδου και εξόδου. Τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή δίνονται από τις σχέσεις:

Αντίσταση εισόδου:

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_{be}}{i_b} = \frac{-R_e i_e}{i_b} = \frac{R_e i_c}{i_b} = \beta R_e$$

Αντίσταση εξόδου:

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} \approx R_c$$

Ενίσχυση τάσης:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c R_c}{i_c R_e} = -\frac{R_c}{R_e}$$

Ενίσχυση ρεύματος:

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-i_c}{i_b} = -\beta$$

Στην περίπτωση που είναι συνδεδεμένος ο πυκνωτής C_3 παράλληλα με την αντίσταση εκπομπού (όπως στο σχήμα 1), λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα για το AC ενώ για το DC λειτουργεί ως ανοιχτό κύκλωμα με αποτέλεσμα να τροποποιούνται οι σχέσεις:

Αντίσταση εισόδου:

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_{be}}{i_b} = \frac{-u_{eb}}{i_b} = \frac{-r_e i_e}{i_b} = \frac{r_e i_c}{i_b} = \beta r_e$$

Ενίσχυση τάσης:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-i_c R_c}{i_c r_e} = -\frac{R_c}{r_e}$$

Η δυναμική αντίσταση εκπομπού ($r_e = V_T / I_C$) είναι πολύ μικρή συγκριτικά με τις τυπικές τιμές αντιστάσεων εκπομπού, με αποτέλεσμα η ενίσχυση τάσης στην περίπτωση που στο κύκλωμα υπάρχει πυκνωτής εκπομπού να είναι πολύ μεγαλύτερη, διατηρώντας ταυτόχρονα ο ενισχυτής σταθερότητα στο ρεύμα πόλωσης, αφού στο συνεχές ρεύμα ο πυκνωτής παρουσιάζεται ως ανοιχτό κύκλωμα. Στο κύκλωμα του σχήματος 3 το τρανζίστορ βρίσκεται σε συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη (ακόλουθος τάσης). Η πηγή V_1 θεωρείται βραχυκύκλωμα για το εναλλασσόμενο ρεύμα και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι στο AC ανάλογο ο συλλέκτης είναι γειωμένος και αποτελεί το κοινό σημείο εισόδου – εξόδου. Η ενίσχυση τάσης και ρεύματος του ενισχυτή δίνεται από τις σχέσεις:

Ενίσχυση τάσης:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o}{u_{be} + u_o} \approx 1$$

Ενίσχυση ρεύματος:

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b + i_c}{i_b} = \beta + 1 \approx \beta$$

Ο ενισχυτής κοινού συλλέκτη κάνει ενίσχυση ρεύματος αλλά όχι ενίσχυση τάσης και η τάση εξόδου παρουσιάζεται σε φάση με την τάση εισόδου. Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή είναι πολύ μεγάλη, ενώ η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή. Έτσι ο ενισχυτής κοινού συλλέκτη αποτελεί συχνά βαθμίδα προσαρμογής ενός φορτίου με μικρή αντίσταση σε ενισχυτή με μεγάλη αντίσταση εξόδου.

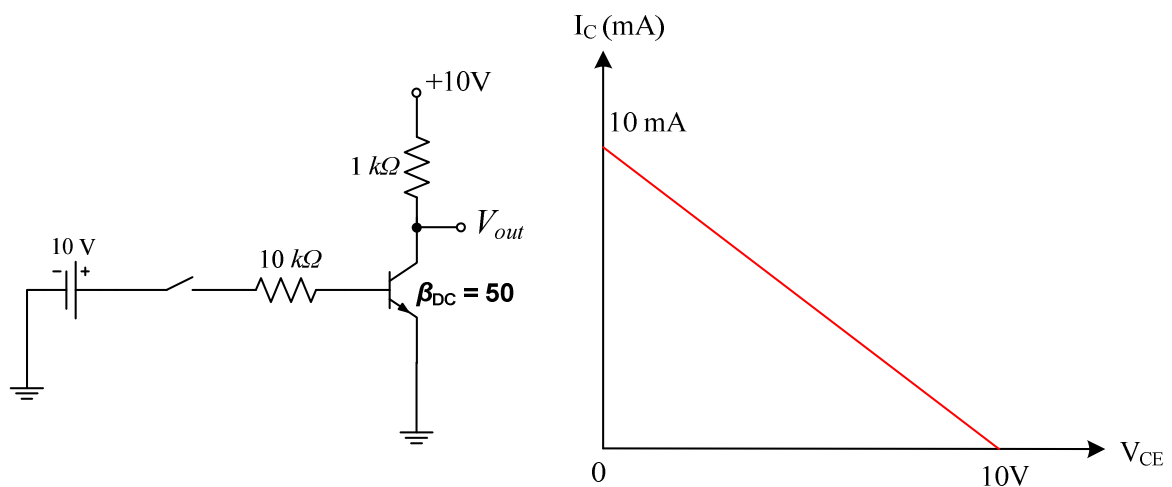
Βασική συνδεσμολογία του τρανζίστορ στο κύκλωμα μας είναι η πόλωση βάσης κατά την οποία έχουμε τη διακοπτική λειτουργία. Η πόλωση βάσης χρησιμεύει σε ψηφιακά κυκλώματα επειδή αυτά τα κυκλώματα είναι σχεδιασμένα συνήθως να λειτουργούν στο κορεσμό και στην αποκοπή. Λόγω αυτού, έχουν είτε χαμηλή είτε υψηλή τάση η εξόδου. Με άλλα λόγια, δεν χρησιμοποιείται κανένα άλλο σημείο Q μεταξύ κορεσμού και αποκοπής. Γι αυτό το λόγο, οι διακυμάνσεις στο σημείο Q δεν ενοχλούν, γιατί το τρανζίστορ παραμένει στον κορεσμό ή στην αποκοπή όταν μεταβάλλεται το κέρδος ρεύματος.

Εδώ δίνεται ένα παράδειγμα χρήσης ενός κυκλώματος πολωμένης-βάσης για μεταγωγή μεταξύ κορεσμού και αποκοπής. Το σχήμα 14(α) δείχνει ένα παράδειγμα ενός τρανζίστορ σε ισχυρό κορεσμό. Συνεπώς, η τάση εξόδου είναι περίπου 0V. Αυτό σημαίνει ότι το σημείο Q είναι το ανώτερο άκρο της γραμμής φορτίου. (Σχ. 1.4.β)

Όταν ανοίγει ο διακόπτης, το ρεύμα βάσης μηδενίζεται και επομένως το ρεύμα συλλέκτη γίνεται μηδέν. Χωρίς ρεύμα μέσω της αντίστασης $1k\Omega$, όλη η τάση τροφοδοσίας συλλέκτη εμφανίζεται στα άκρα συλλέκτη-εκπομπού. Συνεπώς, η τάση εξόδου υψώνεται στα $+10V$. Τώρα, το σημείο Q είναι το κατώτερο άκρο της γραμμής του φορτίου (Σχ1.4.β).

Το κύκλωμα μπορεί να έχει μόνο δύο τάσεις εξόδου: 0 ή $+10V$. Έτσι αναγνωρίζεται ένα ψηφιακό κύκλωμα. Έχει μόνο δύο στάθμες εξόδου: χαμηλή (low) ή υψηλή (high). Οι ακριβείς τιμές των δύο τάσεων εξόδου δεν έχουν σημασία. Αυτό που ενδιαφέρει είναι ότι μπορούμε να ξεχωρίζουμε τις τάσεις σαν χαμηλή ή υψηλή.

Τα ψηφιακά κυκλώματα συχνά ονομάζονται κυκλώματα μεταγωγής (switching circuits), επειδή το σημείο λειτουργίας τους Q μετάγεται μεταξύ δύο σημείων στη γραμμή φορτίου. Στις περισσότερες σχεδιάσεις, τα δύο σημεία είναι κορεσμός και αποκοπή. Ένα άλλο όνομα που χρησιμοποιείται συχνά είναι κυκλώματα δύο-καταστάσεων (two-state circuit), λόγω των δύο τάσεων εξόδου (χαμηλή, υψηλή) .



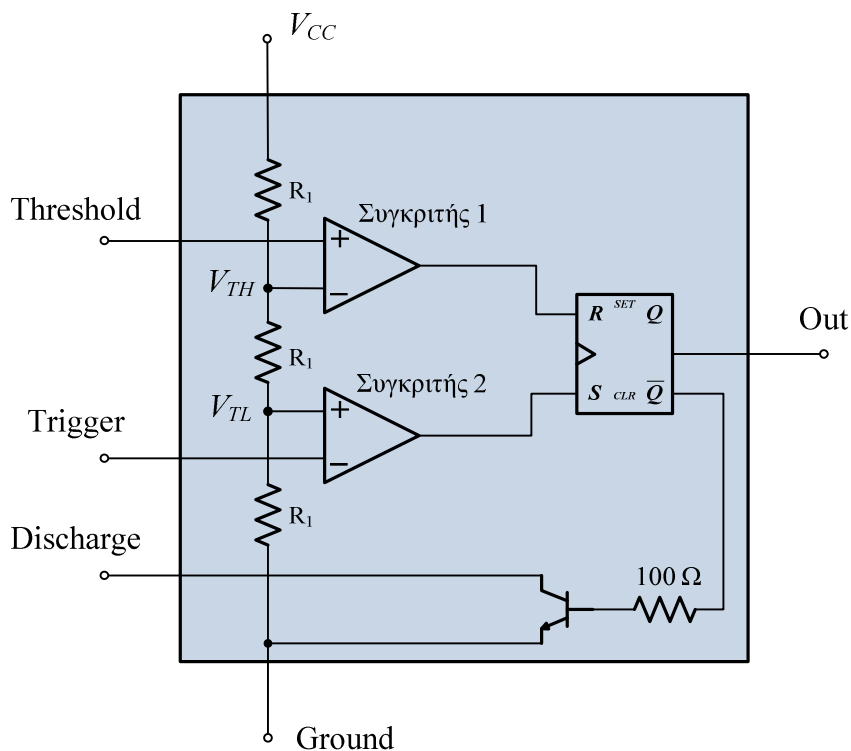
Σχήμα 1.4: (α) Ισχυρός κορεσμός, (β) Γραμμή φορτίου

1.4 Ο ΧΡΟΝΙΣΤΗΣ 555

Ο NE555 (όπως επίσης LM555, CA555 και MC1455) είναι ένας ευρύτατα χρησιμοποιούμενος χρονιστής IC, ένα κύκλωμα που μπορεί να λειτουργεί με δυο τρόπους: Μονοσταθές (μια σταθερή κατάσταση), ή ασταθές (καμία σταθερή κατάσταση). Στη μονοσταθή λειτουργία , μπορεί να δημιουργήσει ακριβής χρονικές καθυστερήσεις από microseconds μέχρι ώρες. Στην ασταθή λειτουργία , μπορεί να δημιουργήσει ορθογώνια σήματα με μεταβλητό κύκλο εργασίας. Εμείς θα μελετήσουμε την ασταθή λειτουργία την οποία εφαρμόζουμε στο κύκλωμά μας.

Ο χρονιστής 555 μπορεί να συνδεθεί έτσι ώστε να λειτουργεί σαν ασταθής πολυδονητής. Όταν χρησιμοποιείται έτσι ο χρονιστής 555 δεν έχει σταθερές καταστάσεις, που σημαίνει ότι δεν μπορεί να παραμείνει επ άπειρο σε μία κατάσταση. Με άλλα λόγια , ταλαντώνεται όταν λειτουργεί με τον ασταθή τρόπο και δημιουργεί ορθογώνιο σήμα εξόδου. Το σχ.1.5 δείχνει το εσωτερικό ενός χρονιστή 555.

Όπως βλέπουμε, η έξοδος είναι μια σειρά ορθογώνιων παλμών. Αφού δεν χρειάζεται σκανδαλισμός της εισόδου για να έχουμε έξοδο, ο χρονιστής 555 που λειτουργεί σε ασταθή κατάσταση μερικές φορές ονομάζεται πολυδονητής ελεύθερης ροής. (free-running, multi-vibrator)



Σχήμα 1.5 Εσωτερικό χρονιστή 555

1.5 ΛΟΓΙΚΕΣ ΠΥΛΕΣ

Οι λογικές πύλες

Οι λογικές πύλες είναι τα βασικά δομικά στοιχεία στα ψηφιακά κυκλώματα. Μία λογική πύλη είναι ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο πραγματοποιεί μία λογική πράξη στις εισόδους της και παράγει μία έξοδο. Οι λογικές πύλες έχουν δημιουργηθεί για να δουλεύουν στο δυαδικό σύστημα. Στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ως λογικό 0 θεωρείται η τάση εκείνη η οποία είναι κάτω από ένα κατώφλι που έχουν ορίσει οι κατασκευαστές της λογικής πύλης (πχ 0,5V). Αντίστοιχα το λογικό 1 αντιστοιχεί σε τάση η οποία υπερβαίνει κάποια τάση (συνήθως 5V αλλά οι τελευταίες τεχνολογίες έχουν καταφέρει να μειώσουν την τάση αυτή). Με άλλα λόγια το λογικό 0 αντιστοιχεί στην τάση γείωσης και το λογικό 1 σε τάση τροφοδοσίας.

Η πύλη XOR

Η συνάρτηση αποκλειστικού - OR (XOR), για την οποία χρησιμοποιείται το σύμβολο \oplus , είναι μία λογική πράξη που ισοδυναμεί με την ακόλουθη πράξη Boole:

$$x \oplus y = xy' + x'y$$

Το XOR είναι ίσο με 1 αν μόνο το x είναι ίσο με 1, ή αν μόνο το y είναι ίσο με 1 (δηλαδή αν τα x και τα y έχουν διαφορετική τιμή), όχι όμως όταν και τα δύο είναι ίσα με 1 ή όταν και τα δύο είναι ίσα με 0. Το XNOR, επίσης γνωστό ως συνάρτηση ισοδυναμίας, ισοδυναμεί με την ακόλουθη πράξη Boole.

$$(x \oplus y)' = xy + x'y'$$

Το XNOR είναι ίσο με 1, αν το x και το y είναι ίσα με 1 ή αν και τα δύο είναι ίσα με 0. Μπορεί να αποδειχτεί ότι το XNOR είναι το συμπλήρωμα του XOR μέσω ενός πίνακα αληθείας ή μέσω αλγεβρικής επεξεργασίας:

$$(x \oplus y)' = (xy' + x'y)' = (x'+y)(x+y') = xy + x'y'$$

Οι επόμενες ταυτότητες ισχύουν για την πράξη XOR:

$$x \oplus 0 = x$$

$$x \oplus 1 = x'$$

$$x \oplus x = 0$$

$$x \oplus x' = 1$$

$$x \oplus x' = x' \oplus y = (x \oplus y)'$$

Οποιαδήποτε από αυτές τις ταυτότητες μπορεί να αποδειχθεί με τη χρήση πινάκων αληθείας ή με την αντικατάσταση της πράξης " \oplus " από την ισοδύναμη της έκφραση Boole. Επίσης, μπορεί να αποδειχθεί ότι η πράξη XOR είναι αντιμεταθετική και προσεταιριστική, δηλαδή ότι:

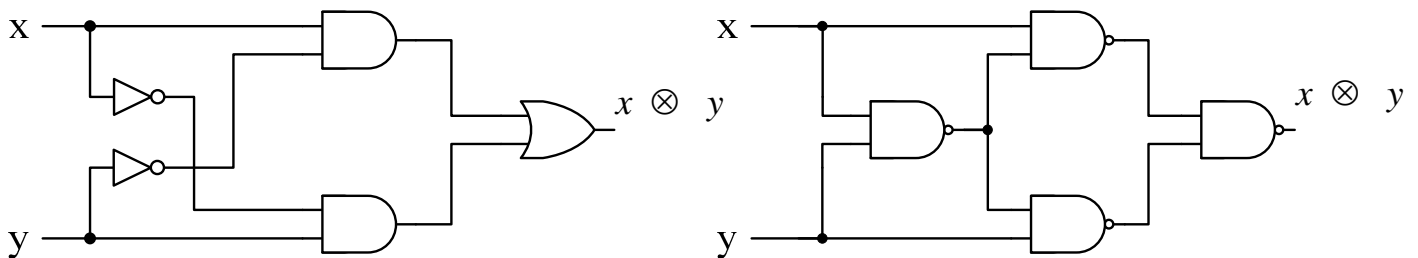
$$A \oplus B = B \oplus A$$

Και ότι

$$(A \oplus B) \oplus C = A \oplus (B \oplus C) = A \oplus B \oplus C$$

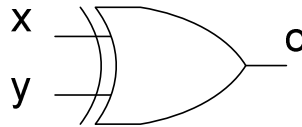
Αυτό σημαίνει ότι οι δύο εισοδοί μιας πύλης XOR μπορεί να εναλλαχθούν χωρίς να επηρεαστεί η αλγεβρική πράξη να εκτελείται. Σημαίνει, επίσης, ότι έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε το αποτέλεσμα μιας πράξης XOR τριών μεταβλητών με οποιαδήποτε σειρά και γι αυτό το λόγο η πράξη αυτή με τρεις ή περισσότερες μεταβλητές μπορεί να γραφτεί χωρίς παρενθέσεις. Αυτό επιτρέπει μεν την κατασκευή πυλών XOR με τρεις ή περισσότερες εισόδους, η κατασκευή όμως πρακτικών πυλών XOR πολλών εισόδων δεν είναι εύκολη. Ακόμη και η συνάρτηση XOR δύο εισόδων κατασκευάζεται συνήθως με άλλου είδους πυλών. Μια περίπτωση κατασκευής XOR δύο εισόδων με συμβατικές πύλες φαίνεται στο σχήμα 1.6, όπου χρησιμοποιούνται δύο αντιστροφείς, δύο πύλες AND και μια πύλη OR. Στο σχήμα 1.6 φαίνεται μια υλοποίηση του XOR με τέσσερις πύλες NAND. Η πρώτη πύλη NAND εκτελεί την πράξη $(xy)' = (x'+y')$, ενώ το υπόλοιπο κύκλωμα NAND δύο επιπέδων παράγει άθροισμα γινομένων:

$$(x' + y')x + (x' + y')y = xy' + x'y = x \oplus y$$



Σχήμα 1.6 Υλοποιήσεις συνάρτησης XOR(αριστερά με πύλες AND,OR,NOTκαι δεξιά με πύλες NAND).

Μόνο ένας περιορισμένος αριθμός συναρτήσεων Boole μπορεί να εκφραστεί με πράξεις XOR. Ωστόσο, αυτή η συνάρτηση εμφανίζεται αρκετά συχνά στη σχεδίαση πρακτικών ψηφιακών συστημάτων. Είναι δε ιδιαίτερα χρήσιμη σε αριθμητικές πράξεις και σε κυκλώματα εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων. Παρακάτω εμφανίζεται το σχηματικό σύμβολο τη XOR και ο πίνακας αληθείας της.



Σχήμα 1.7 Πύλη XOR

Πίνακας αληθείας XOR

Είσοδος x	Είσοδος y	Έξοδος
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

1.6 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΝΗΜΗΣ: FLIP-FLOP

Στα ηλεκτρονικά ένα flip-flop είναι ένα κύκλωμα το οποίο έχει 2 σταθερές καταστάσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση πληροφοριών. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αλλάζουμε καταστάσεις ενός σήματος που εφαρμόζεται σε μία ή περισσότερες ελεγχόμενες εισόδους και θα έχει μία ή δύο εξόδους.

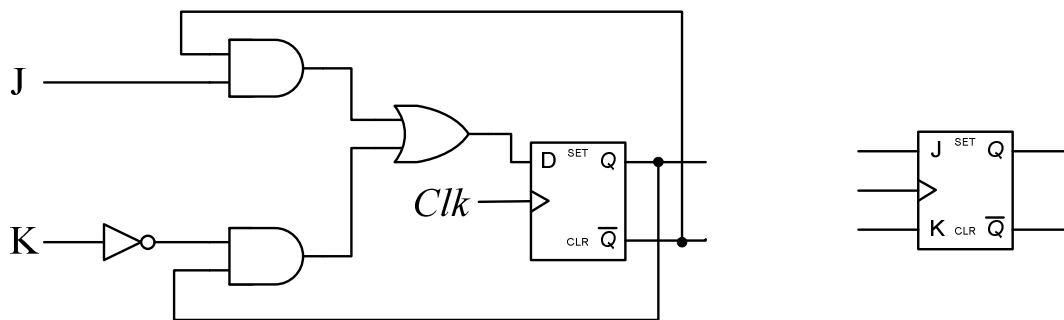
JK FLIP - FLOP

Ένα flip-flop μπορεί να εκτελέσει τρεις λειτουργίες: να τεθεί σε κατάσταση θέσης (να δώσει έξοδο 1), να τεθεί σε κατάσταση μηδενισμού (να δώσει έξοδο 0) ή να συμπληρώσει την έξοδό του. Το JK flip-flop έχει δύο εισόδους και στις εξόδους του θα βγάλει τιμές ανάλογα με την τιμή που παίρνουν οι εισοδοί του ακριβώς πριν από τη μετάβαση του ρολογιού. Το φλιπ-φλοπ αυτό μπορεί να εκτελέσει και τις τρεις προαναφερθείσες λειτουργίες. Το λογικό διάγραμμα ενός JK flip-flop που κατασκευάζεται με τη χρήση ενός D flip-flop και πυλών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8. Όταν ενεργοποιείται η είσοδος J, το φλιπ-φλοπ μηδενίζεται (η έξοδός του γίνεται 0). Όταν ενεργοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο εισοδοί, η έξοδος του φλιπ-φλοπ συμπληρώνεται. Μπορούμε να επαληθεύσουμε εύκολα

τη συνολική λειτουργία, αν εξετάσουμε το συνδυαστικό υποκύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 1.8 και δίνει τη τιμή σαν είσοδο D του αντίστοιχου φλιπ-φλοπ:

$$D = JQ' + K'J$$

Όταν το $J = 1$ και $K = 0$ ισχύει $D = Q' + Q = 1$, οπότε η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί τη θέση του D flip-flop (τη μετάβαση της εξόδου στο 1). Όταν $J = 0$ και $K = 1$, ισχύει $D = 0$, επομένως η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί το μηδενισμό του D flip-flop. Όταν $J = 1$ $K = 1$, ισχύει $D = Q'$, οπότε η επόμενη ακμή του ρολογιού προκαλεί τη συμπλήρωση της εξόδου του D flip-flop. Όταν $J = K = 0$, ισχύει $D = Q$ και η επόμενη ακμή του ρολογιού αφήνει την έξοδο του D flip-flop αναλλοίωτη. Το σχηματικό σύμβολο του JK flip-flop παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8. Το σύμβολο αυτό είναι παρόμοιο με εκείνο του D flip-flop, με τη διαφορά ότι υπάρχουν δύο εισοδοί, οι οποίες ονομάζονται J και K..



Σχήμα 1.8 JK flip-flop, Αριστερά διάγραμμα κυκλώματος και δεξιά σχηματικό σύμβολο.

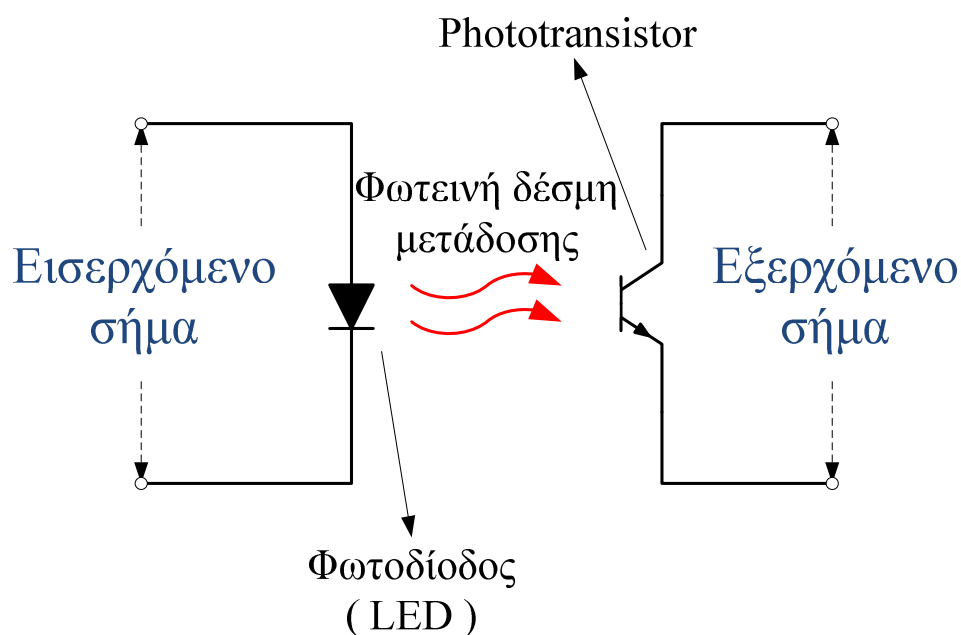
Πίνακας αληθείας JK flip-flop

Είσοδος J	Είσοδος K	Έξοδος Q
0	0	Q(t) Καμία αλλαγή
0	1	0 Μηδενισμός
1	0	1 Θέση
1	1	Q' Συμπλήρωση εξόδου

1.7 Οπτοαπομονωτές

Ένας οπτοαπομονωτής (γνωστός και ως optocoupler ή opto-isolator) είναι ένα ημιαγωγό στοιχείο που χρησιμοποιεί μια σύντομη μετάδοση οπτικού σήματος για να μεταφέρει ένα ηλεκτρικό σήμα μεταξύ κυκλωμάτων ή μεταξύ στοιχείων ενός κυκλώματος, κρατώντας τα ηλεκτρικά απομονωμένα το ένα από το άλλο. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνίας, συστήματα οδήγησης και ελέγχου στα οποία χρησιμοποιούμε φως για να αποφύγουμε το ενδεχόμενο μια υψηλή τάση να επηρεάσει ένα χαμηλής ισχύος σύστημα. Με λίγα λόγια χρησιμοποιούμε συνήθως τους οπτοαπομονωτές για να απομονώσουμε χαμηλής ισχύος κυκλώματα από κυκλώματα μεγαλύτερης ισχύος και να αφαιρέσουμε ηλεκτρικό θόρυβο από το ηλεκτρικό σήμα.

Η δομή ενός οπτοαπομονωτή είναι απλή. Ένας οπτοαπομονωτής αποτελείται από μία φωτο-δίοδο(LED), η οποία είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση του οπτικού σήματος, και από έναν αισθητήρα φωτός για την πρόσληψη του οπτικού σήματος. Όταν ηλεκτρικό ρεύμα περάσει από τη φωτοδίοδο παράγεται φως το οποίο διαπερνά το εσωτερικό υλικό του οπτοαπομονωτή. Η ακτίνα φωτός ταξιδεύει μέσα από το διάφανο κενό και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα φωτός, ο οποίος μετατρέπει το φως αυτό σε ηλεκτρικό σήμα. Σε απουσία φωτός η είσοδος και η έξοδος του οπτοαπομονωτή είναι ηλεκτρικά μονωμένες η από την άλλη.



Σχήμα 1.9 Αναπαράσταση μετάδοσης του φωτεινού παλμού σε οπτοαπομονωτή.

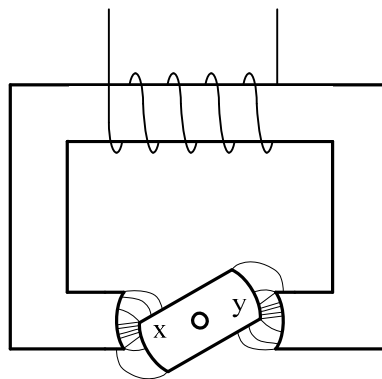
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΒΗΜΑΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ (ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ - ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ)

2.1 Είδη βηματικών κινητήρων

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι βηματικών κινητήρων : ο απλός μόνιμου μαγνήτη , μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης , και οι υβριδικοί . Ο απλός μόνιμου μαγνήτη βηματικός μοιάζει με τον κοινό σύγχρονο κινητήρα με μόνιμο μαγνήτη στον δρομέα . Διαφέρει όμως στην κατασκευή των περιελίξεων του στάτη , τα οποία έχουν την μορφή τυλίγματος πηνίου σε προεξέχοντες πόλους . Ενεργοποιώντας τα τυλίγματα ανά ζεύγος πόλων θα στρέψουν το τύμπανο σύμφωνα με εκείνους τους πόλους : ενεργοποιώντας το επόμενο ζεύγος θα στρέψουν το τύμπανο *ένα βήμα* . Η ροπή ανά μονάδα όγκου είναι σχετικά “φτωχή” σε αυτόν τον τύπο κινητήρα , και το βήμα είναι μεγάλο : 90° για διπολικό δρομέα . Στις περισσότερες εφαρμογές απαιτούνται μικρότερα βήματα και μεγαλύτερες ροπές , γι’ αυτό οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης χρησιμοποιούν την αρχή της ευθύγραμμης ροπής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Σ’ αυτό το διάγραμμα το σιδερένιο τύμπανο δέχεται μια ροπή η οποία τείνει να τον στρέψει ευθύγραμμα με τους πόλους του στάτη . Η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος είναι η ελάχιστη σ’ αυτή τη θέση . Οι περισσότεροι βηματικοί μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχουν μία πιο περίπλοκη κατασκευή απ’ αυτή , αλλά όλοι χρησιμοποιούν την ροπή ευθυγράμμισης μεταξύ των προεξέχοντων πόλων ή δοντιών και στον στάτη και στο τύμπανο . Αυτού του τύπου οι βηματικοί κινητήρες είναι πρότυπα doubly – salient μηχανών , των οποίων η λειτουργία δε μπορεί να αναλυθεί με όρους θεωρίας στρεφόμενων πεδίων .

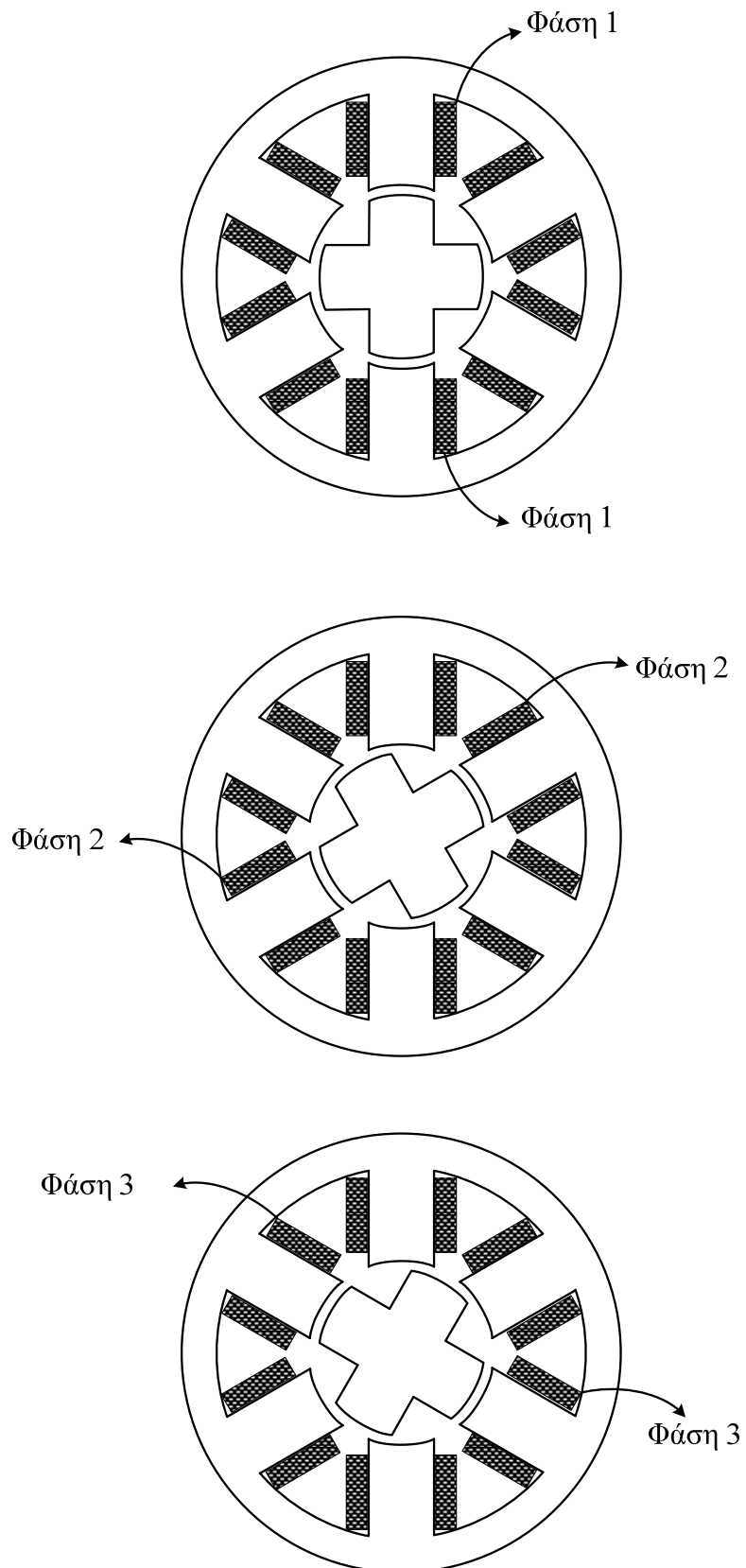


Σχήμα 2.1: Αρχή ευθύγραμμης ροπής

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η τομή ενός απλού κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης . Υπάρχουν τρεις φάσεις στον στάτη , στοιχισμένες σε έξι πόλους και τέσσερις πόλοι στο τύμπανο . Το διάγραμμα δείχνει τις τρεις θέσεις του δρομέα όταν οι φάσεις ‘1’ , ‘2’ και ‘3’ ενεργοποιούνται διαδοχικά : Το βήμα είναι 30° . Παρατηρούμε ότι τα βήματα του δρομέα είναι μικρότερα από τις θέσεις των αξόνων του μαγνητικού πεδίου : αυτός είναι κινητήρας *vernier* . Μικρότερα βήματα μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας περισσότερους πόλους στον στάτη και στον δρομέα ή εγκαθιστώντας μια κατασκευή πολλαπλών στοιβάδων

Στους κινητήρες πολλαπλών στοιβάδων , υπάρχει ένας διαφορετικός συνδυασμός στάτη – τυμπάνου για κάθε φάση . Το τύμπανο έχει μικρότερους εξέχοντες πόλους ή δόντια , και ο στάτης συνήθως έχει τέσσερις πόλους με την ίδια οδοντωτή μορφή στις άκρες των πόλων . Όταν μια φάση ενεργοποιείται , όλα τα δόντια του τυμπάνου τραβιούνται μέχρι να ευθυγραμμιστούν με τα δόντια του στάτη . Το τύμπανο είναι τοποθετημένο σε απλό κοινό στέλεχος (άξονας) και ο στάτης με κατάλληλες στοιβάδες με γωνία ίση με εκείνη του βήματος . Εναλλάσσοντας το ρεύμα από τη μια φάση στην επόμενη θα τραβηχτεί η επόμενη συστοιχία δοντιών του τυμπάνου σε ευθυγράμμιση με τα ανταποκρινόμενα δόντια του στάτη , προκαλώντας στον άξονα στροφή ενός βήματος . Οι κινητήρες πολλαπλών στοιβάδων συνήθως έχουν τουλάχιστον τρεις φάσεις .

Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχουν την χρήσιμη ιδιότητα ότι η ροπή εξαρτάται από το μέτρο του ρεύματος και όχι από τη φορά του : η μαγνητική δύναμη ευθυγράμμισης δεν επηρεάζεται από την αντιστροφή της κατεύθυνσης του πεδίου . Συνεπώς το ρεύμα φάσης χρειάζεται μόνο να αλλάζει κατάσταση από on σε off : δε χρειάζεται να αντιστρέφεται . Αυτό απλοποιεί πάρα πολύ τον ηλεκτρονικό έλεγχο των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης .



Σχήμα 2.2 Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης μονής στοιβάδας.

- α) Φάση 1 ενεργοποιημένη
- β) Φάση 2 ενεργοποιημένη
- γ) Φάση 3 ενεργοποιημένη

Η εξίσωση 2.1 δίνει την ροπή ευθυγράμμισης στη doubly-salient κατασκευή του σχήματος 2.2:

$$T = \frac{adgB^2}{\mu_0} [Nm] \quad (2.1)$$

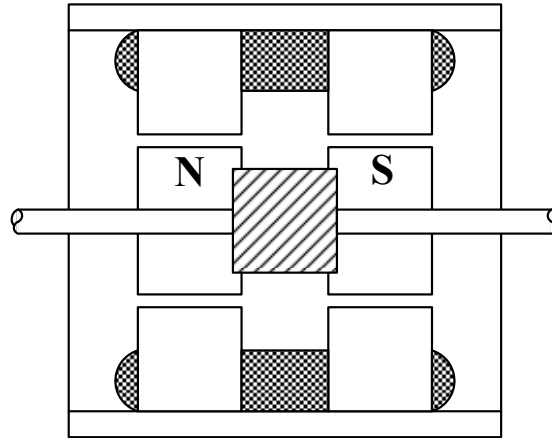
το οποίο δείχνει ότι η ροπή είναι ανεξάρτητη της γωνίας περιστροφής. Αυτό ισχύει όταν ο δρομέας δεν βρίσκεται σε ευθυγραμμία με τους πόλους του στάτη. Ωστόσο, όταν βρίσκεται σε ευθύγραμμη θέση η ροπή πρέπει να είναι μηδενική. Η ροπή αυξάνεται από το μηδέν στο μέγιστο σύμφωνα με την εξίσωση 2.1 όσο ο δρομέας αποκλίνει από τη θέση ευθυγράμμισης, με χαρακτηριστική ροπών/γωνίας η οποία εξαρτάται από το σχήμα των πόλων.

Αν ο μαγνητικός κορεσμό είναι αμελητέος, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής B στο διάκενο είναι ανάλογη με το ρεύμα στο τυλίγμα διέγερσης. Η ροπή θα πρέπει στο μεταξύ να εξαρτάται από το ρεύμα στο τετράγωνο. Στη πράξη υπάρχει συνήθως αξιοσημείωτος κορεσμός των μαγνητικών γραμμών στο ρεύμα κανονικής λειτουργίας, έτσι ο νόμος του τετραγώνου στη σχέση ισχύει μόνο για χαμηλά ρεύματα. Σε κανονικά επίπεδα ρεύματος η σχέση μεταξύ τοπής, γωνίας και ρεύματος διέγερσης είναι πιο σύνθετος! Για το χρήστη βηματικού κινητήρα παρ' όλα αυτά, η απλούστερη διαδικασία είναι να συμβουλευτεί το εγχειρίδιο του κατασκευαστή για τα χαρακτηριστικά που έχουν μετρηθεί πειραματικά.

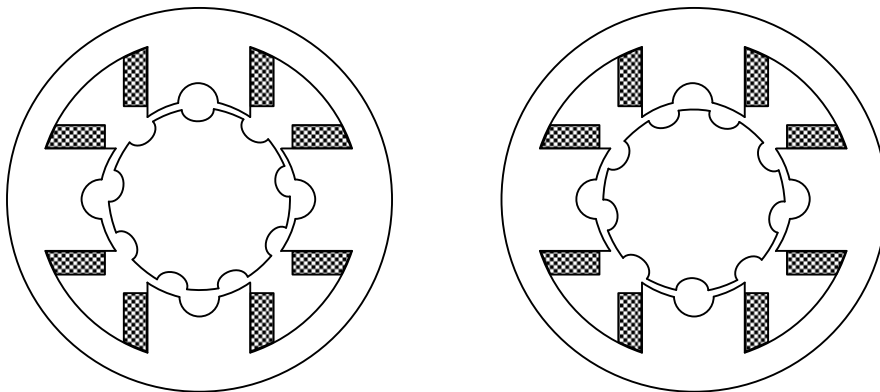
Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες

Ένας μόνιμος μαγνήτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς αύξηση της επίδρασης της μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, με αποτέλεσμα έναν υβριδικό βηματικό κινητήρα με υψηλότερη ροπή ανά μονάδα όγκου. Ο στάτης είναι παρόμοιος με αυτόν του κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, αλλά ο δρομέας είναι φτιαγμένος από δύο μέρη τα οποία σχηματίζουν το Νότιο και το Βόριο μέρος ενός μόνιμου μαγνήτη. Το σχήμα 2.3 απεικονίζει τις αρχές ενός κινητήρα δύο φάσεων. Στο σχήμα 2.3(α) φαίνεται το διάμηκες τμήμα μέσα από το κινητήρα και στο σχήμα 2.3(β) το εγκάρσιο τμήμα μεταξύ του νότιου και του βόριου πόλου του δρομέα. Αντίθετα από τον πολλαπλών στοιβάδων οδοντωτό κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, ο υβριδικός κινητήρας έχει έναν απλό στάτη με μακριούς πόλους γεφυρώνοντας τα δύο μέρη του δρομέα. Υπάρχει μια γωνιακή απόκλιση μεταξύ των δοντιών στα δύο μέρη του στάτη. Τα τυλίγματα στο πόλο 1 και στο πόλο 3 του στάτη αποτελούν το ζεύγος της α' φάσης και τα τυλίγματα στο πόλο 2 και στο πόλο 4 το ζεύγος της β' φάσης αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.3(γ) μας δείχνει τη κατάσταση που η φάση α' τροφοδοτεί με θετικό ρεύμα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του στάτη αντιστρέφοντας

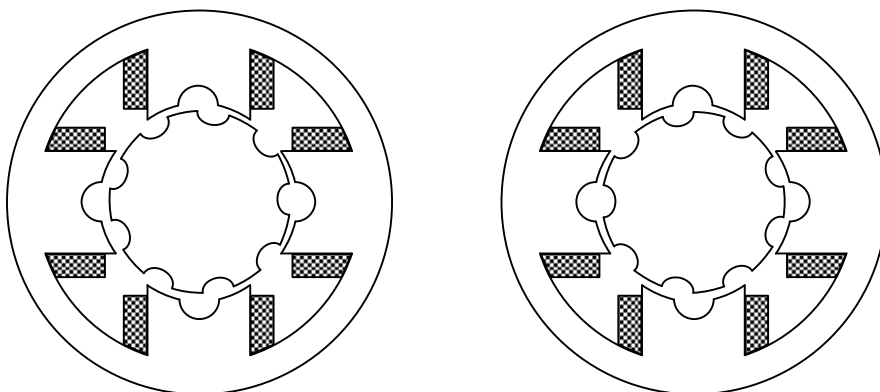
το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη στα διάκενα 3-N και 1-S, αλλά βοηθάει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη στα διάκενα 1-N και 3S! Τα δόντια του ρότορα ευθυγραμμίζονται με τα δόντια του στάτη στα διάκενα όπου το πεδίο είναι ισχυρότερο. Στο σχήμα 2.3(γ) παρουσιάζεται η αντίστοιχη κατάσταση κατά την οποία η φάση β' τροφοδοτείται έτσι ώστε τα δόντια να ευθυγραμμίζονται στα διάκενα 2-N και 4-S.



α



β



γ

Σχήμα 2.3 Υβριδικός βηματικός κινητήρας

α) Διαμήκες τμήμα

β) Εγκάρσιο τμήμα μεταξύ των πόλων - Φάση α ενεργοποιημένη

γ) Φάση β ενεργοποιημένη

Αρνητικό ρεύμα στην φάση α θα προκαλέσει ευθυγράμμιση στα διάκενα 3 – N και 1 – S, και αρνητικό ρεύμα στη φάση β θα προκαλέσει ευθυγράμμιση στα διάκενα 4 – N και 2 – S. Έτσι η διαδοχή ρευμάτων $+\alpha, +\beta, -\alpha, -\beta$ θα σημαίνει βήμα ενός δοντιού στο τύμπανο – τυπικά για τύμπανο 50 δοντιών, με 5 δόντια σε κάθε πόλο του στάτη, μας δίνει ένα βήμα γωνίας 1.8° .

Παραγωγή ροπής (υβριδικών)

Η βασική αρχή λειτουργίας είναι πάλι η ευθυγράμμιση μεταξύ των προεξεχόντων πόλων ή δοντιών [από την εξ. 1.45], αυτή η ροπή θα εξαρτάται από το τετράγωνο της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο μεταξύ του στάτη και του τυμπάνου. Αν σκεφτούμε τις συνθήκες στα διάκενα 2 – N και 4 – N στο σχήμα 9.2(β). Όταν η φάση β δεν είναι ενεργοποιημένη, η πυκνότητες των μαγνητικών ροών στα διάκενα είναι ίσες, και οι ροπές ευθυγράμμισης αλληλοεξουδετερώνονται. Όταν η φάση β ενεργοποιείται, οι πυκνότητες των ροών είναι άνισες: η ροπή εξ' αιτίας του διακένου 2 – N αυξάνεται και ροπή εξ' αιτίας του διακένου 4 – N μειώνεται. Το φαινόμενο μπορεί να υπολογισθεί όπως θα δούμε παρακάτω, αν ο κορεσμός παραμεληθεί.

Αν B_m είναι η πυκνότητα ροής λόγω του μόνιμου μαγνήτη, και B_e η πυκνότητα ροής λόγω του ενεργοποιημένου τυλίγματος φάσης. Η πυκνότητα ροής στο διάκενο 2 – N είναι $B_m + B_e$ και η πυκνότητα ροής στο διάκενο είναι $B_m - B_e$. Έτσι η τελική ροπή δίνεται από τη σχέση

$$T = C\{(B_m + B_e)^2 - (B_m - B_e)^2\} = 4CB_m B_e \quad (9.1)$$

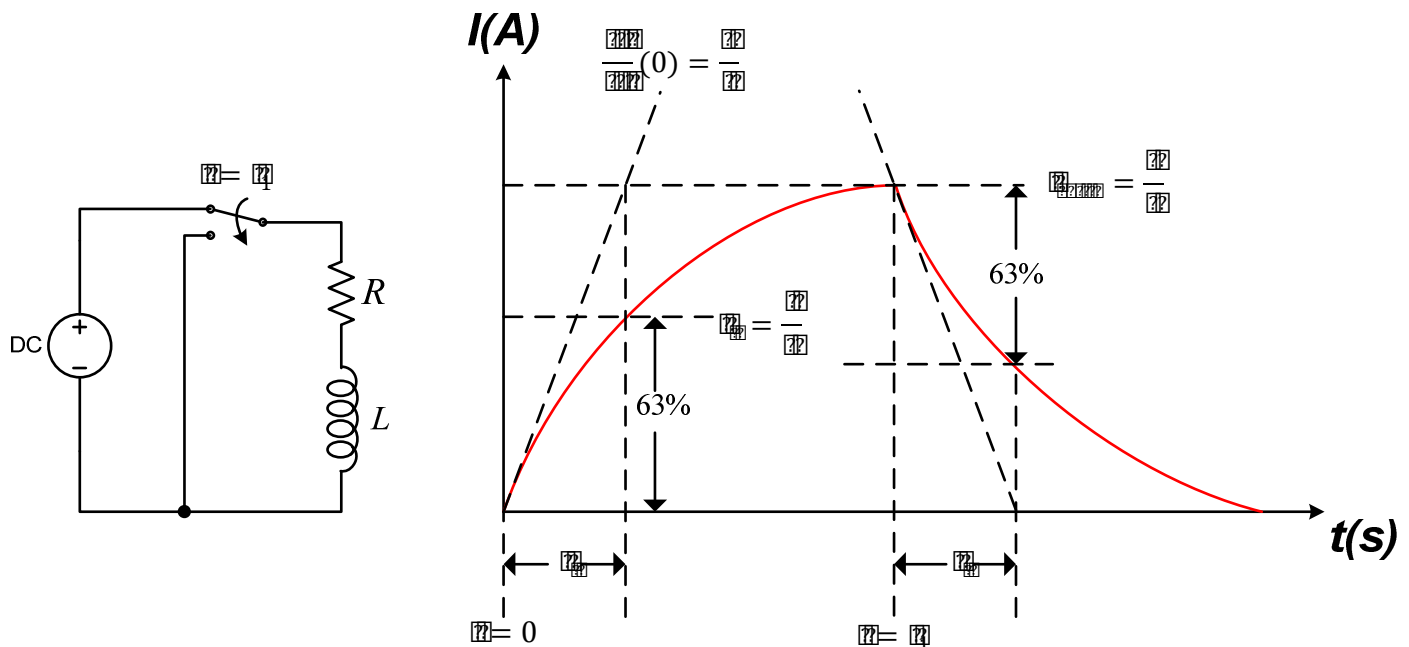
Όπου C είναι μία σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία του κινητήρα. Αν ο μαγνητικός κορεσμός είναι αμελητέος, τότε η B_e θα είναι ανάλογη του ρεύματος στο ενεργοποιημένο τύλιγμα: έτσι η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος, και όχι στο τετράγωνο του τετραγώνου όπως στους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Η εξίσωση 9,1 δείχνει ότι η ροπή είναι επίσης ανάλογη της πυκνότητας της ροής που παράγεται από τον μόνιμο μαγνήτη: καλύτερο είναι να γίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αυτό χωρίς να κορέννονται τα δόντια.

2.2 Εξισώσεις φυσικής βηματικών κινητήρων

Ο στάτης απαρτίζεται από ηλεκτρομαγνητικούς πόλους. Οι πόλοι είναι ηλεκτρομαγνητικά πηνία γύρω από τα οποία είναι τυλιγμένο σύρμα χαλκού. Τα πηνία αυτά παρουσιάζουν δύο φυσικές ιδιότητες την ωμική αντίσταση και την επαγωγική αντίσταση. Τα δύο αυτά μεγέθη επηρεάζουν και περιορίζουν την απόδοση των βηματικών κινητήρων. Οι θερμικές απώλειες οι οφειλόμενες στην ωμική αντίσταση δίνονται από τον τύπο:

$$P_R = R \cdot I_M^2$$

Λόγω της επαγωγής υπάρχει μια αντίσταση στις αλλαγές του ρεύματος, πράγμα το οποίο περιορίζει την λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η χαρακτηριστική ρεύματος συναρτήσει της τάσης ενός επαγωγικού – ωμικού κυκλώματος.



Σχήμα 2.3 Το ηλεκτρικό ισοδύναμο τροφοδοσίας μέσω διακόπτη του πηνίου και η μεταβολή του ρεύματος συναρτήσει του χρόνου κατά το κλείσιμο και το άνοιγμα του διακόπτη

Όταν σύμφωνα με το σχήμα 2.3 κατά την χρονική στιγμή $t = 0$ συνδεθεί δια μέσου του διακόπτη το πηνίο – αντίσταση με την τροφοδοσία V , το ρεύμα ανέρχεται λόγω της επαγωγικής αντίστασης του πηνίου σύμφωνα με την εξίσωση :

$$I(t) = \frac{V}{R} \cdot (1 - e^{-t \cdot \frac{R}{L}})$$

Η αρχική αύξηση του ρεύματος για $t = 0$ δίδεται από :

$$\frac{di}{dt}(0) = \frac{V}{L}$$

Το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά έως ότου φθάσει στην τελική τιμή όπου η επαγωγική αντίσταση δεν θα παίζει πλέον ρόλο παρά μόνο η ωμική :

$$I_{MAX} = \frac{V}{R}$$

Η τιμή $t_e = L / R$ είναι ο παρερχόμενος χρόνος έως ότου το ρεύμα φθάσει το 63 % της τελικής του τιμής δηλαδή την τιμή $I - (I/e)$.

Όταν κατά τη χρονική στιγμή $t = t_1$ ανοίξει ο διακόπτης αρχίζει η μείωση του ρεύματος σύμφωνα με την εξίσωση :

$$I(t) = \left(\frac{V}{R}\right) \cdot e^{-(t-t_1) \cdot \frac{R}{L}}$$

Με αρχική λύση :

$$\frac{di}{dt}(0) = -\frac{V}{L}$$

2.3Εξάρτηση των παραμέτρων κινητήρων από τον αριθμό των σπειρών και από τη διάμετρο του σύρματος

Η αντίσταση των τυλιγμάτων υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{a}$$

Όπου : ρ είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού

a είναι η διατομή του σύρματος

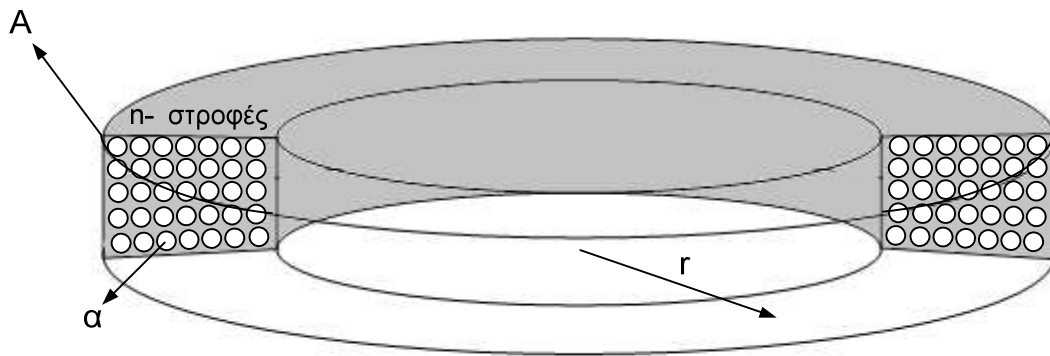
L είναι το συνολικό μήκος του σύρματος

Αλλά η διατομή σύμφωνα με το σχήμα 5 είναι $A = n \cdot a$ και το μήκος είναι :

$$l = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει :

$$R = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \cdot \rho \cdot \frac{1}{a} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \cdot \rho \cdot \frac{n}{A} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot n^2}{A}$$



Σχήμα 2.4 Ο πόλος του στάτη

Με άλλα λόγια, η αντίσταση R είναι ανάλογη του τετραγώνου των σπειρών. Ως γνωστό, και η αυτεπαγωγή είναι ανάλογη του τετραγώνου των σπειρών σύμφωνα με τον τύπο:

$$L = 2\pi r^2 \cdot n^2$$

Οι απώλειες είναι :

$$P_R = R \cdot I_M^2$$

$$I = \sqrt{\frac{P_R}{R}} \approx \sqrt{\frac{P_R}{n^2}} \approx \frac{1}{n}$$

Δηλαδή το, το ρεύμα είναι αντιστρόφως ανάλογο του πλήθους των σπειρών.

Η ροπή είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής Φ , η οποία είναι ανάλογη του αριθμού των αμπεροστροφών του τυλίγματος.

$$I \approx \Phi \approx n \cdot I_M \approx n \cdot \frac{1}{n} = \text{σταθερό}$$

Με άλλα λόγια, η ροπή είναι σταθερή για σταθερές απώλειες και ανεξάρτητη του αριθμού των σπειρών.

Τέλος, είναι η χρονική σταθερά :

$$t_e = \frac{L}{R} \approx \frac{n^2}{n^2} = \text{σταθερά}$$

Δηλαδή, η χρονική σταθερά είναι ανεξάρτητη του αριθμού σπειρών.

2.4 Θερμικά χαρακτηριστικά

Ακόμα και όταν ένας βηματικός κινητήρας δεν κινείται, ένα ή περισσότερα από τα τυλίγματα του είναι πάντα ενεργοποιημένα. Αν ο κινητήρας οδηγείται από έναν ενισχυτή που παίζει το ρόλο πηγής τάσης, το ρεύμα που θα διαρρέει τα τυλίγματα θα είναι μέγιστο όταν ο

κινητήρας δεν κινείται, γιατί δε θα δημιουργείται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη για να αντισταθμίσει στην επιβαλλόμενη τάση. Επομένως τότε είναι που παράγεται περισσότερη θερμότητα. Η κατάσταση μέγιστης παραγωγής θερμότητας είναι ταυτόχρονα και η δυσμενέστερη όσον αφορά την απαγωγή της θερμότητας, δεδομένου ότι με το δρομέα ακίνητο, το ποσό θερμότητας που παράγεται μέσω συναγωγής είναι ελάχιστο

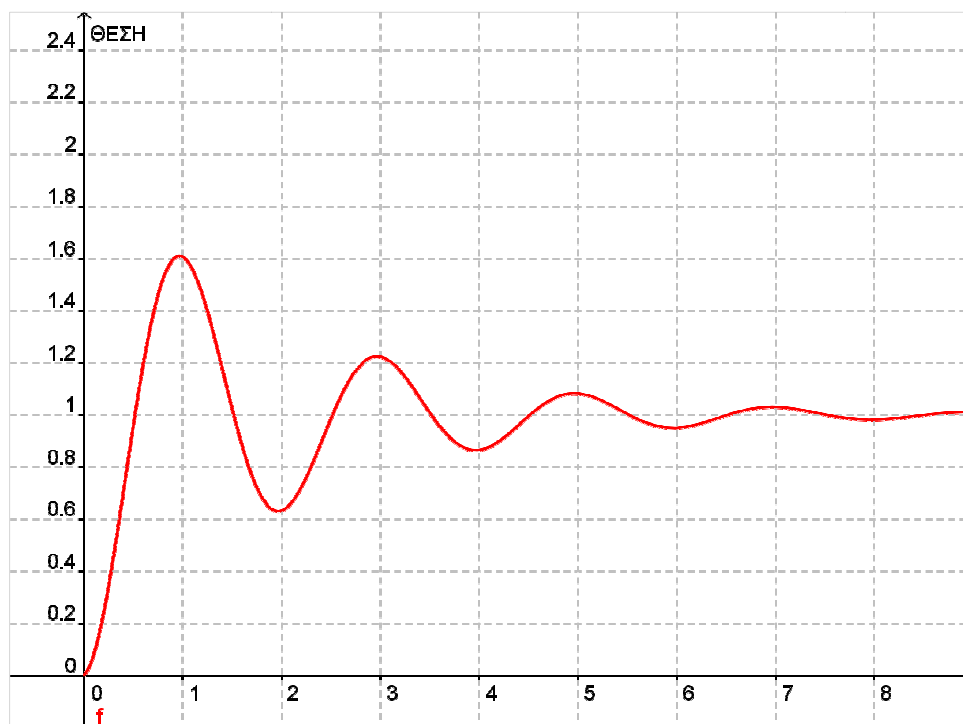
Συνεπώς η θερμοκρασία θέτει ένα σημαντικό όριο στη λειτουργία των βηματικών κινητήρων. Κανονικά σχεδιάζονται να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με άλλους τύπους κινητήρων, αλλά ακόμα και έτσι η αύξηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Σε “κανονικό” περιβάλλον λειτουργίας, η τήρηση των προδιαγραφών στην τάση τροφοδοσίας του κινητήρα εξασφαλίζει ασφαλή λειτουργία. Καθώς το θερμικό όριο είναι το πιο αυστηρό όριο λειτουργίας, η απόδοση ενός κινητήρα μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας τις δυνατότητες ψύξης πέρα των κανονικών. Έτσι η τάση, και κατά συνέπεια το ρεύμα, μπορούν να αυξηθούν χωρίς υπέρβαση του θερμικού ορίου

Ένας άλλος τρόπος για να παρακαμφθούν οι περιορισμοί απόδοσης των βηματικών κινητήρων είναι η χρησιμοποίηση ενός ενισχυτή που θα ελέγχει το ρεύμα αντί για την τάση. Οι συνήθεις προδιαγραφές του κατασκευαστή υποδεικνύουν την τιμή της τάσης. Αυτή η τιμή βασίζεται στη θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί στον κινητήρα όταν θα μείνει ακίνητος για μεγάλο χρονικό διάστημα, αφού οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές τοποθέτησης. Όμως η θερμότητα που παράγεται εξαρτάται πιο άμεσα από το ρεύμα παρά από την τάση. Έτσι, η επιβολή περιορισμού στην τάση οδηγεί σε συντηρητικό περιορισμό. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με υψηλούς ρυθμούς, το ρεύμα στην προδιαγραφόμενη τάση θα είναι μικρότερο από το ρεύμα ακινησίας εξαιτίας της επίδρασης της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, όπως επίσης και αμέσως από μία αλλαγή στη διέγερση, γιατί αυτή η αυτεπαγωγή του τυλίγματος θα επιβραδύνει την αύξηση του ρεύματος. Οι ενισχυτές ρεύματος αυξάνουν την τάση σε αυτές τις περιπτώσεις μέχρι να φτάσει το ρεύμα την τιμή της προδιαγραφής. Η ροπή θα είναι σημαντικά υψηλότερη από την ροπή που παράγεται στην τιμή της τάσης προδιαγραφής και έτσι είναι δυνατή μεγαλύτερη επιτάχυνση και υψηλότερα όρια βηματικού ρυθμού.

2.5 Απόδοση βηματικών κινητήρων

2.5.1 Συντονισμός

Κινούμενος με διαδοχικά βήματα, ο βηματικός κινητήρας έχει πολύ παρόμοια συμπεριφορά με το κλασσικό σύστημα μάζας – ελατηρίου – αποσβεστήρα Σχήμα 2.4. Η ελαστική συμπεριφορά προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ του δρομέα και του μαγνητικού πεδίου των πόλων του στάτη που είναι ενεργοποιημένοι. Κατά τη χρονική διάρκεια του βήματος, η διέγερση του στάτη παραμένει σταθερή. Στη λειτουργία εν κενό, η αδρανειακή συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της αδράνειας του δρομέα. Η απόσβεση δημιουργείται από τις μηχανικές τριβές, την αντίσταση του αέρα, και τις ηλεκτρικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων. Όπως κάθε σύστημα μάζας – ελατηρίου, θα έχει μια συχνότητα συντονισμού. Η συχνότητα εξαρτάται από το φορτίο, αλλά αν η συχνότητα των παλμών διέγερσης πλησιάζει την ιδιοσυχνότητα του συστήματος, η απόδοση θα μειωθεί και ο κινητήρας θα χάσει βήματα. Το φαινόμενο του συντονισμού είναι ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα στις εφαρμογές των βηματικών κινητήρων. Προκαλείται από τη δυναμική δομή της αλληλεπίδρασης μεταξύ δρομέα και στάτη και από τις συχνότητες που περιέχει η ασυνεχής κίνηση.



Σχήμα 2.4 Δυναμική ενός βήματος

Οι δύο θεραπείες για τον συντονισμό είναι 1: η αποφυγή διέγερσης με ακολουθία παλμών που έχει συχνότητα κοντά στην ιδιοσυχνότητα του κινητήρα και 2: την αύξηση της

απόσβεσης. Οι περισσότεροι βηματικοί κινητήρες έχουν μέσα αποφυγής των ιδιοσυχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της εναλλαγής από πλήρες βηματισμό σε ημιβηματισμό και αντίστροφα. Η απόσβεση μπορεί να εισαχθεί παθητικά με την πρόσθεση μηχανικών στοιχείων ή ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Μπορεί επίσης και να ελεγχθεί ενεργά χρησιμοποιώντας ανάδραση ταχύτητας ή επιτάχυνσης.

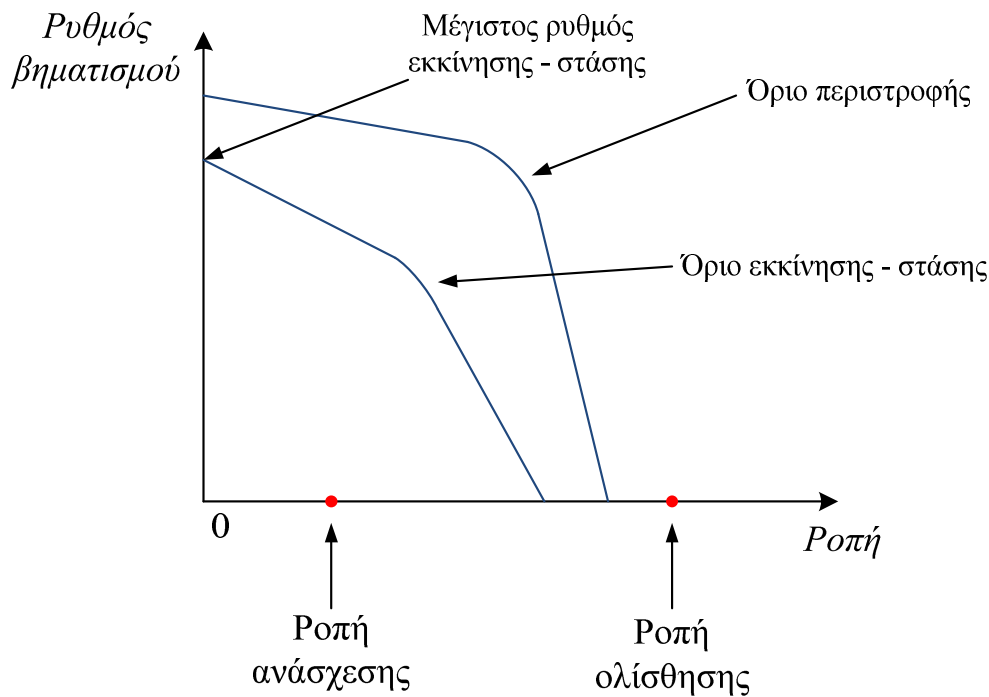
2.5.2 Στατική λειτουργία

Ο λόγος που οι βηματικοί κινητήρες συντονίζονται, δηλαδή η ελαστικότητα που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο, παρέχει συνάμα και ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, την μεγάλη ροπή συγκράτησης η οποία θα διατηρήσει τη θέση του κινητήρα ακόμη και όταν βρίσκεται υπο φορτίο, χωρίς συσκευές ανάδρασης. Η μέγιστη επιτρεπτή στατική φόρτιση είναι αυτή, για την οποία η διέγερση ακόμα αρκεί για να παράγει μια ροπή ικανή να μετακινήσει τον κινητήρα στην επόμενη θέση. Αυτή η φόρτιση είναι συνήθως μικρότερη από την κορυφαία (peak) θεωρητική ροπή, η οποία παρουσιάζεται αμέσως πριν ο κινητήρας ολισθήσει. Κατά την ολίσθηση ο κινητήρας κινείται μερικά βήματα, με συνέπεια να χάσει το σύστημα την ακεραιότητα της θέσης του. Οι βηματικοί κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες ολισθαίνουν σε πολλαπλάσια των τεσσάρων βημάτων, καταλήγοντας σε κάποια θέση ισορροπίας.

Οι βηματικοί κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες εμφανίζουν επίσης ροπή συγκράτησης ακόμα και όταν τα τυλίγματα διέγερσης δε διεγείρονται. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μόνιμων μαγνητών και του στάτη. Για συστήματα που χρειάζεται να διατηρούν την ακεραιότητα της θέσης τους ακόμα και στην περίπτωση απώλειας της ισχύος τροφοδοσίας, αν αυτή η ροπή ανάσχεσης ή παραμένουσα ροπή είναι μεγαλύτερη του στατικού φορτίου, μπορεί να κρατήσει τη θέση του κινητήρα χωρίς την εφαρμογή εξωτερικής ισχύος. Σε άλλες περιπτώσεις όμως μπορεί να αποβεί επιζήμια. Οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής δεν έχουν ροπή ανάσχεσης επειδή δεν έχουν μόνιμους μαγνήτες.

2.5.3 Δυναμική συμπεριφορά

Για να κινηθεί ο κινητήρας από μια θέση σε μια άλλη, πρέπει να εφαρμοστεί ένας πεπερασμένος βηματικός ρυθμός. Σε πολύ μικρούς βηματικούς ρυθμούς, η συμπεριφορά του κινητήρα παρουσιάζει χαρακτηριστικά στατικής λειτουργίας, καθώς η μεταβατική απόκριση ανάμεσα στα βήματα έχει χρόνο να σβήσει μέχρι να γίνει το επόμενο βήμα. Σε αυτή την κατάσταση ο κινητήρας μπορεί να επιτύχει πολύ χαμηλή μέση ταχύτητα, αλλά πρακτικά θα πηδάει από τη μια θέση στην άλλη όπου θα σταματά και θα περιμένει να κινηθεί στην επόμενη. Καθώς η συμπεριφορά αυτή είναι ουσιαστικά στατική, ο κινητήρας μπορεί να εκκινηθεί και να σταματήσει κατά βούληση και μπορούν να γίνουν οποιεσδήποτε αλλαγές στο βηματικό ρυθμό, αρκεί αυτός να παραμείνει αρκετά χαμηλός. Καθώς αυξάνεται ο βηματικός ρυθμός, ο δρομέας δεν προλαβαίνει να σταματήσει πριν δοθεί η επόμενη εντολή. Καθώς η διέγερση αλλάζει κατά τη διάρκεια κίνησης του δρομέα, ο κινητήρας λειτουργεί σε δυναμική ή μεταβατική κατάσταση. Μέχρι έναν οριακό βηματικό ρυθμό, ο οποίος εξαρτάται από το φορτίο, ο κινητήρας μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε στατική κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι ο βηματικός ρυθμός μπορεί να αλλαχθεί κατά βούληση, ακόμα και να αντιστραφεί, χωρίς να χρειάζονται ειδικές προφυλάξεις. Αυτός ο οριακός βηματικός ρυθμός λέγεται όριο στάσης – εκκίνησης ή ρυθμός στάσης – εκκίνησης χωρίς σφάλμα (EFSS). Η συνεχής γραμμή στο Σχήμα 2.5 εικονίζει ένα τυπικό όριο σε συνάρτηση της ροπής που πρέπει να δώσει ο κινητήρας. Το μέγιστο όριο στάσης – εκκίνησης εμφανίζεται όταν ο κινητήρας λειτουργεί εν κενό (ελάχιστη αδράνεια). Αυτή η καμπύλη δίνεται από τον κατασκευαστή του κινητήρα, αλλά πρέπει να χρησιμοποιηθεί προσεκτικά γιατί επηρεάζεται από τη φύση του φορτίου και τις ανάγκες του σε ροπή, όπως επίσης και από τη φύση των ενισχυτών που χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν τον κινητήρα. Αν υπάρχουν συχνότητες συντονισμού μέσα στην περιοχή λειτουργίας του κινητήρα, τότε το σχήμα της καμπύλης αυτής θα μεταβληθεί και αν κατά το συντονισμό η απόσβεση είναι μικρή, η καμπύλη θα παραμορφωθεί σοβαρά. Η ροπή ολίσθησης και η ροπή ανάσχεσης φαίνονται σαν τυπικά σημεία στον χώρο λειτουργίας του κινητήρα.



Σχήμα 2.5 Όρια απόδοσης βηματικού κινητήρα

Είναι μερικές φορές δυνατό να λειτουργήσει ο κινητήρας πάνω από την καμπύλη στάσης – λειτουργίας. Εάν το φορτίο έχει σημαντική αδράνεια, η ροπή που χρειάζεται για να επιτευχθεί είναι πολύ μεγαλύτερη από τη ροπή που απαιτείται για να κινηθεί με σταθερή ταχύτητα. Έτσι, αφότου έχει επιταχυνθεί το φορτίο, είναι δυνατό να αυξηθεί ο βηματικός ρυθμός πάνω στο όριο στάσης – εκκίνησης χωρίς να παρουσιαστεί έλλειμμα ροπής, επειδή απαιτείται λιγότερη ροπή για τη διατήρηση της σταθερής ταχύτητας. Αυτό το νέο όριο σημειώνεται στην καμπύλη λειτουργίας ως *όριο περιστροφής*. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί στην περιοχή μεταξύ των καμπυλών ορίου στάσης – εκκίνησης και ορίου περιστροφής, ο βηματικός ρυθμός δε μπορεί να αλλάζει αυθαίρετα. Πρίν σταματήσει ο κινητήρας, ο ρυθμός πρέπει να επιστρέψει σταδιακά στην περιοχή κάτω από το όριο στάσης – εκκίνησης. Εάν ο βηματικός ρυθμός μεταβληθεί υπερβολικά γρήγορα, τα όρια αναγκαίας ροπής θα παραβιαστούν εξαιτίας του αδρανειακού φορτίου και ο κινητήρας θα χάσει βήματα. Αν το φορτίο του κινητήρα είναι κυρίως φορτίο αντίστασης χωρίς αδρανειακό μέρος, το όριο στάσης – εκκίνησης δε μπορεί να επεκταθεί. Η διαδικασία της βαθμιαίας επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης του κινητήρα καλείται αναρρίχηση (*ramping*) και είναι σημαντική στα συστήματα βηματικών κινητήρων υψηλής απόδοσης. Ο ρυθμός αναρρίχησης και το μέγιστο όριο περιστροφής εξαρτώνται σημαντικά από το φορτίο και τους ενισχυτές.

2.6 Δυναμική του δρομέα

Ανεξάρτητα από το είδος του βηματικού κινητήρα κατά τη διάρκεια του παλμού σε ένα από τα τυλίγματα διέγερσης, ο δρομέας στρέφεται κατά ένα γωνιακό βήμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κίνηση αυτή του δρομέα αποτελεί μία εκθετικά αποσβενύμενη ταλάντωση γύρω από τη νέα θέση ισορροπίας. Το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης, καθώς και ο χρόνος αποκατάστασης, εξαρτώνται από τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων όπως της ροπής αδράνειας και του συντελεστή ιξώδους τριβής, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα το λόγο απόσβεσης και την αποσβενύμενη φυσική συχνότητα. Για λειτουργία χωρίς φορτίο και αν αμελήσουμε τις σταθερές του ηλεκτρικού μέρους, η εξίσωση περιστροφικής κίνησης του άξονα με βάση το 2ο νόμο του Νεύτωνα παίρνει τη μορφή.

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta(t)}{dt} + K\theta(t) = \tau(t)$$

Με βάση το παραπάνω τύπο εύκολα αποδεικνύεται ότι, για το λόγο απόσβεσης και τη μη αποσβενύμενη φυσική συχνότητα, ισχύουν αντίστοιχα οι σχέσεις:

$$\zeta = \frac{B}{2\sqrt{KJ}}$$
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}}$$

Αύξηση της σταθεράς αδράνειας οδηγεί σε μείωση του λόγου απόσβεσης και της μη αποσβενύμενη συχνότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης υπερύψωσης, καθώς επίσης και την αύξηση του χρόνου αποκατάστασης. Αντίθετα αποτελέσματα έχει η αύξηση της ιξώδους τριβής.

2.7 Χαρακτηριστικά ροπής

Τα στατικά χαρακτηριστικά της ροπής των βηματικών κινητήρων είναι κατά προσέγγιση ημιτονοειδή συνάρτηση της γωνίας. Το σημείο 0 στο σημείο της ροπής παρουσιάζεται στη θέση ισορροπίας. Τα στατικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται όταν η διέγερση δεν μεταβάλλεται και η ταχύτητα του δρομέα είναι αμελητέα. Καθορίζουν την ροπή συγκράτησης ή ολίσθησης, όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 7.5. Η ροπή ολίσθησης αναπτύσσεται μετακινώντας το δρομέα μακριά από τη θέση ισορροπίας του. Ως ένα σημείο,

η ροπή επαναφοράς αυξάνεται με την απόσταση. Αν ο δρομέας μετακινηθεί περισσότερο, η ροπή επαναφοράς πέφτει και ο δρομέας ολισθαίνει σε μία νέα θέση ισορροπίας. Η προδιαγραφόμενη ροπή ολίσθησης καθορίζεται με τη επιβολή ενός κατάλληλου συντελεστή ασφαλείας στη μέγιστη θεωρητική τιμή. Η κατάσταση περιπλέκεται ακόμα πιο πολύ όταν χρησιμοποιείται κλασματικός βηματισμός. Στη περίπτωση πλήρους βηματισμού η ροπή συγκράτησης είναι η ίδια για όλες τις θέσεις ισορροπίας. Όταν χρησιμοποιείται κλασματικός βηματισμός όμως, η ροπή συγκράτησης διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο της διέγερσης σε κάθε θέση ισορροπίας. Στον ημιβηματισμό, η ροπή συγκράτησης σε εκείνες τις θέσεις όπου η μία ομάδα τυλιγμάτων είναι σβηστή, είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη ροπή όπου τα τυλίγματα είναι ενεργοποιημένα. Στον μικροβηματισμό, η ροπή συγκράτησης στις θέσεις που αντιστοιχούν στον πλήρη βηματισμό και στον ημιβηματισμό είναι αντίστοιχα οι μέγιστες και οι ελάχιστες αναπτυσσόμενες ροπές. Οι ροπές συγκράτησης σε άλλες θέσεις θα βρίσκονται στο ενδιάμεσο των δύο αυτών τιμών.

Όταν κινείται ο δρομέα δημιουργείται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη εξαιτίας της κίνησης του μαγνητισμένου δρομέα μέσα στο πεδίο που παράγει η διέγερση των τυλιγμάτων του στάτη. Αυτή η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη, φαίνεται σαν μία τάση ή οποία εξουδετερώνει την τάση που επιβάλλεται στον κινητήρα από τον ενισχυτή του. Το ρεύμα δια μέσου των τυλιγμάτων του στάτη, το οποίο σε πρώτη προσέγγιση είναι ανάλογο της ροπής, εξαρτάται από την καθαρή τάση που εφαρμόζεται στον κινητήρα και συνεπώς είναι μικρότερο από την τιμή που θα είχε αν ο κινητήρας ήταν στάσιμος. Το γεγονός αυτό γίνεται σημαντικό στους μεγάλους βηματικούς ρυθμούς, όπου ο δρομέας δεν σταματά μεταξύ των βημάτων. Η επίδραση της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν ενισχυτή ρεύματος για την οδήγηση του κινητήρα, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Οι ενισχυτές ρεύματος κανονικά λειτουργούν μετρώντας το ρεύμα και χρησιμοποιώντας ένα βρόγχο ανάδρασης για να ρυθμίσουν την τάση, έτσι ώστε να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο ρεύματος. Αυτό όμως χρειάζεται κάποιο χρόνο και έτσι ακόμα και με τους ενισχυτές ρεύματος, υπάρχει μια χρονική περίοδος μειωμένης ροπής.

Ο προσδιορισμός ενός βηματικού κινητήρα απαιτεί το συνδυασμό των χαρακτηριστικών της ροπής του με το φορτίο που οδηγείται. Οι περισσότεροι κατασκευαστές βηματικών κινητήρων δίνουν σχεδιαστικές κατευθύνσεις για την οδήγηση φορτίων που είναι κυρίως αδρανειακά και για την οδήγηση φορτίων που έχουν αμελητέα αδράνεια. Πιο περίπλοκες περιπτώσεις φορτίων απαιτούν προσομοίωση του συστήματος ή εφαρμογή μοντέλων διαφορικών εξισώσεων ώστε να καθοριστούν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά του κινητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΒΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

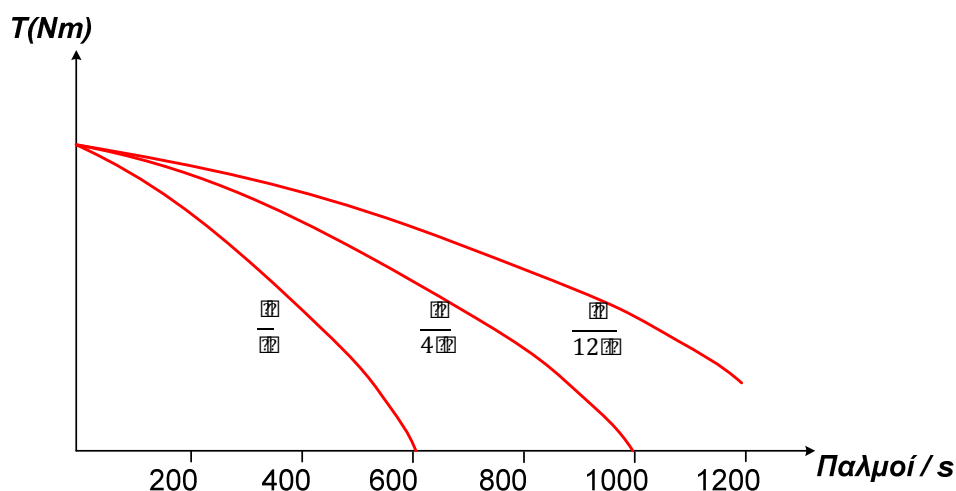
3.1 Γενικά περί συστημάτων οδήγησης βηματικών κινητήρων

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η οδήγηση βηματικών κινητήρων βασίζεται στην διακοπτική λειτουργία των τυλιγμάτων του . Επειδή είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογία στο χώρο της ηλεκτρικής κίνησης δεν έχουμε παραδείγματα οδήγησης τους από διεγερόμενα ηλεκτρομηχανικά μέσα (relay), τα πρώτα κυκλώματα οδήγησης βηματικών κινητήρων ήταν ηλεκτρονικά και η φιλοσοφία τους βασιζόταν όπως και σήμερα στη διέγερση ημιαγωγικών διακοπών (BJT, MOSFET, IGBT). Η διαφορά με τα σημερινά δεδομένα είναι ότι η διέγερση των ημιαγωγών στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται με τη χρήση λογισμικού και σπανιότερα με τη χρήση συνδυαστικών και χρονικών ψηφιακών κυκλωμάτων. Παρακάτω, θα δούμε κάποιους τρόπους οδήγησης και των δύο περιπτώσεων αφού πρώτα αναλύσουμε θεωρητικά αυτό που ουσιαστικά ελέγχουμε δηλαδή τον ρυθμό των βημάτων.

3.2 Ρυθμός και είδη βηματισμού

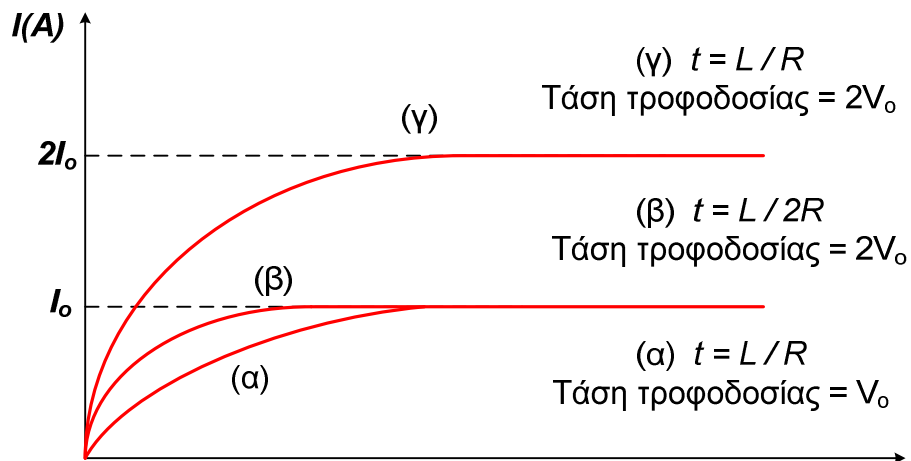
3.2.1 Ρυθμός βηματισμού

Ένας βηματικός κινητήρας που λειτουργεί με σταθερή τάση όσο αυξάνεται ο ρυθμός βημάτων του τόσο μειώνεται η ροπή του σχήμα 3.1. Αυτό οφείλεται στο ότι το ρεύμα δε μπορεί να αυξηθεί απότομα και δεν προλαβαίνει να φθάσει στην τελική τιμή του σχήμα 4γ , αλλά προσδιορίζεται από τη χρονική σταθερά του πηνίου $t_e = L / R$ σχήμα 2.3.



Σχήμα 3.1 Ροπή συναρτήσει ρυθμού βημάτων για διάφορες τιμές του λόγου L/R

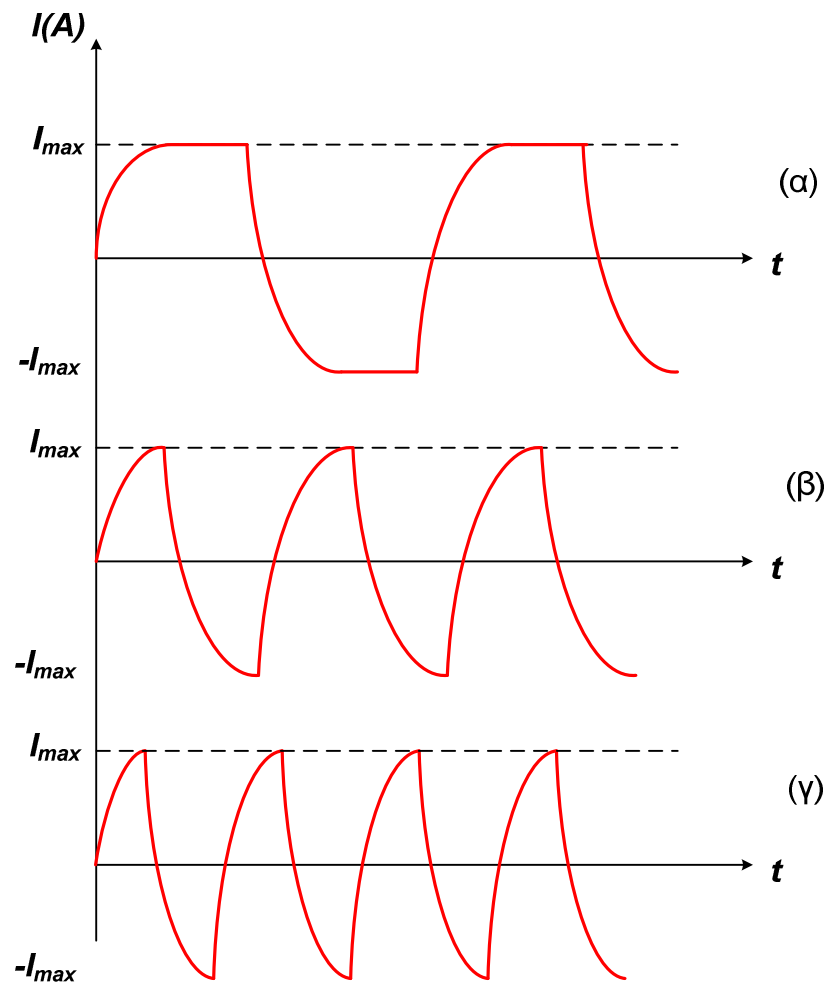
Η μείωση της σταθεράς t_e επιτυγχάνεται με την αύξηση της αντίστασης R επειδή $t_e = L / R$. Διπλασιάζοντας π.χ. την R τοποθετώντας μιας αντίσταση σε σειρά με το τυλίγμα και διπλασιάζοντας ταυτόχρονα την τάση τροφοδοσίας V έχουμε το ίδιο μέγιστο ρεύμα αλλά η απόκριση είναι κατά πολύ ταχύτερη σχήμα 3β .



Σχήμα 3.2 (α) Το ρεύμα του τυλίγματος για διαφορετικές τιμές του R και του V .
 (β) όταν διπλασιάζεται και η τάση τροφοδοσίας V_0 και η αντίσταση R έχουμε ταχύτερη απόκριση αλλά το μέγιστο ρεύμα του τυλίγματος.
 (γ) όταν διπλασιάζεται η τάση τροφοδοσίας V_0 , έχουμε ταχύτερη απόκριση και διπλασιασμό του μέγιστου ρεύματος του τυλίγματος I_0

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται το ρεύμα οδήγησης βηματικού κινητήρα με παλμούς τριών διαφορετικών συχνοτήτων. Πάνω από μια συγκεκριμένη οριακή συχνότητα που φαίνεται στο σχήμα 4β το ρεύμα δεν προλαβαίνει να λάβει τη μέγιστη τιμή του σχήμα 4γ. Επειδή η ροπή είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του ρεύματος, όσο αυξάνεται η συχνότητα των βημάτων δηλαδή των παλμών μικραίνει η χρονική σταθερά t_e και δίνεται η δυνατότητα αύξησης και της συχνότητας των παλμών και της ροπής σχήμα 2. Αυξάνοντας όμως την αντίσταση R αυξάνονται και οι απώλειες θερμότητας σε αυτήν. Για το λόγο αυτό είναι προτιμητέο να αυξάνεται η τάση V , έτσι ώστε να έχουμε αυξημένο ρεύμα σε υψηλές ταχύτητες.

Αν είναι γνωστός ο μέγιστος επιτρεπόμενος χώρος και η μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια ισχύος P_R , η μοναδική παράμετρος είναι το πλήθος των σπειρών, ή η διατομή του χάλκινου σύρματος.



Σχήμα 3.3 Κυματομορφές του ρεύματος μέσα από ωμικό-επαγωγικό φορτίο για τρεις διαφορετικές συχνότητες.

Κυματομορφή (γ) : Μέγιστη συχνότητα
Κυματομορφή (α) : Ελάχιστη συχνότητα

3.2.2 Κλασματικός βηματισμός

Ημιβηματισμός

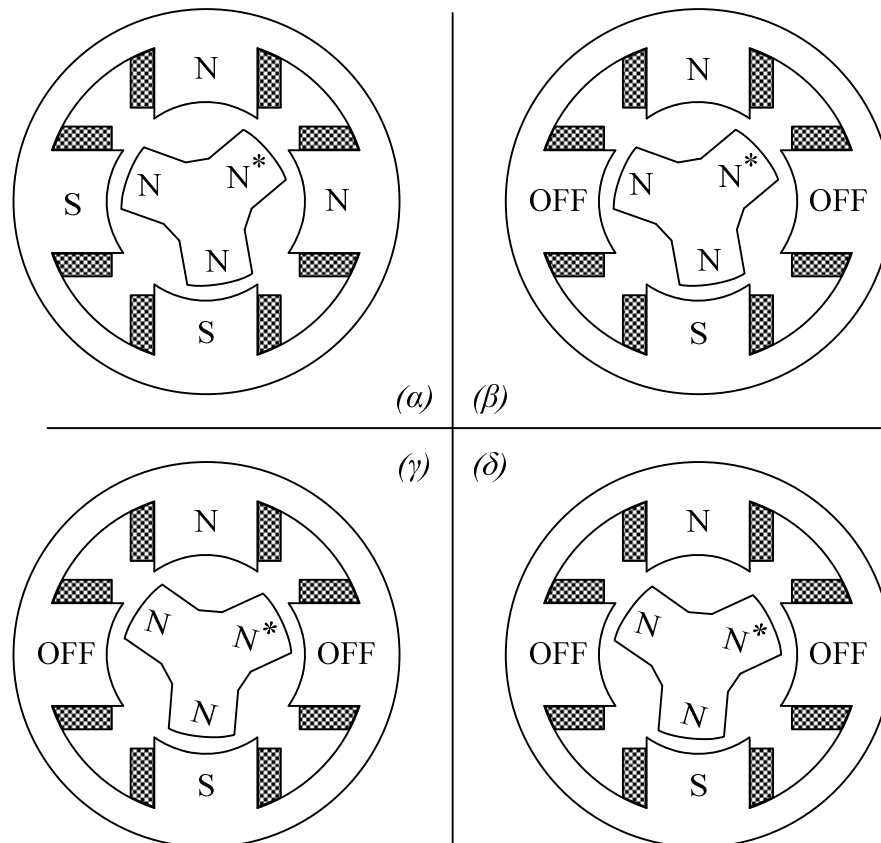
Μεγαλύτερη διακριτότητα σε βηματικούς κινητήρες είναι δυνατή χρησιμοποιώντας παραλλαγμένες ακολουθίες διέγερσης. Η ακολουθία από αυτές που υλοποιείται πιο εύκολα είναι ο ημιβηματισμός κινητήρων τεσσάρων φάσεων με μόνιμους μαγνήτες. Στον Πίνακα 3.1 η ακολουθία πλήρους βήματος δείχνει μια αντιστροφή πόλων για τη μετάβαση από το ένα βήμα στο άλλο. Αν αντί να αντιστραφούν οι πόλοι, απλά απενεργοποιηθούν τα τυλίγματα, ο κινητήρας θα μεταπηδήσει στο μισό της απόστασης μέχρι το επόμενο βήμα. Αυτό υλοποιείται με την ακολουθία διέγερσης του Πίνακα 3.2 και επιτυγχάνει διακριτότητα διπλάσια από αυτή που παρέχει ο πλήρης βηματισμός.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΗΜΙΒΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

A	B	Γ	Δ
1	0	1	0
0	0	1	0
0	1	1	0
0	1	0	0
0	1	0	1
0	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	0
AB	Δεξιός/Αριστερός	ΓΔ	Πάνω/Κάτω
01	NS	10	NS
00	OFF	00	OFF
01	SN	01	SN

Το Σχήμα 3.3 δείχνει τον κινητήρα να κινείται κατά ένα βήμα χρησιμοποιώντας ακολουθία ημιβηματισμού. Στην αρχική θέση που συμπίπτει με πλήρες βήμα, είναι και τα δύο τυλίγματα ενεργοποιημένα. Κατόπιν η διέγερση αλλάζει με την απενεργοποίηση του δεξιού και αριστερού τυλίγματος. Ο κινητήρας κινείται προς τη θέση ισορροπίας που

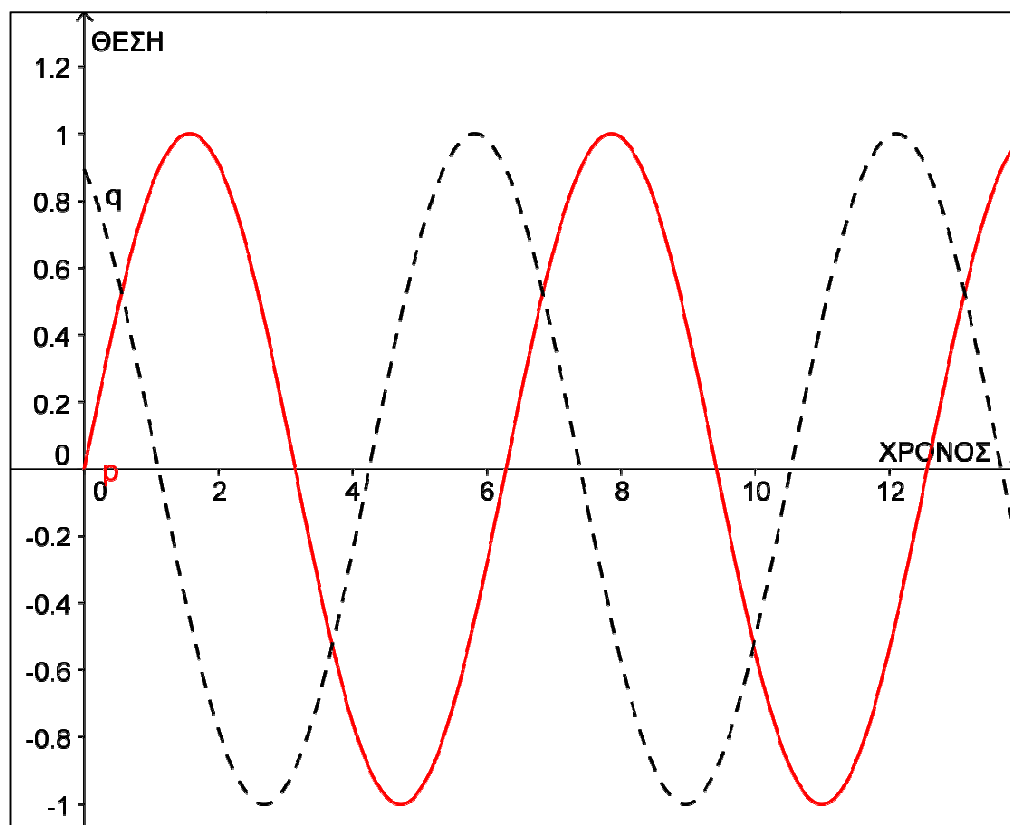
φαίνεται, η οποία βρίσκεται στα μισά της απόστασης από το επόμενο πλήρες βήμα. Ένα κύριο μειονέκτημα της εφαρμογής ημιβηματισμού είναι ότι η ροπή που αναπτύσσεται δεν είναι ομοιόμορφη από βήμα σε βήμα. Εφόσον η ενδιάμεση θέση χρησιμοποιεί μόνο ένα τυλιγμά, η ροπή συγκράτησης είναι μόνο γύρω στα τρία τέταρτα της ροπής σε θέση πλήρους βήματος.



Σχήμα 3.4 Λειτουργία ημιβηματισμού

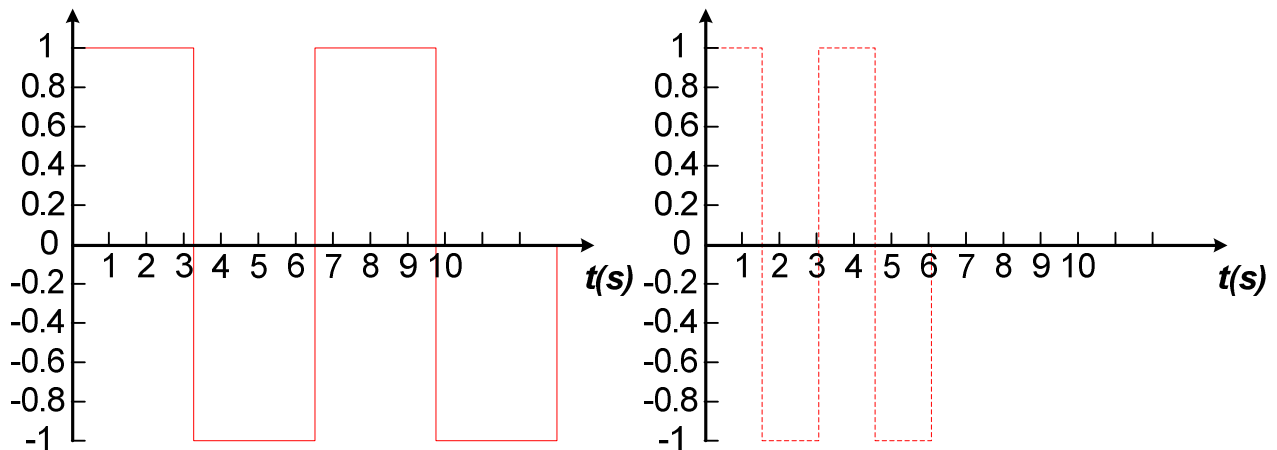
Μικροβηματισμός

Οι ακολουθίες βηματισμού και ημιβηματισμού μπορούν να γενικευτούν περισσότερο θεωρώντας τον βηματικό κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες ως κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος δύο φάσεων. Είναι διφασικός γιατί έχει δύο ομάδες συντονισμένων τυλιγμάτων : πάνω κάτω και αριστερό – δεξιό. Η διέγερση ενός διφασικού κινητήρα είναι δύο “τετραγωνισμένα” σήματα με διαφορά φάσης 90° που εικονίζονται στο Σχήμα 3.5. Η ακολουθία πλήρους βηματισμού λαμβάνεται κβαντίζοντας αυτά τα σήματα σε 2 επίπεδα, +1 και -1, όπως φαίνονται στο σχήμα 3.6. Για κάθε φάση απαιτείται μόνο μία μεταβλητή Boole, αφού οι δυνατές τιμές, που μπορούν να πάρουν οι φάσεις είναι μόνο δύο, +1 και -1. Στο πίνακα ακολουθίας υπάρχουν 4 μεταβλητές, Α,Β,Γ και Δ, αλλά κάθε ζευγάρι λαμβάνει σαν τιμές μόνο τους συνδυασμούς 01 και 10 και έτσι μπορεί να αντικατασταθεί από μία και μόνο μεταβλητή.



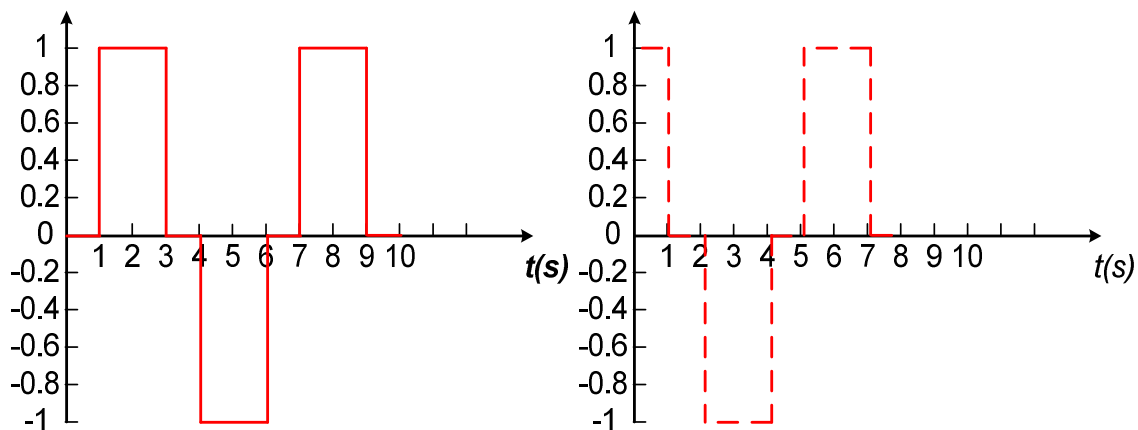
Σχήμα 3.5 Τετραγωνισμένα σήματα χωρίς διακριτοποίηση

Ένα επιπλέον επίπεδο κβαντοποίησης παράγει την ακολουθία ημιβηματισμού που φαίνεται στο σχήμα 3.7. Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε τριπλή κβαντοποίηση, που εξασφαλίζει τρεις δυνατές τιμές για κάθε μεταβλητή, -1 , 0 , ή $+1$, οπότε δεν είναι πλέον δυνατή η παράσταση της κάθε φάσης με μία μεταβλητή Boole. Εφόσον ο πίνακας ακολουθίας χρησιμοποίησε από την αρχή δύο μεταβλητές για την κάθε φάση, η ακολουθία ημιβηματισμού θα μπορούσε να παρασταθεί στον ίδιο πίνακα. Σε αυτή τη περίπτωση όμως, χρησιμοποιούνται όλοι οι συνδυασμοί, 10 , 01 , 00 . Δεν υπάρχει λόγος να περιοριστεί η κβαντοποίηση σε τρία επίπεδα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε αριθμός επιπέδων. Τότε η γωνία βήματος του κινητήρα μπορεί να γίνει αυθαίρετα μικρή, δίνοντας *μικροβηματική* συμπεριφορά. Στην πραγματικότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αρχικά τετραγωνισμένα σήματα ως πηγές διέγερσης με ένα αναλογικό σύστημα οδήγησης που θα δώσει συνεχή κίνηση. Έτσι ο οριζόντιος άξονας του γραφήματος μιας τέτοιας διέγερσης ενός βηματικού κινητήρα, μπορεί να θεωρηθεί και ως γωνία αντί για χρόνος, όπως συμβαίνει συνήθως σε κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος. Κίνηση μπροστά ή πίσω στον άξονα της γωνίας θα κινήσει τον κινητήρα σύγχρονα ως προς τη διέγερση-



Σχήμα 3.6 Τετραγωνικό σήμα με δυαδική διακριτοποίηση

-κατά τη μικροβηματική λειτουργία, η αναλογία ανάμεσα στους βηματικούς κινητήρες και στους σύγχρονους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος. Η κυριότερη διαφορά στη χρήση είναι ότι η διέγερση δεν είναι σήμα σταθερής συχνότητας. Αντίθετα, η διέγερση συχνά παραμένει σταθερή, με τον κινητήρα να μένει στην ίδια θέση. Το πιο ελκυστικό χαρακτηριστικό τόσο του πλήρους βηματισμού όσο και του μικροβηματισμού είναι ότι οι ενισχυτές που οδηγούν τα τυλίγματα είτε λειτουργούν στο μέγιστο είτε είναι σβηστοί. Αυτό επιτρέπει τη χρήση ενισχυτών διακοπών (switching amplifiers), οι οποίοι είναι πιο αποδοτικοί και λιγότερο ακριβοί από τους αναλογικούς ενισχυτές. Οι αναλογικοί ενισχυτές μπορούν να δώσουν τιμές τάσης οπουδήποτε μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα, ενώ οι ενισχυτές διακόπτες μπορούν να δώσουν είτε μέγιστη τάση είτε τίποτα. Η υλοποίηση μικροβηματισμού απαιτεί χρήση αναλογικών ενισχυτών ή χρήση διαμόρφωσης παλμών κατά πλάτος (PWM).



Σχήμα 3.6 Τετραγωνικό σήμα με τριαδική διακριτοποίηση

Η υλοποίηση πλάτους παλμών είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί το φυσικό βαθυπερατό φίλτρο της αδράνειας του κινητήρα για να εξομαλύνει την έξοδο ενός ψηφιακού σήματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ενισχυτής διακόπτης, ώστε η έξοδος να είναι είτε ενεργοποιημένη είτε απενεργοποιημένη. Δημιουργείται ένα ορθογωνικό σήμα με σταθερή συχνότητα, η οποία επιλέγεται αρκετά μεγάλη ώστε η έξοδος του κινητήρα να μην αυξομειώνεται υπερβολικά. Η ισχύς που παρέχεται στον κινητήρα μεταβάλλεται αλλάζοντας την αναλογία του χρόνου στον οποίο ο ενισχυτής είναι ενεργός ως προς το χρόνο τον οποίο είναι ανενεργός (κύκλος καθήκοντος). Το πλεονέκτημα της χρήσης PWM σε αυτή την εφαρμογή είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί μικροβηματισμός χωρίς να χρησιμοποιηθούν αναλογικοί ενισχυτές. Οι PWM όμως, παράγει σημαντικά επίπεδο ακουστικού θορύβου και μεγάλες ραδιοφωνικές παρεμβολές.

3.3 Βασικά κυκλώματα οδήγησης

Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διαθέτουν τουλάχιστον τρεις φάσεις. Η πολικότητα των ρευμάτων είναι ανεξάρτητη από τη παραγόμενη ροπή. Η φορά περιστροφής εξαρτάται από τη χρονική διαδοχή τροφοδότησης των τυλιγμάτων της κάθε φάσης. Η λειτουργία των κινητήρων μαγνητικής αντίστασης δεν απαιτεί εναλλαγή των πόλων στα τυλίγματα της κάθε φάσης. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη χρήση μονοπολικών συστημάτων οδήγησης (unipolar drives),

σχ 9-13.

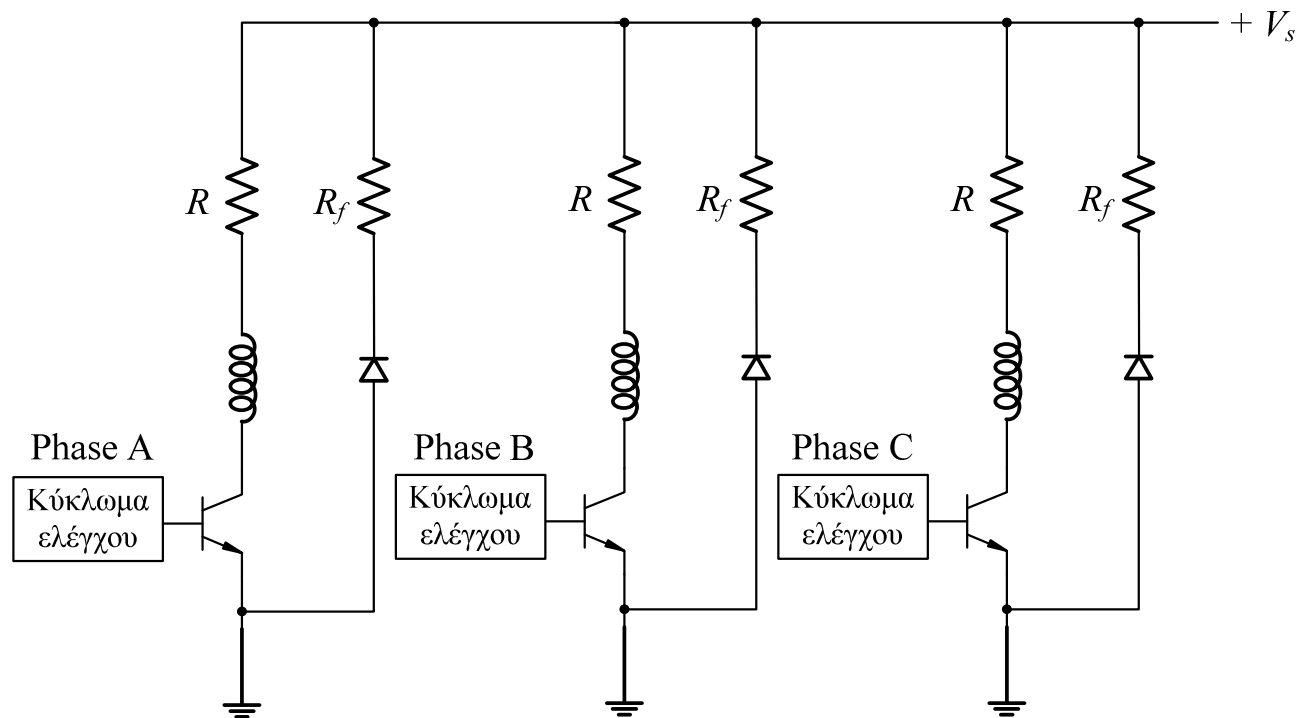
Το κύκλωμα ελέγχου της κάθε φάσης είναι ξεχωριστό. Μέσω του κυκλώματος ελέγχου, με τον έλεγχο του ασθενούς ρεύματος τη βάσης του τρανζίστορ, ελέγχουμε το κατά πολύ ισχυρότερο ρεύμα του τυλίγματος φάσης.

Τα τρανζίστορ κάνουν διακοπτική λειτουργία, δηλαδή λειτουργούν στην περιοχή της αποκοπής (ανοιχτός διακόπτης) και στην περιοχή του κορεσμού (κλειστός διακόπτης). Η αντίσταση R έχει ως στόχο, όπως προαναφέραμε, τη μείωση της σταθεράς χρόνου του τυλίγματος (για ικανοποιητική λειτουργία στις υψηλές συχνότητες). Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της τάσης στο τύλιγμα και μετά την αποκατάσταση της μόνιμης κατάστασης, για το ρεύμα του τυλίγματος πρακτικά θα ισχύει

$$I = \frac{V_s}{R + R_a}$$

όπου:

R_a = ωμική αντίσταση τυλίγματος ανά φάση (Ω).



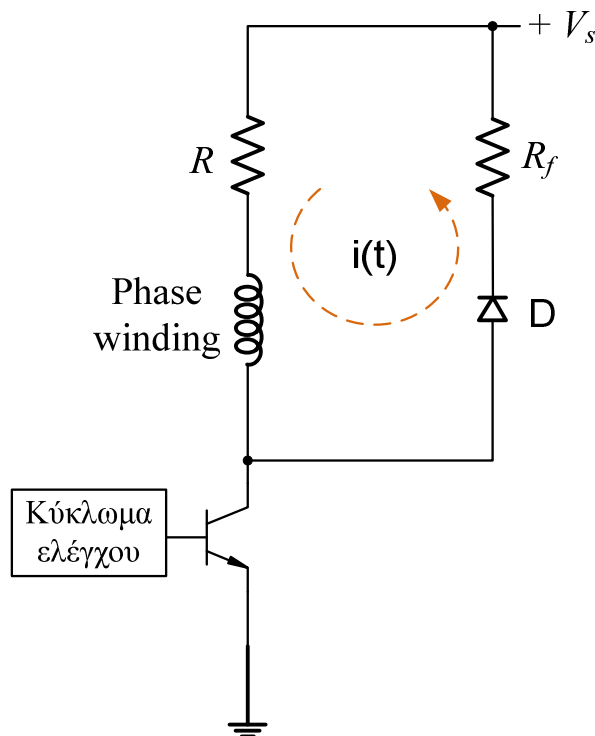
Σχήμα 3.7 Μονοπολικά κυκλώματα οδήγησης τριφασικού κινητήρα μαγνητικής αντίστασης

Για τη διατήρηση του ρεύματος στην ονομαστική του τιμή, η προσθήκη της ωμικής αντίστασης R θα πρέπει να συνοδευτεί και από ανάλογη αύξηση στην τάση V_2 .

Η τιμή της τάσης τροφοδοσίας επιλέγεται, ώστε με βάση την (9.17) να παρέχει το απαιτούμενο ονομαστικό ρεύμα στον κινητήρα. Στη διάρκεια αγωγής, το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού. Με αρκετά καλή προσέγγιση για τη τάση μεταξύ των επαφών συλλέκτη-εκπομπού, ισχύει ότι

$$V_{CE,sat} \ll V_s$$

και για αυτό το λόγο αυτή η τάση $V_{CE,sat}$ στις περισσότερες περιπτώσεις αμελείται. Η αυτεπαγωγή του τυλίγματος παίζει καθοριστικό ρόλο και κατά την απομάκρυνση του παλμού, δηλαδή κατά τη σβέση του τρανζίστορ. Η απότομη μεταβολή του ρεύματος θα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας σημαντικής υπέρτασης στα άκρα του τυλίγματος και κατ' επέκταση και στην επαφή συλλέκτη-εκπομπού του τρανζίστορ, η οποία μπορεί να προκαλέσει μέχρι και την μόνιμη καταστροφή του. Για το λόγο αυτό, έχει προστεθεί στο ηλεκτρονικό κύκλωμα του σχ.3.7 το μονοπάτι της ελεύθερης ροής μέσω της διόδου και της ωμικής αντίστασης R_f . Μέσω της συγκεκριμένης διαδρομής εκφορτίζεται η μαγνητική ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη στην αυτεπαγωγή κατά τη χρονική διάρκεια εφαρμογής του παλμού τάσης, σχ 3.8.

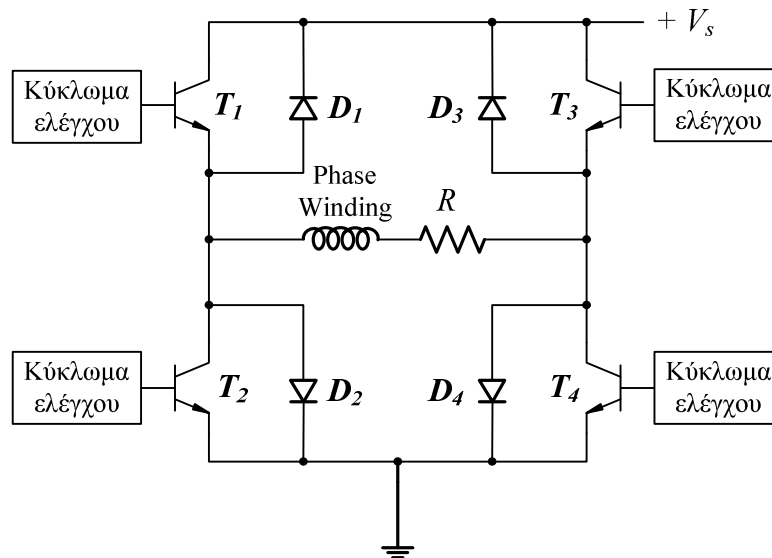


Σχήμα 3.8 Μονοπάτι ελεύθερης διέλευσης

Η προκαλούμενη υπέρταση κατά τη σβέση του τρανζίστορ πολώνει ορθά τη δίοδο ελεύθερης ροής D και η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια του πηνίου καταναλίσκεται στις τρεις ωμικές αντιστάσεις R, R_f και R_a του κλειστού βρόχου. Εάν το διερχόμενο ρεύμα πριν από τη σβέση του τρανζίστορ ήταν το ίδιο με το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, τότε και η αναπτυσσόμενη τάση στην επαφή συλλέκτη-εκπομπού θα δίνεται από τη σχέση

$$V_{CE,max} = V_s + I_a R_f$$

Σε αντίθεση με τους κινητήρες μαγνητικής αντίστασης, οι υβριδικοί κινητήρες, ή οποιοσδήποτε τύπος βηματικών κινητήρων που περιλαμβάνει μόνιμους μαγνήτες διαθέτουν μόνο δύο φάσεις. Η λειτουργία των κινητήρων αυτών απαιτεί περιοδική εναλλαγή των πόλων της κάθε φάσης και αυτό σημαίνει αντιστροφή της πολικότητας των αντίστοιχων ρευμάτων. Η απαίτηση αυτή κάνει πιο σύνθετα τα κυκλώματα οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων (bipolar drives). Στο σχήμα 3.9 δείχνεται το κύκλωμα ισχύος για τον έλεγχο της μιας φάσης ενός υβριδικού ή μόνιμου μαγνήτη βηματικού κινητήρα.



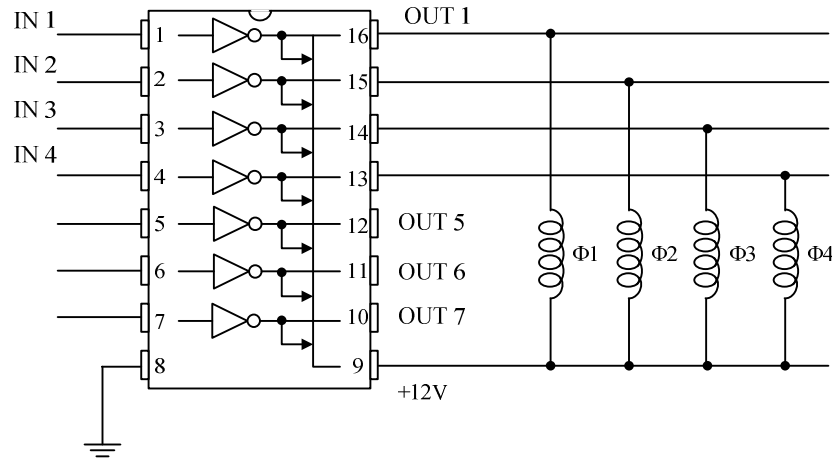
Σχήμα 3.9 Διπολικό κύκλωμα οδήγησης μιας φάσης υβριδικού ή μόνιμου μαγνήτη βηματικού κινητήρα.

Τα τρανζίστορ άγουν ανά ζεύγη. Για παράδειγμα, η ταυτόχρονη αγωγή των τρανζίστορ $T_1 - T_2$ εξασφαλίζει ρεύμα κατά τη μια φορά, ενώ η ταυτόχρονη αγωγή των $T_3 - T_4$ ρεύμα κατά την αντίθετη φορά. Σε αναλογία με τα μονοπολικά κυκλώματα οδήγησης, η ωμική αντίσταση R σε σειρά με το τυλίγμα εξασφαλίζει τη μείωση της σταθεράς χρόνου του τυλίγματος, για του λόγους που έχουμε ήδη αναφέρει. Η χρήση των διόδων D_1, D_2, D_3 και D_4 είναι για την εξασφάλιση του μονοπατιού ελεύθερης διέλευσης κατά τη σβέση των τρανζίστορ. Πράγματι, αμέσως μετά τη σβέση των τρανζίστορ $T_1 - T_2$ και μέχρι την έναυση των $T_3 - T_4$, λόγω της αναπτυσσόμενης αναστροφής τάσης στην αυτεπαγωγή, πολώνονται ορθά οι δίοδοι D_3 και D_4 . Αντίστοιχα, κατά τη σβέση των τρανζίστορ $T_3 - T_4$, το μονοπάτι ελεύθερης ροής εξασφαλίζεται από τις διόδους D_1 και D_2 . Μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας επιστρέφει στο δίκτυο. Η χρήση ωμικής αντίστασης στον κλάδο ελεύθερης ροής για την βελτίωση της σταθεράς χρόνου κατά την εκφόρτιση του ρεύματος στα διπολικά συστήματα οδήγησης δεν είναι απαραίτητη.

3.4 Ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε τη λογική των διακοπτικών στοιχείων που χρησιμοποιούμε στα κυκλώματα οδήγησης των βηματικών κινητήρων, μιλώντας γενικά όμως για το κύκλωμα διέγερσης. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι αυτό μπορεί να έχει όποια μορφή επιθυμούμε και καλύπτει τις ανάγκες μας. Τέτοια κυκλώματα μπορεί να είναι απλά ψηφιακά κυκλώματα με χρονιστές, πύλες και μετρητές, ή προγραμματιζόμενοι μικροελεγκτές όπως θα δούμε παρακάτω.

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται το κύκλωμα οδήγησης μικρού τετρα – φασικού βηματικού κινητήρα 12V 0,5A με τη χρησιμοποίηση του ULN2003A.

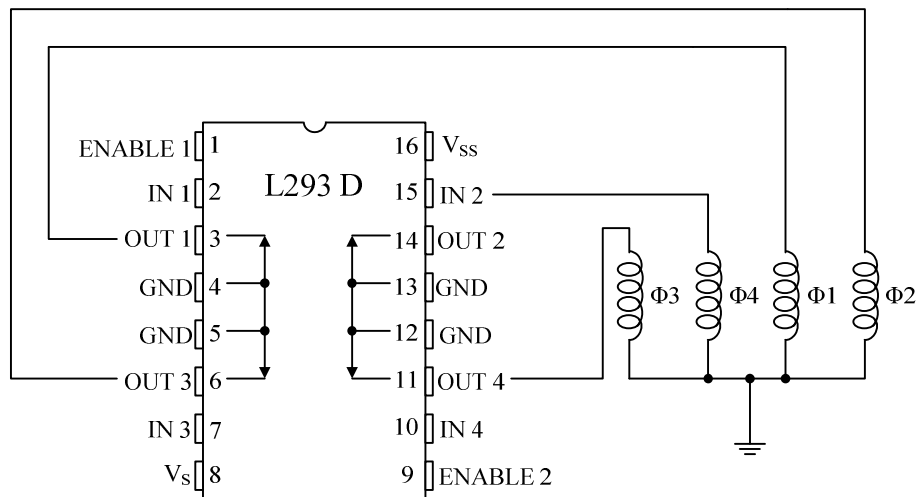


Σχήμα 3.10 Οδήγηση των φάσεων τετραφασικού βηματικού κινητήρα χρησιμοποιώντας το ULN2003A.
 Έκαστη φάση ενεργοποιείται όταν γίνει από το μικροελεγκτή η αντίστοιχη είσοδος $1N_x=1$

Το ολοκληρωμένο ULN2003A σχήμα 3.10, αποτελείται από επτά ενισχυτές Darlington με κοινούς συλλέκτες . Οι εξοδοι του είναι τύπου ανοικτού συλλέκτη και μία από αυτές μπορεί να δώσει ρεύμα της τάξεως των 0,5A ανά Darlington , ενώ στιγμιαία μπορεί να δώσει ρεύμα της τάξεως των 0,6A. Σε περίπτωση που απαιτούνται υψηλότερα ρεύματα μπορούν π.χ. δύο εξοδοι να συνδεθούν παράλληλα διπλασιάζοντας το παρεχόμενο ρεύμα. Κάθε ένας ενισχυτής διαθέτει στην έξοδο του μία δίοδο για την προστασία κατά την οδήγηση επαγωγικών φορτίων. Η οδήγηση λοιπόν, γίνεται χωρίς να χρειάζεται η τοποθέτηση διόδων προστασίας παράλληλα με τις φάσεις αφού αυτές είναι ενσωματωμένες στο ULN2003A.

Τα ολοκληρωμένα ULN2003A (5V , TTL, CMOS), ULN2004A (6-15VCMOS, PMOS), ULN2001A (DTL, TTL, PMOS, CMOS) και ULN2002A (14-25VPMOS), είναι κατάλληλα για την οδήγηση πηνίων ηλεκτρονόμων , LED, κεφαλές θερμικών εκτυπωτών και πολλών άλλων συσκευών. Το ULN2003A μπορεί να οδηγείται από εισόδους TTL και CMOS, ενώ η διαφορά δυναμικού στην έξοδο του λαμβάνει την τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στην ακίδα 9 (σχήμα 3.10) όταν η αντίστοιχη είσοδος του είναι λογικό 1.

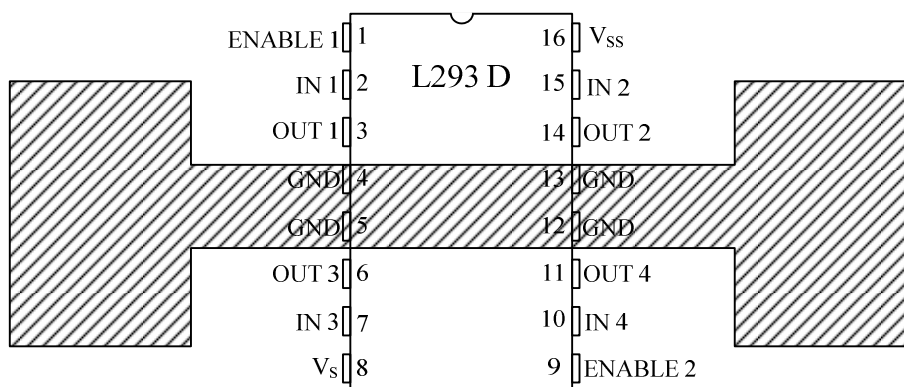
Το ολοκληρωμένο L293 είναι κατάλληλο για την οδήγηση βηματικών κινητήρων και όχι μόνον. Διατίθεται στο εμπόριο σε διάφορες εκδόσεις με την ικανότητα οδήγησης με ρεύμα 1A συνεχώς και 1,5A στιγμιαία. Στην έκδοση L293D υπάρχουν ενσωματωμένες δίοδοι προστασίας (σχήμα 3.11) συνδεδεμένες παράλληλα με το φορτίο για την οδήγηση επαγωγικών φορτίων.



Σχήμα 3.11 Οδήγηση των τεσσάρων φάσεων τετραφασικού βηματικού κινητήρα με το L293D. Οι εισόδοι IN 1, IN 2, IN 3 και IN 4 οδηγούνται από ένα μικροελεγκτή.

Διαθέτει 4 εισόδους TTL, CMOS και 4 εξόδους. Η έξοδος λαμβάνει την τιμή που έχει η τάση V_S . Η τάση V_{SS} ανέρχεται σε 5 V ενώ η τάση V_S μπορεί να ξεπερνά ακόμη και τα 30 V.

Όταν το ρεύμα είναι μεγάλο για αποφυγή υπερθέρμανσης του L293 θα πρέπει η κοινή γείωση των ακροδεκτών 4, 5, 12 και 13 να συνδέεται με μεγάλη μεταλλική επιφάνεια (νησίδα) στην πλακέτα όπως φαίνεται στο σχήμα 8 για την απαγωγή της θερμότητας. Σε περίπτωση που ο κινητήρας είναι μεγάλος και απορροφά μεγάλο ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ολοκληρωμένο L298, το οποίο μπορεί να δώσει ρεύμα της τάξεως των 4A με τάση έως και 46V.



Σχήμα 3.12 Σύνδεση του L293 με μεγάλη σκιογραφημένη επιφάνεια χαλκού στην πλακέτα στις ακίδες γείωσης για την επίτευξη ψύξης του ολοκληρωμένου.

3.5 Λογισμικό ελέγχου βηματικού κινητήρα

Η διέγερση του βηματικού κινητήρα μπορεί να παραχθεί εξολοκλήρου από λογισμικό αν ο βηματικός ρυθμός είναι αρκετά χαμηλός. Μια συνήθης λύση είναι η χρήση ενός ωρολογιακού interrupt που οδηγεί το πρόγραμμα διέγερσης στον ρυθμό των παλμών. Κάθε φορά που το ρολόι στέλνει ένα interrupt, αν ο κινητήρας δε βρίσκεται ήδη στην επιθυμητή θέση, κινείται κατά ένα βήμα. Το μοντέλο διέγερσης μπορεί να είναι είτε τεσσάρων φάσεων είτε παλμού/κατεύθυνσης. Η λίστα που ακολουθεί είναι ένα κομμάτι προγράμματος για τη συνάρτηση interrupt στην περίπτωση ενός οδηγού τεσσάρων φάσεων. Κάθε φορά που καλείται το πρόγραμμα, συγκρίνει την τρέχουσα θέση με την επιθυμητή θέση και ανάλογα δίνει ή όχι εντολή για ένα βήμα προς την επιθυμητή.

```
/*Interrupt Service Routine for Four-Phase Stepper*/
static long dp = 0; /*Desired position*/
static long ap = 0; /*Actual position*/

/*Excitation sequence, values are the hex equivalents of the full step
sequence given above*/

static int excite[4] = {0xa,0x6,0x5,0x9}; /*
Hex equivalent of 1010,0110,0101,1001*/
static int ix = 0; /*Index to current excitation*/

step_isr()          /*Interrupt service routine*/
{
If(ap==dp)return; /*Nothing to do*/

If(ap<dp)
{
if(++ix>3)ix = 0; /*Increment the index*/
ap++;           /*Increment actual position*/
}
else
{
if(--ix<0)ix = 3; /*Decrement the index for opposite direction*/
ap--;           /*Decrement actual position*/
}

step_out(excite[ix]); /*Send out the excitation*/
return;
}
```

Ο εξοπλισμός που χρειάζεται η συνάρτηση αυτή είναι τέσσερα **bit** ψηφιακής εξόδου και, στην ιδανική περίπτωση, ένα ηλεκτρονικά υλοποιημένο ρολόι αποκλειστικά για τη συνάρτηση αυτή. Η επικοινωνία με αυτή τη συνάρτηση από το παρασκήνιο, από όπου προέρχονται οι εντολές θέσης και βηματικού ρυθμού, γίνεται μέσω κλήσης συναρτήσεων που καθορίζουν αυτές τις παραμέτρους. Οι εντολές θέσης καθορίζουν την μεταβλητή “dp”,

ενώ οι αλλαγές στο βηματικό ρυθμό γίνονται μέσω μιας συνάρτησης που μεταβάλλει το interrupt του ρολογιού.

Εάν ένα ρολόι υλοποιημένο ηλεκτρονικά μπορεί να λειτουργεί αποκλειστικά για λογαριασμό της συνάρτησης, είναι δυνατό στους περισσότερους υπολογιστές να επιτευχθούν ρυθμοί παλμών ως μερικές χιλιάδες βήματα ανα δευτερόλεπτο χωρίς υπερβολική επιβάρυνση της CPU. Καθώς τα περισσότερα ηλεκτρονικά ρολόγια έχουν χρονική διακριτότητα της τάξης του $1\mu s$, είναι δυνατή πολύ καλή διακριτότητα βηματικού ρυθμού. Η αναρρίχηση του βηματικού ρυθμού απαιτεί πιο πολύ πολύπλοκη λογική, καθώς η κατάσταση του ρεύματος πρέπει να διατηρηθεί, αλλά είναι πραγματοποιήσιμη μέσα στην ίδια δομή του προγράμματος.

Εάν είναι διαθέσιμα μόνο ρολόγια υλοποιημένα μέσω λογισμικού, επειδή δεν υπάρχουν αρκετά ηλεκτρονικά ρολόγια για όλες τις χρονοσιμένες συναρτήσεις ενός προγράμματος, μπορεί και πάλι να επιτευχθεί βηματικός ρυθμός μερικών χιλιάδων βημάτων το δευτερόλεπτο. Η διακριτότητα όμως του λογισμικού ρολογιού είναι σπανίως μεγαλύτερη από $0,5\text{ ms}$ και έτσι στους μεγάλους βηματικούς ρυθμούς ο έλεγχος του ρυθμού γίνεται εντελώς χονδρικά. Ακόμα μεγαλύτεροι βηματικοί ρυθμοί κάποιου είδους αφοσιωμένου ελεγκτή. Ένας γρήγορος υπολογιστής ενός τσίπ μπορεί κατά πάσα πιθανότητα να πετύχει βηματικούς ρυθμούς ως 5 με 10 φορές μεγαλύτερους, κυρίως επειδή ολόκληρη η CPU μπορεί να αφοσιωθεί στον έλεγχο των βημάτων. Προκειμένου για ρυθμούς ακόμα πιο μεγάλους απαιτούνται ειδικά κυκλώματα. Οι ελεγκτές βηματικών κινητήρων που διατίθενται στο εμπόριο, δίνουν το βασικό έλεγχο φάσης από μια είσοδο παλμού/κατεύθυνσης και μπορούν επίσης να προσφέρουν και πιο εξεζητημένες μορφές ελέγχου, όπως αναρρίχηση και άλλες μορφές που δεν είναι πλήρους βηματισμού, όπως επίσης και λογική αποφυγής κρίσιμων ταχυτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Ανάλυση του κυκλώματος μας

Μέχρι τώρα είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια τα θεωρητικά αλλά και πρακτικά χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων και των τρόπων που οδηγούνται. Μελετήσαμε τις φυσικές εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία τους σε όλες τις καταστάσεις τους. Επίσης, με τον ίδιο τρόπο μελετήσαμε όλα τα στάδια που αποτελούν τα συστήματα οδήγησης των βηματικών κινητήρων από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα σημάτων χαμηλής ισχύος μέχρι και τα κυκλώματα μεγαλύτερης ισχύος για κάθε τύπο βηματικού κινητήρα. Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο θα αναλύσουμε το τρόπο που λειτουργεί το κύκλωμα που εμείς κατασκευάσαμε συμπεριλαμβάνοντας αναλυτικά συγκεντρωτικά διαγράμματα. Κλείνοντας το κεφάλαιο υπάρχουν τα τεχνικά φυλλάδια (datasheets) από όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση του συστήματος.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η λειτουργία του βηματικού κινητήρα βασίζεται στην παλμική διέγερση των τυλιγμάτων του . Ο τρόπος που προσεγγίσαμε αυτήν την διαδικασία ήταν με λογικές πύλες και ολοκληρωμένα κυκλώματα χρονισμού . Το κύκλωμα μας έχει δύο εκδόσεις , την υλοποίηση με ολοκληρωμένα τεχνολογίας TTL ή CMOS . Στην περίπτωση μας επιλέξαμε την δεύτερη . Η λογική είναι η εξής : τέσσερις XOR πύλες απο ένα ολοκληρωμένο 4070 μας παρέχουν την αλληλουχία των παλμών και συνεπώς την φορά περιστροφής . Αυτό ορίζεται μεταβάλλοντας την κατάσταση του pin 12 απο High (1) σε Low (0) . Η βηματική ενεργοποίηση γίνεται μέσω του 4027 που περιέχει δύο Flip-Flops . Οι έξοδοι Q και Q' ελέγχουν την σειρά διαδοχής των φάσεων . Ο βηματισμός επιτυγχάνεται διεγείροντας τις εισόδους *clock* και των δύο Flip-Flop, το φόρτο εργασίας αυτό, έχει αναλάβει το ολοκληρωμένο 555 . Είναι προφανές ότι δεν θα μπορούσαμε να συνδέσουμε απ' ευθείας τις εξόδους του 4027 στον κινητήρα. Αυτό γίνεται γιατί το σήμα εξόδου είναι χαμηλής ισχύος και ανίκανο να διεγείρει τον κινητήρα , αλλά και σαν κίνηση επικίνδυνη για την διάταξη. Γι αυτό χρησιμοποιούμε τρανζίστορ ισχύος ή MOSFETS για την οδήγηση των τυλιγμάτων του κινητήρα . Πριν απο αυ'το το στάδιο όμως έχουμε παρεμβάλει και τέσσερις οπτοαπομονωτές για δύο λόγους : πρώτον για την απομόνωση του κυκλώματος ισχύος απο το διέγερσης και δεύτερον για να αποφύγουμε την μεταφορά θορύβων που δημιουργούν τα ψηφιακά κυκλώματα στα τρανζίστορ και συνεπώς στον κινητήρα .

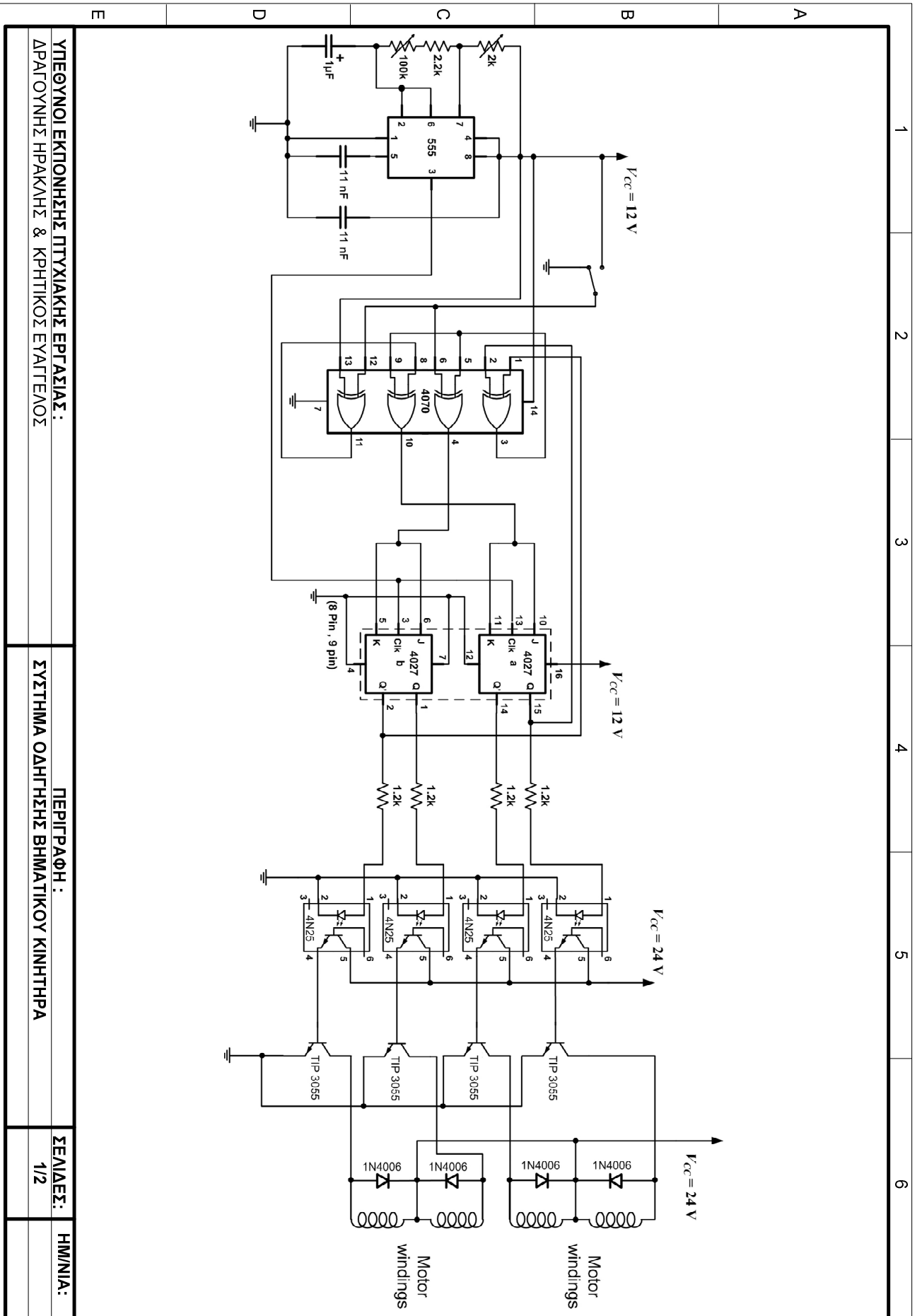
Τα ψηφιακά μας κυκλώματα χρειάζονται σκανδαλισμό. Αυτό συνεπάγεται ότι χρειαζόμαστε μία γεννήτρια τετραγωνικών παλμών. Στην προηγούμενη παράγραφο είπαμε ότι αυτό επιτυγχάνεται με το ολοκληρωμένο 555 στην περίπτωση μας, αλλά γενικά είναι κάτι που υλοποιείται με πολλούς τρόπους, όπως με παράλληλη θύρα από υπολογιστή ή

μικροελεγκτή. Σημαντικό είναι να θυμόμαστε, πως όταν χρησιμοποιούμε το 555 είναι καλό να τοποθετούμε μεταξύ των pins ισχύος πυκνωτές χωρητικότητας 0,1μF γιατί το ολοκληρωμένο εισάγει πολύ θόρυβο με αποτέλεσμα συχνά να παρατηρείται μπέρδεμα στο μέτρημα των παλμών στα Flip-Flop.

Ένα άλλο σημαντικό κομμάτι του συστήματος μας είναι η τροφοδοσία των κυκλωμάτων μας με τις τάσεις που απαιτούν. Γι αυτό χρησιμοποιήσαμε ένα τροφοδοτικό τύπου switching 24V και έντασης μέχρι 4A. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι πιο περίπλοκος από τα απλά τροφοδοτικά που κάνουν ανόρθωση και εξομάλυνση του ημιτονικού σήματος και λειτουργεί σε δύο συχνότητες των 50 και 60Hz. Η διαδικασία με την οποία μας παρέχει τη συνεχή του τάση στην έξοδο αποσαφηνίζεται στη 2η σελίδα των σχεδίων στα εδάφια A1 έως B4 μέσω block διαγράμματος. Στη πορεία της εργασίας μας προέκυψε η ανάγκη για μία ακόμα τροφοδοσία των 12V για τα ψηφιακά μας. Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο 78S12 regulator σε μια από τις εξόδους του τροφοδοτικού αυτού.

Για τη διακοπτική λειτουργία των τυλιγμάτων του κινητήρα μας χρησιμοποιήσαμε τρανζίστορ ισχύος TIP3055 τα οποία τοποθετήθηκαν σε κοινό ψυγείο με blower για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας. Το σύστημα ψύξης συνοδεύεται από αυτοματισμό σκανδαλισμού με θερμίστορ ρυθμισμένο να ξεκινά στη θερμοκρασία των 35°C περίπου. Σημαντικό ρόλο στη ψύξη του συστήματος παίζει ακόμη η επιλογή του διάτρητου κουτιού μέσα στο οποίο τοποθετήσαμε το σύστημα.

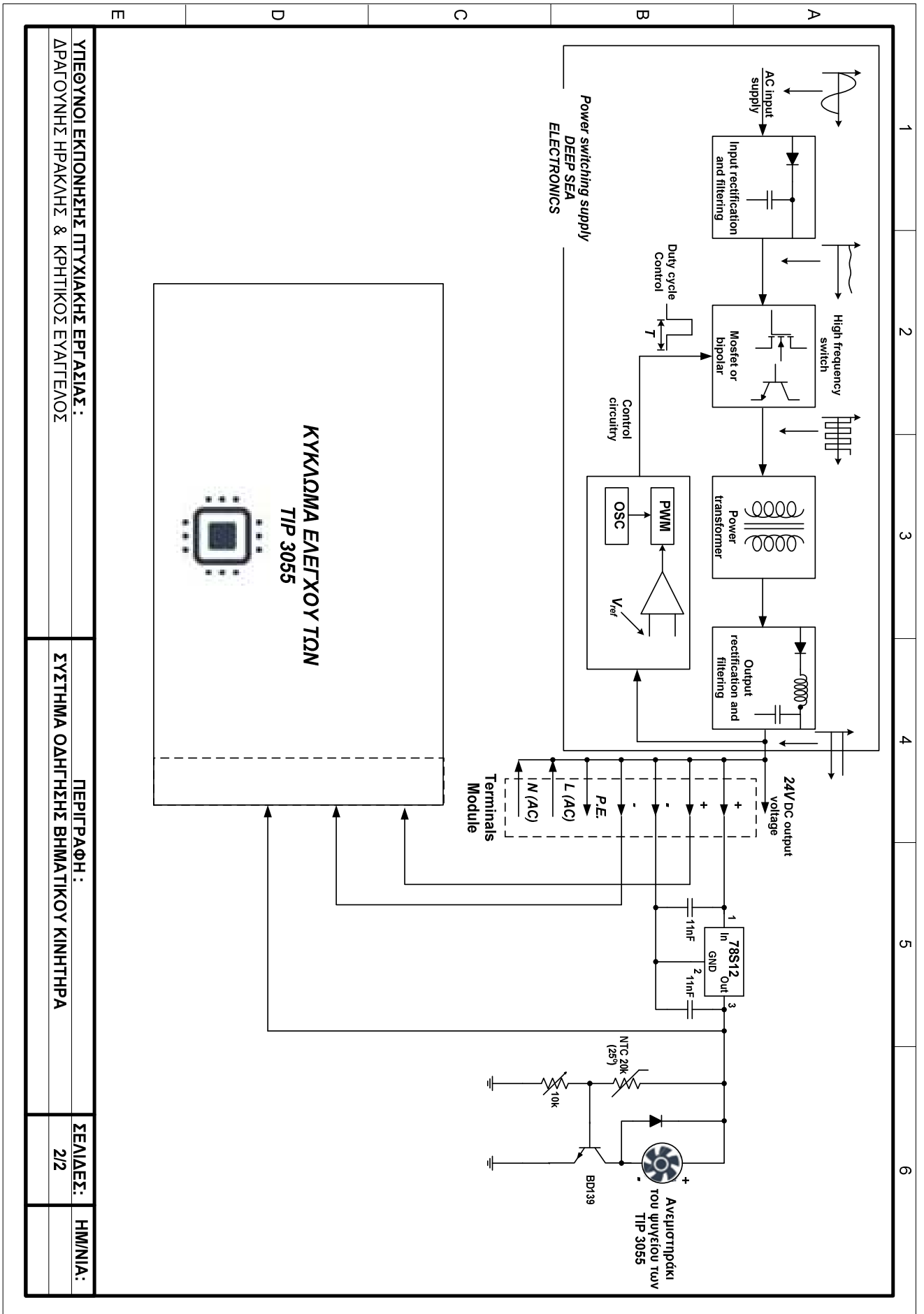
Τέλος, ο εν λόγω κινητήρας που χρησιμοποιήσαμε για τις δοκιμές είναι ένας της Sanyo Denki με ονομαστικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τα 24V και 3,1 A. Παρακάτω, φαίνονται τα αναλυτικά τεχνικά σχέδια του συστήματος αλλά και φωτογραφικό υλικό από δοκιμή με παλμογράφο σε διάφορα σημεία του συστήματος.

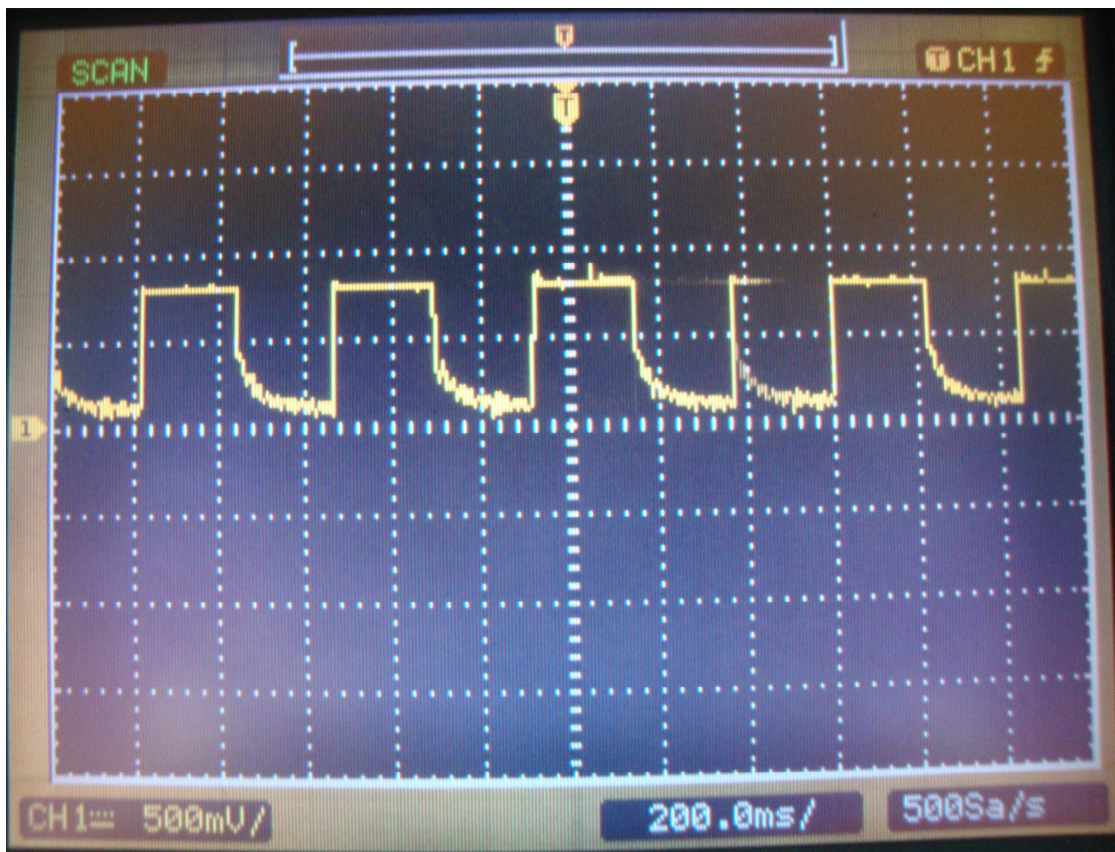


ΥΠΕΥΘΥΝΟΙ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :
ΔΡΑΓΟΥΝΗΣ ΗΡΑΚΛΗΣ & ΚΡΗΤΙΚΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

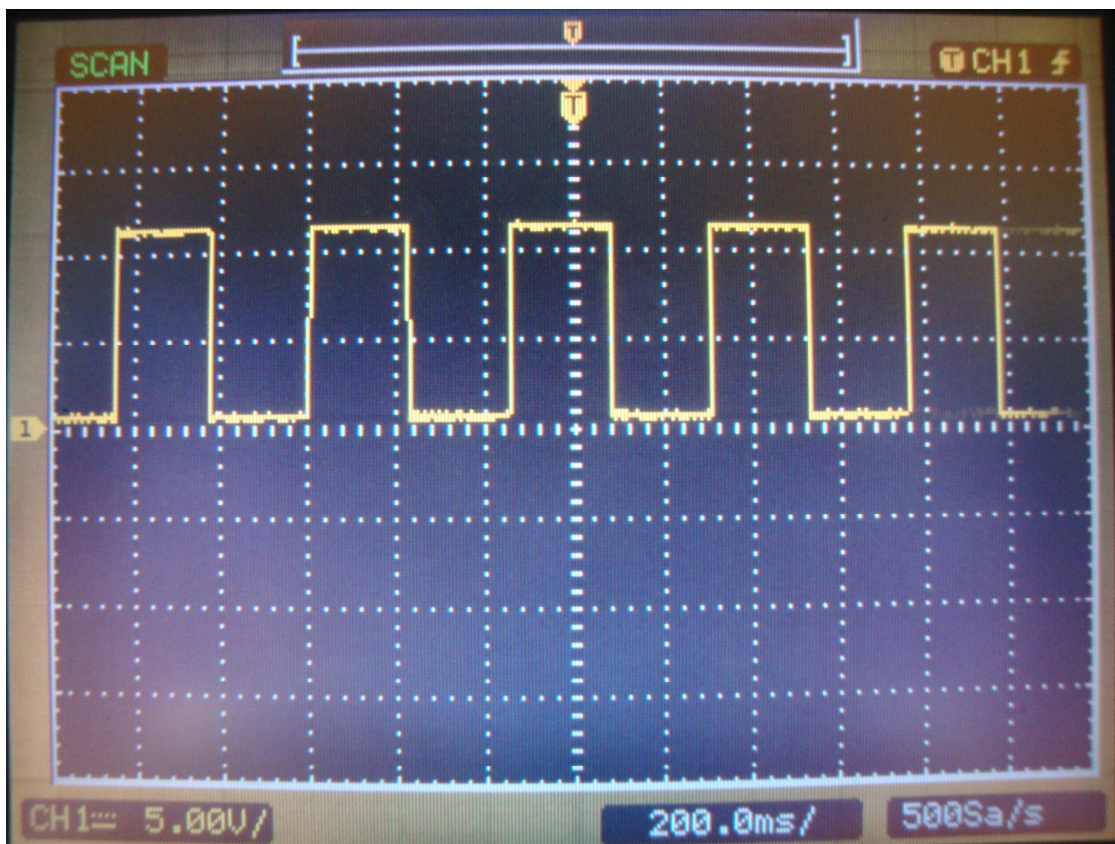
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ :
ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΣΕΛΙΔΕΣ: 1/2
ΗΜ/ΝΙΑ:





Εικόνα 4.1 Έξοδος των JK Flip-Flop



Εικόνα 4.2 Έξοδος 555



Εικόνα 4.3 Έξοδος των Οπτοcoupler

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] David M. Auslander / Carl J. Kempf, «Μηχατρονική : προσαρμοστικά μηχανικών συστημάτων», Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [2] Σταμάτης Αλατσαθανός, «Μικροελεγκτές PIC», εκδόσεις Γκιούρδας ISBN – 13 : 978 – 960 – 378 – 530 – 7 , ISBN – 10 : 960 – 387 – 530 – 9
- [3] A.E. Fitzgerald / Charles Kingley / Stephen D. Umans «*Electric Machinery* » 5th Edition, ISBN: 0 – 07 – 021134 – 5
- [4] Charles I. Hubert «*Electric Machines: Theory, Operation, Applications, Adjustment and Control* »
- [5] J. D. Edwards «*Electrical Machines & Drives* »
- [6] Π.Β. Μαλατέστας, « *Ηλεκτρική κίνηση* » , έκδοση 4^η Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, ISBN: 978 – 960 – 418 – 524 – 5
- [7] M. Morris Mano / Michael D. Ciletti, « *Ψηφιακή Σχεδίαση* » , έκδοση 4^η , Εκδόσεις Παπασωτηρίου, ISBN: 960 – 7182 – 66–9
- [8] Albert Malvino / David J. Bates , « *Ηλεκτρονική* » , έκδοση 7^η Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ ISBN: 978 – 960 – 418 –279 – 4
- [9] Sedra / Smith « *Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα ΤΟΜΟΣ Α* » , έκδοση 5^η , εκδόσεις Παπασωτηρίου, ISBN: 960 – 7182 – 61– 8

ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<http://searchnetworking.techtarget.com>