

UNIVERSITY OF THESSALY
POLYTECHNIC SCHOOL
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

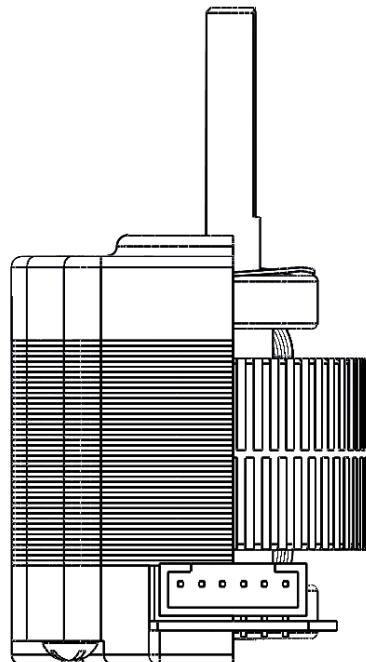
Diploma Thesis

STEP MOTORS AND SIMULATION OF THEIR OPERATION

from

ILIAS CHATZIEFSTATHIOU

Supervisor professor: DR. GEORGE PERANTZAKIS



Submitted as part of the requirements

for the acquisition of

Master's Diploma in Mechanical Engineering

2020

© 2020 Chatziefstathiou Ilias

The approval of the diploma thesis by the Department of Mechanical Engineering of the Polytechnic School of the University of Thessaly does not imply acceptance of the views of the author (Law 5343/32 no. 202 par. 2).

Approved by the Three-Member Examination Committee:

First examiner (Supervisor)	Dr. George Perantzakis Assistant Professor, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Thessaly
Second examiner	Dr. Anastasios Stamatellos Professor, Dept. of Mechanical Engineering, University of Thessaloniki
Third examiner	Dr. George Charalambous Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

*This work is dedicated to
you, the reader*

Acknowledgements

First of all, I would like to thank the supervisor of my dissertation, Professor Mr. Georgios Perantzakis, for the opportunity he gave me to deal with this subject and the valuable help he offered me.

I also owe my thanks to Professor Mr. Dimitrios Vamvatsikos of the Department of Civil Engineering of the National Technical University of Athens who, in addition to his useful advice and guidance during my studies, helped me believe in myself.

I am grateful to my family who supported me in every way so that I could finish my studies.

Finally, I thank each of my close friends who helped me directly or indirectly.

Ilias Chatziefstathiou

Abstract

The subject of this work is step motors and the simulation of their operation. In this thesis, the nature and function of these electric motors are analyzed. In the first part, the different types of motors along with their strengths and weaknesses are mentioned. Also, the way they generate torque is analyzed and some of their areas of application are referenced. In the second part, the construction geometry is analyzed and three-dimensional drawings of the 42HD4027-01 hybrid bipolar stepper motor are created. In the third part, a simulation model of the 42HD4027-01 motor is constructed using the Simulink tool. In addition, the constants that affect the model and their adjustment are examined so that its behavior reflects the actual behavior of the particular engine. Finally, a program is written to synthesize the desired motions and create the appropriate input voltages in the engine phases in order to simulate its response based on an open loop control technique. This thesis was synthesized by the student Ilias Chatziefstathiou under the supervision of Professor Mr. George Perantzakis.

Table of Contents

Glossary of terms	1
Part 1 - The stepper motors.....	3
1. Types of stepper motors	4
1.1 Permanent magnet stepper motors.....	4
1.2 Variable reluctance stepper motors.....	7
1.3 Hybrid stepper motors	9
2. Winding configurations	15
2.1 Unipolar configuration	15
2.2 Bipolar configuration	19
Integrated driver circuits	23
2.3 Bifilar windings	24
3. Stepping motor driving techniques	25
3.1 Wave drive.....	25
3.2 Whole step drive	26
3.3 Half step drive.....	27
3.4 Microstepping.....	28
4. Torque of stepper motors	31
4.1 Holding torque of one phase.....	31
4.2 Holding torque of two phases	34
4.3 Holding torque of sine-cosine microstepping	37
4.4 Pull out torque.....	43
5. The NEMA standard.....	55
6. Fields of application of stepper motors	58
6.1 Optical Media Driver head movement (CD / DVD).....	60
6.2 FDM 3-dimansinoal printers.....	61
Part 2 - Construction Configuration and 3D Design.....	63
1. Disassembly	64
2. Sketch - dimensioning	68
3. 3D design	70
4. Data sheet.....	76

Part 3 - Engine operation simulation	79
1. Mathematical equations of the model.....	80
1.1 Newton 's second law of rotation	80
1.2 Current and generated phase torque.....	81
1.3 Detent torque	82
1.4 Induced voltage	83
1.5 Kirchhoff's second law.....	85
2. Formatting the model's equations	86
3. Model construction in Simulink.....	88
4. Model parameters.....	92
4.1 Constant current-torque conversion constant - KT	92
4.2 Rotor and load moment of inertia - IL	94
4.3 Winding resistance - R	95
4.4 Winding inductance - L	96
4.5 Detent torque as percentage - Cd	97
4.6 Maximum magnetic flux linkage between phase and rotor - ψM	98
5. Model supplementary program	105
5.1 Model viriables creation.....	105
5.2 Calculation of additional parameters-characteristics	106
5.3 Phase input calculation – movement interpreter	107
6. Model results.....	119
6.1 Responses from various driving techniques.....	119
6.2 Ideal and actual positioning	133
6.3 Calculation of mechanical oscillation period.....	134
Conclusions	136
Suggestions for future research	137
Bibliography and sources	139
Appendix - AVR microcontroller as stepper motor driver	141

Glossary of terms

I_A	Phase A current	(Amp)
I_{max}	Maximum phase current	(Amp)
I_B	Phase B current	(Amp)
Res	Drive resolution	(Degree / step)
L	Phase inductance	(Henry)
R	Phase resistance	(Ohm)
T_{2Phase}	Holding torque of two fully active phases	(N*m)
T_{Phase}	Holding torque of one fully active phase	(N*m)
T_{dt}	Detent torque	(N*m)
T_{dtmax}	Maximum detent torque possible	(N*m)
T_{maxA}	Maximum phase A torque possible	(N*m)
T_{maxB}	Maximum phase B torque possible	(N*m)
T_{po}	Pull-out torque	(N*m)
T_{sum}	Total motor torque produced	(N*m)
T_A	Torque produced by Phase A	(N*m)
T_B	Torque produced by Phase B	(N*m)
K_T	Current-torque correlation constant	(N*m / Amp)
I_L	Load and rotor moment of inertia	(N*m^2)
I_{LOAD}	Load moment of inertia	(N*m^2)
I_{ROTOR}	Rotor moment of inertia	(N*m^2)
Kms	Microstepping resolution	(number of steps)
T	Drive technique period	(number of steps)
$\dot{\omega}$	Angular acceleration of rotor	(Rad / s^2)
S	Wave drive step	(Rad)
θ	Angular position of rotor	(Rad)
C_d	Detent torque as percentage of holding torque	(ratio)
T_{osc1p}	Period of oscillation while one phase is active	(sec)
T_{osc2p}	Period of oscillation while two phases are active	(sec)
T_e	Induced voltage signal period	(sec)
$V_{SA}(t)$	Voltage in phase A	(Volt)
$V_{SB}(t)$	Voltage in phase B	(Volt)
e_A	Induced Voltage in phase A	(Volt)
e_B	Induced Voltage in phase B	(Volt)
V_{RMS}	Root mean square of a voltage signal	(Volt)
V_{pk}	Peak of a voltage signal	(Volt)
ψ_A	Flux linkage between rotor to phase A	(Volt*sec=Weber)
ψ_B	Flux linkage between rotor to phase B	(Volt*sec=Weber)
ψ_M	Maximum possible flux linkage between rotor and a phase	(Volt*sec=Weber)

Part 1 - The stepper motors

Ένας βηματικός κινητήρας είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Είναι ένας σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας χωρίς ψήκτρες. Η κύρια του διαφορά με τους υπόλοιπους είναι ότι μπορεί να διαιρέσει μια πλήρη περιστροφή σε έναν εκτεταμένο αριθμό βημάτων. Η θέση του κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια χωρίς τεχνικές ανατροφοδότησης, εφόσον ο κινητήρας είναι προσεκτικά επιλεγμένος για τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Σε αυτό το μέρος γίνεται αρχική μελέτη της λειτουργίας και κατασκευής του βηματικού κινητήρα. Επίσης γίνεται έρευνα των πεδίων στα οποία χρησιμοποιείται περισσότερο σήμερα, των δυνατών χαρακτηριστικών του αλλά και των σημείων όπου παρουσιάζει αδυναμίες.

Στην ενότητα “Είδη βηματικών κινητήρων” εξετάζονται οι τρεις μεγάλες οικογένειες βηματικών κινητήρων. Ονομαστικά αυτές είναι οι “Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη”, οι “Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης” και οι “Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες”. Αυτές οι οικογένειες διαφέρουν κυρίως στο είδος του ρότορα και ως αποτέλεσμα και σε άλλα λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως η ευκρίνεια του βήματος, η ροπή συγκράτησης και κάποια ακόμη που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

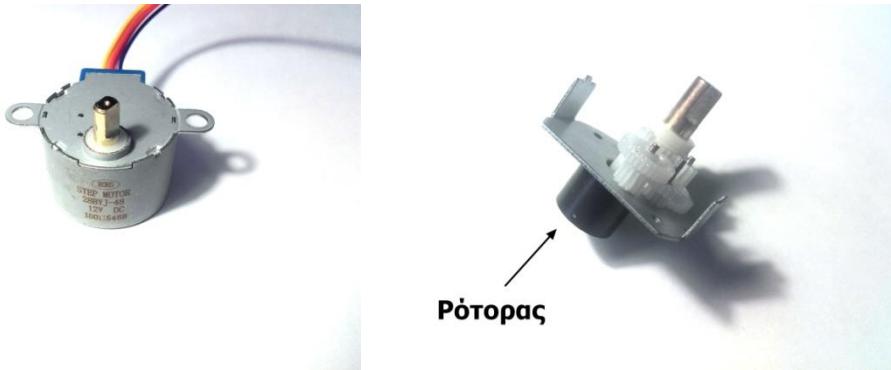
Στη δεύτερη ενότητα αυτού του μέρους μελετάται ένας τρόπος διαχωρισμού των διφασικών βηματικών κινητήρων με βάση τη διάταξη περιέλιξης των ηλεκτρομαγνητικών τους πηνίων, η οποία παίζει μεγάλο ρόλο στην τεχνική ελέγχου και την απόδοση.

Η επομένη ενότητα, ”Ο υβριδικός βηματικός κινητήρας”, αποτελεί μια πιο λεπτομερή εμβάθυνση των χαρακτηριστικών αυτής της οικογένειας, μιας και η κύρια μελέτη της εργασίας επικεντρώνεται σε έναν κινητήρα ο οποίος ανήκει στην συγκεκριμένη οικογένεια βηματικών κινητήρων.

Αναφέρονται επίσης τα κυρία χαρακτηριστικά και η σπουδαιότητα του προτύπου National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Σύμφωνα με αυτό, προσδιορίζονται συγκεκριμένες φόρμες σχεδίασης και διαστασιολόγησης βηματικών μηχανών με σκοπό την αύξηση της συμβατότητας μεταξύ εφαρμογών και κινητήρων. Το πρότυπο NEMA καθιστά την αναβάθμιση, επισκευή ή αντικατάσταση βηματικού κινητήρα ευκολότερη.

1. Types of stepper motors

1.1 Permanent magnet stepper motors

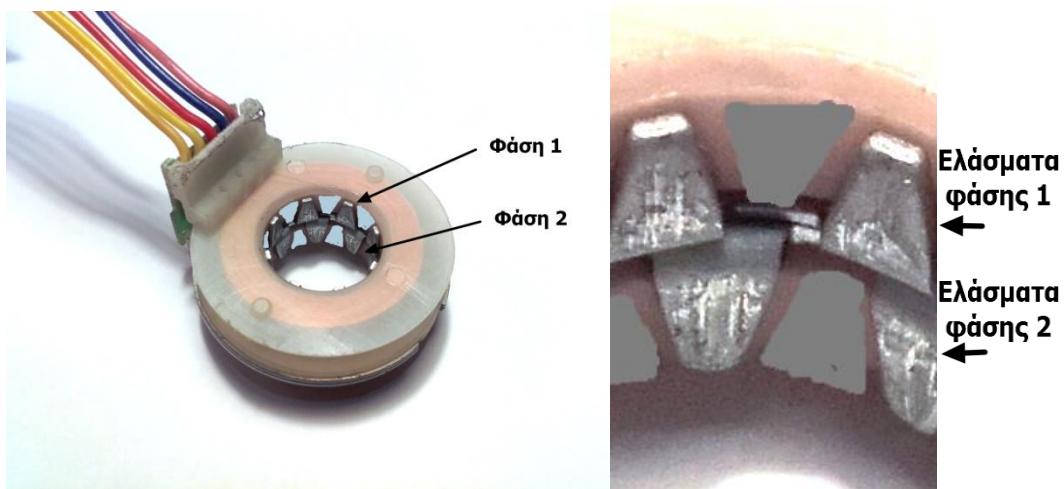


Μικρός βηματικός κινητήρας με εμπορική ονομασία 28BYJ-48. (Εικόνα 1.1)

Κιβώτιο ταχύτητας 28BYJ-48 (Εικ. 1.2)

Αποτελούν έναν φθηνό τύπο βηματικών κινητήρων χαμηλής ανάλυσης (γωνίες βήματος τυπικά 7,5 έως 15 μοίρες ή 48 έως 24 βήματα ανά περιστροφή) και χαμηλής ροπής συγκράτησης. Για τον λόγο αυτό, πολλές φορές συνδυάζονται με κιβώτια ταχυτήτων μεγάλων σχέσεων μετάδοσης (Εικ. 1.2). Έτσι, αυξάνονται παράλληλα η ανάλυση αλλά και η ροπή συγκράτησης.

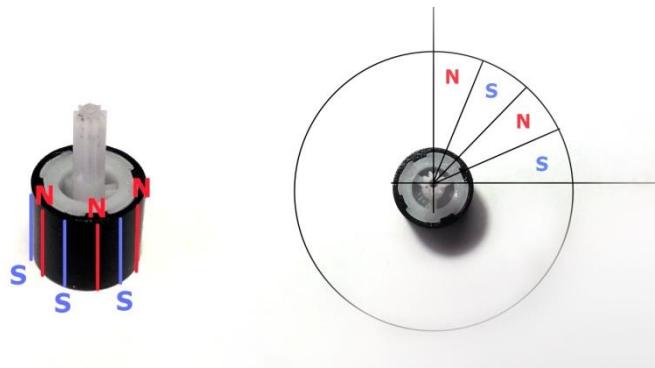
Χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες και έτσι εξαλείφεται η ανάγκη οδοντώσεων στο ρότορα, κάτι που παρατηρείται περισσότερο στους άλλους, πιο εξελιγμένους τύπους βηματικών κινητήρων. Η ροπή παράγεται μέσω περιοδικού μαγνητισμού του ρότορα. Ηλεκτρικοί παλμοί στα τυλίγματα δημιουργούν περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο αναγκάζει τους μόνιμους μαγνήτες του ρότορα να στοιχηθούν κάθε φορά παράλληλα στην κατεύθυνσή του.



Στάτης 28BYJ-48 (Εικ. 1.3)

Ο στάτης της συγκεκριμένης μηχανής είναι μονοπολικός. Αποτελείται από δύο φάσεις, μια στο επάνω και μια στο κάτω μέρος του, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3. Το πεδίο που δημιουργείται από τα τυλίγματα μαγνητίζει μεταλλικά ελάσματα που βρίσκονται στο κέντρο τα οποία είναι διατεταγμένα ώστε να δημιουργούν πεδίο όμοιο με εκείνο του ρότορα σε αριθμό και διάταξη πόλων. Αυτά τα ελάσματα είναι δεκαέξι ανά φάση, δηλαδή όσοι και οι πόλοι του ρότορα.

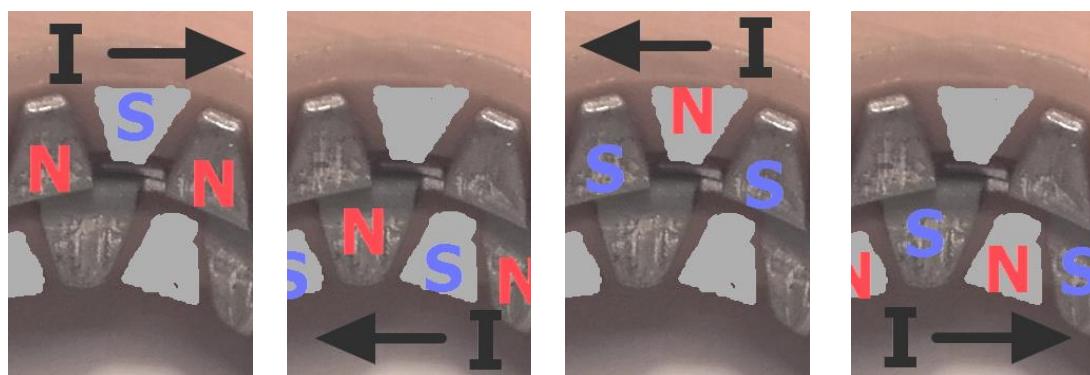
Στο βηματικό κινητήρα που εξετάζεται, ο δρομέας (ρότορας) είναι ένας μόνιμος μαγνήτης, στην περιφέρεια του οποίου εναλλάσσονται οι μαγνητικοί πόλοι (N-S-N-S...) δεκαέξι φορές (Εικ. 1.4).



Ρότορας 28BYJ-48 (Εικ. 1.4)

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα τέσσερα βήματα μιας περιόδου λειτουργίας του στάτη κατά την τεχνική κυματικής οδήγησης (Εικ. 1.5). Τα μισά από τα μεταλλικά ελάσματα κατασκευάζονται ως μέρος του περιβλήματος της μηχανής και για αυτόν τον λόγο έχουν σχεδιαστεί πάνω στις εικόνες με γκρι χρώμα.

Το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται ωρολογιακά. Ο νότιος μαγνητικός πόλος που σχηματίζεται στο αριστερό έλασμα της πρώτης φωτογραφίας σε κάθε βήμα προοδεύει προς τα δεξιά. Εφόσον αυτό είναι ένα τμήμα του εσωτερικού όπως μέρους του στάτορα, η κίνηση μεταφράζεται ως ωρολογιακή περιστροφή. Για αντιωρολογιακή περιστροφή, αρκεί να ακολουθηθούν τα ίδια βήματα σε αντίθετη σειρά.



Λειτουργία 28BYJ-48 σε κυματική οδήγηση (Εικ. 1.5)

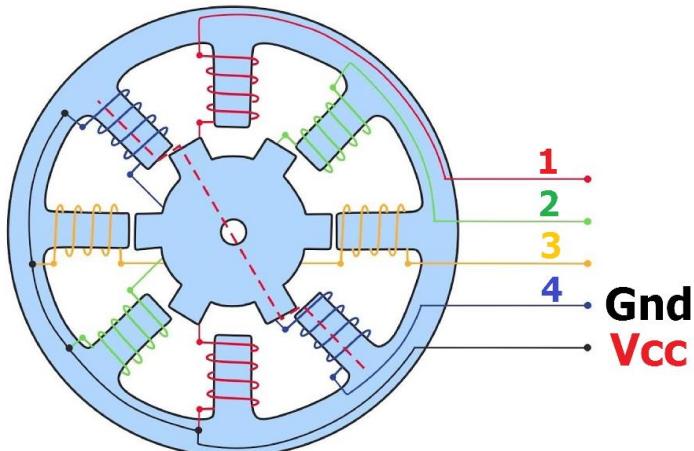
Αυτή η αλληλουχία βημάτων επιλέχθηκε για την κατανόηση της λειτουργίας. Στην πραγματικότητα όμως είναι πιο αποδοτικό να λειτουργούν σε όλα τα βήματα παράλληλα και οι δύο φάσεις. Έτσι το παραγόμενο πεδίο είναι πιο ισχυρό. Αυτός ο τρόπος οδήγησης αλλά και άλλοι θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.

Εφ' όσον σε τέσσερα βήματα το πεδίο προοδεύει κατά 2 από τα 16 ελάσματα η διαδικασία θα πρέπει να επαναληφθεί 8 φορές για έναν πλήρη κύκλο. Έτσι υπολογίζεται πως ο κινητήρας έχει 32 βήματα ή ευκρίνεια 11.25 μοίρες ανά περιστροφή όταν εφαρμόζεται μέθοδος οδήγησης ολόκληρων βημάτων. Το κιβώτιο ταχυτήτων που εμπεριέχεται στο σασί του κινητήρα έχει σχέση μετάδοσης 63.68395:1. Έτσι η τελική ευκρίνεια προκύπτει ότι είναι 0.17665 μοίρες ή 2037.89 βήματα ανά περιστροφή. Η παραπάνω ηλεκτρική μηχανή είναι η 28BYJ-48 (Εικ. 1.6).



Τομή κινητήρα 28BYJ-48 (Εικ. 1.6)

1.2 Variable reluctance stepper motors



Κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Εικ. 1.7)

Ο κινητήρας του σχήματος (Εικ. 1.7) έχει τέσσερις φάσεις και είναι μονοπολικός. Αυτός ο τύπος βηματικού κινητήρα αποτελείται από έναν κεντρικό κυλινδρικό άξονα με πολλαπλές οδοντωτές ανυψώσεις (πόλοι) σε ολόκληρη την περιφέρεια και στάτη με τυλίγματα όπως φαίνεται στην εικόνα 1.7. Οι ηλεκτρικοί παλμοί που εφαρμόζονται στις περιελίξεις του στάτη παράγουν εναλλάξ αλληλουχίες μαγνητικών ροών πάνω από τα δόντια του δρομέα δημιουργώντας ροπή.

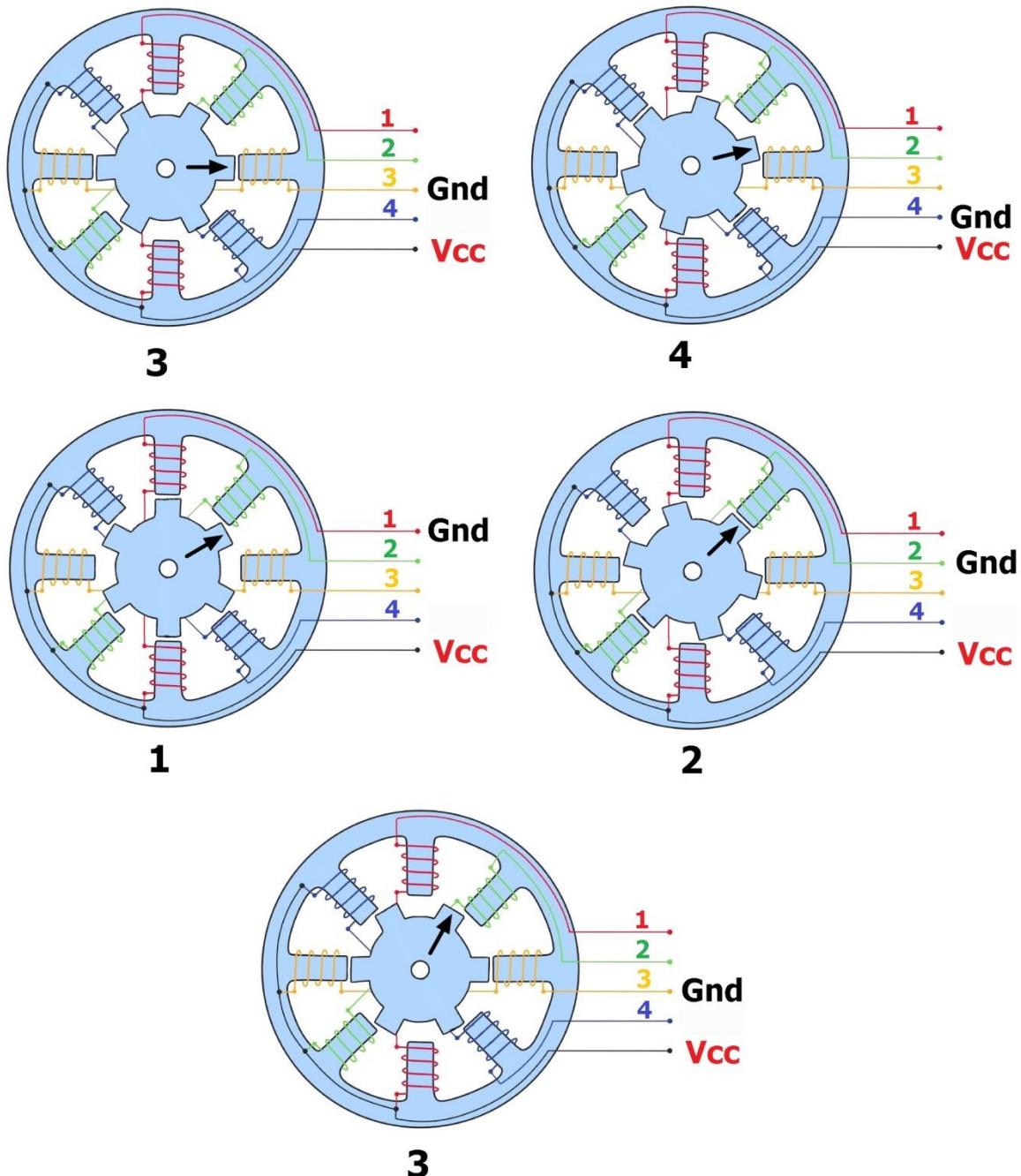
Οι αντικριστοί πόλοι του στάτη συνδέονται σε σειρά. Ο ρότορας έχει 6 δόντια. Όταν το πηνίο μιας φάσης διεγείρεται, τα πλησιέστερα δόντια του δρομέα ευθυγραμμίζονται κατά μήκος του άξονα της περιέλιξης της φάσης. Έτσι, ο ρότορας καταλαμβάνει τη θέση που δείχνει η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή (Εικ. 1.7).

Εδώ εξετάζεται μόνο η φάση 4 για να απλοποιηθεί η σύνδεση. Στη θέση που βρίσκεται η μηχανή (Εικ. 1.7) ο ρότορας είναι σε στοίχιση με την 3^η φάση. Η 4η φάση έχει ενεργοποιηθεί και ο ρότορας είναι έτοιμος να περιστραφεί αντιωρολογιακά ώστε να στοιχηθεί με αυτήν. Για ωρολογιακή κίνηση θα πρέπει να ενεργοποιηθεί η δεύτερη φάση αντί της 4ης.

Σε τέσσερα βήματα ο ρότορας προοδεύει κατά ένα έκτο μιας περιστροφής, άρα υπολογίζεται πως έχει ευκρίνεια 15 μοιρών. Δηλαδή μετά την ενεργοποίηση των φάσεων 4-1-2-3 σε σειρά, η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή του ρότορα (Εικ. 1.7) θα στοιχηθεί με τη φάση 3. Η κίνηση του ρότορα στον συγκεκριμένο κινητήρα είναι αντίθετη της φοράς περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στον στάτη.

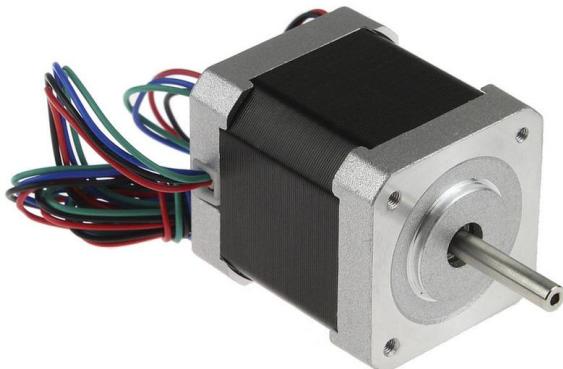
Με την ακολουθία 3,4,1,2,3 ολοκληρώνονται τα τέσσερα βήματα περιστροφής και ο δρομέας κινείται κατά 60 μοίρες αντίθετα της φοράς των δεικτών του ρολογιού (Εικ. 1.8). Για μία πλήρη περιστροφή του δρομέα απαιτούνται 24 βήματα. Διαφορετικές γωνίες βήματος μπορούν να επιτευχθούν επιλέγοντας διαφορετικούς συνδυασμούς του αριθμού των δοντιών του ρότορα και των πηνίων στο στάτη.

Η κίνηση φαίνεται πιο καθαρά στο παρακάτω σχήμα. Η ενεργή φάση συνδέεται κάθε φορά με τη γείωση και ο δρομέας στοιχίζεται παράλληλα με τους πόλους της. Στο τέλος της ακολουθίας, δηλαδή όταν η φάση 2 είναι ενεργή, το επόμενο βήμα ενεργοποιεί πάλι τη φάση 3 οδηγώντας το ρότορα σε στοίχιση παρόμοια με την αρχική αλλά παρόλα αυτά στραμμένη κατά 60 μοίρες αντιωρολογιακά.



Παράδειγμα οδήγησης – ακολουθία 3,4,1,2,3 (Εικ. 1.8)

1.3 Hybrid stepper motors



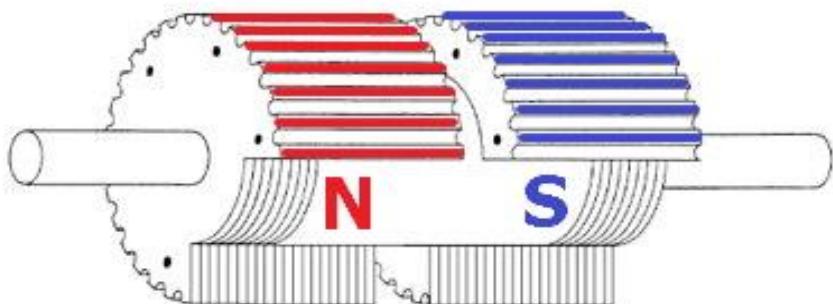
Υβριδικός βηματικός κινητήρας (Εικ. 1.9)

Όπως το δηλώνει και ο επιθετικός προσδιορισμός “υβριδικός”, ο συγκεκριμένος τύπος (Εικ. 1.9) συνδυάζει λειτουργικά χαρακτηριστικά των δυο προηγούμενων τύπων βηματικών κινητήρων με σκοπό να ενσωματώσει τα δυνατά τους σημεία. Στον πυρήνα του ρότορα βρίσκεται ισχυρός μαγνήτης νεοδυμίου, του οποίου το πεδίο οδηγείται σε συγκεκριμένες κατεύθυνσεις μέσω μεταλλικών προεξοχών. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις φάσεις προβάλλεται επίσης σε όμοια κατεύθυνση με αυτή του ρότορα, πάλι μέσω μεταλλικών προεξοχών. Κάθε φορά που μια φάση ενεργοποιείται, ο ρότορας παίρνει κατάλληλη θέση ώστε οι προεξοχές με αντίθετη πολικότητα να εφάπτονται και αυτές με όμοια πολικότητα να απομακρύνονται.

Οι βηματικοί κινητήρες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι ακριβότεροι από τους παραπάνω τύπους μόνιμου μαγνήτη και μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης λόγω των ακόλουθων χαρακτηριστικών:

- Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες έχουν βελτιωμένη ευκρίνεια βημάτων που κυμαίνεται από 3.6 έως 0.9 μοίρες ή 100 έως 400 βήματα ανά περιστροφή αντίστοιχα.
- Τα κενά ανάμεσα στο ρότορα και στις φάσεις είναι πολύ μικρά με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης .
- Το σύστημα πολλαπλών οδοντώσεων βοηθάει στον συντονισμό των μαγνητικών ροών που παράγονται από τις περιελίξεις του στάτη.
- Η μονοπολική κατασκευή του στάτη αυξάνει την πυκνότητα ισχύος του κινητήρα. Μεγαλύτερη ροπή μπορεί να επιτευχθεί για το ίδιο βάρος τυλιγμάτων.
- Οι γεωμετρίες που πρέπει να επιτευχθούν είναι πιο δύσκολες και απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα για την κατανόηση του ρότορα, του στάτη και της αρχής της λειτουργίας μιας τέτοιας ηλεκτρικής μηχανής.



Τομή ρότορα υβριδικού κινητήρα (Εικ. 1.10)

Παραπάνω φαίνεται ενδεικτικά μία τομή ενός ρότορα μηχανής της υβριδικής οικογένειας (Εικ. 1.10). Αυτός μπορεί να αποτελείται από παραπάνω από δύο πόλους, ανάλογα με την ισχύ και το μέγεθος της μηχανής.

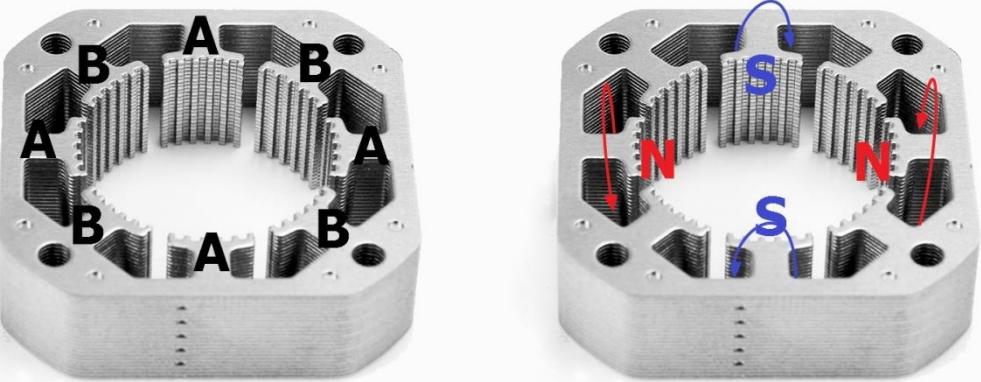
Γύρω από τον άξονα υπάρχει μαγνήτης μεγάλης πυκνότητας πεδίου, συνήθως τύπου κοβαλτίου [πηγή 9]. Στην περιφέρειά του μεταλλικό περίβλημα κατευθύνει τις μαγνητικές ροές όπως φαίνεται στην εικόνα 1.10. Τα τρία στοιχεία, άξονας, μαγνήτης κοβαλτίου και περίβλημα, συνδέονται μεταξύ τους με σφιχτή συναρμογή ή εποξική κόλλα. Συχνά χρησιμοποιείται σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στους πόλους του μεταλλικού περιβλήματος με σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσης των μαγνητικών ροών σε αυτούς.

Οι προεξοχές βόρειου και νότιου πόλου είναι τοποθετημένες έτσι ώστε οι κοιλάδες του ενός να βρίσκονται απέναντι στις κορυφές του άλλου. Ο λόγος για τον οποίο αυτή η διάταξη είναι σημαντική φαίνεται μελετώντας τη λειτουργία του στάτη.



Φωτογραφία ρότορα υβριδικού κινητήρα (Εικ. 1.11)

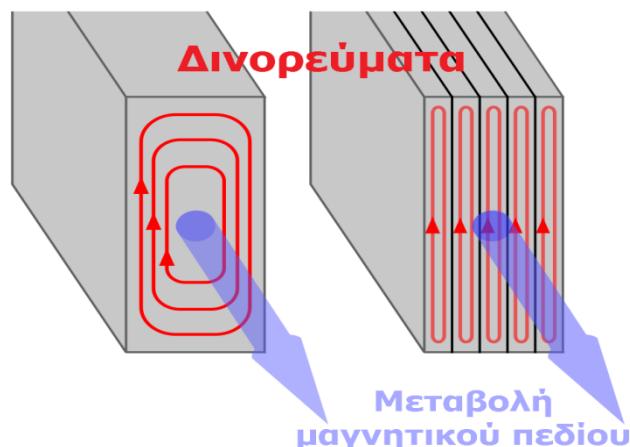
Στην εικόνα 1.11 απεικονίζεται ένας τέτοιος ρότορας. Οι πόλοι εναλλάσσονται πέντε φορές κατά το μήκος του, δηλαδή αποτελείται από τρεις μαγνήτες νεοδυμίου. Παρόλα αυτά η κατασκευή του είναι όμοια με αυτήν που προαναφέρθηκε. Ρότορες μεγαλύτερου μήκους έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας αλληλεπίδρασης τους με τον στάτη και γι' αυτό ανήκουν σε βηματικές μηχανές μεγαλύτερης ισχύος.



Στάτης υβριδικού κινητήρα (Εικ. 1.12)

Ο στάτης κατασκευάζεται από πολλά λεπτά μεταλλικά φύλλα στοιβαγμένα το ένα πάνω στο άλλο (Εικ. 1.12). Αυτά είναι εύκολο να παραχθούν με κατεργασίες αυτοματοποιημένης κοπής απότμησης/διάτρησης και δένονται μεταξύ τους με τα τυλίγματα. Κατά την επιφάνειά τους εγκοπές και εσοχές βοηθάνε τη σωστή τους στοίβαξη και αποτρέπουν την οριζόντια ολίσθηση [πηγή 1]. Αυτός ο τρόπος κατασκευής έχει τρία κύρια πλεονεκτήματα. Πρώτον, αποφεύγονται ακριβές και χρονοβόρες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Δεύτερον, το ύψος του στάτη είναι εύκολα ρυθμιζόμενο και ανάλογο με τον αριθμό των πλακιδίων από τα οποία αποτελείται. Έτσι, από μια παραγωγική διαδικασία μπορεί να προμηθευτεί η κατασκευή για στάτες διαφορετικών διαστάσεων.

Η τρίτη ιδιότητα που προσφέρει αυτή η μέθοδος κατασκευής είναι ότι βοηθάει στην μείωση του μεγέθους των παρασιτικών δινορευμάτων που επάγονται στον ρότορα λόγω των εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται κατά την λειτουργία του (Εικ. 1.13). Τα φύλλα του στάτη βάφονται με λεπτή στρώση μονωτικού υλικού. Έτσι, τα ρεύματα που επάγονται στον στάτη περιορίζονται σε στενότερους βρόχους μεγαλύτερης αντίστασης. Όσο η αντίσταση αυξάνεται, η τιμή των δινορευμάτων μειώνεται. Μείωση των παρασιτικών δινορευμάτων σημαίνει μείωση των απωλειών ενέργειας ως θερμότητα στον στάτη και αύξηση της απόδοσης. Η ίδια τεχνική κατασκευής χρησιμοποιείται και σε πυρήνες μετασχηματιστών εναλλασσόμενου ρεύματος όπου και πάλι στόχος είναι η μείωση των δινορευμάτων σε περιβάλλον εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων.



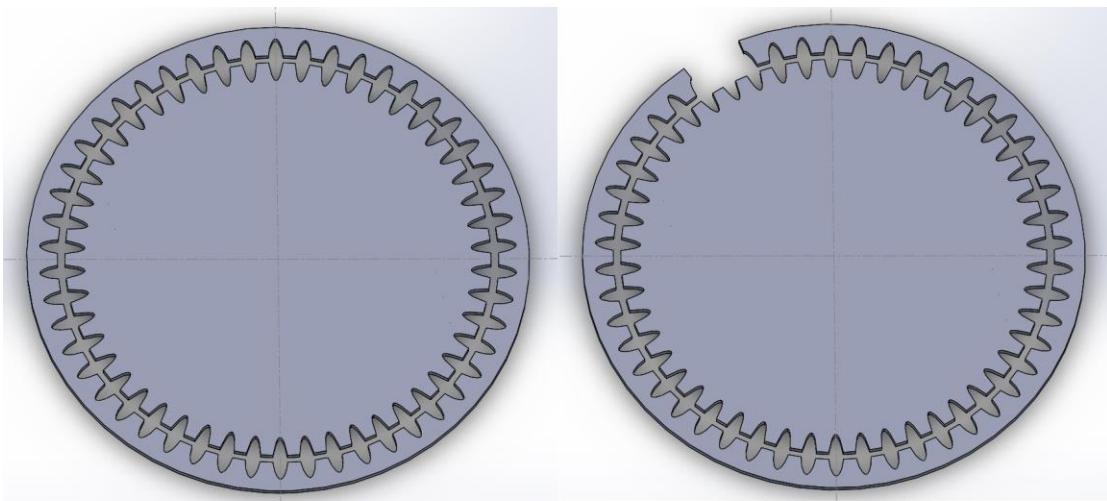
Δημιουργούμενα δινορεύματα σε μασίφ αγωγούς και μονωμένα πλακίδια (Εικ. 1.13)

Όταν ο ρότορας έχει 50 ακμές, ο στάτης έχει 48 χωρισμένες σε 8 ομάδες των 6 ακμών, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.12. Η φάση στην οποία ανήκει κάθε ομάδα εναλλάσσεται περιμετρικά. Έτσι, κάθε φάση αποτελείται από 4 τέτοιες ομάδες (Εικ. 1.12 φάση Α και Β).

Ως προς τον τρόπο τύλιξης των πηνίων κάθε φάσης, η επόμενη ομάδα είναι πάντα τυλιγμένη αντίθετα από την προηγούμενη. Έτσι, όταν ενεργοποιείται μια φάση, οι όμοια πολωμένες ομάδες βρίσκονται η μια απέναντι από την άλλη. Στο σχέδιο 1.12 φαίνονται οι φορές τύλιξης της φάσης Α αλλά και οι πόλοι που δημιουργούνται για ρεύμα ίδιας κατεύθυνσης. Για τη φάση Β εφαρμόζεται η ίδια τεχνική τύλιξης.

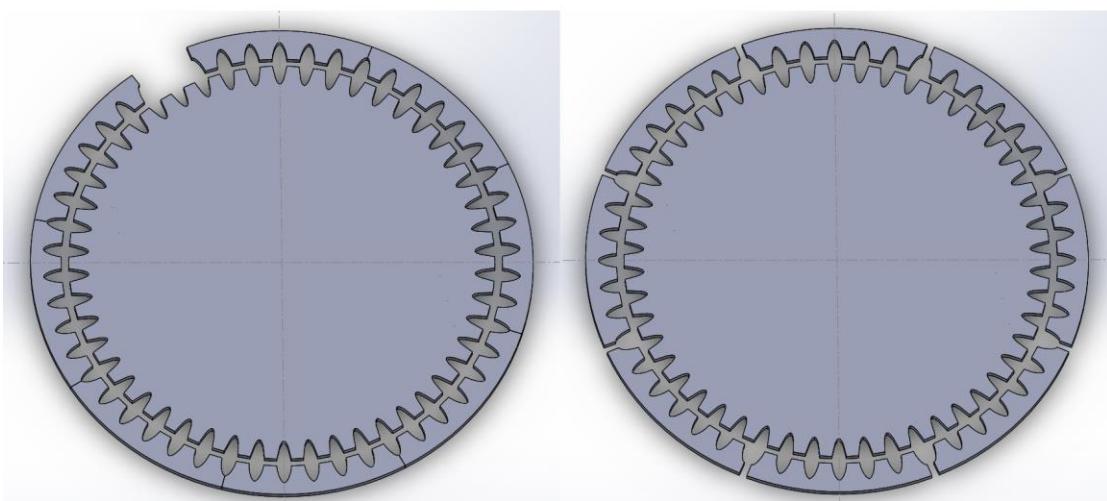
Εφόσον το εξωτερικό του ρότορα αποτελείται από 50 ακμές, μπορεί να υπολογιστεί το βήμα της μίας ακμής. Συγκεκριμένα είναι $(360 \text{ μοίρες}) / (50 \text{ ακμές})$ και προκύπτει 7.2 μοίρες.

Κάθε ομάδα είναι μετατοπισμένη από την προηγούμενη κατά 1/4 του βήματος μιας ακμής (1.8 μοίρες). Για 8 τέτοιες μετατοπίσεις, μια για κάθε ομάδα ακμών, δημιουργείται κενό μήκους δυο ακμών που είναι και ο λόγος για τον οποίο ο στάτης έχει 2 ακμές λιγότερες από τον ρότορα. Κατά αυτόν τον τρόπο συμπεραίνεται πως οι ομάδες μιας φάσης είναι μετατοπισμένες κατά 2/4 του βήματος (3.6 μοίρες) ανά μια. Συνεχίζοντας, οι απέναντι ομάδες μιας φάσης είναι μετατοπισμένες κατά ένα ολόκληρο βήμα ή 7.2 μοίρες για τον συγκεκριμένο κινητήρα. Αυτό σημαίνει πως όταν οι ακμές μιας ομάδας βρίσκονται απέναντι από ακμές ενός πόλου του ρότορα, η απέναντι ομάδα βρίσκεται επίσης απέναντι από ακμές, ενώ καθεμία από τις άλλες δυο ομάδες της φάσης βρίσκονται απέναντι σε κοιλάδες του ρότορα. Τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά φαίνονται καλύτερα στην εικόνα 1.14 που ακολουθεί.



1. Ισος αριθμός ακμών στάτη και ρότορα

2. Αφαίρεση δυο ακμών του στάτη



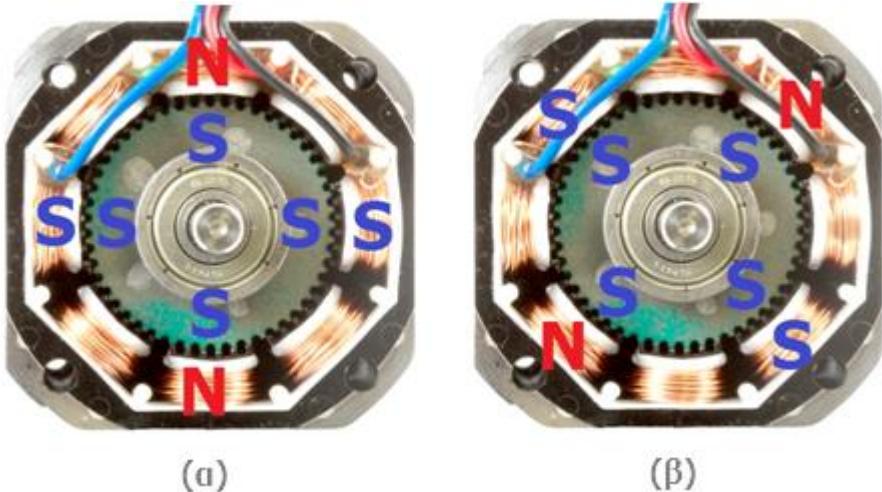
3. Διαχωρισμός εναπομεινάντων ακμών στάτη σε 8 ομάδες των 6

4. Ισος διαμοιρασμός του κενού που δημιουργήθηκε απο την αφαίρεση των δυο ακμών του στάτη

Τεχνική κατανόησης γεωμετρίας στάτη και ρότορα υβριδικού βηματικού κινητήρα (Εικ. 1.14)

Ακολουθώντας αυτά τα 4 βήματα η κατασκευή του στάτη γίνεται καλύτερα κατανοητή. Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι απέναντι ομάδες προέκυψε να έχουν όμοια στοίχιση ως προς τον ρότορα ενώ οι παραδίπλα ομάδες την αντίθετη. Να σημειωθεί πως εφόσον το κενό δυο ακμών διαμοιράζεται ίσα στις οχτώ θέσεις ανάμεσα στις ομάδες του στάτη, δημιουργούνται κενά με πάχος 1/4 του βήματος μιας ακμής.

Με βάση αυτές τις ιδιότητες στη συνέχεια εξηγείται η λειτουργία και τα βήματα για τον έλεγχο της μηχανής.



Λειτουργία υθριδικού κινητήρα (Εικ. 1.15)

Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνεται μία πλήρως συναρμολογημένη μηχανή (Εικ. 1.15). Άσπρη πλαστική μόνωση έχει τοποθετηθεί ανάμεσα στο στάτη και τα τυλίγματα με σκοπό την προστασία των εύθραυστων χάλκινων καλωδίων αλλά και την διευκόλυνση της τύλιξης τους.

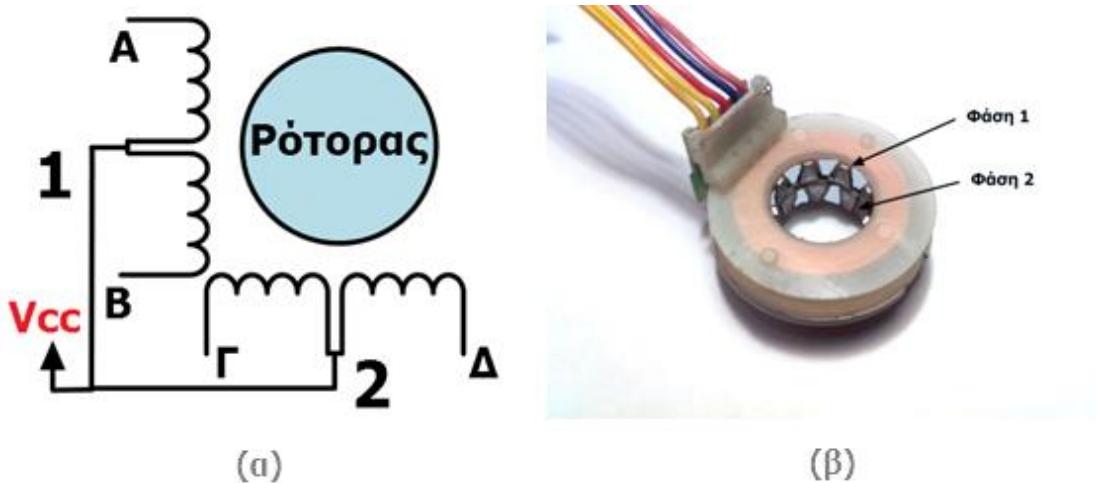
Στην εικόνα (α) η μηχανή βρίσκεται σε ευσταθή στατική ισορροπία. Στις περιοχές αντίθετων πόλων (πάνω και κάτω μέρος φωτογραφίας) τα δόντια ρότορα και στάτη εφάπτονται ενώ στις όμοια πολωμένες περιοχές έχουν μέγιστη απόσταση. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στον αντίθετο πόλο του ρότορα αφού τα δόντια του είναι τοποθετημένα κατάλληλα για αυτόν τον λόγο.

Στην εικόνα (β) η οδήγηση έχει προχωρήσει κατά ένα βήμα, η ενεργή φάση απενεργοποιήθηκε ενώ η ανενεργή ενεργοποιήθηκε και οι καινούριοι μαγνητικοί πόλοι δημιουργούνται στον στάτη όπως φαίνεται. Ο ρότορας τείνει να κινηθεί προς την κοντινότερη θέση ευσταθούς στατικής ισορροπίας. Για να υπάρχει όμοια στοίχιση των δοντιών με αυτήν της αριστερής φωτογραφίας, αρκεί ο ρότορας να κινηθεί δεξιόστροφα κατά 1.8 μοίρες.

Ισχύουν και εδώ όσα αναφέρθηκαν για τον κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, δηλαδή είναι πιο αποδοτικό ως προς κάποια χαρακτηριστικά να λειτουργούν σε όλα τα βήματα παράλληλα και οι δύο φάσεις. Σε επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι ροές του ρεύματος σε κάθε φάση για μια περίοδο με τεχνική ολόκληρων βημάτων. Ο ρότορας περιστρέφεται κατά 1.8 μοίρες σε κάθε βήμα. Αυτή είναι και η ευκρίνεια του συγκεκριμένου κινητήρα βάσει αυτής της μεθόδου οδήγησης.

2. Winding configurations

2.1 Unipolar configuration



Μονοπολική διάταξη (Εικ. 1.16)

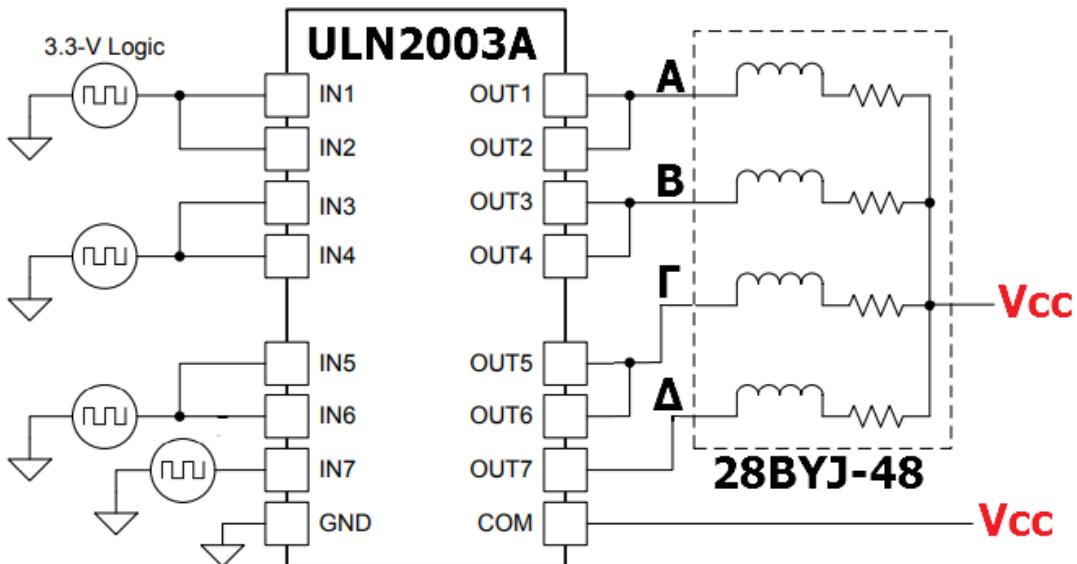
Ο κινητήρας μόνιμου μαγνήτη που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι μονοπολικός (Εικ. 1.16). Τα καλώδια που φαίνονται στην εικόνα (β) αντιστοιχίζονται ένα προς ένα με τα άκρα που φαίνονται στο σχήμα (α). Οι απολήξεις A,B στο αριστερό σχήμα ανήκουν στην φάση 1, ενώ οι Γ και Δ στη φάση 2.

Στην μέση κάθε τυλίγματος των φάσεων υπάρχει κοινός κόμβος ο οποίος συνδέεται στην συνεχή τάση (V_{cc}). Τα δύο μισά κάθε φάσης τυλίγονται με ίδιες φορές. Έτσι, η ενεργοποίηση καθενός από τα δύο μισά μιας φάσης αντιστοιχεί σε παραγωγή μαγνητικού πεδίου μιας κατεύθυνσης και της αντίθετής της [πηγή 5]. Αυτή η διάταξη απλουστεύει το κύκλωμα εφόσον οι μαγνητικοί πόλοι μιας φάσης μπορούν να αντιστραφούν χωρίς να είναι απαραίτητη η αντιστροφή της ροής του ρεύματος σε αυτήν.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεδομένης μιας φάσης, η κοινή διάταξη για κάθε περιέλιξη είναι η ακόλουθη: τρία άκρα ανά φάση, άρα έξι καλώδια για έναν κανονικό βηματικό κινητήρα δύο φάσεων. Συνήθως τα δυο άκρα που ανήκουν στην μέση των δύο φάσεων συνδέονται σε κοινό κόμβο εσωτερικά της μηχανής με αποτέλεσμα να προκύπτουν εξωτερικά 5 απολήξεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.16 (α).

Δεδομένου ότι είναι αρκετά εύκολο να λειτουργήσουν αυτοί οι βηματικοί κινητήρες, είναι συχνά πολύ δημοφιλείς στο ευρύ κοινό, σε όσους ασχολούνται για χόμπι και είναι συνήθως ο φθηνότερος τρόπος για την πραγματοποίηση ακριβών γωνιακών κινήσεων.

Για τον έλεγχο της μηχανής χρησιμοποιούνται απλά κυκλώματα. Οι απολήξεις A B Γ Δ συνδέονται μέσω τρανζίστορ στην γείωση. Οι βάσεις του τρανζίστορ συνδέονται σε μικροελεγκτή ο οποίος με κατάλληλο πρόγραμμα μπορεί να τα χειρίστε με βάση κάποια από τις τεχνικές οδήγησης.



ULN2003A ως οδηγός μονοπολικού κινητήρα (Εικ. 1.17)

Ένα σύνηθες ενσωματωμένο κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μονοπολικού κινητήρα είναι το ULN2003A της εταιρείας Texas Instruments (Εικ. 1.17). Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα της χρήσης του ως οδηγό του κινητήρα 28BYJ-48.

Το κύκλωμα περιλαμβάνει επτά NPN Darlington ζεύγη τρανζίστορ καθώς και flyback διόδους για το καθένα. Οι δίοδοι προστατεύουν το κύκλωμα από αυξήσεις στο ρεύμα που μπορούν να προκληθούν από το επαγγειακό φορτίο του κινητήρα και αυτό καθιστά το συγκεκριμένο κύκλωμα ιδανικό για αυτήν την εφαρμογή.

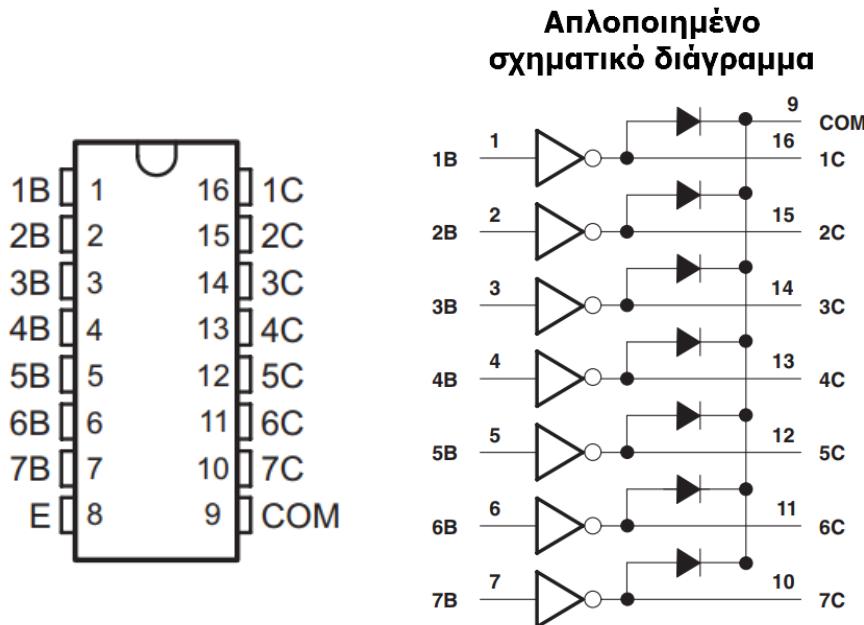
Οι βάσεις των 7 τρανζίστορ βρίσκονται στις απολήξεις IN1 με IN7 του κυκλώματος. Αντίστοιχα, οι συλλέκτες βρίσκονται στις απολήξεις OUT1 με OUT7. Οι επτά δίοδοι συνδέουν την απόληξη κάθε συλλέκτη με την τάση (COM). Οι εκπομποί όλων των τρανζίστορ συνδέονται στη γείωση (GND). Η τάση ελέγχου εφαρμόζεται στις βάσεις ενώ τα φορτία συνδέονται στους συλλέκτες.

Το συγκεκριμένο ενσωματωμένο κύκλωμα μπορεί να υποστηρίξει ρεύμα έως και 300mA ανά τρανζίστορ. Εναλλακτικά, δυο ή και περισσότερα τρανζίστορ μπορούν να συνδεθούν παράλληλα με σκοπό την αύξηση αυτού του ορίου όταν υπάρχει ανάγκη, όπως έχει γίνει στο σχήμα της εικόνας 1.17 για τις απολήξεις Α,Β και Γ της μηχανής.

Για την ενεργοποίηση της φάσης 1 τάση 3.3V θα πρέπει να εφαρμοσθεί στις απολήξεις IN1 και IN2 του ULN2003A, ενώ για την αντιστροφή της πολικότητας θα πρέπει να εφαρμοσθεί τάση 3.3V στις απολήξεις IN3 και IN4.

Ενώ το κύκλωμα οδήγησης για κινητήρες μονοπολικής διάταξης είναι απλό σε κατασκευή και χρήση, οι κινητήρες έχουν το εξής μειονέκτημα: σε κάθε βήμα, μόνο η μισή από την περιέλιξη κάθε φάσης μπορεί να είναι ενεργή. Έτσι τα μισά από τα τυλίγματα μένουν ανεκμετάλλευτα κατά τον χρόνο λειτουργίας της μηχανής, συνεπώς μειώνεται η πυκνότητα ισχύος της μηχανής.

Παρακάτω παρατίθεται σχηματικό διάγραμμα των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται το ενσωματωμένο κύκλωμα ULN2003A. Ο τρόπος αρίθμησης των απολήξεων ενσωματωμένων κυκλωμάτων γίνεται πάντα αριθμώντας ως πρώτη αυτήν που βρίσκεται πιο πάνω στην αριστερή μεριά του κυκλώματος και συνεχίζεται προς τα κάτω ακολουθώντας την περιφέρειά του (Εικ. 1.18). Το πάνω μέρος ενός ενσωματωμένου κυκλώματος είναι πάντα σημαδεμένο με μια εγκοπή ή μια προεξοχή.



Σχηματικό διάγραμμα ULN2003A (Εικ. 1.18)

Τυπικά, η συσκευή ULN2003A (Εικ. 1.18) οδηγεί περιφερειακά υψηλού ρεύματος ή υψηλής τάσης (ή και τα δύο) από μια μονάδα Microcontroller Unit(MCU) ή λογική συσκευή. Η εφαρμογή και χρήση της ULN2003A είναι αναγκαία όταν η εφαρμογή απαιτεί φορτία υψηλότερου ρεύματος από αυτό που μια λογική συσκευή μπορεί να παρέχει.

Αυτός ο σχεδιασμός για οδήγηση επαγωγικών φορτίων είναι μια κοινή εφαρμογής της ULN2003A. Τέτοια επαγωγικά φορτία περιλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, ηλεκτρονόμων, ηλεκτροκινητήρων συνεχούς ρεύματος, οθονών LED, λαμπτήρων πυρακτώσεως, θερμικών κεφαλών εκτύπωσης κ.α.

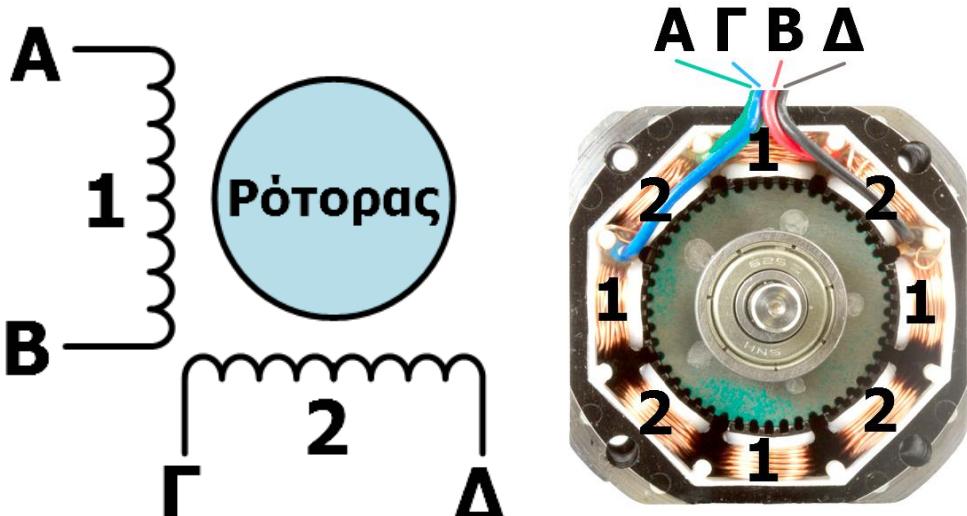
Στον πίνακα που ακολουθεί (Εικ. 1.19) παρουσιάζονται χαρακτηριστικές ηλεκτρικές ιδιότητες των τρανζίστορ από τα οποία απαρτίζεται το ενσωματωμένο κύκλωμα LM2003A. Από αυτές τις τιμές αξίζει να σημειωθεί η διαφορά δυναμικού εισόδου για ενεργοποίηση του τρανζίστορ ($V_{I(OH)}$). Η μέγιστη τιμή για ρεύμα 300mA είναι 3V που σημαίνει πως ένας ελεγκτής με λειτουργία λογικής 3.3V μπορεί να παράξει την αναγκαία τάση για να οδηγήσει το κύκλωμα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ		ULN2003A	ΜΟΝΑΔΕΣ
$V_{I(OH)}$	$V_{ce} = 2\text{ V}$	$I_c = 200\text{ mA}$	2.4	V
		$I_c = 250\text{ mA}$	2.7	
		$I_c = 300\text{ mA}$	3	
V_{OH}	$V_s = 50\text{ V}, I_o = 300\text{ mA}$		$V_s - 20$	mV
$V_{CE(sat)}$	$I_i = 250\text{ mA}, I_c = 100\text{ mA}$		1.1	V
	$I_i = 350\text{ mA}, I_c = 200\text{ mA}$		1.3	
	$I_i = 500\text{ mA}, I_c = 350\text{ mA}$		1.6	
I_{CEX}	$V_{ce} = 50\text{ V}, I_i = 0$		50	μA
V_F	$I_f = 350\text{ mA}$		2	V
$I_{I(OFF)}$	$V_{ce} = 50\text{ V}, I_c = 500\text{ }\mu\text{A}, T_a = 70\text{ oC}$		65	μA
I_I	$VI = 3.85\text{ V}$		1.35	mA
I_R	$VR = 50\text{ V}$		50	μA
C_i	$VI = 0, f = 1\text{ MHz}$		25	pF

Ηλεκτρικές ιδιότητες ULN2003A (Εικ. 1.19)

Πρόσθετα χαρακτηριστικά μπορούν να αναζητηθούν στο φύλλο δεδομένων του κυκλώματος που είναι ελεύθερα διαθέσιμο.

2.2 Bipolar configuration



Διπολική διάταξη τυλιγμάτων (Εικ. 1.20)

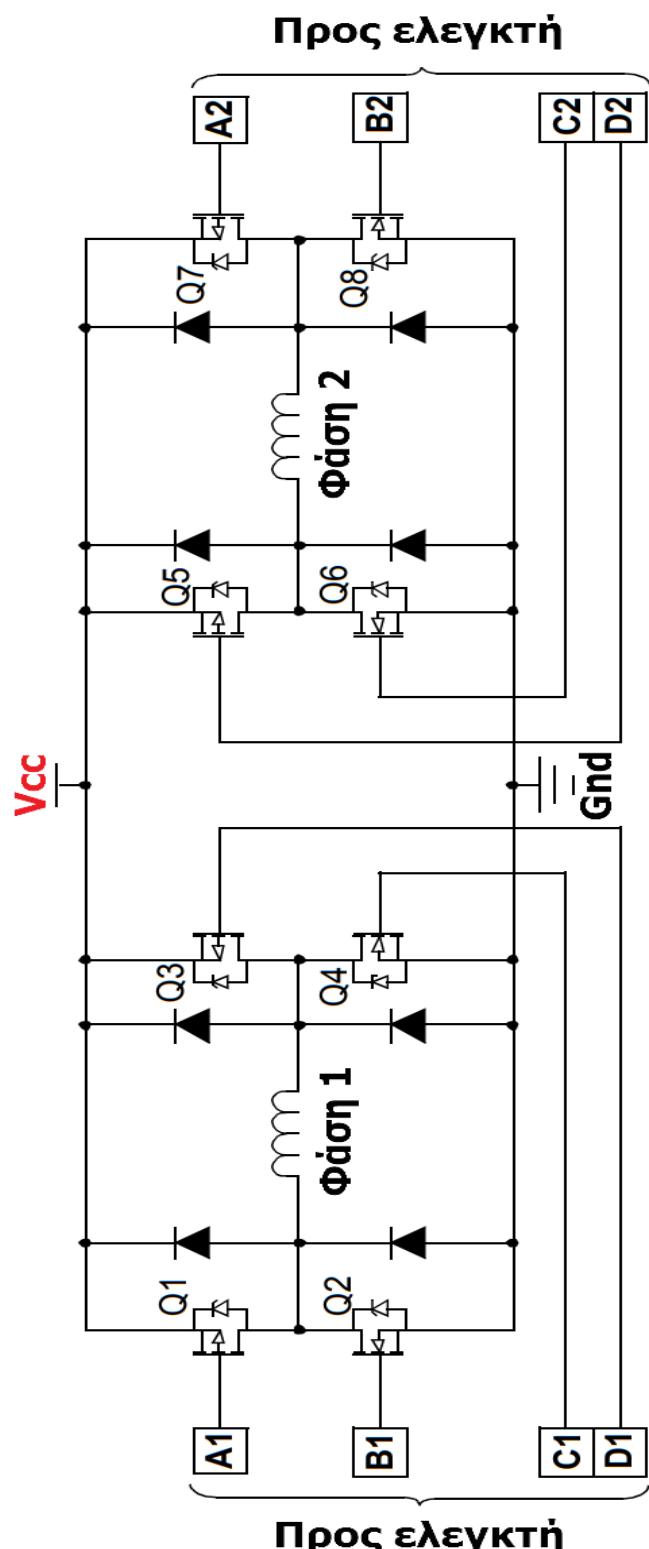
Ο υβριδικός κινητήρας που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα ανήκει στην οικογένεια διπολικής διάταξης (Εικ. 1.20). Τα τέσσερα καλώδια του στάτη ανήκουν ανά δύο σε διαφορετική φάση [πηγή 5].

Η κύρια διαφορά είναι ότι οι δυο φάσεις είναι εντελώς ανεξάρτητες. Δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των δυο τυλιγμάτων. Κάθε φορά που μια από τις φάσεις ενεργοποιείται όλο το μήκος της διαρρέεται από ρεύμα. Για αυτόν τον λόγο οι διπολικοί κινητήρες έχουν περίπου 30% περισσότερη ροπή από έναν ισοδύναμο μονοπολικό κινητήρα του ίδιου όγκου.

Για την αντιστροφή του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου μιας φάσης είναι απαραίτητη η αντιστροφή της ροής του ρεύματος σε αυτήν. Αυτή η διαδικασία είναι πολύπλοκη και απαιτεί τη χρήση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος που αντιστρέφει την πολικότητα μιας τάσης που εφαρμόζεται σε κάποιο φορτίο.

Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται αποκαλείται "H Bridge" και είναι μια διάταξη από τέσσερεις ημιαγωγούς διακόπτες ή τρανζίστορ. Εκτός από τη χρήση τους ως διατάξεις οδήγησης βηματικών κινητήρων, χρησιμοποιούνται επίσης και για την αλλαγή φοράς περιστροφής κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Αυτό το κύκλωμα έχει τη δυνατότητα να αντιστρέψει τη ροή του συνεχούς ρεύματος. Είναι απαραίτητη η χρήση μιας τέτοιας διάταξης ανά φάση, άρα δύο για έναν διφασικό κινητήρα διπολικής διάταξης τυλιγμάτων.

Η χρήση ενός τέτοιου οδηγού που χρησιμοποιεί δυο "H Bridge" διατάξεις είναι πολύ δύσκολη γιατί έχει μικρά περιθώρια λάθους στον συγχρονισμό των παλμών τάσης ελέγχου. Όπως εξετάζεται στη συνέχεια, μόνο κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου ανάμεσα στους παλμούς βρίσκονται ανάμεσα στη σωστή λειτουργία του ελεγκτή-οδηγού ή την βραχυκύκλωση της πηγής.



Κύκλωμα ελέγχου διπολικού κινητήρα (Εικ. 1.21)

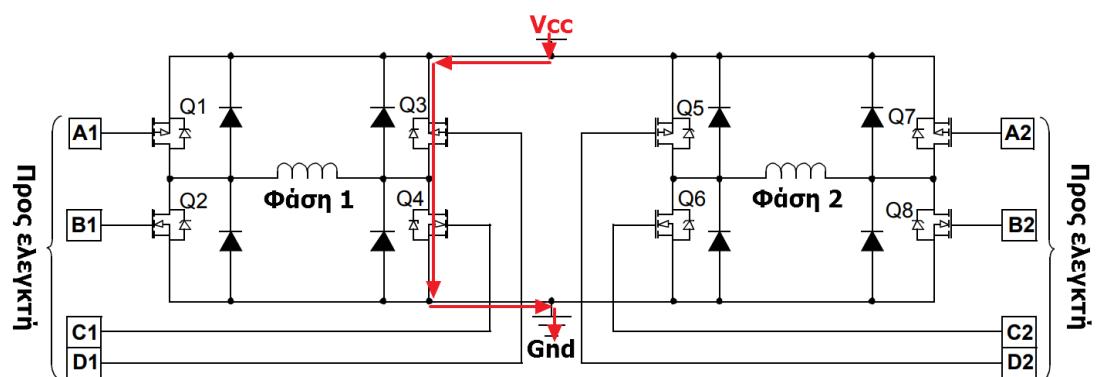
Στην εικόνα 1.21 τα MOSFETs Q1 με Q4 είναι συνδεδεμένα έτσι ώστε το κύκλωμα να σχηματίζει ένα “H”. Αυτή η διάταξη σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε ως “H Bridge”. Υπάρχουν δύο τέτοιες διατάξεις, μια για κάθε φάση του κινητήρα.

Στο κύκλωμα της εικόνας 1.21 τα τρανζίστορ Q1 με Q8 ανήκουν στην κατηγορία των Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(ή MOSFET). Σε αντίθεση με τα συμβατικά Bipolar Junction Transistors(BJT) που ενεργοποιούνται με βάση το ρεύμα στη βάση τους, τα MOSFET ενεργοποιούνται βάση της τάσης που δέχονται στη μεσαία τους απόληξη - Gate. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η παρουσία πολύ μεγαλύτερης αντίστασης που εμφανίζουν σε μη ενεργή κατάσταση. Ως μειονέκτημα η ενίσχυση που προσφέρουν τα MOSFETs είναι υποδεέστερη από αυτή των BJTs αλλά αυτό δεν είναι σημαντικό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Σε κάθε ημιαγωγικό διακόπτη (MOSFET) συνδέεται αντιπαράλληλα μία δίοδος ελεύθερης ροής (καλείται Freewheeling Diode ή Flyback Diode) για να παρέχει τη δυνατότητα επιστροφής του ρεύματος (όταν αυτό αλλάζει κατεύθυνση - αρνητική τιμή ρεύματος) κατά την ανάστροφη πόλωση του διακόπτη. Ταυτόχρονα, εμποδίζεται η απότομη μεταβολή του ρεύματος κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης ροής του, αποφεύγοντας έτσι τον κίνδυνο εμφάνισης επαγωγικών υπερτάσεων στις διατάξεις του κυκλώματος.

Οι απολήξεις A1, B1, C1 και D1 συνδέουν τις πύλες (Gates) των τρανζίστορ Q1, Q2, Q3 και Q4 με τον ελεγκτή. Οι απολήξεις A2, B2, C2 και D2 συνδέουν τις πύλες των τρανζίστορ Q5, Q6, Q7 και Q8 με τον ελεγκτή. Ο ελεγκτής παρέχει ακριβείς παλμούς τάσης στις βάσεις των τρανζίστορ και είναι υπεύθυνος για τη σωστή λειτουργία του κινητήρα ως προς τα βήματα της μεθόδου με την οποία οδηγείται. Ας παρατηρηθεί ότι η ενεργοποίηση των τρανζίστορ Q1 και Q4 προμηθεύει τη φάση 1 με ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης από ότι η ενεργοποίηση των τρανζίστορ Q2 και Q3.

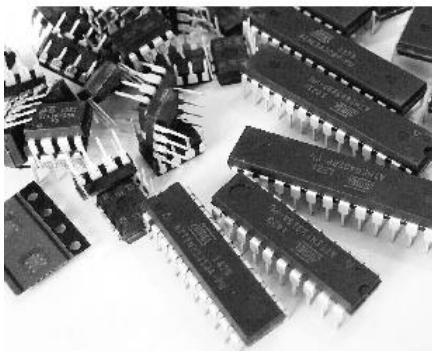
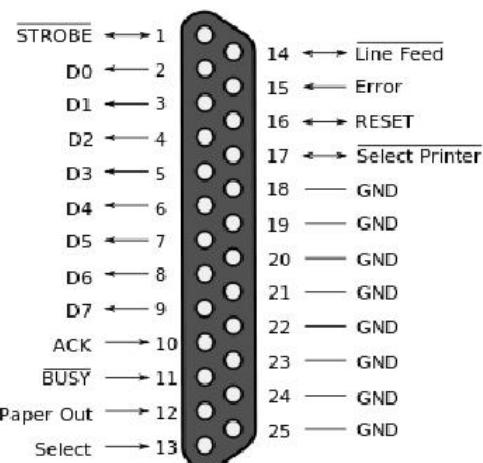
Ο κίνδυνος ενός τέτοιου κυκλώματος είναι πως βασίζεται στην ακρίβεια και αξιοπιστία του ελεγκτή για την αποφυγή βραχυκύκλωσης της πηγής. Η ταυτόχρονη ενεργοποίηση οποιωνδήποτε από τα ζεύγη Q1-Q2, Q3-Q4, Q5-Q6 ή Q7-Q8 των τρανζίστορ, βραχυκυκλώνει την τάση με την γείωση μέσω αγωγού μικρής αντίστασης (εικόνα 1.22). Αυτό έχει ως συνέπεια την διαρροή των ενεργών τρανζίστορ και των σε σειρά αγωγών από υψηλό ρεύμα και συνεπώς την πιθανή καταστροφή τους. Η χρήση δευτερευόντων κυκλωμάτων εντοπισμού βραχυκύκλωσης ή περιοριστών ρεύματος είναι πολύ συχνή όσον αφορά αυτά τα κυκλώματα. Μια συχνή επίσης λύση είναι η ενσωμάτωση λογικών διατάξεων στα κυκλώματα οδήγησης που αποτρέπουν την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των επίμαχων τρανζίστορ.



Πραγματική φορά ρεύματος για βραχυκύκλωση μέσω τρανζίστορ Q3-Q4 (Εικ. 1.22)

Ο κατάλληλος ελεγκτής μπορεί να επιλεχθεί μέσα από μια μεγάλη ποικιλία υπολογιστών και μικροελεγκτών. Αρχικά, μια παράλληλη θύρα ενός ιδιωτικού ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορεί να παράξει ακριβή σήματα βασισμένα σε λογική TTL. Οι ακροδέκτες εξόδου μπορούν να παρέχουν είτε υψηλή τάση TTL για λογικό 1 (μεταξύ + 2.4v και + 5.0v) είτε χαμηλή TTL για λογικό 0 (μεταξύ 0v και + 0.8v). Επιπλέον, η παράλληλη θύρα διαθέτει και εξόδους συμβατές με τη χρήση διατάξεων διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM) για τον περαιτέρω έλεγχο του επιπέδου της τάσης, κάτι που καθιστά τη μέθοδο συμβατή και για οδήγηση μικροβημάτων. Αρκεί μόνο να γραφτεί κατάλληλο πρόγραμμα με βάση την πλατφόρμα που θα χρησιμοποιηθεί.

Πέρα από τα παραπάνω υπολογιστικά συστήματα, μικροελεγκτές όπως αυτοί της εταιρίας ATMEL ή MICROCHIP μπορούν να παράξουν τα ίδια σήματα TTL λογικής, είναι πιο φθηνοί, πολύ μικρότεροι σε μέγεθος, αναλώσιμοι και πολλοί από αυτούς διαθέτουν επίσης λειτουργίες PWM. Το μόνο μειονέκτημα είναι πως χρειάζονται ειδικά εργαλεία για τον προγραμματισμό τους και για την αποθήκευση πηγαίου κώδικα στην εσωτερική τους μνήμη. Επίσης, η μνήμη τους είναι κατά πολύ μικρότερη αλλά κατά τα άλλα αρκετή για αυτόν τον σκοπό.



μικροελεγκτές AVR

(RESET/dW) PA2	1	VCC
(RXD) PD0	2	PD7 (UCSK/SCL/PCINT7)
(TXD) PD1	3	PD6 (MISO/DO/PCINT6)
(XTAL2) PA1	4	PD5 (MOSI/DI/SDA/PCINT5)
(XTAL1) PA0	5	PD4 (OC1B/PCINT4)
(CKOUT/XCK/INT0) PD2	6	PD3 (OC1A/PCINT3)
(INT1) PD3	7	PD2 (OC0A/PCINT2)
(T0) PD4	8	PD1 (AIN1/PCINT1)
(OC0B/T1) PD5	9	PD0 (AIN0/PCINT0)
GND	10	PD6 (ICP)
	11	
	12	
	13	
	14	
	15	
	16	
	17	
	18	
	19	
	20	

Παραδείγματα λογικών μονάδων (Εικ. 1.23)

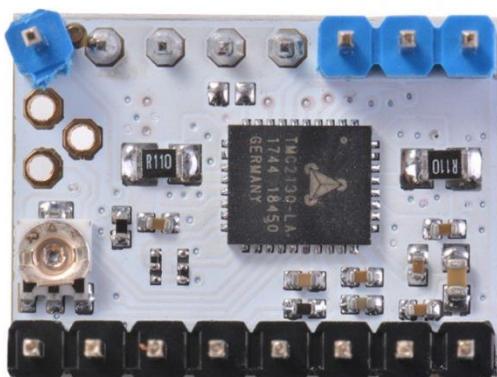
Integrated driver circuits

Η πιο διαδεδομένη πρακτική που ακολουθείται για την οδήγηση υβριδικών βηματικών κινητήρων διπολικής διάταξης είναι η χρήση κυκλωμάτων σχεδιασμένων ειδικά για τον έλεγχό τους.

Αυτά τα κυκλώματα συνήθως ενσωματώνουν μια διάταξη "H Bridge" με έναν μικροελεγκτή. Η διευκόλυνση που προσφέρουν είναι πως απαιτούν μόνο δυο λογικά σήματα για την ολοκληρωμένη τους οδήγηση. Ένα λογικό σήμα (0 ή 1) για την δήλωση της φοράς περιστροφής (ωρολογιακά ή αντίθετα) και ένα λογικό σήμα για την δήλωση πραγματοποίησης ενός βήματος (ένας τραπεζοειδής παλμός 0-1-0 ισοδυναμεί με πρόοδο ενός βήματος). Παραδειγματικά, πραγματοποίηση κίνησης με σταθερή ταχύτητα μπορεί να επιτευχθεί με την τροφοδότηση τραπεζοειδούς σήματος σταθερής περιόδου στην είσοδο δήλωση πραγματοποίησης βημάτων του οδηγού.

Πολλές φορές τέτοια ολοκληρωμένα κυκλώματα μπορεί να προσφέρουν επιπλέον ευκολίες για την οδήγηση. Αρχικά, τα περισσότερα προσφέρουν δυνατότητα επιλογής τεχνικής οδήγησης (κυματική οδήγηση, ολοκλήρων βημάτων, μικροβημάτων κτλ.). Επίσης έχουν τη δυνατότητα να προμηθεύουν τις φάσεις του κινητήρα με τάσεις πολύ μεγαλύτερες της ονομαστικής του κινητήρα ενώ παράλληλα περιορίζουν το ρεύμα της φάσης στα ονομαστικά όρια. Με αυτήν την τεχνική το ρεύμα στις φάσεις μπορεί να μεταβληθεί γρηγορότερα και συνεπώς ο κινητήρας έχει καλύτερη ανταπόκριση σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας.

Σήμερα, οι πιο εξελιγμένοι οδηγοί τέτοιου τύπου προσφέρουν παραπάνω δυνατότητες όπως την μείωση του χαρακτηριστικού ακουστικού θορύβου που συνήθως συνοδεύει τη λειτουργία ενός βηματικού κινητήρα. Η ανάλυση μικροβημάτων που προσφέρουν μπορεί να φτάσει τα 256 μικροβήματα ανά ένα κυματικό βήμα. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της αστοχίας του συγχρονισμού του κινητήρα με την εφαρμογή τεχνικών παρακολούθησης και ανάλυσης της επαγόμενης από τον ρότορα τάσης στα τυλίγματα. Κάποια μοντέλα εφαρμόζουν αλγορίθμους για την εξοικονόμηση ενέργειας και πολλά άλλα τα οποία δεν θα αναφερθούν. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στο φύλλο δεδομένων ενός από τα πιο σύγχρονα κυκλώματα οδήγησης, του TMC2130 (Εικ. 1.24).

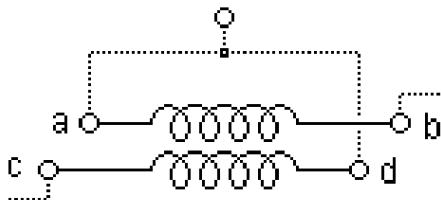


TMC2130 - Σύγχρονο κύκλωμα οδήγησης διπολικών βηματικών κινητήρων (Εικ. 1.24)

2.3 Bifilar windings

Ο όρος διμερείς σημαίνει κυριολεκτικά "δύο μέρη". Κινητήρες με διμερείς περιελίξεις είναι πανομοιότυποι στο ρότορα και στον στάτη με διπολικούς κινητήρες υπό μία εξαίρεση - κάθε περιέλιξη είναι αποτελούμενη από δύο καλώδια που τυλίγονται παράλληλα μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, οι κοινοί διμερείς κινητήρες έχουν οκτώ απολήξεις αντί των τεσσάρων ενός παρόμοιου διπολικού κινητήρα. Αυτές πολλές φόρες ενώνονται εσωτερικά ανά δύο με αποτέλεσμα να έχουν πάλι τέσσερα εξωτερικά καλώδια [πηγή 5].

Οι συγκεκριμένοι κινητήρες δουλεύουν ακριβώς όπως διπολικοί ή μονοπολικοί κινητήρες. Για να χρησιμοποιηθεί ένας διμερής κινητήρας ως μονοπολικός, τα δύο σύρματα από κάθε περιέλιξη συνδέονται σε σειρά και το σημείο σύνδεσης χρησιμοποιείται ως κοινός κόμβος. Η διαμόρφωση της σύνδεσης μονοπολικής περιέλιξης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 1.25α).



Διμερές τύλιγμα μονοπολικού κινητήρα (Εικ. 1. 25α)

Για να χρησιμοποιηθεί ένας διμερής κινητήρας ως διπολικός, τα δύο καλώδια κάθε περιέλιξης συνδέονται είτε παράλληλα είτε σε σειρά. Το τύλιγμα στο παρακάτω σχήμα δείχνει την παράλληλη σύνδεση (Εικ. 1.25β). Η παράλληλη σύνδεση επιτρέπει την λειτουργία της μηχανής σε υψηλότερες τιμές ρεύματος, ενώ η σύνδεση σε σειρά επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλότερες τάσεις. Το υψηλότερο ρεύμα αυξάνει την ισχύ και την ροπή του κινητήρα ενώ οι μεγάλες τάσεις εξασφαλίζουν ταχύτερη αλλαγή του ρεύματος στα τυλίγματα, δηλαδή μειώνουν το χρόνο ανταπόκρισης του κινητήρα.



Διμερές τύλιγμα διπολικού κινητήρα (Εικ. 1.25β)

Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί διπολικός υβριδικός βηματικός κινητήρας με διμερή τυλίγματα όπως του παραπάνω σχήματος.

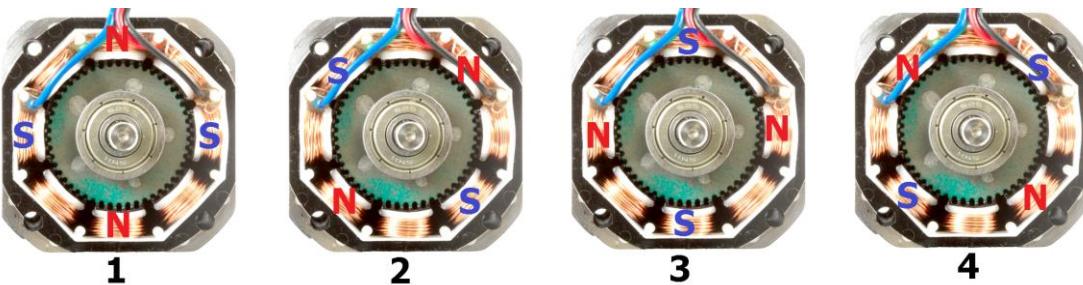
3. Stepping motor driving techniques

3.1 Wave drive

Ο πιο απλός και λιγότερο απαιτητικός ενεργειακά τρόπος για να οδηγηθεί μια βηματική μηχανή είναι η μέθοδος της κυματικής οδήγησης. Ταυτόχρονα, η μέθοδος βοηθάει στην κατανόηση της λειτουργίας του κινητήρα.

Κατά τη μέθοδο αυτή μόνο μια από τις φάσεις του κινητήρα ενεργοποιείται κάθε στιγμή. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η μελέτη της λειτουργίας με την συγκεκριμένη οδήγηση γίνεται πιο εύκολη. Κατά τα άλλα, εφόσον μόνο τα μισά τυλίγματα χρησιμοποιούνται σε κάθε χρονική στιγμή, η μηχανή δεν φτάνει ποτέ τις μέγιστες δυνατότητές της σε ισχύ η ροπή. Η οδήγηση αυτή μπορεί να επιλεγεί μόνο όταν οι απώλειες ισχύος που την συνοδεύουν δεν είναι υψηλές ώστε να μειώσουν την απόδοση του κινητήρα κάτω από τις απαιτήσεις της εφαρμογής για την οποία χρησιμοποιείται.

Στο παρακάτω παράδειγμα (Εικ. 1.26) φαίνονται ενδεικτικά τα βήματα για κυματική οδήγηση πάνω στον υβριδικό κινητήρα. Όπως και η μέθοδος ολόκληρων βημάτων, έτσι και αυτή αποτελείται από τέσσερα βήματα ανά περίοδο, δηλαδή οι δυο μέθοδοι αποδίδουν την ίδια ευκρίνεια.



	BHMA 1	BHMA 2	BHMA 3	BHMA 4
ΦΑΣΗ A	+I	0	-I	0
ΦΑΣΗ B	0	+I	0	-I

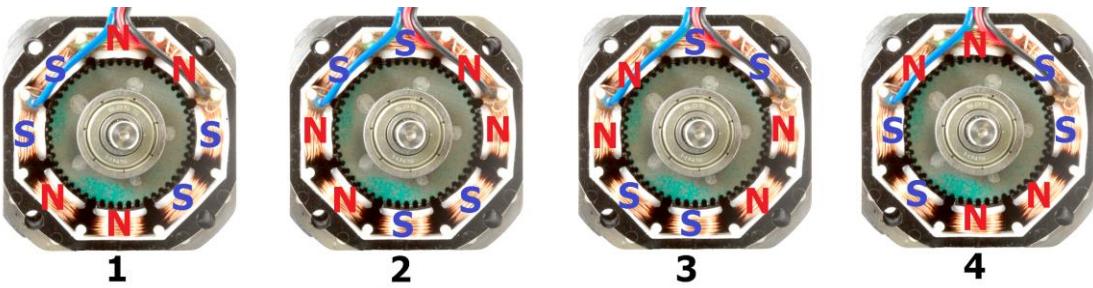
Απεικόνιση χαρακτηριστικών κυματικής οδήγησης (Εικ. 1.26)

Αυτή η οδήγηση δεν αναφέρεται ούτε και εφαρμόζεται συχνά. Συνήθως παραμελείται λόγω του ότι έχει την ίδια ανάλυση με την τεχνική ολόκληρων βημάτων η οποία όμως αποφέρει υψηλότερες επιδόσεις.

Είναι σημαντικό να γίνει ξεκάθαρο πως αν και το μαγνητικό πεδίο εκτελεί μια πλήρη περιστροφή κατά τα τέσσερα παραπάνω βήματα, ο ρότορας κινείται μόνο 7.2 μοίρες, ή 1.8 μοίρες για κάθε βήμα. Αυτό εξηγείται σε προηγούμενη ενότητα και φαίνεται πιο καθαρά στην λειτουργία του κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης στην εικόνα 1.8.

3.2 Whole step drive

Αυτή η οδήγηση παρέχει πολύ μεγαλύτερη ισχύ και ροπή, επειδή και οι δυο φάσεις είναι ενεργές σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή. Η ανάλυση του κινητήρα και πάλι δεν βελτιώνεται και είναι όμοια με αυτήν της προηγούμενης κυματικής οδήγησης. Η μια περίοδος της οδήγησης αποτελείται από τέσσερα βήματα όπως φαίνονται στην εικόνα 1.27. Ωστόσο, η μέθοδος αποτελεί μια άριστη επιλογή όταν ο κύριος σκοπός είναι η εκμετάλλευση των μέγιστων δυνατοτήτων του κινητήρα όσον αφορά την ισχύ του.



	BHMA 1	BHMA 2	BHMA 3	BHMA 4
ΦΑΣΗ Α	+I	-I	-I	+I
ΦΑΣΗ Β	+I	+I	-I	-I

Απεικόνιση χαρακτηριστικών οδήγησης ολόκληρων βημάτων (Εικ. 1.27)

Εφόσον το μαγνητικό κύκλωμα δεν βρίσκεται σε μαγνητικό κορεσμό, τροφοδοτώντας ταυτόχρονα δύο φάσεις του κινητήρα δημιουργείται μια καμπύλη ροπής σε σχέση με τη θέση που είναι το άθροισμα των καμπυλών ροπής και θέσης για τις δύο φάσεις του μοτέρ που ενεργοποιούνται μεμονωμένα. Το διάγραμμα κάθε φάσης και υπό ιδανικές συνθήκες είναι ημιτονοειδές. Ένα διάγραμμα ροπής - θέσης έχει διαφορά φάσης S από αυτό επόμενου βήματος, όπου S αντιπροσωπεύει γωνία ενός βήματος σε ακτίνια. Στο γράφημα που ακολουθεί (Εικ. 1.28) φαίνονται τα διαγράμματα ροπής - θέσης του κινητήρα για τις δύο φάσεις καθώς και το άθροισμά τους. Η συνισταμένη ροπή των δυο παρουσιάζει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή, όπως και ήταν αναμενόμενο. Οι καμπύλες ροπής αναλύονται περισσότερο σε επόμενη ενότητα.



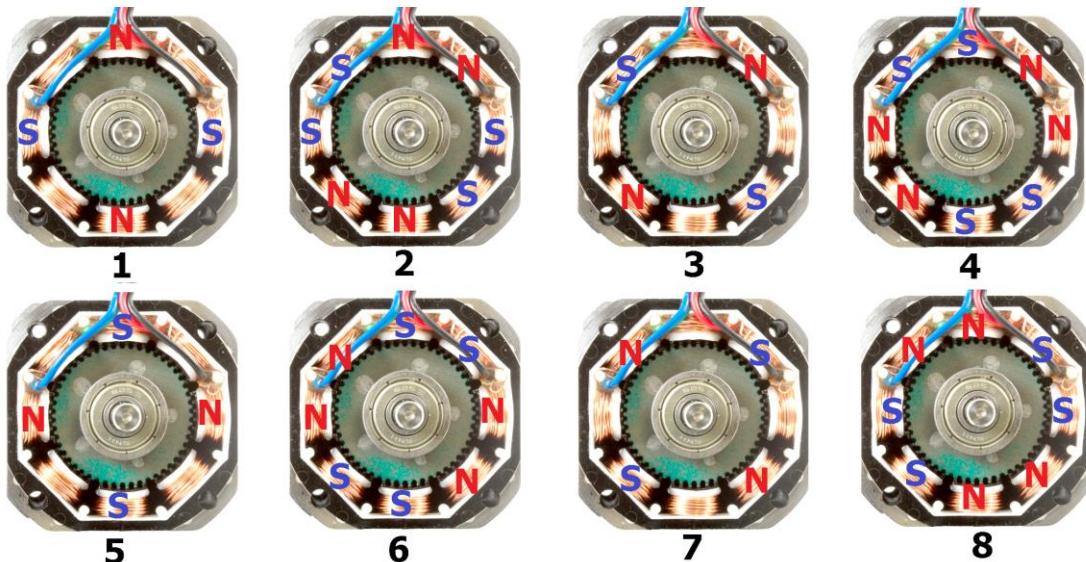
Διαγράμματα ροπής-θέσης δύο ενεργοποιημένων φάσεων (Εικ. 1.28)

3.3 Half step drive

Για την αύξηση της ανάλυσης του βηματικού κινητήρα χρησιμοποιούμε την οδήγηση μισών βημάτων. Αυτή η λειτουργία είναι στην πραγματικότητα ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων τεχνικών οδήγησης.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.29, ένα ενεργό πηνίο ακολουθείται από δύο ενεργά πηνία και στη συνέχεια πάλι ένα ενεργό πηνίο ακολουθείται από δύο και ούτω καθεξής. Έτσι με αυτόν τον τρόπο έχουμε δυο φορές περισσότερα βήματα ανά περίοδο και άρα διπλάσια ανάλυση με την ίδια κατασκευή. Ο ρότορας περιστρέφεται κατά 7.2 μοίρες σε μια πλήρη περίοδο, δηλαδή σε 8 βήματα. Έτσι η ανάλυση είναι $7.2/8=0.9$ μοίρες ανά βήμα.

Δυστυχώς, εφόσον σε κάποια βήματα μόνο μια από τις δύο φάσεις του στάτη είναι ενεργή, η μέγιστη ροπή που μπορεί να ασκήσει ο κινητήρας μειώνεται όταν η οδήγηση βρίσκεται σε ένα από αυτά τα βήματα.

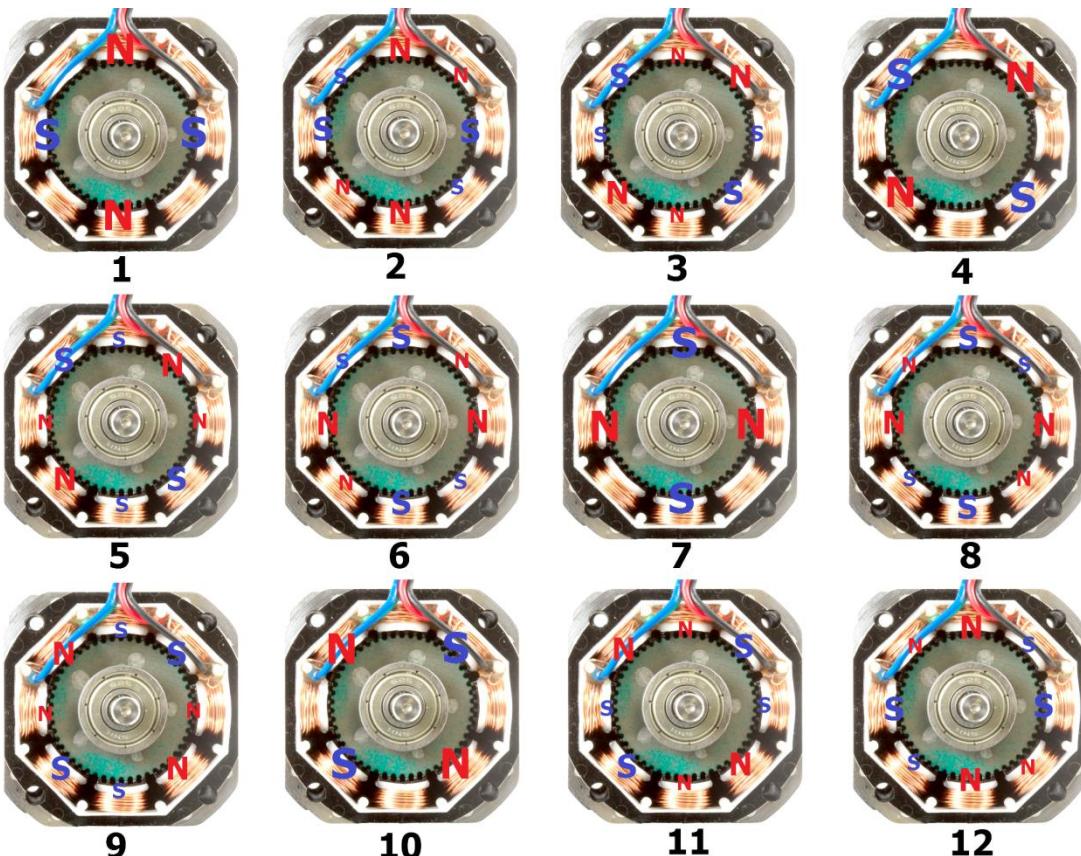


	BHMA 1	BHMA 2	BHMA 3	BHMA 4
ΦΑΣΗ Α	+I	+I	0	-I
ΦΑΣΗ Β	0	+I	+I	+I
	BHMA 5	BHMA 6	BHMA 7	BHMA 8
ΦΑΣΗ Α	-I	-I	0	+I
ΦΑΣΗ Β	0	-I	-I	-I

Απεικόνιση χαρακτηριστικών οδήγησης μισών βημάτων (Εικ. 1.29)

3.4 Microstepping

Κατά τη μέθοδο οδήγησης μικροβημάτων η τάση και κατ'επέκταση το ρεύμα που ενεργοποιεί τις φάσεις υποδιαιρείται σε περισσότερες από μια τιμές. Χρησιμοποιώντας μια πληθώρα τιμών αυξανόμενου ρεύματος οι φάσεις μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται σταδιακά δημιουργώντας έτσι παραπάνω βήματα και αυξάνοντας την ευκρίνεια της μηχανής (Εικ. 1.30). Εδώ εξετάζεται η τεχνική μικροβημάτων ημιτόνου-συνημιτόνου όπου το ρεύμα της φάσης A προσεγγίζει κυματομορφή συνιμιτόνου ενώ το ρεύμα της B κυματομορφή ημιτόνου σε συνάρτηση με τα βήματα.



	BHMA 1	BHMA 2	BHMA 3	BHMA 4
ΦΑΣΗ A	$I_{\text{cos}(0)} = I$	$I_{\text{cos}(\pi/6)}$	$I_{\text{cos}(2\pi/6)}$	$I_{\text{cos}(3\pi/6)} = 0$
ΦΑΣΗ B	$I_{\text{sin}(0)} = 0$	$I_{\text{sin}(\pi/6)}$	$I_{\text{sin}(2\pi/6)}$	$I_{\text{sin}(3\pi/6)} = I$
	BHMA 5	BHMA 6	BHMA 7	BHMA 8
ΦΑΣΗ A	$I_{\text{cos}(4\pi/6)}$	$I_{\text{cos}(5\pi/6)}$	$I_{\text{cos}(\pi)} = -I$	$I_{\text{cos}(7\pi/6)}$
ΦΑΣΗ B	$I_{\text{sin}(4\pi/6)}$	$I_{\text{sin}(5\pi/6)}$	$I_{\text{sin}(\pi)} = 0$	$I_{\text{sin}(7\pi/6)}$
	BHMA 9	BHMA 10	BHMA 11	BHMA 12
ΦΑΣΗ A	$I_{\text{cos}(8\pi/6)}$	$I_{\text{cos}(9\pi/6)} = 0$	$I_{\text{cos}(10\pi/6)}$	$I_{\text{cos}(11\pi/6)}$
ΦΑΣΗ B	$I_{\text{sin}(8\pi/6)}$	$I_{\text{sin}(9\pi/6)} = -I$	$I_{\text{sin}(10\pi/6)}$	$I_{\text{sin}(11\pi/6)}$

Απεικόνιση χαρακτηριστικών οδήγησης μικροβημάτων (Εικ. 1.30)

Η οδήγηση μικροβημάτων επιτρέπει σε έναν βηματικό κινητήρα να σταματήσει και να κρατήσει μια θέση ανάμεσα σε θέσεις ολόκληρου ή μισού βήματος, δεύτερον εξαλείφει σε μεγάλο βαθμό τον σπασμαδικό χαρακτήρα του χειρισμού βηματικών μηχανών σε χαμηλές ταχύτητες και τον θόρυβο στις ενδιάμεσες ταχύτητες και, τρίτον, μειώνει τα προβλήματα συντονισμού.

Η οδήγηση του παραδείγματος αποκαλείται και οδήγηση μικροβημάτων 1/3 του βήματος, εφόσον χρειάζονται τρία βήματα της συγκεκριμένης οδήγησης μικροβημάτων για την πραγματοποίηση ενός ίδιου βήματος, αν χρησιμοποιούταν τεχνική κυματικής οδήγησης. Για αυτόν τον λόγο και τα βήματα μιας περιόδου προκύπτουν τριπλάσια σε πλήθος από αυτά της κυματικής οδήγησης. Η ανάλυση που προσφέρει η οδήγηση του παραδείγματος είναι κατά συνέπεια τριπλάσια της κυματικής, άρα 0.6 μοίρες ανά βήμα ή 600 βήματα ανά περιστροφή. Με την περεταίρω ανάλυση του ρεύματος σε παραπάνω από 3 τιμές, είναι δυνατή οδήγηση μικροβημάτων ακόμα μεγαλύτερης ανάλυσης.

Τα ρεύματα των δυο φάσεων μπορούν να εκφραστούν και από τους παρακάτω τύπους:

$$I_A = I_{max} \cos\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right) \quad (1.1\alpha)$$

$$I_B = I_{max} \sin\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right) \quad (1.1\beta)$$

Όπου

I_A : Ρεύμα της φάσης A

I_B : Ρεύμα της φάσης B

I_{max} : Ονομαστικό ρεύμα φάσης

Kms : Ανάλυση μικροβημάτων (3 για το παράδειγμα της εικόνας 1.30)

$BHMA$: βήμα μικροοδήγησης

Με χρήση των παραπάνω εξισώσεων είναι δυνατόν να υπολογιστούν τα ρεύματα των δυο φάσεων για οδήγηση μικροβημάτων οσησδήποτε ανάλυσης. Η προκύπτουσα ανάλυση καθώς και η περίοδος της οδήγησης είναι συναρτήσεις της παραμέτρου Kms που αναφέρθηκε στους παραπάνω τύπους. Έτσι:

$$T = 4 * Kms \quad (1.2)$$

$$Res = \frac{1.8}{Kms} \quad (1.3)$$

Όπου

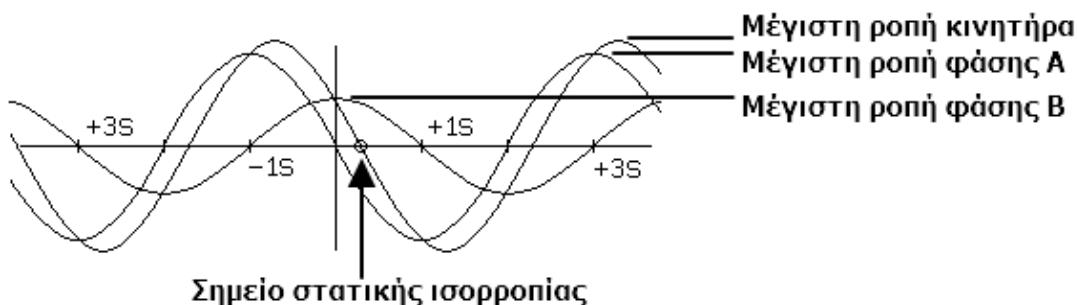
T : Περίοδος οδήγησης σε βήματα (12 για το παράδειγμα της εικόνας 1.30)

Res : Ανάλυση σε μοίρες ανά βήμα (0.6 για το παράδειγμα της εικόνας 1.30)

Με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων μπορεί να προσδιοριστεί η παράμετρος Kms για συγκεκριμένη ζητούμενη ανάλυση Res . Οι τιμές 4 και 1.8 προκύπτουν από την περίοδο και ανάλυση αντίστοιχα της συγκεκριμένης βηματικής μηχανής σε κυματική οδήγηση.

Η επιλογή της συγκεκριμένης ημιτονοειδούς συμπεριφοράς του ρεύματος έχει γίνει με σκοπό την διατήρηση σταθερής ροπής καθ' όλη την εξέλιξη της οδήγησης. Εφόσον δεν παρατηρείται μαγνητικός κορεσμός σε μέρη του στάτη, η παραγόμενη ροπή και το ρεύμα μιας φάσης είναι ανάλογα και γραμμικά εξαρτώμενα μεγέθη. Αυτό σημαίνει πως και η μέγιστη ροπή που ασκούν οι δυο φάσεις ανεξάρτητα ακολουθούν όμοιες κυματομορφές με αυτές του ρεύματος. Η άθροιση των ροπών των δυο φάσεων σε κάθε βήμα με αυτή τη μέθοδο αποδίδει μια σταθερή ροπή και ίση με αυτή της κυματικής οδήγησης για έναν ιδανικό βηματικό κινητήρα. Σε επόμενη ενότητα εξετάζεται ο τρόπος συνάθροισης των δυο ροπών της κάθε φάσης και το πώς η συγκεκριμένη ημιτονοειδής κυματική συμπεριφορά είναι σημαντική για την επίτευξη σταθερής ροπής όσον αφορά την οδήγηση μικροβημάτων.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικ. 1.31) φαίνονται προσεγγιστικά οι μορφές των διαγραμμάτων ροπής-θέσης του κινητήρα αλλά και καθεμιάς φάσης ξεχωριστά κατά το δεύτερο βήμα στην βηματική οδήγηση που αναφέρθηκε στο παράδειγμα της εικόνας 1.30. Με S συμβολίζεται ένα ολόκληρο βήμα του κινητήρα. Η κυκλωμένη θέση πάνω στην καμπύλη της ροπής του κινητήρα συμβολίζει την θέση ισορροπίας όταν η εξωτερική εφαρμοζόμενη ροπή στον άξονα είναι μηδενική.



Διαγράμματα ροπής-θέσης δυο ημιενεργοποιημένων φάσεων (Εικ. 1.31)

4. Torque of stepper motors

4.1 Holding torque of one phase

Για έναν βηματικό κινητήρα που περιστρέφεται κατά S ακτίνια ανά κυματικό βήμα, η γραφική παράσταση της ροπής στρέψης έναντι της γωνιακής θέσης του δρομέα σχετικά με κάποια αρχική θέση ισορροπίας γενικά προσεγγίζει ημιτονοειδή κυματομορφή. Το πραγματικό σχήμα της καμπύλης εξαρτάται από τη γεωμετρία των πόλων τόσο του δρομέα όσο και του στάτορα. Πληροφορίες ως προς την γεωμετρία ή των καμπυλών ροπής συνήθως δεν δίνονται στα φύλλα δεδομένων του κινητήρα. Για τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και τους υβριδικούς κινητήρες, η πραγματική καμπύλη συνήθως φαίνεται ημιτονοειδής. Αντίθετα, στους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης η καμπύλη σπάνια έχει ημιτονοειδή μορφή. Οι τραπεζοειδείς ή ακόμη και οι ασύμμετρες πριονωτές καμπύλες ροπής-θέσης είναι πιο συνηθισμένες στους συγκεκριμένους κινητήρες.

Για έναν κινητήρα μόνιμου μαγνήτη ή έναν υβριδικό κινητήρα δύο φάσεων, το διάγραμμα ροπής-θέσης παρουσιάζει ημιτονοειδή μορφή με περίοδο 4S, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.32 της επόμενης σελίδας. Στην ίδια εικόνα φαίνεται επίσης η διάταξη του ρότορα ως προς την ενεργή φάση του στάτη για κάποιες από τις περιοχές ενδιαφέροντος του διαγράμματος. Για τον σχηματισμό του διαγράμματος το ρεύμα μιας μόνο φάσης παίρνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ενώ η άλλη φάση μένει ανενεργή. Η ροπή που προκύπτει για κάθε διαφορετική θέση του ρότορα αποτυπώνεται στον άξονα γ του διαγράμματος.

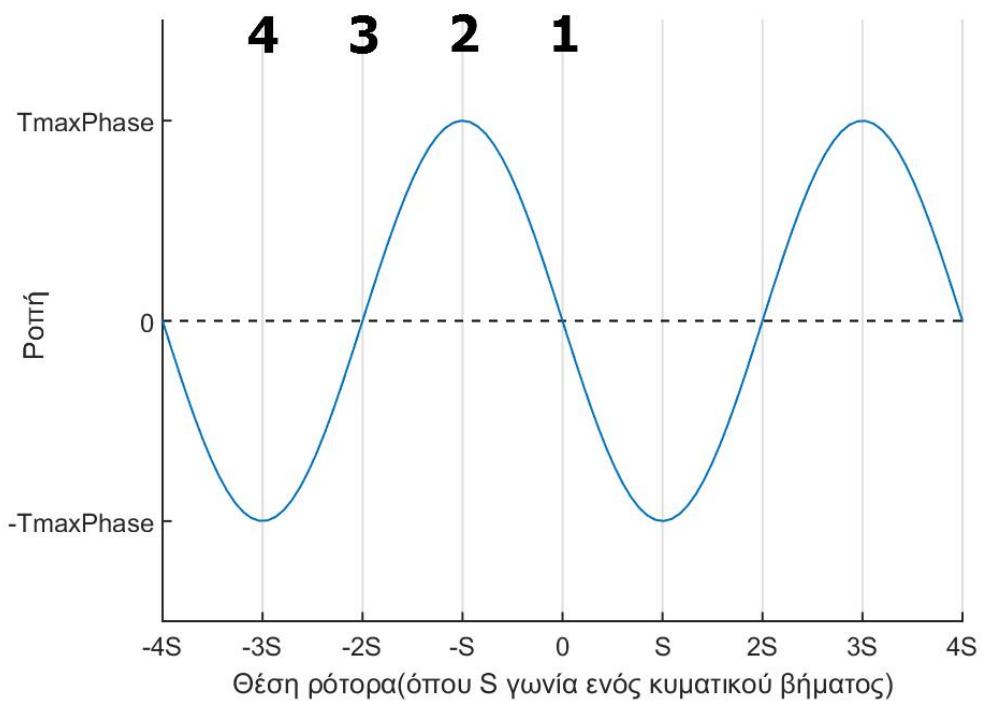
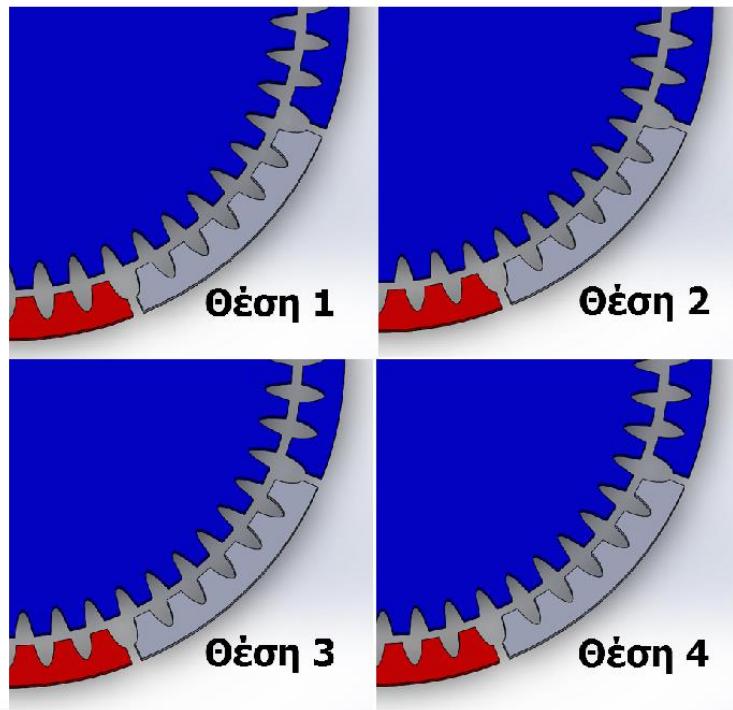
Στην θέση 1 της εικόνας 1.32 η γωνιακή θέση του ρότορα είναι ίση με 0 ακτίνια και η διάταξη βρίσκεται σε στατική ισορροπία εφόσον η ροπή είναι μηδενική. Για την ακρίβεια πρόκειται για ευσταθή στατική ισορροπία και αυτό μπορεί να αποδειχθεί είτε μελετώντας την ενέργεια του συστήματος, είτε τη ροπή που ασκείται στο ρότορα.

Για να αποδειχθεί ενεργειακά ότι η ισορροπία είναι ευσταθής αρκεί να δειχθεί πως η ενέργεια του συστήματος παίρνει την ελάχιστη τιμή στην θέση 1. Ας παρατηρηθεί ότι στην θέση 1 οι όμοιοι πόλοι ρότορα-στάτη βρίσκονται σε μέγιστη απόσταση μεταξύ τους ενώ οι αντίθετοι σε ελάχιστη. Η αρνητική δυναμική ενέργεια που οφείλεται στην ελκτική συμπεριφορά των αντίθετων πόλων μεγιστοποιείται, ενώ η θετική δυναμική ενέργεια που οφείλεται στην αποστική συμπεριφορά των όμοιων πόλων ελαχιστοποιείται. Συμπεραίνεται έτσι πως στη θέση 1 η ενέργεια του συστήματος παίρνει ελάχιστη τιμή και για αυτόν τον λόγο η θέση αυτή αποτελεί μια θέση ευσταθούς στατικής ισορροπίας.

Για να αποδειχθεί με την ροπή που ασκείται στον ρότορα αρκεί να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος για μικρές μετατοπίσεις του ρότορα από αυτό το σημείο ισορροπίας. Για μικρή ωρολογιακή κίνηση του ρότορα -dφ, η ροπή που ασκείται στον ρότορα παίρνει θετική τιμή άρα τείνει να τον περιστρέψει αντιωρολογιακά προς την θέση 1, $\phi=0$. Για αντιωρολογιακή περιστροφή του ρότορα κατά dφ, η ροπή που ασκείται στον ρότορα παίρνει αρνητική τιμή άρα τείνει να τον περιστρέψει ωρολογιακά προς την θέση 1, $\phi=0$. Για οποιαδήποτε από τις δύο διαταραχές στην θέση ο ρότορας τείνει να επιστρέψει στην θέση 1, άρα η ισορροπία είναι ευσταθής.

Για την θέση 3 όπου ο ρότορας βρίσκεται σε γωνιακή θέση $\phi = -2S$ και εφαρμόζοντας τον παρόμοιο συλλογισμό διαπιστώνεται πως υπάρχει ασταθής ισορροπία.

Στην θέση 2 ο ρότορας έχει κινηθεί ωρολογιακά κατά S ακτίνια, άρα $\phi = -S$. Η ροπή που παράγεται σε αυτήν την θέση είναι και η μέγιστη για ένα ενεργό τύλιγμα σύμφωνα και με το διάγραμμα της εικόνας 1.32. Ας παρατηρηθεί ότι αυτή η θέση είναι παρόμοια με την θέση 4 της εικόνας 1.32. Για την ακρίβεια η θέση 4 προκύπτει μετά από καθρεπτισμό της θέσης 2. Ως συνέπεια στη θέση 4 παράγεται ροπή ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς.



Διαγράμματα ροπής-θέσης μιας ενεργοποιημένης φάσης και απεικόνιση πολικότητας στάτη (Εικ. 1.32).

Ως παράδειγμα, για έναν ιδανικό βηματικό κινητήρα με δυο φάσεις αυτή η καμπύλη περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$T_A = -T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) \quad (1.4)$$

Όπου

T_A	: Παραγόμενη ροπή φάσης A
T_{Phase}	: Ροπή συγκράτησης μιας πλήρως ενεργοποιημένης φάσης
S	: Βήμα κατά κυματική οδήγηση σε ακτίνια
θ	: Γωνιακή θέση ρότορα σε ακτίνια

Αυτό το μοντέλο μπορεί να αποκλίνει μερικώς από την συμπεριφορά της ροπής του κινητήρα σε πραγματικές συνθήκες.

Είναι χρήσιμο να γίνει διάκριση μεταξύ της γωνίας ηλεκτρικού άξονα και της μηχανικής γωνίας άξονα. Στο μηχανικό πλαίσιο αναφοράς, τα 2π ακτίνια ορίζονται ως μία πλήρης περιστροφή του άξονα του κινητήρα. Στο ηλεκτρικό πλαίσιο αναφοράς, μια περιστροφή ορίζεται ως μια περίοδος της καμπύλης ροπής-θέσης. Οπότε και από τον παραπάνω τύπο φαίνεται ότι μια περίοδος του διαγράμματος ροπής είναι $4S$ ακτίνια ενώ για μια περίοδο του άξονα της μηχανής αντιστοιχούν 2π ακτίνια.

Αφού ενεργοποιηθεί η μια φάση και χωρίς φορτίο στον άξονα της μηχανής, ο άξονας θα ισορροπήσει στη θέση 0 που φαίνεται στο διάγραμμα (Εικ. 1.32). Εφόσον η πραγματική συμπεριφορά της μηχανής δεν αποκλίνει πολύ από την ημιτονοειδή συμπεριφορά, προσθέτοντας ένα φορτίο ροπής T στον άξονα και εφόσον το φορτίο δεν ξεπερνάει τα όρια ροπής ($T_{maxPhase}$), ο ρότορας θα ισορροπήσει σε μια καινούρια θέση το πολύ $1/4$ της περιόδου του διαγράμματος μακριά από την αρχική θέση ισορροπίας. Για υβριδικούς ή κινητήρες μόνιμου μαγνήτη δυο φάσεων αυτό αναλογεί σε γωνία ενός βήματος S. Αν ασκηθεί ροπή μεγαλύτερη της ροπής συγκράτησης στον άξονα της μηχανής, αυτός θα περιστραφεί ελεύθερα.

Στην περίπτωση που καμία από τις φάσεις του στάτη δεν είναι ενεργή και κυρίως στους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και τους υβριδικούς, η ροπή που παρατηρείται δεν είναι μηδενική. Αυτό οφείλεται στην χρήση μόνιμου μαγνήτη που χαρακτηρίζει και τα δυο αυτά είδη. Η ροπή αυτή σπάνια αναφέρεται στα φύλα δεδομένων των κινητήρων. Ο όρος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της είναι “detent torque”. Τα πιο συνηθισμένα σχέδια κινητήρων παράγουν τέτοια ροπή που μεταβάλλεται τριγωνομετρικά με τη γωνία ρότορα, με μια ευσταθή θέση ισορροπίας σε κάθε κυματικό βήμα S και πλάτος περίπου 10% της ονομαστικής ροπής συγκράτησης μιας φάσης του κινητήρα. Έρευνα των κινητήρων ενός κατασκευαστή (Phytron) δείχνει τιμές τόσο υψηλές, από 23% για έναν πολύ μικρό κινητήρα, όσο και χαμηλές, 2,6% για έναν κινητήρα μεσαίου μεγέθους. Η ροπή αυτή μπορεί να επηρεάζει την ακρίβεια της τοποθέτησης αλλά δίνει ταυτόχρονα το πλεονέκτημα της συγκράτησης του φορτίου που οδηγείται μετά την απενεργοποίηση του κινητήρα.

4.2 Holding torque of two phases

Εφόσον κανένα μέρος του μαγνητικού κυκλώματος δεν κορεσθεί, τροφοδοτώντας ταυτόχρονα δύο φάσεις του κινητήρα παράγεται μια καμπύλη ροπής σε σχέση με τη θέση που είναι το άθροισμα των καμπυλών ροπής και θέσης για τις δύο φάσεις του κινητήρα αν υπολογιστούν μεμονωμένα. Για τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή τους υβριδικούς κινητήρες δύο φάσεων, οι δύο καμπύλες θα έχουν διαφορά φάσης S και αν τα ρεύματα στα δύο τύλιγμα είναι ίσα, οι κορυφές και οι κοιλάδες του αθροίσματος θα μετατοπιστούν $S / 2$ ακτίνια από τις κορυφές των αρχικών καμπυλών, όπως φαίνεται στην εικόνα της επόμενης σελίδας (Εικ. 1.33).

Από την προηγούμενη ενότητα, η ροπή της φάσης A εκφράζεται ως:

$$T_A = -T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right)$$

Η ροπή της φάσης B είναι όμοια με αυτή της φάσης A αλλά καθυστερεί ως προς αυτήν κατά φάση $\pi/2$:

$$T_B = -T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta + \frac{\pi}{2}\right) = -T_{Phase} \cos\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right)$$

Με πρόσθεση των παραπάνω σχέσεων και χρησιμοποιώντας τον τριγωνομετρικό τύπο

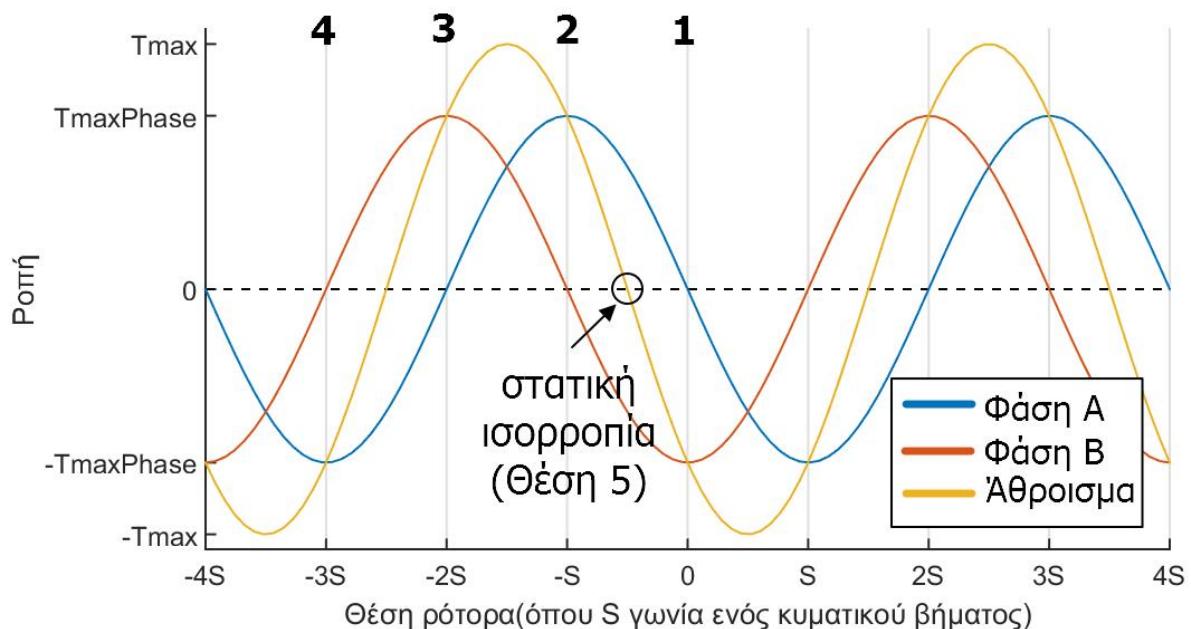
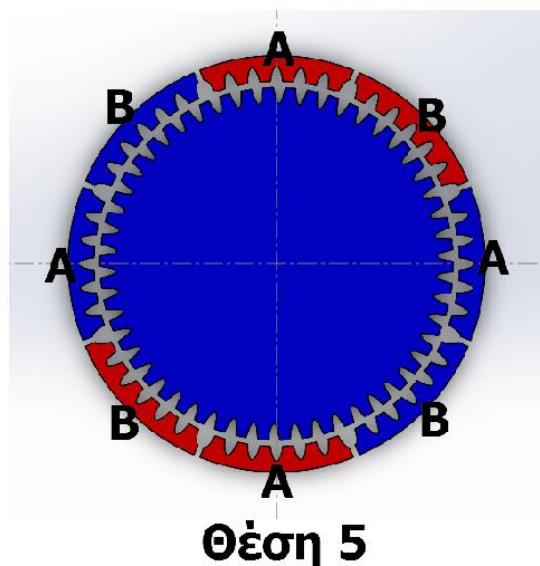
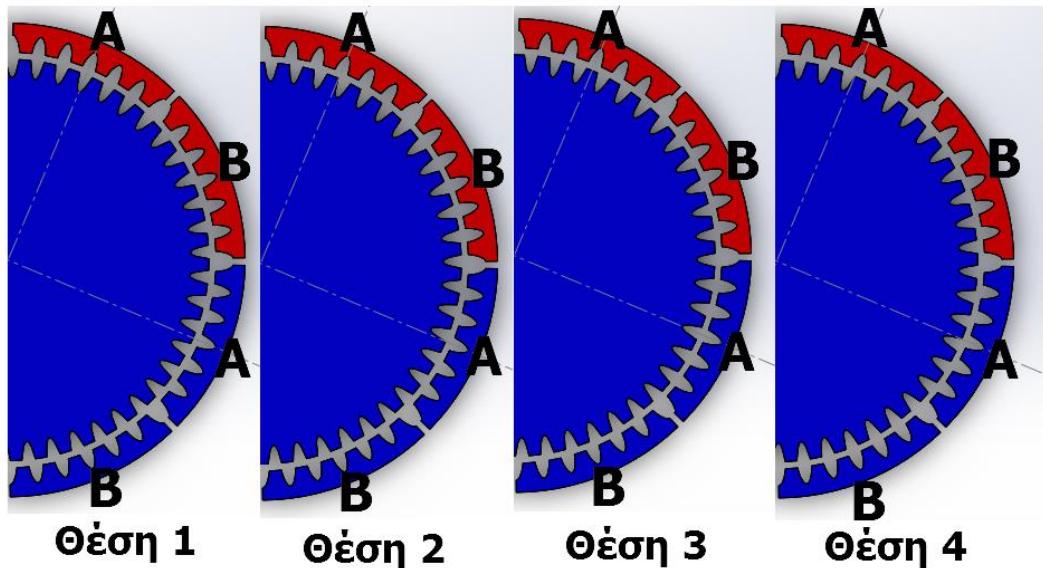
$$a \sin x + b \cos x = R \sin(x + \varphi), \text{όπου } R = \sqrt{a^2 + b^2}, \cos \varphi = \frac{a}{R}, \sin \varphi = \frac{b}{R}$$

Προκύπτει:

$$\begin{aligned} T_{sum} &= T_A + T_B = -T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) - T_{Phase} \cos\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) \Rightarrow \\ T_{sum} &= \sqrt{2} T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta - \frac{3\pi}{4}\right) = -\sqrt{2} T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta + \frac{\pi}{4}\right) \Rightarrow \\ T_{sum} &= -\sqrt{2} T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1.5) \end{aligned}$$

Για τις παραπάνω σχέσεις, όπου

T_{sum}	: Παραγόμενη συνολική ροπή κινητήρα
T_A	: Παραγόμενη ροπή φάσης A
T_B	: Παραγόμενη ροπή φάσης B
T_{Phase}	: Ροπή συγκράτησης μιας πλήρως ενεργοποιημένης φάσης
S	: Βήμα κατά κυματική οδήγηση σε ακτίνια
θ	: Γωνιακή θέση ρότορα σε ακτίνια



Διαγράμματα ροπής-θέσης δυο ενεργοποιημένων φάσεων και απεικόνιση πολικότητας στάτη (Εικ. 1.33)

Στην εικόνα 1.33 στα στιγμιότυπα 1,2,3 και 4 εμφανίζονται μόνο μισές από τις ομάδες ακμών κάθε φάσης. Αυτές είναι αρκετές για να περιγράψουν εξ ολοκλήρου την κατάσταση του κινητήρα διότι, όπως προαναφέρθηκε, οι απέναντι ομάδες έχουν πάντοτε όμοια στοίχιση και πόλο.

Όπως επιβεβαιώνουν οι τύποι 1.4, 1.5 και το διάγραμμα η ροπή συγκράτησης ενισχύεται κατά $\sqrt{2}$ όταν και οι δυο φάσεις είναι ενεργές. Αυτό είναι έγκυρο μόνο όταν δεν υπάρχει μαγνητικός κορεσμός στην διάταξη και οι παραστάσεις περιγράφουν επαρκώς αρμονικές καμπύλες. Έτσι ισχύει:

$$T_{2Phase} = \sqrt{2}T_{Phase} \quad (1.6)$$

Όπου

- | | |
|--------------|--|
| T_{2Phase} | : Ροπή συγκράτησης δύο πλήρως ενεργοποιημένων φάσεων |
| T_{Phase} | : Ροπή συγκράτησης μιας πλήρως ενεργοποιημένης φάσης |

Στα φύλλα δεδομένων τις περισσότερες φορές ως χαρακτηριστικό ροπής δίνεται η ροπή συγκράτησης δυο φάσεων. Αυτό συμβαίνει διότι είναι μεγαλύτερη άρα "κολακεύει" το προϊόν. Η ροπή συγκράτησης μιας φάσης όμως είναι μια χρήσιμη τιμή αφού εκτός από την κυματική οδήγηση είναι ίση με την ροπή συγκράτησης κατά την χρήση οδήγησης μικροβημάτων ημιτόνου-συνημιτόνου, μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές οδήγησης σήμερα. Η τιμή της μέγιστης ροπής συγκράτησης μιας φάσης προκύπτει από διαίρεση της μέγιστης ροπής συγκράτησης δυο φάσεων με $\sqrt{2}$. Είναι σημαντικό να εξακριβώνεται ποια από τις δυο είναι κάθε φορά η μέγιστη ροπή που δίνεται στα φύλλα δεδομένων του κινητήρα. Έπειτα αρκεί να υπολογίζεται η κατάλληλη από τις δυο, δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί στο είδος οδήγησης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Παρατηρείται πως η νέα θέση ισορροπίας που φαίνεται στην εικόνα 1.33 βρίσκεται ανάμεσα στις θέσεις ισορροπίας κάθε μιας φάσης αν ήταν ενεργοποιημένες μεμονωμένα. Το T_{sum} μηδενίζεται για $\theta = -S/2$. Έτσι, η νέα θέση ευσταθούς ισορροπίας βρίσκεται ανάμεσα σε δυο συνεχόμενες θέσεις ευσταθούς ισορροπίας που αντιστοιχούν σε κυματικά βήματα του κινητήρα. Αυτή είναι η ιδιότητα που κατά την οδήγηση μισών βημάτων βιοθάει στην δημιουργία τεσσάρων επιπλέον θέσεων ισορροπίας σε κάθε περίοδο του ηλεκτρικού άξονα για την αύξηση έτσι της ευκρίνειας του κινητήρα.

Με παρατήρηση κάθε φάσης A και B ξεχωριστά και μέθοδο όμοια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για την εξήγηση της ροπής μιας φάσης στην προηγούμενη ενότητα γίνεται κατανοητή η συμπεριφορά των καμπυλών ροπής φάσης A και φάσης B που φαίνονται με μπλε και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα στο διάγραμμα. Η κίτρινη καμπύλη περιγράφει την συνολική ροπή του κινητήρα και προκύπτει από το άθροισμα των προηγούμενων δυο. Η θέση 5 αντιπροσωπεύει τη θέση ευσταθούς στατικής ισορροπίας του κινητήρα χωρίς εξωτερικό φορτίο.

4.3 Holding torque of sine-cosine microstepping

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα οδήγησης μικροβημάτων τα ρεύματα των δυο φάσεων εκφράζονται σε συνάρτηση με το βήμα της οδήγησης με τη μορφή:

$$I_A = I_{max} \cos\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right) \quad (1.7\alpha)$$

$$I_B = I_{max} \sin\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right) \quad (1.7\beta)$$

Επίσης, η παραγόμενη ροπή και το ρεύμα μιας φάσης είναι ανάλογα και γραμμικά εξαρτώμενα μεγέθη σε ιδανικές συνθήκες. Έτσι, ανάλογα γράφονται και οι μέγιστες ροπές της κάθε φάσης:

$$T_{maxA} = T_{Phase} \cos\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right) \quad (1.8\alpha)$$

$$T_{maxB} = T_{Phase} \sin\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right) \quad (1.8\beta)$$

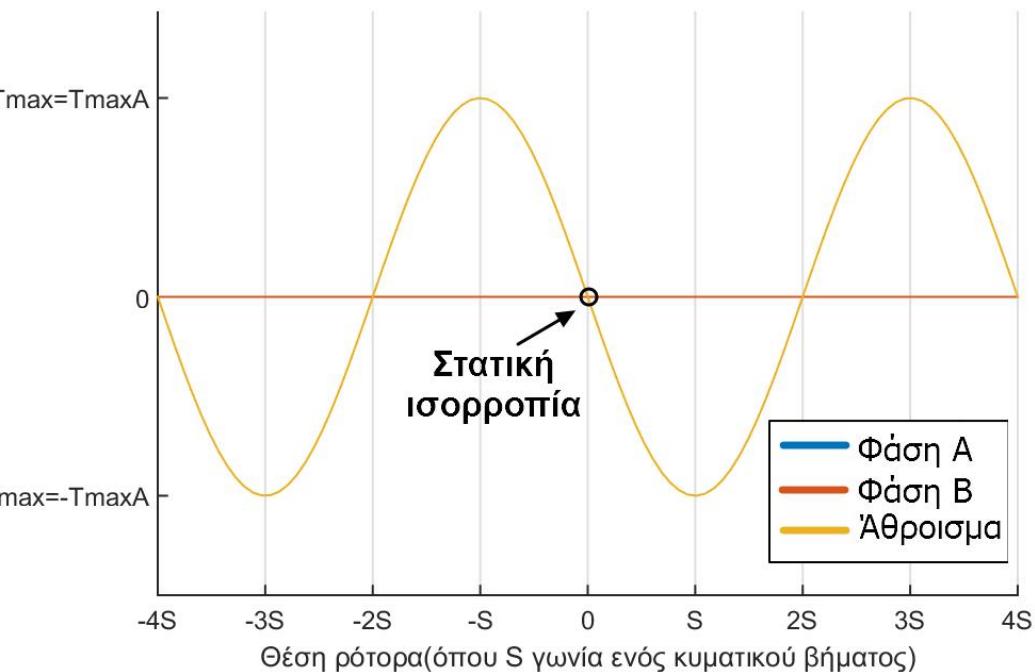
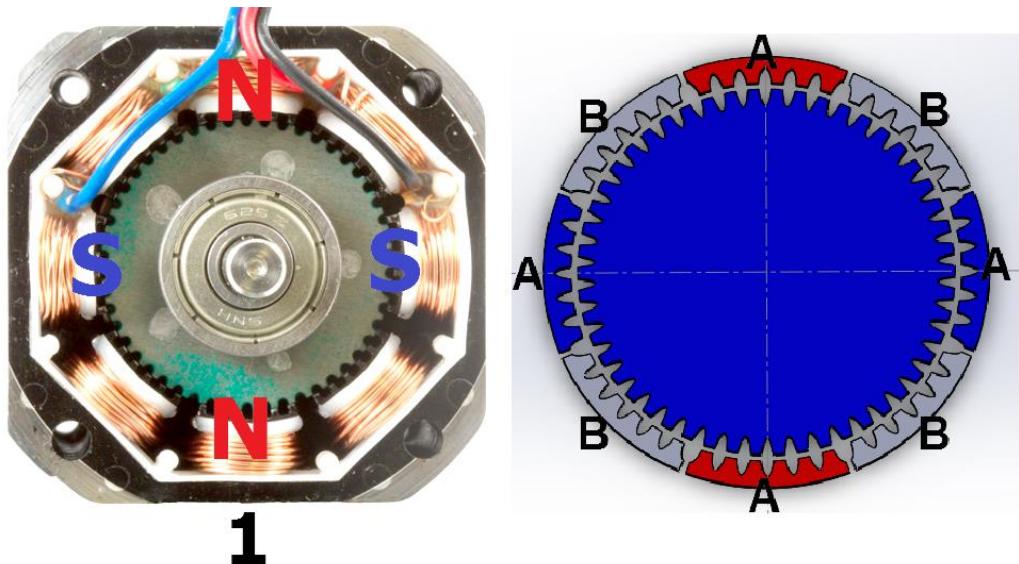
Όπου

T_{maxA}	: Μέγιστη ροπή φάσης A
T_{maxB}	: Μέγιστη ροπή φάσης B
T_{Phase}	: Ροπή συγκράτησης μιας πλήρως ενεργοποιημένης φάσης
Kms	: Ανάλυση μικροβημάτων
$BHMA$: βήμα μικροοδήγησης

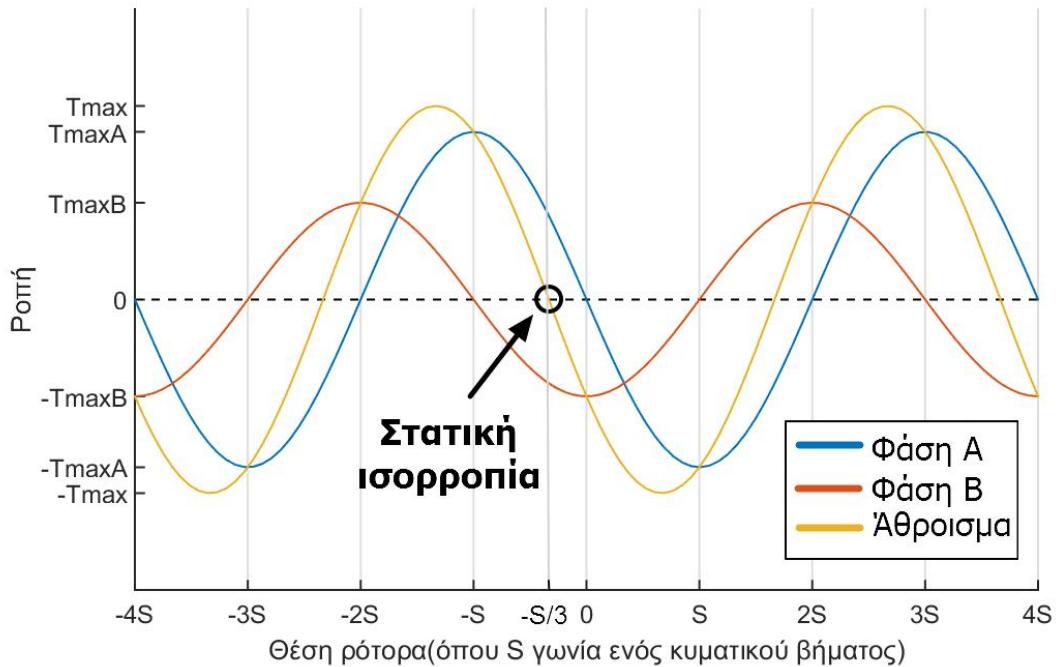
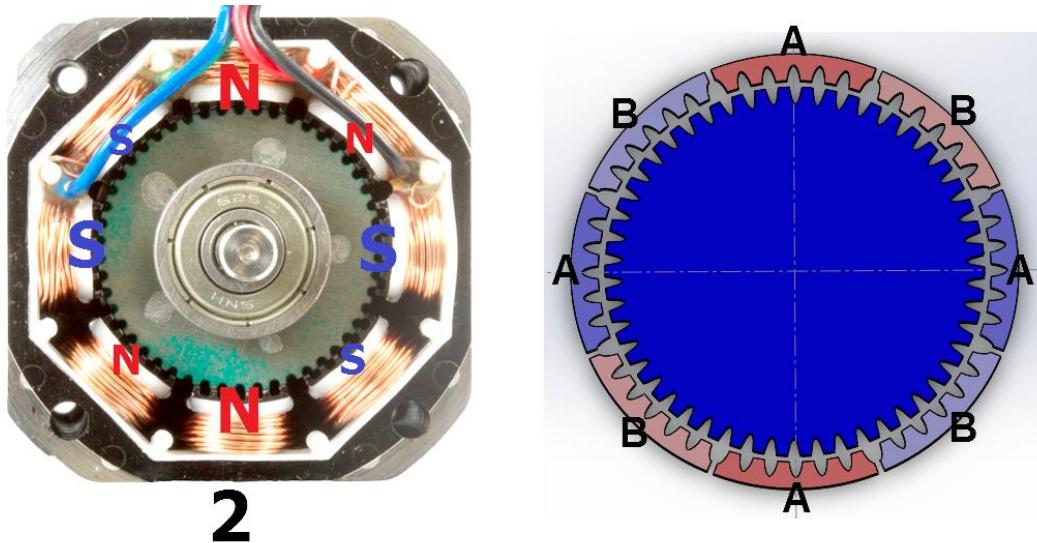
Τότε σύμφωνα με τον τριγωνομετρικό τύπο που χρησιμοποιήθηκε για την άθροιση ροπών των δυο φάσεων:

$$\begin{aligned} R = \sqrt{a^2 + b^2} &\Rightarrow T_{max} = \sqrt{T_{maxA}^2 + T_{maxB}^2} \\ &= \sqrt{\{T_{Phase} \cos\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right)\}^2 + \{T_{Phase} \sin\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right)\}^2} = \\ &= \sqrt{T_{Phase}^2 \{\cos^2\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right) + \sin^2\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * Kms}\right)\}} = \\ &= \sqrt{T_{Phase}^2 \{1\}} = T_{Phase} \end{aligned}$$

Συμπερασματικά, εφόσον τα ρεύματα των φάσεων ακολουθούν συμπεριφορά ημιτόνου-συνημιτόνου, το ίδιο ισχύει και για τις μέγιστες ροπές των φάσεων. Αυτή η συμπεριφορά έχει σαν αποτέλεσμα η μέγιστη παραγόμενη ροπή στον κινητήρα να παραμένει σταθερή και ίση με T_{Phase} για οποιοδήποτε βήμα της συγκεκριμένης οδήγησης μικροβημάτων.



Στην παραπάνω εικόνα (Εικ. 1.34) αναλύεται το πρώτο βήμα της οδήγησης που αναφέρθηκε στην ενότητα της οδήγησης μικροβημάτων. Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο στάτης είναι παρόμοια με αυτήν που εξετάστηκε στην ενότητα “Στατική ροπή μιας φάσης”. Μόνο η φάση A είναι ενεργοποιημένη και δέχεται το μέγιστο δυνατό ρεύμα με αποτέλεσμα να παράγει μέγιστη ισχύ ίση με τη μέγιστη δυνατή μιας φάσης ($T_{maxA} = T_{Phase}$). Η θέση ισορροπίας βρίσκεται στην γωνία $\theta = 0$.



Διαγράμματα ροπής-θέσης δυο φάσεων και απεικόνιση πολικότητας στάτη στο 2° βήμα οδήγησης μικροβημάτων (Εικ. 1.35)

Στην παραπάνω εικόνα (Εικ. 1.35) αναλύεται το δεύτερο βήμα της οδήγησης που αναφέρθηκε στην ενότητα της οδήγησης μικροβημάτων. Όπως αποδείχτηκε, η μέγιστη ροπή του κινητήρα T_{\max} είναι πάντα ίση με τη μέγιστη ροπή μιας φάσης T_{Phase} . Οι ασθενείς αποχρώσεις του στάτη συμβολίζουν την μερική ενεργοποίηση των φάσεων. Η ανάλυση της οδήγησης είναι 0.6 μοίρες και άρα ο ρότορας είναι στραμμένος κατά 0.6 μοίρες ωρολογιακά εφόσον είναι το δεύτερο βήμα της οδήγησης.

Τα ρεύματα των φάσεων στο δεύτερο βήμα της οδήγησης μπορούν να υπολογιστούν από τους τύπους για Kms = 3:

$$I_A = I_{max} \cos\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * \text{Kms}}\right) = I_{max} \cos\left(\frac{(2 - 1)\pi}{2 * 3}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{max}$$

$$I_B = I_{max} \sin\left(\frac{(BHMA - 1)\pi}{2 * \text{Kms}}\right) = I_{max} \sin\left(\frac{(2 - 1)\pi}{2 * 3}\right) = \frac{1}{2} I_{max}$$

Όταν μια φάση δέχεται ένα ποσοστό του μέγιστου ρεύματος που μπορεί να δεχθεί, η μέγιστη ροπή που μπορεί να παράξει μειώνεται κατά το ίδιο ποσοστό. Έτσι:

$$T_{maxA} = \frac{\sqrt{3}}{2} T_{Phase}$$

$$T_{maxB} = \frac{1}{2} T_{Phase}$$

Οπότε και οι καμπύλες ροπής-θέσης κάθε φάσης θα περιγράφονται από τους τύπους:

$$T_A = -T_{maxA} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2} T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) \quad (1.9\alpha)$$

$$T_B = -T_{maxB} \cos\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) = -\frac{1}{2} T_{Phase} \cos\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) \quad (1.9\beta)$$

Με πρόσθεση των παραπάνω σχέσεων και χρησιμοποιώντας τον τριγωνομετρικό τύπο

$$a \sin x + b \cos x = R \sin(x + \varphi), \text{όπου } R = \sqrt{a^2 + b^2}, \cos \varphi = \frac{a}{R}, \sin \varphi = \frac{b}{R}$$

Προκύπτει:

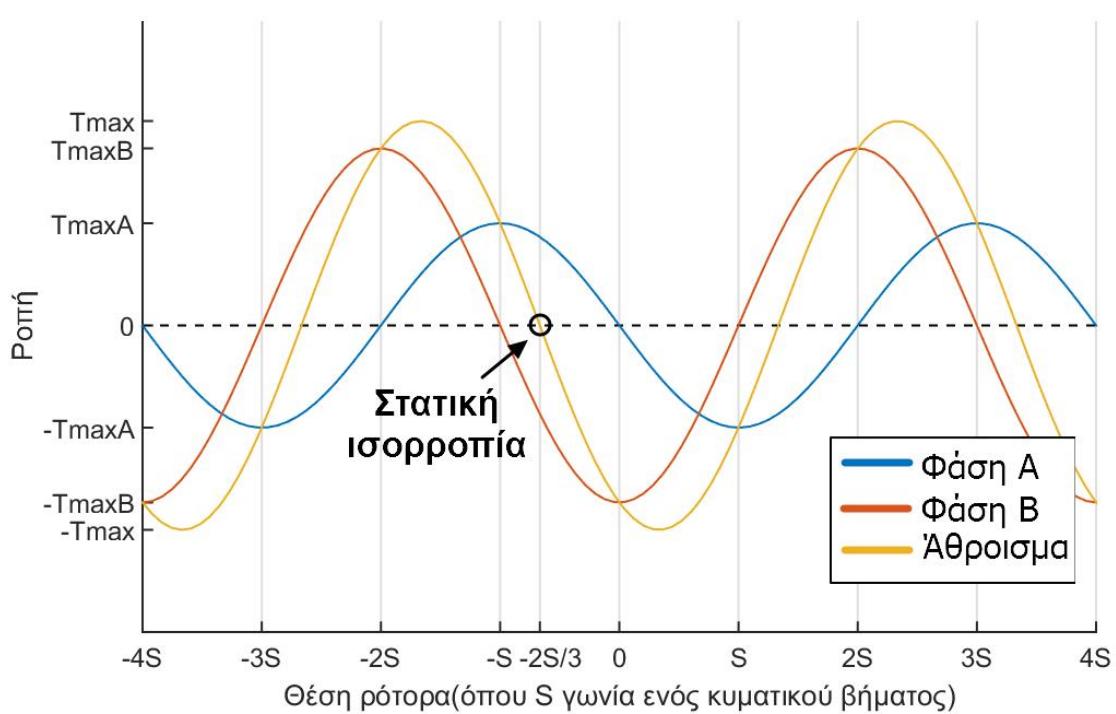
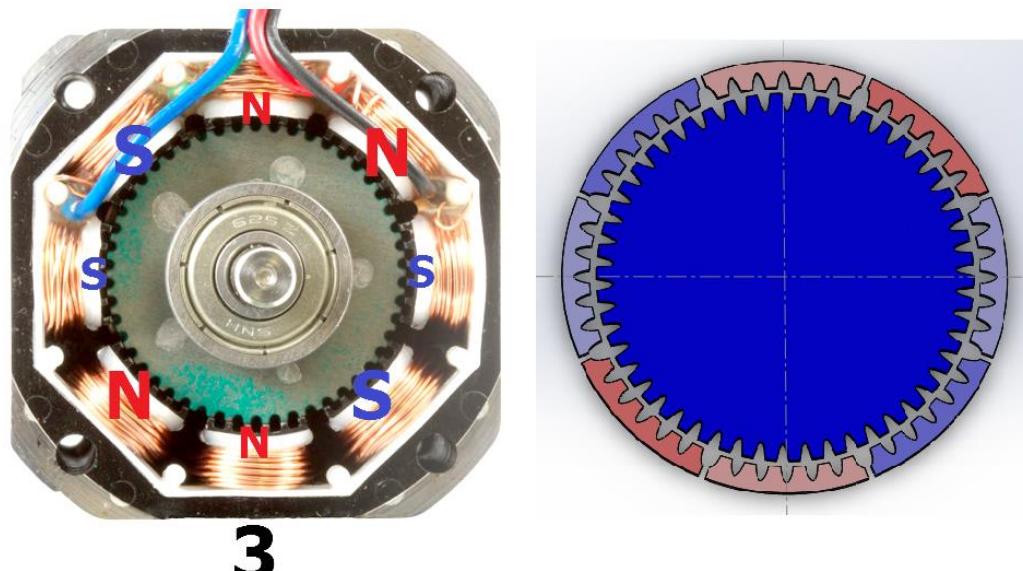
$$\begin{aligned} T_{sum} &= -\frac{\sqrt{3}}{2} T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) - \frac{1}{2} T_{Phase} \cos\left(\frac{\pi}{2S} \theta\right) \Rightarrow \\ T_{sum} &= T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta - \frac{5\pi}{6}\right) = -T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta + \frac{\pi}{6}\right) \Rightarrow \\ T_{sum} &= -\sqrt{2} T_{Phase} \sin\left(\frac{\pi}{2S} \theta + \frac{\pi}{6}\right) \end{aligned}$$

Όπου η διαφορά φάσης της ολικής ροπής σε συνάρτηση με τις μέγιστες ροπές των φάσεων Α και Β εκφράζεται ως:

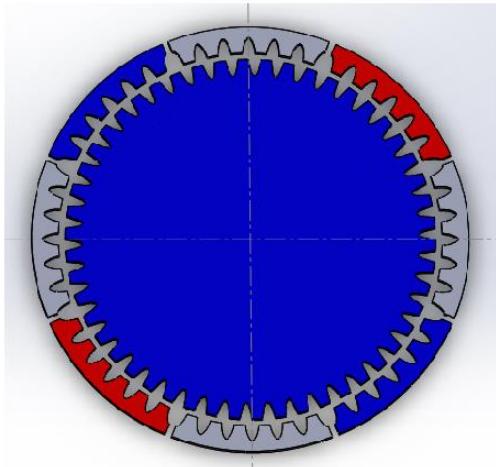
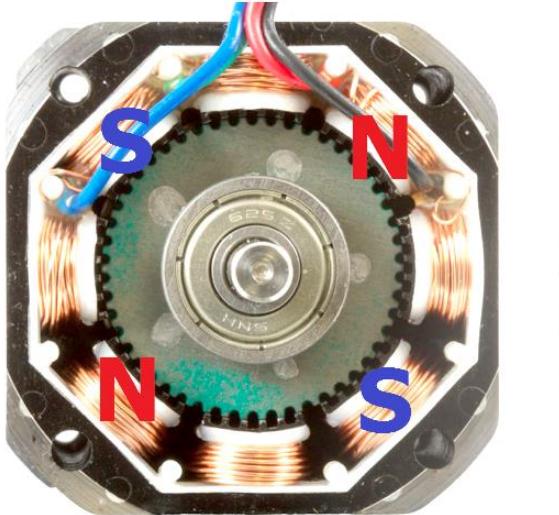
$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{a}{R}, \sin \varphi = \frac{b}{R} \Rightarrow \varphi = \arctan \frac{b}{a} = \arctan \frac{T_{maxB}}{T_{maxA}} = \arctan \frac{\frac{1}{2} T_{maxPhase}}{\frac{\sqrt{3}}{2} T_{maxPhase}} = \\ &= \arctan \frac{\sqrt{3}}{3} \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{6} \text{ ή } \varphi = -\frac{5\pi}{6} \end{aligned}$$

Η τιμή $\frac{\pi}{6}$ αποκλείεται λόγω των πρώτων συναρτήσεων, $\cos \varphi = \frac{a}{R}, \sin \varphi = \frac{b}{R}$.

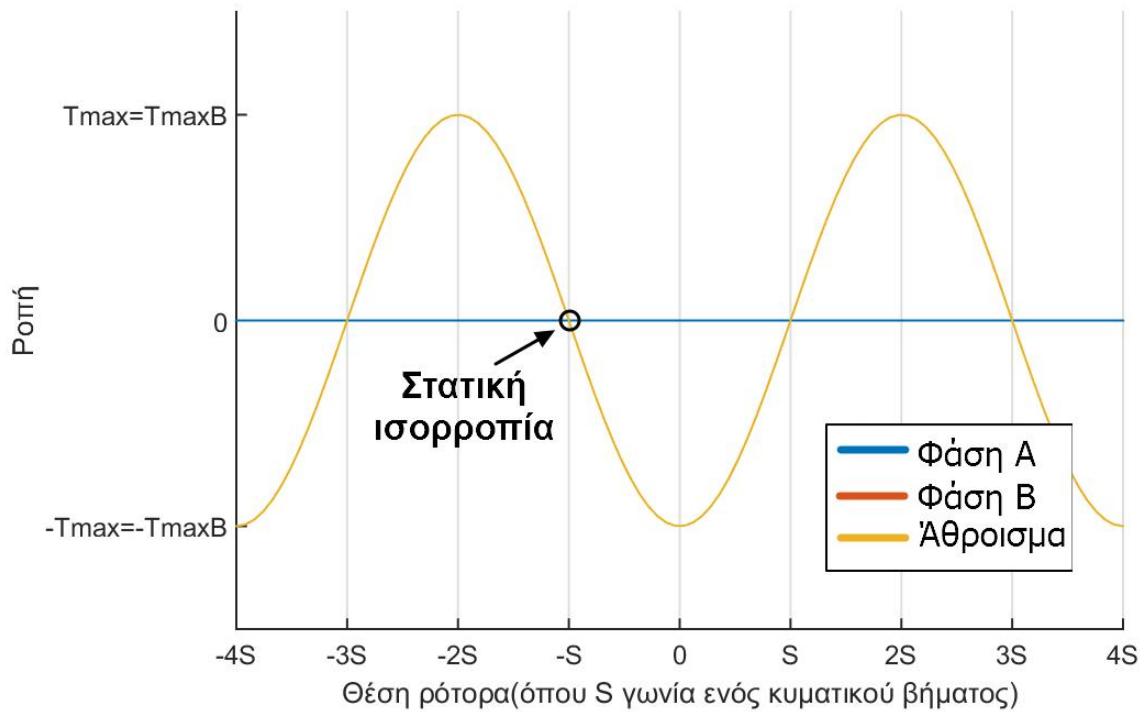
Επίσης η ευσταθής στατική θέση ισορροπίας για δυο επιλεγμένα T_{maxA} , T_{maxB} υπολογίζεται από τον τύπο $x = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{2S}{\pi}\varphi$, όπου φ η διαφορά φάσης της ολικής ροπής σε συνάρτηση με τις μέγιστες ροπές των φάσεων A και B και $\omega = \frac{\pi}{2S}$ η γωνιακή ταχύτητα της ολικής ροπής. Με παρόμοιο τρόπο και χρησιμοποιώντας τους ίδιους τύπους υπολογίζονται οι ροπές σε κάθε βήμα. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες για τα δυο επόμενα βήματα της οδήγησης μικροβημάτων.



Διαγράμματα ροπής-θέσης δυο φάσεων και απεικόνιση πολικότητας στάτη στο 3° βήμα οδήγησης μικροβημάτων (Εικ. 1.36).



4



Διαγράμματα ροπής-θέσης δυο φάσεων και απεικόνιση πολικότητας στάτη στο 4° βήμα οδήγησης μικροβημάτων (Εικ. 1.37)

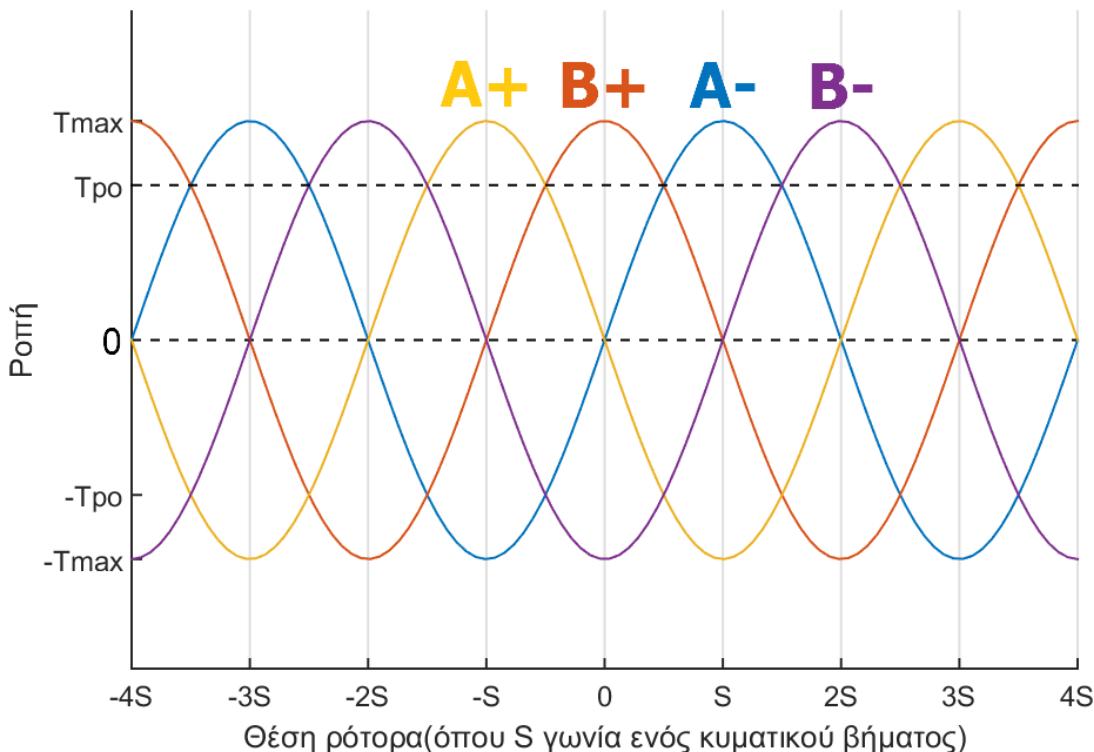
Με τα τέσσερα βήματα που αναλύονται στις εικόνες 1.34, 1.35, 1.36 και 1.37 πραγματοποιείται περιστροφή ισοδύναμη με ένα κυματικό βήμα του κινητήρα. Από τις εικόνες αξίζει να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της καμπύλης της ολικής ροπής (κίτρινο χρώμα). Η καμπύλη μετατοπίζεται σε κάθε βήμα 'προς τα αριστερά' κατά απόσταση $S/3$ σύμφωνα με τη συμπεριφορά των ρευμάτων των δυο φάσεων και ταυτόχρονα διατηρεί σταθερό πλάτος.

4.4 Pull out torque

Οι βηματικοί κινητήρες χάνουν τον συγχρονισμό τους όταν ο ρότορας αναπηδάει σε μια καινούρια θέση πέραν από αυτήν που ενδείκνυται από την οδήγηση. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν το φορτίο στον ρότορα υπερβεί τα όρια της συγκεκριμένης μηχανής. Το μέγιστο φορτίο υπό το οποίο μια βηματική μηχανή είναι ικανή να διατηρήσει τον συγχρονισμό της αναφέρεται σε ξενόγλωσσα βιβλία και στα φύλλα δεδομένων των μηχανών ως 'pull out torque'.

Μια βηματική μηχανή στην περίπτωση που ο ρότορας παραμένει ακίνητος μπορεί να κρατήσει τον συγχρονισμό της σε φορτία που περιγράφονται από τη στατική ροπή του κινητήρα για κάθε είδος οδήγησης. Όταν όμως ένας βηματικός κινητήρας καλείται να προοδεύσει κατά κάποιον αριθμό βημάτων ο υπολογισμός της ροπής σύγχρονης λειτουργίας γίνεται με διαφορετικό τρόπο.

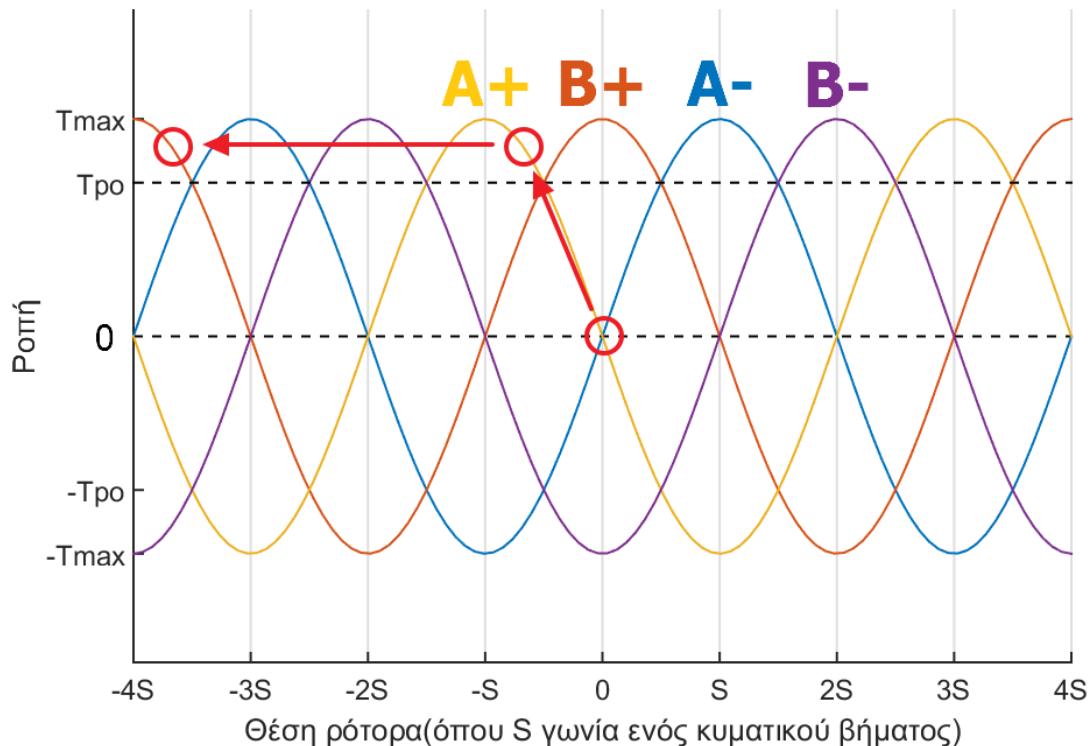
Έστω ότι ένας διφασικός υβριδικός κινητήρας πρόκειται να κινηθεί κατά τέσσερα βήματα με βάση την κυματική οδήγηση, αρχική θέση 0 ακτίνια και με πολύ αργή ταχύτητα. Η συμπεριφορά της ροπής που πρόκειται να παραχθεί από τις φάσεις κατά τα βήματα αυτά φαίνεται στην εικόνα 1.38. Αρχικά, η φάση A είναι ενεργοποιημένη θετικά, στην συνέχεια θα ενεργοποιηθεί η B θετικά, έπειτα η A αρνητικά (δηλαδή με αντίθετη τάση στα άκρα της) και τέλος η B αρνητικά. Σε κάθε βήμα μόνο μια φάση είναι ενεργή και παράγεται αντίστοιχη ροπή, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Διάγραμμα ροπής θέσης δυο φάσεων κατά θετική και αρνητική ενεργοποίηση (Εικ. 1.38)

Στην εικόνα 1.39 ένα φορτίο μεγαλύτερο της ροπής σύγχρονης λειτουργίας αλλά μικρότερο της μέγιστης ροπής εφαρμόζεται στον ρότορα. Ο ρότορας στρέφεται κατά γωνία μικρότερη του S ώστε η παραγόμενη ροπή να αντισταθμίσει το φορτίο. Με την πρόοδο του βήματος η φάση A απενεργοποιείται και η φάση B ενεργοποιείται θετικά. Η καινούρια κατάταξη της ροπής στον κινητήρα περιγράφεται από την κόκκινη καμπύλη στο σχήμα. Είναι φανερό πως η παραγόμενη ροπή από τη φάση B σε εκείνη τη θέση δεν είναι αρκετή για να υποστηρίξει πλέον το φορτίο. Ο ρότορας πιθανώς να ισορροπήσει σε κάποια θέση που όμως δεν είναι η επιθυμητή. Έτσι ο κινητήρας χάνει τον συγχρονισμό του.

Από αυτό το παράδειγμα είναι φανερό πως αν και μια φάση είναι σε θέση να συγκρατήσει ένα φορτίο, ο κινητήρας δεν είναι σε θέση να δουλέψει διατηρώντας τον συγχρονισμό του για το ίδιο φορτίο, εάν αυτό υπερβαίνει τη ροπή σύγχρονης λειτουργίας του κινητήρα – pull out torque.



Συμπεριφορά κινητήρα υπό φορτίο μεγαλύτερο της ροπής σύγχρονης λειτουργίας κατά αργή πρόοδο βημάτων (Εικ. 1.39)

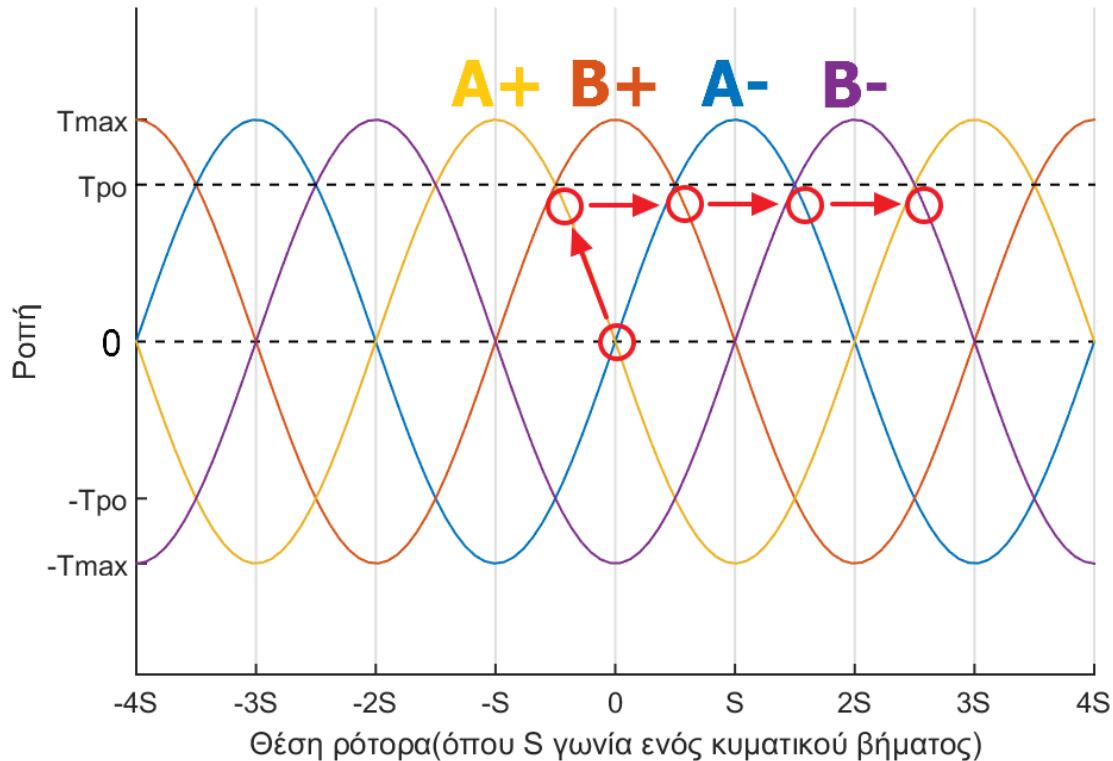
Για τον υπολογισμό της ροπής σύγχρονης λειτουργίας σε αυτήν την περίπτωση ισχύει η σχέση:

$$T_{po} = \frac{\sqrt{2}}{2} T_{Phase} \approx 0.707 T_{Phase} \quad (1.10)$$

Όπου

T_{Phase} : Ροπή συγκράτησης μιας πλήρως ενεργοποιημένης φάσης
 T_{po} : Ροπή σύγχρονης λειτουργίας του κινητήρα

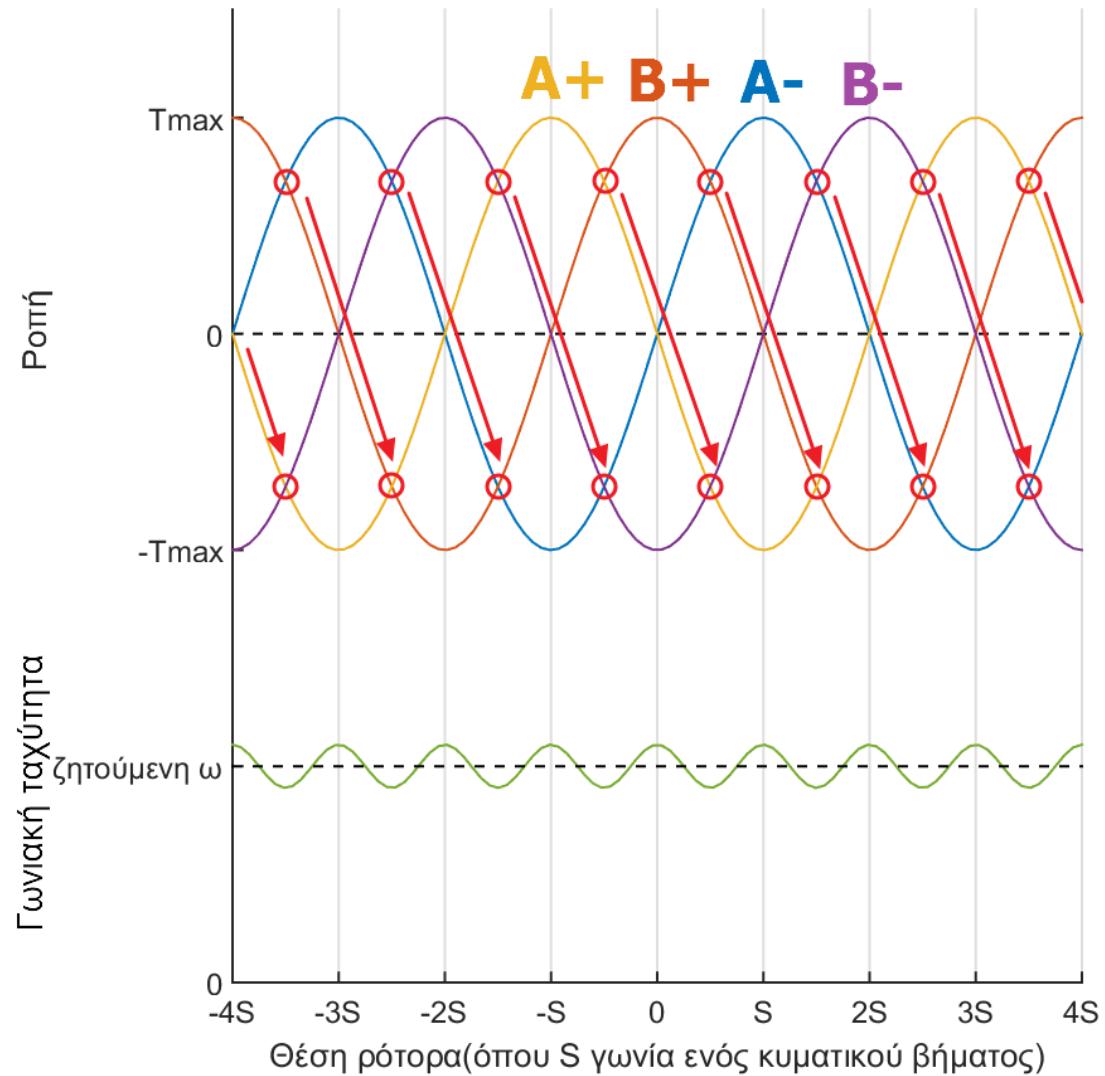
Στην εικόνα 1.40 παρουσιάζεται αντίστοιχο παράδειγμα στο οποίο όμως η τιμή του φορτίου παραμένει μικρότερη της ροπής σύγχρονης λειτουργίας του κινητήρα. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, μετά την εφαρμογή του φορτίου ο ρότορας κινείται υπό γωνία μικρότερη του S ώστε να αναπτυχθεί η κατάλληλη ροπή από τον κινητήρα. Με την πρόοδο του βήματος η φάση A απενεργοποιείται και η φάση B ενεργοποιείται θετικά οπότε και πάλι η καινούρια κατάταξη της ροπής στον κινητήρα περιγράφεται από την κόκκινη καμπύλη στο σχήμα. Σε αυτήν την περίπτωση η ροπή είναι αρκετή για να κινήσει το φορτίο στην ζητούμενη θέση. Έτσι ο ρότορας κινείται στις σωστές θέσεις σύμφωνα με την οδήγηση και δεν χάνει τον συγχρονισμό του.



Συμπεριφορά κινητήρα υπό φορτίο μικρότερο της ροπής σύγχρονης λειτουργίας κατά αργή πρόοδο βημάτων (Εικ. 1.40)

Ο κινητήρας είναι σε θέση να παράξει ροπή T_{po} σε οποιαδήποτε θέση βρίσκεται ο ρότορας ενεργοποιώντας την κατάλληλη φάση. Παρόλα αυτά ο μέσος όρος ροπής που ο κινητήρας μπορεί να παράξει είναι μεγαλύτερος από αυτήν την τιμή.

Η περίσσεια ροπής που δεν αξιοποιήθηκε στον προηγούμενο υπολογισμό σύγχρονης λειτουργίας μπορεί να αξιοποιηθεί όταν ο ρότορας αναπτύσσει ταχύτητα. Με την παραδοχή πως η ροπή αδράνειας του ρότορα και του φορτίου είναι αρκετά μεγάλη ώστε η ταχύτητα να μένει σχετικά σταθερή, είναι δυνατό να υποστηριχτεί μεγαλύτερο φορτίο από τον κινητήρα. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι μηδενικό, κάθε φάση παράγει κατά μέσο όρο μηδενική ροπή ώστε η μέση ταχύτητα να παραμένει σταθερή (Εικ. 1.41).



Συμπεριφορά κινητήρα υπό μηδενικό φορτίο και πρόοδο βημάτων
με σκοπό προσέγγιση ταχύτητας ω (Εικ. 1.41)

Καθώς το φορτίο αυξάνεται ο ρότορας καθυστερεί ή προοδεύει στην κίνησή του με αποτέλεσμα να εκμεταλλεύεται αντίστοιχα μεγαλύτερο μέρος της θετικής ή αρνητικής ροπής που είναι διαθέσιμη από τις φάσεις. Στο σχήμα 1.42 εφαρμόζεται φορτίο $LOAD=T_{ro}$ και ο ρότορας καθυστερεί κατά S σε σχέση με την κίνηση του στο σχήμα 1.41. Η καθυστέρηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εκμετάλλευση της μέγιστης δυνατής θετικής ροπής του κινητήρα σε κάθε βήμα.

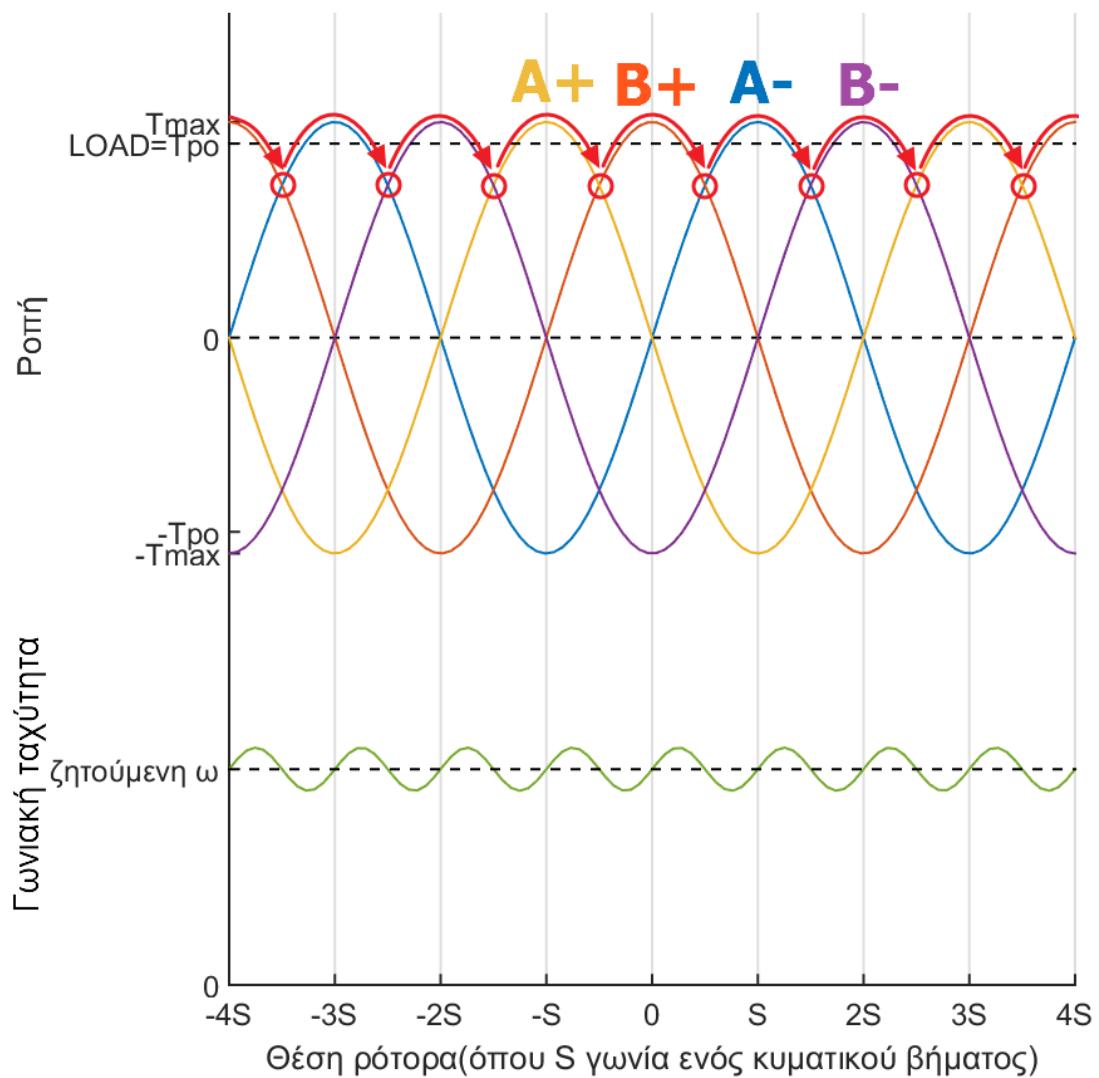
Σε αυτήν την περίπτωση, η ροπή σύγχρονης λειτουργίας για κυματική μέθοδο οδήγησης για έναν διφασικό υβριδικό βηματικό κινητήρα υπολογίζεται με βάση τον μέσο όρο ροπής που παράγει μια φάση. Έτσι είναι π.χ. για την φάση B+ στο σχήμα 1.42:

$$T_{po} = \frac{\int_{-S/2}^{S/2} T_{Phase} \cos\left(\frac{\pi}{2S}\theta\right)}{S/2 - (-S/2)} = \frac{\int_{-\pi/4p}^{\pi/4p} T_{Phase} \cos(p\theta)}{\pi/4p - (-\pi/4p)} \approx 0.9T_{Phase} \quad (1.11)$$

*Για απαλοιφή του S χρησιμοποιήθηκε η σχέση 3.4

Όπου

- T_{Phase} : Ροπή συγκράτησης μιας πλήρως ενεργοποιημένης φάσης
- T_{po} : Ροπή σύγχρονης λειτουργίας του κινητήρα
- S : Βήμα κατά κυματική οδήγηση σε ακτίνια
- p : Πλήθος ακμών του ρότορα
- θ : Γωνιακή θέση ρότορα σε ακτίνια

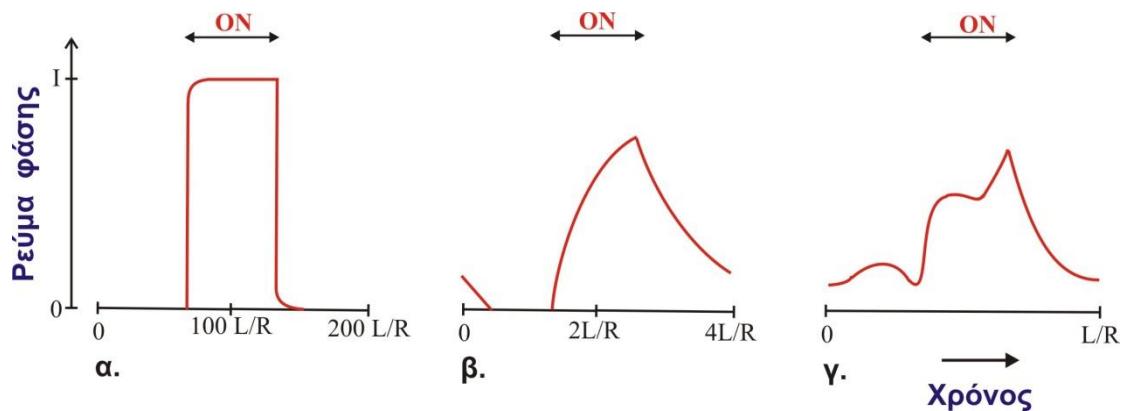


Συμπεριφορά κινητήρα υπό φορτίο ίσο με τη ροπή σύγχρονης λειτουργίας
και πρόσθιο βημάτων με σκοπό προσέγγιση ταχύτητας ω (Εικ. 1.42)

Καθώς ο ρυθμός προόδου των βημάτων αυξάνεται, κάθε φάση διεγείρεται μόνο για ένα σύντομο χρονικό διάστημα με συνέπεια ο χρόνος ανάπτυξης του ρεύματος στις φάσεις να αποτελεί σημαντικό ποσοστό της περιόδου κάθε βήματος. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε υψηλότερες ταχύτητες το ρεύμα σε κάθε φάση μπορεί ακόμη και να μην έχει τον χρόνο να φτάσει στην ονομαστική του μέγιστη τιμή πριν το διάστημα διέγερσης τελειώσει και η φάση απενεργοποιηθεί. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για την ελάττωση και μηδενισμό του ρεύματος φάσης καθίσταται σημαντικός. Μετά την απενεργοποίηση του διακόπτη-τρανζίστορ του οδηγού η φάση θεωρείται απενεργοποιημένη αλλά συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα μέσω της διόδου ελεύθερης ροής λόγω της επαγωγικής της φύσης. Συνεπώς η ροπή στρέψης μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα για δύο λόγους:

1. Τα ρεύματα φάσης είναι χαμηλότερα και έτσι η ροπή του κινητήρα που παράγεται σε οποιαδήποτε θέση του ρότορα είναι μικρότερη
2. Οι φάσεις παραμένουν μερικώς ενεργές μετά την απενεργοποίησή τους από τον οδηγό με συνέπεια να παράγουν αρνητική ροπή

Ο υπολογισμός της ροπής σύγχρονης λειτουργίας σε υψηλές ταχύτητες περιπλέκεται από τις παραλλαγές στο ρεύμα κατά τη διάρκεια του χρόνου διέγερσης κάθε φάσης, γεγονός που σημαίνει ότι δεν υπάρχει πλέον κάποια απλή σχέση μεταξύ της στατικής ροπής ρότορα και της ροπής σύγχρονης λειτουργίας.



Τυπικές κυματομορφές ρεύματος κατά την ενεργοποίηση μιας φάσης σε
α. χαμηλές, β. μέτριες και γ. υψηλές ταχύτητες (Εικ. 1.43)

Σε πολύ υψηλές ταχύτητες λειτουργίας πρέπει να ληφθεί υπόψη η τάση που επάγεται στις περιελίξεις των φάσεων από την κίνηση του ρότορα. Η επίδραση αυτών των επαγόμενων τάσεων μπορεί να παρατηρηθεί στην εικόνα γ του σχήματος 1.43, στην οποία η κυματομορφή δεν μπορεί να περιγραφεί με όρους μιας απλής εκθετικής αύξησης και μείωσης. Όταν η φάση ενεργοποιείται, είναι δυνατόν να μειωθεί το ρεύμα από την επαγόμενη τάση, η οποία είναι στη μέγιστη θετική της τιμή όταν διεγείρεται η φάση. Παρομοίως, όταν η φάση απενεργοποιείται, το ρεύμα μπορεί να αυξηθεί στιγμιαία καθώς η επαγόμενη τάση περνά από την μέγιστη αρνητική της τιμή εκείνη την στιγμή. Ως αποτέλεσμα, η ανάλυση των πλήρων χαρακτηριστικών ροπής σύγχρονης λειτουργίας και ταχύτητας πρέπει να περιλαμβάνει τις επιδράσεις των τάσεων που προκαλούνται στις περιελίξεις από τον περιστρεφόμενο ρότορα.

Η πεπλεγμένη μαγνητική ροή που συνδέει τις φάσεις Α και Β με τον ρότορα σε σχέση με την θέση του ρότορα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\psi_A = \psi_M \sin(p\theta) \quad (1.12\alpha)$$

$$\psi_B = \psi_M \sin(p\theta - \pi/2) \quad (1.12\beta)$$

Όπου

- ψ_A : Πεπλεγμένη μαγνητική ροή από ρότορα σε φάση Α
- ψ_B : Πεπλεγμένη μαγνητική ροή από ρότορα σε φάση Β
- ψ_M : Μέγιστη πεπλεγμένη μαγνητική ροή ανάμεσα σε φάση και ρότορα
- θ : Θέση ρότορα
- p : Πλήθος ακμών του ρότορα

Όταν ο ρότορας κινείται με γωνιακή ταχύτητα $d\theta/dt$ η επαγόμενη τάση στα τυλίγματα των φάσεων είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάσεις και ρότορα:

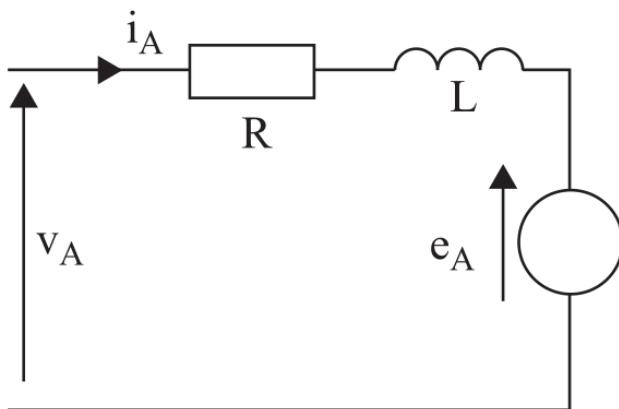
$$e_A = d\psi_A/dt = p\psi_M \cos(p\theta) d\theta/dt \quad (1.13\alpha)$$

$$e_B = d\psi_B/dt = p\psi_M \cos(p\theta - \frac{\pi}{2}) d\theta/dt \quad (1.13\beta)$$

Όπου

- e_A : Επαγόμενη τάση σε φάση Α
- e_B : Επαγόμενη τάση σε φάση Β
- $d\theta/dt$: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα

Στο σχήμα 1.44 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα της φάσης Α του υβριδικού κινητήρα. Τα στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται είναι μια σταθερή αντίσταση, ένα πηνίο σταθερής επαγωγής και μια μεταβαλλόμενη πηγή τάσης σε σειρά. Η πηγή τάσης αντιπροσωπεύει την επαγόμενη τάση από τον ρότορα.



Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος μιας φάσης ενός υβριδικού βηματικού κινητήρα (Εικ. 1.44)

Ένας πλήρης κύκλος διέγερσης στην κυματική οδήγηση αποτελείται από τέσσερα βήματα που αντιστοιχούν στη διέγερση κάθε φάσης από ρεύμα μιας φοράς και της αντίθετής της. Εάν ο κινητήρας προοδεύει βήματα με συχνότητα f , τότε ο κύκλος διέγερσης επαναλαμβάνεται σε συχνότητα $f/4$ και συνεπώς η γωνιακή συχνότητα του κύκλου διέγερσης είναι:

$$\omega = 2\pi \times (f/4) = \pi f/2 \quad (1.14)$$

Κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου διέγερσης ο ρότορας περιστρέφεται ένα βήμα δοντιού ($=2\pi/p$) σε χρόνο $2\pi/\omega$, έτσι η μέση γωνιακή ταχύτητα του δρομέα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\text{distance}}{\text{time}} = (2\pi/p)/(2\pi/\omega) = \frac{\omega}{p} \quad (1.15)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον χρόνο προκύπτει:

$$p\theta = \omega t - \delta \quad (1.16)$$

όπου το δ είναι μια σταθερά ολοκλήρωσης γνωστή ως γωνία φορτίου. Αυτή η γωνία αντιπροσωπεύει την υστέρηση του δρομέα πίσω από τη θέση ισορροπίας των φάσεων καθώς αυξάνεται το φορτίο στον κινητήρα.

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 1.15, 1.16 η σχέση 1.13α μπορεί να γραφεί ως:

$$e_A = \omega \psi_M \cos(\omega t - \delta) \quad (1.17)$$

Για τον υπολογισμό της ροπής σύγχρονης λειτουργίας είναι απαραίτητη μια έκφραση της εφαρμοζόμενης τάσης στις φάσεις. Η τάση που εφαρμόζεται σε κάθε κύκλωμα φάσης είναι μια πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί με θετική ή αρνητική φορά ή να απενεργοποιηθεί. Αυτή η εναλλασσόμενη παροχή εισάγει μια μη γραμμικότητα, η οποία μπορεί να εξαλειφθεί λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον πρώτο αρμονικό όρο της τάσης και του ρεύματος κατά ανάλυση Φουριέ. Έτσι για την εφαρμοζόμενη τάση είναι:

$$v_A = V \cos(\omega t) \quad (1.18\alpha)$$

$$v_B = V \cos(\omega t - \pi/2) \quad (1.18\beta)$$

$$V = 0.9V_{DC} \quad (1.19)$$

Όπου

- v_A : 1^η αρμονική τάση σε φάση A
- v_B : 1^η αρμονική τάση σε φάση B
- V : Πλάτος ταλάντωσης πρώτου αρμονικού όρου με τεχνική κυματικής οδήγησης
- V_{DC} : Τάση πηγής
- ω : Γωνιακή ταχύτητα κύκλου διέγερσης

Ο 1^{o} αρμονικός όρος του ρεύματος της φάσης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I_A = I \cos(\omega t - \delta - \alpha) \quad (1.20)$$

Όπου

- I_A : 1^η αρμονική ρεύματος σε φάση A
- I : Πλάτος ταλάντωσης πρώτου αρμονικού όρου
- α : Διαφορά φάσης

Σύμφωνα με τον 2^{o} νόμο του Κίρχοφ για το ισοδύναμο κύκλωμα της φάσης A στο σχήμα 1.44 ισχύει:

$$v_A = RI_A + L(dI_A/dt) + e_A \quad (1.21)$$

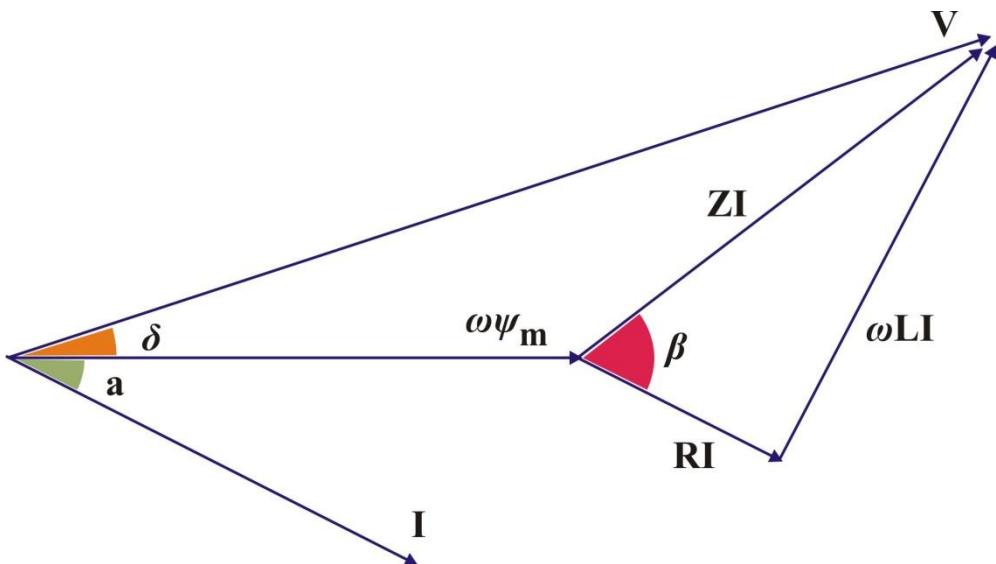
Όπου

- R : Αντίσταση φάσης
- L : Σταθερά επαγωγής φάσης

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τους πρώτους αρμονικούς όρους ρεύματος και τάσης προκύπτει:

$$v_A = RI \cos(\omega t - \delta - \alpha) - \omega LI \sin(\omega t - \delta - \alpha) + \omega \psi_M \cos(\omega t - \delta) \quad (1.22)$$

Όλες οι τριγωνομετρικές συναρτήσεις στην παραπάνω εξίσωση χαρακτηρίζονται από ίση γωνιακή ταχύτητα ω . Γι' αυτόν τον λόγο είναι εφικτό με βάση την σχέση 1.22 να κατασκευαστεί το διανυσματικό διάγραμμα για τον διφασικό υβριδικό βηματικό κινητήρα. Κάθε όρος του δεξιού μέλους αναπαριστάται ως διάνυσμα μήκους ίσου με το πλάτος του και κατεύθυνσης ανάλογης της διαφοράς φάσης τους:



Διανυσματικό διάγραμμα για τον υβριδικό βηματικό κινητήρα (Εικ.1.45)

Στο παραπάνω διάγραμμα είναι:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

$$\beta = \tan^{-1}(\omega L / R)$$

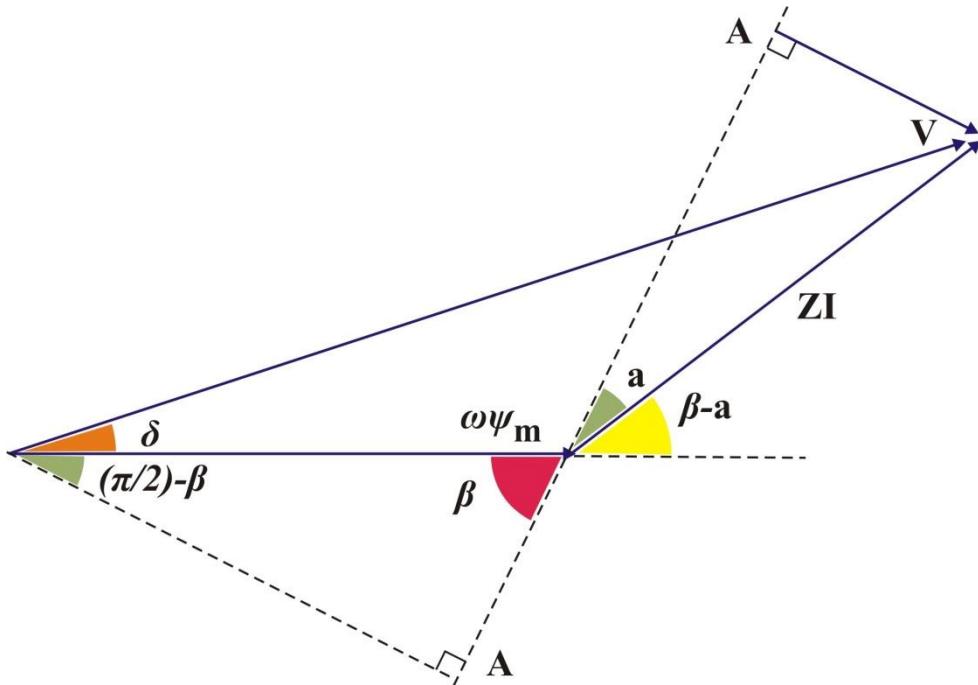
Η μηχανική ισχύς εξόδου της φάσης A μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο τάσης e_A και ρεύματος I_A (χρησιμοποιείται η ιδιότητα $2 \cos(a) \cos(b) = \cos(a+b) + \cos(a-b)$):

$$\begin{aligned} e_A I_A &= \omega \psi_M \cos(\omega t - \delta) I \cos(\omega t - \delta - \alpha) \\ &= \frac{\omega \psi_M I \cos(a)}{2} + \frac{\omega \psi_M I \cos(2\omega t - 2\delta - \alpha)}{2} \quad (1.23) \end{aligned}$$

Εφόσον ο ρότορας και το φορτίο έχουν αρκετά μεγάλη ροπή αδράνειας ώστε οι ταλαντώσεις στην ταχύτητα να παραμένουν μικρές, από τους δυο παραπάνω όρους της εξίσωσης 1.23 ο όρος που εξαρτάται από τον χρόνο μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος για τον υπολογισμό της μέσης μηχανικής ισχύος εξόδου. Στην προκειμένη περίπτωση ο κινητήρας έχει δύο φάσεις οπότε η μέση μηχανική ισχύς εξόδου θα είναι:

$$\text{μέση μηχανική ισχύς εξόδου} = \omega \psi_M I \cos(a) \quad (1.24)$$

Πρέπει να βρεθεί μια έκφραση για το $I \cos(a)$. Στο διανυσματικό διάγραμμα χαράσσεται η ευθεία AA'. Τα διανύσματα ZI, $\omega \psi_M$ και V προβάλλονται πάνω στην ευθεία AA' και έτσι:



Τεχνική ανάλυσης στο διανυσματικό διάγραμμα για την έκφραση του $I \cos(a)$ (Εικ. 1.46)

$$AA' = V \sin(\pi/2 - \beta + \delta) = \omega \psi_M \cos(\beta) + ZI \cos(\alpha)$$

Οπότε προκύπτει:

$$\begin{aligned} I \cos(\alpha) &= [V \sin(\pi/2 - \beta + \delta) - \omega \psi_M \cos(\beta)] / Z \\ &\Rightarrow I \cos(\alpha) = [V \cos(\beta - \delta) - \omega \psi_M \cos(\beta)] / Z \quad (1.25) \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας τώρα την σχέση 1.25 στην σχέση 1.24 προκύπτει:

$$\text{μέση μηχανική ισχύς εξόδου} = [\omega \psi_M V \cos(\beta - \delta) - \omega^2 \psi_M^2 \cos(\beta)] / Z \quad (1.26)$$

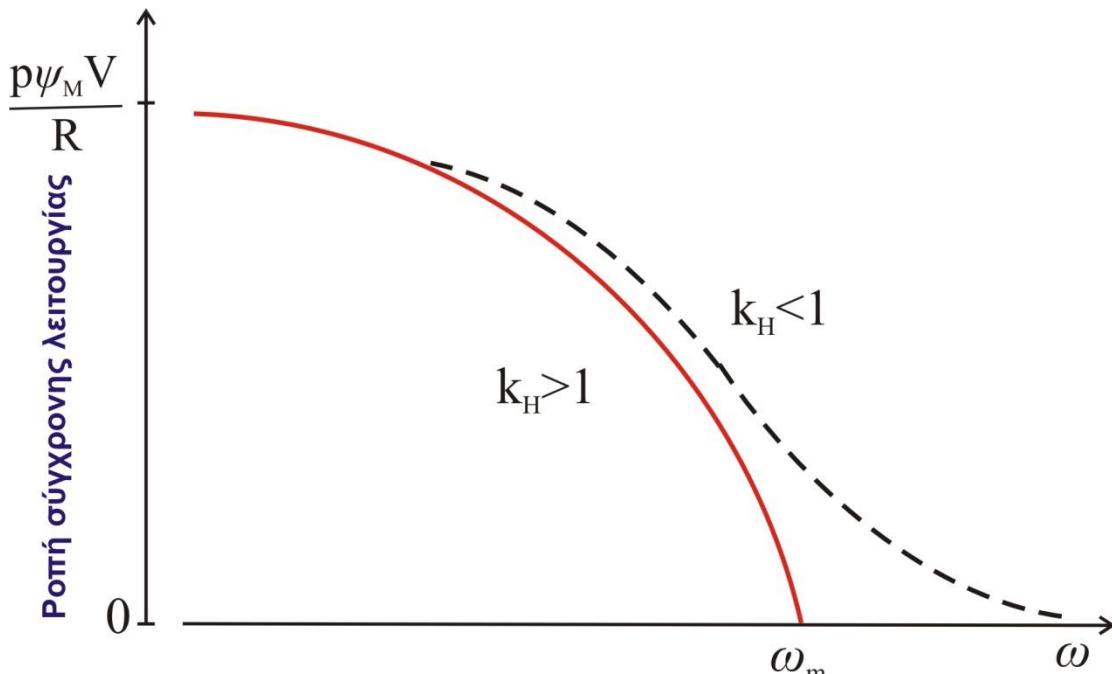
Η ροπή πλέον μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο ροπή = ισχύ/ταχύτητα. Η ταχύτητα του ρότορα είναι ίση με $1/p$ επί της γωνιακής ταχύτητας του κύκλου διέγερσης. Συμπερασματικά είναι:

$$\text{ροπή} = \text{ισχύ}/\text{ταχύτητα} = p[\psi_M V \cos(\beta - \delta) - \omega \psi_M^2 \cos(\beta)] / Z \quad (1.27)$$

Όταν το μέγιστο δυνατό φορτίο εφαρμόζεται στον ρότορα αυτός καθυστερεί στην κίνηση του κατά γωνία δ ώστε η ροπή να παίρνει την μέγιστη δυνατή τιμή. Για τον υπολογισμό της ροπής σύγχρονης λειτουργίας λοιπόν αρκεί να βρεθεί για ποια γωνία δ μεγιστοποιείται η ροπή. Παρατηρείται πως η σχέση 1.27 παίρνει μεγίστη τιμή για $\delta = \beta$, έτσι:

$$\begin{aligned} \text{Ροπή σύγχρονης λειτουργίας} &= p[\psi_M V - \omega \psi_M^2 \cos(\beta)] / Z \\ &= \frac{p \psi_M V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} - \frac{p \omega \psi_M^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} \end{aligned} \quad (1.28)$$

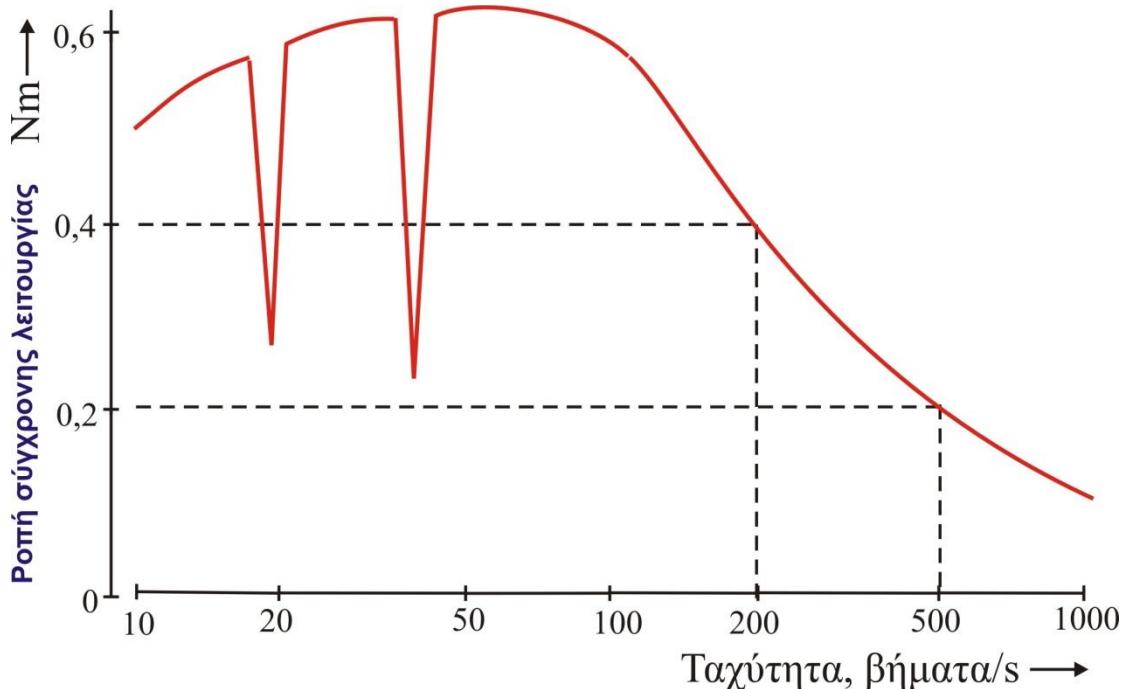
Η παραπάνω εξίσωση αν και φαίνεται να είναι περίπλοκη δίνει μια πολύ απλή χαρακτηριστική καμπύλη η οποία φαίνεται στο σχήμα 1.47.



Το k_H είναι μια σταθερά του κινητήρα και υπολογίζεται από την σχέση:

$$k_H = \psi_M R / VL$$

Συνδυάζοντας τους παραπάνω υπολογισμούς της ροπής σύγχρονης λειτουργίας για μικρές μέτριες και μεγάλες ταχύτητες η χαρακτηριστική καμπύλη παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1.48.



Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας υβριδικού βηματικού κινητήρα (Εικ. 1.48)

Οι απότομες πτώσεις στην ροπή σύγχρονης λειτουργίας που παρατηρούνται στο διάγραμμα στις ταχύτητες των 20 και 40 βημάτων/δευτερόλεπτο οφείλονται σε φαινόμενα συγχρονισμού με φυσικές συχνότητες ταλάντωσης του κινητήρα. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται κυρίως όταν εφαρμόζονται τεχνικές οδήγησης μικρής ευκρίνειας όπως αυτές των ολοκλήρων ή μισών βημάτων. Όσο η ανάλυση της οδήγησης αυξάνεται τόσο λιγότερο επηρεάζεται το διάγραμμα ροπής σύγχρονης λειτουργίας από φαινόμενα συγχρονισμού και για αυτόν τον λόγο δεν θα αναλυθούν. Για περαιτέρω έρευνα του φαινομένου ο αναγνώστης παραπέμπεται στο βιβλίο 'Stepping Motors, a guide to theory and practice' του συγγραφέα Paul Acarnley [πηγή 3].

5. The NEMA standard

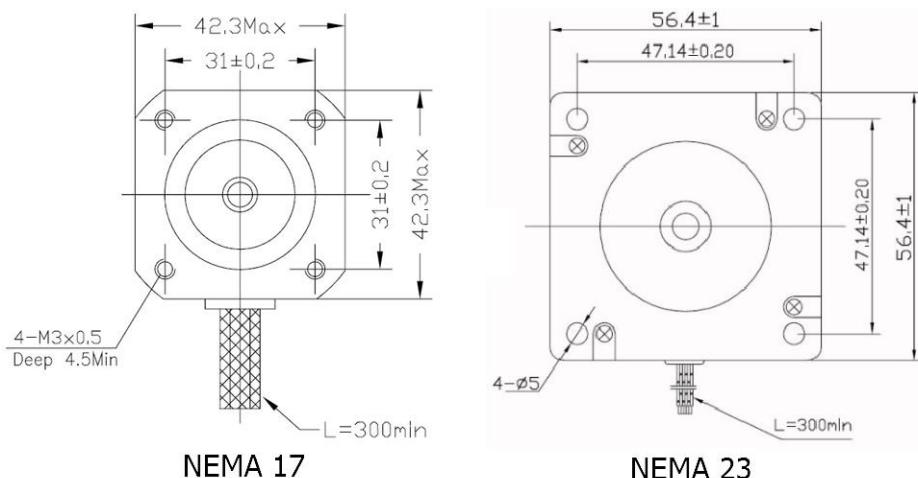
Το πρώτο χαρακτηριστικό με το οποίο έρχεται σε επαφή κάποιος που ασχολείται με βηματικούς κινητήρες είναι το πρότυπο NEMA. Στην αγορά οι βηματικοί κινητήρες πάντα έχουν τη λέξη NEMA και έναν αριθμό που την ακολουθεί στον τίτλο τους.

Η NEMA (National Electrical Manufacturers Association) είναι ένας οργανισμός που ιδρύθηκε το 1926 και αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες εμπορικές ενώσεις κατασκευαστών ηλεκτρολογικού εξοπλισμού στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Αποτελείται από περίπου 350 εταιρείες που παράγουν προϊόντα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή, τον έλεγχο και την τελική χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Εκτός από τις δραστηριότητες της σε πολιτικό επίπεδο, η NEMA έχει δημοσιεύσει περισσότερα από 700 πρότυπα, οδηγούς εφαρμογής, και τεχνικά έγγραφα. Μεταξύ των κυριότερων προτύπων είναι τα πρότυπα για ηλεκτρικά περιβλήματα, κινητήρες και βύσματα AC. Οι οδηγοί NEMA χρησιμοποιούνται ευρέως στη Βόρεια Αμερική και σε ορισμένες άλλες χώρες.

Από το 1984 η συγκεκριμένη ένωση καθόρισε μια σειρά προδιαγραφών για μεγέθη, διαστασιολόγηση και προδιαγραφές κινητήρων. Το πρότυπο NEMA ICS 6-1993 [πηγή 7] περιγράφει βηματικούς κινητήρες και είναι το πρότυπο NEMA που συνήθως αναφέρεται όταν μιλάμε για αυτούς.

Τα συχνότερα εμφανιζόμενα ονόματα στο εμπόριο είναι οι κινητήρες NEMA 17 και NEMA 23 (Εικ. 1.49). Όπως αναφέρεται και στη συνέχεια αυτός ο χαρακτηρισμός αναφέρεται στο μέγεθος της μπροστινής επιφάνειας της μηχανής. Στην παράγραφο 4.3.1.1 αυτού του προτύπου, η NEMA επέλεξε να συσχετίσει τη σήμανση των βηματικών κινητήρων (π.χ. "NEMA 17") με το δέκατο των ίντσών του μεγέθους της πρόσοψής τους. Συμπερασματικά, μια μηχανή NEMA 17 έχει μπροστινή επιφάνεια διαστάσεων περίπου 1.7" επί 1.7" ή 43.18mm επί 43.18mm. Αντίστοιχα μια μηχανή NEMA 23 έχει μπροστινή επιφάνεια διαστάσεων περίπου 2.3" επί 2.3" ή 58.42mm επί 58.42mm.



Διαστάσεις βηματικών κινητήρων τύπου NEMA 17 και 23 (Εικ. 1.49)

Η ονομασία NEMA μιας βηματικής μηχανής μπορεί να περιγράφει πολύ περισσότερα από το μέγεθος της μπροστινής της όψης. Ολόκληρο το όνομα NEMA μιας βηματικής μηχανής γράφεται όπως παρακάτω:

NEMA DDMMLLL-CCCIVVVSSSW

όπου τα γράμματα συμβολίζουν ιδιότητες που εξηγούνται στον επόμενο πίνακα:

Γράμματα	Χαρακτηριστικό	Μονάδα
DD	Μέγεθος μπροστινής όψης	ίντσες·10
MM	Είδος πρόσδεσης	C : με υποδοχές D : Πρόσοψη με οπές με σπείρωμα CD : Πρόσοψη με οπές
LLL	Μήκος	ίντσες·10
CCC	Ρεύμα φάσης	Αμπέρ·10
I	Τάξη μόνωσης	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: A : 221 °F (105 °C); B : 266 °F (130 °C); F : 311 °F (155 °C); H : 356 °F (180 °C) Η κατηγορία B είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος για κινητήρες 60 κύκλων στις ΗΠΑ Η κλάση F είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος για κινητήρες 50 κύκλων. Σε γενικές γραμμές, η υπέρβαση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά 10 ° F θα μειώσει τη ζωή του κινητήρα κατά το ήμισυ.
VVV	Τάση φάσης	Volts·10
SSS	Ευκρίνεια	Βήματα ανά περιστροφή
W	Κωδικός τυλιγμάτων	Πόσα εξωτερικά καλώδια συνδέονται με τα εσωτερικά τυλίγματα: A : 2 καλώδια B : 3 καλώδια C : 4 καλώδια D : 5 καλώδια E : 6 καλώδια F : 8 καλώδια

Μερικά παραδείγματα:

- NEMA 34: βηματικός κινητήρας διάστασης μπροστινής όψης 3.4" επί 3.4"
- NEMA 34D: βηματικός κινητήρας διάστασης μπροστινής όψης 3.4" επί 3.4", με χρήση φλάντζας.
- NEMA 34CD: βηματικός κινητήρας διάστασης μπροστινής όψης 3.4" επί 3.4", με χρήση φλάντζας και οπές με σπείρωμα στην μπροστινή του όψη.
- NEMA 34D016: βηματικός κινητήρας διάστασης μπροστινής όψης 3.4" επί 3.4" και μήκους 1.6", με χρήση φλάντζας.
- NEMA 34D016-016B053200A: βηματικός κινητήρας διάστασης μπροστινής όψης 3.4" επί 3.4"" και μήκους 1.6", με φλάντζα, έχει ρεύμα φάσης 1.6 A, τάξης μόνωσης B, 5.3 V τάση φάσης, 200 βήματα ανά περιστροφή, και σύνδεσης τυλιγμάτων τύπου A.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως μια μηχανή π.χ. NEMA 23 δεν είναι κατά κανόνα πιο ισχυρή από μια τύπου NEMA 17. Το μόνο καθορισμένο είναι πως έχουν διαφορετικές διαστάσεις.

Ο κύριος λόγος εφαρμογής του προτύπου NEMA ICS 6 είναι η επίτευξη συμβατότητας μεταξύ των μηχανών και των εφαρμογών τους. Το πρότυπο κάνει την αντικατάσταση μιας βηματικής μηχανής από άλλη ίδιου τύπου λιγότερο περίπλοκη. Οι αναβαθμίσεις και οι επισκευές γίνονται πολύ πιο εύκολες χωρίς την ανάγκη για αλλαγή της βάσης ή τροποποίησης στο σασί της εγκατάστασης, εφόσον η μηχανή επιλεγεί κατάλληλα.

6. Fields of application of stepper motors

Ο βηματικός κινητήρας δεν είναι ιδανικός σε κάθε εφαρμογή, αλλά σε σωστό περιβάλλον μπορεί να εμφανίσει πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, οι βηματικοί κινητήρες διατηρούν τη μέγιστη τους ροπή ακόμα και σε στάση. Επίσης, η γωνία περιστροφής του κινητήρα είναι ανάλογη προς τον παλμό εισόδου. Ουσιαστικά, οι βηματικοί κινητήρες προσφέρουν εξαιρετικό έλεγχο ταχύτητας, ακρίβεια τοποθέτησης και επαναληψιμότητα της κίνησης χωρίς να είναι αναγκαία η χρήση ενός κλειστού βρόχου ελέγχου. Μια από τις κύριες αδυναμίες του βηματικού κινητήρα είναι η κακή του επίδοση σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Επίσης η απόδοση τους από άποψη ενέργειας είναι υποδεέστερη σε σχέση με άλλους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Τα παραπάνω κύρια χαρακτηριστικά που διατυπώνονται πιο αναλυτικά και σε προηγούμενες ενότητες είναι ο λόγος για τον οποίο οι συγκεκριμένοι κινητήρες εμφανίζονται σήμερα σε πολλά τεχνολογικά προϊόντα προς το ευρύ κοινό. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα αποτελούν και έναν από τους λόγους για τον οποίο προϊόντα όπως οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές εξελίχθηκαν ραγδαία και είναι πλέον διαθέσιμα προς τον μέσο πολίτη.

Πέρα από εφαρμογές σε εμπορικά προϊόντα οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να εντοπιστούν και σε πιο εξειδικευμένους τομείς. Μεγάλα κέντρα επεξεργασίας CNC ή ιατρικά μηχανήματα απεικόνισης, μηχανήματα συγκόλλησης, αυτόματες μηχανές κλωστοϋφαντουργίας, αυτόματοι πωλητές είναι μερικά από τα παραδείγματα εφαρμογής τους σε αυτήν την περίπτωση.

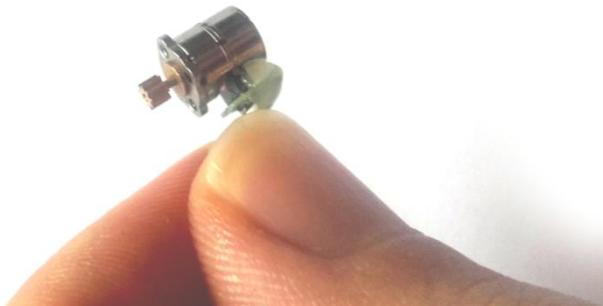
Η ανάγκη για ακριβείς κινήσεις που έχει αυξηθεί μέσα από την αυτοματοποίηση στην βιομηχανία αλλά και στην καθημερινή ζωή, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης. Η αυξανόμενη χρήση αυτών των κινητήρων στις μηχανές συσκευασίας και τιτλοφόρησης και η αυξανόμενη διείσδυση αντίστοιχων αδιάβροχων εκδοχών τους σε διάφορους τομείς εφαρμογής είναι δύο βασικές τάσεις που παρατηρήθηκαν στην αγορά στα μέσα της τελευταίας δεκαετίας.

Η επιλογή ενός βηματικού κινητήρα για μια εφαρμογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις ροπής και ταχύτητας της εφαρμογής καθώς και από τις απαιτήσεις ευκρίνειας της κίνησης. Χρησιμοποιώντας την καμπύλη ροπής στροφών του κινητήρα και τις πληροφορίες περί ευκρινείας που διατίθεται στα φύλλα δεδομένων κάθε μονάδας μπορεί να διαπιστωθεί αν ένας συγκεκριμένος κινητήρας είναι κατάλληλος για κάθε εργασία.

Ακολουθούν μερικά παραδείγματα χρήσης βηματικών κινητήρων.

Σε συστήματα αυτοκινήτων και αεροσκαφών βηματικοί κινητήρες βοηθούν στον αυτόματο έλεγχο ταχύτητας ταξιδιού, τον προσανατολισμό σε στρατιωτικές κεραίες και σε αυτοματοποιημένες κάμερες. Στα αεροσκάφη, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε όργανα αεροσκαφών, διάφορους αισθητήρες και κεραίες.

Σε σύγχρονες ψηφιακές κάμερες βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για την αυτόματη εστίαση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και σε λειτουργίες ζουμ. Οι κινητήρες ρυθμίζουν τις αποστάσεις των οπτικών φακών εστίασης. Στην προκειμένη περίπτωση οι κινητήρες είναι μικρού μεγέθους και μικρής ισχύος, αφού το φορτίο που κινούν είναι οπτικοί φακοί (Εικ. 1.50).



Βηματικός κινητήρας μικρού μεγέθους για χρήση σε κάμερες (Εικ. 1.50)

Στην βιομηχανία τυχερών παιχνιδιών οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται στους μηχανισμούς λειτουργίας τυχερών τροχών και σε αυτόματα μηχανήματα για ανακάτεμα χαρτιών.

Στον τομέα της χημείας συσκευές ανάμιξης και δειγματοληψίας χρησιμοποιούν βηματικούς κινητήρες.

Σε εξοπλισμό γραφείου οι βηματικοί κινητήρες είναι ενσωματωμένοι σε σαρωτές εγγράφων βασισμένους σε υπολογιστή, μονάδες ταινίας αποθήκευσης δεδομένων, εκτυπωτές, πλότερ και αναγνώστες οπτικών μέσων - CD/DVD.

Σε επιστημονικά όργανα οι βηματικοί κινητήρες βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις όπως φασματογράφους ή την τοποθέτηση τηλεσκοπίου σε παρατηρητήρια.

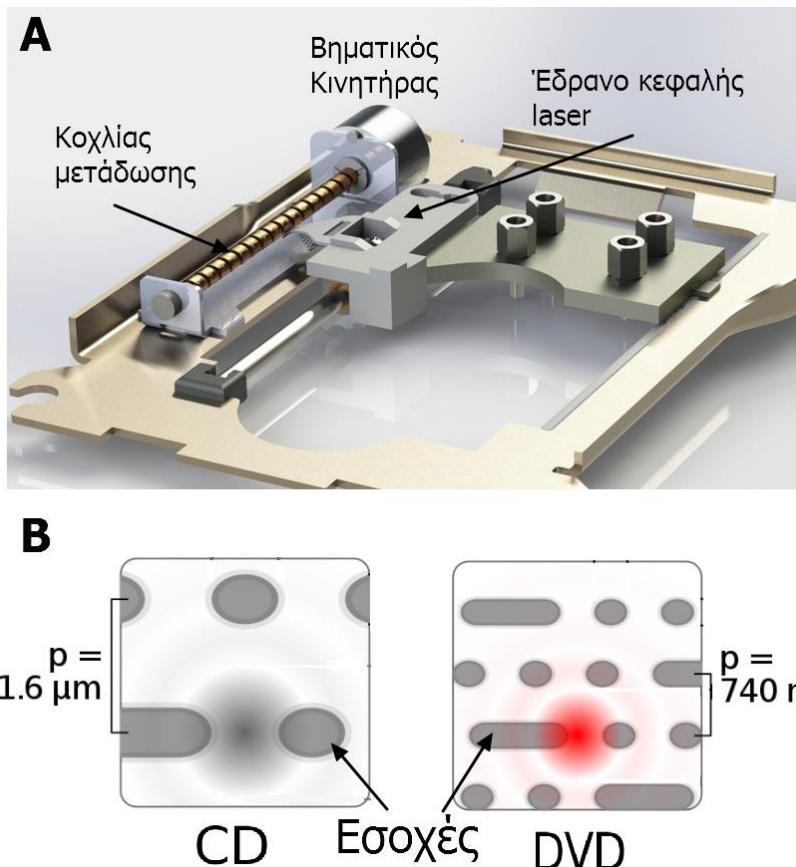
Σε ιατρικό εξοπλισμό βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε ιατρικά σκάνερ, μικροσκοπικές ή νανοσκοπικές αυτοματοποιημένες συσκευές πολλαπλών αξόνων, αντλίες διανομής, δειγματολήπτες και αυτόματους εγχυτήρες χρωματογραφίας. Επίσης βρίσκονται μέσα σε εξοπλισμό ψηφιακής οδοντοτεχνικής φωτογραφίας, αντλίες υγρών, αναπνευστήρες και μηχανήματα ανάλυσης αίματος.

6.1 Optical Media Driver head movement (CD / DVD)

Ένας μικρός βηματικός κινητήρας μπορεί να εντοπιστεί μέσα σε κάθε οπτικό οδηγό CD ή DVD. Η χρήση του σχετίζεται άμεσα με την τοποθέτηση του laser ανάγνωσης ή εγγραφής σε σχέση με το CD.

Στην εικόνα 1.51 Α φαίνεται ο σκελετός μιας μονάδας ανάγνωσης. Πάνω στον σκελετό είναι συναρμολογημένες οι ράγες στις οποίες κινείται το έδρανο του αναγνώστη-laser. Από το έδρανο προβάλλεται μια ακμή η οποία προσαρμόζεται σε μια από τις εγκοπές του κοχλία μετάδοσης, στο αριστερό μέρος της εικόνας. Τέλος, ο κοχλίας μετάδοσης συνδέεται με βηματικό κινητήρα.

Σε μια συσκευή ανάγνωσης CD είναι απαραίτητη η τοποθέτηση της κεφαλής ανά βήματα μήκους 1.6 μμ, όσο δηλαδή απέχουν και οι ομόκεντροι δακτύλιοι εσοχών που αναπαριστούν τα δεδομένα (Εικ. 1.51 Β). Ανάλογα, σε έναν αναγνώστη DVD αυτό το μήκος μειώνεται στα 0,74 μμ. Η δουλειά του βηματικού κινητήρα γίνεται πιο δύσκολη καθώς απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι δακτύλιοι εσοχών είναι πιο πυκνοί και συνεπώς περισσότεροι από όσους χωράνε σε ένα CD. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους για τον οποίο τα DVD έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα.



A. Μηχανισμός ανάγνωσης-εγγραφής CD/DVD και

B. Σύγκριση δομής CD/DVD (Εικ. 1.51)

6.2 FDM 3-dimansinoal printers

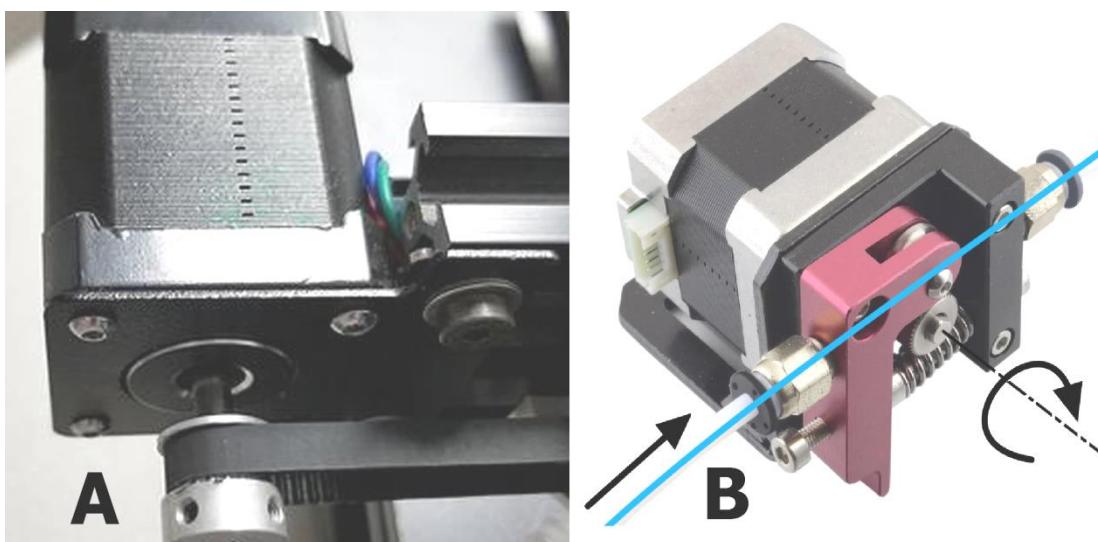
Οι πιο διαδεδομένοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές για το ευρύ κοινό είναι αυτοί της οικογένειας FDM(Fuse Deposition Modeling). Ο όρος FDM συνδέεται άμεσα με την τεχνική που χρησιμοποιούν οι συγκεκριμένοι εκτυπωτές για να παράξουν τρισδιάστατα αντικείμενα. Κάποιο είδος θερμοπλαστικού ζεσταίνεται στην κεφαλή εκτύπωσης και έπειτα τοποθετείται σε κατάλληλες θέσεις σε πολλά οριζόντια επίπεδα.

Κάθε τέτοιος τρισδιάστατος εκτυπωτής χρησιμοποιεί τρείς βηματικούς κινητήρες για την τοποθέτηση της κεφαλής εκτύπωσης στον τρισδιάστατο χώρο. Κάθε βηματικός κινητήρας αντιστοιχεί σε έναν από τους τρείς βαθμούς ελευθερίας που χαρακτηρίζουν τον τρισδιάστατο χώρο χωρίς περιστροφή. Για την μετατροπή της γωνιακής κίνησης των κινητήρων σε γραμμική χρησιμοποιούνται ζώνες μετάδοσης κίνησης ή κοχλίες μετάδοσης.

Η ευκρίνεια των κινήσεων στις τρείς διευθύνσεις συνδέεται άμεσα με την ικανότητα παραγωγής λεπτομερών μοντέλων σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή. Μια μικρή ευκρίνεια σε κινήσεις έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση σφαιρικών επιφανειών και γενικά τη μείωση της ακρίβειας των διαστάσεων στο παραγόμενο μοντέλο. Οι FDM εκτυπωτές σήμερα μπορούν να έχουν ευκρίνεια έως και 0.02mm στις αξονικές τους κινήσεις. Ένας τέτοιος κινητήρας φαίνεται στην εικόνα 1.52 A.

Πέρα από τους τρείς κινητήρες που χρησιμοποιούνται για την κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης, οι FDM εκτυπωτές χρησιμοποιούν έναν ακόμα βηματικό κινητήρα για τον έλεγχο του ρυθμού της ροής του πλαστικού εκτύπωσης μέσα στην κεφαλή. Στην εικόνα 1.52 B φαίνεται ένας τέτοιος βηματικός κινητήρας.

Σχεδόν όλες οι οικογένειες τρισδιάστατων εκτυπωτών χρησιμοποιούν τουλάχιστον έναν βηματικό κινητήρα. Αυτό είναι αναμενόμενο εφόσον η τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτεί ακρίβεια και επαναληψιμότητα σε κινήσεις.



Βηματικοί κινητήρες σε τρισδιάστατους εκτυπωτές FDM (Εικ. 1.52)

Part 2 - Construction Configuration and 3D Design

Το περιεχόμενο αυτού του μέρους συνδέεται με την εκτενή ανάλυση και μελέτη της γεωμετρίας καθώς και των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα 42HD4027-01 τύπου NEMA 17.

- Αρχικά ο κινητήρας αποσυναρμολογείται στον βαθμό που είναι δυνατόν χωρίς ρίσκο για την καταστροφή του.
- Στη συνέχεια, κάθε κομμάτι του κινητήρα διαστασιολογείται και δημιουργείται πρόχειρο σκαρίφημα με τις απαραίτητες όψεις.
- Βάσει των διαστάσεων που μετρήθηκαν, δημιουργούνται τρισδιάστατα σχέδια με τη χρήση σχεδιαστικού προγράμματος. Από το τρισδιάστατο μοντέλο εξάγονται ακριβή σχέδια για τον κινητήρα.
- Τέλος μελετάται το φύλλο δεδομένων ώστε να εξαχθούν από αυτό χρήσιμες πληροφορίες για τον κινητήρα.

Τα τρισδιάστατα σχέδια του κινητήρα μπορούν να βρεθούν στο ίδιο αρχείο .rar με αυτό όπου ήταν τοποθετημένη η εργασία.

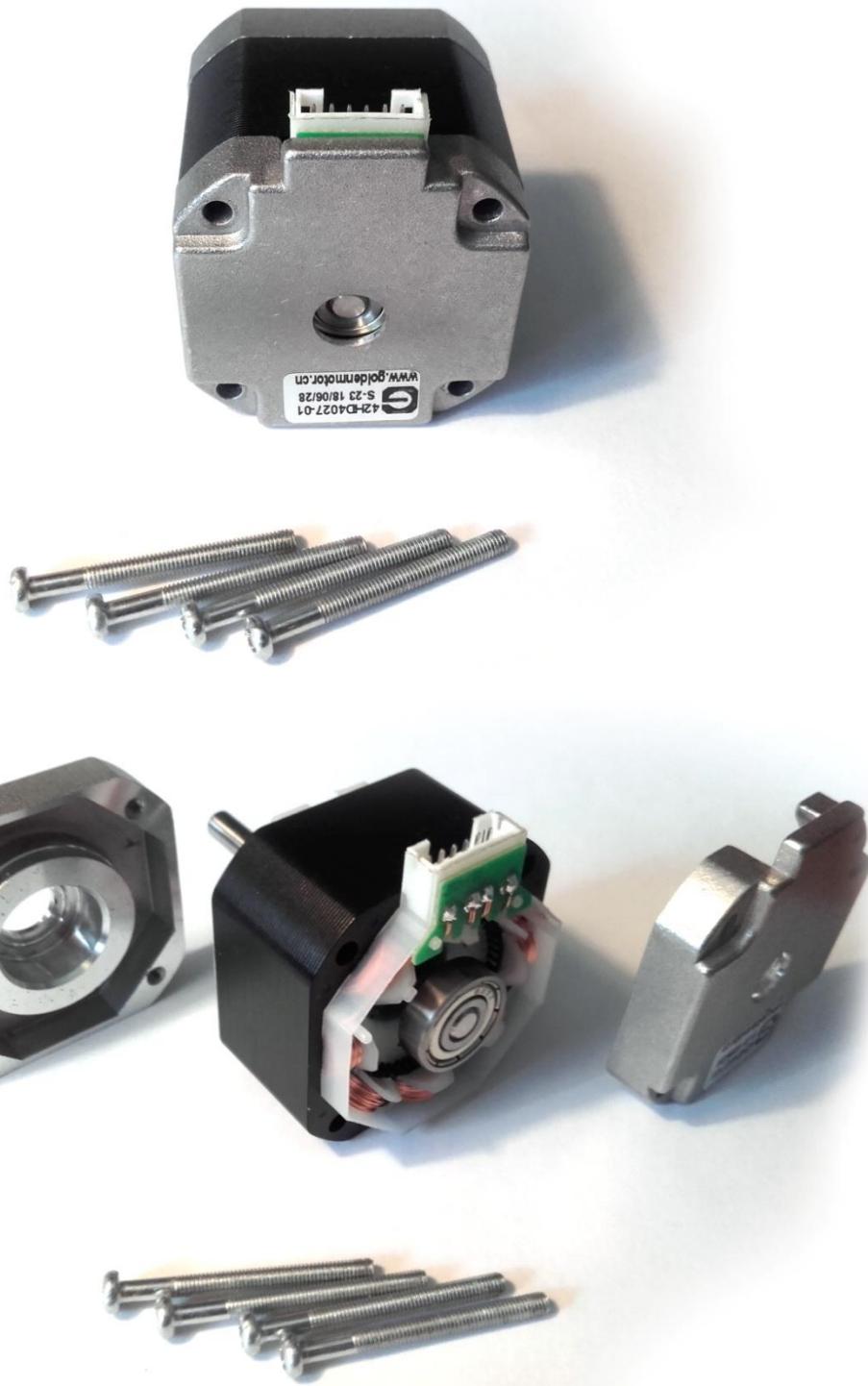
1. Disassembly

Η αποσυναρμολόγηση του κινητήρα έως κάποιον βαθμό είναι μια εύκολη διαδικασία. Τα κύρια του μέρη συγκρατούνται από τέσσερεις κοχλίες (Εικ. 2.1). Αυτοί διαπερνούν τη βάση και βιδώνουν σε σπείρωμα στην απέναντι μεριά του κινητήρα. Έτσι, με τη σύσφιξή τους οι δυο ακριανές πλάκες συγκρατούν τον ρότορα και τον στάτορα ανάμεσά τους σε σταθερή απόσταση.

Τα κύρια εμπόδια που δεν επιτρέπουν την πλήρη αποσυναρμολόγηση του κινητήρα είναι η μόνιμη κόλληση του μαγνητικού ρότορα στον άξονά του και τα τυλίγματα. Η αφαίρεση και επανασυναρμολόγηση τυλίγματων σε κινητήρες είναι μια δύσκολη διαδικασία την οποία αναλαμβάνουν συνήθως αυτοματοποιημένα μηχανήματα. Κάθε φάση μπορεί να αποτελείται από τυλίγματα χλιιάδων σπειρών. Οποιαδήποτε τροποποίηση των τυλιγμάτων συνδέεται με ρίσκο για την καταστροφή τους και συνεπώς την καταστροφή του κινητήρα.

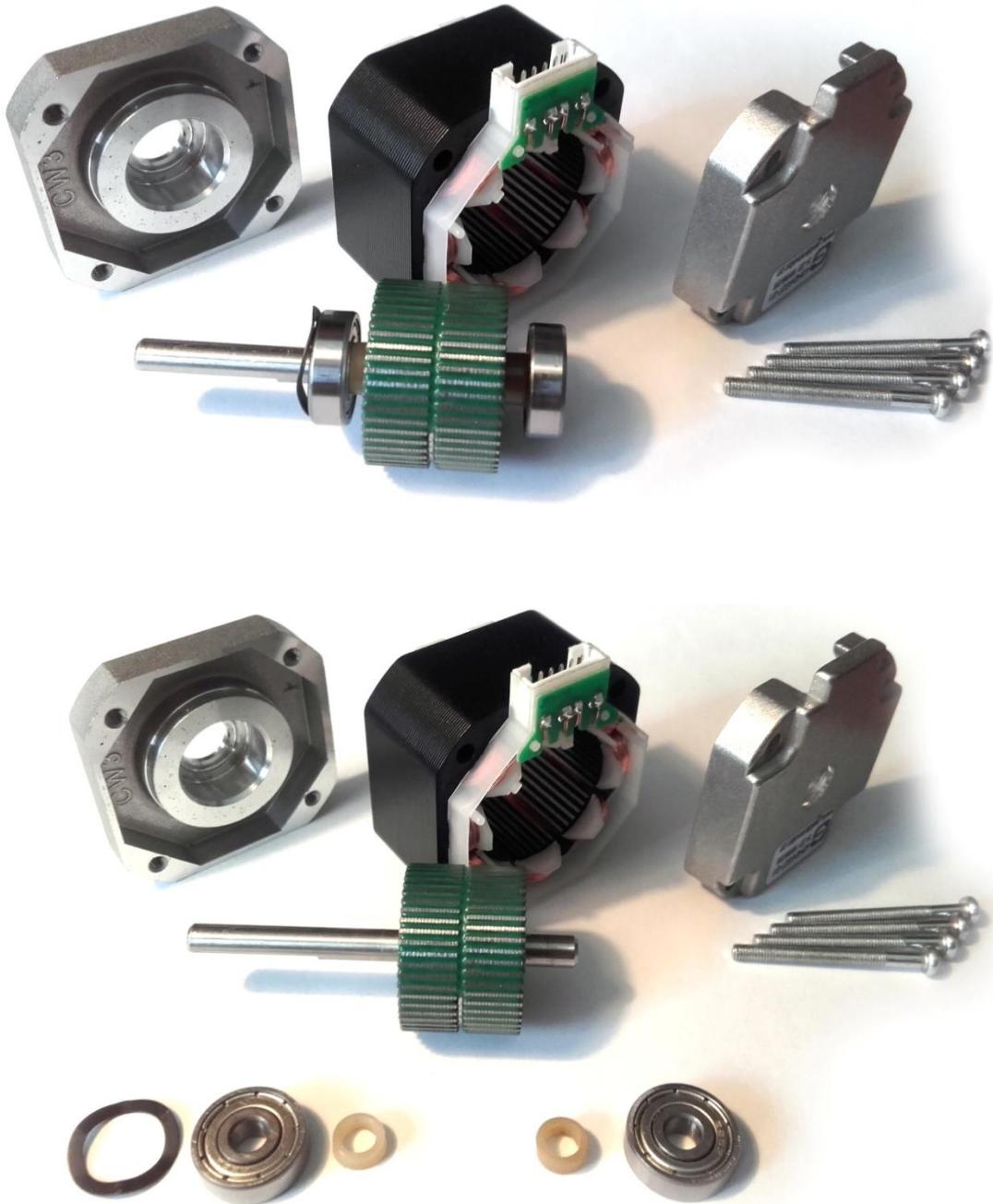


Αποσυναρμολόγηση κινητήρα - εξωτερική μελέτη (Εικ. 2.1)



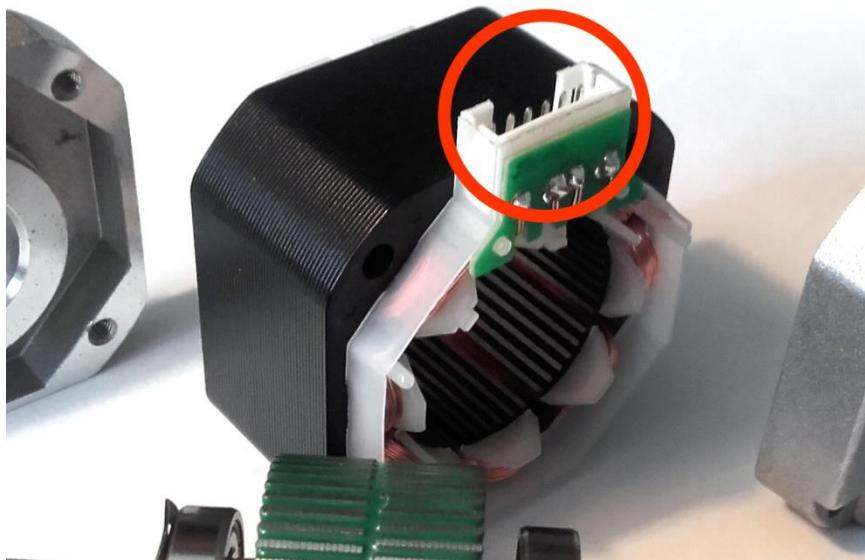
Αποσυναρμολόγηση κινητήρα – χαλάρωση κοχλιών και αφαίρεση καλυμμάτων (Εικ. 2.2)

Αφού οι κοχλίες αφαιρεθούν, η πρόσοψη και το πίσω μέρος του κινητήρα γλιστράνε μακριά από τον στάτη. Τα δύο ρουλεμάν στα οποία στηρίζεται ο άξονας του ρότορα εδράζονται στο καθένα από τα δύο καλύμματα του κινητήρα που φαίνονται στην εικόνα 2.2. Συχνά μετά την αφαίρεση αυτών των καλυμμάτων, τα ρουλεμάν βρίσκονται ακόμα συναρμοσμένα σε αυτά.



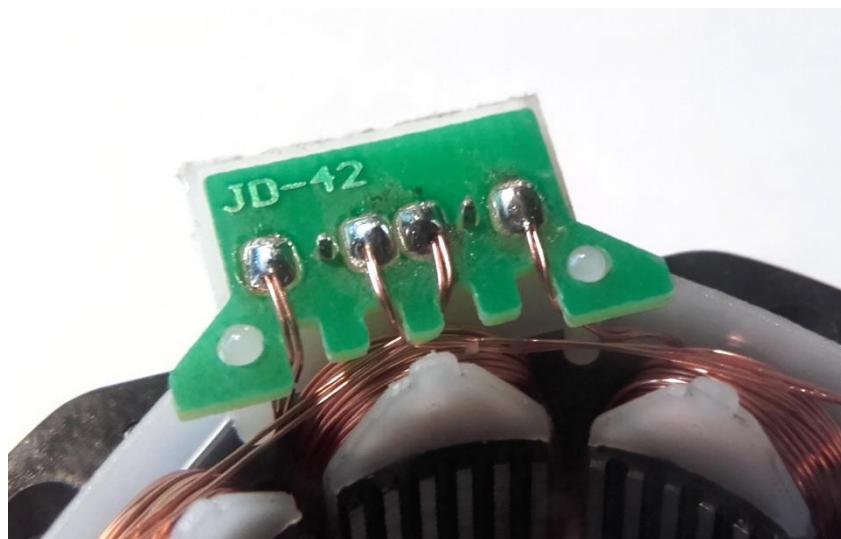
Αποσυναρμολόγηση κινητήρα – αφαίρεση ρότορα (Εικ. 2.3)

Η αφαίρεση του ρότορα από το κέντρο του στάτη είναι εύκολη σε μικρούς κινητήρες ή κινητήρες όμοιας ροπής συγκράτησης με το συγκεκριμένο. Αρκεί να ασκηθεί δύναμη αξονικά, παράλληλα με τον άξονα του ρότορα ώστε αυτός να γλιστρήσει προς τα έξω. Σε κινητήρες μεγαλύτερης ισχύος η εξαγωγή του ρότορα από το στάτη ίσως να μην είναι δυνατόν να γίνει χωρίς τα κατάλληλα εργαλεία. Η απαιτούμενη δύναμη για την αποσύνδεση του ρότορα από το στάτη αυξάνει με την αύξηση της μαγνητικής ροής που τους συνδέει. Σε κάθε περίπτωση, οι δυνατοί μαγνήτες του ρότορα πρέπει να χειρίζονται με προσοχή σε μεγαλύτερους κινητήρες. Η αφαίρεση του μαγνήτη από τον άξονα δεν είναι εφικτή εφόσον τα δυο μέρη είναι μονίμως κολλημένα μεταξύ τους. Ο άξονας του κινητήρα συγκρατείται από δυο ρουλεμάν δυο πλαστικούς αποστάτες και μια κυματοειδή ροδέλα.



JST έξοδος των φάσεων του κινητήρα (Εικ. 2.4)

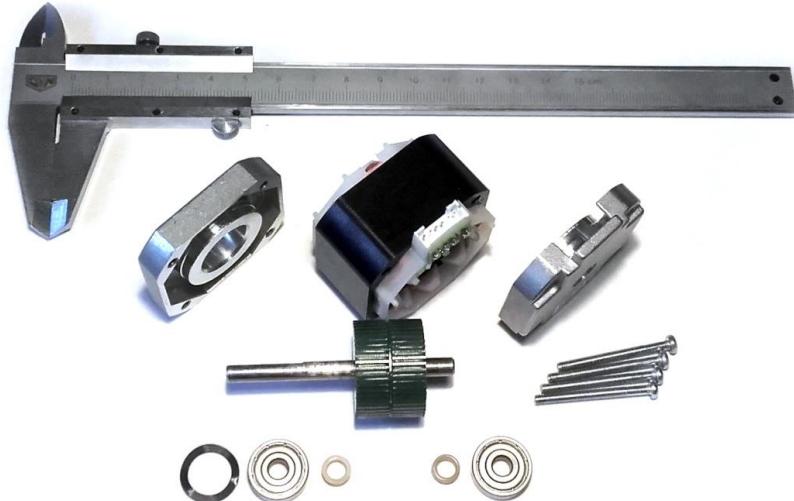
Μπορεί να παρατηρηθεί πως ο κινητήρας χρησιμοποιεί έξοδο τύπου Japan Solderless Terminal (JST – τύποι συνδέσμων που καθιερώθηκαν από την Ιαπωνία). Δύο από τις έξι απολήξεις της εξόδου δεν χρησιμοποιούνται από τον κινητήρα (Not connected – Float). Οι υπόλοιπες τέσσερεις χρησιμοποιούνται από τις τέσσερεις απολήξεις των δύο φάσεων του κινητήρα.



Απολήξεις των τυλιγμάτων των φάσεων (Εικ. 2.5)

Επιπλέον, παρατηρώντας την πλακέτα στη βάση της εξόδου μπορεί να διαπιστωθεί πως οι φάσεις είναι τυλιγμένες με δυο παράλληλα χάλκινα καλώδια πάχους 0.32mm. Η χρησιμότητά τους περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Σχήμα εικόνας 1.25β). Πάραυτα, τα τέσσερα πηνία που ανήκουν σε κάθε φάση φαίνεται να είναι εν σειρά.

2. Sketch - dimensioning



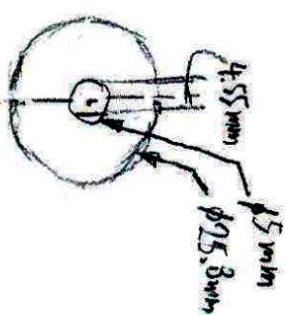
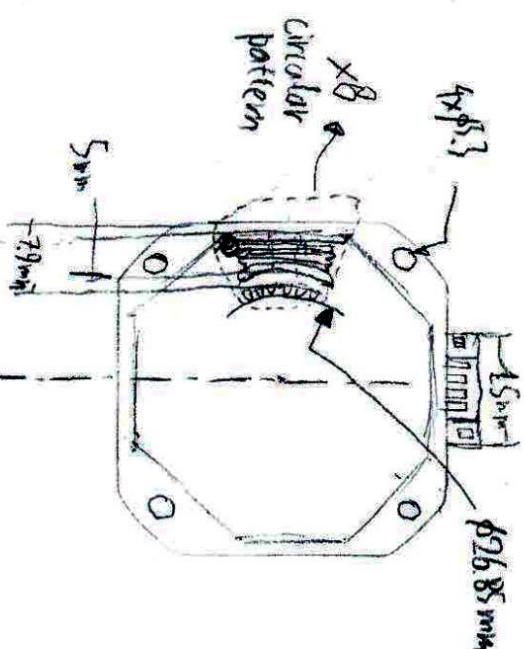
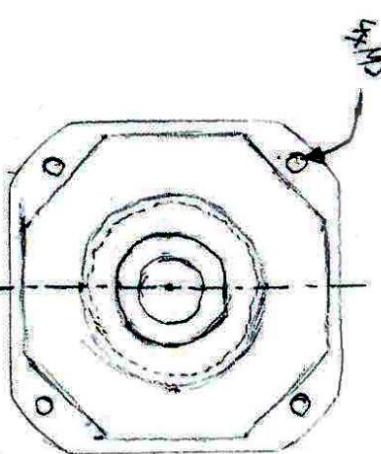
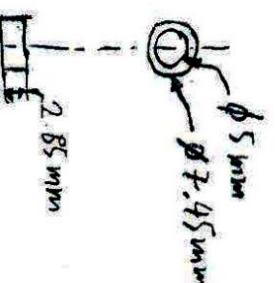
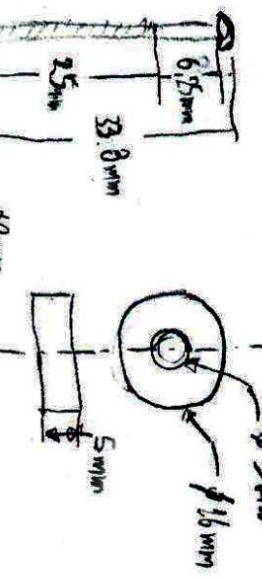
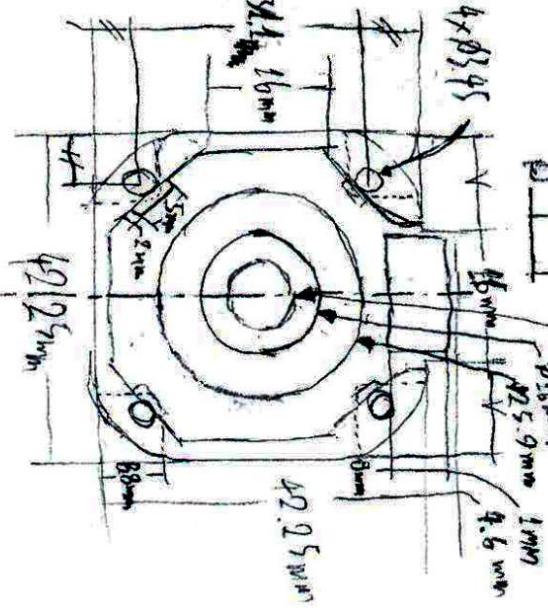
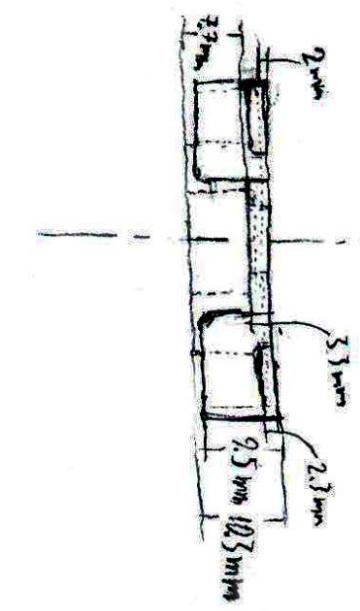
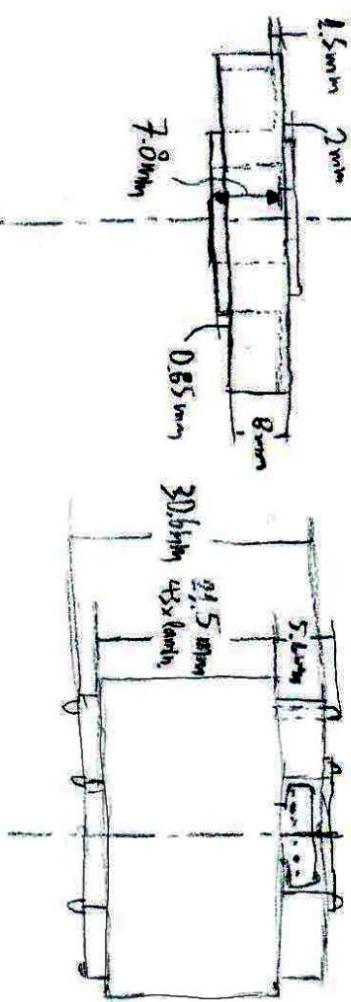
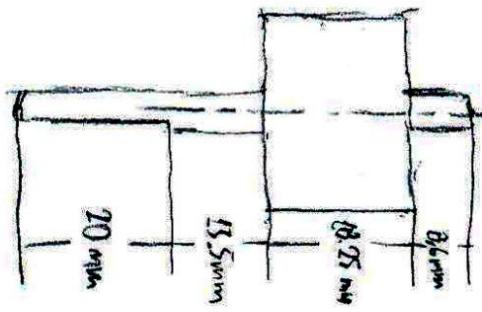
Κομμάτια προς διαστασιολόγηση (Εικ. 2.6)

Προτού κατασκευαστεί το τρισδιάστατο σχέδιο, οι διαστάσεις όλων των κομματιών του κινητήρα μετρώνται και καταγράφονται. Για τον σκοπό αυτό δημιουργείται πρόχειρο σχέδιο - σκαρίφημα.

Κάποιες από τις διαστάσεις του κινητήρα δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στην συναρμολόγηση ή λειτουργία του κινητήρα και έτσι αποδίδονται με λιγότερη ακρίβεια στο σκαρίφημα. Επίσης, αμελούνται εξ' ολοκλήρου ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία δημιουργήθηκαν με σκοπό τον έλεγχο της παραγωγής όπως ενδείξεις αριθμού καλουπιού ή τα οποία είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας των κατεργασιών διαμόρφωσης αλλά δεν επηρεάζουν την λειτουργία και τη συναρμολόγηση.

Όλες οι σημαντικές μετρήσεις έγιναν με παχύμετρο κλίμακας Βερνιέρου όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6. Η ακρίβεια μέτρησης της κλίμακας στο συγκεκριμένο όργανο είναι 0,05mm. Μετά τη μέτρηση και καταγραφή των διαστάσεων έγινε σύγκριση τους με αυτές που δίνονται στο φύλλο δεδομένων του κινητήρα. Διαπιστώθηκε πως κάποιες από αυτές είναι εκτός των ανοχών που αναγράφονται εκεί.

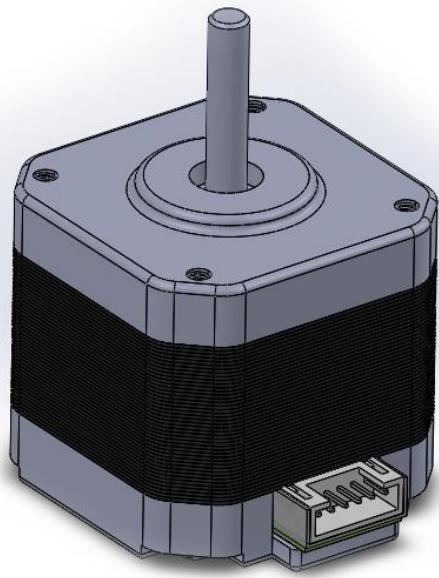
Το σκαρίφημα του κινητήρα έγινε σε κλίμακα 1:1, με μέθοδο first angle και φαίνεται στην εικόνα 2.7 της επόμενης σελίδας.



Σκαρίφημα κυνηγήρα 42HD4027-01 (Εικ. 2.7)

3. 3D design

Το τρισδιάστατο σχέδιο δημιουργήθηκε με βάση τις μετρήσεις που έγιναν. Όλα τα κομμάτια από τα οποία αποτελείται ο κινητήρας σχεδιάστηκαν ξεχωριστά και στη συνέχεια συνδυάστηκαν για τη δημιουργία του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου του(Εικ. 2.8). Το μοντέλο μπορεί να βρεθεί στον σύνδεσμο του κωδικού QR.



Τρισδιάστατο μοντέλο κινητήρα 42HD4027-01 (Εικ. 2.8)

Στις εικόνες 2.9, 2.10 και 2.11 παρουσιάζονται τα μέλη του κινητήρα σε κάτοψη και δεξιά όψη. Η κλίμακα του σχεδίου είναι 1:1 και ακολουθείται μέθοδος προβολής πρώτης γωνίας σε όλα τα σχέδια.

Εφόσον τα τυλίγματα του κινητήρα δεν λύθηκαν κάποια από τα κομμάτια δεν μετρήθηκαν με ακρίβεια και μπορεί να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις. Αυτό ισχύει κυρίως για τα ελάσματα του ρότορα και τις μονώσεις των τυλιγμάτων. Η συνδεσμολογία που περιλαμβάνει τον μόνιμο μαγνήτη του ρότορα δεν αναλύθηκε περεταίρω. Επίσης, τα τυλίγματα έχουν σχεδιαστεί στο μοντέλο μόνο για αισθητικούς λόγους. Ο τρόπος τύλιξης του κινητήρα μελετάται σε προηγούμενη ενότητα.

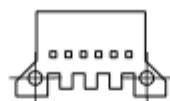
Στις λεπτομέρειες Α και Β της εικόνας 2.9 φαίνεται πως το έλασμα Α έχει εγκοπές και προεξοχές ενώ το έλασμα Β είναι διάτρητο. Για την κατασκευή του στάτη στον συγκεκριμένο κινητήρα, 42 ελάσματα τύπου Α στοιβάζονται σε σειρά και ένα έλασμα τύπου Β τοποθετείται στο τέλος ώστε να καλύψει τις προεξοχές του τελευταίου ελάσματος Α.

Στην λεπτομέρεια Γ της εικόνας 2.11 φαίνονται οι μικρές αυλακώσεις που φέρει ο άξονας του κινητήρα. Αυτές βοηθούν στην σύνδεσή του με τη συνδεσμολογία του μαγνήτη του ρότορα.

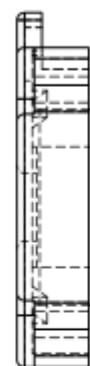
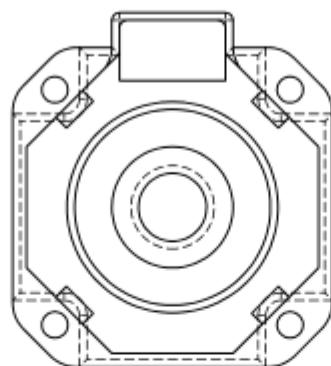
ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ JST



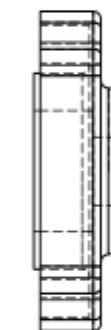
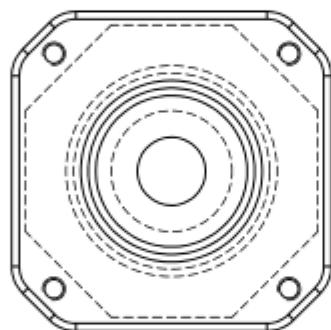
ΠΛΑΚΕΤΑ THT



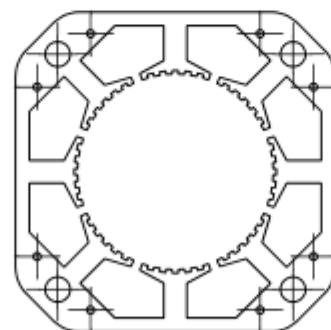
ΚΑΛΥΜΑ Α



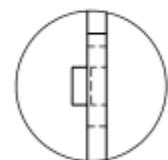
ΚΑΛΥΜΑ Β



ΕΛΑΣΜΑ ΡΟΤΟΡΑ Α



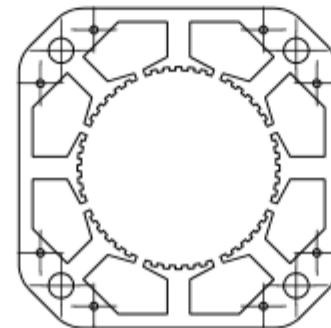
A



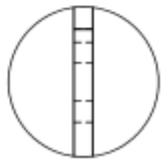
ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ Α

ΚΛΙΜΑΚΑ 5 : 1

ΕΛΑΣΜΑ ΡΟΤΟΡΑ Β



B

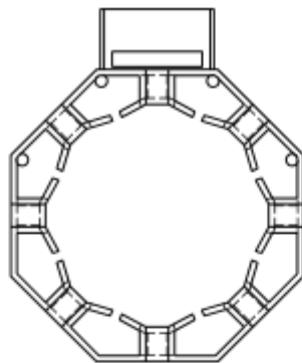


ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ Β

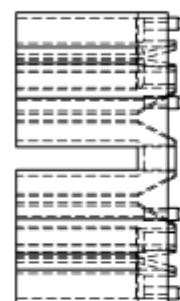
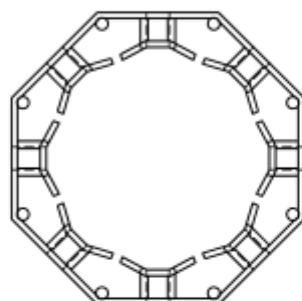
ΚΛΙΜΑΚΑ 5 : 1

Κομμάτια κινητήρα 42HD4027-01 Α (Εικ. 2.9)

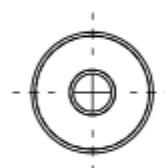
ΜΟΝΩΣΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ Α



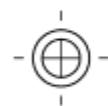
ΜΟΝΩΣΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ Β



ΕΔΡΑΝΟ ΚΥΛΙΣΗΣ



ΑΠΟΣΤΑΤΗΣ Α



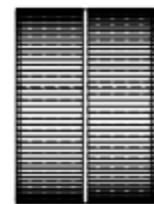
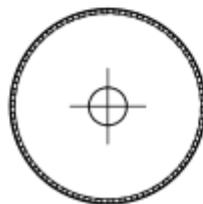
ΑΠΟΣΤΑΤΗΣ Β



ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΗΣ ΡΟΔΕΛΑ



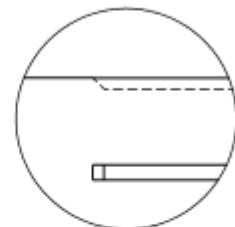
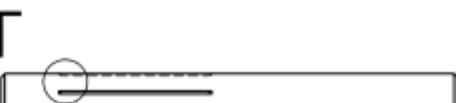
ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ
ΜΑΓΝΗΤΗ ΡΟΤΟΡΑ



Κομμάτια κινητήρα 42HD4027-01 B (Εικ. 2.10)



ΑΞΟΝΑΣ



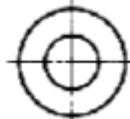
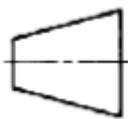
ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ Γ

ΚΛΙΜΑΚΑ 5 : 1

ΚΟΧΛΙΑΣ Μ3



ΚΛΙΜΑΚΑ 1:1

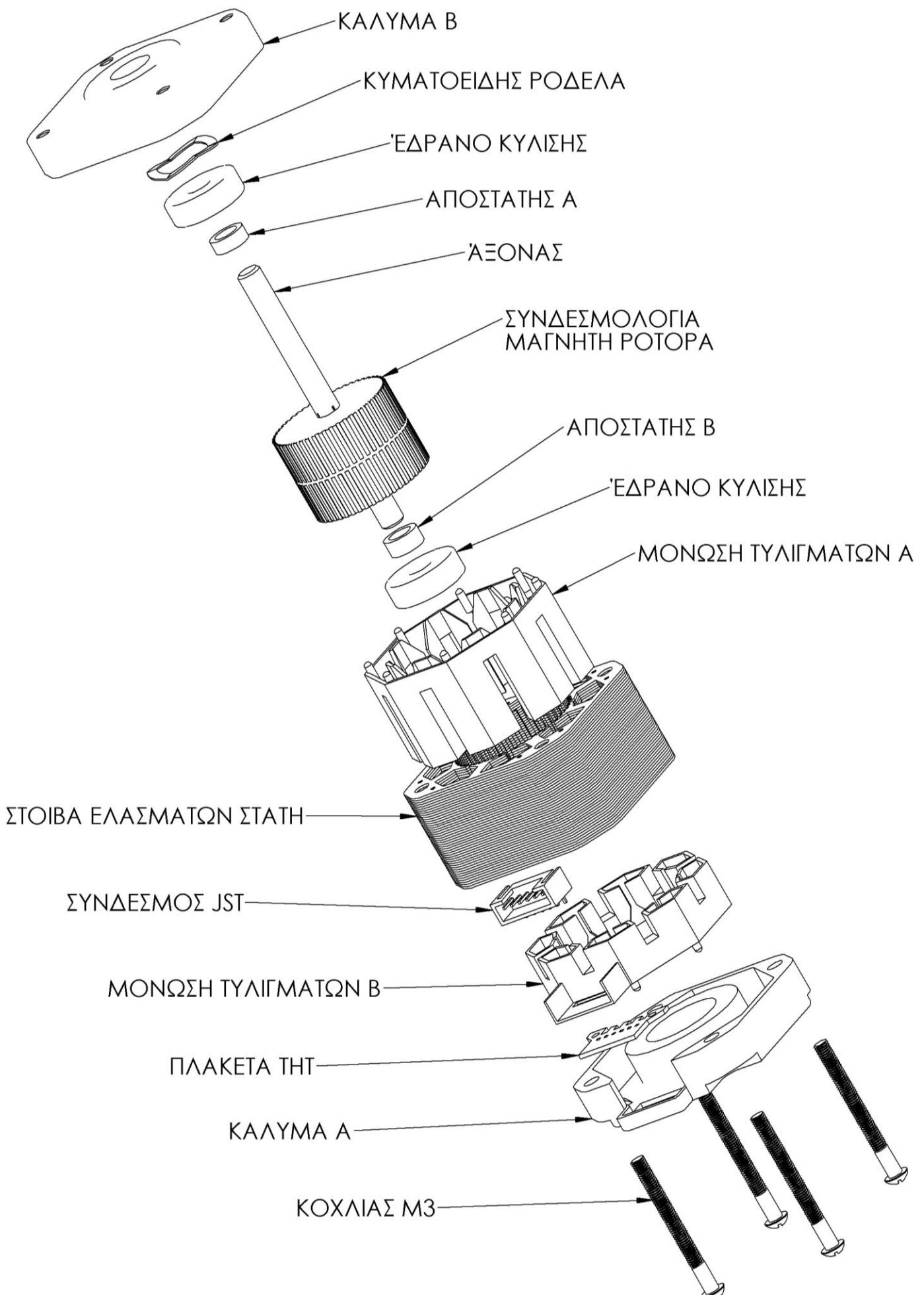


Κομμάτια κινητήρα 42HD4027-01 Γ (Εικ. 2.11)

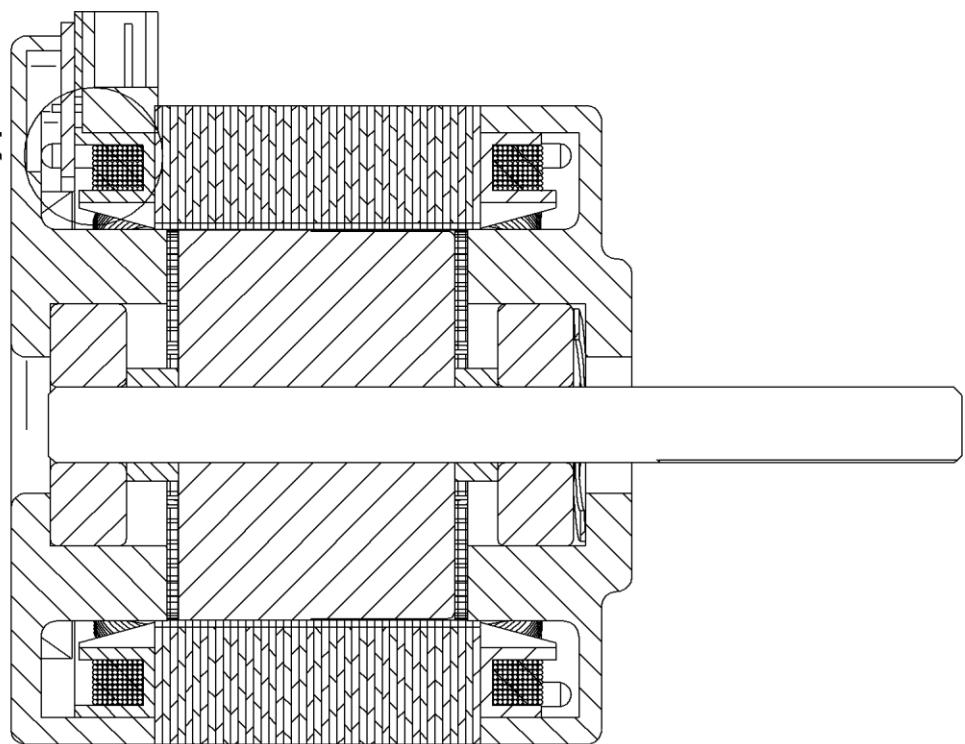
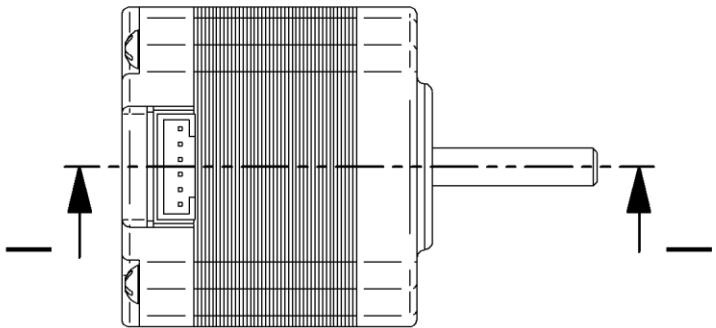
Στην εικόνα 2.12 της επόμενης σελίδας φαίνεται η ανεπτυγμένη όψη του κινητήρα. Κάθε κομμάτι που φαίνεται στην ανεπτυγμένη όψη του κινητήρα αναφέρεται ξεχωριστά στα προηγούμενα σχέδια των εικόνων 2.9, 2.10 και 2.11.

Στην εικόνα 2.13 φαίνεται μια τομή του κινητήρα σε κλίμακα 2:1. Από αυτήν την όψη, μπορεί να παρατηρηθεί το εσωτερικό του συναρμολογημένου κινητήρα. Ο ρόλος της κυματοειδούς ροδέλας γίνεται πιο σαφής – η ροδέλα συμπιέζει ολόκληρη την συνδεσμολογία του ρότορα και αποτρέπει την κίνηση του άξονα σε κατεύθυνση παράλληλη σε αυτόν.

Στην λεπτομέρεια Κ που φαίνεται στο δεξί μέρος της εικόνας 2.13, απεικονίζεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια η θέση του των τυλιγμάτων του κινητήρα αλλά και ο τρόπος σύνδεσης τους με τον εξωτερικό σύνδεσμο JST. Οι οχτώ απολήξεις των τυλιγμάτων (οχτώ επειδή χρησιμοποιούνται δυο παράλληλα καλώδια για την περιέλιξη) περνούν ανάμεσα από τις εγκοπές της πλακέτας THT και συγκολλούνται στα άκρα της εξόδου.



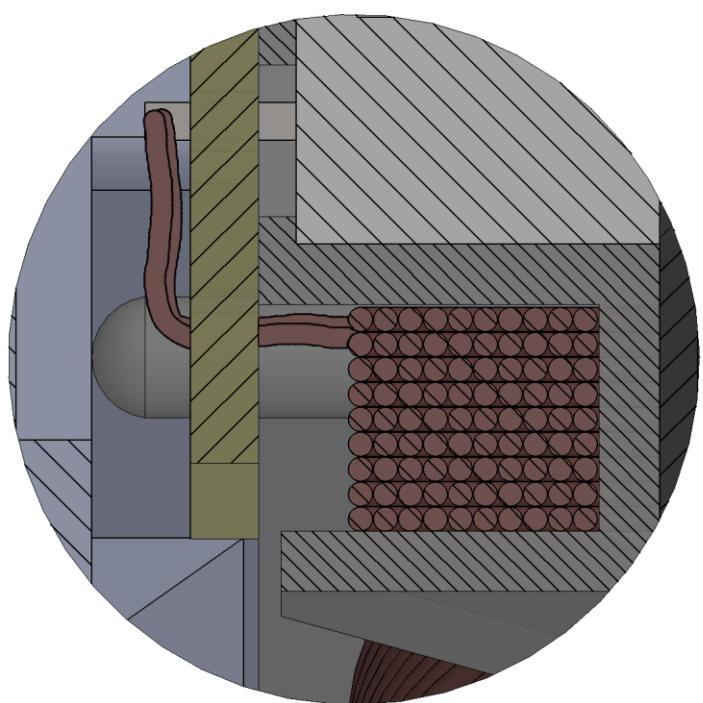
Αναπτυγμένη όψη κινητήρα 42HD4027-01 (Εικ. 2.12)



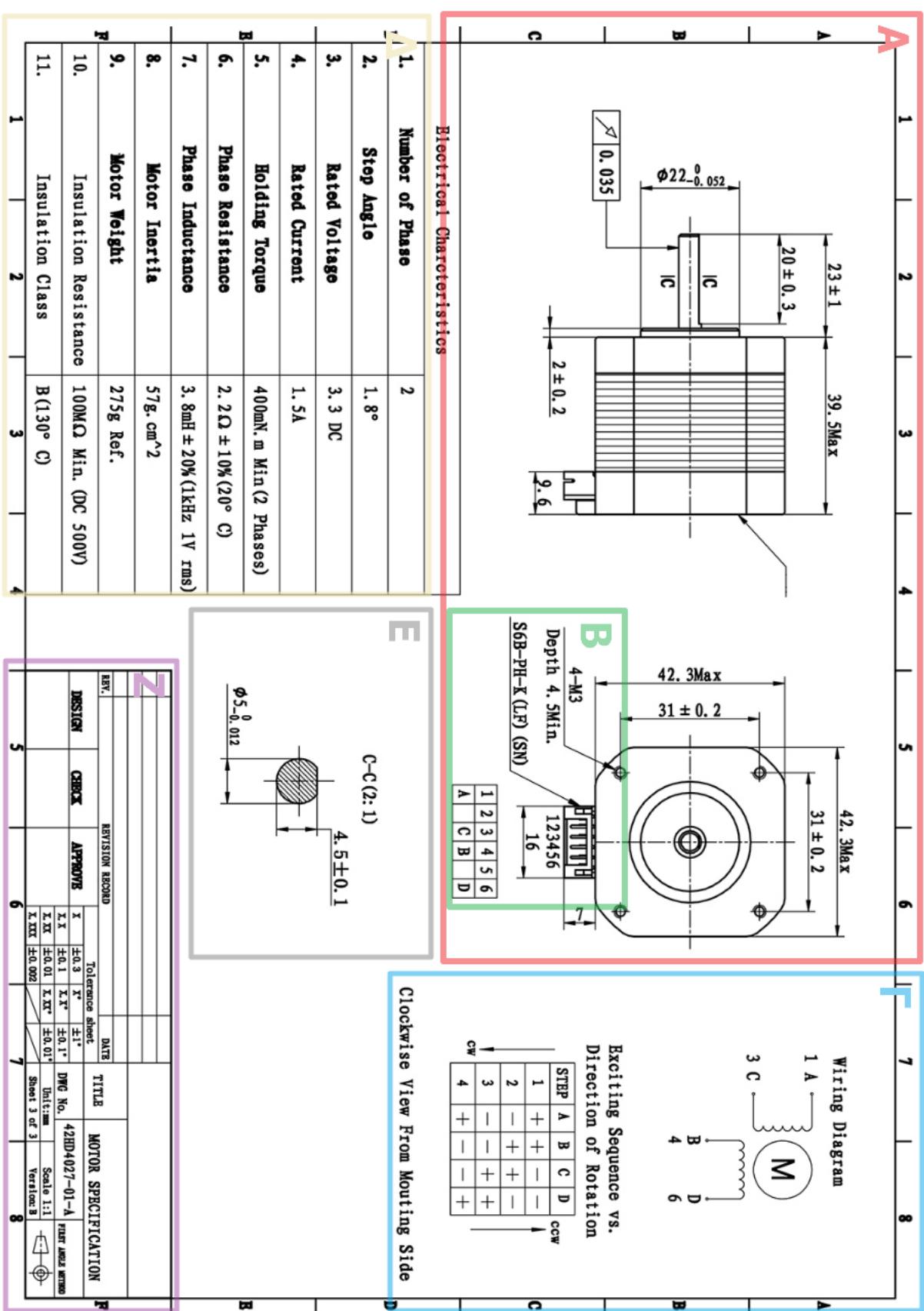
Κ
ΤΟΜΗ
Ι-Ι
ΚΛΙΜΑΚΑ 2 : 1

Τομή κυνηγήρα 42ΗD4027-01 (Εικ. 2.13)

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ Κ
ΚΛΙΜΑΚΑ 10 : 1



4. Data sheet



Φύλλο δεδομένων κινητήρα 42hd4027-01 (Εικ. 2.14)

1 2 3 4 5 6 7

6 7

8

A 23±1 39.5Max

B 20±0.3

C 31±0.2 42.3Max

D 2 ± 0.2 4-M3
Depth 4.5Min.

E 9.6

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

Y

Z

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

HH

II

JJ

KK

LL

MM

NN

OO

PP

QQ

RR

SS

TT

UU

VV

WW

XX

YY

ZZ

AA

BB

CC

DD

EE

FF

GG

Το φύλλο δεδομένων που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.14 παρέχεται από τον κατασκευαστή του κινητήρα. Μέσα σε αυτό αναγράφονται πολλές χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του όσο και τα ηλεκτρολογικά, αλλά και παραμέτρους λειτουργίας του βηματικού κινητήρα.

Στο πλαίσιο Α της εικόνας 2.14, γίνεται μια εξωτερική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Όπως αναφέρεται στην ενότητα 'Σκαρίφημα – διαστασιολόγηση' κάποιες από αυτές τις διαστάσεις είναι εκτός των ορίων των ανοχών που δίνονται. Η δεξιά όψη και η κάτωψη βιοθούν τον αναγνώστη να σχηματίσει μια πρώτη εικόνα του προϊόντος. Μέσα στο πλαίσιο Α της εικόνας 2.14 βρίσκεται το πλαίσιο Β.

Στο πεδίο Β γίνεται μια περιγραφή του τύπου της εξόδου JST που χρησιμοποιεί ο κινητήρας (S6B-PH-K). Όλες οι απολήξεις της εξόδου αριθμούνται και οι ενεργές αντιστοιχίζονται με γράμματα. Οι απολήξεις 2 και 5 είναι ανενεργές ή όχι συνδεδεμένες (not connected - float).

Στο πεδίο Γ της εικόνας 2.14 οι απολήξεις που αριθμήθηκαν και αντιστοιχήθηκαν με γράμματα (Α,Β,Γ,Δ), αντιστοιχίζονται με τις φάσεις στις οποίες ανήκουν. Επίσης, σε αυτό το πεδίο δίνεται διάγραμμα με σκοπό τον ορισμό της φοράς περιστροφής σε συνάρτηση με την αλληλουχία ενεργοποίησης των φάσεων του κινητήρα.

Στο πεδίο Δ δίνονται δεδομένα που συνδέονται κυρίως με τη λειτουργία του κινητήρα. Πολλά από αυτά είναι απαραίτητα για την κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου του. Επιγραμματικά δίνονται το πλήθος των φάσεων (2), η γωνία ενός κυματικού ή ολόκληρου βήματος (1.8°), η μέγιστη τάση και το Ονομαστικό ρεύμα φάσης (3.3V, 1.5A), η ελάχιστη τιμή της μέγιστης ροπής συγκράτησης δυο φάσεων (400mN*m), η αντίσταση ($2.2\Omega \pm 10\%$ στους 20°C) και σταθερά επαγγής φάσης ($3.8\text{mH} \pm 20\% \text{ με } 1\text{V RMS στο } 1\text{kHz}$), η ροπή αδράνειας του ρότορα του κινητήρα ($57\text{g}^*\text{cm}^2$), το βάρος του κινητήρα (275g), η ελάχιστη αντίσταση της μόνωσης του κινητήρα ($100\text{M}\Omega$, με έλεγχο στα 500V) και, τέλος, ο τύπος της θερμικής μόνωσης (ανήκει στις προδιαγραφές της NEMA και ορίζει την ασφαλή θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα – τύπος B, 130°C).

Στο πεδίο Ε της εικόνας 2.14 γίνεται διαστασιολόγηση της τομής C-C του σχήματος. Οι διαστάσεις του άξονα είναι σημαντικές για την κατασκευή μελών με σκοπό τη συναρμογή τους σε αυτόν.

Στο πεδίο Ζ της εικόνας 2.14 φαίνονται πληροφορίες όπως το όνομα του κινητήρα, η μέθοδος σχεδίασης, η κλίμακα του σχεδίου, η μονάδα μέτρησης (χιλιοστά - mm) και κάποιες πληροφορίες περί ανοχών.

Part 3 - Engine operation simulation

Σε αυτό το μέρος γίνεται χρήση του εργαλείου Simulink του λογισμικού Matlab για την κατασκευή μοντέλου μέσω της προσομοίωσης των αναδρομικών σχέσεων που διέπουν την φύση του διφασικού διπολικού βηματικού κινητήρα.

Αρχικά, γίνεται συγκέντρωση των σχέσεων δυναμικής και ηλεκτρομαγνητισμού που έχουν παρατεθεί στο 1^o μέρος. Αυτές είναι οι εξισώσεις που συσχετίζουν την ροπή με την γωνιακή επιτάχυνση του ρότορα, το ρεύμα των φάσεων και τη θέση του ρότορα με τη ροπή που ασκούν οι φάσεις στον ρότορα, τη ροπή "Detent torque" με τη γωνιακή θέση, την θέση και ταχύτητα του ρότορα με την αντίθετη ηλεκτρεγερτική δύναμη και τον δεύτερο κανόνα του Κίρχοφ για κάθε φάση. Έπειτα, οι σχέσεις φέρονται σε κατάλληλη μορφή για τη διευκόλυνση κατασκευής του μοντέλου.

Μετά την αρχική κατασκευή του μοντέλου εξετάζεται η σημασία των σταθερών που είναι υπεύθυνες για την συμπεριφορά του μοντέλου. Για κάθε σταθερά αναλύεται η μέθοδος προσδιορισμού της χρησιμοποιώντας τόσο αισθητήρες όσο και τις πληροφορίες που είναι ήδη διαθέσιμες από τον κατασκευαστή του κινητήρα.

Στη συνέχεια γράφεται βοηθητικό πρόγραμμα για την δήλωση των σταθερών του μοντέλου καθώς και τον υπολογισμό περισσότερων χαρακτηριστικών. Πρόσθετα, γράφεται αλγόριθμος επίλυσης κινήσεων που υπολογίζει τις εισόδους των φάσεων για την πραγματοποίηση συγκεκριμένων κινήσεων που δίνονται από τον χρήστη.

Τέλος, κάποια αποτελέσματα του μοντέλου παρατίθενται και εξετάζεται η συμπεριφορά του και ο τρόπος λειτουργίας του.

Προς δημιουργία του μοντέλου μελετήθηκαν οι πηγές 2,4,6 και 8.

1. Mathematical equations of the model

1.1 Newton's second law of rotation

Αυτή η σχέση είναι σημαντική για τη σύνδεση της ροπής που δέχεται ο ρότορας με την γωνιακή επιτάχυνση που αναπτύσσει ως συνέπεια. Σε επόμενη ενότητα εξηγείται πως χρησιμοποιώντας ολοκληρωτές στο Simulink είναι πολύ εύκολη η μετατροπή της γωνιακής επιτάχυνσης σε ταχύτητα και θέση. Έτσι, σχηματίζεται μια ολοκληρωμένη εικόνα της κινητικής του ρότορα και κατ' επέκταση του φορτίου που είναι δεμένο σε αυτόν.

$$T = I\dot{\omega} \Rightarrow T_{sum} + T_{ex} = I_L\dot{\omega} \quad (3.1)$$

Όπου

- T_{sum} : Παραγόμενη συνολική ροπή κινητήρα
 T_{ex} : Συνολική εξωτερικά εφαρμοζόμενη ροπή I_L : Ροπή αδράνειας ρότορα και φορτίου
 $\dot{\omega}$: Γωνιακή επιτάχυνση ρότορα

Η ροπή αδράνειας υπολογίζεται προσθέτοντας την αδράνεια του ρότορα του κινητήρα που συνήθως είναι σταθερή και του φορτίου που καλείται να κινήσει. Για λειτουργία ελέγχου ανοιχτού βρόχου είναι σημαντικό η ροπή αδράνειας των φορτίων που συνδέονται με βηματικές μηχανές να παραμένει σταθερή ως προς τον χρόνο και να μην ασκούνται απρόβλεπτες εξωτερικές ροπές στον άξονα του κινητήρα.

$$I_L = I_{ROTOR} + I_{LOAD} \quad (3.2)$$

Όπου

- I_{ROTOR} : Ροπή αδράνειας ρότορα
 I_{LOAD} : Ροπή αδράνειας φορτίου

1.2 Current and generated phase torque

Για τη σύνδεση αυτών των δύο μεγεθών γίνεται λόγος στο 1° μέρος. Στην ενότητα ‘Στατική ροπή μικροβημάτων ημιτόνου-συνημιτόνου’ αναφέρεται πως το ρεύμα και η μέγιστη παραγόμενη ροπή σε ένα τύλιγμα συνδέονται γραμμικά. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί μια σταθερά μετατροπής του ρεύματος σε ροπή:

$$T_{maxX} = K_T I_X \quad (3.3)$$

Όπου

T_{maxX} : Μέγιστη παραγόμενη ροπή φάσης X

I_X : Ρεύμα στην φάση X

K_T : Σταθερά συσχέτισης ρεύματος-ροπής φάσης. Όσο μεγαλύτερη, τόσο μεγαλύτερη ροπή δέχεται ο ρότορας από την φάση X για σταθερή τιμή ρεύματος στην φάση X.

Στο 1° κεφάλαιο διατυπώνονται επίσης σχέσεις που δηλώνουν τον συσχετισμό της θέσης του ρότορα με την ροπή που ασκεί μια φάση, όπως οι σχέσεις 1.9 οι οποίες για κάποια φάση X γράφονται:

$$T_X = -T_{maxX} \sin\left(\frac{\pi}{2S}\theta\right) = -K_T I_X \sin\left(\frac{\pi}{2S}\theta\right) \quad (3.4)$$

Όπου

T_X : Παραγόμενη ροπή φάσης X

T_{maxX} : Μέγιστη παραγόμενη ροπή φάσης X

S : Βήμα κατά κυματική οδήγηση σε ακτίνια

θ : Γωνιακή θέση ρότορα σε ακτίνια

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί περεταίρω με παράθεση της σχέσης που συνδέει το πλήθος ακμών του ρότορα με το μέγεθος βήματος σε κυματική οδήγηση S:

$$\frac{2\pi}{p} = 4S \Rightarrow \frac{\pi}{2S} = p \quad (3.5)$$

Όπου

p : Πλήθος ακμών του ρότορα

Είναι εύκολο να διαπιστωθεί η αρτιότητα της παραπάνω εξίσωσης αν παρατηρηθεί πως και τα δυο της μέλη περιγράφουν γωνία μιας ακμής του ρότορα ($4S$). Από τις εξισώσεις 3.4 και 3.5 προκύπτει:

$$T_X = -K_T I_X \sin(p\theta) \quad (3.6)$$

1.3 Detent torque

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο “Στατική ροπή μιας φάσης” στην σελίδα 33, ως “detent torque” χαρακτηρίζεται μια ροπή που οφείλεται στην χρήση μόνιμου μαγνήτη. Ο 42HD4027-01 είναι ένας υβριδικός διπολικός κινητήρας και χρησιμοποιεί μόνιμο μαγνήτη ως μέρος του ρότορά του.

Εφόσον η ροπή οφείλεται στον μόνιμο μαγνήτη του ρότορα, η συμπεριφορά της δεν σχετίζεται με ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όπως τα ρεύματα των φάσεων. Η ροπή “detent torque” μεταβάλλεται μόνο σε συνάρτηση με τη γωνία του ρότορα, ώστε να δίνει μια ευσταθή θέση ισορροπίας σε κάθε κυματικό βήμα S του κινητήρα. Το πλάτος της είναι σταθερό και συνήθως δίνεται ως ποσοστό της ροπής συγκράτησης του κινητήρα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συγκεκριμένη ροπή μπορεί να εκφραστεί σε συνάρτηση με τη θέση του ρότορα από τον τύπο:

$$T_{dt} = -T_{dtmax} \sin(4p\theta) \quad (3.7\alpha)$$

Όπου

T_{dt} : Ροπή “detent torque”

T_{dtmax} : Μέγιστη τιμή ροπής “detent torque”

Για λόγους ευκολίας σύγκρισης του μεγέθους της ροπής “detent torque” μεταξύ κινητήρων διαφορετικής ισχύος, εκφράζεται ως ποσοστό της μέγιστης ροπής συγκράτησης του εκάστοτε κινητήρα. Οπότε είναι:

$$C_d = \frac{T_{dtmax}}{T_{2phase}} \Rightarrow T_{dtmax} = C_d T_{2phase} \quad (3.7\beta)$$

Όπου

C_d : Ποσοστό ροπής “detent torque” ως προς τη ροπή συγκράτησης

T_{2phase} : Μέγιστη ροπή συγκράτησης δυο φάσεων

Αντικαθιστώντας την σχέση 3.7β στην σχέση 3.7α προκύπτει:

$$T_{dt} = -C_d T_{2phase} \sin(4p\theta) \quad (3.7\gamma)$$

1.4 Induced voltage

Η σωστή ενσωμάτωση αυτού του φαινομένου και των σχέσεων που το διέπουν στο μοντέλο είναι σημαντική, γιατί εφόσον οι τριβές πρόκειται να αμεληθούν, αυτή είναι η μόνη πηγή ροπής που αντιστέκεται στην κίνηση και βοηθάει το μοντέλο να διατηρεί πεπερασμένες αποκρίσεις ή να μην παρουσιάζει αστάθεια. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι 1.13 που δόθηκαν στο 1° μέρος στην ενότητα ‘Ροπή σύγχρονης λειτουργίας’.

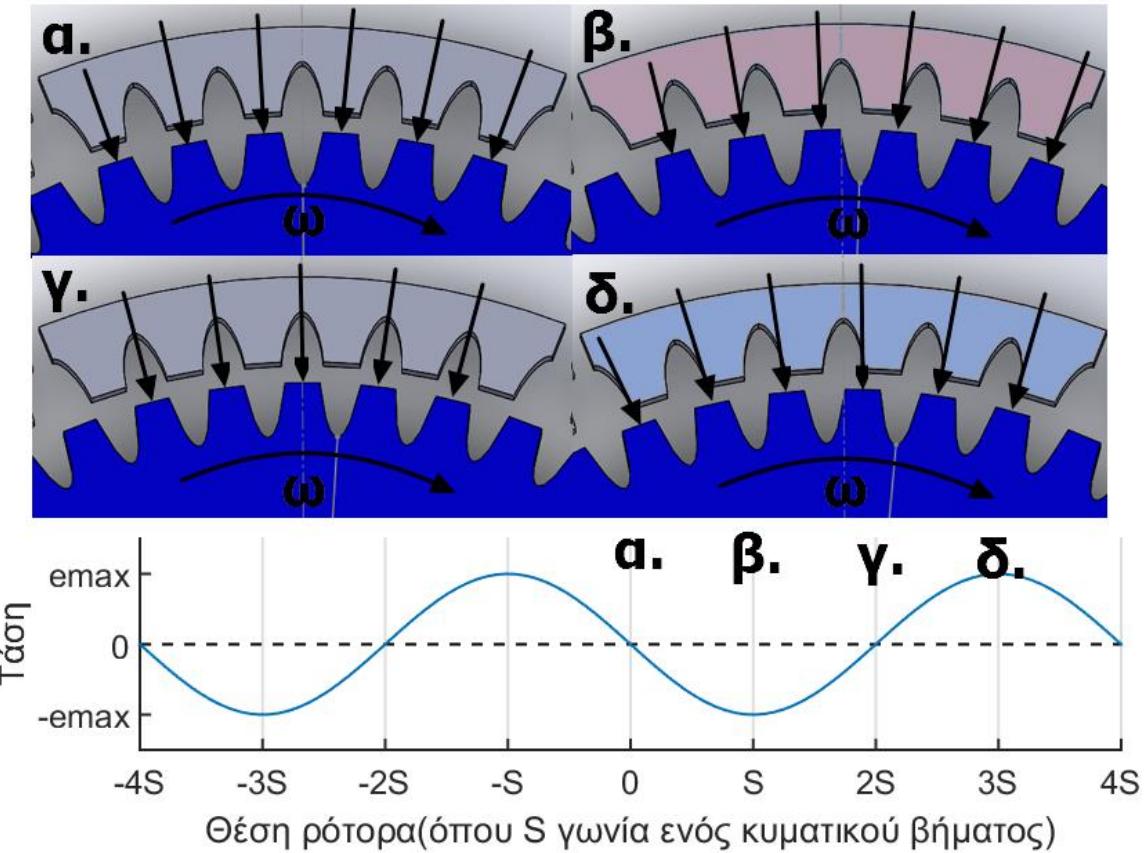
Για την σωστή λειτουργία τους στο μοντέλο, αυτές οι σχέσεις είναι απαραίτητο να έχουν τη σωστή διαφορά φάσης με τις προηγούμενες που χρησιμοποιούνται για τη ροπή. Έτσι, εφόσον η παραγόμενη ροπή της φάσης A εκφράζεται από την σχέση 3.6 η οποία χαρακτηρίζεται από συνάρτηση $- \sin$, η αντίστοιχη αντίθετη επαγόμενη τάση είναι συμφασική και χαρακτηρίζεται επίσης από σχέση $- \sin$. Αντίστοιχα υπολογίζεται και η τάση στην περίπτωση της φάσης B. Οπότε:

$$e_A = -p\psi_M \sin(p\theta) d\theta/dt \quad (3.8\alpha)$$

$$e_B = -p\psi_M \cos(p\theta) d\theta/dt \quad (3.8\beta)$$

Όπου

- e_A : Επαγόμενη τάση σε φάση A
- e_B : Επαγόμενη τάση σε φάση B
- p : Πλήθος ακμών του ρότορα
- ψ_M : Μέγιστη πεπλεγμένη μαγνητική ροή ανάμεσα σε φάση και ρότορα
- θ : Γωνιακή θέση ρότορα σε ακτίνια
- $d\theta/dt$: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα



Συμπεριφορά επαγόμενης τάσης στη φάση A(Εικ.3.2)

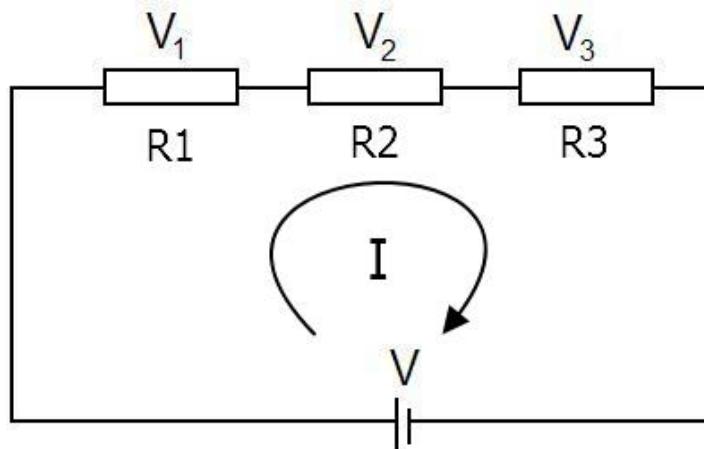
Στην εικόνα 3.2, e_{\max} είναι η μεγίστη τάση που παράγεται από επαγωγή στα τυλίγματα για ταχύτητα ρότορα ω . Ο ρότορας κινείται ωρολογιακά με σταθερή ταχύτητα ω .

Στην εικόνα 3.2 α και γ φαίνεται πως η επαγόμενη τάση μηδενίζεται όταν οι ακμές του ρότορα είναι στοιχισμένες με τις ακμές (α) ή τις κοιλάδες (γ) του στάτη. Αυτό συμβαίνει διότι στις συγκεκριμένες θέσεις μηδενίζεται ο ρυθμός αλλαγής της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσά τους. Στις άλλες δυο περιπτώσεις, β και δ, ο ρυθμός αλλαγής της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής και συνεπώς η επαγόμενη τάση μεγιστοποιούνται. Τα μαύρα βέλη συμβολίζουν το μαγνητικό πεδίο του ρότορα στην μεριά του νότιου μαγνητικού του πόλου.

Η επαγόμενη τάση δημιουργείται κάθε φορά στο τύλιγμα της φάσης με σκοπό να αντισταθεί στην κίνηση. Στην περίπτωση που οι ακμές του ρότορα απομακρύνονται από τις ακμές του στάτη, δημιουργείται τάση ώστε να αναπτυχθεί αντίθετος μαγνητικός πόλος από αυτόν του στάτη με 'σκοπό' την αντίσταση στην κίνηση μέσω έλξης(εικόνα 3.2 β.). Αντίθετα, όταν οι ακμές του ρότορα πλησιάζουν αυτές του στάτη η αντίσταση στην κίνηση γίνεται μέσω απώθησης, οπότε η τάση που αναπτύσσεται από επαγωγή είναι τέτοια ώστε να προκαλέσει όμοιο μαγνητικό πεδίο στον στάτη με αυτό του ρότορα(Εικ. 3.2 δ.). Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από τον νόμο του Λεντς.

1.5 Kirchhoff's second law

Ο νόμος τάσης του Γκουστάβ Κίρχοφ είναι ο δεύτερος από τους θεμελιώδεις νόμους που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κυκλωμάτων. Ο νόμος τάσης δηλώνει ότι για μια διαδρομή κλειστού βρόχου σε ένα κύκλωμα το αλγεβρικό άθροισμα όλων των τάσεων είναι ίσο με το μηδέν. Αυτός ο νόμος έχει τις ρίζες του στην αρχή διατήρησης της ολικής ενέργειας σε ένα σύστημα.



Δεύτερος κανόνας του Κίρχοφ (Εικ.3.3)

Για την εικόνα 3.3 σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Κίρχοφ ισχύει ότι το άθροισμα της πτώσης τάσης στους αντιστάτες R1, R2 και R3 που είναι αντίστοιχα V1, V2 και V3 είναι ίσο με την παροχή τάσης της πηγής V. Στον νόμο των τάσεων τα πρόσημα των τάσεων πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Έτσι είναι:

$$V_1 + V_2 + V_3 - V = 0 \quad \text{ή} \quad V_1 + V_2 + V_3 = V$$

Σε γενική μορφή:

$$\sum_{k=1}^n V_k = 0, \text{ όπου } V_k \text{ για } k = 1 \dots n \text{ οι τάσεις του κλειστού βρόχου} \quad (3.9)$$

2. Formatting the model's equations

Αν και οι σχέσεις που προαναφέρθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσιες για την ανάπτυξη του μοντέλου, η παρακάτω διαδικασία μορφοποίησής τους είναι χρήσιμη γιατί διευκολύνει την μετάφραση τους σε μπλοκ του Simulink. Αρχικά, για να υπολογιστεί η ολική ροπή στον ρότορα αρκεί να αθροιστούν η ροπή που παρέχεται από την φάση A και τη φάση B, η ροπή “detent torque” και η εξωτερικά εφαρμοζόμενη ροπή στον ρότορα:

$$T_{dt} = -C_d T_{2phase} \sin(4p\theta)$$

$$T_A = -K_T I_A \sin(p\theta)$$

$$T_B = -K_T I_B \cos(p\theta)$$

$$\begin{aligned} T_{sum} &= T_A + T_B + T_{dt} + T_{ex} \\ &= -K_T I_A \sin(p\theta) - K_T I_B \cos(p\theta) - C_d T_{2phase} \sin(4p\theta) + T_{ex} \end{aligned}$$

Όπου

- T_{sum} : Συνολική ροπή που ασκείται στο ρότορα
- T_A : Ροπή που ασκείται από τη φάση A
- T_B : Ροπή που ασκείται από τη φάση B
- T_{dt} : Ροπή που οφείλεται στον μόνιμο μαγνήτη (Detent torque)
- T_{ex} : Συνολική εξωτερικά εφαρμοζόμενη ροπή
- I_A : Ρεύμα φάσης A
- I_B : Ρεύμα φάσης B

Έπειτα εφαρμόζεται ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα για περιστροφή – σχέση 3.1:

$$\begin{aligned} I_L \dot{\omega} &= -K_T I_A \sin(p\theta) - K_T I_B \cos(p\theta) - C_d T_{2phase} \sin(4p\theta) + T_{ex} \\ \Rightarrow \frac{d\omega(t)}{dt} &= -\frac{1}{I_L} \{ K_T I_A(t) \sin(p\theta(t)) \\ &\quad + K_T I_B(t) \cos(p\theta(t)) + C_d T_{2phase} \sin(4p\theta(t)) - T_{ex} \} \quad (3.10) \end{aligned}$$

Όπου

- $\omega(t)$: Ταχύτητα ρότορα
- $\theta(t)$: Θέση ρότορα
- $I_A(t)$: Ρεύμα φάσης A
- $I_B(t)$: Ρεύμα φάσης B

Τα παραπάνω μεγέθη της σχέσης 3.10 είναι και τα μόνα που μεταβάλλονται με τον χρόνο. Επίσης, η γωνιακή επιτάχυνση έχει γραφτεί σαν παράγωγος της ταχύτητας. Η παραπάνω σχέση (3.10) είναι και η πρώτη σημαντική για την ανάπτυξη του μοντέλου. Ο λόγος για τον οποίο είναι χρήσιμη σε αυτήν την μορφή είναι διότι με ένα απλό μπλοκ ολοκλήρωσης μπορεί να εξαχθεί η ταχύτητα του ρότορα ω . Εισάγοντας έπειτα την ταχύτητα ω σε έναν ακόμη ολοκληρωτή μπορεί να εξαχθεί η θέση του ρότορα.

Στη συνέχεια μορφοποιείται αντίστοιχη σχέση της οποίας το ολοκλήρωμα δίνει το ρεύμα της φάσης. Αρχικά εφαρμόζεται ο κανόνας του Κίρχοφ για τον κλειστό βρόχο μιας φάσης. Διαφορά δυναμικού μπορεί να παρατηρηθεί στα άκρα της αντίστασης, του πηνίου ή μέσω επαγωγής. Έτσι π.χ. για την φάση A είναι:

$$V_{SA}(t) = RI_A(t) + L \frac{dI_A(t)}{dt} - p\psi_M \sin(p\theta(t))\omega(t)$$

Όπου

$V_{SA}(t)$: Τροφοδοτούμενη τάση φάσης A

Ο όρος $RI_A(t)$ είναι η πτώση τάσης στην αντίσταση του τυλίγματος ενώ ο όρος $L \frac{dI_A(t)}{dt}$ η πτώση τάσης λόγω αυτεπαγωγής. Ο όρος $-p\psi_M \sin(p\theta(t))\omega(t)$ εκφράζει την επαγόμενη τάση λόγω μεταβολής της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής. Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς την παράγωγο του ρεύματος παίρνουμε την ζητούμενη σχέση για την φάση A:

$$\frac{dI_A(t)}{dt} = \frac{1}{L} \{ V_{SA}(t) - RI_A(t) + p\psi_M \sin(p\theta(t))\omega(t) \} \quad (3.11)$$

Η σχέση 3.11 με ένα μπλοκ ολοκλήρωσης μπορεί να δώσει το ρεύμα της φάσης A. Τα μεγέθη της σχέσης που μεταβάλλονται είναι το ρεύμα φάσης A $I_A(t)$ και η παράγωγός του, η θέση του ρότορα $\theta(t)$ και η ταχύτητά του $\omega(t)$. Η τροφοδοτούμενη τάση, $V_{SA}(t)$, αν και μεταβάλλεται έχει ρόλο εισόδου στο μοντέλο, οπότε είναι πάντα γνωστή.

Με την ίδια διαδικασία μορφοποιείται η αντίστοιχη σχέση για την φάση B. Οπότε για την φάση B είναι:

$$\frac{dI_B(t)}{dt} = \frac{1}{L} \{ V_{SB}(t) - RI_B(t) + p\psi_M \cos(p\theta(t))\omega(t) \} \quad (3.12)$$

3. Model construction in Simulink

Για την κατασκευή του μοντέλου αρχικά τα δεύτερα μέλη των σχέσεων 3.10, 3.11 και 3.12 περνούν από μπλοκ ολοκλήρωσης. Έπειτα, τα ρεύματα των φάσεων καθώς και η ταχύτητα και η θέση του ρότορα πρέπει να δρομολογηθούν στους κατάλληλους όρους ώστε να ολοκληρωθούν έτσι οι αναδρομικές σχέσεις.

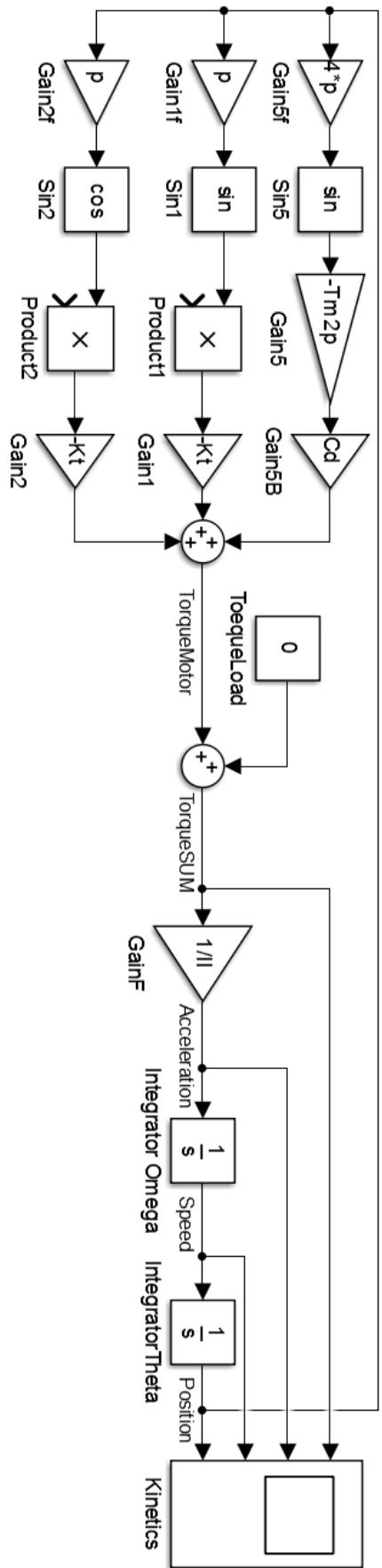
Αρχικά το 2^o μέλος της σχέσης 3.10 εισέρχεται σε ένα μπλοκ ολοκλήρωσης όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4. Αποτέλεσμα είναι η έξοδος του ολοκληρωτή Omega να είναι η ταχύτητα του ρότορα. Για εξαγωγή της θέσης, το σήμα του περνάει από έναν δεύτερο ολοκληρωτή. Ο ολοκληρωτής Theta έχει σαν έξοδο την θέση του ρότορα. Οι αρχικές συνθήκες της ολοκλήρωσης, δηλαδή η αρχική ταχύτητα και η αρχική θέση, μπορούν να εισαχθούν στις επιλογές των ίδιων μπλοκ ολοκλήρωσης στο simulink. Τέλος, χρησιμοποιείται μπλοκ scope για την θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και την συνολική ροπή του ρότορα. Όπως φαίνεται στο σχήμα, στην συνολική ροπή έχει προστεθεί ένας ακόμη όρος που αντιπροσωπεύει την εξωτερικά ασκούμενη ροπή στον ρότορα. Αυτή η ροπή μπορεί να κρατηθεί μηδενική είτε να δοθεί σε μορφή συνάρτησης από τον χρήστη.

Το σήμα της θέσης έχει δρομολογηθεί από την έξοδο του δεύτερου ολοκληρωτή στην είσοδο των δυο τριγωνομετρικών συναρτήσεων ημιτόνου και συνημίτονου (Εικ. 3.4). Τα δύο μπλοκ γινομένου 'Product1' και 'Product2' έχουν μια κενή θέση στην οποία πρέπει να δρομολογηθεί το ρεύμα της κάθε φάσης.

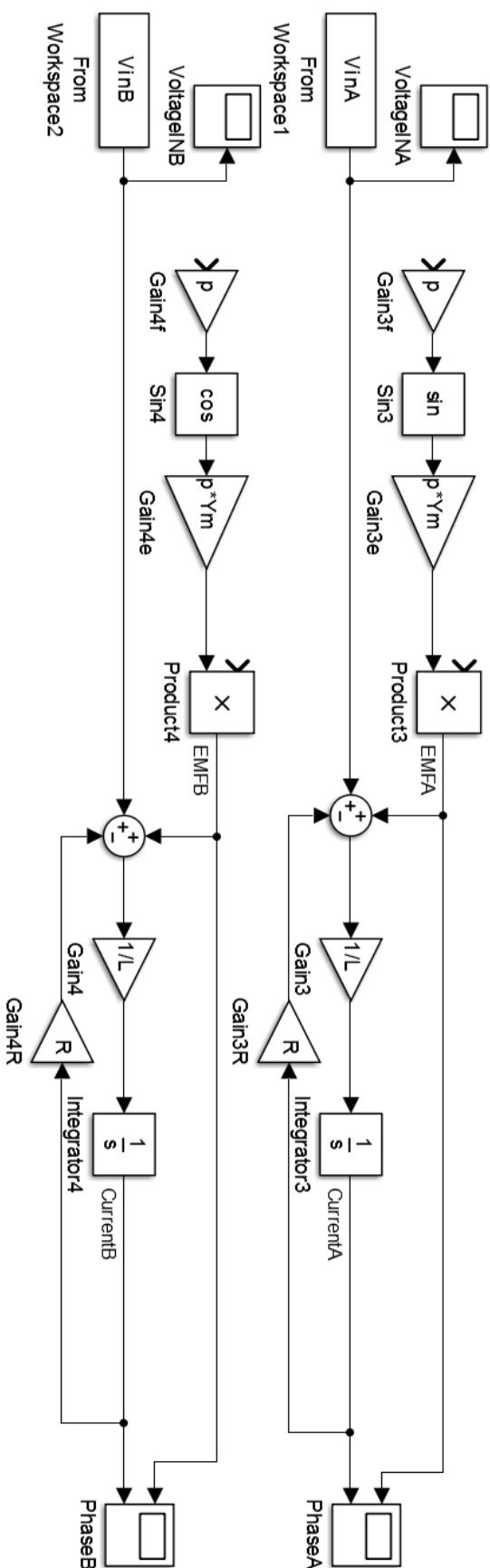
Συνεχίζοντας, τα 2^a μέλη των σχέσεων 3.11 και 3.12 εισέρχονται σε ολοκληρωτή με αποτέλεσμα η έξοδός τους να δίνει το ρεύμα της κάθε φάσης. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.5. Για την τάση εισόδου έχουν χρησιμοποιηθεί μπλοκ "From Workspace" με σκοπό την χρήση κυματομορφών που θα δημιουργηθούν από πρόγραμμα σε μορφή πινάκων. Επιπλέον, έχουν προστεθεί μπλοκ Scope για την παρακολούθηση του σήματος ρευμάτων στις φάσεις, της εισαγόμενης τάσης στα τυλίγματα και της επαγόμενης τάσης.

Στην εικόνα 3.5 το σήμα του ρεύματος έχει δρομολογηθεί πίσω στους όρους πτώσης τάσης της αντίστασης των τυλιγμάτων στα μπλοκ 'Gain3R' και 'Gain4R'. Τα μπλοκ 'Product3' και 'Product4' έχουν μια κενή θέση στην οποία πρέπει να δρομολογηθεί η ταχύτητα του ρότορα που είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της επαγόμενης τάσης. Το ίδιο ισχύει και για τα μπλοκ 'Gain3f' και 'Gain4f' στα οποία πρέπει να δρομολογηθεί η θέση του ρότορα.

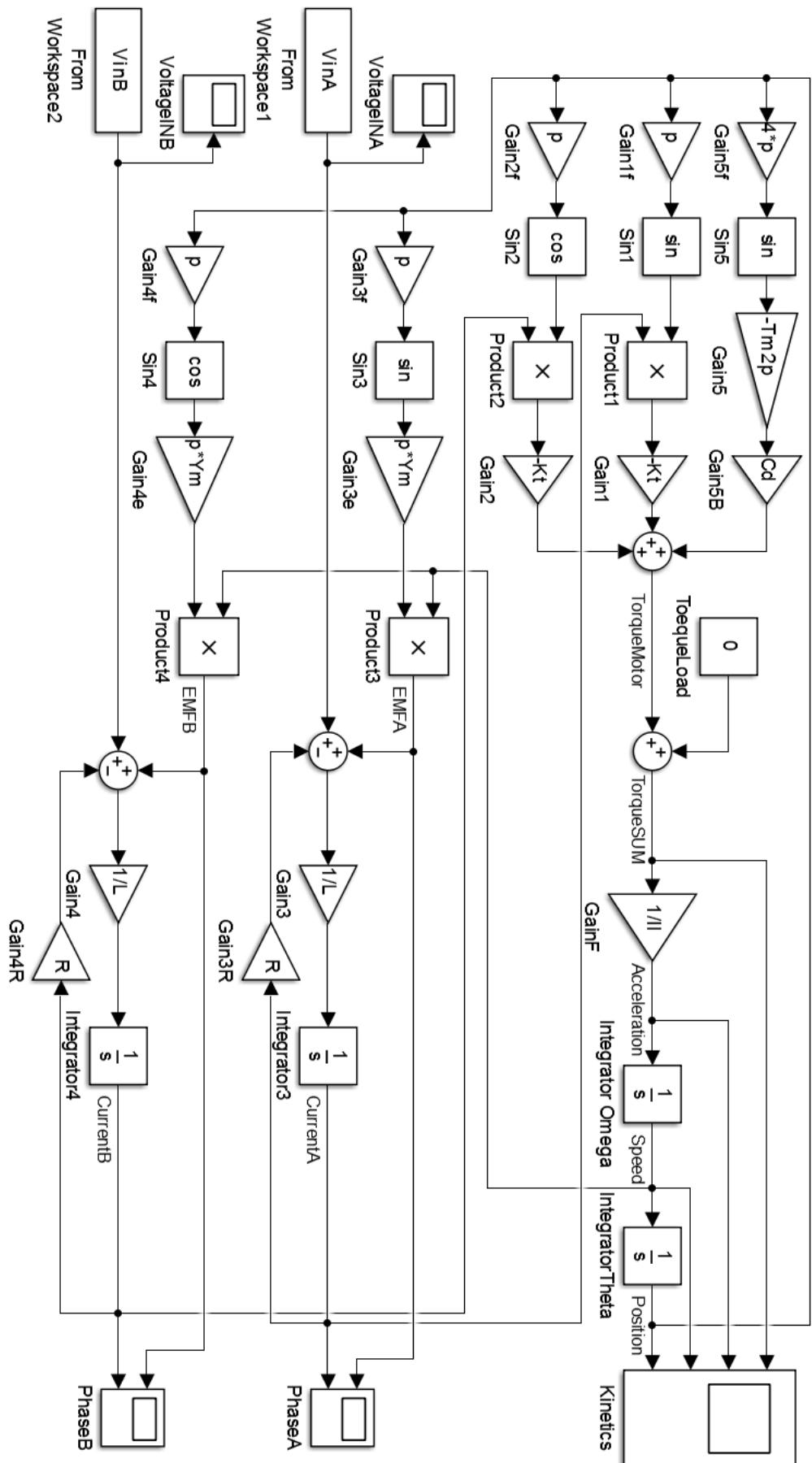
Στην εικόνα 3.6 η κατασκευή του μοντέλου έχει ολοκληρωθεί. Τα απαραίτητα σήματα ταχύτητας, θέσης και ρεύματος των φάσεων έχουν δρομολογηθεί στα μπλοκ που παρέμεναν με κενές θέσεις και οι τρείς σχέσεις 3.10, 3.11 και 3.12 είναι πλέον συνδεδεμένες. Το μοντέλο όμως δεν είναι ακόμα έτοιμο να εκτελεστεί εφόσον δεν έχουν οριστεί οι σταθερές που το διέπουν.



Κομμάτι ενσωμάτωσης ροπής και κίνησης μοντέλου (Εικ.3.4)



Κομμάτι ενσωμάτωσης ηλεκτρικής συμπεριφοράς φάσεων (Εικ.3.5)



Ολοκληρωμένο μοντέλο βηματικού κινητήρα (Εικ.3.6)

4. Model parameters

4.1 Constant current-torque conversion constant - K_T

Η σταθερά στην οποία αναφέρεται ο τίτλος είναι εκείνη που μπορεί να εντοπιστεί στην σχέση 3.3 της προηγούμενης ενότητας ‘Ρεύμα και παραγόμενη ροπή φάσης’:

$$T_{maxX} = K_T I_X \quad (3.3)$$

Όπου

T_{maxX} : Μέγιστη παραγόμενη ροπή φάσης X

I_X : Ρεύμα στην φάση X

K_T : Σταθερά συσχέτισης ρεύματος-ροπής φάσης. Όσο μεγαλύτερη, τόσο μεγαλύτερη ροπή δέχεται ο ρότορας από την φάση X για σταθερή τιμή ρεύματος στην φάση X.

Για να υπολογιστεί αυτή η σταθερά για έναν βηματικό κινητήρα θα πρέπει να είναι γνωστή η ροπή που παράγεται για μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος στα τυλίγματά της. Η μέτρηση τέτοιων τιμών είναι επώδυνη αφού απαιτεί την χρήση αισθητήρων ρεύματος και ροπής σε κατάλληλη διάταξη. Αυτές οι τιμές συνήθως μπορούν να υπολογιστούν από παραμέτρους που δίνονται από τον κατασκευαστή στα φύλλα δεδομένων των περισσότερων κινητήρων.

Στο φύλλο δεδομένων του συγκεκριμένου κινητήρα (Εικόνα 2.14 της σελίδας 76) φαίνεται πως αναφέρεται το ονομαστικό ρεύμα φάσης (Rated current) και η μέγιστη ροπή συγκράτησης του κινητήρα (Holding torque). Να σημειωθεί πως η μέγιστη ροπή συγκράτησης αναφέρεται στην μέγιστη ροπή πού ο κινητήρας μπορεί να παράξει όταν και οι δυο φάσεις δέχονται μέγιστο ρεύμα (2 phases). Προτού χρησιμοποιηθεί η ροπή αυτή για τον υπολογισμό της σταθεράς K_T θα πρέπει να μετατραπεί σε μέγιστη ροπή συγκράτησης μιας φάσης μέσω του τύπου 1.6:

$$T_{2Phase} = \sqrt{2} T_{Phase} \Rightarrow T_{Phase} = \frac{T_{2Phase}}{\sqrt{2}} \quad (1.6)$$

Όπου

T_{2Phase} : Μέγιστη ροπή συγκράτησης δυο φάσεων

T_{Phase} : Μέγιστη ροπή συγκράτησης μιας φάσης

Η σταθερά K_T στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις δύο αυτές σχέσεις:

$$K_T = \frac{T_{Phase}}{I_{max}} = \frac{\frac{T_{2Phase}}{\sqrt{2}}}{I_{max}} = \frac{T_{2Phase}}{\sqrt{2}I_{max}} \quad (3.13)$$

Όπου

I_{max} : Ονομαστικό ρεύμα μιας φάσης(Rated current)

Σε περίπτωση που καμία από τις μέγιστες ροπές συγκράτησης μίας ή δύο φάσεων δεν δίνεται ή δεν είναι διαθέσιμη από δεδομένα, ο υπολογισμός της θα πρέπει να γίνεται πειραματικά.

Ο κινητήρας πρέπει να εγκατασταθεί σε διάταξη με δυνατότητα μέτρησης της ροπής που ασκείται στον άξονα. Εξετάζεται ο πειραματικός υπολογισμός της μέγιστης ροπής συγκράτησης μιας φάσης του κινητήρα.

Για τον υπολογισμό της μέγιστης ροπής συγκράτησης μιας φάσης αρκεί να ενεργοποιηθεί μόνο μία φάση με την μέγιστη ονομαστική της τάση. Μετά την ενεργοποίηση και εφόσον δεν ασκείται εξωτερική ροπή στον άξονα, ο ρότορας ισορροπεί σε κάποια θέση όπου η ασκούμενη ροπή από την ενεργή φάση είναι μηδενική. Στη συνέχεια πρέπει να μετρηθεί η απαιτούμενη ροπή που πρέπει να εφαρμοσθεί στον άξονα ώστε να περιστραφεί κατά S (δηλαδή γωνία ίση με περιστροφή ενός κυματικού βήματος ή 1.8° για τον συγκεκριμένο κινητήρα) προς οποιαδήποτε φορά από τη θέση ισορροπίας. Αυτή η ροπή αντιπροσωπεύει την μέγιστη ροπή συγκράτησης μιας φάσης του βηματικού κινητήρα. Η τελευταία πρόταση γίνεται εμφανέστερη μετά τη μελέτη του διαγράμματος ροπής-θέσης της εικόνας 1.32 στο κεφάλαιο “4.1 Στατική ροπή μιας φάσης”.

4.2 Rotor and load moment of inertia - I_L

Η ροπή αδράνειας του ρότορα είναι σταθερή και δίνεται συνήθως στις προδιαγραφές του κινητήρα από τον κατασκευαστή. Στο φύλλο δεδομένων του κινητήρα 42HD4027-01 (Εικόνα 2.14 της σελίδας 76) η ροπή αδράνειας του ρότορα δίνεται να είναι $57 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ ή $57 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας του φορτίου πέφτει κάθε φορά στα χέρια του υπευθύνου για την εκάστοτε εφαρμογή. Αν και η ροπή αδράνειας των εξωτερικών φορτίων δύναται να μεταβάλλεται θα θεωρηθεί σταθερή. Μεταβολές στην ροπή αδράνειας καθιστούν τον ελεγκτή και το πρόγραμμα οδήγησης ανοιχτού βρόχου αναποτελεσματικό στο να κρατάει την χρήση του κινητήρα εντός των ορίων ροπής σύγχρονης λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα ο κινητήρας πιθανώς να χάσει τον βηματισμό και τον συγχρονισμό του.

Κάποια είδη φορτίων, όπως εμπορικές διατάξεις μετάδοσης κίνησης, μπορεί να αναφέρουν την ροπή αδράνειάς τους από τον κατασκευαστή. Για οποιαδήποτε πρόσθετα φορτία στην μετάδοση κίνησης πρέπει να γίνουν οι κατάλληλοι υπολογισμοί και η ροπή αδράνειάς τους να προστεθεί στην ολική ροπή αδράνειας του φορτίου.

Τέλος, η ροπή αδράνειας του φορτίου και του ρότορα προστίθενται για τον υπολογισμό της ολικής ροπής αδράνειας του συστήματος όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο μέρος “1.1 Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα για περιστροφή”:

$$I_L = I_{ROTOR} + I_{LOAD} \quad (3.2)$$

Όπου

I_{ROTOR} : Ροπή αδράνειας ρότορα

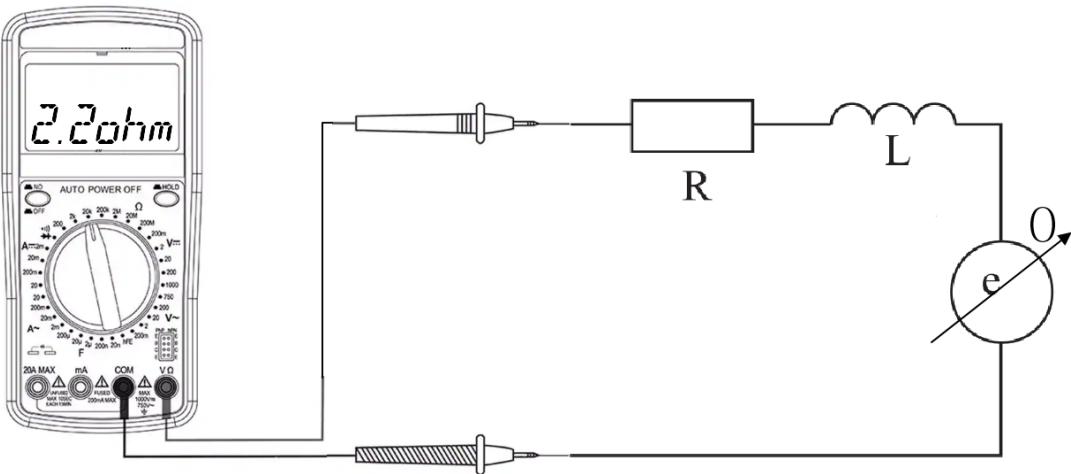
I_{LOAD} : Ροπή αδράνειας φορτίου

I_L : Ροπή αδράνειας ρότορα και φορτίου

4.3 Winding resistance - R

Η αντίσταση των τυλιγμάτων είναι μια πολύ βασική παράμετρος κάθε κινητήρα και δίνεται συνήθως από τον κατασκευαστή. Μικρότερες τιμές αντίστασης μπορεί να συνδέονται με την ύπαρξη διμερούς περιέλιξης. Στο φύλλο δεδομένων του κινητήρα 42HD4027-01 (Εικόνα 2.14 της σελίδας 76) η αντίσταση κάθε φάσης(Phase resistance) δίνεται να είναι ίση με 2.2 Ohms στους 20°C με $\pm 10\%$ πιθανό λάθος.

Στην περίπτωση που αυτή η πληροφορία είναι δύσκολο να βρεθεί, η μέτρηση της μπορεί να γίνει με την χρήση ενός πολύμετρου. Αρκεί να επιλεχθεί η σωστή λειτουργία για μέτρηση μικρών τιμών αντίστασης και οι απολήξεις του να συνδεθούν σε σειρά με μια από τις φάσεις. Η πολικότητα της σύνδεσης δεν έχει σημασία για μετρήσεις σε αντιστάτες. Ωστόσο είναι σημαντικό τα καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση καθώς και το σημείο σύνδεσής τους με την φάση να μην παρουσιάζει μεγάλες τιμές αντίστασης. Η διάταξη μέτρησης φαίνεται στην εικόνα 3.7 που ακλουθεί.



Μέτρηση αντίστασης φάσης με πολύμετρο(Εικ.3.7)

4.4 Winding inductance - L

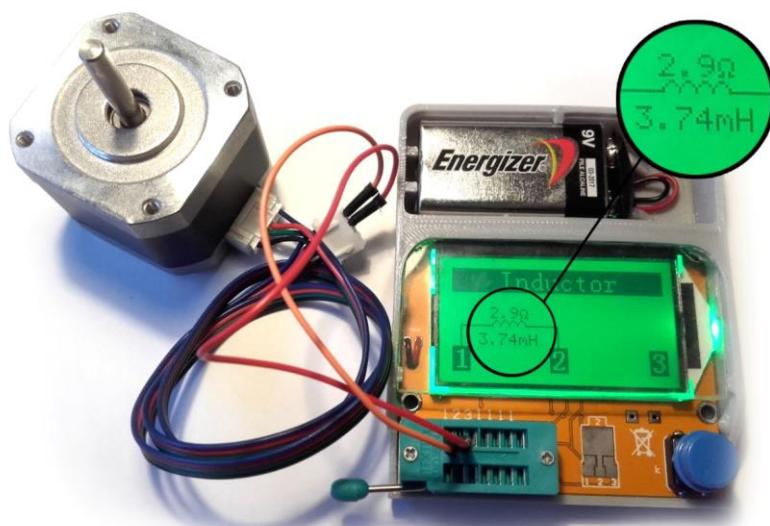
Η σταθερά επαγωγής των φάσεων είναι μια εξίσου βασική παράμετρος με αυτήν της αντίστασης και δίνεται συνήθως στα φύλλα δεδομένων. Η τιμή της συνδέεται άμεσα με τον αριθμό σπειρών σε κάθε τύλιγμα.

Η μέτρηση της σταθεράς επαγωγής είναι συνήθως μια επίπονη διαδικασία η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Ένας από τους τρόπους μέτρησης είναι η ενσωμάτωση του τυλίγματος σε ταλαντεύομενο κύκλωμα συντονισμού διάταξης L-C με γνωστή τιμή πυκνωτή, η διέγερσή του, η εξαγωγή της κυματομορφής του, η μέτρηση της συχνότητας ταλάντωσης και τέλος ο υπολογισμός της τιμής της σταθεράς επαγωγής του πηνίου με βάση τον τύπο υπολογισμού συχνότητας συντονισμού κυκλώματος L-C:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.14)$$

Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εργαλείο αναγνώρισης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων LCR, όπως στην εικόνα 3.8. Αυτά τα εργαλεία εκτελούν αυτόματα διαδικασίες όπως αυτή που περιγράφεται στην παραπάνω παράγραφο. Η μέτρηση του εργαλείου για την σταθερά επαγωγής φαίνεται να είναι 3.74mH και είναι μέσα στα όρια της τιμής 3.8mH ±20% που δίνεται από τον κατασκευαστή. Η τιμή της αντίστασης που δίνει το εργαλείο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που δίνει ο κατασκευαστής λόγω της αντίστασης που παρουσιάζουν τα εν σειρά καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση.

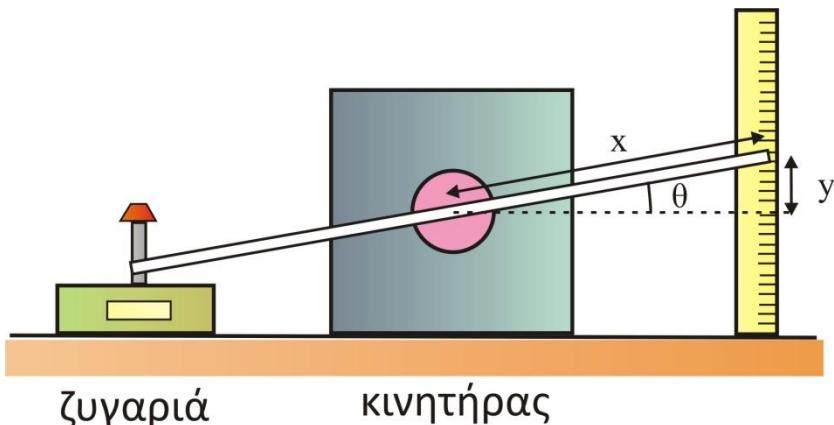
Η σταθερά επαγωγής των φάσεων διπολικού βηματικού κινητήρα μεταβάλλεται ελαφρώς σε συνάρτηση με τη θέση του ρότορα αλλά θεωρείται σταθερή.



Μέτρηση σταθεράς επαγωγής με μετρητή LCR(Εικ. 3.8)

4.5 Detent torque as percentage - C_d

Για τον συγκεκριμένο κινητήρα (42HD4027-01) δεν δίνεται κάποια τιμή για την ροπή “detent torque” στο φύλλο δεδομένων. Για την μέτρηση της ροπής μπορεί να κατασκευαστεί διάταξη μέτρησης της ροπής του ρότορα και να καταγραφούν τιμές για διάφορες γωνίες (Εικ. 3.9). Το αποτέλεσμα της μέτρησης συνήθως προσεγγίζει τριγωνομετρική καμπύλη σταθερού πλάτους.



Διάταξη μέτρησης ροπής “detent torque” (Εικ. 3.9)

Η τιμή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο επιλέχθηκε ώστε να είναι όμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται σε μοντέλο παρεμφερή κινητήρα. Βηματικός διπολικός κινητήρας ροπής συγκράτησης 3,4Nm μετρήθηκε να έχει ροπή “detent torque” πλάτους 0.05Nm. Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει το 1.6% της ροπής συγκράτησης του συγκεκριμένου κινητήρα. Εφόσον πιο ισχυροί κινητήρες εμφανίζουν μικρότερο ποσοστό ροπής “detent torque” ως προς τη ροπή συγκράτησής τους, για τον κινητήρα 42HD4027-01 θεωρείται ροπή “detent torque” ίση με το 2% της ροπής συγκράτησής του. Αυτό σημαίνει πως, εφόσον η μέγιστη ροπή συγκράτησης του κινητήρα είναι 0.4Nm, η ροπή “detent torque” θα εμφανίζει μέγιστη τιμή ή πλάτος ίσο με 0.008Nm. Το ποσοστό ροπής “detent torque” ως προς τη ροπή συγκράτησής του κινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση 3.7β:

$$C_d = \frac{T_{dtmax}}{T_{2phase}} = \frac{0.008}{0.4} = 2\% \quad (3.7\beta)$$

Όπου

C_d : Ποσοστό ροπής “detent torque” ως προς τη ροπή συγκράτησής

T_{dtmax} : Μέγιστη τιμή ροπής “detent torque”

T_{2phase} : Μέγιστη ροπή συγκράτησης δυο φάσεων

4.6 Maximum magnetic flux linkage between phase and rotor - ψ_M

Αυτή η σταθερά αποτελεί μια ακόμη παράμετρο του κινητήρα η οποία συνήθως δεν δίνεται από τον κατασκευαστή του. Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται δυο εναλλακτικοί τρόποι μέτρησης αυτής της σταθεράς για έναν βηματικό διπολικό υβριδικό κινητήρα.

Οι δύο μέθοδοι μέτρησης έχουν ως κοινό στοιχείο το ότι ο ρότορας του κινητήρα πρέπει να περιστραφεί με σταθερή ταχύτητα. Κατά την περιστροφή αυτή εξάγονται οι τιμές της ταχύτητας περιστροφής και του πλάτους της ως αποτέλεσμα παραγόμενης τάσης από επαγωγή σε ένα από τα τυλίγματα. Εφόσον τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι γνωστά, η τιμή της μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\psi_M = \frac{e_{max}}{p d\theta/dt} \quad (3.15)$$

Όπου

e_{max} : Μέγιστη επαγόμενη τάση ή πλάτος επαγόμενης τάσης

p : Πλήθος ακμών του ρότορα

ψ_M : Μέγιστο μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε φάση και ρότορα

$d\theta/dt$: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα

Η πρώτη μέθοδος εξαγωγής αυτών των απαραίτητων τιμών απαιτεί την χρήση ενός παλμογράφου (Εικ. 3.10). Το ημιτονοειδές σήμα που παράγεται από μια φάση ενώ ο ρότορας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα καταγράφεται και γίνεται μέτρηση του πλάτους αλλά και της περιόδου του. Εφόσον η γωνία του άξονα της μηχανής κατά την οποία το σήμα της επαγόμενης τάσης εκτελεί μια περίοδο είναι γνωστή και ίση με 7.2 μοίρες ή 0.1257 ακτίνια, η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο ρότορας μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της σχέσης:

$$d\theta/dt = 0.1257/T_e \quad (3.16)$$

Όπου

$d\theta/dt$: Γωνιακή ταχύτητα ρότορα

T_e : Περίοδος σήματος επαγόμενης τάσης

Το πλάτος του σήματος είναι μια τιμή που μπορεί να μετρηθεί άμεσα για ένα ηλεκτρικό σήμα. Μετά τον τελευταίο υπολογισμό για την ταχύτητα του ρότορα και την μέτρηση του πλάτους ταλάντωσης, χρησιμοποιείται η σχέση 3.15 για τον υπολογισμό της ζητούμενης μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα.

Η διάταξη που δημιουργήθηκε με σκοπό την μέτρηση αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.10. Μια από τις φάσεις του κινητήρα έχει συνδεθεί με τις απολήξεις του παλμογράφου ενώ ο άξονας της μηχανής έχει συνδεθεί με εξωτερικό κινητήρα ώστε να εξαναγκαστεί σε περιστροφή. Κατά τη διάρκεια της περιστροφής με σταθερή γωνιακή ταχύτητα καταγράφεται η παραγόμενη τάση της φάσης.



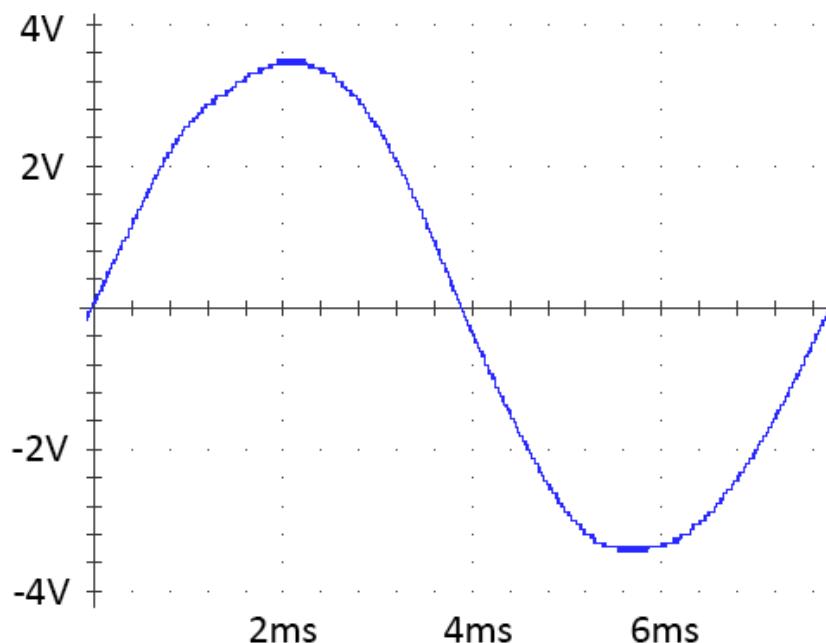
Διάταξη μέτρησης επαγόμενου κύματος με παλμογράφο (Εικ. 3.10)

Το αποτέλεσμα της μέτρησης που πραγματοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα 3.13. Ο οριζόντιος άξονας έχει διαβάθμιση 500μs και ο κάθετος 2V.

Μετρώντας με τους οπτικούς οδηγούς της οθόνης του παλμογράφου εξάγονται οι τιμές της περιόδου του σήματος, που είναι περίπου ίση με 7.8ms, και του πλάτους ταλάντωσης, που είναι περίπου ίσο με 3.5V (Εικ. 3.11). Επίσης, το πλήθος ακμών του ρότορα είναι γνωστό και ίσο με 50. Με την εφαρμογή των εξισώσεων 3.16 και 3.15 που προαναφέρθηκαν, το μέγιστο μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε φάση και ρότορα προκύπτει ίσο με 0.004344 Webers.

$$d\theta/dt = 0.1257/0.0078 \Rightarrow d\theta/dt = 16.115 \text{ rad/s} \quad (3.16)$$

$$\psi_M = \frac{e_{max}}{p d\theta/dt} = \frac{3.5V}{50 \times 16.115 \text{ rad/s}} \Rightarrow \psi_M = 0.004344 \text{ Webers} \quad (3.15)$$



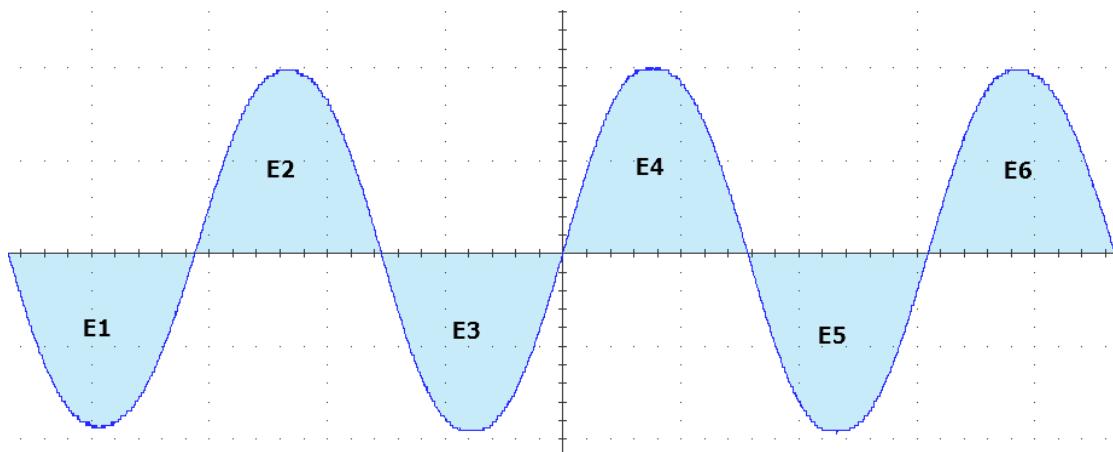
Υπολογισμός παραμέτρων κύματος με οπτικούς βοηθούς (Εικ. 3.11)

Εναλλακτικά, ως μια πιο άμεση μέθοδος, για την εύρεση της ζητούμενης σταθεράς μπορεί να ολοκληρωθεί το σήμα επαγόμενης τάσης από κάποιον χρόνο που ισούται με OV έως τον χρόνο του επόμενου μηδενισμού. Το εμβαδόν που χαρακτηρίζεται από την ολοκλήρωση αυτή είναι διπλάσιο της τιμής της σταθεράς μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από τον νόμο επαγωγής του Faraday.

Το σήμα της επαγόμενης τάσης εκφράζεται σε άδονες τάσης (V) – χρόνου (sec) και συμπερασματικά το εμβαδόν έχει μονάδες Volts x Seconds, που είναι ισοδύναμα με τη μονάδα μέτρησης πυκνότητας μαγνητικής ροής πεδίου, δηλαδή τα Weber. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται και για την ανάλυση μετασχηματιστών.

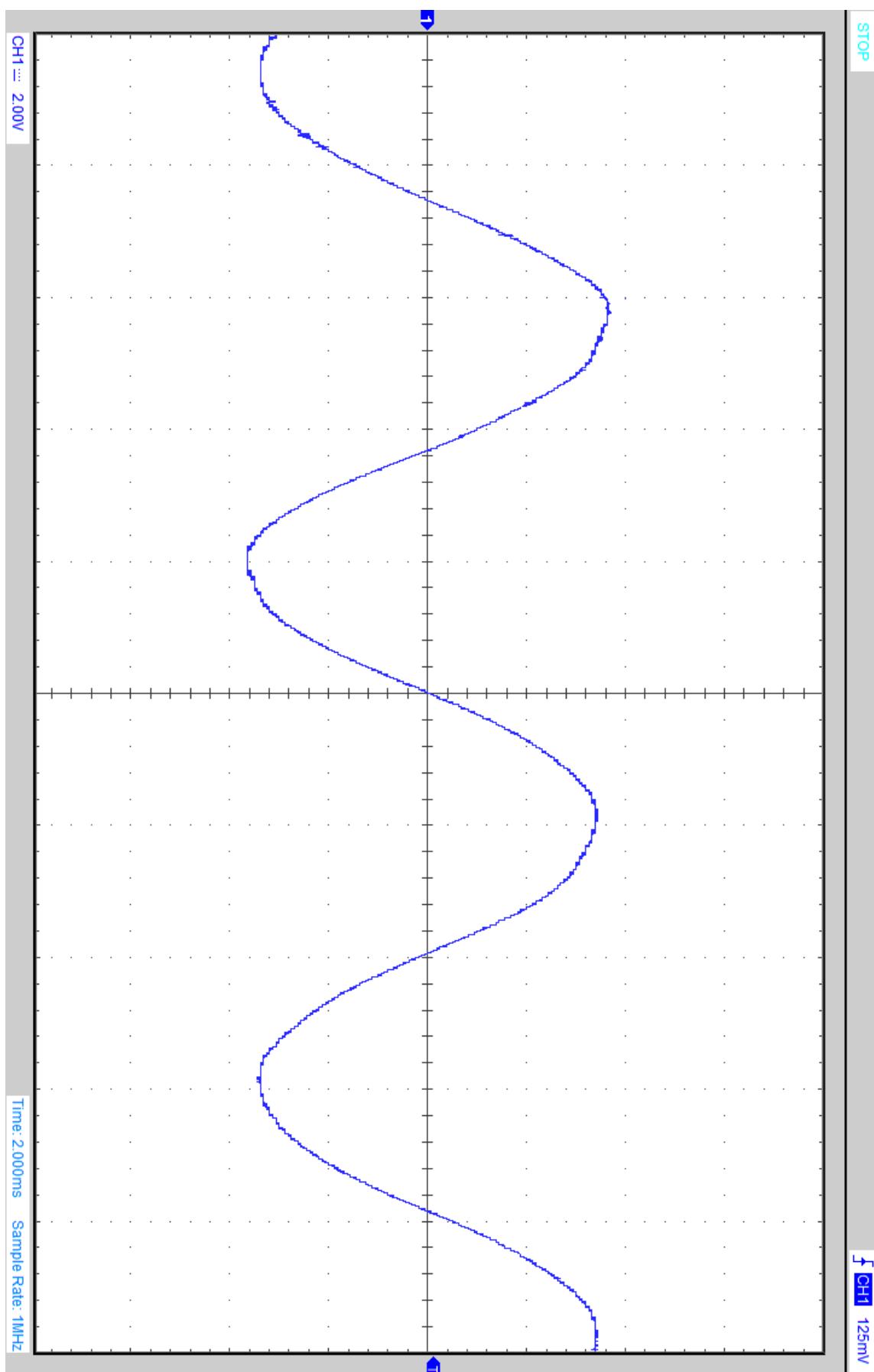
Πολλοί σύγχρονοι ηλεκτρονικοί παλμογράφοι ενσωματώνουν λειτουργίες ολοκλήρωσης σημάτων πράγμα που διευκολύνει αυτήν την διαδικασία. Επίσης, αυτή η μέθοδος είναι η μόνη που λειτουργεί και σε περιπτώσεις μη ημιτονοειδούς συμπεριφοράς της επαγόμενης τάσης.

Για επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας της μέτρησης είναι δυνατή η ολοκλήρωση μεγάλου τμήματος πολλών περιόδων και έπειτα η εύρεση του μέσου όρου των εμβαδών. Στην εικόνα 3.12 κάθε ένα από τα εμβαδά E1 μέχρι E6 είναι ίσο με δυο φορές το μέγιστο μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε φάση και ρότορα. Για την εύρεση μέσου όρου, τα εμβαδά E1 μέχρι E6 αθροίζονται και διαιρούνται με το πλήθος τους, δηλαδή το 6. Στη συνέχεια η τιμή διαιρείται με το 2 προς εύρεση της μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα.



Εμβαδά επαγόμενου κύματος τάσης σε μια φάση (Εικ. 3.12)

Μετά την επεξεργασία σήματος 16 περιόδων του επαγόμενου κύματος στο Matlab σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο μέσου όρου το μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε φάση και ρότορα προέκυψε ίσο με 0.004412 Webers.



Επαγόμενο κύμα από μέτρηση παλμογράφου (Εικ. 3.13)

Για την δεύτερη μέθοδο μέτρησης της μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα γίνεται χρήση ενός πολύμετρου και ενός ταχύμετρου. Με τη χρήση του πολύμετρου μπορεί να μετρηθεί η ρίζα του μέσου τετραγώνου μιας εναλλασσόμενης τάσης(Root-Mean-Square Voltage). Ειδικά στην περίπτωση που αυτή η πηγή παρουσιάζει συμπεριφορά ημιτόνου, το πλάτος ταλάντωσης με την ρίζα του μέσου τετραγώνου της τάσης συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$V_{RMS} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_{pk} = \sqrt{2} * V_{RMS} \quad (3.17)$$

Όπου

V_{RMS} : Ρίζα του μέσου τετραγώνου της τάσης σήματος

V_{pk} : Κορυφή της τάσης σήματος (peak)

Με βάση τον τύπο 3.17 και εφόσον η τάση V_{RMS} είναι γνωστή από την μέτρηση του πολύμετρου, μπορεί να υπολογιστεί το πλάτος ταλάντωσης που είναι ίσο με V_{pk} .

Στην προκείμενη περίπτωση, η περίοδος του σήματος δεν μπορεί να υπολογιστεί. Για αυτόν τον λόγο η ταχύτητα του ρότορα μετράται άμεσα με ένα ταχύμετρο (Εικ. 3.14).



Διάταξη μέτρησης επαγόμενου κύματος με ταχύμετρο και πολύμετρο (Εικ. 3.14)

Χρησιμοποιώντας αυτήν την διάταξη μετρήθηκαν επτά τιμές της τάσης V_{RMS} σε διαφορετικές ταχύτητες του ρότορα $d\theta/dt$ (Εικ. 3.15 επόμενης σελίδας). Με βάση τις σχέσεις 3.17 και 3.15 υπολογίζεται η τιμή της μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα για κάθε ζεύγος δεδομένων V_{RMS} , $d\theta/dt$ και έπειτα από τον μέσο όρο όλων των αποτελεσμάτων προκύπτει $\psi_M = 0.004431$ Weber.



*Μετρήσεις με ταχύμετρο και πολύμετρο σε Volts και RPM αντίστοιχα.
Η ένδειξη των RPM στο ταχύμετρο είναι διπλάσια της πραγματικής (Εικ. 3.15)*

Οι μετρήσεις του ταχύμετρου είναι διπλάσιες της πραγματικής ταχύτητας του ρότορα διότι χρησιμοποιούνται δυο ανακλαστήρες αντιδιαμετρικά στην περιφέρεια. Στο κομμάτι κώδικα που ακολουθεί, οι τιμές όλων των μετρήσεων εκχωρούνται σε πίνακες και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα:

```
%Maximum flux linkage from multimeter and tachometer measurements
tach=[1624; 1606; 2087; 2038; 2818; 2735; 2725]/2;
multi=[13.38; 13.28; 17.03; 16.82; 22.97; 22.18; 22.46];
Vpk(:,1)=multi(:,1)*sqrt(2);
tach=0.10472*tach;
Ymtach=zeros([size(tach,1) 1]);
for i=1:size(tach,1)
Ymtach(i,1)=Vpk(i,1)/50/tach(i,1);
end
YmtachMEAN=mean(Ymtach);
```

5. Model supplementary program

Οι σταθερές που χρησιμοποιεί το μοντέλο του Simulink στα blocks του προσδιορίζονται από μεταβλητές στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Για την δημιουργία αυτών των μεταβλητών αλλά και για πρόσθετους υπολογισμούς όσον αφορά χαρακτηριστικά του κινητήρα και σήματα εισόδου του, δημιουργείται πρόγραμμα στη γλώσσα του Matlab.

5.1 Model variables creation

Το πρώτο μέρος του προγράμματος αφορά τη δημιουργία μεταβλητών τις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιήσει το μοντέλο στα blocks του. Αυτές οι μεταβλητές δημιουργούνται με απλές εντολές εικώνωσης. Για κάθε μεταβλητή ακολουθεί αντίστοιχο σχόλιο ως προς τη φύση της και τις μονάδες σύμφωνα με τις οποίες θα πρέπει να δοθεί από τον χρήστη.

Το κομμάτι αυτό του προγράμματος είναι το επόμενο:

```
%>>>USER DEFINED Parameter settings for Stepper Motor Model<<<
%
%
Imaxphase=1.5;          %Phase max current
Tm2p=0.4;                %Maximum holding torque of two active phases
(Newtons*m)
Cd=0.02;                 %Detent torque divided by one phase maximum holding
torque (Tm2p)

Irotor=57E-7;            %Moment of inertia of rotor (Kilograms*meters^2)
Iload=0*Irotor;          %Moment of inertia of load (Kilograms*meters^2)

p=50;                     %Number of rotor teeth
L=3.8E-3;                 %Winding inductance (Henrys)
R=2.2;                     %Winding resistance (Ohms)
Ym=0.00415;               %Maximum flux linking each winding
(Volts*seconds=Webers)
```

(Σημειώνεται ότι λόγω της μεταφοράς κειμένου από το Matlab κάποιες γραμμές κώδικα συνεχίζονται και στην επόμενη σειρά. Ο κώδικας μπορεί να αντιγραφεί στο Matlab και να εκτελεστεί χωρίς επιπλοκές.)

Όπως φαίνεται στον κώδικα, σε αυτό το σημείο ορίζονται οι βασικές σταθερές του μοντέλου ως μεταβλητές του Matlab. Συγκεκριμένα ορίζονται το ονομαστικό ρεύμα φάσης ($Imaxphase$), η μέγιστη ροπή συγκράτησης δυο φάσεων ($Tm2p$), το ποσοστό ροπής “detent torque” ως προς τη ροπή συγκράτησής (Cd), η ροπή αδράνειας ρότορα και φορτίου ($Irotor$ και $Iload$), το πλήθος ακμών του ρότορα (p), ο συντελεστής αυτεπαγωγής (L), η αντίσταση φάσης (R) και το μέγιστο μαγνητικό πεδίο ανάμεσα σε φάση και ρότορα (Ym).

5.2 Calculation of additional parameters-characteristics

Το δεύτερο μέρος του προγράμματος αφορά τη χρήση των προηγούμενων μεταβλητών προς υπολογισμό κάποιων πρόσθετων, μερικές από τις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιήσει το μοντέλο στα blocks του. Όπως γίνεται και στις προηγούμενες γραμμές κώδικα, για κάθε μεταβλητή ακολουθεί αντίστοιχο σχόλιο ως προς τη φύση της και τις μονάδες που την χαρακτηρίζουν.

Το κομμάτι αυτό του προγράμματος είναι το επόμενο:

```
%>>>More parameter calculations<<<
%
%
Tmp=Tm2p/sqrt(2); %Maximum holding torque of one active
phase (Newtons*m)
Kt=Tmp/Imaxphase; %Winding current to winding torque
constant (Newtons*meters/Ampères)
I1=Irotor+Iload; %Moment of inertia of rotor and load
(Kilograms*meters^2)
Tosc1phase=2*pi*sqrt(I1/(Kt*p*Imaxphase)); %Oscillation period
of rotor when one phase is active (s)
Tosc2phase=2*pi*sqrt(I1/(sqrt(2)*Kt*p*Imaxphase));%Oscillation period
of rotor when two phases are active (s)
oscData=load('oscDATA.txt'); %Maximum flux
linkage from oscilloscope curve integration (Wb)
k=0;osc=0; %oscDATA.txt wave
begins and ends at 0V
for i=1:size(oscData,1)
if (oscData(i,1)==0&&(i-k)>100)
k=i-k; osc=osc+1;
end
end
Ymint=sum(abs(oscData))*10^-6/osc; %Maximum flux linkage by wave
integration
```

(Σημειώνεται ότι λόγω της μεταφοράς κειμένου από το Matlab κάποιες γραμμές κώδικα συνεχίζονται και στην επόμενη σειρά. Ο κώδικας μπορεί να αντιγραφεί στο Matlab και να εκτελεστεί χωρίς επιπλοκές.)

Όπως φαίνεται στον κώδικα, γίνεται χρήση των προηγούμενων μεταβλητών που δηλώθηκαν ώστε να υπολογιστούν παραπάνω χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ονομαστικά η μέγιστη ροπή συγκράτησης μιας φάσης (T_{mp}), η σταθερά συσχέτισης ρεύματος-ροπής φάσης (K_t), η ροπή αδράνειας ρότορα και φορτίου (I_1) και οι περίοδοι ταλάντωσης του ρότορα καθώς είναι ενεργή μια φάση και καθώς είναι ενεργές δυο φάσεις ($T_{\text{osc1phase}}$ και $T_{\text{osc2phase}}$ αντίστοιχα). Τέλος, εφαρμόζεται η μέθοδος ολοκλήρωσης για την εύρεση της μέγιστης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.3 Phase input calculation – movement interpreter

Το τρίτο μέρος του προγράμματος είναι ένας διερμηνέας κινήσεων για τον βηματικό κινητήρα. Στόχος του είναι να παράξει τις τάσεις εισόδου οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο για την προσομοίωση της κίνησης. Αυτό το πρόγραμμα είναι σε θέση να σχεδιάζει τις εισόδους των φάσεων του κινητήρα βάσει τραπεζοειδούς μοτίβου επιτάχυνσης το οποίο δίνεται από τον χρήστη.

Το κομμάτι αυτό του προγράμματος είναι το επόμενο:

```
%>>>MOVEMENT SIGNAL CALCULATION<<<
%
%
Tmax=0.001*Tmp; %Maximum allowd torque
amax=Tmax/Il; %Maximum allowd acceleration
jerk=25000; %Maximum allowd jerk
Mo=[0 0; 2*pi 5; 0 12]; %Movement matrix
%(first column position in rads - second column speed in rad/s -
%always zeros in first row)
pause=0.3;
Vmax=1*Imaxphase*R; %Rated winding voltage

%Drive sequences written for counter clockwise motion
WD=[1 0;0 -1;-1 0;0 1]; %Wave drive sequence
FS=[1 1;1 -1;-1 -1;-1 1]; %Full step drive sequence
WS=[1 0;1 -1;0 -1;-1 -1;-1 0;-1 1;0 1;1 1]; %Half step drive sequence
MSno=64; %Microstepping amount
MS=zeros([MSno*4 2]); %Microstepping sequence
calculation

for i=1:MSno*4
MS(i,1)=cos((i-1)/MSno*pi/2);
MS(i,2)=-sin((i-1)/MSno*pi/2);
end

DU=WD;%<<<SELECTING DRIVE TECHNIQUE

StepAngle=4*pi*10^-2/size(DU,1); %Step angle in radians
```

Σχόλιο:

Σε αυτές τις πρώτες γραμμές του κώδικα δίνονται τα δεδομένα για την σύνθεση του σήματος βηματισμού του κινητήρα. Ως είσοδο ο χρήστης πρέπει να δώσει την μέγιστη δυνατή ροπή που επιτρέπεται να ασκηθεί από τον κινητήρα (`Tmax`), την παράγωγο της επιτάχυνσης (`jerk`), τον χρόνο παύσης μεταξύ κινήσεων (`pause`) και τον πίνακα βημάτων που περιέχει μια εντολή κίνησης ανά γραμμή (`Mo`). Κάθε εντολή κίνησης περιέχει δύο νούμερα - γωνία προορισμού και ταχύτητα κίνησης. Επίσης, μπορεί να επιλεχθεί η τεχνική οδήγησης εφόσον εκχωρηθεί ο κατάλληλος πίνακας στην μεταβλητή `DU` (Drive Used).

```

t1=@(x) (amax/jerk-max(amax/jerk-x/2,0)); %ramping acceleration
time
t2=@(x) (max(x-2*amax/jerk,0)); %contant acceleration
time
w1=@(x) jerk*t1(x)^2/2; %Speed developed during ramp up or ramp
down acceleration periods
w2=@(x) amax*t2(x); %Speed developed during steady acceleration
period
%ramping up acceleration angle interval
u1=@(x) (jerk*t1(x)^3/6);
%contant acceleration angle interval
u2=@(x) (jerk*t1(x)*t2(x)^2/2+jerk*t1(x)^2/2*t2(x));
%ramping down acceleration angle interval
u3=@(x) (-
jerk*t1(x)^3/6+jerk*t1(x)^3/2+(jerk*t1(x)*t2(x)+jerk*t1(x)^2/2)*t1(x)
);
%for above functions where x=tacc

i0=0;
t0=0;
for im=2:size(Mo,1)

du=abs(Mo(im,1)-Mo(im-1,1)); %Absolute movement angle
steps=round(du/StepAngle); %Total steps for the
movement
dt=StepAngle/Mo(im,2); %Step time at max
movement speed
dir(i0+1:i0+steps,1)=2*heaviside(Mo(im,1)-Mo(im-1,1))-1;%matrix with
direction for every step
tacc=0; %Time interval for
acceleration of movement

tstp=0.001; %Maximizing acceleration time based on movement's
required speed
error=1;
errorlast=-1;
cnt=1;
while(abs(error)>1e-9);
error=2*w1(tacc)+w2(tacc)-Mo(im,2);
if (error*errorlast>0 && cnt>2)
tstp=tstp*2;
cnt=1;
elseif (error*errorlast<0)
tstp=-1*tstp/2;
cnt=1;
end
errorlast=error;
tacc=tacc+tstp;
cnt=cnt+1;
end

```

Σχόλιο:

Στο κομμάτι του κώδικα με τίτλο “Maximizing acceleration time based on movement's required speed” χρησιμοποιείται η τραπεζοειδής επιτάχυνση που έχει δοθεί για τον υπολογισμό του χρόνου που χρειάζεται για να επιτευχθεί η τελική ταχύτητα που επίσης έχει δοθεί από τον χρήστη. Αυτός ο χρόνος είναι ο μέγιστος χρόνος επιτάχυνσης εφόσον για μεγαλύτερο χρόνο θα παραβιαζόταν η συνθήκη μέγιστης ταχύτητας της κίνησης.

```

if (u1(tacc)+u2(tacc)+u3(tacc)>du/2) %If reaching top speed requires
more than the available space
tstp=-0.001;%Minimizing acceleration time based on available movement
space
error=1;
errorlast=1;
cnt=1;
while (abs(error)>1e-9)
error=u1(tacc)+u2(tacc)+u3(tacc)-du/2;
if (error*errorlast>0 && cnt>2)
tstp=tstp*2;
cnt=1;
elseif (error*errorlast<0)
tstp=-1*tstp/2;
cnt=1;
end
errorlast=error;
tacc=tacc+tstp;
cnt=cnt+1;
end
dt=StepAngle/(2*w1(tacc)+w2(tacc));
end

```

Σχόλιο:

Κάθε ιδανική κίνηση χαρακτηρίζεται από μια αρχική επιτάχυνση που πιθανώς να ακολουθείται από μια ομαλή κίνηση με σταθερή ταχύτητα και τέλος επιβραδυνόμενη κίνηση έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή τελική θέση. Τα προφίλ των επιταχύνσεων που χρησιμοποιούνται είναι τραπεζοειδή.

Στο κομμάτι του κώδικα με τίτλο “[Minimizing acceleration time based on available movement space](#)”, αν ο χρόνος επιτάχυνσης που υπολογίστηκε από το προηγούμενο μέρος οδηγεί σε χρήση περισσότερου από τον μισό διαθέσιμο χώρο της κίνησης, χρησιμοποιείται ο διαθέσιμος χώρος της κίνησης που εκτελείται για να περεταίρω περιορισμό του χρόνου επιτάχυνσης. Αυτός ο καινούριος χρόνος είναι ο μέγιστος χρόνος επιτάχυνσης, εφόσον για μεγαλύτερο χρόνο δεν θα υπήρχε αρκετός χώρος ώστε να εξελιχθεί η επιτάχυνση και η επιβράδυνση της κίνησης, με πιθανό αποτέλεσμα την εμφάνιση λάθους στην τελική θέση της κίνησης. Κατά την τραπεζοειδή επιτάχυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και ο μισός χώρος της κίνησης. Αυτό συμβαίνει διότι η επιβράδυνση που θα ακολουθήσει απαιτεί ίσο χώρο με αυτόν της επιτάχυνσης.

Για τον κώδικα της επόμενης σελίδας, στο κομμάτι με τίτλο “[Calculating step time matrix STt](#)”, υπολογίζεται ο συγκεκριμένος πίνακας με βάση τον χρόνο επιτάχυνσης που υπολογίστηκε από τα προηγούμενα βήματα. Ο πίνακας περιέχει τον χρόνο βηματισμού για κάθε ένα από τα βήματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να ολοκληρωθεί η κίνηση. Αυτοί οι χρόνοι υπολογίζονται κατάλληλα ώστε να τηρούνται οι απαιτήσεις μέγιστου ρυθμού αλλαγής της επιτάχυνσης (jerk), μέγιστης επιτάχυνσης και μέγιστης ταχύτητας.

```

STt(i0+1:i0+steps,1)=0; %This matrix will keep the times
that every step is executed
stepsu1=ceil(u1(tacc)/du*steps); %amount of steps for ramp up
acceleration
stepsu2=floor(u2(tacc)/du*steps);%amount of steps for constant
acceleration
stepsu3=floor(u3(tacc)/du*steps);%amount of steps for ramp down
acceleration
t1c=t1(tacc);
t2c=t2(tacc);

%Calculating step time matrix STt
for i=1:stepsu1 %Ramp up acceleration
u=(i-1)*StepAngle;
STt(i0+i,1)=(6*u/jerk)^(1/3);
end

for i=1:stepsu2 %Constant acceleration
u=i*StepAngle;
STt(i0+stepsu1+i,1)=(-
jerk*t1c^2/2+sqrt(jerk^2*t1c^4/4+2*jerk*t1c*u))/jerk/t1c+STt(i0+max(s
tepsu1,1),1);
end

for i=1:stepsu3 %Ramp down acceleration
u=i*StepAngle;
A=-jerk/6;
B=jerk*t1c/2;
C=jerk*t1c*t2c+jerk*t1c^2/2;
D=-u;
rts=roots([A B C D]);
STt(i0+stepsu1+stepsu2+i,1)=min(abs(rts))+STt(i0+stepsu1+stepsu2,1);
end

for i=1:stepsu1+stepsu2+stepsu3 %Adding pause and starting time
STt(i0+i,1)=STt(i0+i,1)+t0+pause;
end

for i=1:steps-2*(stepsu1+stepsu2+stepsu3)+1 %Constant speed
STt(i0+stepsu1+stepsu2+stepsu3+i,1)=STt(i0+stepsu1+stepsu2+stepsu3+i-
1,1)+dt;
end

k=stepsu1+stepsu2+stepsu3+1; %Mirroring signal
for i=steps-(stepsu1+stepsu2+stepsu3)+1:steps
STt(i0+i,1)=STt(i0+i-1,1)+(STt(i0+k,1)-STt(i0+k-1,1));
k=k-1;
end

i0=i0+steps;
t0=STt(i0,1);
end

dtmin=STt(2)-STt(1); %minimum step time
for i=2:steps
if (STt(i)-STt(i-1))<dtmin
dtmin=STt(i)-STt(i-1);
end
end

```

```

VinA=zeros([size(STt,1)+1 2]); %Voltage in phases A,B calculation
VinB=zeros([size(STt,1)+1 2]);
VinA(1,1)=0;
VinA(1,2)=Vmax*DU(1,1);
VinB(1,1)=0;
VinB(1,2)=Vmax*DU(1,2);
dcount=1;
for i=1:size(STt,1)
dcount=dcount+dir(i);
if dcount>size(DU,1)
dcount=1;
elseif dcount<1
dcount=size(DU,1);
end

VinA(i+1,1)=STt(i);
VinA(i+1,2)=Vmax*DU(dcount,1);

VinB(i+1,1)=STt(i);
VinB(i+1,2)=Vmax*DU(dcount,2);
end

```

Σχόλιο:

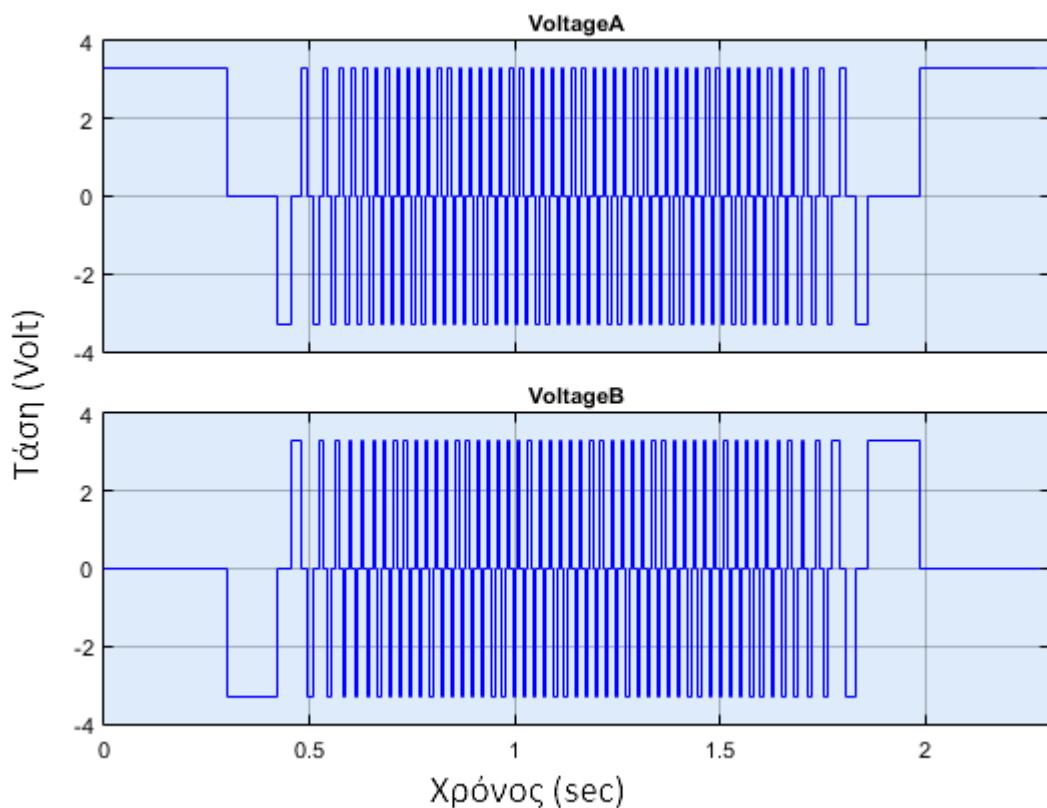
Στο κομμάτι του κώδικα με τίτλο “*Voltage in phases A,B calculation*” υπολογίζονται οι τάσεις που θα πρέπει να δεχθούν οι φάσεις A,B του κινητήρα βάσει του πίνακα με τους χρόνους βηματισμού STt και της τεχνικής οδήγησης που έχει επιλεχθεί. Επίσης, χρησιμοποιείται ο λογικός πίνακας dir που έχει ίδιες διαστάσεις με τον πίνακα STt και περιέχει πληροφορίες για την κατεύθυνση βηματισμού για κάθε βήμα της κίνησης: 1 για ωρολογιακή και -1 για την αντίθετη φορά.

(Σημειώνεται ότι λόγω της μεταφοράς κειμένου από το Matlab κάποιες γραμμές κώδικα συνεχίζονται και στην επόμενη σειρά. Ο κώδικας μπορεί να αντιγραφεί στο Matlab και να εκτελεστεί χωρίς επιπλοκές.)

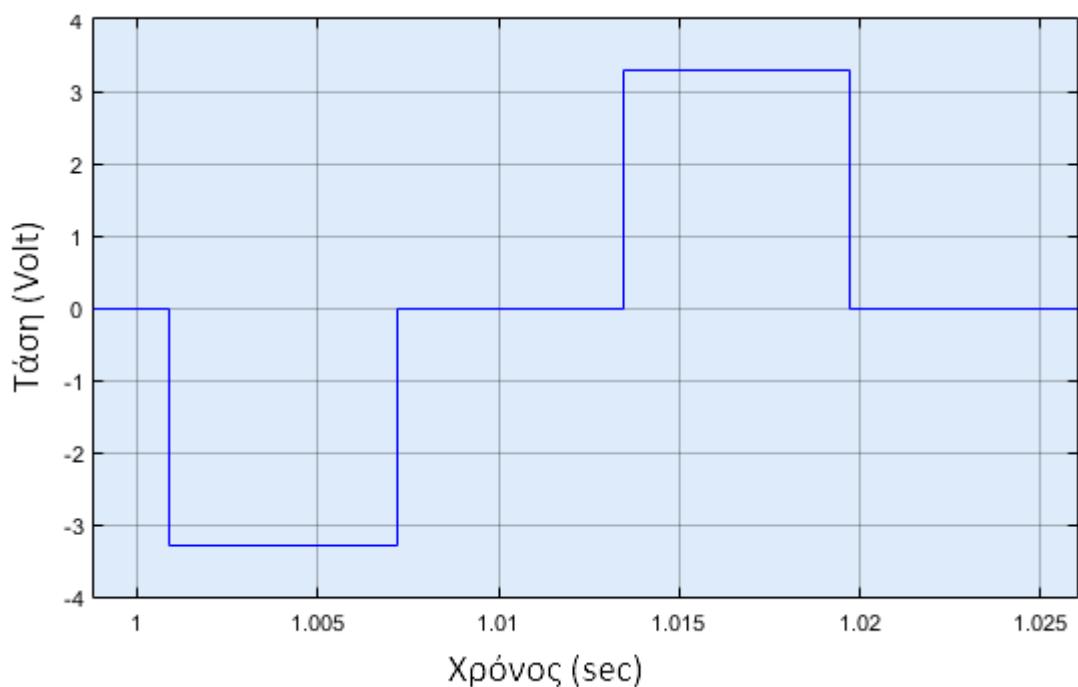
Αρχείο .txt με τον κώδικα μπορεί να βρεθεί στον σύνδεσμο που ακολουθεί:

Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται γραφικές παραστάσεις με τις τάσεις οδήγησης οι οποίες υπολογίζονται από τον προηγούμενο αλγόριθμο. Η τάση αυτή παράγεται ως είσοδος για τις φάσεις του κινητήρα ώστε ο ρότορας να εκτελέσει μια ολόκληρη περιστροφή υπό τους κινηματικούς περιορισμούς μέγιστης ταχύτητας 5 rad/s, μέγιστης επιτάχυνσης 45.11 rad/s^2 και μέγιστου ρυθμού αλλαγής της επιτάχυνσης 100 rad/s^3. Στα σχέδια που ακολουθούν (Εικόνες 3.16 – 3.27) η συγκεκριμένη κίνηση υπολογίζεται αρχικά με κυματική οδήγηση και στη συνέχεια με τεχνικές οδήγησης σταδιακά αυξανόμενης ευκρίνειας.

Κυματομορφές οδήγησης μιας περιστροφής με κυματική οδήγηση:

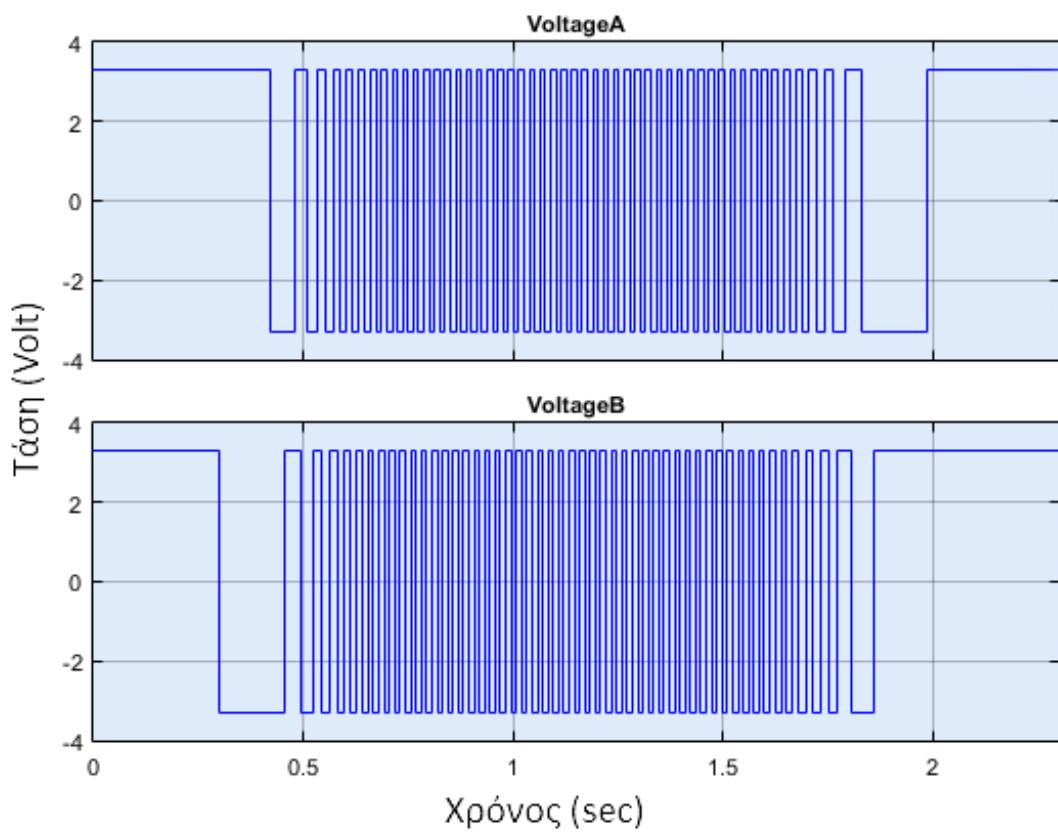


Κυματομορφές τάσης εισόδου φάσεων Α και Β για την εκτέλεση
μιας πλήρους περιστροφής με κυματική οδήγηση (Εικ. 3.16)

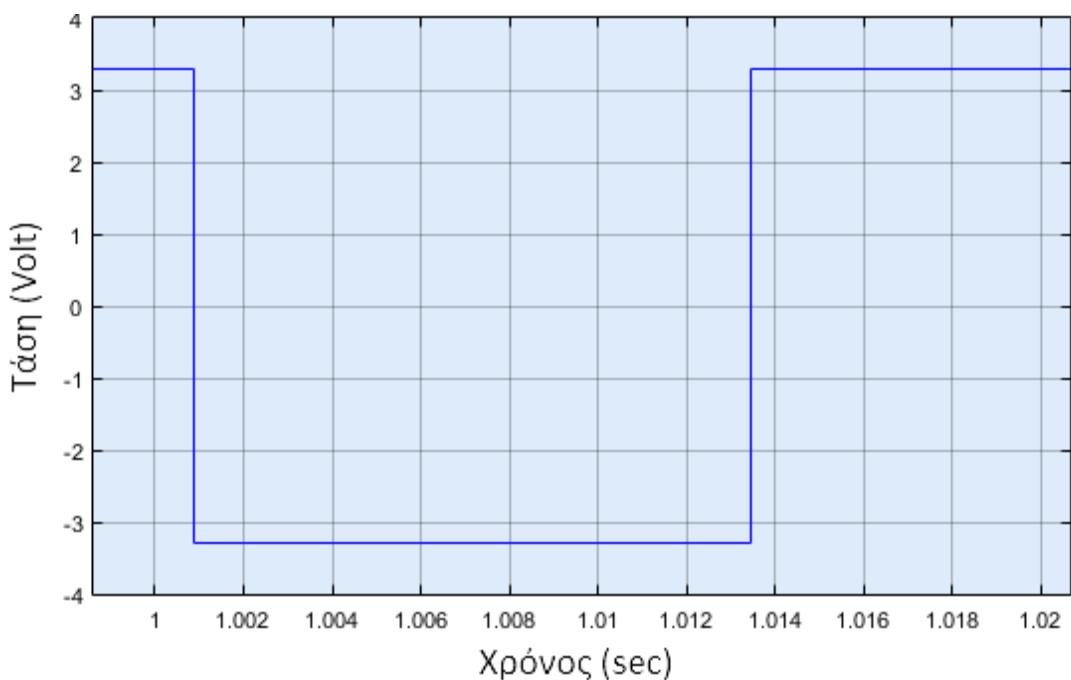


Κυματομορφή τάσης κυματικής οδήγησης σε μεγέθυνση (Εικ 3.17)

Κυματομορφές οδήγησης μιας περιστροφής με οδήγηση ολόκληρων βημάτων:

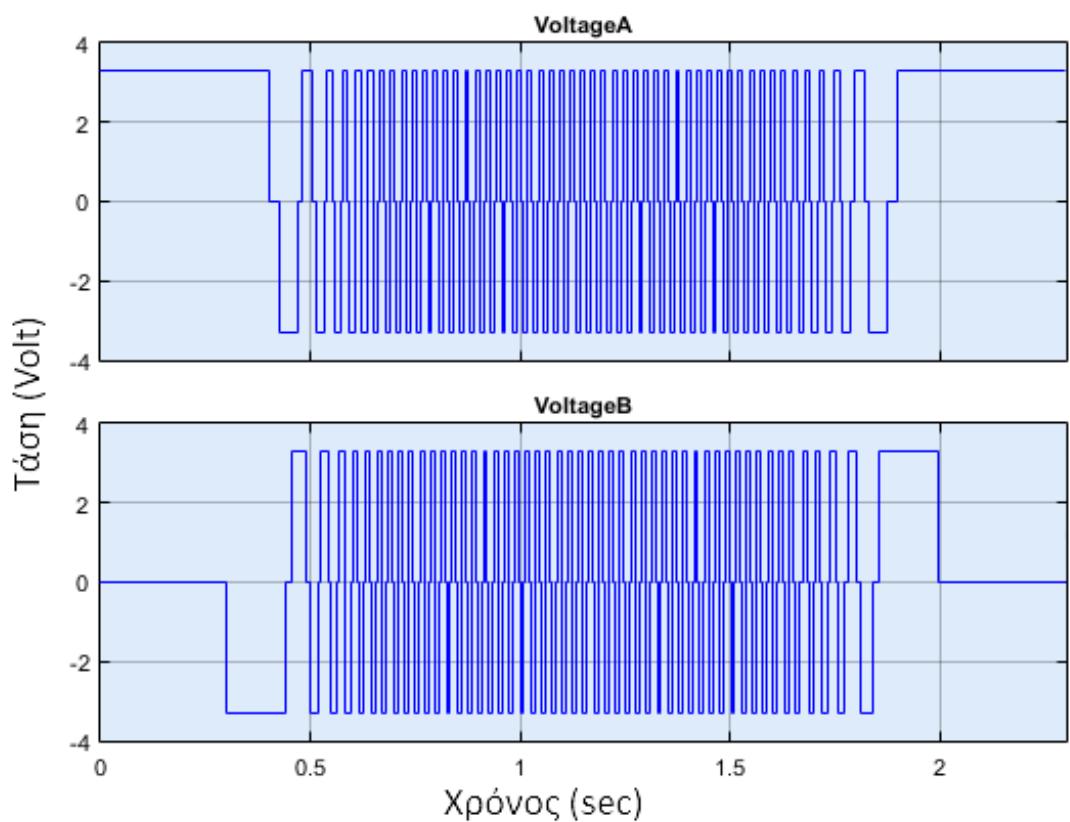


Κυματομορφές τάσης εισόδου φάσεων Α και Β για την εκτέλεση
μιας πλήρους περιστροφής με οδήγηση ολόκληρων βημάτων (Εικ. 3.18)

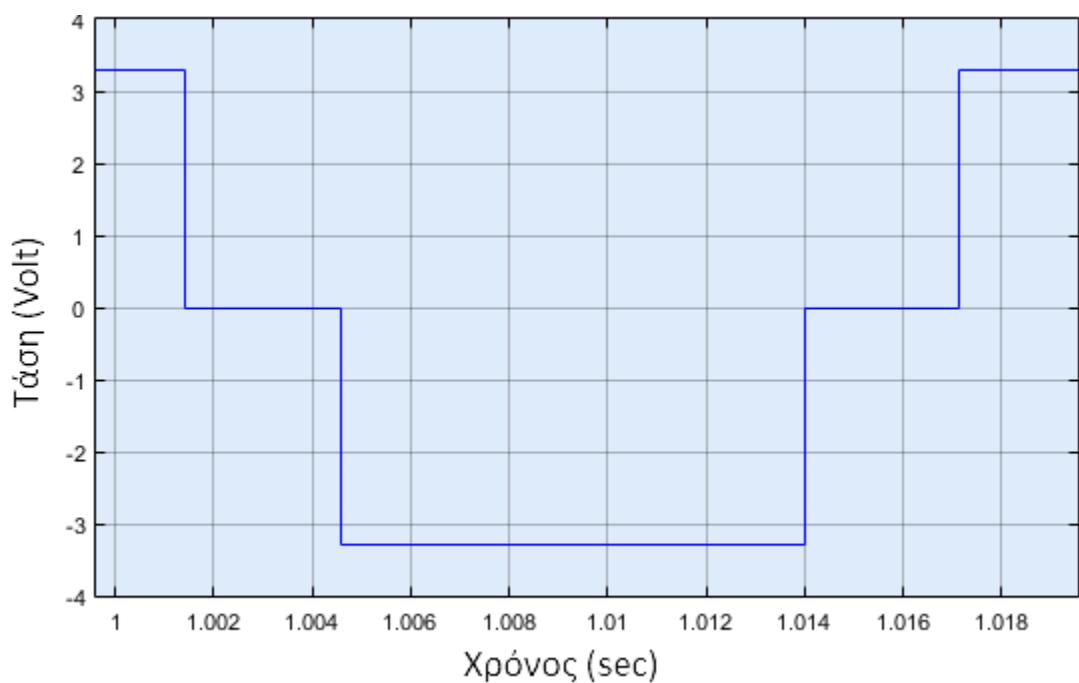


Κυματομορφή τάσης οδήγησης ολόκληρων βημάτων σε μεγέθυνση (Εικ 3.19)

Κυματομορφές οδήγησης μιας περιστροφής με οδήγηση μισών βημάτων:

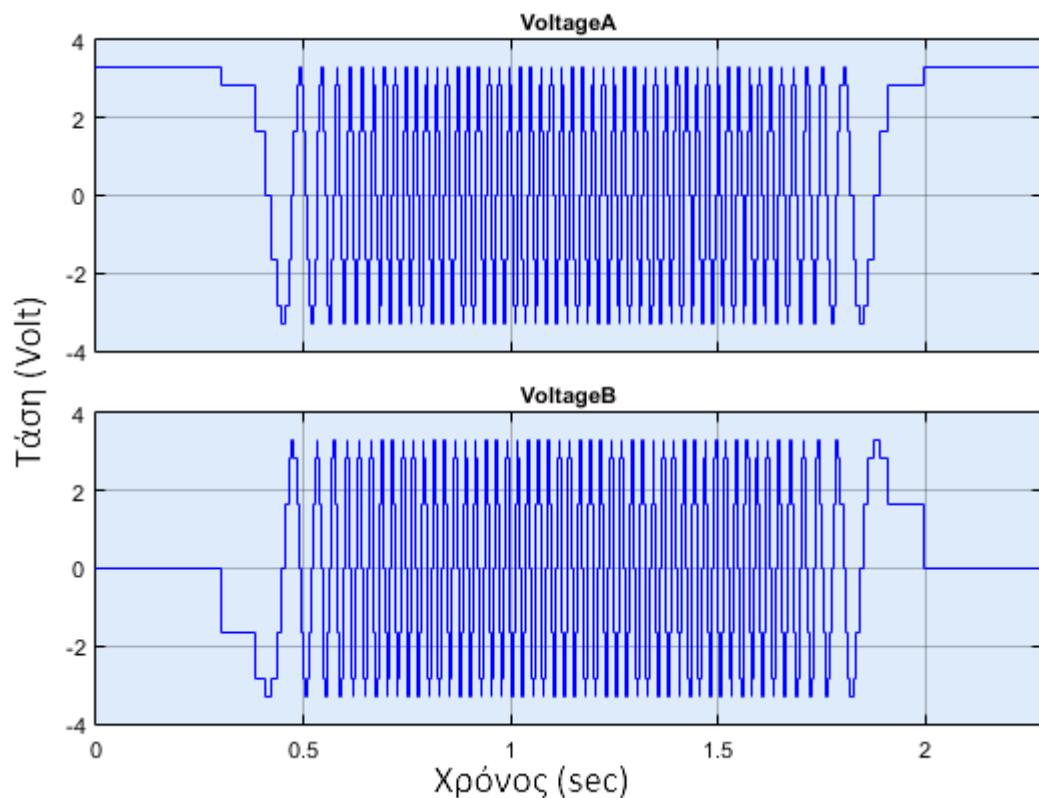


Κυματομορφές τάσης εισόδου φάσεων Α και Β για την εκτέλεση
μιας πλήρους περιστροφής με οδήγηση μισών βημάτων (Εικ. 3.20)

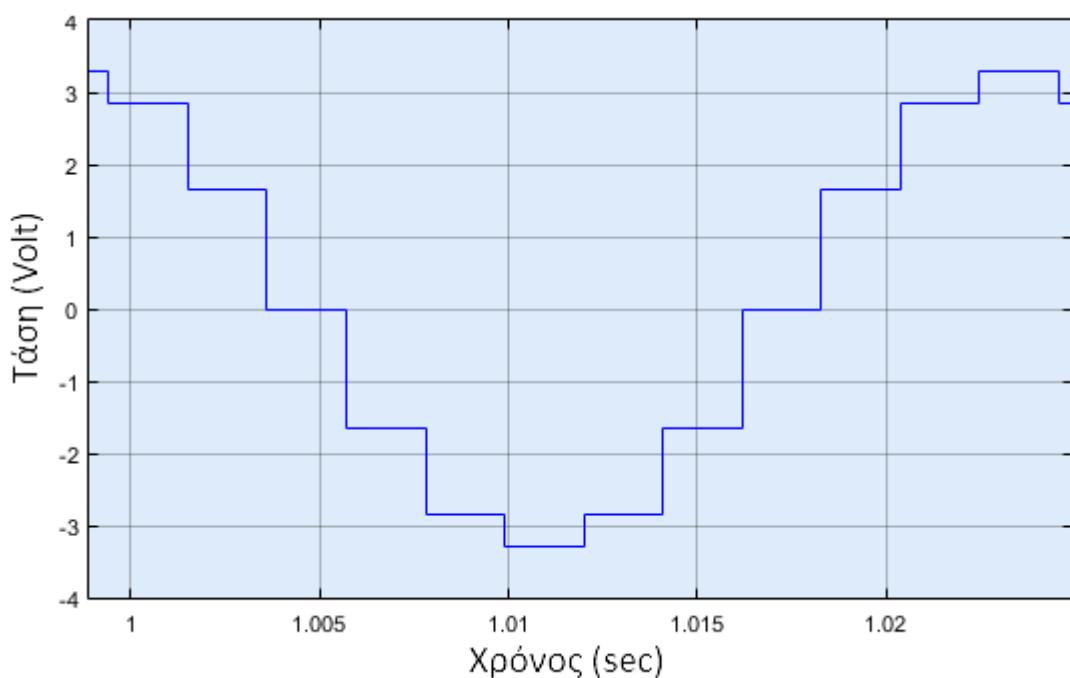


Κυματομορφή τάσης οδήγησης μισών βημάτων σε μεγέθυνση (Εικ 3.21)

Κυματομορφές οδήγησης μιας περιστροφής με οδήγηση μικροβημάτων ενός τρίτου:

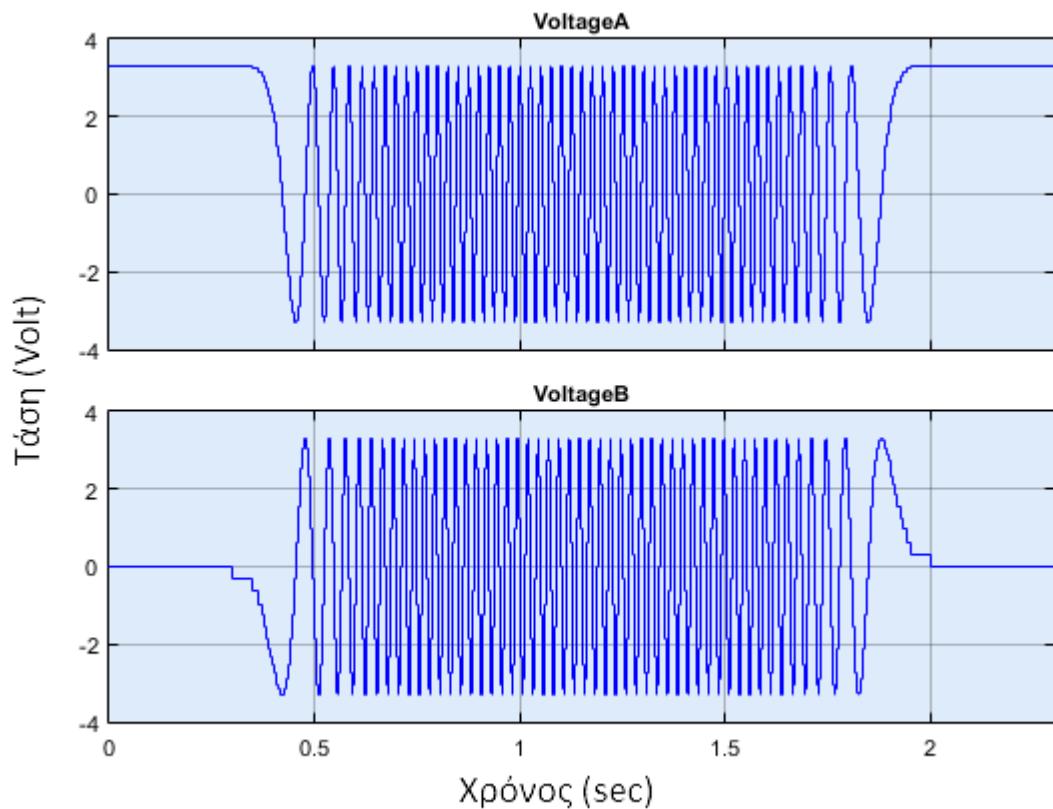


Κυματομορφές τάσης εισόδου φάσεων Α και Β για την εκτέλεση
μιας πλήρους περιστροφής με οδήγηση μικροβημάτων ενός τρίτου (Εικ. 3.22)

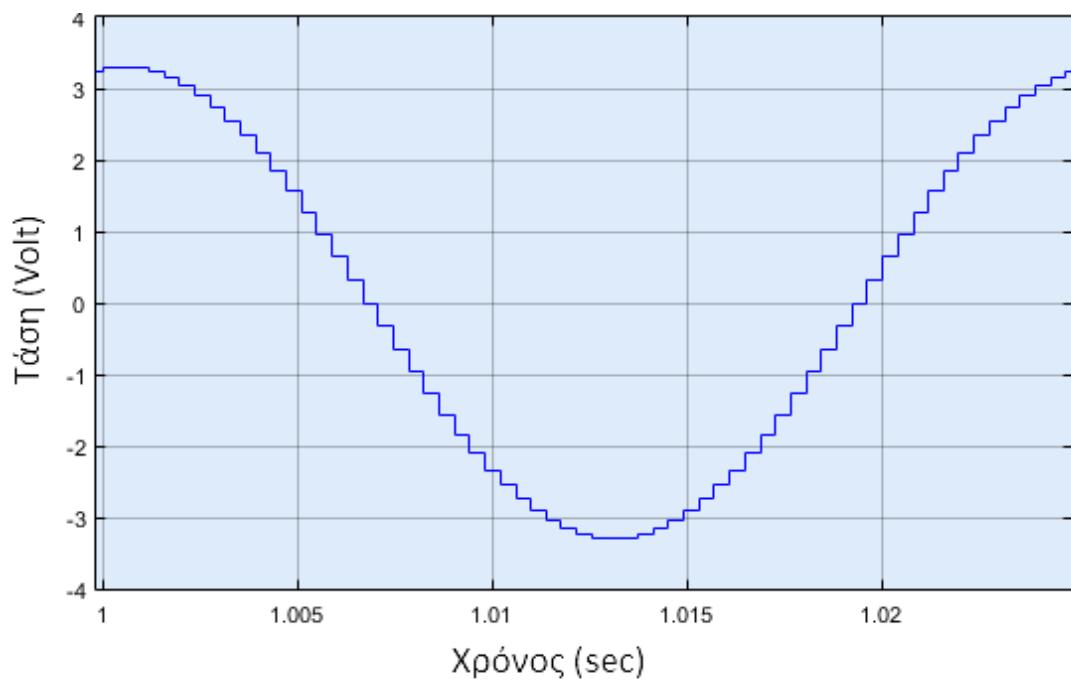


Κυματομορφή τάσης οδήγησης μικροβημάτων ενός τρίτου σε μεγέθυνση (Εικ 3.23)

Κυματομορφές οδήγησης μιας περιστροφής με οδήγηση μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου:

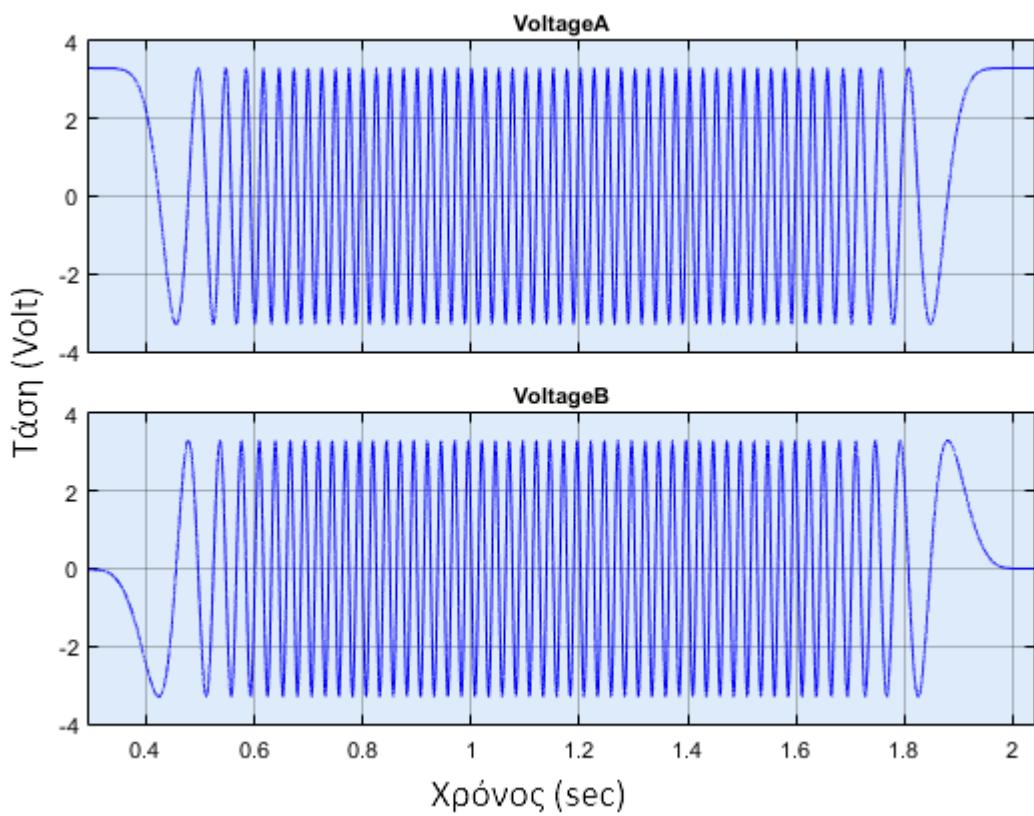


Κυματομορφές τάσης εισόδου φάσεων A και B για την εκτέλεση μιας πλήρους περιστροφής με οδήγηση μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου (Εικ. 3.24)

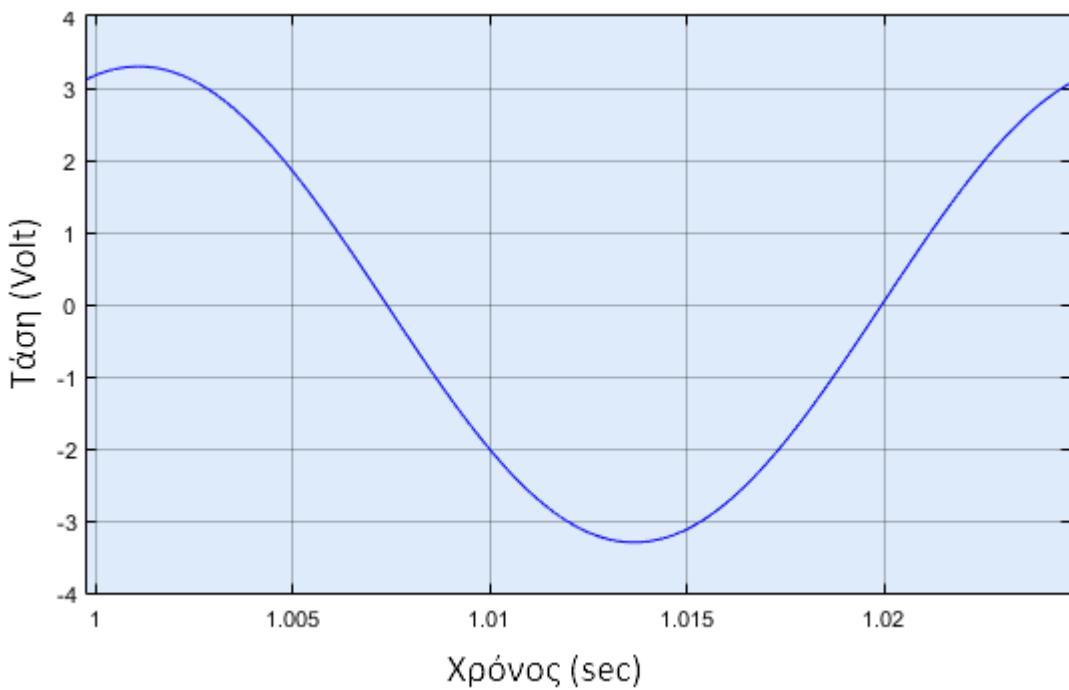


Κυματομορφή τάσης οδήγησης μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου σε μεγέθυνση (Εικ 3.25)

Κυματομορφές οδήγησης μιας περιστροφής με οδήγηση μικροβημάτων πολύ μεγάλης ανάλυσης:

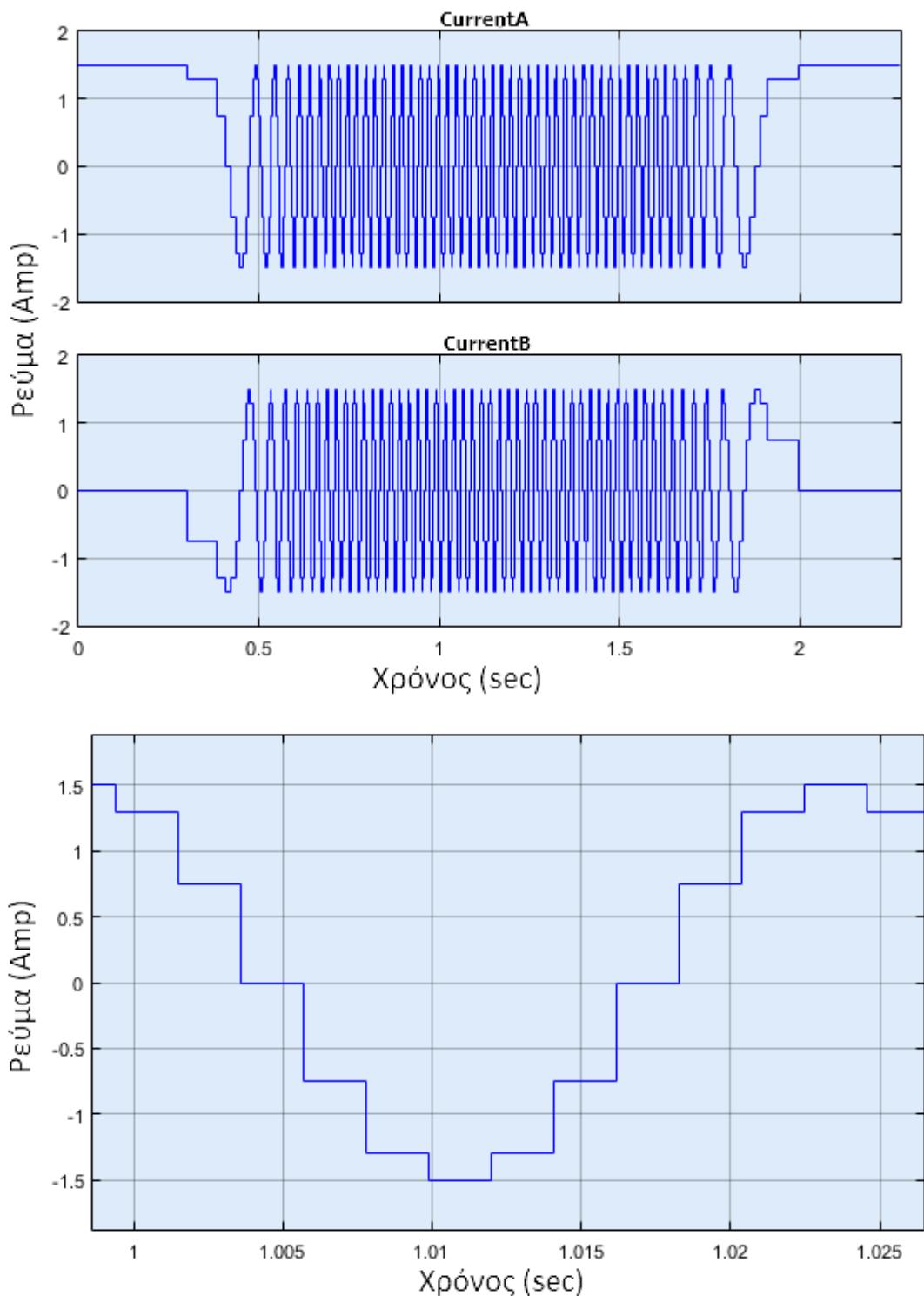


Κυματομορφές τάσης εισόδου φάσεων A και B για την εκτέλεση μιας πλήρους περιστροφής με οδήγηση μικροβημάτων πολύ μεγάλης ανάλυσης (Εικ. 3.26)



Κυματομορφή τάσης οδήγησης μικροβημάτων πολύ μεγάλης ανάλυσης σε μεγέθυνση (Εικ 3.27)

Στην περίπτωση ενσωμάτωσης οδηγού ελέγχου του ρεύματος φάσεων με σύστημα κλειστού βρόχου στο μοντέλο, οι προηγούμενες τάσεις οδήγησης μπορούν να μετατραπούν σε ζητούμενα ρεύματα φάσης διαιρώντας με την αντίσταση των φάσεων R. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της οδήγησης μικροβημάτων ενός τρίτου η καμπύλη ζητούμενου ρεύματος για την οδήγηση είναι αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.28. Οι τιμές που παίρνει το ρεύμα συμπίπτουν με αυτές στο παράδειγμα οδήγησης μικροβημάτων της 1^{ης} ενότητας στη σελίδα 37.



Ιδανική κυματομορφή ρεύματος οδήγησης μικροβημάτων ενός τρίτου (Εικ. 3.28)

6. Model results

6.1 Responses from various driving techniques

Σε αυτό το μέρος οι τάσεις οδήγησης που αναφέρονται στις εικόνες 3.16 – 3.27 εφαρμόζονται ως είσοδοι στο μοντέλο και παρατίθενται τα αποτελέσματα απόκρισής του. Όπως προαναφέρθηκε, η κίνηση για την οποία δημιουργήθηκαν αυτές οι κυματομορφές τάσεων είναι μια πλήρης περιστροφή του ρότορα υπό τους κινηματικούς περιορισμούς μέγιστης ταχύτητας 5 rad/s , μέγιστης επιτάχυνσης 45.11 rad/s^2 και μέγιστου ρυθμού αλλαγής της επιτάχυνσης 100 rad/s^3 . Για την προσομοίωση αυτή, στον ρότορα είναι προσαρμοσμένο φορτίο ροπής αδράνειας δεκαπλάσιας αυτής του ρότορα.

Αρχικά, η συνιστώσα της ροπής του κινητήρα που οφείλεται στον μόνιμο μαγνήτη (“Detent torque”) αμελείται. Δηλαδή, η σταθερά του μοντέλου του κινητήρα Cd τίθεται ίση με 0 για τις πρώτες προσομοιώσεις. Η φύση της συγκεκριμένης συνιστώσας είναι τέτοια ώστε να δημιουργεί κυματισμούς στα γραφήματα της ταχύτητας και της επιτάχυνσης με αποτέλεσμα να γίνονται δυσανάγνωστα. Αν και οι αποκρίσεις του κινητήρα δίχως τη συγκεκριμένη συνιστώσα δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, βοηθούν καλύτερα στην κατανόηση της ταχύτητας και επιτάχυνσης της οδήγησης και ιδιαίτερα στην περίπτωση της οδήγησης μικροβημάτων μεγάλης ανάλυσης (Εικ. 3.39).

Κατά τον βηματισμό οποιασδήποτε οδήγησης το φαινόμενο που ευθύνεται για την κίνηση του ρότορα είναι η μετάβαση της θέσης ισορροπίας του ρότορα σε κάποια καινούρια θέση (Η μετάβαση της θέσης ισορροπίας δεν γίνεται στιγμιαία αλλά εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής των ρευμάτων των φάσεων). Για τεχνικές οδήγησης μικρής ευκρίνειας η θέση ισορροπίας μεταβάλλεται κατά μεγαλύτερα διαστήματα γωνίας. Ως αποτέλεσμα κατά τον βηματισμό τεχνικών οδήγησης μικρής ευκρίνειας ο ρότορας αποκτά αρχικά μεγάλη δυναμική ενέργεια, η οποία μειώνεται σταδιακά μέσω των επαγόμενων τάσεων, δημιουργώντας μια αποσβενύμενη ταλάντωση γύρω από την καινούρια θέση ισορροπίας. Αυτή είναι η κύρια αιτία του σπασμωδικού χαρακτήρα των τεχνικών οδήγησης μικρής ανάλυσης και δικαιολογεί τις μεγαλύτερες αναταράξεις που είναι αισθητές στα διαγράμματα ροπής επιτάχυνσης και ταχύτητας στις εικόνες 3.29 – 3.34.

Όσον αφορά την ροπή “Detent torque” η παρουσία της δεν φαίνεται να είναι αισθητή για οδηγήσεις ανάλυσης έως και αυτήν των μικροβημάτων ενός τρίτου στις εικόνες 3.35 και 3.36. Αντίθετα, στην απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου οι κυματισμοί της ροπής μειώνονται περισσότερο, η παρουσία της ροπής “Detent torque” γίνεται περισσότερο αισθητή. Κατά την οδήγηση μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου οι αναταράξεις στην ροπή είναι ήδη μικρότερες από αυτές που αναπόφευκτα προστίθενται στην κίνηση από την ροπή “Detent torque”. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση κάποιας τεχνικής οδήγησης υψηλότερης ανάλυσης για την εκτέλεση της συγκεκριμένης κίνησης είναι ανώφελη εφόσον δεν μπορεί να προσφέρει λιγότερες αναταράξεις. Η προηγούμενη πρόταση επαληθεύεται αν μελετηθούν οι εικόνες 3.38 και 3.40. Αν και η οδήγηση μικροβημάτων μεγάλης ανάλυσης υπό την απουσία της ροπής “Detent torque” (Εικ. 3.39) αντιπροσωπεύει μια ιδανική απόκριση χωρίς αναταράξεις, η απόκρισή της είναι όμοια με

αυτήν της οδήγησης μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου όταν συνυπολογίζεται (Εικόνες 3.38 και 3.40).

Η ροπή “Detent torque” φαίνεται να είναι ένας παράγοντας-μειονέκτημα του κινητήρα λόγω της οποίας η απόκρισή του περιορίζεται σε καμπύλες ροπής με αναταράξεις πλάτους τουλάχιστον ίσου με αυτό της συγκεκριμένης ροπής.

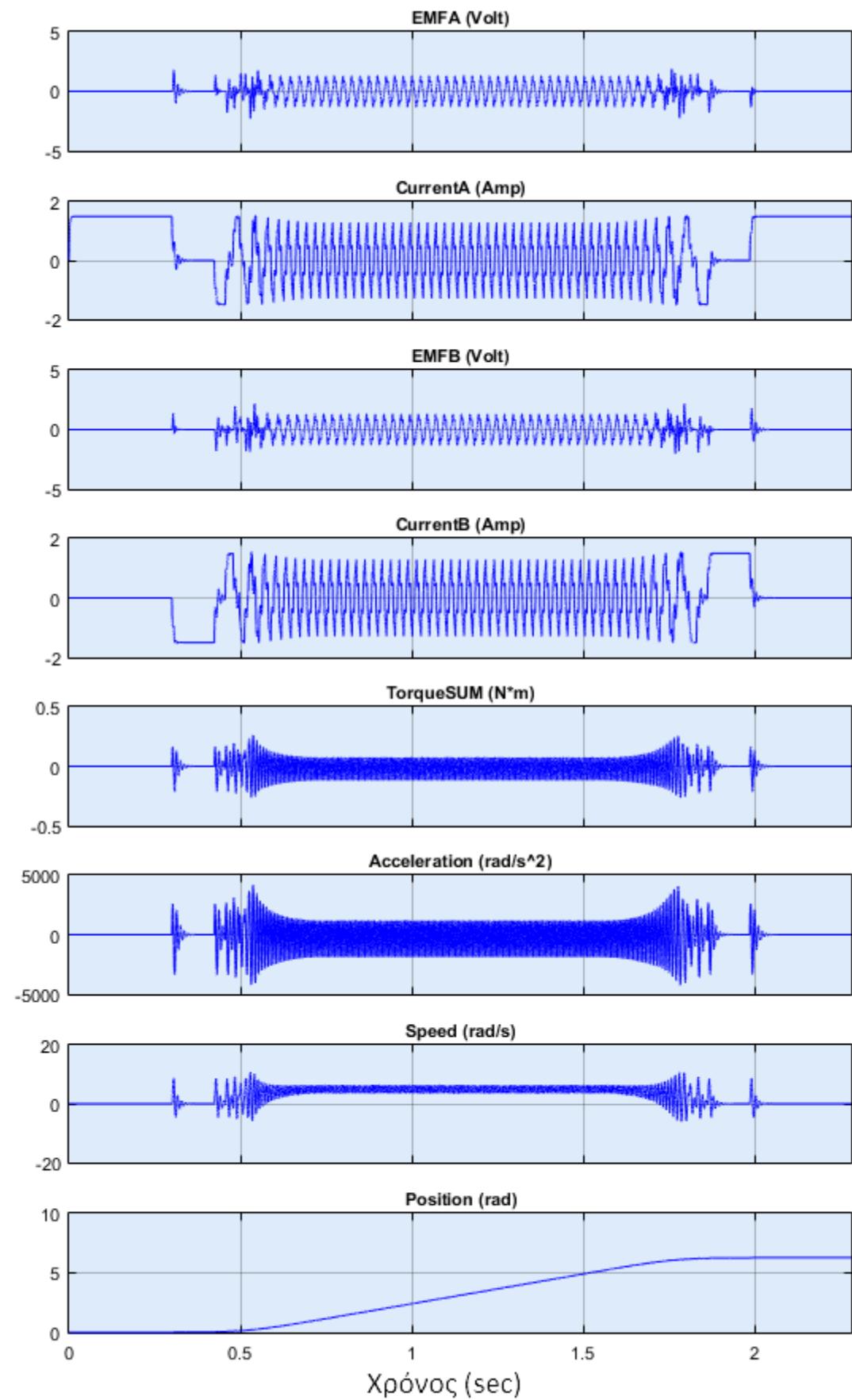
Η ιδανική συμπεριφορά του κινητήρα προκύπτει για οδήγηση μικροβημάτων πολύ μεγάλης ανάλυσης και κινητήρα αμελητέας ροπής “Detent torque” (Εικ. 3.39). Στα σχήματα της συγκεκριμένης εικόνας κάθε ανεπιθύμητος κυματισμός έχει περιοριστεί σε βαθμό που είναι τάξεις μικρότερος των καμπυλών της απόκρισης και δεν είναι διακριτός στο διάγραμμα. Στα διαγράμματα κινητικής της απόκρισης (επιτάχυνση – ταχύτητα - θέση) της εικόνας 3.39 φαίνεται καθαρά η φύση της κίνησης τραπεζοειδούς επιτάχυνσης που έχει προγραμματισθεί από τον αλγόριθμο-διερμηνέα κίνησης. Η επιτάχυνση χαρακτηρίζεται από καμπύλες 1^{st} βαθμού ή ευθείες, η ταχύτητα από καμπύλες 2^{nd} βαθμού και η θέση από καμπύλες 3^{rd} βαθμού.

Καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης το πλάτος των κυματισμών των επαγόμενων τάσεων EMFA και EMFB (ElectroMotiveForce-phaseA και ElectroMotiveForce-phaseB) παρατηρείται να είναι ανάλογο της στιγμιαίας ταχύτητας του ρότορα σε κάθε οδήγηση. Αυτό μπορεί να συναχθεί και από τις εξισώσεις που περιγράφουν την επαγόμενη τάση 3.8α και 3.8β όπου η ταχύτητα $d\theta/dt$ εμφανίζεται ως παράγοντας του πλάτους.

Τα ρεύματα στις φάσεις A και B (CurrentA και CurrentB) προσεγγίζουν ασυμπτωτικά κάθε φορά τις τελικές τιμές που καθορίζονται από τις τάσεις και τις αντιστάσεις τυλιγμάτων ($I_{target} = V/R$). Οι τάσεις στα τυλίγματα καθορίζονται από τις τάσεις εισόδου και τις επαγόμενες τάσεις από τον μαγνητικό ρότορα. Οι απότομες, σύντομες αναταράξεις στις καμπύλες του ρεύματος των φάσεων οφείλονται στις επαγόμενες τάσεις. Κατά τη διάρκεια της μέγιστης ταχύτητας στην προσομοίωση τα ρεύματα των φάσεων φτάνουν το 87% της τελικής τιμής διότι ο χρόνος για την ανάπτυξή τους είναι περιορισμένος. Εξαίρεση αποτελεί η οδήγηση ολοκλήρων βημάτων κατά την οποία οι φάσεις παραμένουν ενεργές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι σε οποιαδήποτε άλλη τεχνική οδήγησης.

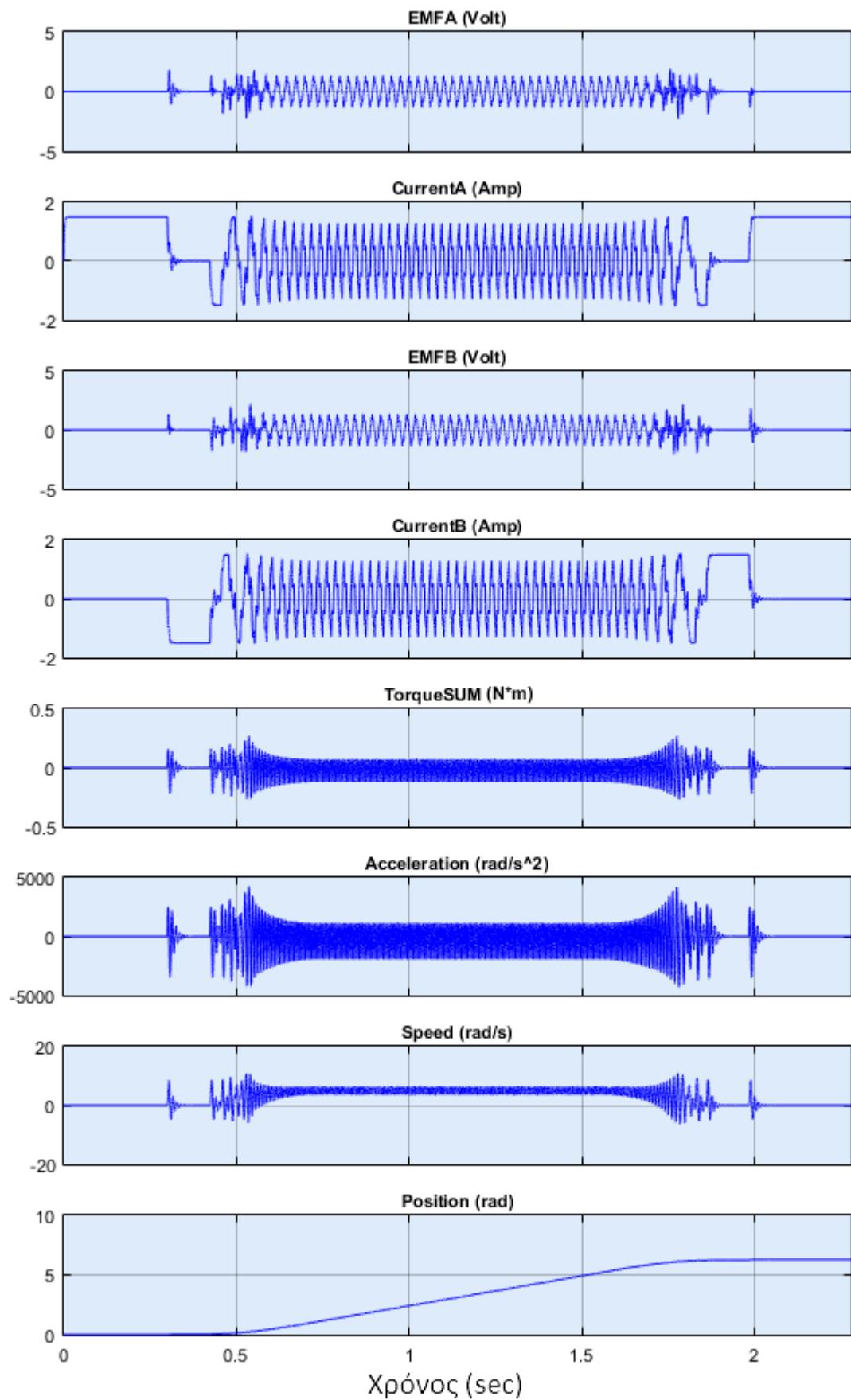
Ανεξάρτητα του είδους της ανάλυσης, του θορύβου ή των αναταράξεων που χαρακτηρίζουν καθεμία από τις αποκρίσεις στις προσομοιώσεις που έγιναν (Εικ. 3.29 – 3.40) η κίνηση εκτελέσθηκε με επιτυχία όσον αφορά την τελική θέση του ρότορα. Σε κάθε περίπτωση ο ρότορας ισορροπεί στην τελική θέση 6.2832 rad που είναι ίση με 2π rad ή μια περιστροφή.

Απόκριση κυματικής οδήγησης χωρίς “Detent torque”:



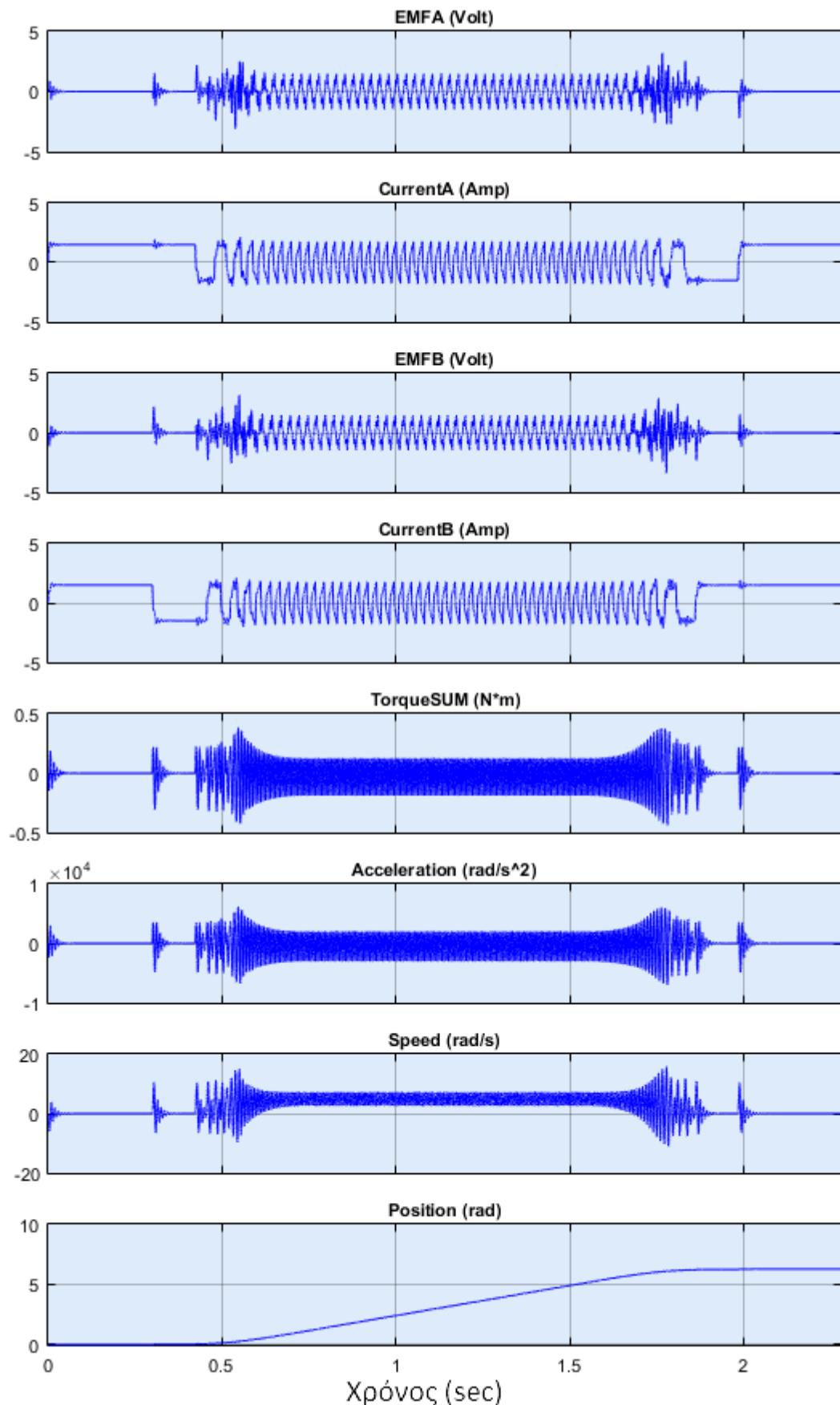
Απόκριση κυματικής οδήγησης χωρίς “Detent torque” (Εικ. 3.29)

Απόκριση κυματικής οδήγησης με “Detent torque”:



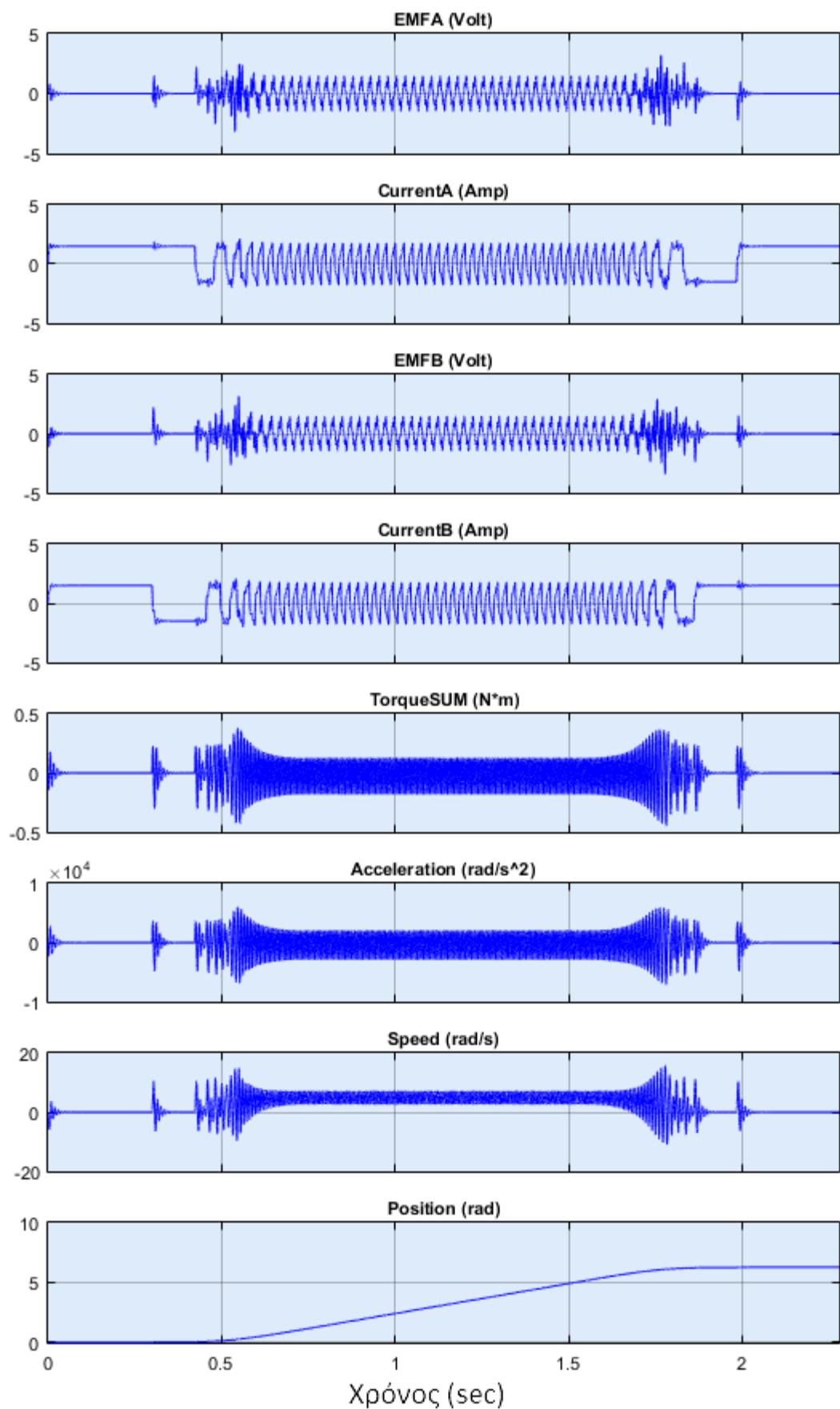
Απόκριση κυματικής οδήγησης με “Detent torque” (Εικ. 3.30)

Απόκριση οδήγησης ολόκληρων βημάτων χωρίς “Detent torque”:



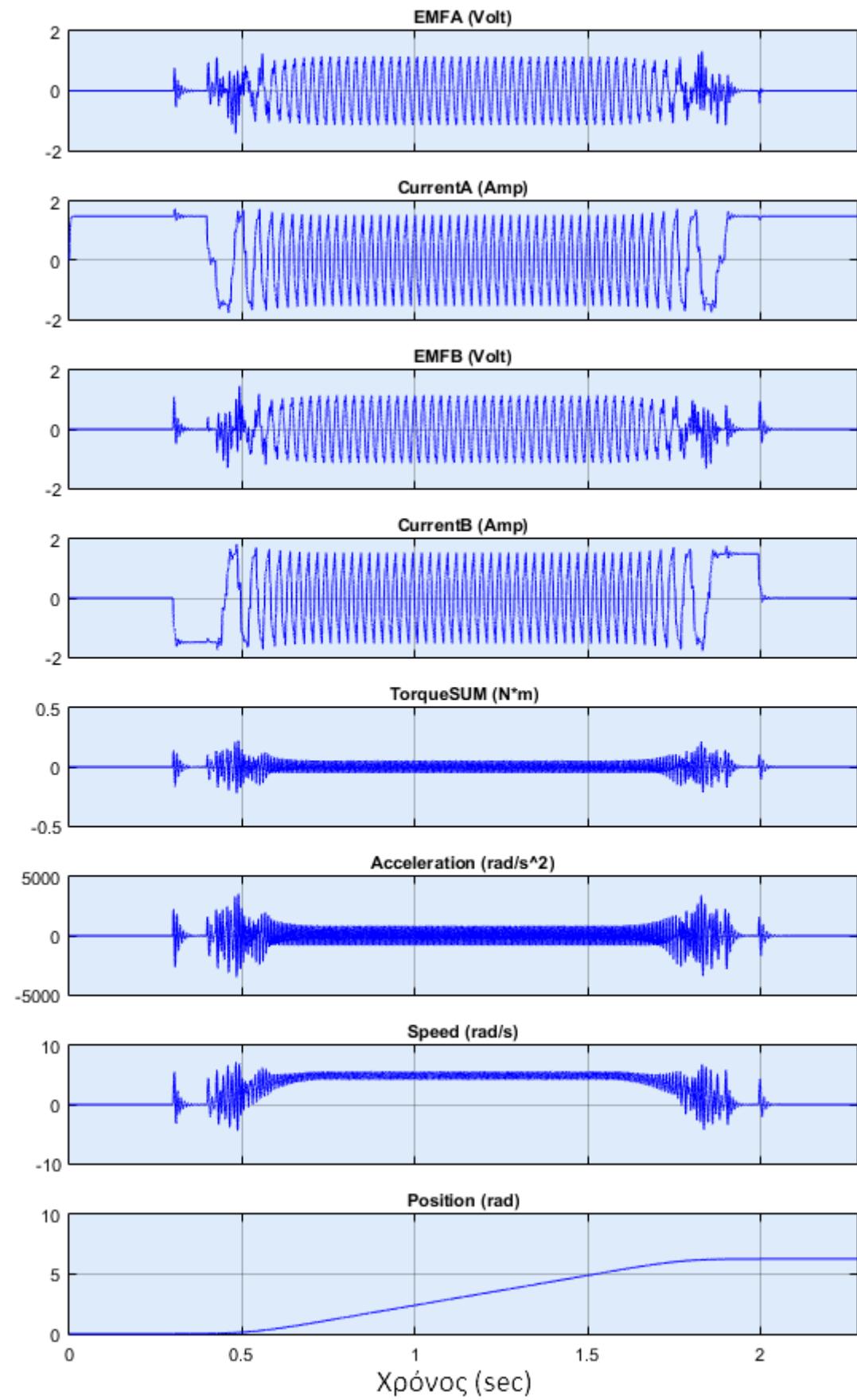
Απόκριση οδήγησης ολόκληρων βημάτων χωρίς “Detent torque” (Εικ. 3.31)

Απόκριση οδήγησης ολόκληρων βημάτων με “Detent torque”:



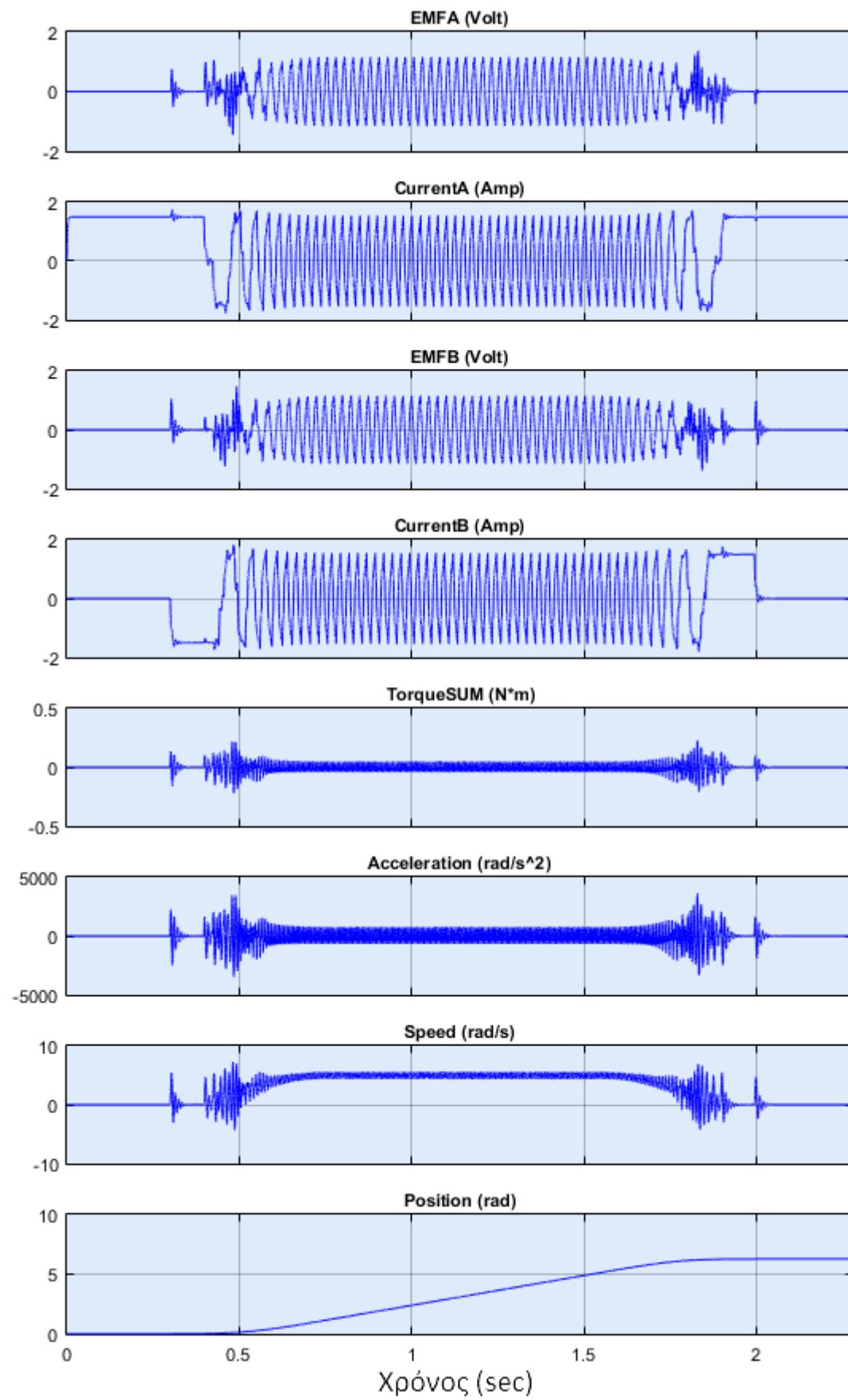
Απόκριση οδήγησης ολόκληρων βημάτων με “Detent torque” (Εικ. 3.32)

Απόκριση οδήγησης μισών βημάτων χωρίς “Detent torque”:



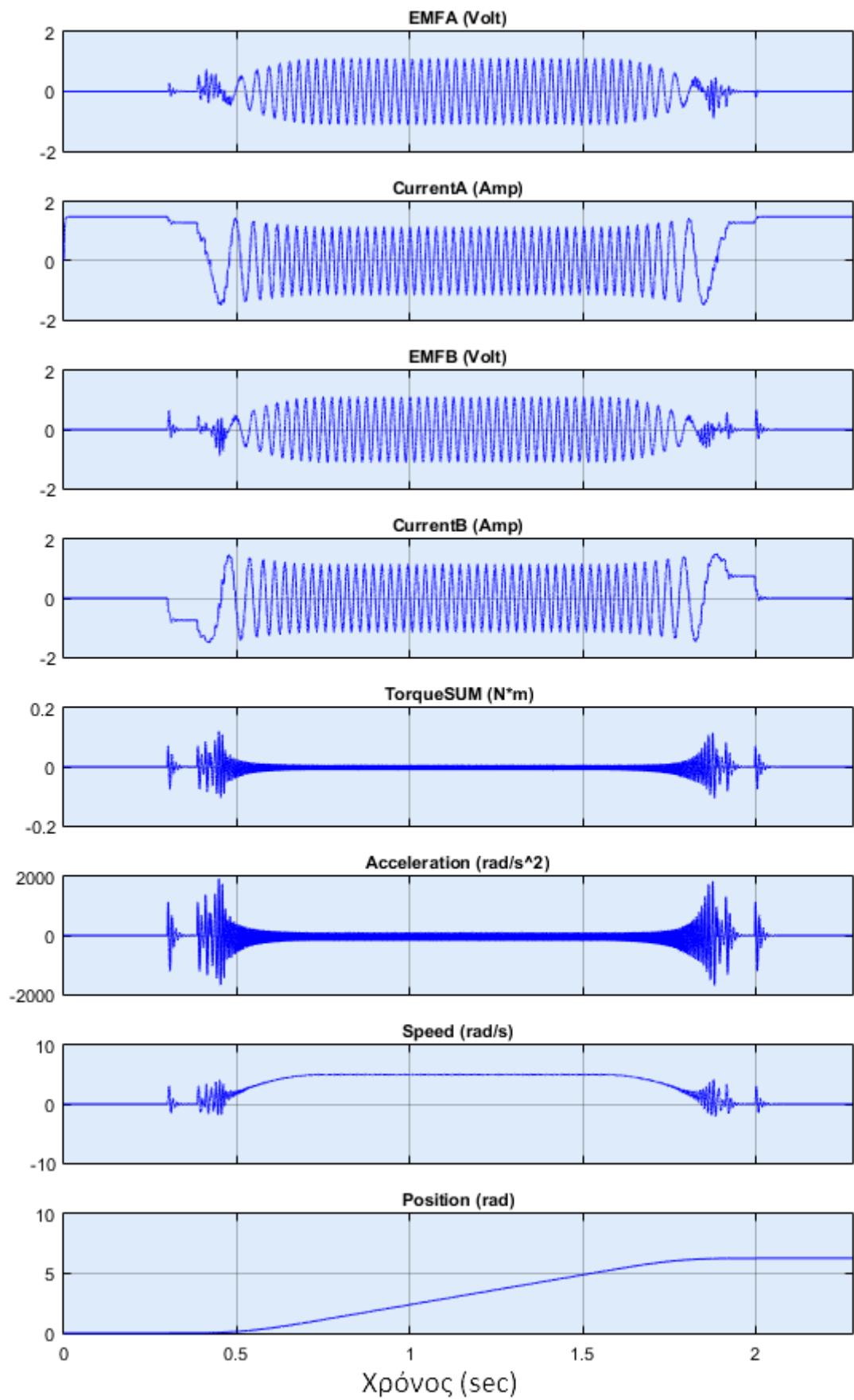
Απόκριση οδήγησης μισών βημάτων χωρίς “Detent torque” (Εικ. 3.33)

Απόκριση οδήγησης μισών βημάτων με “Detent torque”:



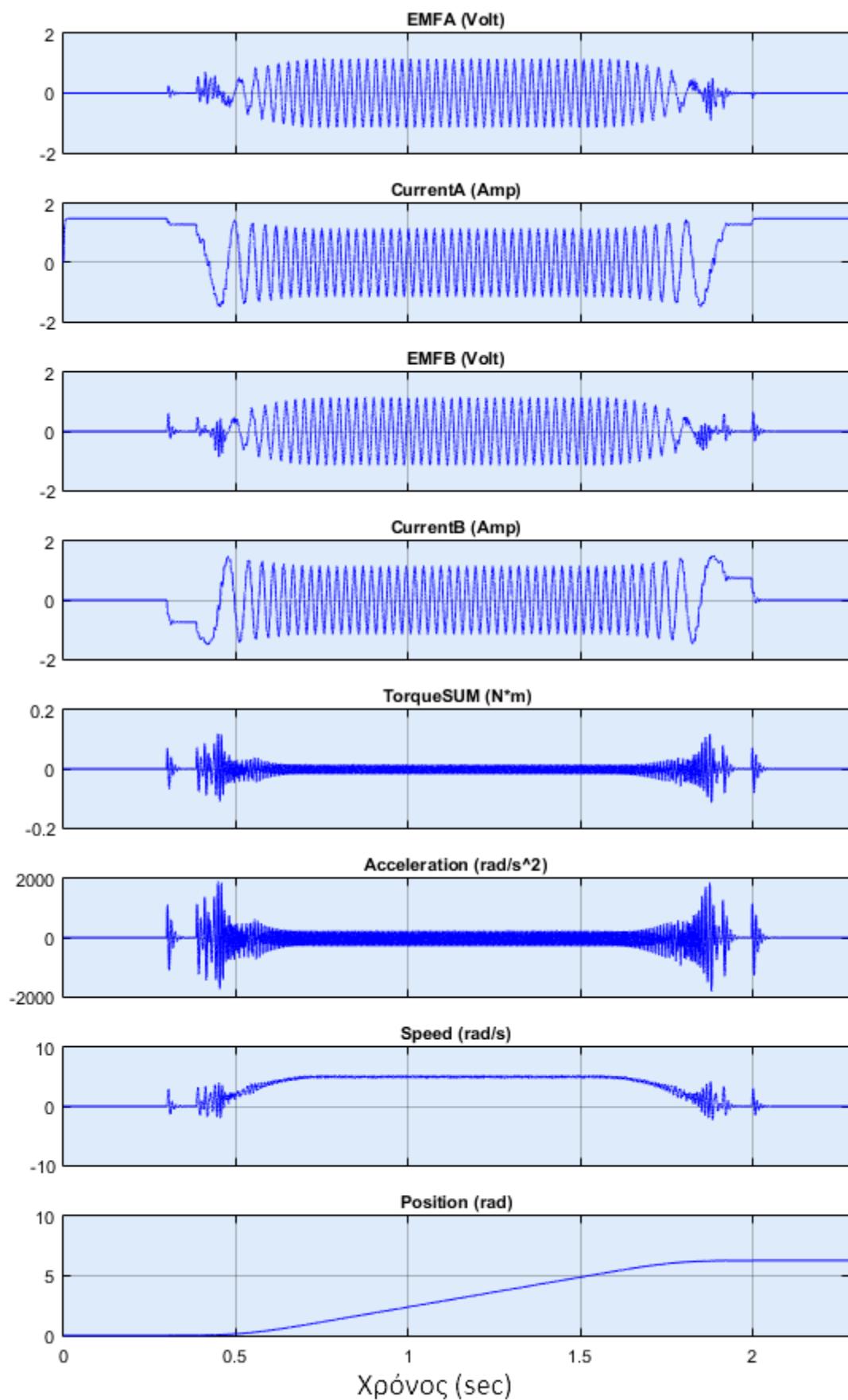
Απόκριση οδήγησης μισών βημάτων με “Detent torque” (Εικ. 3.34)

Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός τρίτου χωρίς “Detent torque”:



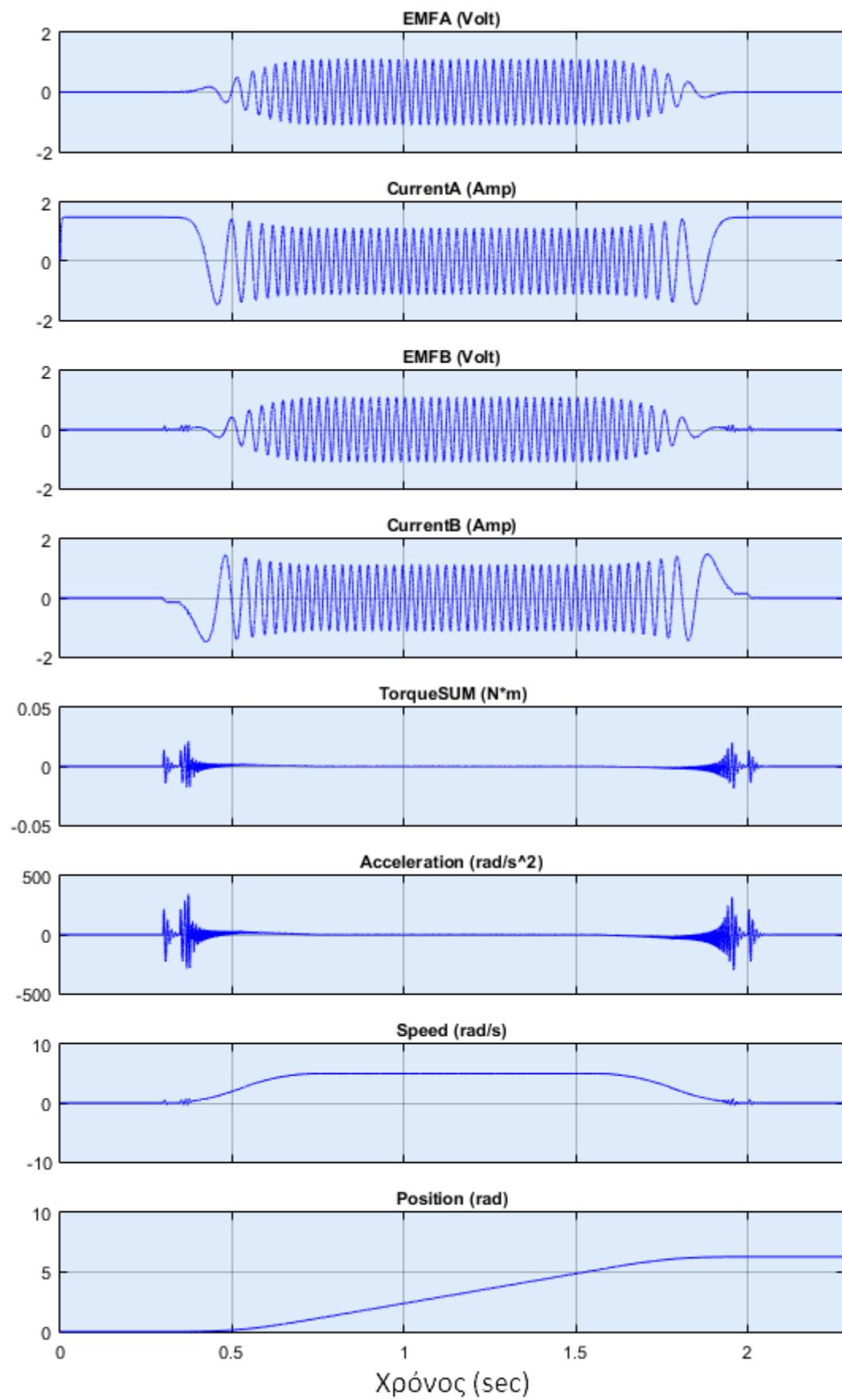
Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός τρίτου χωρίς “Detent torque” (Εικ. 3.35)

Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός τρίτου με “Detent torque”:



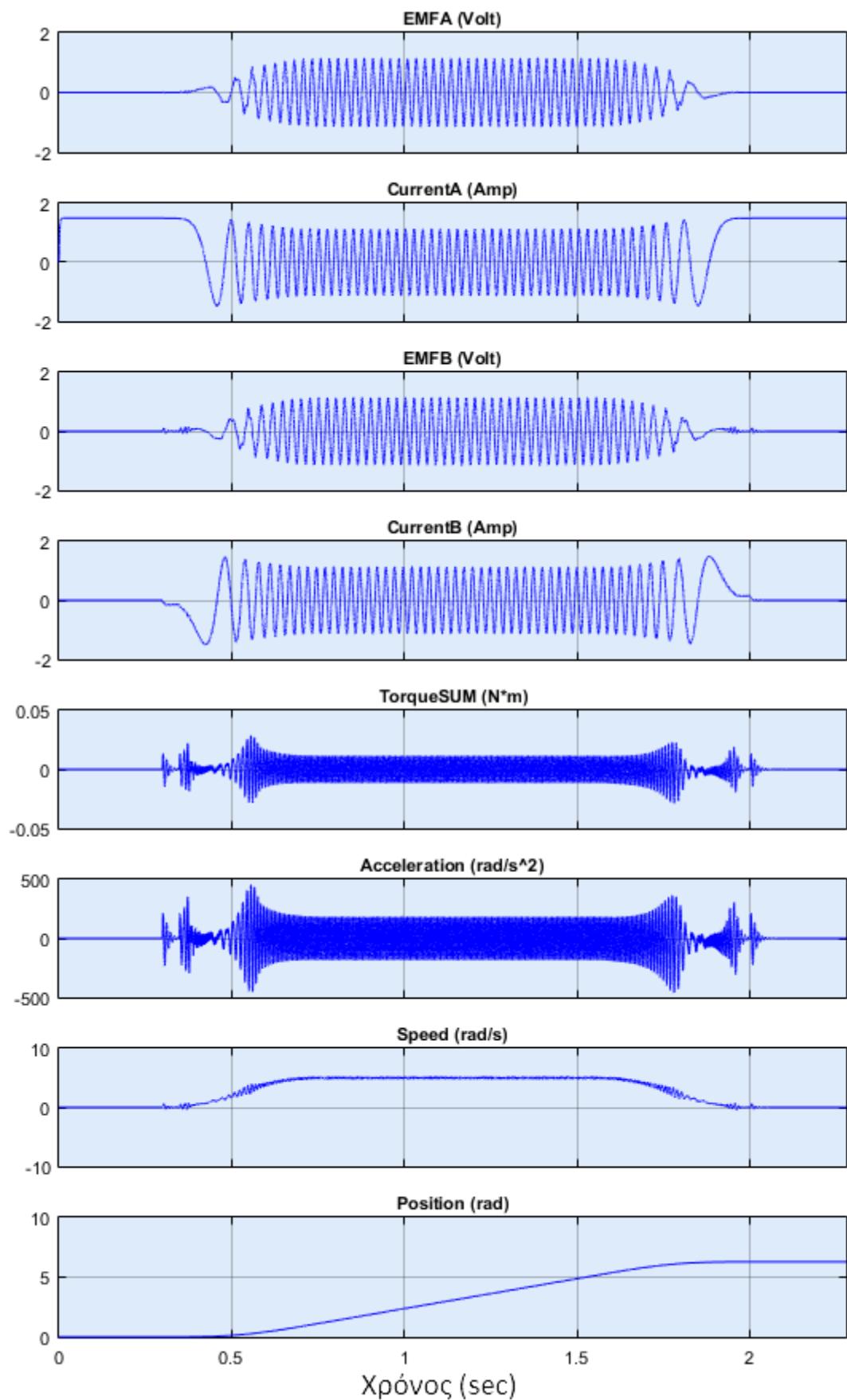
Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός τρίτου με “Detent torque” (Εικ. 3.36)

Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου χωρίς “Detent torque”:



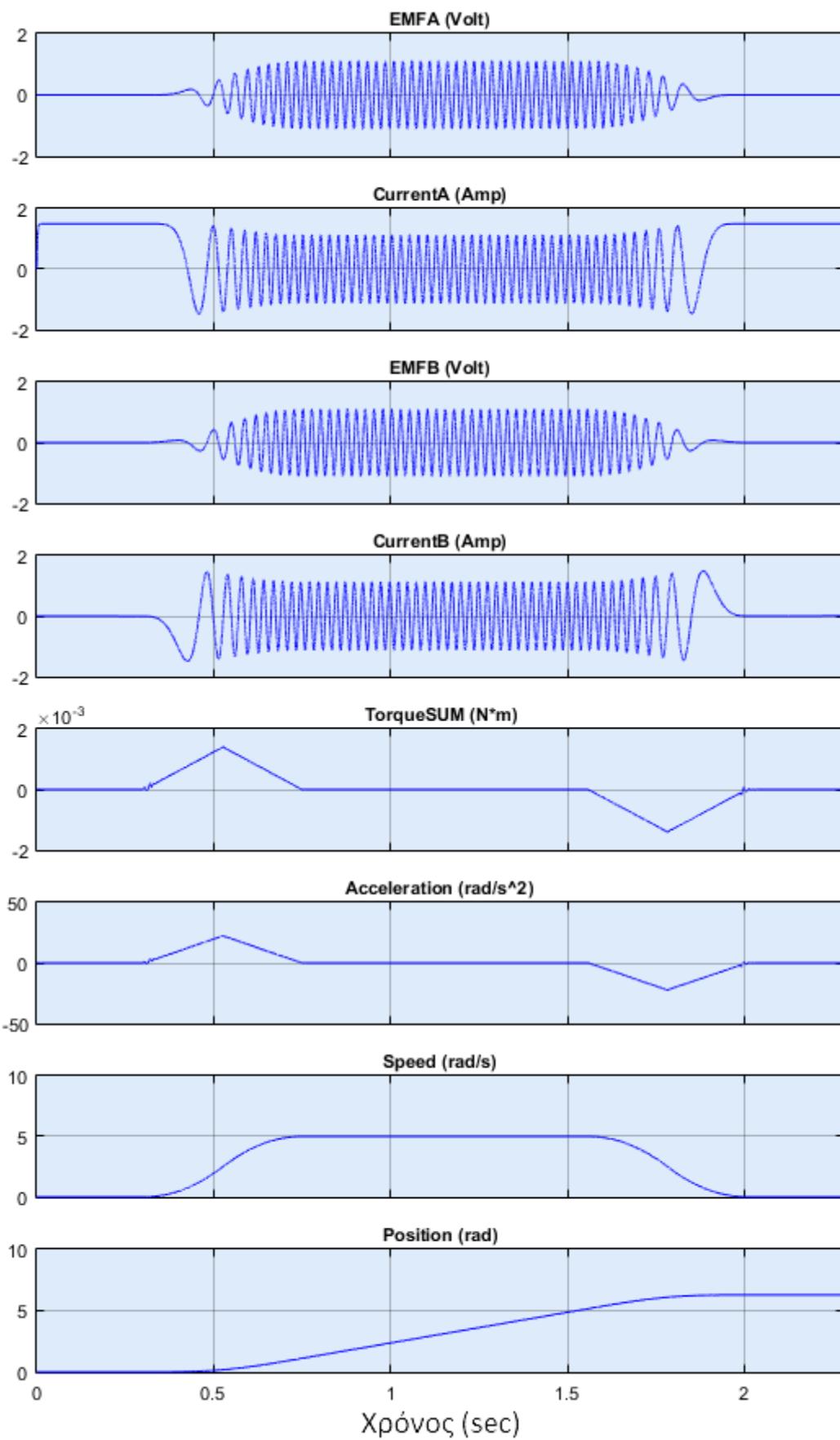
Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου χωρίς “Detent torque” (Εικ. 3.37)

Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου με “Detent torque”:



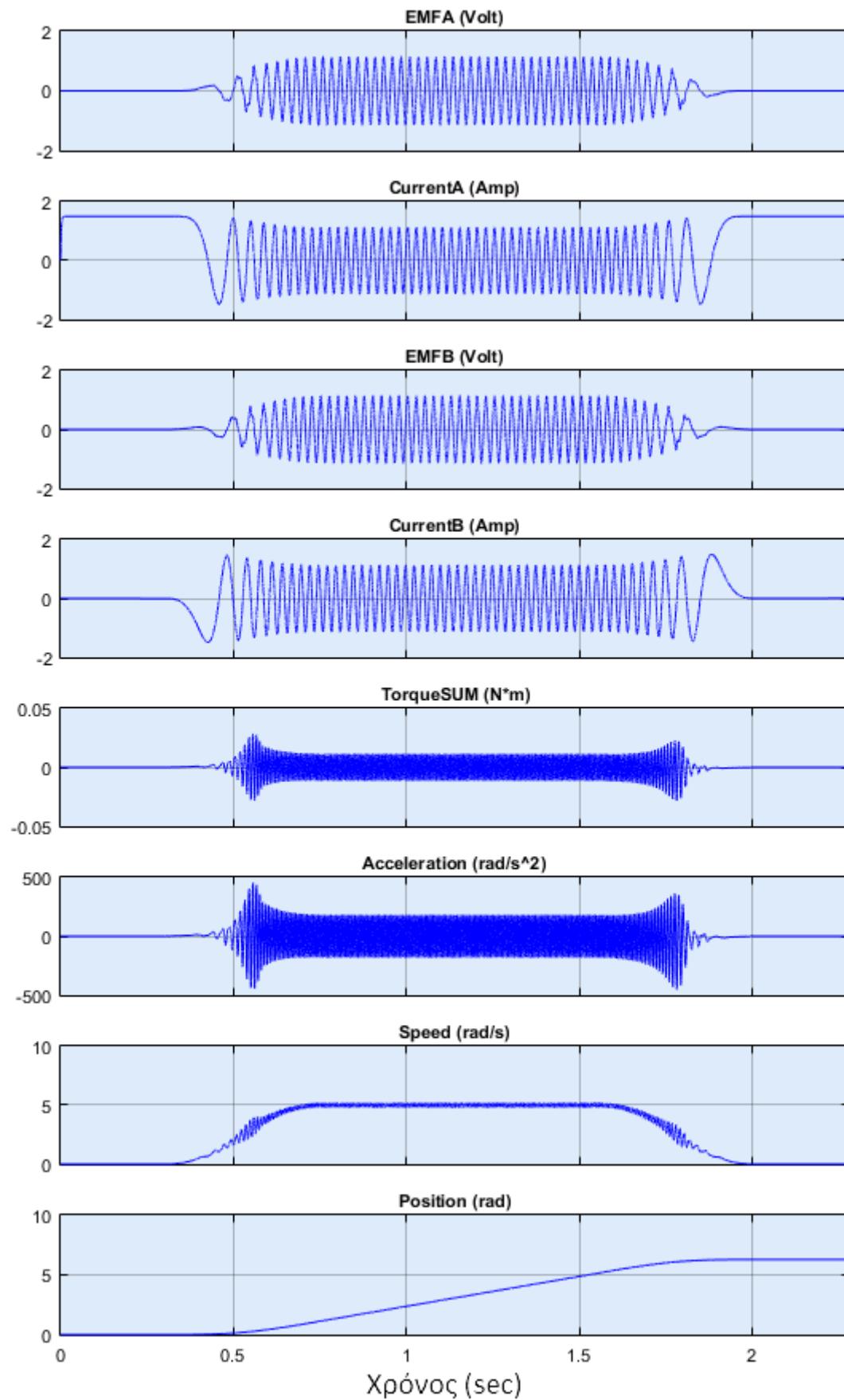
Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων ενός δεκάτου έκτου με “Detent torque” (Εικ. 3.38)

Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων μεγάλης ανάλυσης χωρίς “Detent torque”:



Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων μεγάλης ανάλυσης χωρίς “Detent torque” (Εικ. 3.39)

Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων μεγάλης ανάλυσης με “Detent torque”:



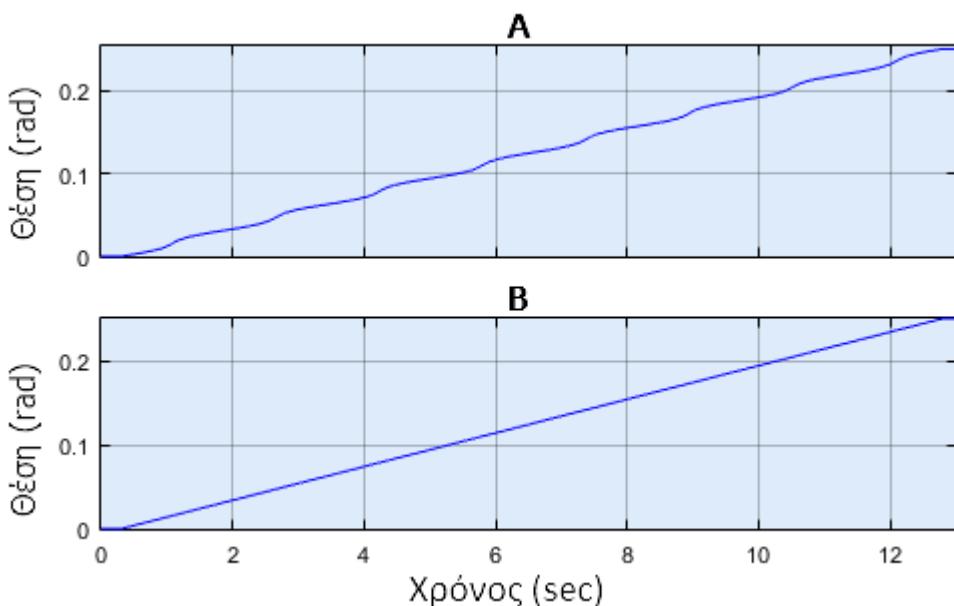
Απόκριση οδήγησης μικροβημάτων μεγάλης ανάλυσης με “Detent torque” (Εικ. 3.40)

6.2 Ideal and actual positioning

Ένα ακόμη μειονέκτημα που οφείλεται στην ροπή του μόνιμου μαγνήτη “Detent torque” είναι ένα μικρό σφάλμα στην τοποθέτηση του ρότορα για συγκεκριμένες γωνίες. Το σφάλμα τοποθέτησης είναι μηδενικό στις γωνίες όπου η ροπή “Detent torque” είναι μηδέν και μέγιστο στις γωνίες όπου η ροπή μεγιστοποιείται. Μια περίοδος της ροπής “Detent torque” εξελίσσεται μέσα σε διάστημα S , δηλαδή ενός κυματικού βήματος του ρότορα και επομένως υπάρχουν δυο μηδενισμοί και δυο μεγιστοποιήσεις σε κάθε διάστημα γωνίας S .

Οι μηδενισμοί της ροπής “Detent torque” συμπίπτουν με τις γωνίες της οδήγησης μισών βημάτων. Για αυτόν τον λόγο η οδήγηση μισών βημάτων αλλά και κάθε άλλη τεχνική οδήγησης μικρότερης ευκρίνειας δεν επηρεάζεται από αυτό το σφάλμα. Αντίθετα, κάθε οδήγηση μεγαλύτερης ευκρίνειας χρησιμοποιεί θέσεις ισορροπίας σε γωνίες όπου η ροπή “Detent torque” δεν μηδενίζεται και γι’ αυτόν τον λόγο συνδέονται με κάποιο σφάλμα.

Για την μέτρηση αυτού του σφάλματος, χρησιμοποιώντας το μοντέλο του κινητήρα, αρκεί να εκτελεστεί πολύ αργή κίνηση με οδήγηση μικροβημάτων μεγάλης ανάλυσης χωρίς φορτίο στον ρότορα. Η εκτέλεση της προσομοίωσης γίνεται πρώτα με αμελητέα ροπή “Detent torque” ($Cd=0$) και έπειτα με την πραγματική ($Cd=0.02$). Η θέση του ρότορα μετράται όταν αυτός βρίσκεται στην γωνία $S/4$ ή 0.45 μοίρες και στις δυο περιπτώσεις. Το μέγιστο σφάλμα μετρήθηκε περίπου ίσο με 0.55 mrad. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην εικόνα 3.41. Η εικόνα Β προέκυψε από την προσομοίωση με αμελητέα ροπή “Detent torque” και η τοποθέτηση του ρότορα είναι ιδανική, ενώ η εικόνα Α περιγράφει την απόκριση με το σφάλμα λόγω της ροπής “Detent torque”. Στην εικόνα Α το σφάλμα της καμπύλης έχει αυξηθεί ώστε να είναι ευδιάκριτο.



A. τοποθέτηση με σφάλμα και Β ιδανική τοποθέτηση (Εικ. 3.41)

6.3 Calculation of mechanical oscillation period

Όταν ο ρότορας ισορροπεί σε κάποια θέση μετά την ενεργοποίηση της φάσης ή των φάσεων συμπεριφέρεται σαν αποσβενόμενος ταλαντωτής. Μια μικρή μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας του έχει ως αποτέλεσμα την ταλάντωσή του γύρω από αυτήν. Η φυσική περίοδος ταλάντωσης του συστήματος είναι σημαντική διότι έχει αντίκτυπο στην απόδοση του κινητήρα. Ρυθμοί βηματισμού κοντά στην συχνότητα αυτής της ταλάντωσης ή πολλαπλάσιά της συνδέονται με πτώση της ροπής σύγχρονης λειτουργίας του κινητήρα.

Η σταθερά ελατηρίου αντιπροσωπεύεται από την σχέση της αλλαγής της ροπής σε συνάρτηση με τη μεταβολή της γωνιακής θέσης του ρότορα κοντά στην θέση ισορροπίας του. Η σχέση ανάμεσα στη θέση και τη ροπή όπως εξετάζεται και σε προηγούμενες ενότητες δεν είναι γραμμική αλλά έχει ημιτονοειδή μορφή. Συμπερασματικά, η γραμμική συμπεριφορά είναι μια καλή προσέγγιση για μικρές μόνο γωνίες.

Η σταθερά απόσβεσης συνδέεται με τις επαγόμενες τάσεις στις φάσεις του στάτη. Οι επαγόμενες τάσεις όμως δεν εξαρτώνται μόνο από την ταχύτητα του ρότορα αλλά και από τη θέση του. Λόγω της φύσης των χαρακτηριστικών αυτής της ταλάντωσης ο ακριβής υπολογισμός της περιόδου της είναι μια επίπονη διαδικασία. Για έναν προσεγγιστικό υπολογισμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι επόμενες σχέσεις.

Για μέγιστη ροπή ίση με αυτήν μιας πλήρως ενεργοποιημένης φάσης:

$$T_{osc1p} = 2\pi \sqrt{\frac{I_L}{K_t p I_{max}}} \quad (3.15)$$

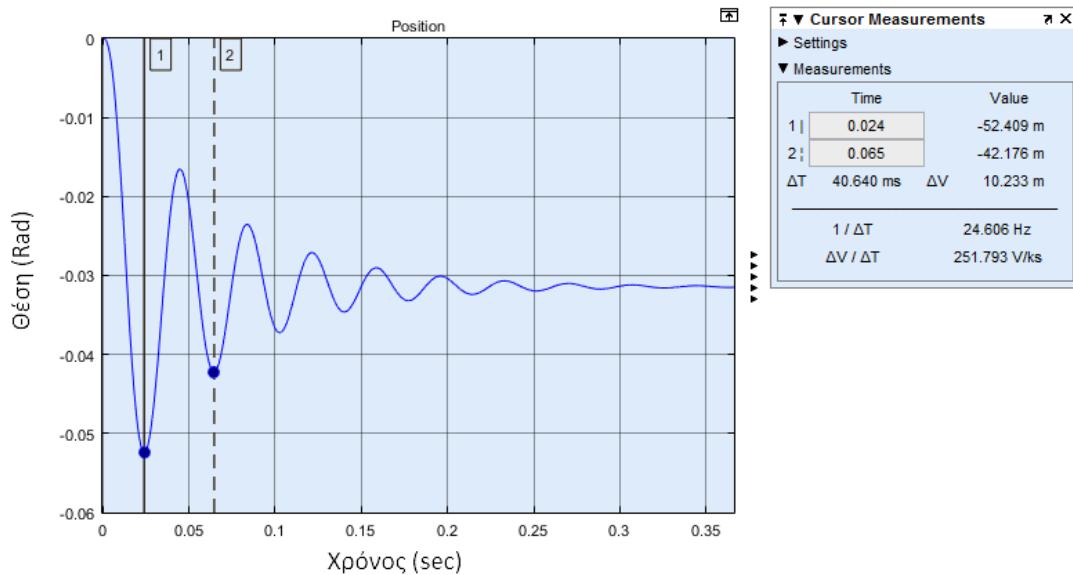
Για μέγιστη ροπή ίση με αυτήν δυο πλήρως ενεργοποιημένων φάσεων:

$$T_{osc2p} = 2\pi \sqrt{\frac{I_L}{\sqrt{2} K_t p I_{max}}} \quad (3.15)$$

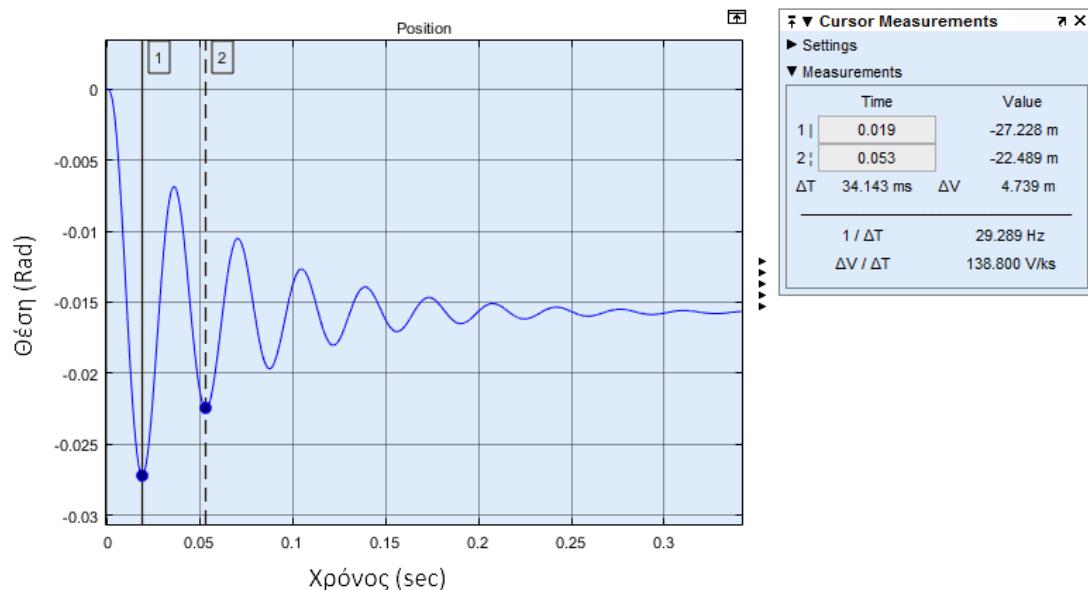
Όπου

- T_{osc1p} : Περίοδος ταλάντωσης μιας ενεργής φάσης
- T_{osc2p} : Περίοδος ταλάντωσης δυο ενεργών φάσεων
- I_L : Ροπή αδράνειας ρότορα και φορτίου
- K_t : Σταθερά συσχέτισης ρεύματος-ροπής φάσης
- p : Πλήθος ακμών του ρότορα
- I_{max} : Ονομαστικό ρεύμα φάσης

Με χρήση του μοντέλου έγινε προσομοίωση αυτής της ταλάντωσης για μία και για δύο ενεργές φάσεις. Το φορτίο στον ρότορα επιλέχθηκε να έχει ροπή αδράνειας 100 φορές αυτήν του ρότορα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες 3.42 και 3.43 αντίστοιχα. Με χρήση των προηγούμενων σχέσεων οι περίοδοι ταλάντωσης υπολογίστηκαν $T_{osc1p} = 0,0401 \text{ sec}$ για μια ενεργή φάση και $T_{osc2p} = 0,0337 \text{ sec}$ για δυο ενεργές φάσεις. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών είναι κοντά σε αυτά των αποκρίσεων του μοντέλου που φαίνονται στις εικόνες 3.42 και 3.43.



Περίοδος ταλάντωσης ρότορα με μια ενεργή φάση (Εικ. 3.42)



Περίοδος ταλάντωσης ρότορα με δυο ενεργές φάσεις (Εικ. 3.43)

Conclusions

Η κατασκευή μοντέλου ενός υβριδικού βηματικού κινητήρα με χρήση του εργαλείου Simulink αποδείχθηκε να είναι μια σχετικά απλή διαδικασία εφόσον οι μαθηματικές σχέσεις που διέπουν την συμπεριφορά του μορφοποιηθούν κατάλληλα. Σε αυτήν την εργασία η διαδικασία μοντελοποίησης του κινητήρα τυποποιείται σε κάποιον βαθμό.

Αποδείχτηκε ότι ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει επαρκώς μόνο σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής όταν τα τυλίγματα των φάσεων τροφοδοτούνται με τάση ίση ή μικρότερη της ονομαστικής.

Η λειτουργία και η κίνηση του κινητήρα συνδέεται με δυο **πηγές που μπορούν να δημιουργήσουν αναταράξεις** και παρασιτικούς κυματισμούς στις κινηματικές καμπύλες απόκρισής του. **Η πρώτη πηγή αναταράξεων** οφείλεται στη μέθοδο οδήγησης που χρησιμοποιείται. Όσο χαμηλότερη είναι η ευκρίνεια της οδήγησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία ανάμεσα στις γειτονικές θέσεις βημάτων του κινητήρα. Όταν κατά τον βηματισμό ο ρότορας αναγκάζεται να ισορροπήσει σε μια καινούρια θέση που απέχει αισθητά από την προηγούμενη, υπερβαίνει τη θέσης-στόχο κατά την προσέγγιση και αυτό δημιουργεί κραδασμούς. Στην ιδανική περίπτωση όπου η τεχνική οδήγησης που χρησιμοποιείται χαρακτηρίζεται από άπειρα βήματα ανά περιστροφή (αναλογική οδήγηση) η τεχνική οδήγησης δεν συνεισφέρει καθόλου στις αναταράξεις - κυματισμούς της απόκρισης. **Η δεύτερη πηγή αναταράξεων** συνδέεται με την ροπή "Detent Torque", δηλαδή την ροπή που οφείλεται στον μόνιμο μαγνήτη του ρότορα. Η ύπαρξη αυτής της ροπής δεν μπορεί να αποφευχθεί. Ως αποτέλεσμα, η χρήση μιας τεχνικής οδήγησης η οποία συνεισφέρει αναταράξεις μικρότερες από αυτές που οφείλονται στην ροπή "Detent Torque" είναι ανώφελη.

Από το μοντέλο που δημιουργήθηκε είναι δυνατόν να διεξαχθούν **χαρακτηριστικά μεγέθη του κινητήρα** όπως η περίοδος ταλάντωσης ρότορα-φορτίου και το σφάλμα τοποθέτησης κατά την χρήση οδήγησης μικροβημάτων.

Όσον αφορά στη μέτρηση της μέγιστης μαγνητικής ροής ανάμεσα σε φάση και ρότορα του κινητήρα, και οι τρεις μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν δίνουν αποδεκτές και σχετικά συγγενικές τιμές για την σταθερά.

Μερικές από τις **διαστάσεις του κινητήρα** που δίνονται στο φύλο δεδομένων του είναι εκτός των ανοχών που προδιαγράφονται σε αυτό. Συνεπώς, απαιτείται προσοχή κατά την χρήση πληροφοριών από αυτά τα έγγραφα.

Suggestions for future research

Ενεργειακή έρευνα – Αγωγή θερμότητας στον κινητήρα

Ο κινητήρας θα μπορούσε να μελετηθεί ως προς την ιδιότητα του να άγει την θερμότητα που αναπτύσσεται στα τυλίγματα του προς το περιβάλλον. Η ικανότητα του αυτή αποτελεί μια από τις συνθήκες που οριοθετεί το ονομαστικό ρεύμα των φάσεων και κατά συνέπεια την μέγιστη ισχύ του κινητήρα. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση του χαρακτηριστικού αυτού συνεπάγεται την αύξηση της ισχύος των συγκεκριμένων κινητήρων ή ακόμη και την αύξηση της διάρκειας ζωής τους. Κάποιες τέτοιες τεχνικές θα μπορούσαν να είναι η προσθήκη εξωτερικών εναλλακτών θερμότητας ή η μορφοποίηση καναλιών αέρα στο εσωτερικό του κινητήρα και η βελτίωση θερμικών χαρακτηριστικών των υλικών από τα οποία κατασκευάζεται ο στάτης αλλά και τα καλώδια στα τυλίγματα του. Μπορούν να δημιουργηθούν θερμικά μοντέλα του κινητήρα προς εξέταση της απόδοσης των προηγούμενων τεχνικών.

Κινηματική έρευνα – Τεχνικές ακύρωσης σφάλματος τοποθέτησης μικροβημάτων

Στην εργασία αυτήν έγινε αναφορά ως προς το σφάλμα τοποθέτησης κατά την χρήση τεχνικής οδήγησης μικροβημάτων. Προτείνεται μελέτη πάνω σε τεχνικές μείωσης αυτού του σφάλματος. Η ροπή η οποία παράγεται από τις φάσεις ίσως μπορούσε να προγραμματιστεί ώστε να ακυρώνει εκείνην που αναφέρεται ως ροπή “Detent Torque” η οποία είναι η αιτία του σφάλματος τοποθέτησης. Η έρευνα πρέπει να έχει στόχο την ανάπτυξη αυτής της τεχνικής οδήγησης που θα ακυρώνει την ροπή “Detent Torque” και κατά συνέπεια θα αποδίδει χαμηλότερους κραδασμούς και μειωμένο σφάλμα τοποθέτησης στις κινήσεις. Το πρόγραμμα-διερμηνέας κίνησης που γράφτηκε σε αυτήν την εργασία μπορεί να τροποποιηθεί για αυτόν τον σκοπό. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το μοντέλο του κινητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Κινηματική έρευνα – Προσομοίωση λειτουργίας ολοκληρωμένου εργαλείου CNC

Η προσομοίωση των κινήσεων μιας μηχανής CNC προϋποθέτει τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας της διάταξης μεταφοράς κίνησης που χρησιμοποιείται. Επίσης αναγκαία είναι και η κατασκευή μοντέλου για το κομμάτι του ολοκληρωμένου κυκλώματος – οδηγού των βηματικών κινητήρων. Η μοντελοποίηση των υβριδικών βηματικών κινητήρων τυποποιήθηκε σε κάποιον βαθμό σε αυτήν την εργασία οπότε για αυτό το κομμάτι μπορεί να ακολουθηθεί η ίδια μέθοδος. Επιπλέον, μπορεί να επινοηθεί πρόγραμμα-διερμηνέας κίνησης με σκοπό τον συγχρονισμό 2 ή παραπάνω κινητήρων προς εκτέλεση κινήσεων σε δυο ή περισσότερες διαστάσεις. Τέλος, οι κινήσεις θα προσομοιωθούν από το μοντέλο.

Ιστορική μελέτη:

Οι βηματικοί κινητήρες έκαναν την εμφάνιση τους κατά το 1920. Σήμερα αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της τεχνολογίας. Μπορεί να απέκτησαν δημοτικότητα μόνο τα τελευταία χρόνια (λόγω της εμφάνιση τους στους τρισδιάστατους εκτυπωτές) όμως η συνεισφορά τους είναι μακροχρόνια και ευρεία. Προτείνεται η συλλογή των κύριων και πιο σημαντικών συνεισφορών του βηματικού κινητήρα στην τεχνολογία και την επιστήμη του κόσμου μας.

Για ερωτήσεις ως προς την χρήση του μοντέλου και του διερμηνέα κινήσεων μπορείτε να απευθυνθείτε στο email liakou.metal@gmail.com.

Bibliography and sources

-1-

"STACKING WITH CYLINDRICAL SPOTS IN LAMINATION OF STAMPED ELECTRICAL STEEL SHEETS",

Heng-Sheng Lina, Ho-Chung Fua, Li-Hsiang Liub, Yun-Kui Huangc, De-Hua Fangc,
Published by Elsevier Ltd.

International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 17-22 September 2017,
Cambridge, United Kingdom

-2-

"BIDIRECTIONAL SPEED CONTROL OF DC MOTOR AND STEPPER MOTOR THROUGH MAT LAB USING PIC MICRO CONTROLLER",

Ozwin Dominic Dsouza, Manjunathababu. P, Babu Naik,
BMS Institute of Technology, Bangalore, India, 2013

-3-

"STEPPING MOTORS – A GUIDE TO THEORY AND PRACTICE",

Paul Acarnley,

Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2007
[σελ. 3 - 43, σελ. 134 - 135][Ενότητες 1,4,5,6,7]

-4-

"SIMULATION OF AN OPEN-LOOP STEPPING MOTOR SYSTEM",

Bell Gregory,

Thesis, Rochester Institute of Technology, 1985.

[σελ. 1 - 20]

-5-

"STEPPING MOTORS FUNDAMENTALS - AN907",

Reston Condit, Microchip Technology Inc., Dr. Douglas W. Jones, University of Iowa,
Published by MICROCHIP, 2004

-6-

“CONTROL OF STEPPING MOTORS”,
Douglas W. Jones,
THE UNIVERSITY OF IOWA Department of Computer Science, 1990
Published by MICROCHIP, 2004
[Ενότητες 1,2,3,5]

-7-

“NEMA STANDARDS PUBLICATION ICS 6”,
Published by National Electrical Manufacturers Association, 1993
[Ενότητα 3]

-8-

“STEPPING MOTORS AND STEPPING MOTOR CONTROL SYSTEM - TND6197/D”,
Published by ON Semiconductor - trademark of Semiconductor Components Industries, 2015

-9-

“STEPPING MOTORS WITH DISC MAGNET” - United States Patent
Inventors: Albert Palmero, Harwinton, Robert N. Brigham, Monroe; Robert S. Lundin,
Litchfield, all of Conn.
Filed in 1981
[σελ. 9 - 14]

-10-

“SIMPLE DIGITAL LOGIC DESIGN (H-BRIDGE)”
CS 3651 – Prototyping Intelligent Appliances
Georgia Institute of Technology

Appendix - AVR microcontroller as stepper motor driver

Η τεχνική οδήγησης βηματικών κινητήρων με σταθερή τάση έχει μειονεκτήματα αλλά χρησιμοποιείται εδώ με σκοπό την εμπέδωση της λειτουργίας του. Για την υλοποίηση μιας τέτοιας οδήγησης, παραθέτεται το πρόγραμμα σε C++ που γράφτηκε με βάση τις δυνατότητες του μικροελεγκτή της εταιρείας Atmel - ATTiny2313A (Εικ. 4.1).

Pinout ATTiny2313A/4313

PDIP/SOIC

(PCINT10/RESET/dW) PA2	1	20	VCC
(PCINT11/RXD) PD0	2	19	PB7 (USCK/SCL/SCK/PCINT7)
(PCINT12/TXD) PD1	3	18	PB6 (MISO/DO/PCINT6)
(PCINT9/XTAL2) PA1	4	17	PB5 (MOSI/DI/SDA/PCINT5)
(PCINT8/CLKI/XTAL1) PA0	5	16	PB4 (OC1B/PCINT4)
(PCINT13/CKOUT/XCK/INT0) PD2	6	15	PB3 (OC1A/PCINT3)
(PCINT14/INT1) PD3	7	14	PB2 (OC0A/PCINT2)
(PCINT15/T0) PD4	8	13	PB1 (AIN1/PCINT1)
(PCINT16/OC0B/T1) PD5	9	12	PB0 (AIN0/PCINT0)
GND	10	11	PD6 (ICPI/PCINT17)

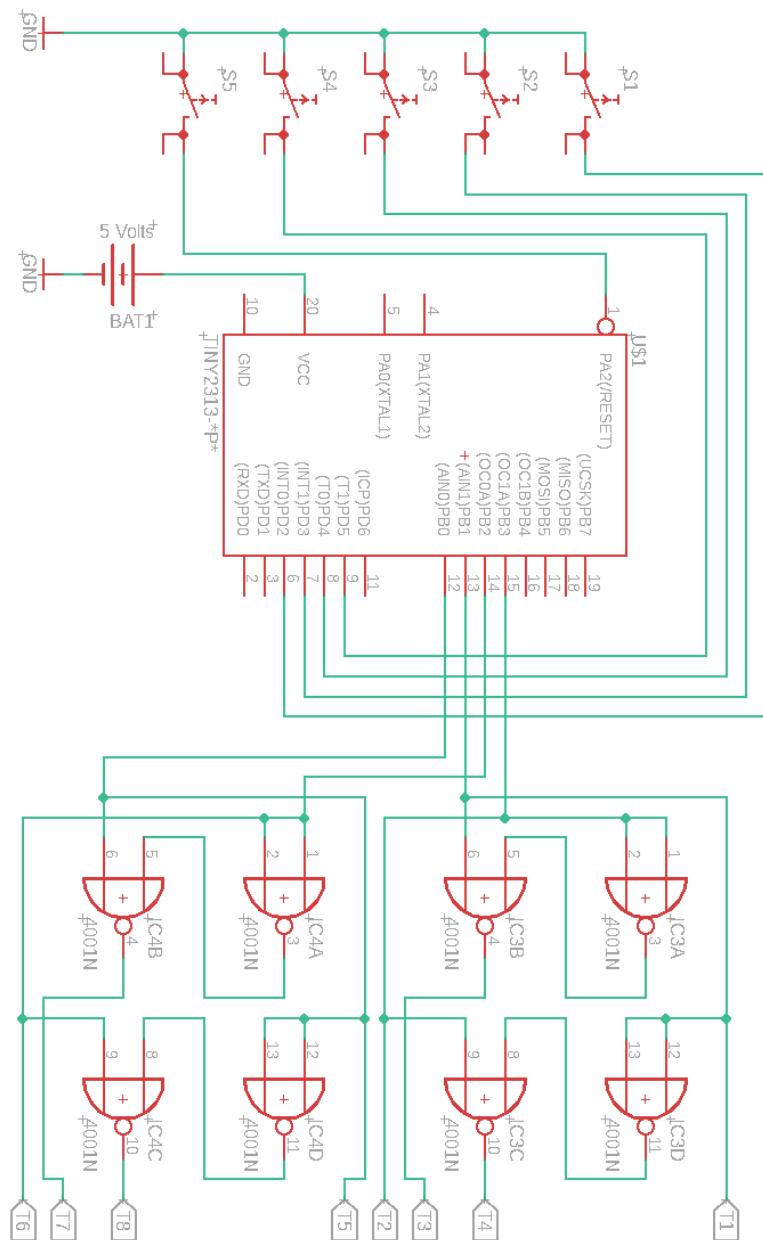
Απολήξεις μικροελεγκτή ATTiny2313A (Εικ. 4.1)

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τις απολήξεις 12,13,14,15 ως λογικές εξόδους για τον έλεγχο των τρανζίστορ - MOSFET. Επίσης οι απολήξεις 1,6,7,8,9 χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για επικοινωνία με τον χρήστη.

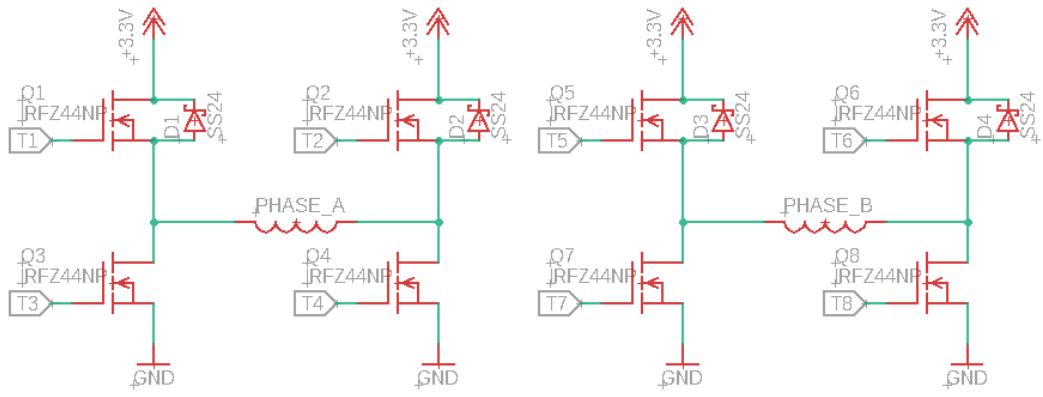
Οι χρόνοι βηματισμού των κινήσεων που προσομοιώθηκαν στο κεφάλαιο “Αποτελέσματα μοντέλου” αποθηκεύονται σαν πίνακες στην μνήμη του μικροελεγκτή. Μετά την εντολή βηματισμού από τον χρήστη, ο μικροελεγκτής ακολουθεί αυτούς τους χρόνους βηματισμού για να οδηγήσει τον κινητήρα. Με την γείωση της απόληξης 7 δίνεται η εντολή για την εκτέλεση της κίνησης που φαίνεται στην εικόνα 3.30 (Κυματική οδήγηση). Με την γείωση της απόληξης 8 δίνεται η εντολή για την εκτέλεση της κίνησης που φαίνεται στην εικόνα 3.32 (Οδήγηση ολοκλήρων βημάτων). Τέλος, με την γείωση της απόληξης 9 δίνεται η εντολή για την εκτέλεση της κίνησης που φαίνεται στην εικόνα 3.34 (Οδήγηση μισών βημάτων). Εάν η απόληξη 6 είναι ήδη γειωμένη πριν κάποια από τις 3 προηγούμενες εντολές δοθεί, το πρόγραμμα μπαίνει σε λειτουργία χειροκίνητου βηματισμού, όπου ένα βήμα εκτελείται κάθε φορά που η απόληξη 6 γειώνεται. Ο χειροκίνητος βηματισμός του κινητήρα βοηθάει στην καλύτερη αντίληψη της λειτουργίας του και της αλλαγής της συμπεριφοράς του σε κάθε μια από τις τρείς διαθέσιμες οδηγήσεις (κυματική οδήγηση, ολοκλήρων βημάτων, μισών βημάτων).

Μετά από 30" ο μικροελεγκτής προγραμματίζεται να μεταβαίνει σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ώστε να μην χρειάζεται η εγκατάσταση διακόπτη on/off στο κύκλωμα. Για την επανενεργοποίησή του αρκεί να γειωθεί η απόληξη 1 η οποία προκαλεί την επαναφορά του μικροελεγκτή στην αρχική του κατάσταση. Αυτή η μέθοδος ακολουθείται και για την έξοδο από τη λειτουργία χειροκίνητου βηματισμού.

Για μεγαλύτερη ασφάλεια μπορεί να εγκατασταθεί λογικό κύκλωμα ανάμεσα στον μικροελεγκτή και τα τρανζίστορ που να αποτρέπει την βραχυκύλωση της πηγής σε περίπτωση σφάλματος του προγράμματος οδήγησης. Στις εικόνες 4.2 α και β φαίνεται το ολοκληρωμένο σχέδιο της εφαρμογής.



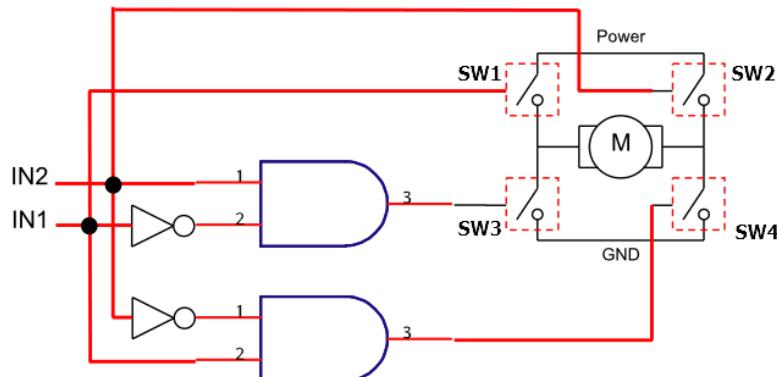
Λογικό κύκλωμα εφαρμογής (Εικ. 4.2a)



Διατάξεις "H bridge" εφαρμογής (Εικ. 4.26)

(Τα τρανζίστορ IRF510 δεν είναι τα καταλληλότερα για την εφαρμογή και για αυτόν τον λόγο η τάση μειώνεται στην εφαρμογή από τα 3.3 στα 1.23 V.)

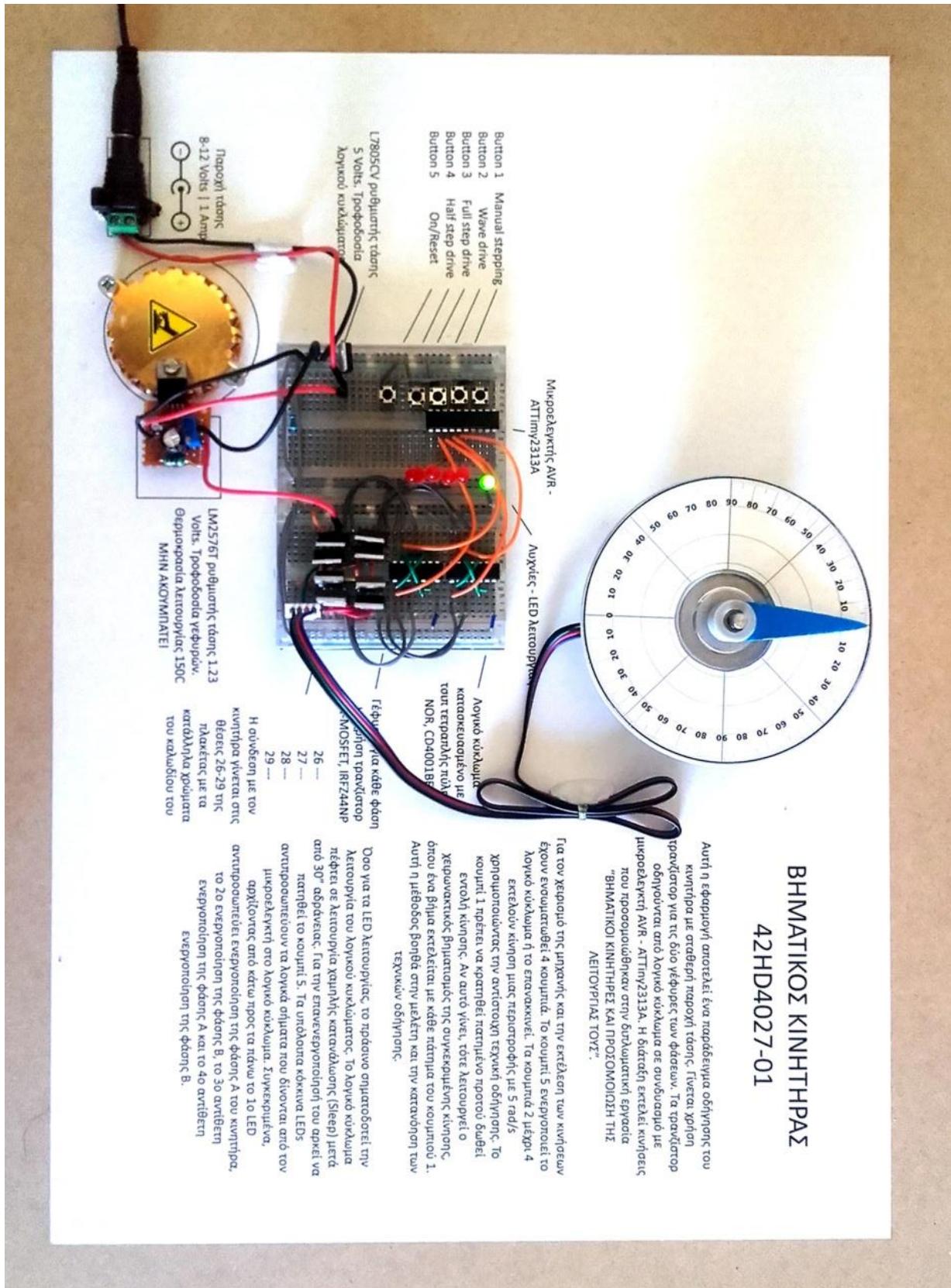
Η λογική διάταξη που χρησιμοποιείται ενσωματώνει δύο ολοκληρωμένα κυκλώματα τετραπλών λογικών πυλών NOR. Το κύκλωμα που αναφέρεται στην πηγή [10] μεταφράζεται σε ισοδύναμο με την χρήση πυλών NOR. Οι πύλες NOR είναι χρήσιμες διότι μπορούν να συνθέσουν κάθε άλλη λογική πύλη. Η αυθεντική λογική διάταξη φαίνεται πιο καθαρά στην εικόνα 4.3.



Function	IN 2	IN 1	SW1	SW2	SW3	SW4
Coast	0	0	0	0	0	0
Forward	0	1	1	0	0	1
Reverse	1	0	0	1	1	0
Brake	1	1	1	1	0	0

Λογική διάταξη για την ασφαλή λειτουργία "H bridge" (Εικ.4.3)

Στην εικόνα 4.4 που ακολουθεί φαίνεται η εφαρμογή στη φυσική της μορφή. Όλα τα κομμάτια που χρησιμοποιήθηκαν τοποθετήθηκαν πάνω σε μια πλάκα από MDF.



Ακολουθεί ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε C++:

```
/*
 * StepperDriver.c
 *
 * Created: 6/12/2019 12:06:07 μμ
 * Author : Ilias Chatziefstathiou
 */

#define F_CPU    8000000

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/sleep.h>

const volatile uint16_t PROGMEM
Dt1[12]={7167,1370,1131,1005,926,874,838,813,797,788,785,177|0x8000}; //177
const volatile uint16_t PROGMEM
Dt2[22]={5689,1479,1037,727,642,586,545,515,490,471,455,442,432,423,415,409,404
,400,397,395,393,357|0x8000};

const volatile uint8_t PROGMEM DriveTech[3][8]={
    {0b11110001,0b11110010,0b11110100,0b11111000,0b11110001,0b11110010,0b111
10100,0b11111000},
    {0b11110011,0b11110110,0b11111100,0b11111001,0b11110011,0b11110110,0b111
1100,0b11111001},
    {0b11110001,0b11110011,0b11110010,0b11110110,0b11110100,0b11111100,0b111
11000,0b11111001}
};

volatile uint16_t steps1=0;
volatile uint16_t steps=0;
volatile uint16_t * pDt=0;

volatile uint8_t msec8_1=0;
volatile uint8_t msec8_2=0;
volatile uint8_t msec8_3=0;
volatile uint8_t msec8_4=0;
volatile uint8_t msec8_sleep=0;
volatile uint8_t secs_sleep=0;
volatile uint8_t * pmsecs8=0;

volatile uint8_t i=0;
volatile uint16_t j=0;
volatile uint16_t jacc=0;

volatile uint8_t Button1pressed=0;
volatile uint8_t Button2pressed=0;
volatile uint8_t Button3pressed=0;
volatile uint8_t Button4pressed=0;
volatile uint8_t * pButtonpressed=0;
volatile uint8_t ButtonPin=0;

volatile uint8_t NextOut=0;
volatile uint8_t MVMNTflag=0;
```

```

void setup() //Sets microcontroller registers
{
    TCCR0A=0b00000000;
    TCCR0B=0b00000100; //clock /8 and CTC with OCR1A as TOP

    TCCR1A=0b00000000;
    TCCR1B=0b00001011; //clock /8 and CTC with OCR1A as TOP

    TIMSK =0b01000010; //compare interrupt enable, timer0 OVF interrupt
enable

    DDRA = 0b00000001; //Port direction registers
    PORTA = 0b11111110;

    DDRB = 0b10001111;
    PORTB = 0b11110000;

    DDRD = 0b00000001;
    PORTD = 0b11111110;

    TCNT0=0;
    TCNT1=0; //timer initialization

    MCUCR |= 0b00010000; //Power down mode
    //MCUCR |= (1<<SE); //Sleep enable
    //MCUCR &= ~(1<<SE); //Sleep disable

    sei(); //interrupts enabled
    //cli(); //interrupts disabled

    TIMSK&=~((1<<OCIE1A)|(1<<OCIE1B)); //Timer 1 compareA & compareB
interrupt DISABLE
    //TIMSK|=(1<<OCIE1A)|(1<<OCIE1B); //Timer 1 compareA & compareB
interrupt ENABLE
}

void ButtonCheck() //Software debounced button check
{
    if ((PIND&ButtonPin) == 0){
        if (!*pButtonpressed && (*pmsecs8>6)){
            *pButtonpressed=1;
            *pmsecs8=0;
            secs_sleep=0;
        }
    }
    if ((PIND&ButtonPin) != 0){
        if ((*pButtonpressed&1) && (*pmsecs8>6)){
            *pButtonpressed=0;
            *pmsecs8=0;
        }
    }
}

void SleepCheck() //Checks if it should sleep
{
    if (secs_sleep>=30)
    {
        secs_sleep=0;
        msecs8_sleep=0;
        PORTB=0x70;
        sleep_mode();
    }
}

```

```

void movement(uint8_t DU) //Executes movement
{
    pDt=pgm_get_far_address(Dt1);
    if (DU==2){pDt=pgm_get_far_address(Dt2);}

    steps=0;
    j=0;
    while(!(pgm_read_word(pDt+j)>>15))
    {
        steps++;
        j++;
    }
    steps=steps*2+1+(pgm_read_word(pDt+j)&0x7fff);

    ButtonPin=0b000000100;
    pButtonpressed=&Button4pressed;
    pmsecs8=&msecs8_4;

    MVMNTflag=0;
    j=0;
    PORTB=pgm_read_byte(&DriveTech[DU][0]);
    _delay_ms(100);
    PORTB=0xf0;
    _delay_ms(1);
    OCR1A=0x0fff;
    OCR1B=0x0fff;
    TIMSK|=(1<<OCIE1A)|(1<<OCIE1B);
    TCNT1=0;
    PORTB=pgm_read_byte(&DriveTech[DU][1]);
    if ((PIND&0b000000100) == 0){
        TIMSK&=~((1<<OCIE1A)|(1<<OCIE1B));
        MCUCR |= (1<<SE); //Sleep enable
    }
    while (j+1<steps)
    {
        if (MVMNTflag==0)
        {
            MVMNTflag+=(pgm_read_word(pDt+j)>>15);
            if (MVMNTflag==1){jacc=j-1;continue;}
            OCR1A=pgm_read_word(pDt+j);
            OCR1B=OCR1A-1;
            NextOut=pgm_read_byte(&DriveTech[DU][(j+2)%8]);
            j++;
        }
        else if (MVMNTflag==1)
        {
            NextOut=pgm_read_byte(&DriveTech[DU][(j+2)%8]);
            j++;
            if (j-jacc-1>=(pgm_read_word(pDt+jacc+1)&0x7fff)){MVMNTflag=2;}
        }
        else
        {
            OCR1A=pgm_read_word(pDt+jacc);
            OCR1B=OCR1A-1;
            NextOut=pgm_read_byte(&DriveTech[DU][(j+2)%8]);
            j++;
            jacc--;
        }
        while (PORTB!=NextOut)
        {
            if (!(TIMSK>>OCIE1A)&1)
            {

```

```

        ButtonCheck();
        if (Button4pressed==1)
        {
            _delay_ms(200);
            PORTB=0xf0;
            _delay_ms(1);
            PORTB=NextOut;
        }
        SleepCheck();
    }
}
TIMSK&=~((1<<OCIE1A)|(1<<OCIE1B));
_delay_ms(100);
PORTB=0xf0;
}

int main(void)
{
    setup();
    while (1)
    {
        ButtonPin=0b00001000;
        pButtonpressed=&Button1pressed;
        pmsecs8=&msecs8_1;
        ButtonCheck();
        if (Button1pressed==1)
        {
            movement(0);
        }

        ButtonPin=0b00010000;
        pButtonpressed=&Button2pressed;
        pmsecs8=&msecs8_2;
        ButtonCheck();
        if (Button2pressed==1)
        {
            movement(1);
        }

        ButtonPin=0b00100000;
        pButtonpressed=&Button3pressed;
        pmsecs8=&msecs8_3;
        ButtonCheck();
        if (Button3pressed==1)
        {
            movement(2);
        }

        SleepCheck();
    }
}

```

```

ISR (TIMER1_COMPB_vect)
{
    PORTB=0xf0;
}

ISR (TIMER1_COMPA_vect)
{
    PORTB=NextOut;
}

ISR (TIMER0_OVF_vect)
{
    msecs8_1++;
    msecs8_2++;
    msecs8_3++;
    msecs8_4++;

    msecs8_sleep++;
    if (msecs8_sleep>=122){msecs8_sleep=0;secs_sleep++;}
}

```

Σχόλιο:

Οι υπορουτίνες ISR (Interrupt Sub Routine) είναι το ισχυρό εργαλείο χάρη στο οποίο μπορούν να δημιουργηθούν σήματα με ακριβείς χρονισμούς παλμών. Είναι ένα από τα χρήσιμα εργαλεία που διαθέτουν οι μικροελεγκτές της οικογένειας AVR της ATMEL.

(Σημειώνεται ότι λόγω της μεταφοράς κειμένου από το Atmel Studio κάποιες γραμμές κώδικα συνεχίζονται και στην επόμενη σειρά. Ο κώδικας μπορεί να αντιγραφεί να εκτελεστεί χωρίς επιπλοκές.)