

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΠΜΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»



«Ανάπτυξη συστήματος περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και μέτρησης μαγνητικών σωματιδίων»

Κωνσταντίνος Ξαγοράρης

Επιβλέπων καθηγητής: Ε. Χριστοφόρου

Αθήνα 2010

Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσα διπλωματικής εργασίας έγινε η μελέτη και η κατασκευή πειραματικής διάταξης που σκοπό έχει τον εντοπισμό μαγνητισμένων περιοχών μέσα σε μη μαγνητικά υλικά. Η μέλλουσα εφαρμογή της διάταξης θα είναι στο χώρο της ιατρικής έρευνας. Ακριβέστερα κατασκευάστηκε μια γεννήτρια περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και μια διάταξη περιστροφής αισθητήρων μεγάλης ακρίβειας.

Για την υλοποίηση της κατασκευής απαιτήθηκε η εξοικείωση του γράφοντος τόσο με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας των επιμέρους εξαρτημάτων, όσο και με τις διαδικασίες προμήθειας τους. Ακόμη απαιτήθηκαν γνώσεις σε σχέση με τις κατεργασίες των υλικών καθώς απαιτήθηκε να κατεργαστούν δύο κομμάτια plexiglass σε αυτόματη εργαλειομηχανή.

Ο τρόπος ανάπτυξης που επιλέχθηκε περιλαμβάνει αρχικά στο θεωρητικό κομμάτι, μια ενημέρωση σε σχέση με το σκοπό χρήσης της διάταξης. Εν συνεχεία, σταδιακά αναπτύσσεται ο τρόπος λειτουργίας του κάθε εξαρτήματος που επιλέχθηκε, τα κριτήρια που οδήγησαν στην επιλογή του, οι τροποποιήσεις που απαιτήθηκαν, αλλά και ο τρόπος χρήσης του συνδυαστικά με την υπόλοιπη διάταξη.

1 Θεωρητικό μέρος

1.1 Περίληψη Προτεινόμενου Έργου

Η προτεινόμενη δράση αφορά στην ανάπτυξη εγχώριας τεχνικής για την οικονομική και αξιόπιστη διάγνωση κακοηθειών του επιθηλίου και του προστάτη (και μεταστάσεων των κακοηθειών του προστάτη) με μαγνητικές και θερμογραφικές τεχνικές, καθώς επίσης και την εξόντωση των καρκινικών κυττάρων με τεχνικές υπερθερμίας και επαγωγικής θέρμανσης. Η μέθοδος στηρίζεται στην επικόλληση μαγνητικών νανοσωματιδίων στο καρκινικό κύτταρο μέσω της αγκύρωσης κατάλληλων πρωτεϊνών (υποδοχείς των οποίων υπερεκφράζονται στην κυτταρική μεμβράνη των καρκινικών κυττάρων) στην επιφάνεια του κυττάρου. Οι εν λόγω πρωτεϊνες επικολλούνται (με σταθερούς ομοιοπολικούς δεσμούς) στην επιφάνεια του μαγνητικού νανοσωματιδίου με την παρεμβολή μιας οργανικής νανο-αλυσίδας και στην συνέχεια εισέρχονται ενέσιμα στην κυκλοφορία του αίματος. Το υλικό της οργανικής νανο-αλυσίδας είναι βιο-συμβατό και καλύπτει ολόκληρο το μαγνητικό σωματίδιο. Εκτός από τα μόρια προσδέτες που θα βοηθούν στην επιλεκτική στόχευση των σωματιδίων στα καρκινικά κύτταρα, στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων μπορούν να επικολλώνται και άλλα μόρια, όπως φθορίζουσες ουσίες (για μορφολογική παρατήρηση της in vivo κατανομής τους), φάρμακα (για παράδειγμα αντικαρκινικά που μπορεί να λειτουργούν συνεργικά με τα μαγνητικά σωματίδια), ή/και ενισχυτές διαπέρασης (μόρια που αυξάνουν την διαπέραση των σωματιδίων διαμέσου βιολογικών μεμβρανών), ώστε να είναι ακόμα περισσότερο λειτουργικά (Εικόνα 1-1). Δεδομένου ότι ένα καρκινικό κύτταρο επιθηλίου ή προστάτη διαθέτει δύο τάξεις μεγέθους περισσότερους υποδοχείς από ότι ένα υγιές κύτταρο (αναλογία 1:100), η κυκλοφορία του αίματος και οι νανοδιαστάσεις του συμπλόκου επιτρέπουν αρχικά την εξαγγείωσή τους μέσω των πόρων που υπάρχουν στα ατελή αγγεία που αιματώνουν καρκινικούς όγκους (σφαιρικά σωματίδια διαμέτρου έως 200nm μπορούν να περνούν μέσα από τέτοιες ατέλειες, λόγω του φαινομένου της αυξημένης διαπερατότητας και συγκράτησης [EPR –enhanced permeability and retention] που εμφανίζουν οι καρκινικοί όγκοι) και την επικόλλησή τους μέσω της πρωτεϊνης στα καρκινικά κύτταρα που υπερεκφράζουν υποδοχείς της πρωτεϊνης, σε ένα χρονικό διάστημα σαφώς μικρότερο της μιας ώρας.



Εικόνα 1-1: Σχηματική αναπαράσταση της μορφολογίας των προτεινόμενων νανοσωματιδίων για χρήση στη διάγνωση και θεραπεία διαφόρων τύπων καρκίνου (από: C. Sun et al., 2008).

Στην συνέχεια επαγωγική θέρμανση γύρω από το σημείο ελέγχου του ανθρώπινου σώματος (μαστός, προστάτης, αλλά ενδεχομένως και ολόκληρο το σώμα) θερμαίνει από απόσταση επιλεκτικά μόνο τα μαγνητικά νανοσωματίδια (λόγω συχνότητας επαγωγικής θέρμανσης δεν επηρεάζονται οργανικοί δεσμοί και δεσμοί υδρογόνου). Ένας καινοτόμος αλγόριθμος επεξεργασίας της πληροφορίας θερμικής εκπομπής από το σημείο ή σημεία μέτρησης επιτρέπει την ανάγνωση περιοχών με έντονη θερμική εκπομπή που αντιστοιχεί σε ενδεχόμενη παρουσία καρκινικών κυττάρων. Εναλλακτικά ή συμπληρωματικά της θερμικής μέτρησης είναι δυνατή η μαγνητική απεικόνιση των νανοσωματιδίων μέσω μαγνητικού συντονισμού, για διάγνωση πρωτογενών όγκων ή μεταστάσεων αυτών. Η ευαισθησία της μεθόδου θα μπορούσε να αγγίξει τα όρια μονοκυτταρικής μέτρησης κάτω από δοσμένες προϋποθέσεις (ευαίσθητα όργανα μέτρησης), γεγονός πολύ σημαντικό για τη διάγνωση μικρομεταστάσεων.

Ενδεχόμενα ευρήματα καρκινικών κυττάρων του επιθηλίου ή καρκινικών κυττάρων του προστάτη και των μεταστάσεών του μπορούν να εξοντωθούν με μεγαλύτερη ένταση επαγωγικής θέρμανσης και δεδομένης της απελευθέρωσης των μαγνητικών σωματιδίων μετά την καταστροφή των καρκινικών κυττάρων είναι δυνατή η επιτήρηση της προόδου της συρρίκνωσης ή εξαφάνισης του καρκίνου. Η εξαφάνιση στηρίζεται στην κυτταρική προσέγγιση της προκαλούμενης αύξησης θερμοκρασίας ενώ η διατήρηση των υγιών κυττάρων εν ζωή στηρίζεται στην ελάχιστη αύξηση θερμοκρασίας λόγω μικρού αριθμού επικολλημένων μαγνητικών σωματιδίων.

1.2 Απεικονιστικές τεχνικές

Οι σημαντικότερες απεικονιστικές τεχνικές, τόσο σε κλινικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο είναι βασικά δύο, η μέθοδος της αξονικής τομογραφίας και η μέθοδος της μαγνητικής τομογραφίας, οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια με στόχο τον προσδιορισμό των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους.

Αξονική τομογραφία:

Η αξονική τομογραφία στηρίζεται στην τεχνική των ακτίνων Χ. Η πρόσπτωση ακτίνων Χ σε έμβιο οργανισμό σκεδάζεται ή/και απορροφάται από αυτό, ανάλογα της πυκνότητάς του και της σύστασής του, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η (μέχρι ενός βαθμού) μη καταστροφική απεικόνιση του έμβιου οργανισμού[Hallouard et al., 2010].

Η ευαισθησία της μεθόδου είναι βασισμένη στη δυνατότητα διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας από ραδιενεργές πηγές (το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μπορεί να κατέβει στην τάξη της ατομικής ακτίνας ή της παραμέτρου κρυσταλλικού πλέγματος, δηλ. κάποιων Angstrom) ακόμη και στα μεταλλικά υλικά. Όσο μικρότερο το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερο το βάθος διείσδυσης των ακτίνων στο προς δοκιμή υλικό.

Η ανάπτυξη των ψηφιακών τεχνικών απεικόνισης, ευαίσθητων στα «σκληρά» μήκη κύματος οδήγησε σε μια μικρή επανάσταση στις ραδιογραφίες, καθώς οι ψηφιακές κάμερες, δεν απαιτούν την χρήση αναλογικών τεχνικών, μειώνοντας δραματικά τον χρόνο εργασίας για μια ραδιογραφία και βελτιώνοντας δραστικά τα λαμβανόμενα αποτελέσματα [Ryan et al., 2007]. Πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένες τεχνικές οι οποίες είναι ήδη σε λειτουργία σε βιομηχανικές εφαρμογές (σωληνώσεις, όπως διυλιστήρια και μεταφορά πετρελαίου – φυσικού αερίου) καθώς επίσης και στην ιατρική απεικονιστική. Η λειτουργία τους είναι βασισμένη στις πηγές ακτίνων X μικρο-εστίασης, που χρησιμοποιούν ψηφιακές κάμερες λήψης υψηλής ευκρίνειας. Λόγω του ελάχιστου ποσού τους απαιτούμενης κατανάλωσης ενέργειας, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς παύση της γραμμής παραγωγής [Galbraith JM, WT Allen, KL Coleman, VJ Alreja. Real Time Radioscopic Inspection of Insulated Pipeline Systems, Insight 37, pp. 417-420, 1995]. Ο περιορισμός της ευαισθησίας της ραδιογραφίας ακτίνων Χ είναι η διάθλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η καλύτερη ανάλυση που αναφέρθηκε ποτέ σε μη μεταλλικά και έμβια υλικά ήταν της τάξης του 1 μm (οι βιομηχανικώς αποδεκτές και πρακτικά εφαρμόσιμες ευαισθησίες σε χαρακτηρισμούς μετάλλων είναι της τάξης των 10-100 μm, που αντιστοιχούν και στην καλύτερη δυνατή ευκρίνεια αξονικού τομογράφου ιατρικής απεικόνισης).

Έτσι, παρόλο που αυτή η μέθοδος απεικόνισης είναι ικανή να αποτυπώσει την κατάσταση στον έμβιο οργανισμό, εντούτοις πάσχει από την αναλυτική του ικανότητα, η οποία στα πλέον εξελιγμένα συστήματα δεν μπορεί να ξεπεράσει το μικρονικό επίπεδο. Δεδομένου ότι η προτεινόμενη τεχνολογία για την καταπολέμηση του καρκίνου στηρίζεται στην χρήση σωματιδίων με διαστάσεις της τάξης των 10 nm, η μέθοδος της αξονικής τομογραφίας δεν είναι σε θέση να απεικονίσει το κάθε ένα νανοσωματίδιο ξεχωριστά.

Μαγνητική τομογραφία:

Η υψηλότερη δυνατή ευκρίνεια στην απεικόνιση ζωντανών σωμάτων εξασφαλίζεται με τη χρήση πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR). Ο πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός (NMR) είναι η ιδιότητα του μαγνητικού πυρήνα, σύμφωνα με την οποία η μαγνητική ροπή και οι εφαρμοζόμενοι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί (EM) προκαλούν την απορρόφηση της ενέργειας από τον πυρήνα και την συνεπακόλουθη ακτινοβολία της ενέργειας [Yao & Chen, 2010]. Η ενέργεια που ακτινοβολείται πίσω είναι σε μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού η οποία βασίζεται στη δύναμη του μαγνητικού πεδίου ή στη φυσική μαγνητική ροπή του πυρήνα. Αυτό επιτρέπει την παρατήρηση συγκεκριμένων μαγνητικών ιδιοτήτων του πυρήνα. Όλα τα σταθερά ισότοπα τα οποία περιέχουν μονό αριθμό πρωτονίων και/ή νετρονίων έχουν μια φυσική μαγνητική ροπή, με άλλα λόγια ένα μη μηδενικό spin, ενώ όλα τα νουκλίδια με ίσους αριθμούς πρωτονίων νετρονίων έχουν και τα δύο στροβιλισμό 0. Ο περισσότερο κοινά μελετώμενος πυρήνας είναι 1Η, ενώ άλλοι πυρήνες από ισότοπα πολλών άλλων στοιχείων έχουν επίσης μελετηθεί από υψηλού πεδίου φασματοσκοπία NMR. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι εκμεταλλεύσιμο στις ιατρικές τεχνικές απεικόνισης. Αν ένα δείγμα είναι τοποθετημένο σε ανομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο τότε οι συχνότητες συντονισμού του πυρήνα του δείγματος βασίζονται στο πού αυτό το πεδίο είναι τοποθετημένο.

Η ανάλυση των τεχνικών απεικόνισης βασίζεται στο πόσο μεγάλη είναι η βάθμωση του πεδίου. Η αποτελεσματικότητα του NMR μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας υπερπόλωση και/ή χρησιμοποιώντας διδιάστατες, τριδιάστατες και υψηλότερων διαστάσεων πολλαπλών συχνοτήτων τεχνικές [K. Yamada, Recent Applications of Solid-State 170 NMR, Annual Reports on NMR Spectroscopy, Volume 70, pp. 115-158, 2010].

Η αρχή του NMR συνήθως περιλαμβάνει δύο διαδοχικά βήματα, δηλαδή την ευθυγράμμιση (πόλωση) των στροβιλισμών των μαγνητικών πυρήνων σε ένα εφαρμοζόμενο, σταθερό μαγνητικό πεδίο H0 και συνεπώς τη διατάραξη αυτής της ευθυγράμμισης των στροβιλισμών του πυρήνα με την εφαρμογή ενός ηλεκτρομαγνητικού, συνήθως ραδιοσυχνοτήτων (RF), παλμό. Η απαιτούμενη συχνότητα διαταραχής είναι εξαρτημένη από το στατικό μαγνητικό πεδίο (H0) και την παρακολούθηση του πυρήνα. Τα δύο πεδία επιλέγονται συνήθως να είναι παράλληλα μεταξύ τους επειδή αυτό μεγιστοποιεί τη δύναμη του σήματος NMR. Η επακόλουθη απόκριση από την συνολική μαγνήτιση (M) των στροβιλισμών των πυρήνων είναι το φαινόμενο που εκμεταλλεύεται η φασματοσκοπία NMR και η απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού. Και οι δύο χρησιμοποιούν έντονα εφαρμοζόμενα πεδία (H0) ώστε να επιτύχουν διασπορά και πολύ υψηλή σταθερότητα για να καταφέρουν φασματική ανάλυση, λεπτομέρεις των οποίων περιγράφονται από χημικές μεταθέσεις, το φαινόμενο Zeeman και τις μεταθέσεις Knight (στα μέταλλα).

Η ιατρική εφαρμογή του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού είναι ευρέως γνωστή ως απεικόνικη μαγνητικού συντονισμού (MRI) χρησιμοποιώντας κυρίως το πρωτόνιο NMR [José et al., 2010]. Βιοχημικές πληροφορίες μπορούν να αντληθούν από ζωντανό ιστό (π.χ ανθρώπινοι εγκεφαλικοί όγκοι) με την τεχνική γνωστή ως φασματοσκοπία μαγνητικού συντονισμού σε ζωντανό οργανισμό (in vivo) ή Μικροσκοπία NMR χημικών μεταθέσεων. Αυτές οι μελέτες είναι δυνατές επειδή οι πυρήνες περιβάλλονται από ηλεκτρόνια σε τροχιές, τα οποία είναι φορτισμένα σωματίδια που παράγουν μικρά, τοπικά μαγνητικά πεδία. Η ποσότητα μόνωσης (shielding) εξαρτάται από το ακριβές τοπικό περιβάλλον. Για παράδειγμα, ένα Υδρογόνο ενωμένο με ένα Οξυγόνο θα μονωθεί διαφορετικά από ένα Υδρογόνο ενωμένο με ένα άτομο Άνθρακα. Επιπρόσθετα, δύο πυρήνες Υδρογόνου μπορεί να αλληλεπιδρούν μέσω μιας διεργασίας γνωστής ως σύζευξη τροχιάς – τροχιάς (spin-spin coupling), αν είναι στο ίδιο μόριο, η οποία θα διαιρέσει τις γραμμές του φάσματος με αναγνωρίσιμο τρόπο. Η υψηλή ανάλυση των τεχνικών NMR-MRI, ικανή να ανιχνεύσει δεσμούς ανεξάρτητου (single) πρωτονίου, είναι το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σεσύγκριση με άλλες μεθόδους όπως η ακτινογραφία CT. Στην περίπτωση της μαγνητικής μεταφοράς φαρμάκου ή των θεραπειών υπερθερμίας που βασίζονται σε νανο-σωματίδια μαγνητίτη η μέθοδος MRI είναι πολύ ευαίσθητη για τη χαρτογράφηση της κατανομής στο χώρο και της πυκνότητας των μαγνητικών συμπλεγμάτων.

Στην πραγματικότητα, μετρήσεις MRI γύρω από ανεξάρτητα νανο-σωματίδια μαγνητίτη επιδεικνύουν μια μαύρη εικόνα που περιβάλλει τα νανο-σωματίδια, με αυτή την εικόνα να είναι αρκετά μεγαλύτερη από το μέγεθος των νανο-σωματιδίων, χωρίς να αντιστοιχεί στο κέντρο του σωματιδίου κατ' ανάγκη. Έτσι, ενώ η αξονική τομογραφία αποδεικνύεται ως μη ευαίσθητη για την απεικόνιση της κατανομής των νανοσωματιδίων στο χώρο, η μαγνητική τομογραφία αποδεικνύεται ως υπερβολικά ευαίσθητη με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να απεικονίσει μαγνητική μάζα τόσο «μεγάλη» όση είναι αυτή των εισαγόμενων νανοσωματιδίων.

Η απουσία μιάς μεθόδου απεικόνισης είναι το κίνητρο για την πρόταση ανάπτυξης της απεικόνισης περιστρεφόμενης μαγνητομετρίας που θα αναλυθεί στο προτεινόμενο έργο και στα αντίστοιχα πακέτα εργασίας. Μετρώντας ανεξάρτητα υπερ-παραμαγνητικά νανο-σωματίδια μαγνητίτη και της θέσης τους σε δεδομένες τομές επιτρέπει την ακριβή απεικόνιση σωματιδίων πριν και μετά την ιατρική θεραπεία (π.χ μαγνητική διανομή φαρμάκου ή μαγνητική στόχευση).

1.3 Προτεινόμενο έργο

Σε διεθνές επίπεδο, η έρευνα για την καταπολέμηση του καρκίνου με μαγνητικές τεχνικές είναι αρκετά εξελιγμένη. Η στοχευμένη χορήγηση/μεταφορά φαρμάκων με υπερπαραμαγνητικά νανοσωματίδια υλοποιείται σε εργαστηριακό επίπεδο και αξιολογείται σε πειραματόζωα. Αντίθετα, οι απεικονιστικές τεχνικές εν γένει υστερούν σε σχέση με τις μεθοδολογίες στοχευμένης χορήγησης. Στην χώρα μας, υπάρχουν ερευνητικές ομάδες οι οποίες ασχολούνται με διάφορα θεματικά πεδία της στοχευμένης χορήγησης/μεταφοράς φαρμάκων, με αρκετά μεγάλη επιτυχία, όπως για παράδειγμα η ανάπτυξη μαγνητικών και υπερπαραμαγνητικών νανοσωματιδίων, ο σχεδιασμός και η παρασκευή λιποσωμάτων με ειδικούς επιφανεικούς προσδέτες καθοδήγησης (homing devices), η *in vitro* αξιολόγηση της στοχευμένης χορήγησης/μεταφοράς φαρμάκων σε ειδικές καλλιέργειες καρκινικών κυττάρων, η *in vivo* αξιολόγηση της στοχευμένης χορήγησης/μεταφοράς φαρμάκων (με τέτοια συστήματα) σε πειραματόζωα, και τέλος η κλινική αξιολόγηση της θεραπευτικής/διαγνωστικής προσέγισης σε ασθενείς (κλινικές μελέτες). Το κίνητρο της παρούσας πρότασης είναι η δημιουργία μιας αμιγώς ελληνικής διεπιστημονικής ομάδας για την ολοκληρωμένη ανάπτυξη πρωτότυπης τεχνικής για την αξιόπιστη διάγνωση και θεραπεία κακοηθειών. Η πρωτοτυπία της μεθοδολογίας στηρίζεται στην προτεινόμενη μαγνητική ή/και θερμική απεικονιστική τεχνική (τεχνικές που είναι δυνατόν να μετρούν ανεξάρτητα ή και συνδυαστικά), καθώς επίσης και στην επιλεκτική κάλυψη μαγνητικών νανοσωματιδίων με την κατάλληλη πρωτεϊνη που στοχεύει σε συγκεκριμένες κατηγορίες κυτάρων. Στόχος είναι η παραγωγή εγχώριας τεχνογνωσίας με παγκόσμια πρωτοτυπία, τόσο σε επίπεδο καταγραφικών συστημάτων όσο και σε επίπεδο φαρμακευτικού υλικού, καθώς επίσης και τη δημιουργία ενός δικτύου επιστημόνων που θα έχει τη δυνατότητα χρήσης και μεταφοράς τεχνογνωσίας σ' αυτό το θεματικό πεδίο. Έτσι, θα είναι δυνατή και η προσέλκυση σημαντικών επενδύσεων στην χώρα από ευρωπαϊκές και διεθνείς πηγές (οργανισμούς ή ιδιωτικά κονδύλια), μειώνοντας παράλληλα και την διαφυγή επιστημονικού προσωπικού υψηλής στάθμης, που έχει τα δικά του πολλαπλασιστικά οφέλη.

1.4 Τεχνικές απεικόνισης νανο-σωματιδίων

Οι τεχνικές απεικόνισης των νανο-σωματιδίων (και κατά συνέπεια των ενώσεων οι οποίες είναι προσκολλημένες σε αυτά), που θα χρησιμοποιηθούν στο προτεινόμενο έργο είναι οι εξής:

□ Απεικόνιση βάθμωσης μαγνητικού πεδίου (Magnetic Field Gradient Mapping) με την μέθοδο της περιστροφικής μαγνητομετρίας που σε περίπτωση επιτυχούς λειτουργίας αποτελεί καινοτομία σε παγκόσμιο επίπεδο,

□ Απεικόνιση θερμογραφίας (Infrared Spot Mapping), που σε περίπτωση επιτυχούς λειτουργίας αποτελεί επίσης καινοτομία σε παγκόσμιο επίπεδο,

□ Χρήση των δύο προαναφερθέντων τεχνικών για μέτρηση ποσότητας νανοσωματιδίων σε δείγμα αίματος με μορφή κηλίδας (blood spot imaging)

Το εν λόγω προτεινόμενο έργο, εξειδικεύεται κατά συνέπεια στις δράσεις που αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους.

1.5 Περιστροφική μαγνητομετρία

Απεικόνιση βάθμωσης μαγνητικού πεδίου με περιστροφική μαγνητομετρία

Αρχή λειτουργίας:

Ο στόχος αυτής της μεθόδου είναι η ικανότητα μέτρησης των μαγνητικών ροπών ανεξάρτητων και γειτνιαζόντων νανο-σωματιδίων υπερ-παραμαγνητικού μαγνητίτη μέσα σε μια τομή με τη μέτρηση μαγνητικού πεδίου στα όρια της τομής. Η μέθοδος απεικόνισης θα έπρεπε επίσης να λειτουργεί ανεξάρτητα της μαγνητικής διάταξης των γειτνιαζόντων σωματιδίων. Για αυτό το λόγο, θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει ακριβές μαγνητόμετρο, το οποίο είναι ικανό να μετρήσει την επίδραση όλων των μαγνητικών ροπών εξαπλωμένων στη γειτονιά της τομής σε ένα δοσμένο οριακό σημείο.

Το πεδίο στο δοσμένο οριακό σημείο λόγω ενός ανεξάρτητου μαγνητικού σωματιδίου μπορεί να γραφτεί σε διανυσματική μορφή όπως παρακάτω:

$$\mathbf{B}(x,y,z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3\mathbf{r}(\boldsymbol{\mu}\cdot\mathbf{r}) - \boldsymbol{\mu}r^2}{r^6}$$
(1)

όπου **μ** είναι η μαγνητική ροπή του μαγνητικού σωματιδίου και **r** το διάνυσμα της απόστασης μεταξύ μαγνητικού σωματιδίου και οριακού σημείου.

Υποθέτοντας τη μαγνητική ροπή του υπερ-παραμαγνητικού νανο-σωματιδίου ίση με ~10-6 m2A και τις διαστάσεις του r της τάξης του 10-1m, η χειρότερη ευαισθησία του πιθανώς χρησιμοποιούμενου μαγνητόμετρου θα έπρεπε να είναι της τάξης του μA/m, ή pT [Kyu Sung & Je-Kyun Park, 2006].

Έτσι, χρησιμοποιώντας σημειακά μαγνητόμετρα με ευαισθησία της τάξης του pT [Pavel Ripka, Advances in fluxgate sensors, Sensors and Actuators A: Physical, 106, pp. 8-14, 2003], μπορεί πιθανώς να προταθεί η μέτρηση της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου στα όρια της αναφερθείσας τομής. Διαλέγοντας ένα πλαίσιο αναφοράς στο οποίο η μαγνητική ροπή είναι στην αρχή και ο άξονας z δείχνει προς την κατεύθυνση της μαγνητικής ροπής μ του συστήματος απλοποιεί τους υπολογισμούς της πυκνότητας ροής. Οι συνιστώσες της διπολικής μαγνητικής πυκνότητας ροής αυτού του διπόλου σε οποιοδήποτε σημείο (x,y,z) του χώρου, είναι:

$$B_{x}(x, y, z) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} 3\mu \frac{xz}{(x^{2} + y^{2} + z^{2})^{5/2}}$$

$$B_{y}(x, y, z) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} 3\mu \frac{yz}{(x^{2} + y^{2} + z^{2})^{5/2}}$$

$$B_{z}(x, y, z) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} 3\mu \frac{z^{2} - \frac{1}{3}(x^{2} + y^{2} + z^{2})}{(x^{2} + y^{2} + z^{2})^{5/2}}$$
(2)

Ενώ η «εγκάρσια» συνιστώσα δίνεται από:

$$B_{\perp}(x,y,z) = \sqrt{B_s^2(x,y,z) + B_y^2(x,y,z)} = \frac{\mu_0}{4\pi} 3\mu \frac{z\sqrt{x^2 + y^2}}{(x^2 + y^2 + z^2)^{6/2}},$$
(3)

Μια πιο γενική μορφή χωρίς την υπόθεση ότι η μαγνητική ροπή μ περιορίζεται στη

διεύθυνση z είναι:

$$B_{x}(x,y,z) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \left(\frac{3(mx+ny+pz)x}{(x^{2}+y^{2}+z^{2})^{5/2}} - \frac{m}{(x^{2}+y^{2}+z^{2})^{3/2}} \right)$$

$$B_{y}(x,y,z) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \left(\frac{3(mx+ny+pz)y}{(x^{2}+y^{2}+z^{2})^{5/2}} - \frac{n}{(x^{2}+y^{2}+z^{2})^{3/2}} \right)$$

$$B_{z}(x,y,z) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \left(\frac{3(mx+ny+pz)z}{(x^{2}+y^{2}+z^{2})^{5/2}} - \frac{p}{(x^{2}+y^{2}+z^{2})^{3/2}} \right)$$
(4)

όπου (*m*,*n*,*p*) είναι οι συνιστώσες στη διεύθυνση (*x*,*y*,*z*) της μαγνητικής ροπής μ. Ένας αριθμός τέτοιων σωματιδίων συνεισφέρει στο μαγνητικό πεδίο σε ένα δοσμένο οριακό σημείο το οποίο είναι η περίληψη της επίδρασης όλων αυτών των πεδίων, που μαθηματικά εκφράζονται με τη σειρά των εξισώσεων (1-4), με παραμετρικό έλεγχο θέσης.

Είναι εμφανές ότι η μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου ανεξάρτητου σημείου μπορεί να προσφέρει μια μοναδική λύση του καθορισμού της χωρικής ανάλυσης των διανεμημένων μαγνητικών σωματιδίων σε δοσμένη τομή.

Αντί αυτού, η περιστροφή τέτοιου ευαίσθητου σημειακού μαγνητόμετρου γύρω από τομή δείγματος προσφέρει τη μέτρηση της επίδρασης όλων των μαγνητικών ροπών σε άπειρα οριακά σημεία. Θεωρητικώς, προσφέρει τη μοναδική λύση της θέσης και του μεγέθους πολλαπλών μαγνητικών ροπών μέσα στα όρια της τομής. Επιπρόσθετα, η χρήση σημειακών μαγνητόμετρων τριών διαστάσεων με ευαισθησία της τάξης του (in the order of) pT, μπορεί να προσφέρει καλύτερη χωρική ανάλυση, εφόσον μπορεί να μετρήσει το διανυσματικό πεδίο στο δοσμένο οριακό σημείο. Υποθέτοντας ότι αυτή είναι μια χρονοβόρα μέθοδος, όπως επίσης αναζητώντας τη μείωση της αβεβαιότητας της μεθόδου, μια κυκλική διάταξη μαγνητόμετρων τριών διαστάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη μέτρηση.

Μετρώντας την επίδραση όλων των μαγνητικών ροπών σε ποικίλα διακεκριμένα οριακά σημεία, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα της μεθόδου κάθε σημειακού μαγνητόμετρου, το διανυσματικό μαγνητικό πεδίο σε διαφορετικές θέσεις μπορεί να μετρηθεί. Κατόπιν, περιστροφή της κυκλικής διάταξης των μαγνητόμετρων προσφέρει μέτρηση όλων των μαγνητικών ροπών σε άπειρα οριακά σημεία με μετρήσεις πολλαπλού σημείου. Μια τέτοια μέτρηση, παρόλο που απαιτεί καλά επιλεγμένα σημειακά μαγνητόμετρα 3-d και ένα απέραντο αριθμό υπολογιστικής δύναμης, μπορεί να προσφέρει μονοτονική λύση της θέσης και του μεγέθους διαφόρων μαγνητικών ροπών στα όρια της τομής. Επιπρόσθετα, περιστροφή της διάταξης του αισθητήρα μπορεί να επιτρέψει την εξάλειψη της διακεκριμένης αβεβαιότητας του αισθητήρα. Τα σωματίδια υπό μέτρηση είναι υπερ-παραμαγνητικά και γι' αυτό δεν επιδεικνύουν μαγνητική ροπή σε δεδομένη διεύθυνση χωρίς μαγνήτιση. Αντιθέτως, επιδεικνύουν μια τυχαία αλλαγή προσανατολισμού των μαγνητικών τους ροπών στους αντίστοιχους μαλακούς μαγνητικούς και μαγνητοκρυσταλλικούς άξονες ανισοτροπίας. Αλλά, αν μαγνητιστούν, επιδεικνύουν τη μαγνητική τους ροπή ακολουθώντας τη διεύθυνση του εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου.

Περιστροφική μαγνήτιση των σωματιδίων προσφέρει επιπρόσθετο πλεονέκτημα βελτίωσης της χωρικής ανάλυσης της μέτρησης. Χρησιμοποιώντας ζεύγη μαγνητικών πόλων σταθερής κατάστασης (όπως στις ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές) μια συντονισμένη περιστροφή μαγνήτισης μέσα στους κόκκους των νανο-σκονών μαγνητίτη μπορεί να επιτευχθεί. Έτσι, τα υπερ-παραμαγνητικά σωματίδια μαγνητίζονται σε περιστροφική βάση, ακολουθώντας το διάνυσμα της μαγνήτισης. Έχει παρατηρηθεί ότι η συχνότητα περιστροφής πρέπει να είναι μικρότερη από την συχνότητα χαλάρωσης (relaxation) των σωματιδίων, έτσι ώστε να επιτρέπει την αλλαγή κάθε κρυσταλλογραφικού αξονικού προσανατολισμού. Επιπρόσθετα, περιστροφή της μαγνήτισης μπορεί επίσης να προσφέρει την πιθανότητα περιορισμού του προβλήματος μαγνητικής σύζευξης μεταξύ νανο-σωματιδίων (δύο γειτνιάζοντα σωματίδια μπορούν να συζευχθούν σε δοσμένη διεύθυνση αλλά όχι στις υπόλοιπες). Έτσι, ο χρόνος απεικόνισης μπορεί επίσης να βελτιωθεί.

Το πρόβλημα της παρεμβολής της επακόλουθης (προσκείμενης) τομής μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση διατάξεων αισθητήρων οριακού πεδίου τριών διαστάσεων. Ένας κύκλος

απαρτίζεται από πλήθος αισθητήρων, ενώ πολλαπλοί κύκλοι τοποθετούνται προσκείμενοι μεταξύ τους. Η παρεμβολή τομής μπορεί επίσης να περιοριστεί με τη χρήση τριδιάστατων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου: μετρώντας την παράλληλη και εφαπτόμενη συνιστώσα και κινώντας τη συνδεσμολογία κατά μήκος του σώματος υπό δοκιμή, κάποιος μπορεί να καταγράψει χωριστά την απόκριση διαφορετικών τομών. Η σχηματική απεικόνιση ενός τέτοιου μετρητικού οργάνου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-2.



Εικόνα 1-2: Σχήμα του μετρητικού οργάνου που θα χρησιμοποιείται για απεικόνιση νανοσωματιδίων: (1) στάτορας για παραγωγή περιστρεφόμενου πεδίου, (2) κυκλική διάταξη αισθητήρα, δυνάμενη να περιστραφεί, ο αριθμός αισθητήρων είναι επεξηγηματικός, (3) η τομή υπό μέτρηση

Ανάπτυξη μεθόδου και συσκευές

Στην πράξη η ανάπτυξη της μεθόδου μαγνητικής απεικόνισης απαιτεί τις παρακάτω υλοποιήσεις:

- Σωλήνας πολυμερικής μήτρας που περικλείει μαγνητικά σωματίδια που προσομοιάζει το ανθρώπινο σώμα.
- Σύστημα αισθητήρων που περιλαμβάνει ένα αισθητήρα μαγνητικού πεδίου τοποθετημένο σε δακτυλιοειδή διάταξη, ικανό να περιστρέφεται και να κινείται κατά μήκος του άξονα του δακτυλίου
- Στάτορα τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, που περιβάλλει το σύστημα αισθητήρων και οδηγείται από τριφασικό ενισχυτή ισχύος, προσφέροντας περιστρεφόμενο πεδίο μεταβλητής συχνότητας
- Σύστημα καταγραφής δεδομένων για τη λήψη των πληροφοριών του συστήματος.
 Λογισμικό Lab-View για την απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων.

1.6 Οριοθέτηση πλαισίου εργασίας – Περιγραφή project

Σκοπός της εργασίας είναι να κατασκευαστεί μια διάταξη η οποία θα μπορεί να εντοπίζει μαγνητισμένες περιοχές μέσα σε ένα υλικό. Συγκεκριμένα κατασκευάζεται το hardware ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος της περιστροφικής μαγνητομετρίας.

Με βάση τα προηγούμενα είναι εμφανές ότι θα πρέπει αφενός να δημιουργηθεί ένα ελεγχόμενο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, και αφετέρου να κατασκευαστεί μια διάταξη

αισθητήρων μαγνητικού πεδίου η οποία θα περιστρέφεται ελεγχόμενα με επιθυμητή ακρίβεια.

Αυτό που επιθυμούμε λοιπόν είναι από την μια η εξασφάλιση ενός περιστρεφόμενου πεδίου, και από την άλλη ένα μηχανισμό κίνησης της διάταξης αισθητήρων με συγκεκριμένη ακρίβεια κίνησης.

Απαιτήσεις της κατασκευής:

- 1. Τριφασικός εξαπολικός κινητήρας για την παραγωγή του πεδίου και έλεγχος περιστροφής του.
- 2. Ακρίβεια περιστροφής διάταξης: 1 μοίρα τουλάχιστον.
- Έλεγχος της περιστροφής από ηλεκτρονικό υπολογιστή με την απλούστερη και ευκολότερη δυνατή σύνδεση, ώστε να είναι ελέγξιμο στην διαδικασία εντοπισμού, που θα συνδυάζει προφανώς και τα αποτελέσματα μετρήσεων από τους αισθητήρες.

2 Πειραματικό μέρος

2.1 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

2.1.1 Εισαγωγή

Το επιθυμητό περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που θα είναι απαραίτητο για τον εντοπισμό των μαγνητισμένων περιοχών μέσα σε μη μαγνητικά υλικά, θα παραχθεί από το στάτη ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα. Έτσι είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να αναφερθούμε στα βασικά των κινητήρων αυτών.

Οι επαγωγικοί ή ασύγχρονοι (induction, asynchronous) κινητήρες είναι οι πλέον διαδεδομένοι λόγω της απλής και οικονομικής κατασκευής τους και των μειωμένων αναγκών συντήρησης. Το εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτεί τα τυλίγματα του στάτη απ' ευθείας, ενώ τα τυλίγματα του δρομέα διαρρέονται από ρεύμα που δημιουργείται λόγω του φαινομένου της επαγωγής. Από το φαινόμενο αυτό παίρνουν και το όνομά τους.

Οι επαγωγικοί κινητήρες παράγονται για τριφασική (3Φ) και μονοφασική (1Φ) λειτουργία. Οι 3Φ κινητήρες παράγονται με ισχύ από 0.3kW έως μερικά MW. Σε αντίθεση με τους μονοφασικούς, εκκινούν μόνοι τους, η δε φορά περιστροφής τους αλλάζει με εναλλαγή της τροφοδοσίας δύο φάσεων. Οι 1Φ κινητήρες είναι γενικά χαμηλότερης ισχύος και χρησιμοποιούνται κυρίως όταν δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε τριφασικό δίκτυο.

Οι εν λόγω κινητήρες χρησιμοποιούνται σε αντλιοστάσια (κίνηση αντλιών), χημικά εργοστάσια (αντλίες, πύργοι ψύξης, αναδευτήρες), σε κάθε φύσης βιομηχανικές εγκαταστάσεις (κίνηση συμπιεστών, ιμάντων, αντλιών, ανεμιστήρων, φυσητήρων, εργαλειομηχανών, ανυψωτικών, σε πρέσες, στον εξαερισμό), στην άντληση πετρελαίου, κλπ. Η γραμμική (linear) έκδοση του επαγωγικού κινητήρα χρησιμοποιείται κυρίως σε μεταφορικά συστήματα (π.χ. σε εργοστάσια, ηλεκτρικά τρένα Maglev). Με την πρόοδο των ηλεκτρονικών οδηγήσεων, οι εφαρμογές τους επεκτείνονται σε νέους τομείς.

Στα παρακάτω, αφού έγινε αναφορά στις συνήθεις εφαρμογές των επαγωγικών κινητήρων, θα αναλύσουμε τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους, θα εξετάσουμε τις αρχές λειτουργίας τους και θα κατανοήσουμε το φαινόμενο της ολίσθησης στροφών του δρομέα σε σχέση με τη σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στους πόλους του κινητήρα και τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας.

Τέλος, εξετάζουμε τον έλεγχο στροφών των κινητήρων που έχει ιδιαίτερη σημασία διότι εκτός του ότι πρόκειται για σχετικά σύγχρονη κατάκτηση, έχει και άμεση εφαρμογή στη διάταξη που θα κατασκευάσουμε.

2.1.2 Θεωρητικά στοιχεία τριφασικών επαγωγικών κινητήρων

2.1.2.1 Κατασκευή 3Φ επαγωγικού κινητήρα

Ένας επαγωγικός κινητήρας απαρτίζεται κυρίως από τον ακίνητο στάτη (εξωτερικό περίβλημα) και τον περιστρεφόμενο δρομέα. Στην Εικόνα 2-1 εικονίζεται ένας 3Φ επαγωγικός κινητήρας χαμηλής ισχύος.



Εικόνα 2-1: Τριφασικός κινητήρας οριζόντιας λειτουργίας με βάση.

Ο κυλινδρικός στάτης κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων και φέρει τριφασικό τύλιγμα που τοποθετείται σε αυλάκια της εσωτερικής επιφάνειας. Ο δρομέας χωρίζεται από το στάτη με ένα διάκενο από 0,4 έως 4mm και αποτελείται επίσης από σιδηρομαγνητικό υλικό και φέρει αύλακα στην εξωτερική επιφάνειά του. Υπάρχουν δύο τύποι δρομέων, ο δρομέας κλωβού ή βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage rotor), και ο τυλιγμένος δρομέας (wound rotor).



Εικόνα 2-2: Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας. Από αριστερά διακρίνουμε το κάλυμμα του ανεμιστήρα, τον ανεμιστήρα, το οπίσθιο κάλυμμα του κινητήρα, τον στάτη με πυρήνα και τυλίγματα, το δρομέα τύπου κλωβού, οι ένσφαιροι τριβείς, η άτρακτος και το εμπρόσθιο κάλυμμα. Στο σώμα του κινητήρα υπάρχουν τα πτερύγια ψύξης, το κιβώτιο σύνδεσης και την πινακίδα των χαρακτηριστικών.

Ο δρομέας κλωβού αποτελείται από ράβδους αλουμινίου ή χαλκού που τοποθετούνται μέσα στα αυλάκια του δρομέα και βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δακτυλίδια από αλουμίνιο ή χαλκό. Η Εικόνα 2-3 απεικονίζει τις ράβδους με τα δακτυλίδια προσαρμοσμένα στις δύο άκρες τους. Συνήθως το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε κινητήρες χαμηλότερης ισχύος και καταλαμβάνει τα αυλάκια του δρομέα με κατευθείαν χύτευση του υγρού αλουμινίου. Ο δρομέας του προκύπτει εικονίζεται στο επόμενο σχήμα και δεν είναι δυνατόν να αποσυναρμολογηθεί.



Εικόνα 2-3: Κλωβός δρομέα επαγωγικού κινητήρα

Ο τυλιγμένος δρομέα έχει τρία τυλίγματα, ίδια με αυτά του στάτη που συνδέονται σε διάταξη αστέρα ή τριγώνου. Οι τρεις ακροδέκτες που προκύπτουν συνδέονται με δακτυλίους ολίσθησης που βρίσκονται σε μόνιμη επαφή με σταθερές ψήκτρες. [3]

2.1.2.2 Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη και ροπή

Οι επαγωγικοί κινητήρες μοιάζουν με τους μετασχηματιστές. Τα ρεύματα που διαρρέουν το στάτη (πρωτεύον) δημιουργούν με επαγωγή τάσεις στο δρομέα (δευτερεύον). Σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές, στους επαγωγικούς κινητήρες η μαγνητική ροή δεν διαρρέει μόνο συνεχές σιδηρομαγνητικό υλικό, αλλά διαρρέει και ένα διάκενο αέρα, το διάκενο μεταξύ του στάτη και του δρομέα.

Οι τάσεις από επαγωγή δημιουργούν ένα ρεύμα στους αγωγούς του δρομέα όταν αυτός είναι βραχυκυκλωμένος (δρομέας κλωβού) ή όταν τα τυλίγματα του είναι βραχυκυκλωμένα με εξωτερική αντίσταση (τυλιγμένος δρομέας). Αν και στους μετασχηματιστές η συχνότητα των ρευμάτων του πρωτεύοντος είναι ίση με τη συχνότητα των ρευμάτων του δευτερεύοντος, αυτό δεν ισχύει στους επαγωγικούς κινητήρες παρά μόνο σε κατάσταση ακινησίας. Τέλος η ροπή που δημιουργείται από την κίνηση των ρευματοφόρων αγωγών του δρομέα μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, είναι σαφές ότι η κύρια διαφορά μεταξύ επαγωγικών και άλλων τύπων κινητήρων είναι ότι τα ρεύματα του δρομέα παράγονται από επαγωγή και ότι από διεγέρτρια (σύγχρονοι κινητήρες) ή από εξωτερική πηγή (κινητήρες συνεχούς ρεύματος).

2.1.2.3 Ολίσθηση

Ο στάτης μιας επαγωγικής μηχανής είναι όμοιος με αυτόν μιας σύγχρονης μηχανής. Τροφοδοτείται με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα και αυτό δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα ίση με τη σύγχρονη που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_s = \frac{120f}{P} \tag{2-1}$$

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τη δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου στο στάτη ενός σύγχρονου κινητήρα.



Εικόνα 2-4: Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σε σύγχρονο τριφασικό κινητήρα 4 πόλων (2N και 2S).

Εάν ο δρομέας ενός επαγωγικού στρεφόταν και αυτός με την ίδια σύγχρονη ταχύτητα όπως συμβαίνει στους σύγχρονους, τότε σε αυτόν δεν επάγεται τάση και οι αγωγοί του δεν διαρρέονται από ρεύμα επειδή προϋπόθεση για τα δύο φαινόμενα είναι η σχετική κίνηση αγωγού μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο επαγωγικός κινητήρας δεν μπορεί να στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά με κάποια μικρότερη, έτσι ώστε να υπάρχει σχετική ταχύτητα μεταξύ του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και των ρευμάτων του δρομέα που παράγονται με επαγωγή.

Η σχετική ταχύτητα πεδίου-δρομέα λέγεται ταχύτητα ολίσθησής (slip speed) και είναι ίση με τη διαφορά της σύγχρονης ταχύτητας από την ταχύτητα του δρομέα.

$$n_{slip} = n_s - n_{\mu n \gamma} \qquad [rpm] \qquad (2-2)$$

Στην ανάλυση των επαγωγικών μηχανών είναι ιδιαίτερα χρήσιμο το μέγεθος της ολίσθησης

(slip) που ορίζεται από τη σχέση:
$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} = \frac{n_s - n_{\mu\eta\chi}}{n_s} = 1 - \frac{n_{\mu\eta\chi}}{n_s}$$
(2-3)

Έτσι η ολίσθηση εκφράζεται σαν αριθμός μικρότερος της μονάδας, ή σε ποσοστιαία βάση. Η ολίσθηση είναι συνήθως πολύ μικρή, γύρω στο 3-8%, και κατά την εκκίνηση είναι ίση με τη μονάδα.

Οι μηχανικές στροφές μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της ολίσθησης ως εξής:

$$n_{\mu\eta\chi} = (1-s)n_s$$
 (2-4)

Ενώ η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα είναι:

$$\omega_{\mu\eta\chi} = (1-s)\omega_s = (1-s)\frac{4\pi f}{P}$$
 (2-5)

2.1.2.4 Φορά περιστροφής



Εικόνα 2-5: Σχηματική παράσταση τυλιγμάτων δρομέα και στάτη σε επαγωγικό κινητήρα 2 πόλων.

Η Εικόνα 2-5 απεικονίζει σχηματικά έναν επαγωγικό κινητήρα 2 πόλων τυλιγμένου δρομέα. Τα τριφασικά τυλίγματα του στάτη, κατά το παρελθόν ήταν τυλιγμένα γύρω από έκτυπους πόλους του στάτη. Σήμερα, ο στάτης είναι εσωτερικά λείος και τα τυλίγματα διανεμημένα όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 2-6. Πολλές όμως φορές παρίστανται για λόγους απλότητας σαν συγκεντρωμένα πηνία. Οι άξονες των πηνίων αυτών απέχουν μεταξύ τους 120 ηλεκτρικές μοίρες, που στην περίπτωση όπου έχουμε δύο πόλους, είναι ίσες με τις μηχανικές μοίρες που τα χωρίζουν. Οι άκρες των τυλιγμάτων Α, Β και C που βρίσκονται πλησιέστερα στον άξονα περιστροφής συνδέονται μεταξύ τους κα σχηματίζουν τον ουδέτερο, (σύνδεση αστέρα). Οι άλλες άκρες συνδέονται με το τριφασικό ρεύμα, Φυσικά, μπορούμε να έχουμε και σύνδεση τριγώνου, όπου το τέλος του ενός τυλίγματος συνδέεται με την αρχή του επομένου.



Εικόνα 2-6: Επαγωγικός κινητήρας 4 πόλων και δρομέα κλωβού. Σχηματικά απεικονίζεται η περιστροφή του μαγνητικού πεδίου του στάτη με τη σύγχρονη ταχύτητα και του δρομέα με τη μηχανική ταχύτητα. Η ολίσθηση του δρομέα είναι περίπου 17%.

Εάν έχουμε Ρ πόλους, τότε ο στάτης και ο δρομέας αποτελούνται από P/2 τριάδες πηνίων. Κάθε μία από τις τρεις φάσεις αποτελείται από P/2 πηνία που απέχουν μεταξύ τους γωνία 4π/Ρ. Για παράδειγμα, ο στάτης του σχήματος αποτελείται από 4/2=2 τριάδες πηνίων και κάθε φάση αποτελείται από 4/2=2πηνία που απέχουν μεταξύ τους γωνία π rad ή 180°. Και ο στάτης της εφαρμογής μας που θα έχει 6 πόλους, θα αποτελείται από 3 τριάδες πηνίων και κάθε φάση από 3 πηνία που μεταξύ τους θα έχουν γωνία 2π/3 rad ή 120°.

Η φορά περιστροφής εξαρτάται από τη διαδοχή των φάσεων των ρευμάτων στο στάτη. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι στον κινητήρα στην Εικόνα 2-5 σε κάποια στιγμή το μέγιστο ρεύμα είναι στη φάση a. Εάν η επόμενη φάση που φθάσει σε μέγιστο ρεύμα είναι η b τότε ό δρομέας θα στραφεί όπως φαίνεται στο σχήμα. Εάν όμως η επόμενη φάση που θα φτάσει σε μέγιστο ρεύμα είναι η c, τότε ο δρομέας θα στραφεί αντίστροφα.

Η Εικόνα 2-6 απεικονίζει την περιστροφή του μαγνητικού πεδίου του στάτη, όπως προκύπτει από την περιστροφή των μαγνητικών πόλων και την περιστροφή με υστέρηση στη γωνιακή θέση του δρομέα. Όπως φαίνεται οι μαγνητικές γραμμές και επομένως και η συνισταμένη ροή που διέρχεται από το δρομέα περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, ενώ ο δρομέας περιστρέφεται με τη μηχανική ταχύτητα που δίνεται από την σχέση (2-5).



Εικόνα 2-7: Ρεύματα και πεδίο επαγωγικού 3Φ κινητήρα 2 μαγνητικών πόλων. (α)Ρεύματα στα τυλίγματα του στάτη, (β-δ)Η ροή για τα ρεύματα του δρομέα. Οι ακροδέκτες a-a, b-b και c-c στα σχήματα είναι βραχυκυκλωμένοι.

Η Εικόνα 2-7 απεικονίζει την περιστροφή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τις τρεις φάσεις ενός κινητήρα 2 μαγνητικών πόλων. Στην περίπτωση αυτή ο στάτης δεν έχει διανεμημένο τύλιγμα αλλά τυλίγματα που είναι συγκεντρωμένα στους 6 έκτυπους πόλους του στάτη (2 ανά φάση).

Η ανάλυση των πεδίων που δημιουργούνται από εναλλασσόμενα ρεύματα διευκολύνεται κατά πολύ με τη χρήση διανυσματικών μεγεθών που περιστρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Εάν λοιπόν τοποθετήσουμε τη διατομή της επαγωγικής μηχανής στο μιγαδικό επίπεδο, η συνισταμένη ροή μπορεί να γραφεί σαν στρεφόμενο διάνυσμα ως εξής:

$$\Phi_s = \Phi_{s,m} e^{j\omega_s t} \quad (2-6)$$

Όπου $\Phi_{s,m}$ είναι η μέγιστη τιμή της ροής που οφείλεται στα ρεύματα του στάτη. Οι αγωγοί ή τα τυλίγματα του δρομέα αποκόπτουν γραμμές ροής και επομένως αναπτύσσονται σε αυτά τάσεις από επαγωγή. Επειδή όμως ο δρομέας περιστρέφεται και αυτός με κάποια ολίσθηση, η σχετική γωνιακή ταχύτητα με την οποία κόβει τις γραμμές είναι η διαφορά της

σύγχρονης από τη μηχανική ταχύτητα, δηλαδή είναι η ταχύτητα που δίνεται από την επόμενη σχέση

$$\omega_{s}-\omega_{\mu\eta\chi}=\omega_{s}-(1-s)\omega_{s}=s\omega_{s} \quad (2-7)$$

Επομένως, η ροή που είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία τάσεων από επαγωγή είναι:

$$\Phi_{s,r} = \Phi_{s,r,m} e^{js\omega_s t} \quad (2-8)$$

Σε αυτό το σημείο δεν έχει νόημα να εμβαθύνουμε περισσότερο στο πως επιδρά η ολίσθηση στο επαγόμενο πεδίο του δρομέα, μιας και ο τελευταίος θα αφαιρεθεί και θα έχουμε καθαρά ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Άρα η μέση ροή ανά πόλο μέσα στο χώρο από όπου θα έχει αφαιρεθεί ο δρομέας θα είναι αυτή που περιγράφεται από την παρακάτω απλή σχέση

$$\Phi = BlD$$
 (2-9)

Όπου *B* είναι η μαγνητική επαγωγή, *l* το μήκος των αγωγών κατά την έννοια του άξονα της μηχανής και *D* η μέση διάμετρος του στάτη.

2.1.2.5 Σύνδεση με το δίκτυο

Η ονομαστική τάση των κινητήρων δίνεται μαζί με τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του με την τριφασική τροφοδοσία. Για παράδειγμα ένας κινητήρας 220Δ/380Υ μπορεί να τροφοδοτηθεί από τάση 220V σε σύνδεση τυλιγμάτων τριγώνου ή από τάση 380V σε σύνδεση τυλιγμάτων αστέρα.

Αυτό συμβαίνει διότι εάν ο κινητήρας είναι σε σύνδεση αστέρα, τότε η τάση στα τυλίγματά του (τις φάσεις) είναι ίση με την πολική τάση διά $\sqrt{3}$. Επομένως, όταν συνδέεται σε 380V τάση σε σύνδεση αστέρα τότε η κάθε φάση ή τύλιγμα του κινητήρα βρίσκεται σε τάση 380/ $\sqrt{3}$ V, δηλαδή 220V. Ο κινητήρας αυτός μπορεί να εκκινήσει με σύνδεση αστέρα/τριγώνου

από τάση 220 αλλά όχι από 380. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν η σύνδεση αλλάξει σε τρίγωνο τα τυλίγματα θα βρεθούν σε τάση 380V με αποτέλεσμα την υπερθέρμανσή τους και την πιθανή καταστροφή του κινητήρα.

Σε μεγάλους κινητήρες (πάνω από 3HP) που συνδέονται σε τρίγωνο στην κανονική του λειτουργία υπάρχει ένας διακόπτης να τοποθετηθεί ένας διακόπτης αστέρα τριγώνου (αυτόματος ή χειροκίνητος) ώστε να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης και να εκκινεί ομαλότερα. [3]

2.1.3 Υπολογισμοί και Επιλογή 3Φ κινητήρα

Έχει ήδη γίνει κατανοητό ότι ο επαγωγικός κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί, δεν θα χρησιμοποιηθεί ως κινητήρας. Αφού ανοιχτεί και αφαιρεθεί ο δρομέας του και όλα τα συναφή του (εδράσεις, καπάκια και ανεμιστήρας) θα χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Για τον λόγο αυτό τα κριτήρια επιλογής του κινητήρα δεν είναι τα συνήθη περί απαιτούμενης ισχύος της εφαρμογής. Αντί αυτών τα κριτήρια που οδηγούν στην επιλογή μας είναι τα παρακάτω:

1) Η κατά το δυνατόν ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου. Αυτό επιτυγχάνεται όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός πόλων.

2) Η περιστροφή του πεδίου με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ταχύτητα ώστε να έχουμε μειωμένο θόρυβο.

3) Ικανή εσωτερική διάμετρος στάτη, ώστε να χωράει η διάταξη των αισθητήρων.

Γνωρίζοντας ότι το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων διεγειρόμενη με την ίδια συχνότητα. Τα δύο πρώτα κριτήρια είναι αντιφατικά μεταξύ τους. Όμως ο ελάχιστος αριθμός πόλων που επιτρέπει την εφαρμογή της τεχνικής της περιστροφικής μαγνητομετρίας είναι 6.

Αυτό που μας συμφέρει είναι να διεγείρουμε το στάτη με όσο το δυνατό μεγαλύτερη συχνότητα ώστε να έχουμε τη μεγαλύτερη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Η οδήγηση που θα επιλεγεί¹ μπορεί να παρέχει μέγιστη συχνότητα διέγερσης 400Hz, οπότε η μέγιστη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του πεδίου υπολογίζεται:

$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \cdot 400}{6} = 8000$$
 [rpm] που σημαίνει 133,33 Hz.

Για το μέγεθος του κινητήρα, προφανώς είναι ανάλογο με την ιπποδύναμή του. Έτσι με βάση το πρότυπο IEC 72-1 που ακολουθούν οι περισσότεροι επαγωγικοί κινητήρες του εμπορίου όσο αφορά στις διαστάσεις τους αναζητούμε ένα κινητήρα που να έχει εσωτερική διάμετρο στάτη περίπου 100mm,ώστε να χωράει η διάταξη των αισθητήρων.

Καταλήγουμε ότι ένας κινητήρας 2 ΗΡ θα έχει περίπου εσωτερική διάμετρο στάτη 100mm. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι εσωτερικές διαστάσεις δεν είναι μέγεθος που δίνεται από τα κατασκευαστικά σχέδια από τις εταιρίες, ούτε από το πρότυπο. Οπότε για να ληφθεί η απόφαση έγινε στο περίπου ο υπολογισμός με βάση τις εξωτερικές διαστάσεις που δίνονται από το πρότυπο και επιβεβαιώθηκε από την εμπειρία του προμηθευτή από χαλασμένους κινητήρες.

Εν τέλει καταλήγουμε ότι χρειαζόμαστε ένα τριφασικό επαγωγικό κινητήρα, 6 πόλων, 2 ίππων. Στο εμπόριο υπάρχουν κινητήρες διαφόρων ποιοτήτων.

¹ βλ. παράγραφο 2.1.5

2.1.4 Οδήγηση των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων

Η σύγχρονη ταχύτητα με την οποία όπως έχουμε αναφέρει περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο εντός ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, είναι ευθέως ανάλογη με τη συχνότητα τροφοδοσίας. Για να ελέγξουμε λοιπόν την περιστροφή του πεδίου, πρέπει να ελέγξουμε τη συχνότητα του ρεύματος που τροφοδοτούμε τον κινητήρα. Εν γένει η ρύθμιση στροφών επαγωγικών κινητήρων συνεπάγεται έλεγχο στροφών σχετικά με συγκεκριμένο φορτίο, όπως αυτό περιγράφεται στην χαρακτηριστική του. Εάν το φορτίο μεταβληθεί τότε ο κινητήρας πρέπει να ρυθμιστεί ξανά (έλεγχος ανοικτού βρόχου). Βέβαια στην περίπτωση μας όπου ο δρομέας έχει αφαιρεθεί, προφανώς δεν υπάρχει φορτίο και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζεται τέτοια ανάγκη. Ο κύριος παράγοντας που θα καθορίσει την επιλογή του τρόπου ελέγχου θα είναι το επιθυμητό μεγάλο εύρος συχνότητας διέγερσης. Τέλος μας ενδιαφέρει να δούμε αν υπάρχει κάποιο κατασκευαστικό όριο του κινητήρα στη συχνότητα διέγερσης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να δούμε κάποια στοιχεία για την οδήγηση επαγωγικών

Κατά το παρελθόν η αδυναμία των επαγωγικών μηχανών για ρύθμιση των στροφών τους σε ένα ευρύ πεδίο, περιόριζε τις εφαρμογές τους. Σήμερα όμως, με την καθιέρωση των ηλεκτρονικών ισχύος, υπάρχουν οδηγήσεις που μπορούν να παρέχουν ισχύ ελεγχόμενης ταχύτητας τόσο από συνεχές ρεύμα όσο και από εναλλασσόμενο. Αυτές μεταβάλλουν τη χαρακτηριστική ροπής στροφών και κατά συνέπεια ρυθμίζουν τις στροφές με τους εξής τρόπους:

1.Με μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας

2.Με μεταβολή της συχνότητας και σταθερό λόγο τάσης δια συχνότητα τροφοδοσίας (σταθερή ροή διακένου)

3. Με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.

Με μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας

Μεταβάλλοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας, μεταβάλλουμε τη σύγχρονη ταχύτητα και επομένως μετατίθεται και η χαρακτηριστική ροπής-στροφών. Εκτός όμως από τη σύγχρονη ταχύτητα, μεταβάλλονται και οι αντιδράσεις που εξαρτώνται από τη συχνότητα.

Εάν εξετάσουμε επί μέρους μεγέθη βλέπουμε ότι μια αύξηση της συχνότητας του ρεύματος από αυτή που αντιστοιχεί στην ονομαστική σύγχρονη ταχύτητα, έχει τα εξής αποτελέσματα: (α) αύξηση της σύγχρονης ταχύτητας, (β) αύξηση των αντιδράσεων, (γ) μείωση της ροπής εκκίνησης, (δ) μείωση της ροπής ανατροπής και (ε) μείωση των ρευμάτων. Και ειδικά η ροπή ανατροπής και η ροπή εκκίνησης μειώνονται περίπου ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας συχνότητας. Στην Εικόνα 2-8 φαίνεται η επίδραση της αύξησης της συχνότητας τροφοδοσίας του κινητήρα πέρα από την ονομαστική , που εδώ θεωρείται ως συχνότητα βάσης στην χαρακτηριστική του. Ο οριζόντιος άξονας είναι βαθμονομημένος σε σχέση με τις στροφές βάσης.

Οι αντίθετες μεταβολές ισχύουν για τη μείωση της συχνότητας τροφοδοσίας. Στην περίπτωση αυτή όμως τα ρεύματα στο στάτη και στο δρομέα αυξάνουν, όπως επίσης αυξάνει και η μαγνητική ροή που διατρέχει το μαγνητικό κύκλωμα. Η αύξηση αυτή μπορεί να οδηγήσει το σιδηρομαγνητικό υλικό σε κατάσταση κορεσμού, με μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης και βεβαίως μεγάλες απώλειες και υπερθερμάνσεις. Μάλιστα, η υπερθέρμανση εντείνεται από το γεγονός ότι ο κινητήρας στρέφεται πιο αργά και επομένως η δυνατότητα ψύξης των αυτόνομα αερόψυκτων κινητήρων μειώνεται περισσότερο.



Εικόνα 2-8: Ρύθμιση ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα με αύξηση της συχνότητας.

Σημείωση: Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στην περίπτωση που αφαιρέσουμε από τον κινητήρα τον δρομέα, χάνει ουσιαστικά το σύστημα ψύξης του (πτερωτή και πτερύγια ανεμισμού πάνω στο δρομέα). Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε λάθος στην τροφοδοσία, μπορεί να υπερθερμάνει και να καταστρέψει άμεσα τον κινητήρα. Είναι σίγουρο ότι δεν θα πρέπει να τροφοδοτείται με συχνότητα κάτω από την ονομαστική του, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για άνω όριο τροφοδοσίας προς στιγμή δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιο θέμα, όμως πρέπει να δίνουμε *ιδιαίτερη προσοχή στην θερμοκρασία του τριφασικού κινητήρα*.

Εφαρμόζοντας το νόμο του Faraday για εναλλασσόμενη τάση και Ν τυλίγματα, προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της ροής είναι $\Phi_m = \frac{V_m}{2\pi fN}$

Επομένως πράγματι βλέπουμε ότι το πλάτος της ροής είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας τροφοδοσίας. Άρα λειτουργικά θα ήθελε κανείς να μειώσει τη συχνότητα τροφοδοσίας ώστε να επωφεληθεί από την αύξηση της ροπής ενός κινητήρα, αλλά δεν μπορεί να κατέβει κάτω από την ονομαστική. Αυτά τα προβλήματα, αντιμετωπίζονται με οδηγήσεις που μειώνουν την συχνότητα τροφοδοσίας, αλλά συγχρόνως κρατάνε το λόγο τάσης προς συχνότητα σταθερό (και επομένως μειώνουν αναλογικά την τάση λειτουργίας).

Οι εν λόγω οδηγήσεις οδηγήσεις είναι αυτές της δεύτερης κατηγορίας.





Εικόνα 2-9: Μετάθεση χαρακτηριστικής Τ-ω για μειούμενη συχνότητα και λόγο V/f σταθερό. (α) Αμελητέες αντιστάσεις ισοδύναμου κυκλώματος, (β) μη αμελητέες αντιστάσεις

Όταν μία οδήγηση εργάζεται με αυτό τον τρόπο τότε η ροή διακένου του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή. Η λειτουργία αυτή επιλέγεται για συχνότητες κάτω από τις ονομαστικές. Για μικρές αντιστάσεις η καμπύλη μεταφέρεται αυτούσια αριστερά, στην πράξη όμως παραμορφώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα.

Με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τροφοδοσίας. Αύξηση της τάσεις αυτής δεν επιφέρει αλλαγή στη σύγχρονη ταχύτητα, απλώς «σπρώχνει» την καμπύλη προς τα πάνω και μειώνει την ολίσθηση στην οποία λειτουργεί ο κινητήρας. Εάν το φορτίο έχει χαρακτηριστική τετραγωνικά αυξανόμενη με τις στροφές, τότε η αύξηση της τάσης δίνει ένα περιορισμένο εύρος λειτουργίας με μεταβλητές στροφές. Το εύρος περιορίζεται από το σημείο όπου η καμπύλη του φορτίου έρχεται σε επαφή με το μέγιστο κάποιας χαρακτηριστικής του κινητήρα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε κινητήρες χαμηλής ισχύος που κινούν ανεμιστήρες ή εν γένει πτερωτές.



Εικόνα 2-10: Έλεγχος στροφών με μεταβολή τάσης τροφοδοσίας. Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι θα χρησιμοποιηθεί οδήγηση που θα μεταβάλλει τη συχνότητα τροφοδοσίας, διότι εμάς απλώς μας ενδιαφέρει να διεγείρουμε επιδρώντας στη συχνότητα από την ονομαστική τιμή έως το μέγιστο δυνατό που θα μπορέσουμε να επιτύχουμε. Για αυτό ας δούμε με ποιους τρόπους επιτυγχάνεται η **τροφοδοσία** μεταβλητής συχνότητας (variable frequency drives, VFD):

1.Με αντιστροφέα (inverter) που τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα και παρέχει 1Φ ή 3Φ ρεύμα επιθυμητής συχνότητας.



Εικόνα 2-11: Οδήγηση μεταβλητών στροφών για 3Φ επαγωγικούς κινητήρες μέχρι 1 kW. Η οδήγηση έχει 1Φ είσοδο 220V και 3Φ έξοδο 0-120Hz. Ac Tech

Οι αντιστροφείς είναι διατάξεις ανοικτού βρόχου, δηλαδή δεν χρησιμοποιούν ανάδραση από τον κινητήρα. Γενικά, δεν είναι σε θέση να αποδώσουν την ονομαστική ροπή σε πολύ χαμηλές στροφές, κάτι πολύ χρήσιμο σε ανυψωτικές διατάξεις. Η ρύθμιση στρφών που επιτυγχάνουν είναι κοντά στο 1:10 και μπορούν να ρυθμίσουν στροφές μέχρι ±3% των στροφών βάσης.

2. Με κυκλομετατροπέα (cycloconverter) που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα και παρέχει 3Φ εναλλασσόμενο ρεύμα επιθυμητής συχνότητας.

Λίγα περισσότερα για τους κυκλομετατροπείς

Ο κυκλομετατροπέας (cycloconverter) είναι οδήγηση μεταβλητής ταχύτητας που όμως τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Μετατρέπει δηλαδή εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερού πλάτους και συχνότητας σε τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Ο κυκλομετατροπέας στην ουσία είναι μια τριάδα μετατροπέων, ο καθένας εκ των οποίων δρα σε μια από τις τρεις φάσεις του δικτύου. Για το λόγο αυτό, ο κυκλομετατροπέας επιτρέπει ακριβέστερη δημιουργία της επιθυμητής κυματομορφής της τάσης που εφαρμόζεται στον κινητήρα, ενώ η κυματομορφή του ρεύματος προσεγγίζει πολύ την μορφή μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ροπής που είναι πολύ πιο ομαλή (χωρίς αρμονικές) για όλο το εύρος στροφών.

Η Εικόνα δείχνει το κύκλωμα μιας φάσης γέφυρας κυκλομετατροπέα. Σε αυτό τα θυρίστορ χωρίζονται στη θετική και την αρνητική ομάδα. Η μεταβολή της καθυστέρησης με την οποία άγουν οι δύο αυτές ομάδες καθορίζει την κυματομορφή της εξόδου.



Εικόνα 2-12: Κύκλωμα μίας φάσης ενός κυκλομετατροπεά.

Η συχνότητα τροφοδοσίας της οδήγησης πρέπει να είναι 3-4 φορές υψηλότερη από την επιδιωκόμενη μέγιστη συχνότητα εξόδου. Επομένως, για δίκτυο στα 50Hz, η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να εφαρμοστεί στον κινητήρα είναι το πολύ 16,67 Hz. Αυτή η συχνότητα περιορίζει τη μέγιστη σύγχρονη ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί από ένα κινητήρα και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή του συστήματος οδήγησης.

Πρακτικά λοιπόν εφόσον εμείς έχουμε 6 πόλους στον κινητήρα θα πρέπει να τροφοδοτήσουμε με το πολύ 16,67 Ηz, οπότε η μέγιστη σύγχρονη ταχύτητα που θα επιτύχουμε θα είναι:

η_s=120*16,67/6=333, 4 Hz

Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται γενικά σε απαιτητικές εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας και υψηλής ροπής.

Διανυσματικός έλεγχος

Ο στόχος του διανυσματικού ελέγχου (vector control) είναι για να ελέγξει τα ρεύματα του στάτη με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η ροή του πεδίου του στάτη να έχει κάποια επιθυμητή κατεύθυνση και να είναι δυνατός ο έλεγχος της αποδιδόμενης ροπής ανεξάρτητα από το πεδίο. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζονται είτε αισθητήρες είτε συνηθέστερα ένα πολύ ακριβές μοντέλο λειτουργίας του κινητήρα. Η αναφορά στο διανυσματικό έλεγχο γίνεται καθώς ο κυκλομετατροπέας που θα χρησιμοποιηθεί έχει την δυνατότητα αυτή (Space Vector Control)

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι ενώ οι οδηγήσεις των 3Φ κινητήρων αυξάνουν το εύρος ρύθμισης στροφών των επαγωγικών κινητήρων, δημιουργούν πολλές φορές προβλήματα στο δίκτυο, διότι οι κυματομορφές που δημιουργούνται έχουν ασυνέχειες και επομένως περιέχουν αρμονικές. Οι αρμονικές διαχέονται στο δίκτυο σαν ηλεκτρικός θόρυβος και επηρεάζουν ηλεκτρονικές συσκευές όπως υπολογιστές. Η επίδρασή τους μπορεί να μειωθεί κατάλληλα με χρήση φίλτρων. [3]

2.1.5 Επιλογή Οδήγησης Τριφασικού κινητήρα

Έχοντας επιλέξει τον τριφασικό κινητήρα που θα χρησιμοποιήσουμε, γνωρίζοντας τα στοιχεία του τριφασικού δικτύου που θα χρησιμοποιήσουμε, και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις για το εύρος της συχνότητας διέγερσης του κινητήρα, είμαστε σε θέση να αναζητήσουμε την οδήγησή του.

Εφόσον το δίκτυο θα είναι τριφασικό και ο κινητήρας τριφασικός θα χρειαστούμε ένα κυκλομετατροπέα.

Υπήρχε ήδη στο εργαστήριο ένας κατάλληλος της εταιρίας LG Industrial Systems, iG Drives με κωδικό SV 015 iG – 4U, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά από την ταμπέλα της συσκευής:

 INPUT
 380-460V
 3 Phase

 5.2A
 50/60 Hz

 OUTPUT
 0-Input V
 3 Phase

 4A
 0.2-400 Hz

 2HP/1.5 kW

Πράγματι η επιλογή αυτή, είναι κατάλληλη για τον 3Φ κινητήρα που θα χρησιμοποιήσουμε και επιπλέον παρέχει ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων εξόδου, ώστε θα μπορέσουμε να έχουμε ικανοποιητική δυνατότητα ρύθμισης της περιστροφής του πεδίου.

Από το manual της συσκευής, μπορούμε να εντοπίσουμε τα λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά του:

	Type: SV015 iG –	4U					
Applicable motor	[HP] / [kW]	2/1.5					
Output rating	[kVA]	3.0					
	[Amp]	4.0					
	Max. Frequency	400Hz					
	Output volts	0 to Input Voltage					
Input rating	Voltage	3phase 380/460V (±10%)					
	Frequency	50-60 Hz (±5%)					
Control	Control method	Space Vector PWM					
	Frequency resolution	0.01 Hz					
	Frequency accuracy	Digital setting: 0.01% of Max. frequency					
	Analog setting: 0.1% of Max. free						
	V/F ratio Braking torque Linear,2.0(non-linear),						
		User programmable					
	Overload capacity	150% for 1minute					
	Braking Torque	50%					
	Torque boost	0 to 20% programmable					
Operation	Operating method	Key-pad/terminal selective					
	Frequency setting	AnalogQ0 to 10V, 4 to 20 mA,					

		Potentiometer			
	Accel./Decel. Time	0.1 to 999sec (1 st ,2 nd Accel. / Decel. Selective)			
	Step operation	Up to 8 step (programmable)			
Programmable	Input	P1, P2, P3			
Input/Output	Output	MO (frequency, stall, over-load alarm, under-voltage alarm, run/stop)			
Protection	Trip indication	Over-load, over-voltage, under- voltage, inverter over-heat, motor over-heat, CPU Error			
	Stall prevention	Over-current prevention			
	Instant Power Failure	Under 15msec: continuous operation			
		Over 15msec: Automatic restart (selective)			
Environmental conditions	Ambient temperature	-10°C to 40°C			
	Humidity	Under 90%			
	Altitude	Under 1000m			
	Cooling system	Forced air cooling			

Από τα στοιχεία του πίνακα αξίζει να τονιστεί ότι έχουμε ένα εύρος 400Hz στη συχνότητα εξόδου και ότι η μέθοδος ελέγχου είναι περιστρεφόμενου διανύσματος (Space Vector PWM).

2.1.6 Λειτουργία κυκλομετατροπέα

Η λειτουργία του κυκλομετατροπέα είναι αρκετά σύνθετη ανάλογα με το τι θέλει να ελέγξει κανείς. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα φαίνεται το interface του όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την κατάλληλη λειτουργία.



Υπάρχουν 2 ομάδες λειτουργιών F και H, που αριθμούν 58 και 21 λειτουργίες αντίστοιχα. Εμείς θέλουμε να επενεργούμε στην συχνότητα και να έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίζουμε σε όλο το εύρος από 0 έως 400Hz. Καλύτερα από την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας¹ έως τα 400Hz.

2.1.7 Σύνδεση τριφασικού κινητήρα

Τώρα μένει να συνδέσουμε τον κινητήρα μέσω του κυκλομετατροπέα με το δίκτυο. Θα ασχοληθούμε πρώτα με τη σύνδεση του κυκλομετατροπέα. Σύμφωνα με το manual στην παράγραφο για τις συνδέσεις ισχύος αναφέρεται ότι στα τερματικά ισχύος που φαίνονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα



¹ Από το ταμπελάκι του κινητήρα 480V / 60Hz / 1100RPM

Συνδέουμε τις φάσεις της παροχής την παροχή και τον κινητήρα ως εξής:

Symbol	Function				
R					
S	AC line input terminals 380/460V class				
Т					
B1	External Dynamic Braking resistor terminals				
B2					
U					
V	3-phase output terminals				
W					

Οπότε θα πρέπει να συνδέσουμε τον κινητήρα στα U, V, W και τις φάσεις στα R,S,T. Τα τερματικά για εξωτερική πέδη προφανώς δεν μας ενδιαφέρουν.

Όμως θα πρέπει να συνδεθούν και οι γειώσεις καθ' υπόδειξη πάνω στο σώμα της οδήγησης. Υπάρχει μια βίδα και ακριβώς εμπρός της το σύμβολο της γείωσης. Η γείωση του κινητήρα συνδέεται και αυτή πάνω στο ίδιο σημείο.

Τέλος θα πρέπει να συνδεθούν και τα καλώδια από το ποντεσιόμετρο που είναι πάνω στο καπάκι στα τερματικά ελέγχου τα οποία φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

30A	30C	30B	FX	BXJOG	RST	CM	VR	V1	5G
00	62		(3)	(\mathfrak{A})		\otimes	\otimes	\otimes	\otimes
Par los				200	IN	20	20	0 00	
l 🕅	36	SIG			P	2 P3		FM	5G

Εδώ βλέπουμε το ηλεκτρολογικό σχέδιο της βασικής καλωδίωσης του κυκλομετατροπέα, όπου φαίνεται (δεξιά κάτω) το σημείο που υποδεικνύει τον τρόπο σύνδεσης του ποντεσιομέτρου. Στο manual της συσκευής υπάρχει πίνακας που αναλύει τις λειτουργίες των τερματικών ελέγχου.



Οπότε πρέπει να συνδέσουμε τα κόκκινα καλώδια στα VR, V1 και 5G.



Οπότε αφαιρούμε το κάλυμμα του και συνδέουμε τα καλώδια όπως έχει αναλυθεί. Στην εικόνα βλέπουμε τη συνδεσμολογία.

Μένει τώρα να συνδέσουμε τον κινητήρα με τον κυκλομετατροπέα. Οι κινητήρες συνδέονται σε συνδεσμολογία είτε τριγώνου είτε αστέρα, ανάλογα με την τάση του δικτύου. Εφόσον η τάση εξόδου του κυκλομετατροπέα φτάνει την τάση εξόδου του δικτύου, σύμφωνα με τον πίνακα των χαρακτηριστικών του, πρέπει να πραγματοποιήσουμε την σύνδεση βάση της τάσης του δικτύου η οποία είναι 480V.

Το καλώδιο U(μαύρο), V(μπλε), W(καφέ) από την έξοδο του κυκλομετατροπέα, πρέπει να συνδεθεί με τον κινητήρα. Στην ταμπέλα του κινητήρα βλέπουμε 280Δ/480Υ συνεπώς πρέπει να συνδέσουμε σε αστέρα.

Ανοίγοντας το κουτί για τη σύνδεση, το καπάκι επάνω υπάρχει σκαρίφημα για τη σύνδεση αστέρα, οπότε τοποθετούμε ανάλογα τα λαμάκια και τα καλώδια. Δεν ξεχνάμε τη γείωση πάνω στο σώμα της μηχανής.



Με τη σύνδεση αστέρα έχουμε στα τυλίγματα του στάτη τάση ίση με 480/ $\sqrt{3}$ =280V AC (βλ παράγραφο 2.1.2.5). Τα τυλίγματα αυτά είναι εκτεθειμένα από την μία πλευρά του ανοικτού κινητήρα, και μπορούν να αποτελέσουν σοβαρό κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Οπότε ο χρήστης πρέπει να προσέχει πολύ όταν η γεννήτρια μαγνητικού πεδίου τροφοδοτείται.

2.2 Μηχανισμός περιστροφής διάταξης αισθητήρων

2.2.1 Εισαγωγή

Μέχρι στιγμής έχουμε μια αρκετά καλή εικόνα για την διάταξη που θα κατασκευαστεί. Συγκεκριμένα έχουμε επιλέξει τα απαραίτητα εξαρτήματα και έχουμε φροντίσει για την ανάπτυξη του συστήματαος περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Στο κομμάτι αυτό θα ασχοληθούμε με την κατασκευή της διάταξης των αισθητήρων, αλλά και την προδιαγραφή του μηχανισμού περιστροφής του.

Έπειτα από έρευνα στους κινητήρες χαμηλής ισχύος (σερβοκινητήρες, βηματικοί, ultrasonic) αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί βηματικός κινητήρας για την περιστροφή της διάταξης. Έτσι αφού δούμε τα βασικά στοιχεία για τους βηματικούς θα κάνουμε μια προμελέτη για την διάταξη των αισθητήρων ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε σωστά την ισχύ του κινητήρα.

2.2.2 Θεωρητικά στοιχεία για βηματικούς κινητήρες

2.2.2.1 Εισαγωγή

Οι βηματικοί κινητήρες αποτελούν σήμερα μια ιδιαίτερα διαδεδομένη μορφή μικρών ηλεκτρικών κινητήρων και χρησιμοποιούνται σε συσκευές όπου βασική απαίτηση είναι ο ακριβής έλεγχος της θέσης ενός περιστρεφόμενου άξονα χωρίς τη βοήθεια επιπρόσθετου αισθητήρα θέσης. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι π.χ. ο μηχανισμός ελέγχου θέσης της κεφαλής ενός εκτυπωτή, οι μηχανισμοί ελέγχου θέσης γενικά σε εκτυπωτές, σχεδιογράφους, μονάδες ανάγνωσης(δίσκοι), συστήματα αριθμητικού ελέγχου (CNC), ρομπότ, φωτοτυπικά μηχανήματα, fax, εξοπλισμούς δορυφόρων, διαστημικά οχήματα, ιατρικά όργανα, μηχανές συσκευασίας τροφίμων, ρολόγια κάμερες χρονοδιακόπτες, κλπ Εν γένει χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μικρή αυξητική γωνιακή μετατόπιση του δρομέα ή επαναλαμβανόμενη κίνηση.

Οι βηματικοί κινητήρες είναι ηλεκτρομαγνητικοί κινητήρες οι οποίοι λειτουργούν βάσει των δυνάμεων έλξης που αναπτύσσονται μεταξύ μαγνητικών πόλων που δημιουργούνται όταν διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα από τα τυλίγματα του στάτη. Ο ρεύμα οδηγείται στο στάτη μέσω κατάλληλων διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος και η τροφοδοσία του γίνεται με παλμούς. Εκτός από τη ροπή που μπορεί να αναπτύξει, χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί επίσης και η γωνία που διαγράφει ο δρομέας με κάθε παλμό που εφαρμόζεται στο στάτη, η οποία ονομάζεται *γωνιακό βήμα*. Είναι κυρίως κινητήρες γωνιακής θέσης και όχι στροφών. Με κατάλληλες μεθόδους παλμοδότησης είναι δυνατό να επιτύχουμε κίνηση του δρομέα



Εικόνα 2-13: Τυπική δομή ενός βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες παράγονται σε ισχύεις από μερικά W μέχρι μερικά kW, με γωνιακό βήμα από 0,75° έως 180°. Ενώ μπορούν να δεχτούν από 1000 έως 20000 παλμούς ανά δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα του δρομέα μπορεί να ρυθμιστεί αυξάνοντας τη συχνότητα των παλμών τάσης. Ανάλογα με το συνδυασμό γωνιακού βήματος και αριθμού παλμών προκύπτει η γωνιακή ταχύτητα.

2.2.2.2 Κατασκευή

Οι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε κυρίως τρεις τύπους:

- 1. Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης
- 2. Μόνιμου μαγνήτη και μαγνητικού δίσκου
- 3. Υβριδικοί

1. Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στην Εικόνα παριστά σχηματικά ένα κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης ο δρομέας του οποίου έχει έκτυπους πόλους (οδόντες), το πλήθος των οποίων διαφέρει από το πλήθος των πόλων του στάτη.



Εικόνα 2-14: Βηματικός κινητήρας μαγνητικής αντίστασης 4 φάσεων. Ο στάτης έχει 8 οδόντες (4 μαγνητικούς πόλους), ενώ ο δρομέας 6 οδόντες.

Η διέγερση του τυλίγματος του κατάλληλου οδόντα αναγκάζει το δρομέα να περιστραφεί έτσι ώστε κάποιο ζεύγος οδόντων του να ευθυγραμμιστεί με τους πόλους του ενεργοποιημένου τυλίγματος. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η μαγνητική αντίσταση στο δρόμο της μαγνητικής ροής και από αυτό παίρνουν και το όνομά τους. Για παράδειγμα εάν στον κινητήρα της εικόνας ενεργοποιηθεί το τύλιγμα D, τότε ο οδόντας που είναι πλησιέστερα σε αυτό θα στραφεί ανθωρολογιακά κατά 15°. Αυξάνοντας τους οδόντες στο στάτη και το δρομέα, μειώνεται η γωνία του βήματος του δρομέα. Εάν διακοπεί η τροφοδοσία του τυλίγματος δεν υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση και επομένως η ροπή μηδενίζεται και ο κινητήρας δεν μπορεί να συγκρατήσει φορτίο.

Οι κινητήρες αυτοί παράγονται με ένα τμήμα δρομέα (single stack motor) ή και με πολλαπλά τμήματα δρομέα(Multiple stack rotor) προσαρμοσμένα στην ίδια άτρακτο. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνεται η αποδιδόμενη ροπή. Μπορούν να έχουν μικρό ή μεσαίο γωνιακό βήμα και υψηλή συχνότητα παλμών,.

2. Μόνιμου μαγνήτη και μαγνητικού δίσκου

Ο δρομέας των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet, canstack, tin-can) αποτελείται από κυλινδρικούς τομείς μόνιμων μαγνητών που προσαρμόζονται στην ίδια άτρακτο, βλ. Εικόνα 2-12. Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πόλους που τείνουν να ευθυγραμμίζονται με το πεδίο των πόλων του στάτη. Η κατασκευή του κινητήρα δεν επιτρέπει μικρά γωνιακά βήματα, όμως γίνεται πολύ οικονομικά.

Οι κινητήρες ΜΜ αλλάζουν φορά περιστροφής εάν αλλάξει η φορά του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη, κάτι που δεν συμβαίνει στους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης. Επίσης, λόγων της ύπαρξης των μόνιμων μαγνητών, ο δρομέας έχει διευθύνσεις στις οποίες προτιμά να ευθυγραμμίζεται. Ο δρομέας επαναφέρεται σε μία θέση ισορροπίας μετά από μικρή διαταραχή, εμφανίζει δηλαδή **ροπή συγκράτησης** (holding torque) ακόμη και όταν διακοπεί η τροφοδοσία.



Εικόνα 2-15: Δρομέας βηματικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

Οι κινητήρες MM έχουν μικρή ροπή αδράνειας και παράγουν χαμηλή ροπή σε χαμηλές στροφές. Είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι σε μη βιομηχανικές εφαρμογές όπως σε μηχανές γραφείου. Οι κινητήρες MM χρησιμοποιούνται σε ρολόγια.

3. Υβριδικοί

Ο υβριδικός (hybrid) βηματικός κινητήρας συνδυάζει τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων τύπων. Ο δρομέας αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες σε μορφή κυλίνδρου που είναι επιμήκης κατά την αξονική έννοια. Στα άκρα των μαγνητών προσαρμόζονται τμήματα με μορφή οδοντωτών τροχών, που λόγω του ενδιάμεσου μαγνήτη μετατρέπονται στ βόρειο και νότιο πόλο.



Εικόνα 2-16: Σχηματική απεικόνιση 2Φ υβριδικού βηματικού κινητήρα με δρομέα δύο τμημάτων.

Ο δρομέας αποτελείται από ζεύγη τμημάτων. Τα τμήματα αυτά στην Εικόνα 2-13 έχουν μετατοπισθεί το ένα σε σχέση με το άλλο κατά μισό γωνιακό βήμα.

Ο στάτης έχει έκτυπους πόλους ή οδόντες ενώ τα τυλίγματά του είναι συνεχή κατά μήκος του άξονα του κινητήρα. Συνήθως είναι δύο ή πέντε φάσεων. Το πλήθος των οδόντων στο στάτη και το δρομέα μπορεί να είναι το ίδιο ή διαφορετικό, ανάλογα με το αν μας ενδιαφέρει η μείωση των αρμονικών ή η αύξηση της ροπής, αντίστοιχα. Επειδή ο δρομέας είναι μόνιμος μαγνήτης, υπάρχει πάντοτε κάποια ροπή συγκράτησης.

Οι υβριδικοί κινητήρες είναι πλέον διαδεδομένοι στις βιομηχανικές εφαρμογές. Στην καθημερινή ζωή, ο πλέον συνήθης υβριδικός κινητήρας είναι αυτός που χρησιμοποιείται στις οδηγήσεις δισκετών υπολογιστών.

2.2.2.3 Αρχές Λειτουργίας

Όταν ενεργοποιείται ο βηματικός κινητήρας, τότε ο δρομέας στρέφεται για ένα ορισμένο αριθμό γωνιακών βημάτων, δηλαδή ο κινητήρας συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρομαγνητικός επενεργητής π.χ. σαν πηνίο. Η περιστροφή κατά γωνιακά βήματα συντελείται διεγείροντας το κατάλληλο τύλιγμα στο στάτη, ενώ μπορεί να αντιστρέφεται η φορά των βημάτων. Επειδή ο κινητήρας στρέφεται μόνο κατά διακριτά γωνιακά βήματα, ο δρομέας επιταχύνεται και επιβραδύνεται συνεχώς, ακόμη και όταν φαίνεται να περιστρέφεται με 'σταθερή' ταχύτητα. Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα δεν είναι σταθερή, αλλά

Οι επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις φέρνουν στο προσκήνειο τις αδρανειακές ροπές που οφείλονται στην ισοδύναμη ροπή αδράνειας του δρομέα κατι φορτίου. Τα δυναμικά φαινόμενα επίσης εισάγουν προβλήματα συντονισμού και ταλαντώσεων στην ιδιοσυχνότητα κινητήρα-φορτίου. Γενικά, η ροπή αδράνειας του δρομέα για ένα σύστημα κίνησης υψηλής απόδοσης και το εννεαπλάσιο της ροπής αδρανείας.

Όταν τα τυλίγματα είναι διεγερμένα, ο δρομέας εμφανίζει ροπή συγκράτησης, δηλαδή εάν επιχειρηθεί γωνιακή μετατόπιση του δρομέα από εξωτερικό παράγοντα, τότε εμφανίζεται ροπή που τον επαναφέρει στην αρχική θέση. Για το λόγο αυτό, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για έλεγχο γωνιακής θέσης, ή γραμμικής θέσης, παρουσία φορτίου.

Επειδή οι βηματικοί κινητήρες παράγουν στατική ροπή σε παλμούς, η συμπεριφορά τους είναι προβλέψιμη και αξιόπιστη. Η κατανάλωση ισχύος δεν εξαρτάται από το φορτίο.

Πράγματι ένας βηματικός κινητήρας απορροφά το ίδιο ρεύμα και ισχύ είτε κινεί ένα φορτίο είτε έίναι ακίνητος αλλά ενεργοποιημένος. Για το λόγο αυτό, οι βηματικοί κινητήρες τείνουν να λειτουργούν θερμοί.

Ο βηματικός κινητήρας δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς οδήγηση που είναι υπεύθυνη για την ενεργοποίηση των τυλιγμάτων και συνήθως συμπεριλαμβάνει μικροεπεξεργαστή, Ο κινητήρας δεν είναι αθόρυβος, αλλά παράγει θόρυβο που εξαρτάται από τον ρυθμό των παλμών που δέχεται από την οδήγηση.

Η γενική συμπεριφορά του κινητήρα εξαρτάται απόλυτα από την οδήγηση και επομένως το ίδιο ισχύει και για την καμπύλη στροφών, Συχνά η χαρακτηριστική δίνεται σαν ροπήσυχνότητα παλμών, επειδή η τελευταία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής. Η ροπή μειώνεται με αύξηση των στροφών.

Η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας των βηματικών κινητήρων περιλαμβάνει δύο καμπύλες, τη καμπύλη συγχρονισμού (pull-in) και την καμπύλη αποσυγχρονισμού (pull-out). Αυτές χωρίζουν το διάγραμμα ροπής ταχύτητας σε δύο περιοχές. Στην πρώτη, την περιοχή ελέγχου, ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει, να σταματήσει, ή να αλλάξει φορά με ένα μόνο παλμό. Στην περιοχή αυτή, ο κινητήρας μπορεί να εργάζεται σαν διάταξη ελέγχου θέσης ανοικτού βρόχου.



Εικόνα 2-17: Χαρακτηριστικές ροπής στροφών για βηματικούς κινητήρες

Στη δεύτερη περιοχή, την περιοχή ταχύτητας, ο κινητήρας εργάζεται αφού επιταχυνθεί από την πρώτη. Ο κινητήρας στρέφεται χωρίς να αποσυγχρονίζεται, αλλά δεν μπορεί να σταματήσει ή να αλλάξει φορά περιστροφή. Για να συμβεί αυτό ο κινητήρας θα πρέπει πρώτα να οδηγηθεί στην περιοχή ελέγχου. [3]

2.2.2.4 Ορισμοί Μεγεθών για Βηματικούς Κινητήρες

Ροπή συγκράτησης (holding torque). Αυτή είναι η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα χωρίς να μετακινηθεί ο δρομέας του.

Ροπή συγχρονισμού (pull-in torque). Η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα, κάτω από την επίδραση της οποίας ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει χωρίς να χάσει παλμό.
Ροπή απόσυγχρονισμού (pull-out torque). Η μέγιστη ροπή που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα κάτω από την επίδραση της οποίας ο περιστρεφόμενος δρομέας δεν χάνει βήμα.

Ταχύτητα συγχρονισμού (pull-in rate) / αποσυγχρονισμού (pull-out rate). Ο μέγιστος αριθμός παλμών ανά δευτερόλεπτο με τον οποίο ο κινητήρας μπορεί να εκκινήσει με φορτίο χωρίς να χάσει βήμα / δεν χάνει βήμα όταν η ταχύτητά του μειώνεται.

2.2.2.5 Οδηγήσεις βηματικών κινητήρων

Οι βηματικοί κινητήρες απαιτούν οδήγηση για να λειτουργήσουν. Αυτές μπορεί να χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ανοικτού βρόχου της θέσης του δρομέα ή για έλεγχο ταχύτητας ανοικτού ή κλειστού βρόχου. Οι οδηγήσεις σε χρήση περιγράφονται στην συνέχεια συνοπτικά.

Οδήγηση RL : Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μια αντίσταση σε παράλληλη σύνδεση με το κάθε τύλιγμα του στάτη. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται γρήγορη απόκριση περιστροφής του δρομέα, αλλά αυξάνει τις απώλειες. Οι οδηγήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για χαμηλές μόνο ισχείς.

Μονοπολική Οδήγηση (unipolar drive): εφαρμόζεται σε κινητήρες που έχουν τύλιγμα με μεσαία λήψη. Η τάση στα τυλίγματα εφαρμόζεται μεταξύ μεσαίας λήψης και ενός από τους ελέυθερους ακροδέκτες του τυλίγματος. Η φορά περιστροφής του δρομέα εξαρτάται από το ποιος ακροδέκτης συνδέεται με την τροφοδοσία. Πρόκειται για μια απλή οδηγηση όμως έχει το μειονέκτημα της μη αποδοτικής χρήσης των τυλιγμάτων του κινητήρα.

Διπολική Οδήγηση (bipolar drives): Συνεργάζονται με κινητήρες των οποίων τα τυλίγματα του στάτη δεν έχουν μεσαία λήψη. Στην περίπτωση αυτή για να αλλάξει η φορά περιστροφής πρέπει να αλλάξει και το ρεύμα φορά και στις δύο φάσεις. Οι οδηγήσεις αυτές παράγουν μεγαλύτερη ροπή, ιδίως στις χαμηλές ταχύτητες, αλλά ηλεκτρονικά είναι πολύπλοκες.

Οδήγηση κατατμητού: Η οδήγηση κατατμητού (chopper drive) χρησιμοποιεί διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) για να ελέγξει το μέσο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Οι οδηγήσεις αυτές παράγουν ηλεκτρικό θόρυβο (αρμονικές).



Εικόνα 2-18: Κάρτα οδήγησης βηματικού κινητήρα και κινητήρας. Η κάρτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κινητήρες με μονοπολικά ή διπολικά τυλίγματα και παρέχει βήμα 0.9°. Με χρήση επιπρόσθετης κάρτας μπορεί να επικοινωνήσει με υπολογιστή για έλεγχο του κινητήρα. Veleman

Ορισμένες οδηγήσεις είναι κατάλληλες για μικροβηματισμό (microstepping). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε υποπολλαπλάσια του βήματος του κινητήρα με ηλεκτρονικό τρόπο.

Οι οδηγήσεις για έλεγχο ταχύτητας είναι συνήθως ανοικτού βρόχου δηλαδή δεν υπάρχει ανάδραση ταχύτητας. Χρησιμοποιούμε λογική ή μεθόδους ανάλογες με την κυματομορφή της ταχύτητας σαν συνάρτηση του χρόνου που θέλουμε να επιτύχουμε. Συνήθης μορφή είναι η τραπεζοειδής, όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται γραμμικά από μηδέν έως κάποια προκαθορισμένη ταχύτητα (συνάρτηση αναρρίχησης), στη συνέχεια παραμένει σταθερή και τέλος μειώνεται σταθερά έως τη μηδενική ταχύτητα (συνάρτηση αρνητικής αναρρίχησης). Άλλες, πιο βελτιωμένες κυματομορφές επιτυγχάνονται με χρήση οδηγήσεων με μικροεπεξεργαστή. Στις μέρες μας λόγω πτώσης του κόστους των μικροεπεξεργαστών είναι η επικρατούσα τάση. [3]

2.2.2.6 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα

Συνοψίζοντας, τα βασικά πλεονεκτήματα της οικογένειας των βηματικών κινητήρων είναι τα ακόλουθα:

- Σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, δεν χρειάζεται φρένο για να μείνει ακίνητος ή για να επιβραδυνθεί.
- Στις μικρές ταχύτητες περιστροφής αλλά και κατά την εκκίνησή του παράγει μεγάλες τιμές ροπής.
- Είναι πολύ αξιόπιστος καθώς για τη λειτουργία του δεν απαιτούνται κινούμενες ηλεκτρικές επαφές, όπως στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος και έτσι η διάρκεια ζωής του εξαρτάται μόνο από την αξιοπιστία του εδράνου κύλισης.
- Δεν απαιτείται χρήση αισθητήρων και κυκλωμάτων ανάδρασης για τον προσδιορισμό της θέσης του άξονα κίνησης. Η οδήγησή τους γίνεται με παλμούς και κάθε παλμός αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη γωνία στροφής του δρομέα, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Για το λόγο αυτό είναι δυνατός ο έλεγχος θέσης του δρομέα χωρίς την ανάγκη τοποθέτησης αισθητήρων, δίνοντας τον απαραίτητο αριθμό παλμών.
- Μπορεί να επιτύχει πολύ μικρές μεταβολές στην αύξηση ή τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του,
- Μπορεί να επιτύχει πολύ μικρές ταχύτητες περιστροφής.

Υπάρχουν όμως και κάποια μειονεκτήματα:

- Θορυβώδης λειτουργία
- Αδυναμία περιστροφής σε υψηλές ταχύτητες.
- Κατά τη μετακίνηση φορτίων μεγάλης μάζας μπορεί να μη σταματήσει ακαριαία ο κινητήρας λόγω της αυξημένης αδράνειας.

2.2.3 Προμελέτη Διάταξης Αισθητήρων

Στο πλαίσιο της εργασίας πρέπει να κατασκευαστεί μία δακτυλιοειδής διάταξη, ικανή να στηρίζει τους αισθητήρες. Ταυτόχρονα πρέπει να επιτρέπεται εξωτερικά η τοποθέτηση του δοκιμίου, και να βγαίνουν τα καλώδια των αισθητήρων από μία πλευρά.

Η επικρατέστερη ιδέα για τη διάταξη αυτή, είναι ένας περιστρεφόμενος κύλινδρος. Η έδρασή του είναι ένα θέμα μιας και η απαίτηση να είναι ανοικτός από τη μία πλευρά, θέτει περιορισμούς στις επιλογές. Η προμελέτη πρέπει να γίνει για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το μέγεθος του κινητήρα που θα επιλέξουμε. Έστω λοιπόν ότι θα κατασκευαστεί μία «κούπα» όπως αυτή στο σχέδιο που ακολουθεί:



Χωρίζουμε την κούπα σε 2 κομμάτια, τη σωλήνα και τον πάτο. Η σωλήνα έστω ότι είναι σωλήνα ύδρευσης από PVC, και ο πάτος από υλικό αντίστοιχου ειδικού βάρους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η «κούπα» -ας μας επιτραπεί η ορολογία αυτή- πρέπει να είναι ανοικτή από την μια πλευρά για να είναι δυνατή η τοποθέτηση δοκιμίου. Έτσι *θα αναρτηθεί* πάνω στον κινητήρα ως πρόβολος και ως εκ τουτου είναι σημαντικό να είναι όσο πιο ελαφριά γίνεται. Εξάλλου δεν πρόκειται να φέρει βάρος μεγαλύτερο από το ίδιο βάρος της συν αυτό των αισθητήρων, το οποίο είναι ελάχιστο. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε πλαστικά υλικά. Επίσης τα μεταλλικά υλικά θα ήταν απαγορευτικά και για έναν επιπλέον λόγο, διότι θα μαγνητίζονταν μέσα στο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και θα επέφερε την καταστροφή της διάταξης.

Σε αυτή τη φάση μας ενδιαφέρει ένα πρώτο ασφαλές νούμερο. Εν συνεχεία θα χρησιμοποιήσουμε και τον κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας.

Υπολογισμός βάρους περιστρεφόμενης διάταξης

 Έστω ότι η σωλήνα είναι κομμάτι από σωλήνα ύδρευσης από PVC για τις διαστάσεις της οποίας έχουμε:

Μήκος¹: 200mm

Πάχος τοιχώματος²: 1.8mm

Βάρος: 0.82kg/m

Οπότε ένα κομμάτι σωλήνα 0.2m ζυγίζει $W_1 = 0.2 * 0.82 = 0.164 kg$

¹ Τόσο είναι το μήκος του στάτη ενός κινητήρα (3Φ,6Π) μεγέθους 2ΗΡ – διάσταση από το πρότυπο IEC 72-1 για κινητήρα μεγέθους 100 (τύπος: 1AI(1D)100L-6)

 $^{^2}$ Τα στοιχεία αυτά είναι από το διαδίκτυο για σωλήνα ύδρευσης PVC 3atm.

 Για τον πάτο της «κούπας», έστω ότι αποτελείται και αυτός από PVC, πρόκειται για ένα κυκλικό δίσκο διαστάσεων:

Διάμετρος: 96,2mm

Πάχος: 10mm

Οπότε θα έχει όγκο:
$$V_2 = \pi \cdot (\frac{9,62}{2})^2 \cdot 1 = 72.7 cm^3$$

Και με ειδικό βάρος πολυαιθυλενίου: κάτι λιγότερο από 1gr/cm³

Θα ζυγίζει $W_2 = 72.7 * 0.001 = 0.073 kg$ "

Οπότε το συνολικό βάρος της «κούπας» θα είναι: $W = W_1 + W_2 = 0.236 kg$

Αυτό θα είναι και το συνολικό βάρος που θα πρέπει να περιστρέφει ο βηματικός κινητήρας, προσαυξημένο και με κάποια γραμμάρια -έστω 50- των αισθητήρων.

Υπολογισμός Ροπής Συγκράτησης Βηματικού Κινητήρα

Θα υπολογίσουμε την ροπή συγκράτησης, θεωρώντας ότι λόγω ομοιογένειας του υλικού τα βάρη ασκούνται στο μισό της ακτίνας τους από τον άξονα περιστροφής.

Έστω ότι τα βάρη ασκούνται στις μέσες ακτίνες, δηλαδή για τη σωλήνα R_1 =50-0,9=49,1mm

Και για τον πάτο R₂=96.2/2=48.1mm

Προσαυξάνουμε το W1 κατά τα 50gr των αισθητήρων και επιμένως η συνολική απαιτούμενη ροπή συγκράτησης για τον κινητήρα σε [gr*cm]:

N=N₁+ N₂=283*4.91+73*4.81=1741 gr*cm

Έστω συντελεστής ασφαλείας $S_f = 1,5$ ο οποίος παρέχει ασφάλεια τόσο στην κατασκευή όσο και στην ακρίβεια του βηματικού κινητήρα, γιατί επηρεάζεται όσο αυξάνεται το φορτίο του. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το ±5% που δίνουν οι κατασκευαστές για τους κινητήρες αυτούς, αναφέρονται σε συνθήκες έλλειψης φορτίου. Έτσι όσο πιο «άνετα» λειτουργεί ο κινητήρας τόσο καλύτερες ακρίβειες πετυχαίνει.

Άρα τελικά για την επιλογή του κινητήρα η απαιτούμενη ροπή είναι:

N=2611 gr*cm=0,256 N*m

2.2.4 Επιλογή και προμήθεια βηματικού κινητήρα

Για λόγους που έχουν να κάνουν με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις ακριβείας της εφαρμογής, την πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών, τη δυσκολία προμήθειας εξαρτημάτων, επιλεγεί μια ολοκληρωμένη λύση κινητήρα και οδήγησης με επικοινωνία μέσω USB.

Στην αρχή η απαίτηση για USB επικοινωνία δεν ήταν τόσο σαφής και έγινε εκτενής έρευνα εξετάζοντας τις λύσεις για ανεξάρτητη προμήθεια κινητήρα και οδήγησης. Έτσι η έρευνα έγινε με τα εξής κριτήρια:

1. *Ο κινητήρας να δίνει την απαιτούμενη ροπή*. Μετά τον υπολογισμό της απαιτούμενης ροπής για την περιστροφή της διάταξης καταλήγουμε ότι χρειαζόμαστε τουλάχιστον 0.256 N*m ροπής.

2. Συνδυασμός κινητήρα και οδήγησης του να επιτυγχάνει ακρίβεια περιστροφής της διάταξης μικρότερη από 1°.

3. Ελάχιστο κατά το δυνατό κόστος

4. Συνεργασία προμηθεύτριας εταιρίας με τους οικονομικούς όρους του ΕΜΠ (Ελληνική εταιρία που να δέχεται πληρωμή επί πιστώσει).

Σημείωση: Πρέπει να τονιστεί ότι σε αυτό το σημείο η έρευνα ήταν αρκετά επίπονη μιας και ενώ γνωρίζαμε τις παραπάνω απαιτήσεις οι συνδυασμοί των κινητήρων και των οδηγήσεων γίνονται πραγματικά πολλοί. Αυτό συμβαίνει διότι ακόμα και για την ίδια ροπή υπάρχουν τρεις δυνατοί συνδυασμοί λύσεων όσον αφορά στην ακρίβεια περιστροφής:

Α. Κινητήρας που το φυσικό του βήμα να είναι κάτω από μοίρα και αντίστοιχη οδήγηση.

B. Κινητήρας με βήμα μεγαλύτερο της μοίρας και δυνατότητα οδήγησης (και κινητήρα) για ηλεκτρονική επίτευξη βημάτων μικρότερων από το φυσικό (microstepping)

C. Κινητήρας με βήμα μεγαλύτερο της μοίρας και αντίστοιχη οδήγηση, και ανασχεδιασμός μηχανισμού με μηχανική μετάδοση η οποία θα διαιρεί με μηχανικό τρόπο το βήμα του κινητήρα. Μια τέτοια λύση βέβαια δεν είναι ιδιαιτέρως επιθυμητή αφού η μετάδοση με οδοντωτούς τροχούς καλύτερα, έχει επίπτωση στην ακρίβεια, λόγω της απαιτούμενης χάρης των τροχών, αλλά και κάτι τέτοιο θα απαιτούσε επανασχεδιασμό της διάταξης.

Παραγγελίας Οδύσσεια

Ενδεικτικά αναφέρονται site από τους πρώτους προμηθευτές στους οποίους έγινε προσπάθεια να εντοπιστεί μία τεχνικά σωστή λύση ήταν οι:

RS Electronics: <u>http://gr.rsdelivers.com/</u>

Darlas: <u>http://www.darlas.gr</u>

Σε συνδυασμό με αρκετά site από εξωτερικό.

Σε αυτό το σημείο της έρευνας έγινε πιο ξεκάθαρη η απαίτηση για USB σύνδεση της οδήγησης με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επίσης το κόστος για την ανεξάρτητη προμήθεια

οδήγησης και κινητήρα φάνηκε ότι εν γένει είναι μεγαλύτερο ή ίσο με την προμήθεια μιας ολοκληρωμένης λύσης, κυρίως λόγω της οδήγησης, Στην πράξη έπρεπε να προμηθευτούμε microcontroller και προγραμματιστή microcontroller, το κόστος των οποίων μαζί με του κινητήρα έφτανε το κόστος μιας ολοκληρωμένης λύσης, η εγγυημένη απόδοση της οποίας μας έκανε να στραφούμε προς τα εκεί.

Οι δύο παραπάνω εταιρίες δεν είχαν στα προϊόντα τους κάποια οδήγηση που να επικοινωνεί με USB. Έτσι εντοπίστηκε η λύση της εταιρίας ARCUS με κωδικό: DMX-J-SA [Integrated NEMA 17 Step Motor + Driver + Controller with USB 2.0 Communication]

Εντοπίστηκαν οι προμηθευτές της εταιρίας στην Ελλάδα, οι οποίοι ενώ υποστήριζαν άλλα προϊόντα της εταιρίας δεν εισήγαγαν το συγκεκριμένο.

Έτσι έγινε προσπάθεια κάποιος προμηθευτής από Ελλάδα να παραγγείλει το συγκεκριμένο κινητήρα και να μας προμηθεύσει και ένα τριφασικό.

Οι RS Electronics και Darlas δεν δέχτηκαν να εξυπηρετήσουν με αυτόν τον τρόπο και απευθυνθήκαμε σε 3 ακόμη εταιρίες:

K.Χατζόπουλος A.E. [http://www.e-hatzopoulos.gr/]

Netscope [http://www.netscope.gr]

Πρινιωτάκης A.E.B.E.[<u>http://www.priniotakis.gr</u>]

Ευτυχώς μας δόθηκαν 3 προσφορές η πιο συμφέρουσα από τις οποίες ήταν αυτή του Χατζόπουλου από όπου και προμηθευτήκαμε και τους δύο κινητήρες. Δυστυχώς υπαιτιότητα της ARCUS, ο βηματικός καθυστέρησε πάνω από μήνα για την παραλαβή. Εν τέλει καταφέραμε να έχουμε τον εξοπλισμό στα χέρια μας.

2.2.5 Τροφοδοσία βηματικού κινητήρα

Για την τροφοδοσία του κινητήρα που έχει επιλεγεί χρειαζόμαστε ένα απλό τροφοδοτικό 24VDC, 2A. Έτσι προμηθευόμαστε το τροφοδοτικό PSU-WP24 με τα εξής χαρακτηριστικά:

INPUT: 100-240 VAC, 1.4A, 50-60Hz (Wall plug power supply)

OUTPUT: +24 VDC, 2.0A (2pin plug)

Η λύση αυτή είναι ιδιαιτέρως απλή και μας δίνει και τη δυνατότητα φορητότητας της διάταξης.

2.2.6 Βηματικός κινητήρας DMX-J-SA-17-2

Η προμήθεια του βηματικού κινητήρα DMX-J-SA-17-2 έγινε από την εταιρία την αντιπρόσωπο της Arcus Technology στην Ιταλία, την Garnet Italia.

Η πωλήτρια που έκανε την προσφορά και με την οποία είχαμε επικοινωνία ονομαζόταν Sara Santini [sara.santini@garnetitalia.com], και για οποιαδήποτε πληροφορία χρειαστεί απευθυνόμαστε σε εκείνη.

Ο κινητήρας και το τροφοδοτικό παρελήφθησαν χωρίς την συνοδεία έντυπου υλικού. Το documentation της συσκευής μπορεί να κατέβει από την σελίδα <u>http://www.arcus-technology.com/</u>

Το απαραίτητο για τη σύνδεση και τον προγραμματισμό manual, αλλά και οι drivers και το interface του κινητήρα μπορεί να κατέβει από <u>http://www.arcus-technology.com/dmx-j-sa.php?osCsid=ce4072f62b6309b41168c1e4b93c775f</u>

2.2.7 Δοκιμαστική Λειτουργία Βηματικού

2.2.7.1 Εξοικείωση με τον εξοπλισμό

Ο κινητήρας DMX-J-SA έχει επικοινωνία συμβατή με USB 2.0. Η επικονωνία μεταξύ pc και Drivemax επιτυγχάνεται με τη χρήση αρχείου DLL συμβατό με τα Windows. Για αναλυτικές πληροφορίες για τις παρεχόμενες λειτουργίες επικοινωνίας (USB Communication API Functions) μπορούμε να αναφερθούμε στο εγχειρίδιο χρήσης.

Γλώσσες προγραμματισμού συμβατές με τα Windows, όπως Visual BASIC, Visual C++, LABView,ή οποιαδήποτε άλλη που θα μπορούσε να έχει πρόσβαση σε ένα αρχείο DLL μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επικοινωνήσει με τη συσκευή.

Ο τυπικός χρόνος που απαιτείται για την αποστολή/απάντηση μιας εντολής χρησιμοποιώντας τη λειτουργία API fnPerformaxComSendRecv () είναι της τάξης του millisecond. Η τιμή αυτή ενδέχεται να έχει κάποιες αποκλίσεις ανάλογα με την ταχύτητα του επεξεργαστή του pc και τον τύπο της εντολής ASCII που αποστέλεται.

Οι διαστάσεις του κινητήρα σε ίντσες φαίνονται στο παρακάτω σχέδιο:



0.1960



Και το διάγραμμα ροπής στροφών είναι:



Από εδώ βλέπουμε ότι ο κινητήρας είναι αρκετός για τα 0,256 N*m που υπολογίσαμε στην αρχική μελέτη, όταν στρέφεται με στροφές κάτω από 500rpm. Μεγαλύτερες ταχύτητες δεν απαιτούνται για την εφαρμογή μας, και όπως θα δούμε και παρακάτω θα πρέπει να ρυθμίσουμε την ταχύτητα μέχρι τα 500rpm. Βέβαια το νούμερο 0,256Nm συμπεριλαμβάνει το συντελεστή ασφαλείας (1,5), οπότε είμαστε σίγουρα ασφαλείς.

2.2.7.2 Σύνδεση κινητήρα

Ο κινητήρας πρέπει να συνδεθεί σύμφωνα με το manual όπως δείχνει το παρακάτω σχέδιο:



Πρέπει να δοθεί προσοχή στην πολικότητα του τροφοδοτικού έτσι ώστε να συνδέσουμε το +V με τα +24V του τροφοδοτικού. Μετρώντας με πολύμετρο τα +24V είναι στο κόκκινο

καλώδιο του τροφοδοτικού. Για να συνδέσουμε σωστά πρέπει να γειώσουμε τα καλώδια DO1,DO2 και το GND. Τα DI1 και DI2 είναι για χρήση στην περίπτωση που χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε διακόπτες ώστε να σταματάει η κίνηση του κινητήρα σε κάποια συγκεκριμένα σημεία, και εδώ δεν θα μας χρειαστούν. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον κινητήρα, το τροφοδοτικό και τη σωστή σύνδεση.



Εν συνεχεία συνδέουμε με καλώδιο mini USB-USB τον κινητήρα με τον υπολογιστή στον οποίο θα εγκαταστήσουμε τους drivers και από τον οποίο θα γίνει ο προγραμματισμός του κινητήρα.

2.2.7.3 Εγκατάσταση Λογισμικού κινητήρα

ΑπότηνηλεκτρονικήσελίδατηςArcus[http://www.arcus-technology.com/dmx-j-
sa.php?osCsid=ce4072f62b6309b41168c1e4b93c775f]sa.php?osCsid=ce4072f62b6309b41168c1e4b93c775f]κάνουμεdownloadτοαρχείοDMXInstallation Version 1.62.zipκαι τοArcus Drivers, Libraries, Source Code Version 1.03.zip

Αφού αποσυμπιέσουμε, κάνουμε run το αρχείο, Drivemax Series Setup 1.62.exe και το Arcus Drivers, Libraries, Source Setup 1.03.exe, και έχουν εγκατασταθεί όλα τα απαραίτητα για την χρήση του κινητήρα όσο και το manual του.

2.2.7.4 User Graphic Interface για Windows

Ο κινητήρας συνοδεύεται με λογισμικό το οποίο εκτός των drivers, συμπεριλαμβάνει και ένα γραφικό διαμεσολαβητή για τον χρήστη (Graphic User Interface), που δίνει τη δυνατότητα για έλεγχο, προγραμματισμό, compilation, λήψη και debugging του ελεκτή. Ξεκινώντας το πρόγραμμα DMX-J-SA GUI βρισκόμαστε μπροστά στην κύρια οθόνη ελέγχου η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Εν συνεχεία θα αναλυθούν οι λειτουργίες του.



A. Κατάσταση κινητήρα (Motor status)



Στο πεδίο αυτό βλέπουμε την τρέχουσα κατάσταση του κινητήρα. Συγκεκριμένα: **1. Position** – Στο πεδίο αυτό βλέπουμε την στιγμιαία θέση του κινητήρα.

2. Status – Στο πεδίο αυτό βλέπουμε την κατάσταση του κινητήρα, συγκεκριμένα:

ACCEL – acceleration- κατάσταση επιτάχυνσης

CONST – Κατάσταση σταθερής ταχύτητας

DECEL – deceleration – κατάσταση επιβράδυνσης

-LIM ERROR – Συμβάν σφάλματος στο σημείο του αρνητικού ορίου

+LIM ERROR – Συμβάν σφάλματος στο σημείο του θετικού ορίου

3. Clear Error – Με το κουμπί αυτό καθαρίζουμε την κατάσταση σφάλματος.

4. Current – τιμή του ρεύματος οδήγησης

5. Mode – Ένδειξη είδους λειτουργίας (Απόλυτη/Σχετική: ABS/INC).

6. Limit and Home Input Status – Ένδειξη κατάστασης διακοπτών ορίου (+L, -L, H)

B. Έλεγχος κινητήρα (Motor Control)



1. Target Position – Θέση στόχου: Σε αυτό το πεδίο συμπληρώνουμε τη θέση που θέλουμε να λάβει ο άξονας του κινητήρα

2. Speed Parameters – Σε αυτά τα πεδία συμπληρώνουμε την ελάχιστη, τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας (βλ. παράγραφο 2.2.7.7)

3. Enable – Ενεργοποίηση κινητήρα

4. Set Position – Με το κουμπί αυτό ορίζουμε τον μετρητή θέσης στην εκάστοτε τιμή της θέσης (Position)

5. ABS/INC – Με τα κουμπιά αυτά επιλέγουμε απόλυτη κίνηση ή σχετική.

6. DATUM – Απόλυτη κίνηση στη θέση 0 στο απόλυτο σύστημα. Η μέγιστη διαφορά από το σημείο 0, στο σημείο στόχου είναι 262143, αν είναι μεγαλύτερο η κίνηση δεν θα πραγματοποιηθεί.

7. ABS – Απόλυτη κίνηση προς το σημείο στόχου. Αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από 262143 η κίνηση δεν θα πραγματοποιηθεί.

8. JOG+/- - Συνεχής κίνηση προς τα θετικά ή τα αρνητικά.

9. HOME+/- - Κίνηση προς το σημείο Home, με θετική ή αρνητική περιστροφή **10. L+/-** - Κίνηση προς το σημείο +L/-L, με θετική ή αρνητική περιστροφή

11. HL+/- - Κίνηση προς το σημείο Home, με γρήγορη ή αργή ταχύτητα, με θετική ή αρνητική περιστροφή

12. ΙΥΤΟΡ - Άμεσο σταμάτημα του κινητήρα χωρίς επιβράδυνση

13. RSTOP – Σταμάτημα με επιβράδυνση

C. Έξοδοι και είσοδοι



Digital Output Status – Κατάσταση των δύο ψηφιακών εξόδων. Η κατάστασή τους μπορεί να ενεργοποιηθεί κάνοντας click στον κύκλο.

2. Digital Input Status – Display of the two digital input bits. If the digital input pin is grounded, the digital input is turned on. Κατάσταση των δύο ψηφιακών εισόδων. Αν η είσοδος είναι γειωμένη, η κατάστασή της είναι ενεργή.

D. Τερματικό (Terminal)

Terminal	
Command:	
Reply:	

Διαδραστικές εντολές (Interactive ASCII commands) μπορούν να σταλούν και οι απαντήσεις δίνονται στο πεδίο Reply. (βλ παράγραφο 2.2.7.7 για τις εντολές)

E. Ρύθμιση (Setup)



1. Πολικότητα (Polarity) – Αλλάζει την πολικότητα των εισόδων και των εξόδων του DMX-J-SA.

2. DOBOOT/EOBOOT – Αλλάζει την κατάσταση εκκίνησης για τις ψηφιακές εξόδους και τις εισόδους ενεργοποίησης.

3. Auto Run – Τρέχουν τα stand-alone προγράμματα κατά την εκκίνηση.

4. Device Name – Επιλογή ονόματος συσκευής[JSA00-JSA99]-Default to JSA00.

5. LCA/HCA – Ρύθμιση της διόρθωσης Limit/Home(βλέπε manual)

6. Current – Ρύθμιση ρευμάτων κινητήρα για κατάσταση Run, Idle, και χρόνο αδράνειας (Idle Time).

7. Disable Limit - Απενεργοποιεί τις εισόδους Limit για γενική χρήση.

8. Upload – Φόρτωση τωρινών ρυθμίσεων στο DMX-J-SA.

- 9. Down Κατέβασμα των τωρινών ρυθμίσεων.
- **10. Store** Αποθήκευση των ρυθμίσεων στη μνήμη flash.

11. Open/Save – Οι παράμετροι μπορούν να αποθηκευτούν σε ένα αρχείο και να διαβάζονται από εκεί.

F. Διαχείρηση αρχείων για Standalone πρόγραμμα.



- 1. Open Άνοιγμα ενός προγράμματος
- **2. Save** Αποθήκευση ενός προγράμματος.
- **3. New** Νέο πρόγραμμα.

G. Κατάσταση Μεταβλητών (Variable Status)



Με το κουμπί Variables μπορούμε να ελέγξουμε και να επιδράσουμε στις τιμές των μεταβλητών που έχουμε χρησιμοποιήσει, στατικές και δυναμικές. (0-24 volatile, 25-49 non-volatile)

Για να επιδράσουμε στην τιμή των μεταβλητών γράφουμε στο Command Line χρησιμοποιώντας την εξής σύνταξη: V[0-49]=[value] syntax.

Η. Πεδίο σύνταξης προγραμμάτων stand-alone.



1. Γράφουμε στο πεδίο ένα πρόγραμμα

2. Διαγράφουμε το πρόγραμμα που υπάρχει ήδη στο DMX-J-SA χρησιμοποιώντας υο κουμπί Clear Code Space.

3. Χρησιμοποιώντας το κουμπί με το βελάκι μπορούμε να δουλέψουμε σε ένα πιο μεγάλο και ευκολότερο editor.

I. Standalone Program Compile/Download/Upload/View



- **1. Compile –** Μεταγλώττιση προγράμματος (compilation).
- **2. Download –** Κατέβασμα του προγράμματος στην μνήμη flash.
- **3. Upload –** Φόρτωση του προγράμματος από τον controller.

4. View – Επόπτευση του μεταγλωττισμένου προγράμματος σε γλώσσα χαμηλού επιπέδου.

J. Έλεγχος προγράμματος - Program Control



1. Program Status – Εμφανίζει την κατάσταση του προγράμματος. Οι πιθανές καταστάσεις είναι:

Idle – Αδρανές: Το πρόγραμμα δεν τρέχει.

Running – Το πρόγραμμα τρέχει.

Paused – Το πρόγραμμα είναι σταματημένο προσωρινά.

Error – Στο πρόγραμμα έχει παρουσιαστεί σφάλμα.

2. Program Index – Εμφανίζει τον πίνακα χαμηλού επιπέδου του προγράμματος.

3. X-Thread – Ανοίγει τον έλεγχο του προγράμματος για τη λειτουργία standalone.

4. Program Control – Έλεγχος προγράμματος. Τα κουμπιά RUN, STOP, PAUSED, and

CONTINUED, τρέχουν, σταματούν, σταματούν προσωρινά, ή συνεχίζουν το τρέξιμο, αντίστοιχα.

2.2.7.5 Σύνοψη ελέγχου κίνησης

Ο κινητήρας έχει δύο ειδών λειτουργίες, η μία προϋποθέτει την σύνδεση του με ηλεκτρονικό υπολογιστή και η δεύτερη είναι αυτόνομη (standalone). Όμως ένα πρόγραμμα που γράφεται στον editor για λειτουργία standalone, μπορεί να ελέγχεται και μέσω pc. Έτσι αναπτύσσουμε πρώτα τις εντολές για τη ρύθμιση του κινητήρα από το pc και σε επόμενη παράγραφο θα δούμε τις εντολές για standalone.

Σημείωση: Όλες οι εντολές που περιγράφονται σε αυτό το κομμάτι αφορούν την λειτουργία του κινητήρα με έλεγχο μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο κινητήρας ακολουθεί από προεπιλογή ένα τραπεζοειδές προφίλ ταχύτητας όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Τα μεγέθη High speed and low speed είναι σε pps (pulses per sec). Βάζοντας τις τιμές στα πεδία HSPD και LSPD, ορίζει κανείς στην ουσία το μέγεθος της επιτάχυνσης αλλά και καθεαυτού τις τιμές των ταχυτήτων. Το εύρος των τιμών που μπορεί να λειτουργήσει ο κινητήρας είναι από 100 έως 200K pps. Αυτό βέβαια εξαρτάται από παράγοντες όπως το ρεύμα και την τάση τροφοδοσίας.

Ο κινητήρας DMX-J-SA-17 έχει ακρίβεια 1.8° με 16 μικροβήματα, κάτι που σημαίνει ότι μια περιστροφή χωρίζεται σε 3200 βήματα (3200pulses/rev)

$$\frac{360}{1.8}$$
 • 16 = 3200 *pulses / rev*

Άρα η κάθε μοίρα είναι $\frac{3200}{360} = 8.89 \rightarrow 9 \, pulses / \deg$ Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να

επιτύχουμε με απόλυτη ακρίβεια την τιμή της 1 μοίρας. Αυτό όμως δεν έχει καμία σημασία καθώς γνωρίζουμε ότι με 8 παλμούς έχουμε 0,9°! Οπότε μπορούμε να χωρίσουμε τον κύκλο σε 400 βήματα, ή και ακόμα περισσότερο προφανώς μέχρι 3200pulses/rev το οποίο αντιστοιχεί σε ακρίβεια 0,1125 της μοίρας. Κάτι που βέβαια είναι αρκετά αμφίβολο λόγω του σφάλματος θέσης του κινητήρα.

Για να μετατρέψουμε την ταχύτητα περιστροφής σε ταχύτητα παλμών, χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση: **Pulse/sec = RPM*53.3**

Για παράδειγμα για να πετύχουμε τα 500RPM (rev/min) τα οποία θέλουμε ως άνω όριο ταχύτητας, ρυθμίζουμε την μέγιστη ταχύτητα στους **26650 pulses/sec** η οποία δεν θα πρέπει να υπερβαίνεται.

Σημείωση: Η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας (LSPD) που επιτρέπεται εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή (HSPD). Αν η LSPD είναι ρυθμισμένη κάτι από την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή, η κίνηση δεν επιτρέπεται.

Σε περίπτωση που συμβεί κάτι τέτοιο θα χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Lowest Speed [pps]	Highest Speed [pps]
1	8K
2	16K
5	40K
10	80K
20	160K
50	200K

Μετρητής θέσης (Position Counter)

Ο κινητήρας έχει ένα 32μπιτο μετρητή θέσης. Ο εύρος του μετρητή είναι από - 2,147,483,648 έως 2,147,483,648. Η θέση του κινητήρα μπορεί να διαβάζεται χρησιμοποιώντας την εντολή **PX**. Για παράδειγμα, για να ρυθμίσουμε τη θέση του άξονα στη θέση 2000, χρησιμοποιούμε την εντολή PX=2000.Για να διαβάσουμε την τρέχουσα θέση του άξονα χρησιμοποιούμε την εντολή PX και η απάντηση θα περιέχει τη θέση του άξονα.

Κίνηση προς θέση-στόχο

Ο τρόπος αυτός κίνησης χρησιμοποιείται για να κινήσει τον κινητήρα σε ένα επιθυμητή σημείο στόχο από την τρέχουσα θέση. Χρησιμοποιούμε την εντολή **X** για να μετακινήσουμε τον άξονα στο σημείο στόχο.

Η κίνηση αυτή έχει δύο λειτουργίες την απόλυτη και τη σχετική, χρησιμοποιώντας τις εντολές **ABS** (Absolute) και **INC** (Incremental) αντίστοιχα. Υπό την επιλογή σχετικής κίνησης η εντολή **X1000** θα κινήσει τον άξονα 1000 από την τωρινή θέση, ενώ κατά την απόλυτη κίνηση η ίδια εντολή θα μετακινήσει τον άξονα στην απόλυτη θέση 1000. Για να επιβεβαιώσουμε ποιο είδος κίνησης έχει επιλεγεί μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εντολή **MM**.

Η μέγιστη επιτρεπτή διαφορά της θέσης-στόχου από την τρέχουσα θέση είναι 262,143.

Η μέγιστη διαφορά μεταξύ της τρέχουσας θέσης και της θέσης-στόχου πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από το νούμερο αυτό. Για παράδειγμα, αν η τρέχουσα θέση είναι 1000, η θέση στόχος που είμαι επιτρεπτή πρέπει να είναι μέσα στο διάστημα (261143,263143).

Λειτουργίες κίνησης χρησιμοποιώντας τους διακόπτες

<u>Κίνηση στη θέση Home (Home Input Only – High speed only)</u>

Η εύρεση της θέσης Home περιλαμβάνει την κίνηση του άξονα προς το σημείο όπου υπάρχει ο διακόπτης Home, κατά τη θετική ή την αρνητική φορά περιστροφής (ανάλογα την εντολή H+/H-) και σταματά όταν ενεργοποιηθεί η είσοδος Home. Η λειτουργία αυτή γίνεται κατανοητή από το παρακάτω διάγραμμα.



A. Ξεκινά το μοτέρ από την χαμηλή ταχύτητα και επιταχύνει στην υψηλή ταχύτητα (High Speed).

B. Από τη στιγμή που θα ενεργοποιηθεί η είσοδος Home, ο μετρητής θέσης μηδενίζεται και το μοτέρ σταματά άμεσα. Αν ο διακόπτης πατηθεί κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης, ο κινητήρας σταματά άμεσα.

Κίνηση στη θέση Home (High speed and Low)



Α. Ο κινητήρας ξεκινά από χαμηλή ταχύτητα και επιταχύνει σε υψηλή.

B. Μόλις ενεργοποιηθεί η είσοδος Home, ο μετρητής θέσης μηδενίζεται και το μοτέρ άμεσα χαμηλώνει ταχύτητα.

C. Το μοτέρ αλλάζει φορά περιστροφής για να ψάξει το διακόπτη Home.

D.Όταν ξαναενεργοποιηθεί ο διακόπτης Home, θα συνεχίσει πέρα από το διακόπτη κατά το ποσοστό που έχει οριστεί από την παράμετρο διόρθωσης HCA (Home Correction Amount). Ο κινητήρας τώρα κινείται προς το διακόπτη home με υψηλή ταχύτητα.

E. Ο κινητήρας τώρα κινείται πέραν του σημείου Home κατά το ποσοστό που ορίζεται από την παράμετρο HCA. Ο κινητήρας κινείται προς το διακόπτη Home με αργή ταχύτητα.

F. Όταν ο διακόπτης ενεργοποιηθεί ξανά, ο μετρητής θέσης μηδενίζει και το μοτέρ σταματά άμεσα.

<u>Κίνηση στη θέση Limit</u>

Χρησιμοποιούμε τις εντολές L+/L-. Στο παρακάτω διάγραμμα επεξηγείται η λειτουργία.



Α. Ο κινητήρας ξεκινά από χαμηλή ταχύτητα και επιταχύνει σε υψηλή.

B. Μόλις ενεργοποιηθεί η είσοδος Limit, ο κινητήρας ρυθμίζεται στο όριο διόρθωσης (**LCA**) και αλλάζει φορά περιστροφής και επανέρχεται στο σημείο μηδέν.

C. Με το που φτάσει στο σημείο μηδέν, σταματά άμεσα.

Σημείωση: Για να ενεργοποιηθούν οι διακόπτες (είσοδοι) home και limit, τροφοδοτούμε με 24VDC και συνδέουμε την είσοδο home ή input στην γείωση.

Αν δεν ο διακόπτης home δεν χρησιμοποιείται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν γενικής χρήσης είσοδος. Ψηφιακή είσοδος για την είσοδο home είναι η **DI4**.

<u>Κίνηση Jog</u>

Η κίνηση αυτή χρησιμοποιείται για συνεχόμενη κίνηση του κινητήρα χωρίς να σταματά. Ενεργοποιείται με τις εντολές **J+/J-**

<u>Σταματώντας τον κινητήρα</u>

Όταν ο κινητήρας κινείται (οποιαδήποτε κίνηση) μπορεί να σταματήσει με δύο τρόπους, είτε άμεσα, είτε με επιβράδυνση. Ενδείκνυται να χρησιμοποιείται η επιβράδυνση, ώστε να υπάρχει μικρότερη επίδραση στο σύστημα. Για να σταματήσει άμεσα, χρησιμοποιούμε την εντολή **ABORT**. Για να σταματήσουμε με επιβράδυνση, χρησιμοποιούμε **STOP**.

<u>Λειτουργία του διακόπτη Limit</u>

Με τη λειτουργία του διακόπτη Limit ενεργοποιημένη, η ενεργοποίηση του διακόπτη κατά την κίνηση, θα σταματήσει την κίνηση αμέσως ανάλογα με την κατεύθυνση περιστροφής. Αν ο διακόπτης για το θετικό όριο ενεργοποιηθεί και η κίνηση είναι κατά τη θετική φορά περιστροφής, ο κινητήρας θα σταματήσει και το status του κινητήρα θα ρυθμιστεί στο θετικό όριο σφάλματος. Το ίδιο θα συμβεί και κατά την αντίθετη φορά.

Αν το σφάλμα ορίου ορισθεί μια φορά, τότε το status πρέπει να καθαριστεί μέσω της εντολής **CLR** ώστε να υπάρξει ξανά κίνηση.

Η λειτουργία των διακοπτών ορίου μπορούν να απενεργοποιηθούν χρησιμοποιώντας την εντολή **DL**. Με την απενεργοποίηση της λειτουργίας ορίων, οι είσοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γενικής χρήσης. Οι ψηφιακές είσοδοι είναι DI3 για το –Limit και D15 για το +Limit.

<u>Παύση επικοινωνίας (Watchdog)</u>

Έχει προβλεφτεί για τον χρήση να ενεργοποιεί alarm αν δεν έχει πραγματοποιηθεί επικοινωνία μεταξύ pc και συσκευής για μία ορισμένη χρονική περίοδο. Όταν το alarm έχει ενεργοποιηθεί, το Bit 10 θα ενεργοποιηθεί στο status του κινητήρα. Το χρονικό διάστημα παύσης ρυθμίζεται από την **TOC** εντολή, με μονάδες msec. Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται συνήθως στην λειτουργία standalone. Για να απενεργοποιηθεί, θέτουμε τιμή μηδέν στο **TOC**.

<u>Status κινητήρα</u>

To status του κινητήρα μπορεί να αναγνωστεί κάθε στιγμή με την εντολή MST. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις πιθανές καταστάσεις του status.

Bit	Description
0	Motor running at constant speed
1	Motor in acceleration
2	Motor in deceleration
3	Home input switch status
4	Minus limit input switch status
5	Plus limit input switch status
6	Minus limit error. This bit is latched when the minus limit is hit during
	negative direction motion. This error must be cleared before issuing any
	subsequent move commands (CLR command).
7	Plus limit error. This bit is latched when the plus limit is hit during
	positive direction motion. This error must be cleared before issuing any
	subsequent move commands (CLR command).
10	Communication timeout counter alarm

Ψηφιακές Είσοδοι (Digital Inputs)

Η ηλεκτρονική μονάδα του κινητήρα παρέχει 2 ψηφιακές εισόδους. Εάν όμως η λειτουργία ορίων είναι απενεργοποιημένη (**DL**), μπορούμε να έχουμε μέχρι και 5 εισόδους γενικής χρήσης. Για να αναγνώσουμε την κατάστασή τους, χρησιμοποιούμε την εντολή **DI**. Ή μία μία με τις εντολές **DI[1-5]**. Πρέπει να σημειωθεί ότι το 0 Bit αντιστοιχεί στην **DI1** εντολή, κοκ.

Bit	Description	Bit-Wise Command
0	Digital Input 1	DI1
1	Digital Input 2	DI2
2	Negative Limit	DI3
3	Home	DI4
4	Positive Limit	DI5

<u>Ψηφιακές Έξοδοι</u>

Η ηλεκτρονική μονάδα παρέχει και 2 ψηφιακές εξόδους, η κατάσταση των οποίων μπορεί να αναγνωστεί με την εντολή **DO**. Και κάθε μία ξεχωριστά με τις εντολές που φαίντοσνται στον παρακάτω πίνακα.

Bit	Description	Bit-Wise Commands
0	Digital Output 1	DO1
1	Digital Output 2	DO2

Η αρχική κατάσταση για τις δύο ψηφιακές εξόσους μπορεί να ρυθμιστεί με την εντολή **EOBOOT** στην επιθυμητή αρχική κατάσταση. Η τιμή αποθηκεύεται στην μνήμη flash με την εντολή **STORE**

Ισχύς κινητήρα

Ο κινητήρας μπορεί να τεθεί ή όχι σε ισχύ ανάλογα με την εντολή ΕΟ (enable output). Η εντολή αυτή δεν επηρεάζει τις εντολές κίνησης. Η αρχική κατάσταση της μπορεί να ρυθμιστεί από την εντολή ΕΟΒΟΟΤ, και αποθηκεύεται στη μνήμη flash, με την εντολή STORE.

<u>Πολικότητα</u>

Χρησιμοποιώντας την εντολή POL, μπορούμε να ελέγξουμε τις πολικότητες των σημάτων που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Bit	Description
0	Direction
1	Limit
2	Home
3	Digital Output
4	Digital Input
5	Enable Output
6	Jump to line 0 on error†

Ρεύμα κινητήρα σε κατάσταση αναμονής και σε κατάσταση λειτουργίας

Ο κινητήρας επιτρέπει δύο ρυθμίσεις για το ρεύμα:

Run Current: Η τιμή του ρεύματος όταν ο κινητήρας λειτουργεί. Ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας την εντολή CUR.

Idle Current: Η τιμή του ρεύματος όταν ο κινητήρας είναι σε κατάσταση αναμονής. Ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας την εντολή ACR.

Για να ρυθμίσουμε το χρόνο που ο κινητήρας χρειάζεται να είναι σε κατάσταση αναμονής, χρησιμοποιούμε την ICN εντολή. Οι μονάδες χρόνου είναι εκατοστά του δευτερολέπτου.

Όταν ρυθμίζουμε τα ρεύματα, το εύρος μεταξύ των δύο τιμών πρέπει να είναι μεταξύ 100mA μέχρι 2000mA, εκτός αν ο χρήστης επιθυμεί το moter να απενεργοποιείται τελείως κατά την κατάσταση αναμονής. Για να το επιτύχουμε αυτό, ρυθμίζουμε το idle current στο 0. Το πραγματικό ρεύμα στον κινητήρα μπορεί να αναγνωστεί με την εντολή CCR.

Στο σημείο αυτό κρίνεται ότι έχουν αναλυθεί όλες οι πληροφορίες που χρειάζονται για τον έλεγχο του κινητήρα μέσα από το interface. Πιθανόν να είναι εύχρηστη κάποια λίστα εντολών, για την οποία ο αναγνώστης πρέπει αναφερθεί στην παράγραφο ASCII Language Specification από το manual της συσκευής, στην οποία φαίνονται συγκεντρωμένες όλες οι παραπάνω λειτουργίες.

Όταν όμως θέλει κανείς να προγραμματίσει τον κινητήρα για συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να χρησιμοποιήσει την γλώσσα του κινητήρα (Standalone Language). Κρίνεται χρήσιμο για τον χρήστη να κατασκευαστεί ένας πίνακας με τις εντολές αυτής της γλώσσας και αναλυτικά παραδείγματα υπάρχουν στο manual της συσκευής.

Εντολή	Περιγραφή
ABORTX	Motion: Immediately stop motion without deceleration.
ABS	Command: Changes all move commands to absolute mode.
ACC	Read: Get acceleration value
	Write: Set acceleration value.
	Value is in milliseconds.
DELAY	Set a delay (1 ms units)
DI	Read: Gets the digital input value. DMX-J-SA has 5 digital inputs.
	Digital inputs are active high
DI[1-5]	Read: Gets the digital input value. DMX-J-SA has 5 digital inputs.
	Digital inputs are active high
DN	Read: Gets the device name
	Write: Sets the device name
DO	Read: Gets the digital output value
	Write: Sets the digital output valueDMX-J-SA has 2 digital outputs.
	Digital outputs are active low.
DO[1-2]	Read: Gets the individual digital output value
	Write: Sets the individual digital output value
	DMX-J-SA has 2 digital outputs.
	Digital outputs are active low.
ECLEARX	Write: Clears motor error status.

ELSE	Perform ELSE condition check as a part of IF statement	
ELSEIF	Perform ELSEIF condition check as a part of the IF statement	
END	Indicate end of program.	
	Program status changes to idle when END is reached.	
	Note: Subroutine definitions should be written AFTER the END statement	
ENDIF	Indicates end of IF operation	
ENDSUB	Indicates end of subroutine	
	When ENDSUB is reached, the program returns to the previously called	
	subroutine.	
ENDWHILE	Indicate end of WHILE loop	
EO	Description:	
	Read: Gets the enable output value	
	Write: Sets the enable output value	
GOSUB	Perform go to subroutine operation	
	Subroutine range is from 0 to 31.	
HLHOMEX[+ or -]	Perform homing using current high speed, low speed, and acceleration.	
HOMEX[+ or -]	Command: Perform homing using current high speed, low speed, and	
	acceleration.	
HSPD	Read: Gets high speed. Value is in pulses/second	
	Write: Sets high speed. Value is in pulses/second.	
	Range is from 1 to 200,000.	
IF	Perform IF condition check	
INC	Command: Changes all move commands to incremental mode.	
JOGX[+ or -]	Command: Perform jogging using current high speed, low speed, and	
	acceleration.	
LHOMEX[+ or -]	Command: Perform homing using current high speed, low speed, and	
	acceleration.	
LSPD	Read: Get low speed. Value is in pulses/second.	
	Write: Set low speed. Value is in pulses/second.	
	Range is from 1 to 200,000.	
MSTX	Read: Get motor status	
РХ	Read: Gets the current pulse position	
	Write: Sets the current pulse position	
SR[0,1]	Write: Set the stand-alone control for the specified stand-alone program	
V[0-49]	Assign to variable.DMX-J-SA has 50 variables [V0-V49]	
WAITX	Command: Tell program to wait until move on the certain axis is finished	
	before	
	executing next line.	
WHILE	Pertorm WHILE loop	
X	Perform X axis move to target location	

2.2.7.6 Δοκιμαστικό σενάριο λειτουργίας

Σενάριο:

Έστω ότι θέλουμε να λάβουμε 400 μετρήσεις γύρω από ένα δοκίμιο (ένας κύκλος, 360°) και ότι η κάθε μέτρηση χρειάζεται 2 sec για να πραγματοποιηθεί. Έτσι θέλουμε ο κινητήρας να κάνει 360 βήματα της μιας μοίρας και σε κάθε βήμα να σταματάει για 2 sec. Εν συνεχεία να γίνει ένα stop 4' και να συμβεί ακριβώς το ίδιο από την αντίθετη κατεύθυνση.

Λύση:

Πρέπει να φτιάξουμε ένα πρόγραμμα για να επιτύχουμε το παραπάνω. Για να λειτουργήσει κάτι τέτοιο, θα χρειαστούμε την χρήση μιας μεταβλητής μετρητή (counter) η οποία θα παίρνει τις τιμές της θέσης του άξονα, έτσι ώστε να μπορέσουμε να ορίσουμε συνθήκες για τα δύο loop που θα μας δώσουν τις δύο περιστροφές. Έτσι έχουμε το παρακάτω πρόγραμμα:

HSPD=1000	;* Ρύθμιση της υψηλής ταχύτητας σε 1000pulses/sec
LSPD=100	;* Ρύθμιση της χαμηλής ταχύτητας σε 100pulses/sec
ACC=300	;* Ρύθμιση της επιτάχυνσης σε 300msec
EO=1	;* Ενεργοποίηση του κινητήρα
ABS	;* Απόλυτη κίνηση
хо	;* Κίνηση στο 0
WAITX	;* Αναμονή μέχρι το τέλος της κίνησης
V1=0	;* Μηδενισμός μεταβλητής V1
WHILE V1<3200	;* Έναρξη loop: Όσο V1<3200
INC	;* Σχετική κίνηση
X8	;* Κίνηση κατά 8pulses (0.9°) από την προηγούμενη θέση
WAITX	;* Αναμονή μέχρι το τέλος της κίνησης
V1=V1+8	;* Ενημέρωση μεταβλητής
DELAY=2000	;* Καθυστέρηση 2sec
ENDWHILE	;* Τέλος loop
DELAY=4000	;* Καθυστέρηση 4sec
WHILE V1>0	;* Έναρξη loop: Όσο V1<3200
INC	;* Σχετική κίνηση
X-8	;* Κίνηση κατά -8pulses (0.9°) από την προηγούμενη θέση
WAITX	;* Αναμονή μέχρι το τέλος της κίνησης
V1=V1-8	;* Ενημέρωση μεταβλητής V1
DELAY=2000	;* Καθυστέριση 2sec
ENDWHILE	;* Τέλος loop
END	;* Τέλος προγράμματος

2.3 Κατασκευή

2.3.1 Εισαγωγή

Μέχρι στιγμής έχουμε μια πολύ καλή εικόνα του μηχανισμού. Συγκεκριμένα έχει περιγραφεί τα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν ο τρόπος επιλογής και λειτουργίας τους. Τέλος έχει γίνει σαφής ο τρόπος που θα συνδεθούν και θα λειτουργήσουν τα εξαρτήματα. Δεν έχει δοθεί ακόμη όμως μια γενική εικόνα του μηχανισμού και δεν έχει περιγραφεί ο τρόπος κοπής των κομματιών plexiglass.

Ανακεφαλαιώνοντας σε αυτό το σημείο μπορούμε να περιγράψουμε εποπτικά την όλη διαδικασία της κατασκευής όπως έγινε στην πραγματικότητα.



2.3.2 Βάση διάταξης

Για την τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων χρησιμοποιήθηκε μια βάση από πάγκο από Laminate, πάνω στον οποίο τοποθετήθηκαν τα εξαρτήματα με τη διάταξη που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σημειώσεις:

Κατά την τοποθέτηση δόθηκε η απαραίτητη προσοχή ώστε να υπάρχει ικανός χώρος μεταξύ του inverter και του τριφασικού κινητήρα ώστε να χωρέσει ο βηματικός. Επιπλέον στην περίπτωση που υπάρξει θέμα ηλεκτρομαγνητικού θορύβου από το inverter στους αισθητήρες υπάρχει χώρος ώστε να τοποθετηθεί το κατάλληλο screen.

Από την ανοικτή πλευρά του τριφασικού κινητήρα υπάρχει ικανός χώρος ώστε να τοποθετηθεί ιδιοκατασκευή συγκράτησης των δοκιμίων. Τέλος τοποθετήθηκαν ελαστικές βάσεις κάτω από τον πάγκο ώστε να μπορεί να είναι εύκολα μετακινήσιμη η διάταξη, αλλά να υπάρχει και περιθώριο για τους κοχλίες που θα συγκρατήσουν τον τριφασικό.

2.3.3 Αποσυναρμολόγηση του τριφασικού κινητήρα

Εφόσον έφτασε στα χέρια μου ο τριφασικός κινητήρας, πρώτο μέλημα ήταν η προσεκτική αποσυναρμολόγησή του, ώστε να αφαιρεθεί ο δρομέας και να έχουμε στα χέρια μας την επιθυμητή γεννήτρια περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Συγκεκριμένα ο κινητήρας έφτασε συσκευασμένος και τα στοιχεία που αναγράφονται στο κιβώτιο ήταν τα επιθυμητά:

Ισχύς: 1 kW / 2HP Τάση: 230/400V Συχνότητα: 50Hz Στροφές: 920rpm Έδραση: B3 Βάρος: 21,5kg



Κατά την αποσυναρμολόγηση αφαιρέθηκαν κατά σειρά:



1. Το καπάκι του ανεμιστήρα αφαιρώντας τις 4 βίδες συγκράτησης.

2. Ο ανεμιστήρας αφού αφαιρέθηκε η ασφάλεια του. Για την αφαίρεση του, χωρίς να προκληθεί ζημιά χρειάστηκε εξολκέας.



3. Το πίσω καπάκι, αφαιρώντας τις 4 βίδες συγκράτησης. Για να ανοίξουμε τον κινητήρα αφαιρούμε πρώτα το πίσω καπάκι διότι εμπρός υπάρχει η σφήνα πάνω στον άξονα και δεν επιτρέπει να περάσει το καπάκι από τον άξονα χωρίς να καταστραφεί η στεγανοποιητική τσιμούχα. Αφαιρώντας λοιπόν το πίσω καπάκι με αρκετή δυσκολία βρισκόμαστε μπροστά στην παρακάτω εικόνα.



4. Τέλος, αφαιρώντας το δρομέα μαζί με το εμπρός καπάκι έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα η γεννήτρια περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου είναι έτοιμη και μπορούμε να την τοποθετήσουμε πάνω στη βάση.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται όλα τα στοιχεία του κινητήρα που αποσυναρμολογήθηκε.





Η τοποθέτηση θα γίνει με τέσσερις απλούς κοχλίες χωρίς ελαστική βάση που συνηθίζεται στους κινητήρες αφού δεν υπάρχει θέμα ροπής και φορτίου.

2.3.4 Στήριξη βηματικού επί του τριφασικού κινητήρα

Είναι εμφανές ότι έπρεπε να προδιαγραφεί ένας τρόπος ώστε να στηριχθεί ο βηματικός κινητήρας και η διάταξη των αισθητήρων, τέτοιος ώστε η διάταξη να περιστρέφεται απρόσκοπτα εντός του τριφασικού και ο βηματικός να στηρίζεται σταθερά ώστε να δουλεύει χωρίς ταλαντώσεις. Στην όλη κατασκευή υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ακριβείας μιας και ο σκοπός είναι η διάταξη των αισθητήρων να περιστρέφεται με ακρίβεια μικρότερη από μοίρα.

Η λύση της μετάδοσης κίνησης με οδοντωτούς τροχούς, πόσο μάλλον με αλυσίδα ή ιμάντα είναι εμφανές ότι πρέπει να αποφευχθεί λόγω της επίπτωσης της στην ακρίβεια του μηχανισμού.

Οι πρώτη λύση που ήρθε στο μυαλό ήταν να τοποθετηθεί άμεσα ο βηματικός κινητήρας πάνω στο μπροστινό καπάκι του τριφασικού αφού βέβαια αφαιρεθεί ο άξονας του. Αυτό όμως είχε το εξής πρόβλημα: ο άξονας του βηματικού έχει μήκος μόνο 25mm και η διαμόρφωση του καπακιού του τριφασικού φέρνει τον βηματικό αρκετά εμπρός σε σχέση με το στάτη – επειδή περιέχει και την έδραση του κανονικού άξονα.

Η τελική λύση δεν ήταν μακριά από την πρώτη σκέψη και περιλαμβάνει την διαμόρφωση ενός «καπακιού» από plexiglass πιο επίπεδο από το κανονικό, το οποίο τοποθετείται στην εμπρός πλευρά του τριφασικού που έχει αφαιρεθεί το κανονικό καπάκι. Το πάχος του είναι 10.5mm Πάνω στο plexiglass τοποθετείται ο βηματικός κινητήρας ώστε ο άξονάς του να είναι ευθυγραμμισμένος με την άτρακτο του τριφασικού η οποία έχει αφαιρεθεί, ώστε η διάταξη των αισθητήρων να μην περιστρέφεται έκκεντρα μέσα στο στάτη του τριφασικού.

Για να κατασκευάσουμε τη βάση στήριξης αυτή, πρέπει να μετρήσουμε τον στάτη του τριφασικού κινητήρα και τον βηματικό. Αφού έγινε η μέτρηση με ακρίβεια όπου ήταν απαραίτητο, σχεδιάστηκε το κομμάτι στο Solidworks, και εν συνεχεία με SolidCAM, βγήκε ο απαραίτητος G κώδικας για την κατεργασίας στην εργαλειομηχανή. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το επιθυμητό τεμάχιο. [11]



Η ανάγκη αυτής της ευθυγράμμισης του βηματικού σε σχέση με τον στάτη του τριφασικού, έκανε την κατασκευή πιο επίπονη μιας και χειροκίνητες μέθοδοι δεν παρείχαν την επιθυμητή ακρίβεια. Έτσι η κοπή έγινε σε μηχανή CNC. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οχημάτων στο Τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών, όπου με τη βοήθεια του προσωπικού του εργαστηρίου¹ έγινε η κοπή. Στη δεύτερη εικόνα βλέπουμε το αρχικό κομμάτι plexiglass στο πρώτο πιάσιμο στη μηχανή.



Ο κυκλικός δίσκος που φαίνεται στην εικόνα απαιτεί τις παρακάτω κατεργασίες:

- 1. Διάνοιξη κεντρικής οπής για τον άξονα Φ6
- 2. Αύλακα για την συναρμογή με το στάτη του τριφασικού
- 3. Διάνοιξη 4 οπών Φ3 για τη στήριξη του βηματικού
- 4. Διάνοιξη 4 οπών Φ6 για τη στήριξη της βάσης επί του τριφασικού
- 5. Φρεζάρισμα κυλινδρικής ποκέτας Φ22 ώστε να εφαρμόσει σωστά ο βηματικός
- 6. Φρεζάρισμα για το κόψιμο της περιφέρειας

Για να πετύχουμε αυτά χρειαζόμαστε 2 διαφορετικά πιασίματα του κομματιού πάνω στη μηχανή, διότι ενώ οι οπές μπορούν να γίνουν από την πλευρά της αύλακας, η κυλινδρική ποκέτα όχι. Η διαδικασία αυτή ενέχει δυσκολία λόγω την ανάγκης ξανακεντραρίσματος του κομματιού.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν : τρυπάνι Φ3, τρυπάνι Φ6, φρεζοκεφαλή Φ4, φρεζοκεφαλή Φ10

Σημείωση 1: Για καλύτερο αποτέλεσμα έγινε προσπάθεια να διαμορφωθεί στο plexyglass μια αύλακα ώστε να «φωλιάζει» το καπάκι στο «χείλος» του τριφασικού. Έτσι ο βηματικός έρχεται ακόμα 3mm πιο κοντά στο στάτη. Με τον τρόπο αυτό καταφέρνουμε να αποφύγουμε οποιαδήποτε μετάδοση και να αρμώσουμε την διάταξη των αισθητήρων απευθείας στον άξονα του βηματικού.

Σημείωση 2: Θεωρητικά ο βηματικός κινητήρας δεν πρέπει να επηρεάζεται από το πεδίο του ασύγχρονου διότι το περίβλημά του είναι γειωμένο κάτι που σημαίνει ότι συμπεριφέρεται σαν κλωβός Faraday. Σε περίπτωση όμως που το πεδίο του τριφασικού δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργία του βηματικού είναι εύκολη η προσθήκη μιας μεταλλικής επιφάνειας που θα λειτουργεί σαν screen για το πεδίο.

¹ Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Αλέξανδρο Βάμβακα για τη πολύτιμη βοήθειά του.

Σημείωση 3: Οι κατεργασίες αυτού του είδους ενώ θα μπορούσε κανείς να τις θεωρήσει ιδιαιτέρως απλές, ενέχουν αρκετές κρυφές δυσκολίες και προφανώς η εμπειρία του χειριστή της εργαλειομηχανής βοηθά για να ξεπεραστούν. Οι δυσκολία είναι κυρίως στο δέσιμο του κομματιού πάνω στην τράπεζα της μηχανής, στο κεντράρισμά του, στην επιλογή των σωστών εργαλείων, αριθμού πάσων και αλληλουχίας κατεργασιών.

2.3.5 Κατασκευή διάταξης αισθητήρων

Για να κατασκευάσουμε την διάταξη των αισθητήρων, χρειαζόμαστε ένα κυκλικό δίσκο, διαμέτρου, όσο η εσωτερική του σωλήνα και με μία οπή στο κέντρο ώστε να αναρτηθεί ως πρόβολος πάνω στον άξονα του βηματικού κινητήρα.



Ο κυκλικός δίσκος που φαίνεται στην εικόνα απαιτεί τις παρακάτω κατεργασίες:

- 1. Διάνοιξη κεντρικής οπής για τον άξονα Φ4.5mm
- 2. Φρεζάρισμα για το κόψιμο της περιφέρειας

Για να κοπεί ο κυκλικός δίσκος χρειάστηκε ένα πιάσιμο του τεμαχίου στην μηχανή. Χρησιμοποιήθηκε ένα τρυπάνι 4,5mm για την οπή και μια φρεζοκεφαλή 10mm. Χρησιμοποιήσαμε μεγάλη φρεζοκεφαλή ώστε να μπορέσουμε να μειώσουμε τον αριθμό των πάσων και να αυξήσουμε την ταχύτητα της κατεργασίας. Για να κοπεί το τεμάχιο χρειαστήκαμε 5 πάσα. Πέντε φορές δηλαδή το εργαλείο διέγραψε κύκλο και κατέβαινε 2.1mm τη φορά.

Η διάμετρος του άξονα του βηματικού έιναι 5mm με θέση για σφήνα, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Έτσι επιλέγουμε να κάνουμε οπή με ακριβώς το μικρότερο εργαλείο που είχαμε στη διάθεσή μας.

Επίσης το φρεζάρισμα για την περιφέρεια έγινε με ακρίβεια δεκάτου του χιλιοστού [96,2mm] Για να το πετύχουμε αυτό χρειάστηκε να μετρήσουμε με τη σωλήνα. Όμως οι σωλήνες PVC για ύδρευση δεν έχουν την επιθυμητή ακρίβεια στο πάχος τους. Έτσι μετρώντας με παχύμετρο 3 φορές τη διάμετρο βγάλαμε ένα μέσο όρο.

Επιπλέον στην εργαλειομηχανή η φθορά του εργαλείου-όταν δεν υπάρχει διόρθωσηεισάγει σφάλμα όταν η ακρίβεια είναι κάτω από χιλιοστό. Έτσι κάναμε ένα Πράγματι μετά το τέλος της κατεργασίας, επιτυγχάνεται πολύ καλή συναρμογή plexiglass και σωλήνα, η σύνδεση των οποίων γίνεται με λίγη κόλλα στιγμής. Η διάταξη ζυγίζεται και είναι 267gr, έναντι των 236gr που είχαμε υπολογίσει κατά την προμελέτη. Η απόκλιση καλύπτεται άνετα από τον συντελεστή ασφαλείας της κατασκευής, αλλά και από τη ροπή του κινητήρα που προμηθευτήκαμε τελικά.



2.3.6 Προσάρτηση διάταξης αισθητήρων στο βηματικό κινητήρα

Προφανώς κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης των παραπάνω, πρέπει να τοποθετηθούν κατά σειρά:

- 1. Καπάκι επί του τριφασικού
- 2. Βηματικός από την έξω πλευρά του καπακιού
- Διάταξη αισθητήρων εντός του τριφασικού με μεγάλη προσοχή στον άξονα του βηματικού.

Θα χρησιμοποιηθεί κόλλα για τη σύνδεση του πάτου του της κούπας με το σωλήνα, και επιπλέον μια απλή σφήνα από πλαστικό για την ανάρτηση της κούπας στον άξονα του βηματικού κινητήρα.

3 Βιβλιογραφία

[1] Εξελίξεις στην τεχνολογία των κινητήρων μικρής και ελάχιστης ισχύος, Ε.Μητρονίκας – Α.Σαφάκας – Πανεπιστήμιο Πατρών

[2] DMX-J-SA Manual Rev 1.09

[3] Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας – Ε.Παπαδόπουλου

[4] Magnetism Against Tumor – Ε. Χριστοφόρου

[5] PROJECT #2 SPACE VECTOR PWM INVERTER - JIN-WOO JUNG, PH.D STUDENT - MECHATRONIC SYSTEMS LABORATORY - THE OHIO STATE UNIVERSITY

[6] LG Variable Frequency Drives: iG Series – Installation, Operation & Maintanance Manual

[7] ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΩΝ ΓΙΑ ΑΜΕΣΟ ΕΛΕΓΧΟ ΡΟΠΗΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ - ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ - ΖΗΣΗΣ ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

[8] Εξελίξεις στην τεχνολογία των κινητήρων μικρής και ελάχιστης ισχύος – Ε.Μητρονίκας – Α. Σαφάκας

[9] ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ -Ηλ. Μηχ. Β. Σ. Βασιλάτος, Δρ.-Ηλ. Μηχ. Ε. Κ. Τατάκης - Πανεπιστήμιο Πατρών

[10] Takshi Kenjo, Akira Sugawara, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", 2nd edition, *Oxford Science Publications*, Oxford, 1994

[11] Solidworks – Solidcam Tutorials 2010

[12] Σημειώσεις για το μάθημα Εργαλειομηχανές – Γ.Χ. Βοσνιάκος 2003

Ιστότοποι

http://www.robolab.tuc.gr/

http://www.mechatronics.gr

http://www.microplanet.gr/

http://www.electronics-lab.com

http://techteam.gr/

http://www.schneider-electric.gr/

http://www.metadosi-ischios.gr

http://www.leonardo-energy.org

http://www.automotsys.com.au

http://hibp.ecse.rpi.edu

http://users.pandora.be/educypedia/ http://www.ni.com http://www.allegromicro.com http://www.anaheimautomation.com/intro.htm http://www.st.com http://www.stepperworld.com http://www.atmel.com http://www.rta.it

4 Παράρτημα

4.1 G-code

Για την κοπή τόσο της βάσης στήριξης του βηματικού όσο και για τον κυκλικό δίσκο που χρησιμοποιήθηκε ως πάτος στη διάταξη των αισθητήρων ήταν αναγκαίο αφού σχεδιάστηκαν τα κομμάτια σε 3D σχέδιο στο Solidworks, να γραφεί ο G κώδικας ώστε να περαστεί στη μηχανή cnc.

%
O5000 (KAPAKI.TAP)
(MCV-OP) (19-NOV-2010)
(SUBROUTINES: O2 O0)
G90 G17
G80 G49 G40
G54
G91 G28 Z0
G90
M01
N1 M6 T1
(TOOL -1- MILL DIA 3.0 R0. MM)
G90 G00 G40 G54
G43 H1 D31 G0 X0. Y90. Z70. S2500 M3
M8
()
(D-DRILL-T1 - DRILL)
()
X0. Y90. Z10.
G98 G81 Z-3. R2. F30
X90. Y0.
X0. Y-90.
X-90. Y0.
X-15.556 Y15.556
X15.556
Y-15.556
X-15.556
X0. Y0.
G80
()
(F-CONTOUR-T1 - PROFILE)
()
G0 X0. Y-79. Z10.
Z2.
G1 Z-1.5 F30
G2 X0. Y-79. IO. J79. F100
G1 Z-3. F30
G2 X0. Y-79. IO. J79. F100
G0 Z10.
M30
%

Για το δεύτερο πιάσιμο του κομματιού γράφουμε τον παρακάτω κώδικα.

%
О5000 (КАРАКІ.ТАР)
(MCV-OP) (19-NOV-2010)
(SUBROUTINES: O2 O0)
G90 G17
G80 G49 G40
G54
G91 G28 Z0
G90
M01
N1 M6 T1
(TOOL -1- MILL DIA 3.0 R0, MM.)
G90 G00 G40 G54
G43 H1 D31 G0 X0 Y90 770 S2500 M3
M8
()
(D-DBIUL-T1 - DBIUL)
X0. 190. 210.
096 061 2-5. K2. F30
X90. Y0.
X0. Y-90.
X-90. YO.
X-15.556 Y15.556
X15.556
Y-15.556
X-15.556
X0. Y0.
G80
()
(F-CONTOUR-T1 - PROFILE)
()
G0 X0. Y-79. Z10.
Z2.
G1 Z-1.5 F30
G2 X0. Y-79. I0. J79. F100
G1 Z-3. F30
G2 X0. Y-79. IO. J79. F100
G0 Z10.
G91 G28 Z0
G90
M01
N2 M6 T2
(TOOL -2- MILL DIA 10.0 R0. MM)
G90 G00 G40 G54
G43 H2 D32 G0 X0. Y-2.5 Z70. S1000 M3
M8
()
(P-CONTOUR1-T2 - POCKET)

()
X0. Y-2.5 Z10.
Z2.
G1 Z-3. F33
G3 X0. Y-2.5 I0. J2.5 F100
G1 Y-6.
G3 X0. Y-6. I0. J6.
G0 Z10.
()
(F-CONTOUR2-T2 - PROFILE)
()
X0. Y-105.5 Z10.
Z2.
G1 Z-3. F33
G3 X0. Y-105.5 IO. J105.5 F100
G1 Z-6. F33
G3 X0. Y-105.5 IO. J105.5 F100
G1 Z-9. F33
G3 X0. Y-105.5 IO. J105.5 F100
G1 Z-10.5 F33
G3 X0. Y-105.5 IO. J105.5 F100
G0 Z10.
M30
%