



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ LINUXCNC

ΤΖΑΝΗΣ Ν. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Βοσνιάκος Γεώργιος - Χριστόφορος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

.....
Αθανάσιος Ν. Τζάνης
Διπλωματούχος Μηχανικός Αεροσκαφών Σχολής Ικάρων

Copyright © Αθανάσιος Ν. Τζάνης, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος

Προκειμένου να κλείσει επιτυχώς το κεφάλαιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού» που διοργανώνεται από τη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, εκπονήθηκε η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Η πραγματοποίησή της επιβεβαιώνει τον τίτλο του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος, καθώς απαιτήθηκαν γνώσεις που απορρέουν από ποικίλους επιστημονικούς κλάδους, όπως του αυτομάτου ελέγχου, του μηχανολογικού, του ηλεκτρονικού αλλά και του ηλεκτρολογικού. Η ενασχόληση με όλους αυτούς τους τομείς, άνοιξε τους ορίζοντές μου, φέρνοντάς με αντιμέτωπο με ανεξερεύνητα, για εμένα, γνωστικά αντικείμενα, κάτι που πιστεύω ότι θα με βοηθήσει στην περαιτέρω επαγγελματική και ερευνητική εξέλιξή μου.

Η επιτυχής ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας βασίζεται σε πολλούς πυλώνες, οι οποίοι στάθηκαν αρωγοί αυτής της προσπάθειας και τη στήριξαν από την ανάληψή της, έως την βοήθεια στην επίλυση ορισμένων προβλημάτων που εμφανίστηκαν στην πορεία και μέχρι τέλους αυτής.

Καταρχάς, πρέπει να αποδοθούν οι ευχαριστίες μου και η ευγνωμοσύνη μου στο πρόσωπο του καθηγητή κ. Γ. Χ. Βοσνιάκου που με εμπιστεύθηκε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα διπλωματικής εργασίας, για την παροχή χρήσιμων συμβουλών καθόλη τη διάρκεια εκπόνησής της, για την υλική στήριξη της προσπάθειας και για την υποστήριξη με βιβλιογραφικό υλικό.

Θα πρέπει επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γ. Χ. Βοσνιάκο και τον καθηγητή κ. Δ. Μανωλάκο για την φιλοξενία στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών και για την παραχώρηση τμήματός του προκειμένου να επιτευχθεί η ολοκλήρωση του έργου.

Ευχαριστίες επίσης θα ήθελα να αποδώσω στους υποψήφιους διδάκτορες κ. Γ. Παπαζέτη και κ. Π. Αβράμπο και στο τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου ήτοι στον κ. Ν. Μελισά και στον κ. Κ. Κερασιώτη για την άμεση ανταπόκριση τους σε θέματα που προκύπτανε στην πορεία, για τις γνώσεις τους και για τη γενικότερη στήριξη τους.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχε όλον αυτόν τον καιρό και που ακόμα στέκεται δίπλα μου σε όλες μου τις αποφάσεις. Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε ορισμένους συναδέλφους για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν σε τεχνικά θέματα.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί ο εκσυγχρονισμός της φρέζας EMCO F1-CNC, εργαλειομηχανής τριών αξόνων, και η αυτοματοποίησή του ελέγχου της μέσω H/Y.

Η εν λόγω εργαλειομηχανή αποτελούνταν από μονάδα ελέγχου η οποία δέχονταν κασέτες με μαγνητική ταινία, στις οποίες γινόταν εγγραφή του G κώδικα και κατόπιν χρησιμοποιούνταν για την ανάλογη κίνηση των αξόνων και τον έλεγχο των υπολοίπων παραμέτρων της εργαλειομηχανής.

Ο κύριος στόχος της εργασίας ήταν η ψηφιοποίηση του σήματος της εργαλειομηχανής, καθιστώντας δυνατή την επικοινωνία της με το λογισμικό πρόγραμμα LinuxCNC (EMC2), το οποίο ήταν εγκατεστημένο σε H/Y. Το λογισμικό αυτό είναι ελεύθερο, ανοιχτού κώδικα, και υποστηρίζεται από την πλατφόρμα των Linux. Παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου και των τριών αξόνων της φρέζας καθώς επίσης και όλων των υπολοίπων παραμέτρων που αφορούν την ομαλή λειτουργία της μηχανής.

Για να καταστεί εφικτός ο ανωτέρω στόχος, κατασκευάστηκε πλακέτα, η οποία δέχεται το σήμα του H/Y μέσω παράλληλης θύρας (parallel port) και το διανέμει καταλλήλως στους αντίστοιχους οδηγούς (driver board) των βηματικών κινητήρων (stepper motor).

Επίσης, λόγω του ότι ο έλεγχος της περιστροφικής ταχύτητας κοπής της κύριας ατράκτου γινόταν αναλογικά μέσω ροοστάτη, κατασκευάστηκε πλακέτα, η οποία μετατρέπει το ψηφιακό σήμα που στέλνει το LinuxCNC (Pulse Width Modulation, PWM) σε αναλογικό, ώστε η άτρακτος να ελέγχεται πλήρως από το λογισμικό έχοντας την κατάλληλη περιστροφική ταχύτητα.

Ακόμη, προστέθηκαν στο σύνολο έξι τερματικοί διακόπτες, οι οποίοι οριοθετούν την τράπεζα κοπής και χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση του μηχανήματος. Η τοποθέτησή τους καθίσταται αναγκαία και για λόγους ασφαλείας, ώστε σε περίπτωση οποιασδήποτε δυσλειτουργίας να διακοπεί αυτόματα η εργασία.

Ο εκσυγχρονισμός αφορούσε επίσης την αντικατάσταση των αρχικών βηματικών κινητήρων με νέους καλύτερης ανάλυσης, των αντίστοιχων οδηγών τους και του ανάλογου τροφοδοτικού τους.

Περαιτέρω, προστέθηκε τροφοδοτικό για τα παρελκόμενα βοηθητικά συστήματα και κατασκευάστηκε πλακέτα μετατροπής τάσης προκειμένου οι πλακέτες αλλά και δευτερεύοντα υποσυστήματα, όπως ανεμιστήρες (fans), να λειτουργούν στις προβλεπόμενες συνθήκες.

Τέλος, προστέθηκε κατάλληλο κύκλωμα ελέγχου κινητήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται για την κίνηση μέγγενης, προκειμένου να στηριχθούν τα τεμάχια προς κοπή.

Καταλήγοντας, η συνένωση όλων των ανωτέρω υποσυστημάτων έδωσε το επιθυμητό αποτέλεσμα, που είναι ο έλεγχος της εργαλειομηχανής είτε μέσω G κώδικα, είτε μέσω εικονικών πλήκτρων στο περιβάλλον εργασίας του LinuxCNC.

Λέξεις κλειδιά: Εργαλειομηχανή, φρέζα, κέντρο κατεργασιών, βηματικός κινητήρας, κινητήρας συνεχούς ρεύματος, άξονας κίνησης, κοχλίας μετάδοσης κίνησης, G κώδικας.

Abstract

The subject of the present thesis is about retrofitting the EMCO F1-CNC, a 3-axis milling machine, and making possible its further automation via a PC controlled system.

The milling machine as mentioned consisted of a control unit, which would take magnetic tapes where the user could write the preferred G code and by playing the tape afterwards the machine started to move the corresponding axis and control the rest of the functions.

The main purpose of this thesis was the digitalization of the signal originating from the machine, making possible the contact between the mill and the LinuxCNC software, which is installed in a Linux-based computer. The software used is free and has an open source code. It provides the ability of moving all of the machine's three axis and controlling those parameters making its function as normal as possible.

In order to reach the above goal, an electronic board was constructed which has the ability of receiving the computer signals and distributing them to the appropriate stepper motor drivers.

Furthermore, due to the fact that the control of the rotating speed of the main spindle took place analogically by using a mechanical potentiometer, an additional electronic board was constructed which could convert the digital signal received by the LinuxCNC software (specifically pulse width modulation, PWM) to analog. In this way, the main spindle is fully controlled by the software providing the appropriate rotating speed.

In addition, six limit switches were used which set the limits of the available cutting space and provide the initialization of the axis. Their placement was also necessary for safety reasons, so that in case of a malfunction the immediate termination of the machining process could be possible automatically.

New stepper motors substituted the old ones, providing better resolution, accompanied by the compatible new stepper motor drivers and a new power supply.

One more power supply was also added and a voltage converter electronic board was constructed, in order for the auxiliary systems, such as the fans, to function with their right inputs.

Finishing, an appropriate circuit was designed and implemented in order to control a DC motor which moves a clump used as a holder for the pieces to be cut.

The junction of the subsystems mentioned above gave the expected result which is the automatic control of the milling machine via the LinuxCNC software either by a fixed G-code or through virtual buttons at the software's graphic user interface.

Key words: Milling machine, CNC machining center, stepper motor, direct current motor, axis of movement, LinuxCNC, leadscrew, G-code.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	iv
Περίληψη.....	vi
Abstract	viii
Πίνακας Περιεχομένων	x
Κατάλογος Εικόνων.....	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xvi
1. Εισαγωγή	1
1.1. Εξέλιξη της Παραγωγής	1
1.2. Computer Numerical Control	2
1.3. Έλεγχος Εργαλειομηχανών CNC	3
1.4. Μηχανές CNC	4
1.5. Άξονες και Σύστημα Συντεταγμένων.....	5
1.6. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	7
2. Θεωρητικό Μέρος.....	10
2.1. Βηματικοί Κινητήρες	10
2.1.1. Αρχή Λειτουργίας	10
2.1.2. Είδη Βηματικών Κινητήρων	11
2.1.3. Βηματικοί Κινητήρες Υβριδικού Τύπου.....	12
2.2. Πλακέτες Ηλεκτρονικού Κυκλώματος.....	15
2.2.1. Εισαγωγή.....	15
2.2.2. Είδη Πλακετών.....	16
3. Κέντρο Κατεργασιών EMCO F1-CNC.....	19
3.1. Εισαγωγή	19
3.2. Κατασκευαστικά Στοιχεία EMCO F1-CNC	19
3.3. Τεχνικά Χαρακτηριστικά EMCO F1-CNC	22
3.3.1. Βηματικοί Κινητήρες	22
3.3.2. Εγκάρσια, Διαμήκης και Κατακόρυφη Κίνηση	23
3.3.3. Κύρια Άτρακτος	25
3.3.4. Τράπεζα Εργασίας.....	26

3.4. Προγραμματισμός EMCO F1-CNC	27
4. LinuxCNC	33
4.1. Εισαγωγή	33
4.2. Λογισμικό	33
4.3. Τρόπος Λειτουργίας	35
5. Ανακατασκευή Αξόνων Κίνησης	36
5.1. Εισαγωγή	36
5.2. Βηματικοί Κινητήρες	36
5.3. Τερματικοί Διακόπτες	38
6. Κατασκευή Πλακετών Ηλεκτρονικού Κυκλώματος	43
6.1. Εισαγωγή	43
6.2. Πλακέτες Μηχανήματος	43
6.3. Εργοστασιακές Πλακέτες	48
7. Βοηθητικός Εξοπλισμός	50
7.1. Τροφοδοτικά Ισχύος	50
7.2. Ψύξη Συστήματος	51
7.3. Ηλεκτρική Μέγγενη	52
7.4. Εξοπλισμός Εκκίνησης	54
8. Αρχικοποίηση LinuxCNC	55
8.1. Οδηγός LinuxCNC Stepconfig Wizard	55
8.2. Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη	65
9. Παράδειγμα Λειτουργίας	66
9.1. Προετοιμασία διαδικασίας	66
9.2. G κώδικας	67
9.3. Αποτέλεσμα μηχανουργικής κατεργασίας	75
10. Συμπεράσματα	77
10.1. Συμπεράσματα	77
10.2. Περαιτέρω έρευνα	77
Βιβλιογραφία	79
Παράρτημα Α: Ηλεκτρολογικό σχέδιο EMCO F1-CNC	81

Παράρτημα Β: 3D σχεδίαση EMCO F1-CNC	82
Παράρτημα Γ: Αρχεία LinuxCNC	85
Υποπαράρτημα Γ1: Αρχείο .hal	85
Υποπαράρτημα Γ2: Αρχείο .ini	87
Υποπαράρτημα Γ3: Αρχείο .xml	89
Παράρτημα Δ: Διαθέσιμες εντολές	90
Υποπαράρτημα Δ1: Επεξήγηση συμβολισμών [10].....	90
Υποπαράρτημα Δ2: Εντολές G κώδικα [10]	90
Υποπαράρτημα Δ3: Εντολές M κώδικα [10].....	91
Παράρτημα Ε: Σχέδιο αντικειμένου προς κατεργασία	93

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Διάτρητη ταινία για έλεγχο εργαλειομηχανής NC.	3
Εικόνα 1.2: Οι τρεις βασικοί άξονες ενός κατακόρυφου κέντρου κατεργασιών. Ανάκτηση από [21].	5
Εικόνα 1.3: Οι τρεις βασικοί άξονες ενός οριζόντιου κέντρου κατεργασιών. Ανάκτηση από [21].	7
Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα VR με βήμα 30°. Ανάκτηση από [5].	11
Εικόνα 2.2: Ρότορας υβριδικού τύπου βηματικού κινητήρα. Ανάκτηση από [5]. ...	12
Εικόνα 2.3: Υβριδικός βηματικός κινητήρας 200 βημάτων ανά περιστροφή. Ανάκτηση από [5].	12
Εικόνα 2.4: Η πολικότητα των δύο άκρων του ρότορα που διαχωρίζονται από τον μόνιμο μαγνήτη. Ανάκτηση από [5].	13
Εικόνα 2.5: Η λεπτομέρεια δείχνει την ευθυγράμμιση του στάτορα με τον ρότορα και σημειώνεται η γωνία των 1,8° που σχηματίζεται σε κάθε βήμα. Ανάκτηση από [5].	14
Εικόνα 2.6: Πλακέτα δοκιμών (Breadboard).	16
Εικόνα 2.7: Διάτρητη πλακέτα (Perfboard).	17
Εικόνα 2.8: Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Ανάκτηση από http://www.circuitbasics.com	17
Εικόνα 3.1: Γενική άποψη κέντρου κατεργασιών EMCO F1-CNC.	19
Εικόνα 3.2: Εμπρόσθια (α) και οπίσθια (β) άποψη του συστήματος.	20
Εικόνα 3.3: Ηλεκτρολογικό σχέδιο εργοστασιακού κέντρου κατεργασιών EMCO F1-CNC.	21
Εικόνα 3.4: Βηματικός κινητήρας (α) X (άνω) και Y (κάτω) άξονα (νούμερο 25), (β) Z άξονα.	22
Εικόνα 3.5: Γρανάζι (α) βηματικού κινητήρα και (β) ατέρμονα κοχλία.	23
Εικόνα 3.6: Σύστημα μετάδοσης κίνησης (α) X και Y άξονα και (β) Z άξονα.	24
Εικόνα 3.7: (α) Σύστημα μετάδοσης κίνησης από βηματικό κινητήρα (αριστερά) σε ατέρμονα κοχλία και (β) μεγέθυνση τρόπου λειτουργίας ατέρμονα κοχλία με σφαιρίδια (ball screw spindle).	24
Εικόνα 3.8: (α) Κύρια άτρακτος και (β) περιοχή έδρασης κύριας ατράκτου στον άξονα Z.	25
Εικόνα 3.9: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος κυρίας ατράκτου. Διακρίνεται ο ιμάντας μετάδοσης κίνησης προς τον συγκρατητή κοπτικών εργαλείων.	25
Εικόνα 3.10: Συγκρατητής κοπτικών εργαλείων με φωλιά και κοπτικά εργαλεία. .	26
Εικόνα 3.11: (α) Ηλεκτρική μέγγενη και (β) ο κινητήρας συνεχούς που κινεί την μέγγενη.	27
Εικόνα 3.12: Εμπρόσθια (α) και οπίσθια (β) άποψη του κέντρου ελέγχου.	28
Εικόνα 3.13: Εντολές που δέχεται το κέντρο κατεργασιών όπως φαίνονται στην πρόσοψη του κέντρου ελέγχου του.	31
Εικόνα 4.1: Εικόνα λογότυπου LinuxCNC. Ανάκτηση από [10].	33
Εικόνα 4.2: Απλοποιημένο διάγραμμα ελέγχου εργαλειομηχανής με LinuxCNC. Ανάκτηση από [8].	35
Εικόνα 5.1: Βηματικός κινητήρας της Wantai Motors που χρησιμοποιήθηκε.	36

Εικόνα 5.2: (α) Οδηγός βηματικού κινητήρα και (β) τροφοδοτικό των οδηγών.....	37
Εικόνα 5.3: (α) Το γρανάζι μετάδοσης της κίνησης και (β) ο νέος βηματικός κινητήρας με προσαρμοσμένο στον άξονά του το γρανάζι.....	38
Εικόνα 5.4: Ορισμένα από τα στίγματα οριοθέτησης των αξόνων. Εδώ φαίνεται η οριοθέτηση του X άξονα. Σε υπέρθεση λεπτομέρεια των στιγμάτων οριοθέτησης.	39
Εικόνα 5.5: (α) Ο τύπος των τερματικών διακοπών που χρησιμοποιήθηκαν και (β) μεγέθυνση των τρόπων σύνδεσης του διακόπτη NC: Normally Closed, NO: Normally Open, Com: Γείωση.	41
Εικόνα 5.6: Εμπρός όψη διακόπτης πόρτας (α) και η οπίσθια όψη του διακόπτη (β).	42
Εικόνα 6.1: Απεικόνιση διαδικασίας σύνθεσης. Ανάκτηση από [18].....	43
Εικόνα 6.2: Πλακέτα διαμοιρασμού σημάτων (interface board).	44
Εικόνα 6.3: Κύκλωμα πλακέτας διαμοιρασμού σημάτων (interface board).....	45
Εικόνα 6.4: Πλακέτα μετατροπής τάσης (voltage converter).	46
Εικόνα 6.5: Κύκλωμα πλακέτας μετατροπής τάσης.	46
Εικόνα 6.6: Πλακέτα μετατροπής σήματος PWM (PWM Signal Converter).....	47
Εικόνα 6.7: Κύκλωμα πλακέτας μετατροπής σήματος PWM.....	47
Εικόνα 6.8: Πλακέτα τροφοδοσίας πλακέτας ελέγχου DC κινητήρα της κύριας ατράκτου.....	48
Εικόνα 6.9: Πλακέτα οδηγός κύριας ατράκτου. Διακρίνεται αριστερά το ποτενσιόμετρο χειροκίνητης ρύθμισης των στροφών.	49
Εικόνα 7.1: Τροφοδοτικά ισχύος (α) 154,8 W και (β) 36W.	50
Εικόνα 7.2: (α) Ο τύπος ανεμιστήρα ψύξης που χρησιμοποιήθηκε και (β) οι ανεμιστήρες επί του συστήματος (διακρίνονται αριστερά με βέλη).....	51
Εικόνα 7.3: Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος της ηλεκτρικής μέγγενης.	52
Εικόνα 7.4: Οδηγός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.	52
Εικόνα 7.5: Συνδεσμολογία για έλεγχο κινητήρα ηλεκτρικής μέγγενης.	53
Εικόνα 7.6: (α) Εξωτερική όψη κουτιού όπου διακρίνονται τα δύο κουμπιά κίνησης του κινητήρα καθώς και το βύσμα σύνδεσης με τον κινητήρα (άνω πλευρά) και (β) εσωτερική όψη του κουτιού όπου διακρίνεται η οδηγός πλακέτα.	53
Εικόνα 7.7: Κομβία εκκίνησης και εκτάκτου ανάγκης (κόκκινο).	54
Εικόνα 8.1: Αρχικό παράθυρο LinuxCNC Stepconfig Wizard.....	55
Εικόνα 8.2: Επιλογή για δημιουργία νέας διαμόρφωσης μηχανήματος.	56
Εικόνα 8.3: Βασικές πληροφορίες κέντρου κατεργασιών.	57
Εικόνα 8.4: Εκτέλεση δοκιμής εύρεσης παραμέτρου Base Period Maximum Jitter.	58
Εικόνα 8.5: Προχωρημένες ρυθμίσεις.....	59
Εικόνα 8.6: Επιλογές pin παράλληλης θύρας.....	59
Εικόνα 8.7: Εισαγωγή παραμέτρων X άξονα.....	60
Εικόνα 8.8: Εισαγωγή παραμέτρων Y άξονα.....	60
Εικόνα 8.9: Εισαγωγή παραμέτρων Z άξονα.	61
Εικόνα 8.10: Παράθυρο δοκιμής ταχύτητας και επιτάχυνσης αξόνων.	62
Εικόνα 8.11: Εισαγωγή παραμέτρων ταχύτητας περιστροφής κύριας ατράκτου. ...	64
Εικόνα 8.12: Παράθυρο ολοκλήρωσης αρχικοποίησης διαδικασίας.	64
Εικόνα 9.1: Αρχικό τεμάχιο – πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε.....	66

Εικόνα 9.2: Ηλεκτρικός αναδευτήρας. Εντός του μπλε τετραγώνου το τμήμα που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε.	66
Εικόνα 9.3: Στιγμιότυπα από την διαδικασία λείανσης του αρχικού τεμαχίου.	67
Εικόνα 9.4: Στιγμιότυπα κατεργασίας αρχικού τεμαχίου προς τελική διαμόρφωση.	76
Εικόνα 9.5: Τελική μορφή αντικειμένου.	76
Εικόνα 10.1: Εμπρόσθια όψη φρέζας (1).	82
Εικόνα 10.2: Εμπρόσθια όψη φρέζας (2).	82
Εικόνα 10.3: Λεπτομέρεια άνω πλευράς φρέζας.	83
Εικόνα 10.4: Οπίσθια όψη φρέζας (1).	83
Εικόνα 10.5: Οπίσθια όψη φρέζας (2).	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων.	22
Πίνακας 3.2: Επεξήγηση Βασικών πλήκτρων του κέντρου ελέγχου της φρέζας EMCO F1-CNC.	29
Πίνακας 3.3: Ρεπερτόριο G κώδικα και λειτουργία που υποστηρίζει η φρέζα.	30
Πίνακας 3.4: Ρεπερτόριο M κώδικα και λειτουργία που υποστηρίζει η φρέζα.	31
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων της Wantai Motors.	36
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά οδηγού βηματικών κινητήρων και τροφοδοτικού. .	37
Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικών ισχύος.	50
Πίνακας 8.1: Χρονικές παράμετροι οδηγών βηματικών κινητήρων.	58
Πίνακας 8.2: Κοινές παράμετροι αξόνων.	61
Πίνακας 8.3: Όρια κίνησης κάθε άξονα.	62
Πίνακας 10.1: Υπόμνημα.	84

1. Εισαγωγή

1.1. Εξέλιξη της Παραγωγής

Ο κλάδος της παραγωγής ασχολείται με τις διαδικασίες ανάπτυξης εξαρτημάτων, προϊόντων και συστημάτων, κάτι που τον καθιστά έναν από τους σημαντικότερους όσον αφορά τους τομείς ενασχόλησης των μηχανικών. Η βελτίωση του επιπέδου ζωής, η τεχνολογική αναβάθμιση αλλά και η ευημερία ενός κράτους βασίζεται στην εξέλιξη του κλάδου της παραγωγής αναδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο την αξία του [1].

Ένας τρόπος εξέλιξης του κλάδου αυτού είναι η είσοδος της αυτοματοποίησης των διαδικασιών, με στόχο την αύξηση της παραγωγής, τη μείωση του χρόνου που απαιτείται, του κόστους αλλά και της ρύπανση του περιβάλλοντος. Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, αξιοποιούνται πλέον νέα συστήματα, όπως πνευματικά, υδραυλικά, ηλεκτροπνευματικά και ηλεκτροϋδραυλικά μηχανήματα, σε συνδυασμό με ηλεκτρονικούς υπολογιστές (H/Y) και μικροεπεξεργαστές. Η δυνατότητα επαναπρογραμματισμού των H/Y και των μικροεπεξεργαστών ανάλογα με τις απαιτήσεις της παραγωγής, τους έχει καταστήσει αναπόσπαστο κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας [1].

Η εισαγωγή των μηχανών CNC (Computer Numerical Control) άλλαξε ριζικά τη βιομηχανία της παραγωγής. Πλέον, οι καμπύλες τροχιές κοπής αντιμετωπίζονται όπως οι ευθείες, οι σύνθετες τρισδιάστατες (3-D) δομές είναι σχετικά εύκολο να παραχθούν και ο αριθμός των βημάτων μηχανικής κατεργασίας που απαιτούν ανθρώπινη δράση έχει μειωθεί δραματικά. Με την αυξημένη αυτοματοποίηση των διαδικασιών παραγωγής με μηχανές CNC μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές βελτιώσεις στη συνοχή και την ποιότητα των προϊόντων. Ο αυτοματισμός CNC μείωσε τη συχνότητα εμφάνισης σφαλμάτων και παρέιχε στους χειριστές CNC τη δυνατότητα να εκτελέσουν πρόσθετες εργασίες. Επιτρέπει, επίσης, μεγαλύτερη ευελιξία στον τρόπο που συγκρατούνται τα εξαρτήματα στη διαδικασία κατασκευής, κάτι που έχει αντίκτυπο στο χρόνο που απαιτείται για την μεταφορά σε άλλο μηχάνημα, προκειμένου για παραγωγή εξαρτημάτων που απαιτούν τη χρήση άνω των δύο μηχανών. Σε ένα περιβάλλον παραγωγής, μια σειρά μηχανών CNC μπορεί

να συνδυαστεί σε ένα σταθμό εργασιών, κοινώς αποκαλούμενο «κυψέλη», για την προοδευτική κατεργασία ενός εξαρτήματος που απαιτεί τροποποιήσεις από διαφορετικά μηχανήματα [21].

1.2. Computer Numerical Control

Η ιδέα του αριθμητικού ελέγχου (Numerical Control, NC) των εργαλειομηχανών αναπτύχθηκε στα τέλη του 1940 – αρχές του 1950, από τον John T. Parsons της Πολεμικής Αεροπορίας των Η.Π.Α. σε συνεργασία με το Εργαστήριο Σερβομηχανισμών του M.I.T. Το πρώτο σύστημα CNC χρησιμοποιούσε υλικολογισμικό βασισμένο στον αριθμητικό έλεγχο, όπου ο H/Y είχε τον έλεγχο του υπολογισμού της αντιστάθμισης των κοπτικών εργαλείων και μερικές φορές χρησιμοποιούνταν για επεξεργασία του κώδικα. Το ηλεκτρονικό σύστημα της εργαλειομηχανής ελέγχονταν από μια διάτρητη ταινία ανάγνωσης. Αυτό επέτρεψε να φτιαχτούν μια ποικιλία από διάφορα αντικείμενα χρησιμοποιώντας την ίδια μηχανή απλά αλλάζοντας το σχέδιο των οπών (ή προγράμματος) στην ταινία του χαρτιού [21].

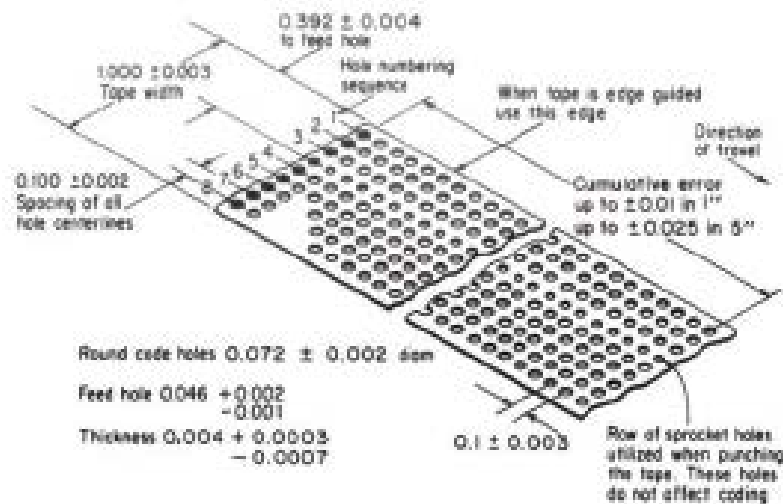
Ο ελεγκτής CNC είναι ο «εγκέφαλος» μιας μηχανής CNC, ενώ η φυσική διαμόρφωση του μηχανήματος είναι ο «σκελετός». Η λεπτομερής κατανόηση της φυσικής διαμόρφωσης μιας εργαλειομηχανής είναι πάντα προτεραιότητα για έναν προγραμματιστή CNC [21].

Οι πρώτες μηχανές NC, οι οποίες συχνά αναφέρονται ως πρώτη γενιά, είχαν σχεδιαστεί για χειροκίνητες ή σταθερά επαναλαμβανόμενες εργασίες. Αυτά τα μηχανήματα είχαν προσθέσει αριθμητικά συστήματα ελέγχου, αλλά μόνο για τον αριθμητικό έλεγχο της εργασίας σε σχέση με το εργαλείο. Σε αυτή την πρώτη φάση εξοικονομούνταν αρκετός χρόνος, αλλά ο χειριστής έπρεπε να επιλέξει τα εργαλεία, τις ταχύτητες και την πρόωση των κοπτικών [21].

Οι μηχανές δεύτερης γενιάς είναι αυτές στις οποίες η απομάκρυνση του υλικού – κατεργασία του αντικειμένου γίνεται ταυτόχρονα με τον έλεγχο της σχέσης εργασίας/κοπτικού εργαλείου. Αυτές οι μηχανές NC ονομάζονταν επίσης μηχανές ελεγχόμενες με ταινία (tape-controlled machines), επειδή οι πληροφορίες αποθηκεύονταν είτε σε διάτρητη είτε σε μαγνητική ταινία (κασέτα). Η Εικόνα 1.1

απεικονίζει τα χαρακτηριστικά ενός τύπου διάτρητης ταινίας. Ακόμη όμως υπήρχαν προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν, όπως ήταν η πολύ δύσκολη επεξεργασία των πληροφοριών στο μηχάνημα και η πολύ περιορισμένη χωρητικότητα μνήμης [21].

Η ανάπτυξη των H/Y έφερε στο προσκήνιο τις μηχανές τρίτης γενιάς, οι οποίες είναι σε θέση να εκτελέσουν μια εκτενή σειρά εργασιών, κάτι που το επέτρεψε η συνεργασία τους με τους νέους H/Y. Αυτές οι εργαλειομηχανές της τρίτης πλέον γενιάς αναφέρονται συνήθως ως μηχανήματα CNC και μερικές φορές ως μηχανήματα άμεσου αριθμητικού ελέγχου (Direct Numerical Control, DNC) [21].



Εικόνα 1.1: Διάτρητη ταινία για έλεγχο εργαλειομηχανής NC.

Οι σύγχρονες μηχανές CNC έχουν ελάχιστες ομοιότητες με τους προκατόχους τους. Με την αυξημένη αυτοματοποίηση των διαδικασιών κατασκευής, χρησιμοποιώντας κατεργασίες βασισμένες στο CNC, έχει επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στη συνοχή και στην ποιότητα [21].

1.3. Έλεγχος Εργαλειομηχανών CNC

Ένα σύστημα CNC συνήθως περιλαμβάνει μια μονάδα ελέγχου της μηχανής (Machine-Control Unit, MCU) και το ίδιο το μηχάνημα. Η MCU χωρίζεται περαιτέρω σε δύο στοιχεία, τα οποία είναι η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων (Data-Processing Unit, DPU) και η μονάδα ελέγχου βρόχων (Control-Loops Unit, CLU).

Η DPU επεξεργάζεται τα κωδικοποιημένα δεδομένα και διαβιβάζει στην CLU πληροφορίες σχετικά με τη θέση κάθε άξονα, την κατεύθυνση της κίνησης, την τροφοδοσία και τις βοηθητικές λειτουργίες. Η CLU λειτουργεί τους κινητήριους μηχανισμούς της μηχανής, λαμβάνει σήματα ανάδρασης σχετικά με την πραγματική θέση και την ταχύτητα κάθε άξονα και στέλνει σήμα όταν ολοκληρωθεί μια λειτουργία. Η DPU διαβάζει διαδοχικά τα δεδομένα όταν έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση κάθε γραμμής, όπως σημειώνεται από την CLU.

Ο πιο ευρέως διαδεδομένος τρόπος ελέγχου είναι μέσω του G κώδικα. Πρόκειται ουσιαστικά για εντολές που είναι δομημένες σε γραμμές δεδομένων [21].

Ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου, όταν πρόκειται για χειροκίνητο προγραμματισμό μίας εργαλειομηχανής CNC, είναι η γλώσσα APT (Automatic Programming Tool). Η εν λόγω γλώσσα είναι ικανή να περιγράψει απλά αντικείμενα, χωρίς τη χρήση σχεδιαστικού προγράμματος 3-D ή κάποιο περιβάλλον γραφικών (Graphics User Interface, GUI). Για πιο περίπλοκα σχήματα όμως, η χρήση προγραμμάτων υποβοηθούμενων από H/Y, είτε CAD (Computer Aided Design) είτε CAM (Computer Aided Manufacturing), κρίνεται μονόδρομος [21].

1.4. Μηχανές CNC

Διαφορετικές εργαλειομηχανές CNC είναι εξειδικευμένες σε διαφορετικές εργασίες μηχανουργικής κατεργασίας. Ένα σύστημα CAD/CAM μπορεί επίσης να υποστηρίξει τις διάφορες διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας. Για παράδειγμα, μπορεί να υποστηρίξει τόνους CNC δύο και τεσσάρων αξόνων, κέντρα κατεργασίας τριών έως πέντε αξόνων και κέντρα μηχανουργικής κατεργασίας με συνδυασμό των ανωτέρω [21].

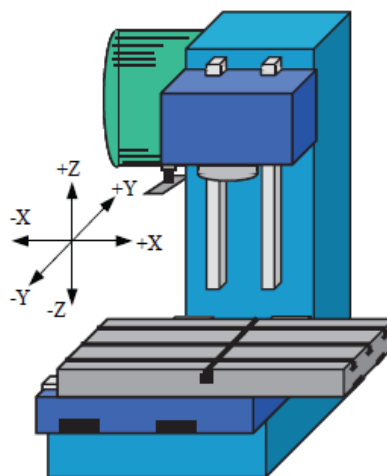
Οι εργαλειομηχανές CNC μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως CNC φρέζες, CNC τόνους και CNC συνδυαστικών λειτουργιών. Είναι ικανές για πολλαπλές λειτουργίες όπως φρεζάρισμα (milling), τόννευση (turning), διάτρηση (drilling), διάνοιξη οπών (boring) και άλλες, ενώ μπορούν να λειτουργούν σε περισσότερες από μία όψεις ενός εξαρτήματος. Όπως το ίδιο το όνομα υπονοεί, τα κέντρα κατεργασίας παρέχουν μεγάλη ευελιξία στη μηχανική κατεργασία των αντικειμένων [21].

Οι μηχανές CNC που παρέχουν συνδυασμό λειτουργιών αποτελούν ένα κέντρο πλήρους μηχανικής κατεργασίας. Αυτά τα μηχανήματα διαθέτουν μικρού μεγέθους περιστρεφόμενους συγκρατητές εδραιωμένους πάνω στην περιστρεφόμενη άτρακτο, έτσι ώστε να μπορούν να εκτελούνται εργασίες φρεζαρίσματος ενώ το αντικείμενο είναι ακόμα τοποθετημένο στο κέντρο τórνευσης.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ενασχόληση με μία φρεζομηχανή, η οποία παρέχει τη δυνατότητα κάθετης αλλά και οριζόντιας κατεργασίας των αντικειμένων, που επιτυγχάνεται μέσω της χειροκίνητης περιστροφής της κύριας ατράκτου, όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

1.5. Άξονες και Σύστημα Συντεταγμένων

Ένα κατακόρυφο κέντρο κατεργασίας έχει την κύρια άτρακτο προσανατολισμένη στην κατακόρυφη θέση. Συνήθως, ένας αυτόματος μηχανισμός αλλαγής εργαλείων είναι τοποθετημένος στο μηχάνημα για να επιτρέπεται η εναλλαγή τους χωρίς την παρέμβαση χειριστή. Τα βασικά κατακόρυφα κέντρα κατεργασίας επιτρέπουν τρεις κατευθύνσεις ή άξονες κίνησης. Η τράπεζα εργασίας μπορεί να μετακινηθεί από αριστερά προς τα δεξιά (άξονας X), και μέσα - έξω ή προς και από τον χειριστή (άξονας Y). Η κεφαλή ή η κύρια άτρακτος μπορούν επίσης να κινούνται προς τα πάνω και προς τα κάτω (άξονας Z). Η Εικόνα 1.2 δείχνει τους τρεις βασικούς άξονες ενός κατακόρυφου κέντρου επεξεργασίας.



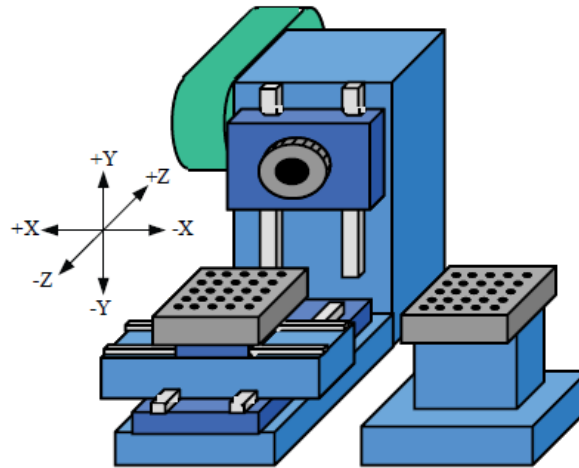
Εικόνα 1.2: Οι τρεις βασικοί άξονες ενός κατακόρυφου κέντρου κατεργασιών. Ανάκτηση από [21].

Ορισμένα κατακόρυφα κέντρα κατεργασίας διαθέτουν περιστρεφόμενη τράπεζα εργασίας ή συγκρατητή τεμαχίων τοποθετημένο πάνω στο τραπέζι για να επιτρέπουν την περιστροφή του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας. Αυτές οι συσκευές επιτρέπουν την κατεργασία περισσότερων από μία επιφάνειων του τεμαχίου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου κατεργασίας. Αυτός ο περιστροφικός άξονας ονομάζεται συνήθως άξονας C ή άξονας B ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης του περιστροφικού άξονα στο μηχάνημα [21].

Ο μεγαλύτερος περιορισμός ενός κατακόρυφου κέντρου κατεργασιών είναι ότι ο άξονας μπορεί να έχει πρόσβαση μόνο στη μία πλευρά του τεμαχίου. Αυτό σημαίνει ότι εάν πρέπει να τροποποιηθούν περισσότερες από μία πλευρές του τεμαχίου, πρέπει να πραγματοποιηθεί μία πιο πολύπλοκη εγκατάσταση στο μηχάνημα. Αυτός είναι επίσης ένας άλλος λόγος για τον οποίο τα κάθετα κέντρα κατεργασιών CNC θεωρούνται ευκολότερα στον προγραμματισμό σε σύγκριση με άλλες μηχανές [21].

Για αυτό το είδος κέντρου κατεργασιών, η κατεύθυνση (συν - μείον) του άξονα Z είναι εύκολο να κατανοηθεί. Καθώς το κοπτικό εργαλείο κινείται πλησιέστερα προς την τράπεζα εργασίας (κάτω), ο άξονας Z κινείται προς την αρνητική κατεύθυνση. Καθώς απομακρύνεται από την τράπεζα εργασίας (προς τα πάνω), κινείται προς τη θετική κατεύθυνση. Ωστόσο, κατά τους άξονες X και Y, το εργαλείο κοπής δεν κινείται. Αντίθετα, υπάρχει κίνηση της τράπεζας. Κατά την εξέταση της κατεύθυνσης του άξονα από την άποψη του προγραμματιστή, είναι καλύτερη η εξέταση της κατεύθυνσης του άξονα σαν να κινείται το εργαλείο. Για να μετακινηθεί το εργαλείο προς τη θετική κατεύθυνση (δεξιά), η τράπεζα πρέπει να μετακινηθεί προς τα αριστερά [21].

Ένα οριζόντιο κέντρο κατεργασίας (Εικόνα 1.3) έχει την κύρια άτρακτο προσανατολισμένη στην οριζόντια θέση. Η κίνηση της τράπεζας από αριστερά προς τα δεξιά, όπως φαίνεται από την κύρια άτρακτο, εξακολουθεί να είναι ο άξονας X. Σε αυτή την περίπτωση η κίνηση της κεφαλής πάνω και κάτω θεωρείται ο άξονας Y. Η κίνηση του τραπεζιού προς και από την άτρακτο είναι ο άξονας Z [21].



Εικόνα 1.3: Οι τρεις βασικοί άξονες ενός οριζόντιου κέντρου κατεργασιών. Ανάκτηση από [21].

Διαφαίνεται ότι η διαμόρφωση για ένα οριζόντιο κέντρο κατεργασιών είναι διαφορετική από εκείνη ενός κάθετου. Ωστόσο, αν παρατηρηθεί το μηχάνημα από την οπτική γωνία ενός κατεργαζόμενου τεμαχίου, η βασική διάταξη για τους άξονες X, Y και Z είναι ουσιαστικά η ίδια και για τους δύο τύπους μηχανών. Αυτό σημαίνει ότι οι κινήσεις (X, Y, και Z) που έχουν προγραμματιστεί για ένα κατακόρυφο κέντρο κατεργασιών θα προκαλέσουν το ίδιο αποτέλεσμα σε ένα οριζόντιο κέντρο επεξεργασίας.

Γενικά, τα οριζόντια κέντρα κατεργασίας απαιτούν περισσότερη προετοιμασία για να προγραμματιστούν από ότι τα κάθετα κέντρα [21].

Επίσης, η διαμόρφωση των αξόνων στα οριζόντια κέντρα δεν αποτελεί γενικό κανόνα και πολλές φορές συναντώνται κατασκευαστές τέτοιων κέντρων με διαφορετική διαμόρφωση των τριών αξόνων.

1.6. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η αρχιτεκτονική ανοιχτού ελέγχου από το παρελθόν έχει απασχολήσει τον επιστημονικό τομέα, λόγω της ποικιλομορφίας που παρουσιάζουν τα μηχανήματα. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική έχει αναλυθεί διεξοδικά όσον αφορά την ιστορική της εξέλιξη [1], αλλά και προτείνεται η καθολική χρήση της [16]. Προσπάθεια ανάπτυξης λογισμικού CNC ανοιχτής αρχιτεκτονικής έχει πραγματοποιηθεί σε θεωρητικό επίπεδο, μέσω μοντελοποίησης της ροής των διαδικασιών, και παράλληλα έχει υπάρξει εφαρμογή της σε τριαξονικό κέντρο κατεργασιών [20].

Αυτού του τύπου οι ελεγκτές ανοιχτής αρχιτεκτονικής, όπως το LinuxCNC (EMC2), εμφανίζουν εκτός από υπέρ και κινδύνους για τον χρήστη, αφού θέτουν θέματα αξιοπιστίας, ασφάλειας και ευκολίας στην τροποποίηση του κώδικα [15]. Με βάση αυτό το λογισμικό έχει γίνει τροποποίηση κέντρου εργασιών και στο παρελθόν [17].

Πάνω στην πλατφόρμα RT Linux έχουν πραγματοποιηθεί ποικίλες μελέτες διασύνδεσης μηχανήματος CNC και H/Y. Μία εφαρμογή αποτελεί ένα CNC πολυαξονικό μηχάνημα ηλεκτροδιάβρωσης (EDM), που παρέχει έλεγχο της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο [1]. Επίσης, σε RT Linux έχει αναπτυχθεί λογισμικό προσανατολισμένου CNC συστήματος, υπό την ονομασία Lin-Soft CNC, αποτελούμενο από τέσσερα επίπεδα που επικοινωνούν μεταξύ τους και τα οποία είναι το επίπεδο του οδηγού, του πραγματικού χρόνου, του μη πραγματικού χρόνου και το περιβάλλον χρήστη [6].

Μία άλλη προσέγγιση είναι η διασύνδεση της μηχανής CNC με λογισμικό πυρήνα κάνοντας χρήση των μοντέλων πόρων και διαδικασιών, μειώνοντας το χρόνο και το κόστος που απαιτείται για την κατασκευή ή τροποποίηση ενός μηχανήματος CNC με αρχιτεκτονική ανοιχτού ελέγχου [12].

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους, μία εναλλακτική του H/Y που προτείνεται είναι η χρήση μικροελεγκτή τύπου Arduino, ο οποίος είναι εφικτό να ελέγξει ταυτόχρονα έως και έξι άξονες, ενώ παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης του G κώδικα από USB [7].

Η ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων λογισμικών CAM/CAPP/CAD και του εκτελεστικού οργάνου CNC έχει φανεί πως είναι καίριας σημασίας. Η ανάλυση αυτού του ζητήματος έχει δείξει ότι το πρότυπο STEP-NC είναι ικανό να παρέχει την απαραίτητη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ αυτών των λογισμικών και του μηχανήματος CNC, ώστε να είναι εφικτή η ολοκληρωτική επεξεργασία ενός κομματιού, που περιλαμβάνει διαδικασίες όπως σχεδιασμό, αυτόματη δημιουργία G κώδικα και εν τέλει κατασκευή, μέσω ενός περιβάλλοντος εργασίας, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε κατεργασίας και των διαθέσιμων μέσων, όπως αριθμός και είδος κοπτικών εργαλείων [1].

Περαιτέρω, έχει γίνει ανάπτυξη συστήματος CNC με αρχιτεκτονική ARM [19], σχεδίαση πραγματικού χρόνου ιεραρχικού δικτύου με τεχνολογία Ethernet/Internet [23] αλλά και μελέτη διασύνδεσης CNC με εργαλειομηχανή μέσω USB, το οποίο αποτελεί το περιβάλλον και πρωτόκολλο επικοινωνίας, με λειτουργικό σύστημα Linux [22].

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1. Βηματικοί Κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες έχουν προσελκύσει το ευρύ κοινό λόγω του απευθείας ελέγχου τους από Η/Υ ή μικροελεγκτές. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι ότι η περιστροφική κίνηση του άξονα πραγματοποιείται μέσω διακριτών γωνιακών διαστημάτων, ή αλλιώς βημάτων, κάθε φορά που λαμβάνεται ένας παλμός. Με αυτόν τον τρόπο, η τροφοδοσία ενός αριθμού παλμών στον κινητήρα, θα έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή του κατά μία γνωστή γωνία. Το γεγονός αυτό τους καθιστά ιδανικούς για έλεγχο θέσης ανοιχτού βρόχου.

2.1.1. Αρχή Λειτουργίας

Ξεκινώντας, η απλοϊκή εξήγηση της αρχής λειτουργίας των βηματικών κινητήρων έγκειται στο ότι ένας άξονας σιδήρου ή χάλυβα συγκρατείται, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι ελεύθερος να περιστρέφεται, μέσα σε μαγνητικό πεδίο, και να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο αυτό. Αν η κατεύθυνση του πεδίου αλλάξει, ο άξονας θα γυρίσει μέχρι να ευθυγραμμιστεί ξανά, λόγω δράσης της επονομαζόμενης ροπής ευθυγράμμισης (reluctance torque) [5].

Στη συντριπτική πλειοψηφία των ηλεκτρικών μηχανών, από DC και επαγωγικούς κινητήρες έως γεννήτριες σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, η ροπή παράγεται από την αλληλεπίδραση ενός μαγνητικού πεδίου (που παράγεται στις περιελίξεις του στάτορα) με αγωγούς μεταφοράς ρεύματος στον δρομέα. Ο τρόπος με τον οποίο η ροπή παράγεται στους εν λόγω κινητήρες είναι μέσω της σχέσης $F=B \cdot i \cdot L$, για τη δύναμη που εμφανίζεται αγωγού μήκους L , που φέρει ρεύμα i κάθετο προς μαγνητική ροή B . Οι μηχανές αυτού του τύπου που εκμεταλλεύονται αυτόν τον μηχανισμό δημιουργίας ροπής δεν εμφανίζουν ροπή ευθυγράμμισης [5].

Η ροπή ευθυγράμμισης προέρχεται από την τάση του άξονα να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο, οπότε εάν ο άξονας μετατοπιστεί από τη θέση ισορροπίας του, εμφανίζεται μια ροπή επαναφοράς. Οι ρότορες των μηχανών που παράγουν ροπή με δράση της ροπής ευθυγράμμισης, είναι ως εκ τούτου σχεδιασμένοι έτσι ώστε ο άξονας να έχει προεξοχές ή «πόλους», που θα

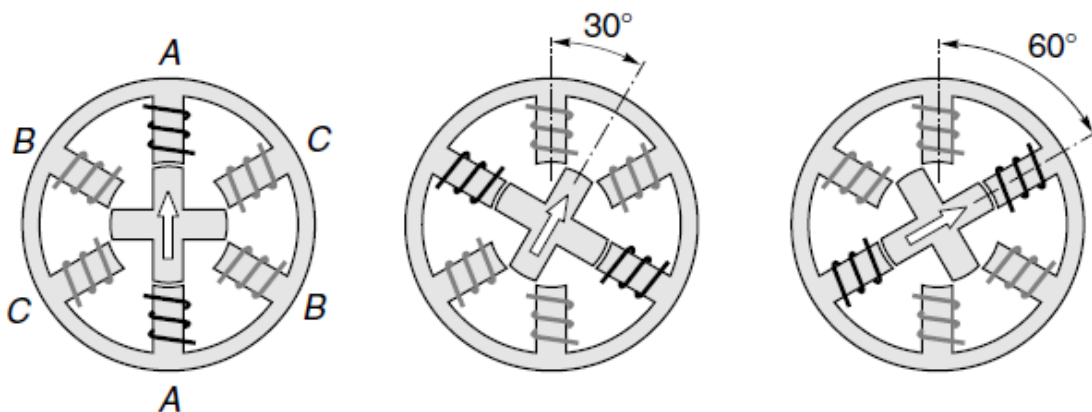
ευθυγραμμίζονται με το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις περιελίξεις του στάτη [5].

Όλη η ροπή παράγεται στη συνέχεια με δράση της ροπής ευθυγράμμισης, επειδή χωρίς αγωγούς στο ρότορα ώστε να μεταφέρεται ρεύμα, δεν υπάρχει ροπή « $B \cdot i \cdot l$ ». Αντίθετα, ο αγωγός στους DC ή στους επαγωγικούς κινητήρες είναι κυλινδρικός, οπότε δεν υπάρχει προτιμώμενος προσανατολισμός του ρότορα, δηλ. καμία ροπή ευθυγράμμισης [5].

2.1.2. Είδη Βηματικών Κινητήρων

Οι δύο πιο σημαντικοί τύποι βηματικών κινητήρων είναι οι μεταβλητής ευθυγράμμισης (Variable Reluctance, VR) και οι υβριδικού τύπου. Ενώ και οι δύο τύποι χρησιμοποιούν την αρχή της ευθυγράμμισης, η διαφορά μεταξύ τους βρίσκεται στη μέθοδο με την οποία παράγονται τα μαγνητικά πεδία [5].

Στον τύπο VR τα πεδία παράγονται αποκλειστικά και μόνο από σύνολα στατικών περιελίξεων μεταφοράς ρεύματος. Ο υβριδικός τύπος έχει επίσης σύνολα στατικών περιελίξεων, αλλά γίνεται προσθήκη ενός μόνιμου μαγνήτη στον ρότορα [5].



Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα VR με βήμα 30°. Ανάκτηση από [5].

Παρόλο που και οι δύο τύποι κινητήρων λειτουργούν με τις ίδιες βασικές αρχές λειτουργίας, αποδεικνύεται στην πράξη ότι ο τύπος VR χρησιμοποιείται για μεγαλύτερες γωνίες βήματος (π.χ., 15°, 30°, 45°), ενώ ο υβριδικός τύπος τείνει να είναι η καλύτερη λύση για εφαρμογές που απαιτούνται μικρές γωνίες (π.χ. 1,8°, 2,5°) [5].

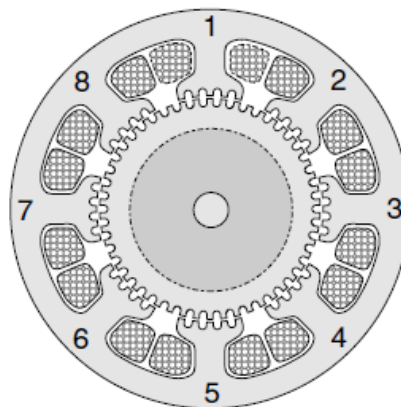


Εικόνα 2.2: Ρότορας υβριδικού τύπου βηματικού κινητήρα. Ανάκτηση από [5].

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται τη χρήση υβριδικού τύπου βηματικών κινητήρων και γι' αυτό το λόγο γίνεται λεπτομερέστερη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας τους στη συνέχεια.

2.1.3. Βηματικοί Κινητήρες Υβριδικού Τύπου

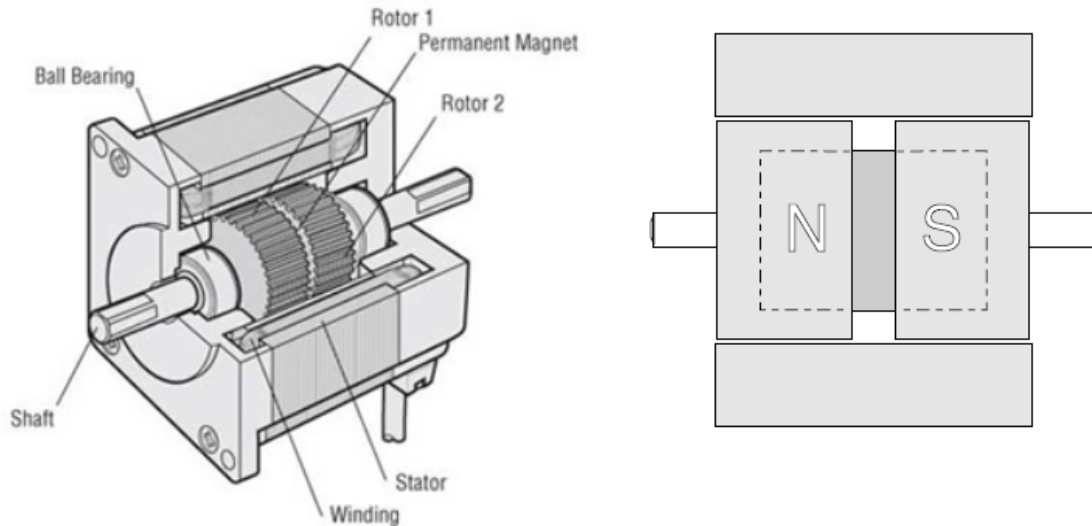
Οι βηματικοί κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν παρέχουν τη δυνατότητα 200 βημάτων ανά περιστροφή, κάτι που μεταφράζεται σε $1,8^\circ$ ανά βήμα του ρότορα. Μία τομή ενός τέτοιου κινητήρα φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2.3: Υβριδικός βηματικός κινητήρας 200 βημάτων ανά περιστροφή. Ανάκτηση από [5].

Όπως φαίνεται, ο στάτορας αποτελείται από 8 πόλους, εκ των οποίων ο καθένας έχει 5 οδόντες και φέρει πηνίο.

Ο ρότορας αποτελείται από δύο χαλύβδινα άκρα, που το καθένα φέρει 50 οδόντες και διαχωρίζονται από μόνιμο μαγνήτη, αξονικά μαγνητισμένος, έτσι ώστε το ένα άκρο να έχει πολικότητα N και το άλλο S [5].



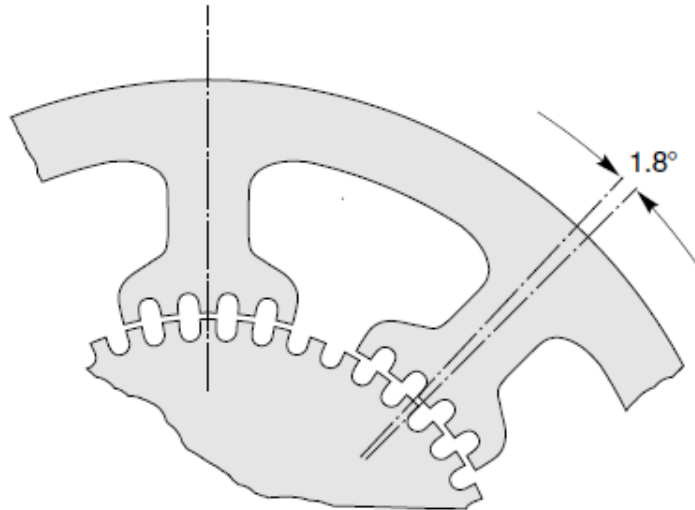
Εικόνα 2.4: Η πολικότητα των δύο άκρων του ρότορα που διαχωρίζονται από τον μόνιμο μαγνήτη. Ανάκτηση από [5].

Η απόσταση των οδόντων είναι κοινή σε στάτορα και ρότορα και είναι τέτοια, ώστε η μεσοκάθετος ενός οδόντα, του ενός άκρου του ρότορα (π.χ. πολικότητας S), να συμπίπτει με τη μεσοκάθετο σχισμής του άλλου άκρου του ρότορα (π.χ. πολικότητας N) [5].

Όταν δεν υπάρχει ροή ρεύματος στις περιελίξεις του στάτορα, η μόνη πηγή μαγνητικής ροής στο διάκενο στάτορα-ρότορα είναι ο μόνιμος μαγνήτης. Η μαγνητική ροή διασχίζει το διάκενο από το άκρο πολικότητας N του ρότορα προς τους πόλους του στάτορα, ρέει αξονικά κατά μήκος του σώματος του στάτορα και επιστρέφει στον μαγνήτη διασχίζοντας το διάκενο προς το άκρο S [5].

Εάν δεν υπήρχε κενό μεταξύ των δύο ομάδων οδόντων του ρότορα, θα υπήρχε μια ισχυρή ροπή που θα προκαλούσε ισχυρή περιοδική ευθυγράμμιση, όταν περιστρέφεται ο ρότορας, και κάθε φορά που ένα σύνολο οδόντων του στάτορα ευθυγραμμίζεται με τα αντίστοιχα του δρομέα, θα προκαλούνταν η λήψη μιας σταθερής θέσης ισορροπίας. Το κενό αυτό, λοιπόν, προκαλεί σχεδόν ολοκληρωτική εξάλειψη της ροπής αυτής που προκαλείται από τον μόνιμο μαγνήτη. Στην πράξη όμως, παραμένει ένα μικρό ποσοστό ροπής συγκράτησης και αυτό μπορεί να γίνει

αισθητό, όταν ο άξονας τείνει να γυρίσει ενώ δεν διαρρέεται από ρεύμα, καθώς τείνει να κινείται στα διακριτά βήματά του. Αυτή η ιδιότητά του χρησιμοποιείται για παράδειγμα, όταν είναι επιθυμητή η ακινητοποίηση του ρότορα, όταν το ρεύμα τίθεται εκτός λειτουργίας, αφού η ροπή αυτή είναι ικανή και αρκετή ώστε να τον συγκρατήσουν στη συγκεκριμένη θέση, χωρίς το φόβο ακούσιας μετακίνησής του [5].



Εικόνα 2.5: Η λεπτομέρεια δείχνει την ευθυγράμμιση του στάτορα με τον ρότορα και σημειώνεται η γωνία των $1,8^\circ$ που σχηματίζεται σε κάθε βήμα. Ανάκτηση από [5].

Τα οκτώ πηνία συνδέονται έτσι ώστε να σχηματίζουν δύο φάσεις. Τα πηνία στους πόλους 1, 3, 5 και 7 σχηματίζουν τη φάση Α, ενώ αυτά στους 2, 4, 6 και 8 σχηματίζουν τη φάση Β. Όταν η φάση Α διαρρέεται από θετικό ρεύμα, οι πόλοι 1 και 5 του στάτορα αποκτούν S πολικότητα και οι πόλοι 3 και 7 Ν. Οι οδόντες του Ν άκρου του ρότορα έλκονται από τους πόλους 1 και 5 του στάτορα, ενώ οι οδόντες του άκρου S του ρότορα έλκονται σε ευθεία με τους οδόντες στους πόλους 3 και 7 του στάτορα. Για να γίνει ένα βήμα του ρότορα, η φάση Α απενεργοποιείται και ενεργοποιείται η φάση Β, είτε με θετικό είτε με αρνητικό ρεύμα, ανάλογα με την απαιτούμενη κατεύθυνση περιστροφής. Αυτό προκαλεί την κίνηση του ρότορα κατά το ένα τέταρτο του βήματος ενός δοντιού (δηλ. $1,8^\circ$) σε μια νέα θέση ισορροπίας (βήμα) [5].

Ο κινητήρας εκτελεί συνεχόμενα βήματα ενεργοποιώντας τις φάσεις σύμφωνα με την ακολουθία + A, -B, -A, + B, +A (δεξιόστροφα) ή + A, + B, -A, -B,

+ A (αριστερόστροφα). Επομένως από τις ακολουθίες αυτές φαίνεται ότι είναι απαραίτητη η χρήση διπολικού τροφοδοτικού, που μπορεί να παρέχει θετικό και αρνητικό ρεύμα. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με αυτό τον τρόπο, αναφέρεται ως «δύο φάσεων, με διπολική παροχή» (2-phase, with bipolar supply) [5].

Εάν δεν είναι διαθέσιμη η διπολική παροχή, το ίδιο μοτίβο ενεργοποίησης των πόλων μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικό τρόπο, με την προϋπόθεση ότι οι περιελίξεις του στάτορα αποτελούνται από δύο πανομοιότυπα πηνία. Για να μαγνητιστεί ο ένας πόλος ως βόρειος (N), τροφοδοτείται θετικό ρεύμα στο ένα σύνολο πηνίων της φάσης A, αλλά για να μαγνητιστεί ο ίδιος πόλος νότιος (S), το ίδιο θετικό ρεύμα τροφοδοτείται στο άλλο σεί των πηνίων της φάσης A, τα οποία έχουν την αντίθετη περιέλιξη. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν τέσσερις ξεχωριστές περιελίξεις, και όταν ο κινητήρας λειτουργεί με αυτό τον τρόπο αναφέρεται ως «τεσσάρων φάσεων, με μονοπολική τροφοδοσία» (4-phase, with unipolar supply). Δεδομένου ότι κάθε περιέλιξη καταλαμβάνει μόνο το ήμισυ του χώρου, η μαγνητεγερτική δύναμη κάθε περιέλιξης είναι η μισή ενός ολόκληρου πηνίου, οπότε η επαγόμενη θερμότητα είναι μειωμένη σε σύγκριση με τη διπολική λειτουργία (κατά την οποία χρησιμοποιείται ολόκληρη η περιέλιξη) [5].

2.2. Πλακέτες Ηλεκτρονικού Κυκλώματος

2.2.1. Εισαγωγή

Μία πλακέτα ηλεκτρονικού κυκλώματος είναι ένα τεχνολογικό προϊόν που επιτρέπει τη συναρμολόγηση και διασύνδεση ηλεκτρικών ή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (αντιστάσεις, πυκνωτές, τρανζίστορ κ.ά.) πάνω σε ένα οριζόντιο υπόστρωμα. Η συνεχής τεχνολογική πρόοδος στις πλακέτες ηλεκτρονικού κυκλώματος έχει οδηγήσει σε νέες μεθόδους μηχανικής κατασκευής και παραγωγής.

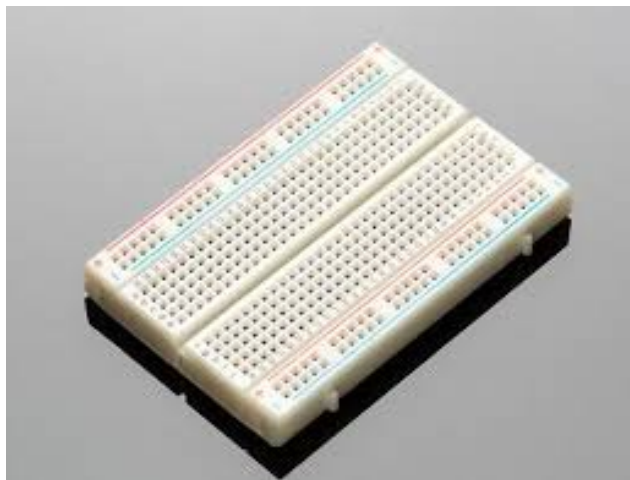
Πριν από την εμφάνιση της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν συχνά την κατασκευή από σημείο σε σημείο για να δημιουργήσουν τέτοιου είδους πλακέτες. Ωστόσο, από τις αρχές του 1900, οι πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος κυριάρχησαν έναντι των άλλων τεχνικών κατασκευής. Στον σχεδιασμό των τυπωμένων κυκλωμάτων, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ποικιλία μεθόδων,

συμπεριλαμβανομένου του φρεζαρίσματος, προκειμένου να χειριστούν το χαλκό και άλλα στρώματα υλικού, ώστε να δημιουργήσουν εξελιγμένα κυκλώματα πάνω σε μία μόνο πλακέτα. Η χημική εγχάραξη και ο χειρισμός των στρωμάτων υλικού με τεχνολογίες λέιζερ είναι άλλοι τρόποι με τους οποίους σχεδιάζονται σύγχρονες πλακέτες κυκλωμάτων [4].

2.2.2. Είδη Πλακετών

Οι τρεις πιο χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι κατασκευής ενός κυκλώματος είναι με πλακέτα δοκιμών (Breadboard), με διάτρητη πλακέτα (Perfboard) και με πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board, PCB). Οι δύο τελευταίοι τύποι πλακετών σχεδιάζονται και κατασκευάζονται για να υλοποιήσουν μία συγκεκριμένη λειτουργία, καθώς οι κολλήσεις είναι μόνιμες [18].

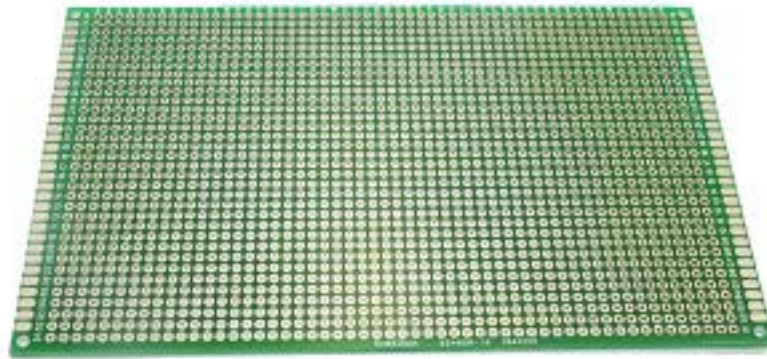
Οι πλακέτες δοκιμών χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός προσωρινού κυκλώματος, με σκοπό την εξομοίωση ενός θεωρητικού μοντέλου. Δεν απαιτείται κόλληση των εξαρτημάτων, είναι εύκολη η αλλαγή των ηλεκτρικών συνδέσεων και η αντικατάσταση των εξαρτημάτων [18].



Εικόνα 2.6: Πλακέτα δοκιμών (Breadboard).

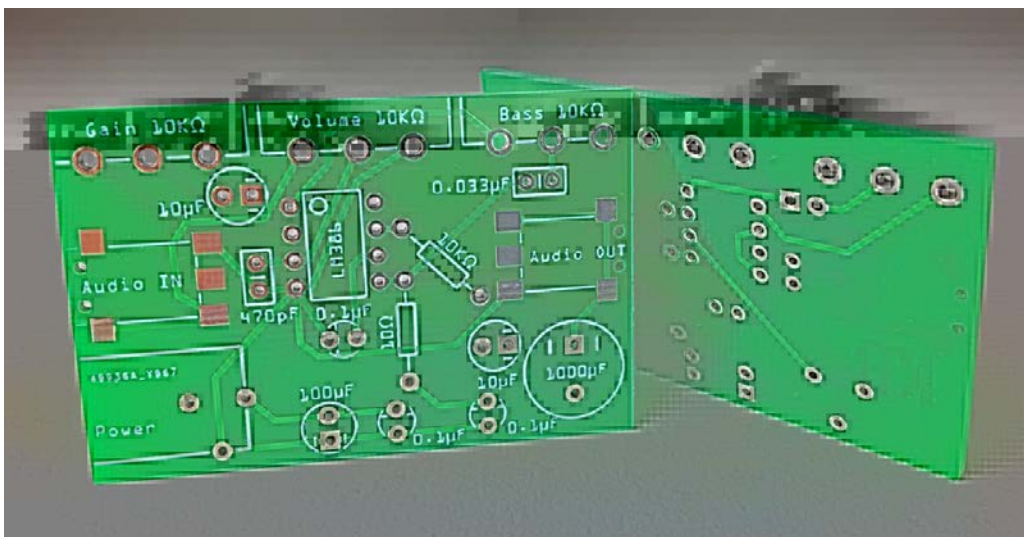
Οι διάτρητες πλακέτες είναι λεπτά φύλλα υλικού FR-2 (φύλλο χαρτιού πλαστικοποιημένο με φαινολική ρητίνη) ή FR-4 (εποξειδικό φύλλο ενισχυμένο με υαλονήματα) με προδιαμορφωμένες τρύπες διαμέτρου 0.9mm σε ένα πλέγμα 0.1in (2.54mm). Οι τρύπες είναι συνήθως επιχρισμένες και από τις δύο πλευρές της

πλακέτας με χαλκό. Από τη στιγμή που κάθε τρύπα είναι απομονωμένη, όλες οι συνδέσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων πρέπει να γίνουν από τον χρήστη [4].



Εικόνα 2.7: Διάτρητη πλακέτα (Perfboard).

Μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος συνδέει ηλεκτρικά τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα χρησιμοποιώντας αγωγικές οδούς χαραγμένες σε ένα ή περισσότερα στρώματα φύλλου χαλκού που είναι τοποθετημένα επάνω ή/και μεταξύ των στρώσεων ενός μη αγωγικού υποστρώματος [4].



Εικόνα 2.8: Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Ανάκτηση από <http://www.circuitbasics.com>.

Η κατασκευή αυτών των πλακετών απαιτεί πρόσθετη προσπάθεια σχεδιασμού του κυκλώματος, αλλά η παραγωγή και η συναρμολόγηση μπορούν να αυτοματοποιηθούν. Για το πρώτο κομμάτι, τον σχεδιασμό δηλαδή του κυκλώματος,

υπάρχει διαθέσιμο εξειδικευμένο λογισμικό CAD. Η μαζική παραγωγή PCBs είναι φθηνότερη και ταχύτερη από ότι με άλλες μεθόδους κατασκευής πλακετών [4].

Οι PCBs μπορούν να είναι μονής όψης (ένα στρώμα χαλκού), διπλής όψης (δύο στρώσεις χαλκού στις δύο πλευρές ενός μη αγώγιμου υποστρώματος) ή πολυστρωματικά (εξωτερικά και εσωτερικά στρώματα χαλκού εναλλασσόμενα με στρώματα μη αγώγιμου υποστρώματος) [4].

Παρά το γεγονός των ποικίλων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος, ο ειδικός εξοπλισμός που απαιτείται προκειμένου να παρασκευαστούν, αλλά και τα απόβλητα της παραγωγικής διαδικασίας [18], καθιστούν τη μέθοδο δύσκολη.

3. Κέντρο Κατεργασιών EMCO F1-CNC

3.1. Εισαγωγή

Η επιτυχία της Αυστριακής εταιρείας EMCO Group, η οποία ιδρύθηκε το 1947, ξεκίνησε με την παραγωγή συμβατικών τόνων. Εντωμεταξύ, η εν λόγω εταιρεία έχει καταλήξει να κατέχει πολύχρονη πείρα, να είναι ενεργή στην τεχνική κατάρτιση ανθρώπινου δυναμικού και να είναι ένας από τους κορυφαίους παραγωγούς στον τομέα της τόννευσης και του φρεζαρίσματος.

Μετά την παραγωγή του τόννου EMCO COMPACT 5 CNC, το οποίο χρησιμοποιούνταν με επιτυχία σε παγκόσμιο επίπεδο για χρόνια, ξεκίνησε η παραγωγή του EMCO F1-CNC, με οδηγό τα ίδια πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν και στον τόννο που αναφέρθηκε.

3.2. Κατασκευαστικά Στοιχεία EMCO F1-CNC

Το κέντρο κατεργασιών που πραγματεύεται η παρούσα εργασία φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 3.1: Γενική άποψη κέντρου κατεργασιών EMCO F1-CNC.

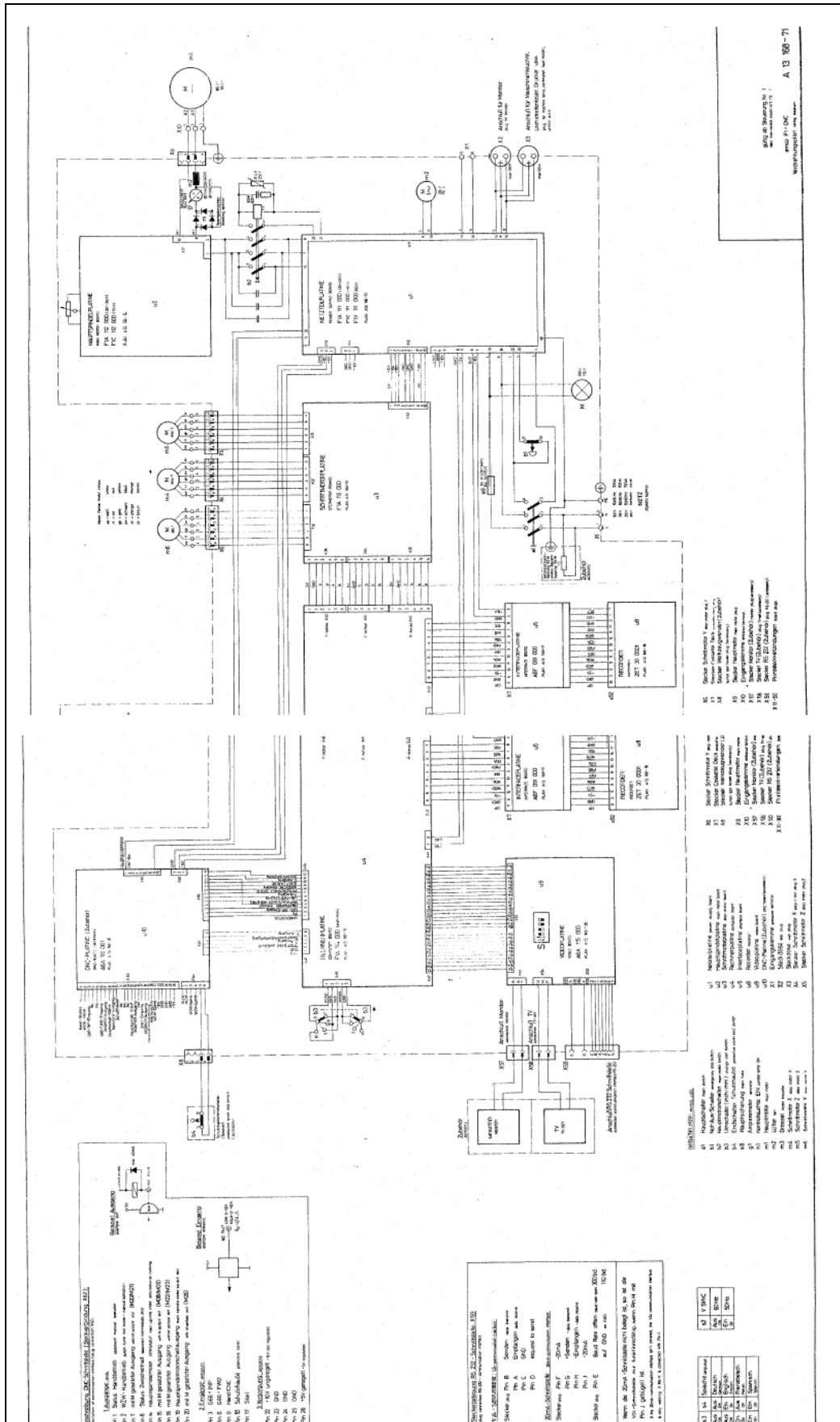
Πρόκειται ουσιαστικά για μία φρέζα τριών αξόνων, X, Y και Z, για την κίνηση των οποίων χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες και γρανάζια μετάδοσης κίνησης.



Εικόνα 3.2: Εμπρόσθια (α) και οπίσθια (β) άποψη του συστήματος.

Η κύρια άτρακτος περιστρέφεται με τη βοήθεια κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC motor), του οποίου η ταχύτητα είναι δυνατό να ελεγχθεί από ποτενσιόμετρο που είναι συνδεδεμένο απευθείας στην οδηγό πλακέτα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος και εδράζεται στην πρόσοψη του κέντρου ελέγχου της μηχανής στην εργοστασιακή της μορφή. Προκειμένου να επιτευχθεί κοπή των διαφόρων τεμαχίων η μηχανή είναι εφοδιασμένη με κατάλληλο συγκρατητή κοπτικών εργαλείων (tool holder/mounting/clamping). Η μηχανή δεν παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης εναλλαγής κοπτικών, η οποία διαδικασία ουσιαστικά γίνεται σταματώντας το πρόγραμμα και κάνοντας τις απαραίτητες ενέργειες στο μεσοδιάστημα.

Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται το ηλεκτρολογικό σχέδιο του εργοστασιακού κέντρου κατεργασιών.



Εικόνα 3.3: Ηλεκτρολογικό σχέδιο εργοστασιακού κέντρου κατεργασιών EMCO F1-CNC.

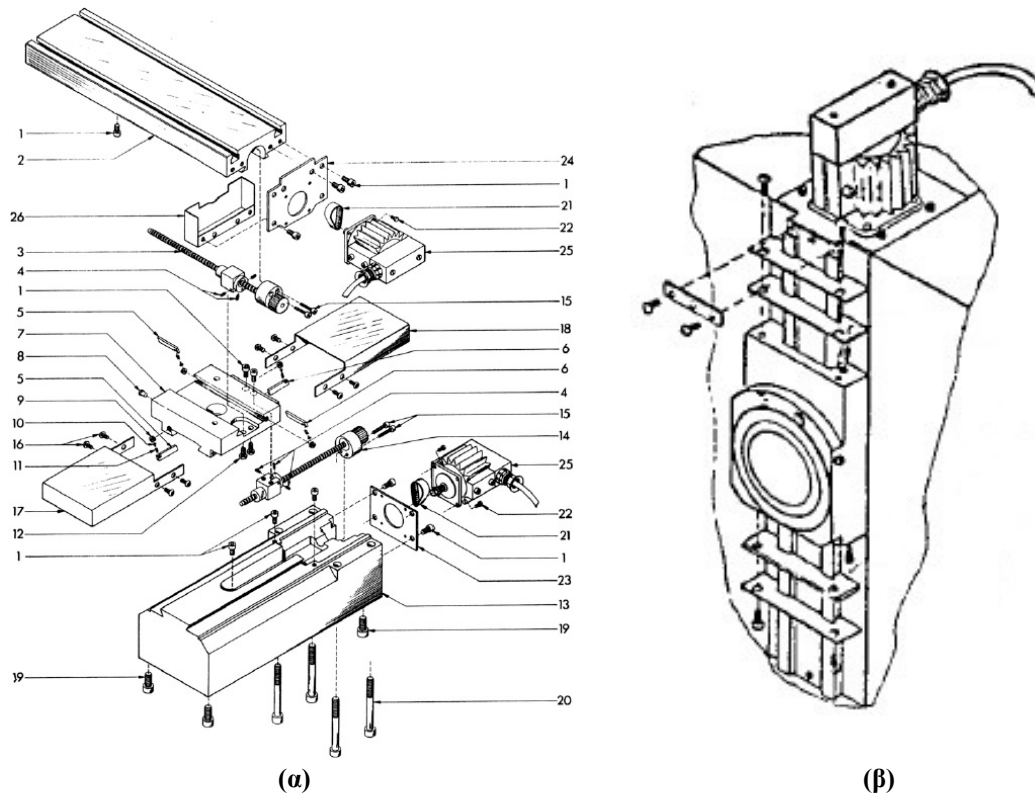
3.3. Τεχνικά Χαρακτηριστικά EMCO F1-CNC

3.3.1. Βηματικοί Κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για την κίνηση των τριών αξόνων X, Y και Z του μηχανήματος. Πρόκειται για διπολικού τύπου (bipolar) της εταιρείας Warner Electric, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5(α). Τα χαρακτηριστικά πρόωσης των βηματικών κινητήρων ήταν όπως παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων.

Τάση λειτουργίας	9 VDC
Ένταση ρεύματος	2 A/φάση
Βήμα	5°
Ροπή (Holding Torque)	4,3 kg-cm (=0.42N-m ή 60 oz-in)
Ταχύτητα πρόωσης	1 – 1200 mm/min
Βηματική ανάλυση	0,001 mm
Δύναμη πρόωσης	1300 N
Ταχεία κίνηση	1200 mm/min



Εικόνα 3.4: Βηματικός κινητήρας (α) X (άνω) και Y(κάτω) άξονα (νούμερο 25), (β) Z άξονα.

Η περιστροφή ενός βηματικού κινητήρα διαιρείται σε επιμέρους βήματα, τα οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 72 (όπως προκύπτει από τη διαίρεση $360^{\circ}/5^{\circ}=72$).

Εάν μετακινηθούν οι άξονες στις οριακές θέσεις ή αντίθετα με την κίνησή τους, θα ακουστεί χαρακτηριστικός ήχος. Ο βηματικός κινητήρας δέχεται ερεθίσματα για περαιτέρω κίνηση, αλλά δεν δύναται να κινηθεί περαιτέρω. Έτσι θα πρέπει να σταματήσει η τροφοδοσία όταν γίνεται εργασία σε χειροκίνητη λειτουργία ή θα πρέπει να διακοπεί η ροή του προγράμματος όταν το μηχάνημα βρίσκεται σε λειτουργία "CNC".

3.3.2. Εγκάρσια, Διαμήκης και Κατακόρυφη Κίνηση

Για την μετατροπή της περιστροφικής κίνησης του βηματικού κινητήρα σε πρισματική για την κίνηση στους τρεις άξονες, γίνεται χρήση υμάντων (timing belts), οι οποίοι μεταφέρουν την περιστροφική κίνηση του κινητήρα σε κοχλίες. Αυτοί με την σειρά τους την μετατρέπουν σε γραμμική, όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα. Μεταξύ του άξονα περιστροφής του κινητήρα και του άξονα περιστροφής του κοχλίου, ο λόγος μετάδοσης είναι 5:2 εφόσον το γρανάζι του κινητήρα φέρει 16 οδόντες ενώ το γρανάζι του ατέρμονα κοχλίου φέρει 40 οδόντες.



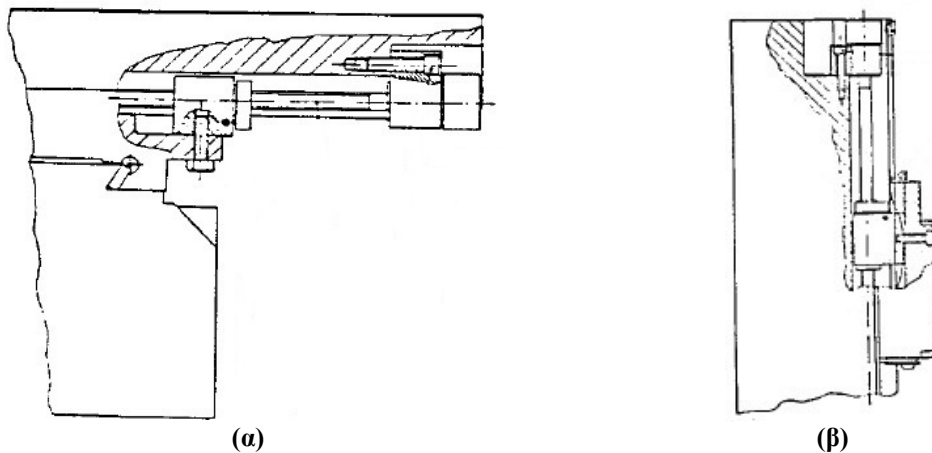
(α)



(β)

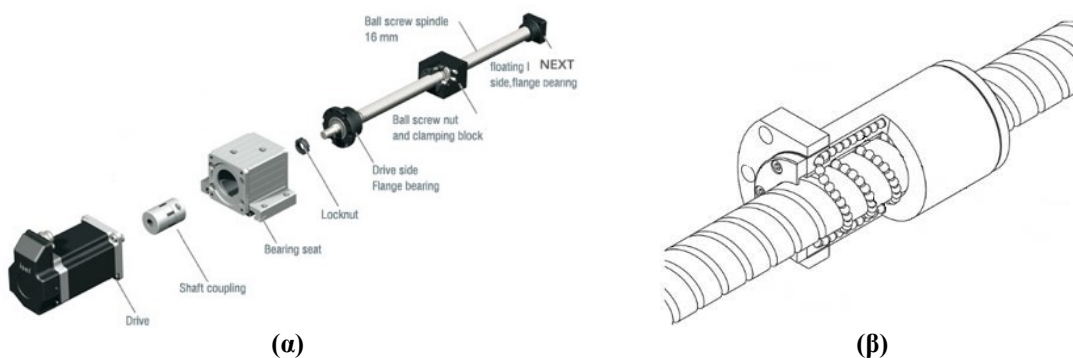
Εικόνα 3.5: Γρανάζι (α) βηματικού κινητήρα και (β) ατέρμονα κοχλίου.

Οι γλίστρες – διάδρομοι (slideways) των τριών αξόνων, πάνω στις οποίες σφηνώνουν και κινούνται η κύρια άτρακτος και η τράπεζα εργασίας κατά τις δύο διευθύνσεις, είναι κατασκευασμένες από υψηλής ποιότητας γκρι χυτοσίδηρο και έχουν ψαλιδωτή μορφή (dovetail guideway). Τα κινούμενα μέρη επί των γλιστρών είναι εφοδιασμένα με δύο ρυθμιζόμενα κωνικά πτερύγια (taper gibs), τα οποία προσφέρουν το σφήνωμα επί των γλιστρών, ώστε να εξασφαλίζεται μηδενική ανοχή και ως εκ τούτου κούνημα των μερών κατά τη λειτουργία, όπου αναπτύσσονται μεγάλες αξονικές δυνάμεις.



Εικόνα 3.6: Σύστημα μετάδοσης κίνησης (α) X και Y άξονα και (β) Z άξονα.

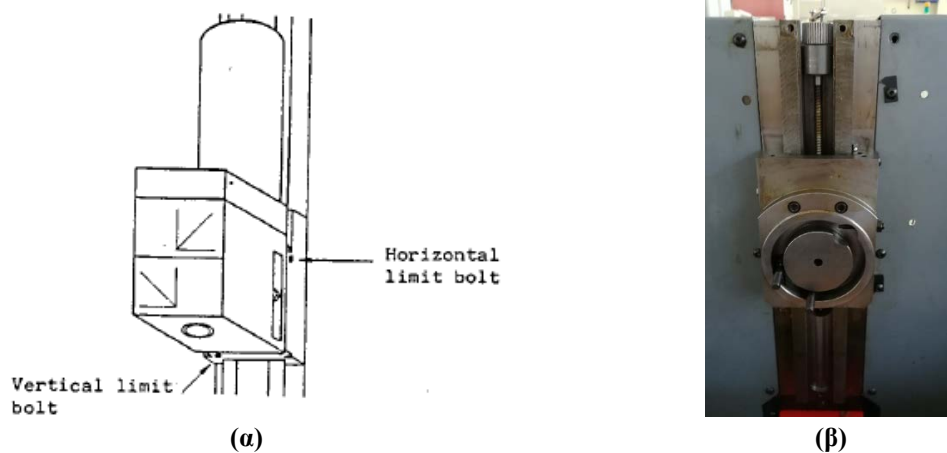
Η υψηλής ακρίβειας γραμμική κίνηση των τριών αξόνων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ατέρμονων κοχλιών εφοδιασμένων με σφαιρίδια (ball screw spindles), τα οποία ανατροφοδοτούνται εσωτερικά ενός στιβαρού συστήματος εδράνου – ρουλεμάν, το οποίο εδράζεται επί των κινούμενων μερών.



Εικόνα 3.7: (α) Σύστημα μετάδοσης κίνησης από βηματικό κινητήρα (αριστερά) σε ατέρμονα κοχλία και (β) μεγέθυνση τρόπου λειτουργίας ατέρμονα κοχλία με σφαιρίδια (ball screw spindle).

3.3.3. Κύρια Άτρακτος

Η κύρια άτρακτος κινείται κατά τον άξονα Z, πάνω σε γλίστρες, οι οποίες είναι κατάλληλα γρασαρισμένες, ώστε να υπάρχει η κατάλληλη τριβή, για την απρόσκοπτη λειτουργία της φρέζας. Επίσης, η κύρια άτρακτος έχει τη δυνατότητα περιστροφής κατά 90°, με σκοπό την οριζόντια κατεργασία τεμαχίων όποτε απαιτείται. Για τη συγκεκριμένη λειτουργία απαραίτητη ήταν η αντίστοιχη επιλογή αξόνων, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω στην περιγραφή των κομβίων της εμπρόσθιας όψης της μονάδας ελέγχου.



Εικόνα 3.8: (α) Κύρια άτρακτος και (β) περιοχή έδρασης κύριας ατράκτου στον άξονα Z.

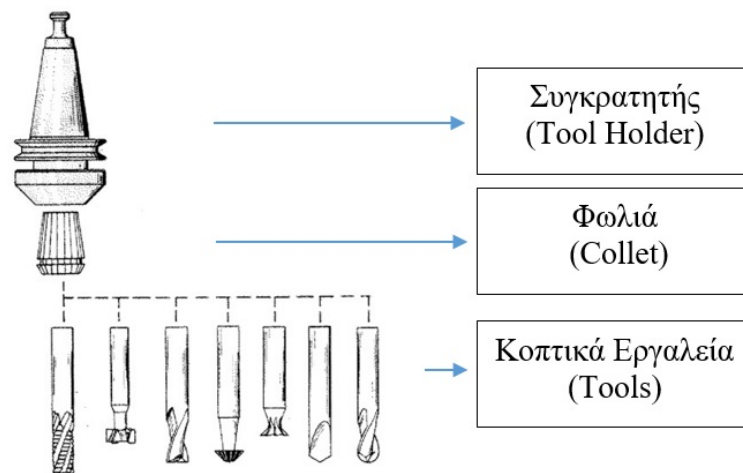
Η κύρια άτρακτος περιλαμβάνει τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος με φάσμα στροφών από 150 έως 4000rpm και έχει ισχύ εξόδου 550W στις 4000rpm.



Εικόνα 3.9: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος κυρίας ατράκτου. Διακρίνεται ο ιμάντας μετάδοσης κίνησης προς τον συγκρατητή κοπτικών εργαλείων.

Το αμπερόμετρο που βρίσκεται στη μονάδα ελέγχου της φρέζας δείχνει την πραγματική κατανάλωση ρεύματος του DC κινητήρα.

Ο κινητήρας DC συνδέεται με τον υποδοχέα του συγκρατητή των κοπτικών εργαλείων μέσω συστήματος τροχαλίας – ιμάντα (Εικόνα 3.9). Ο υποδοχέας δέχεται συγκρατητή κοπτικών εργαλείων σύμφωνα ή παρόμοιος με το πρότυπο DIN 2079. Ο εργοστασιακός συγκρατητής και η φωλιά κοπτικών (collet) ήταν τύπου SK 30.



Εικόνα 3.10: Συγκρατητής κοπτικών εργαλείων με φωλιά και κοπτικά εργαλεία.

3.3.4. Τράπεζα Εργασίας

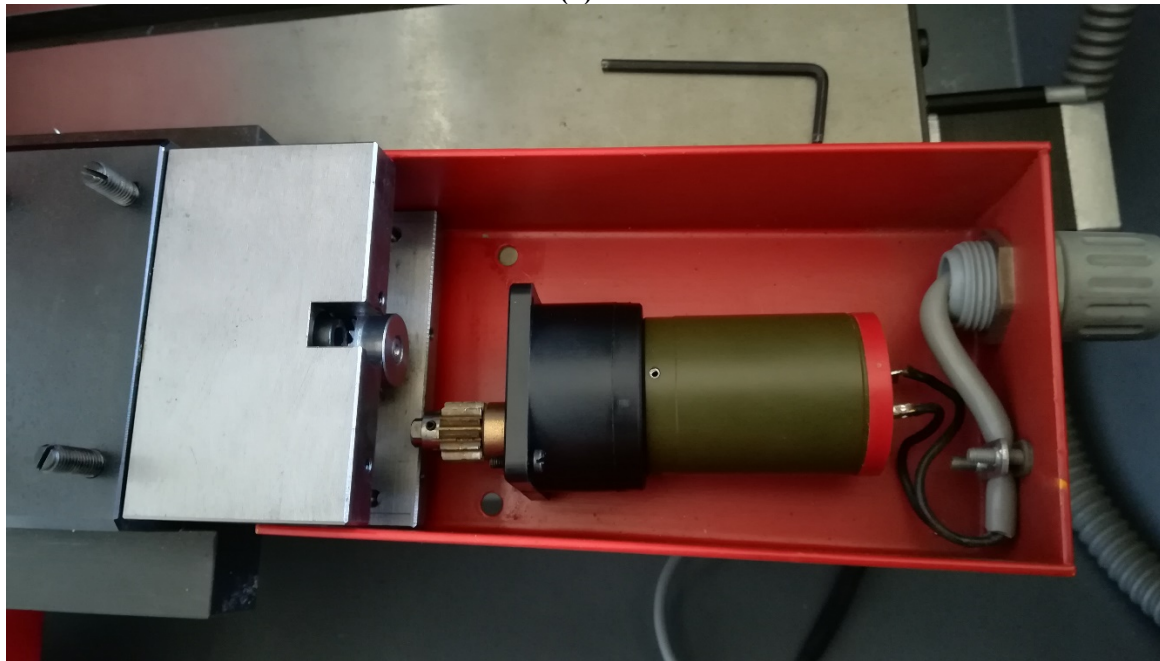
Το βασικό χαρακτηριστικό της τράπεζας εργασίας είναι οι διαστάσεις της, οι οποίες καθορίζουν και τις μέγιστες αρχικές διαστάσεις των τεμαχίων προς κοπή. Αυτές ήταν 200mm κατά τον άξονα X, 100mm κατά τον άξονα Y και 200mm κατά τον άξονα Z. Αυτές οι διαστάσεις δεν άλλαξαν μετά το τέλος της ανακατασκευής.

Επί της τράπεζας εργασίας βρίσκεται ηλεκτρική μέγγενη, η οποία έχει δυνατότητα συγκράτησης τεμαχίων μήκους περίπου 100mm. Η συγκεκριμένη μέγγενη λειτουργούσε με τη βοήθεια κινητήρα Maxon, συνδεδεμένος σε πλακέτα του εργοστασιακού κέντρου ελέγχου της μηχανής.

Βέβαια, υπάρχει πληθώρα δυνατοτήτων σύσφιξης τεμαχίων λόγω της ειδικής διαμόρφωσης της τράπεζας με ράγες.



(α)



(β)

Εικόνα 3.11: (α) Ηλεκτρική μέγγενη και (β) ο κινητήρας συνεχούς που κινεί την μέγγενη.

3.4. Προγραμματισμός EMCO F1-CNC

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ο προγραμματισμός του κέντρου κατεργασιών EMCO F1-CNC γίνεται σε τρεις άξονες X, Y και Z, είτε χειρωνακτικά είτε μέσω εντολών στον ενσωματωμένο εργοστασιακό μικροϋπολογιστή. Ο έλεγχος της φρέζας γίνεται μέσω εντολών G και M κώδικα, οι οποίες εισάγονται μέσω του πληκτρολογίου και εμφανίζονται στην οθόνη, οι οποίες διακρίνονται στην πρόσοψη του μηχανήματος στην Εικόνα 3.12.

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια η εμπρόσθια όψη του κέντρου ελέγχου της φρεζομηχανής.



Εικόνα 3.12: Εμπρόσθια (α) και οπίσθια (β) άποψη του κέντρου ελέγχου.

Ακολουθώς περιγράφονται τα κομμάτια τα οποία βρίσκονται επί της πρόσοψης της εργοστασιακής μηχανής:

- 1) Διακόπτης επιλογής συστήματος αξόνων και μετρητικού συστήματος. Το μετρητικό σύστημα μπορεί να είναι είτε χιλιοστά (mm) είτε ίντσες (inches) και επιλέγεται από το χρήστη ανάλογα με την εκάστοτε χρήση του μηχανήματος.
- 2) Κύριος διακόπτης. Μετακινώντας το κλειδί από την θέση 0 στη θέση 1 το μηχάνημα και το σύστημα ελέγχου ενεργοποιούνται.
- 3) Λαμπτήρας λειτουργίας. Όταν το μηχάνημα ενεργοποιείται το λαμπάκι ανάβει με χαρακτηριστικό πράσινο χρώμα.
- 4) Κουμπί έκτακτης ανάγκης (κοινώς λεγόμενο «μανιτάρι»). Με το πάτημα του κουμπιού μηδενίζεται το ρεύμα που τροφοδοτεί τους κινητήρες των τριών αξόνων, τον κινητήρα περιστροφής της ατράκτου και τη μονάδα ελέγχου. Προκειμένου να αποδεσμεύσουμε το κουμπί έκτακτης ανάγκης το στρέφουμε προς τα αριστερά και στη συνέχεια ανοίγουμε πάλι το κύριο κουμπί.
- 5) Οθόνη στην οποία παρουσιάζεται η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου του τόνου.
- 6) Κουμπί ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της ατράκτου με τις χαρακτηριστικές τιμές 0 και 1 καθώς και μια θέση με την ένδειξη CNC για λειτουργία σε κατάσταση μηχανής CNC.
- 7) Ποτενσιόμετρο ρύθμισης των στροφών με τις οποίες περιστρέφεται η κύρια άτρακτος.

- 8) Αμπερόμετρο για τον κινητήρα κίνησης της ατράκτου. Το αμπερόμετρο δείχνει την πραγματική κατανάλωση ρεύματος του κινητήρα. Για την προστασία του κινητήρα από υπερφόρτωση, η κατανάλωση ρεύματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 4A σε συνεχή λειτουργία.
- 9) Υποδοχή τοποθέτησης κασέτας αναπαραγωγής του προγράμματος. Η τεχνολογία αυτή ήταν συνηθισμένη σε μηχανήματα παλαιότερων χρόνων αλλά σήμερα έχει εξαλειφθεί τελείως.
- 10) Κουμπί επιλογής λειτουργίας: είτε χειροκίνητης είτε αυτόματης μέσω προγράμματος. Υπάρχει και αντίστοιχη λυχνία ένδειξης.

Τα βασικά κουμπιά που υπάρχουν στο πληκτρολόγιο της φρέζας, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό του ενώ παρουσιάζονται και εξηγούνται στον παρακάτω πίνακα. Τα κουμπιά αυτά χρησιμοποιούνται κατά την χειροκίνητη λειτουργία της μηχανής.

Πίνακας 3.2: Επεξήγηση Βασικών πλήκτρων του κέντρου ελέγχου της φρέζας EMCO F1-CNC.

Πλήκτρο	Ενέργεια
NUMBERS	Εισάγει τιμές για το G, X, Z και F
-	Εισάγει αρνητικές τιμές για τις συντεταγμένες X, Y και Z. Το σύμβολο αυτό ακολουθεί τον αριθμό που πληκτρολογήθηκε.
INP	Κουμπί εισόδου. Εισάγει τιμή στην οθόνη από τη μνήμη του υπολογιστή.
DEL	Κουμπί διαγραφής. Διαγράφει τις τρέχουσες τιμές που φαίνονται εκτός από τον αύξων αριθμό του block.
FWD	Κουμπί Forward. Μεταφέρει την οθόνη ένα block προς τα εμπρός.
REV	Κουμπί Reverse. Μεταφέρει την οθόνη ένα block προς τα πίσω.
→	Μεταφέρει την οθόνη στην επόμενη λέξη.
INP+FWD	Σταματάει το πρόγραμμα στη φάση που βρίσκεται. Το πρόγραμμα μπορεί να ξεκινήσει από εκεί που σταμάτησε πατώντας το πλήκτρο START.
INP+REV	Σταματάει το πρόγραμμα στη φάση που βρίσκεται. Το πρόγραμμα μπορεί να ξεκινήσει από την αρχή πατώντας το πλήκτρο START.
DEL+REV	Διαγράφει έναν κωδικό σφάλματος. Η εσφαλμένη τιμή θα εμφανιστεί.
DEL+INP	Διαγράφει εξ ολοκλήρου το τρέχον πρόγραμμα από τη μνήμη του υπολογιστή.
START	Εκτελείται ένα πρόγραμμα που βρίσκεται στη μνήμη του υπολογιστή.

Στα πλαίσια ανακατασκευής του κέντρου κατεργασιών, πολλά από όλα τα ανωτέρω κουμπιά θα καταργηθούν τελείως και οι διαδικασίες που επιτελούσαν θα εκτελούνται μέσω κατάλληλου λογισμικού.

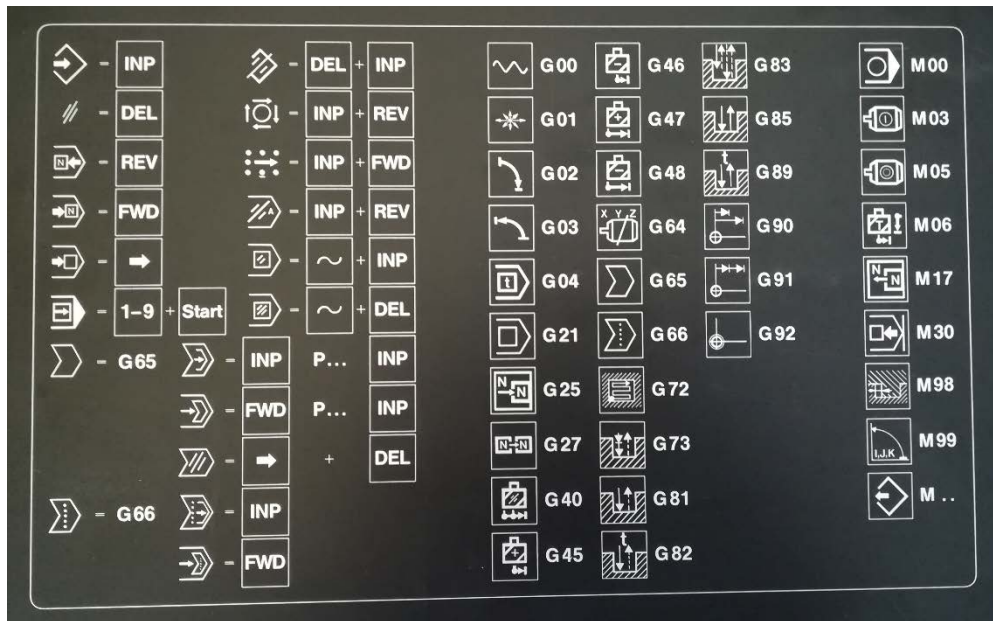
Οι εντολές G και M κώδικα οι οποίες υποστηρίζονται από το μηχάνημα είναι αυτές που φαίνονται και επεξηγούνται ακολούθως. Με το λατινικό γράμμα «F» δηλώνεται η πρόωση (feed rate) σε mm/min, με το «S» η ταχύτητα περιστροφής (spindle speed), με το «T» η επιλογή κοπτικού εργαλείου, με το «N» ο αύξων αριθμός του block, ενώ με τα «X/Y/Z» η κατεύθυνση κίνησης του ανάλογου άξονα.

Πίνακας 3.3: Ρεπερτόριο G κώδικα και λειτουργία που υποστηρίζει η φρέζα.

G-κώδικας	Λειτουργία
G00	Ταχεία κίνηση ή κίνηση λήξης θέσης
G01	Γραμμική κίνηση
G02	Κυκλική κίνηση ωρολογιακά
G03	Κυκλική κίνηση αντιωρολογιακά
G04	Αναμονή
G21	Κενή γραμμή
G25	«Κάλεσμα» υπο-ρουτίνας
G27	Εντολή μετάβασης
G40	Ακύρωση Αντιστάθμισης ακτίνας κοπτικού εργαλείου
G45	Προσθήκη ακτίνας κοπτικού εργαλείου
G46	Αφαίρεση ακτίνας κοπτικού εργαλείου
G47	Προσθήκη ακτίνας κοπτικού εργαλείου εις διπλούν
G48	Αφαίρεση ακτίνας κοπτικού εργαλείου εις διπλούν
G64	Βηματικός κινητήρας χωρίς ισχύ
G65	Λειτουργία μαγνητικής κασέτας
G66	Λειτουργία σύνδεσης RS232
G72	Διάνοιξη κυκλικού θυλακίου
G73	Κύκλος διάτρησης με γρεξοσπάστη
G81	Κύκλος διάτρησης
G82	Κύκλος διάτρησης με καθυστερητή
G83	Κύκλος διάτρησης με ανάκληση
G85	Κύκλος διεύρυνσης οπών
G89	Κύκλος διεύρυνσης οπών με καθυστερητή
G90	Απόλυτες συντεταγμένες
G91	Βηματικές συντεταγμένες
G92	Ορισμός XYZ καταχωρητή

Πίνακας 3.4: Ρεπερτόριο M κώδικα και λειτουργία που υποστηρίζει η φρέζα.

M-κώδικας	Λειτουργία
M00	Παύση
M03	Περιστροφή ατράκτου ωρολογιακά
M05	Διακοπή περιστροφής ατράκτου
M06	Εισαγωγή ακτίνας κοπτικού εργαλείου
M17	Επιστροφή στο κύριο πρόγραμμα
M30	Τέλος προγράμματος
M98	Αντιστάθμιση εργασιών
M99	Παράμετροι κυκλικής παρεμβολής



Εικόνα 3.13: Εντολές που δέχεται το κέντρο κατεργασιών όπως φαίνονται στην πρόσοψη του κέντρου ελέγχου του.

Εάν επιλεγθεί χειροκίνητη εισαγωγή προγράμματος μέσω του πληκτρολογίου, οι εντολές εισάγονται σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά:

- 1) Πληκτρολόγηση INP, ώστε να εισαχθεί ο αριθμός ακολουθίας (N)
- 2) Εισαγωγή G-κώδικα
- 3) Πληκτρολόγηση INP
- 4) Εισαγωγή τιμής για X άξονα (προαιρετικά)
- 5) Πληκτρολόγηση INP
- 6) Εισαγωγή τιμής για Y άξονα (προαιρετικά)
- 7) Πληκτρολόγηση INP

- 8) Εισαγωγή τιμής για Z άξονα (προαιρετικά)
- 9) Πληκτρολόγηση INP
- 10) Εισαγωγή τιμής για F (προαιρετικά)
- 11) Πληκτρολόγηση INP
- 12) Στην οθόνη εμφανίζεται αυτόματα ο επόμενος άξων αριθμός

4. LinuxCNC

4.1. Εισαγωγή

Το LinuxCNC (πρώην Enhanced Machine Controller ή EMC2) ξεκίνησε στο Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των Η.Π.Α. (National Institute of Standards and Technology, USA), βασιζόμενο σε χρήση των Unix ως λειτουργικό σύστημα. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι σχεδιασμένο από διάφορους εθελοντές προγραμματιστές του linuxcnc.org και είναι συνήθως πακεταρισμένο ως ένα αρχείο ISO με μια τροποποιημένη έκδοση του 32-bit Ubuntu Linux [10].

Αποτελεί ένα δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα με τις τρέχουσες εκδόσεις του να είναι αδειοδοτημένες υπό την GNU General Public License και την Lesser GNU General Public License (GPL και LGPL). Το LinuxCNC είναι σχεδιασμένο για να υλοποιεί την αριθμητική ικανότητα ελέγχου που χρησιμοποιούν όλοι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές γενικής χρήσης για τον έλεγχο εργαλειομηχανών, όπως φρέζες και τόννους, ρομποτικών συστημάτων, όπως PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) και SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm), καθώς και άλλες μηχανές που ελέγχονται μέσω H/Y [10].



Εικόνα 4.1: Εικόνα λογότυπου LinuxCNC. Ανάκτηση από [10].

4.2. Λογισμικό

Το λογισμικό LinuxCNC παρέχει στον χρήστη ποικίλες λειτουργίες, όπως περιγράφονται ακολούθως [8]:

- Γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη με πολλές δυνατότητες επιλογής από τον ίδιο τον χρήστη

- Μεταγλωττιστή (interpreter) του G-κώδικα (γλώσσα προγραμματισμού RS-274)
- Σύστημα παρακολούθησης κίνησης των αξόνων της μηχανής σε πραγματικό χρόνο μέσω του γραφικού περιβάλλοντος
- Έλεγχο λειτουργίας των ηλεκτρονικών χαμηλού επιπέδου του μηχανήματος, όπως αισθητήρες και κινητήρες
- Ευκολία στη χρήση και με γρήγορη δημιουργία και διαμόρφωση των ρυθμίσεων (configuration) για την κάθε εργαλειομηχανή
- Προγραμματιζόμενο PLC λογισμικό με κλιμακωτά διαγράμματα (ladder)
- Εύκολο τρόπο εγκατάστασης του λογισμικού μέσω του Live – CD

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι το εν λόγω λογισμικό δεν παρέχει τη δυνατότητα ούτε σχεδίασης (CAD), ούτε αυτόματης παραγωγής G-κώδικα (CAM) [8].

Το σύστημα ελέγχου είναι ικανό να ελέγχει είτε σερβοκινητήρες (αναλογικού τύπο ή PWM) κλειστού βρόχου, με το σύστημα ανάδρασης να κλείνει μέσω του λογισμικού στον Η/Υ, είτε ανοιχτού βρόχου, χρησιμοποιώντας βηματικούς κινητήρες [8].

Χαρακτηριστικά του ελέγχου κίνησης περιλαμβάνουν αντιστάθμιση ακτίνας και μήκους κοπτικού εργαλείου, απόκλιση διαδρομής με συγκεκριμένες ανοχές, κατασκευή σπειρώματος σε τόρνο, συγχρονισμένη κίνηση αξόνων, προσαρμοστική ταχύτητα πρόωση κοπτικού εργαλείου (adaptive feed rate), παράκαμψη του ρυθμού πρόωσης από τον χρήστη και συνεχή έλεγχο της ταχύτητας [8].

Το λογισμικό αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη [10]:

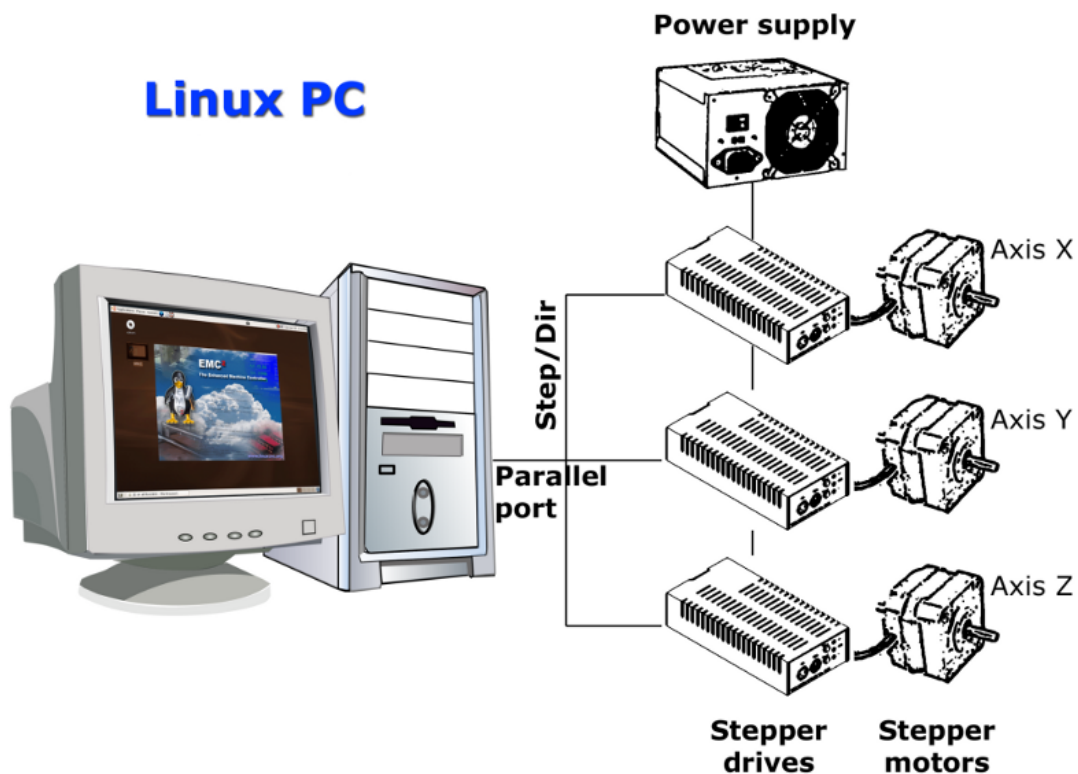
- Έναν ελεγκτή κίνησης (EMCMOT)
- Έναν διακριτό ελεγκτή I/O (EMCIO)
- Έναν εκτελεστή εργασιών που συντονίζει τους ανωτέρω ελεγκτές (EMCTASK)
- Ένα, ανάμεσα σε πολλά, γραφικό περιβάλλον χρήστη

Επιπλέον, υπάρχει ένα προγραμματιζόμενο επίπεδο που ονομάζεται HAL (Hardware Abstraction Layer), το οποίο επιτρέπει τη διαμόρφωση του λογισμικού LinuxCNC, χωρίς την ανάγκη αρχικής επανασύνταξης του προγράμματος [8].

4.3. Τρόπος Λειτουργίας

Ένα τυπικό παράδειγμα τρόπου λειτουργίας του λογισμικού LinuxCNC φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, όπου παρουσιάζεται ο έλεγχος ενός συστήματος τριών αξόνων [8].

Σε Η/Υ, εφοδιασμένος με λειτουργικό σύστημα Linux, τρέχει το λογισμικό LinuxCNC, το οποίο ελέγχει τους οδηγούς των βηματικών κινητήρων αποστέλλοντας σήματα (παλμούς) μέσω παράλληλης θύρας (DB-25). Αυτά τα σήματα είναι που αναγκάζουν τους οδηγούς των βηματικών κινητήρων να κινηθούν τους βηματικούς κινητήρες [8].



Εικόνα 4.2: Απλοποιημένο διάγραμμα ελέγχου εργαλειομηχανής με LinuxCNC. Ανάκτηση από [8].

5. Ανακατασκευή Αξόνων Κίνησης

5.1. Εισαγωγή

Προκειμένου να εκσυγχρονιστεί η μηχανή EMCO F1, κρίθηκε αναγκαία η αντικατάσταση των βηματικών κινητήρων (stepper motors) και των οδηγών τους (drivers) και η τοποθέτηση τερματικών διακοπών (limit switches) σε κάθε άξονα.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι λόγοι που οδήγησαν στην αντικατάσταση των βηματικών κινητήρων και ο σκοπός που εξυπηρετούν οι τερματικοί διακόπτες.

Στο Παράρτημα Β φαίνεται σε 3-D απεικόνιση η προσομοίωση της φρέζας και η τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων επί του ανακατασκευασμένου κέντρου κατεργασιών.

5.2. Βηματικοί Κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν ήταν της εταιρείας Wantai Motors. Και στους τρεις άξονες χρησιμοποιήθηκαν πανομοιότυποι κινητήρες με χαρακτηριστικά όπως αυτά φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.



Εικόνα 5.1: Βηματικός κινητήρας της Wantai Motors που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά βηματικών κινητήρων της Wantai Motors.

Τάση λειτουργίας	3,6 VDC
Ένταση ρεύματος	2 A/φάση
Βήμα	1,8°
Ροπή (Holding Torque)	9 kg-cm (=0.88N-m ή 125 oz-in)
Πρότυπο Nema ¹	23

¹ National Electrical Manufacturers Association, NEMA. Πρόκειται για πρότυπο που χαρακτηρίζει τα είδη των σερβοκινητήρων, βηματικών κινητήρων, συσκευών ανατροφοδότησης και ελέγχου για χρήση σε συστήματα ελέγχου θέσης και κίνησης [11].

Ο πρώτος λόγος αντικατάστασής τους αποτελεί η παλαιότητα και η αμφίβολη λειτουργία τους. Επιπλέον οι νέοι βηματικοί παρέχουν μεγαλύτερη ροπή, σχεδόν διπλάσια, και μικρότερο βήμα, ήτοι $1,8^\circ$, σε σύγκριση με τους αρχικούς που είχαν βήμα 5° . Αυτό σημαίνει ότι πλέον ο κινητήρας διαθέτει 200 βήματα ανά περιστροφή και όχι 72.

Μαζί με τους βηματικούς κινητήρες απαραίτητη ήταν και η αντικατάσταση των οδηγών τους (drivers) με την τοποθέτηση κατάλληλου τροφοδοτικού (power supply).



Εικόνα 5.2: (α) Οδηγός βηματικού κινητήρα και (β) τροφοδοτικό των οδηγών.

Βασικά χαρακτηριστικά των οδηγών και του τροφοδοτικού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά οδηγού βηματικών κινητήρων και τροφοδοτικού.

Οδηγός Βηματικών Κινητήρων		Τροφοδοτικό	
Τάση Εισόδου	18 ~ 50 VDC	Τάση Εισόδου	85 ~ 132VAC / 170 ~ 264VAC
Ένταση Ρεύματος Εισόδου	<4 A	Τάση Εξόδου	36 V
Ένταση Ρεύματος Εξόδου	1 ~ 4,2A	Ένταση Ρεύματος Εξόδου	4,3 A

Οι νέοι βηματικοί παρέχουν επίσης πιο εύκολη διασύνδεση με τους νέους οδηγούς τους, καθώς δεν διατίθονταν το ηλεκτρολογικό διάγραμμα των παλιών αλλά ούτε και της ειδικής εργοστασιακής πλακέτας που είχε κατασκευαστεί ειδικά για

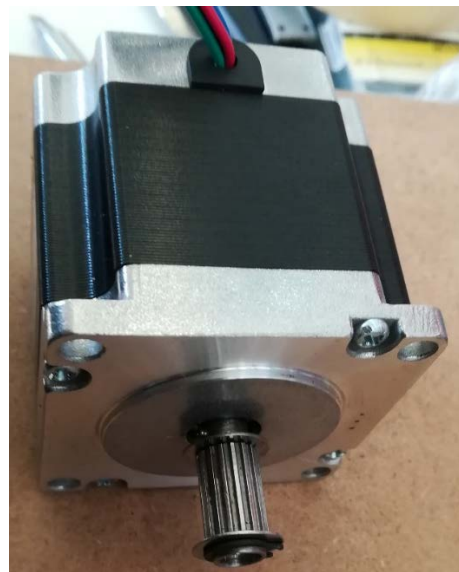
αυτούς τους αρχικούς βηματικούς κινητήρες. Τα επιμέρους συστήματα πλέον μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα και να αντικατασταθούν, εάν απαιτηθεί για οποιοδήποτε λόγο, χωρίς να κρίνεται απαραίτητη η παράλληλη αφαίρεση και άλλου υποεξαρτήματος.

Τα γρανάζια που προσφέρουν τη μετάδοση της κίνησης από τους βηματικούς κινητήρες στους μάντες κίνησης των ατέρμονων κοχλιών διατηρήθηκε, αφαιρώντας αυτά από τους άξονες των παλαιών βηματικών και τοποθετώντας τα στους νέους. Ο βασικός λόγος που επιλέχθηκε να μην τοποθετηθεί νέο γρανάζι είναι ο συνδυασμός γρανάζι άξονα κινητήρα – μάντα – γρανάζι ατέρμονα κοχλία. Σε κάθε περίπτωση αντικατάστασης έστω και ενός εκ των τριών ανωτέρω υποσυστημάτων, θα πρέπει τα νέα να είναι σε θέση να συνεργαστούν, δηλαδή να ταιριάζει το μέγεθος των οδόντων με τα αυλάκια (pitch).

Το τελικό αποτέλεσμα του γραναζιού επί του άξονα του κινητήρα είναι αυτό που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



(α)



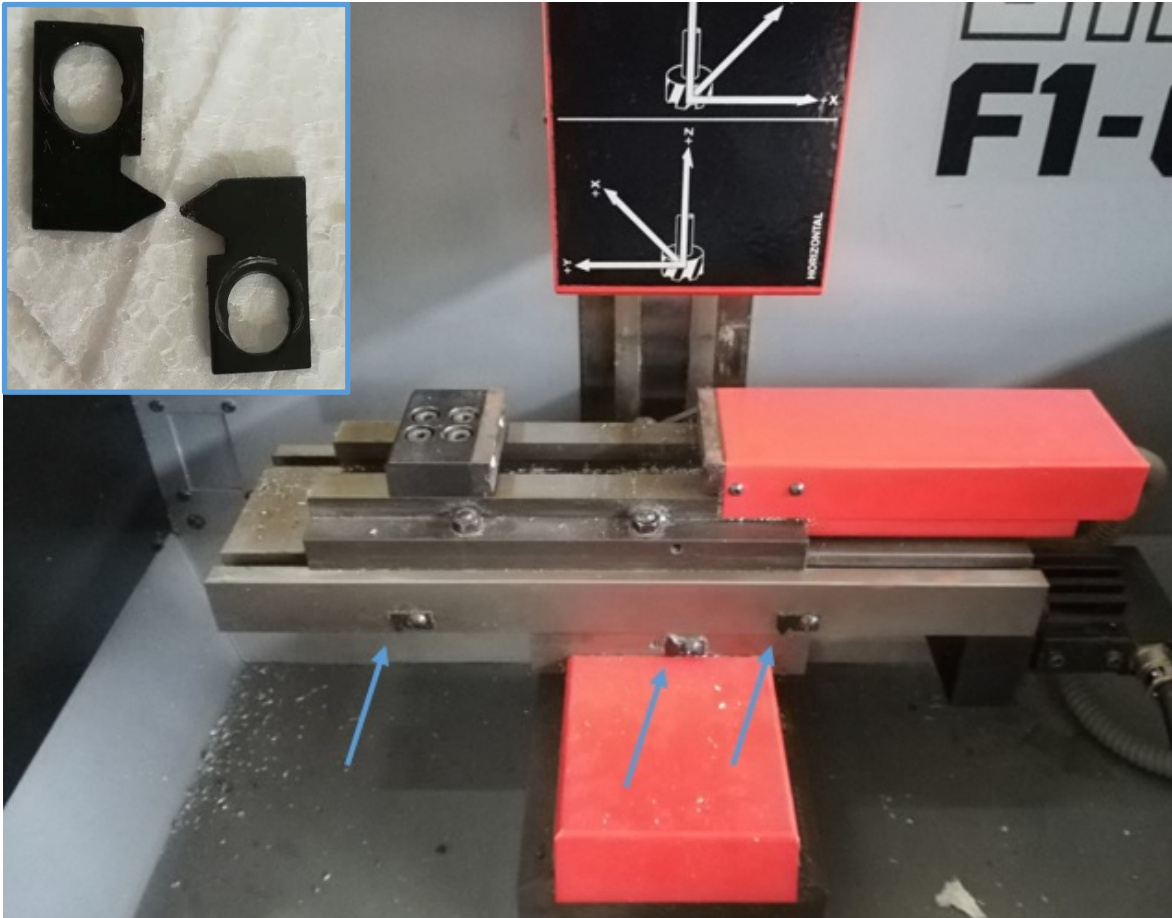
(β)

Εικόνα 5.3: (α) Το γρανάζι μετάδοσης της κίνησης και (β) ο νέος βηματικός κινητήρας με προσαρμοσμένο στον άξονά του το γρανάζι.

5.3. Τερματικοί Διακόπτες

Η μηχανή Emco F1 δεν διαθέτει τερματικούς διακόπτες, παρά μόνο στίγματα (βέλη) που υποδεικνύαν τον τερματισμό κάθε άξονα. Στον μικροεπεξεργαστή του

εργοστασιακού μηχανήματος ήταν καταχωρημένα τα όρια κατεργασίας με αποτέλεσμα την μη προσπέλασή τους.



Εικόνα 5.4: Ορισμένα από τα στίγματα οριοθέτησης των αξόνων. Εδώ φαίνεται η οριοθέτηση του X άξονα. Σε υπέρθεση λεπτομέρεια των στιγμάτων οριοθέτησης.

Η χρήση του προγράμματος LinuxCNC δεν απαιτεί τη χρήση διακοπών για την αρχικοποίηση των αξόνων. Όπως και στο αρχικό κέντρο κατεργασιών έτσι και με το LinuxCNC είναι δυνατή η καταχώρηση των ορίων κίνησης κατά την αρχικοποίηση του λογισμικού για το συγκεκριμένο μηχάνημα. Αυτά τα όρια που καταχωρούνται ονομάζονται «μαλακά» όρια (soft limits) και το πρόγραμμα σταματάει τη λειτουργία του όταν κάποιος άξονας τα προσεγγίσει, προκειμένου να μην φτάσει το φυσικό τέλος της διαδρομής του (hard stop). Η αρχική θέση των αξόνων σε αυτή την περίπτωση γίνεται χειροκίνητα από τον χρήστη.

Παρά το γεγονός αυτό, αποφασίστηκε η τοποθέτησή τους, καθώς από τη μία καθίσταται πιο εύκολη η αρχικοποίηση των αξόνων και από την άλλη αντιμετωπίζονται ορισμένα θέματα ασφαλείας.

Το πρώτο θέμα ασφαλείας αποτελεί ενδεχόμενη δυσλειτουργία των αξόνων, που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μη ορθή κίνηση των ατέρμονων κοχλιών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον κατακόρυφο άξονα (άξονας Z) στον οποίο κινείται η κύρια άτρακτος που φέρει το κοπτικό εργαλείο και συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο φορτίο. Ενδεχόμενη δυσλειτουργία του κατακόρυφου ατέρμονα κοχλία θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα για τη διάταξη.

Ο δεύτερος λόγος που επιβάλλεται η τοποθέτηση οριακών διακοπών είναι για την περίπτωση που οι βηματικοί κινητήρες χάσουν κάποιο βήμα. Με την πάροδο του χρόνου τα ενδεχόμενα βήματα που έχουν χαθεί αθροίζονται, με αποτέλεσμα το σύστημα να βρεθεί εκτός ορίων.

Οι διακόπτες αρχικής θέσης (home switches) μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε μέσα στα όρια της διαδρομής του κάθε άξονα. Συνήθως, για λόγους απλότητας της εφαρμογής, όπως και στην προκειμένη εργασία, το μέρος έδρασης των διακοπών αρχικής θέσης ταυτίζεται με του διακόπτη μιας εκ των δύο οριακών θέσεων της διαδρομής του άξονα. Ως αποτέλεσμα, ο ρόλος των τριών οριακών διακοπών που έχουν τοποθετηθεί στην εργαλειομηχανή είναι διπλός. Πρώτα, να αρχικοποιήσουν το σύστημα συντεταγμένων της εργαλειομηχανής (0,0,0 - Αρχή μέτρησης αξόνων) και στη συνέχεια να δρουν ως διακόπτες ασφαλείας στην περίπτωση που δοθεί εντολή σε κάποιον από τους άξονες να κινηθεί εκτός από το πεδίο λειτουργίας της μηχανής. Για λόγους ασφαλείας, όπως λέχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τοποθετήθηκαν οριακοί διακόπτες και στις άλλες πλευρές των τερματικών θέσεων κάθε άξονα.

Οι τερματικοί διακόπτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρείας OEM με εκτεταμένο βραχίονα για την πιο εύκολη επαφή με τον κάθε άξονα. Συνολικά τοποθετήθηκαν έξι τερματικοί διακόπτες, δύο σε κάθε άξονα (X-, X+, Y-, Y+, Z-, Z+).



Εικόνα 5.5: (α) Ο τύπος των τερματικών διακοπών που χρησιμοποιήθηκαν και (β) μεγέθυνση των τρόπων σύνδεσης του διακόπτη NC: Normally Closed, NO: Normally Open, Com: Γείωση.

Η συνδεσμολογία των βηματικών κινητήρων πραγματοποιήθηκε σε «κανονικώς κλειστή» (Normally Closed, NC) και όχι «κανονικώς ανοιχτή» (Normally Open, NO). Αυτό σημαίνει ότι για την απερίσπαστη λειτουργία του μηχανήματος, το κύκλωμα των διακοπών πρέπει να είναι συνεχώς κλειστό. Τυχόν ανοιχτοκύκλωση οδηγεί σε διακοπή της λειτουργίας. Λόγοι ανοιχτοκύκλωσης αποτελούν ο τερματισμός κάποιου άξονα ή βλάβη κάποιου διακόπτη. Εάν η σύνδεση γινόταν σε «κανονικώς ανοιχτή», τυχόν βλάβη διακόπτη δε θα εντοπιζόνταν.

Επιπλέον συνδέθηκε με το νέο σύστημα ο διακόπτης ασφαλείας της πόρτας (Εικόνα 5.6) που βρίσκεται έμπροσθεν του μηχανήματος και προστατεύει τον χρήστη από τα γρέζια.

Σε κάθε περίπτωση, όταν ένας διακόπτης ενεργοποιείται, η τιμή που δέχεται το LinuxCNC πηγαίνει από τη λογική τιμή high στη low. Ωστόσο, το LinuxCNC αναμένει μια πραγματική τιμή, όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, συνεπώς πρέπει να επιλεγθεί το αντίστοιχο κουτί «invert» στη σελίδα διαμόρφωσης της παράλληλης θύρας, όπως θα δειχθεί αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Για τη χρήση των διακοπών χρησιμοποιήθηκε μια αντίσταση που ονομάζεται pull-up, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.3. Σε ηλεκτρονικά λογικά κυκλώματα, η pull-up αντίσταση είναι μια αντίσταση, η οποία συνδέεται μεταξύ του αγωγού σήματος, και μιας θετικής τάσης τροφοδοσίας για να εξασφαλιστεί ότι το σήμα θα έχει μια έγκυρη λογική στάθμη, εάν οι εξωτερικές συσκευές αποσυνδεθούν, ή στην περίπτωση που εμφανίζονται υψηλές τιμές εμπέδησης (σύνθετης αντίστασης).

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στο σημείο διασύνδεσης δύο συσκευών διαφορετικών τύπων λογικών, οι οποίες πιθανώς λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας. Με άλλα λόγια, για την παρούσα περίπτωση, ο ρόλος της αντίστασης αυτής είναι να μειώνει την τιμή της εισόδου στην περίπτωση της εκκίνησης και μέχρι να πραγματοποιηθεί η σύνδεση έως τη γείωση. Σε αντίθετη περίπτωση, η τιμή της εισόδου μπορεί να κυμαίνεται σε διαφορετικά επίπεδα όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό. Η τιμή της αντίστασης αυτής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι 10 kΩ.



(α)



(β)

Εικόνα 5.6: Εμπρός όψη διακόπτης πόρτας (α) και η οπίσθια όψη του διακόπτη (β).

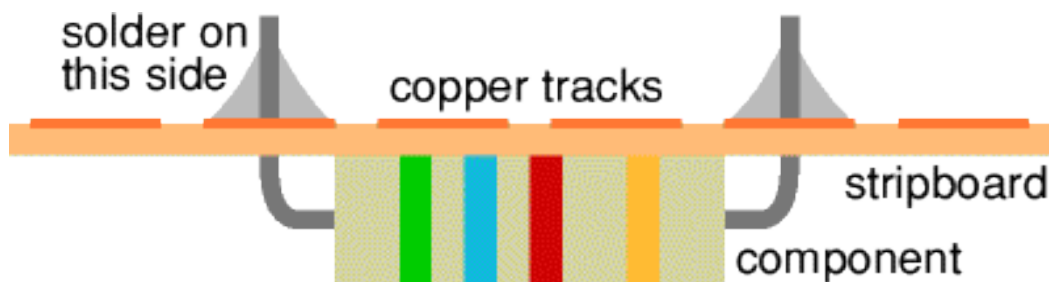
6. Κατασκευή Πλακετών Ηλεκτρονικού Κυκλώματος

6.1. Εισαγωγή

Για την πλήρη αξιοποίηση των λειτουργιών του κέντρου φρεζαρίσματος EMCO F1, απαραίτητη ήταν η κατασκευή πλακετών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Ορισμένες από τις πλακέτες ήταν διαθέσιμες εμπορικά προς αγορά, αλλά δύο λόγοι οδήγησαν στην απόφαση για την αρχική σύνθεσή τους. Ο ένας λόγος ήταν αφενός η μείωση του κόστους ανακατασκευής της φρεζομηχανής EMCO F1 και ο άλλος λόγος ήταν η επιδίωξη προσωπικής ενασχόλησης με αυτόν τον επιστημονικό τομέα.

Από τις μεθόδους ανάπτυξης πλακετών, όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.2, αυτή που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν η σύνθεση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε διάτρητες πλακέτες, και κόλληση των εξαρτημάτων επί αυτών. Ο λόγος επιλογής αυτής της μεθόδου έγκειται στην απλότητά της, καθώς και στη μη χρήση επικίνδυνων ουσιών κατά την παραγωγή του κυκλώματος. Για τη σύνδεση των επιμέρους εξαρτημάτων σε κάθε πλακέτα, χρησιμοποιήθηκε σύρμα χαλκού.



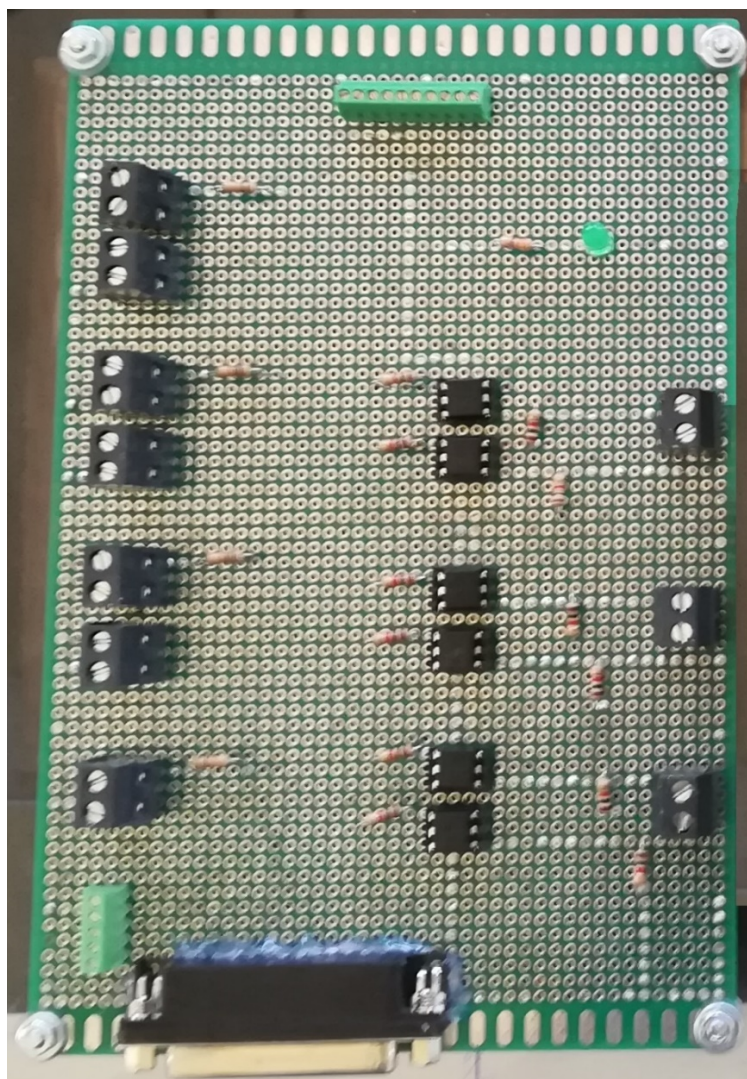
Εικόνα 6.1: Απεικόνιση διαδικασίας σύνθεσης. Ανάκτηση από [18].

Σε αυτό το σημείο αναφέρεται ότι εκπονήθηκε και το συνολικό ηλεκτρολογικό σχέδιο του νέου κέντρου κατεργασιών και παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

6.2. Πλακέτες Μηχανήματος

Οι πλακέτες που κατασκευάστηκαν εξυπηρετούσαν τους σκοπούς, όπως αυτοί αναφέρονται ακολούθως.

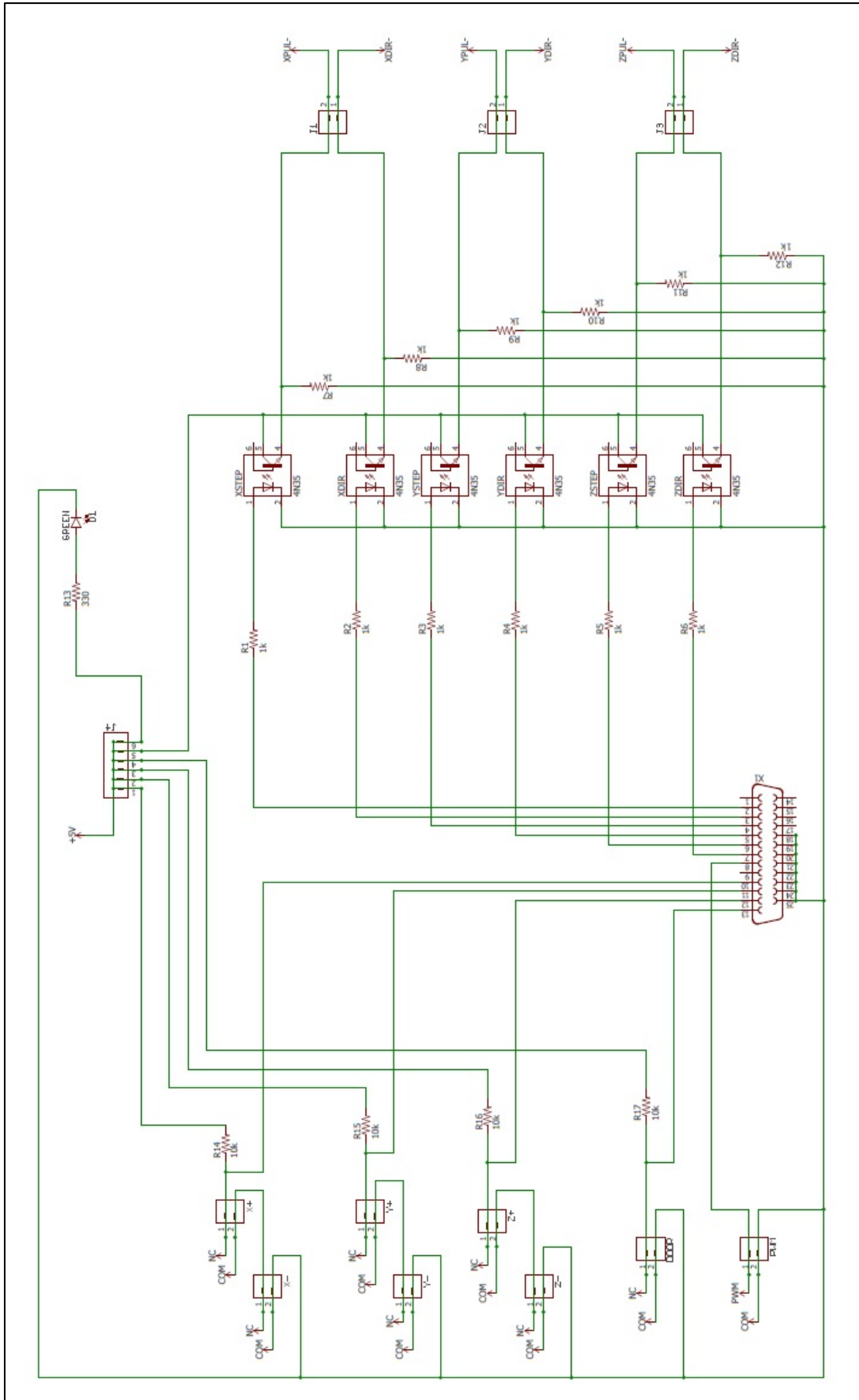
Αρχικά κατασκευάστηκε πλακέτα διαμοιρασμού σημάτων (Interface Board) που αποτελεί τη σύνδεση του Η/Υ με τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό της φρέζας.



Εικόνα 6.2: Πλακέτα διαμοιρασμού σημάτων (interface board).

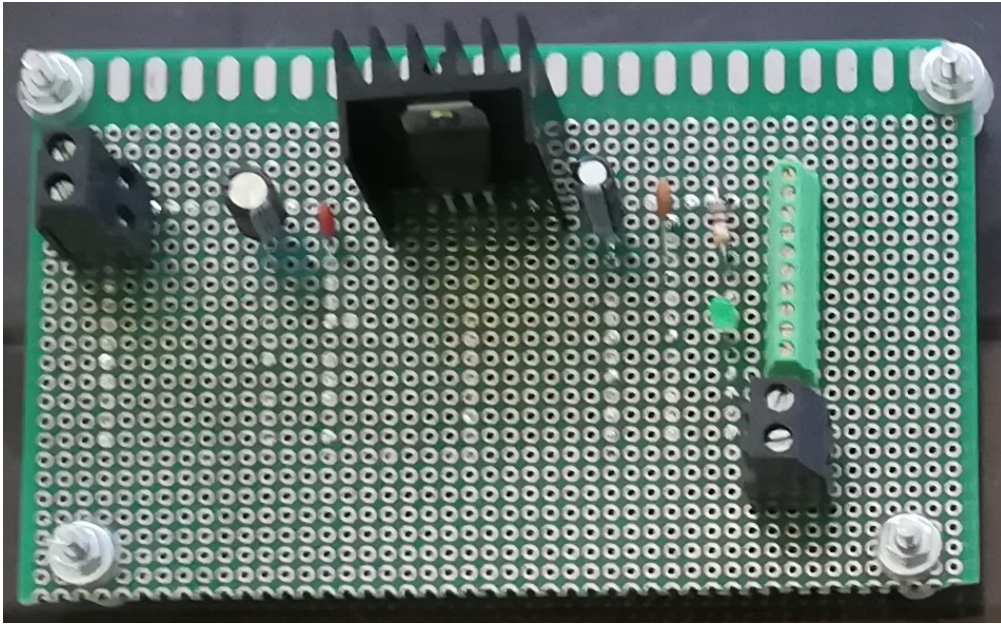
Η σύνδεση της πλακέτας με τον Η/Υ γίνεται μέσω παράλληλης θύρας (DB25), της οποίας η αρσενική απόληξη της πλακέτας φαίνεται στην ανωτέρω εικόνα στο αριστερά κάτω μέρος.

Σε αυτήν την πλακέτα συνδέονται επίσης οι τερματικοί διακόπτες του μηχανήματος (αριστερή πλευρά), όπως φαίνονται στο κεφάλαιο 5.3, η έξοδος του σήματος PWM προς την πλακέτα μετατροπής σήματος PWM σε αναλογικό (αριστερά κάτω πλευρά - με πράσινο χρώμα), όπως περιγράφεται ακολούθως, αλλά και η έξοδος των σημάτων κίνησης των βηματικών κινητήρων προς τους οδηγούς αυτών (δεξιά πλευρά).

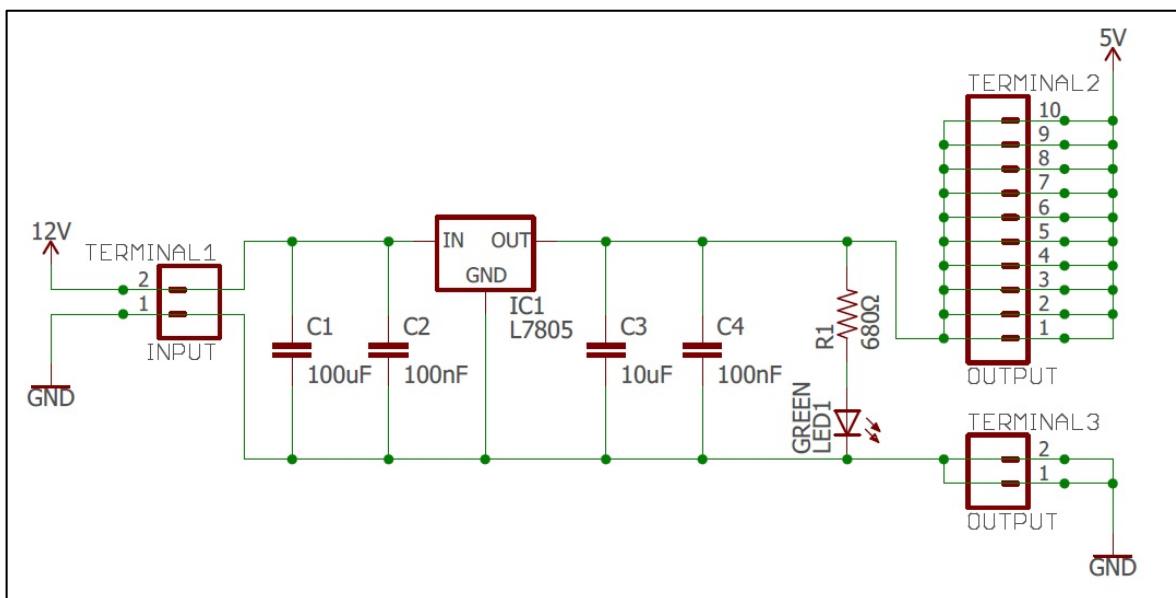


Εικόνα 6.3: Κύκλωμα πλακέτας διαμοιρασμού σημάτων (interface board).

Κατόπιν, κατασκευάστηκε πλακέτα μετατροπής τάσης από 12V σε 5V (Voltage Converter 12V to 5V). Αυτή υλοποιήθηκε ώστε να εξυπηρετηθούν τμήματα της ανακατασκευασμένης φρέζας, τα οποία απαιτούσαν τάση 5V. Τα τμήματα που απαιτούσαν τάση 5V ήταν η πλακέτα διαμοιρασμού σημάτων, οι οδηγοί των βηματικών κινητήρων και ο οδηγός του κινητήρα DC της ηλεκτρικής μέγγενης.

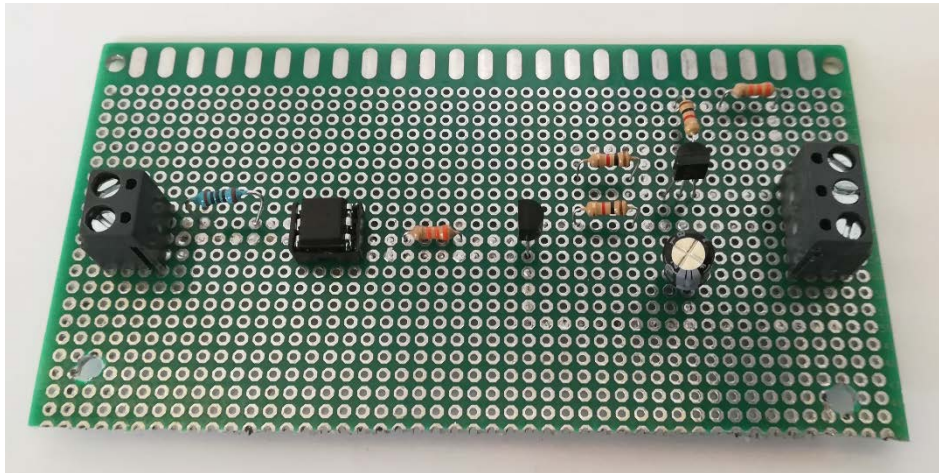


Εικόνα 6.4: Πλακέτα μετατροπής τάσης (voltage converter).

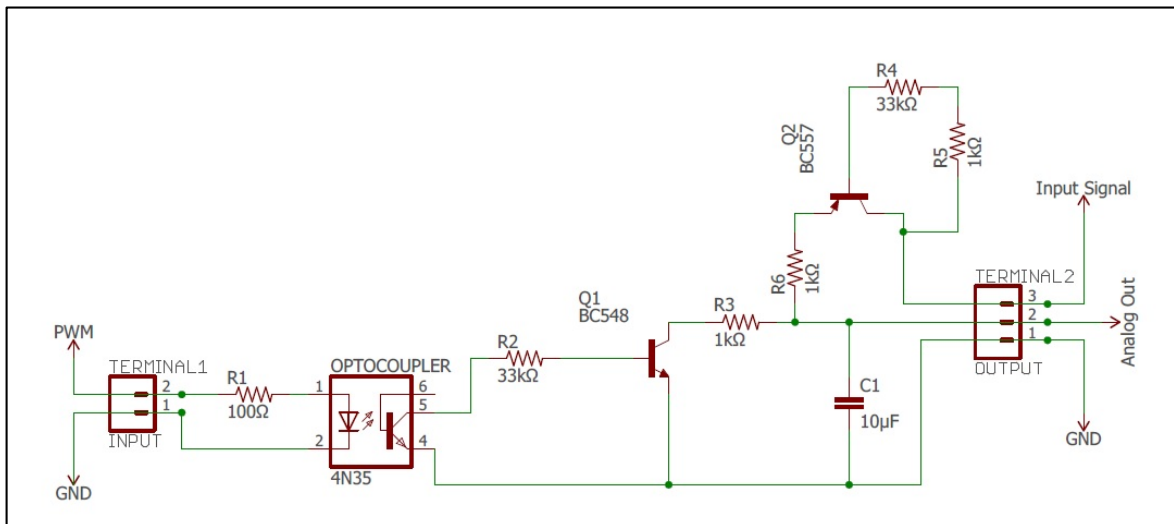


Εικόνα 6.5: Κύκλωμα πλακέτας μετατροπής τάσης.

Τέλος, κατασκευάστηκε πλακέτα μετατροπής του σήματος PWM (PWM Signal Converter) που στέλνει ο Η/Υ, ώστε το ψηφιακό σήμα του Η/Υ να μετατραπεί σε αναλογικό και να ρυθμιστούν οι στροφές λειτουργίας της κυρίας ατράκτου (Main Spindle Motor). Στην πρότερη μορφή του μηχανήματος, ο έλεγχος των στροφών γινόταν με ροοστάτη, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος στην πλακέτα οδηγό (Driver Board) της κυρίας ατράκτου.



Εικόνα 6.6: Πλακέτα μετατροπής σήματος PWM (PWM Signal Converter).



Εικόνα 6.7: Κύκλωμα πλακέτας μετατροπής σήματος PWM.

Οι πλακέτες αυτές, μαζί με την εργοστασιακή πλακέτα οδηγού του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (main spindle motor) τοποθετήθηκαν επί φύλλου plexiglass, για να είναι ηλεκτρικά απομονωμένες.

6.3. Εργοστασιακές Πλακέτες

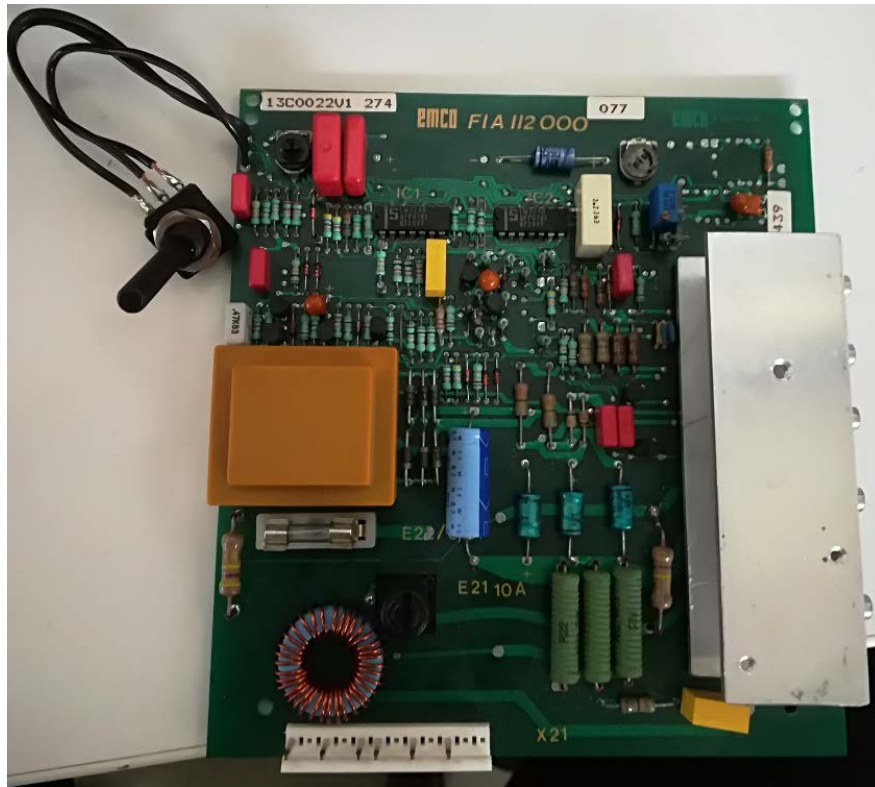
Πέραν των πλακετών που κατασκευάστηκαν θεωρήθηκε αναγκαίο να τοποθετηθούν σε αυτό το σημείο της εργασίας οι εργοστασιακές πλακέτες που διατηρήθηκαν και στο ανακατασκευασμένο μηχάνημα.

Η πρώτη αποτελεί την πλακέτα τροφοδοσίας του εργοστασιακού συστήματος (Εικόνα 6.8). Πλέον η χρήση της περιορίζεται στην τροφοδοσία της πλακέτας οδηγού της κυρίας ατράκτου καθώς και στη συνδεσμολογία των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για την έναρξη της λειτουργίας του μηχανήματος, όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 7.4.



Εικόνα 6.8: Πλακέτα τροφοδοσίας πλακέτας ελέγχου DC κινητήρα της κύριας ατράκτου.

Η δεύτερη πλακέτα που διατηρήθηκε είναι η πλακέτα οδηγός της κυρίας ατράκτου (Εικόνα 6.9). Η συγκεκριμένη πλακέτα ναι μεν διατηρήθηκε, όμως πραγματοποιήθηκαν ορισμένες μετατροπές. Η πρώτη ήταν η αφαίρεση του ποτενσιόμετρου (διακρίνεται αριστερά) και η σύνδεση με την πλακέτα μετατροπής σήματος από PWM σε αναλογικό και η δεύτερη ήταν η αντικατάσταση μίας αντίστασης με έναν ρυθμιστή τάσης VR7807 [1].



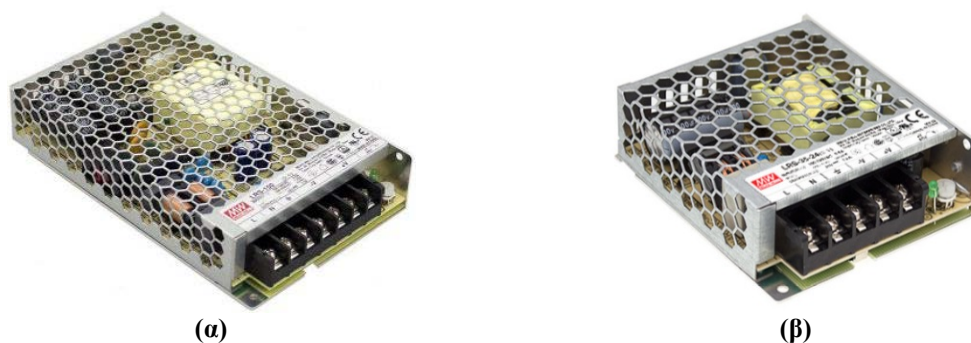
Εικόνα 6.9: Πλακέτα οδηγός κύριας ατράκτου. Διακρίνεται αριστερά το ποτενσιόμετρο χειροκίνητης ρύθμισης των στροφών.

7. Βοηθητικός Εξοπλισμός

Προκειμένου να υποστηριχθούν οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός, που εξυπηρετούσε ποικίλους σκοπούς. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται τα τροφοδοτικά παροχής ισχύος, οι ανεμιστήρες ψύξης των συστημάτων και η ηλεκτρική μέγγενη συγκράτησης των τεμαχίων στην τράπεζα εργασίας.

7.1. Τροφοδοτικά Ισχύος

Τα τροφοδοτικά παροχής ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο της εταιρείας MeanWell, καθένα εκ των οποίων εξυπηρετούσε διαφορετική λειτουργία.



Εικόνα 7.1: Τροφοδοτικά ισχύος (α) 154,8 W και (β) 36W.

Το πρώτο παρείχε ισχύ 154,8W με τάση εξόδου 36VDC για την τροφοδοσία των οδηγών των βηματικών κινητήρων, οι οποίοι απαιτούσαν τάση εύρους 18 έως 50VDC, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.2.

Το δεύτερο παρείχε ισχύ 36W με τάση εξόδου 12V και χρησιμοποιήθηκε για την άμεση τροφοδοσία των ανεμιστήρων, που απαιτούσαν 12VDC, στην παροχή ρεύματος για την λειτουργία του κινητήρα DC της ηλεκτρικής μέγγενης και για την τροφοδοσία της πλακέτας μετατροπής τάσης από 12 σε 5V.

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικών ισχύος.

Τροφοδοτικό 154,8 Watt		Τροφοδοτικό 36 Watt	
Τάση Εισόδου	85 ~ 132VAC / 170 ~ 264VAC	Τάση Εισόδου	88 ~ 264VAC
Τάση Εξόδου	36 V	Τάση Εξόδου	12 V
Ένταση Ρεύματος Εξόδου	4,3 A	Ένταση Ρεύματος Εξόδου	3 A

7.2. Ψύξη Συστήματος

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας η οποία εμφανίζεται εσωτερικά του χώρου όπου εδρεύουν τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα, κρίθηκε αναγκαία η τοποθέτηση δύο ανεμιστήρων (fans), προκειμένου να απάγεται ικανοποιητικά η θερμότητα.



(α)



(β)

Εικόνα 7.2: (α) Ο τύπος ανεμιστήρα ψύξης που χρησιμοποιήθηκε και (β) οι ανεμιστήρες επί του συστήματος (διακρίνονται αριστερά με βέλη).

Ο πιο χαμηλά τοποθετημένος ανεμιστήρας παρείχε τροφοδοσία αέρα στα ηλεκτρονικά με θερμοκρασία αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος, η οποία λόγω διαμόρφωσης του χώρου είχε σαφώς χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ αυτός που βρισκόταν σε μεγαλύτερο ύψος οδηγούσε τον θερμό αέρα εξωτερικά του χώρου των ηλεκτρονικών.

7.3. Ηλεκτρική Μέγγενη

Η ηλεκτρική μέγγενη που χρησιμοποιήθηκε, προϋπήρχε εγκατεστημένη στην τράπεζα εργασίας της φρέζας και είναι αποσπώμενη. Εσωτερικά, εδράζεται κινητήρας DC (DC Motor) της εταιρείας Maxon, ο οποίος αρχικά λειτουργούσε μέσω των προεγκατεστημένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων της φρέζας.



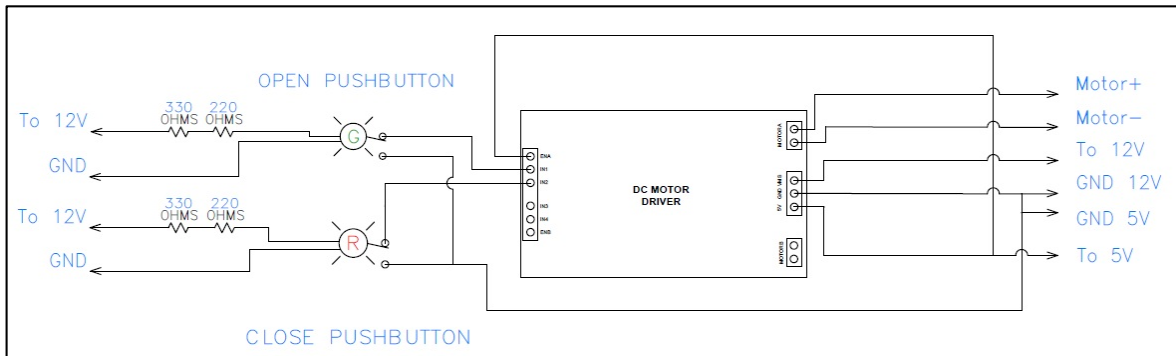
Εικόνα 7.3: Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος της ηλεκτρικής μέγγενης.

Με σκοπό την επαναλειτουργίας της, βασική ήταν η χρήση μίας οδηγού πλακέτας για κινητήρα DC, όπως αυτή φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 7.4: Οδηγός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία όπως φαίνεται ακολούθως, ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος του DC κινητήρα και προς τις δύο κατευθύνσεις με το πάτημα αντίστοιχου κομβίου.

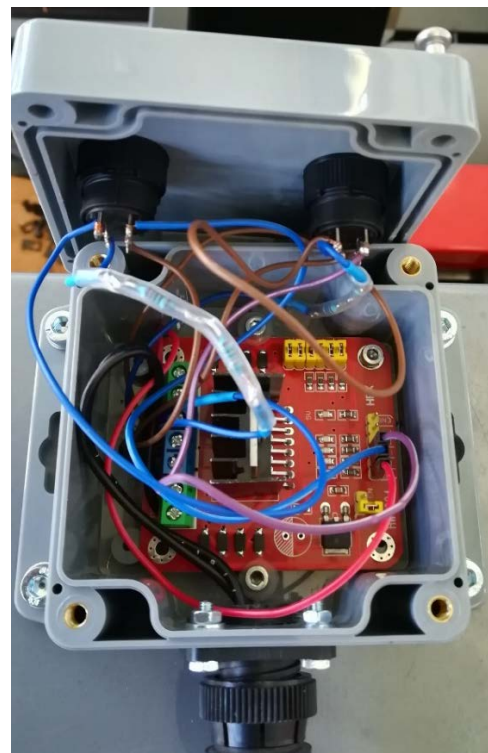


Εικόνα 7.5: Συνδεσμολογία για έλεγχο κινητήρα ηλεκτρικής μέγγενης.

Το αποτέλεσμα ήταν όλη η συνδεσμολογία να τοποθετηθεί εντός ενός πλαστικού κουτιού για προστασία και η τελική του μορφή φαίνεται στην Εικόνα 7.6.



(α)



(β)

Εικόνα 7.6: (α) Εξωτερική όψη κουτιού όπου διακρίνονται τα δύο κουμπιά κίνησης του κινητήρα καθώς και το βύσμα σύνδεσης με τον κινητήρα (άνω πλευρά) και (β) εσωτερική όψη του κουτιού όπου διακρίνεται η οδηγός πλακέτα.

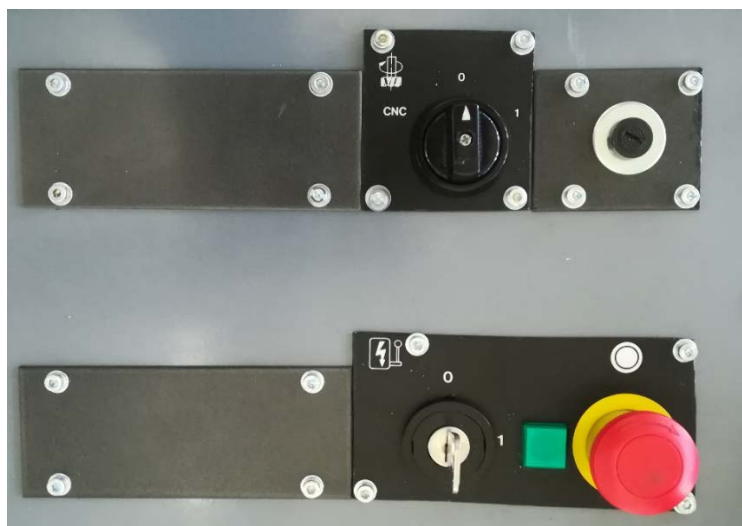
Σκοπός του συγκεκριμένου κυκλώματος ήταν η κατάλληλη διαμόρφωσή του, ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος του κινητήρα, είτε ωρολογιακά είτε αντιωρολογιακά, για όση ώρα είναι πατημένο το αντίστοιχο κομβίο, για να κλείσει ή να ανοίξει η μέγγενη.

7.4. Εξοπλισμός Εκκίνησης

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση του κέντρου κατεργασιών διατηρήθηκαν εκ του αρχικού μηχανήματος.

Προκειμένου να τροφοδοτηθεί το κέντρο κατεργασιών με ρεύμα, τοποθετείται κλειδί στην αντίστοιχη θέση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.7, και στρέφεται ωρολογιακά στη θέση «1». Παρατηρείται η λάμψη της πράσινης λυχνίας στα δεξιά. Σημειώνεται ότι με αυτόν τον τρόπο δεν ξεκινάει η λειτουργία της κυρίας ατράκτου, αλλά στρέφοντας τον ακριβώς από πάνω διακόπτη ωρολογιακά στη θέση «1».

Με το κομβίο έκτακτης ανάγκης (emergency button) σταματάει η τροφοδοσία όλων των εξαρτημάτων και παύει η λειτουργία της μηχανής. Για να ξανακινήσει, το κομβίο έκτακτης ανάγκης στρέφεται αντιωρολογιακά και ανασηκώνεται στην αρχική του θέση.



Εικόνα 7.7: Κομβία εκκίνησης και εκτάκτου ανάγκης (κόκκινο).

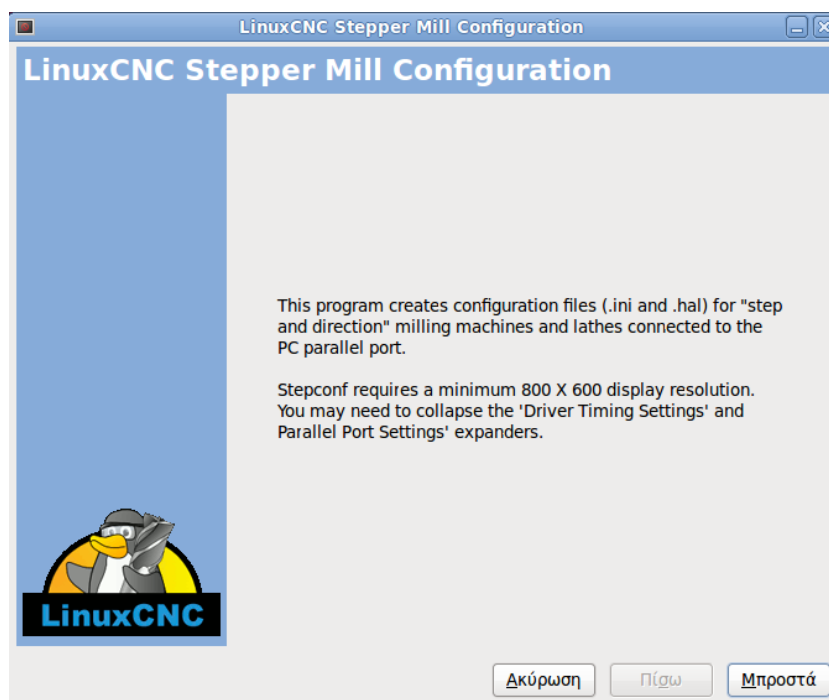
Άνω και δεξιά διακρίνεται ο χώρος υποδοχής της κύριας ασφάλειας του μηχανήματος, η οποία προσεγγίζεται ξεβιδώνοντας κοχλία μισής στροφής.

8. Αρχικοποίηση LinuxCNC

Μετά την σύνδεση των μηχανολογικών και των ηλεκτρολογικών - ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σειρά έχει η επίτευξη της επικοινωνίας του κέντρου κατεργασιών με τον Η/Υ. Η επικοινωνία αυτή, επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού LinuxCNC που τρέχει σε περιβάλλον Linux και μίας παράλληλης θύρας που συνδέει τον Η/Υ με την πλακέτα διαμοιρασμού των σημάτων (interface board), η οποία με τη σειρά της μεταδίδει πληροφορία που αφορά το βήμα (step), την κατεύθυνση (direction) των βηματικών κινητήρων και την ταχύτητα περιστροφής της κύριας ατράκτου.

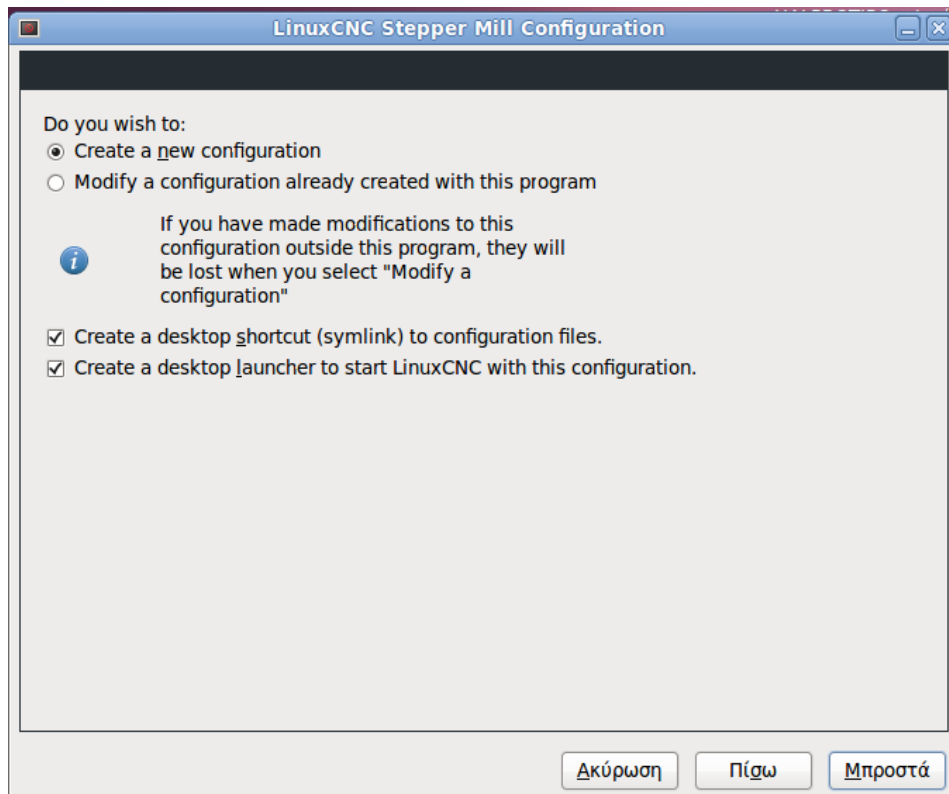
8.1. Οδηγός LinuxCNC Stepconfig Wizard

Η πρώτη ενέργεια στο LinuxCNC είναι η αρχικοποίηση του μηχανήματος μέσω του οδηγού LinuxCNC Stepconf Wizard. Ο οδηγός αυτός αποθηκεύει ουσιαστικά τις επιλογές του χρήστη για το μηχάνημα που επιθυμεί σε μία διαδρομή του Η/Υ (linuxcnc/config). Μετά το πέρας αρχικοποίησης του μηχανήματος υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης των παραμέτρων, επιλέγοντας το αντίστοιχο αρχείο που έχει επέκταση .stepconfig.



Εικόνα 8.1: Αρχικό παράθυρο LinuxCNC Stepconfig Wizard.

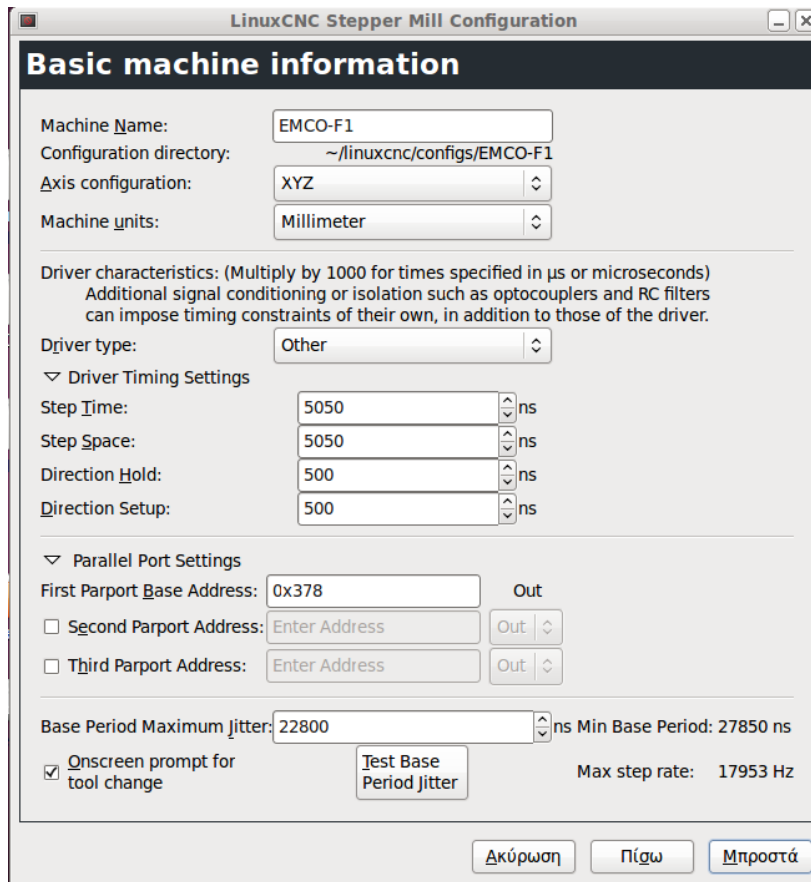
Όπως μαρτυρά το αρχικό παράθυρο, τα αρχεία που πρόκειται να δημιουργηθούν θα έχουν επέκταση `.ini` και `.hal`, καθώς επίσης προειδοποιεί και για ελάχιστη ανάλυση οθόνης 800x600, ώστε να είναι ευδιάκριτα όλα τα κουμπιά του προγράμματος. Πηγαίνοντας στο επόμενο βήμα εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο.



Εικόνα 8.2: Επιλογή για δημιουργία νέας διαμόρφωσης μηχανήματος.

Επειδή για το συγκεκριμένο κέντρο κατεργασιών δεν προϋπήρχε κάποια ανάλογη διαμόρφωση, επιλέγεται η δημιουργία νέας καθώς και η δημιουργία συντομεύσεων στην επιφάνεια εργασίας του φακέλου με τα αρχεία διαμόρφωσης και ενός εικονιδίου εκκίνησης για το συγκεκριμένο μηχάνημα.

Στο επόμενο παράθυρο που ανοίγει πρέπει να εισαχθούν πληροφορίες σχετικά με το κέντρο κατεργασιών.



Εικόνα 8.3: Βασικές πληροφορίες κέντρου κατεργασιών.

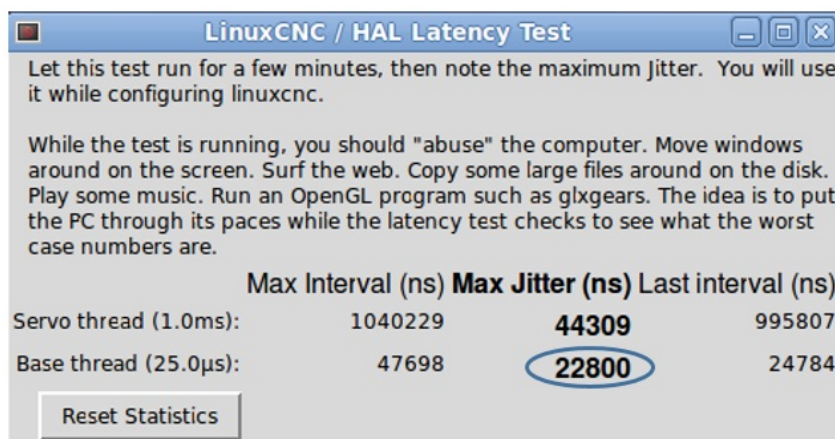
Οι πληροφορίες αυτές είναι το όνομα της μηχανής, η διαμόρφωση των αξόνων, οι οποίοι στην προκειμένη περίπτωση είναι τρεις, οι μονάδες μέτρησης, όπου επιλέγονται τα χιλιοστά, ο τύπος των οδηγών των βηματικών κινητήρων, ο οποίος λόγω του ότι δεν υπάρχει στην αναπτυσσόμενη λίστα, οι τιμές που ακολουθούν πρέπει να εισαχθούν χειροκίνητα από τον χρήστη και αναλύονται στη συνέχεια, ρυθμίσεις για την παράλληλη θύρα, όπου η τιμή της 0x378 που αφορά της διεύθυνση αφήνεται ως έχει και τέλος η παράμετρος Base Period Maximum Jitter.

Όσον αφορά τις χρονικές ρυθμίσεις των οδηγών των βηματικών κινητήρων που απαιτούνται, αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή σε συνδυασμό με την ιστοσελίδα του LinuxCNC. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η κάθε παράμετρος, η επεξήγησή της καθώς και η τιμή που καταχωρήθηκε σε nanoseconds όπως ορίζει το πρόγραμμα.

Πίνακας 8.1: Χρονικές παράμετροι οδηγών βηματικών κινητήρων

Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή (ns)
Step Time	Διάρκεια παλμού οδηγού	5050
Step Space	Ελάχιστος χρόνος μεταξύ διαδοχικών παλμών	5050
Direction Hold	Διάρκεια διατήρησης διεύθυνσης pin μετά από αλλαγή	500
Direction Setup	Διάρκεια πριν την αλλαγή διεύθυνσης και μέχρι τον τελευταίο βηματικό παλμό	500

Η επόμενη σημαντική παράμετρος αυτής της καρτέλας διαμόρφωσης αφορά το Base Period Maximum Jitter και βρίσκεται μέσω δοκιμής λανθάνουσας κατάστασης (latency test) του H/Y πατώντας το αντίστοιχο πλήκτρο «Test Base Period Jitter». Πρόκειται ουσιαστικά για τον χρόνο που απαιτεί ο H/Y από τη στιγμή που λάβει ένα εξωτερικό ερέθισμα μέχρι τη στιγμή που θα εκδηλώσει την ανάλογη ενέργεια.

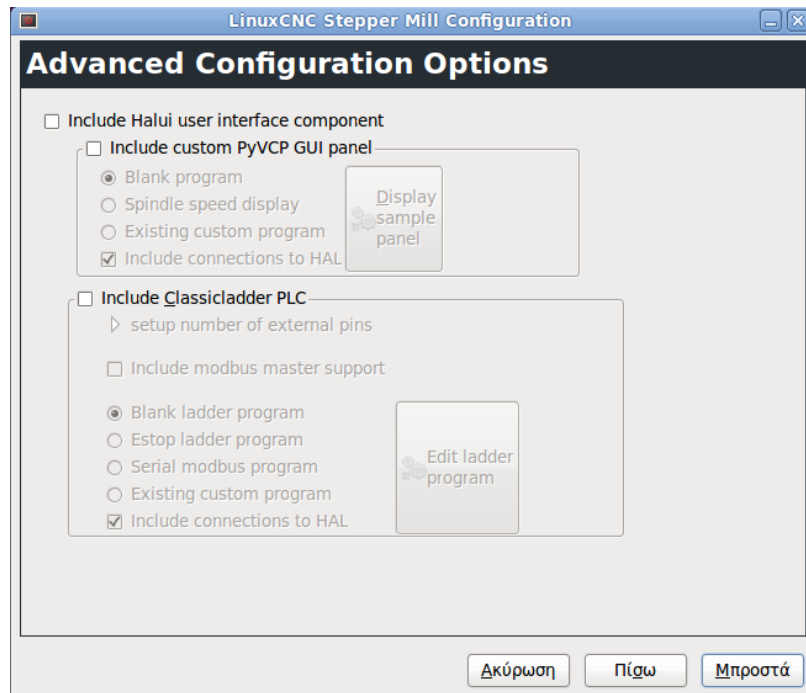


Εικόνα 8.4: Εκτέλεση δοκιμής εύρεσης παραμέτρου Base Period Maximum Jitter.

Προτροπή του λογισμικού αποτελεί η παράλληλη εκδήλωση ενεργειών στον H/Y, όπως αντιγραφή αρχείων, άνοιγμα προγραμμάτων, μετακίνηση παραθύρων κ.ά. με σκοπό την εύρεση της δυσχερέστερης κατάστασης του H/Y.

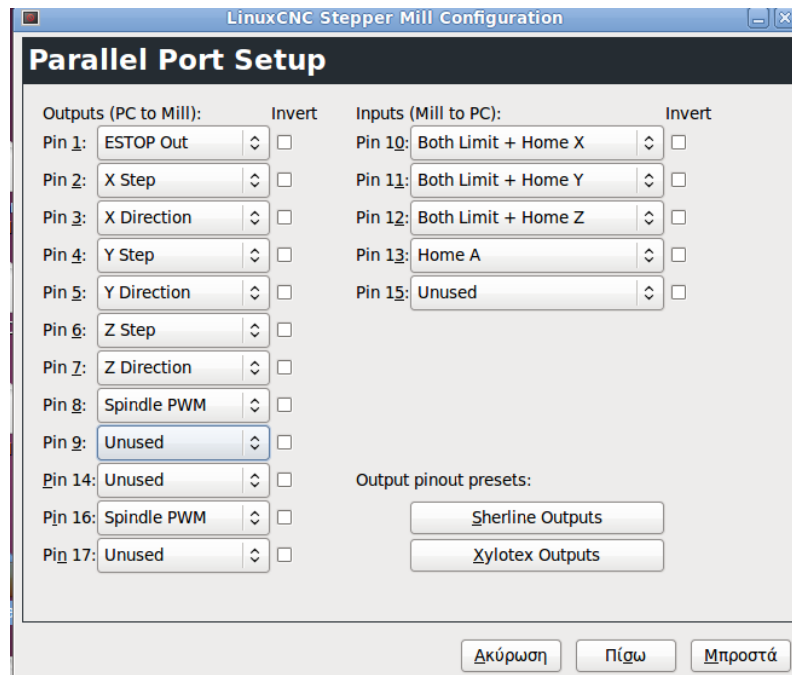
Η τιμή που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα μετά από κάποια λεπτά ήταν αυτή που φαίνεται στην ανωτέρω εικόνα, ήτοι 22800 ns.

Στο βήμα που ακολουθεί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.5, επιλέγονται ορισμένες προχωρημένες ρυθμίσεις. Από αυτές γίνεται επιλογή του «Include custom PyVCP panel», με σκοπό την εμφάνιση της ταχύτητας της κυρίας ατράκτου στο γραφικό περιβάλλον κατά την εκτέλεση του προγράμματος.



Εικόνα 8.5: Προχωρημένες ρυθμίσεις.

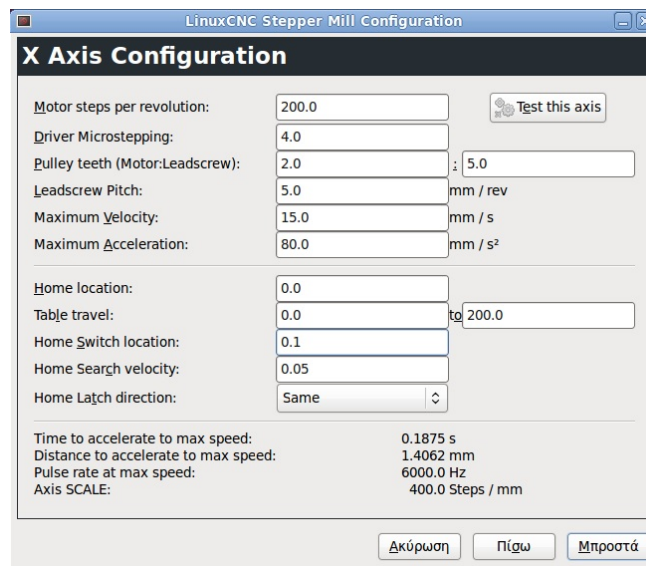
Ακολούθως, ο οδηγός sterconfig ζητάει την καταχώρηση των τιμών για κάθε pin της παράλληλης θύρας. Η παράλληλη θύρα διαθέτει συνολικά 25 pins, εκ των οποίων τα τελευταία οκτώ, δηλαδή 18 έως 25, είναι γειώσεις. Όσον αφορά τα υπόλοιπα pins αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.



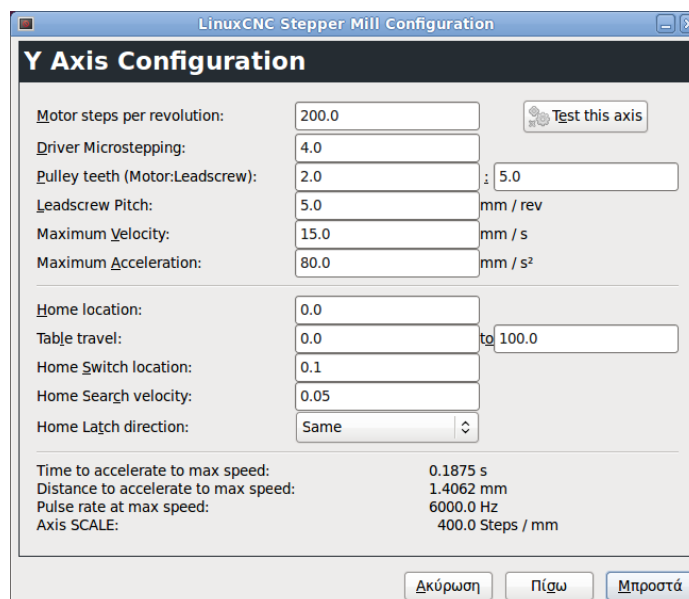
Εικόνα 8.6: Επιλογές pin παράλληλης θύρας.

Η πρώτη αφορά τις πληροφορίες που στέλνει ο H/Y στο κέντρο κατεργασιών, pins 1 – 9, 14, 16, 17, και η δεύτερη τα σήματα που στέλνει το κέντρο κατεργασιών στον H/Y, pins 10 – 13, 15. Η διαμόρφωση των σημάτων είναι εντελώς ανάλογη της πλακέτας διαμοιρασμού των σημάτων που κατασκευάστηκε και έγινε όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.6.

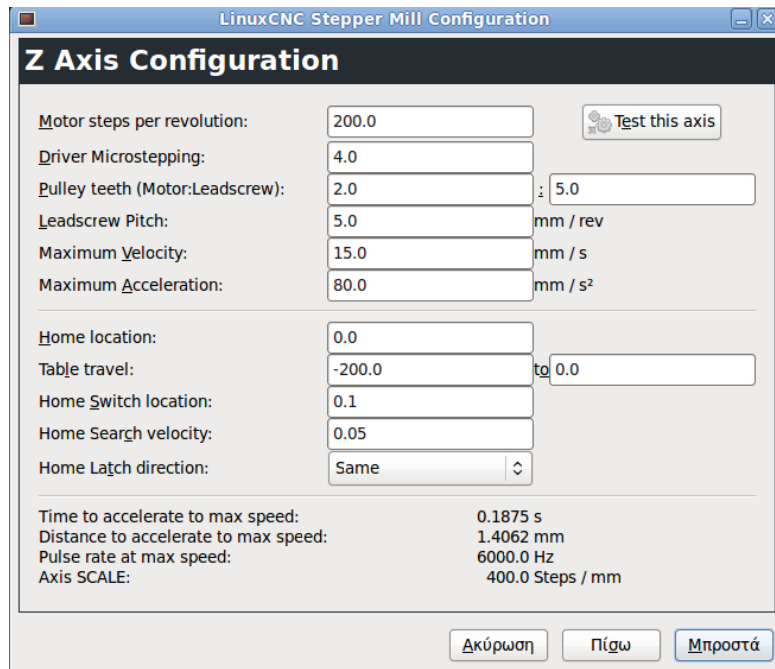
Κατόπιν, στα επόμενα παράθυρα πρέπει να καταχωρηθούν ορισμένες πληροφορίες για τον κάθε άξονα.



Εικόνα 8.7: Εισαγωγή παραμέτρων X άξονα.



Εικόνα 8.8: Εισαγωγή παραμέτρων Y άξονα.



Εικόνα 8.9: Εισαγωγή παραμέτρων Z άξονα.

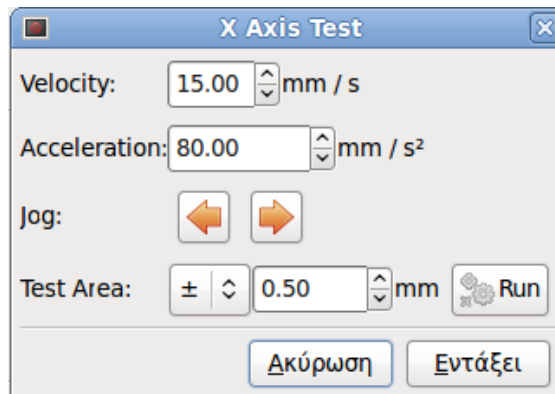
Και στους τρεις άξονες οι παράμετροι που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα, διατηρήθηκαν κοινές.

Πίνακας 8.2: Κοινές παράμετροι αξόνων.

Παράμετρος	Επεξήγηση	Τιμή
Motor steps per revolution	Βήματα ανά περιστροφή βηματικού κινητήρα	200 steps/rev
Driver Microstepping	Επιμέρους βήματα που απαιτούνται για ένα πλήρες βήμα του κινητήρα	4
Pulley teeth (Motor:Leadscrew)	Λόγος μείωσης από το γρανάζι του κινητήρα στο γρανάζι του ατέρμονα κοχλία	2:5 (16:40 οδόντες αντίστοιχων γραναζιών)
Leadscrew Pitch	Γραμμική κίνηση που προσφέρει ο ατέρμονα κοχλίας σε μία πλήρη περιστροφή του	5 mm/rev

Η παράμετρος του βήματος του κινητήρα ανά περιστροφή και του microstepping παρέχεται από τον κατασκευαστή του κινητήρα, ενώ οι επόμενες δύο που αφορούν την μετάδοση της κίνησης βρέθηκαν από τον κατασκευαστή του εργοστασιακού μηχανήματος.

Οι επόμενες παράμετροι αφορούν την μέγιστη ταχύτητα και επιτάχυνση των αξόνων. Ο κατασκευαστής του εργοστασιακού κέντρου κατεργασιών αναφέρει μέγιστη ταχύτητα 1200 mm/min. Παρ' όλα αυτά, για την πλήρη εξακρίβωση των παραμέτρων αυτών πραγματοποιήθηκε δοκιμή καθενός άξονα σε διάφορες ταχύτητες και επιταχύνσεις έως ότου βρεθεί ο καταλληλότερος συνδυασμός. Αρχικά πρέπει να τοποθετηθούν μικρές τιμές για την αποφυγή απρόοπτου αποτελέσματος. Οι τελικές τιμές δεν θα πρέπει επίσης να είναι πολύ μεγάλες αλλά ούτε και πολύ μικρές. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος απώλειας βημάτων του κινητήρα (σφάλμα μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής κίνησης του άξονα) ή ακόμα και μπλοκαρίσματός του, ενώ στη δεύτερη αργή επιβράδυνσή του με αποτέλεσμα να μην πιάνει την τελική θέση.



Εικόνα 8.10: Παράθυρο δοκιμής ταχύτητας και επιτάχυνσης αξόνων.

Η επόμενη παράμετρος, home location, διατηρήθηκε σε όλους του άξονες ίδια και ίση με 0.

Η παράμετρος table travel δηλώνει το όριο κίνησης κάθε άξονα και αυτά εισήχθησαν όπως φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Τα όρια των αξόνων δηλώνονταν από τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής και είναι 200 mm για τον X άξονα, 100 mm για τον Y άξονα και 200 mm για τον Z άξονα.

Πίνακας 8.3: Όρια κίνησης κάθε άξονα.

Άξονας	Table Travel
X	0 έως 200
Y	0 έως 100
Z	-200 έως 0

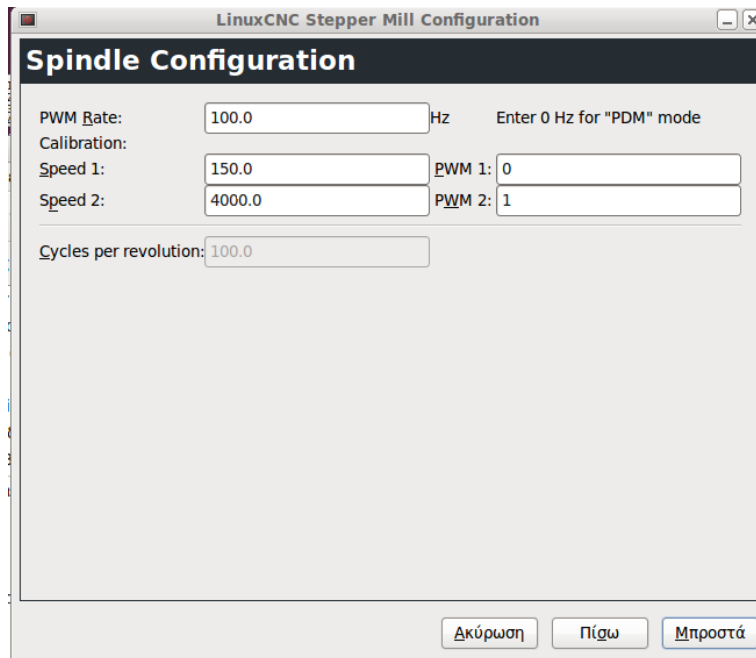
Η ιδιαιτερότητα του Z άξονα, που φαίνεται η αναστροφή των τιμών, οφείλεται στο γεγονός ότι είναι επιθυμητή η αρχικοποίηση του άξονα να γίνεται με αφετηρία το άνω όριό του.

Το Home Switch Location είναι η θέση στην οποία ο οριακός διακόπτης προσαρμόζεται σε σχέση με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων της μηχανής. Αυτή η επιλογή, καθώς και οι επόμενες δύο, εμφανίζονται μόνο όταν επιλεχθούν οι διακόπτες Home στη διαμόρφωση της παράλληλης θύρας. Αν γίνει συνδυασμός οριακών διακοπών και αρχικής θέσης, δεν θα πρέπει αυτοί να έχουν κοινή τοποθεσία, αλλιώς το πρόγραμμα θα βγάλει σφάλμα. Γι' αυτόν τον λόγο, επιλέγεται μία ελάχιστη διαφορά της τάξης των 0,1 mm.

Η επιλογή Home Search Velocity είναι η ταχύτητα κατά την αναζήτηση του διακόπτη αρχικής θέσης. Εάν ο άξονας προσεγγίζει τον διακόπτη, η ταχύτητα αυτή της προσέγγισης πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε ο άξονας να μπορεί να επιβραδύνεται, ώστε να σταματήσει πριν φτάσει στο τέλος της διαδρομής.

Τέλος, όσον αφορά το Home Latch Direction, επιλέγεται «Same» για να απομακρυνθεί ο άξονας από το διακόπτη και, στη συνέχεια να τον ξαναπλησιάσει με πολύ χαμηλή ταχύτητα. Τη δεύτερη φορά που θα κλείσει ο διακόπτης ορίζεται η αρχική θέση. Η επιλογή «Opposite» γίνεται για να απομακρυνθεί ο άξονας από το διακόπτη και όταν το ο διακόπτης ανοίξει, γίνεται ρύθμιση της αρχικής θέσης. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε η ρύθμιση σε «Opposite».

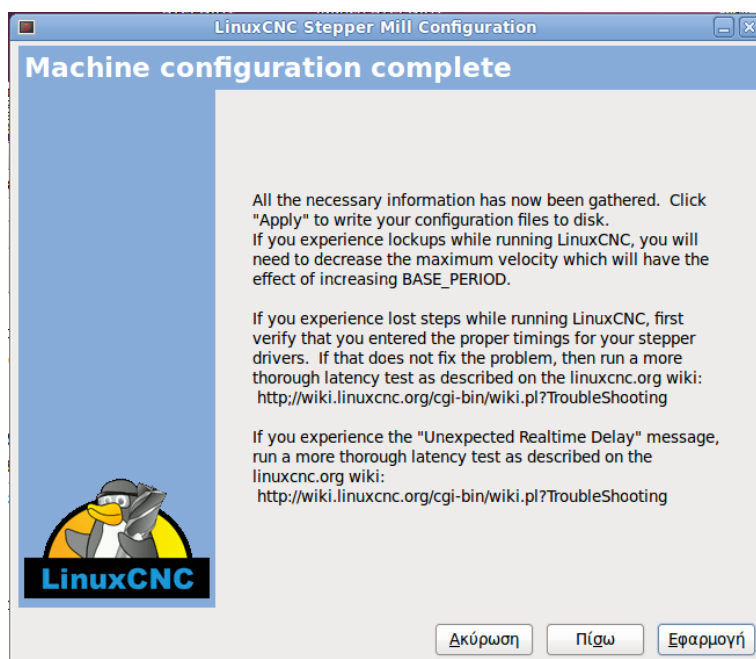
Το τελευταίο παράθυρο αρχικοποίησης του μηχανήματος αφορά την ταχύτητα περιστροφής της κύριας ατράκτου.



Εικόνα 8.11: Εισαγωγή παραμέτρων ταχύτητας περιστροφής κύριας ατράκτου.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής, η ταχύτητα περιστροφής της κύριας ατράκτου είναι από 150 έως 4000 rpm. Αυτές οι τιμές τοποθετούνται στο παράθυρο αρχικοποίησης.

Η ολοκλήρωση της αρχικοποίησης έρχεται με την εμφάνιση του αντίστοιχου παραθύρου.



Εικόνα 8.12: Παράθυρο ολοκλήρωσης αρχικοποίησης διαδικασίας.

Επισημαίνεται σε αυτό το σημείο ότι οι τελικές τιμές κάποιων εκ των ανωτέρω σταδίων δεν παρέμειναν όπως φαίνονται στις φωτογραφίες, αλλά τροποποιήθηκαν για την ομαλότερη λειτουργία της φρέζας. Η τελική μορφή τους φαίνεται μέσω των αρχείων που παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

8.2. Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη

Κατόπιν, προκειμένου να γίνει εισαγωγή στο περιβάλλον του LinuxCNC, όπως αυτό διαμορφώθηκε για το συγκεκριμένο μηχάνημα από τα ανωτέρω βήματα, γίνεται αναζήτηση του εικονιδίου στην επιφάνεια εργασίας, όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4.1, με την περιγραφή «launch EMCO-F1», που ήταν το όνομα που δόθηκε κατά τη διαμόρφωση.

9. Παράδειγμα Λειτουργίας

9.1. Προετοιμασία Διαδικασίας

Ως τελευταίο βήμα, για την πιστοποίηση της ορθής λειτουργίας της εργαλειομηχανής, σχεδιάστηκε ένα αντικείμενο (Εικόνα 9.2) και γράφτηκε ο G κώδικας για την κατασκευή του εκ της πρώτης ύλης (Εικόνα 9.1).



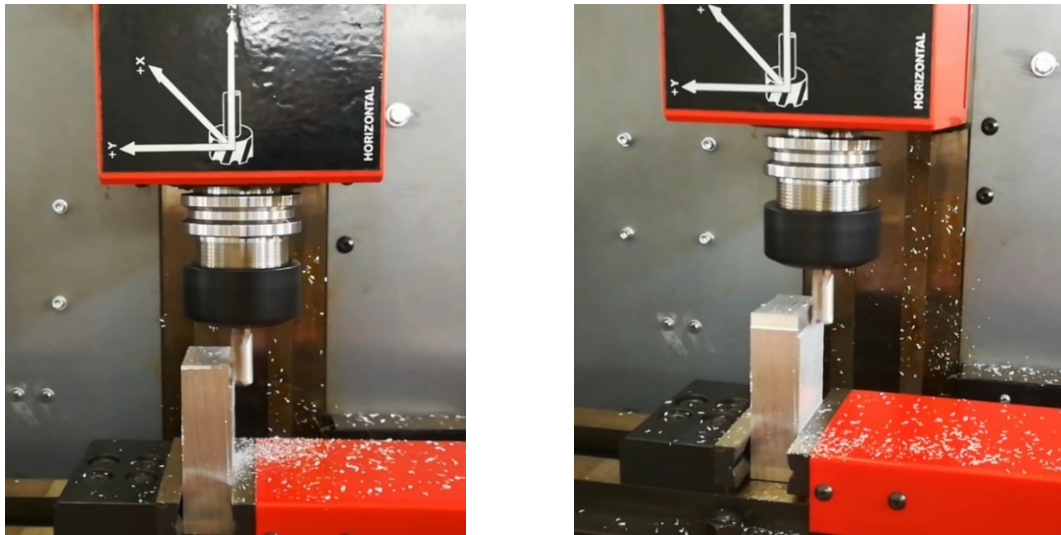
Εικόνα 9.1: Αρχικό τεμάχιο – πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε.

Το αντικείμενο που μετρήθηκε και σχεδιάστηκε, όπως φαίνεται στο Παράρτημα Ε, πρόκειται για έναν διακόπτη ρύθμισης στροφών για ένα ηλεκτρικό αναδευτήρα.



Εικόνα 9.2: Ηλεκτρικός αναδευτήρας. Εντός του μπλε τετραγώνου το τμήμα που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε.

Στη συνέχεια, κατόπιν της εκκινήσεως της μηχανής, το τεμάχιο προς επεξεργασία τοποθετήθηκε και συσφίχθηκε εντός της ηλεκτρικής μέγγενης και πραγματοποιήθηκε αρχικοποίηση των αξόνων. Κατόπιν, στο αρχικό τεμάχιο εφαρμόστηκε περιμετρική λείανση στο κέντρο κατεργασιών, χρησιμοποιώντας υψηλές στροφές και μικρό βάθος.



Εικόνα 9.3: Στιγμιότυπα από την διαδικασία λείανσης του αρχικού τεμαχίου.

9.2. G Κώδικας

Το πρόγραμμα του G κώδικα που υλοποιήθηκε παρουσιάζεται ακολούθως. Τα βήματα που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση, όπως αλλαγή κοπτικών, μηδενισμός αξόνων (offset – touch off) ή γύρισμα τεμαχίου, φαίνονται με έντονα γράμματα εντός παρενθέσεως, που υποδηλώνουν σχόλιο. Οι τίτλοι, με πράσινο φόντο, δεν περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα.

1 ^ο Πρόγραμμα: Κατεργασία άνω πλευράς
%
(OFFSETS X LEFT, Y BOTTOM, Z ABOVE)
(TOOL D10)
N1 G01 X0 Y0 Z2 F100
N2 M03 S1500
(ABOVE VIEW MACHINING PER 1MM DEPTH FOR 6MM TOTAL)
(1MM DEPTH)
N3 G01 Z-1
N4 X2
N5 Y30

N6 X4
N7 Y0
N8 X6.25
N9 Y25.73
N10 X15 Y30
N11 Z0
N12 G00 Z10
N13 X30 Y0
N14 Z0
N15 G01 Z-1
N16 X28
N17 Y30
N18 X26
N19 Y0
N20 X23.75
N21 Y25.73
N22 X15 Y30
N23 Z0
N24 G00 Z10
N25 X0 Y0
N26 Z1
(2MM DEPTH)
N27 G01 Z-2
N28 X2
N29 Y30
N30 X4
N31 Y0
N32 X6.25
N33 Y25.73
N34 X15 Y30
N35 Z0
N36 G00 Z10
N37 X30 Y0
N38 Z0
N39 G01 Z-2
N40 X28
N41 Y30
N42 X26
N43 Y0
N44 X23.75
N45 Y25.73
N46 X15 Y30
N47 Z0
N48 G00 Z10
N49 X0 Y0

N50 Z1
(3MM DEPTH)
N51 G01 Z-3
N52 X2
N53 Y30
N54 X4
N55 Y0
N56 X6.25
N57 Y25.73
N58 X15 Y30
N59 Z0
N60 G00 Z10
N61 X30 Y0
N62 Z0
N63 G01 Z-3
N64 X28
N65 Y30
N66 X26
N67 Y0
N68 X23.75
N69 Y25.73
N70 X15 Y30
N71 Z0
N72 G00 Z10
N73 X0 Y0
N74 Z1
(4MM DEPTH)
N75 G01 Z-4
N76 X2
N77 Y30
N78 X4
N79 Y0
N80 X6.25
N81 Y25.73
N82 X15 Y30
N83 Z0
N84 G00 Z10
N85 X30 Y0
N86 Z0
N87 G01 Z-4
N88 X28
N89 Y30
N90 X26
N91 Y0
N92 X23.75

N93 Y25.73
N94 X15 Y30
N95 Z0
N96 G00 Z10
N97 X0 Y0
N98 Z1
(5MM DEPTH)
N99 G01 Z-5
N100 X2
N101 Y30
N102 X4
N103 Y0
N104 X6.25
N105 Y25.73
N106 X15 Y30
N107 Z0
N108 G00 Z10
N109 X30 Y0
N110 Z0
N111 G01 Z-5
N112 X28
N113 Y30
N114 X26
N115 Y0
N116 X23.75
N117 Y25.73
N118 X15 Y30
N119 Z0
N120 G00 Z10
N121 X0 Y0
N122 Z1
(6MM DEPTH)
N123 G01 Z-6
N124 X2
N125 Y30
N126 X4
N127 Y0
N128 X6.25
N129 Y25.73
N130 X15 Y30
N131 Z0
N132 G00 Z10
N133 X30 Y0
N134 Z0
N135 G01 Z-6

N136 X28
N137 Y30
N138 X26
N139 Y0
N140 X23.75
N141 Y25.73
N142 X15 Y30
N143 Z0
N144 G00 Z10
(REMOVE REST MATERIAL)
N145 G00 X0 Y30
N146 Z0
N147 G01 Z-1
N148 X30
N149 Z-2
N150 X0
N151 Z-3
N152 X30
N153 Z-4
N154 X0
N155 Z-5
N156 X30
N157 Z-6
N158 X0
N159 Z0
(BOTTOM DISK DOWN OF THE ARROW 7 TO 9MM)
N160 G00 Z10
N161 X0 Y15
N162 Z0
(7MM DEPTH)
N163 G01 Z-7
N164 G03 X30 Y15 R15
N165 G03 X0 Y15 R15
(8MM DEPTH)
N166 G01 Z-8
N167 G03 X30 Y15 R15
N168 G03 X0 Y15 R15
(9MM DEPTH)
N169 G01 Z-9
N170 G03 X30 Y15 R15
N171 G03 X0 Y15 R15
N172 G01 Z0
N173 G00 Z20
N174 M03 S0
N175 M30 (END)

(END FOR TOOL CHANGE D6, FLIP AND REOFFSETTING)
2^ο Πρόγραμμα: Αποκοπή από αρχικό τεμάχιο (1)
%
(OFFSETS X + Y LEFT & BOTTOM, Z OVER)
(TOOL D6)
N1 G01 X0 Y0 Z2 F100
N2 M03 S1500
(ABOVE VIEW MACHINING PER 1MM DEPTH FOR 23MM TOTAL)
N3 Z-1
N4 Y6
N5 X21
N6 Z-2
N7 X0
N8 Z-3
N9 X21
N10 Z-4
N11 X0
N12 Z-5
N13 X21
N14 Z-6
N15 X0
N16 Z-7
N17 X21
N18 Z-8
N19 X0
N20 Z-9
N21 X21
N22 Z-10
N23 X0
N24 Z-11
N25 X21
N26 Z-12
N27 X0
N28 G01 Z0
N29 G00 Z20
N30 M03 S0
N31 M30 (END)
(TURNING OVER THE PIECE & REOFFSETTING, WITH SAME TOOL D6)
3^ο Πρόγραμμα: Αποκοπή από αρχικό τεμάχιο (2)
%
(OFFSETS X + Y LEFT & BOTTOM, Z OVER)
(TOOL D6)
N1 G01 X0 Y0 Z2 F100
N2 M03 S1500

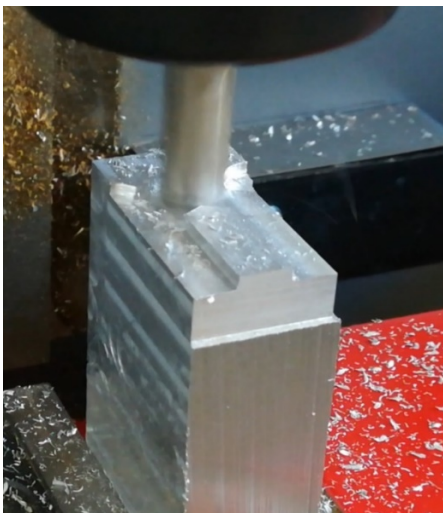
(ABOVE VIEW MACHINING PER 1MM DEPTH FOR 23MM TOTAL)
N3 Z-1
N4 Y6
N5 X-21
N6 Z-2
N7 X0
N8 Z-3
N9 X-21
N10 Z-4
N11 X0
N12 Z-5
N13 X-21
N14 Z-6
N15 X0
N16 Z-7
N17 X-21
N18 Z-8
N19 X0
N20 Z-9
N21 X-21
N22 Z-10
N23 X0
N24 Z-11
N25 X-21
N26 Z-12
N27 X0
N28 G01 Z0
N29 G00 Z20
N30 M03 S0
N31 M30 (END)
(TURNING OVER THE PIECE REOFFSETTING WITH SAME TOOL D6)
4^ο Πρόγραμμα: Κατεργασία κάτω πλευράς
%
(OFFSETS X + Y LEFT & BOTTOM, Z OVER)
(TOOL D6)
N1 G00 X0 Y0 Z2 F100
N2 M03 S1500
(ABOVE VIEW MACHINING PER 1MM DEPTH FOR 2MM TOTAL)
(BIG POCKET)
(1MM DEPTH)
N3 G01 X13 Y13
N4 Z-1
N5 X16
N6 G03 X10 Y13 R3

N7 G03 X16 Y13 R3
N8 G01 X19
N9 G03 X7 Y13 R6
N10 G03 X19 Y13 R6
N11 G01 X13 Y13
(2MM DEPTH)
N12 Z-2
N13 X16
N14 G03 X10 Y13 R3
N15 G03 X16 Y13 R3
N16 G01 X19
N17 G03 X7 Y13 R6
N18 G03 X19 Y13 R6
(MIDDLE DRILL)
N19 G01 X13 Y13 Z0
N20 Z-4
N21 Z0
N22 Z-6
N23 Z0
N24 Z-7
N25 Z0
N26 G00 Z60
N27 M03 S0
N28 M1 (PAUSE - DISABLE SPINDLE FROM SWITCH)
(TOOL CHANGE D3 - OFFSET AGAIN - SPINDLE SWITCH ENABLE - THEN RESUME)
N29 G00 X11 Y5.5 Z2
N30 M03 S1500
N31 G01 Z-3 F100
N32 X13
N33 X10
N34 Z-4
N35 X13
N36 Z-5
N37 X10
N34 Z-6
N35 X13
N36 Z-7
N37 X10
N38 Z0
N39 G00 Z60
N40 M03 S0
N41 M30 (END)
(TURNING OVER THE PIECE REOFFSETTING AND TOOL CHANGE D3)

5 ^ο Πρόγραμμα: Άνοιγμα οπής	
%	
(OFFSETS X + Y LEFT & BOTTOM, Z OVER)	
(TOOL D3)	
N1 G01 Z2 F100	
N2 M03 S1500	
(ABOVE VIEW MACHINING PER 1MM DEPTH FOR 7MM TOTAL)	
N3 G01 X5.5 Y5.25	
N4 Z-1	
N5 Z0	
N6 Z-2	
N7 Z0	
N8 Z-3	
N9 Z0	
N10 Z-4	
N11 Z0	
N6 Z-5	
N7 Z0	
N8 Z-6	
N9 Z0	
N10 Z-7	
N11 Z0	
N14 G00 Z20	
N40 M03 S0	
N41 M30 (END)	
(OFFICIALLY THE END)	

9.3. Αποτέλεσμα Μηχανουργικής Κατεργασίας

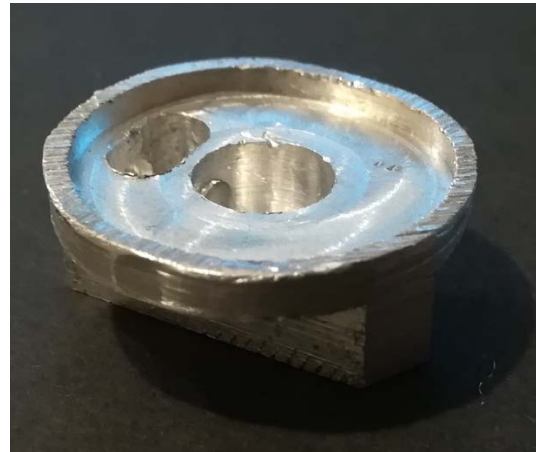
Ακολούθως παρατίθενται φωτογραφίες από τη διαδικασία κατεργασίας του αντικειμένου.





Εικόνα 9.4: Στιγμιότυπα κατεργασίας αρχικού τεμαχίου προς τελική διαμόρφωση.

Μετά την περάτωση του προγράμματος G κώδικα, το τελικό αντικείμενο απομακρύνθηκε από την τράπεζα κατεργασίας και είναι όπως φαίνεται στις κάτωθι εικόνες. Οι διαστάσεις του είναι ακριβώς οι επιθυμητές και όμοιες με αυτές του πρωτότυπου.



Εικόνα 9.5: Τελική μορφή αντικειμένου.

10. Συμπεράσματα

10.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ο τρόπος ανακατασκευής ενός κέντρου κατεργασιών τριών αξόνων και η επίτευξη της επικοινωνίας του με Η/Υ.

Η αντικατάσταση των βηματικών κινητήρων προσφέρει ομαλότερη κίνηση των τριών αξόνων, σε σύγκριση με τους εργοστασιακούς, λόγω της αυξημένης διαθέσιμης ροπής. Επιπλέον, λόγω των αναβαθμισμένων χαρακτηριστικών τους και σε συνδυασμό με τους οδηγούς τους, παρέχεται καλύτερη ακρίβεια στις κατεργασίες αφενός μεν λόγω της πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας μέσω του Η/Υ, αφετέρου λόγω του μικρότερου βήματος που παρέχει ο κάθε βηματικός κινητήρας.

Αποδεικνύεται η ικανότητα του λογισμικού LinuxCNC να προβεί σε αποτελεσματικό έλεγχο μίας τριαξονικής φρέζας, προσθέτοντας ως εισόδους όλα τα εξωτερικά ερεθίσματα της μηχανής, προκειμένου να λειτουργεί ομαλά και με ασφάλεια.

Ο βαθμός διευκόλυνσης του χρήστη, ώστε να εισαγάγει και να εκτελέσει ένα πρόγραμμα G κώδικα, έχει αυξηθεί πλέον δραστικά.

Επιπλέον, ένα ακόμη πλεονέκτημα του εν λόγω λογισμικού αποτελεί η αύξηση των διαθέσιμων εντολών G και M κώδικα.

10.2. Περαιτέρω Έρευνα

Προκειμένου να αυξηθεί η λειτουργικότητα της συγκεκριμένης φρέζας και με γνώμονα την επίτευξη επιπλέον ενεργειών από το μηχάνημα, μπορούν να προταθούν τα κάτωθι.

Αρχικά, θα μπορούσε είτε να κατασκευαστεί, είτε να προσαρμοστεί ένα έτοιμο εξωτερικό χειριστήριο με στόχο την πιο γρήγορη μικροκατεργασία αντικειμένων, όπως επί παραδείγματι διάνοιξη οπών, χωρίς την ανάγκη σύνθεσης ολόκληρου ρεπερτορίου εντολών G κώδικα στον Η/Υ. Η συγκεκριμένη τροποποίηση απαιτεί βέβαια και δεύτερη παράλληλη θύρα στον Η/Υ, αλλά και ακόμη μία πλακέτα διαμοιρασμού σημάτων.

Μία ακόμη πρόταση αποτελεί η εισαγωγή ενός επιπλέον άξονα κίνησης, ο οποίος θα είναι περιστροφικός, και θα αυξάνει τις δυνατότητες κατεργασίας αντικειμένων με πιο πολύπλοκες γεωμετρίες. Το LinuxCNC είναι ικανό, στην υπάρχουσα διαμόρφωση, προσθέτοντας ως εισόδους το βήμα και την κατεύθυνση του άξονα (όπως περιγράφηκε για τους X, Y και Z στην παρούσα εργασία) να προβεί στον αποτελεσματικό έλεγχο και των τεσσάρων πλέον αξόνων.

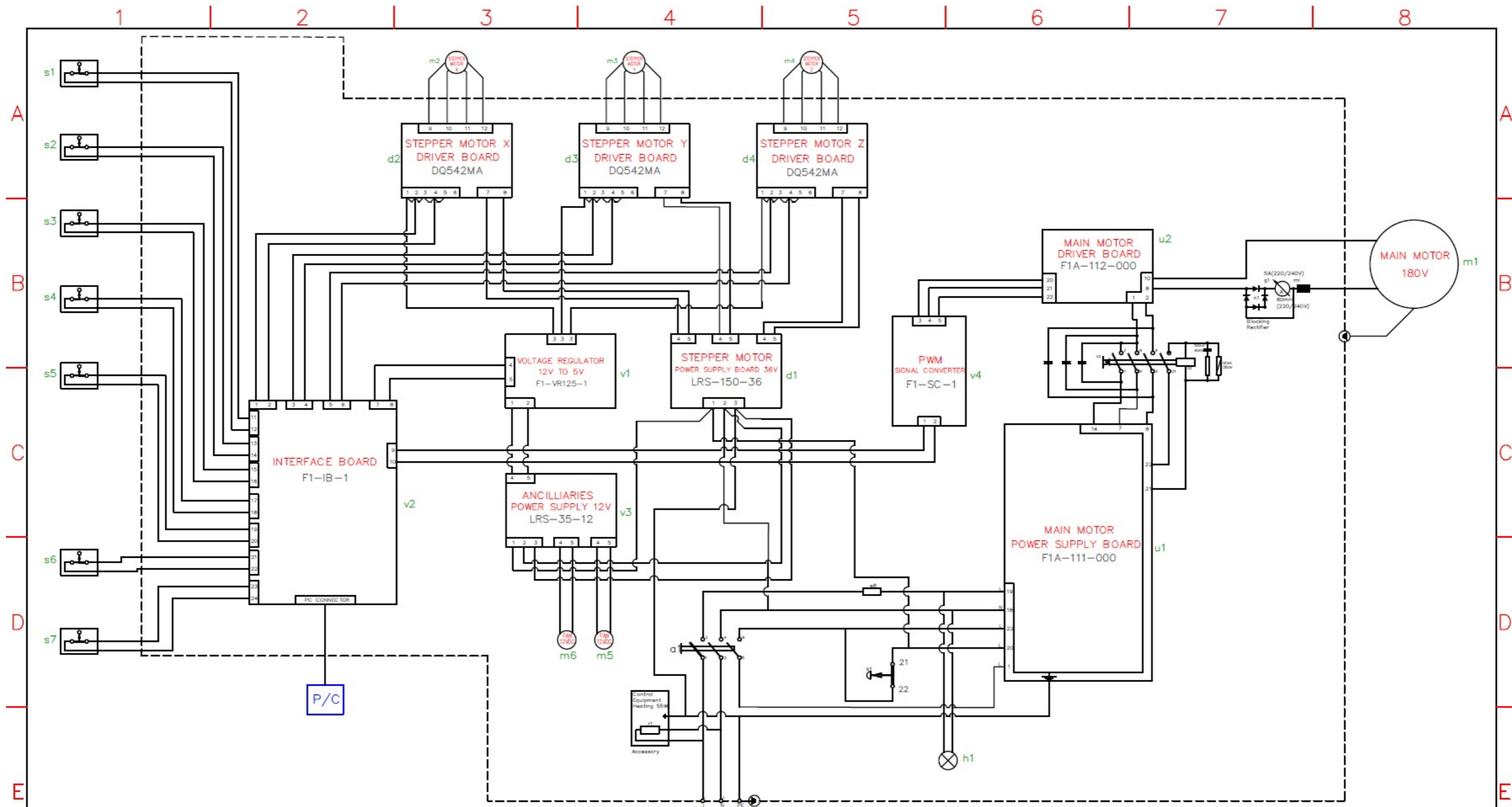
Τέλος, η κατασκευή συστήματος αυτόματης εναλλαγής των κοπτικών εργαλείων, θα βελτιώνει ακόμη περισσότερο την αυτοματοποίηση των διαδικασιών, εξοικονομώντας χρόνο στον χρήστη, αφού δεν θα απαιτείται η παύση της λειτουργίας για την εκδήλωση των απαραίτητων ενεργειών αντικατάστασης.

Βιβλιογραφία

- [1] Davim, P. (2019). *Manufacturing engineering education*. Oxford, UK: Chandos Publishing.
- [2] Gutiérrez, M.E., Alvares, A.J. (2013). Development of a CNC router adherent to standard step-NC based on the controller advanced machine (EMC 2), *22nd International Congress of Mechanical Engineering*, Brazil, 2013.
- [3] Hai-peng, H., Guan-xin, C., Zhen-long, W. (2009). Development of a CNC system for multiaxis EDM based on RTLinux, *2009 WRI World Congress on Software Engineering*.
- [4] Hamilton, C. (1984). *A guide to printed circuit board design*. London, UK: Butterworth & Co. Ltd.
- [5] Hughes, A. (2006). *Electric motors and drives, fundamentals, types and applications* (3rd ed). Oxford, UK: Elsevier.
- [6] Ji, H., Li, Y. & Wang, J. (2008). A software oriented CNC system based on Linux/RTLinux, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(3-4), 291-301.
- [7] Khanna, A., Kumar, A., Bhatnagar, A., Tyagi, R., Srivastava, S. (2013). Low-cost production CNC system, *2013 7th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, India, 2013.
- [8] Linuxcnc (2016). *Getting started* [PDF file]. Ανάκτηση από <http://linuxcnc.org/docs/2.6/pdf>.
- [9] Linuxcnc (2016). *HAL manual* [PDF file]. Ανάκτηση από <http://linuxcnc.org/docs/2.6/pdf>.
- [10] Linuxcnc (2016). *User manual* [PDF file]. Ανάκτηση από <http://linuxcnc.org/docs/2.6/pdf>.
- [11] NEMA Industrial Control and Systems, *Motion/position control motors, controls, and feedback devices* [PDF file]. Ανάκτηση από nema.org/Standards/SecureDocuments/ICS16.pdf.
- [12] Park, S., Kim, S.-H., Cho, H. (2005). Kernel software for efficiently building, re-configuring, and distributing an open CNC controller, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(7-8), 788–796.
- [13] Pritschow, G., Altintas, Y., Jovane, F., Koren, Y., Mitsuishi, M., Takata, S., Brussel, H., Weck, M., Yamazaki, K. (2001). Open controller architecture – past, present and future, *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 50(2), 463-470.

- [14] Radhakrishnan, P. (2015). *Computer numerical control machines and computer aided manufacture* (2nd ed). London, UK: New Academic Science Limited.
- [15] Shackelford, W., Proctor, F. (2001). Use of Open Source Distribution for a Machine Tool Controller, *Proc. SPIE 4191, Sensors and Controls for Intelligent Manufacturing*.
- [16] Staroveški, T., Brezak, D., Udiljak, T., Majetić, D. (2009). Implementation of a linux-based CNC open control system, 12th International Scientific Conference on Production Engineering, Computer Integrated Manufacturing and High Speed Machining, Biograd, 2009. Zagreb: Croatian Association of Production Engineering.
- [17] Tomislav, S., Danko, B., Toma, U., Dubravko, M. (2011). Experimental machine tool for process monitoring and control systems research, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 23-24.
- [18] Wayne, C. (2016). *Electronic circuits, the definitive guide to circuit boards, testing circuits and electricity principles*, Independently Published.
- [19] Wei, X., JiHong, C. (2012). Research on ARM Numerical Control System, *Physics Procedia*, 25, 1934–1938.
- [20] Xiong-bo, M., Zhen-yu, H., Yong-zhang, W., Hong-ya, F. (2007). Development of a PC-based open architecture software-CNC system, *Chinese Journal of Aeronautics*, 20(3), 272-281.
- [21] Xun, X. (2009). *Integrating advanced computer-aided design, manufacturing, and numerical control, principles and implementations*. New York, USA: Information Science Reference.
- [22] Zhang, C., Wang, H., Wang, J. (2003). An USB-based software CNC system, *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3), 286–290.
- [23] Zhang, X. L., Tang, X. Q., Chen, J. H., Zhou, H. C., Wu, T. (2006). Hierarchical real-time networked CNC system based on the transparent model of industrial Ethernet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(1-2), 161–167.

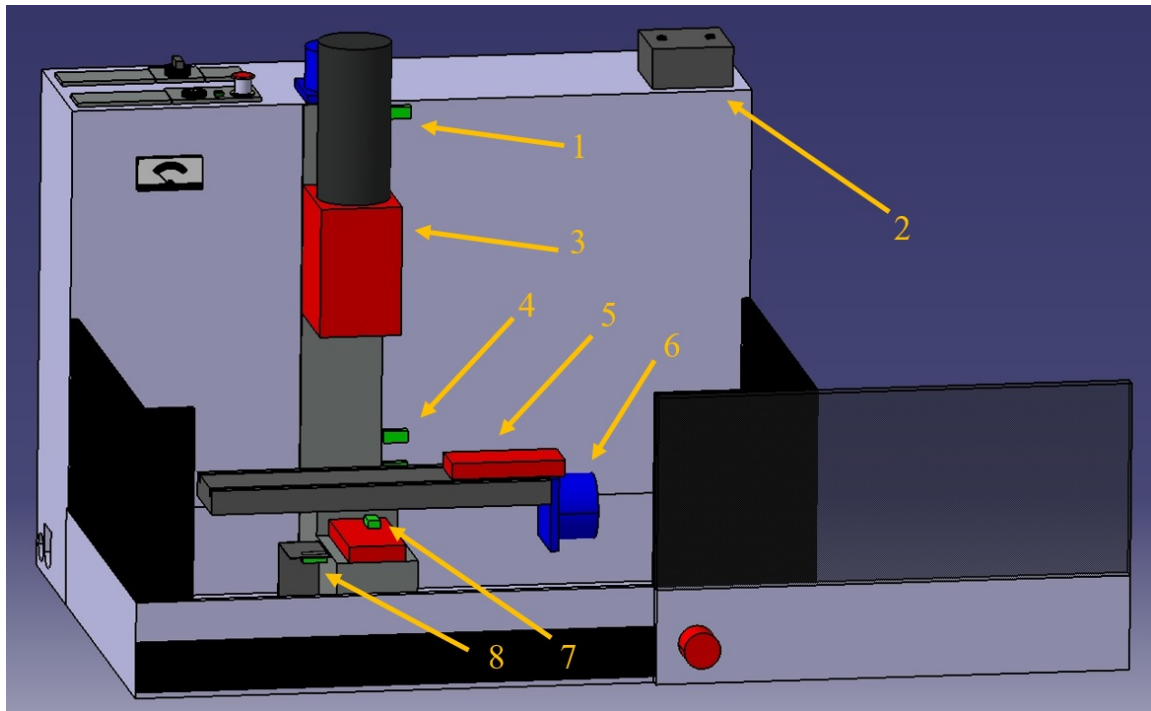
Παράρτημα Α: Ηλεκτρολογικό Σχέδιο EMCO F1-CNC



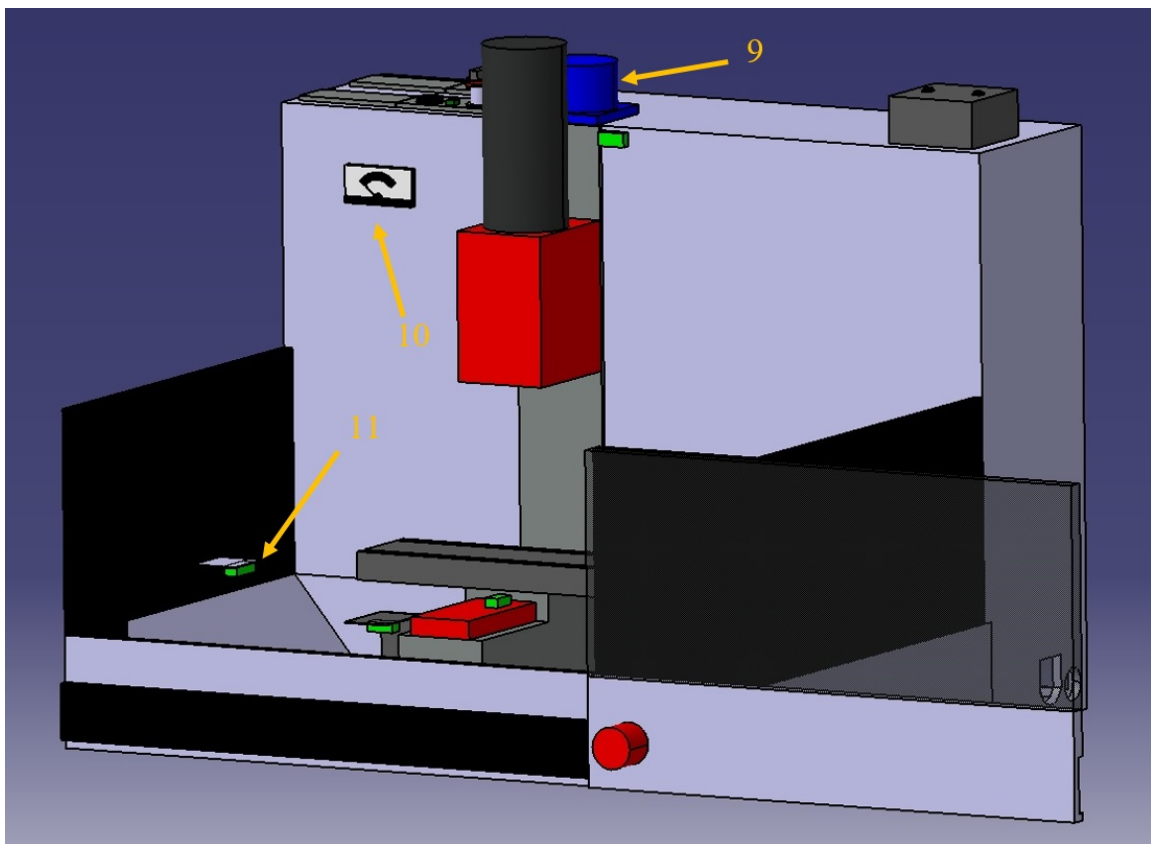
PARTS LIST		e8	Main Fuse	m6	Fan	u1	Main Motor Power Supply Board
a1	Main Switch	g1	Amperometer	s1	X+ End Switch	u2	Main Motor Driver Board
b1	Emergency Stop Button	h1	Control Lamp	s2	X- End Switch	v1	Voltage Regulator 12V to 5V
b2	Main Motor Switch	m1	Main Motor	s3	Y+ End Switch	v2	Interface Board
d1	Stepper Motor Power Supply Board	m2	Stepper Motor X	s4	Y- End Switch	v3	Ancillaries Power Supply 12V
d2	Stepper Motor X Driver Board	m3	Stepper Motor Y	s5	Z+ End Switch	v4	PWM Signal Converter
d3	Stepper Motor Y Driver Board	m4	Stepper Motor Z	s6	Z- End Switch		
d4	Stepper Motor Z Driver Board	m5	Fan	s7	Door End Switch		

NATIONAL TECHNICAL
 UNIVERSITY OF ATHENS
 EMCO F1-CNC
 TZANIS ATHANASIOS

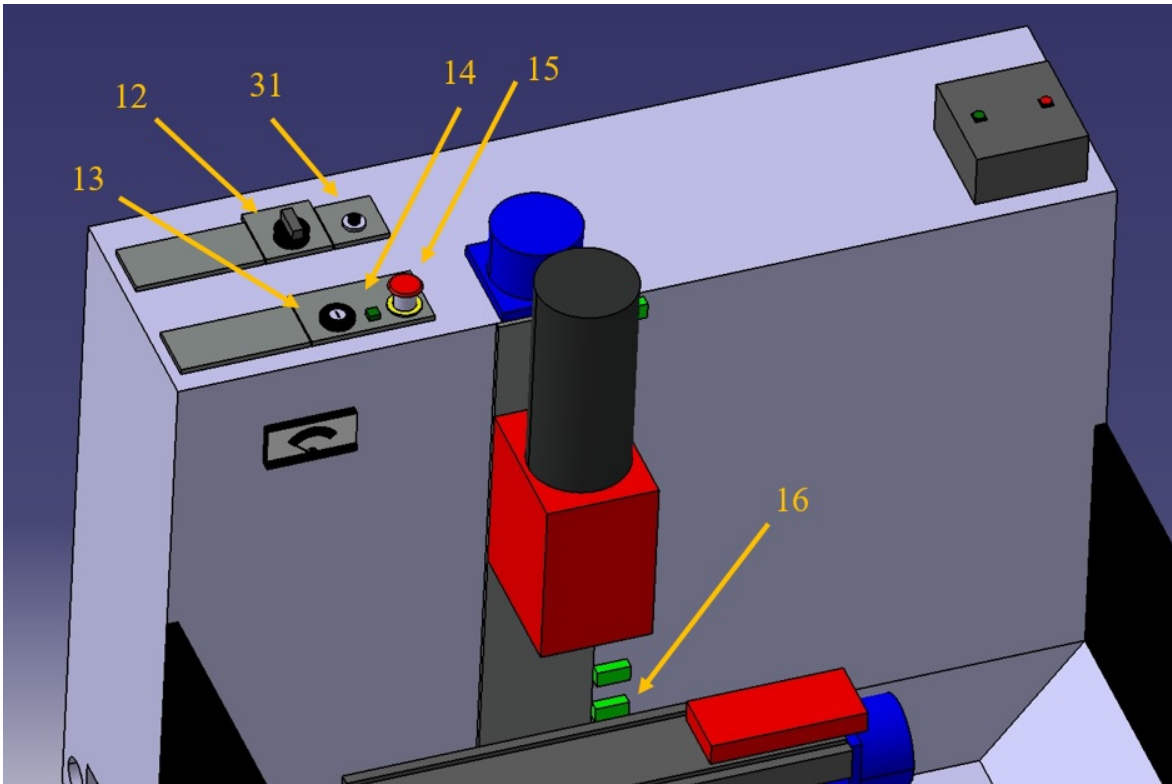
Παράρτημα Β: 3D Σχεδίαση EMCO F1-CNC



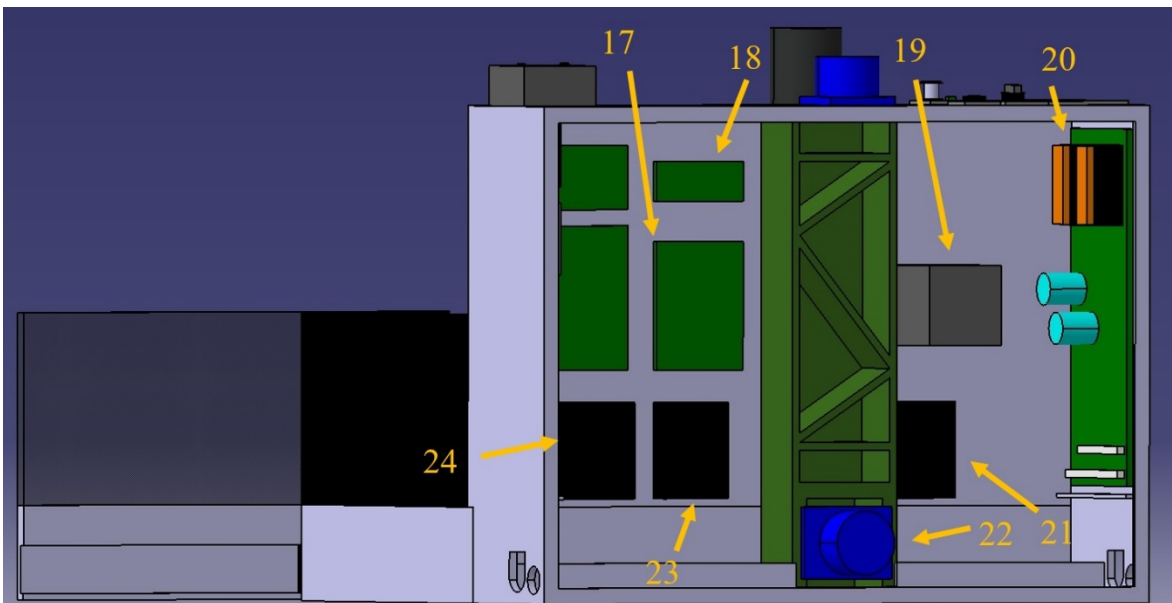
Εικόνα 10.1: Εμπρόσθια όψη φρέζας (1).



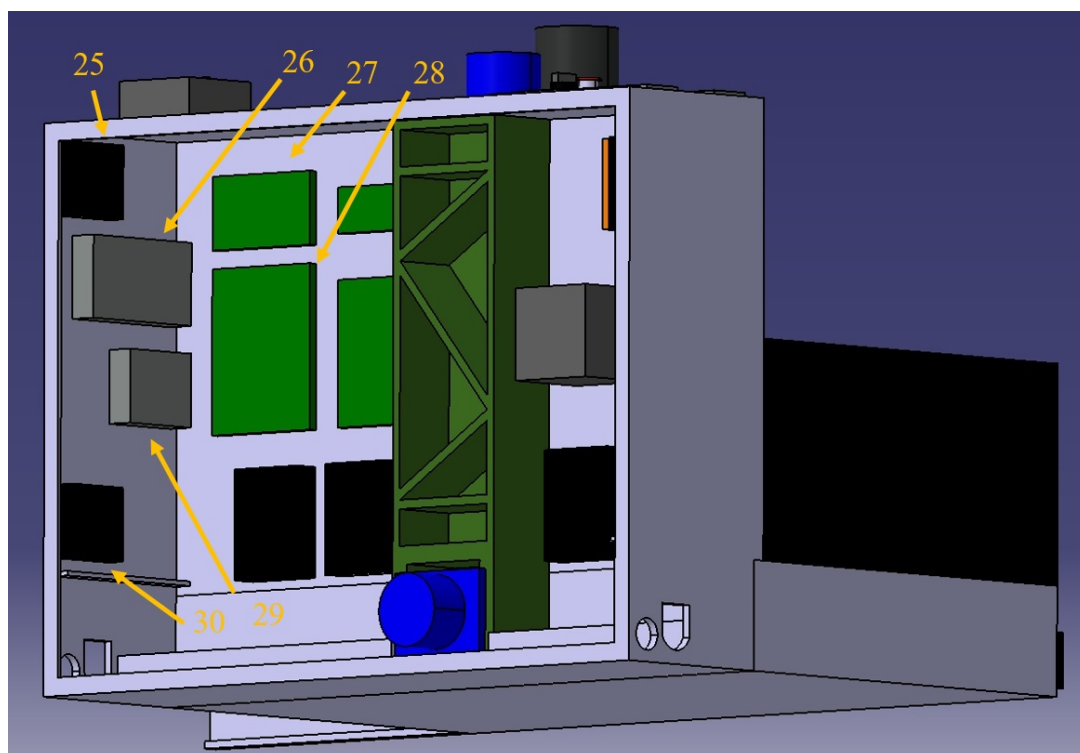
Εικόνα 10.2: Εμπρόσθια όψη φρέζας (2).



Εικόνα 10.3: Λεπτομέρεια άνω πλευράς φρέζας.



Εικόνα 10.4: Οπίσθια όψη φρέζας (1).



Εικόνα 10.5: Οπίσθια όψη φρέζας (2).

Πίνακας 10.1: Υπόμνημα.

A/A	Περιγραφή	A/A	Περιγραφή
1	Οριακός διακόπτης Z+	17	Πλακέτα οδηγός κυρίας ατράκτου
2	Έλεγχος ηλεκτρικής μέγγενης	18	Πλακέτα μετατροπής PWM σε αναλογικό σήμα
3	Κύρια άτρακτος	19	Motor inductor
4	Οριακός διακόπτης Z-	20	Πλακέτα τροφοδοσίας κυρίας ατράκτου
5	Ηλεκτρική μέγγενη	21	Οδηγός βηματικού κινητήρα Z άξονα
6	Βηματικός κινητήρας X άξονα	22	Βηματικός κινητήρας Y άξονα
7	Οριακός διακόπτης X+	23	Οδηγός βηματικού κινητήρα Y άξονα
8	Οριακός διακόπτης Y-	24	Οδηγός βηματικού κινητήρα X άξονα
9	Βηματικός κινητήρας Z άξονα	25	Ανεμιστήρας
10	Αμπερόμετρο	26	Τροφοδοτικό οδηγών βηματικών κινητήρων 36V
11	Οριακός διακόπτης X-	27	Πλακέτα μετατροπής τάσης 12V σε 5V
12	Λειτουργία κυρίας ατράκτου	28	Πλακέτα διαμοιρασμού σημάτων
13	Λειτουργίας φρέζας	29	Τροφοδοτικό παρελκομένων 12V
14	Λυχνία έναρξης λειτουργίας	30	Ανεμιστήρας
15	Κομβίο έκτακτης ανάγκης	31	Κύρια ασφάλεια
16	Οριακός διακόπτης Y+		

Παράρτημα Γ: Αρχεία LinuxCNC

Υποπαράρτημα Γ1: Αρχείο .hal

```
# Generated by stepconf at Thu Jun 13 19:33:21 2019
# If you make changes to this file, they will be
# overwritten when you run stepconf again
loadrt trivkins
loadrt [EMCMOT]EMCMOT base_period_nsec=[EMCMOT]BASE_PERIOD
servo_period_nsec=[EMCMOT]SERVO_PERIOD num_joints=[TRAJ]AXES
loadrt probe_parport
loadrt hal_parport cfg="0x378 out "
loadrt stepgen step_type=0,0,0
loadrt abs count=1
loadrt pwmgen output_type=1

addf parport.0.read base-thread
addf stepgen.make-pulses base-thread
addf pwmgen.make-pulses base-thread
addf parport.0.write base-thread

addf stepgen.capture-position servo-thread
addf motion-command-handler servo-thread
addf motion-controller servo-thread
addf stepgen.update-freq servo-thread
addf pwmgen.update servo-thread
addf abs.0 servo-thread

net spindle-cmd <= motion.spindle-speed-out => pwmgen.0.value
net spindle-on <= motion.spindle-on => pwmgen.0.enable
net spindle-pwm <= pwmgen.0.pwm
setp pwmgen.0.pwm-freq 10000.0
setp pwmgen.0.scale 1830
setp pwmgen.0.offset 0
setp pwmgen.0.dither-pwm true

net xstep => parport.0.pin-02-out
setp parport.0.pin-03-out-invert 1
net xdir => parport.0.pin-03-out

net ystep => parport.0.pin-04-out
# setp parport.0.pin-05-out-invert 1
net ydir => parport.0.pin-05-out

net zstep => parport.0.pin-06-out
setp parport.0.pin-07-out-invert 1
net zdir => parport.0.pin-07-out

net spindle-pwm => parport.0.pin-08-out

net both-home-x <= parport.0.pin-10-in
net both-home-y <= parport.0.pin-11-in
net both-home-z <= parport.0.pin-12-in
net estop-ext <= parport.0.pin-13-in-not
```

```

setp stepgen.0.position-scale [AXIS_0]SCALE
setp stepgen.0.steplen 1
setp stepgen.0.stepspace 1
setp stepgen.0.dirhold 23300
setp stepgen.0.dirsetup 23300
setp stepgen.0.maxaccel [AXIS_0]STEPGEN_MAXACCEL
net xpos-cmd axis.0.motor-pos-cmd => stepgen.0.position-cmd
net xpos-fb stepgen.0.position-fb => axis.0.motor-pos-fb
net xstep <= stepgen.0.step
net xdir <= stepgen.0.dir
net xenable axis.0.amp-enable-out => stepgen.0.enable
net both-home-x => axis.0.home-sw-in
net both-home-x => axis.0.neg-lim-sw-in
net both-home-x => axis.0.pos-lim-sw-in

setp stepgen.1.position-scale [AXIS_1]SCALE
setp stepgen.1.steplen 1
setp stepgen.1.stepspace 1
setp stepgen.1.dirhold 23300
setp stepgen.1.dirsetup 23300
setp stepgen.1.maxaccel [AXIS_1]STEPGEN_MAXACCEL
net ypos-cmd axis.1.motor-pos-cmd => stepgen.1.position-cmd
net ypos-fb stepgen.1.position-fb => axis.1.motor-pos-fb
net ystep <= stepgen.1.step
net ydir <= stepgen.1.dir
net yenable axis.1.amp-enable-out => stepgen.1.enable
net both-home-y => axis.1.home-sw-in
net both-home-y => axis.1.neg-lim-sw-in
net both-home-y => axis.1.pos-lim-sw-in

setp stepgen.2.position-scale [AXIS_2]SCALE
setp stepgen.2.steplen 1
setp stepgen.2.stepspace 1
setp stepgen.2.dirhold 23300
setp stepgen.2.dirsetup 23300
setp stepgen.2.maxaccel [AXIS_2]STEPGEN_MAXACCEL
net zpos-cmd axis.2.motor-pos-cmd => stepgen.2.position-cmd
net zpos-fb stepgen.2.position-fb => axis.2.motor-pos-fb
net zstep <= stepgen.2.step
net zdir <= stepgen.2.dir
net zenable axis.2.amp-enable-out => stepgen.2.enable
net both-home-z => axis.2.home-sw-in
net both-home-z => axis.2.neg-lim-sw-in
net both-home-z => axis.2.pos-lim-sw-in

net estop-out <= iocontrol.0.user-enable-out
net estop-ext => iocontrol.0.emc-enable-in

loadusr -W hal_manualtoolchange
net tool-change iocontrol.0.tool-change => hal_manualtoolchange.change
net          tool-changed          iocontrol.0.tool-changed          <=
hal_manualtoolchange.changed
net          tool-number          iocontrol.0.tool-prep-number          =>
hal_manualtoolchange.number
net          tool-prepare-loopback          iocontrol.0.tool-prepare          =>
iocontrol.0.tool-prepared

```


Υποπαράρτημα Γ2: Αρχείο .ini

```
# Generated by stepconf at Thu Jun 13 19:33:21 2019
# If you make changes to this file, they will be
# overwritten when you run stepconf again

[EMC]
MACHINE = EMCO-F1
DEBUG = 0

[DISPLAY]
DISPLAY = axis
EDITOR = gedit
POSITION_OFFSET = RELATIVE
POSITION_FEEDBACK = ACTUAL
MAX_FEED_OVERRIDE = 1.2
INTRO_GRAPHIC = linuxcnc.gif
INTRO_TIME = 5
PROGRAM_PREFIX = /home/administrator/linuxcnc/nc_files
INCREMENTS = 5mm 1mm .5mm .1mm .05mm .01mm .005mm
PYVCP = custompanel.xml

[FILTER]
PROGRAM_EXTENSION = .png,.gif,.jpg Greyscale Depth Image
PROGRAM_EXTENSION = .py Python Script
png = image-to-gcode
gif = image-to-gcode
jpg = image-to-gcode
py = python

[TASK]
TASK = milltask
CYCLE_TIME = 0.010

[RS274NGC]
PARAMETER_FILE = linuxcnc.var

[EMCMOT]
EMCMOT = motmod
COMM_TIMEOUT = 1.0
COMM_WAIT = 0.010
BASE_PERIOD = 100000
SERVO_PERIOD = 1000000

[HAL]
HALFILE = EMCO-F1.hal
HALFILE = custom.hal
POSTGUI_HALFILE = custom_postgui.hal

[TRAJ]
AXES = 3
COORDINATES = X Y Z
LINEAR_UNITS = mm
ANGULAR_UNITS = degree
CYCLE_TIME = 0.010
DEFAULT_VELOCITY = 6
MAX_LINEAR_VELOCITY = 6.00
```

```

[EMCIO]
EMCIO = io
CYCLE_TIME = 0.100
TOOL_TABLE = tool.tbl

# x
[AXIS_0]
TYPE = LINEAR
HOME = 0.0
MAX_VELOCITY = 6.0
MAX_ACCELERATION = 80.0
STEPGEN_MAXACCEL = 100.0
SCALE = 400.0
FERROR = 1
MIN_FERROR = .25
MIN_LIMIT = -0.001
MAX_LIMIT = 200.0
HOME_OFFSET = -4
HOME_SEARCH_VEL = -14.000000
HOME_LATCH_VEL = 1.250000
HOME_IGNORE_LIMITS = YES
HOME_SEQUENCE = 0

# y
[AXIS_1]
TYPE = LINEAR
HOME = 0.0
MAX_VELOCITY = 6.0
MAX_ACCELERATION = 80.0
STEPGEN_MAXACCEL = 100.0
SCALE = 400.0
FERROR = 1
MIN_FERROR = .25
MIN_LIMIT = -0.001
MAX_LIMIT = 100.0
HOME_OFFSET = -4
HOME_SEARCH_VEL = -14.000000
HOME_LATCH_VEL = 1.250000
HOME_IGNORE_LIMITS = YES
HOME_SEQUENCE = 1

# z
[AXIS_2]
TYPE = LINEAR
HOME = 0.0
MAX_VELOCITY = 6.0
MAX_ACCELERATION = 80.0
STEPGEN_MAXACCEL = 100.0
SCALE = 400.0
FERROR = 1
MIN_FERROR = .25
MIN_LIMIT = -200.0
MAX_LIMIT = 0.001
HOME_OFFSET = 4
HOME_SEARCH_VEL = 5.000000
HOME_LATCH_VEL = -1.250000
HOME_IGNORE_LIMITS = YES

```

HOME_SEQUENCE = 2

Υποπαράρτημα Γ3: Αρχείο .xml

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<pyvcp>
  <vbox>
    <relief>RIDGE</relief>
    <bd>6</bd>
    <label>
      <text>"Spindle Speed:"</text>
      <font>("Helvetica",20)</font>
    </label>
    <bar>
      <min_>0</min_>
      <halpin>"spindle-speed"</halpin>
      <max_>1830</max_>
    </bar>
    <label>
      <text>"Spindle-At-Speed:"</text>
      <font>("Helvetica",20)</font>
    </label>
    <hbox>
      <label>
        <text>"
          "
        </text>
        <font>("Helvetica",20)</font>
      </label>
      <led>
        <halpin>"spindle-at-speed-led"</halpin>
        <size>30</size>
        <on_color>"green"</on_color>
        <off_color>"red"</off_color>
      </led>
    </hbox>
  </vbox>
</pyvcp>
```

Παράρτημα Δ: Διαθέσιμες Εντολές

Υποπαράρτημα Δ1: Επεξήγηση Συμβολισμών [10]

Γράμμα	Επεξήγηση
A	A axis of machine
B	B axis of machine
C	C axis of machine
D	Tool radius compensation number
F	Feed rate
G	General function (See table Modal Groups)
H	Tool length offset index
I	X offset for arcs and G87 canned cycles
J	Y offset for arcs and G87 canned cycles
K	Z offset for arcs and G87 canned cycles.
	Spindle-Motion Ratio for G33 synchronized movements
M	Miscellaneous function (See table Modal Groups)
N	Line number
P	Dwell time in canned cycles and with G4.
	Key used with G10.
Q	Feed increment in G73, G83 canned cycles
R	Arc radius or canned cycle plane
S	Spindle speed
T	Tool selection
U	U axis of machine
V	V axis of machine
W	W axis of machine
X	X axis of machine
Y	Y axis of machine
Z	Z axis of machine

Υποπαράρτημα Δ2: Εντολές G κώδικα [10]

G κώδικας	Επεξήγηση
G0	Coordinated Straight Motion Rapid Rate
G1	Coordinated Straight Motion Feed Rate
G2 G3	Coordinated Helical Motion Feed Rate
G4	Dwell
G5.1	Quadratic B-Spline
G5.2 G5.3	NURBs Block
G7	Diameter Mode (lathe)
G8	Radius Mode (lathe)
G10 L1	Set Tool Table Entry
G10 L10	Set Tool Table, Calculated, Workpiece

G10 L11	Set Tool Table, Calculated, Fixture
G10 L2	Coordinate System Origin Setting
G10 L20	Coordinate System Origin Setting Calculated
G17 - G19.1	Plane Select
G20 G21	Units of Measure
G28 - G28.1	Go to Predefined Position
G30 - G30.1	Go to Predefined Position
G33	Spindle Synchronized Motion
G33.1	Rigid Tapping
G38.2 - G38.5	Probing
G40	Cancel Cutter Compensation
G41 G42	Cutter Compensation
G41.1 G42.1	Dynamic Cutter Compensation
G43	Use Tool Length Offset from Tool Table
G43.1	Dynamic Tool Length Offset
G49	Cancel Tool Length Offset
G53	Motion in Machine Coordinate System
G54-G59	Select Coordinate System (1 - 6)
G59.1-G59.3	Select Coordinate System (7 - 9)
G61 G61.1	Path Control Mode
G64	Path Control Mode with Optional Tolerance
G73	Drilling Cycle with Chip Breaking
G76	Multi-pass Threading Cycle (Lathe)
G80	Cancel Motion Modes
G81	Drilling Cycle
G82	Drilling Cycle with Dwell
G83	Drilling Cycle with Peck
G85	Boring Cycle, No Dwell, Feed Out
G86	Boring Cycle, Stop, Rapid Out
G89	Boring Cycle, Dwell, Feed Out
G90 G91	Distance Mode
G90.1 G91.1	Arc Distance Mode
G92	Coordinate System Offset
G92.1 G92.2	Cancel Coordinate System Offsets
G92.3	Restore Axis Offsets
G93 G94 G95	Feed Modes
G96	Constant Surface Speed
G97	RPM Mode
G98 G99	Canned Cycle Z Retract Mode

Υποπαράρτημα Δ3: Εντολές M Κώδικα [10]

M κώδικας	Επεξήγηση
M0 M1	Program Pause
M2 M30	Program End

M60	Pallet Change Pause
M3 M4 M5	Spindle Control
M6	Tool Change
M7 M8 M9	Coolant Control
M48 M49	Feed & Spindle Overrides Enable/Disable
M50	Feed Override Control
M51	Spindle Override Control
M52	Adaptive Feed Control
M53	Feed Stop Control
M61	Set Current Tool Number
M62-M65	Output Control
M66	Input Control
M67	Analog Output Control
M68	Analog Output Control
M100-M199	User Defined M-Codes

Παράρτημα Ε: Σχέδιο Αντικειμένου Προς Κατεργασία

