

Αναβάθμιση συστήματος ελέγχου εργαλειομηχανής CNC τριών αξόνων

Μήτσουρας Γεράσιμος _ 44170
Σίμος Μιχάλης _ 43811
Φιλοσίδης Γιώργος _ 44088

Υπεύθυνοι καθηγητές (Συνεπίβλεψη):

ΧΑΜΗΛΟΘΩΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ
ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Αιγάλεω

2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	8
2.1 Ορισμός CNC	8
2.2 Ιστορία μηχανών CNC	8
2.3 Τύποι CNC εργαλειομηχανών	9
2.3.1 Φρέζες	9
2.4 Arduino	14
2.5 Βηματικοί κινητήρες	16
2.6 GRBL	17
2.6.1 Περιορισμοί	19
3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	20
3.1 Έλεγχος των ηλεκτροκινητήρων	20
3.1.1 Έλεγχος καλωδίωσης βηματικών κινητήρων και διακοπών	21
3.2 Έλεγχος μετάδοσης κίνησης.	21
3.3 Έλεγχος συστήματος οδήγησης ατράκτου	21
3.4 Έρευνα λύσεων	23
4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ	25
4.1 Κίνηση αξόνων	25
4.1.1 Οδηγοί βηματικών κινητήρων (stepper motor drivers)	25
4.1.2 Microstepping	25
4.1.3 Τροφοδοσία	26
4.1.4 Ρύθμιση έντασης λειτουργίας	26
4.2 Τερματικοί διακόπτες και διακόπτες ασφαλείας.	27
4.3 Σύστημα ελέγχου ατράκτου	28
5. ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	31
5.1 Τελική κατασκευή κυκλώματος	31
5.2 Βαθμονόμηση ατράκτου	33
5.3 Βαθμονόμηση GRBL	34
5.4 Συντήρηση	35

5.5	Δοκιμές G κώδικα	35
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	36
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	37
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	38
8.1	Εγχειρίδιο χρήστη	38
8.1.1	Συνδέσεις	38
8.1.2	Λογισμικό	39
8.1.3	Πιθανά σφάλματα	40
8.2	Παραμετροποίηση GRBL	40
8.3	Χαρτογράφηση βυσμάτων	41
8.3.1	Πίνακες χαρτογράφησης αρχικό στάδιο	41
8.3.2	Πίνακες χαρτογράφησης τελικό στάδιο	42
8.4	Κώδικας Arduino ProMini	44
8.5	G Κώδικας Δοκιμής	49

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την αναβάθμιση του συστήματος ελέγχου μιας CNC εργαλειομηχανής τριών αξόνων. Η εργαλειομηχανή είναι μια CNC φρέζα 2,5D αξόνων της light machines, μοντέλου Prolight 1000, η οποία αγοράστηκε από το ίδρυμα τη δεκαετία του 1990. Ο χειρισμός της εργαλειομηχανής γινόταν με λογισμικό της εταιρείας, το οποίο ήταν συμβατό μόνο με υπολογιστή που χρησιμοποιούσε DOS. Μετά από βλάβη της πλακέτας LMC, που συνδέεται στον υπολογιστή, σταμάτησε να λειτουργεί και η επισκευή της εκτιμήθηκε ασύμφορη. Με σκοπό την αναβάθμισή της, τέθηκαν κάποια κριτήρια ως απαιτήσεις για την τελική κατασκευή. Έπειτα από έλεγχο, ανακαλύφθηκε ότι τα μηχανικά και ηλεκτρομηχανικά μέρη της συσκευής ήταν πλήρως λειτουργικά και ότι η βλάβη περιοριζόταν στο σύστημα ελέγχου. Η αντικατάσταση του συστήματος ελέγχου από ένα Arduino UNO με λογισμικό λειτουργίας GRBL, αποτέλεσε μια οικονομική, ανοιχτού κώδικα λύση, η οποία είναι συμβατή με τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα CAM. Για τον έλεγχο του κοπτικού, ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη και κατασκευή ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, ώστε η υπάρχουσα πλακέτα ελέγχου της ατράκτου να επικοινωνεί με το Arduino. Επίσης, παρατίθεται ένα απλό εγχειρίδιο, ώστε να είναι δυνατή η χρήση της συσκευής από μη εξοικειωμένο χειριστή, καθώς η εργαλειομηχανή προορίζεται για εκπαιδευτική χρήση στο μάθημα του προγραμματισμού CNC. Στο κεφάλαιο 1 και 2 της εργασίας, παρατίθενται τα κριτήρια που τέθηκαν και αντίστοιχα το θεωρητικό υπόβαθρο, για να εξοικειωθεί κανείς με ορισμούς και όρους της εργασίας. Η διερεύνηση του προβλήματος καθώς και η τελική κατασκευή αναλύονται στα κεφάλαια 3,4 και 5. Τέλος στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

ABSTRACT

The following thesis, deals with the upgrade of the controlling system of a three-axis CNC machine tool. This specific CNC machine tool, is a 2,5D-axis milling machine, made by *light machines*, model *Prolight 1000*, which was bought by the Higher Education Institute of Piraeus, Technological Field, at the decade of 1990. The handling of the machine tool was taking place with the company's software, which was only compatible with computers using DOS. After a failure of the LNC board that is connected with the computer, the machine tool stopped working and the repairing of it was decided unprofitable. Having as a purpose the upgrade of the machine tool, a few criteria were put as requirements for the final construction. After the inspection, it was discovered that the mechanical and electromechanical parts of the device were fully functional and that the damage was limited to the control system. The replacement of the control system with an Arduino UNO, with operating software GRBL, was proven the most money-saving, open-code solution that was compatible with the most widely used CAM programs. For the inspection of the cutting machine, the development and construction of an electronic circuit were necessary, in order for the existing spindle control board to communicate with the Arduino. Furthermore, a simple manual is listed, in order for the machine to be easy to use by non-skilled staff, as it is intended for educational use in the course of CNC programming. In chapters 1 and 2 of this thesis, the criteria that were put and the corresponding theoretical background are listed, in order to familiarize any reader with the definitions and the terms that are used. The investigation of the problem and the final construction, are analyzed in chapters 3, 4 and 5. Finally, chapter 6 refers to the conclusions of the thesis.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το εργαστήριο του μαθήματος CNC κατείχε την εργαλειομηχανή CNC φρέζα proligh1000 (Light Machines Corporation, 1996) που είχε θεωρηθεί εκτός λειτουργίας και μη επισκευάσιμη. Μετά από εκτενή έλεγχο στην εργαλειομηχανή και προσδιορισμό του προβλήματος της από την πλακέτα ελέγχου LMC, αποφασίστηκε να αναβαθμιστεί το σύστημα ελέγχου της. Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης για το πρόβλημα τέθηκαν τα εξής κριτήρια αξιολόγησης: 1) η τελική κατασκευή να μπορεί να προσαρμόζεται εύκολα στις αλλαγές που πιθανόν να φέρει η πρόοδος της τεχνολογίας, 2) να έχει τη δυνατότητα να δέχεται επεκτάσεις για τη συνεχή αναβάθμισή της (π.χ. 4^{ος} άξονας, ψυκτικό μέσο κοπτικού, κτλ.), 3) να μπορεί να συνεργάζεται με σύγχρονα προγράμματα CAD και CAM και 4) να είναι οικονομικά προσιτή η λύση του προβλήματος.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Ορισμός CNC

Ο αριθμητικός έλεγχος μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (CNC-Computer Numerical Control) είναι μια υποβοηθούμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή διαδικασία, η οποία γενικώς ελέγχει μηχανές, μέσω οδηγιών που δημιουργούνται από έναν κωδικοποιητή και αποθηκεύονται σε ένα σύστημα μνήμης για άμεση ή μελλοντική χρήση. (Σκιττίδης, 2000)

2.2 Ιστορία μηχανών CNC

Ο βιομηχανικός τομέας με θέμα απασχόλησης τα αεροπλάνα, ήταν αυτός που έδωσε το κίνητρο για να ανακαλυφθούν τα συστήματα NC, CNC και DNC. Ο λόγος; Τα μέρη ενός αεροσκάφους, λόγω εξέλιξης, άρχιζαν να γίνονται όλο και πιο περίπλοκα και έτσι οι μέθοδοι παραγωγής αυτών έπρεπε να εξελιχθούν. Η πρώτη NC εργαλειομηχανή έκανε την εμφάνιση της το 1952 και ήταν κατασκευασμένη στο πανεπιστήμιο MIT χρηματοδοτούμενη από την USAF (Αμερικάνικη Αεροπορία).

Οι απαιτήσεις όμως της εποχής έκαναν αισθητό πως μία τέτοια μηχανή δεν ήταν αρκετή από μόνη της. Το σύνολο του προγράμματος έπρεπε να εξελιχθεί και αυτό θα μπορούσε να γίνει με την κατασκευή ενός λογισμικού, το οποίο θα μπορούσε να προγραμματίζει εργαλειομηχανές τύπου NC. Έτσι αποφασίστηκε να βρεθεί εταιρεία η οποία θα κατασκεύαζε αυτό το λογισμικό. Όμως κάτι τέτοιο ήταν εξωπραγματικό εκείνη την εποχή καθώς το απαιτούμενο επενδυτικό πλάνο για τις εργατοώρες του προσωπικού ήταν τεράστιο για να μπορέσει να το επιβαρυνθεί μια εταιρία. Για αυτό το λόγο οι 25 μεγαλύτερες εταιρίες αεροκατασκευών αποφάσισαν να δημιουργήσουν ένα κοινό πρόγραμμα το οποίο θα χρηματοδοτούσαν με σκοπό τη δημιουργία αυτού του λογισμικού. Με την επιτυχία της συγκεκριμένης κίνησης δημιουργήθηκε το λογισμικό APT.

Με την πάροδο των χρόνων παρατηρήθηκε ότι ο όγκος των δεδομένων ήταν πολύ μεγάλος και δύσκολα επεξεργάσιμος στα τότε κυκλώματα. Η εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών βοήθησε να αναβαθμιστεί ολόκληρο το σύστημα, καθώς μπορούσαν να διαχειριστούν περισσότερα δεδομένα σε ταχύτερο χρόνο. Έτσι με την νέα αυτή προσθήκη δημιουργήθηκαν νέου τύπου εργαλειομηχανές CNC. Με τον καιρό προστέθηκε στο σύστημα και ένας κεντρικός τερματικός υπολογιστής ο οποίος θα μπορούσε να χειρίζεται πολλές μηχανές CNC διαφόρου τύπου, να τροποποιεί στοιχεία σε πραγματικό χρόνο και ακόμη να κάνει καταγραφή δεδομένων, όπως ώρες λειτουργίας της κάθε μηχανής ξεχωριστά. Τα συστήματα αυτά ονομάστηκαν DNC (Direct Numerical Control). (Σκιττίδης, 2000)

2.3 Τύποι CNC εργαλειομηχανών

Οι NC εργαλειομηχανές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, τις μηχανές κοπής και τις μηχανές μη κοπής. Όπως είναι φανερό από τον τίτλο τους, οι κοπτικές μηχανές είναι εργαλειομηχανές οι οποίες κατεργάζονται το κομμάτι αφαιρώντας υλικό για να φτάσουν στο τελικό αποτέλεσμα και οι μηχανές μη κοπής είναι εκείνες οι οποίες κατεργάζονται το κομμάτι χωρίς να <<πειράξουν>> τη μάζα του. Για παράδειγμα μηχανές κοπής είναι οι τόρνοι και οι φρέζες ενώ μηχανές μη κοπής είναι οι πρέσες και οι στράτζες. Μία σύντομη λίστα αυτών των μηχανών είναι η εξής:

- Φρέζες
- Κέντρα κατεργασίας
- Τόρνοι
- Δράπανα
- Πλάνες
- Μηχανές οξυγονοκοπής και κοπής πλάσματος
- Μηχανές συγκολλήσεως
- Γραμμή Παραγωγής Συστήματος Ευέλικτης Κατεργασίας
- Ρομπότ

(Smid, 2003) (Seong-Kyoon Kang, et al., 2008)

2.3.1 Φρέζες

Οι βασικοί άξονες σε μία φρέζα είναι τρεις X, Y και Z. Το κομμάτι που τοποθετείται σε μία φρέζα είναι πάντα σταθερό, στερεωμένο στην τράπεζα της μηχανής. Το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται, κινείται πάνω – κάτω ή μέσα – έξω σε μερικές μηχανές, αλλά δεν μπορεί να ακολουθήσει τη διαδρομή κοπής, αντ' αυτού κινείται η τράπεζα.

Οι CNC φρέζες είναι συνήθως μικρές, απλές μηχανές, χωρίς εργαλείο αλλαγής κοπτικού ή άλλες αυτόματες λειτουργίες. Συγκριτικά με άλλες εργαλειομηχανές η δύναμή τους δεν είναι πολύ μεγάλη. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται για επιδιόρθωση εργαλείων, εργασίες συντήρησης ή για παραγωγή λίγων κομματιών.

Οι φρέζες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες βάση των ακόλουθων χαρακτηριστικών :

- Από τον αριθμό των αξόνων: δύο, τρεις ή και περισσότερους
- Από την διεύθυνση των αξόνων: κατακόρυφα ή οριζόντια
- Από την ύπαρξη ή όχι μηχανισμού αλλαγής εργαλείου.

Οι φρέζες όπου η κίνηση της ατράκτου του κοπτικού είναι πάνω και κάτω, κατηγοριοποιούνται ως κατακόρυφες (vertical) εργαλειομηχανές. Εκείνες όπου η κίνηση είναι μέσα - έξω κατηγοριοποιούνται ως οριζόντιες (horizontal) εργαλειομηχανές. (Smid, 2003)

2.3.1.1 Άξονες

Οι φρέζες και τα κέντρα κατεργασίας έχουν τουλάχιστον τρεις άξονες X,Y,Z. Οι μηχανές γίνονται πιο "ευέλικτες" εάν έχουν τέταρτο άξονα, ο οποίος συνήθως είναι ο άξονας της περιστροφής (ο άξονας A είναι για κάθετα κομμάτια ενώ ο B για οριζόντια). Ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία μπορεί να προσφέρει ένας πέμπτος άξονας ή και περισσότεροι. Τέτοιες μηχανές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αεροσκαφών, όπου μια πολυαξονική μηχανή είναι απαραίτητη για την κατασκευή πολυσύνθετων σχημάτων με δύσκολες κοιλότητες και διάφορες γωνίες.

Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος διομισηδιάστατες και τρεισιμισηδιάστατες μηχανές. Αυτοί οι όροι αναφέρονται στο είδος των μηχανών όπου η ταυτόχρονη κοπή και κίνηση έχει περιορισμούς. Για παράδειγμα, μια μηχανή τεσσάρων αξόνων έχει τους X,Y,Z ως κύριους άξονες και την τράπεζα σχεδιασμένη ως τον άξονα A. Αυτή η τράπεζα έχει σχεδιαστεί να περιστρέφεται κατά τη τοποθέτηση του κομματιού, αλλά δεν μπορεί να περιστραφεί όταν οι κύριοι άξονες βρίσκονται σε κίνηση. Αυτό το είδος εργαλειομηχανής ονομάζεται τρεισιμισηδιάστατη. Εν' αντιθέσει μια πιο περίπλοκη αλλά παρόμοια μηχανή, η οποία είναι εξοπλισμένη με μία τράπεζα που μπορεί να περιστραφεί καθώς κινούνται οι κύριοι άξονες, χαρακτηρίζεται ως μηχανή τεσσάρων διαστάσεων. (Smid, 2003)

2.3.1.2 Σύστημα ελέγχου

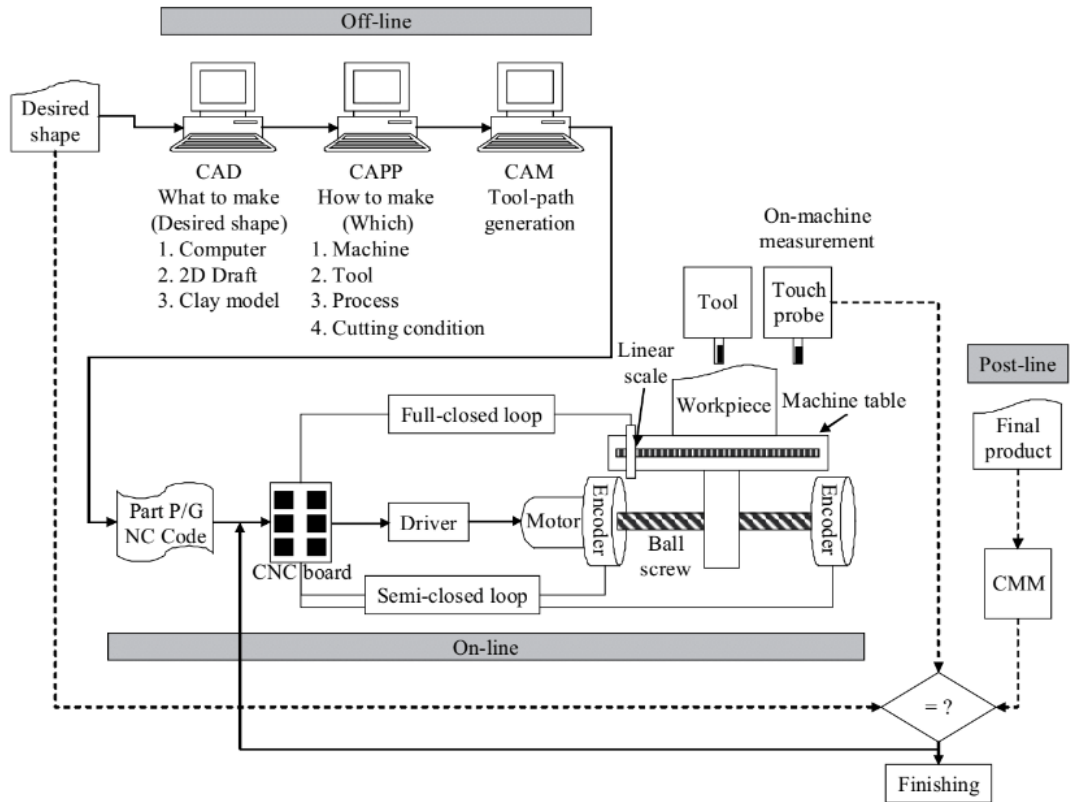
Μια CNC εργαλειομηχανή είναι εξοπλισμένη με ένα υπολογιστικό αριθμητικό σύστημα ελέγχου γνωστό ως CNC. Ουσιαστικά η φρέζα είναι το σώμα και η μονάδα ελέγχου είναι ο εγκέφαλος και το νευρικό σύστημα της εργαλειομηχανής. Σε μία CNC εργαλειομηχανή δεν υπάρχουν κουμπιά, λεβιέδες και λοιπά εξαρτήματα που μπορεί να συναντήσει κανείς σε συμβατικές εργαλειομηχανές. Η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, η κίνηση των αξόνων και εκατοντάδες άλλες διεργασίες προγραμματίζονται από έναν προγραμματιστή CNC και χειρίζονται από έναν υπολογιστή, ο οποίος είναι αναπόσπαστο κομμάτι της CNC μονάδας.

Να φτιάξει κανείς ένα πρόγραμμα για μια εργαλειομηχανή σημαίνει να φτιάξει πρόγραμμα για το σύστημα ελέγχου. Η εργαλειομηχανή είναι πολύ σημαντική για το τελικό αποτέλεσμα, αλλά η μονάδα ελέγχου είναι αυτή που καθορίζει τον τύπο του προγράμματος, τη δομή και τη σύνταξη.

Για να κατανοήσει κάποιος πλήρως τη διαδικασία προγραμματισμού CNC είναι σημαντικό να καταλάβει τη διαδικασία παραγωγής ενός κομματιού, την επιλογή του κατάλληλου εργαλείου, τη ταχύτητα, τη πρόωση και πολλές άλλες λειτουργίες.

Είναι εξίσου σημαντικό να κατανοεί πώς δουλεύει ο υπολογιστής και το σύστημα ελέγχου.

Για την παρασκευή ενός κομματιού χρησιμοποιώντας μηχανές CNC πρέπει να τηρηθεί αυστηρά (για να είναι επιτυχής η διαδικασία) το διάγραμμα ροής που δίνεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής CNC εργαλειομηχανών

Το διάγραμμα αυτό μπορεί να αναλυθεί αν χωριστεί σε τρία μέρη: 1) τις offline διεργασίες που είναι τα CAD, CAPP και CAM, 2) τις online διεργασίες οι οποίες είναι η κατεργασία του κομματιού, παρακολούθηση του και μετρήσεις του κομματιού και 3) post-line διεργασίες όπως CAI και κατεργασίες τελειοποίησης του κομματιού.

1) Offline Διεργασίες:

Οι offline διεργασίες είναι οι εργασίες που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός προγράμματος συνιστωσών για τον έλεγχο ενός μηχανήματος NC. Στο στάδιο αυτό, αφού έχει καθοριστεί το σχήμα του κομματιού, δημιουργείται ένα γεωμετρικό μοντέλο αυτού με χρήση 2D ή 3D CAD. Σε γενικές γραμμές, το CAD (Computer Aided Design) σημαίνει μοντελοποίηση του κομματιού, δηλαδή και σχεδιασμός και ανάλυση αυτού. Μετά την μοντελοποίηση, εφαρμόζεται το CAPP όπου δημιουργούνται οι απαραίτητες πληροφορίες για τη μηχανική κατεργασία. Σε αυτό

το στάδιο επιλέγονται λεπτομερώς στοιχεία όσον αφορά την κατεργασία που θα ακολουθήσει όπως η επιλογή της εργαλειομηχανής, κοπτικών εργαλείων, ιδιοσυσκευές και περαιτέρω εξαρτήματα, συνθήκες κοπής και δημιουργία της ακολουθίας των εντολών. Επειδή ο προγραμματισμός της διαδικασίας είναι πολύπλοκος και το CAPP δεν είναι σε θέση από μόνο να καταφέρει μια τέτοια διαδικασία σε σχέση με την πρόοδο της τεχνολογίας, ο σχεδιασμός της διαδικασίας εξαρτάται γενικά από την τεχνογνωσία ενός προγραμματιστή που γνωρίζει το CAPP. Το CAM εκτελείται στο τελικό στάδιο για τη δημιουργία του κώδικα για το εκάστοτε κομμάτι. Σε αυτό το στάδιο, δημιουργούνται οι διαδρομές των κοπτικών εργαλείων με βάση πληροφορίες γεωμετρίας από το CAD και πληροφορίες επεξεργασίας από το CAPP. Κατά τη δημιουργία αυτών των μονοπατιών εξετάζονται παρεμβολές μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου, η ελαχιστοποίηση του χρόνου επεξεργασίας, οι αλλαγές εργαλείων και η βέλτιστη απόδοση της μηχανής. Ειδικότερα, το CAM είναι ένα βασικό εργαλείο για τη δημιουργία των διαδρομών εργαλείων για κάθε είδους εργαλειομηχανή τύπου NC.

2)Online Διεργασίες:

Οι online διεργασίες είναι εκείνες που απαιτούνται για να επεξεργαστείς κομμάτια με NC μηχανές. Σε αυτό το στάδιο, το σύστημα NC διαβάζει και ερμηνεύει προγράμματα κομματιών από τη μνήμη και ελέγχει την κίνηση των αξόνων. Το σύστημα NC ακολουθεί οδηγίες για τον έλεγχο θέσης και ταχύτητας με βάση το πρόγραμμα των κομματιών και οι σερβοκινητήρες ελέγχονται βάσει των παραγόμενων οδηγιών. Καθώς η περιστροφή ενός σερβοκινητήρα μετατρέπεται σε γραμμική κίνηση μέσω μηχανισμού κοχλιών τύπου ball screw, το κοπτικό εργαλείο ή η τράπεζα μετακινείται και έτσι γίνεται επεξεργασία του κομματιού μέσω αυτών των κινήσεων.

Προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια της μηχανικής κατεργασίας, πρέπει να είναι υψηλή όχι μόνο η ακρίβεια κίνησης των μερών της μηχανής όπως του σερβοκινητήρα, ο οδηγός της τράπεζας, οι κοχλίες τύπου ball screw και η άτρακτος αλλά πρέπει και η ακαμψία της εργαλειομηχανής να είναι υψηλή. Η εργαλειομηχανή και τα εξαρτήματα του μηχανήματος θα πρέπει επίσης να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να μην είναι ευαίσθητα στις δονήσεις και τις θερμοκρασίες. Επιπλέον η απόδοση του κωδικοποιητή και των αισθητήρων που περιλαμβάνονται στο σύστημα NC και ο μηχανισμός ελέγχου επηρεάζουν την ακρίβεια της μηχανικής κατεργασίας.

Σε αυτό το στάδιο, η κατάσταση της μηχανής και η διαδικασία μηχανουργικής κατεργασίας μπορεί να παρακολουθούνται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Για την ακρίβεια, κατά τη μηχανική κατεργασία ειδικά εργαλεία όπως ανιχνευτής θραύσης εργαλείων, αντιστάθμιση θερμικής παραμόρφωσης, προσαρμοστικός έλεγχος και αντιστάθμιση της απόκλισης εργαλείου με βάση τη μέτρηση της δύναμης κοπής, της θερμότητας και του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αυτά τα οποία δίνουν σήμα αν η κατεργασία πηγαίνει βάση προγραμματισμού ή ότι κάτι έχει πάει

στραβά. Η μέτρηση του κομματιού πάνω στην εργαλειομηχανή χρησιμοποιείται επίσης για τον υπολογισμό σφάλματος στην μηχανική κατεργασία, ελέγχοντας το τελικό κομμάτι, ώστε να μπορεί να διορθωθεί κατευθείαν το σφάλμα στο σύστημα NC για το επιθυμητό αποτέλεσμα στην επόμενη κατεργασία αντίστοιχου κομματιού.

3) Post-line Διεργασίες

Στο τελευταίο μέρος χρησιμοποιούνται προγράμματα CAI (Computer Aided Inspection), για τον έλεγχο του τελικού κομματιού. Γίνεται επιθεώρηση με τη χρήση ενός CMM (Coordinate Measurement Machine) συγκρίνοντας το κομμάτι με το γεωμετρικό μοντέλο για να μπορούν να γίνουν τροποποιήσεις σε περίπτωση απόκλισης από το επιθυμητό. Οι τροποποιήσεις γίνονται είτε με αλλαγή κάποιου εργαλείου του συστήματος NC ή με τη διεξαγωγή μετεγχειρητικών εργασιών, όπως η επανεπεξεργασία και η λείανση. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να εφαρμοστεί και η αντίστροφη μηχανική, δηλαδή να ληφθούν μετρήσεις από το τελικό κομμάτι και από αυτές να προκύψει το γεωμετρικό για χρήση σε μεγαλύτερη παραγωγή. (Smid, 2003) (Seong-Kyoon Kang, et al., 2008)

Οι κατασκευαστές εργαλειομηχανών προσθέτουν τις δικές τους επιφάνειες λειτουργίας, με όλους τους διακόπτες και τα κουμπιά που χρειάζονται για το χειρισμό μιας CNC εργαλειομηχανής και όλων των λειτουργιών της. Το σύστημα ελέγχου περιέχει λειτουργίες οι οποίες δουλεύουν παράλληλα με το πρόγραμμα. Μερικές λειτουργίες μπορούν να διεκπεραιωθούν μόνο εάν το πρόγραμμα το υποστηρίζει. Όλοι οι διακόπτες και τα κουμπιά χειρίζονται από τον χειριστή της εργαλειομηχανής για να φέρει εις πέρας την εκτέλεση του προγράμματος και τη διαδικασία της κατεργασίας.

2.3.1.3 Διακόπτης έκτακτης ανάγκης

Κάθε CNC εργαλειομηχανή έχει τουλάχιστον έναν διακόπτη, κόκκινο σε χρώμα, που βρίσκεται σε προσβάσιμο σημείο. Αυτός ο διακόπτης ονομάζεται διακόπτης έκτακτης ανάγκης ή E-stop. Όταν ενεργοποιείται όλες οι λειτουργίες σταματούν αμέσως. Η κεντρική τροφοδοσία της μηχανής διακόπτεται και η μηχανή απαιτεί επανεκκίνηση. Η ύπαρξη διακόπτη έκτακτης ανάγκης είναι υποχρεωτική σε όλες τις εργαλειομηχανές CNC.

Η ενεργοποίηση του διακόπτη ασφαλείας δεν είναι ο βέλτιστος ή ο μόνος τρόπος για να σταματήσει η λειτουργία της εργαλειομηχανής. Αντιθέτως τα πιο σύγχρονα συστήματα ελέγχου διαθέτουν άλλες λειτουργίες, σχεδιασμένες να αποτρέπουν τη σύγκρουση μεταξύ του κοπτικού και του κομματιού. Σε αυτά η ενεργοποίηση του διακόπτη ασφαλείας είναι η έσχατη λύση και ο χειριστής προσφεύγει σε αυτή μόνο εάν οποιαδήποτε άλλη λύση θα απαιτούσε πολύ περισσότερο χρόνο.

2.3.1.4 Χειρισμός της ατράκτου του κοπτικού

Όλα τα είδη CNC εργαλειομηχανών χρησιμοποιούν περιστροφική κίνηση της ατράκτου (spindle) για να αφαιρέσουν υλικό από το κομμάτι. Οι στροφές και η πρόωση κατά την κοπή πρέπει να χειρίζονται από το πρόγραμμα. Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι για τον έλεγχο της περιστροφής του κοπτικού και την πρόωση κοπής, όπου όλοι εξαρτώνται από τον τύπο της CNC εργαλειομηχανής και την τρέχουσα εφαρμογή κατεργασίας.

Η προγραμματιστική εντολή σχετικά με την ταχύτητα της ατράκτου χειρίζεται από τη μονάδα CNC με την εντολή S. Η εντολή S σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου και συνεπώς του κοπτικού εργαλείου. Πρέπει πάντα να καθορίζεται στον κώδικα μαζί με μία αριθμητική τιμή, για παράδειγμα S400.

Υπάρχουν τρεις εναλλακτικές επιλογές ερμηνείας για την αριθμητική τιμή εισαγωγής :

- Κωδικός αριθμός για παλιά συστήματα ελέγχου
- Άμεση ταχύτητα ατράκτου σε στροφές ανά λεπτό
- Περιφερειακή ταχύτητα ατράκτου σε πόδια ανά λεπτό ή μέτρα ανά λεπτό

Στις CNC φρέζες δεν υπάρχει επιλογή για περιφερειακή ταχύτητα της ατράκτου.

2.4 Arduino

Το Arduino είναι ένας μικρός υπολογιστής ο οποίος μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να επεξεργάζεται δεδομένα μεταξύ εξωτερικών εξαρτημάτων και συσκευών. Πρόκειται για μια διαδραστική πλατφόρμα που συναναστρέφεται με το περιβάλλον της με φυσικά και εικονικά μέσα.

Για παράδειγμα, μια απλή εφαρμογή ενός Arduino είναι να ανάβει ένα φως με το πάτημα ενός διακόπτη, να σβήνει μετά από 30 δευτερόλεπτα και να περιμένει μέχρι να ξαναπατηθεί ο διακόπτης. Αυτό θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί περαιτέρω με έναν αισθητήρα κίνησης στη θέση του διακόπτη.

Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτόνομες, διαδραστικές εφαρμογές ή να συνδεθεί με υπολογιστή ή ακόμα και με κάποιο δίκτυο ώστε να λάβει δεδομένα και έπειτα να ενεργήσει βάσει με αυτά.

Μπορεί να συνδεθεί με κουμπιά, LED, διακόπτες, αισθητήρες πίεσης, αισθητήρες κίνησης, οθόνες και γενικά ό,τι μπορεί να ελεγχθεί ή να δώσει δεδομένα. Στο διαδίκτυο υπάρχει πληθώρα παραδειγμάτων από εφαρμογές όπου το Arduino έχει χρησιμοποιηθεί για να διαβάσει δεδομένα και να ελέγξει μια μεγάλη ποικιλία από συσκευές.

Η πλακέτα αποτελείται από έναν μικροελεγκτή (ATmega 328), έναν κρύσταλλο χρονισμού (έναν τύπο μετρονόμου που δίνει παλμούς σε συγκεκριμένη συχνότητα

και επιτρέπει στον ελεγκτή να λειτουργεί σε σωστή ταχύτητα), έναν ρυθμιστή τάσης 5 Volt σε σειρά και ανάλογα τον τύπο, θύρα USB για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή. Επίσης η πλακέτα δίνει πρόσβαση στις ακίδες εισόδου/ εξόδου (I/O pins) για την σύνδεση με κυκλώματα και αισθητήρες.

Για τον προγραμματισμό του Arduino γίνεται χρήση του Arduimo IDE (Integrated Development Environment), ένα δωρεάν πρόγραμμα στο οποίο ο κώδικας γράφεται σε γλώσσα κατανοητή από την συσκευή (C++).

Για επιπλέον χρησιμότητα του Arduino μπορεί να γίνει χρήση κυκλωμάτων που περιέχουν συσκευές όπως οθόνη, οδηγούς ηλεκτροκινητήρων, σειρές αισθητήρων κ.ά. τα οποία απλά συνδέονται πάνω στην πλακέτα και ονομάζονται shields. Η χρήση τους δεν είναι απαραίτητη καθώς τα ίδια κυκλώματα μπορούν να αναπαραχθούν σε πλακέτες δοκιμών (Breadboard). (McRoberts, 2010)

2.5 Βηματικοί κινητήρες

Ο σκοπός του βηματικού κινητήρα είναι να εκτελεί ακριβείς γωνιακές μεταβολές και να διατηρεί τη θέση του μέχρι να του δοθεί καινούρια εντολή. Η ταχύτητα και η ροπή αποτελούν δευτερεύουσες παραμέτρους. Από τη στιγμή που ο κινητήρας περιστρέφεται σε συγκεκριμένη γωνία και έπειτα σταματά, ο σκοπός του είναι επιτυχής. Κάθε κίνηση ονομάζεται βήμα και οι πιο συνηθισμένες γωνίες βήματος είναι 30° , 15° , 7.5° , 5° , 2.5° και 1.8° .

Χάρη στην απλότητα και την ακρίβειά τους, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι ότι ο ελεγκτής δεν είναι ανάγκη να γνωρίζει τη θέση του κινητήρα ώστε να προσδιορίσει τη φορά του. Αν ο β/κ είναι σχεδιασμένος για βήματα 5° τότε κάθε σήμα ελέγχου θα τον περιστρέψει 5° .

Για αρκετές εφαρμογές, είναι θεμιτό τα βήματα να έχουν όσο το δυνατό μικρότερη γωνία. Μικρότερη γωνία σημαίνει μεγαλύτερη γωνιακή ευκρίνεια.

Ένας άλλος παράγοντας του β/κ είναι η ροπή του, και συγκεκριμένα η ροπή συγκράτησης. Ο β/κ «κρατάει» τη θέση του όταν βρίσκεται σε αδράνεια και η ροπή συγκράτησης του είναι η μέγιστη ροπή που μπορεί να διατηρήσει σε ακινησία.

Οι σύγχρονοι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

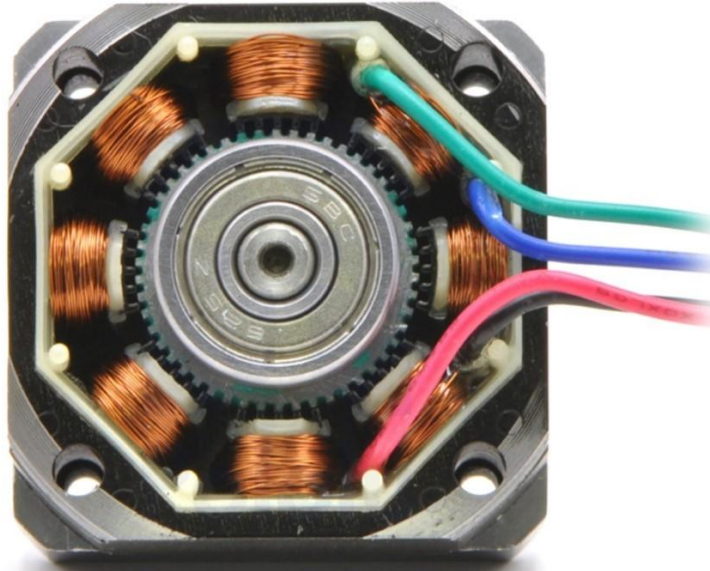
- Μόνιμου μαγνήτη: μεγάλη ροπή, μικρή γωνιακή ευκρίνεια
- Μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης εξαιρετική γωνιακή ευκρίνεια, χαμηλή ροπή
- Υβριδικό συνδυάζει καλή ροπή και ευκρίνεια

Λόγω της ισορροπίας μεταξύ ροπής και ευκρίνειας που προσφέρουν οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες, προτιμούνται για τις περισσότερες εφαρμογές ρομποτικής, 3D εκτυπωτών και γενικά CNC μηχανημάτων συγκριτικά με τους άλλους τύπους, αν και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλότερο.

Ο ρότορας των υβριδικών βηματικών κινητήρων είναι ένας δυνατός μόνιμος μαγνήτης, που προσφέρει ροπή, διαμορφωμένος με δόντια για μεγαλύτερη ευκρίνεια. Ο στάτης αποτελείται από ηλεκτρομαγνήτες με δόντια αντίστοιχου μεγέθους ώστε όταν ενεργοποιούνται διαδοχικά να ελκύουν τα δόντια του ρότορα και όχι ολόκληρο το μαγνήτη.

Για μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση των υβριδικών β/κ, τα τυλίγματα του στάτη χωρίζονται σε δύο φάσεις : A/A' και B/B'. Κάθε φάση δέχεται θετικό, αρνητικό ή καθόλου ρεύμα. Όταν ενεργοποιείται μια φάση, τα τυλίγματά της ελκύουν τα δόντια ενός πόλου του ρότορα. Όταν ενεργοποιείται η άλλη φάση, τα τυλίγματα της ελκύουν τα δόντια του άλλου πόλου του ρότορα. Η διαδοχική ενεργοποίηση και εναλλαγή του ρεύματος στους πόλους έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση. Συνήθως ο ρότορας έχει 50-60 δόντια ανά πόλο, πράγμα που αυξάνει την γωνιακή ευκρίνεια

του κινητήρα. Οι πιο συνηθισμένοι υβριδικοί β/κ κάνουν βήματα γωνιών 1.8° και 0.9°. (Scarpino, 2016)



www.pololu.com

Εικόνα 2.1 Υβριδικός βηματικός κινητήρας

2.6 GRBL

Πρόκειται για ένα δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα, υψηλών επιδόσεων, για τον έλεγχο της κίνησης μηχανών που κινούνται, φτιάχνουν αντικείμενα ή κάνουν άλλα πράγματα να κινούνται και τρέχουν απευθείας από ένα Arduino.

Οι περισσότεροι 3D εκτυπωτές λειτουργούν με το GRBL σαν λογισμικό τους. Έχει προσαρμοστεί για χρήση σε εκατοντάδες εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων laser cutters και CNC εργαλειομηχανές. Χάρη στην απλότητά του και των ελάχιστων απαιτήσεων του, το λογισμικό GRBL έχει εξελιχθεί σε <<φαινόμενο>>.

Το 2009, ο Simen Svale Skogsrud, έγραψε και κοινοποίησε τις πρώτες εκδοχές του GRBL στην «κοινότητα του ανοιχτού κώδικα». Από το 2011 συνεχίζει σαν πρόγραμμα που αναπτύσσεται μέσω της κοινότητας του, υπό την ηγεσία του Sungeun “Sonny” Jeon Ph.D.

Το GRBL είναι ιδανικό για ελαφρού τύπου παραγωγή. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με H/Y ή Raspberry Pi μέσω των ειδικά σχεδιασμένων πλατφόρμων που έχουν αναπτυχθεί για να λειτουργούν με το GRBL. Είναι γραμμένο σε εξειδικευμένη C (γλώσσα προγραμματισμού) εκμεταλλεύόμενο έτσι όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ο μικροελεγκτής ATmega328p («καρδιά» του

Arduino) για χρονισμό και ασύγχρονη λειτουργία. Είναι ικανό να διατηρήσει περισσότερα από 30kHz ρυθμό βημάτων και προσφέρει μια καθαρή, χωρίς διακυμάνσεις ροή παλμών.

Ο διερμηνέας του G-code περιλαμβάνει ένα υποσύνολο από τα πρότυπα του LinuxCNC και υποστηρίζεται από τα περισσότερα εργαλεία CAM χωρίς προβλήματα.

Supported G-Codes in v1.1

- **G0, G1:** *Linear Motions (γραμμικές κινήσεις)*
- **G2, G3:** *Arc and Helical Motions (κυκλικές και ελικοειδείς κινήσεις)*
- **G4:** *Dwell*
- **G10 L2, G10 L20:** *Set Work Coordinate Offsets*
- **G17, G18, G19:** *Plane Selection*
- **G20, G21:** *Units*
- **G28, G30:** *Go to Pre-Defined Position*
- **G28.1, G30.1:** *Set Pre-Defined Position*
- **G38.2:** *Probing*
- **G38.3, G38.4, G38.5:** *Probing*
- **G40:** *Cutter Radius Compensation Modes OFF (Only)*
- **G43.1, G49:** *Dynamic Tool Length Offsets*
- **G53:** *Move in Absolute Coordinates*
- **G54, G55, G56, G57, G58, G59:** *Work Coordinate Systems*
- **G61:** *Path Control Modes*
- **G80:** *Motion Mode Cancel*
- **G90, G91:** *Distance Modes*
- **G91.1:** *Arc IJK Distance Modes*
- **G92:** *Coordinate Offset*
- **G92.1:** *Clear Coordinate System Offsets*
- **G93, G94:** *Feedrate Modes*
- **M0, M2, M30:** *Program Pause and End*
- **M3, M4, M5:** *Spindle Control*
- **M7* , M8, M9:** *Coolant Control*
- **M56* :** *Parking Motion Override Control*

(*) denotes commands not enabled in config.h by default.

(Github, 2017)

2.6.1 Περιορισμοί

Οι προγραμματιστές έχουν περιορίσει τους G-κώδικες που υποστηρίζονται για να διατηρήσουν τον κώδικα απλό, ελαφρύ και ευέλικτο καθώς συνεχίζουν να βελτιώνουν και να διατηρούν τη σταθερότητα της λειτουργίας με κάθε νέα προσθήκη. Το GRBL μπορεί να ανταπεξέλθει σε όλες τις κοινές διεργασίες μέσω του κώδικα που παράγεται από τα CAM συστήματα ενώ δεν υποστηρίζονται μεταβλητές, βάσεις δεδομένων για εργαλεία, συναρτήσεις, κύκλοι εργασιών και άλλες εξειδικευμένες εντολές. Υποστηρίζονται μόνο οι βασικές λειτουργίες και δυνατότητες της μηχανής . Οι πιο περίπλοκες εντολές μπορούν να απλοποιηθούν μέσω των διεπαφών χρήστη (UIs) και να μεταφραστούν για το GRBL.. (Github, 2017)

3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Πρώτη κίνηση είναι η αναγνώριση του προβλήματος. Με δεδομένη την ύπαρξη μη επισκευάσιμης ζημιάς στο σύστημα ελέγχου της εργαλειομηχανής, είναι σκόπιμο να ελεγχθούν όλα τα επιμέρους λειτουργικά τμήματα της. Έπειτα από αναγνώριση των επιμέρους εξαρτημάτων της εργαλειομηχανής γίνεται έλεγχος λειτουργίας του καθενός ξεχωριστά (ηλεκτροκινητήρες αξόνων και ατράκτου, καλωδιώσεις, ασφάλειες, πλακέτα οδήγησης κινητήρα ατράκτου και λοιπά). Επιβεβαιώνοντας πως η βλάβη περιορίζεται μόνο στο σύστημα ελέγχου της εργαλειομηχανής, γίνεται έρευνα λύσεων για την αντικατάστασή του.

3.1 Έλεγχος των ηλεκτροκινητήρων

Αφαιρώντας τους εγκλεισμούς των ηλεκτροκινητήρων αναγνωρίζεται το είδος και ο τύπος τους.

Η κίνηση στους άξονες της εργαλειομηχανής εξασφαλίζεται από τρεις ίδιους βηματικούς κινητήρες (B/K), ένα για κάθε άξονα. Οι κινητήρες είναι τύπου Slo Syn M063-CS06 (Superior Electric,) με δυνατότητα συνδεσμολογίας unipolar ή bipolar, σύμφωνα με τις αναγραφόμενες πληροφορίες. Στην προκειμένη περίπτωση, είναι συνδεδεμένοι unipolar με ονομαστική τάση λειτουργίας 4,9V και ονομαστική ένταση 2,1 A. Οι κινητήρες αυτοί είναι σχεδιασμένοι να κάνουν 200 βήματα για μία πλήρη περιστροφή ($1.8^\circ / \text{step}$).



Εικόνα 3.1 Βηματικός κινητήρας X άξονα.

Για τον έλεγχο της λειτουργίας τους, μετράται με πολύμετρο η ηλεκτρική αντίσταση στα άκρα των φάσεων τους. Σε περίπτωση μεγάλης ένδειξης ηλεκτρικής αντίστασης ή σημαντικής διαφοράς της τιμής μεταξύ των φάσεων του, ο κινητήρας θεωρείται πως έχει υποστεί μη αναστρέψιμη βλάβη. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν, δεν υποδηλώνουν βλάβη στους β/κ.

Η ίδια μεθοδολογία ακολουθείται και για τον έλεγχο του κινητήρα της ατράκτου. Πρόκειται για έναν ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) ισχύος 1 Hp (745 watt) ο οποίος αποδείχτηκε λειτουργικός. Περισσότερες πληροφορίες για τον κινητήρα δεν υπήρχε δυνατότητα να βρεθούν, καθώς δεν υπάρχει κάποια αναγραφή πάνω στο περίβλημά του, ούτε κάποια αναφορά στο εγχειρίδιο χρήσης της εργαλειομηχανής.

3.1.1 Έλεγχος καλωδίωσης βηματικών κινητήρων και διακοπών

Αρχικά γίνεται χαρτογράφηση των καλωδίων βάσει των χρωμάτων τους και καταγράφονται σε πίνακα. Στη συνέχεια επαληθεύεται η λειτουργία των διακοπών ενεργοποιώντας τους διαδοχικά και ελέγχοντας με πολύμετρο αν κλείνουν κύκλωμα. Όμοια ελέγχεται και η καλωδίωση των βηματικών κινητήρων. Εφόσον η καλωδίωση δεν έχει ασυνέχειες, δε χρειάζεται κάποια τροποποίηση.

3.2 Έλεγχος μετάδοσης κίνησης.

Η κίνηση χωρίζεται σε 3 άξονες όπου για τον καθένα αντιστοιχούν δυο γλίστρες, ένας κοχλίας μεταφοράς κίνησης (Ball screw), ένας βηματικός κινητήρας, γρανάζια και ιμάντας χρονισμού (2:1). Λόγω πολυετούς ακινησίας είναι αναγκαίος ο έλεγχος της κατάστασης τους. Μέσω οπτικού ελέγχου εξετάζεται η κατάσταση που βρίσκονται οι ιμάντες. Η έλλειψη σχισμών τους καθιστά κατάλληλους προς χρήση. Κατάλληλα επίσης προς χρήση βρίσκονται και τα γρανάζια καθώς δεν φέρουν φθορές στους οδόντες και τις επιφάνειες. Οι ολισθήρες και οι κοχλίες μετάδοσης δεν φέρουν κανένα σημάδι οξείδωσης και επιφανειακής φθοράς. Το σύνολο του συστήματος ελέγχεται μηχανικά περιστρέφοντας το βηματικό κινητήρα χειροκίνητα. Ο έλεγχος του συστήματος πρέπει να προηγηθεί της τροφοδοσίας των β/κ καθώς μία μικρή φθορά στο σύστημα μετάδοσης μπορεί να προκαλέσει μία κρίσιμη βλάβη.

3.3 Έλεγχος συστήματος οδήγησης ατράκτου

Το σύστημα ελέγχου και τροφοδοσίας του ηλεκτροκινητήρα της ατράκτου βρίσκεται στο πίσω μέρος της συσκευής και αποτελείται από:



Εικόνα 3.2 Σύστημα ελέγχου κινητήρα ατράκτου

- Έναν αντιστάτη 5Ω που χρησιμοποιείται σαν δυναμική πέδη για τον κινητήρα όταν αυτός δεν τροφοδοτείται.
- Έναν ηλεκτρονόμο υπεύθυνο για την ενεργοποίηση της πέδης,
- Έναν ηλεκτρονόμο υπεύθυνο για την τροφοδοσία του συστήματος,
- Την πλακέτα ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα της ατράκτου (PCM21000A της Minarik electric)
- Έναν αντιστάτη συνδεδεμένο στην τροφοδοσία της πλακέτας
- Μια ασφάλεια 8A για την προστασία του συστήματος από υπερτροφοδότηση
- Ένα ποτενσιόμετρο $10k\Omega$ (βρίσκεται στο μπροστινό μέρος της συσκευής) συνδεδεμένο στην πλακέτα που λειτουργεί σαν είσοδος ελέγχου των στροφών.

Ο έλεγχος των στροφών του κινητήρα γίνεται από την πλακέτα PCM21000A της Minarik Electric. Η ηλεκτρονική αυτή διάταξη, δέχεται 220VAC το μετασχηματίζει σε συνεχές ρεύμα και έτσι τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα. Για τον έλεγχο των στροφών έχει δυο επιλογές, χειροκίνητο και CNC. Κατά την χειροκίνητη επιλογή στροφών, η πλακέτα δέχεται σήμα από ένα ποτενσιόμετρο που βρίσκεται στο μπροστινό μέρος της εργαλειομηχανής. Κατά την επιλογή CNC η εντολή έρχεται από τον κώδικα μέσω του ελεγκτή σε μορφή διαφοράς δυναμικού 0-10VDC. Ένας ηλεκτρονόμος είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση της PCM21000A. Ο ελεγκτής ελέγχει με 5VDC

και έναν πρώτο ηλεκτρονόμο ο οποίος επιτρέπει να περάσει ρεύμα δικτύου και ενεργοποιεί δύο άλλους. Ο ένας τροφοδοτεί την πλακέτα και ο άλλος είναι υπεύθυνος για το σύστημα της δυναμικής πέδης του ηλεκτροκινητήρα. Η πέδη λειτουργεί όταν σταματά η τροφοδοσία περνώντας το παραγόμενο ρεύμα από την περιστροφή του κινητήρα, μέσα από έναν αντιστάτη 5Ω .

Πρώτα ελέγχθηκαν η καλωδίωση, η οποία δεν έφερε φθορές και η ασφάλεια η οποία ήταν καμένη. Αντικαταστάθηκε και δοκιμάστηκε η λειτουργία του κινητήρα στη χειροκίνητη επιλογή χωρίς όμως αποτέλεσμα.

Έπειτα από μελέτη του εγχειρίδιου χρήσης της πλακέτας ελέγχου και πιστή ακολούθηση των βημάτων βαθμονόμησης, μηδενίστηκαν όλα τα ποτενσιόμετρα της πλακέτας εκτός αυτού της ροπής το οποίο τέθηκε στο μέγιστο. Καθώς ο κινητήρας ξεκίνησε να περιστρέφεται στη χειροκίνητη λειτουργία, τα ποτενσιόμετρα τις επαναφέρθηκαν στην αρχική τους κατάσταση, στην οποία και παρέμειναν μέχρι την τελική βαθμονόμηση.

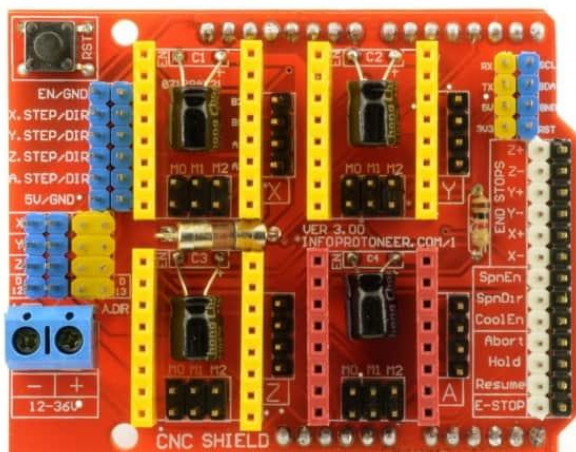
3.4 Έρευνα λύσεων

Έχοντας ολοκληρώσει τον έλεγχο της εργαλειομηχανής και επιβεβαιώσει πως η βλάβη περιορίζεται στο σύστημα ελέγχου της μηχανής έγινε έρευνα για λύσεις επιδιόρθωσης. Κύριος παράγοντας στην αντικατάσταση του συστήματος υπήρξε και η αναβάθμιση του καθώς το ήδη υπάρχον ήταν συμβατό μόνο με ηλεκτρονικό υπολογιστή χρήσης λειτουργικού συστήματος windows DOS.

Οι λύσεις που προέκυψαν ήταν οι εξής:

- GRBL: λογισμικό ανοιχτού κώδικα
- TinyG: λογισμικό κλειστού κώδικα
- Mach3: λογισμικό κλειστού κώδικα

Από τα παραπάνω επιλέχθηκε το GRBL διότι δεν χρειάζεται ειδική άδεια και εξειδικευμένο εξοπλισμό σε αντίθεση με τις άλλες δύο λύσεις και το κόστος των απαραίτητων εξαρτημάτων είναι χαμηλότερο. Για τη χρήση του λογισμικού χρησιμοποιήθηκαν ένα Arduino Uno και ένα CNC shield.



Εικόνα 3.3 CNC Shield



Εικόνα 3.4 Arduino UNO

Η παραπάνω πλακέτα συνδέεται άμεσα με το Arduino Uno καθώς και με οδηγούς βηματικών κινητήρων ειδικά σχεδιασμένους για τη συγκεκριμένη διάταξη. Δέχεται εξωτερική τροφοδοσία για την κίνηση των η/κ την οποία διαμοιράζει σε κάθε άξονα. Πάνω της αναγράφεται ευδιάκριτα και κατανοητά η συνδεσμολογία των τερματικών διακοπών, των οδηγών, των βηματικών κινητήρων, του ελέγχου του ψυκτικού υγρού και των στροφών του κοπτικού.

4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Το κομμάτι της κατασκευαστικής επίλυσης χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα:

- Την κίνηση των αξόνων της εργαλειομηχανής
- Τους τερματικούς διακόπτες και τους διακόπτες ασφαλείας
- Το σύστημα ελέγχου της ατράκτου

4.1 Κίνηση αξόνων

4.1.1 Οδηγοί βηματικών κινητήρων (stepper motor drivers)

Οι οδηγοί επιλέγονται έτσι ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις του εκάστοτε B/K (Volts, Ampere). Οι οδηγοί DRV8825 της pololu είναι ικανοί να διαχειρίζονται ρεύμα έντασης έως 2,2 A και τάσης 8-45 VDC, με κατάλληλη ψύξη. Τοποθετούνται στο CNC shield, στις αντίστοιχες υποδοχές.

4.1.2 Microstepping

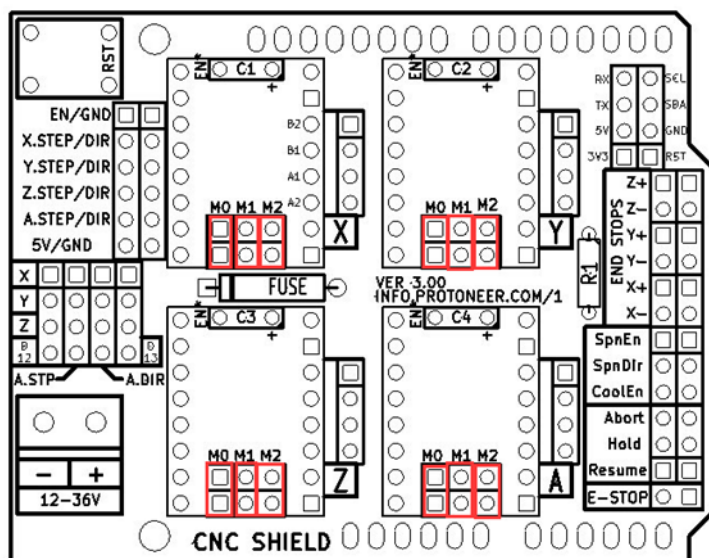
Ο κάθε οδηγός έχει τρεις γέφυρες οι οποίες με διάφορους συνδυασμούς επιτυγχάνουν την επιλογή μικροβηματισμού. (full, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32)

Πίνακας 4-1 Επιλογή μικροβηματισμού

MODE0	MODE1	MODE2	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

Η επιλογή μικρότερου βηματισμού επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στην κίνηση και ομαλότερη λειτουργία, θυσιάζοντας ροπή από τον κινητήρα.

Για την τελική κατασκευή επιλέχτηκε να γίνει βηματισμός μισού βήματος βάζοντας μια γέφυρα στα pins M0 του shield. Ενώ οι άξονες X και Y λειτουργούσαν χωρίς πρόβλημα, ο κινητήρας του Z άξονα δε κινήθηκε και έκανε έναν δυνατό θόρυβο. Το πρόβλημα προσδιορίστηκε στον οδηγό καθώς μετά την αντικατάσταση του οδηγού ο άξονας ήταν ικανός να εκτελέσει την κίνηση σε half steps.



Εικόνα 4.1 Pins επιλογής μικροβηματισμού στη CNC Shield

4.1.3 Τροφοδοσία

Για την τροφοδοσία απαιτείται ένας μετασχηματιστής ικανός να πληροί τις απαιτήσεις ρεύματος των Β/Κ, της τάξεως των 7Α και άνω.

Το CNC shield διαχειρίζεται τάση 12 έως 36 VDC και διαμοιράζει το ρεύμα στους τρεις οδηγούς, οι οποίοι με τη σειρά τους τροφοδοτούν αντίστοιχα τους βηματικούς κινητήρες.

4.1.4 Ρύθμιση έντασης λειτουργίας

Οι οδηγοί είναι συμβατοί με διάφορα είδη Β/Κ. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα ενσωματωμένο ποτενσιόμετρο το οποίο ρυθμίζει την ένταση του ρεύματος εξόδου.

Η ρύθμιση της έντασης γίνεται από το ποτενσιόμετρο του οδηγού με τη βοήθεια μιας τάσης αναφοράς. Η ανάγνωσή της επιτυγχάνεται με την μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του ποτενσιόμετρου και της ακίδας της γείωσης .



Εικόνα 4.2 Οδηγός βηματικού κινητήρα DRV8825

Λόγω των απαιτήσεων των Β/Κ για ρεύμα σταθερής έντασης των 2,2 Α, είναι απαραίτητη η ρύθμιση της τάσης αναφοράς στα 1,1 V. Η τιμή αυτή ορίζεται από την εξίσωση $V_{ref} = \frac{current\ limit}{2}$ που αναγράφεται στο φύλλο δεδομένων.

4.2 Τερματικοί διακόπτες και διακόπτες ασφαλείας.

Στα άκρα κάθε άξονα υπάρχει από ένας τερματικός διακόπτης (NO) που οριοθετεί την κίνησή του και βοηθάει για τον ορισμό του «μηδέν» της μηχανής .

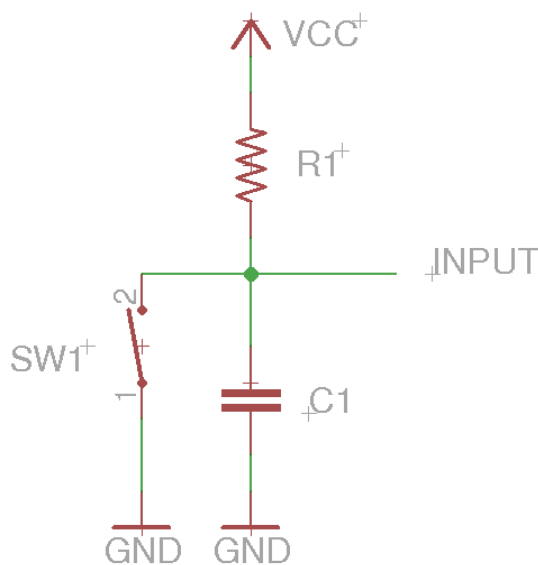
Η συνδεσμολογία τους από τον κατασκευαστή, θέλει τους διακόπτες της θετικής πλευράς των αξόνων X και Y συνδεδεμένους σε παραλληλία και αντίστοιχα της αρνητικής πλευράς.

Το CNC shield παρέχει αναμονή για σύνδεση δυο διακοπών ανά άξονα η οποία όμως είναι βραχυκυκλωμένη εσωτερικά. Αυτό οφείλεται στο ότι το GRBL αναγνωρίζει μόνο έναν τερματικό διακόπτη ανά άξονα.

Κατά συνέπεια είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός και η ανακαλωδίαση των διακοπών ώστε να συνδεθούν κατάλληλα στο CNC shield ως διακόπτες του κάθε άξονα.

Το CNC shield v3.0 είναι συμβατό με παλαιότερη έκδοση του GRBL. Στην παρούσα έκδοση οι ακροδέκτες των τερματικών διακοπών του Z άξονα συνδέονται στην ακίδα του Spindle enable αντί της αναγραφόμενης τους θέσης. Αυτή η αλλαγή οφείλεται στην προσθήκη της δυνατότητας ελέγχου της περιστροφικής ταχύτητας ατράκτου που προσφέρει η καινούργια έκδοση του GRBL.

Η εργαλειομηχανή προσφέρει προστασία στον χειριστή μέσω ενός ακρυλικού εγκλεισμού. Κατά τη λειτουργία της μηχανής ο εγκλεισμός πρέπει να είναι κλειστός. Η θέση του εγκλεισμού αναγνωρίζεται μέσω ενός μαγνητικού διακόπτη. Επειδή το GRBL δεν προσφέρει τρόπο λειτουργίας για τον μαγνητικό διακόπτη, αυτός συνδέεται παράλληλα με τον διακόπτη εκτάκτου ανάγκης στη θέση E-stop του CNC shield.



Έπειτα από άμεση σύνδεση των διακοπών στο Arduino, με κάθε εντολή κίνησης, εμφανιζόταν μήνυμα ενεργοποίησης κάποιου διακόπτη. Αυτό προέκυπε από τη δημιουργία επαγωγικών ρευμάτων μεταξύ των καλωδίων ισχύος (τροφοδοσία β/κ) και λογικής (διακόπτες). Η χρήση χαμηλοπεράτων φίλτρων (Low pass filter) εξάλειψε το θόρυβο από το σήμα. Τα φίλτρα πρέπει να συνδεθούν ενδιάμεσα του CNC shield και των διακοπών. Αποτελούνται από αντιστάσεις 4,7 kΩ και πυκνωτές 100 nF.

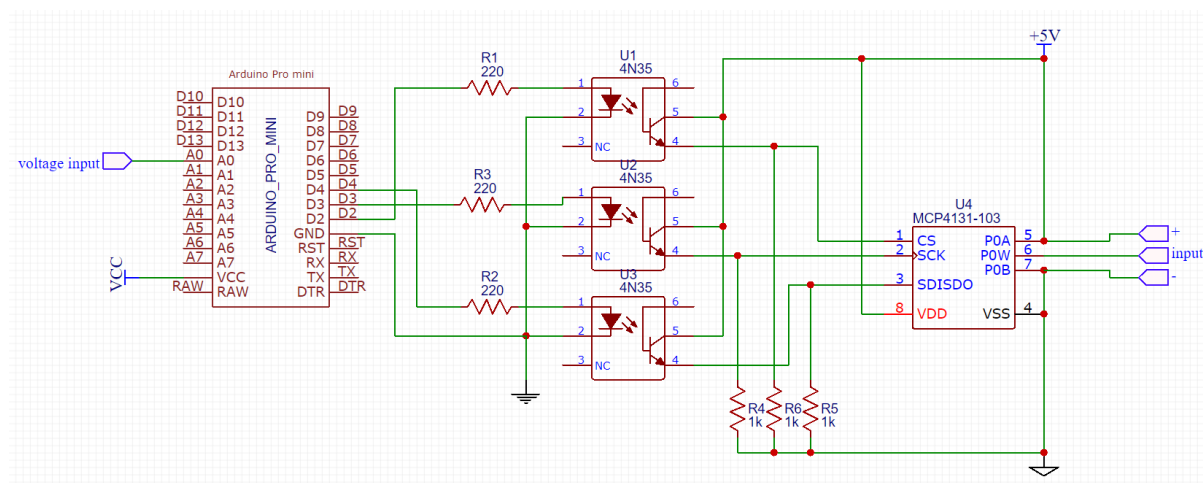
Σχήμα 4.3 Χαμηλοπερατό φίλτρο

4.3 Σύστημα ελέγχου ατράκτου

Γνωρίζοντας ότι η πλακέτα ελέγχου της ατράκτου δέχεται 0-10 VDC για τον έλεγχο του αριθμού των στροφών του Η/Κ και το Arduino παρέχει 0-5 VDC με τη λειτουργία PWM, αρχικά συνδέθηκαν απευθείας οι κατάλληλες ακίδες του Arduino στην είσοδο σήματος της PCM21000A, και ο κινητήρας περιστρεφόταν σε μικρότερο από το επιθυμητό εύρος στροφών .

Για το απαιτούμενο εύρος στροφών (σήμα εύρους τάσης 0-10V), χρησιμοποιήθηκε ένας ενισχυτής τάσης (DC boost converter) συνδυαζόμενος με μια γέφυρα Η (H-bridge). Κατά την δοκιμή λειτουργίας του κυκλώματος, παρατηρήθηκε πως ενώ σε χαμηλές στροφές το κοπτικό εργαλείο περιστρεφόταν ομαλά, αυξάνοντας τις στροφές, αυτές αυξομειώνονταν με αποτέλεσμα να καίγεται η ασφάλεια.

Μην έχοντας λύση στο πρόβλημα δοκιμάστηκε μια εντελώς διαφορετική μέθοδος. Ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα να πραγματοποιείται μέσω ενός ψηφιακού ποτενσιόμετρου συνδεδεμένου παράλληλα με το φυσικό ποτενσιόμετρο στην πλακέτα. Η επιλογή της αυτόματης και χειροκίνητης λειτουργίας θα ήταν εφικτή με τη χρήση ενός διακόπτη δύο θέσεων.



Σχήμα 4.4 Κύκλωμα ελέγχου ψηφιακού ποτενσιόμετρου MCP4131

Το ψηφιακό ποτενσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το MCP4131 (Microchip, 2017) ,εσωτερικής αντίστασης 10kΩ, αντίστοιχης του φυσικού ποτενσιόμετρου. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI που χρησιμοποιεί το ψηφιακό ποτενσιόμετρο, για αποφυγή αλλοίωσης του κώδικα GRBL, εγκαθίσταται σε δεύτερο Arduino (proMini) και το σήμα για τη μεταβολή της αντίστασής του έρχεται από το PWM της ακίδας SP-EN του GRBL (0-5VDC)

Το κύκλωμα του PCM21000A και το κύκλωμα του Arduino βρίσκονται σε διαφορετικά ηλεκτρικά δυναμικά, με τη διαφορά τους να ξεπερνά τα 100 V. Αυτή η διαφορά είναι αρκετή για να κάψει τα ευαίσθητα σε υψηλές τάσεις κυκλώματα. Για αυτό το λόγο κρίθηκε αναγκαία η ηλεκτρική απομόνωση των κυκλωμάτων με χρήση οπτοαπομονωτών μεταξύ του Arduino proMini και του ψηφιακού ποτενσιόμετρου.

Για την τροφοδοσία του ποτενσιόμετρου ήταν απαραίτητη η χρήση εξωτερικού τροφοδοτικού.

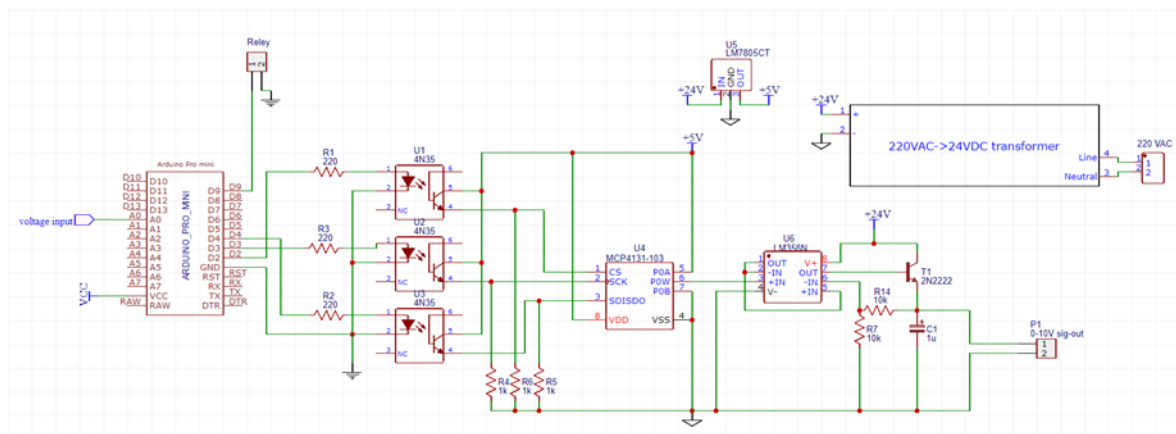
Καθώς η απαιτούμενη τιμή ρεύματος στην είσοδο της MCP21000A ήταν μεγαλύτερη από αυτή που επέτρεπε το ψηφιακό ποτενσιόμετρο να περάσει, το κύκλωμα δεν λειτούργησε. Με αυτό το αποτέλεσμα η λύση με τα παράλληλα ποτενσιόμετρα κρίθηκε εξαιρετικά δύσκολη στην ενσωμάτωσή της στο κύκλωμα της ατράκτου.

Συνεπώς ο χειρισμός που προσφερόταν από την πλακέτα (σήμα 0-10VDC) ήταν η τελική λύση. Με βάση την προηγούμενη δοκιμή, κρίθηκε καταλληλότερο το σήμα των 10 VDC να διαιρείται από ψηφιακό ποτενσιόμετρο αντί για χρήση της εντολής PWM, όπως στην πρώτη δοκιμή, με σκοπό το σήμα να είναι σταθερό και όχι διακοπτόμενο. Το ψηφιακό ποτενσιόμετρο 4131, δεν ήταν αρκετό για να διαχειριστεί απευθείας τα 10 VDC, συνεπώς κρίθηκε αναγκαία η χρήση του ψηφιακού ποτενσιόμετρου X9C103, το οποίο είναι ικανό να διαχειριστεί τα 10 V σε εύρος τάσης από -5V έως +5V.

Μετρώντας την τάση στα άκρα του ποτενσιόμετρου, η μεταβολή της βρέθηκε εκθετική, ενώ η μεταβολή του σήματος από το GRBL ήταν γραμμική

Από την παραπάνω δοκιμή, βγήκε το συμπέρασμα ότι το σήμα των 10V απαιτεί και μία ποσότητα ρεύματος (~40mA) για να εξασφαλίσει προστασία από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία των ηλεκτροκινητήρων. Η λύση επιτεύχθηκε με τη χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή σήματος σε συνδυασμό με ένα τρανζίστορ.

Η μεταβολή της τάσης του σήματος που δέχεται ο ενισχυτής ελέγχεται από το κύκλωμα που αναφέρεται στο σχήμα 4.4. Επαναχρησιμοποιείται το ψηφιακό ποτενσιόμετρο MCP4131. Για επιπλέον ασφάλεια μεταξύ του Arduino και του ποτενσιόμετρου παρεμβάλλονται οπτοζεύκτες .



Σχήμα 4.5 Κύκλωμα ελέγχου ατράκτου

Εφόσον η ακίδα Spindle enable του CNC shield έχει χαρτογραφηθεί ως τερματικοί διακόπτες του Z άξονα, ως ακίδα Spindle enable χρησιμοποιείται η ακίδα Z+. Από την ακίδα Z+ του CNC shield αποστέλλεται σήμα σε μορφή PWM το οποίο περνά

από φίλτρο RC, αντίστασης $1k\Omega$ και ηλεκτρολυτικού πυκνωτή $47\mu F$, για να γίνει σταθερή τάση και να καταλήξει στο Arduino proMini. Το proMini ελέγχει γραμμικά την αντίσταση του ψηφιακού ποτενσιόμετρου το οποίο συνδέεται στην είσοδο σήματος του ενισχυτή LM358.

Ο ενισχυτής δέχεται σήμα τάσης 0-5VDC στην ακίδα 3 και 24V στην ακίδα 8. Από την ακίδα 7 συνδέεται με τη βάση του τρανζίστορ 2N2222. Για την τροφοδοσία των 24 V χρησιμοποιείται κατάλληλος μετασχηματιστής και για τα 5V ένας σταθεροποιητής τάσης LM7805 που δέχεται στην είσοδό του τάση μέχρι 35V.

Το κύκλωμα, συνδεδεμένο με την πλακέτα ελέγχου PCM21000A, δίνει τα απαραίτητα σήματα που απαιτούνται για τον πλήρη έλεγχο της ατράκτου.

Με τη χρήση ενός οπτικού στροφόμετρου, έγινε η βαθμονόμηση της PCM21000A ώστε η άτρακτος να περιστρέφεται από 500 έως 5000 στροφές ανά λεπτό με μέγιστο σφάλμα 5%

Στον κώδικα του Arduino proMini προστέθηκαν επίσης κάποιες λειτουργίες που το GRBL δεν είχε προβλέψει για τη συγκεκριμένη διάταξη. Για τον έλεγχο του ηλεκτρονόμου τροφοδοσίας προστέθηκε εντολή η οποία, όταν η τιμή της ξεπερνάει τις 500 στροφές τον ενεργοποιεί και τον απενεργοποιεί με την εντολή M5, θέτοντας ταυτόχρονα σε λειτουργία τη δυναμική πέδη.

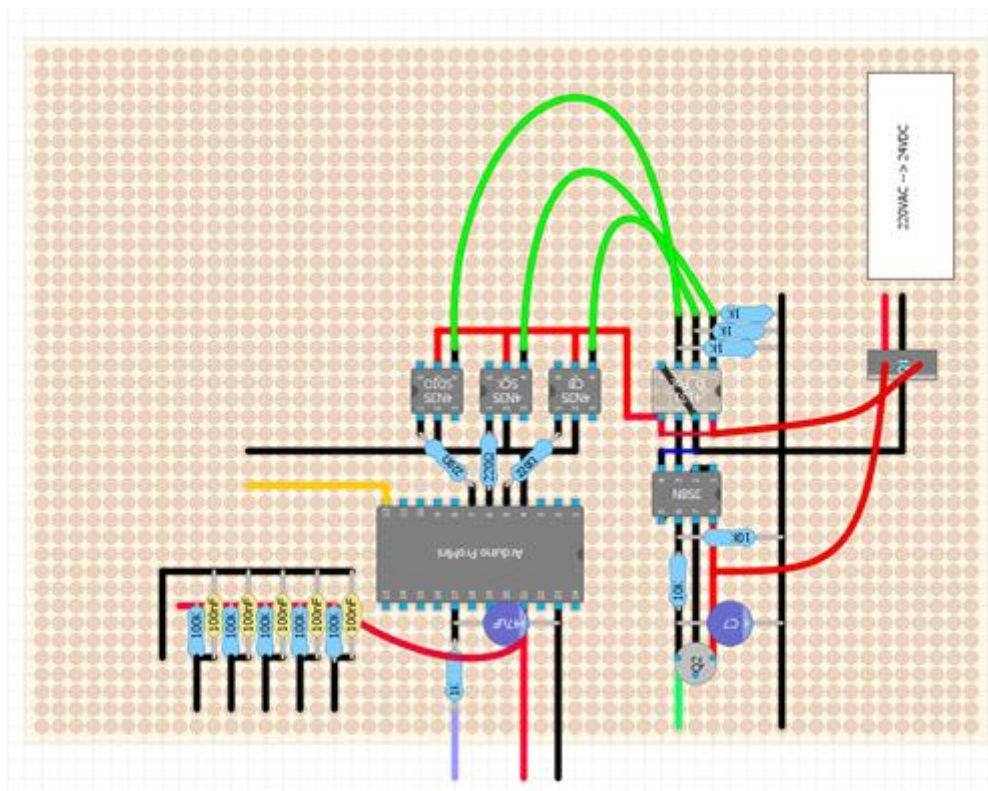
Επίσης προστέθηκε μια λειτουργία σταδιακής αύξησης ή μείωσης των στροφών καθώς όταν ο κώδικας απαιτούσε υψηλές στροφές, η απότομη επιτάχυνση προκαλούσε ολίσθηση στον ιμάντα μετάδοσης της κίνησης της ατράκτου.

5. ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

5.1 Τελική κατασκευή κυκλώματος

Το ProLight 1000 διαθέτει ένα κουτί κεντρικού ελέγχου το οποίο στεγάζει: την τροφοδοσία των βηματικών κινητήρων, τους οδηγούς τους, δύο ηλεκτρονόμους για τη διαχείριση των παρελκόμενων καθώς και τα βύσματα σύνδεσης με την μηχανή και τον υπολογιστή. Όλα τα παραπάνω βρίσκονται σε μορφή τυπωμένης πλακέτας.

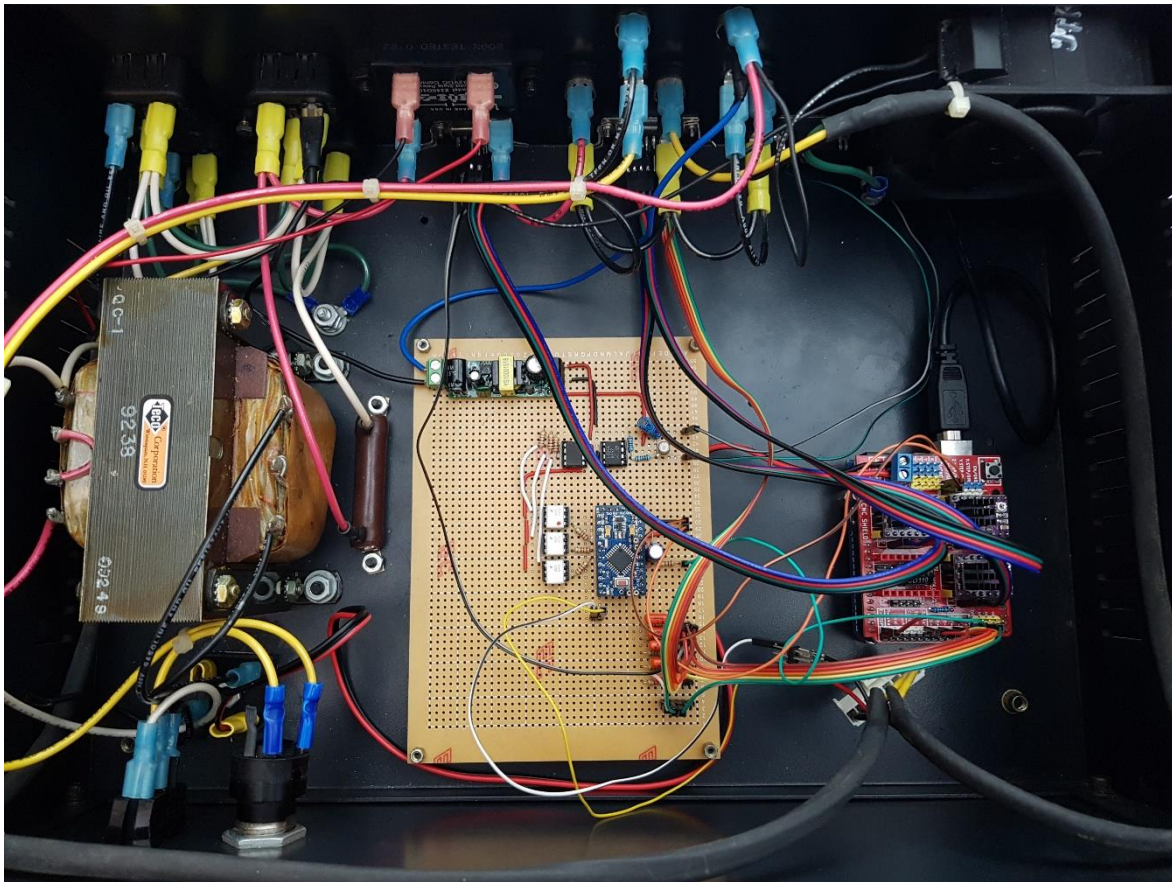
Με βάση το κύκλωμα που περιγράφεται στο σχήμα 4.5 κατασκευάζεται σε διατρητή πλακέτα (perfboard) η ηλεκτρονική διάταξη για τον έλεγχο της ατράκτου. Στην ίδια πλακέτα προστίθενται και τα φίλτρα RC για τους διακόπτες.



Εικόνα 5.1 Σκαρίφημα πλακέτας perfboard

Η μετατροπή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4 απαιτεί την αφαίρεση της παλιάς πλακέτας, χρήση του υπάρχοντος μετασχηματιστή και της ίδιας γέφυρας ανόρθωσης για την, εκ νέου, τροφοδοσία των βηματικών κινητήρων. Στις οπές που έμειναν από τα βύσματα στερεώθηκαν καινούρια, τα οποία τροποποιήθηκαν ώστε να μπορούν να συνδεθούν με αυτά τα καινούρια καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν. Στον άδειο χώρο που έμεινε από την πλακέτα, ανοίχτηκαν οι απαραίτητες οπές για τη στερέωση του Arduino και των υπόλοιπων ηλεκτρονικών.

Τέλος είναι απαραίτητη η αντικατάσταση του 25pin βύσματος, με το βύσμα usbA του καλωδίου σύνδεσης του Arduino. Για να μπορέσει να τοποθετηθεί το νέο βύσμα στη θέση του παλιού, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός στηρίγματος.



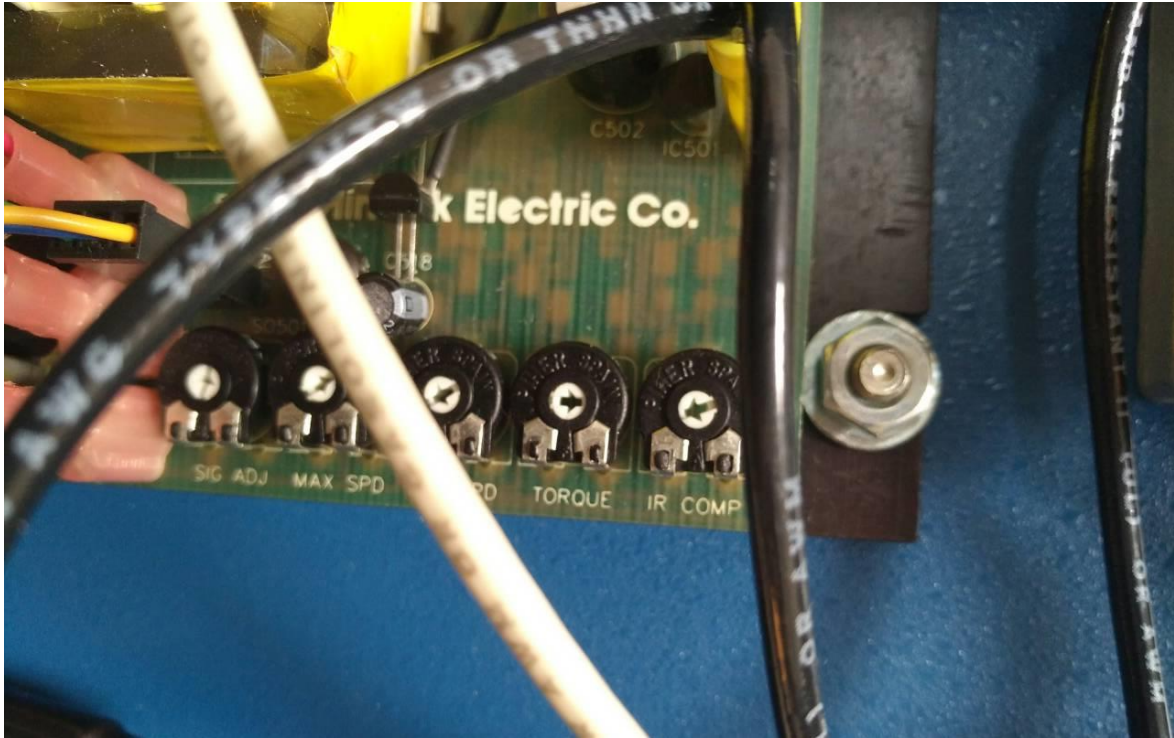
Εικόνα 5.2 Τελική κατάσταση του κουτιού ελέγχου



Εικόνα 5.3 Θύρα USB για σύνδεση με υπολογιστή

5.2 Βαθμονόμηση ατράκτου

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήστη της πλακέτας PCM21000A (Minarik, 2001) και με τη χρήση ενός οπτικού στροφόμετρου, έγινε η βαθμονόμηση των στροφών του κινητήρα. Τα ποτενσιόμετρα που βρίσκονται πάνω στην ηλεκτρονική διάταξη εξασφαλίζουν συμβατότητα με μεγάλο εύρος ηλεκτροκινητήρων με προϋπόθεση την κατάλληλη ρύθμισή τους για την κάθε περίπτωση.



Εικόνα 5.4 Ποτενσιόμετρα βαθμονόμησης PCM21000A

Ποτενσιόμετρο SIG ADJ: ορίζει τον μέγιστο αριθμό στροφών ανά λεπτό (RPM) που θα περιστρέφεται ο Η/Κ κατά τη ελεγχόμενη από το πρόγραμμα λειτουργία της εργαλειομηχανής (διακόπτης στη θέση CNC).

Ποτενσιόμετρο MAX SPD: ορίζει τον μέγιστο αριθμό στροφών ανά λεπτό που θα περιστρέφεται ο Η/Κ κατά τη χειροκίνητη λειτουργία της εργαλειομηχανής (διακόπτης στη θέση Manual).

Ποτενσιόμετρο MIN SPD: ορίζει τον ελάχιστο αριθμό στροφών.

Ποτενσιόμετρο TORQUE: ρυθμίζει τη ροπή του κινητήρα περιορίζοντας το μέγιστο ρεύμα που περνάει στα περιελίγματα του.

Ποτενσιόμετρο IR COMP: σταθεροποιεί τις στροφές του κινητήρα σε περίπτωση που στο κοπτικό εμφανιστή κάποια αντίσταση εκτός της προσδοκούμενης (πχ. κατά την κοπή).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκαν οι πέντε χιλιάδες (5000) RPM, που αναγράφονται στο εγχειρίδιο της μηχανής, σαν μέγιστη τιμή. Οι ελάχιστες στροφές ορίζονται από τον κώδικα του Arduino στις 500 RPM, οπότε το αντίστοιχο ποτενσιόμετρο ρυθμίζεται στην μικρότερη δυνατή θέση του. Για τη ρύθμιση της ροπής είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών του ηλεκτροκινητήρα, τα οποία δεν αναφέρονται στο εγχειρίδιο της εργαλειομηχανής και δεν είναι δυνατή η εύρεσή τους μέσω πηγών του διαδικτύου, με αποτέλεσμα η ρύθμιση να πραγματοποιείται σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές που αναγράφονται στο εγχειρίδιο, για κινητήρα 1 ίππου (HP).

5.3 Βαθμονόμηση GRBL

Σύμφωνα με τις οδηγίες από τον ιστότοπο διαμοιρασμού του GRBL, γίνεται η βαθμονόμηση των παραμέτρων του, ώστε οι εντολές κίνησης του G κώδικα να εκτελούνται με ακρίβεια από την εργαλειομηχανή.

Πρώτα ρυθμίζεται η ακρίβεια της κίνησης των αξόνων με τις παραμέτρους \$101, \$102, \$103 για τους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα. Αυτό εξαρτάται από το βήμα του κοχλίας μεταφοράς της κίνησης και δίνεται σε βήματα του κινητήρα ανά χιλιοστό κίνησης. Ο κοχλίας μεταφοράς κίνησης έχει βήμα 5trpi δηλαδή χρειάζεται 5 πλήρεις περιστροφές για να διανύσει μία ίντσα ή 25,4 mm. Για να κάνει 1 περιστροφή ο κοχλίας μεταφοράς, ο β/κ θα πρέπει να πραγματοποιήσει 2 περιστροφές λόγω της σχέσης μετάδοσης 2:1. Άρα σε μισό βηματισμό, ο β/κ θα πρέπει να κάνει 800 βήματα ανά περιστροφή, δηλαδή για να διανύσει 1 mm θα πρέπει να κάνει 157,48 βήματα ($200\text{βήματα} * 2\text{μισό βήμα} * 2\text{σχέση μετάδοσης} / 5,08\text{mm/rev} = 157,48\text{steps/mm}$).

Η μέγιστη ταχύτητα πρόωσης ορίζεται από τις παραμέτρους \$110, \$111, \$112 με διαδοχικές δοκιμές, αυξάνοντας σταδιακά την τιμή τους μέχρι οι κινητήρες να αποτύχουν να ολοκληρώσουν την κίνησή τους. Οι τιμές που προκύπτουν είναι τα 1500 mm/min για τους άξονες X και Y, και 1000 mm/min για τον άξονα Z.

Ως μέτρο ασφαλείας, ενεργοποιείται η λειτουργία των τερματικών διακοπών θέτοντας την παράμετρο \$21=1. Σε περίπτωση εσφαλμένων εντολών, αν κάποιος από τους άξονες ενεργοποιήσει τερματικό διακόπτη, σταματούν όλες οι κινήσεις και ο χειριστής ειδοποιείται με μήνυμα σφάλματος.

Λόγω της αδυναμίας των βηματικών κινητήρων να ελέγχουν την ακριβή τους θέση, η μηχανή πρέπει να μηδενίζει τους άξονές της με κάθε ενεργοποίηση της ή μετά από τυχόν σφάλμα που μπορεί να προκύψει. Γι' αυτό το λόγο έχει οριστεί μια σειρά εντολών που κινεί τους άξονες προς την θέση μηδέν της μηχανής, η οποία συμπίπτει με το σημείο που ενεργοποιούνται και οι τρεις θετικοί τερματικοί διακόπτες, το λεγόμενο «Homíng». Η παράμετρος που ελέγχει αυτή τη λειτουργία είναι η \$22 και ενεργοποιείται δίνοντάς της την τιμή 1

Επιπλέον ενεργοποιείται και η λειτουργία των εικονικών τερματικών διακοπών, θέτοντας την τιμή 1 στην παράμετρο \$20. Έτσι σε περίπτωση που ο χειριστής δώσει εντολή η οποία θα κινούσε την τράπεζα σε θέση που ενεργοποιείται κάποιος τερματικός διακόπτης, ο υπολογιστής θα βγάλει μήνυμα σφάλματος πριν την πραγματοποίηση της εντολής με αποτέλεσμα η μηχανή να μη χρειαστεί «homing».

5.4 Συντήρηση

Η εργαλειομηχανή είχε μείνει σε ακινησία για πολλά χρόνια. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση σκουριάς και σκόνης στην τράπεζα και την ξήρανση του λιπαντικού στις επιφάνειες τριβής. Ήταν λοιπόν αναγκαία η απομάκρυνση όλων των σημείων οξείδωσης, ο καθαρισμός από τη σκόνη και η ανανέωση του λιπαντικού στις γλίστρες και στους κοχλίες μεταφοράς της κίνησης.

5.5 Δοκιμές G κώδικα

Ως επιβεβαίωση ότι η μηχανή λειτουργεί κανονικά, δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του Fusion 360 CAD-CAM προγράμματος, μία απλή σειρά εντολών G κώδικα και δοκιμάστηκε χωρίς κοπή. Η εργαλειομηχανή αποκρίθηκε όπως ήταν αναμενόμενο και ακολούθησε με επιτυχία τις εντολές που της δόθηκαν.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την διάρκεια της πτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε μεθοδολογία για την αναβάθμιση της λειτουργίας παλαιάς εργαλειομηχανής (proLight1000) με μη υποστηριζόμενο hardware, ώστε μέσω μικρών τροποποιήσεων να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με σύγχρονο software. Με τη χρήση του Arduino και με το ανοιχτό λογισμικό GRBL όχι μόνο επετεύχθη ο σκοπός της εργασίας αλλά αναβαθμίστηκε παράλληλα και η CNC εργαλειομηχανή, καθώς παλαιότερα λειτουργούσε σε 2,5D διαστάσεις και πλέον λειτουργεί σε 3. Μέσα σε αυτό το διάστημα έγινε κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας μιας CNC εργαλειομηχανής, οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται καθώς και ο μηχανολογικός και ηλεκτρολογικός εξοπλισμός που την απαρτίζει.

Διευρύνθηκαν οι γνώσεις στον τομέα των ηλεκτρονικών και της μηχανικής, χρησιμοποιώντας καινούργια εξαρτήματα, κομμάτια λογισμικού και μικροελεγκτές των οποίων ο συνδυασμός έθεσε σε λειτουργία την εργαλειομηχανή.

Η εργαλειομηχανή επιδέχεται βελτίωσης, καθώς κύριος παράγοντας στην επιλογή εξαρτημάτων και στις διεργασίες μεταποίησης ήταν ο οικονομικός, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των δυνατοτήτων της. Παρ' όλα αυτά το τελικό αποτέλεσμα είναι πλήρως ικανό να λειτουργήσει τόσο ως εκπαιδευτική διάταξη, όσο και ως μηχανή παραγωγής μικρής κλίμακας. Συγκεκριμένα, με τις παρακάτω βελτιώσεις, η εργαλειομηχανή θα μπορούσε να εκτελεί πληθώρα εντολών, που θα της επέτρεπαν να αξιοποιηθεί εν μέρει ως CNC κέντρο κατεργασίας:

- Αντικατάσταση της πλακέτας ελέγχου με mach4.
- Προσθήκη κατάλληλου συστήματος ψύξης κατά την κοπή
- Μετατροπή συστήματος κίνησης αξόνων σε κλειστού βρόγχου
- Προσθήκη τέταρτου ή περισσότερων αξόνων

Τέλος, για την ολοκλήρωση της εργασίας, αξιοποιήθηκαν γνώσεις από μαθήματα του τμήματος της μηχανολογίας (μηχανική, CNC, μηχανολογικό εργαστήριο, σχεδιασμός κατασκευών, αυτοματισμοί), καθώς επίσης συνδυάστηκαν βασικές γνώσεις από διαφορετικούς τομείς, κατανοώντας έτσι την αναγκαιότητα και σπουδαιότητα της συνδυαστικής σκέψης και της διατηρηματικής συνεργασίας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arduino, 2017. *Arduino ProMini*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://store.arduino.cc/arduino-pro-mini>
[Πρόσβαση 17 12 2017].
- Github, 2017. *github*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: github.com
- Intersil, 2009. *X9C103 Datasheet*, : .
- Light Machines Corporation, 1996. *proLIGHT 1000 Machining Center User's Guide*. επιμ. : .
- McRoberts, M., 2010. *Beginning Arduino*. επιμ. : Technology in Action.
- Microchip, 2017. *PCM4131 Datasheet*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22060a.pdf>
[Πρόσβαση Νοέμβριος 2017].
- Minarik, 2001. *PCM20000 SERIES User's Manual*. επιμ. : .
- National Semiconductors, 2005. *LM358 Datasheet*, : .
- Philips Semiconductors, 1997. *2N2222 Datasheet*, : .
- Scarpino, M., 2016. *MOTORS FOR MAKERS: A GUIDE TO STEPPERS, SERVOS, AND OTHER ELECTRICAL MACHINES*. s.l.:QUE .
- Seong-Kyoon Kang, Suk-Hwan Suh, Dae-Hyuk Chung & Ian Stroud, 2008. *Theory and Design of CNC Systems*. επιμ. : Springer.
- Smid, P., 2003. *CNC Programming Handbook*. New York: Industrial Press Inc..
- Superior Electric, . *SLO-SYN Motion Control Products*, : .
- VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC, 2017. *4n35 Datasheet*, : .
- Σκιπτιδης, Φ. Χ., 2000. *Βασικές Αρχές Αριθμητικού Ελέγχου και Προγραμματισμός Εργαλειομηχανών CNC Τόμος Α'*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική.
- Στεργίου, Κ., 2004. *Σχεδιασμός των Κατασκευών*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική.

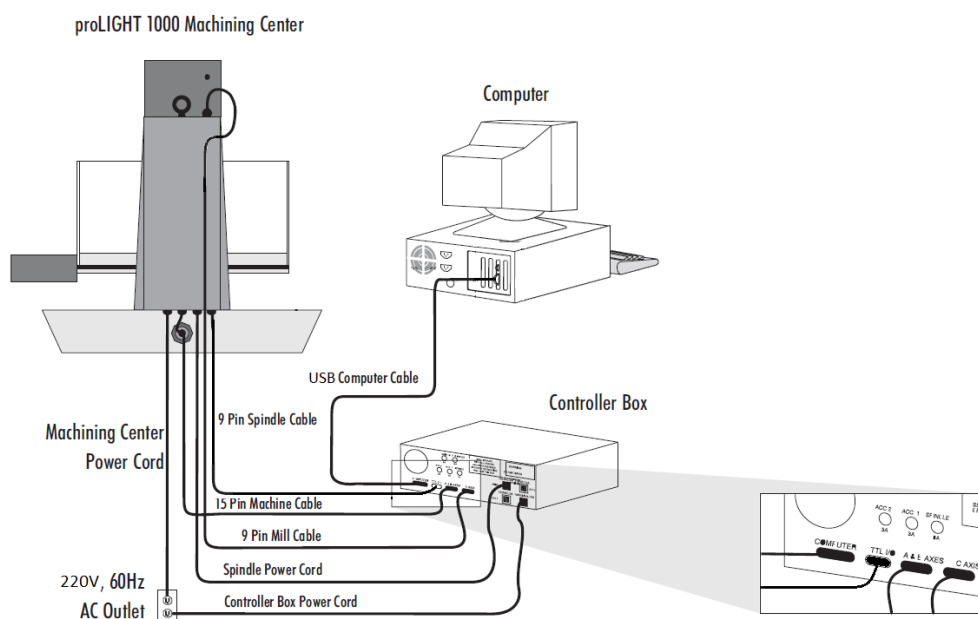
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1 Εγχειρίδιο χρήστη

8.1.1 Συνδέσεις

Τα καλώδια διασύνδεσης και τα καλώδια ρεύματος είναι αρκετά μακριά ώστε να επιτρέπουν στον ελεγκτή να έχει τοποθετημένο το κουτί του controller σε απόσταση 1,5 μέτρων από την εργαλειομηχανή. Σιγουρεύεται πως η εργαλειομηχανή είναι τοποθετημένη σε σταθερή και επίπεδη επιφάνεια. Ο controller τοποθετείτε κοντά στην εργαλειομηχανή έτσι ώστε ο διακόπτης ενεργοποίησης να είναι σε προσβάσιμο σημείο και ταυτόχρονα τυχόν ρινίσματα ή υγρά κοπής να μην μπορούν να έρθουν σε επαφή με αυτόν.

Ακολουθείται πιστά το παρακάτω σχεδιάγραμμα για τη σωστή σύνδεση των καλωδίων.



Σχήμα 8.1 Σχεδιάγραμμα σύνδεσης εργαλειομηχανής

Σιγουρευτείτε όλες οι συνδέσεις να εφαρμόζουν σφιχτά στις αντίστοιχες θέσεις τους και αν υπάρχουν βίδες συγκράτησης να είναι σωστά και σφιχτά τοποθετημένες.

8.1.1.1 Σύνδεση εργαλειομηχανής με controller

1. Συνδέστε το 15pin βύσμα στη θέση A & B AXIS του controller.

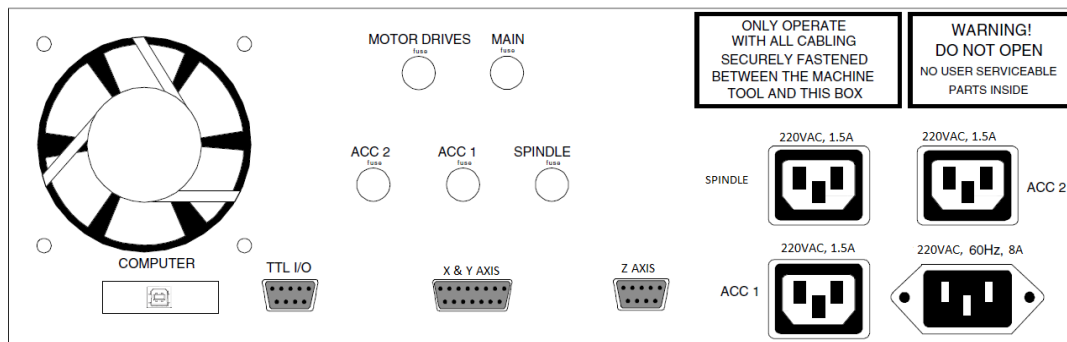
2. Συνδέστε το 9pin βύσμα που βρίσκεται στο πάνω μέρος της εργαλειομηχανής στη θέση Z AXIS του controller.
3. Συνδέστε το 9pin βύσμα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της εργαλειομηχανής στη θέση TTL I/O του controller.
4. Συνδέστε το βύσμα τροφοδοσίας της ατράκτου των 220VAC στη θέση SPINDLE του controller.

8.1.1.2 Σύνδεση controller με υπολογιστή

1. Συνδέστε το βύσμα USB του υπολογιστή στη θύρα UBS type A, κάτω από τον ανεμιστηράκι, του controller.

8.1.1.3 Σύνδεση controller και εργαλειομηχανής στο ρεύμα

1. Συνδέστε το καλώδιο τροφοδοσίας της εργαλειομηχανής σε θέση ρεύματος 220 VAC.
2. Συνδέστε το καλώδιο τροφοδοσίας του controller σε θέση ρεύματος 220 VAC και το 3pin βύσμα του στη θέση 220VAC,60 Hz, 8A του controller.



Σχήμα 8.2 Σχηματική απεικόνιση πίσω όψης κουτιού ελέγχου

8.1.2 Λογισμικό

Στο διαδίκτυο υπάρχει πληθώρα από προγράμματα συμβατά με το GRBL. Όλα λειτουργούν με την ίδια αρχή.

1. Βεβαιώνεται πως το καλώδιο USB είναι συνδεδεμένο στο κουτί ελέγχου και στον υπολογιστή.
2. Ανοίγετε το πρόγραμμα
3. Πατάτε το πλήκτρο “connect” στην οθόνη (σιγουρευτείτε ότι το baud rate είναι 115200)
4. Σιγουρευτείτε ότι το E-Stop είναι ανενεργό, ο προστατευτικός εγκλεισμός είναι στη θέση του και μηδενίστε τη μηχανή (Homing)

Η μηχανή είναι έτοιμη για χρήση.

Το πρόγραμμα (G-CODE) φορτώνεται ως αρχείο

8.1.3 Πιθανά σφάλματα

Πρόβλημα	Λύση
Έχει πατηθεί τερματικός διακόπτης	Απαιτείται soft reset και Homing της μηχανής
Με το Homing η τράπεζα δεν απομακρύνεται από τον τερματικό διακόπτη	Χρειάζεται απενεργοποίηση των διακοπών (\$21=0) και χειροκίνητη κίνηση της τράπεζας μακριά από το διακόπτη. Ενεργοποιείστε τους διακόπτες (\$21=1) και εκτελέστε Homing
Οι στροφές της ατράκτου δεν μεταβάλλονται σύμφωνα με το πρόγραμμα.	Βεβαιωθείτε ότι ο διακόπτης επιλογής βρίσκεται στη θέση CNC.
Η μηχανή δεν παίρνει ρεύμα	Ελέγξτε τις ασφάλειες

8.2 Παραμετροποίηση GRBL

- \$0 = 6 (Step pulse time, microseconds)
- \$1 = 25 (Step idle delay, milliseconds)
- \$2 = 0 (Step pulse invert, mask)
- \$3 = 0 (Step direction invert, mask)
- \$4 = 0 (Invert step enable pin, boolean)
- \$5 = 0 (Invert limit pins, boolean)
- \$6 = 0 (Invert probe pin, boolean)
- \$10 = 1 (Status report options, mask)
- \$11 = 0.010 (Junction deviation, millimeters)
- \$12 = 0.002 (Arc tolerance, millimeters)
- \$13 = 0 (Report in inches, boolean)
- \$20 = 1 (Soft limits enable, boolean)
- \$21 = 1 (Hard limits enable, boolean)
- \$22 = 1 (Homing cycle enable, boolean)
- \$23 = 0 (Homing direction invert, mask)
- \$24 = 25.000 (Homing locate feed rate, mm/min)
- \$25 = 500.000 (Homing search seek rate, mm/min)
- \$26 = 250 (Homing switch debounce delay, milliseconds)
- \$27 = 1.500 (Homing switch pull-off distance, millimeters)

\$30 = 5000 (Maximum spindle speed, RPM)
 \$31 = 0 (Minimum spindle speed, RPM)
 \$32 = 0 (Laser-mode enable, boolean)
 \$100 = 157.480 (X-axis travel resolution, step/mm)
 \$101 = 157.480 (Y-axis travel resolution, step/mm)
 \$102 = 157.480 (Z-axis travel resolution, step/mm)
 \$110 = 1000.000 (X-axis maximum rate, mm/min)
 \$111 = 1000.000 (Y-axis maximum rate, mm/min)
 \$112 = 1000.000 (Z-axis maximum rate, mm/min)
 \$120 = 10.000 (X-axis acceleration, mm/sec²)
 \$121 = 10.000 (Y-axis acceleration, mm/sec²)
 \$122 = 10.000 (Z-axis acceleration, mm/sec²)
 \$130 = 304.800 (X-axis maximum travel, millimeters)
 \$131 = 152.400 (Y-axis maximum travel, millimeters)
 \$132 = 228.600 (Z-axis maximum travel, millimeters)

8.3 Χαρτογράφηση βυσμάτων

8.3.1 Πίνακες χαρτογράφησης αρχικό στάδιο

Πίνακας 8-1.9-Pin βύσμα καλωδίου σύνδεσης άξονα Z

Ακίδα	Χρήση	Χρώμα καλωδίου εργαλειομηχανής
1	Common	Ροζ
2	Θετικός τερματικός διακόπτης Z	Άσπρο
3	Z motor	Μαύρο
4	Z motor	Πράσινο
5	Z motor	Πορτοκαλί
6	Z motor	Μπλε
7	Αρνητικός τερματικός διακόπτης Z	Μωβ
8	Not used	
9	Not used	

Πίνακας 8-2.15-Pin βύσμα καλωδίου σύνδεσης άξονα X & Y

Ακίδα	Χρήση	Χρώμα καλωδίου εργαλειομηχανής
1	X motor	Μωβ
2	X motor	Μαύρο
3	X motor	Άσπρο
4	X motor	Ροζ
5	Not used	
6	Θετικοί τερματικοί διακόπτες X και Y	Καφέ
7	Καπάκι	Κόκκινο
8	E-stop	Πορτοκαλί
9	Y motor	Κίτρινο
10	Y motor	Γκρι
11	Y motor	Κόκκινο-Μαύρο
12	Y motor	Πράσινο
13	Αρνητικοί τερματικοί διακόπτες X και Y	Κόκκινο-Κίτρινο
14	Not used	
15	Common	Μπλε

Πίνακας 8-3.9-Pin βύσμα καλωδίου σήματος ατράκτου

Ακίδα	Χρήση	Χρώμα καλωδίου εργαλειομηχανής
1	+	Ροζ
2	-	Κόκκινο
3-9	Not used	

8.3.2 Πίνακες χαρτογράφησης τελικό στάδιο

Πίνακας 8-4.9-Pin βύσμα καλωδίου σύνδεσης άξονα Z

Ακίδα	Χρήση	Χρώμα καλωδίου εργαλειομηχανής	Χρώμα καλωδίου controller
1	Common	Ροζ	Γκρι
2	Θετικός τερματικός διακόπτης Z	Άσπρο	Μαύρο
3	Z motor	Μαύρο	Μαύρο
4	Z motor	Πράσινο	Πράσινο
5	Z motor	Πορτοκαλί	Κόκκινο
6	Z motor	Μπλε	μπλε
7	Αρνητικός τερματικός διακόπτης Z	Μωβ	Άσπρο

8	Not used		
9	Not used		

Πίνακας 8-5.15-Pin βύσμα καλωδίου σύνδεσης άξονα X & Y

Ακίδα	Χρήση	Χρώμα καλωδίου εργαλειομηχανής	Χρώμα καλωδίου controller
1	X motor	Μωβ	Μαύρο
2	X motor	Μαύρο	Κόκκινο
3	X motor	Άσπρο	Πράσινο
4	X motor	Ροζ	Μπλε
5			
6	Τερματικοί διακόπτες Y	Καφέ	Πορτοκαλί
7	Καπάκι	Κόκκινο	Κόκκινο
8	E-stop	Πορτοκαλί	Καφέ
9	Y motor	Κίτρινο	Μαύρο
10	Y motor	Γκρι	Κόκκινο
11	Y motor	Κόκκινο-Μαύρο	Πράσινο
12	Y motor	Πράσινο	Μπλε
13	Τερματικοί διακόπτες X	Κόκκινο-Κίτρινο	Κίτρινο
14			
15	Common	Μπλε	Πράσινο

Πίνακας 8-6.9-Pin βύσμα καλωδίου σήματος ατράκτου

Ακίδα	Χρήση	Χρώμα καλωδίου εργαλειομηχανής	Χρώμα καλωδίου controller
1	+	Ροζ	Πράσινο -μαύρο
2	-	Κόκκινο	Γκρι - μαύρο

8.4 Κώδικας Arduino ProMini

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο ARDUINO PRO MINI συγγράφηκε εξ' ολοκλήρου από τον κύριο Γ.Χαμηλοθώρη, καθηγητή του τμήματος Αυτοματισμού του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ .

Ο κώδικας είναι υπεύθυνος να δέχεται το σήμα ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού από το Arduino/GRBL και να το μετατρέπει σε κατάλληλη εντολή για την πλακέτα Minarik.

Δέχεται και μετατρέπει το σήμα της εντολής ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου του κοπτικού, το οποίο παράγεται ως παλμικό σήμα 5V από το Arduino/GRBL και το εκπέμπει σε σήμα μορφής SPI με σκοπό να τοποθετήσει κατάλληλα το δρομέα του ποτενσιόμετρου. Η τάση στην έξοδο του δρομέα , έπειτα από απομόνωση και ενίσχυση σε εύρος τάσης 0-10V , έχει τις ακόλουθες εφαρμογές :

- Αποτελεί την "ακολουθία τάσης", στις εισόδους (+/-) σήματος της πλακέτας Minarik PCM21000A της συσκευής.
- Ενεργοποιεί τον ηλεκτρονόμο που επιτρέπει την τροφοδοσία της πλακέτας Minarik.Ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται όταν η εντολή της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη από την ορισμένη ως ελάχιστη ταχύτητα.
- Προστατεύει από χαμηλές ταχύτητες. Η τροφοδοσία του κινητήρα του κοπτικού αφαιρείται, όταν η εντολή της ταχύτητας είναι μικρότερη από την ορισμένη ως ελάχιστη ταχύτητα. Αυτό επιτυγχάνεται με την απενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου που τροφοδοτεί την πλακέτα Minarik.
- Παρέχει βαθμιαία επιτάχυνση και επιβράδυνση του κινητήρα όταν έχει δοθεί εντολή μεταβολής ταχύτητας.

/****** Conditions Arduino/GRBL signal for spindle speed into appropriate command for the Minarik board

* Purpose

* (1) Acquires and converts the spindle speed command signal produced as 5V PWM from Arduino/GRBL and transmits it in the form of a SPI signal to position the wiper of a potentiometer. The output voltage on the wiper pin, after buffering and amplification to 0-10V, is applied to the "voltage follower" (+/-) terminals of the Minarik PCM21000A motor controller board.

(2) Guards against under-speeding. Power to the spindle motor is removed if the value of the speed command is less than a specified minimum.

(3) Provides a gradual acceleration and deceleration of the motor, when a command to change speed is received. Changes of speed are constrained to a selectable rate, expressed as the number of units (in the 0-127 scale) per execution cycle of the code. The execution cycle is estimated at approx. 110% of the parameter idleTime that sets the main delay between repeated execution of the code

For example, when the rate is 5 units/cycle and idleTime is 200ms, it takes approx. 5.7s to accelerate the motor from standstill to full speed (assuming no load), corresponding to a rotational acceleration of approx. 880rpm/s or 92rad/s².

* Hardware

* A pin connects to the incoming PWM signal from Arduino running GRBL. Depending on the capture process, this can be any pin for method 2 or a special A2D converter pin for method 1.

Three digital pins (outputs) connect to pins DI, SCK and CS* of the 4131 10K potentiometer, to establish the SPI (Master Out - Slave In) communication.

A digital pin connects to the control terminal of a relay or similar 5V switch, to control the power to the spindle motor.

Optionally, serial data are transmitted over the standard Arduino port.

* Software

The incoming PWM signal is read using one of two methods.

Method 1 uses readAnalog() to measure the average value of the PWM voltage. This requires smooth values, that can be obtained by interposing a simple RC circuit (filter). For the specific PWM frequency of approx. 980Hz of the Arduino/GRBL output, and in order to keep the ripple of the voltage after the filter below the 7-bit resolution of the 41XX, a filter with time constant of approx. 32ms or larger is needed.

In method 2, the duration of "ON" and "OFF" pulses of the PWM is determined with the pulseIn() function and the duty cycle is calculated and re-scaled to 10 bits, compatible with the range of values returned by the standard readAnalog() function of Arduino.

The output to the digital potentiometer is transmitted

For transmission of commands to the digital potentiometer, the SPI protocol is implemented with custom functions, rather than using the standard library. This allows for the speed to be freely adjusted. In particular, by limiting the speed in the kHz range, SPI signals can be transmitted through ordinary opto-couplers (e.g. the 4N35).

Protection against underspeeding uses a hysteresis loop to avoid stopping and restarting the motor (relay jitter) when the speed command varies close to the value of the speed limit.

Gradual acceleration is implemented as a linear fit of values between the current speed and the new command. This linear fit has a fixed slope in time (slew rate).

* Reference

The code for SPI uses parts of original code by Sebastian Tomczak, July 2007.

The code for capturing the incoming PWM signal with pulseIn() is based on a post by Samuel Cowen, Dec. 2015.

v5.0, G.Chamilothoris, Oct. 2017.

```

/***** Initialisation
* Define global variables and constant values
*****/

const int slctPin= 2; // digital (D# - not physical) pin for SPI Slave Select; connects to CS* of the slave device
const int clkPin= 3; // digital (D#) pin for SPI Clock; connects to SCK of the slave device
const int mosiPin= 4; // digital (D#) pin for SPI Master Out Slave In; connects to SDI of the slave device
const int pwmPin= A0; // (D# or A#, depending on the method) pin for capturing the incoming PWM signal
const int relayPin= 9; // digital (D#) pin to control the relay supplying power to the spindle motor; active HIGH
const int halfT= 500; // half clock period [us]; sets the SPI clock frequency calculated as 500/halfT [kHz]
const int idleT= 200; // idle time [ms] between successive read-and-transmit operations
const int writeCmd= 0; // command byte to write date to the slave device; 0 according to the 41XX datasheet
const int speedStep= 5; // maximum change of speed per execution cycle; allowable values 1-127
const int minSpeed= 20; // minimum spindle speed in 7-bit range (0-127); motor starts only if speed command is higher
const int method= 1; // method used to read incoming PWM: 1=readAnalog, 2=pulseIn (default)

/***** setup()
* Configure the uC and run initialisation operations.
*****/

void setup() {
  pinMode(slctPin, OUTPUT); // configure the SS (Slave Select) pin as output
  pinMode(clkPin, OUTPUT); // configure the CLK (Clock) pin as output
  pinMode(mosiPin, OUTPUT); // configure the MOSI (Master Out Slave In) pin as output
  digitalWrite(slctPin, HIGH); // initialise the SS pin HIGH so that the 41xx slave device is disabled at startup
  pinMode(relayPin, OUTPUT); // configure the relay pin as output
  digitalWrite(relayPin, LOW); // initialise the relay pin so that the spindle motor is off at startup
  pinMode(pwmPin, INPUT); // configure the pin receiving the PWM signal as input
  Serial.begin(9600); // start communication over the serial port (for debugging)
}

/***** main loop
* Execute repeatedly in a loop.
*****/

void loop () {
  /* define static and non-static local variables */
  static int speedCommand= 0; // most recent output sent to the potentiometer, initially zero
  static boolean relayNow= LOW; // most recent state (on or off) of the relay; initially off
  static unsigned long previousMillis = millis(); // most recent time in [ms], initialised at start
  int analogIn; // current incoming PWM reading
  int speedDelta; // difference between incoming and outgoing speed command
  /* Capture and rescale incoming PWM data */
  analogIn= readPWM(pwmPin, method); // read the duty cycle of the incoming PWM signal (10-bit range)
  analogIn= map(analogIn, 0, 1023, 0, 127); // scale down the value from the 10-bit to the 7-bit range
  /* Check against underspeed and set the relay accordingly */
  relayNow= checkSpeed(analogIn, minSpeed); // check whether the speed is below the underpeed limit
  digitalWrite(relayPin, relayNow); // apply the resulting state to the pin that controls the relay
  /* Constrain acceleration to the acceptable rate, and transmit the new speed to the potentiometer */
  speedDelta= analogIn-speedCommand; // calculate difference between incoming and actual speed command
  if (abs(speedDelta) > speedStep) { // if the absolute difference exceeds the max step allowed...
    speedCommand += signum(speedDelta) * speedStep; // increase or decrease the actual speed by one step only
  }
  else{ // otherwise, if the distance is less than or equal to the max step...
    speedCommand = analogIn; // set the speed equal to the incoming command
  }
  spiOut(slctPin, clkPin, mosiPin, writeCmd, speedCommand); // set the wiper of the 4131 pot to the new position
  /* Display values on the serial monitor for debugging (comment out if not required) */
  Serial.print(" Relay= ");
  Serial.print(relayNow);

```

```

Serial.print(" deltaT= ");
Serial.print(millis()-previousMillis);
previousMillis= millis();
Serial.print(" PWM= ");
Serial.print(analogIn);
Serial.print(" Speed= ");
Serial.println(speedCommand);
/* Take a short break before repeating the operation */
delay(idleT);
}
/***** spiTransfer()
* Transfers a single byte to the slave device, over the MOSI and CLK lines of the SPI link. Changes
* state of two GPIO pins, identified through global constants mosiPin and clkPin. Assumes that the
* slave device is activated (by dropping the SS line) before and during the transmission.
* Arguments:
* clkPin sets the pin for the SPI Clock signal.
* mosiPin sets the pin for the SPI Master-Out-Slave-In signal.
* outByte contains the byte to be transfered.
* Returns: none.
*****/
void spiTransfer(const int clkPin, const int mosiPin, byte outByte) {
for(int i= 0; i<8; i++) { // iterate through the eight bits of the byte to be sent
digitalWrite(mosiPin, (outByte & B10000000)); // apply the Most Significant Bit (leftmost) on the MOSI line;
delayMicroseconds(halfT); // wait for half a clock period
digitalWrite(clkPin, HIGH); // set clock high to signal availability of data to the slave device
delayMicroseconds(halfT); // wait for another half a clock period
digitalWrite(clkPin, LOW); // set clock low to prepare for next tick (i.e. the next transfer cycle)
outByte= outByte<<1; // shift outgoing bits one position to the left, prepare for next bit to be sent
}
digitalWrite(mosiPin, LOW); // return the MOSI line to LOW state once transmission of the byte is completed
}

/***** spiOut()
* Sends a message (Command+Data) to the 4131 device over SPI. Enables the slave device, using the SS* line of the
SPI protocol and calls the function spiTransfer() to do the actual transfer of a command byte and of a data byte, according
to the 4131 specification.
* Arguments:
* selPin sets the pin for the SPI Slave Select signal.
* clkPin sets the pin for the SPI Clock signal.
* mosiPin sets the pin for the SPI Master Out Slave In signal.
* cmdByte contains a single-byte command to be sent to the 4131 slave device.
* databyte contains one byte of data to be send to the 4131 slave device.
* Returns: none.
*****/
void spiOut(const int selPin, const int clkPin, const int mosiPin, const byte cmdByte, const byte dataByte) {
digitalWrite (selPin, LOW); // set slave-select line low to enable connection to the slave device
spiTransfer(clkPin, mosiPin, cmdByte);// transfer the command byte (requested pot action) over the SPI link
spiTransfer(clkPin, mosiPin,dataByte);// transfer the data (pot wiper position) byte over the SPI link
digitalWrite(selPin, HIGH); // set slave select high to disable connection to the 41xx slave device
delayMicroseconds(10*halfT>16383? 16383 : 10*halfT); // wait for 5 SPI clock periods or, if exceeded, for the...
// maximum time allowed by the delayMicroseconds() function
}

/***** checkSpeed()
* Checks against underspeeding the spindle. Switches on or off the relay that supplies
* power, depending on the value of the speed command reative to a pre-specified speed
* limit. Introduces a 15% hysteresis band, in order to avoid jitter.
* Arguments:
* speedCommand is the current command for spindle speed, in the 0-127 range.
* speedLimit is the lowest allowed speed before the motor is cut off, expressed in the
* 0-127 range; typical values are 15-20.
* Returns: none.
*****/

```

```

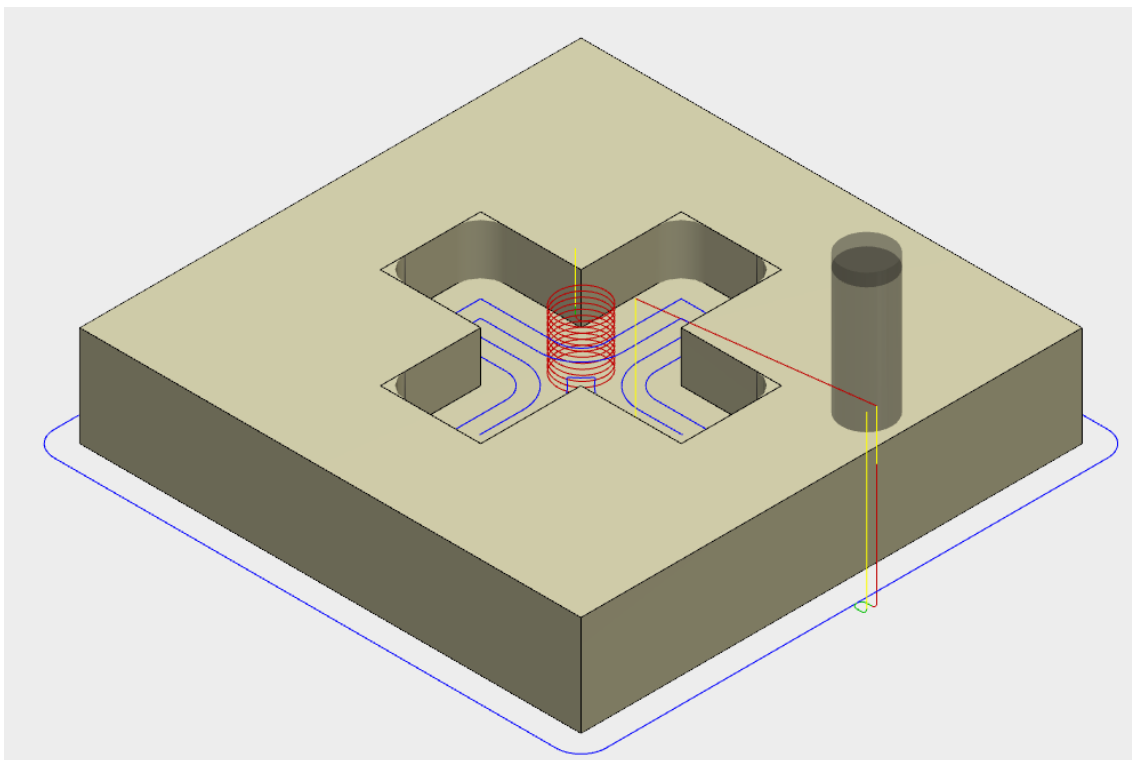
int checkSpeed(const int speedCommand, const int speedLimit){
    static boolean relayState= LOW;    // variable to store the most recent state of the relay, initially off
    const int band= min(speedLimit/7, 5); // define the hysteresis band at approx. 15% of the limit, but no less than 5
    switch (relayState) {
        // examine next move, depending on the current state of the relay
        case HIGH: {
            // if the relay is on, check if speed command is less than limit
            relayState= (speedCommand<speedLimit)? LOW : relayState;    // in which case, switch the relay off
            break;
        }
        case LOW: {
            // if the relay is off, check if speed is above limit+band
            relayState= (speedCommand>speedLimit+band)? HIGH : relayState; // in which case, switch the relay on
            break;
        }
    }
    return relayState;    // pass the resulting state of the relay to the caller programme
}

/***** readPWM()
* Calculates the approximate duty cycle (percentage) of an incoming PWM signal, using the selected
* sensing method. Method 1 uses the standard Arduino A2D conversion implemented with the function
* digitalRead(). Method 2 uses the function pulseIn() to measure the duration of the HIGH and LOW
* pulses in the PWM signal.
* Arguments:
* pin is the number of the pin on which to read the PWM signal.
* method sets the sensing method as above.
* Returns: an integer within the 10-bit range (0-1023).
*****/
int readPWM(int const pin, int const method){
    int reading;    // variable to store the return value
    switch (method) {
        // select the method to apply for reading the PWM signal
        case 1:
            // if the first method is selected,
            reading= analogRead(pin);    // acquire and convert the voltage applied to the analog pin
            break;
        default:
            // if the second method is selected, or by default
            int const timeOut= 5000;    // time [us] after which the pulseIn function is forced to return
            int xState;    // variable to store the most recent state of the pin
            int xHi = pulseIn(pin, HIGH, timeOut); // measure the duration of the ON pulse [us]
            xState=digitalRead(pin);    // read the state of the pin just after pulseIn() returns
            xHi = (xHi) ? xHi : xState*timeOut;    // check whether zero result means full OFF or full ON
            int xLo = pulseIn(pin, LOW, timeOut); // measure the duration of the OFF pulse [us]
            xState=!digitalRead(pin);    // read the state of the pin just after pulseIn() returns
            xLo = (xLo) ? xLo : xState*timeOut;    // check whether zero result means full ON or full OFF
            int xTot = xHi+xLo;    // calculate the total duration (PWM period)
            reading= map(xHi, 0, xTot, 0, 1023);    // scale to the 10-bit range, to simulate the return of analogRead()
            break;
    }
    return reading;    // pass the result of the conversion to the caller programme
}

/***** signum()
* Calculates the sign of an integer value.
* Arguments:
* x is a (signed) integer value.
* Returns: 0 if x is zero, 1 if x is positive, -1 if x is negative.
*****/
int signum(const int x){
    int s;    // stores intermediate result
    if (x){
        // if x is not zero...
        s= (x>0)? 1 : -1;    // find its sign and return 1 for positive or -1 for negative values
    }
    else {
        // otherwise...
        s= 0;    // return 0
    }
    return s;
}

```


8.5 G Κώδικας Δοκιμής



Εικόνα 8.3 Μοντέλο δοκιμής

Χρησιμοποιείται κονδύλι διαμέτρου 10 mm και ύψους 20mm για την προσομοίωση.

```
%  
(1001)  
(test)  
(T4 D=10 CR=0 - ZMIN=-20 - flat end mill)  
G90 G94  
G17  
G21  
  
(2D Pocket2)  
M9  
S3000 M3  
G54  
M9  
G0 X50.756 Y48.15  
Z15  
Z5  
G1 Z3.499 F4610  
G3 X50.786 Y48.171 Z3.234 I-2.767 J3.861  
X50.87 Y48.234 Z2.987 I-2.796 J3.84  
X51.001 Y48.338 Z2.777 I-2.881 J3.777
```

X51.166 Y48.479 Z2.619 I-3.012 J3.673
X51.348 Y48.652 Z2.525 I-3.177 J3.532
X51.479 Y48.788 Z2.5 I-3.359 J3.359
X44.5 Y55.234 Z1.979 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z1.458 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z0.937 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z0.416 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-0.106 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-0.627 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-1.148 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-1.669 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-2.19 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-2.711 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-3.232 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-3.753 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-4.274 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-4.796 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-5.317 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-5.838 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-6.359 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-6.88 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-7.401 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-7.922 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-8.443 I-3.489 J3.223
X51.479 Y48.788 Z-8.964 I3.489 J-3.223
X44.5 Y55.234 Z-9.485 I-3.489 J3.223
X51.348 Y48.652 Z-10 I3.489 J-3.223
G2 X52.698 Y49.818 I8.652 J-8.652
G3 Y50.182 I-0.136 J0.182
G2 X50.189 Y52.689 I7.302 J9.818
G3 X49.811 I-0.189 J-0.141
G2 X47.311 Y50.189 I-9.811 J7.311
G3 Y49.811 I0.141 J-0.189
G2 X49.818 Y47.302 I-7.311 J-9.811
G3 X50.182 I0.182 J0.136
G2 X51.348 Y48.652 I9.818 J-7.302
X55.278 Y49.18 I2.311 J-2.311
G3 X59.158 Y48.358 I3.226 J5.658
G2 X60 Y48.4 I0.842 J-8.358
G1 X71.326 Y48.355
G3 X71.645 Y48.674 J0.319
G1 Y51.326
G3 X71.326 Y51.645 I-0.319
G1 X60 Y51.6
G2 X51.6 Y60 J8.4
G1 X51.645 Y71.326

G3 X51.326 Y71.645 I-0.319
G1 X48.674
G3 X48.355 Y71.326 J-0.319
G1 X48.4 Y60
G2 X40 Y51.6 I-8.4
G1 X28.67 Y51.645
G3 X28.355 Y51.33 J-0.315
G1 Y48.674
G3 X28.674 Y48.355 I0.319
G1 X40 Y48.4
G2 X48.4 Y40 J-8.4
G1 X48.355 Y28.674
G3 X48.674 Y28.355 I0.319
G1 X51.326
G3 X51.645 Y28.674 J0.319
G1 X51.6 Y40
G2 X59.158 Y48.358 I8.4
X61.92 Y46.747 I0.273 J-2.706
G3 X64.598 Y45 I2.678 J1.179
G1 X75
Y55
X60
G2 X55 Y60 J5
G1 Y75
X45
Y60
G2 X40 Y55 I-5
G1 X25
Y45
X40
G2 X45 Y40 J-5
G1 Y25
X55
Y40
G2 X60 Y45 I5
G1 X64.598
G3 X64.854 Y45.033 Z-9.966 J1
X65.077 Y45.122 Z-9.866 I-0.256 J0.967
X65.247 Y45.24 Z-9.707 I-0.479 J0.878
X65.36 Y45.352 Z-9.5 I-0.65 J0.76
X65.42 Y45.431 Z-9.259 I-0.762 J0.648
X65.439 Y45.46 Z-9 I-0.823 J0.569
G0 Z15

(2D Contour1)

M9

Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ.

X108 Y51
Z15
Z5
G1 Z1 F30
Z-19
G18 G3 X107 Z-20 I-1
G1 X106 F4610
G17 G3 X105 Y50 J-1
G1 Y0
G2 X100 Y-5 I-5
G1 X0
G2 X-5 Y0 J5
G1 Y100
G2 X0 Y105 I5
G1 X100
G2 X105 Y100 J-5
G1 Y50
G3 X106 Y49 I1
G1 X107
G18 G2 X108 Z-19 K1
G0 Z15
G17
M9
M30
%