



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

***Έλεγχος βιομηχανικής πηγής laser CO₂ με χρήση
ανοικτής πλατφόρμας λογισμικού***

Ζουμπούλης Γ. Παναγιώτης

Επιβλέπων: Δρ. Γεώργιος - Χριστόφορος Βοσνιάκος, καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2020

.....
Παναγιώτης Γ. Ζουμπούλης

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Γ. Ζουμπούλης, 2020

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

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία σημαίνει την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Συστήματα Αυτοματισμού» που συντονίζεται από τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Αποτελεί συνέχεια της διπλωματικής μου εργασίας, η ολοκλήρωση της οποίας προ τριετίας μου απέδωσε τον τίτλο του διπλωματούχου Μηχανικού ΕΜΠ και έχει ως αντικείμενο την αποκατάσταση της λειτουργίας και τον εκμοντερνισμό του συστήματος ελέγχου μιας βιομηχανικής πηγής laser αερίου, η οποία στεγάζεται στους χώρους του εργαστηρίου κατεργασιών υψηλής ακρίβειας του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Αποτελεί ένα έργο αρκετά πρακτικής φύσεως, το οποίο δίνει την ευκαιρία, τόσο στο συγγραφέα, όσο και στον αναγνώστη να εμβαθύνει στην ανατομία και τις εφαρμογές των βιομηχανικών laser και των υποσυστημάτων τους. Με την δε ολοκλήρωσή του δύναται να προσδώσει γνώσεις, αλλά και πληθώρα δυνατοτήτων στον Τομέα για επέκταση της ερευνητικής του δραστηριότητας, προσθέτοντας στο δυναμικό του ένα νέο λειτουργικό εργαλείο το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί σε πλήθος εφαρμογών.

Δράττομαι της ευκαιρίας να αποδώσω τις απαραίτητες ευχαριστίες σε όλους όσους συνετέλεσαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας:

Κατ' αρχάς οφείλω τις μεγαλύτερες ευχαριστίες στον Δρ. Γ.Χ. Βοσνιάκο, καθηγητή της Σχολής και επιβλέποντα της εργασίας αυτής, τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε για την ενασχόληση με το συγκεκριμένο θέμα, όσο και για τη συνεχή υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου απέναντι σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου, τον Κωνσταντίνο Κερασιώτη, το Νικόλαο Μελισσά, καθώς και τους Υ.Δ. Αβράμιο Παναγιώτη και Γεώργιο Παπαζέτη για τη συνεχή βοήθειά τους.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο και συνεργάτη Ιωάννη Βλέσσα, ο οποίος έδωσε λύσεις σε κρίσιμα προβλήματα που αφορούσαν την εργασία άμεσα και αφιλοκερδώς.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου που με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και εξακολουθεί να με στηρίζει.

Περίληψη

Στη μεταπτυχιακή αυτή εργασία θα παρουσιαστεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε με στόχο την αποκατάσταση και τον εκμοντερνισμό του συστήματος ελέγχου της πηγής της δέσμης ενός παλαιού κέντρου κατεργασιών laser. Η εργαλειομηχανή ανήκει και βρίσκεται στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών, έχοντας δωρισθεί από τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών εν έτη 2010.

Σε προηγούμενη εργασία είχε σχεδιαστεί η προσαρμογή ενός πιο σύγχρονου ελεγκτή στο ψηφιακά καθοδηγούμενο σύστημα κίνησης της τράπεζας της εργαλειομηχανής χρησιμοποιώντας λογισμικό LinuxCNC (πρώην Enhanced Machine Controller, ή EMC2). Το LinuxCNC είναι ευρέως διαδεδομένο ανοικτό λογισμικό ελέγχου εργαλειομηχανών που προσαρμόζεται σε διαφορετικές διατάξεις εργαλειομηχανών, εφόσον ο προγραμματιστής γνωρίζει τις παραμέτρους (λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά) του συστήματός του, χωρίς επιπλέον κόστος παρά μόνο για την αγορά καρτών διεπαφής με Η/Υ από τον οποίο θα πραγματοποιείται ο χειρισμός. Στην παρούσα διατριβή μελετάται η διεπαφή της ίδιας της πηγής της δέσμης του laser στην ελεγχόμενη μέσω LinuxCNC διάταξη του κέντρου κατεργασίας με στόχο την επίτευξη της ενσωμάτωσης του ελέγχου της δέσμης σε ενιαίο ελεγκτή.

Στο πλαίσιο της εργασίας, καθορίστηκαν και καταγράφηκαν επιπλέον οι απαραίτητες ενέργειες για την επαναφορά της πηγής σε λειτουργία. Καθαρισμός εξαρτημάτων και οπτικών κοιλοτήτων, όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο, αντικατάσταση σωληνώσεων, επικαιροποίηση ηλεκτρικών συνδέσεων και τροφοδοσία της πηγής με ηλεκτρική ενέργεια και παροχή νερού. Η πραγματοποίησή τους, ωστόσο δεν κατέστη δυνατή εντός του χρονικού πλαισίου περάτωσης της παρούσας εργασίας εξ αιτίας της έξαρσης της πανδημίας του ιού SARS-CoV-2.

Abstract

This post graduate thesis presents the process followed in order to achieve the refurbishment and modernization of the laser source of an outdated industrial laser machining center. The machine is property of and located at the laboratory of Manufacturing Technology at the School of Mechanical Engineering, given from the School of Naval Engineering since 2010.

During previous work, the adaptation of a modern controller had been designed for the numerically controlled motion system using LinuxCNC software (previously Enhanced Machine Controller, or EMC2) which is a widely used open software for controlling manufacturing machines that can fit in any machine, provided that the user knows the parameters (functioning and geometric characteristics) of the system in check, without adding costs to the process except the ones necessary to buy interface cards to connect with the controlling computer. This thesis studies the interface between the laser source itself and the LinuxCNC-controlled setup of the machining center in order to implement control the beam under a single controller.

Additionally, all necessary operations were identified on the source in order to regain its functionality. Parts and optical cavity cleanup, wherever needed, tubing replacement, electrical connections updates, electricity and water supply to the source. Performing, however, the above operations was not made possible, within the set timeline for the completion of this thesis, due to the outbreak of the global pandemic of the virus SARS-CoV-2.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| Πρόλογος..... | 5 |
| Περίληψη | 7 |
| Abstract..... | 9 |
| 1. Εισαγωγή..... | 13 |
| 1.1 Διατύπωση του προβλήματος..... | 14 |
| 1.2 Σημασία της επίλυσης του προβλήματος | 15 |
| 1.3 Σχετική έρευνα..... | 16 |
| 1.4 Σύνοψη μεταπτυχιακής εργασίας..... | 19 |
| 2. Τεχνολογία Laser στη βιομηχανία | 21 |
| 2.1 Αρχές λειτουργίας Laser..... | 21 |
| 2.2 Βασικά είδη Laser..... | 23 |
| 2.3 Εφαρμογές δέσμης Laser στη βιομηχανική παραγωγή..... | 26 |
| 2.3.1 Μετρολογία εργαλειομηχανών | 26 |
| 2.3.2 Κατεργασία υλικών..... | 31 |
| 3. Το Κέντρο Κατεργασιών Laser CO₂ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών | 41 |
| 3.1 Βάση Μηχανικού Κέντρου Κατεργασίας & Τραπεζί CNC 3 αξόνων | 43 |
| 3.2 Σύστημα κίνησης κεφαλής εστίασης..... | 44 |
| 3.3 Μονάδες οδήγησης σερβοκινητήρων..... | 44 |
| 3.4 Μονάδα ελέγχου κέντρου κατεργασίας..... | 46 |
| 3.5 Πηγή δέσμης Laser CO ₂ | 49 |
| 3.5.1 Οπτικός ταλαντωτής..... | 51 |
| 3.5.2 Σύστημα ανάμιξης και κυκλοφορίας αερίων..... | 54 |
| 3.5.3 Τροφοδοσία ισχύος υψηλής τάσης..... | 56 |
| 3.5.4 Η/Υ ελέγχου της μονάδας του Laser..... | 57 |
| 3.5.5 Κλείστρο ελέγχου ροής δέσμης..... | 59 |
| 3.5.6 Εξωτερική μονάδα ψύξης νερού | 60 |
| 4. LinuxCNC..... | 63 |
| 4.1 Εισαγωγή..... | 63 |
| 4.2 Η Δομή και το Περιβάλλον λειτουργίας του LinuxCNC..... | 66 |

| | |
|---|------------|
| 4.3 Διεπαφή μέσω ηλεκτρονικών καρτών της Mesa Electronics | 70 |
| 4.4 Προσαρμογή του LinuxCNC στην εργαλειομηχανή Laser | 72 |
| 5. Εργασίες αποκατάστασης του Κέντρου Κατεργασιών..... | 74 |
| 5.1 Εργασίες αποκατάστασης της μηχανικής τράπεζας CNC..... | 74 |
| 5.1.1 Εγκατάσταση και διασύνδεση καρτών Mesa | 74 |
| 5.1.2 Ρύθμιση παραμέτρων ελέγχου κίνησης αξόνων..... | 76 |
| 5.1.3 Επισκευή συστήματος κίνησης της κεφαλής εστίασης | 83 |
| 5.2 Εργασίες αποκατάστασης της πηγής του Laser | 87 |
| 5.2.1 Επισκευή Η/Υ ελέγχου πηγής | 87 |
| 5.2.2 Έλεγχος, αποκατάσταση βλαβών και διασύνδεση της πηγής..... | 90 |
| 6. Διασύνδεση και Έλεγχος της δέσμης μέσω LinuxCNC..... | 92 |
| 6.1 Συνδεσμολογία διασύνδεσης της πηγής με το Σύστημα Ελέγχου..... | 92 |
| 6.2 Προγραμματισμός ελέγχου της έντασης της συνεχούς δέσμης..... | 95 |
| 6.3 Προγραμματισμός ελέγχου των χαρακτηριστικών της παλμικής δέσμης | 98 |
| 7. Δοκιμές και Αποτελέσματα..... | 99 |
| 7.1 Δοκιμές ελέγχου της πηγής του Laser | 99 |
| 7.1.1 Δοκιμή ON-OFF του κλείστρου της πηγής..... | 99 |
| 7.1.2 Δοκιμή εφαρμογής ελέγχου της έντασης της δέσμης | 100 |
| 7.1.3 Συνδυαστική δοκιμή ελέγχου της δέσμης και κίνησης της τράπεζας..... | 101 |
| 8. Προμελέτη προσαρμογής του κέντρου κατεργασιών Laser για κατεργασία πρόσθεσης υλικού | 102 |
| 8.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση..... | 102 |
| 8.2 Προτάσεις σχεδιασμού συστημάτων προσθετικής κατεργασίας..... | 113 |
| 9. Συμπεράσματα..... | 119 |
| 9.1 Συμπεράσματα | 119 |
| 9.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία..... | 119 |
| Βιβλιογραφία..... | 121 |
| Επιπλέον πηγές | 124 |
| Παράρτημα – Αρχεία Ρύθμισης LinuxCNC (Configuration Files)..... | 125 |

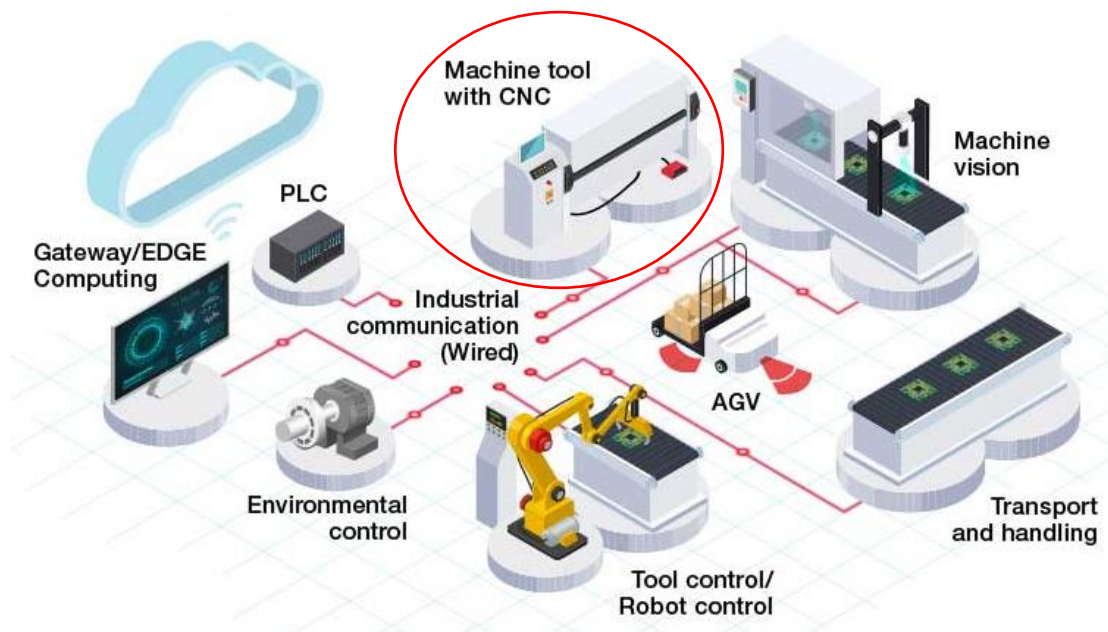
1. Εισαγωγή

Οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου κάνουν την εμφάνισή τους για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1940, όταν ο μηχανουργός John. T. Parsons στην προσπάθειά του να παράξει με μεγάλη ακρίβεια μεταλλικά πτερύγια για τα πολεμικά ελικόπτερα των ΗΠΑ χρησιμοποίησε μια, καινοτόμα για την εποχή μέθοδο καθοδήγησης εργαλείων κοπής με διάτρητες κάρτες. Οι ταινίες ανάγνωσης των καρτών οδηγούσαν το κοπτικό εργαλείο σε 200 διακριτά σημεία με στόχο την προσέγγιση της επιθυμητής τελικής γεωμετρίας της πτερύγωσης επιτυγχάνοντας πρωτοποριακή κατ' επανάληψιν ακρίβεια για τα δεδομένα της εποχής. Οι δεκαετίες που ακολούθησαν μετά τη λήξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, έχοντας ως κύριο χαρακτηριστικό τους την κατακόρυφη πτώση των τιμών των υπολογιστικών συστημάτων και την εμφάνιση των μικροελεγκτών και μικροεπεξεργαστών στην αγορά οδήγησαν σε ραγδαία ανάπτυξη των αυτοματισμών στην παραγωγή, καθιερώνοντας τις επονομαζόμενες εργαλειομηχανές CNC (Computer Numerical Controlled Machine Tools) ως στυλοβάτες της βιομηχανίας.

Η χρήση δέσμης laser για κατεργασία υλικών ξεκινά το 1965 στα εργαστήρια Bell, με πρωτοστάτη τον ηλεκτρολόγο μηχανικό Kumar Patel. Η πρώτη αυτή χρήση περιορίζεται στη διάνοιξη οπών σε εργαλεία διαμόρφωσης τα οποία ήταν κατασκευασμένα από διαμάντι, υλικό σκληρό, ανθεκτικό και ιδιαίτερα δυσκατέργαστο. Τα χρόνια που ακολουθούν, σε συνδυασμό με την ραγδαία διάδοση των συστημάτων αριθμητικού ελέγχου εντάσσουν τα συστήματα laser δυναμικά στον τομέα των κατεργασιών των υλικών, επιτυγχάνοντας κατεργασίες κοπής, διάτρησης, συγκόλλησης, καθώς και αρκετές άλλες, με μεγάλη ακρίβεια, και με πλεονεκτήματα που οι συμβατικές μέθοδοι αδυνατούν να επιλύσουν.

Κεφάλαιο υψίστης σημασίας για τα κέντρα κατεργασίας αριθμητικού ελέγχου αποτελεί η προσβασιμότητα του χρήστη στην αρχιτεκτονική του ελεγκτή και η δυνατότητα τροποποίησης μιας υπάρχουσας διάταξης και προσαρμογής της σε νέα δεδομένα λειτουργίας. Οι κατασκευαστές συστημάτων CNC εμπορεύονται μηχανήματα με πρωτόκολλα κλειστής αρχιτεκτονικής (closed architecture control). Αυτό σημαίνει πως οποιαδήποτε παρέμβαση στο υφιστάμενο σύστημα πέραν του κατασκευαστή καθίσταται αδύνατη. Ομοίως η διασύνδεση του συστήματος με υλικό και εξαρτήματα άλλων εταιριών, ή η συνεργασία της μηχανής με άλλες μέσα από ένα κοινό δίκτυο (φιλοσοφία Industry 4.0) παύουν να υφίστανται ως επιλογές αναγκάζοντας τις επιχειρήσεις να προβούν στην αντικατάσταση παλαιότερων μηχανημάτων, αυξάνοντας

έτσι τόσο το κόστος λειτουργίας, όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που η συχνή αλλαγή εξοπλισμού επιβάλλει.



Εικόνα 1: Ο ρόλος των εργαλειομηχανών CNC στο Industry 4.0

1.1 Διατύπωση του προβλήματος

Ο Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών των Υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου στεγάζει από το 2010 ένα βιομηχανικό κέντρο κατεργασίας laser CO₂, ονομαστικής ισχύος δέσμης 3kW, κατασκευασμένο από την εταιρία Laser Ecosse Ltd. το έτος 1994. Η αλλαγή κατόχων της εργαλειομηχανής και η πάροδος του χρόνου την οδήγησαν σε αδράνεια πολλών ετών, διότι το αρχικό σύστημα ελέγχου, το οποίο βασιζόταν σε PLC (Programmable Logic Controller) υπέστη πλήρη διαγραφή εξ αιτίας της παλαιότητας της εσωτερικής μπαταρίας του PLC. Η Laser Ecosse Ltd. ως εταιρία είχε πάψει να υφίσταται από το 2000 και η υποστήριξη για την ανάκτηση του προγράμματος του PLC αποδείχθηκε μηδενική. Το 2017 στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του συγγραφέα της παρούσας διατριβής επετεύχθη η διασύνδεση του συστήματος κίνησης της τράπεζας CNC της εργαλειομηχανής με νέο ελεγκτή, ανοικτής αρχιτεκτονικής (open architecture controller) χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα LinuxCNC. Η διασύνδεση αυτή επέτρεψε την πλήρη επαναλειτουργία της τράπεζας προσδίδοντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα του ανοικτού κώδικα στο κέντρο, δηλαδή την ευελιξία στην τροποποίηση και διασύνδεση των μερών του με νέο υλικό. Ωστόσο, η εργαλειομηχανή στο σύνολό της παραμένει μη-

λειτουργική, καθώς το εξίσου βασικό κομμάτι της, η πηγή της δέσμης του laser παρέμενε μη-συνδεδεμένη με το νέο ελεγκτή.

Στη διατριβή αυτή παρουσιάζεται η προσπάθεια αποκατάστασης της πηγής του laser, μετά από πολυετή αδράνεια και η διασύνδεσή της με το κεντρικό σύστημα ελέγχου που προσαρμόστηκε πριν από 3 χρόνια στο κέντρο κατεργασιών. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική αναφορά στις ενέργειες που μεσολάβησαν μετά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας το 2017 για την ολοκλήρωση της υλοποίησης του ελεγκτή, οι οποίες κατά την παρουσίασή της δεν είχαν ολοκληρωθεί λόγω καθυστέρησης στην προμήθεια υλικών.

1.2 Σημασία της επίλυσης του προβλήματος

Με βάση τα παραπάνω εγείρεται το ερώτημα της χρησιμότητας της αποκατάστασης και ενσωμάτωσης της πηγής του laser στο υφιστάμενο σύστημα, έναντι της αντικατάστασής της με κάποιο νεότερο, πιο σύγχρονο εξάρτημα, με πιθανώς αρκετά μικρότερο αποτύπωμα στο χώρο του εργαστηρίου και μικρότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα δίνεται από το γεγονός ότι πρόκειται για μια πηγή δέσμης laser υψηλής ισχύος, 3000Watt. Απόκτηση ισοδύναμης πηγής από πλευράς ισχύος θα σήμαινε ένα υπέρογκο κόστος για το εργαστήριο, ενώ υπήρχε ήδη μια φαινομενικά λειτουργική εναλλακτική επιλογή ήδη στους χώρους του.

Επιπλέον, η συγκεκριμένη πηγή δέσμης laser, εξ αιτίας ακριβώς της παλαιότητάς της διακρίνεται από ένα βαθμό απλότητας και κατασκευαστικής διαφάνειας, έναντι νεότερων αντίστοιχων διατάξεων που επιτρέπει την εύκολη προσπέλαση της ανατομίας της και τον εντοπισμό των επιμέρους μελών της για καθαρά εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Η αποκατάσταση και η ενσωμάτωση της υφιστάμενης πηγής στο σύνολο του ελεγχόμενου μέσω LinuxCNC κέντρου κατεργασιών θα αποτελέσει σημαντική προσθήκη στις ήδη υπάρχουσες και εν λειτουργία εργαλειομηχανές του Τομέα.

Η χρήση ενός Laser CO₂ αυτού του επιπέδου ισχύος, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο μπορεί να δώσει τη δυνατότητα πραγματοποίησης πλήθους μη συμβατικών κατεργασιών, μερικές από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Κοπή – Χάραξη (cutting – engraving)
- Συγκόλληση (welding)

- Επίστρωση – Επιμετάλλωση (cladding)
- Προσθετική κατεργασία (additive manufacturing – 3d printing)

Η λειτουργία επομένως της πηγής του laser θα ενισχύσει σημαντικά το εκπαιδευτικό και ερευνητικό έργο του Τομέα. Η διασύνδεση και ο έλεγχός της μέσω μια πλατφόρμας ελέγχου ανοικτής αρχιτεκτονικής όπως το LinuxCNC θα επεκτείνει τις δυνατότητές της, προσφέροντας με πολύ χαμηλό κόστος την προσαρμόσιμη οδήγηση που απαιτείται ανά περίπτωση από τις παραπάνω διεργασίες, καθώς και τη δυνατότητα διασύνδεσης της πηγής με πιο σύνθετες διατάξεις (πχ. κάποιο έξυπνο ρομποτικό κύτταρο).

1.3 Σχετική έρευνα

Σε ό,τι αφορά τις δυνατότητες των laser αερίου, όσο και για τα οφέλη της χρήσης ανοικτών ελεγκτών πραγματοποιείται έρευνα σε πληθώρα εργαστηρίων ανά τον κόσμο. Η έρευνα για τις δυνατότητες των laser CO₂ υψηλής ισχύος (>1kW) στις κατεργασίες εστιάζει όχι τόσο στην κοπή των υλικών, όσο στις κατεργασίες ακριβείας και τις κατεργασίες με πρόσθεση υλικού. Όπως παρουσιάζεται στην ανασκόπηση των **Hyub Lee et al [1]** το 2017, η δυνατότητα επίτευξης της δέσμης υψηλής ισχύος σε συνδυασμό με μια ευνοϊκή σχέση μεταξύ του κόστους και της απλότητας κατασκευής μιας τέτοιας διάταξης, καθώς και της ισχύος της παραγόμενης δέσμης αποτελεί βασικό κριτήριο που προσδίδει ενδιαφέρον στη μελέτη και επιλογή των laser CO₂ στις κατεργασίες ακριβείας.

Ειδικότερα σε ό,τι αφορά τη χρήση laser αερίου για προσθετική κατεργασία (additive manufacturing):

Οι **Philip von Witzendorff et al [2]** το 2018 συνδυάζουν μια πηγή laser CO₂ ισχύος 120W με ένα σύστημα εξώθησης ινών γυαλιού χαλαζία (quartz glass) σε μια τράπεζα CNC. Η ενεργειακή πυκνότητα της εστιασμένης συνεχούς δέσμης επιτρέπει την τοπική θέρμανση του νήματος σε θερμοκρασίες άνω των 2000°C που απαιτούνται για την τήξη του. Επιλέγοντας κατάλληλα κατόπιν μελέτης ταχύτητες πρόωσης και εξώθησης, καθώς και ισχύ δέσμης επιτυγχάνουν συνεχή εναπόθεση τήγματος γυαλιού.

Αντίστοιχα οι **Vevers, Kromanis & Gerins [3]** το 2018 πραγματοποιούν μια σειρά πειραμάτων για τη μελέτη της απόδοσης laser CO₂ έναντι laser ινών (fiber) σε προσθετική κατεργασία τοπικής τήξης (SLM) για ανοξείδωτο χάλυβα 316L. Αν και τα αποτελέσματα δεν έδειξαν υπεροχή των laser αερίου έναντι σε αυτά των ινών, τα δοκίμια επέδειξαν γενικώς καλές ιδιότητες, τόσο ως προς την πυκνότητα, όσο και προς την

αντοχή σε εφελκυσμό. Επίσης προσδιορίστηκε η ανάγκη επανάληψης του πειράματος με μεγαλύτερη ισχύ δέσμης και μικρότερες εστιακές αποστάσεις.

Εκτός από τις κατεργασίες πρόσθεσης υλικού τα laser αερίου μελετώνται και για διεργασίες επιμετάλλωσης, συγκόλλησης, λείανσης, καθώς και για τη δημιουργία συγκεκριμένων υφών στις επιφάνειες δυσκατέργαστων υλικών.

Ο **Y.P Kathuria [4]** σε μια παλαιά του δημοσίευση (1997) χρησιμοποιεί δέσμη laser CO₂ ισχύος 5kW για την επιμετάλλωση ανοξείδωτου χάλυβα, καθώς και κράματος Cr-Ni με Στελλίτη (επισκληρυντική επίστρωση με βάση το κοβάλτιο). Τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής εστιάζουν στο γεγονός ότι μικρότεροι χρόνοι αλληλεπίδρασης της δέσμης με τη σκόνη και την επιφάνεια του υποστρώματος οδηγούν σε πυκνότερη και καλύτερα κατανεμημένη επίστρωση.

Οι **Viswanathan, Sastikumar, Kumar και Nath [5]** το 2008 επιχείρησαν να επικαλύψουν ένα υπόστρωμα ανοξείδωτου χάλυβα 316L με πυριτιούχο σίδηρο WC (Fe₅Si₃) κάνοντας χρήση ενός laser CO₂ ισχύος 2.0kW. Η επίστρωση του συγκεκριμένου υλικού αποσκοπούσε στην αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας του υποστρώματος και την αντοχή του σε φθορά. Η επιτυχία του πειράματος εξαρτήθηκε από τη σύσταση της σκόνης WC-Si-Ni που χρησιμοποιήθηκε και το τελικό αποτέλεσμα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικό σύμφωνα με τα συμπεράσματα της μελέτης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως οι Kumar και Nath από την παραπάνω ερευνητική συνεργασία είχαν ήδη μελετήσει τη χρήση laser CO₂ υψηλής ισχύος (3.5kW και 10kW) για την κατεργασία αφαίρεσης υλικού σε δομικό σκυρόδεμα το 2005 [6].

Οι **Satish R More et al [7]** το 2016 επιλέγουν μια πηγή δέσμης laser CO₂ ισχύος 3.5kW για τη μελέτη της επιμετάλλωσης ως μέθοδο αντιδιαβρωτικής προστασίας. Η μελέτη απαιτούσε δέσμες ισχύος μεγαλύτερης του 1.8KW με δυνατότητα αυξομείωσης, αναλόγως το υλικό της επίστρωσης με στόχο την τήξη της εκάστοτε σκόνης.

Οι **Singh et al [8]** το 2017 χρησιμοποιούν laser αερίου ισχύος δέσμης 4kW για την επικάλυψη δοκιμών ανοξείδωτου χάλυβα 316L με σκόνη χαλκού, δημιουργώντας ένα στρώμα χαλκού πάχους 3mm. Η μελέτη συγκρίνει τις ιδιότητες της επίστρωσης με χρήση laser με αυτή που επιτυγχάνεται με ψυχρό ψεκασμό της σκόνης. Η έρευνα απέδειξε ότι ενώ η ψυχρή επίστρωση προσδίδει στην επιφάνεια καλύτερη πυκνότητα, αντοχή και θερμική αγωγιμότητα, η χρήση της δέσμης παρήγαγε μια επικάλυψη πολύ καλύτερα προσκολλημένη στο υπόστρωμα, εξ αιτίας της τοπικής τήξης αυτού κατά τη θερμή διεργασία.

Ο προαναφερθείς P.Von Witzendorff το 2018 συμμετείχε σε μια ακόμη έρευνα με επί κεφαλής τον **K. Wesang [9]** όπου μια δέσμη laser CO₂ χαμηλής ισχύος, 35W δοκιμάστηκε και μελετήθηκε για τη λειτουργική επικάλυψη γυάλινων υποστρωμάτων με λεπτά υμένια στερεοποιημένου υδρολύματος γέλης (sol-gels) της τάξης του μισού μικρομέτρου (320 – 650nm) τα οποία περιείχαν τιτάνιο, ή ζirkόνιο. Η δέσμη παρείχε στο υδρόλυμα την απαραίτητη θερμότητα για τη σκλήρυνση και στερεοποίησή του, μειώνοντας δραστικά το κόστος έναντι άλλων κοινώς χρησιμοποιούμενων μεθόδων επίστρωσης (CVD, PVD). Στο πλαίσιο της έρευνας επιτεύχθηκαν μονές και τριπλές επιστρωματώσεις και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι (ισχύς δέσμης, ταχύτητα σάρωσης) αναλόγως του υλικού επικάλυψης.

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό από τα παραπάνω ένα μεγάλο ποσοστό της έρευνας εστιάζει περισσότερο στις εφαρμογές επιμετάλλωσης και γενικότερα επιφανειακής επίστρωσης υλικών και εν γένει πρόσθεσης υλικού. Ωστόσο έχουν διεξαχθεί μελέτες, όπως αυτή των Kumar και Nath [6] που αφορούν κατεργασίες αφαίρεσης υλικού και διαμόρφωσης σε πληθώρα υλικών:

Το 2010 οι **Ukar et al [10]** χρησιμοποίησαν laser CO₂ ισχύος 2500W για τη λείανση επιφάνειας εργαλειοχάλυβα. Η μαρτενσιτική δομή της επιφάνειας και συνεπώς η σκληρότητα του υλικού καθιστούν τη συμβατική λείανση δυσεπίτευκτη. Ωστόσο θερμή κατεργασία μέσω της δέσμης έδωσε θετικά αποτελέσματα μειώνοντας κατά 91% τη μέση τραχύτητα επιφανείας του δοκιμίου, επιτυγχάνοντας μέση τραχύτητα μικρότερη από 0.5μm.

Οι **AgnelD'Souza et al [11]** από το εργαστήριο Μηχανοτρονικής και Οργάνων του Διεθνούς ινστιτούτου τεχνολογίας της Ινδώρας στην Ινδία, το 2015 μελέτησαν την εφαρμογή laser αερίου για την κάμψη ελασμάτων σιδήρου FE-410 μέσω συνεχόμενων πάσων δέσμης 2600-3000W. Αν και η κάμψη πραγματοποιήθηκε επιτυχώς χωρίς παρουσία τηγμένου υλικού, ο σχηματισμός μπαινιτικής δομής λόγω ανόπτησης επηρέασε τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Παράλληλα για την πρόβλεψη την γωνίας κάμψης του υλικού απαιτήθηκε η επιστράτευση τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Οι **Zhao, Cheng et al [12]** σε πρόσφατή τους μελέτη το 2019 διερεύνησαν την αφαίρεση υλικού από φακούς τήγματος διοξειδίου του πυριτίου κάνοντας χρήση laser διοξειδίου του άνθρακα υψηλής ισχύος με παλμική δέσμη διάρκειας παλμού 250ns. Η μελέτη εστίαζε στη μείωση των θερμικών φαινομένων, η οποία προκαλεί σημαντική φθορά στα οπτικά. Η χρήση του παλμού έδωσε θετικά αποτελέσματα με ικανοποιητικό ρυθμό αφαίρεσης υλικού.

Οι **Wu, Ke και Wang [13]** το 2019 επιστράτευσαν δέσμη laser CO₂ ισχύος 100W για τη διάνοιξη καναλιών σε μικροροϊκά τσιπ από PMMA, καθώς τα μη μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη απορροφητικότητα στην ακτινοβολία του μήκους κύματος αυτού του είδους δέσμης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης έδειξαν ότι μπορούν να επιτευχθούν εύκολα και με ικανοποιητική ποιότητα οι επιθυμητές δομές για διάφορα προφίλ καναλιών.

Οι **Hao Nan Li et al [14]** στις αρχές του 2020 δημοσίευσαν τη μελέτη τους για την επιφανειακή κατεργασία αδαμάντινων εργαλείων λείανσης με συνεχή δέσμη 60W. Τα αποτελέσματα της μελέτης σε συνδυασμό με την υψηλή αποδοτικότητα και το χαμηλό κόστος χρήσης του laser, καθώς και η συμβατότητα του μήκους κύματος με το υλικό κατεργασίας καθιστούν τη χρήση laser για τη δημιουργία υφών σε λειαντικά εργαλεία από διαμάντι αποτελεσματική μέθοδο.

1.4 Σύνοψη μεταπτυχιακής εργασίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά την Περίληψη η παρούσα μελέτη αφορά την αποκατάσταση και την απόπειρα ελέγχου της βιομηχανικής πηγής laser CO₂ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών με το ανοικτό λογισμικό ψηφιακής καθοδήγησης LinuxCNC. Η επιτυχής ολοκλήρωση της εργασίας θα σημάνει την ολοκλήρωση ενός κύκλου εργασιών διάρκειας 5 ετών και αναμένεται να εξοπλίσει το εργαστήριο με ένα ισχυρό ερευνητικό εργαλείο. Η δομή της διατριβής έχει αναλυτικότερα ως εξής:

Κεφάλαιο 2 – Τεχνολογία laser στη βιομηχανία: Αναλύονται πρωτίστως οι αρχές λειτουργίας των βιομηχανικών Laser και οι εφαρμογές τους στην παραγωγή και τις κατεργασίες.

Κεφάλαιο 3 – Το κέντρο κατεργασιών Laser CO₂ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών: Παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη που μελετάται από την παρούσα διατριβή και εξετάζεται η ανατομία της και τα προβλήματα τα οποία κατέστησαν αναγκαία την αποκατάστασή της.

Κεφάλαιο 4 – LinuxCNC: Περιγραφή και ανάπτυξη του ανοικτού λογισμικού ψηφιακής καθοδήγησης LinuxCNC, των δυνατοτήτων του και της βασικής αρχιτεκτονικής του.

Κεφάλαιο 5 – Εργασίες αποκατάστασης του κέντρου κατεργασιών: Αναλυτική παρουσίαση των εργασιών που έλαβαν χώρα για την επαναλειτουργία του κέντρου

κατεργασίας και της πηγής του Laser. Επισκευές, καθαρισμός και αντικατάσταση εξαρτημάτων, είναι κάποιες από αυτές ενδεικτικά.

Κεφάλαιο 6 – Διασύνδεση και Έλεγχος της δέσμης του laser μέσω LinuxCNC:

Περιγραφή της διεπαφής του ελεγκτή με την πηγή του laser ώστε να ενσωματώνει τη λειτουργία της στην κίνηση της τράπεζας με στόχο την επίτευξη κατεργασίας.

Κεφάλαιο 7 – Δοκιμές και Αποτελέσματα: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διατριβής, συζητούνται τα συμπεράσματα για το σύνολο της μελέτης και τοποθετείται το θεμέλιο για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 8 - Προμελέτη προσαρμογής του κέντρου κατεργασιών Laser για κατεργασία πρόσθεσης υλικού: Επεκτείνοντας τη σχετική έρευνα στη βιβλιογραφία γίνεται προκαταρκτική μελέτη για την προσαρμογή της πηγής του Laser σε διάταξη κατεργασίας με πρόσθεση υλικού.

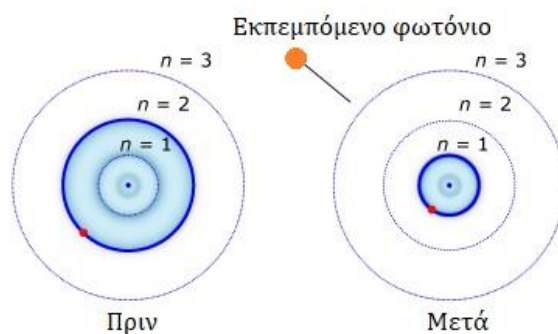
Κεφάλαιο 9 – Συμπεράσματα: Συζητούνται τα συμπεράσματα για το σύνολο της μελέτης και τοποθετούνται τα θεμέλια για μελλοντική εργασία.

2. Τεχνολογία Laser στη βιομηχανία

Το Laser αποτελεί μια διάταξη η οποία εκπέμπει φως μέσα από μια διαδικασία «οπτικής ενίσχυσης», βασισμένη στη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διεγερόμενων ατόμων. Ό ίδιος ο όρος «Laser» αποτελεί ακρωνύμιο του Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Το πρώτο Laser κατασκευάστηκε το 1960 από τον Theodore H. Maiman στα Εργαστήρια Ερευνών Hughes (Hughes Research Laboratories) στο Μάλιμπου της Καλιφόρνια. Η κατασκευή βασίστηκε στη θεωρητική εργασία των Αμερικανών φυσικών και Νομπελιστών Charles Hard Townes και Arthur Leonard Schawlow.

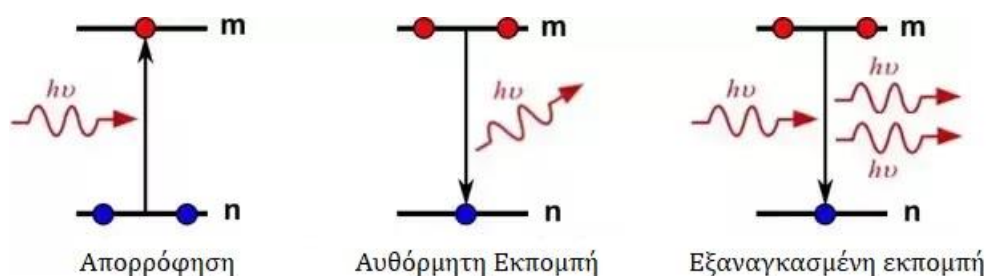
2.1 Αρχές λειτουργίας Laser

Η αρχή λειτουργίας του Laser βασίζεται στους κανόνες της κβαντομηχανικής, σύμφωνα με τους οποίους τα άτομα και τα μόρια της ύλης διαθέτουν διακριτή ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας, η οποία εξαρτάται από τη φύση του ατόμου ή μορίου αυτού. Τα χαμηλότερα επίπεδα ενέργειας ενός ατόμου επιτυγχάνονται όταν τα ηλεκτρόνια του βρίσκονται στις πλησιέστερες δυνατές ως προς τον πυρήνα στον πυρήνα τροχιές. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται *θεμελιώδης* (ground state) και αποτελεί κόμβο ευστάθειας για το άτομο, καθώς έχει την τάση να προσπαθεί να επανέλθει σε αυτή εάν του δοθεί κάποιο επιπλέον ποσό ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή ένα ή παραπάνω ηλεκτρόνια απορροφούν ενέργεια από κάποια εξωτερική πηγή και μετακινούνται σε πιο απομακρυσμένες τροχιές από τον πυρήνα, ή αλλιώς σε υψηλότερα ενεργειακά τροχιακά. Σε αυτή την κατάσταση του ατόμου ονομάζεται *διεγερμένη* (excited state), ή αλλιώς κατάσταση *αναστροφής πληθυσμού* (population inversion) και χαρακτηρίζεται από αστάθεια. Τα ηλεκτρόνια έχουν την τάση να αποβάλουν την επιπλέον ενέργεια ώστε να επιστρέψουν στα χαμηλότερα τροχιακά από τα οποία μεταπήδησαν, μέσω της διαδικασίας της *αποδιέγερσης* (de-excitation). Η αποβαλλόμενη ενέργεια εκπέμπεται στο περιβάλλον υπό τη μορφή φωτός (Εικόνα 2).



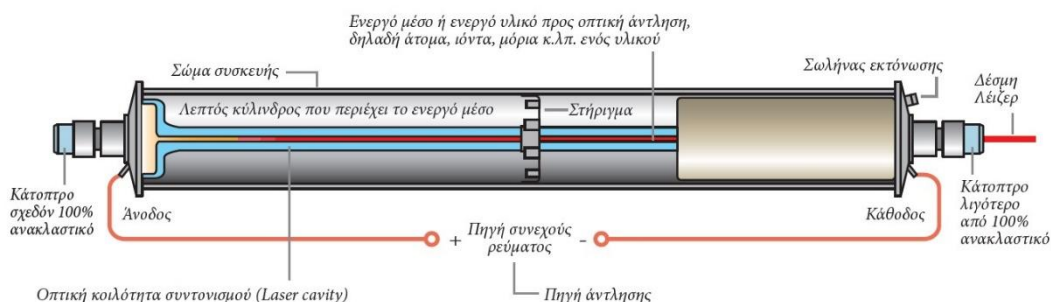
Εικόνα 2: Ατομική αποδιέγερση με εκπομπή φωτονίου

Αυτή η εκπομπή ονομάζεται *αυθόρμητη* (spontaneous emission). Εάν το παραπάνω φωτόνιο συγκρουστεί με τα γειτονικά άτομα, μόρια ή ιόντα του υλικού προκαλεί την εκπομπή πανομοιότυπων φωτονίων, δηλαδή φωτονίων ίδιας συχνότητας ή μήκους κύματος, επομένως *μονοχρωματικό*, και οπωσδήποτε ίδιας *φάσης* (monochromatic & coherent light). Προκαλείται με αυτό τον τρόπο το φαινόμενο της *εξαναγκασμένης εκπομπής* (stimulated emission) το οποίο μέσα από ένα μηχανισμό χιονοστιβάδας προκαλεί την *ενίσχυση* του φωτός (light amplification) με την παραγωγή μεγάλης ποσότητας πανομοιότυπων φωτονίων (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων

Με βάση τον παραπάνω μηχανισμό είναι δυνατό να παραχθεί δέσμη Laser με την ακόλουθη διάταξη (Εικόνα 4) :



Εικόνα 4: Βασική διάταξη παραγωγής δέσμης Laser

Τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης παραγωγής δέσμης Laser είναι τα εξής:

1. **Η οπτική κοιλότητα συντονισμού (laser cavity).** Συνήθως έχει τη μορφή λεπτού κυλινδρικού σωλήνα και μέσα της πραγματοποιείται η διέγερση του φωτός, και στη συνέχεια η προσανατολισμένη ενίσχυσή του μέσω αλληπάλληλων ανακλάσεων στα δυο κάτοπτρα στα άκρα της διάταξης.
2. **Το ενεργό μέσο (active medium / lasing material).** Υλικό, εντός της κοιλότητας του Laser, το οποίο μέσω της κατάλληλης διέγερσης παρουσιάζει τα φαινόμενα της εξαναγκασμένης εκπομπής και ενίσχυσης του φωτός.

3. **Η πηγή άντλησης (pump source).** Εξωτερική πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, ή φωτός που χρησιμοποιείται για τη διέγερση του ενεργού μέσου, Παρέχοντας στα ηλεκτρόνιά του την απαραίτητη ενέργεια για την αναστροφή πληθυσμού.
4. **Κάτοπτρο ολικής ανάκλασης (fully reflective mirror).** Βρίσκεται στο ένα άκρο της κοιλότητας του Laser και ανακλά σχεδόν το 100% της παραγόμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του.
5. **Κάτοπτρο μερικής ανάκλασης (partially reflective mirror).** Βρίσκεται στο άλλο άκρο της κοιλότητας του Laser και αποτελεί την έξοδο της δέσμης. Το κάτοπτρο αυτό ανακλά περίπου το 99% της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του επιτρέποντας στο υπόλοιπο 1% να εξέλθει.

Η παραπάνω διάταξη αφορά κυρίως Laser των οποίων το ενεργό μέσο είναι αέριο (πχ. He-Ne ή CO₂), Ωστόσο η γενική αρχή είναι η ίδια σε κάθε περίπτωση. Το διεγερμένο μέσο εκπέμπει μονοχρωματική και εν φάση ακτινοβολία, η οποία ενισχύεται και προσανατολίζεται μέσω μιας οπτικής ταλάντωσης μεταξύ των δυο κατόπτρων και εξέρχεται στο περιβάλλον υπό μορφής δέσμης.

2.2 Βασικά είδη Laser

Ανάλογα με το ενεργό μέσο που διεγείρομένο παράγει τη δέσμη φωτός οι ιδιότητες ενός Laser και οι διατάξεις παραγωγής μεταβάλλονται, πάντα ακολουθώντας τη βασική λογική που περιγράφηκε στην παραπάνω Παράγραφο. Με βάση το παραπάνω κριτήριο διαχωρισμού προκύπτουν οι κύριες οικογένειες Laser.

Laser αερίου (Gas Laser)

Η πρώτη βασική κατηγορία Laser, όπου το ενεργό μέσο είναι αέριας μορφής. Το πρώτο σύστημα που εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία διέγειρε άτομα Ηλίου και Νέου (He-Ne) και κατασκευάστηκε το 1960 από τον Ιρανό-Αμερικανό φυσικό Ali Javan και τον Αμερικανό φυσικό William R. Bennet. Η διάταξη παραγωγής αυτών των Laser είναι επακριβώς η διάταξη που απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Το μέσο διεγείρεται εντός της κυλινδρικής κοιλότητας με συνεχές ρεύμα και τα άτομα, τα μόρια ή τα ιόντα του αερίου μέσου αντίστοιχα εκπέμπουν φωτόνια. Τα Laser αερίου είναι πολύ διαδομένα και βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή σε διαφορετικούς τομείς, όπως είναι για παράδειγμα τα μετρητικά όργανα, η ολογραφία και η ευθυγράμμιση οπτικών διατάξεων. Το ενεργό μέσο δεν κινδυνεύει από φθορά, η αέρια φύση του επιτρέπει την εκμετάλλευση μεγάλου όγκου υλικού και πολύ συχνά το ίδιο το υλικό είναι χαμηλού κόστους. Τα πιο γνωστά είδη Laser

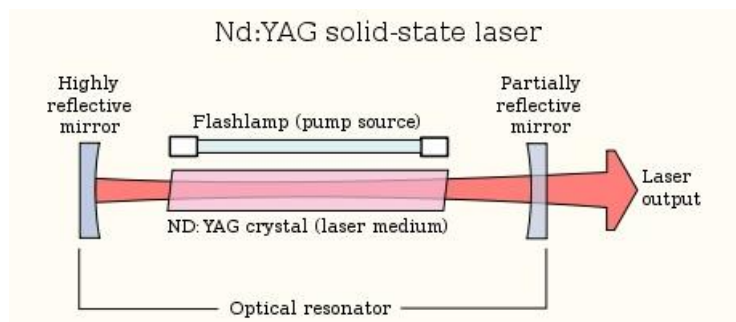
αερίου είναι το He-Ne που προαναφέρθηκε και το Laser CO₂. Το τελευταίο μάλιστα αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη Laser στις κατεργασίες υλικών.

Excimer Laser

Κατά βάση Laser αερίου μέσου, ωστόσο παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες που τα διαφοροποιούν από την παραπάνω κατηγορία. Ο όρος *excimer* προέρχεται από το *excited dimer* και αποτελεί την ονομασία ενός διεγερμένου διμερούς ψευδό-μορίου το οποίο δημιουργείται όταν ένα μίγμα ευγενούς αερίου (πχ. Αργόν, Κρυπτόν, Ξέον) και δραστικού αερίου (πχ. Φθόριο, Χλώριο) βρισκόμενο υπό πίεση δέχεται κατάλληλη ηλεκτρική διέγερση. Το διμερές αυτό είναι ασταθές και η ύπαρξή του καθίσταται δυνατή μόνο για όσο διάστημα τα άτομά του βρίσκονται σε κατάσταση αναστροφής πληθυσμού. Κατά τη σταθεροποίησή τους, το ψευδομόριο σπάει και απελευθερώνει ακτινοβολία στην υπεριώδη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ακτινοβολία ενός Excimer Laser είναι συνήθως παλμική, γεγονός που δίνει μεγάλη ελευθερία στον έλεγχό της επιτυγχάνοντας τεράστια ακρίβεια στην έκλυση θερμότητας και τον περιορισμό της επηρεαζόμενης θερμικά περιοχής της επιφάνειας πρόσπτωσής του. Για το λόγο αυτό τα Laser αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε ιατρικές εφαρμογές, όπως είναι για παράδειγμα οι οφθαλμικές εγχειρίσεις. Επιπλέον χρησιμοποιούνται για την κατεργασία της φωτολιθογραφίας και σε ερευνητικές εφαρμογές, καθώς έχουν τη δυνατότητα να διεγείρουν το μέσο οπτικά σε laser άλλων κατηγοριών, οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω.

Laser στερεάς κατάστασης (Solid State Laser)

Τα Laser αυτά χρησιμοποιούν στερεό ενεργό μέσο, το οποίο συνήθως έχει τη μορφή κάποιου κρυστάλλου. Ο κρύσταλλος εμπλουτίζεται με κάποιο ενισχυτικό στοιχείο. Χαρακτηριστικά ενισχυτικά αποτελούν το νεοδύμιο, το χρώμιο και το υττέρβιο. Τα πιο διαδεδομένα Laser στερεάς κατάστασης είναι τα Laser συνθετικού ρουμπινιού (Ruby) και τα Laser Nd-YAG (Εικόνα 5), των οποίων το μέσο είναι κρύσταλλος υττρίου και αλουμινίου (YAG) εμπλουτισμένος με νεοδύμιο (Nd). Τα Laser στερεάς κατάστασης τυπικά αντλούνται με οπτική διέγερση, μέσω λαμπτήρα, ή συχνότερα μέσω ενός διοδικού Laser (2.2.4) και είναι κατ' αρχήν παλμικά, επιτυγχάνοντας μάλιστα πολύ σύντομους παλμούς, της τάξης των 20 femtoseconds. Η χρήση τους ποικίλει, καθώς τα διάφορα ενεργά μέσα δίνουν διαφορετικές ιδιότητες στη δέσμη με μεγάλο εύρος. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη έκλυση ισχύος, όπως παραδείγματος χάριν στις κατεργασίες μετάλλων, ή σε οπτικά συστήματα, αλλά και σε εφαρμογές ακριβείας, μετρητικές διατάξεις και ιατρικές επεμβάσεις.



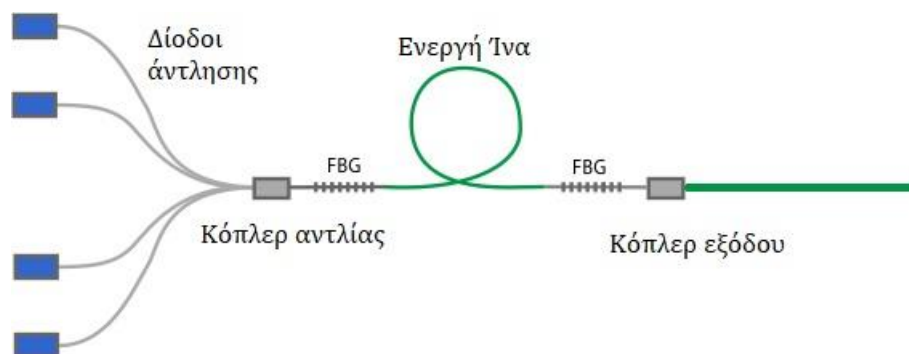
Εικόνα 5: Βασική διάταξη Nd-YAG Laser

Διοδικά Laser (Diode Laser)

Τα διοδικά Laser αποτελούν το πιο απλό σύστημα Laser. Η λειτουργία τους προσεγγίζει εκείνη των διόδων εκπομπής φωτός LED. Κατασκευάζονται από ημιαγωγικές προσμείξεις, όπως για παράδειγμα τσιπ Ινδίου – Γαλλίου – Αρσενικού – Φωσφόρου (InGaAsP) ή Γαλλίου – Αργιλίου - Αρσενικού (GaAlAs). Παράγουν δέσμες χαμηλής ισχύος, από μόλις μερικά mWatt, έως και μερικές δεκάδες Watt, συνεχόμενα ή παλμικά και τα μήκη κύματος της παραγόμενης ακτινοβολίας καλύπτουν όλη την περιοχή του φάσματος από τα 635nm μέχρι και τα 1550nm. Έχουν μικρό μέγεθος και μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ οι απαιτήσεις ισχύος για τη λειτουργία τους, αναλογικά με την ισχύ της παραγόμενης δέσμης είναι μικρές σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες. Χρησιμοποιούνται κυρίως στις τηλεπικοινωνίες, σε μετρητικές διατάξεις και τη φασματομετρία. Ακόμα, συναντώνται σε οπτικές μονάδες ανάγνωσης δίσκων (CD/DVD ROMS) και σε συστοιχίες χρησιμοποιούνται ως πηγές άντλησης σε οπτικά διεγειρόμενα συστήματα Laser μεγαλύτερης ισχύος.

Laser Ινών (Fiber Laser)

Τα Laser Ινών αποτελούν υποκατηγορία των Laser στερεάς κατάστασης, που όμως διαφοροποιούνται από την οικογένεια στην οποία ανήκουν χρησιμοποιώντας ως ενεργό μέσο οπτικές ίνες εμπλουτισμένες με σπάνιες γαίες, όπως είναι το έρβιο, το υττέρβιο, το νεοδύμιο κ.α. Η βασική διάταξή τους φαίνεται την Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Βασική διάταξη Laser Ινών

Το πεδίο των χρήσεών τους καλύπτεται από τις εφαρμογές των Laser στερεάς κατάστασης, ωστόσο βρίσκουν ιδιαίτερα μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανική παραγωγή σε κατεργασίες μεταλλικών και μη υλικών. Η διάταξή τους επιτρέπει την παραγωγή δέσμης μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας με μικρό αποτύπωμα όγκου, γι' αυτό είναι εύκολη η ενσωμάτωσή τους σε εργαλειομηχανές κοπής, ή γενικώς χαρακτηρίζονται από φορητότητα. Διαθέτουν μεγάλη διάρκεια ζωής και καλή ποιότητα δέσμης.

Laser χρωστικών (Dye Laser)

Η τελευταία βασική κατηγορία Laser, εναλλακτικά ονομάζονται και Laser υγρής κατάστασης. Το ενεργό μέσο τους είναι σύνθετες οργανικές ενώσεις (πχ. Ροδαμίνη 6G) διαλυμένες σε οργανικούς διαλύτες (πχ. Αιθανόλη πολύ υψηλής καθαρότητας) και βρίσκονται εντός της κοιλότητας του Laser σε υγρή μορφή. Βρίσκουν εφαρμογή στις κατεργασίες, καθώς δίνουν τη δυνατότητα παραγωγής δέσμης μεγάλης ισχύος, στην αστρονομία και την ιατρική. Τείνουν να αντικατασταθούν πλήρως από τα Laser στερεάς κατάστασης.

2.3 Εφαρμογές δέσμης Laser στη βιομηχανική παραγωγή

Σχεδόν όλες οι παραπάνω κατηγορίες συστημάτων Laser βρίσκουν εφαρμογές στη βιομηχανική παραγωγή. Η μεταφορά ισχύος της δέσμης χρησιμοποιείται για τη θερμική επεξεργασία υλικών, ενώ οι οπτικές της ιδιότητες αξιοποιούνται από την επιστήμη της Μετρολογίας. Επιπλέον, αρκετοί αισθητήρες χρησιμοποιούν δέσμη Laser για τη λειτουργία τους, συμβάλλοντας στην αυτοματοποίηση στις σύγχρονες βιομηχανίες.

2.3.1 Μετρολογία εργαλειομηχανών

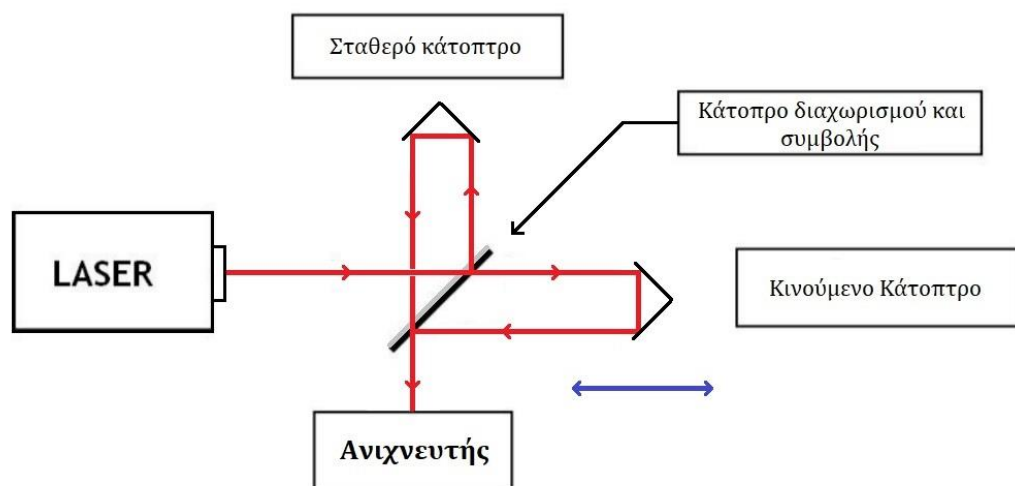
Η μετρολογία, όντας η επιστήμη της μέτρησης μεγεθών εφαρμόζεται στις εργαλειομηχανές με στόχο τη μέτρηση της ακρίβειάς τους. Με αυτό τον τρόπο ώστε να καθίσταται γνωστή η ικανότητά τους να επιτυγχάνουν δεδομένες ανοχές σε κατεργασίες

υλικών, αλλά και γίνεται δυνατή η μείωση των σφαλμάτων τους μέσω αντιστάθμισης. Η αντιστάθμιση γίνεται μέσω του λογισμικού (software) και του υλισμικού (hardware) της εργαλειομηχανής.

Τα συστήματα Laser αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την υψηλού επιπέδου μέτρηση σφαλμάτων θέσης ή γωνίας. Η ευθύτητα της δέσμης του Laser σε συνδυασμό με τις οπτικές της ιδιότητες επιτρέπουν τη μέτρηση με μεγάλη ακρίβεια, της τάξης των nm, κοντά στο μήκος κύματος των ακτινοβολιών της δέσμης.

Δυο από τα πιο κοινά παραδείγματα μετρητικών Laser για τη μετρολογία εργαλειομηχανών είναι το συμβολόμετρο Michelson (Interferometer) και το συμβολόμετρο 2 συχνοτήτων.

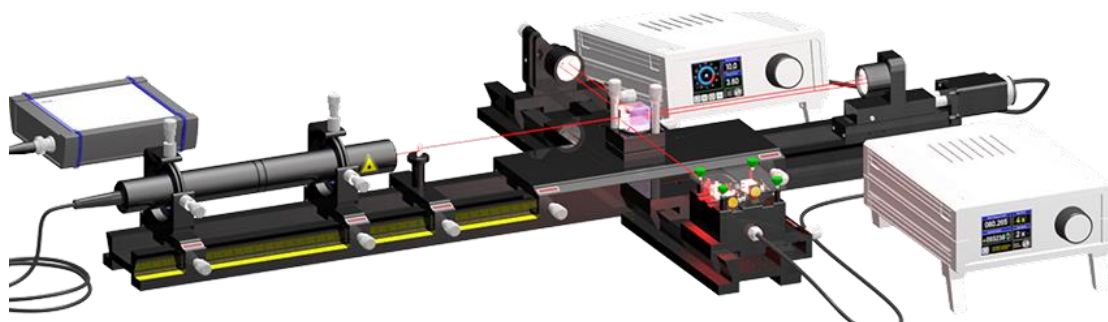
Το **Συμβολόμετρο Michelson** χρησιμοποιεί τη δέσμη μονοχρωματικού φωτός που εκπέμπεται από μια πηγή Laser. Η δέσμη προσπίπτει σε κάτοπτρο το οποίο είναι ημιεπαργυρωμένο και υπό γωνία και διαχωρίζεται (Εικόνα 7). Το ένα μέρος της δέσμης (δέσμη αναφοράς) ανακλάται από σταθερό κάτοπτρο επιστροφής (retroreflector). Το άλλος μέρος της δέσμης (δέσμη μέτρησης) ανακλάται από ίδιου τύπου κάτοπτρο το οποίο όμως κινείται κατά μήκος του μετρούμενου άξονα. Οι δυο δέσμες συμβάλουν στο ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο και καταλήγουν σε μια συσκευή ανίχνευσης.



Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας συμβολόμετρου Michelson

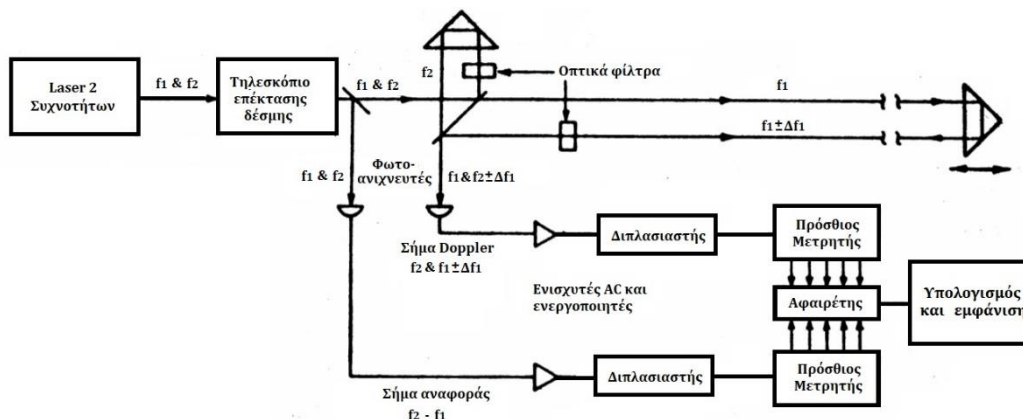
Εάν το κινητό κάτοπτρο μετακινηθεί κατά την παραπάνω διαδικασία, η απόσταση της δέσμης μέτρησης από το σημείο συμβολής μεταβάλλεται, επομένως η επιστροφή της στο σημείο συμβολής έχει διαφορά φάσης σε σχέση με τη δέσμη αναφοράς. Η διαφορά φάσης εξαρτάται από τη μετατόπιση και οδηγεί σε μια αλληλουχία αυξομειώσεων της έντασης της δέσμης που καταλήγει στον ανιχνευτή. Όταν οι δυο δέσμες συμβάλουν συμφασικά

(πχ. ακίνητο κάτοπτρο μέτρησης) η τελική δέσμη έχει την αρχική της ένταση, ενώ όταν η διαφορά φάσης αγγίζει τις 180°, σε μετατόπιση απόστασης ίσης με το μισό του μήκους κύματος της δέσμης, τα δυο κύματα εξουδετερώνουν το ένα το άλλο και ο ανιχνευτής μετράει μηδενικής έντασης κυματομορφή. Ο παραπάνω κύκλος μεταξύ μηδενικής κυματομορφής και πλήρους έντασης επαναλαμβάνεται κάθε φορά που η μετατόπιση ολοκληρώνει απόσταση ίση με μισό μήκος κύματος και ονομάζεται «κροσσός». Μετρώντας αριθμό κροσσών υπολογίζεται η μετατόπιση του κατόπτρου μέτρησης. Λαμβάνοντας ως μηδενική θέση, ή σημείο αναφοράς μια αρχική κατάσταση ακινησίας και προσθέτοντας τη μετατόπιση που υπολογίζεται χάρη στο συμβολόμετρο προκύπτει η τελική θέση του κατόπτρου με διακριτική ικανότητα ίση με το ήμισυ του μήκους κύματος της δέσμης του μετρητικού Laser.



Εικόνα 8: Μετρητική διάταξη συμβολόμετρου Michelson

Το **Συμβολόμετρο 2 Συχνοτήτων** αναπτύχθηκε από την εταιρία Hewlett Packard το 1970 και η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με του συμβολόμετρου Michelson. Η διαφορά του με το παραπάνω εστιάζει στο γεγονός ότι δεν μετρούνται κροσσοί, αλλά κύκλοι διαφοράς φάσης μεταξύ δυο δεσμών, μιας σταθερής δέσμης αναφοράς συχνότητας f_2 και μιας μετρητικής δέσμης με συχνότητα f_1 η οποία ανακλάται από το κινούμενο μετρούμενο μέρος της διάταξης. Οι δυο δέσμες συχνοτήτων f_1 και f_2 συμβάλλουν σε μια τελική δέσμη παρεμβολής συχνότητας $f_2 - f_1$ εάν το κινητό κάτοπτρο βρίσκεται σε ακινησία. Εάν μετατοπιστεί ωστόσο το φαινόμενο doppler θα μεταβάλλει τη συχνότητα της κυματομορφής μέτρησης κατά Δf_1 και η τελική δέσμη θα έχει συχνότητα $f_2 - (f_1 \pm \Delta f_1)$. Συγκρίνονται η δέσμη αναφοράς με τη δέσμη παρεμβολής και ορίζονται κύκλοι αναφοράς. Οι διαφορές συχνότητας εξ αιτίας του φαινομένου doppler σε κάθε κύκλο αναφοράς προστίθενται και γίνεται συσχετισμός με τη μετατόπιση αντίστοιχα. Μια σχηματική διάταξη συμβολόμετρου 2 συχνοτήτων απεικονίζεται στην Εικόνα 9, ενώ μια συσκευή συμβολόμετρου Laser HP στην Εικόνα 10.

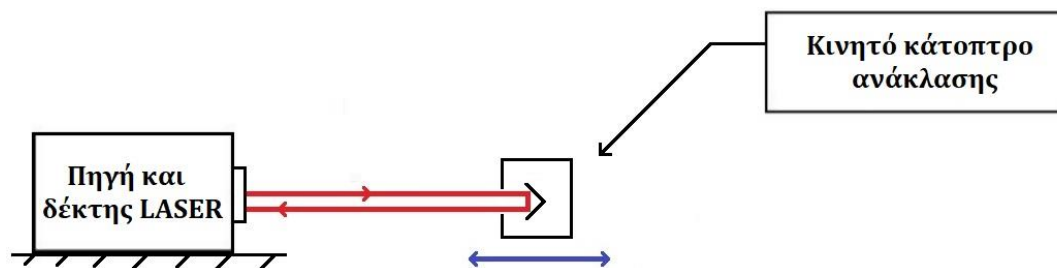


Εικόνα 9: Αρχή λειτουργίας συμβολόμετρου 2 συχνοτήτων

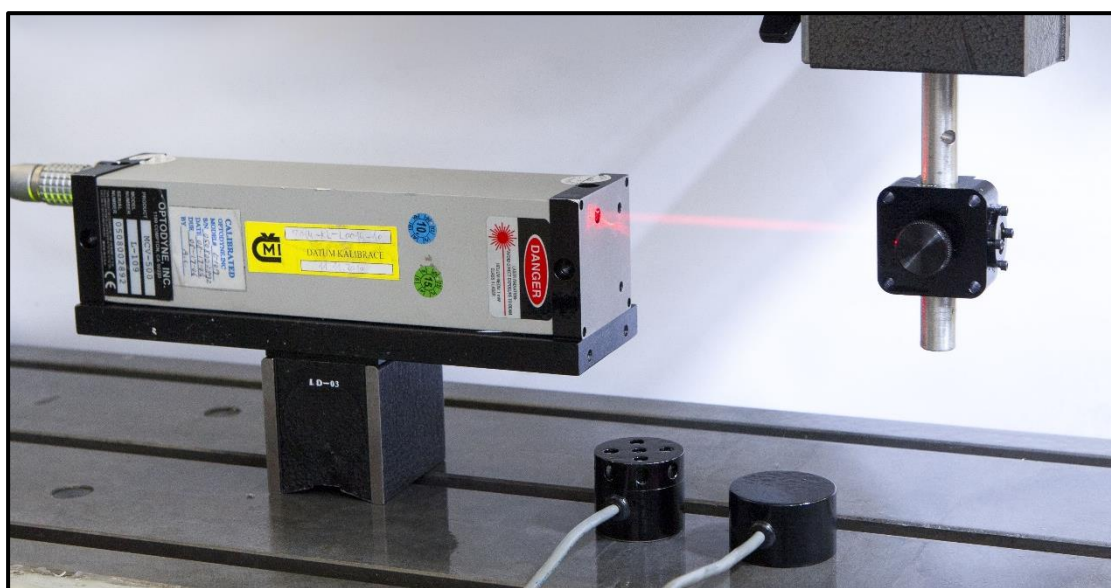


Εικόνα 10: Συμβολόμετρο Laser HP

Μεγάλο ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζουν οι διατάξεις **LDDM (Laser Doppler Displacement Meter)**. Όπως και το συμβολόμετρο HP, έτσι και η LDDM χρησιμοποιεί το φαινόμενο Doppler για τη μέτρηση μετατόπισης. Η διάταξη, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 11 χρησιμοποιεί μια πηγή δέσμης Laser τοποθετημένη σε σταθερό σημείο αναφοράς. Η δέσμη προσπίπτει σε κάτοπτρο και ανακλάται πίσω στην πηγή, όπου υπάρχει κατάλληλος αισθητήρας ανίχνευσης. Η συσκευή συγκρίνει τη συχνότητα τη συχνότητα της παραγόμενης δέσμης με τη συχνότητα με την οποία επιστρέφει. Εάν το κάτοπτρο μετακινείται η συχνότητα αυτή μεταβάλλεται εξ αιτίας του φαινομένου Doppler. Η διαφορά των συχνοτήτων δίνει την ταχύτητα κίνησης του κατόπτρου και με αριθμητική ολοκλήρωση προκύπτει η μετατόπιση. Μια πραγματική διάταξη LDDM απεικονίζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 11: Διάταξη LDDM



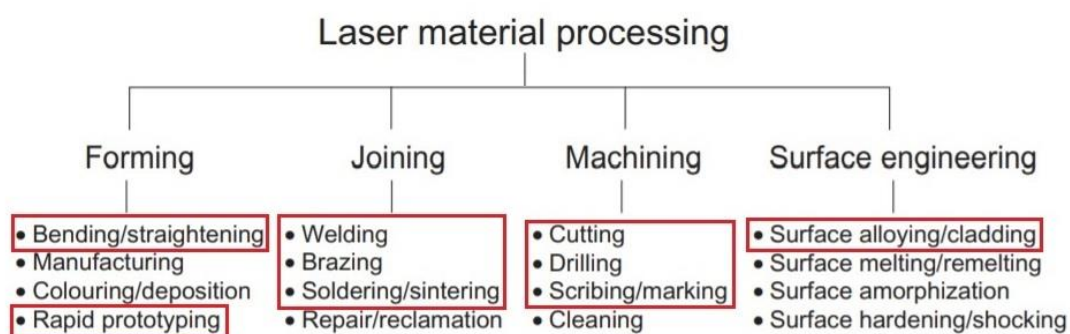
Εικόνα 12: Μετρητική διάταξη LDDM σε τραπέζι φρέζας

Οι παραπάνω διατάξεις μέτρησης χρησιμοποιούνται με διάφορες προσθήκες κατόπτρων και ηλεκτρονικού εξοπλισμού για την εύρεση των σφαλμάτων θέσης και γωνίας των αξόνων των εργαλειομηχανών. Όπως αναφέρθηκε, η μέτρηση αφορά τη μετατόπιση από μια αρχική θέση, επομένως είναι σημαντικό η αναφορική αυτή θέση να είναι καλώς ορισμένη και σταθερή. Η ευθυγράμμιση μεταξύ της δέσμης και των οπτικών είναι υψίστης σημασίας για τη σωστή μέτρηση, ενώ εξίσου σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αξιοπιστία των μετρήσεων είναι και συνθήκες θερμοκρασίας του υλικού της εργαλειομηχανής και του περιβάλλοντος, της υγρασίας και της πίεσης του αέρα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αισθητήρες (Εικόνα 12) οι οποίοι τροφοδοτούν το σύστημα υπολογισμού με ζωντανές ενδείξεις των παραπάνω μεγεθών και αυτόματα προσαρμόζουν τη μέτρηση.

2.3.2 Κατεργασία υλικών

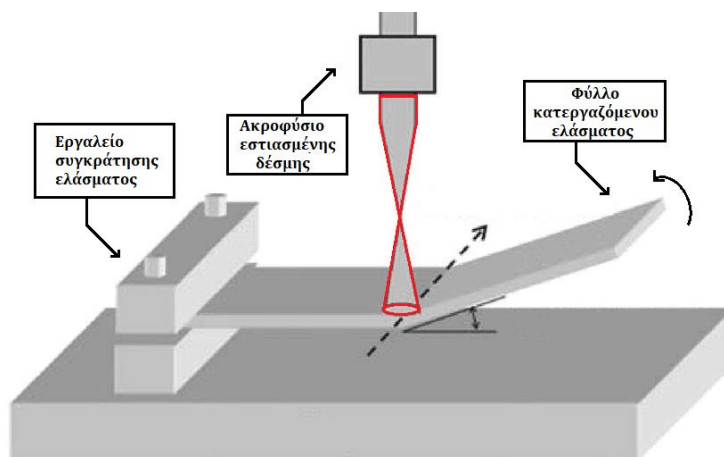
Η δέσμη του Laser εξ αιτίας των ιδιοτήτων της βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην κατεργασία υλικών. Τα μεγάλα ποσά μεταφερόμενης θερμικής ενέργειας περιορισμένα μέσω φακών εστίασης σε μικρές διαμέτρους, της τάξης των (κατά μέγιστο) μερικών mm δημιουργούν μια δέσμη με ενεργειακή πυκνότητα της τάξης των MW/mm². Η δυνατότητα επίσης που προσφέρουν αρκετές κατηγορίες Laser για παλμική εκπομπή φωτός σε συνδυασμό με συστήματα ελέγχου των παλμών και, όπου είναι δυνατόν, της έντασης της δέσμης προσφέρει τεράστια ελευθερία στη διαχείριση της μεταφοράς της εν λόγω ενέργειας επιτυγχάνοντας σύνθετες και ακριβείς εργασίες.

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό των κατεργασιών με χρήση Laser αποτελεί και η απουσία επαφής εργαλείου-τεμαχίου και κατ' επέκτασιν τα μηχανικά φορτία κατεργασίας. Όντας καθαρά θερμική κατεργασία επιτυγχάνεται μηδενική φθορά του εργαλείου (σε αυτή την περίπτωση το ακροφύσιο της εργαλειομηχανής). Ωστόσο πρέπει να υπάρχει μέριμνα, αφενός για τις παραμένουσες τάσεις στα υλικά εξ αιτίας της θερμικής αλληλεπίδρασης με τη δέσμη και ιδιαίτερη προσοχή για τυχόν αλλαγές στις ιδιότητες των υλικών εξ αιτίας αυτής, λόγω της μικρής μεν (έναντι άλλων θερμικών κατεργασιών) αλλά υπαρκτής *θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης* (Heat Affected Zone – HAZ). Ένα ενδεικτικό σχεδιάγραμμα των χρήσεων των Laser στις κατεργασίες παρουσιάζεται στην Εικόνα 13. Δίνεται έμφαση στις βασικότερες εφαρμογές οι οποίες αναπτύσσονται παρακάτω.



Εικόνα 13: Η χρήση του Laser στην κατεργασία υλικών

Η **διαμόρφωση με χρήση δέσμης Laser** (Laser forming) αποτελεί μια σχετικά πρόσφατη εφαρμογή, με σχετικές ερευνητικές δημοσιεύσεις να κάνουν την εμφάνισή τους από το 1998. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια πηγή δέσμης Laser η οποία κατευθύνεται μέσω φακών, ή οπτικής ίνας και εστιαζόμενη από κατάλληλους φακούς προσπίπτει στην επιφάνεια μεταλλικού ελάσματος (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Κάμψη ελάσματος με χρήση δέσμης Laser

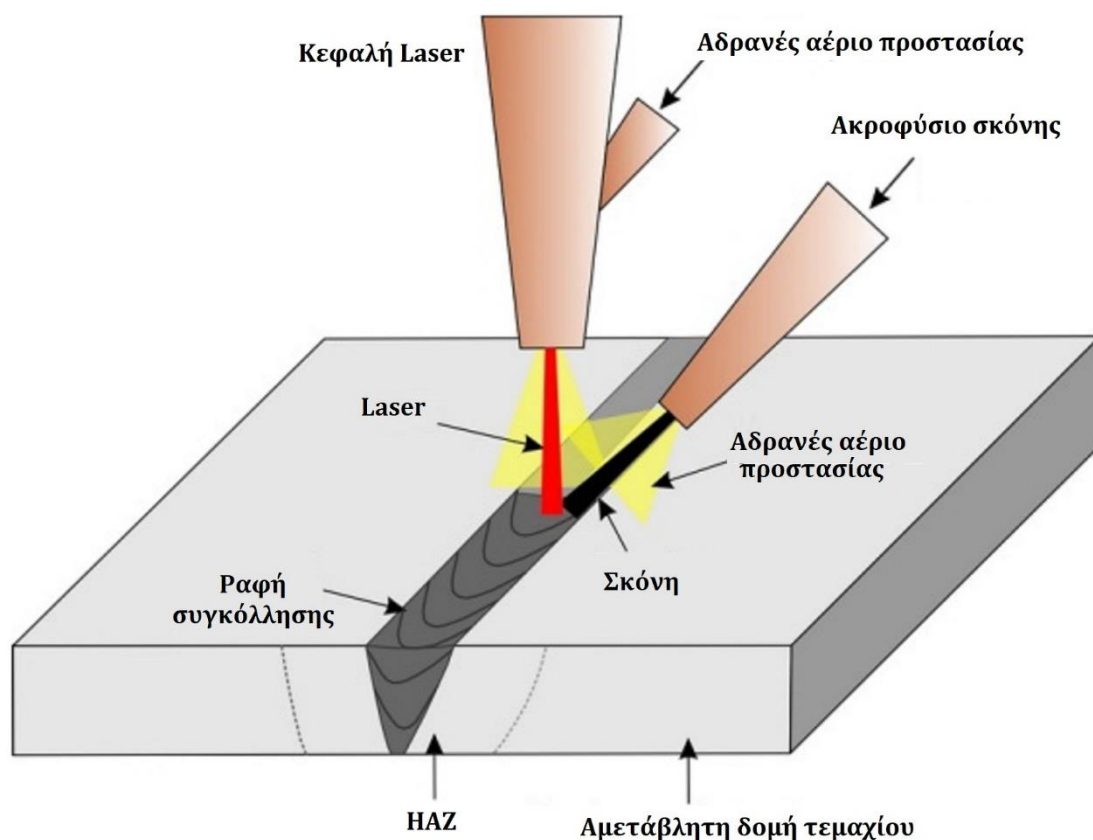
Η θερμότητα που προσδίδεται στο έλασμα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία παραμενουσών τάσεων οι οποίες προκαλούν παραμορφώσεις και έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της καμπυλότητάς του τοπικά κατά την τροχιά που ακολουθεί το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης. Έτσι επιτυγχάνεται η κατά περίπτωση κάμψη ή ευθυγράμμιση του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Η απουσία μηχανικών φορτίων όπως προαναφέρθηκε λόγω της ανέπαφης φύσης της κατεργασίας δίνει μεγάλη ευελιξία και ευκολία στην εφαρμογή της μεθόδου. Ωστόσο, το μεγάλο εύρος υλικών που καλούνται να υποστούν διαμόρφωση σε μια βιομηχανική μονάδα, διαθέτουν ένα εξίσου μεγάλο εύρος ιδιοτήτων. Η ανακλαστικότητα, η απορροφητικότητα και οι διαφορετικοί δείκτες κάμψης των υλικών, σε συνδυασμό με τις διαφορετικές ιδιότητες των κάθε κατηγορίας Laser, όπως είναι το μήκος κύματος καθιστούν αναγκαία τη διεξοδική μελέτη για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος ανά περίπτωση. Η επιλογή του τύπου του Laser, η ένταση της δέσμης, οι ταχύτητες πρόωσης και ο αριθμός των περασμάτων είναι μόλις μερικοί από τους παράγοντες που μεταβάλλονται σε σχέση με τη σύσταση και το πάχος του εκάστοτε ελάσματος.

Η διαμόρφωση με χρήση δέσμης Laser βρίσκει κυρίως εφαρμογή στη διαμόρφωση φύλλων ανοξείδωτου χάλυβα (stainless steel) και κραμάτων αλουμινίου-τιτανίου (Al/Ti).

Η **συγκόλληση μετάλλων με χρήση Laser** (Laser Welding) αποτελεί μια επίσης δημοφιλή εφαρμογή των συστημάτων Laser στη βιομηχανία. Μια εστιασμένη συνεχόμενη δέσμη παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα για την τήξη στο σημείο ραφής, με ή χωρίς ηλεκτρόδιο πλήρωσης. Η περιοχή της συγκόλλησης και το υλικό πλήρωσης

υφίστανται τήξη και η σύνδεση επιτυγχάνεται μετά την απομάκρυνση της δέσμης (Εικόνα 15).



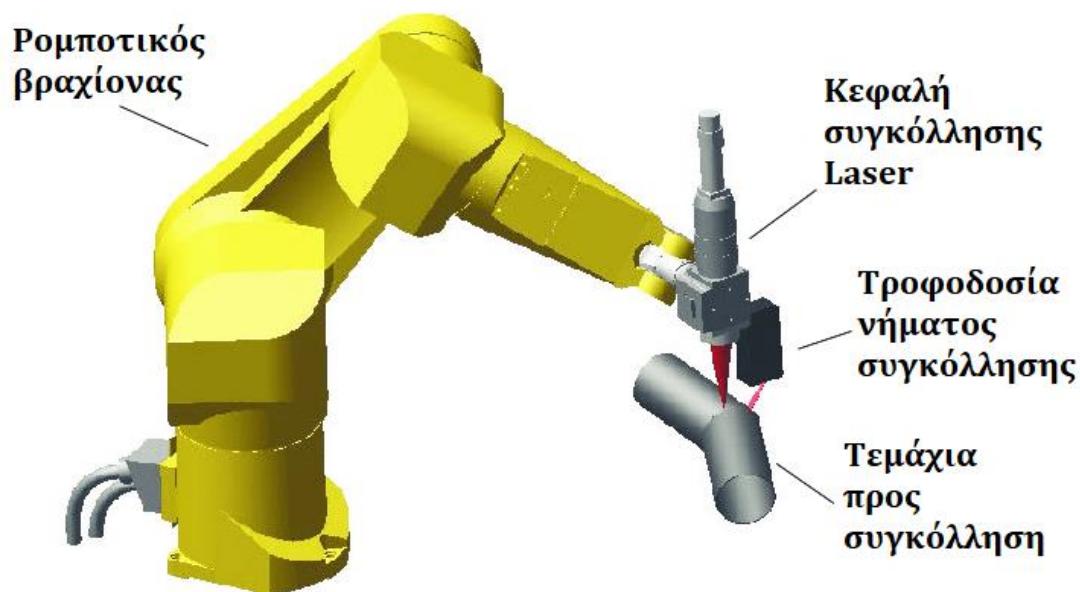
Εικόνα 15: Συγκόλληση με χρήση δέσμης Laser

Η χρήση του Laser στις συγκολλήσεις παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα τα οποία την καθιστούν προτιμητέα σε πολλές βιομηχανικές μονάδες. Αρχικά η διεργασία εκτελείται στον αέρα, εν αντιθέσει άλλων εναλλακτικών μεθόδων (πχ. Electron Beam Machining – EBM) οι οποίες απαιτούν την ύπαρξη θαλάμου κενού. Η εστίαση της δέσμης επιτρέπει την επίτευξη ραφών μεγάλης ακρίβειας, ενώ το μέγεθος της ραφής είναι εύκολα ελεγχόμενο.

Η μικρή HAZ που δημιουργεί η πρόσπτωση της δέσμης στα τεμάχια προς συγκόλληση περιορίζουν τα θερμικά φαινόμενα έναντι συμβατικών μεθόδων (πχ. συγκόλληση τόξου). Οι κολλήσεις είναι ισχυρότερες και οι παραμορφώσεις εξ αιτίας των παραμενουσών τάσεων αμελητέες. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα της κόλλησης ενός μεγάλου πλήθους υλικών, μεταλλικών και μη, ενώ μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ικανότητα σύνδεσης ανόμοιων υλικών μεταξύ τους.

Η συγκόλληση Laser ενσωματώνεται σε εργαλειομηχανές CNC, ενώ για την επίτευξη πολύπλοκων ραφών στον τρισδιάστατο χώρο επιστρατεύονται ευέλικτοι ρομποτικοί

βραχίονες (Εικόνα 16). Θεωρείται από τις πιο γρήγορες μεθόδους σύνδεσης υλικών και αξιοποιείται κατά κύριο λόγο από τη βιομηχανία αυτοκινήτων και την αεροναυπηγική.



Εικόνα 16: Ρομποτική συγκόλληση Laser

Η επόμενη βασική κατηγορία κατεργασιών στις οποίες βρίσκει εφαρμογή η χρήση των Laser είναι η **κατεργασία με αφαίρεση υλικού** (machining). Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν κατά κύριο λόγο η διάτρηση, η κοπή και η χάραξη. Επιπλέον μπορεί να ενταχθεί και ο καθαρισμός επιφανειών από ανεπιθύμητα επιφανειακά στρώματα, όπως για παράδειγμα είναι οι οξειδώσεις.

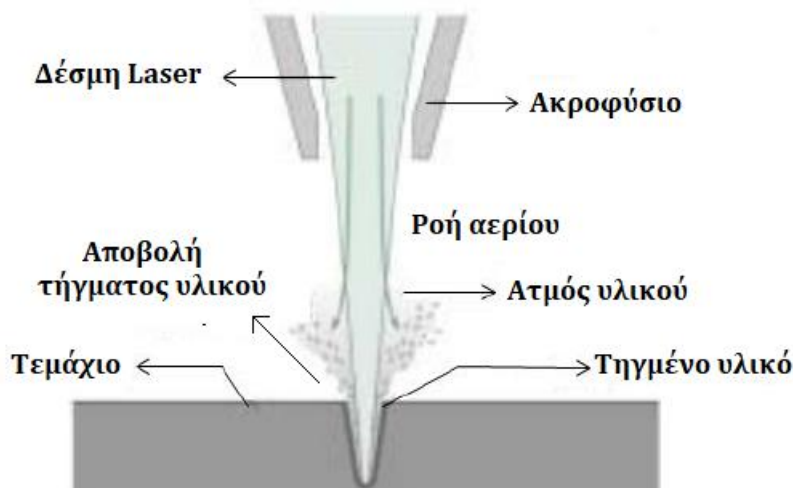
Η αρχή λειτουργίας για την αφαίρεση υλικού με χρήση δέσμης Laser είναι η ακόλουθη:

Η εστιασμένη δέσμη του Laser ανακατευθύνεται και προσπίπτει στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στο σημείο πρόσπτωσης η δέσμη χωρίζεται σε 3 μέρη, το ανακλώμενο μέρος της, το απορροφώμενο από το υλικό και στην περίπτωση διαφανούς, ή ημιδιαφανούς υλικού το διερχόμενο.

Όντως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, η ακτινοβολία του Laser προσπίπτοντας στην επιφάνεια του υλικού διεγείρει μια έντονη κίνηση ηλεκτρονίων στην επιφάνειά του εξ αιτίας της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου. Δημιουργείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και λόγω πεπερασμένης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού εμφανίζεται το φαινόμενο Joule. Ο συνδυασμός των δυο παραπάνω φαινομένων οδηγεί στην απότομη αύξηση της θερμοκρασίας των επιφανειακών στιβάδων του. Η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας υπό την επίδραση ακτινοβολίας προκαλεί τοπική τήξη του υλικού στην περιοχή πρόσπτωσης. Η αγωγιμότητα του υλικού μειώνεται και ταυτόχρονα η

απορροφητικότητα του αυξάνεται. Η θερμοκρασία εξακολουθεί να αυξάνεται και μόλις υπερβεί κατάλληλο κατώφλι παρατηρείται εξάτμιση και με τη ροή κατάλληλου αερίου οι ατμοί του υλικού απομακρύνονται.

Η **διάτρηση υλικού με δέσμη Laser** εκτελείται σημειακά με βάση την παραπάνω αρχή λειτουργίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17. Είναι δυνατή η διάνοιξη οπών μικρού μεγέθους (από μόλις μερικά nm μέχρι κάποια mm) με μεγάλη ακρίβεια, ειδικά αν χρησιμοποιηθεί παλμική δέσμη.



Εικόνα 17: Διάτρηση Laser

Για μεγαλύτερες διαμέτρους οπών, ή σύνθετες γεωμετρίες η κεφαλή του Laser τοποθετείται σε τράπεζα CNC και υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της δέσμης και του τεμαχίου. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η **κοπή με Laser**, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Κοπή Laser

Είναι δυνατή η σάρωση μιας επιφάνειας με μικρότερη ισχύ με στόχο τη **χάραξη του υλικού**, δίχως η δέσμη να το διαπεράσει πλήρως. Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας δίνει μια ανάγλυφη επιφάνεια επιθυμητού σχήματος σε διάφορα βάθη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για παράδειγμα για την κατασκευή ανθεκτικών ετικετών σε μεταλλικά εξαρτήματα.

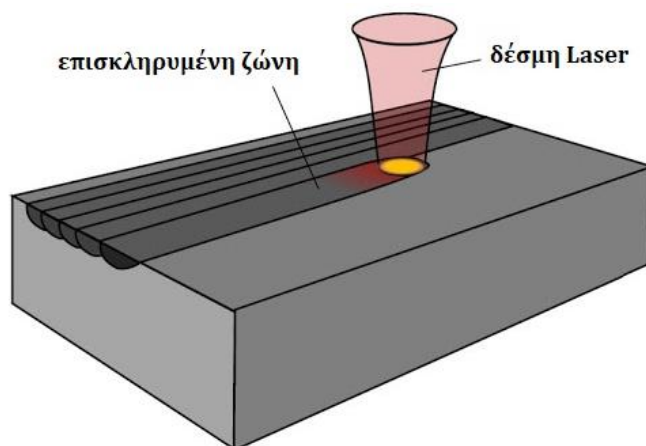


Εικόνα 19: Χάραξη Laser

Η **επιφανειακή κατεργασία με Laser** (Laser Surface Engineering – LSE) αποτελεί την τέταρτη βασική κατηγορία χρήσης Laser για την επεξεργασία υλικών και χρησιμοποιείται για την επίτευξη πλήθους διαφορετικών στόχων.

Η επιφανειακή κατεργασία με Laser εφαρμόζεται σε διατάξεις παρόμοιες με της διάτρησης και της κοπής, με τη διαφορά ότι η κατεργασία σε αυτή την περίπτωση λαμβάνει χώρα μέσα σε ειδικούς θαλάμους με ελεγχόμενη ατμόσφαιρα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Αν και ανάλογα με το είδος του υλικού επίστρωσης και του υποστρώματος οι μέθοδοι και οι αντίστοιχες ονομασίες τους διαφέρουν, κατά κύριο λόγο διακρίνονται δυο βασικές κατηγορίες.

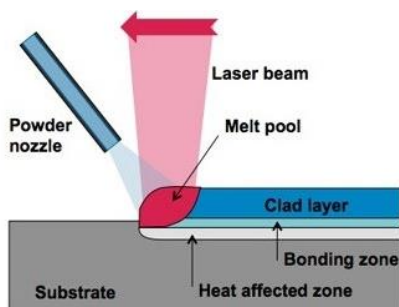
Η πρώτη κατηγορία επιφανειακής κατεργασίας αφορά τη μεταβολή της μικροδομής στην επιφάνεια ενός υλικού χωρίς την αλλαγή στη σύστασή του. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει υλικό επίστρωσης και η πρόσπτωση της δέσμης του Laser στην επιφάνεια του υλικού έχει ως σκοπό τη θερμική κατεργασία του για την επίτευξη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του, όπως για παράδειγμα τη σκλήρυνση (hardening), την ανόπτηση (annealing), την πρόσδοση συγκεκριμένης υφής (texturing), την τράχυνση ή τη λείανση (roughing-polishing). Σχηματικά, κατεργασία επιφανειακής σκλήρυνσης με δέσμη Laser φαίνεται στην Εικόνα 20.



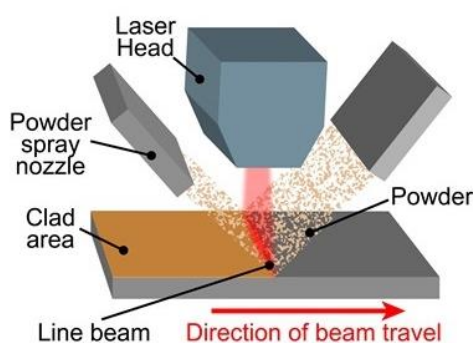
Εικόνα 20: Επιφανειακή σκλήρυνση με δέσμη Laser

Στη δεύτερη κατηγορία η επιφανειακή κατεργασία περιλαμβάνει την προσθήκη υλικού και τη σύνδεσή του με υλικό υπόστρωμα. Ανάλογα με τα είδη των υλικών και τον τρόπο σύνδεσής τους διακρίνουμε δυο βασικές κατηγορίες, την **επιφανειακή κραμάτωση με Laser** (Laser surface alloying – LSA) και την **επιφανειακή επένδυση/επίστρωση** (Laser Surface Cladding – LSC). Οι δυο κατηγορίες συχνά συγχέονται, καθώς η εφαρμογή τους γίνεται με τη χρήση σχεδόν πανομοιότυπων διατάξεων και περιλαμβάνει τον ψεκασμό υλικού υπό μορφή σκόνης και τη θερμική σύνδεσή του με το υπόστρωμα. Η διαφορά τους εστιάζει στις ιδιότητες του τελικού τεμαχίου σε σχέση με τις ιδιότητες του υλικού επίστρωσης και του υποστρώματος. Στην κραμάτωση, δίνεται έμφαση στις ιδιότητες του κράματος που προκύπτει από τη σύνδεση των δυο υλικών και όχι από το υλικό επίστρωσης μεμονωμένα. Κατά την κατεργασία της επένδυσης το υλικό επίστρωσης έχει κυρίαρχο ρόλο στις τελικές ιδιότητες του τεμαχίου.

Η επιφανειακή επεξεργασία μπορεί να γίνεται σημειακά, είτε με γραμμική δέσμη με κατάλληλη διασπορά της με χρήση ειδικής κεφαλής για την αύξηση της ταχύτητας. Αντίστοιχες διατάξεις απεικονίζονται στην Εικόνα 21.



Laser Surface Alloying



Laser Surface Cladding

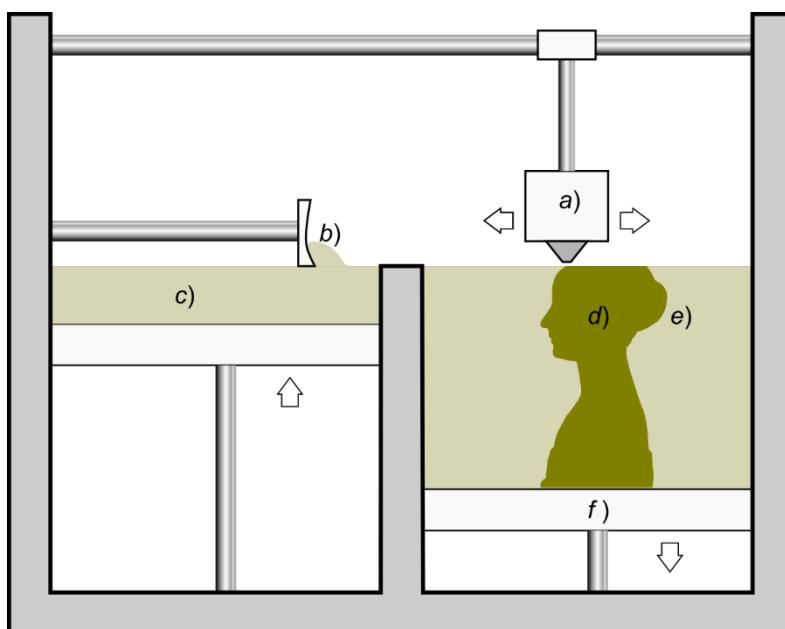
Εικόνα 21: Επιφανειακή κατεργασία με χρήση Laser

Η τελευταία κατηγορία που αξίζει να αναφερθεί εξ αιτίας της πρόσφατης διάδοσής είναι αυτή της προσθετικής κατεργασίας (additive manufacturing). Τα συστήματα Laser χρησιμοποιούνται για την τήξη και εναπόθεση υλικού, όχι μόνο σε μεμονωμένες λεπτές στρώσεις πάνω από υποστρώματα, αλλά για τη δημιουργία εξ ολοκλήρου νέων κατασκευών επιτυγχάνοντας τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing). Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η μέθοδος της **επιλεκτικής τήξης ή πυροσυσσωμάτωσης με Laser** (Selective Laser Melting or Sintering - SLM-SLS).

Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιεί σκόνη υλικού (μεταλλικού και μη) το οποίο τήκει διαδοχικά σε στρώσεις, οι οποίες σταδιακά συνθέτουν το τελικό τεμάχιο. Ή σκόνη του υλικού δύναται να ψεκάζεται, ή βρίσκεται ήδη στρωμένη σε ειδική πλατφόρμα.

Η μέθοδος SLS – SLM παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, καθώς δίνει τη δυνατότητα της κατασκευής τεμαχίων με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα από παλαιότερες και πιο οικονομικές μεθόδους όπως για παράδειγμα της κλασικής πλέον FFF – FDM (Fused Filament Fabrication – Fused Deposition Modeling) η οποία χρησιμοποιεί θερμαινόμενο πολυμερές νήμα.

Η διάταξη της SLS – SLM απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 22 και τα επί μέρους τμήματά της περιγράφονται συνοπτικά ώστε να δοθεί πλήρης εικόνα για την αρχή λειτουργίας της.



Εικόνα 22: Σχηματική διάταξη SLS – SLM

- a. *Κεφαλή Laser*. Η κεφαλή εκπέμπει εστιασμένη δέσμη για την τήξη και πυροσυσσωμάτωση της σκόνης του υλικού εκτύπωσης. Κινείται σε 2 άξονες κατά

το οριζόντιο επίπεδο, ή βρίσκεται σταθερή και η μεταφορά της δέσμης γίνεται από κατάλληλο κατοπτρικό μηχανισμό.

- b. *Σύστημα τροφοδοσίας σκόνης.* Μεταφέρει κατάλληλη ποσότητα σκόνης από το δοχείο τροφοδοσίας στο δοχείο εκτύπωσης.
- c. *Δοχείο τροφοδοσίας σκόνης.* Αποτελεί είτε δοχείο που κινείται κατά τον κατακόρυφο άξονα για να παρέχει αρκετή σκόνη για τη σύνθεση της επόμενης στρώσης, είτε σιλό που με κατάλληλο μηχανισμό απελευθερώνει περιορισμένη ποσότητα σκόνης μέσω της βαρύτητας.
- d. *Τεμάχιο προσθετικής κατασκευής.* Από την επιλεκτική τήξη του υλικού σε στρώσεις μέσω της δέσμης του Laser σχηματίζεται διαδοχικά η επιθυμητή γεωμετρία
- e. *Δοχείο εκτύπωσης.* Το δοχείο μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η προσθετική κατεργασία. Ο χώρος γεμίζει σε όλο του τον όγκο με σκόνη και η ποσότητα της σκόνης που δε στερεοποιείται εξ αιτίας του Laser λειτουργεί ως στηρικτικό για τις προεξοχές του σχηματιζόμενου τεμαχίου, ενώ μετά το πέρας της κατεργασίας τοποθετείται ξανά στο δοχείο τροφοδοσίας για χρήση σε επόμενη εκτύπωση.
- f. *Βάση δοχείου εκτύπωσης.* Κινείται κατακόρυφα με στόχο η στάθμη να βρίσκεται συνεχώς σε σταθερή απόσταση για το σχηματισμό της επόμενης στρώσης.

Το ενδιαφέρον που παρουσιάζει η μέθοδος έγκειται τόσο στην ποιότητα των παραγόμενων τεμαχίων, όσο στη δυνατότητά της να επεξεργάζεται μεγάλο εύρος υλικών, πολλά εκ των οποίων είναι γενικώς δυσκατέργαστα. Στην περίπτωση μεταλλικών υλικών όπου ο βασικός μηχανισμός του σχηματισμού του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι η τήξη η μέθοδος διατηρεί την ονομασία SLM (melting). Στην περίπτωση ωστόσο που το υλικό είναι μη-μεταλλικό, όπως για παράδειγμα στην κατεργασία κεραμικών κόνεων, ο μηχανισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται η σύνδεση των κόκκων είναι αυτός της πυροσυσσωμάτωσης και η μέθοδος διατηρεί την ονομασία SLS (sintering).

Το εργαστήριο κατεργασιών υψηλής ακριβείας του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ μελετά την παραπάνω μέθοδο. Στο πλαίσιο μιας σειράς διπλωματικών και μεταπτυχιακών εργασιών, καθώς και μιας διδακτορικής διατριβής έχει κατασκευαστεί μια πρωτότυπη μηχανή εκτύπωσης SLM που χρησιμοποιεί κατά βάση πολυμερείς σκόνες και δέσμη Laser ίνας εμπλουτισμένης με Ύτριο ισχύος 20W.

Για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων με πρόσθεση υλικού είναι δυνατό να επιστρατευτεί και η μέθοδος της επιφανειακής επίστρωσης. Μια διάταξη όπως

απεικονίζεται στην εικόνα 21 με ενσωμάτωση κατάλληλου συστήματος κίνησης μπορεί να εναποθέτει τη σκόνη του υλικού σε στρώσεις και την παραγωγή τρισδιάστατης γεωμετρίας. Αντίστοιχα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η συγκόλληση με δέσμη Laser. Η χρήση των δυο αυτών μεθόδων στην κατεργασία με πρόσθεση υλικού διερευνάται και αναπτύσσεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 8.

3. Το Κέντρο Κατεργασιών Laser CO₂ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Το κέντρο κατεργασιών που απασχολεί την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ανήκει στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Παραχωρήθηκε στον Τομέα το 2010 από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κατόπιν απόφασης του Πρυτανικού Συμβουλίου της και εντολή απομάκρυνσης του εξοπλισμού από τους χώρους της.

Η πηγή δέσμης Laser συνοδευόμενη από μηχανικό κέντρο κατεργασιών CNC τεσσάρων αξόνων είχε παραχωρηθεί το 2004 ως δωρεά από το Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ-Ι.Η.Δ.Α.) στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων με στόχο της χρήση του για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

Η πολυετής αδράνεια του κέντρου κατά την παραμονή του στους χώρους του ΕΜΠ οδήγησε στην απόσβεση της μνήμης του συστήματος ελέγχου (PLC) με αποτέλεσμα την απώλεια ζωτικών προγραμμάτων για τη χρήση του. Ως εκ τούτου το προαναφερθέν Πρυτανικό Συμβούλιο έκρινε το σύνολο της διάταξης «άχρηστο» και «άνευ μουσειακής αξίας» και για το λόγο αυτό αποφάσισε την απομάκρυνσή του. Την ίδια χρονιά, κατόπιν της επικύρωσης της παραπάνω απόφασης καταστροφής του εξοπλισμού, την κηδεμονία και αποθήκευσή του ανέλαβε ο Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Πραγματοποιήθηκε διαλογή και εγκαταστάθηκαν στο εργαστήριο κατεργασιών υψηλής ακρίβειας η μονάδα του Laser, το 4-αξονικό κέντρο κατεργασίας και η κεφαλή εστίασης της δέσμης. Η επιλογή έγινε με κριτήριο την κατάσταση του εξοπλισμού και τις συνολικές διαστάσεις του και στόχο τη μελλοντική επαναλειτουργία του, εφόσον δε διαπιστώθηκαν μηχανικές βλάβες. Από τα ηλεκτρικά και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα αποθηκεύτηκαν, οι ηλεκτρολογικοί πίνακες, οι κινητήρες, οι τερματικοί διακόπτες και οι καλωδιώσεις με στόχο τη χρήση τυχόν επιπλέον εξαρτημάτων ως ανταλλακτικά σε περιπτώσεις βλάβης, ή φθοράς.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 23) φαίνεται η πλήρης διάταξη του κέντρου κατεργασίας με την πηγή του Laser:



Εικόνα 23: Η εργαλειομηχανή Laser CO₂ του Τομέα

Τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν την εργαλειομηχανή στο σύνολό της είναι τα εξής:

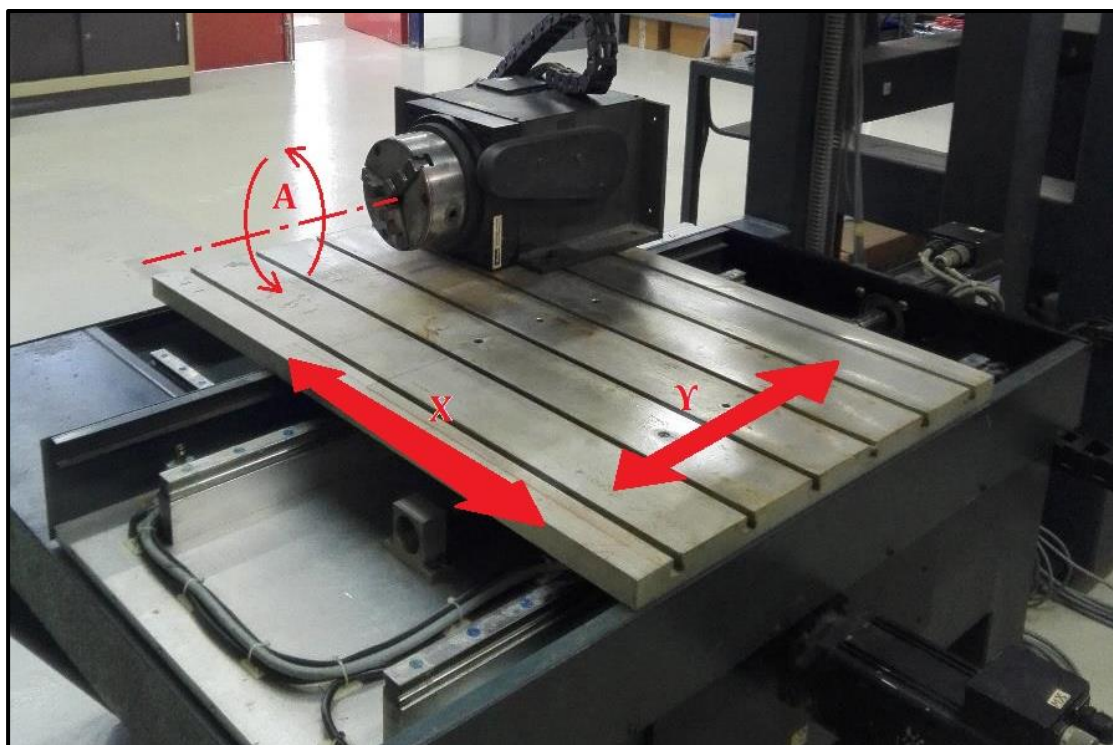
- Πηγή συνεχούς δέσμης Laser αερίου CO₂ ονομαστικής ισχύος 3kW, κατασκευής το 1994 από τη σκωτσέζικη εταιρία Laser Ecosse Ltd. (μοντέλο LE3000).
- Μηχανική τράπεζα κατεργασιών 3 αξόνων κίνησης με σύγχρονους τριφασικούς σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος Schneider (Telemechanique). Το τραπέζι κινείται γραμμικά κατά το οριζόντιο επίπεδο (γραμμικοί άξονες X και Y). Ο τρίτος άξονας του τραπεζιού είναι ο περιστροφικός A με κατάλληλο τσοκ τόρνου για την ακτινική επεξεργασία αξονοσυμμετρικών τεμαχίων ή δοκών.
- Μονάδα ελέγχου της εταιρίας NUM με σύστημα CNC 1060, PLC και σχετική οθόνη κονσόλα HMI. Η μονάδα ελέγχου στεγαζόταν σε δίφυλλο ηλεκτρολογικό πίνακα μαζί με το σύνολο των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που απαιτούνταν για τη λειτουργία του κέντρου.
- Ρυθμιστής εστίασης – απόστασης κεφαλής κοπής Laser (κατά τον κατακόρυφο άξονα Z) Precitec.
- Μονάδα βιομηχανικής ψύξης για παροχή νερού στην πηγή του Laser, κατασκευής από την ιταλική εταιρία MTA το 1994, μοντέλο TAE101.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται κατά βάση το πρώτο από τα παραπάνω τμήματα, την πηγή της δέσμης Laser. Κατ' επέκτασιν θα διερευνηθεί η λειτουργία της μονάδας ψύξης, διότι αποτελεί κομβικής σημασίας υποσύστημα για τη λειτουργία της πηγής.

Τα υπόλοιπα υποσυστήματα αποτέλεσαν το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας του συγγραφέα. Για λόγους πληρότητας ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή τους, καθώς και η περιγραφή των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής.

3.1 Βάση Μηχανικού Κέντρου Κατεργασίας & Τραπέζι CNC 3 αξόνων

Η βάση της μηχανής αποτελείται από συγκολλητές κοιλοδοκούς τετραγωνικής διατομής, καθώς και μεταλλικά ελάσματα. Ακολουθεί σχεδιασμό τύπου «στήλης» (column type), παρόμοιο με αυτό των συμβατικών φρεζών. Διαθέτει τράπεζα κινούμενη γραμμικά κατά το οριζόντιο επίπεδο (άξονες X και Y) επάνω σε γραμμικούς οδηγούς και ειδικό μηχανισμό με τσοκ για συγκράτηση και περιστροφή τεμαχίων κατά τον περιστροφικό άξονα A (Εικόνα 24). Η κίνηση επιτυγχάνεται από τριφασικούς σερβοκινητήρες χωρίς μηχανικό μειωτήρα. Η μετάδοση κίνησης στους γραμμικούς άξονες γίνεται με χρήση κοχλίων κίνησης (leadscrew) και περικοχλίων κίνησης με ανακυκλοφορούντα σφαιρίδια. Για τον άξονα A η μετάδοση κίνησης γίνεται μέσω συστήματος τροχαλίας – ιμάντα με λόγο μετάδοσης 1:2.

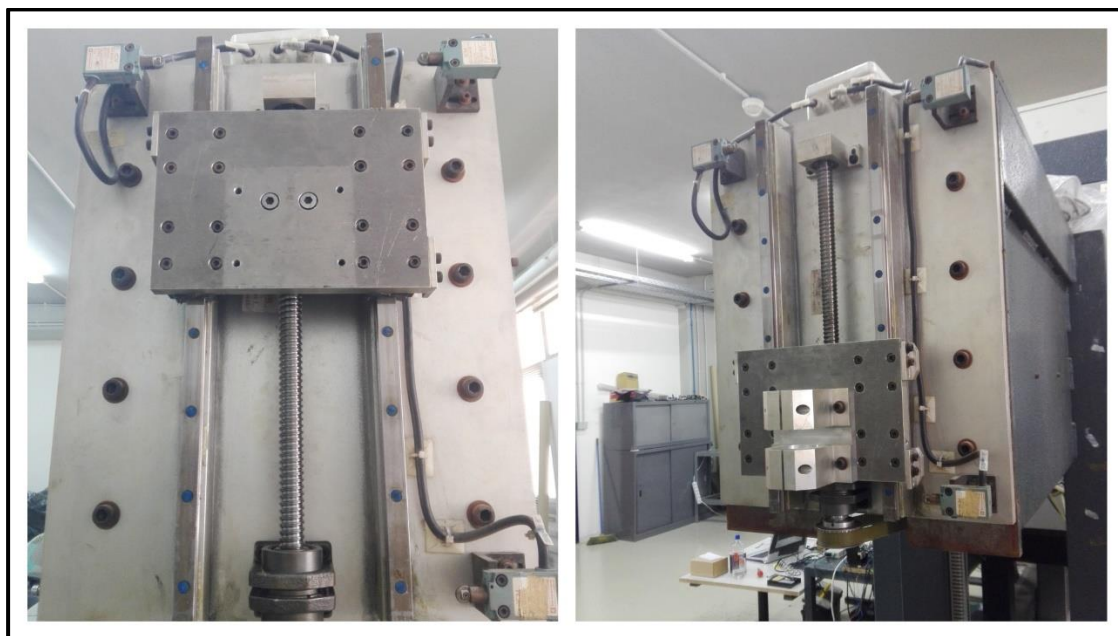


Εικόνα 24: Διάταξη 3αξονικής τράπεζας CNC του κέντρου

Η μέγιστη διαδρομή σε κάθε γραμμικό άξονα ανέρχεται στα 650mm. Η επίτευξη αρχικοποίησης (homíng) και η εύρεση των ορίων της διαδρομής γίνονται με χρήση οριακών διακοπών βαρέως βιομηχανικού τύπου.

3.2 Σύστημα κίνησης κεφαλής εστίασης

Στο άνω μέρος της στήλης του σκελετού βρίσκεται άλλη μια βαθμίδα γραμμικής κίνησης που επιτρέπει την κατακόρυφη μετακίνηση (άξονας Z) της κεφαλής εστίασης του Laser. Η κατασκευή της ακολουθεί τη λογική της τράπεζας, κάνοντας χρήση ιδίου τύπου διακοπών, κοχλίας και περικοχλίου κίνησης και μεταδίδοντας την κίνηση από το σερβοκινητήρα με σύστημα τροχαλίας μάντα με λόγο μετάδοσης 1:1. Ο σκοπός της κεφαλής εστίασης είναι η τοποθέτηση του ακροφύσιου μιας κεφαλής κατεργασίας στο κατάλληλο ύψος σε σχέση με το τεμάχιο για την κατεργασία του.



Εικόνα 25: Σύστημα κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα Z

3.3 Μονάδες οδήγησης σερβοκινητήρων

Η οδήγηση των σερβοκινητήρων της διάταξης πραγματοποιείται από αναλογικές μονάδες οδήγησης της εταιρίας NUM. Οι μονάδες αυτές αποτελούν ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες συνδέονται με τους κινητήρες και το σύστημα ελέγχου, διαμεσολαβούν στην επικοινωνία μεταξύ αυτών και φροντίζουν για την παροχή ισχύος στους κινητήρες.

Οι κινητήρες για τον προσδιορισμό της θέσης τους διαθέτουν αναλογικούς αναλυτές (resolvers) προσαρμοσμένους στην άτρακτό τους. Οι resolvers αποτελούνται από ένα σύνολο πηνίων, σταθερών και περιστρεφόμενων τα οποία μέσω επαγωγής μπορούν να

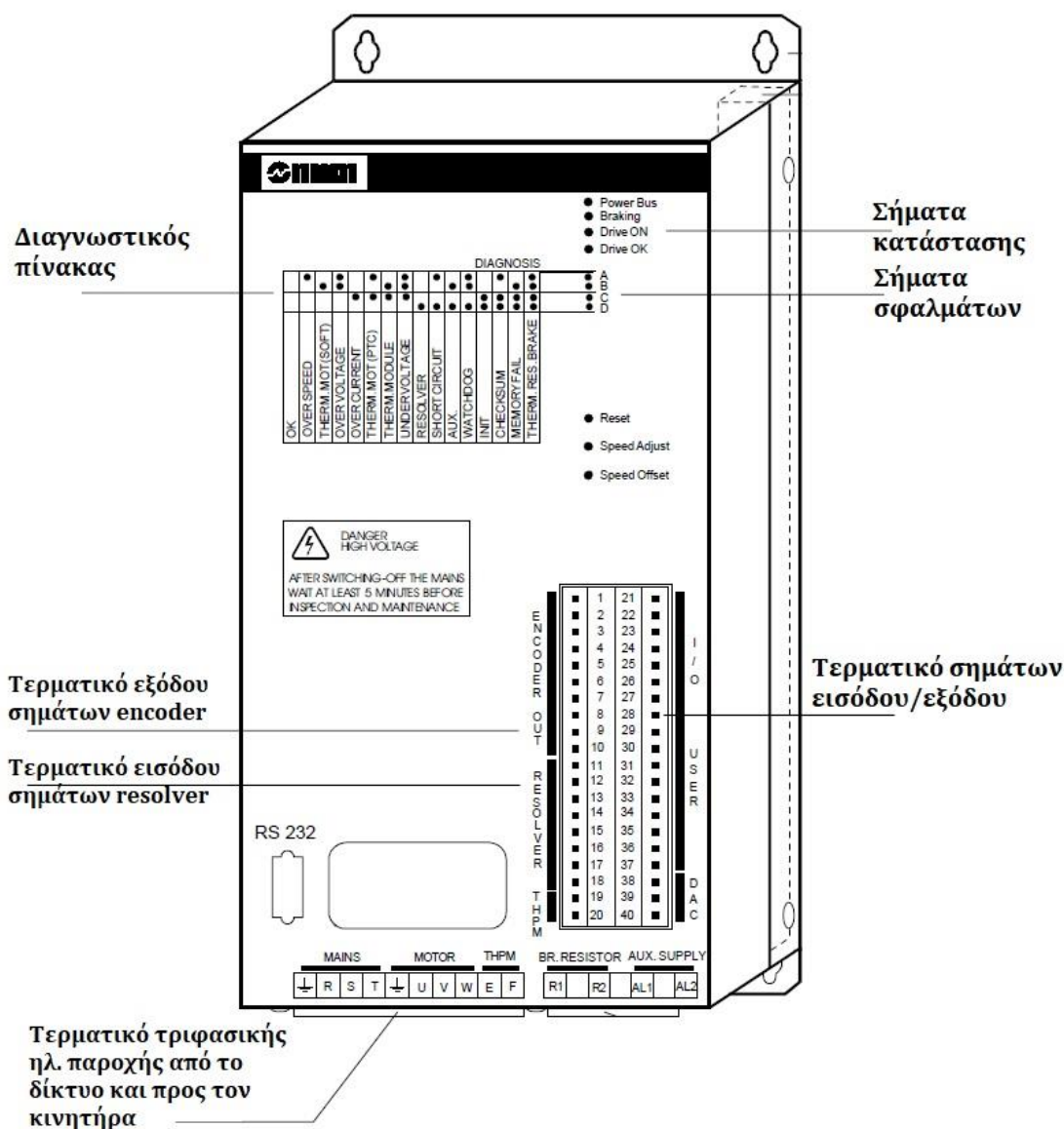
δώσουν πληροφορία για τη γωνία στην οποία βρίσκεται η άτρακτος του κινητήρα. Μέσω κατάλληλης επεξεργασίας από το σύστημα ελέγχου η πληροφορία αυτή συνδυαστικά για όλους τους κινητήρες του συστήματος παρέχει ανά πάσα στιγμή τη δυνατότητα της γνώσης των συντεταγμένων της τράπεζας και κατ' επέκτασιν του τεμαχίου στο χώρο εργασίας. Οι οδηγοί κάθε κινητήρα λαμβάνουν ως σήμα εισόδου το αναλογικό σήμα από τους resolver, το μετατρέπουν σε ψηφιακό σήμα βηματικού κωδικοποιητή τετραγωνικού παλμού (quadrature incremental encoder) και το εξάγουν στο σύστημα ελέγχου για επεξεργασία και προσαρμογή της κίνησης.

Επιπλέον, τα βασικά σήματα που διαχειρίζεται η μονάδα οδήγησης είναι τα εξής:

- Σήμα εισόδου ενεργοποίησης (enable): σήμα ασφαλείας. Χωρίς αυτό η μονάδα οδήγησης αποσυνπλέκεται ηλεκτρικά από το σύστημα και δεν αλληλεπιδρά με τους κινητήρες.
- Σήμα εισόδου ελέγχου: σήμα από το σύστημα ελέγχου που καθορίζει τον τρόπο παροχής ρεύματος στον κινητήρα για να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση μέχρι τις κατάλληλες συντεταγμένες. Το σήμα λαμβάνει τιμές σε ένα εύρος μεταξύ -10 και +10 Volt και αναλογικά προσαρμόζει την ταχύτητα και φορά περιστροφής του κινητήρα.
- Παροχή ηλεκτρικής ισχύος στον κινητήρα: Αποτελεί σήμα εξόδου, καθώς ανάλογα με το σήμα ελέγχου η παροχή μεταβάλλεται χρονικά για την επίτευξη της επιθυμητής κίνησης.

Στην Εικόνα 26 απεικονίζεται σχηματικά μια μονάδα οδήγησης και σημειώνονται τα σημεία εισόδου και εξόδου σημάτων και ηλεκτρικής παροχής.

Συμπληρωματικά αναφέρεται ότι στην πρόσοψή της η μονάδα οδήγησης διαθέτει υποδοχή για σειριακό καλώδιο DB9 για την άμεση επικοινωνία της με πρωτόκολλο RS232 με Η/Υ με σκοπό τη ρύθμιση και τη βαθμονόμηση της συσκευής με αλλαγή των εσωτερικών της ρυθμίσεων. Η ρύθμιση αυτή απαιτεί κατάλληλο πρόγραμμα παρεχόμενο από την εταιρία κατασκευής.



Εικόνα 26: Σχηματική απεικόνιση της μονάδας οδήγησης σερβοκινητήρα του κέντρου κατεργασιών

3.4 Μονάδα ελέγχου κέντρου κατεργασίας

Ο αρχικός έλεγχος του κέντρου κατεργασιών πραγματοποιούνταν μέσω Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (Programmable Logic Controller – PLC). Οι PLC είναι βιομηχανικού τύπου ψηφιακοί υπολογιστές με δυνατότητα πολλαπλών ψηφιακών εισόδων/εξόδων σήματος για τη ρύθμιση και το χρονισμό διεργασιών.

Ο PLC συνεργαζόμενος με βιομηχανικό ελεγκτή ψηφιακής καθοδήγησης NUM CNC 1060 πραγματοποιούσε τη διαχείριση των σημάτων και το συνολικό έλεγχο του κέντρου. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας που σήμανε την έναρξη της αποκατάστασης του κέντρου ο PLC με τον ελεγκτή NUM αφαιρέθηκαν από τη διάταξη και αντικαταστάθηκαν από Η/Υ με ανοικτό λογισμικό ελέγχου εργαλειομηχανών, LinuxCNC. Η αλλαγή αυτή

κρίθηκε αναγκαία, καθώς η εσωτερική μπαταρία του PLC είχε εξαντληθεί μετά από την πολυετή αδράνεια του συστήματος, διαγράφοντας απαραίτητα για τη λειτουργία του προγράμματα.

Το νέο σύστημα ελέγχου αποτελείται από σταθερό Η/Υ με λειτουργικό σύστημα Linux στο οποίο έχει εγκατασταθεί το ανοικτό λογισμικό LinuxCNC. Λεπτομέρειες για τη δομή και τη λειτουργία του LinuxCNC θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Η παρούσα παράγραφος αφορά τη γενική διάταξη του συστήματος ελέγχου.

Η διεπαφή του LinuxCNC με το κέντρο κατεργασιών πραγματοποιείται μέσω ενός ζεύγους ηλεκτρονικών καρτών κατασκευής της αμερικανικής εταιρίας Mesa Electronics. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται:

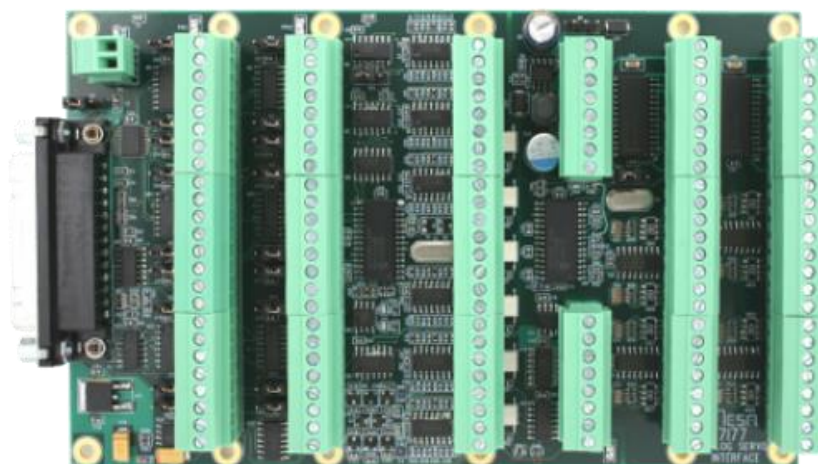
Μια κάρτα **Mesa 5i25** (Εικόνα 27), η οποία είναι κάρτα τύπου FPGA (Field-Programmable Gate Array). Αποτελεί μια συστοιχία προγραμματιζόμενων λογικών πυλών που συνδέεται μέσω θύρας περιφερειακού διαύλου PCI απευθείας στη μητρική πλακέτα του Η/Υ. Εν συντομία, πρόκειται για μια γενικής χρήσεως προγραμματιζόμενη κάρτα I/O.



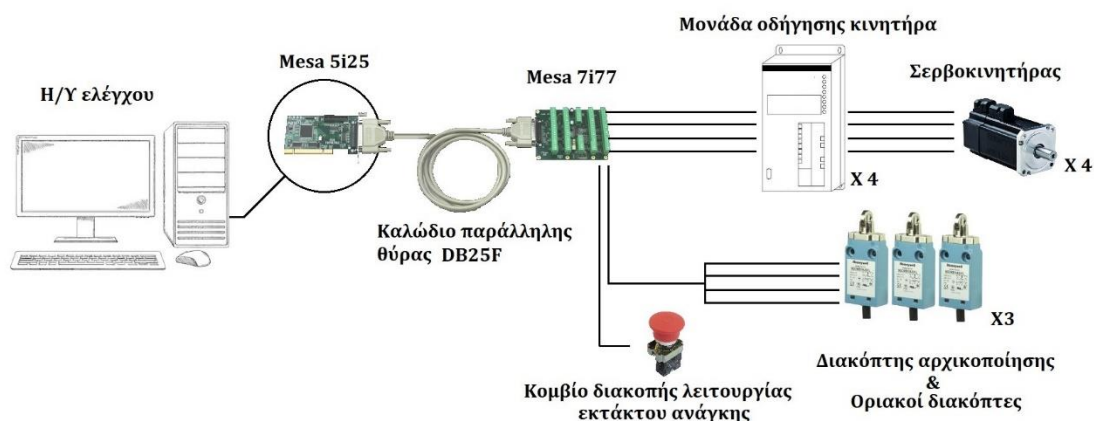
Εικόνα 27: Η κάρτα Mesa 5i25

Η παραπάνω κάρτα συνδέεται μέσω καλωδίου παράλληλης θύρας DB25F με τη θυγατρική κάρτα της (daughter-board) Mesa 7i77, η οποία περιλαμβάνει όλες τις ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους σήματος για τη διασύνδεση του συστήματος ελέγχου απευθείας με τα ελεγχόμενα εξαρτήματα.

Ειδικότερα, η Mesa 7i77 (Εικόνα 28) αποστέλλει αναλογικά σήματα εξόδου στις μονάδες οδήγησης για τον έλεγχο των κινητήρων, ενώ ο έλεγχος κλειστού βρόχου επιτυγχάνεται μέσω ψηφιακών σημάτων εισόδου βηματικού κωδικοποιητή που εξάγουν οι μονάδες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Παράλληλα διαθέτει ένα πλήθος ανεξάρτητων θυρών οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των διακοπών και των λοιπών εξαρτημάτων. Η γενική τελική διάταξη του συστήματος ελέγχου που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της προηγούμενης εργασίας απεικονίζεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 28: Η κάρτα Mesa 7i77



Εικόνα 29: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ελέγχου

3.5 Πηγή δέσμης Laser CO₂

Η πηγή της δέσμης του Laser αερίου της διάταξης αποτελεί ίσως το σημαντικότερο τμήμα της εργαλειομηχανής και το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής. Η διάταξη της πηγής παρουσιάζει το μεγαλύτερο αποτύπωμα όγκου σε σχέση με τα υπόλοιπα εξαρτήματα του κέντρου κατεργασιών, καθώς αποτελεί ενιαία κατασκευή, η οποία περιλαμβάνει όλα τα υποσυστήματά της εντός παραλληλεπιπέδου συνολικών διαστάσεων 2.40 x 1.70 x 0.90 m (Εικόνα 30).



Εικόνα 30: Η πηγή του Laser

Στο πλευρικό δεξί μέρος της πηγής βρίσκεται κονσόλα ελέγχου η οποία συνδέεται με ενσωματωμένο εσωτερικό Η/Υ ελέγχου. Στα μπροστινό μέρος της πηγής υπάρχει οπή εξόδου της δέσμης (Εικόνα 31α), ενώ στο πίσω μέρος βρίσκονται τοποθετημένες όλες οι εισοδοί των αερίων, του ψυκτικού νερού, της ηλεκτρικής παροχής και των σημάτων διεπαφής με το υπόλοιπο σύστημα (Εικόνα 31β).



Εικόνα 31: α) η οπή εξόδου της δέσμης (αριστερά)

β) οι υποδοχές νερού, αερίων, ηλεκτρικού ρεύματος και σημάτων (δεξιά)

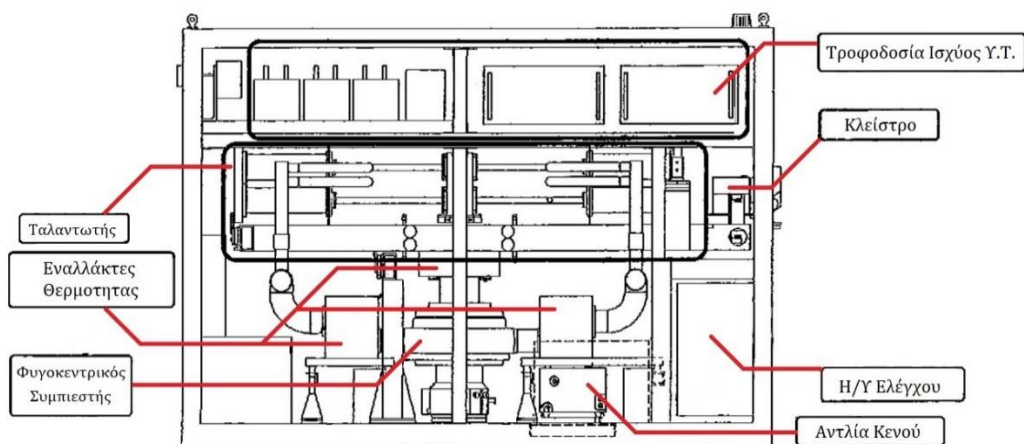
Η πηγή είναι δυνατόν να παράξει και να διατηρήσει συνεχή ονομαστική δέσμη laser ισχύος 3000Watt. Κατατάσσεται στην κατηγορία 4 των συστημάτων Laser (συνεχής δέσμη ισχύος ύψους έως 4000W ή παλμική δέσμη ύψους έως 8000KW).

Εντός της ενιαίας μονάδας της πηγής περιλαμβάνονται τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Ο οπτικός ταλαντωτής στον οποίο παράγεται η δέσμη
- Το σύστημα ανάμιξης και κυκλοφορίας των αερίων στο οποίο περιέχονται
 - Φυγοκεντρικός συμπιεστής
 - Αντλία κενού
- Εναλλάκτες θερμότητας για την ψύξη των αερίων
- Η τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (high-voltage DC current)
- Ο Η/Υ ελέγχου της μονάδας
- Το κιβώτιο του κλείστρου ελέγχου ροής της δέσμης

Για τη λειτουργία της μονάδας της πηγής του Laser χρησιμοποιείται επίσης εξωτερική μονάδα βιομηχανικής ψύξης νερού.

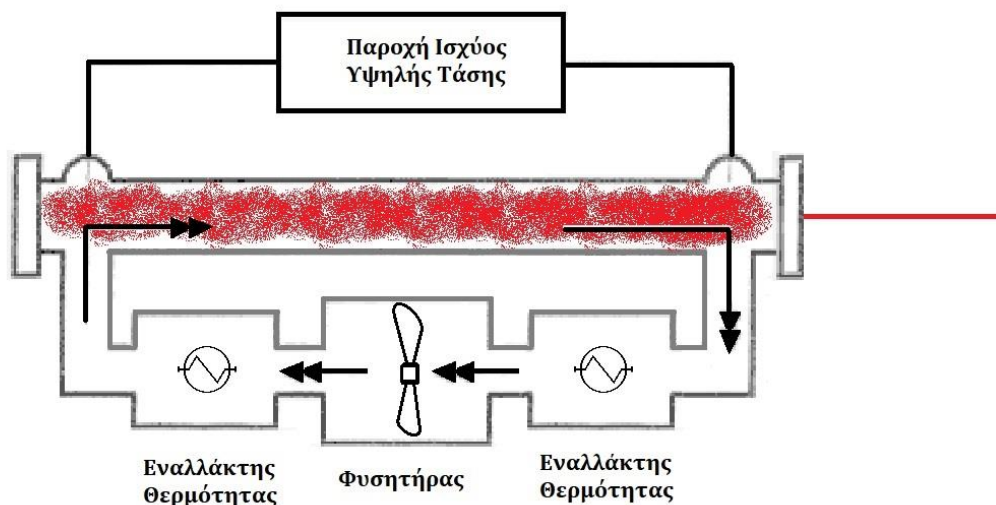
Στην Εικόνα 32 απεικονίζονται σχηματικά τα παραπάνω τμήματα που απαρτίζουν την ενιαία διάταξη της πηγής. Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της δομής και του τρόπου λειτουργίας αυτών και της εξωτερικής μονάδας ψύξης.



Εικόνα 32: Η ανατομία της πηγής του Laser

3.5.1 Οπτικός ταλαντωτής

Η μονάδα του Laser παράγει τη δέσμη χρησιμοποιώντας το υποσύστημα του οπτικού ταλαντωτή. Πρόκειται για ταλαντωτή Ταχείας Αξονικής Ροής αερίου (Fast Axial Gas Flow). Αυτή η κατηγορία ταλαντωτών επιβάλλει ροή του αερίου ενεργού μέσου μέσα στην κοιλότητα διέγερσης παράλληλη με αυτή της δέσμης (Εικόνα 33).



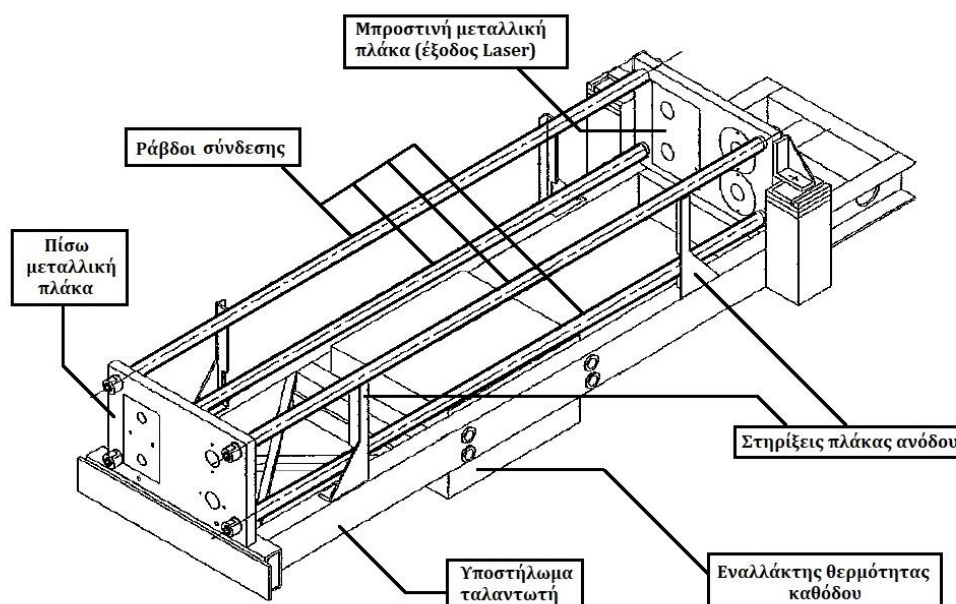
Εικόνα 33: Οπτικός ταλαντωτής ταχείας αξονικής ροής αερίου

Η μεγάλη ταχύτητα ροής επιτρέπει με τη χρήση των εναλλακτών θερμότητας, όπως αυτοί απεικονίζονται στο παραπάνω σχήμα τη γρήγορη ψύξη του υλικού. Η υψηλή ισχύς της παραγόμενης δέσμης έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου μέσου, γεγονός που, χωρίς την κατάλληλη μέριμνα για την ψύξη του θα οδηγούσε πολύ σύντομα μετά την έναρξη της παραγωγής της δέσμης του Laser σε υπερθέρμανση της διάταξης. Η επιλογή της αξονικής κατεύθυνσης της ροής σχετίζεται επίσης με την καλή ψύξη του αερίου και αποτελεί επίσης σχεδιαστικό παράγοντα που

υποδηλώνει ότι το Laser έχει κατασκευαστεί με κύριο σκοπό τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (διάτρηση, κοπή). Τα Laser που εστιάζουν στις εν λόγω κατεργασίες συνήθως υλοποιούνται με αξονική ροή διότι η διάταξη αυτή επιτρέπει σταθερότερες δέσμες σε μεγάλες τιμές ισχύος. Τα Laser CO₂ εγκάρσιας ροής, τα οποία αποτελούν την εναλλακτική επιλογή σχεδίασης, αν και γενικώς επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερες τιμές ισχύος ανά μέτρο θαλάμου διέγερσης, σε μεγάλες τιμές ισχύος τείνουν να παράγουν κακής ποιότητας δέσμη και παρουσιάζουν δυσκολίες στην παλμική λειτουργία.

Ο οπτικός ταλαντωτής της πηγής είναι κινηματικά μονωμένος σε σχέση με την περιβάλλουσα κατασκευή. Η μόνωση αυτή είναι αναγκαία για την αποφυγή σφαλμάτων ευθυγράμμισης στην περίπτωση μηχανικών παραμορφώσεων του βασικού πλαισίου της ενιαίας μονάδας.

Η στήριξη των κοιλοτήτων του ταλαντωτή πραγματοποιείται μεταξύ δυο επίπεδων μεταλλικών πλακών, οι οποίες φέρουν και τα κάτοπτρά του. Η απόσταση μεταξύ των πλακών καθορίζεται από μια ομάδα τεσσάρων κοίλων ράβδων ανοξείδωτου χάλυβα που λειτουργούν ως αποστάτες, όπως φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 34.

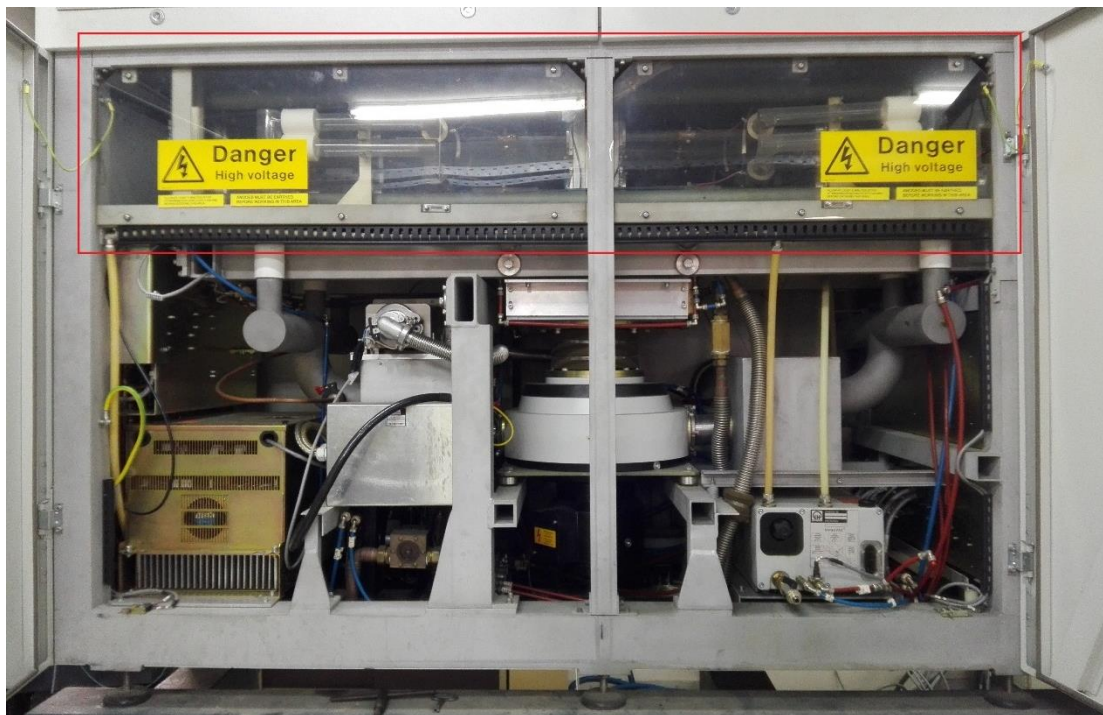


Εικόνα 34: Βάση στήριξης του οπτικού ταλαντωτή

Η παραλληλία μεταξύ των δυο πλακών επιτυγχάνεται, αρχικά μέσω υψηλών ανοχών στην κατεργασία των ράβδων και επιπλέον με την παροχή συνεχούς ψύξης του εσωτερικού τους με νερό κατά τη λειτουργία, για την αποτροπή παραμορφώσεων εξ αιτίας της άνισης θέρμανσης μεταξύ τους.

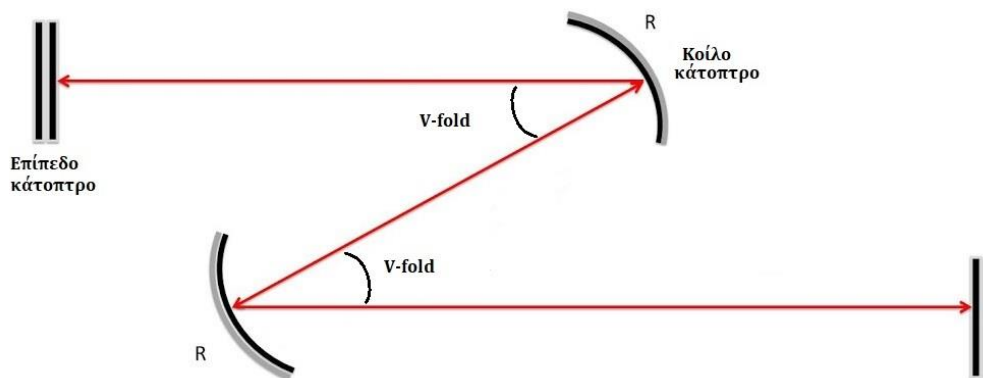
Η παραπάνω κατασκευή στηρίζεται σε πλαίσιο αλουμινίου που έχει υποστεί διεργασία ανακούφισης τάσεων (stress relieved), το οποίο αποτρέπει τη συστροφή της δομής του ταλαντωτή.

Η ίδια η οπτική διάταξη του ταλαντωτή περιλαμβάνει δυο σετ οριζόντιων θαλάμων διέγερσης, σε κατακόρυφη μεταξύ τους στοίχιση (Εικόνα 35).



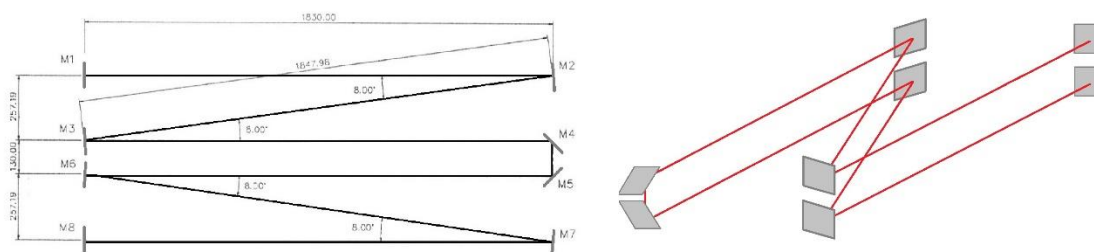
Εικόνα 35: Διάταξη θαλάμων ταλαντωτή

Ο ταλαντωτής αποτελείται από 2 πανομοιότυπα οριζόντια κομμάτια, διατεταγμένα σε κατακόρυφη στοίχιση μεταξύ τους. Κάθε τμήμα απαρτίζεται από τρία επιμέρους σκέλη σε αναδιπλούμενη διάταξη για την εξοικονόμηση χώρου και τη σύνθεση μιας στιβαρότερης κατασκευής. Η ανακατεύθυνση του φωτός γίνεται σε διαμόρφωση Z (z configuration – Εικόνα 36) με διαδοχικές αναδιπλώσεις τύπου V (V-folds) οι οποίες, σύμφωνα με τον κατασκευαστή προσδίδουν στην παραγόμενη δέσμη υψηλή ποιότητα και σταθερότητα. Σε κάθε σκέλος των επιμέρους τμημάτων βρίσκονται 2 σωλήνες εκκένωσης μέσα στους οποίους γίνεται η ενίσχυση του φωτός. Κάθε σωλήνας στο ένα άκρο του συνδέεται με την κάθοδο της πηγής άντλησης, ενώ στο άλλο στηρίζεται σε πλάκες στήριξης ηλεκτρικά απομονωμένες από το κύριο δομικό πλαίσιο της μονάδας. Η συμβολή των δυο δεσμών των θαλάμων επιτυγχάνεται μέσω δυο κατόπτρων, το ένα εκ των οποίων φροντίζει για τη διόρθωση της πόλωσης της δέσμης του Laser.



Εικόνα 36: Διαμόρφωση z με αναδιπλώσεις V

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της οπτικής διαδρομής της δέσμης με διαστάσεις σε mm, όπως αυτή δίνεται στο εγχειρίδιο χρήσης της πηγής (Εικόνα 37)



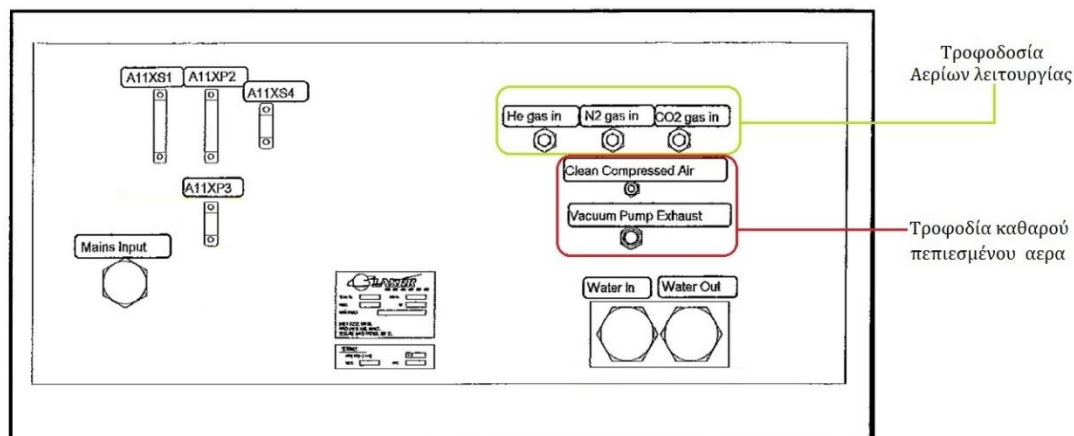
Εικόνα 37: Η οπτική διαδρομή της δέσμης και η διάταξή της στο χώρο

Συμπληρωματικά αναφέρεται πως από το διάφραγμα της εξόδου της πηγής εξέρχονται 2 διαφορετικές δέσμες. Η κύρια δέση της μέγιστης ισχύος των 3KW κινείται στο υπέρυθρο φάσμα με μήκος κύματος κοντά στα 10.6μm. Αυτό την καθιστά αόρατη στο ανθρώπινο μάτι. Για τον οπτικό της εντοπισμό εκπέμπεται παράλληλα, συνευθειακά και ομοαξονικά μια δεύτερη δέση χαμηλής ισχύος αερίου μέσου He-N η οποία έχει έντονο κόκκινο χρώμα και αποτελεί οπτικό στίγμα για την κύρια δέση.

3.5.2 Σύστημα ανάμιξης και κυκλοφορίας αερίων

Η μονάδα του LE3000 για τη λειτουργία της χρησιμοποιεί μίγμα αερίου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ηλίου (He) και αζώτου (N) ως ενεργό μέσο για την παραγωγή της δέσμης του Laser. Για τη λειτουργία επίσης απαιτείται καθαρός πεπιεσμένος αέρας.

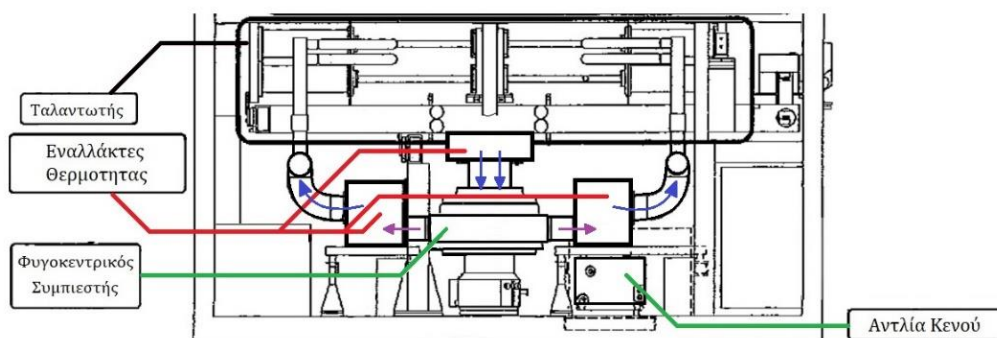
Η τροφοδοσία των αερίων γίνεται εξωτερικά, από την πίσω πλευρά της πηγής μέσω κατάλληλων υποδοχών (Εικόνα 38), από ξεχωριστές φιάλες και η ανάμιξή τους με τις σωστές αναλογίες πραγματοποιείται εντός της μονάδας του Laser από το σύστημα κυκλοφορίας και ανάμιξης αερίων.



Εικόνα 38: Υποδοχές αερίων πηγής LE3000

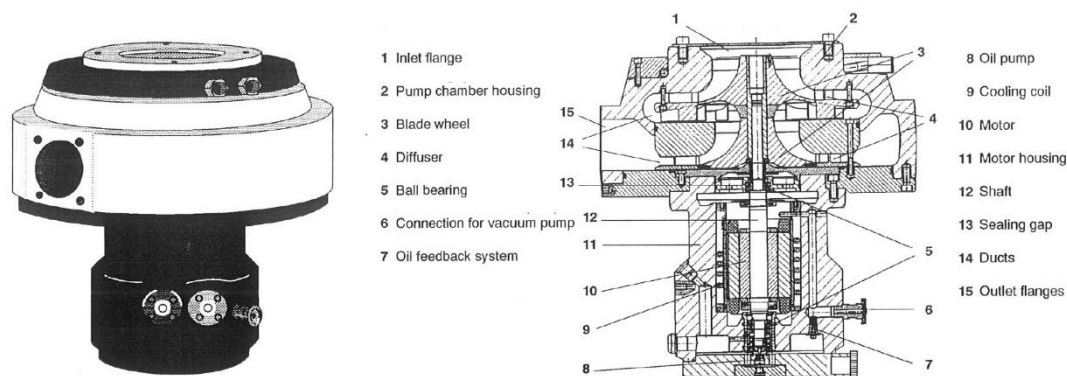
Η ισορροπία κατά τη λειτουργία της πηγής, καθώς και η σωστή κατανάλωση του αερίου επιτυγχάνεται με μικρές δόσεις του αερίου από το σύστημα ανάμιξης και την εκκένωση μιας μικρής, αλλά συνεχούς ποσότητάς του στους θαλάμους διέγερσης μέσω αντλίας κενού.

Η κύρια κυκλοφορία του αερίου μέσου πραγματοποιείται με τη χρήση φυγοκεντρικού συμπιεστή δυο βαθμίδων (2-stage centrifugal compressor). Ο συμπιεστής διαθέτει δυο εξόδους στην κατάθλιψη του και μόνο μία είσοδο αναρρόφησης. Το αέριο μέσο που εξέρχεται από τις εξόδους της κατάθλιψης διέρχεται μέσα από εναλλάκτες θερμότητας και στη συνέχεια περνά στις κοιλότητες του ταλαντωτή. Από εκεί, μέσω κατάλληλου ακροφύσιου πραγματοποιείται ελεγχόμενα ο ψεκασμός του μέσα στους εν κενό σωλήνες εκκένωσης για την ηλεκτρική του διέγερση και παραγωγή της δέσμης. Κατόπιν της διέγερσής του το αέριο ενεργό μέσο, έχοντας θερμανθεί σημαντικά διέρχεται από την κάθοδο των σωλήνων και μέσα σε έναν ακόμη εναλλάκτη θερμότητας. Ολοκληρώνει τον κύκλο του και εισέρχεται ξανά στο συμπιεστή μέσα από την αναρρόφηση. Η παραπάνω διάταξη φαίνεται σχηματικά παρακάτω στην εικόνα 39.



Εικόνα 39: Βασική διάταξη κύριας κυκλοφορίας αερίου της πηγής

Ο διβάθμιος συμπίεσής είναι σουηδικής κατασκευής, μοντέλο Turbostream D2500 της εταιρίας Leybold. Λειτουργεί στις 40000rpm σε πιέσεις μεταξύ 50 και 250 mbar και έχει δυνατότητα μεταφοράς όγκου αερίου σε εύρος 1000 – 2800 m³/h. Στην εικόνα 40 που ακολουθεί παρατίθεται εικόνα και σχεδιαστική τομή του συναρμολογήματος του συμπίεστή όπως αυτή απεικονίζεται στο εγχειρίδιο της πηγής.



Εικόνα 40: Ο φυγοκεντρικός συμπίεστής της πηγής

Επιπρόσθετα της κύριας κυκλοφορίας μια μικρή ποσότητα αερίου εξάγεται από την έξοδο του συμπίεστή. Το αέριο αυτό διέρχεται αρχικά μέσα από θερμαντήρα και στη συνέχεια από ένα στοιχείο καταλύτη. Ακολουθεί η ψύξη του μέσα σε εναλλάκτη θερμότητας και τελικά τροφοδοτείται στις στηρικτικές βάσεις που εδράζουν τους φακούς του οπτικού ταλαντωτή. Η βοηθητική αυτή κυκλοφορία έχει 2 στόχους.

Αρχικά, το στοιχείο του καταλύτη μετατρέπει το μονοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο που προκύπτουν από τη διάσπαση του διοξειδίου του άνθρακα εξ αιτίας της ηλεκτρικής διέγερσης μέσα στο θάλαμο ξανά σε διοξείδιο. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση αερίου από τη λειτουργία της μονάδας του Laser.

Κατά δεύτερον, η ροή του ψυχρού και φιλτραρισμένου από το κύριο σύστημα αερίου παρέχει ψύξη στους φακούς του ταλαντωτή, αυξάνοντας σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους και ρέοντας στην επιφάνειά τους αποτρέπει την εναπόθεση σωματιδίων σκόνης σε αυτή.

3.5.3 Τροφοδοσία ισχύος υψηλής τάσης

Όπως φαίνεται στη σχηματική απεικόνιση στην εικόνα 32 παραπάνω, στο άνω μέρος της μονάδας της πηγής του Laser υπάρχει το υποσύστημα της τροφοδοσίας της πηγής με ηλεκτρική ισχύ υψηλής τάσης. Το υποσύστημα αυτό λαμβάνει ως είσοδο τριφασική εναλλασσόμενη παροχή από το δίκτυο (Εικόνα 38, είσοδος «Mains Input») και μέσω κατάλληλης διάταξης μετατρέπει το ρεύμα σε συνεχές υψηλής τάσης, περίπου 35000 Volts. Το εν λόγω σύστημα αποτελείται από τρία βασικές μονάδες. Αρχικά η εισερχόμενη

τριφασική παροχή διέρχεται μέσα από *Μετατροπέα Ενίσχυσης Εισόδου* (Input Boost Converter) ο οποίος αυξάνει την τάση εισόδου. Στη συνέχεια η τροφοδοσία εισέρχεται σε *Αντιστροφέα Υψηλής Συχνότητας* (High Frequency Inverter) όπου το ρεύμα μετατρέπεται από εναλλασσόμενο σε συνεχές. Σε τρίτο στάδιο το συνεχές πλέον ρεύμα περνά στον *Μετασχηματιστή Υψηλής Τάσης* (High Voltage Transformer) όπου και η τάση αυξάνεται στα απαιτούμενα επίπεδα. Η τάση αυτή απαιτείται από τους σωλήνες διέγερσης της πηγής για την παραγωγή και ενίσχυση της δέσμης.

Το σύστημα μετατροπής ισχύος έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί την πηγή σε συνεχή και παλμική λειτουργία.

3.5.4 Η/Υ ελέγχου της μονάδας του Laser

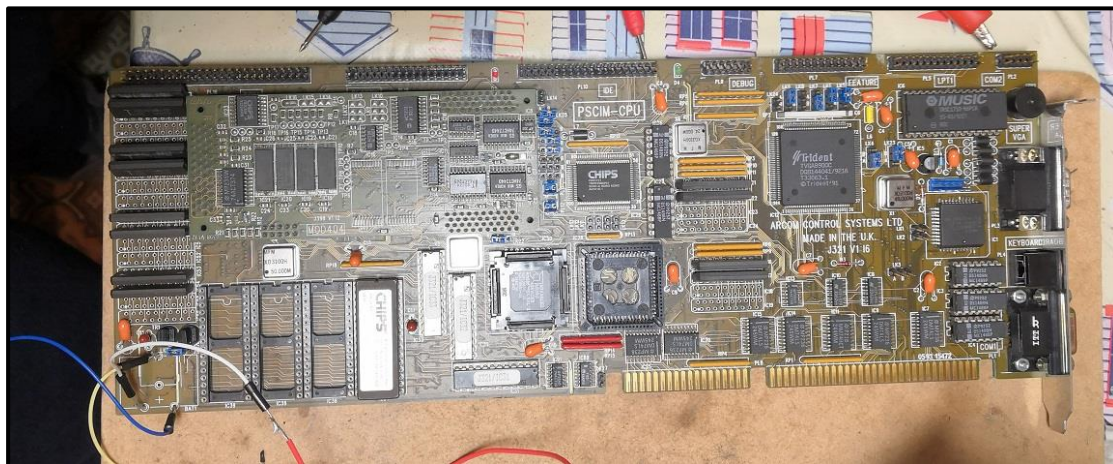
Η μονάδα του LE3000 ελέγχεται καθολικά με τη χρήση βιομηχανικού Η/Υ τοποθετημένου στο εσωτερικό της στη θέση που φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 32. Ο υπολογιστής ελέγχει την εκκίνηση του συστήματος και την παύση λειτουργίας, δίνει δυνατότητα για απευθείας έλεγχο της δέσμης του Laser από το χειριστή και περιλαμβάνει έτοιμα πρωτόκολλα λειτουργίας για τον αυτοκαθαρισμό του συστήματος. Ακόμα, παρέχει κατάλληλο γραφικό περιβάλλον (Graphic User Interface – GUI) στο οποίο απεικονίζονται σε οθόνη κονσόλας πληροφορίες για τη λειτουργία και καταγράφονται δεδομένα σχετικά με την παρουσία και την αποκατάσταση σφαλμάτων στα υποσυστήματα της πηγής. Τέλος, ρυθμίζει τη διεπαφή της μονάδας με το σύστημα ελέγχου της εργαλειομηχανής και παραλαμβάνει τις εξωτερικές εντολές ελέγχου της δέσμης.



Εικόνα 41: Ο Η/Υ ελέγχου της πηγής του Laser

Ο υπολογιστής είναι παλαιάς κατασκευής και ακολουθεί σχεδιασμό Η/Υ σε μια πλακέτα (single board based computer). Αποτελείται ολοκληρωτικά από μια πλακέτα, στην οποία βρίσκονται ενσωματωμένα όλα τα εξαρτήματα, πέραν των αποθηκευτικών μονάδων, όπως φαίνεται στην εικόνα 42. Για την αποθήκευση δεδομένων στην πλακέτα συνδέεται σκληρός δίσκος HDD χωρητικότητας 40MB, ο οποίος ακολουθεί πρωτόκολλο

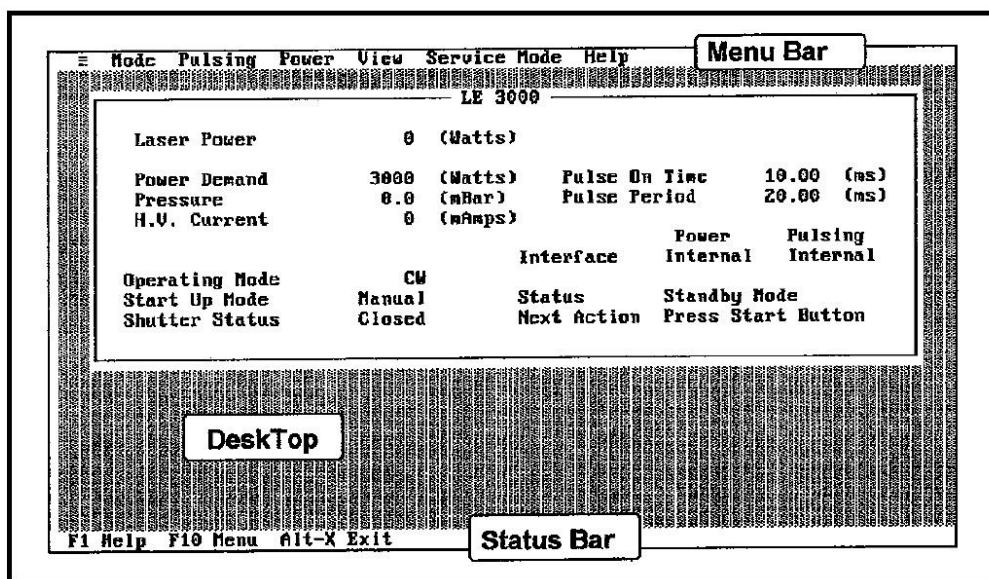
επικοινωνίας IDE (Integrated Drive Electronics), ένα παλιό πρωτόκολλο που προηγούταν των πιο σύγχρονων και διαδεδομένων SATA (Serial Advanced Technology Attachment) και περιλαμβάνει το λογισμικό ελέγχου της μονάδας. Για την επικοινωνία με εξωτερικά μέσα στην πλακέτα επίσης συνδέεται μονάδα ανάγνωσης δισκέτας Floppy.



Εικόνα 42: Η πλακέτα του Η/Υ της πηγής του Laser

Εντός της μονάδας του Η/Υ επίσης περιλαμβάνονται άλλες 3 κάρτες διεπαφής με τα επιμέρους τμήματα της πηγής του Laser. Οι κάρτες αυτές επικοινωνούν με την πλακέτα του Η/Υ μέσω ενδιάμεσης πλακέτας με θύρες διασύνδεσης περιφερειακών εξαρτημάτων, που προσομοιάζουν το γνωστό δίαυλο PCI.

Το λογισμικό ελέγχου βασίζεται σε DOS και περιλαμβάνει τα προαναφερθέντα εργαλεία. Ένα ενδεικτικό στιγμιότυπο του γραφικού περιβάλλοντος παρατίθεται στην εικόνα 43.

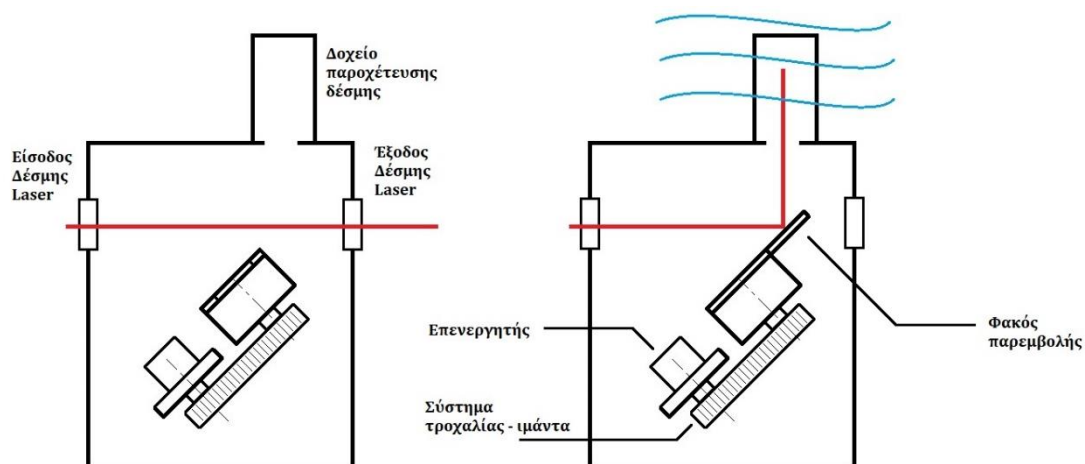


Εικόνα 43: Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού ελέγχου της πηγής

3.5.5 Κλείστρο ελέγχου ροής δέσμης

Ο σχηματισμός, η ενίσχυση και η σταθεροποίηση της δέσμης του Laser μέσα στον ταλαντωτή είναι μια διαδικασία που απαιτεί χρόνο. Δεν είναι δυνατή η εξ ολοκλήρου έναρξη και η λήξη της κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα σε μια κατεργασία κοπής, ή συγκόλλησης, δίνεται εντολή στη δέσμη να εκπέμπεται όσο εκτελούνται τροχιές πάνω στη γεωμετρία του τεμαχίου που πρέπει να κοπεί ή να κολληθεί. Σε κάθε άλλη περίπτωση όμως, όπως είναι η ταχεία μετακίνηση της κεφαλής για τη μετάβαση σε νέο σημείο κατεργασίας, εάν υπάρχει ροή φωτός από την κεφαλή μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Σε αυτές τις, μικρές συνήθως, μεταβάσεις το υποσύστημα του κιβωτίου του κλείστρου (shutter box) αναλαμβάνει τη διακοπή της εκπομπής της δέσμης.

Ο μηχανισμός του κλείστρου είναι αρκετά απλός ως προς την αρχή λειτουργίας του. Η δέσμη εισέρχεται από κατάλληλη οπή και στην περίπτωση που δεν καλείται διακοπή της πορείας της από το σύστημα ελέγχου εξέρχεται απερίσπαστη από το κιβώτιο του κλείστρου. Εάν δοθεί εντολή διακοπής, ένας σωληνοειδής ηλεκτρομαγνητικός περιστροφικός επενεργητής μετακινεί ένα φακό με μηχανισμό τροχαλίας-ιμάντα και τον παρεμβάλλει στην πορεία της δέσμης. Ο φακός τοποθετείται υπό γωνία 45 και ανακλά τη δέσμη σε δοχείο παροχέτευσης. Το δοχείο ψύχεται συνεχώς εξωτερικά από το σύστημα ψυκτικού νερού της μονάδας. Παραλαμβάνει και αποβάλλει τη θερμική ενέργεια της δέσμης για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα. Μόλις δοθεί εκ νέου κατάλληλη εντολή ελέγχου ο κινητήρας αποδεσμεύει το κάτοπτρο και η δέσμη συνεχίζει την πορεία της εκτός της πηγής. Η παραπάνω περιγραφόμενη διάταξη απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 44. Το σημείο στο οποίο βρίσκεται το κιβώτιο του κλείστρου απεικονίζεται στην εικόνα 32.



Εικόνα 44: Μηχανισμός κλείστρου διακοπής εκπομπής δέσμης

3.5.6 Εξωτερική μονάδα ψύξης νερού

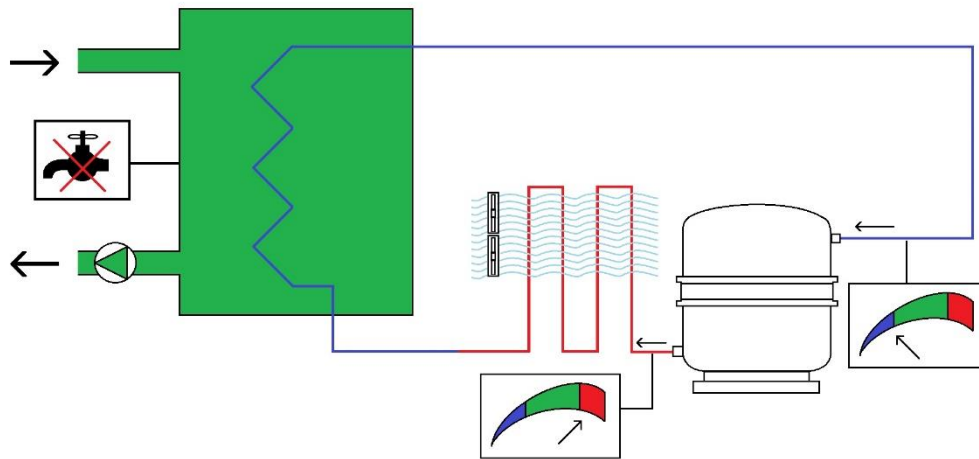
Η ψύξη των υποσυστημάτων της πηγής του Laser κατά τη λειτουργία της πραγματοποιείται με την κυκλοφορία νερού. Το νερό αυτό τροφοδοτείται από την υποδοχή Water In (Εικόνα 38) και εξέρχεται αντίστοιχα από την έξοδο Water Out. Η ψύξη του νερού γίνεται εξωτερικά από τη μονάδα του Laser από βιομηχανική μονάδα ψύξης (industrial water cooling unit – chiller) ιταλικής κατασκευής, μοντέλο TAE 101, της εταιρίας MTA, κατασκευασμένη όπως και η πλειοψηφία των εξαρτημάτων του κέντρου κατεργασίας το 1994.

Η ψυκτική μονάδα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 45).



Εικόνα 45: Η εξωτερική ψυκτική μονάδα του Laser

Η ψύξη του νερού γίνεται εσωτερικά του chiller σε στεγανό δοχείο εναλλαγής θερμότητας, σε συνεργασία με κατάλληλο κύκλωμα ψυκτικού υγρού. Το ψυκτικό υγρό είναι Freon 22 το οποίο ρέει υπό πίεση και ψύχεται με αέρα από μια συστοιχία ανεμιστήρων στο άνω μέρος της μονάδας. Εφόσον το κύκλωμα είναι κλειστό, επιβάλλεται η ύπαρξη κατάλληλου δοχείου διαστολής το οποίο παραλαμβάνει τις αυξομειώσεις όγκου του νερού. Το διάγραμμα ροής της εναλλαγής θερμότητας της ψυκτικής μονάδας φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 46. Το δοχείο διαστολής, η βάση στην οποία τοποθετείται, καθώς και η συστοιχία των ανεμιστήρων απεικονίζονται στην εικόνα 47.



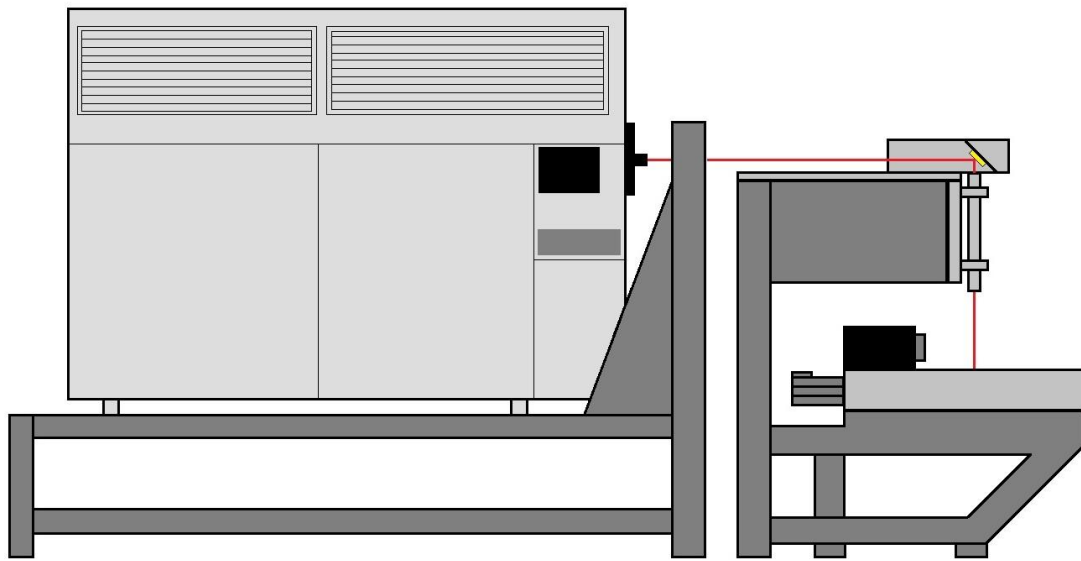
Εικόνα 46: Διάγραμμα ψυκτικής μονάδας



Εικόνα 47: Βασικά μέρη της μονάδας ψύξης

Να σημειωθεί πως η μονάδα ψύξης διαθέτει αντλία κίνησης του νερού η οποία φροντίζει για τη συνεχή παροχή του στη μονάδα του Laser υπό σταθερή πίεση 3.5bar. Η αντλία υποστηρίζει παροχές από 80 έως και 210 λίτρα ανά λεπτό. Η μονάδα του Laser διαθέτει κατάλληλο σύστημα ρύθμισης εισερχόμενης παροχής και τη διατηρεί στο κατώτατο όριο παροχής της αντλίας, τα 80 λίτρα/λεπτό.

Τα παραπάνω υποσυστήματα αποτελούν το σύνολο της πηγής LE3000. Η συνδυαστική τους λειτουργία οδηγεί στην παραγωγή μιας σταθερής δέσμης Laser υψηλής ισχύος, η οποία εξερχόμενη από τη μονάδα ανακατευθύνεται με κατάλληλα τοποθετημένο κάτοπτρο ανάκλασης όπως φαίνεται στην εικόνα 48. Εισερχόμενη στην κεφαλή εστίασης του κέντρου κατεργασιών συνεργάζεται με το σύστημα ελέγχου και τη μηχανική τράπεζα για την επίτευξη της απαιτούμενης κατεργασίας.



Εικόνα 48: Η συνολική διάταξη της εργαλειομηχανής και η πορεία της δέσμης εξωτερικά της πηγής

4. LinuxCNC

4.1 Εισαγωγή

Το LinuxCNC, παλαιότερα ονομαζόμενο EMC2 (Enhanced Machine Controller) αποτελεί πλατφόρμα λογισμικού ψηφιακής καθοδήγησης εργαλειομηχανών ανοικτού κώδικα. Ο αριθμητικός έλεγχος πραγματοποιείται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές γενικής χρήσης οι οποίοι πληρούν κάποιες ελάχιστες απαιτήσεις υλισμικού και λειτουργούν σε περιβάλλον Linux. Ο κώδικας του LinuxCNC είναι εξ ολοκλήρου ανοικτός, βασιζόμενος σε σύστημα GNU ή Linux και αναπτύσσεται στο μεγαλύτερο μέρος του από εθελοντές χρήστες ανά τον κόσμο οργανωμένους σε μια ενιαία διαδικτυακή κοινότητα. Η εγκατάστασή του γίνεται εύκολα σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή που πληροί τις προδιαγραφές και συναντάται κυρίως σε συστήματα Ubuntu και Debian. Ωστόσο υπάρχει δυνατότητα της εγκατάστασης και λειτουργίας του και σε άλλες εκδόσεις των Linux η οποία όμως απαιτεί συνήθως τη χειροκίνητη ρύθμιση για συμβατότητα από πλευράς του χρήστη.



Εικόνα 49: Το λογότυπο του LinuxCNC

Μέσω του LinuxCNC δίνεται η δυνατότητα ψηφιακού ελέγχου μεγάλου εύρους εργαλειομηχανών σε διαφορετικές διατάξεις. Οι πιο συνήθεις εφαρμογές συναντώνται σε κέντρα τόννευσης ή φρεζαρίσματος, καθώς και μηχανές διάτρησης CNC. Δίνεται επιπλέον η δυνατότητα ελέγχου ρομποτικών διατάξεων, όπως είναι οι ρομποτικοί βραχίονες, καθώς και πιο σύνθετων κέντρων κατεργασίας, με τον περιορισμό ο αριθμός των αξόνων ή των βαθμών ελευθερίας των αρθρώσεων να μην ξεπερνάει τους 9.

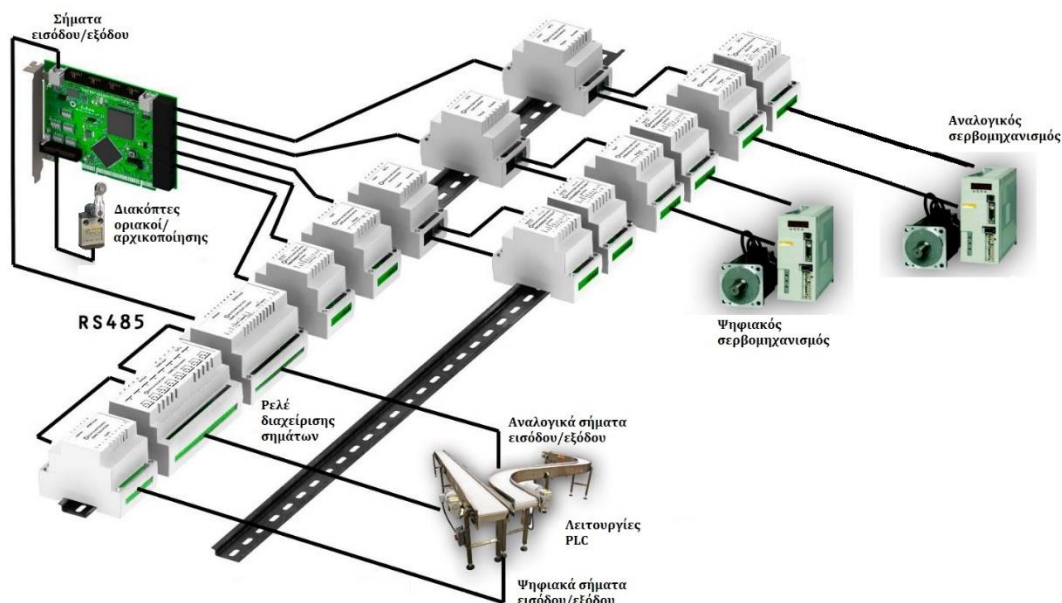
Η οδήγηση μέσω LinuxCNC υποστηρίζει διαφορετικά είδη επενεργητών. Κινητήρες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, βηματικοί κινητήρες και σερβομηχανισμοί, ρελέ ενεργοποίησης, γραμμικά και περιστροφικά σωληνοειδή. Ακόμα διαχειρίζεται σήματα εισόδου και εξόδου από και προς σερβοβαλβίδες, κομβία και διακόπτες,

αναλογικά και ψηφιακά μετρητικά όργανα, ακόμα και αυτόνομους ελεγκτές όπως είναι οι PLC.

Κατά βάση το LinuxCNC περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI), απόλυτα προσαρμόσιμο από το χρήστη για τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.
- Μεταγλωττιστή (interpreter) των εντολών του G-κώδικα σε γλώσσα RS-274.
- Σύστημα παρακολούθησης της κίνησης των αξόνων της μηχανής σε πραγματικό χρόνο (Real Time) μέσα από το GUI.
- Σύστημα παρακολούθησης και διάγνωσης της λειτουργίας των ηλεκτρο-μηχανικών εξαρτημάτων και των αισθητήρων της ελεγχόμενης διάταξης.
- Οδηγό προσαρμογής σε διαφορετικές εργαλειομηχανές μέσω κεντρικού αρχείου ρυθμίσεων (configuration) και σχεδιασμού «εικονικής πλακέτας» (HAL Layer).
- Λογισμικό προγραμματισμού PLC με κλιμακωτά διαγράμματα (Ladder programming).

Η καθοδήγηση διατάξεων μέσω LinuxCNC υποστηρίζει αναλογικούς και ψηφιακούς σερβομηχανισμούς με ανάδραση κλειστού βρόχου από το λογισμικό στον υπολογιστή. Έλεγχος ανοικτού βρόχου μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη χρήση βηματικών κινητήρων. Τα σήματα εισόδου/εξόδου μεταφέρονται είτε απευθείας μέσω κατάλληλης θύρας στον Η/Υ, είτε διέρχονται πρώτα μέσα από ειδικές ηλεκτρονικές κάρτες διεπαφής, που αναγνωρίζουν και ρυθμίζουν τη διέλευση των σημάτων.



Εικόνα 50: Διασύνδεση LinuxCNC μέσω κάρτας διεπαφής

Ο έλεγχος μέσω LinuxCNC υποστηρίζει:

- Το συνεχές έλεγχο της ταχύτητας πρόωσης των αξόνων, ή περιστροφής των αρθρώσεων.
- Την ρύθμιση των στροφών των ατράκτων.
- Την ταυτόχρονη και συγχρονισμένη κίνηση των αξόνων ή των αρθρώσεων.
- Τον έλεγχο σφαλμάτων απόκλισης από τη ζητούμενη θέση (real vs commanded position).
- Την αντιστάθμιση του μήκους και της ακτίνας εργαλείων.
- Κύκλους σύνθετων εργασιών όπως είναι η διάνοιξη σπειρωμάτων.
- Την δυναμική προσαρμογή της ταχύτητας πρόωσης κατά την κατεργασία (adaptive feed rate).

Η οδήγηση δεν περιορίζεται μόνο σε καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων. Το λογισμικό περιέχει έτοιμα αρχεία ρυθμίσεων (configuration files) για την προσαρμογή ελεγκτών σε εξάποδα ρομπότ και συστήματα με περιστροφικούς συνδέσμους, συγκεκριμένα παραδείγματα τα ρομπότ τύπου PUMA και SCARA.

Το LinuxCNC χρησιμοποιεί επεκτάσεις πραγματικού χρόνου (real-time extensions). Οι επεκτάσεις αυτές επιτρέπουν την εκτέλεση εργασιών μέσα σε πολύ στενά χρονικά πλαίσια, της τάξης των δεκάδων microsecond. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική, καθώς εξασφαλίζει αμελητέες καθυστερήσεις στην εκτέλεση πράξεων και την έκδοση εντολών για την κατεργασία. Η δυνατότητα διεργασιών πραγματικού χρόνου δεν είναι δεδομένη σε πολλά λειτουργικά συστήματα, μεταξύ αυτών και αρκετές διανομές των Linux. Η έκδοση Debian Wheezy's με την οποία διανέμεται το Linuxcnc υποστηρίζει εργασίες πραγματικού χρόνου και έχει προ εγκατεστημένη τη δυνατότητα.

Το λογισμικό LinuxCNC σε μορφή .ISO το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας (έκδοση LinuxCNC 2.7) είναι διαθέσιμο από τον σύνδεσμο:

<http://www.linuxcnc.org/linuxcnc-2.7-wheezy.iso>

Η εγκατάσταση έγινε μέσω USB σε μονάδα H/Y με κατάλληλα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Τα κατώτατα τεχνικά χαρακτηριστικά που απαιτεί το LinuxCNC αναγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης του και είναι τα παρακάτω:

- Αρχιτεκτονική H/Y: 32 bit.

- Μνήμη RAM: τουλάχιστον 512Mb για την ομαλή λειτουργία του LinuxCNC και του αντίστοιχου λειτουργικού συστήματος Linux. Νεότερες εκδόσεις των Linux, ιδιαίτερα διανομές Ubuntu απαιτούν τουλάχιστον 1Gb μνήμης RAM.
- Επεξεργαστής: Pentium II ή νεότερος, με συχνότητα το λιγότερο 400MHz.
- Αποθηκευτικός χώρος: Κατ' ελάχιστον 4Gb.

Παρατηρείται πως οι σύγχρονοι Η/Υ υπερβαίνουν κατά πολύ τις παραπάνω απαιτήσεις. Γίνεται σαφώς φανερό πως ακόμα και ένας παλαιός Η/Υ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση και λειτουργία του LinuxCNC. Αυτή η δυνατότητα καθιστά το LinuxCNC ιδανική επιλογή για τη μετασκευή συστημάτων μεγάλης ηλικίας, ή τη μετατροπή συμβατικών εργαλειομηχανών σε CNC με χαμηλά κόστη.

Σε αυτό το σημείο καλό θα ήταν να σημειωθεί πως η χρήση φορητών υπολογιστών δε συνιστάται για τη λειτουργία του LinuxCNC. Ακόμα και αν οι προδιαγραφές πληρούνται τυπικά τα laptops αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα με τις διεργασίες πραγματικού χρόνου και πρέπει να αποφεύγονται. Ομοίως συνιστάται η αποφυγή υπολογιστών με ενσωματωμένη κάρτα γραφικών στον επεξεργαστή. Αυτές οι κάρτες χρησιμοποιούν τη μνήμη RAM του συστήματος για τη λειτουργία τους επιβαρύνοντάς το. Σταθεροί Η/Υ με αρχιτεκτονική 32 bit, διακριτή κάρτα γραφικών που πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις μνήμης και αποθηκευτικού χώρου είναι η ιδανική επιλογή.

4.2 Η Δομή και το Περιβάλλον λειτουργίας του LinuxCNC

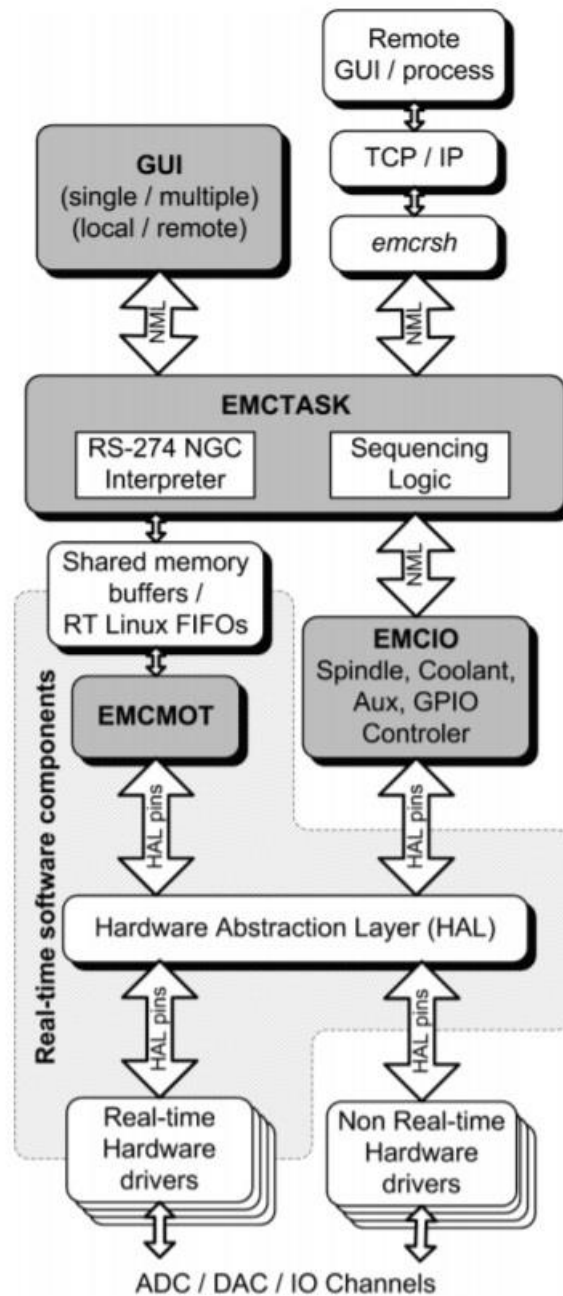
Η ευελιξία του LinuxCNC ως προς τον έλεγχο του μεγάλου εύρους διατάξεων κινητήρων και συσκευών προκύπτει από την εσωτερική δομή του. Η κίνηση των πληροφοριών και των εντολών πραγματοποιείται στρωματικά ανά επίπεδο ως εξής:

- Αρχικά το ανώτατο επίπεδο είναι αυτό του γραφικού περιβάλλοντος. Ο χρήστης αλληλεπιδρά με το GUI, δίνει τις εντολές και λαμβάνει πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματός του και την ύπαρξη σφαλμάτων.
- Πίσω από το γραφικό περιβάλλον, η μετάφραση του G-κώδικα και η διευθέτηση των ακολουθιών εντολών πραγματοποιούνται στο επίπεδο Εκτέλεσης Διεργασιών (EMCTASK).
- Στο επίπεδο EMCTASK οι εντολές που αφορούν κίνηση μεταβιβάζονται μέσω του Διαχειριστή Κίνησης (EMCMOT) σε πραγματικό χρόνο. Στον EMCMOT γίνεται ο σχεδιασμός της τροχιάς και μεταδίδονται οι εντολές για τη μετακίνηση των αξόνων.

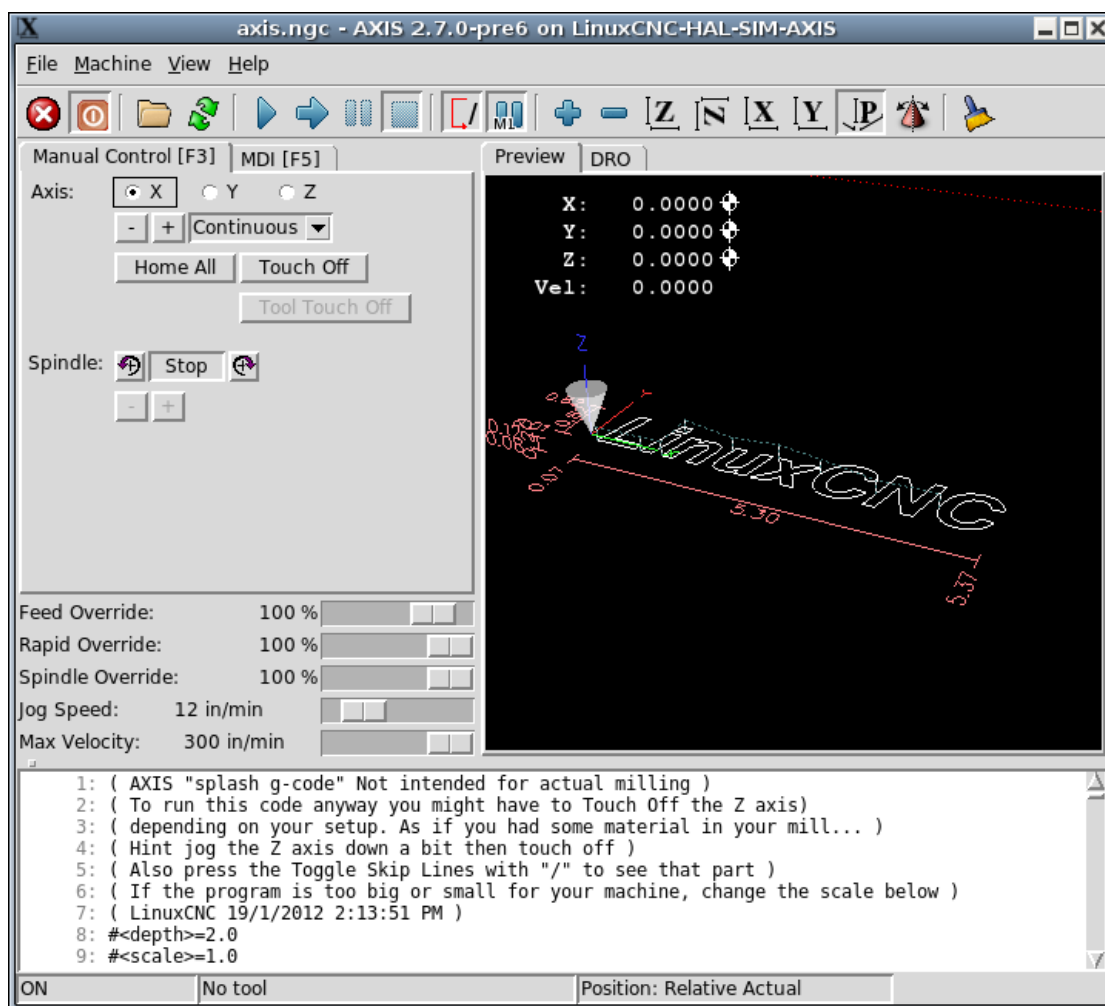
- Σε παράλληλο επίπεδο με τον EMCOT βρίσκεται ο Διαχειριστής Θυρών I/O (EMCIO), το επίπεδο διαχείρισης όλων των σημάτων εισόδου-εξόδου από και προς τον Η/Υ για τα οποία δεν απαιτείται η λειτουργία πραγματικού χρόνου.
- Ανάμεσα στα δυο παραπάνω παράλληλα επίπεδα και την έξοδο των σημάτων από τον Η/Υ προς τις ελεγχόμενες συσκευές παρεμβάλλεται το επίπεδο του Εικονικού Υλισμικού (Hardware Abstraction Layer - HAL). Το επίπεδο αυτό υλοποιείται ως μια εικονική πλακέτα η οποία μπορεί να περιλαμβάνει οποιαδήποτε ηλεκτρονικά εξαρτήματα θα μπορούσαν να συναντηθούν σε μια πραγματική. Προσομοιώνει τη λειτουργία τους σε επίπεδο λογισμικού, τη δοκιμή και λειτουργία οποιασδήποτε διάταξης hardware, χωρίς να είναι απαραίτητη η υλική παρουσία των εξαρτημάτων. Αυτό το στοιχείο δίνει μεγάλη ευελιξία στο LinuxCNC για τον έλεγχο οποιασδήποτε ηλεκτρομηχανικής διάταξης πέραν των εργαλειομηχανών.
- Αφού τα σήματα, τόσο πραγματικού χρόνου (παλμοί σερβοκινητήρων και ανάδραση κωδικοποιητών) όσο και μη πραγματικού χρόνου (ενεργοποίηση ή παύση κυκλοφορίας λιπαντικού και ψυκτικού, αλλαγή εργαλείου, μεταβολή στροφών ατράκτου κτλ.) καταλήγουν στις φυσικές συσκευές και οι διεργασίες υλοποιούνται στην ηλεκτρομηχανική διάταξη του κέντρου κατεργασιών.

Η παραπάνω αρχιτεκτονική απεικονίζεται σχηματικά παρακάτω, στην εικόνα 51.

Το γραφικό περιβάλλον του LinuxCNC αντικαθιστά την κονσόλα της εργαλειομηχανής. Για το σκοπό αυτό ο βασικός του σχεδιασμός περιλαμβάνει όλες τις βασικές λειτουργίες της κονσόλας, όπως είναι για παράδειγμα η χειροκίνητη εισαγωγή εντολών G-Κώδικα, εικονικό κομβίο διακοπής εκτάκτου ανάγκης και η προσομοίωση της τροχιάς του εργαλείου σύμφωνα με το εκτελούμενο πρόγραμμα. Το γεγονός ότι το LinuxCNC είναι ανοικτό λογισμικό, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται πολλά και διαφορετικά γραφικά περιβάλλοντα. Το δημοφιλέστερο είναι το AXIS GUI το οποίο έχει σχεδιαστεί κατά βάση για καρτεσιανά συστήματα 3 αξόνων και χρησιμοποιείται ήδη για τον έλεγχο της εργαλειομηχανής Laser του τομέα.



Εικόνα 51: Η αρχιτεκτονική του LinuxCNC



Εικόνα 52: Το γραφικό περιβάλλον AXIS GUI του LinuxCNC

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 52) έχει καταγραφεί ένα στιγμιότυπο από τη λειτουργία του περιβάλλοντος AXIS GUI για κατεργασία κοπής ή χάραξης σε κέντρο κατεργασίας 3 αξόνων. Στο λευκό τμήμα στο κάτω μέρος της οθόνης απεικονίζεται η διαδοχή των εντολών του G-κώδικα βάση του αρχείου της κατεργασίας που χρησιμοποιείται. Οι συντεταγμένες των αξόνων δίνουν πληροφορίες για την απόλυτη θέση του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Στη γραμμή του βασικού μενού στο πάνω μέρος υπάρχουν πλήκτρα για την εκκίνηση, την παύση και την αναγκαστική διακοπή, καθώς και για την προσπέλαση και επιτόπου επεξεργασία του κώδικα. Ανάμεσά τους υπάρχει ειδικό μενού που περιλαμβάνει πληροφορίες για την πρόωση και τις στροφές της ατράκτου, μπάρες για την παράκαμψη του προγράμματος και χειροκίνητη αυξομείωση των παραπάνω, καθώς και παράθυρο προεπισκόπησης και επισκόπησης της κατεργασίας.

Για την εισαγωγή εντολών στην εικονική κονσόλα χρησιμοποιούνται οι 3 βασικοί τρόποι που χρησιμοποιούνται από τις κλασικές εργαλειομηχανές CNC. Χειροκίνητη εισαγωγή

εντολών (Manual), Αυτόματη (Auto), και MDI (Manual Data Input). Η λειτουργία MDI δίνει τη δυνατότητα εγγραφής μεμονωμένων εντολών για εκτέλεση. Η διαφορά της με τη λειτουργία manual έγκειται στο γεγονός ότι στην τελευταία δε γίνεται χρήση εντολών, αλλά πρόσδοση στροφών ατράκτου και πρόωσης σε έναν άξονα απευθείας μέσα από το μενού ή με τη χρήση εξωτερικού χειριστηρίου ή μοχλού (jogging operation). Η αυτόματη λειτουργία εκτελεί τις όλες τις εντολές που έχουν εισαχθεί από ένα ολόκληρο αρχείο G-κώδικα.

4.3 Διεπαφή μέσω ηλεκτρονικών καρτών της Mesa Electronics

Για τη διασύνδεση του κέντρου κατεργασιών με τον Η/Υ και το LinuxCNC κατέστη αναγκαία η προμήθεια και χρήση ειδικών ηλεκτρονικών καρτών διεπαφής, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3. Οι μονάδες οδήγησης των σερβοκινητήρων του κέντρου κατεργασιών είναι αναλογικού τύπου και ο έλεγχός τους γίνεται κατ' αρχήν με αναλογικό σήμα $\pm 10V$ που ελέγχει τη φορά περιστροφής και την ταχύτητα. Δίχως τη χρήση των καρτών θα απαιτούταν εκτενής προγραμματισμός του HAL από το μηδέν, ώστε να διαχειρίζεται παλμούς που να προσομοιώνουν την αναλογική μεταβολή της τάσης ελέγχου σε πραγματικό. Σε αυτή την περίπτωση πιθανότατα να ήταν απαραίτητη ούτως, ή άλλως η προσθήκη κάποιας υλικής διάταξης ενίσχυσης, ή αντιστροφής πολικότητας, καθώς μια απλή κάρτα εισόδου/εξόδου σημάτων στον Η/Υ διαχειρίζεται σήματα τάσης 3.3V και 5V, αφήνοντας έτσι εκτός εμβέλειας τις τιμές από 5V έως 10V.

Η επιλογή καρτών έγινε κατόπιν αναζήτησης στα σχετικά forum της κοινότητας του LinuxCNC. Το σετ καρτών της εταιρίας Mesa Electronics, 5i25 & 7i77 κρίθηκε κατάλληλο για την εφαρμογή, αρκετά οικονομικό και, επιπρόσθετα, από τις απαραίτητες για τη λειτουργία της μηχανικής τράπεζας επαφές προσέδιδε έναν επιπλέον ικανοποιητικό αριθμό ο οποίος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση της πηγής. Η συνοπτική περιγραφή τους έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όμως κρίνεται απαραίτητο να αναπτυχθεί η δομή και η χρήση τους σε αυτό το κεφάλαιο, τόσο για λόγους πληρότητας, όσο και επειδή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και για τη διασύνδεση και τον έλεγχο της πηγής του Laser.

Η κάρτα **Mesa 5i25** (Εικόνα 27) όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελεί FPGA τύπου κάρτα, ή απλούστερα μια γενικής χρήσεως προγραμματιζόμενη κάρτα I/O. χρησιμοποιεί μια τυπική παράλληλη θύρα DB25F για την επικοινωνία της με τα εξαρτήματα της ελεγχόμενης εργαλειομηχανής και συνδέεται απευθείας με τη μητρική πλακέτα του Η/Υ ελέγχου μέσω θύρας PCI Express.

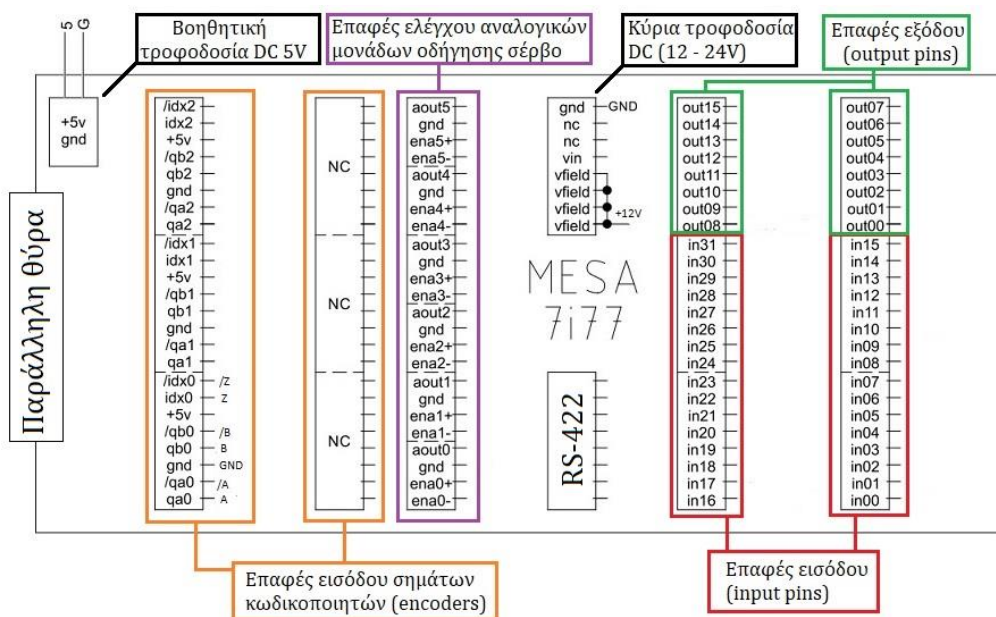
Η διαφορά της από μια απλή κάρτα παράλληλης θύρας εστιάζει στο γεγονός ότι οι θύρες της, είτε εξόδου είτε εισόδου είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Ταυτόχρονα, υπάρχουν έτοιμο υλικολογισμικό (firmware) ενσωματωμένο στον οδηγό εγκατάστασης του linuxCNC που καθιστά εύκολη, σχεδόν αυτοματοποιημένη τη διασύνδεσή της με συστήματα που περιλαμβάνουν κωδικοποιητές, βηματικούς κινητήρες ή ψηφιακούς και αναλογικούς σερβομηχανισμούς. Επιπλέον υπάρχουν επίσης έτοιμα αρχεία ρυθμίσεων (configuration files) που ρυθμίζουν και απλουστεύουν τη διεπαφή της με θυγατρικές κάρτες, όπως είναι η Mesa 7i77. Η παράλληλη θύρα της λειτουργεί σε τάσεις 3.3V και 5V και διαθέτει επίσης και 34 ξεχωριστές επαφές I/O στις οποίες μπορεί να τοποθετηθεί κατάλληλο τερματικό.

Η **Mesa 7i77** (Εικόνα 28) είναι θυγατρική κάρτα της 5i25 (daughterboard) σχεδιασμένη ειδικά για τη διασύνδεσή της με αναλογικές σερβοδιατάξεις έως και 6 βαθμών ελευθερίας.

Περιλαμβάνει ένα σύνολο επαφών, είτε συγκεκριμένου σκοπού είτε γενικής χρήσεως. Ειδικότερα:

- Μια (1) παράλληλη θύρα.
- Μια (1) ενότητα επαφών τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος από και προς την κάρτα.
- Μια (1) ενότητα επαφών βοηθητικής τροφοδοσίας 5V.
- Έξι (6) ενότητες επαφών για τον αναλογικό έλεγχο $\pm 10V$. Σε αυτές περιλαμβάνονται τα σήματα του ελέγχου και της ενεργοποίησης της μονάδας οδήγησης (drive enable).
- Έξι (6) ενότητες εισόδων σήματος κωδικοποιητών.
- Σαράντα οκτώ (48) ανεξάρτητες επαφές I/O γενικής χρήσης, για τον έλεγχο επί μέρους λειτουργιών (σήματα τερματικών διακοπών, διαχείριση ψυκτικού μέσου, αλλαγές εργαλείων κτλ.) εκ των οποίων:
 - Τριάντα δυο (32) εισόδους (inputs) μέγιστης επιτρεπόμενης συνεχούς τάσης 32V.
 - Δεκαέξι (16) εξόδους (outputs) εύρους συνεχούς τάσης από 5V έως 28V.
- Μια (1) σειριακή θύρα RS-422 για την επέκταση της κάρτας με άλλες θυγατρικές κάρτες σε περίπτωση που οι επαφές της 7i77 δεν επαρκούν.

Η παραπάνω δομή απεικονίζεται αναλυτικά σχηματικά στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 53).



Εικόνα 53: Αναλυτική δομή της Mesa 7i77

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας που περιλάμβανε την αποκατάσταση της μηχανικής τράπεζας CNC του κέντρου κατεργασιών Laser του τομέα σχεδιάστηκε αναλυτικά η συνδεσμολογία της κάρτας με τις μονάδες οδήγησης, τους κωδικοποιητές, τους διακόπτες στα όρια των αξόνων και το κομβίο εκτάκτου ανάγκης. Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας μελετάται η σύνδεση της πηγής του Laser με τη Mesa 7i77 και η ρύθμιση των παραμέτρων του LinuxCNC για την ενσωμάτωση του ελέγχου της στον Η/Υ. Η μελέτη αυτή και η υλοποίησή της περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.

4.4 Προσαρμογή του LinuxCNC στην εργαλειομηχανή Laser

Έχει ήδη επισημανθεί η ευελιξία και προσαρμοστικότητα του LinuxCNC σε πληθώρα διαφορετικών διατάξεων. Για δεδομένη εργαλειομηχανή, με γνωστά μεγέθη κινητήρων, αποστάσεις κίνησης αξόνων, τύπους διακοπών και προδιαγραφών εξαρτημάτων η ρύθμιση των παραμέτρων του LinuxCNC για την καθοδήγηση και τον έλεγχο της διάταξης είναι εφικτή.

Η παραπάνω προσαρμογή μπορεί να γίνει με απευθείας επεξεργασία των αρχείων ρυθμίσεων, το αρχείο εικονικού υλισμικού και το αρχείο εκκίνησης (config files, HAL file, INI file).

Το αρχείο εκκίνησης είναι το βασικό αρχείο που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την έναρξη και λειτουργία του LinuxCNC. Πληροφορίες όπως για

παράδειγμα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αξόνων, οι ταχύτητες περιστροφής των κινητήρων, οι σχέσεις μετάδοσης κίνησης και οι κλίμακες των κωδικοποιητών. Το αρχείο περιλαμβάνει ενότητες για κάθε επίπεδο λειτουργίας του LinuxCNC όπως αυτά περιγράφονται στην παράγραφο 4.2 και απεικονίζονται στην εικόνα 51.

Το αρχείο του HAL περιλαμβάνει πληροφορίες για τα χρησιμοποιούμενα από τη δεδομένη διάταξη εικονικά εξαρτήματα. Επιτήρηση σημάτων επαφών εισόδου-εξόδου, εικονικός παλμογράφος και εικονικά κομβία που συνδέονται με το γραφικό περιβάλλον ορίζονται σε αυτό το αρχείο και συμπεριλαμβάνονται μέσω εντολής `#include` στο αρχείο εκκίνησης.

Η παραπάνω καταχώρηση στοιχείων στα αρχεία ρύθμισης μπορεί να είναι χαοτική και χρονοβόρα. Οι παράμετροι είναι πολλοί και η αλληλεπίδρασή τους σε επίπεδο λογισμικού δεν είναι πάντοτε προφανής. Σε τυπικές διατάξεις εργαλειομηχανών η ρύθμιση και η προσαρμογή μπορούν να γίνουν μέσω ειδικών προγραμμάτων καθοδήγησης τα οποία απλουστεύουν και καθοδηγούν βήμα-βήμα το χρήστη για τη διασύνδεση και τη χρήση του LinuxCNC. Ένα από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα οδήγησης είναι το `stepconf` το οποίο καθοδηγεί τη ρύθμιση και διεπαφή του H/Y με διάταξη εργαλειομηχανής που λειτουργεί με τη χρήση βηματικών κινητήρων.

Στην περίπτωση του κέντρου κατεργασίας του τομέα, το οποίο χρησιμοποιεί αναλογικούς τριφασικούς σερβοκινητήρες η διασύνδεση πραγματοποιήθηκε μέσω του οδηγού `pncconf`. Το `pncconf` (**P**oint **a**nd **C**lick **C**ONFигurator) αποτελεί πρόγραμμα βασισμένο στο `stepconf` που γενικεύει και απλουστεύει την εισαγωγή παραμέτρων για συστήματα που κινούνται με σερβομηχανισμούς, αναλογικούς ή ψηφιακούς. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δε θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία ρύθμισης μέσω του `pncconf`, η αναλυτική περιγραφή υπάρχει στη διπλωματική εργασία που πραγματοποιήθηκε την επαναλειτουργία της τράπεζας CNC, ωστόσο στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σε κομμάτι της διαδικασίας αυτής για τη ρύθμιση των κερδών των ελεγκτών των αξόνων.

5. Εργασίες αποκατάστασης του Κέντρου Κατεργασιών

Για την πλήρη αποκατάσταση του κέντρου κατεργασιών με δέσμη Laser του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών απαιτούνται πρωτίστως μια σειρά από ενέργειες οι οποίες θα καταστήσουν κάθε υποσύνολο της εργαλειομηχανής λειτουργικό.

5.1 Εργασίες αποκατάστασης της μηχανικής τράπεζας CNC

Σε προηγούμενη διπλωματική εργασία η οποία αφορούσε την αποκατάσταση του μηχανικού κέντρου CNC και τον έλεγχό του μέσω LinuxCNC σχεδιάστηκε η συνδεσμολογία και ρυθμίστηκαν κατάλληλα οι παράμετροι του λογισμικού για την επικοινωνία του με το σύστημα μέσω των καρτών διεπαφής της Mesa Electronics. Η καθυστέρηση στην παραγγελία και την άφιξη των καρτών δεν επέτρεψε την υλοποίηση του παραπάνω σχεδιασμού εγκαίρως ώστε αυτός να συμπεριληφθεί στην παραπάνω εργασία. Η εργασία ωστόσο συνεχίστηκε και οι απαραίτητες ενέργειες πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής και περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

5.1.1 Εγκατάσταση και διασύνδεση καρτών Mesa

Η πρώτη σημαντική εργασία για την επαναλειτουργία του κέντρου ήταν η υλική εγκατάσταση και διασύνδεση των καρτών Mesa 5i25 και Mesa 7i77 με την υφιστάμενη διάταξη.

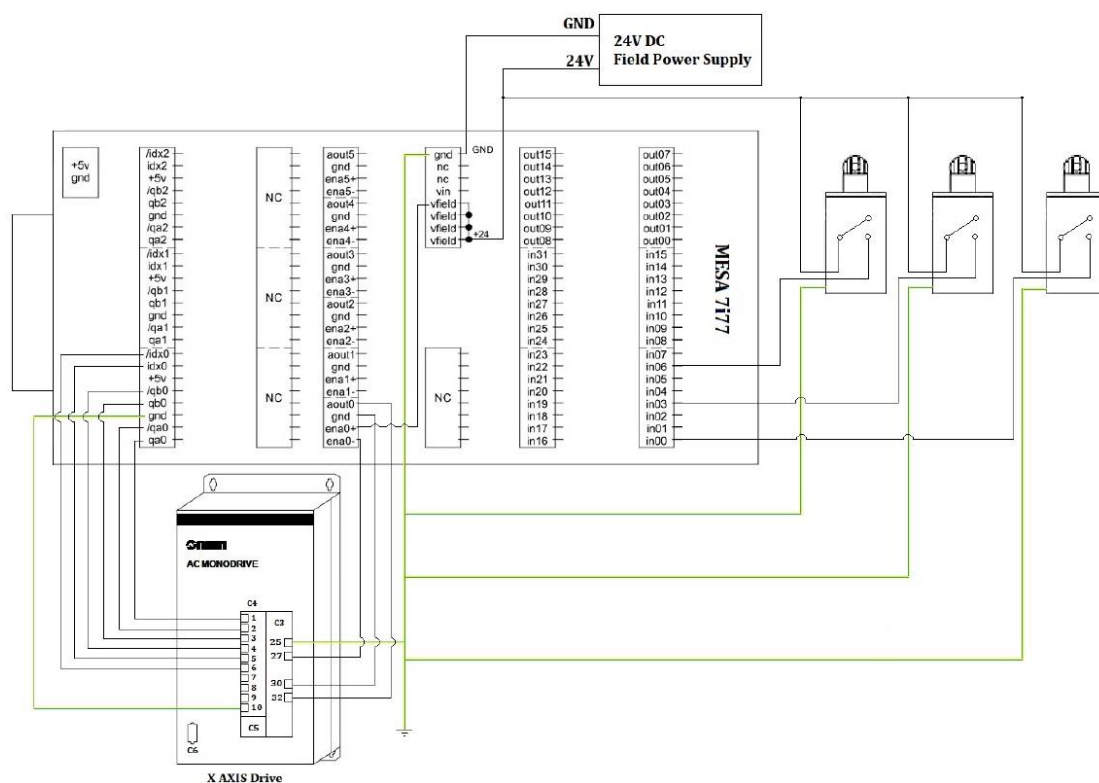
Με την άφιξη των καρτών στον Τομέα, πραγματοποιήθηκε η αποσυμφόρηση του ηλεκτρολογικού πίνακα από εξαρτήματα τα οποία δε βρίσκουν χρήση και επομένως δε διαθέτουν λόγο ύπαρξης στη νέα διάταξη. Συγκεκριμένα έγινε:

- Αφαίρεση της μονάδας του PLC του αρχικού συστήματος ελέγχου
- Αφαίρεση μεγάλου πλήθους καλωδίων από γραμμές αναμονής που δεν επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν
- Οργάνωση των εναπομεινάντων καλωδίων στα πλαστικά κανάλια του πίνακα

Μόλις ολοκληρώθηκε η αποσυμφόρηση και η οργάνωση του πίνακα δημιουργήθηκαν με διάτρηση οι κατάλληλες οπές για την προσθήκη της κάρτας Mesa 7i77 στη θέση όπου καταλάμβανε η μονάδα του PLC. Η κάρτα τοποθετήθηκε μαζί με μεταλλική βάση διανομής ηλεκτρικού ρεύματος για τη συγκέντρωση των ηλεκτρικών γραμμών που τροφοδοτούνται απευθείας από αυτή.

Στη συνέχεια ακολούθησε η διασύνδεση της κάρτας με τα επιμέρους τμήματα της μηχανικής τράπεζας και τον Η/Υ ελέγχου. Οι μονάδες οδήγησης συνδέθηκαν με την έξοδο

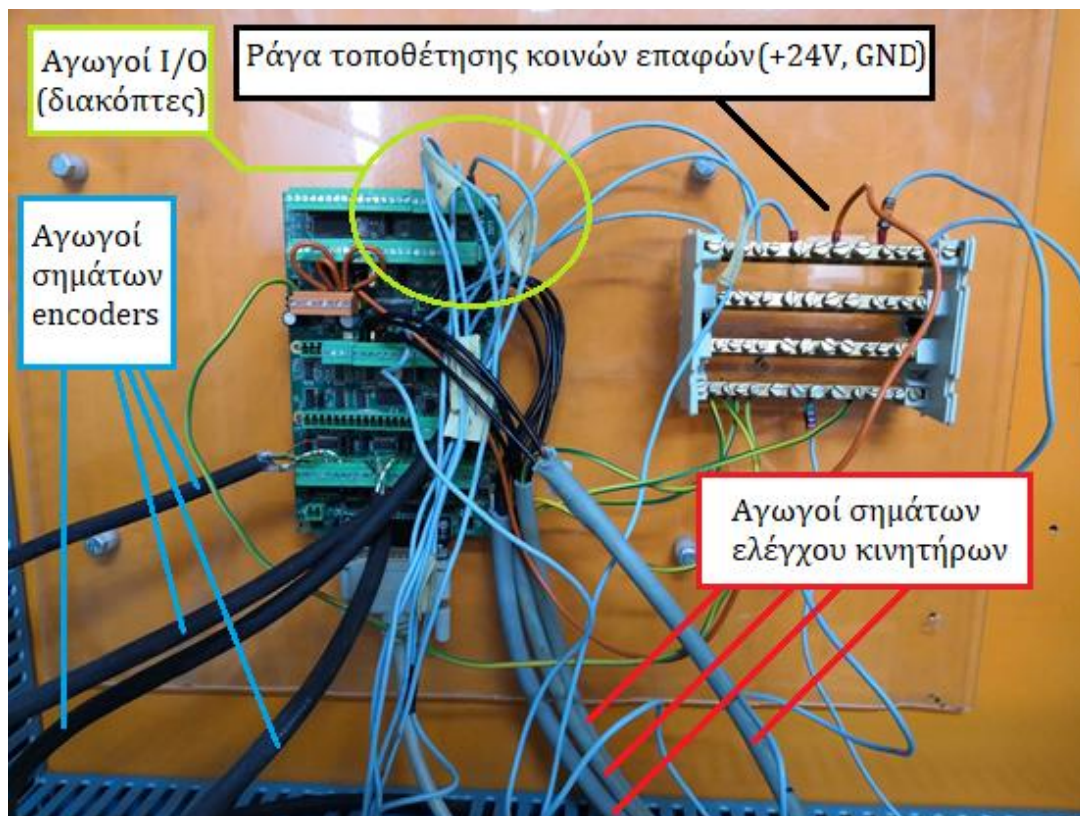
τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος, ομοίως και οι διακόπτες των αξόνων κίνησης. Οι καλωδιώσεις του σήματος κωδικοποιητή που εξάγει η μονάδα οδήγησης, η γραμμή του σήματος ενεργοποίησης, καθώς και η γραμμή του σήματος ελέγχου κάθε σερβοκινητήρα τοποθετήθηκαν στις φίσες των αντίστοιχων υποδοχών της κάρτας. Η συνδεσμολογία ενδεικτικά για έναν άξονα κίνησης παρατίθεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 54: Συνδεσμολογία άξονα γραμμικής κίνησης με την κάρτα Mesa 7i77

Για τα σήματα των διακοπών κάθε βαθμίδας κίνησης χρησιμοποιήθηκαν οι επαφές εισόδου της κάρτας με αριθμό 00 έως 08, ενώ για τη σύνδεση του κομβίου εκτάκτου ανάγκης χρησιμοποιήθηκε η επαφή εισόδου με αριθμό 16, καθαρά για τη διακριτοποίησή του από τους διακόπτες.

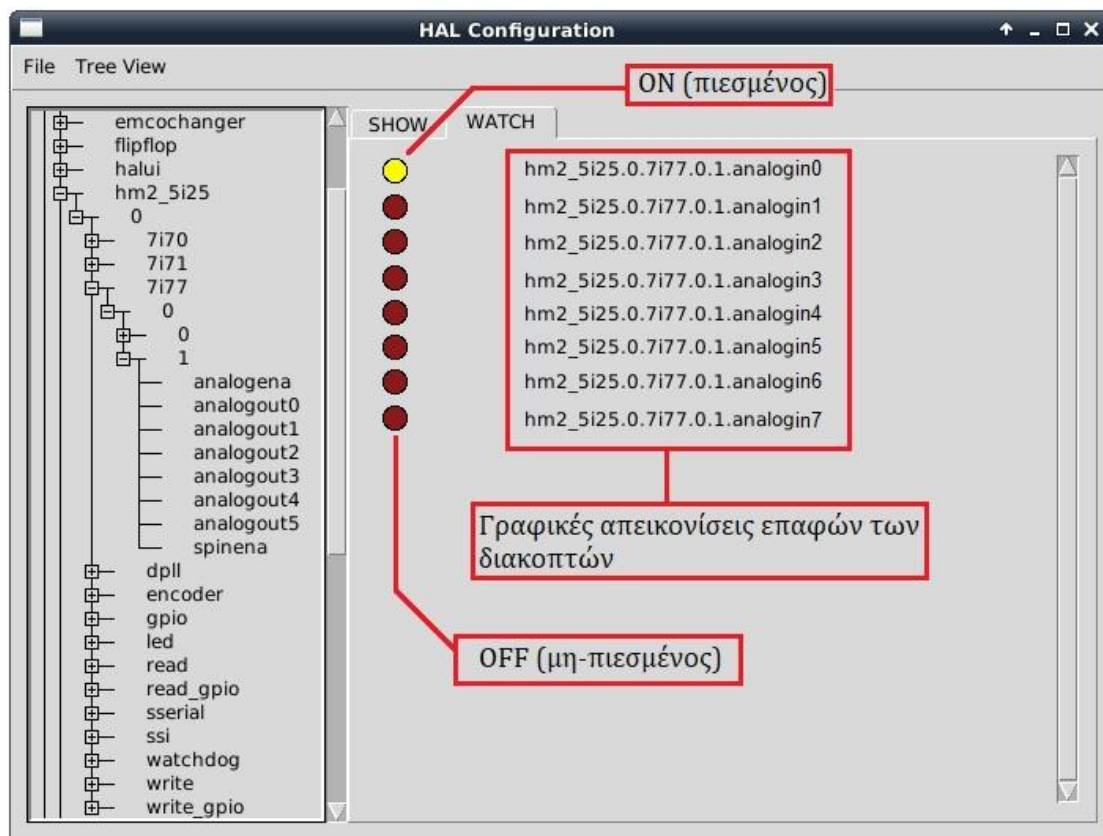
Η τελική διάταξη της κάρτας στον πίνακα της εργαλειομηχανής, μετά την ολοκλήρωση των ηλεκτρολογικών συνδέσεων απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 55).



Εικόνα 55: Η Mesa 7i77 εγκατεστημένη στον ηλεκτρολογικό πίνακα του κέντρου κατεργασιών

5.1.2 Ρύθμιση παραμέτρων ελέγχου κίνησης αξόνων

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών για τη διασύνδεση του συστήματος με τη Mesa 7i77 πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες δοκιμές της λειτουργίας της τράπεζας. Αρχικά έγινε δοκιμή της σωστής λειτουργίας κάθε διακόπτη, για την αποφυγή υλικών βλαβών στην περίπτωση που κάποιος άξονας ξεπερνούσε τα όρια κίνησής του. Η δοκιμή των διακοπών έγινε δια χειρός. Στο GUI του LinuxCNC προστέθηκαν μέσω του HAL πλασματικές γραφικές απεικονίσεις των πραγματικών επαφών τους, οι οποίες προσέδιδαν σε πραγματικό χρόνο χρωματική πληροφορία για την κατάσταση του κάθε διακόπτη (Εικόνα 56).



Εικόνα 56: Γραφική αναπαράσταση επαφών της Mesa 7i77 μέσω HAL

Με διαδοχική δοκιμή επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία και των 9 διακοπών.

Το επόμενο βήμα της δοκιμής της λειτουργίας των αξόνων αποτέλεσε η ίδια η κίνησή τους, σε πρώτη φάση χωριστά και στη συνέχεια σε συνδυασμό.

Κατά την παραμετροποίηση του LinuxCNC στο στάδιο του σχεδιασμού με χρήση του οδηγού `pnccnf`, εξ αιτίας της απουσίας των καρτών είχε γίνει παράληψη της βαθμονόμησης των αξόνων και της επιλογής των κερδών του ελεγκτή PID που ρυθμίζει την επικοινωνία του H/Y με τις μονάδες οδήγησης των κινητήρων. Κατόπιν της εγκατάστασης και υλοποίησης των συνδεσμολογιών δοκιμάστηκε η λειτουργία των γραμμικών αξόνων.

Η πρώτη δοκιμή γίνεται με σύστημα Ανοικτού Βρόχου (Open Loop Test) μέσω του οδηγού `pnccnf`. Η δοκιμή αυτή τροφοδοτεί με συγκεκριμένη τιμή τάσης τους κινητήρες ώστε να γίνει αντιληπτή η λειτουργία τους και η σωστή σύνδεση των συσκευών ανατροφοδότησης ως προς την κατεύθυνση κίνησης. Η δοκιμή ανοικτού βρόχου που πραγματοποιήθηκε διαδοχικά και για τους 3 άξονες (X Y Z) ήταν επιτυχής.

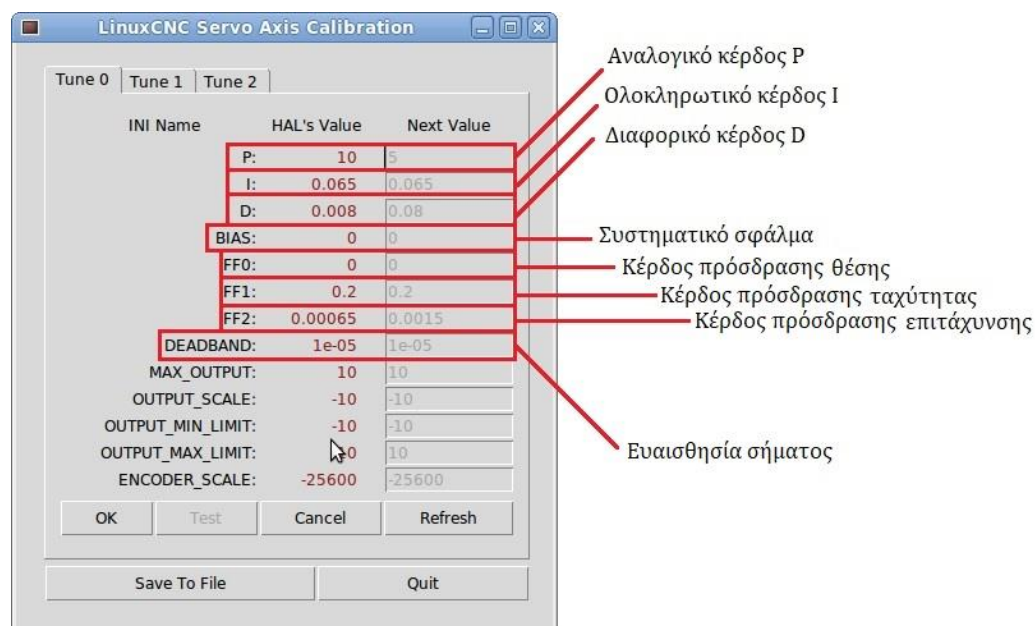
Στη συνέχεια έγιναν αντίστοιχα δοκιμές και ακολούθησε η ρύθμιση του συστήματος Κλειστού Βρόχου (Closed Loop). Οι πρώτες δοκιμές επιβεβαίωσαν τη δοκιμή ανοικτού

βρόχου ως προς τη λειτουργικότητα και τη φορά περιστροφής των κινητήρων, ωστόσο η κίνηση μπορούσε να πραγματοποιηθεί μόνο σε πολύ χαμηλές ταχύτητες και υπήρχε σοβαρή πιθανότητα σφάλματος, κατά το στάδιο της επιτάχυνσης και επιβράδυνσης. Το σφάλμα αυτό οφειλόταν στην έλλειψη ρύθμισης των παραμέτρων PID που ελέγχουν τη διεπαφή μεταξύ του LinuxCNC και των μονάδων οδήγησης.

Οι μονάδες επικοινωνούν με τους οδηγούμενους κινητήρες μέσω ξεχωριστού ελεγκτή PI (proportional – integral controller). Ο PI ελεγκτής ρυθμίζει την επενέργεια του κινητήρα μέσα από δυο σήματα. Το αναλογικό κέρδος P ορίζει την ένταση του σήματος ελέγχου και φροντίζει ώστε το σήμα εξόδου της κινητήριας διάταξης να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τη ζητούμενη τιμή. Υψηλές τιμές του οδηγούν σε μεγαλύτερη ταχύτητα στην απόκριση του συστήματος, αλλά δημιουργούν κίνδυνο για υπερακόντιση (overshoot) του σήματος και πάντα αφήνει ένα σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση. Το ολοκληρωτικό κέρδος I χρησιμοποιεί προηγούμενες τιμές του σήματος και τις αφαιρεί από την απόκριση ώστε να εξαλείψει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης που απομένει από την εφαρμογή μόνο του κέρδους P. Βελτιώνει την απόκριση σε μεγάλο βαθμό, ωστόσο δεν αποτελεί πανάκεια. Μεγάλη τιμή του οδηγεί σε μεγάλα αδρανειακά φαινόμενα κατά το στάδιο της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης και υπερακοντίσεις σήματος.

Εάν το σήμα εισόδου από τον Η/Υ ελέγχου δεν είναι κατάλληλα συντονισμένο με τη διάταξη κίνησης, ο ελεγκτής PI τροφοδοτεί με σήμα τον κινητήρα και η διάταξη μετακινείται, αλλά το τελικό αποτέλεσμα διαφέρει από το επιθυμητό (έννοια του GIGO: Garbage In – Garbage Out). Η απόκλιση μεταξύ της ζητούμενης θέσης και της πραγματικής μπορεί να μετρηθεί με χρήση της ανατροφοδότησης από τους αναλυτές και ονομάζεται *σφάλμα παρακολούθησης* (following error). Το LinuxCNC καταγράφει το following error και μόλις αυτό υπερβεί μια ορισμένη τιμή κατωφλίου (threshold) η οποία μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη, τότε απενεργοποιεί το σήμα ενεργοποίησης (enable) της μονάδας οδήγησης και ακινητοποιεί τον άξονα. Αυτή η λειτουργία έχει ως στόχο την αποφυγή της ανεξέλεγκτης κίνησης των αξόνων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υλικές βλάβες ή και καταστροφή εξαρτημάτων, όπως φαίνεται και στην Παράγραφο 5.1.3.

Για τη ρύθμιση της διεπαφής μεταξύ του LinuxCNC και των μονάδων οδήγησης ο οδηγός `pnccnf` και εκ των υστέρων το γραφικό περιβάλλον λειτουργίας του LinuxCNC περιλαμβάνει ειδικό μενού καταχώρησης των κερδών και του threshold του σφάλματος παρακολούθησης (Εικόνα 57).



Εικόνα 57: Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων του ελεγκτή PID

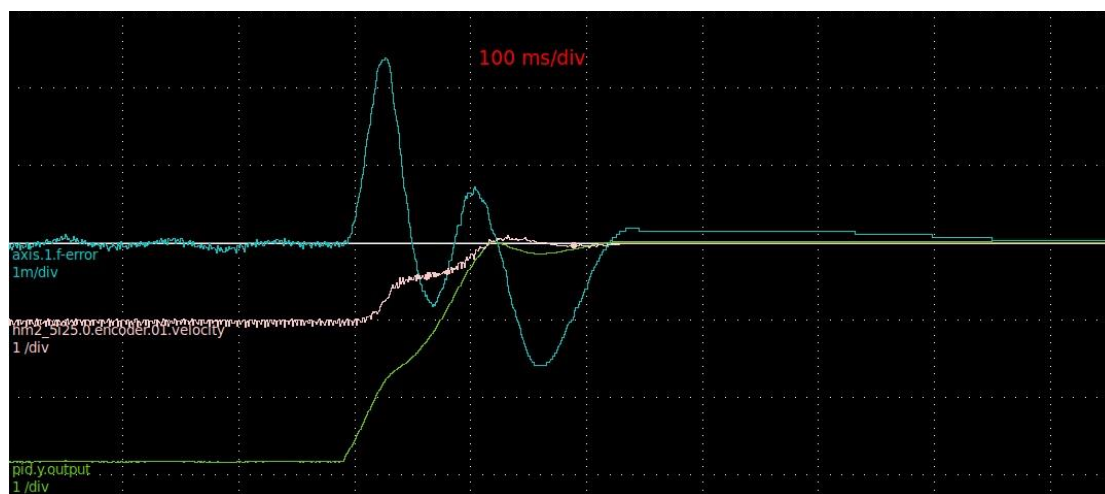
Στην παραπάνω εικόνα καταγράφονται ονομαστικά οι βασικοί παράμετροι που απαιτούν ρύθμιση για τη σωστή διεπαφή μεταξύ του συστήματος ελέγχου και της μηχανικής τράπεζας της εργαλειομηχανής. Ειδικότερα, οι παράμετροι που πρέπει να μελετηθούν είναι οι ακόλουθοι:

- **Αναλογικό Κέρδος P:** Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, ο αναλογικός συντελεστής του ελεγκτή P. Πολλαπλασιάζει απευθείας το σφάλμα μεταξύ ζητούμενης και πραγματικής θέσης και μετράται σε (Volts/μονάδα μηχανής).
- **Ολοκληρωτικό Κέρδος I:** Το κέρδος αυτό πολλαπλασιάζει το αθροιστικό σφάλμα μεταξύ ζητούμενης και πραγματικής θέσης συνεισφέροντας στην τελική τιμή της τάσης του σήματος ελέγχου της μονάδας οδήγησης. Μετράται σε (Volts/μονάδα μηχανής)*second.
- **Διαφορικό Κέρδος D:** Μετρά το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος. Πολλαπλασιάζει τη διαφορά μεταξύ διαδοχικών σφαλμάτων στη μονάδα του χρόνου συνεισφέροντας επίσης στην τελική τιμή της τάσης ελέγχου. Μετράται σε (Volts/μονάδα μηχανής)/second.
- **Συστηματικό σφάλμα Bias:** Συνήθως παίρνει την τιμή 0, αλλά μπορεί να λάβει τιμές αντιστάθμισης εάν εντοπιστεί συστηματικό σφάλμα στα σήματα ελέγχου των μονάδων οδήγησης (για παράδειγμα αν υπάρχει παρουσία drift που οδηγεί στην κίνηση των κινητήρων χωρίς να δοθεί εντολή κίνησης)
- **Κέρδη ρύθμισης πρόσδρασης FF0, FF1 και FF2:** Τα κέρδη αυτά πολλαπλασιάζονται επί τη ζητούμενη θέση, το ρυθμό μεταβολής αυτής

(ταχύτητα) και το ρυθμό μεταβολής του ρυθμού αυτού (επιτάχυνση). Η *πρόσδραση* (feed forward) λειτουργεί με βάση τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος, χρησιμοποιώντας τις αναμενόμενες τροχιές των αξόνων από τις εντολές του G-κώδικα. Οι τιμές των παραπάνω κερδών είναι συνήθως μηδενικές ή πολύ μικρές και χρησιμοποιούνται για την τελική ρύθμιση (fine tuning) της διάταξης όπου αυτό κριθεί απαραίτητο με βάση δοκιμές.

- **Ευαισθησία σήματος Deadband:** Ορίζει μια ελάχιστη τιμή κάτω από την οποία ένα σήμα θεωρείται 0. Συνήθως λαμβάνει πολύ μικρή τιμή της τάξης του 10^{-5} ώστε να αποφεύγονται σφάλματα που οφείλονται στην ύπαρξη ηλεκτρονικού θορύβου.

Η ρύθμιση των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιείται σε δυο στάδια. Αρχικά γίνεται χρήση του παλμογράφου HAL (HAL scope), λειτουργία που προσφέρεται από το LinuxCNC για τη ζωντανή παρακολούθηση σημάτων που διέρχονται από τις επαφές των καρτών, ή και πλασματικών επαφών που έχουν οριστεί από το χρήστη. Το παράθυρο του HAL scope έχει τη μορφή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 58: Παλμογράφος HAL

Στο παράθυρο του παλμογράφου HAL επιλέγονται τα σήματα που προβάλλονται καθώς και η κλίμακα, όπως ακριβώς θα γινόταν σε μια πραγματική συσκευή παλμογράφου. Για κάθε άξονα κίνησης γίνεται χωριστά η ρύθμιση.

Για την επιλογή των κερδών αρχικά έγινε χρήση της μεθόδου Ziegler-Nichols. Τα κέρδη I και D λαμβάνουν την τιμή 0 και στη συνέχεια πραγματοποιούνται δοκιμές λειτουργίας της κίνησης του άξονα μόνο με αναλογικό κέρδος P. Η δοκιμές έγιναν με χειροκίνητη εντολή κίνησης από το γραφικό περιβάλλον AXIS και επαναλήφθηκαν με αυξανόμενη τιμή του P σε κάθε επανάληψη μέχρις ότου να παρατηρηθεί αρχή αστάθειας στο

σύστημα, με τη μορφή κραδασμών στη διάταξη και μόνιμη ταλάντωση της απόκρισης στο HAL score. Για την οριακή αυτή τιμή του P_c (P – critical) επιλέγονται τα κέρδη I και D ως εξής:

| Τύπος Ελεγκτή | P | I | D |
|----------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Ελεγκτής P | $0.5 \cdot P_c$ | - | - |
| Ελεγκτής PI | $0.45 \cdot P_c$ | $0.833 \cdot P_c$ | - |
| Ελεγκτής PID | $0.6 \cdot P_c$ | $0.5 \cdot P_c$ | $0.125 \cdot P_c$ |

Πίνακας 1: Κέρδη ελεγκτών με τη μέθοδο Ziegler-Nichols

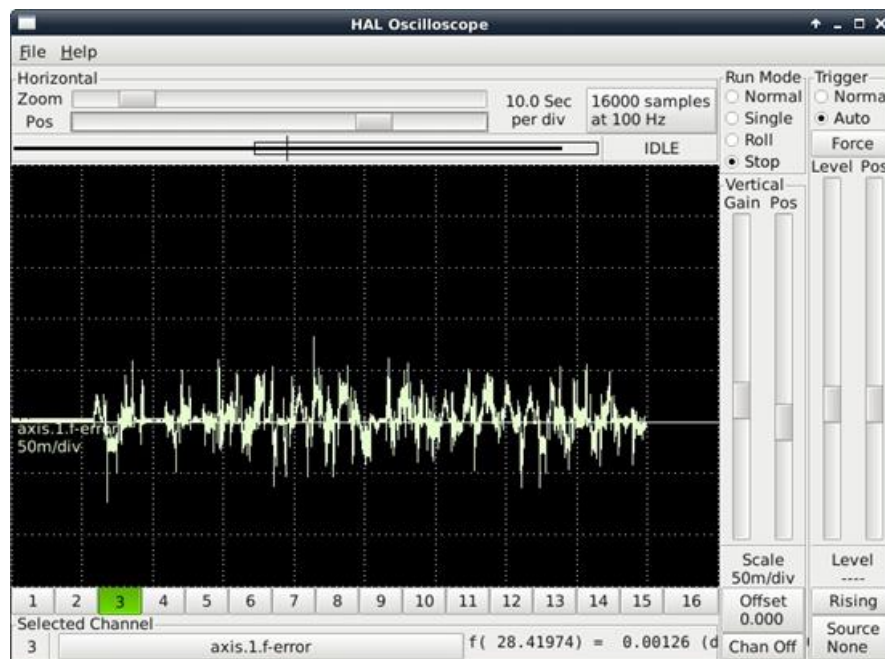
Με χρήση της παραπάνω μεθόδου ορίστηκαν τα κέρδη για κάθε άξονα. Και πάλι η ομαλή λειτουργία του συστήματος εξασφαλίστηκε για πολύ χαμηλές ταχύτητες κίνησης ($\geq 200 \text{ mm/min}$). Για μεγαλύτερες ταχύτητες έγινε περαιτέρω διερεύνηση των κερδών με τη μέθοδο δοκιμής και πλάνης (trial and error).

Σε μεγαλύτερες ταχύτητες έγινε αντιληπτό το γεγονός πως τα κέρδη I και D δεν επηρέαζαν τον έλεγχο των κινητήρων. Οι μονάδες οδήγησης κάλυπταν το κομμάτι του διαφορικού και ολοκληρωτικού ελέγχου εσωτερικά και εν τέλει μόνο το κέρδος P διαφοροποιούσε την απόκριση συνεργαζόμενο με τις μονάδες. Αντίθετα τα κέρδη I και D προκαλούσαν σοβαρή αστάθεια στο σύστημα γι' αυτό και αφαιρέθηκαν λαμβάνοντας την τιμή 0. Εκεί που δόθηκε έμφαση ήταν στις τιμές των FF0, FF1 και FF2 όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο. Για τον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών χρησιμοποιήθηκε το HAL score στο οποίο απεικονίστηκε γραφικά σε πραγματικό χρόνο η μεταβολή του σφάλματος παρακολούθησης σε ολόένα αυξανόμενες ταχύτητες λειτουργίας (Εικόνα 59).

Με περεταίρω πειραματισμό και διαδοχικές δοκιμές εξασφαλίστηκε σταθερή λειτουργία σε ταχύτητες μέχρι και τα 3000 mm/min . Παρατηρήθηκε πως η εξάλειψη του θορύβου, ιδιαίτερα στα σήματα που αφορούσαν τον κινητήρα του άξονα X κατέστη αδύνατη. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην παλαιότητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και της μηχανικής τράπεζας. Οι τελικές τιμές των κερδών για κάθε κινητήρα παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

| ΚΕΡΔΟΣ | ΑΞΟΝΑΣ X | ΑΞΟΝΑΣ Y | ΑΞΟΝΑΣ Z |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| P | 11 | 11 | 11 |
| I | 0 | 0 | 0 |
| D | 0 | 0 | 0 |
| BIAS | 0 | 0 | 0 |
| FF0 | 0 | 0 | 0 |
| FF1 | 0.010666 | 0.01078 | 0.0074 |
| FF2 | 1e-05 | 4e-05 | 3e-05 |
| DEADBAND | 1e-04 | 1e-04 | 1e-04 |
| MAX_OUTPUT | 0 | 0 | 0 |
| OUTPUT_SCALE | -1 | 1 | -1 |
| OUTPUT_MIN_LIMIT | -10 | -10 | -10 |
| OUTPUT_MAX_LIMIT | 10 | 10 | 10 |
| ENCODER_SCALE | 2457.6 | -2457.6 | 2457.6 |

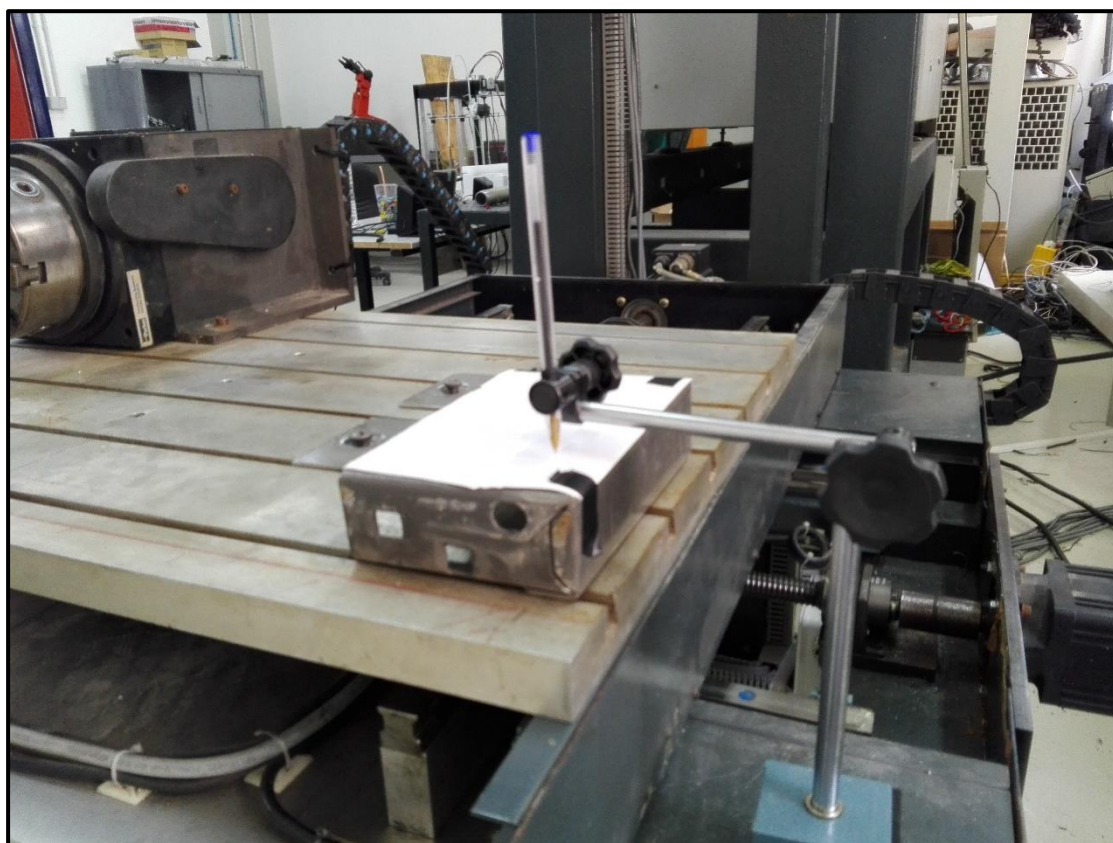
Πίνακας 2: Παράμετροι ελέγχου κινητήρων



Εικόνα 59: Απεικόνιση του σφάλματος παρακολούθησης στο HAL scope κατά τη ρύθμιση του PID

Η μέγιστη δυνατότητα πρόωσης με βάση την ταχύτητα περιστροφής των ατράκτων των κινητήρων (3000rpm) και του βήματος του κοχλία κίνησης (5mm) είναι 15000mm/min. Γίνεται αντιληπτό πως η τρέχουσα ρύθμιση υποστηρίζει μόλις το 20% της μέγιστης ταχύτητας λειτουργίας. Δεν έγινε περαιτέρω διερεύνηση στο σημείο αυτό και γίνεται σύσταση να επαναληφθεί η διαδικασία της ρύθμισης για μεγαλύτερες ταχύτητες σε μελλοντικό χρόνο.

Για την ολοκλήρωση της παραμετροποίησης της κίνησης των αξόνων πραγματοποιήθηκε δοκιμή λειτουργίας για την επιβεβαίωση της ορθής καταχώρησης της κλίμακας των αναλυτών στο LinuxCNC. Δόθηκαν εντολές κίνησης σε γραμμική τροχιά κατά μήκος κάθε άξονα κατά συγκεκριμένη απόσταση. Οι κατευθύνσεις κίνησης αντιστοιχούσαν στις εντολές, όπως είχε επιβεβαιωθεί σε προηγούμενο βήμα και η κλίμακα των συσκευών ανατροφοδότησης μετρήθηκαν με μια απλή σταθερή διάταξη, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 60: Μέτρηση ορθότητας κλίμακας των resolvers

5.1.3 Επισκευή συστήματος κίνησης της κεφαλής εστίασης

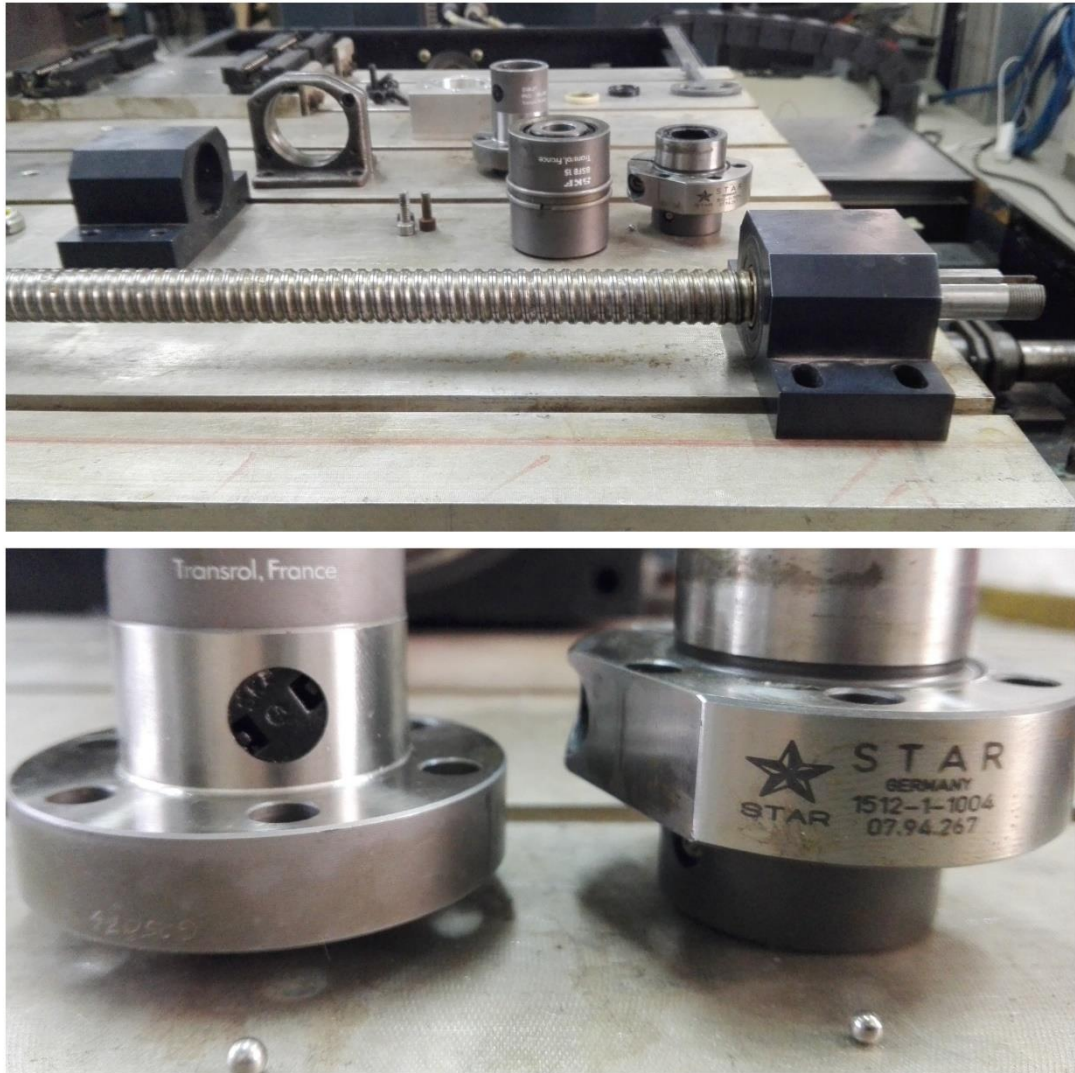
Κατά τη διεξαγωγή δοκιμών για τη ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου, όπως αυτή περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο, η μονάδα οδήγησης του κατακόρυφου άξονα

Ζ, στο υποσύστημα του μηχανισμού κίνησης της κεφαλής εστίασης παρουσίασε βλάβη. Η μονάδα έδωσε απρόσμενα εντολή για την κίνηση της ατράκτου του κινητήρα αντίστροφα από τη ζητούμενη και με ταχύτητα αρκετά μεγαλύτερη. Η δυσλειτουργία αυτή οδήγησε στη σύγκρουση του εδράνου του περικοχλίου κίνησης με τα όρια της διαδρομής. Η σύγκρουση προκάλεσε πλαστική παραμόρφωση στην εσωτερική διατομή του σπειρώματος και τα ανακυκλοφορούντα σφαιρίδια σφήνωσαν ανάμεσα στο διάκενο που δημιουργήθηκε μεταξύ του κοχλίου και του τρίμματος του περικοχλίου. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην πλήρη αχρήστευση του συστήματος μετάδοσης κίνησης.

Εξ αιτίας του παραπάνω περιστατικού, κατέστη αναγκαία η επισκευή του συστήματος μετάδοσης κίνησης και αντικατάσταση της μονάδας οδήγησης, η οποία αφότου αφαιρέθηκε από τη διάταξη δοκιμάστηκε και διαπιστώθηκε ότι παρουσίαζε γενικότερα προβλήματα στην οδήγηση του κινητήρα.

Για την επισκευή του μηχανισμού κίνησης πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες:

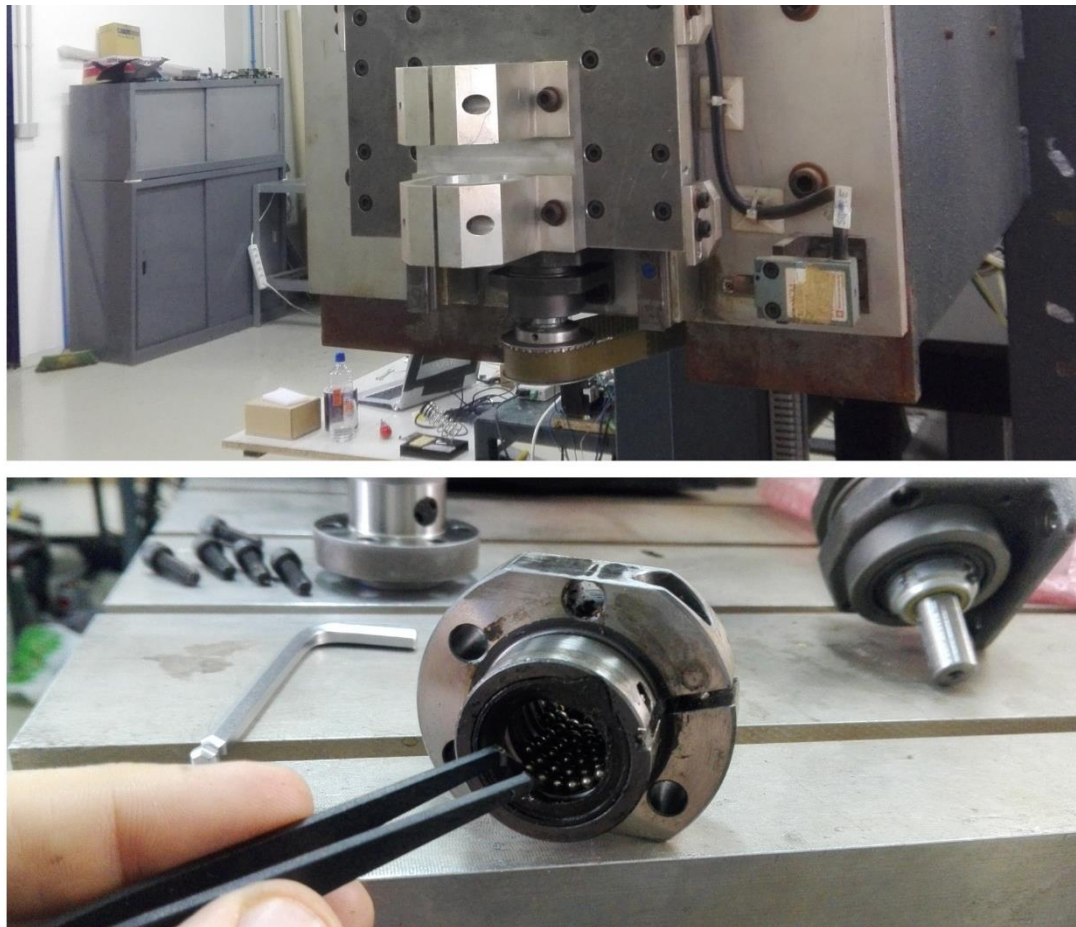
- Αποσυναρμολόγηση του μηχανισμού (Εικόνα 61α).
- Αντικατάσταση του περικοχλίου κίνησης με υπάρχον εφεδρικό ίδιας διατομής, αλλά διαφορετικού μεγέθους σφαιριδίων (Εικόνα 61β).
- Κατεργασία υπάρχοντος κοχλίου κίνησης συμβατού με το εφεδρικό περικόχλιο, ώστε να εφαρμόσει στο σύστημα κίνησης (Εικόνα 62). Η κατεργασία περιλάμβανε:
 - Κοπή του κοχλίου στο κατάλληλο μήκος για την εφαρμογή στο μηχανισμό
 - Διαμόρφωση των άκρων μέσω τόννευσης για την εφαρμογή ένσφαιρου εδράνου κύλισης (ρουλεμάν) και τροχαλίας με σφήνα.
- Ανασυναρμολόγηση του μηχανισμού (Εικόνα 63).



Εικόνα 61: α (άνω) Αποσυναρμολόγηση του μηχανισμού του άξονα Z β (κάτω) το εφεδρικό περικόχλιο και η διαφορά διαμέτρου των σφαιριδίων



Εικόνα 62: Επεξεργασία και αντικατάσταση κοχλία κίνησης



Εικόνα 63: Ανασυναρμολόγηση μηχανισμού άξονα Z

Το εφεδρικό περικόχλιο κίνησης και ο αντίστοιχος του κοχλίας προϋπήρχαν στους χώρους του εργαστηρίου, ως κατάλοιπα παλαιότερου μη χρησιμοποιούμενου μηχανισμού και αξιοποιήθηκαν καταλλήλως. Το αρχικό περικόχλιο ήταν γαλλικής κατασκευής της SKF, με κωδικό PN2 20x5R. Το εφεδρικό, γερμανικό STAR 1512-1-1004. Και τα δυο περικόχλια εφαρμόζουν σε κοχλία κίνησης διαμέτρου 20mm. Το Star αξιοποιούσε σφαιρίδια ελαφρώς μικρότερης διαμέτρου, γεγονός που κατέστησε την αλλαγή του κοχλία απαραίτητη.

Στο πλαίσιο της παραπάνω επισκευής αντικαταστάθηκε και ο κινητήρας του άξονα με μεγαλύτερο μοντέλο. Ο αρχικός κινητήρας αφαιρέθηκε για δοκιμές λειτουργικότητας. Ο μεγαλύτερος κινητήρας τοποθετήθηκε με σκοπό την υποστήριξη του συστήματος σε περίπτωση που εγκατασταθεί βαρύτερη διάταξη κεφαλής εστίασης της δέσμης, ή επιπλέον μηχανισμοί για επίστρωση μετάλλου ή προσθετική κατεργασία.

5.2 Εργασίες αποκατάστασης της πηγής του Laser

Με την ολοκλήρωση των απαραίτητων εκείνων ενεργειών που καθιστούν το μηχανικό κέντρο κατεργασίας λειτουργικό και έτοιμο προς χρήση, σειρά έχει η αποκατάσταση της ίδιας της πηγής του Laser. Η ορθή λειτουργία της αποτελεί τον πυρήνα της παρούσας μελέτης και για την επίτευξή της ακολουθήθηκαν μια σειρά από βήματα τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στις ακόλουθες παραγράφους.

5.2.1 Επισκευή Η/Υ ελέγχου πηγής

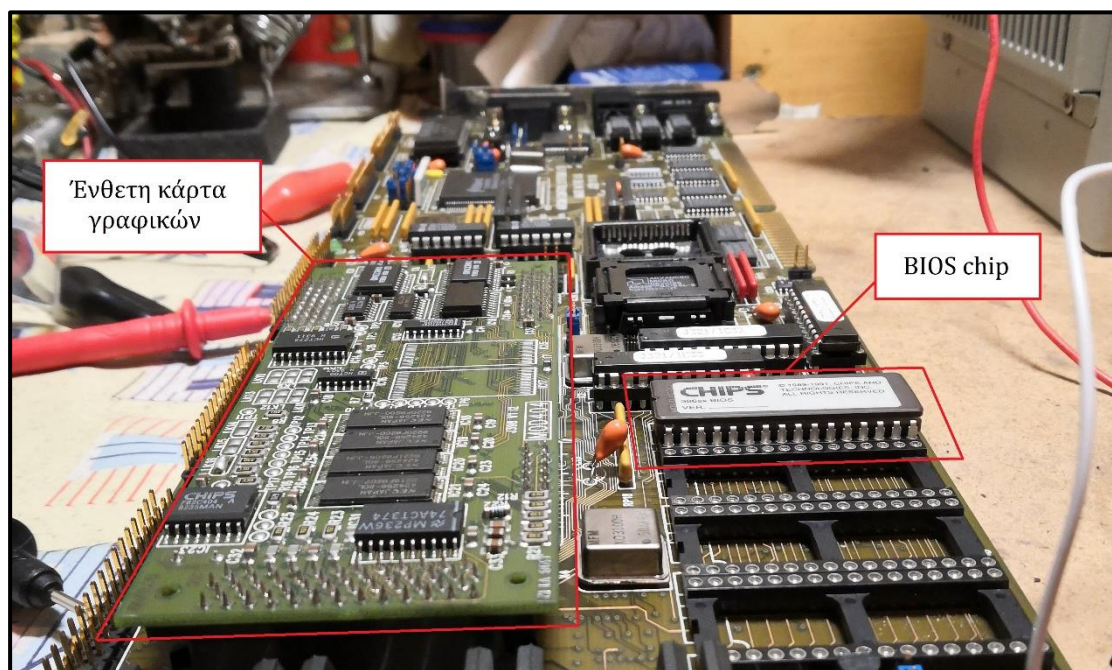
Το πρώτο βήμα για την αποκατάσταση της λειτουργίας της πηγής LE3000 αποτέλεσε η ενεργοποίηση του βιομηχανικού Η/Υ ελέγχου στο εσωτερικό της. Η μονάδα του Η/Υ αφαιρέθηκε από το εσωτερικό της πηγής και τροφοδοτήθηκε με μονοφασική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Σε αυτό το στάδιο προέκυψαν δυο βασικά προβλήματα που έχριζαν αντιμετώπισης.

Αρχικά η μονάδα του Η/Υ, κατά την πρώτη δοκιμή έδινε σήμα στην οθόνη της κονσόλας ελέγχου της πηγής. Η εικόνα ήταν πολύ αμυδρή και μετά την πρώτη δοκιμή έπαψε να ανταποκρίνεται εντελώς. Επιπλέον, κατά την πρώτη αυτή δοκιμή το σύστημα ζητούσε δισκέτα εκκίνησης, ή οποία δεν ήταν διαθέσιμη στο εργαστήριο.

Για την αποκατάσταση της οπτικής εξόδου του Η/Υ επιχειρήθηκε τροφοδοσία της οθόνης της κονσόλας απευθείας από το δίκτυο μονοφασικής παροχής του εργαστηρίου, κάνοντας την παραδοχή ότι η υπολειτουργία οφειλόταν στην έμμεση τροφοδοσία από τον Η/Υ. Η δοκιμή δεν απέδωσε και ακολουθήθηκε αποσυναρμολόγηση του Η/Υ για την εύρεση της πηγής του σφάλματος.

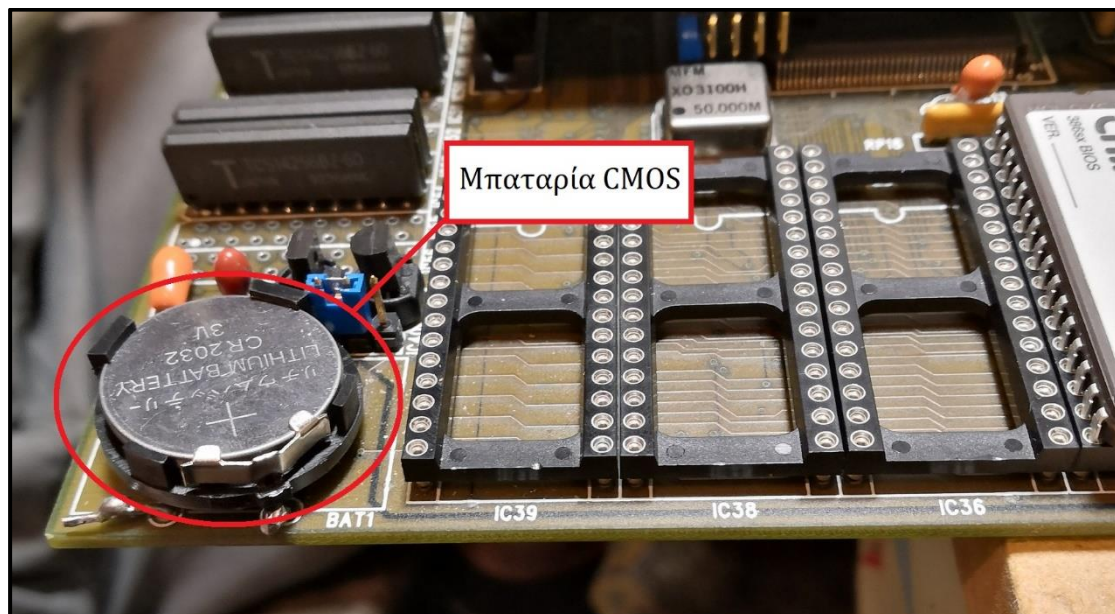
Κατά τη μελέτη της δομής της πλακέτας του υπολογιστή εντοπίστηκαν τα εξής:

- Η έξοδος του οπτικού σήματος προς την οθόνη της κονσόλας ρυθμιζόταν από ένθετη κάρτα γραφικών (Εικόνα 64). Χωρίς την παρουσία της κάρτας γραφικών το σήμα εξέρχεται από τη θύρα VGA της μονάδας του Η/Υ.
- Η εσωτερική μπαταρία CMOS του υπολογιστή είχε εξαντληθεί, πιθανότατα εξ αιτίας της παλαιότητάς της. Αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει την απαίτηση του συστήματος για δισκέτα εκκίνησης και να οδηγήσει μελλοντικά σε προβλήματα λόγω της αδυναμίας λειτουργίας του ρολογιού της μονάδας.



Εικόνα 64: Στοιχεία της πλακέτας του υπολογιστή της LE3000

Η κάρτα γραφικών αφαιρέθηκε με σκοπό να γίνει χρήση της θύρας VGA του Η/Υ. Η μπαταρία CMOS, αφαιρέθηκε και στη θέση της τοποθετήθηκε και κολλήθηκε ειδική βάση με μπαταρία λιθίου 3V CR 2032 (Εικόνα 65), ώστε η αντικατάσταση της μπαταρίας μελλοντικά να μπορεί να πραγματοποιηθεί ευκολότερα. Κατά την αντικατάσταση της μπαταρίας αφαιρέθηκε προσωρινά το ολοκληρωμένο κύκλωμα του BIOS (Εικόνα 64) και πραγματοποιήθηκε η επαναφορά του στις εργοστασιακές ρυθμίσεις.

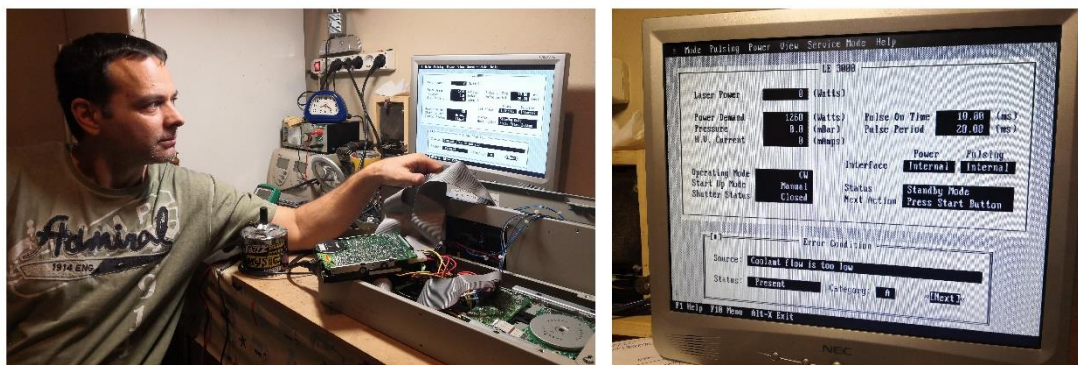


Εικόνα 65: Η νέα μπαταρία CMOS του Η/Υ ελέγχου της μονάδας του Laser

Επιπλέον από τα παραπάνω βήματα, πραγματοποιήθηκε προσωρινή αποσύνδεση και καθαρισμός των επαφών μεταξύ της κάρτας, του σκληρού δίσκου της μονάδας και του οδηγού της δισκέτας floppy. Ο σκληρός δίσκος συνδέθηκε σε άλλη μονάδα υπολογιστή και αφού διαπιστώθηκε ένας αριθμός κατεστραμμένων αρχείων έγινε διεργασία επισκευής τους από κατάλληλο λογισμικό.

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων ο υπολογιστής συναρμολογήθηκε ξανά και έγινε εκ νέου δοκιμή χρησιμοποιώντας τη θύρα VGA. Το σήμα εξόδου προς την οθόνη μεταδόθηκε κανονικά και ζητήθηκε ξανά η είσοδος δισκέτας εκκίνησης στο σύστημα. Για τις ανάγκες της δοκιμής έγινε εγγραφή σε δισκέτα 3.5 ιντσών του λειτουργικού MS DOS 6 το οποίο είναι εγκατεστημένο στο σκληρό δίσκο της μονάδας του υπολογιστή. Η δισκέτα τοποθετήθηκε στον οδηγό του Η/Υ και η εκκίνηση του λογισμικού του Laser πραγματοποιήθηκε κανονικά (Εικόνα 66).

Σε μετέπειτα δοκιμές παρατηρήθηκε πως μετά την πρώτη επιτυχή εκκίνηση του συστήματος η δισκέτα δεν ήταν πλέον απαραίτητη. Δεν κατέστη γνωστό εάν η αρχική απαίτηση ήταν αποτέλεσμα κάποιου κολλήματος του BIOS, των κατεστραμμένων αρχείων του δίσκου, ή του λειτουργικού συστήματος εν γένει. Για την πρόσθετη ασφάλεια των δεδομένων του σκληρού δίσκου δημιουργήθηκαν αντίγραφα τους.



Εικόνα 66: Η πρώτη επιτυχής εκκίνηση του Η/Υ του Laser

5.2.2 Έλεγχος, αποκατάσταση βλαβών και διασύνδεση της πηγής

Οι εργασίες για τον ενδεδειγμένο έλεγχο της λειτουργικότητας της πηγής, καθώς και οι τυχόν επισκευαστικές ενέργειες που θα μπορούσαν πιθανώς να προκύψουν από τον παραπάνω έλεγχο, δυστυχώς δεν κατέστη δυνατό να πραγματοποιηθούν. Ο προγραμματισμός για την εκτέλεσή τους συνέπεσε με την έξαρση της πανδημίας του ιού SARS-CoV-2, ο οποίος επέβαλε μια σειρά από περιορισμούς τόσο στις ακαδημαϊκές όσο και τις επαγγελματικές και κοινωνικές δραστηριότητες κατά την περίοδο της άνοιξης του 2020. Το συνεργείο που ανέλαβε τη διάγνωση των βλαβών και την επισκευή της πηγής προσήλθε στους χώρους του εργαστηρίου και η αρχική εκτίμησή του ήταν θετική, καθώς δεν εντοπίστηκαν εμφανείς βλάβες ή ρηγματώσεις στις σωληνώσεις του ταλαντωτή της πηγής. Η συνεπαγόμενη επίσκεψή του ωστόσο για τον αναλυτικότερο έλεγχο και την πραγματοποίηση εργασιών συντήρησης στις αντλίες, την επικαιροποίηση των ηλεκτρικών συνδέσεων και τη διασύνδεση της πηγής με τις απαραίτητες για τη λειτουργία της φιάλες αερίων, την τροφοδοσία ηλεκτρικής ισχύος και την παροχή νερού αναβλήθηκε έως το πέρας της κρίσης.

Για λόγους πληρότητας ακολουθούν οι προγραμματισμένες εργασίες οι οποίες αναμένεται να πραγματοποιηθούν μετά την επιστροφή της χώρας στην κανονικότητα:

- Αναλυτικός έλεγχος για κρυφές ρωγμές στις σωληνώσεις του οπτικού ταλαντωτή
- Συντήρηση αντλίας κενού (αλλαγή λαδιού και δοκιμή λειτουργίας)
- Πλήρωση ψυγείου με καθαρό νερό και διασύνδεση μονάδας ψύξης με την LE3000
- Διασύνδεση της πηγής του Laser με δίκτυο τριφασικής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, με δυνατότητα στήριξης φορτίου συνολικής έντασης 80A.
- Διασύνδεση της πηγής με φιάλες He, N, CO₂, καθώς και με συμπιεσμένο καθαρό αέρα. Οι συνδέσεις αυτές απαιτούν την προμήθεια των εν λόγω φιαλών και νέες

σωληνώσεις, διότι οι υφιστάμενες παρουσιάζουν φθορά και μεγάλη ψαθιρότητα λόγω ηλικίας.

- Δοκιμή της λειτουργικής πλέον πηγής και εκτέλεση πρωτοκόλλου καθαρισμού με χρήση του λογισμικού του ενσωματωμένου Η/Υ της LE3000.

Εφόσον τα παραπάνω βήματα ολοκληρωθούν επιτυχώς και δεν φέρουν στο φως κάποια σοβαρή βλάβη του συστήματος, η πηγή θα είναι έτοιμη για χρήση με τον ελεγκτή που θα παραμετροποιηθεί και θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.

6. Διασύνδεση και Έλεγχος της δέσμης μέσω LinuxCNC

Η πηγή του LE3000 προσφέρει ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρονικών επαφών στο πίσω μέρος της οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση σημάτων εισόδου και εξόδου. Οι επαφές είναι διατεταγμένες σε δυο σειριακές θήρες DB37, τις A11XS1 και A11XP2 όπως φαίνεται στην εικόνα 38 του Κεφαλαίου 3. Τα σήματα που διαχειρίζονται οι παραπάνω θύρες επιτρέπουν έλεγχο της λειτουργίας της πηγής από εξωτερικό σύστημα ελέγχου, όπως είναι στην παρούσα περίπτωση ο H/Y με το LinuxCNC. Δίνεται η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου της έναρξης και διακοπής της εκκένωσης στο θάλαμο διέγερσης, η εξωτερική αναλογική ρύθμιση της ισχύος της δέσμης του Laser, η μετάβαση σε παλμική λειτουργία της δέσμης και η αλλαγή της θέσης του μηχανικού κλείστρου. Ταυτόχρονα διατίθενται αρκετά επιπλέον σήματα εξόδου που παρέχουν ανάδραση για την κατάσταση των παραπάνω μεταβολών. Η συνδεσμολογία μεταξύ της πηγής και της Mesa 7i77 αναλύεται και παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο. Οι παράγραφοι 6.2 και 6.3 αναπτύσσουν την επικοινωνία του ελεγκτή με τη διασυνδεδεμένη διάταξη, τις απαραίτητες μετατροπές που πραγματοποιούνται στο αρχείο του HAL για την υποστήριξη της διεπαφής, καθώς και τις εντολές του G-κώδικα μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση του LinuxCNC με την LE3000.

6.1 Συνδεσμολογία διασύνδεσης της πηγής με το Σύστημα Ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω εισαγωγή η επικοινωνία της πηγής με εξωτερικά συστήματα ελέγχου γίνεται μέσω των σειριακών θυρών 37 επαφών A11XS1 και A11XP2. Ο ρόλος κάθε επαφής σε κάθε θύρα παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α, ωστόσο σε αυτή την παράγραφο θα γίνει αναφορά των χρησιμοποιούμενων επαφών και του ρόλου που επιτελούν για την επίτευξη ελέγχου της πηγής.

Η διασύνδεση της LE3000 με τη Mesa 7i77 κινείται γύρω από τρεις βασικούς άξονες:

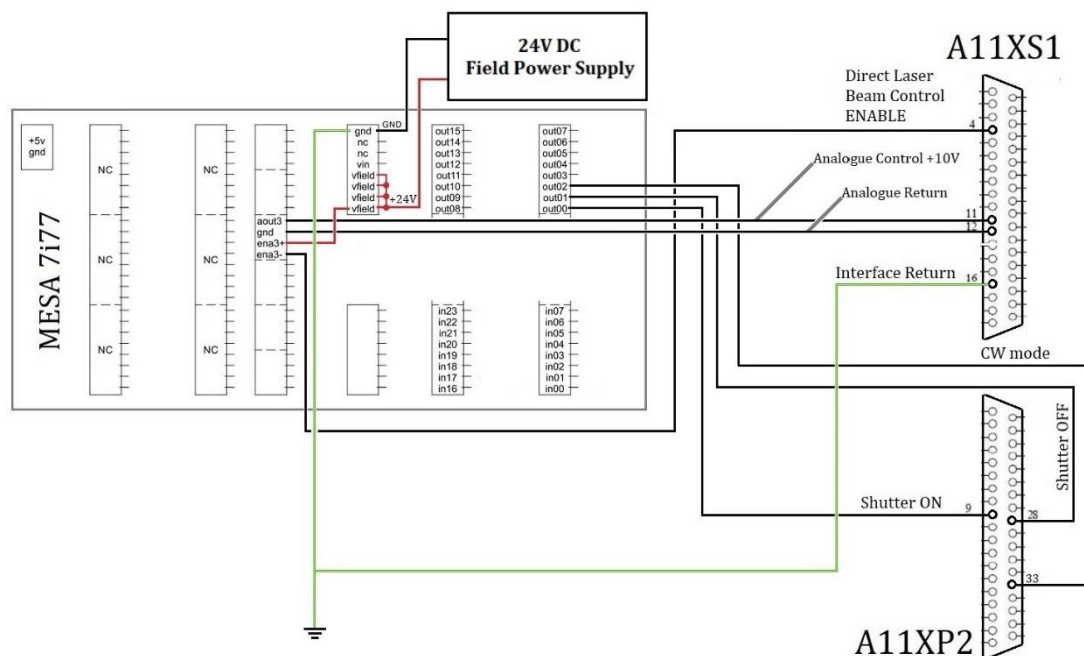
1. Έλεγχος της κατάστασης του μηχανικού κλείστρου (ON -OFF) ο οποίος επιτρέπει ή αντίστοιχα ανακόπτει την πορεία της δέσμης προς την οπή εξόδου από την πηγή του Laser.
2. Αναλογικός έλεγχος της ισχύος της συνεχούς (CW) δέσμης του Laser.
3. Ψηφιακός έλεγχος της δέσμης του Laser σε παλμική λειτουργία.

Η επίτευξη των τριών αυτών ελεγκτών και η ενσωμάτωση των εντολών τους στο τερματικό του AXIS GUI υπό μορφή εντολών G-κώδικα εξασφαλίζει τη ρυθμιζόμενη λειτουργία της δέσμης υπό την καθοδήγηση του LinuxCNC.

Κατόπιν μελέτης του εγχειρίδιου χρήσης και συντήρησης της LE3000 συλλέχθηκαν οι ακόλουθες πληροφορίες για τις επαφές των θυρών A11XS1 και A11XP2:

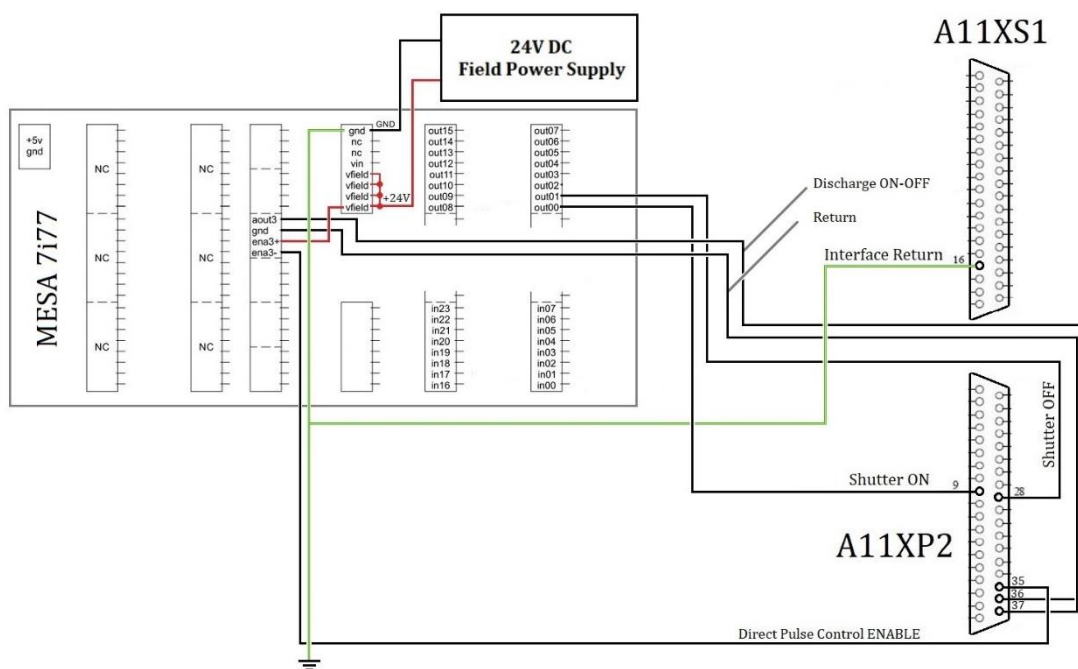
- Οι **επαφές 9** και **28** της θύρας **A11XP2** ελέγχουν την κατάσταση του κλείστρου με σήμα εισόδου 24V συνεχούς τάσης. Συγκεκριμένα, η επαφή 9 θέτει το κλείστρο στη θέση ON επιτρέποντας στη δέσμη να εξέλθει από την πηγή. Αντίστοιχα, δίνοντας τάση 24V στην επαφή 28 θέτει το κλείστρο στη θέση OFF, παρακάμπτοντας την εντολή της επαφής 9.
- Η **επαφή 4** της θύρας **A11XS1** ενεργοποιεί (enable command) τη δυνατότητα για εξωτερικό αναλογικό έλεγχο της ισχύος της δέσμης. Η ισχύς ρυθμίζεται από τις **επαφές 11** και **12** της ίδιας θύρας με μεταβαλλόμενη συνεχή τάση εισόδου 0-10V, όπου για τάση εισόδου ίση με 10V η δέσμη εκπέμπει στη μέγιστη ονομαστική ισχύ (3000W) και για μικρότερες τιμές τάσης ακολουθεί γραμμική μεταβολή με κλίση 400Watt/Volt. Για την εξασφάλιση της συνεχούς (CW) εκπομπής της δέσμης κατά τον εξωτερικό έλεγχο πρέπει να ενεργοποιηθεί η **επαφή 33** της θύρας **A11XP2** τροφοδοτούμενη με συνεχή τάση 24V.
- Για την ενεργοποίηση (enable) της εξωτερικά ελεγχόμενης παλμικής λειτουργίας της δέσμης χρησιμοποιείται η **επαφή 35** της θύρας **A11XP2**. Η εντολή της άμεσης έναρξης και διακοπής της εκκένωσης και εκπομπής της δέσμης δίνεται μέσα από τις **επαφές 36** και **37** της ίδιας θύρας. Το σήμα εισόδου λαμβάνει τιμές από 0-10V, ωστόσο θεωρείται ψηφιακό καθώς η πηγή αναγνωρίζει μόνο 2 καταστάσεις. Τιμές της τάσης μεγαλύτερες των 5V προκαλούν εκκίνηση εκπομπής της δέσμης (ON state), ενώ τάσεις μικρότερες των 2V διακόπτουν την εκπομπή (OFF state). Οι διαδοχικές εκκινήσεις και διακοπές της εκκένωσης ορίζουν τον παλμό και απαιτούν κατάλληλο προγραμματισμό του ελεγκτή. Δεν είναι δυνατόν ο παραπάνω έλεγχος να αντικατασταθεί από διαδοχικές μετακινήσεις του κλείστρου. Η μηχανική διάταξη του κλείστρου είναι τάξεις μεγέθους πιο αργή από την ψηφιακή εντολή, η οποία μεταβάλλει την κατάσταση της δέσμης σε χρόνους της τάξης των 30ms.
- Ως επιστροφή των σημάτων διεπαφής (interface return), ώστε να κλείσει το κύκλωμα ορίζεται η **επαφή 16** της θύρας **A11XS1**. Στο εγχειρίδιο δεν αναφέρεται άλλη επαφή επιστροφής στην θύρα A11XP2 επομένως γίνεται η παραδοχή ότι η παραπάνω επαφή αποτελεί κοινή επιστροφή. Στην περίπτωση που η έλλειψη αυτή οφείλεται σε παράληψη του κατασκευαστή κατά τη συγγραφή του manual θα γίνει κατάλληλη διερεύνηση πάνω στο υφιστάμενο κύκλωμα και θα πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες τροποποιήσεις.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα σχεδιάστηκαν δυο διαφορετικές συνδεσμολογίες. Η πρώτη συνδεσμολογία εξασφαλίζει τον αναλογικό έλεγχο συνεχούς δέσμης, σε συνδυασμό με την κίνηση του μηχανισμού του κλείστρου και απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 67: Συνδεσμολογία αναλογικού ελέγχου συνεχούς δέσμης

Η δεύτερη συνδεσμολογία ρυθμίζει αποκλειστικά την παλμική λειτουργία της δέσμης και απεικονίζεται αντίστοιχα στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 68: Συνδεσμολογία ψηφιακού ελέγχου παλμικής δέσμης

Ο διαχωρισμός των δυο λειτουργιών έγινε χάριν απλότητας. Όπως θα αναπτυχθεί και παρακάτω η αναλογική έξοδος της Mesa 7i77 μπορεί να οριστεί μέσω του `pnccnf` ως εικονική άτρακτος (spindle) και να αντιστοιχηθεί η αυξομείωση της ισχύος με αριθμό στροφών της ατράκτου, απλουστεύοντας κατά πολύ την παραμετροποίηση. Κατόπιν της υλοποίησης και δοκιμής των δυο παραπάνω συνδεσμολογιών είναι δυνατή η συγχώνευσή τους σε μια ενιαία και η προσθήκη εντολής εναλλαγής μεταξύ τους κατά τη λειτουργία της διάταξης.

6.2 Προγραμματισμός ελέγχου της έντασης της συνεχούς δέσμης

Για τον έλεγχο της συνεχούς δέσμης αρχικά απαιτείται η υλοποίηση της συνδεσμολογίας που παρουσιάζεται στην εικόνα 67. Ωστόσο για τη συνεργασία μεταξύ του LinuxCNC και της LE3000 απαιτούνται ενέργειες παραμετροποίησης και στο σύστημα ελέγχου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι επαφές μέσα από τις οποίες διέρχεται το αναλογικό σήμα ελέγχου της δέσμης συνδέονται στο τερματικό υπ' αριθμόν 3 της Mesa 7i77 που ελέγχει τη διεπαφή του συστήματος ελέγχου με αναλογικές μονάδες οδήγησης. Η διασύνδεση αυτή προτιμήθηκε διότι η αρχή λειτουργίας της κάρτας προσεγγίζει την αρχή λειτουργίας της πηγής σε μεγάλο βαθμό. Το τερματικό διαθέτει ζεύγος επαφών που διαχειρίζεται σήμα ενεργοποίησης (enable) τάσης 24Volt (η τάση τροφοδοσίας της κάρτας) και αντίστοιχα χρησιμοποιεί ρυθμιστικό αναλογικό σήμα $\pm 10V$.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας η πηγή του Laser ορίζεται στον οδηγό του `pnccnf` ως «άτρακτος κινητήρα» (spindle) το οποίο λειτουργεί με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Μέγιστος αριθμός στροφών: 3000rpm
- Ελάχιστος αριθμός στροφών: 0rpm
- Δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης περιστροφής με αλλαγή πολικότητας: Όχι
- Μειωτήρας στροφών με σχέση μετάδοσης 4:3

Ο μέγιστος και ο ελάχιστος αριθμός στροφών ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιστοιχίζεται ένα-προς-ένα με την ονομαστική τιμή της ισχύος της δέσμης σε Watt. Ο μειωτήρας είναι εντελώς εικονικός και χρησιμοποιείται για την ταύτιση της κλίσης του σήματος ελέγχου με την κλίση της χαρακτηριστικής του εξωτερικού ελέγχου της δέσμης. Επομένως, με εντολή χρήστη για 3000rpm ατράκτου θα στέλνεται αναλογικό σήμα μέγιστης τάσης 10V στην πηγή και θα εκπέμπει σε ισχύ 3000Watt. Το LinuxCNC σε αυτή την περίπτωση θα θεωρεί ότι εξανάγκασε τον κινητήρα της ατράκτου σε περιστροφή με 4000rpm. Αντίστοιχα, εντολή περιστροφής με 2700rpm, λαμβάνοντας υπόψιν την

ύπαρξη της μείωσης θα αποστέλλει σήμα 9.2V αντί για ακριβώς 9V δίνοντας ως έξοδο δέσμη 2700Watt κ.ο.κ. Η κατεύθυνση περιστροφής ορίζεται αυστηρά ως δεξιόστροφη για την αποφυγή αλλαγής πολικότητας και ο χρήστης δίνει εντολή εκκένωσης με την εντολή M3. Η επιθυμητή ισχύς δίνεται με τη μορφή στροφών ανά λεπτό, με αντιστοιχία σε Watt. Για παράδειγμα, αν ο χρήστης επιθυμεί να εκπέμψει συνεχή δέσμη ισχύος 1500Watt καταχωρεί την εντολή **M3 S1500**.

Ο έλεγχος του μηχανισμού του κλείστρου απαιτεί την αποστολή σήματος εξόδου από τη Mesa 7i77, από τις επαφές out00 και out01. Όπως προαναφέρθηκε η εντολή της επαφής 28 της θύρας A11XP2 η οποία θέτει το κλείστρο στη θέση OFF παρακάμπτει την ισχύ της εντολής 9. Επομένως για τον έλεγχο του μηχανισμού αρχικά θα οριστεί στο αρχείο του HAL ψηφιακό σήμα εξόδου, το οποίο θα συνδεθεί με την έξοδο out00. Στη συνέχεια το σήμα θα λάβει μόνιμη αληθή τιμή (true). Εφόσον η κάρτα Mesa 7i77 τροφοδοτείται από πηγή 24V DC, η αληθής τιμή του ψηφιακού σήματος θα ανέρχεται επίσης στα 24V. Η παραπάνω ενέργεια θέτει το κλείστρο στη θέση ON μόνιμα κατά την έναρξη λειτουργίας της εργαλειομηχανής. Η καταχώρηση της τιμής του σήματος και η σύνδεσή του με την επαφή out00 της κάρτας γίνεται με τις εντολές:

#set signal για την ψηφιακή επαφή out-00 στην τιμή 1 (true)

sets dout-00 TRUE

#διασύνδεση του σήματος dout-00 με την επαφή output 00 της Mesa7i77

net dout-00 hm2_5i25.0.7i77.0.0.output-00

Ο ορισμός του σήματος γίνεται αυτόματα από το LinuxCNC κατά την έναρξη λειτουργίας και το σήμα είναι συνδεδεμένο με τις εντολές **M64** και **M65**. Η σύνταξη των εντολών πραγματοποιείται με τη μορφή **M64 P_ _** όπου P_ _ (P00, P01 κ.ο.κ.) ο αριθμός του ψηφιακού σήματος (στην περίπτωσή μας πρόκειται για το σήμα 00, επομένως P00). Η M64 θέτει το σήμα P_ _ στη θέση TRUE. Αντίστοιχα η M65 το τοποθετεί στη θέση FALSE.

Για τον έλεγχο του σήματος που κλείνει το κλείστρο και εμποδίζει την έξοδο της δέσμης από την πηγή εργαζόμαστε αντιστοίχως:

#set signal για την ψηφιακή επαφή out-01 στην τιμή 1 (true)

sets dout-01 TRUE

#διασύνδεση του σήματος dout-01 με την επαφή out-01 της Mesa7i77

net dout-01 hm2_5i25.0.7i77.0.0.output-01

Το διαχειριζόμενο σήμα σε αυτή την περίπτωση είναι το ψηφιακό 01. Κατά την αρχικοποίηση δίνεται και εδώ η τιμή TRUE για λόγους ασφαλείας. Για την εκπομπή της δέσμης ο χρήστης χρησιμοποιεί τις εντολές M64 και M65 με παράμετρο το P01. Η M65 απενεργοποιεί το σήμα και, εφόσον το σήμα της θέσης ON είναι ενεργό, ο μηχανισμός του κλείστρου μεταβαίνει αυτομάτως στη θέση ON. Στη συνέχεια, με την καταχώρηση της εντολής **M64 P01** ο χρήστης επαναφέρει το κλείστρο στη θέση OFF.

Συμπληρωματικά αναφέρεται πως κατά την ενεργοποίηση του εξωτερικού ελέγχου της δέσμης είναι αναγκαία και η τροφοδότηση της επαφής 33 της θύρας A11XP2 με αληθές λογικό σήμα. Εφόσον η διάταξη της εικόνας 67 δε συμπεριλαμβάνει εναλλαγή με παλμική δέσμη, θα μπορούσε η παραπάνω ενέργεια να υλοποιηθεί πολύ απλά με την τροφοδοσία της με ρεύμα τάσης 24V DC απευθείας από το τροφοδοτικό. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας και δυνατότητας εναλλαγής στην περίπτωση εφαρμογής συνδυαστικής συνδεσμολογίας προτείνεται η σύνδεση της επαφής 33 με την έξοδο **out02** της Mesa 7i77 και η επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας για ψηφιακό σήμα με αύξων αριθμό 02:

#set signal για την ψηφιακή επαφή out-02 στην τιμή 1 (true)

sets dout-02 TRUE

#διασύνδεση του σήματος dout-02 με την επαφή out-02 της Mesa7i77

net dout-02 hm2_5i25.0.7i77.0.0.output-02

Και αντίστοιχα έλεγχος της τιμής του σήματος μέσω των εντολών M64 και M65 (P02).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, ο αναλογικός έλεγχος της δέσμης του Laser, για τη συνδεσμολογία της εικόνας 67 επιτυγχάνεται με τα εξής βήματα:

- Ορισμός της πηγής ως εικονική άτρακτος με μειωτήρα για την προσαρμογή της χαρακτηριστικής του αναλογικού ρυθμιστή της δέσμης στον ελεγκτή του LinuxCNC. Ο χρήστης ορίζει την τιμή της ισχύος σε Watt υπό μορφή RPM ατράκτου.
- Διασύνδεση του μηχανισμού κλείστρου με ψηφιακά σήματα και εναλλαγή θέσεων ON-OFF με εντολές M64/M65
- Συμπληρωματική διασύνδεση επαφής 33 της θύρας A11XP2 με ψηφιακό σήμα και ενεργοποίησή της εξ αρχής για τοποθέτηση της δέσμης σε συνεχή λειτουργία.

6.3 Προγραμματισμός ελέγχου των χαρακτηριστικών της παλμικής δέσμης

Για τον έλεγχο της συνεχούς δέσμης αρχικά απαιτείται η υλοποίηση της συνδεσμολογίας που παρουσιάζεται στην εικόνα 68. Τα βήματα που αφορούν την κίνηση του μηχανικού κλείστρου είναι ακριβώς τα ίδια με την περίπτωση του αναλογικού ελέγχου της συνεχούς δέσμης και δεν επαναλαμβάνεται η περιγραφή τους.

Για την τοποθέτηση της δέσμης σε παλμική λειτουργία δίνεται εντολή ενεργοποίησης (enable) στην επαφή 35 της θύρας A11XP2 ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που δόθηκε στην παραπάνω παράγραφο. Στην περίπτωση που οι συνδεσμολογίες των εικόνων 67 και 68 συνδυαστούν πρέπει να δοθεί προσοχή στην απενεργοποίηση της επαφής 33, ώστε να μην μπει η δέσμη σε συνεχή λειτουργία.

Για τη δοκιμή της παλμικής λειτουργίας αρκεί η επανάληψη του σχεδιασμού της παραγράφου 6.2 με τη διαφορά πως ο χρήστης ενεργοποιεί τη δέσμη δίνοντας υψηλές στροφές στην εικονική άτρακτο ($\geq 1500\text{rpm}$) και αντίστοιχα την απενεργοποιεί δίνοντας χαμηλές ($\leq 600\text{rpm}$).

Στην περίπτωση όπου η πηγή χρειαστεί να επιτελέσει κατεργασία που απαιτεί παλμική δέσμη Laser, θα χρειαστεί να αναπτυχθεί κατάλληλος κώδικας προγράμματος και να ενσωματωθεί με την εντολή loadrt (load real time component) που να ελέγχει τη διαδοχή των σημάτων, τη συχνότητα και τον κύκλο εργασίας (duty cycle) του παλμού.

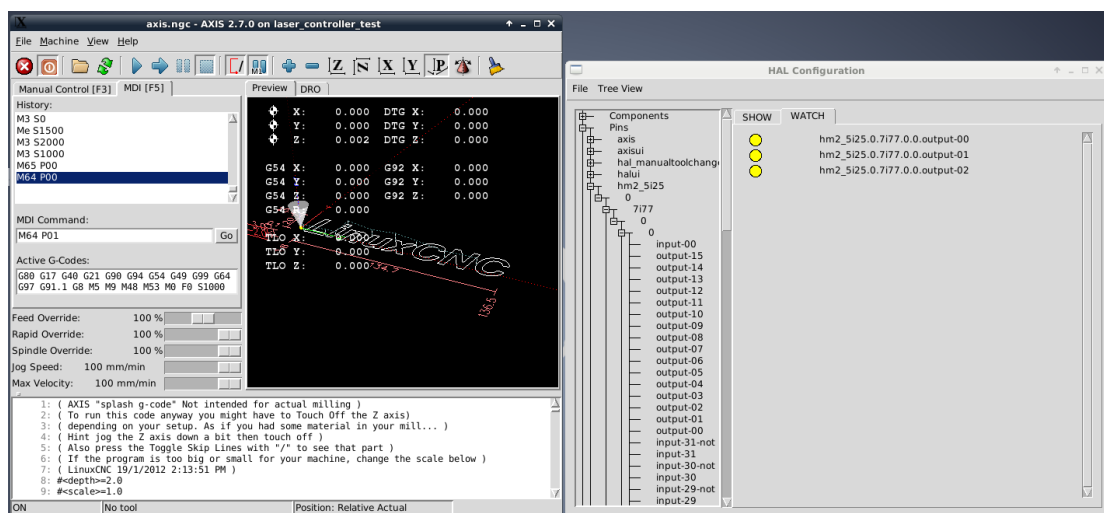
7. Δοκιμές και Αποτελέσματα

7.1 Δοκιμές ελέγχου της πηγής του Laser

Για την πλήρη δοκιμή της λειτουργικότητας του ελεγκτή θα ήταν απαραίτητη η επισκευή και η επαναφορά της LE3000 σε λειτουργική κατάσταση. Ωστόσο, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο αυτή η αποκατάσταση δεν ήταν εφικτή δεδομένων των καταστάσεων. Παρά την έλλειψη μιας λειτουργικής πηγής laser όμως, η δοκιμή του ελεγκτή κατέστη πραγματοποιήσιμη χάρη στην ίδια τη δομή του LinuxCNC και τη συμβατότητα του σερβοκινητήρα του 4^{ου} άξονα της μηχανικής τράπεζας με την πηγή του laser από πλευράς συνδεσμολογίας, ώστε, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 6 να γίνει δοκιμή των σημάτων ελέγχου αντικαθιστώντας τη δέσμη του laser με την άτρακτο του μοτέρ.

7.1.1 Δοκιμή ON-OFF του κλείστρου της πηγής

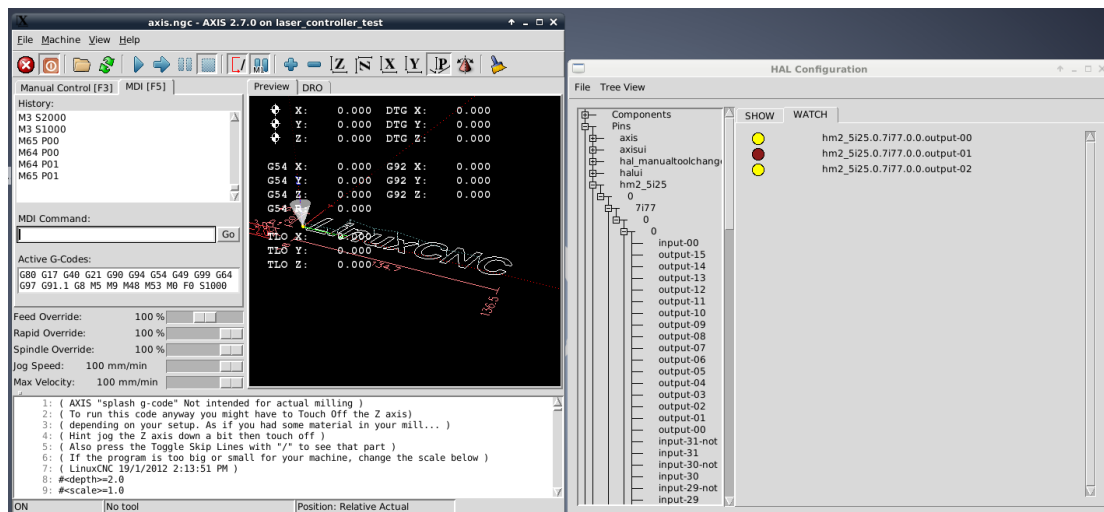
Η πρώτη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε πάνω στην ελεγχόμενη διάταξη αφορούσε τον έλεγχο θέσης του κλείστρου. Τα 2 σήματα που ορίζουν τη θέση του κλείστρου είναι τα ψηφιακά dout-00 και dout-01 τα οποία λαμβάνουν αρχική τιμή 1 (TRUE) κατά την έναρξη λειτουργίας του LinuxCNC. Για την εν λόγω δοκιμή το λογισμικό και η τράπεζα της εργαλειομηχανής τέθηκε σε λειτουργία και οι τιμές των σημάτων μεταβλήθηκαν μέσω των εντολών M64 και M65 όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μέσω του ψηφιακού εργαλείου HAL Meter του LinuxCNC ο χρήστης αποκτά οπτική αντίληψη των μεταβολών των τιμών των σημάτων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 69: Το περιβάλλον του HAL Meter και η αναπαράσταση των επαφών

Οι επαφές που επιλέγονται, στην παρούσα περίπτωση οι ψηφιακές επαφές εξόδου 00 και 01, καθώς και η ψηφιακή επαφή 02 που αφορά την ενεργοποίηση (enable) του

εξωτερικού ελέγχου της δέσμης απεικονίζονται με το κυκλικό κομβίο που φαίνεται στα δεξιά της παραπάνω εικόνας. Εάν το σήμα έχει αληθή τιμή, τότε το κομβίο έχει κίτρινο χρώμα. Αν η τιμή του σήματος μεταβληθεί σε ψευδή, όπως στην περίπτωση που ο χρήστης χρησιμοποιήσει την εντολή MDI M64 το χρώμα του κομβίου γίνεται σκούρο καφέ. Παράδειγμα της μεταβολής αυτής παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:

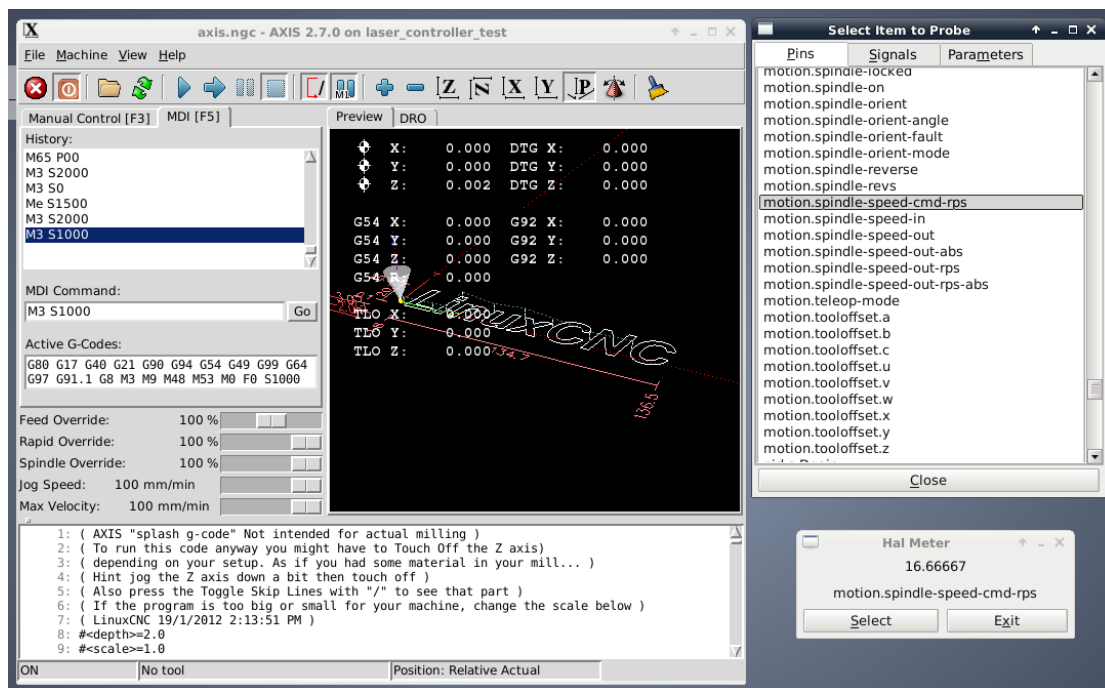


Εικόνα 70: Μεταβολή τιμής ψηφιακού σήματος στο HAL Meter

Με τον παραπάνω τρόπο διαπιστώθηκε πως ο χρήστης με το ζεύγος εντολών MDI M64/M65 διαθέτει πλήρη έλεγχο των σημάτων σε πραγματικό χρόνο, επομένως μπορεί να ρυθμίζει την κίνηση του κλείστρου και να ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί κατά βούληση τον εξωτερικό έλεγχο της δέσμης του Laser.

7.1.2 Δοκιμή εφαρμογής ελέγχου της έντασης της δέσμης

Για τη δοκιμή του αναλογικού σήματος 0-10V που ρυθμίζει την εκλυόμενη ισχύ της δέσμης, σύμφωνα με το σχεδιασμό του Κεφαλαίου 6, στη θέση της LE3000 χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικά ο κινητήρας του 4^{ου} άξονα της μηχανικής τράπεζας. Αντί για τη χρήση του κομβίου χρησιμοποιήθηκε εναλλακτική μορφή απεικόνισης, καθώς στην περίπτωση του αναλογικού σήματος απαιτούνταν η γνώση της τιμής του σήματος με ακρίβεια. Με διαδοχικές δοκιμές, ο άξονας του κινητήρα ανταποκρίθηκε με αισθητή διαφορά σε διαφορετικές εντολές ταχυτήτων, ενώ ο έλεγχος των τιμών των σημάτων έγινε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 71: Απεικόνιση αναλογικού σήματος μέσω του HAL Meter

7.1.3 Συνδυαστική δοκιμή ελέγχου της δέσμης και κίνησης της τράπεζας

Η τελευταία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε αφορούσε την ενσωμάτωση των παραπάνω εντολών σε πρόγραμμα κατεργασίας. Όπως φαίνεται παραπάνω στην Εικόνα 71, η τροχιά που δόθηκε αποσκοπούσε στη χάραξη του λογότυπου του LinuxCNC. Στο πρόγραμμα αυτό ενσωματώθηκαν οι εντολές M64/M65 στα σημεία στα οποία απαιτούνταν εκπομπή της δέσμης του Laser ενώ δοκιμαστικά παρεμβλήθηκαν εντολές μεταβολής στροφών ατράκτου (S200, S700, S1500 και S3000) σε τυχαία σημεία του προγράμματος. Με παρατήρηση των κομβίων και της κίνησης του 4^{ου} άξονα διαπιστώθηκε η ορθή λειτουργία των σημάτων κατά την κατεργασία.

8. Προμελέτη προσαρμογής του κέντρου κατεργασιών Laser για κατεργασία πρόσθεσης υλικού

Με δεδομένη την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης και των δοκιμών που περιγράφονται στα προηγούμενα κεφάλαια εξασφαλίζεται η επαναφορά της LE3000 σε λειτουργική κατάσταση. Η δυνατότητα ελέγχου των χαρακτηριστικών της δέσμης της πηγής, ως προς την ισχύ της συνεχούς λειτουργίας και ως προς τη συχνότητα και τον κύκλο εργασίας στην παλμική λειτουργία θέτει τα θεμέλια για την ανάπτυξη μιας νέας διάταξης στους χώρους του εργαστηρίου η οποία θα καθιστά εφικτή τη διεξαγωγή έρευνας με θέμα την κατεργασία με πρόσθεση υλικού (additive manufacturing), ιδιαίτερα σε προηγμένα υλικά, μεταλλικά κράματα ή υαλώδη.

8.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

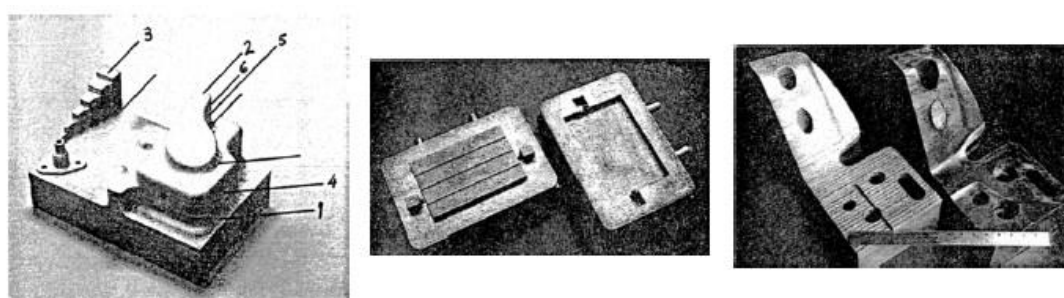
Η σχετική έρευνα για τη χρήση των Laser CO₂ υψηλής ισχύος σε κατεργασίες πρόσθεσης υλικού, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1 παρουσίαζε πολύ ενδεικτικά 2 βασικές εφαρμογές δέσμης Laser CO₂. Μια εκτενέστερη και πιο στοχευμένη έρευνα αποκαλύπτει μεγαλύτερο πλήθος εφαρμογών εστιάζει εμφατικά σε τρεις μεθόδους οι οποίες αφορούν την επεξεργασία υλικών υψηλής αντοχής και ειδικών εφαρμογών. Μεταλλικά κράματα με βάση το Τιτάνιο, το Νικέλιο, το Χαλκό και το Αλουμίνιο, ανοξείδωτοι χάλυβες και γυαλί χαλαζία είναι κάποια από τα υπό μελέτη υλικά. Οι εν λόγω μέθοδοι, όπως περιγράφησαν στην Παράγραφο 2.3.2 είναι η Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση ή Τήξη με Laser (SLS/SLM), η Απευθείας Εναπόθεση Υλικού σε σκόνη (Powder DMD) και η Εναπόθεση Τηγμένου Σύρματος (Wire LMD).

Ειδικότερα, για την καθεμία από τις παραπάνω μεθόδους:

Το 1997 η ερευνητική ομάδα του **J. Mazumder [17]** δημοσιεύει μια από τις πρώτες μελέτες σχετικά με τη μέθοδο DMD με τίτλο «The Direct Metal Deposition of H13 Tool Steel for 3D components». Η μελέτη αφορούσε την προσθετική κατεργασία με εναπόθεση σκόνης χάλυβα H13. Ο εν λόγω χάλυβας χρησιμοποιείται για την κατασκευή καλουπιών. Περιέχει προσμίξεις Χρωμίου και Μολυβδαίνιου και απαιτεί θερμική κατεργασία για την πλειονότητα των εφαρμογών του. Αποτελεί δυσκατέργαστο υλικό, διότι οι παραμένουσες τάσεις που εμφανίζει εξ αιτίας των μαρτενσιτικών σχηματισμών στη δομή του οδηγούν σε παραμορφώσεις του τελικού τεμαχίου μετά από θερμή κατεργασία. Η μέθοδος DMD που εφαρμόστηκε έκανε χρήση πηγής Laser CO₂ ονομαστικής ισχύος δέσμης ίσης με 4.5kW. Η ισχύς της χρησιμοποιούμενης δέσμης κυμαινόταν μεταξύ 2 και 3 kW. Ο ρυθμός τροφοδοσίας της σκόνης ανερχόταν στα 16g/min και η ταχύτητα

πρώσης της μηχανικής τράπεζας στην οποία έγινε η εναπόθεση κυμάνθηκε μεταξύ στα 1560mm/min και 3300mm/min. Η κατεργασία απαιτούσε αδρανή ατμόσφαιρα, για το λόγο αυτό ο θάλαμος εναπόθεσης σκόνης τροφοδοτήθηκε με Αργόν, το οποίο χρησιμοποιήθηκε επίσης για την κυκλοφορία της σκόνης. Το υλικό τοποθετήθηκε σε επίπεδες στρώσεις ύψους 0.4mm και μεταξύ ενός αριθμού στρώσεων το τεμάχιο υφίστατο ανακούφιση τάσεων για την αποφυγή συσσωρευμένης συνολικής τάσης κατά την περάτωση της κατεργασίας.

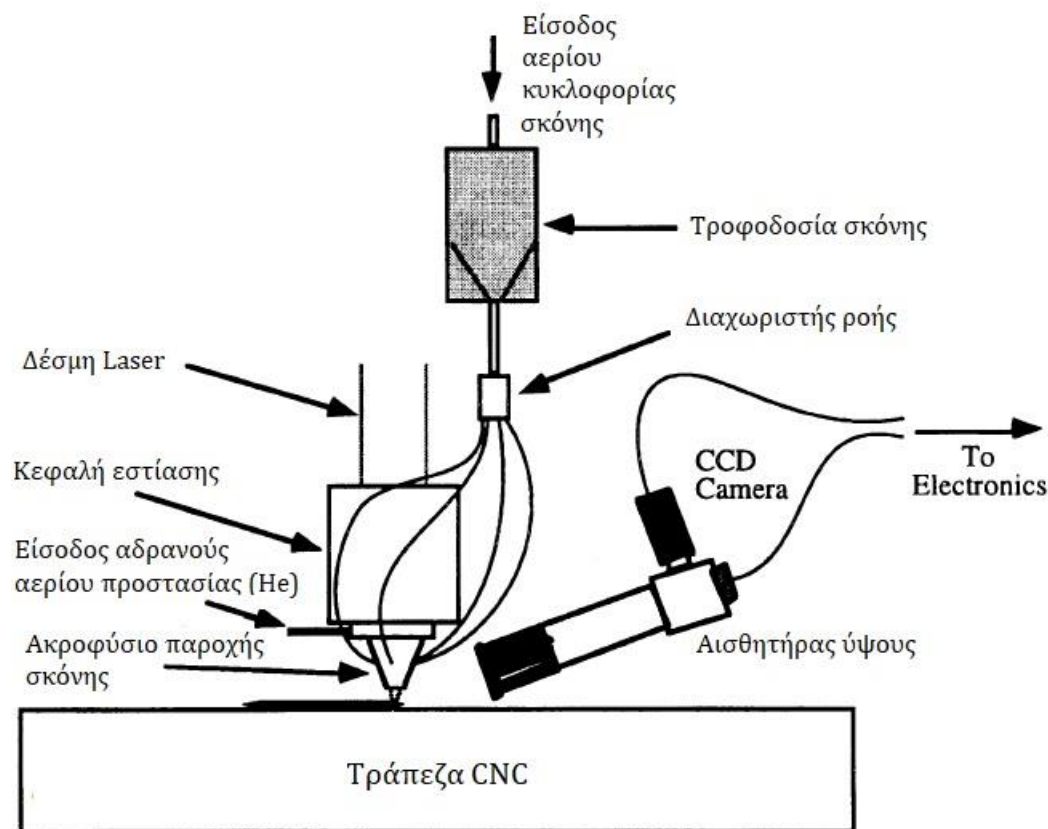
Στο πλαίσιο της παραπάνω μελέτης παράχθηκε ένας αριθμός μεταλλικών καλουπιών, μερικά εκ των οποίων απεικονίζονται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 72: Αποτελέσματα μεθόδου DMD με Laser CO₂ το 1997

Όλα τα κατεργασμένα τεμάχια παρουσίασαν ανοχή κατεργασίας της τάξης των χιλιοστών του εκατοστού και χάρη στην ενδιάμεση τασική ανακούφιση παρουσίασαν αμελητέα συσσωρευση τάσεων.

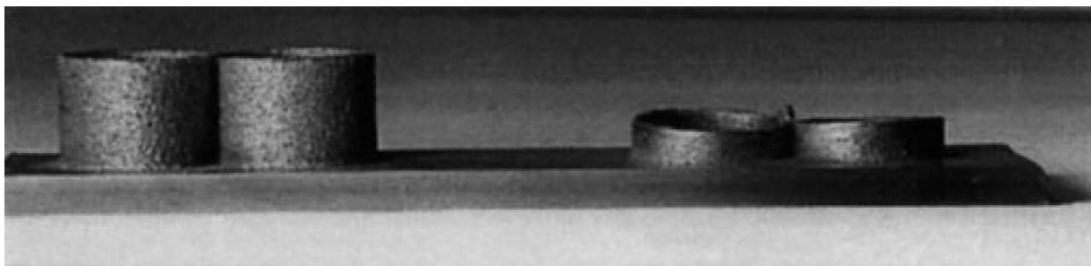
Δύο χρόνια αργότερα η ίδια ερευνητική ομάδα δημοσίευσε μια ακόμη σχετική έρευνα στην οποία όμως δινόταν έμφαση στη χρησιμοποιούμενη διάταξη **[16]**. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε πηγή Laser CO₂ ονομαστικής ισχύος 6kW ενσωματωμένη σε μηχανική ψηφιακά καθοδηγούμενη τράπεζα 5 αξόνων. Η δέσμη λειτούργησε σε παλμική λειτουργία και οι προώσεις των αξόνων ορίστηκαν στα 169.3mm/s. Για την ανατροφοδότηση του ύψους στο οποίο πρέπει να βρεθεί η κεφαλή εστίασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Ανακλαστικής Τοπογραφίας, με προσαρμοσμένη κάμερα συζευγμένου φορτίου (CCD). Εφαρμόστηκαν δυο μορφές ελέγχου, για ζωντανή επιτήρηση τόσο του ύψους όσο και της σύστασης του κατεργαζόμενου τεμαχίου, έλεγχος κλειστού βρόχου και στη συνέχεια ανοικτού. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 73: Διάταξη DMD με ανατροφοδότηση (1999)

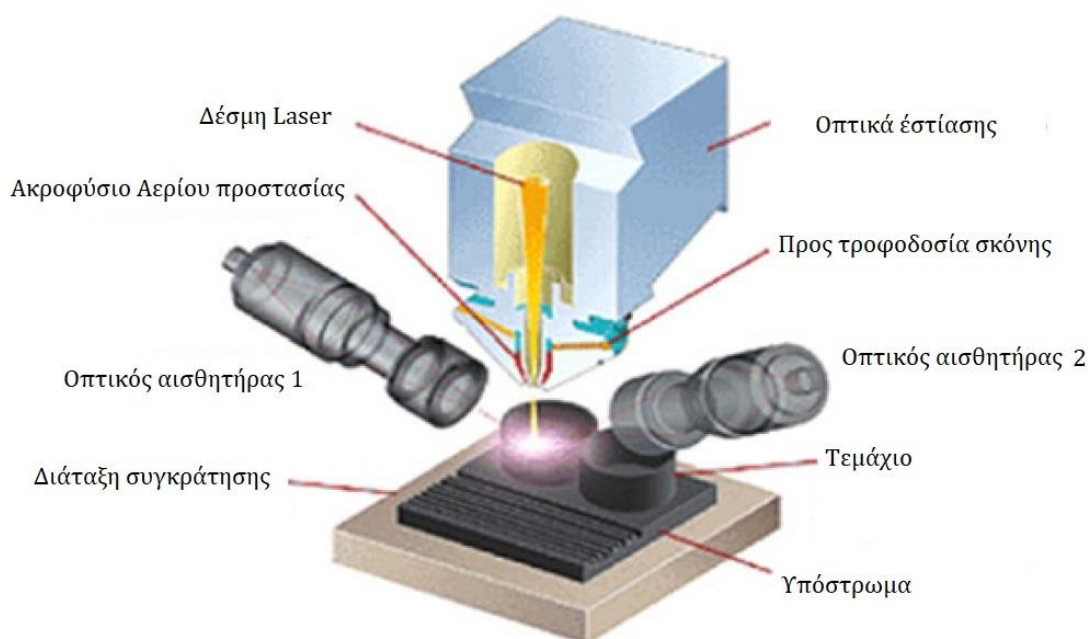
Για την παραπάνω δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν δυο τεχνικές εναπόθεσης σκόνης. Η πρώτη, απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα και χρησιμοποιεί ομοαξονικό ακροφύσιο, το οποίο οδηγεί τη σκόνη του μετάλλου σε ροή παράλληλη και ομόκεντρη με τη δέσμη. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει ομοιόμορφη εναπόθεση του υλικού στην τράπεζα ανεξάρτητα από την κατεύθυνση κίνησής της. Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιούσε δεύτερο ακροφύσιο για την παροχή της σκόνης τοποθετημένο υπό κλίση στο πλάι της δέσμης. Η μέθοδος αυτή επικράτησε ως προς το ρυθμό εναπόθεσης υλικού, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερους όγκους σε μικρότερα χρονικά διαστήματα, ωστόσο παρουσίαζε ανομοιομορφίες ως προς την ποσότητα της εναποτιθέμενης σκόνης σε αλλαγές κατεύθυνσης της κίνησης της τράπεζας. Οι συγγραφείς της μελέτης συνέστησαν τη χρήση και των 2 τεχνικών ταυτόχρονα με τη δυνατότητα περιστροφής της κεφαλής του Laser ώστε το κεκλιμένο ακροφύσιο να βρίσκεται πάντα προσανατολισμένο σύμφωνα με την κίνηση της τράπεζας.

Η χρήση οπτικής ανατροφοδότησης κρίθηκε επίσης αναγκαία για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Συγκριτικά αποτελέσματα της παραπάνω κατεργασίας με και χωρίς οπτική ανατροφοδότηση ύψους φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 74: Σύγκριση DMD με και χωρίς οπτική ανατροφοδότηση ύψους κεφαλής

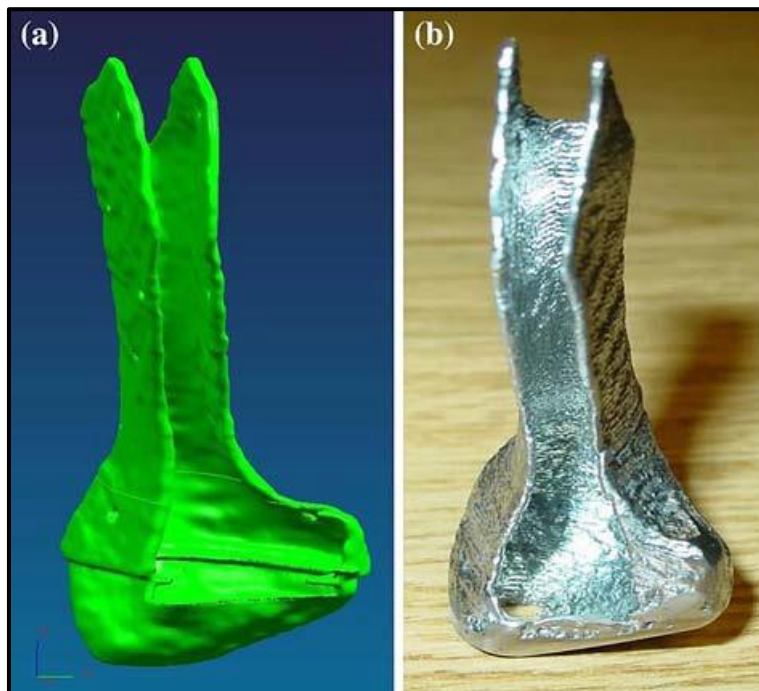
Η ομάδα του **G.P.Dinda**, με τη συμμετοχή του **J. Mazumder** το 2008 δημοσίευσαν μια μελέτη που αφορούσε την προσθετική κατεργασία κράματος βασισμένου στο Τιτάνιο (Ti-6Al-4V) για την κατασκευή βιοσυμβατών ικριωμάτων (biocompatible scaffolds) [17]. Η έρευνα έκανε χρήση πηγής Laser CO₂ 6kW προσαρμοσμένης σε οριζόντια μηχανική τράπεζα (X-Y). Η κεφαλή εστίασης είχε δυνατότητα κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα (Z). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 75: Διάταξη DMD με διπλή οπτική ανατροφοδότηση (2008)

Η παραπάνω διάταξη χρησιμοποιούσε αποκλειστικά ομοαξονικό ακροφύσιο, στο οποίο η ροή της σκόνης συνέκλινε στο σημείο εστίασης της δέσμης του Laser. Η προστασία της κατεργασίας και η κυκλοφορία του υλικού πραγματοποιούνταν με μίγμα από Ήλιο και Αργόν. Οι ταχύτητα πρόωσης των αξόνων ανερχόταν στα 36.6mm/min και ο ρυθμός τροφοδοσίας της σκόνης του υλικού οριζόταν στα 5g/min. Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσίασαν μια επιτυχή κατασκευή, με μέση τραχύτητα επιφανείας του παραγόμενου τεμαχίου στα 25μm (8-12μm με επιπλέον μηχανική και χημική κατεργασία). Το

ολοκληρωμένο ικρίωμα συγκριτικά με το τρισδιάστατο μοντέλο CAD στο οποίο βασίστηκε η κατεργασία απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα:

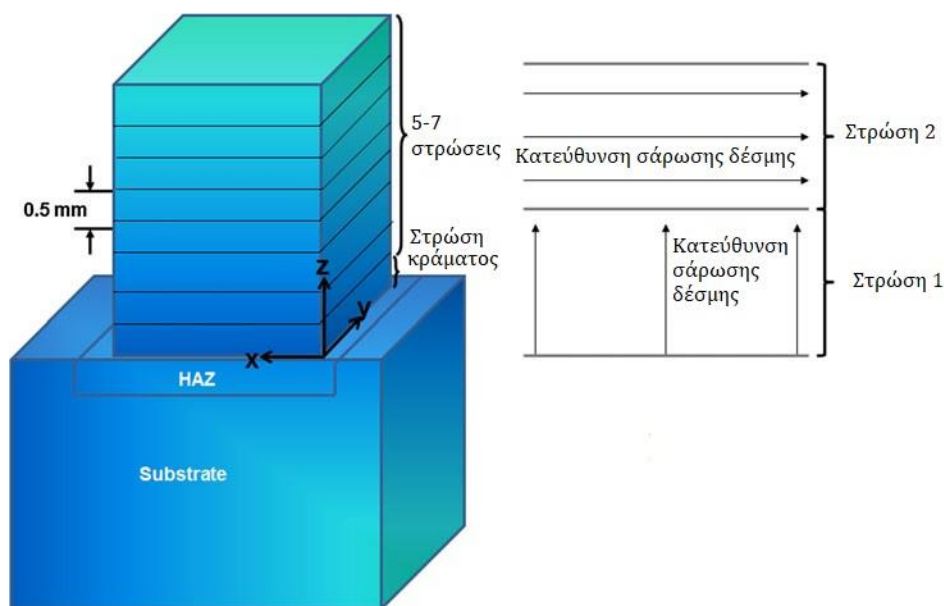


Εικόνα 76: Σύγκριση μοντέλου CAD με το κατεργασμένο με DMD ικρίωμα

Η παραπάνω ερευνητική συνεργασία οδήγησε σε μια νέα δημοσίευση το 2012 χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη με πηγή Laser CO₂ ισχύος 6kW [18]. Η μελέτη αφορούσε την κατεργασία υπερκράματος Νικελίου (IN718 – «Praxair»). Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται τυπικά σε εγκαταστάσεις πυρηνικών αντιδραστήρων, αεριοστροβίλων και αεροπορικών κινητήρων εξ αιτίας της εξαιρετικής αντίστασης του έναντι διάβρωσης, των μηχανικών ιδιοτήτων του και της δομικής του σταθερότητας σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Το μειονέκτημα του παραπάνω υλικού αποτελούσε το υψηλό κόστος για την παραγωγή μονοκρυσταλλικών δομών του, επομένως υπήρχε ανάγκη διερεύνησης μεθόδων που θα επέτρεπαν την παραγωγή τεμαχίων με χαμηλότερο κόστος. Στη δημοσίευση παρουσιαζόταν η μελέτη των παραμέτρων κατεργασίας της εναπόθεσης σκόνης του υπερκράματος για την κατασκευή κυβικών δοκιμίων με στόχο την επίτευξη διαφορετικών επιφανειακών υφών. Η ισχύς της δέσμης που χρησιμοποιήθηκε ανερχόταν στα 750W, η ταχύτητα πρόωσης της τράπεζας ορίστηκε στα 6.25mm/s (375mm/min), η παροχή μάζας σκόνης 0.2g/s και για την αδρανοποίηση της ατμόσφαιρας και την κυκλοφορία της σκόνης χρησιμοποιήθηκε Ήλιο.

Το 2013 οι **Bhattacharya et al** [19] δημοσίευσαν συγκριτική μελέτη για την κατεργασία με πρόσθεση υλικού DMD κράματος Χαλκού – Νικελίου (Cu38Ni) χρησιμοποιώντας τη διάταξη με Laser CO₂ των [17] και [18] καθώς και μια πηγή Laser ινών ονομαστικής

ισχύος 1kW. Η πηγή δέσμης CO₂ ρυθμίστηκε στα 2.1kW, οι ταχύτητες πρόωσης της τράπεζας ορίστηκαν στα 600mm/min και η παροχή σκόνης ανήλθε στα 17g/min. Η διάμετρος της δέσμης του Laser ήταν 2mm και το ύψος των στρώσεων 0.5mm. Η διερεύνηση της κατεργασίας του συγκεκριμένου υλικού παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς επρόκειτο για υλικό υψηλής αντοχής έναντι διάβρωσης κατάλληλο για εφαρμογές στη Ναυπηγική. Στο πλαίσιο της έρευνας κατασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια 5-7 στρώσεων κράματος, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:

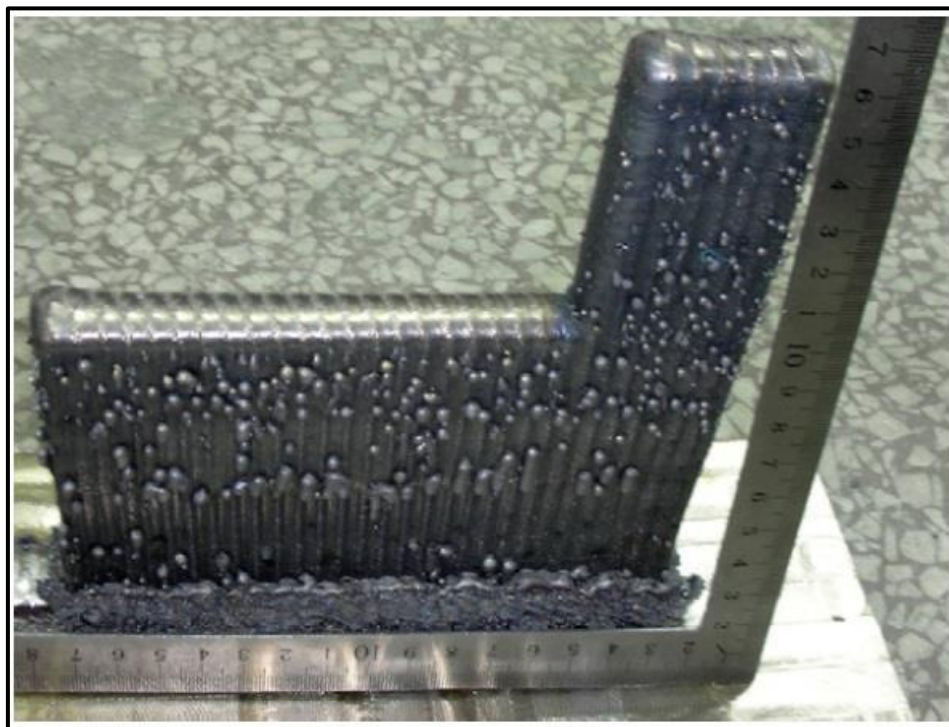


Εικόνα 77: Σχηματική απεικόνιση δοκιμίων DMD

Για τη βελτιστοποίηση του συνδυασμού των παραμέτρων της κατεργασίας εφαρμόστηκε μέθοδος Taguchi L9, με σκοπό την επίτευξη του ελάχιστου δυνατού πορώδους και τη μεγιστοποίηση του ρυθμού εναπόθεσης. Η κατεργασία ήταν επιτυχής και με τη χρήση των 2 ειδών Laser, με την πηγή CO₂ να παρουσιάζει πιο στενή κατανομή του μεγέθους των κόκκων και υψηλότερη μικροσκληρότητα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης οι μελέτες των **J. Li et al** το 2010 και 2012 [20] [21]. Οι δυο δημοσιεύσεις αφορούσαν τη μελέτη της μεθόδου DMD για την κατασκευή δοκιμίων από μεταλλικό υπερκράμα βασισμένο στο Νικέλιο, το René 41. Το εν λόγω υλικό χρησιμοποιείται στην αεροπορική βιομηχανία, ιδίως στην κατασκευή των δομικών στοιχείων αεροπορικών κινητήρων, χάρη στις εξαιρετικές του μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες (815 - 900°C) και την αντοχή του έναντι διάβρωσης και οξειδωσης. Η μελέτη χρησιμοποίησε πηγή Laser διοξειδίου του άνθρακα ισχύος 8kW ρυθμισμένη σε λειτουργία σε εύρος μεταξύ 4500 – 5000W και τράπεζα CNC τεσσάρων αξόνων με προώσεις 300 – 350 mm/min και παροχή μάζας σκόνης 10.5 – 12.5 g/min. Το δοκίμιο αναπτύχθηκε πάνω σε βάση από ανοξείδωτο χάλυβα και αέριο Αργόν χρησιμοποιήθηκε

τόσο για την προστασία όσο και για την κυκλοφορία της σκόνης του μετάλλου. Το αποτέλεσμα της κατεργασίας φαίνεται παρακάτω. Απαιτήθηκε θερμική και μηχανική επεξεργασία για την περάτωση του τεμαχίου, ωστόσο οι μηχανικές του ιδιότητες αποδείχθηκαν ικανοποιητικές.



Εικόνα 78: Μακροδομή δοκιμίου DMD από υπερκράμα Νικελίου

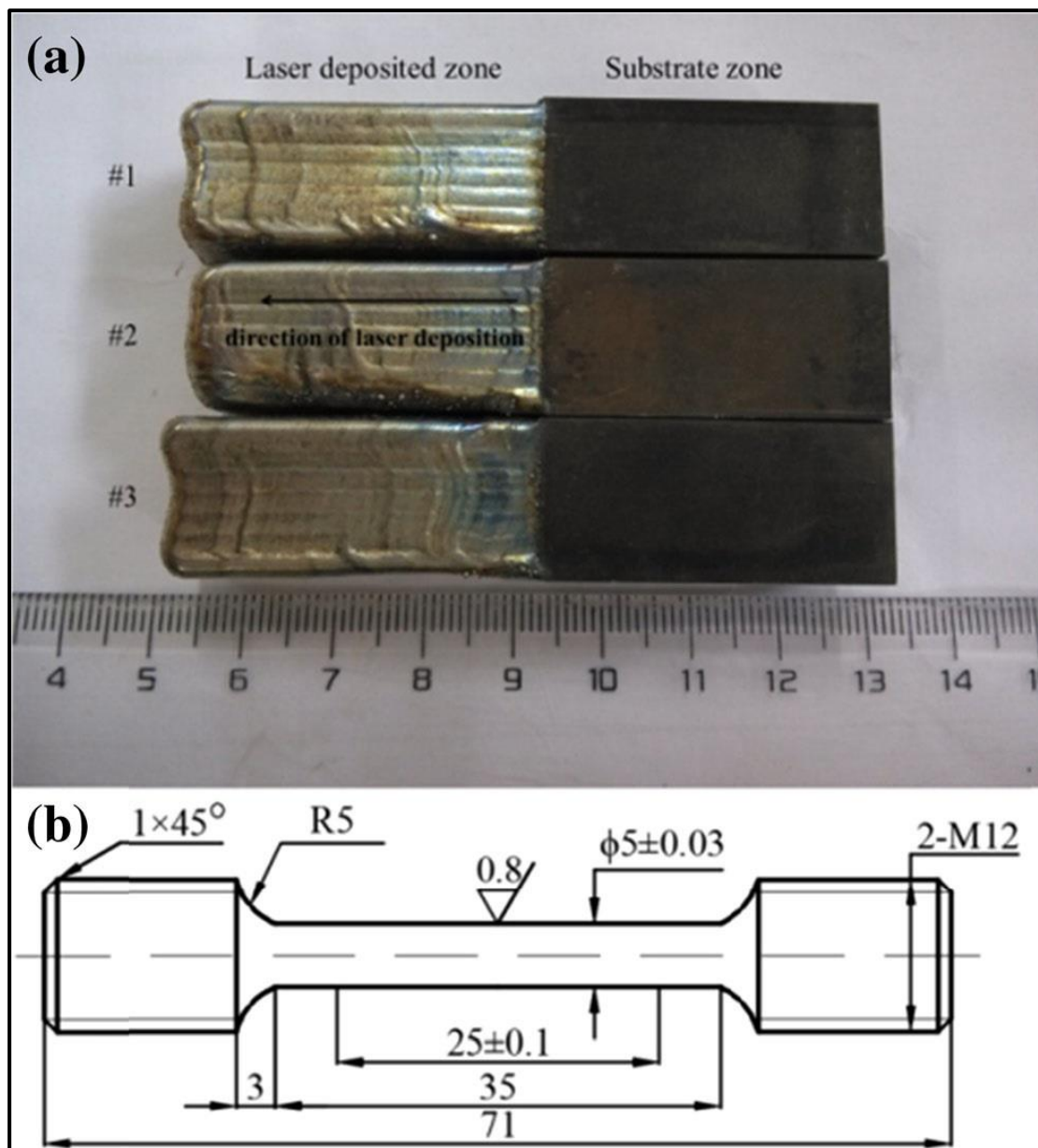
Μια ακόμη αξιοσημείωτη εφαρμογή δημοσιεύτηκε το 2017 από τους **Sui et al [22]** από το Northwestern Polytechnical University της Κίνας. Η μελέτη αφορούσε τις ιδιότητες δοκιμών υπερκράματος Inconel 718 κατεργασμένων κατά το ήμισυ με τη μέθοδο DMD, με την εναπόθεση υλικού κατά τη διεύθυνση της δοκιμής εφελκυσμού. Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε δέσμη Laser CO₂ ισχύος 8kW. Οι παράμετροι της κατεργασίας καταγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

| Ισχύς δέσμης (kW) | Ταχύτητα πρόωσης (mm/s) | Διάμετρος δέσμης (mm) | Υψος στρώσης (mm) | Παροχή μάζας σκόνης (g/min) | Επικάλυψη πάσων (%) |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1.5 – 2 | 8 – 12 | 2 | 0.3 – 0.4 | 5 – 6 | 50 |

Πίνακας 3: Παράμετροι κατεργασίας DMD

Τα δοκίμια που παράχθηκαν με την παραπάνω μέθοδο απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα. Αφού κατεργάστηκαν στη μορφή που φαίνεται παρακάτω δοκιμάστηκαν έναντι εφελκυσμού. Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν αδυναμία στην περιοχή σύνδεσης

του εναποτιθέμενου με Laser υλικού με το υπόστρωμα, πιθανότατα εξ αιτίας της θερμικής επίδρασης της δέσμης στην περιοχή αυτή.

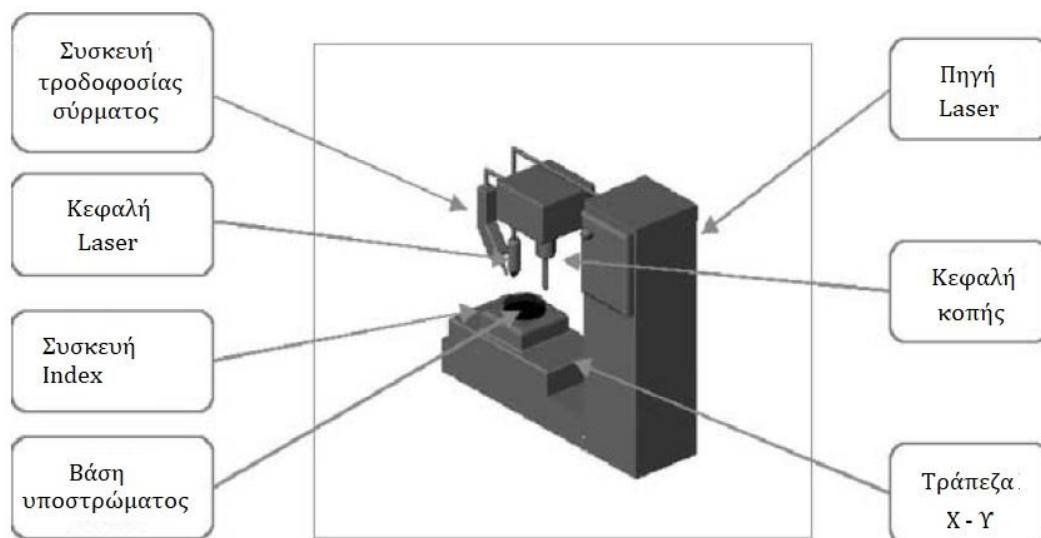


Εικόνα 79: Δοκίμια εφελκυσμού από 50% DMD

Για την αντίστοιχη κατεργασία με πρόσθεση υλικού όπου αντί για σκόνη χρησιμοποιείται μεταλλικό σύρμα οι δημοσιεύσεις ήταν αισθητά λιγότερες. Ωστόσο δύο εξ αυτών ξεχώρισαν και παρουσιάζονται παρακάτω:

Αρχικά, οι **Doo-Sun Choi et al [23]** το 2001 ανέπτυξαν μια τεχνική εναπόθεσης και συγκόλλησης τήγματος μετάλλου με τροφοδοσία σύρματος, σε συνδυασμό με κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελούταν από μηχανική οριζόντια τράπεζα και κατακόρυφα κινούμενη στήλη με εργαλειοφόρα που

πραγματοποιούσε εναλλαγή μεταξύ ακροφύσιου Laser δέσμης CO₂ ισχύος 600-700W και κοπτικού εργαλείου. Στην απόληξη του ακροφύσιου του Laser ήταν προσαρμοσμένο δεύτερο ακροφύσιο υπό γωνία 20 -30° το οποίο ήταν συνδεδεμένο με σύστημα εξώθησης σύρματος με παροχή 400 – 600 mm/min.



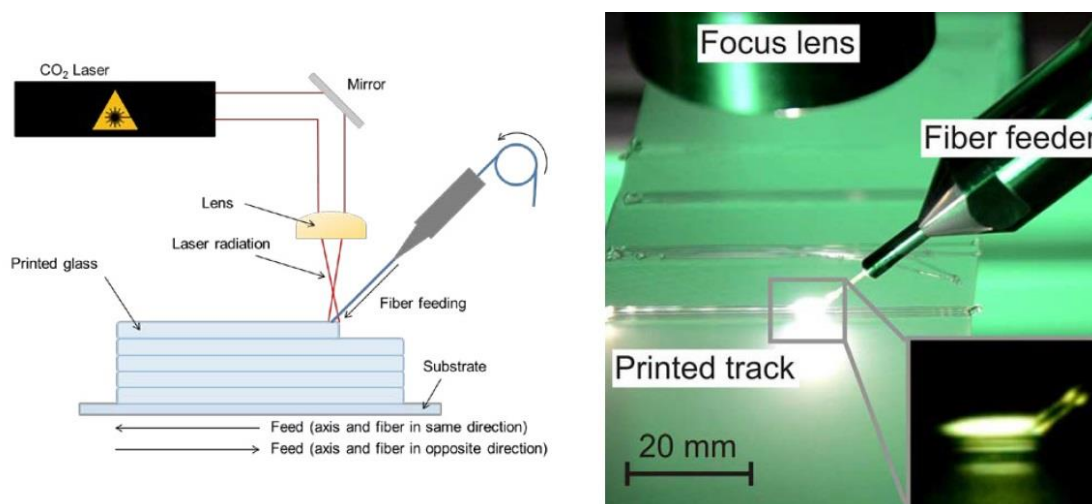
Εικόνα 80: Διπλή διάταξη κατεργασίας Wire LMD και κοπής

Η φιλοσοφία της παραπάνω μεθόδου έγκειται στην αλληλοϋποστήριξη των 2 μεθόδων, πρόσθεσης και αφαίρεσης υλικού. Η κατεργασία με Laser δημιουργεί τη βασική δομή και το κοπτικό εργαλείο ολοκληρώνει τη διεργασία προσδίδοντας κατάλληλες ανοχές και πιστότητα επιφανείας.



Εικόνα 81: Διπλή κατεργασία και αποτέλεσμα

Η δεύτερη εφαρμογή, έχει ήδη περιγραφεί στην παράγραφο της σχετικής έρευνας. Πρόκειται για το έργο των **Philip von Witzendorff et al [2]** το 2018 όπου πραγματοποίησαν κατεργασία με τήξη και εναπόθεση ίνας γυαλιού χαλαζία για τη δημιουργία τεμαχίων. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται σχηματικά και σε φωτογραφία στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 82: Προσθετική κατεργασία με ένα γυαλιού χαλαζία

Οι παράμετροι της κατεργασίας ήταν οι εξής: Ισχύς δέσμης Laser CO₂ 90 – 120Watt και πρόωση άξονα, ίση με το ρυθμό τροφοδοσίας της γυάλινης ίνας, 200 – 300 mm/min. Στο πλαίσιο της μελέτης παράχθηκε κυλινδρικό δοκίμιο και δόθηκε έμφαση στην ανάγκη ελέγχου της παροχής θερμότητας της δέσμης για την επίτευξη βέλτιστου αποτελέσματος.



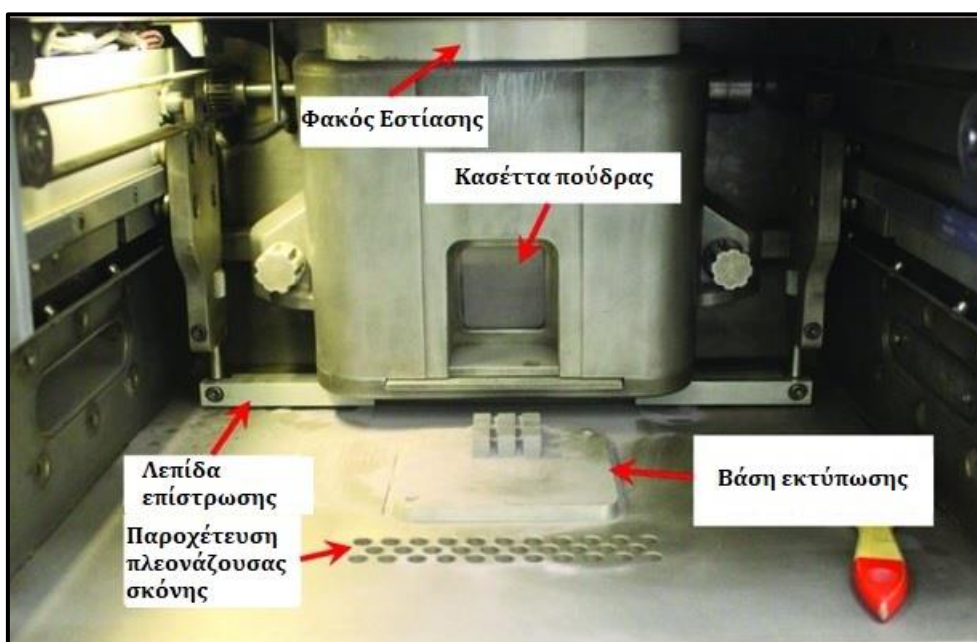
Εικόνα 83: Αποτέλεσμα κατεργασίας με τήξη ίνας γυαλιού με δέσμη Laser

Σχετικά με την επιλεκτική τήξη ή πυροσυσσωμάτωση επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται οι τρεις ακόλουθες δημοσιεύσεις:

Η πρώτη μελέτη, των **A. Simchi et al [24]** το 2004 αφορούσε την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση σκόνης ταχυχάλυβα M2 με συνεχή δέσμη Laser CO₂ ισχύος 200W. Χρησιμοποιήθηκαν ταχύτητες σάρωσης μεταξύ 50 και 175 mm/s και για την αξιολόγηση της επίδρασης της ατμόσφαιρας του θαλάμου της κατεργασίας χρησιμοποιήθηκαν

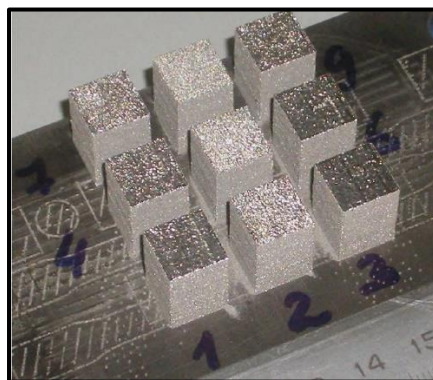
Αργόν και Άζωτο. Η μελέτη κατέληξε πως μεγαλύτερες ταχύτητες σάρωσης είχαν αρνητική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα, αλλά σε χαμηλές ταχύτητες, όπου η αλληλεπίδραση της δέσμης με το υλικό επεκτεινόταν, αυξανόταν ο κίνδυνος σχηματισμού ρηγματώσεων ή σφαιριδίων μετάλλου.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσίαζε η πρόσφατη δημοσίευση των **Baitimerov et al [25]** το 2017. Η μελέτη εστίαζε στην κατεργασία SLM πούδρας κράματος Ti-6Al-4V σε διάταξη SLM του εμπορίου, Sinterstation Pro DM125. Η συσκευή χρησιμοποιούσε δέσμη Laser διοξειδίου του άνθρακα ισχύος 200W με διάμετρο 35μm, θερμαινόμενη τράπεζα και αυτόματο σύστημα εναπόθεσης και ομοιόμορφης διασποράς στρώσης της πούδρας. Η ατμόσφαιρα του θαλάμου προστατευόταν με Αργόν.



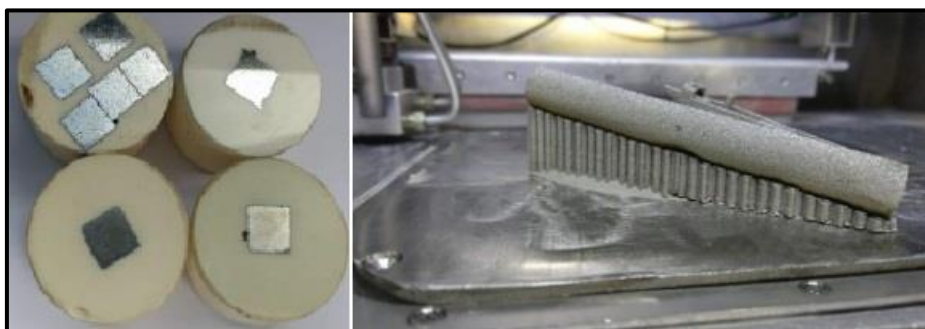
Εικόνα 84: Εμπορική διάταξη SLM μετάλλου

Η δοκιμή παρήγαγε κυβικά δοκίμια, τα οποία απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα. Το ελάχιστο πορώδες που επιτεύχθηκε ανήλθε στο 0.5%.



Εικόνα 85: Κυβικά δοκίμια SLM κράματος τιτανίου

Η τελευταία δημοσίευση έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 1 και πρόκειται για την έρευνα των **Vevers, Kromanis & Gerins [3]** το 2018, κατά την οποία μελετήθηκε η απόδοση και οι παράμετροι της επιλεκτικής τήξης SLM ανοξείδωτου χάλυβα 316L με δέσμη Laser CO₂. Για την πειραματική δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ζεύγος πηγών Laser συνολικής ισχύος 300W. Οι ταχύτητες πρόωσης κυμάνθηκαν μεταξύ 1500 και 2400 mm/min και το ύψος των διαδοχικών στρώσεων μεταξύ 30 και 50μm. Στο πλαίσιο της δοκιμής παράχθηκαν κυβικά δοκίμια τα οποία υπέστησαν στη συνέχεια μηχανική επιφανειακή επεξεργασία, καθώς και δοκίμιο εφελκυσμού. Τα δοκίμια παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα, ενώ τα αποτελέσματα της μελέτης συνοπτικά αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.3.



Εικόνα 86: Δοκίμια ανοξείδωτου χάλυβα 316L από SLM με δέσμη Laser CO₂.

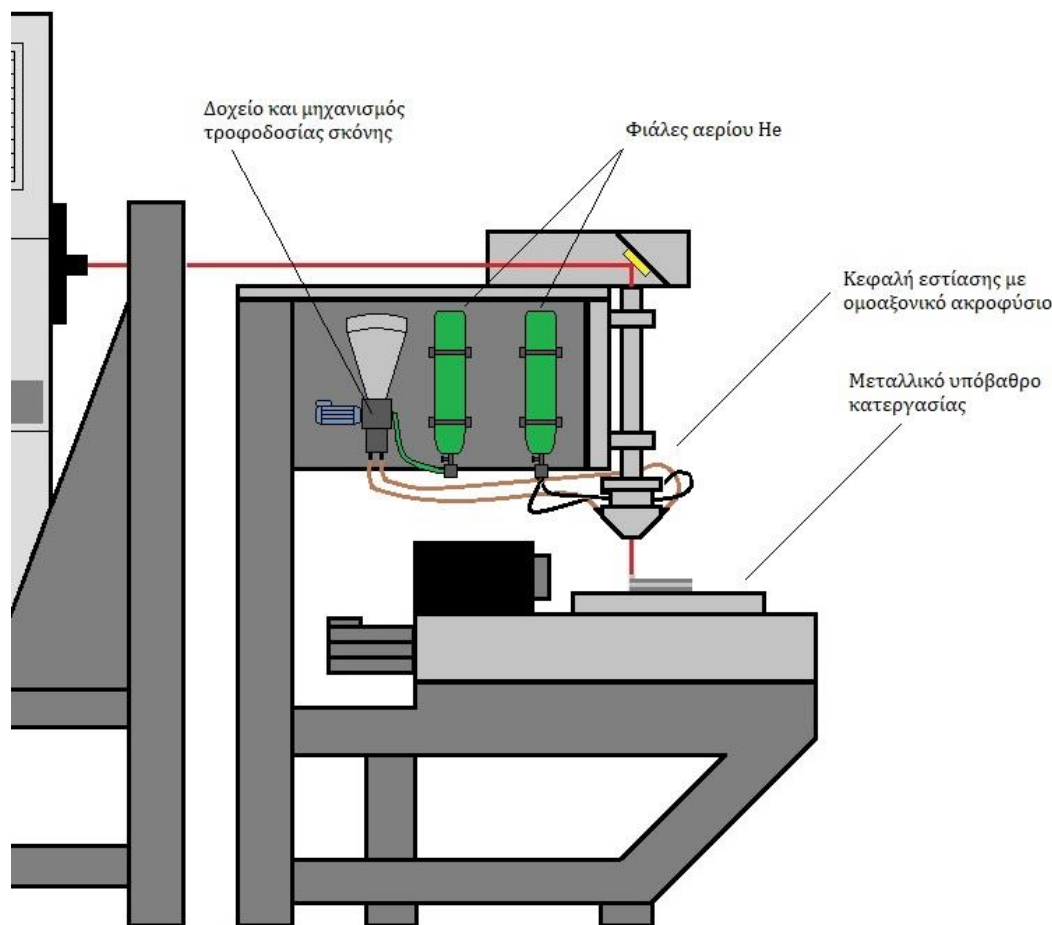
8.2 Προτάσεις σχεδιασμού συστημάτων προσθετικής κατεργασίας

Με βάση την παραπάνω έρευνα γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η προσαρμογή της πηγής του εργαστηρίου σε μια διάταξη κατεργασίας με πρόσθεση υλικού είναι εφικτή. Ο τύπος της δέσμης του Laser είναι αποδεδειγμένα συμβατός για κατεργασία μεγάλου πλήθους υλικών, ενώ οι προώσεις που παρουσιάστηκαν είναι εντός των ορίων των προώσεων της μηχανικής τράπεζας, δίχως μάλιστα να απαιτείται επέκταση των ταχυτήτων και νέα ρύθμιση του PID του LinuxCNC.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης του κέντρου κατεργασιών του Τομέα σε συνδυασμό με την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση προτείνονται σε επίπεδο conceptual design 3 τρόποι για την προσαρμογή και ενσωμάτωση της πηγής LE3000 σε διάταξη κατεργασίας με πρόσθεση υλικού (additive manufacturing).

Αρχικά, ένα βιώσιμο σενάριο, το οποίο συμβαδίζει στο μεγαλύτερο βαθμό με τη σχετική έρευνα είναι η προσαρμογή κεφαλής εστίασης στο κάτω άκρο του σωλήνα του μηχανισμού κίνησης κατά τον άξονα Z με ομοαξονικό ακροφύσιο για τη μετατροπή της

εργαλειομηχανής σε διάταξη DMD. Η γενική μορφή της προτεινόμενης διάταξης απεικονίζεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα:



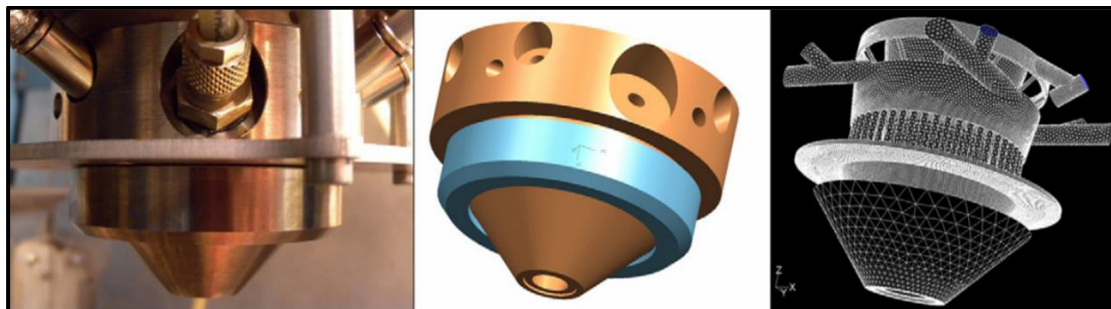
Εικόνα 87: Πρόταση προσαρμογής εργαλειομηχανής σε διάταξη Powder DMD

Η ατμοσφαιρική αδρανοποίηση και η κυκλοφορία είναι δυνατό να επιτευχθούν με χρήση αερίου He το οποίο απαιτείται και για τη λειτουργία της πηγής LE3000.

Ένα δοχείο σκόνης είναι δυνατό να τοποθετηθεί στο πλάι της στήλης της μηχανικής τράπεζας. Στο κάτω μέρος του θα γίνεται διασύνδεση με κυκλοφορητή και τη φιάλη Ηλίου για τη μεταφορά και διανομή της σκόνης στο ακροφύσιο.

Η κεφαλή εστίασης με το ομοαξονικό ακροφύσιο θα πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής τμήματα:

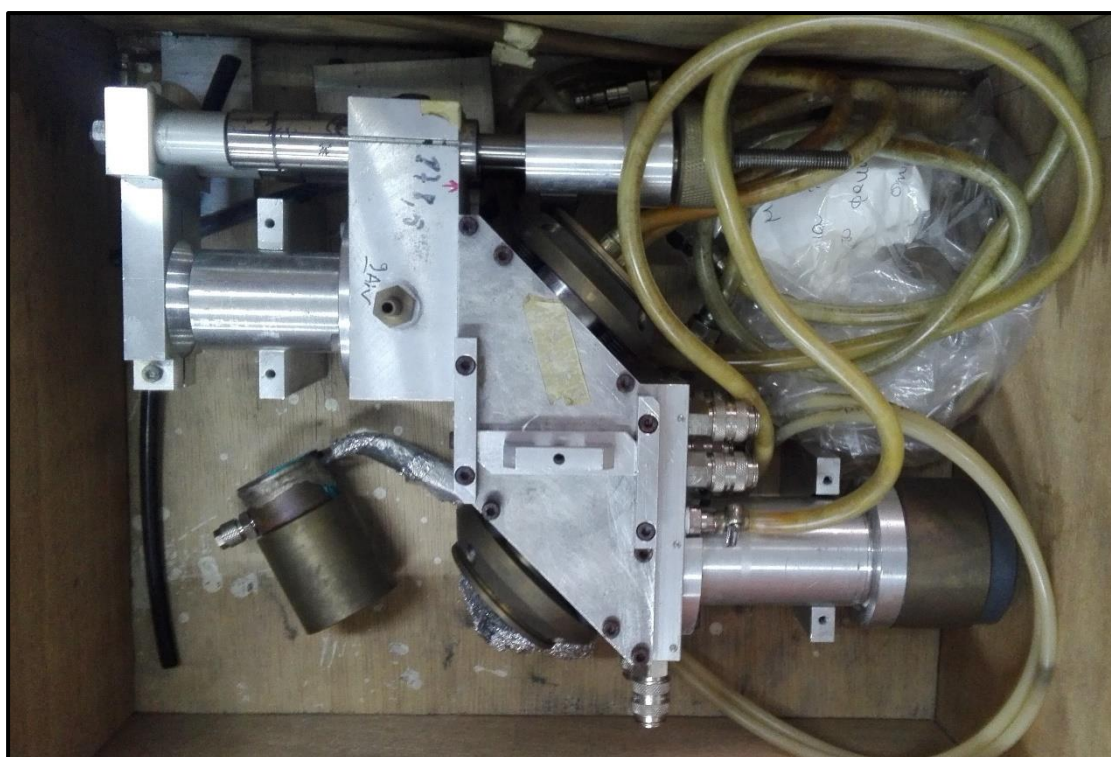
1. Κοιλότητα με φακό εστίασης για την εισερχόμενη δέσμη.
2. Περιφερειακές υποδοχές για την ομοιόμορφη εισαγωγή της σκόνης του υλικού.
3. Κατάλληλες υποδοχές για την εισαγωγή του αερίου προστασίας.
4. Ψυχόμενη πλάκα θερμικής προστασίας πάνω από την απόληξη του ακροφύσιου.



Εικόνα 88: Χαρακτηριστική μορφή ομοαξονικού ακροφύσιου για εναπόθεση σκόνης

Οι ακριβείς διαστάσεις του ακροφύσιου, ο τύπος του φακού εστίασης, τα μεγέθη και οι κλίσεις των υποδοχέων για το αέριο προστασίας απαιτούν εκ νέου μελέτη η οποία θα διεξαχθεί σε μελλοντική εργασία.

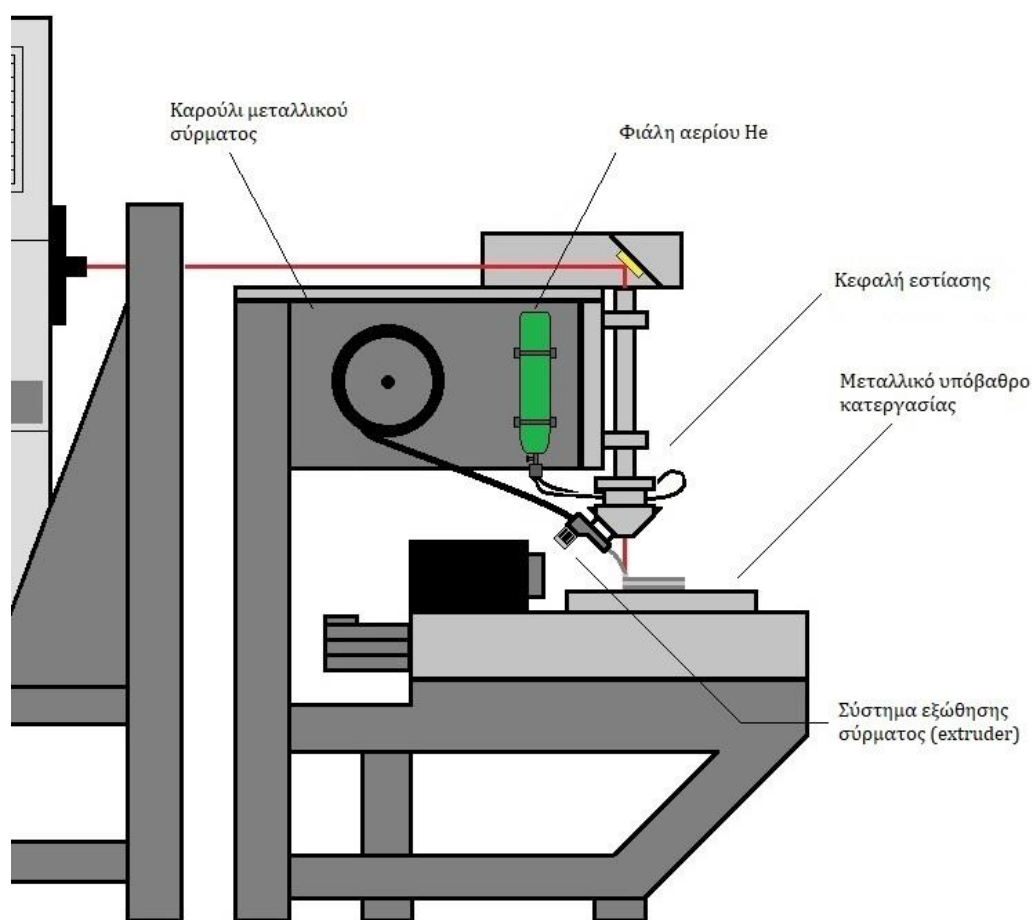
Να σημειωθεί ότι για την παραπάνω διάταξη μπορεί να διερευνηθεί η προσαρμογή υπάρχουσας κεφαλής Laser cladding που υπάρχει στους χώρους του εργαστηρίου, μετά τις κατάλληλες μετατροπές, την επισκευή και επικαιροποίηση φθαρμένων εξαρτημάτων και σωληνώσεων.



Εικόνα 89: Η κεφαλή Laser Cladding του εργαστηρίου

Η ανατροφοδότηση για το ύψος της κεφαλής εστίασης μπορεί να γίνει αρχικά μόνο με τον κωδικοποιητή της βαθμίδας κίνησης του άξονα Z, ανεβαίνοντας κατά πεπερασμένο ύψος μετά από κάθε στρώση. Στην περίπτωση που στην πράξη αυτή η τεχνική κριθεί ανεπαρκής μπορεί να διερευνηθεί η προσθήκη ενός οπτικού συστήματος παρακολούθησης, όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία [16; 17; 18].

Η δεύτερη πρόταση αφορά τη μετατροπή της εργαλειομηχανής σε διάταξη additive manufacturing με τροφοδοσία μεταλλικού σύρματος. Η διάταξη θα προσομοιάζει αντίστοιχη μονάδας 3d εκτύπωσης FDM. Μεταλλικό σύρμα θα εξωθείται από κατάλληλο σύστημα εξώθησης οδηγούμενο από βηματικό κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση το ακροφύσιο της κεφαλής εστίασης θα έχει απλούστερη δομή, με απαιτούμενη μόνο την τροφοδοσία αερίου αδρανοποίησης της ατμόσφαιρας παράλληλα με τη δέσμη.

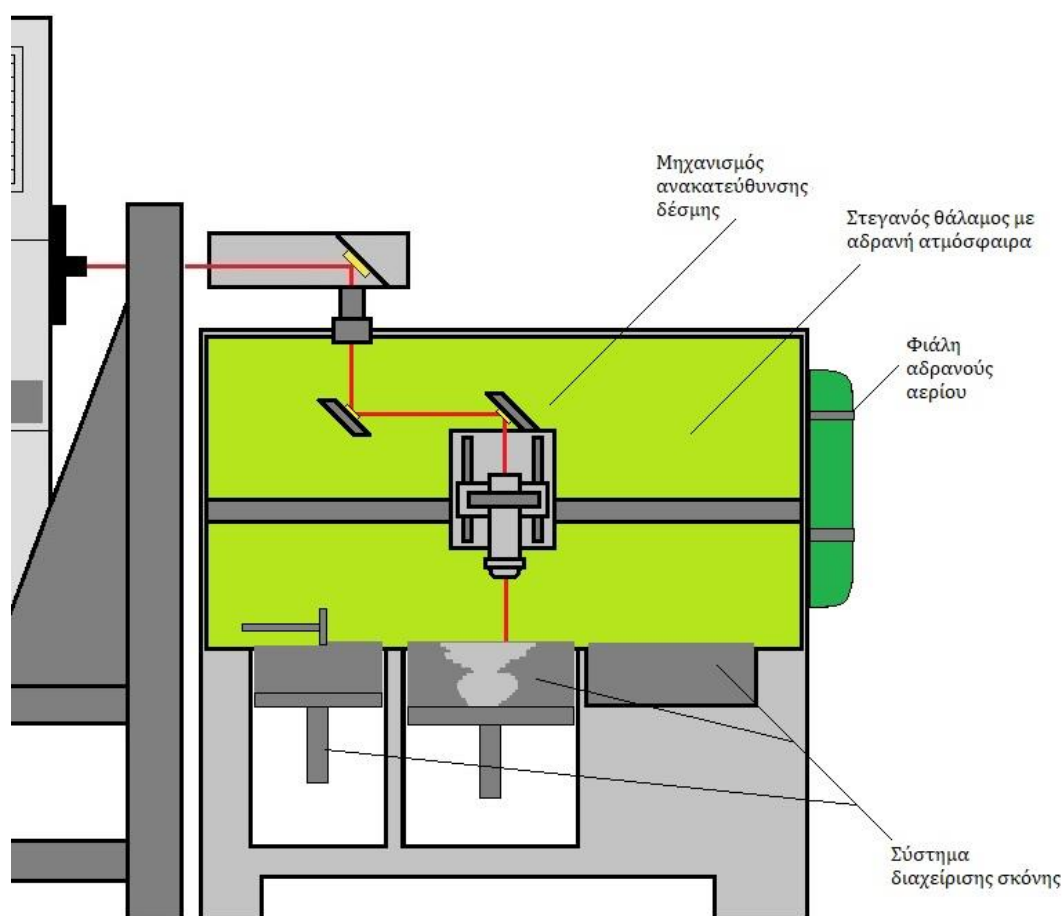


Εικόνα 90: Πρόταση προσαρμογής εργαλειομηχανής σε διάταξη Wire LMD

Για την ενσωμάτωση της πηγής σε διάταξη κατεργασίας SLS/SLM η πολυπλοκότητα αυξάνει. Η υφιστάμενη μηχανική τράπεζα είναι ακατάλληλη για την έδραση του συστήματος της σκόνης. Η μετακίνηση της τράπεζας προκαλεί κραδασμούς, σε ένα βαθμό εξ αιτίας της παλαιότητας των σερβοκινητήρων, γεγονός που θα οδηγούσε σε άτακτη διασπορά της σκόνης ακόμα και με την ύπαρξη κατάλληλου μηχανισμού

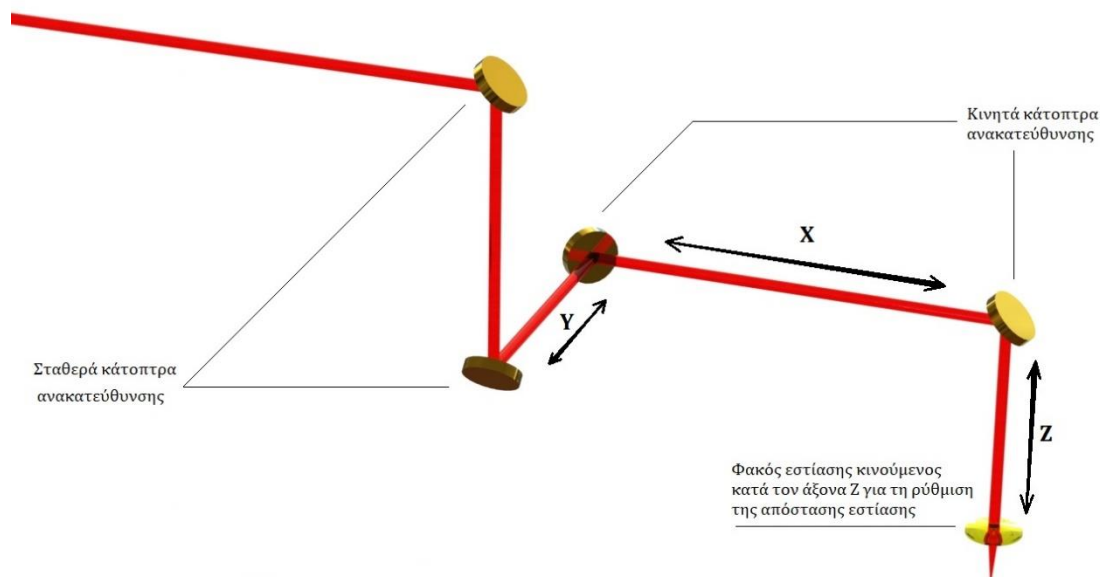
εναπόθεσης και εξομάλυνσης. Η λύση σε αυτή την περίπτωση θα ήταν η αντικατάσταση της τράπεζας με νέα διάταξη. Η δυσκολία του εγχειρήματος είναι σημαντική και απαιτούνται οικονομικοί και σχεδιαστικοί πόροι. Ωστόσο η υλοποίησή του θα προσέδιδε στο εργαστήριο μια λειτουργική διάταξη SLM με την απαραίτητη ισχύ για την κατεργασία μεταλλικών κόνεων, ανοξείδωτου χάλυβα, κραμάτων Τιτανίου και άλλων υλικών υψηλών προδιαγραφών, όπως έχει αποδειχθεί και από πρότερη έρευνα[3; 25].

Η προτεινόμενη διάταξη αποτελείται από 2 κύρια μέρη. Αρχικά, αντικατάσταση της υφιστάμενης μηχανικής τράπεζας με κλειστό θάλαμο με διάταξη εναπόθεσης σκόνης όπως απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 22 της Παραγράφου 2.3.2. Παράλληλα κρίνεται αναγκαίος ο σχεδιασμός και η υλοποίηση κινούμενου μηχανισμού ανακατεύθυνσης της δέσμης για τη σάρωση της επιφάνειας εκτύπωσης. Επιλέγεται διάταξη με κάτοπτρα ανάκλασης κινούμενη κατά τους άξονες X-Y-Z όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 91: Πρόταση προσαρμογής εργαλειομηχανής σε διάταξη SLS/SLM

Ο μηχανισμός ανακατεύθυνσης της δέσμης απεικονίζεται σχηματικά στην ακόλουθη εικόνα. Αποτελείται από 2 σταθερά κάτοπτρα τα οποία παραλαμβάνουν τη δέσμη από την πηγή LE3000 και τη μεταφέρουν προς το σύστημα κίνησης. Δυο κινητά κάτοπτρα πάνω σε βαθμίδες γραμμικής κίνησης κατά το οριζόντιο επίπεδο μεταφέρουν τη δέσμη και την τοποθετούν με κατακόρυφη διεύθυνση στην κεφαλή εστίασης. Η κεφαλή εστίασης κινείται κατά τον κατακόρυφο άξονα Z και ρυθμίζει το ύψος και την απόσταση του ακροφύσιου από την επιφάνεια εκτύπωσης.



Εικόνα 92: Διαδρομή δέσμης προτεινόμενης διάταξης SLM

Ο θάλαμος στον οποίο θα λαμβάνει χώρα η κατεργασία πρέπει να είναι στεγανός και με αδρανή ατμόσφαιρα. Τα κάτοπτρα ανακατεύθυνσης και ο φακός εστίασης πιθανότατα θα χρειαστούν διασύνδεση με κύκλωμα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού για την απομάκρυνση θερμότητας εξ αιτίας της μεγάλης ισχύος της δέσμης.

9. Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού, των εργασιών και των δοκιμών που περιγράφονται στα προηγούμενα κεφάλαια καθίσταται δυνατό να παρατεθούν τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και να καθοριστούν τα επόμενα βήματα που θα τη διαδεχθούν.

9.1 Συμπεράσματα

Αρχικά, σύμφωνα με την επιθεώρηση του συνεργείου η πηγή LE3000 δε φαίνεται να παρουσιάζει κάποια εμφανή βλάβη. Το γεγονός αυτό σε με την επισκευή του εσωτερικού Η/Υ ελέγχου οδηγεί στο συμπέρασμα πως μόλις καταστεί δυνατή η διασύνδεση και ολοκληρωθούν επιτυχώς οι επιμέρους έλεγχοι που είναι σε εκκρεμότητα η πηγή θα είναι σε θέση να λειτουργήσει.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7 επιβεβαιώνουν τη λειτουργικότητα του ελεγκτή της δέσμης του Laser με χρήση του LinuxCNC. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η παραμετροποίηση στο Κεφάλαιο 6 απέδειξε την ευελιξία του λογισμικού, καθώς με απλές τροποποιήσεις του αρχείου HAL για δεδομένη διάταξη είναι δυνατόν να επιτευχθεί η προσαρμογή μεγάλου πλήθους διαφορετικών εξαρτημάτων και να ρυθμιστεί η λειτουργία τους χωρίς να απαιτείται η χρήση μετρητικών συσκευών, όπως είναι το πολύμετρο ή ο παλμογράφος.

Παράλληλα με τις παραπάνω ενέργειες, η μελέτη για τη χρηστικότητα της πηγής του Laser κατόπιν κατάλληλης μετατροπής αποδεικνύει τη χρησιμότητά της για το εργαστήριο και τον Τομέα εν γένει, για την αφαιρετική κατεργασία υλικών, την επιφανειακή, αλλά κυρίως την κατεργασία με πρόσθεση υλικού.

9.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Με την περάτωση της παρούσας εργασίας η κύρια εκκρεμότητα η οποία πρέπει να διευθετηθεί είναι η έμπρακτη αποκατάσταση της λειτουργικότητας της πηγής LE3000. Οι προγραμματισμένες εργασίες, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5 δεν κατέστη δυνατό να εκτελεστούν εξ αιτίας των περιορισμών που επέβαλλε η έξαρση του SARS-CoV-2, η αναστολή ακαδημαϊκών και επαγγελματικών δραστηριοτήτων κόστισε σε πολύτιμο χρόνο. Η πρώτες σημαντικές κινήσεις που πρέπει να γίνουν αφορούν επομένως την επαναφορά της εργαλειομηχανής σε πλήρη λειτουργικότητα, με την τυχόν επισκευή, διασύνδεση των μερών και την εφαρμογή του ανοικτού ελεγκτή που παραμετροποιήθηκε σε αυτή την εργασία.

Στη συνέχεια, μια προτεινόμενη κατεύθυνση για το μέλλον της διάταξης θα μπορούσε να αποτελέσει η κύρια μελέτη για τη σταδιακή μετατροπή της σε κέντρο κατεργασιών με πρόσθεση υλικού που μπορεί να βασιστεί στην προμελέτη του Κεφαλαίου 8. Η μελέτη θα πρέπει να συμπεριλάβει τη διερεύνηση του εύρους των υλικών που η συγκεκριμένη δέσμη μπορεί να κατεργαστεί αποτελεσματικά, την τελική επιλογή της μεθόδου πρόσθεσης υλικού (εναπόθεση σκόνης, τήξη σύρματος, επιλεκτική τήξη ή πυροσυσσωμάτωση κτλ.) το σχεδιασμό κατάλληλης κεφαλής για την εναπόθεση του υλικού, ή την προσαρμογή της ήδη υπάρχουσας κεφαλής επιστρωμάτωσης στην υφιστάμενη διάταξη.

Βιβλιογραφία

Δημοσιεύσεις

1. Lee, Hyub et al. 2017. 'Lasers in Additive Manufacturing: A Review'. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 4: 307–22.
2. Witzendorff, Philipp et al. 2018. 'Additive Manufacturing of Glass: CO₂-Laser Glass Deposition Printing'. Procedia CIRP 74: 272–75.
3. Vevers, Arturs, Artis Kromanis, and Eriks Gerins. 2018. 'CO₂ Laser Powered Metal 3D Printer Parameter Influence on Part Quality'. In, 0955–60.
4. Kathuria, Y.P. 1997. 'Laser-Cladding Process: A Study Using Stationery and Scanning CO₂ Laser Beams'. Surface and Coatings Technology 97: 442–47.
5. Alagan, Viswanathan, D. Sastikumar, Harish Kumar, and Ashish Nath. 2009. 'Formation of WC-Iron Silicide (Fe 5Si 3) Composite Clad Layer on AISI 316L Stainless Steel by High Power (CO₂) Laser'. Surface & Coatings Technology - SURF COAT TECH 203: 1618–23.
6. Rao, B., Harish Kumar, and Ashish Nath. 2005. 'Processing of Concretes with a High-Power CO₂ Laser'. Optics & Laser Technology 37: 348–56.
7. More, Satish, Dhananjay. Bhatt, and Jyoti Menghani. 2017. 'Resent Research Status on Laser Cladding as Erosion Resistance Technique - An Overview'. Materials Today: Proceedings 4: 9902–8.
8. Singh, Surinder, Parminder Singh, Harpreet Singh, and Ramesh Buddu. 2019. 'Characterization and Comparison of Copper Coatings Developed by Low Pressure Cold Spraying and Laser Cladding Techniques'. Materials Today: Proceedings 18: 830–40
9. Wesang, K. et al. 2018. 'Functional Coatings of Sol-Gel on Glass Substrate Using CO₂ Laser Irradiation'. Procedia CIRP 74: 386–89.
10. Ukar, E. et al. 2010. 'Laser Polishing of Tool Steel with CO₂ Laser and High-Power Diode Laser'. International Journal of Machine Tools and Manufacture 50: 115–25.
11. Souza, AgnelD' et al. 2015. 'Parametric Investigation in Laser Forming of 8mm FE-410 Plate Using High Power CO₂ Laser and Its Bend Angle Prediction'. Materials Today: Proceedings 2: 2013–21.
12. Zhao, Linjie et al. 2019. 'Toward Little Heat-Affected Area of Fused Silica Materials Using Short Pulse and High-Power CO₂ Laser'. Results in Physics 12.
13. Tianhao, Wu, Changjun Ke, and Wang Yutong. 2019. 'Fabrication of Trapezoidal Cross-Sectional Microchannels on PMMA with a Multi-Pass Translational Method by CO₂ Laser'. Optik 183.
14. LI, Hao Nan, Ke Xie, Bo Wu, and Wei Zhu. 2019. 'Generation of Textured Diamond Abrasive Tools by Continuous-Wave CO₂ Laser: Laser Parameter Effects and Optimisation'. Journal of Materials Processing Technology 275: 116279.
15. Mazumder, J. et al. 1997. 'The Direct Metal Deposition of H13 Tool Steel for 3-D Components'. JOM 49(5): 55–60.
16. Mazumder, J., A. Schifferer, and J. Choi. 1999. 'Direct Materials Deposition: Designed Macro and Microstructure'. Materials Research Innovations 3(3): 118–31.

17. Dinda, G.P., L. Song, and J. Mazumder. 2008. 'Fabrication of Ti-6Al-4V Scaffolds by Direct Metal Deposition'. *Metallurgical and Materials Transactions A* 39(12): 2914–22.
18. Dinda, G.P., A.K. Dasgupta, and J. Mazumder. 2012. 'Texture Control during Laser Deposition of Nickel-Based Superalloy'. *Scripta Materialia* 67(5): 503–6.
19. Bhattacharya, Sudip, Guru P. Dinda, Ashish K. Dasgupta, and Jyotirmoy Mazumder. 2014. 'A Comparative Study of Microstructure and Mechanical Behavior of CO₂ and Diode Laser Deposited Cu–38Ni Alloy'. *Journal of Materials Science* 49(6): 2415–29.
20. Li, J., H.M. Wang, and H.B. Tang. 2012. 'Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Melting Deposited Ni-Base Superalloy Rene'41'. *Materials Science and Engineering: A* 550: 97–102.
21. Li, J., and H.M. Wang. 2010. 'Microstructure and Mechanical Properties of Rapid Directionally Solidified Ni-Base Superalloy Rene'41 by Laser Melting Deposition Manufacturing'. *Materials Science and Engineering: A* 527(18–19): 4823–29.
22. Sui, Shang et al. 2017. 'The Failure Mechanism of 50% Laser Additive Manufactured Inconel 718 and the Deformation Behavior of Laves Phases during a Tensile Process'. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91(5–8): 2733–40.
23. Choi, Doo-Sun et al. 2001. 'Development of a Direct Metal Freeform Fabrication Technique Using CO₂ Laser Welding and Milling Technology'. *Journal of Materials Processing Technology* 113(1–3): 273–79.
24. Simchi, A., and H. Asgharzadeh. 2004. 'Densification and Microstructural Evaluation during Laser Sintering of M2 High Speed Steel Powder'. *Materials Science and Technology* 20(11): 1462–68.
25. Baitimerov, R M, P A Lykov, L V Radionova, and E V Safonov. 2017. 'Parameter Optimization for Selective Laser Melting of TiAl6V4 Alloy by CO₂ Laser'. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 248: 012012.

Βιβλία

1. «Εργαλειομηχανές CNC - Πρόχειρες Σημειώσεις», Γ.Χ. Βοσνιάκος
2. «Μη Συμβατικές Κατεργασίες – Πρόχειρες Σημειώσεις», Δ. Μανωλάκος
3. «Λέιζερ, αρχές λειτουργίας και εφαρμογές», Ν. Αφεντάκης, Σ. Μουσταϊζής, Ελ. Σεργάκη
4. «Laser processing of materials», J. Dutta Majumdar, I. Manna
5. «Handbook of Laser Technology and Applications: Laser design and laser systems», Τόμος II, Colin E. Webb, Julian D. C. Jones

Διπλωματικές – Μεταπτυχιακές Εργασίες

1. «Παραμετροποίηση και υλοποίηση μονάδας ελέγχου εργαλειομηχανής Laser βάσει ανοικτής πλατφόρμας λογισμικού», Ζουμπούλης Γ. Παναγιώτης (Διπλωματική Εργασία).
2. «Έλεγχος κέντρου τόννευσης με βάση το LinuxCNC: I. Άξονες κίνησης και άτρακτος», Ζουρτσάνος Γ. Νικόλαος (Μεταπτυχιακή Εργασία).
3. «Έλεγχος κέντρου τόννευσης με βάση το LinuxCNC: II Μηχανισμός εργαλείων, Κεντροφορέας και βοηθητικά συστήματα» Κοντογιάννης Β. Νικόλαος (Μεταπτυχιακή Εργασία).
4. «Έλεγχος βιομηχανικού ρομπότ με βάση ανοικτό λογισμικό ψηφιακής καθοδήγησης», Τσούμπας Δ. (Διπλωματική Εργασία).

Εγχειρίδια χρήσης (manuals)

1. Laser Ecosse LE3000 Operating Manual
2. LinuxCNC: Getting Started
3. LinuxCNC: User Manual
4. LinuxCNC: Integrator Manual
5. LinuxCNC: HAL Manual
6. Mesa Electronics 5i25 anything I/O Manual
7. Mesa Electronics 7i77 Six Axis Analog Servo Plus I/O Daughtercard Manual
8. TAE/TWE 015-301 Maintenance and Operating Manual

Επιπλέον πηγές

<http://www.linuxcnc.org/>

<http://www.linuxcnc.org/index.php/english/forum/index>

<http://linuxcnc.org/docs/html/config/pncconf.html>

http://linuxcnc.org/docs/2.5/html/hal/basic_hal.html

http://linuxcnc.org/docs/2.6/html/config/ini_config.html

http://linuxcnc.org/docs/2.4/html/config_ini_config.html

[https://www.photonics.com/Articles/COSUB2 SUB Lasers The Industrial Workhorse/a25155](https://www.photonics.com/Articles/COSUB2_SUB_Lasers_The_Industrial_Workhorse/a25155)

<https://awo.aws.org/glossary/transverse-axial-flow-lasers/>

https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html

<https://blogmech.com/application-of-laser-in-mechanical-engineering-laser-heat-treatment-process-laser-metal-cutting-and-joining-process/>

Παράρτημα – Αρχεία Ρύθμισης LinuxCNC (Configuration Files)

Αρχείο .INI

Generated by PNCconf at Fri May 15 15:18:30 2020

If you make changes to this file, they will be

overwritten when you run PNCconf again

[EMC]

MACHINE = laser_controller_test

DEBUG = 0

[DISPLAY]

DISPLAY = axis

POSITION_OFFSET = RELATIVE

POSITION_FEEDBACK = ACTUAL

MAX_FEED_OVERRIDE = 2.000000

MAX_SPINDLE_OVERRIDE = 1.000000

MIN_SPINDLE_OVERRIDE = 0.500000

INTRO_GRAPHIC = linuxcnc.gif

INTRO_TIME = 5

PROGRAM_PREFIX = /root/linuxcnc/nc_files

INCREMENTS = 5mm 1mm .5mm .1mm .05mm .01mm .005mm

POSITION_FEEDBACK = ACTUAL

DEFAULT_LINEAR_VELOCITY = 1.666667

MAX_LINEAR_VELOCITY = 1.666667

MIN_LINEAR_VELOCITY = 0.010000

DEFAULT_ANGULAR_VELOCITY = 0.250000

MAX_ANGULAR_VELOCITY = 1.000000

MIN_ANGULAR_VELOCITY = 0.010000

EDITOR = gedit

GEOMETRY = xyz

[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

SERVO_PERIOD = 1000000

[HOSTMOT2]

**** This is for info only ****

DRIVER0=hm2_pci

BOARD0=5i25

[HAL]

HALUI = halui

HALFILE = laser_controller_test.hal

HALFILE = custom.hal

POSTGUI_HALFILE = postgui_call_list.hal

SHUTDOWN = shutdown.hal

[HALUI]

```
[TRAJ]
AXES = 3
COORDINATES = X Y Z
LINEAR_UNITS = mm
ANGULAR_UNITS = degree
CYCLE_TIME = 0.010
DEFAULT_VELOCITY = 5.00
MAX_LINEAR_VELOCITY = 50.00
```

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

```
#####
```

```
# Axis X
```

```
#####
```

```
[AXIS_0]
TYPE = LINEAR
HOME = 0.0
FERROR = 10.0
MIN_FERROR = 1.0
MAX_VELOCITY = 50.0
MAX_ACCELERATION = 750.0
P = 11.0
I = 0.0
D = 0.0
FF0 = 0.0
FF1 = 0.010666
FF2 = 1e-05
BIAS = 0.0
DEADBAND = 1e-05
```

```

MAX_OUTPUT = 0.0
ENCODER_SCALE = 2457.6
OUTPUT_SCALE = -1.0
OUTPUT_MIN_LIMIT = -10.0
OUTPUT_MAX_LIMIT = 10.0
MIN_LIMIT = -0.01
MAX_LIMIT = 500.0
HOME_OFFSET = 0.000000
HOME_SEARCH_VEL = -25.000000
HOME_LATCH_VEL = -10.000000
HOME_FINAL_VEL = 0.000000
HOME_USE_INDEX = NO
HOME_SEQUENCE = 1

#####

# Axis Y
#####

[AXIS_1]
TYPE = LINEAR
HOME = 0.0
FERROR = 10.0
MIN_FERROR = 1.0
MAX_VELOCITY = 50.0
MAX_ACCELERATION = 750.0
P = 11.0
I = 0.0
D = 0.0
FF0 = 0.0
FF1 = 0.01078
FF2 = 4e-05
BIAS = 0.0
DEADBAND = 0.0
MAX_OUTPUT = 0.0

```



```

ENCODER_SCALE = -2457.6
OUTPUT_SCALE = 1.0
OUTPUT_MIN_LIMIT = -10.0
OUTPUT_MAX_LIMIT = 10.0
MIN_LIMIT = -0.01
MAX_LIMIT = 500.0
HOME_OFFSET = 0.000000
HOME_SEARCH_VEL = -25.000000
HOME_LATCH_VEL = -10.000000
HOME_FINAL_VEL = 0.000000
HOME_USE_INDEX = NO
HOME_SEQUENCE = 2

#####

# Axis Z
#####

[AXIS_2]
TYPE = LINEAR
HOME = 0.0
FERROR = 10.0
MIN_FERROR = 1.0
MAX_VELOCITY = 25.0
MAX_ACCELERATION = 750.0
P = 11.0
I = 0.0
D = 0.0
FF0 = 0.0
FF1 = 0.0074
FF2 = 3e-05
BIAS = 0.0004
DEADBAND = 0.0
MAX_OUTPUT = 0.0
ENCODER_SCALE = 2457.6

```

```

OUTPUT_SCALE = -1.0
OUTPUT_MIN_LIMIT = -10.0
OUTPUT_MAX_LIMIT = 10.0
MIN_LIMIT = -0.01
MAX_LIMIT = 200.0
HOME_OFFSET = 0.000000
HOME_SEARCH_VEL = -25.000000
HOME_LATCH_VEL = -10.000000
HOME_FINAL_VEL = 0.000000
HOME_USE_INDEX = NO
HOME_SEQUENCE = 0

```

```

#*****

```

```

# Spindle

```

```

#*****

```

```

[SPINDLE_9]

```

```

P = 0.0

```

```

I = 0.0

```

```

D = 0.0

```

```

FF0 = 1.0

```

```

FF1 = 0.0

```

```

FF2 = 0.0

```

```

BIAS = 0.0

```

```

DEADBAND = 0.0

```

```

MAX_OUTPUT = 3000.0

```

```

OUTPUT_SCALE = 3000.0

```

```

OUTPUT_MIN_LIMIT = 0.0

```

```

OUTPUT_MAX_LIMIT = 3000.0

```

Αρχείο HAL

```
# Generated by PNCconf at Fri May 15 15:18:30 2020
# If you make changes to this file, they will be
# overwritten when you run PNCconf again

loadrt trivkins
loadrt [EMCMOT]EMCMOT servo_period_nsec=[EMCMOT]SERVO_PERIOD
num_joints=[TRAJ]AXES
loadrt hostmot2
loadrt hm2_pci config=" num_encoders=3 num_pwmgens=0 num_stepgens=0
sserial_port_0=000xxx"
setp hm2_5i25.0.watchdog.timeout_ns 5000000
loadrt pid names=pid.x,pid.y,pid.z,pid.s

addf hm2_5i25.0.read      servo-thread
addf motion-command-handler servo-thread
addf motion-controller   servo-thread
addf pid.x.do-pid-calcs   servo-thread
addf pid.y.do-pid-calcs   servo-thread
addf pid.z.do-pid-calcs   servo-thread
addf pid.s.do-pid-calcs   servo-thread
addf hm2_5i25.0.write     servo-thread

# external output signals

# --- DOUT-00 ---
net dout-00 hm2_5i25.0.7i77.0.0.output-00

# --- DOUT-01 ---
net dout-01 hm2_5i25.0.7i77.0.0.output-01

# --- DOUT-02 ---
net dout-02 hm2_5i25.0.7i77.0.0.output-02

# external input signals

# --- HOME-X ---
net home-x  <= hm2_5i25.0.7i77.0.0.input-00

# --- HOME-Y ---
net home-y  <= hm2_5i25.0.7i77.0.0.input-01

# --- HOME-Z ---
net home-z  <= hm2_5i25.0.7i77.0.0.input-02

# --- MAX-X ---
net max-x   <= hm2_5i25.0.7i77.0.0.input-03

# --- MAX-Y ---
net max-y   <= hm2_5i25.0.7i77.0.0.input-04
```

```

# --- MAX-Z ---
net max-z    <= hm2_5i25.0.7i77.0.0.input-05

#*****
#  AXIS X
#*****

setp  pid.x.Pgain  [AXIS_0]P
setp  pid.x.Igain  [AXIS_0]I
setp  pid.x.Dgain  [AXIS_0]D
setp  pid.x.bias   [AXIS_0]BIAS
setp  pid.x.FF0     [AXIS_0]FF0
setp  pid.x.FF1     [AXIS_0]FF1
setp  pid.x.FF2     [AXIS_0]FF2
setp  pid.x.deadband [AXIS_0]DEADBAND
setp  pid.x.maxoutput [AXIS_0]MAX_OUTPUT
setp  pid.x.error-previous-target true
setp  pid.x.maxerror .0005

net x-index-enable <=> pid.x.index-enable
net x-enable       => pid.x.enable
net x-pos-cmd      => pid.x.command
net x-vel-cmd      => pid.x.command-deriv
net x-pos-fb       => pid.x.feedback
net x-output       => pid.x.output

# ---PWM Generator signals/setup---

setp  hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout0-scalemax [AXIS_0]OUTPUT_SCALE
setp  hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout0-minlim  [AXIS_0]OUTPUT_MIN_LIMIT
setp  hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout0-maxlim  [AXIS_0]OUTPUT_MAX_LIMIT

net x-output          => hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout0
net x-pos-cmd  axis.0.motor-pos-cmd
net x-enable   axis.0.amp-enable-out
# enable_all_ sserial pwmgens
net x-enable   hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogena

# ---Encoder feedback signals/setup---

setp  hm2_5i25.0.encoder.00.counter-mode 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.00.filter 1
setp  hm2_5i25.0.encoder.00.index-invert 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.00.index-mask 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.00.index-mask-invert 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.00.scale [AXIS_0]ENCODER_SCALE

net x-pos-fb      <= hm2_5i25.0.encoder.00.position
net x-vel-fb      <= hm2_5i25.0.encoder.00.velocity
net x-pos-fb      => axis.0.motor-pos-fb
net x-index-enable axis.0.index-enable <=> hm2_5i25.0.encoder.00.index-enable
net x-pos-rawcounts <= hm2_5i25.0.encoder.00.rawcounts

```

```
# ---setup home / limit switch signals---

net home-x    => axis.0.home-sw-in
net x-neg-limit => axis.0.neg-lim-sw-in
net max-x     => axis.0.pos-lim-sw-in

#*****
#  AXIS Y
#*****

setp pid.y.Pgain  [AXIS_1]P
setp pid.y.Igain  [AXIS_1]I
setp pid.y.Dgain  [AXIS_1]D
setp pid.y.bias   [AXIS_1]BIAS
setp pid.y.FF0    [AXIS_1]FF0
setp pid.y.FF1    [AXIS_1]FF1
setp pid.y.FF2    [AXIS_1]FF2
setp pid.y.deadband [AXIS_1]DEADBAND
setp pid.y.maxoutput [AXIS_1]MAX_OUTPUT
setp pid.y.error-previous-target true
setp pid.y.maxerror .0005

net y-index-enable <=> pid.y.index-enable
net y-enable      => pid.y.enable
net y-pos-cmd     => pid.y.command
net y-vel-cmd     => pid.y.command-deriv
net y-pos-fb      => pid.y.feedback
net y-output      => pid.y.output

# ---PWM Generator signals/setup---

setp hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout1-scalemax [AXIS_1]OUTPUT_SCALE
setp hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout1-minlim  [AXIS_1]OUTPUT_MIN_LIMIT
setp hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout1-maxlim  [AXIS_1]OUTPUT_MAX_LIMIT

net y-output          => hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout1
net y-pos-cmd axis.1.motor-pos-cmd
net y-enable  axis.1.amp-enable-out

# ---Encoder feedback signals/setup---

setp hm2_5i25.0.encoder.01.counter-mode 0
setp hm2_5i25.0.encoder.01.filter 1
setp hm2_5i25.0.encoder.01.index-invert 0
setp hm2_5i25.0.encoder.01.index-mask 0
setp hm2_5i25.0.encoder.01.index-mask-invert 0
setp hm2_5i25.0.encoder.01.scale [AXIS_1]ENCODER_SCALE

net y-pos-fb      <= hm2_5i25.0.encoder.01.position
net y-vel-fb      <= hm2_5i25.0.encoder.01.velocity
net y-pos-fb      => axis.1.motor-pos-fb
net y-index-enable axis.1.index-enable <=> hm2_5i25.0.encoder.01.index-enable
```

```

net y-pos-rawcounts    <= hm2_5i25.0.encoder.01.rawcounts

# ---setup home / limit switch signals---

net home-y    => axis.1.home-sw-in
net y-neg-limit    => axis.1.neg-lim-sw-in
net max-y    => axis.1.pos-lim-sw-in

#*****
#  AXIS Z
#*****

setp  pid.z.Pgain    [AXIS_2]P
setp  pid.z.Igain    [AXIS_2]I
setp  pid.z.Dgain    [AXIS_2]D
setp  pid.z.bias     [AXIS_2]BIAS
setp  pid.z.FF0      [AXIS_2]FF0
setp  pid.z.FF1      [AXIS_2]FF1
setp  pid.z.FF2      [AXIS_2]FF2
setp  pid.z.deadband [AXIS_2]DEADBAND
setp  pid.z.maxoutput [AXIS_2]MAX_OUTPUT
setp  pid.z.error-previous-target true
setp  pid.z.maxerror .0005

net z-index-enable <=> pid.z.index-enable
net z-enable      => pid.z.enable
net z-pos-cmd     => pid.z.command
net z-vel-cmd     => pid.z.command-deriv
net z-pos-fb      => pid.z.feedback
net z-output      => pid.z.output

# ---PWM Generator signals/setup---

setp  hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout2-scalemax [AXIS_2]OUTPUT_SCALE
setp  hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout2-minlim  [AXIS_2]OUTPUT_MIN_LIMIT
setp  hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout2-maxlim  [AXIS_2]OUTPUT_MAX_LIMIT

net z-output      => hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout2
net z-pos-cmd     axis.2.motor-pos-cmd
net z-enable      axis.2.amp-enable-out

# ---Encoder feedback signals/setup---

setp  hm2_5i25.0.encoder.02.counter-mode 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.02.filter 1
setp  hm2_5i25.0.encoder.02.index-invert 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.02.index-mask 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.02.index-mask-invert 0
setp  hm2_5i25.0.encoder.02.scale [AXIS_2]ENCODER_SCALE

net z-pos-fb      <= hm2_5i25.0.encoder.02.position
net z-vel-fb      <= hm2_5i25.0.encoder.02.velocity
net z-pos-fb      => axis.2.motor-pos-fb

```

```
net z-index-enable axis.2.index-enable <=> hm2_5i25.0.encoder.02.index-enable
net z-pos-rawcounts <= hm2_5i25.0.encoder.02.rawcounts
```

```
# ---setup home / limit switch signals---
```

```
net home-z => axis.2.home-sw-in
net z-neg-limit => axis.2.neg-lim-sw-in
net max-z => axis.2.pos-lim-sw-in
```

```
#####
```

```
# SPINDLE S
```

```
#####
```

```
setp pid.s.Pgain [SPINDLE_9]P
setp pid.s.Igain [SPINDLE_9]I
setp pid.s.Dgain [SPINDLE_9]D
setp pid.s.bias [SPINDLE_9]BIAS
setp pid.s.FF0 [SPINDLE_9]FF0
setp pid.s.FF1 [SPINDLE_9]FF1
setp pid.s.FF2 [SPINDLE_9]FF2
setp pid.s.deadband [SPINDLE_9]DEADBAND
setp pid.s.maxoutput [SPINDLE_9]MAX_OUTPUT
setp pid.s.error-previous-target true
setp pid.s.maxerror .0005
```

```
net spindle-index-enable <=> pid.s.index-enable
net spindle-enable => pid.s.enable
net spindle-vel-cmd-rpm-abs => pid.s.command
net spindle-vel-fb-rpm-abs => pid.s.feedback
net spindle-output <= pid.s.output
```

```
# ---PWM Generator signals/setup---
```

```
setp hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout3-scalemax [SPINDLE_9]OUTPUT_SCALE
setp hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout3-minlim [SPINDLE_9]OUTPUT_MIN_LIMIT
setp hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout3-maxlim [SPINDLE_9]OUTPUT_MAX_LIMIT
```

```
net spindle-vel-cmd-abs => hm2_5i25.0.7i77.0.1.analogout3
```

```
# ---setup spindle control signals---
```

```
net spindle-vel-cmd-rps <= motion.spindle-speed-out-rps
net spindle-vel-cmd-rps-abs <= motion.spindle-speed-out-rps-abs
net spindle-vel-cmd-rpm <= motion.spindle-speed-out
net spindle-vel-cmd-rpm-abs <= motion.spindle-speed-out-abs
net spindle-enable <= motion.spindle-on
net spindle-cw <= motion.spindle-forward
net spindle-ccw <= motion.spindle-reverse
net spindle-brake <= motion.spindle-brake
net spindle-revs => motion.spindle-revs
net spindle-at-speed => motion.spindle-at-speed
net spindle-vel-fb-rps => motion.spindle-speed-in
net spindle-index-enable <=> motion.spindle-index-enable
```



```
# ---Setup spindle at speed signals---

sets spindle-at-speed true

#####
# connect miscellaneous signals
#####

# ---HALUI signals---

net joint-select-a    halui.joint.0.select
net x-is-homed        halui.joint.0.is-homed
net jog-x-pos          halui.jog.0.plus
net jog-x-neg          halui.jog.0.minus
net jog-x-analog       halui.jog.0.analog
net joint-select-b    halui.joint.1.select
net y-is-homed        halui.joint.1.is-homed
net jog-y-pos          halui.jog.1.plus
net jog-y-neg          halui.jog.1.minus
net jog-y-analog       halui.jog.1.analog
net joint-select-c    halui.joint.2.select
net z-is-homed        halui.joint.2.is-homed
net jog-z-pos          halui.jog.2.plus
net jog-z-neg          halui.jog.2.minus
net jog-z-analog       halui.jog.2.analog
net jog-selected-pos   halui.jog.selected.plus
net jog-selected-neg   halui.jog.selected.minus
net spindle-manual-cw  halui.spindle.forward
net spindle-manual-ccw halui.spindle.reverse
net spindle-manual-stop halui.spindle.stop
net machine-is-on      halui.machine.is-on
net jog-speed          halui.jog-speed
net MDI-mode           halui.mode.is-mdi

# ---coolant signals---

net coolant-mist    <= iocontrol.0.coolant-mist
net coolant-flood   <= iocontrol.0.coolant-flood

# ---probe signal---

net probe-in    => motion.probe-input

# ---motion control signals---

net in-position    <= motion.in-position
net machine-is-enabled <= motion.motion-enabled

# ---digital in / out signals---

net dout-00    <= motion.digital-out-00
```

```
net dout-01  <= motion.digital-out-01
net dout-02  <= motion.digital-out-02
# ---estop signals---

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

# ---manual tool change signals---

loadusr -W hal_manualtoolchange
net tool-change-request  iocontrol.0.tool-change  => hal_manualtoolchange.change
net tool-change-confirmed 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
```