



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΚΑΡΑΒΟΛΟΣ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ
ΕΝΣΩΜΑΤΟΥΜΕΝΗΣ ΣΕ ΤΟΡΝΟ CNC**

Επιβλέπων: **Βοσνιάκος Γεώργιος - Χριστόφορος**
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον καθηγητή Γεώργιο Χριστόφορο Βοσνιακό που επέβλεψε τη διπλωματική μου και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η καθοδήγηση και η βοήθειά του έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην επιτυχημένη ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Τζίμα που με εισήγαγε στο θέμα της διπλωματικής και με βοήθησε με όποια απορία είχα κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Τέλος, να ευχαριστήσω και όλο το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου που με βοήθησε στην επίτευξη των πειραμάτων και των μετρήσεων.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στέφανος Καράβολος

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	7
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας	8
1.2 Συγκόλληση δια τριβής.....	8
1.2.1 Εισαγωγή	8
1.2.2 Τύποι συγκόλλησης	10
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	13
1.4 Δομή εργασίας.....	14
2. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.....	16
2.1 Γενική διάταξη	16
2.2 Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC)	17
2.2.1 Εισαγωγή	17
2.2.2 PLC που επιλέχθηκε.....	20
2.2.3 Διεπαφή ανθρώπου – μηχανής - Human Machine Interface (HMI)	21
2.3 Κινητήρας.....	23
2.4 Οδηγός του κινητήρα	24
2.4.1 Χαρακτηριστικά	24
2.4.2 Αστοχία οδηγού	26
2.5 Συσκευές εισόδου	28
2.5.1 Αισθητήρας δύναμης.....	28
2.5.2 Διακόπτες.....	30
2.6 Σύστημα μετάδοσης κίνησης	32
2.6.1 Εξαρτήματα.....	32
2.6.2 Ευθυγράμμιση	33
2.7 Εργαλειομηχανή CNC	33
2.8 Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός.....	34
2.8.1 Τροφοδοτικό.....	34
2.8.2 Ηλεκτρονόμοι (Ρελέ)	34
3. Προγραμματισμός λογικού ελεγκτή (PLC)	36
3.1 Εισαγωγή στη γλώσσα προγραμματισμού Ladder	36
3.2 Άλλοι τρόποι προγραμματισμού PLC.....	37
3.3 Δομή προγράμματος	41
3.4 Έλεγχος δύναμης	44
3.4.1 Έλεγχος δύναμης 6 σταδίων.....	44
3.4.2 Έλεγχος δύναμης 2 σταδίων.....	45
3.4.3 Έλεγχος δύναμης 9 σταδίων.....	46
4. Πειράματα – Μέθοδοι.....	48
4.1 Συγκόλληση τεμαχίων PVC.....	48

4.1.1	Απόκριση δύναμης	49
4.1.2	Δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό	51
4.2	Συγκόλληση τεμαχίων αλουμινίου	53
4.2.1	Έλεγχος ποιότητας συγκόλλησης	55
4.3	Συγκόλληση PVC σε διάφορες ταχύτητες	58
5.	Συμπεράσματα	61
6.	Μελλοντική εργασία	62
	Κατάλογος Πινάκων	63
	Κατάλογος Σχημάτων	64
	Κατάλογος Εικόνων	65
	Κατάλογος Αναφορών	66
	Παράρτημα Α – Κύριο πρόγραμμα	69
	Παράρτημα Β – Υπορουτίνες	97
	Παράρτημα Γ – Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής PVC σε εφελκυσμό	119

Περίληψη

Η ανάγκη για σύνδεση δύο υλικών έχει ωθήσει την επιστημονική κοινότητα σε εκτεταμένη έρευνα ώστε η διαδικασία αυτή να μπορεί να εκτελεστεί με το λιγότερο δυνατό κόστος και χρόνο. Η συγκόλληση δια τριβής αποτελεί μια τέτοια μέθοδο σύνδεσης τεμαχίων. Διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα κυρίως λόγω της απλότητάς της αλλά και της ελαχιστοποίησης μεταβολών μικροδομής, πράγμα που την καθιστά ιδανική λύση συγκόλλησης σε πολλές περιπτώσεις. Για την περαιτέρω μείωση του κόστους της κατεργασίας προτείνεται η ευέλικτη μετατροπή εργαλειομηχανής CNC τόννου σε αυτόματη μηχανή συνεχούς συγκόλλησης δια τριβής κάνοντάς την προσιτή λύση για ακόμα περισσότερους μηχανικούς που ενδιαφέρονται να την αξιοποιήσουν.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται κυρίως ο έλεγχος του συστήματος που ασκεί δύναμη στα δύο τεμάχια προς συγκόλληση. Ο έλεγχος της δύναμης επιτυγχάνεται με χρήση προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή - PLC (Siemens PLC S7-200), ο οποίος λαμβάνει σήματα από έναν αισθητήρα που μετράει τη δύναμη επαφής των δύο τεμαχίων προς συγκόλληση. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση των πραγματικών και των ιδανικών τιμών που έχει δώσει ο χειριστής και μέσω κατάλληλου νόμου ελέγχου δημιουργείται το κατάλληλο σήμα για τον οδηγό του κινητήρα πρόωσης. Ο κινητήρας εκτελεί την διορθωτική κίνηση για το μη περιστρεφόμενο τεμάχιο και μέσω αυτής να επιτευχθεί τελικά η τιμή δύναμης επαφής που επιθυμούμε.

Η διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Αρχικά, τα δύο τεμάχια που έχουν τοποθετηθεί στη μηχανή έρχονται σε επαφή. Στη συνέχεια, ακολουθεί η φάση της τριβής όπου ασκείται αξονική δύναμη με το ένα τεμάχιο να περιστρέφεται ως προς το άλλο. Τέλος, ακολουθεί η φάση της σφυρηλάτησης όπου το περιστρεφόμενο τεμάχιο ακινητοποιείται και ασκείται αξονική δύναμη σφυρηλάτησης. Οι παράμετροι που καθορίζουν τις παραπάνω φάσεις είναι η πίεση τριβής, ο χρόνος τριβής, η πίεση σφυρηλάτησης και ο χρόνος σφυρηλάτησης. Αυτές ορίζονται από τον χειριστή μέσω ενός χειριστηρίου (Siemens TD 200) που διαθέτει και οθόνη.

Έπειτα από τον προγραμματισμό του PLC σε γλώσσα Ladder, ώστε να μπορεί να γίνει εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας, ακολούθησαν δοκιμαστικά πειράματα συγκόλλησης σε τεμάχια από PVC και από αλουμίνιο ώστε να καθοριστεί εάν ο έλεγχος που αναπτύχθηκε είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα στην ποιότητα της συγκόλλησης. Οι αρχικές δοκιμές έδωσαν θετικά αποτελέσματα αν και οι παράμετροι συγκόλλησης που επιλέχθηκαν δεν ήταν ιδανικές.

Abstract

The need for joining two materials lead the scientific community to conduct extensive research to enable this process to be performed with the least possible cost and time. Friction welding is one such method of joining pieces. It has many advantages mainly due to simplicity making it the ideal welding solution in many cases. Hens, for further reduction of friction welding cost, it is proposed to convert a CNC lathe machine into an automatic direct drive friction welding machine making it affordable solution for further engineers who are interested in utilizing it.

The main topic of this thesis is the control of the system that applies force to the pieces for welding. Force control is achieved by using a programmable logic controller – PLC (Siemens PLC S7-200), which receives signals from a sensor that measures the contact force between the two pieces being welded. Then, a comparison is made between the actual and desired values set by the operator, and through a control law the appropriate signal is generated and sent to the motor drive. The motor executes this corrective movement in order to move the non-rotating piece thus indirectly achieving the desired contact force value.

The friction welding process is divided into three phases. Firstly, the two pieces that have been attached to the machine approach each other. Then, the friction phase takes place, where an axial force is applied to the pieces with one piece rotating relative to the other. Finally, the forging phase follows, where the relative rotation stops and an axial forging force is applied. The parameters that define the above phases are the friction pressure, friction time, forging pressure and forging time. These parameters are defined by the operator through a panel (Siemens TD 200) equipped with a screen.

After programming the PLC using Ladder programming language, so that the aforementioned process can be performed, preliminary welding tests were conducted on pieces made of PVC and aluminum in order to determine whether the developed control achieved the desired welding quality results. The initial tests yielded positive results despite the fact that the selected welding parameters were not ideal.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μετατροπή CNC τόννου σε αυτόματη μηχανή συνεχούς συγκόλλησης δια τριβής. Συγκεκριμένα εξετάζεται ο έλεγχος του συστήματος άσκησης αξονικής δύναμης στα τεμάχια προς συγκόλληση. Στόχος είναι η αυτοματοποίηση της κατεργασίας συγκόλλησης ώστε να μην απαιτούνται εξειδικευμένοι χειριστές για την υλοποίησή της και να επιτυγχάνεται συνεπής ποιότητα συγκόλλησης

Για την επίτευξη του ελέγχου δύναμης αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Ladder για τον προγραμματισμό προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC). Με την χρήση σερβοκινητήρα ελέγχεται τελικά η μετατόπιση του ενός από τα δύο τεμάχια προς συγκόλληση άρα και η δύναμη επαφής που ασκείται σε αυτά.

Για τον έλεγχο επίτευξης του στόχου απαιτείται δοκιμή του συστήματος ελέγχου σε πραγματικές συνθήκες συγκόλλησης τεμαχίων, ώστε να αξιολογηθεί η λειτουργία του καθώς και η επίδραση που έχουν διαφορετικές παράμετροι κατεργασίας την ποιότητα της συγκόλλησης.

Η συγκεκριμένη διάταξη θεωρείται ως πιλοτική εφαρμογή για ανάπτυξη παρόμοιων διατάξεων για μετατροπή CNC τόννων σε μηχανές συγκόλλησης δια τριβής.

1.2 Συγκόλληση δια τριβής

1.2.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση δια τριβής (Friction welding) είναι μία κατεργασία που ανήκει στη κατηγορία συγκολλήσεων στερεάς κατάστασης και χρησιμοποιείται για την μόνιμη σύνδεση δύο τεμαχίων από ίδιο ή διαφορετικά υλικά . Η συγκόλληση δεν γίνεται με τήξη των υλικών αλλά με την θερμότητα που παράγεται από την τριβή μεταξύ τους. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις ενδέχεται να δημιουργηθεί μία μικρή μεμβράνη λιωμένου υλικού ανάμεσα στις δύο επιφάνειες προς συγκόλληση. Οι πρώτες δοκιμές έγιναν τη δεκαετία του 1890 από τον Αμερικανό J.H. Bevington ο οποίος εφάρμοσε αυτή τη μέθοδο για συγκόλληση μεταλλικών σωλήνων [1]. Αργότερα τη δεκαετία του 1940 έγιναν έρευνες και για συγκόλληση πλαστικών υλικών στην Γερμανία και στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Η μέθοδος αυτή ωστόσο δεν χρησιμοποιήθηκε μέχρι το 1956 όπου ο Ρώσος μηχανικός Α. J. Chdikon πραγματοποίησε επιστημονικές μελέτες και πρότεινε η συγκόλληση δια τριβής να χρησιμοποιηθεί εμπορικά[2].

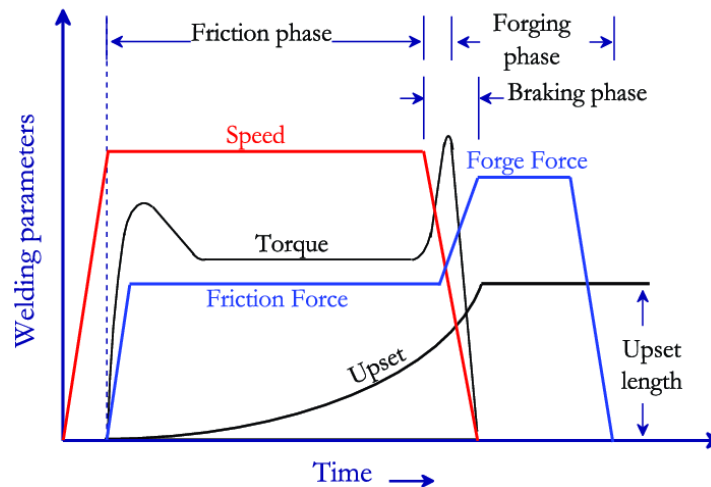
Η διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής [3] περιλαμβάνει την κίνηση ενός τεμαχίου σχετικά με κάποιο άλλο με το οποίο θέλουμε να το συγκολλήσουμε. Αυτή η κίνηση μπορεί να είναι περιστροφική, γραμμική ή τροχιακή. Αρχικά τα τεμάχια έρχονται σε επαφή και τους

ασκείται μια αξονική δύναμη. Λόγω της θερμικής και μηχανικής ενέργειας, τα τεμάχια παραμορφώνονται πλαστικά στην επιφάνεια συγκόλλησης και προκύπτει ένας δεσμός από την ανάμειξη των δύο υλικών. Στη συνέχεια, η σχετική κίνηση σταματάει και πριν η θερμοκρασία του υλικού μειωθεί σημαντικά, ασκείται μια μεγαλύτερη αξονική δύναμη έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η σφυρηλάτηση του σημείου σύνδεσης και τελικά η αύξηση της αντοχής της συγκόλλησης.

Σε αυτόν τον τρόπο συγκόλλησης έχουμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε αρκετές παραμέτρους της κατεργασίας. Έτσι επιλέγοντας τις κατάλληλες τιμές μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την συγκόλληση ώστε να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα για κάθε υλικό που χρησιμοποιούμε. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Η ταχύτητα κίνησης ή περιστροφής του τεμαχίου (Speed)
- Η πίεση τριβής (Friction Pressure)
- Ο χρόνος τριβής (Friction Time)
- Η πίεση σφυρηλάτησης (Forging Pressure)
- Ο χρόνος σφυρηλάτησης (Forging Time)

Ενδεικτικά οι παράμετροι κατεργασίας συναρτήσεως του χρόνου παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Γραφική αναπαράσταση παραμέτρων συγκόλλησης δια τριβής [4]

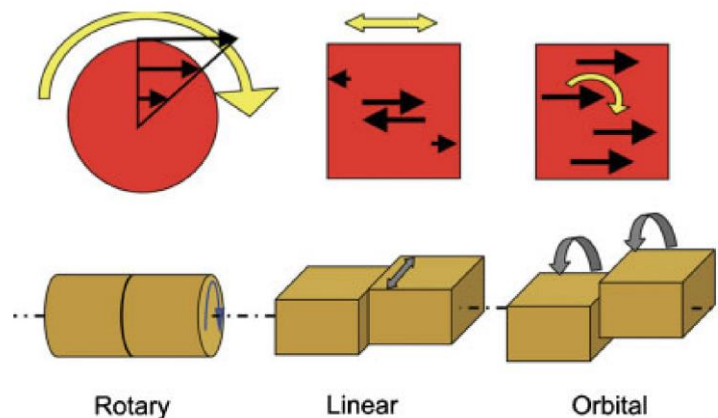
Ο συγκεκριμένος τρόπος συγκόλλησης διαθέτει πλεονεκτήματα τα οποία δεν συναντώνται στα άλλα είδη συγκολλήσεων. Αρχικά, η αντοχή της είναι μεγαλύτερη καθώς πραγματοποιείται συγκόλληση σε όλη η επιφάνεια επαφής των δύο τεμαχίων. Δεν

χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό για τον χειρισμό της μηχανής συγκόλλησης γιατί όλη η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη. Για την εκτέλεσή της δεν απαιτούνται αναλώσιμα υλικά μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος, ειδικά αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για μαζική παραγωγή εξαρτημάτων. Επιπλέον, ο χρόνος για την ολοκλήρωση της είναι σχετικά μικρός. Δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία των επιφανειών πριν την συγκόλληση ενώ σε αρκετές περιπτώσεις δεν χρειάζεται να γίνει κάποια κατεργασία μετά την ολοκλήρωση της. Τέλος, μπορούν να συγκολληθούν υλικά τα οποία είναι διαφορετικά μεταξύ τους και δεν θα μπορούσαν να συγκολληθούν με κάποια άλλη μέθοδο.

Λόγω του μεγάλου αριθμού πλεονεκτημάτων που διαθέτει αυτή η μέθοδος συγκόλλησης, έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη αεροδιαστημική, στη ναυπηγική, αεροναυπηγική και στη κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι η χρήση της για συγκόλληση δεξαμενών πλοίων, περιγύρων στροβιλομηχανών, αγωγών καυσαερίων αυτοκινήτων, ενάλλακτων θερμότητας σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, διωστήρες ναυτικών μηχανών και δεξαμενές καυσίμου σε αεροπλάνα [1], [3].

1.2.2 Τύποι συγκόλλησης

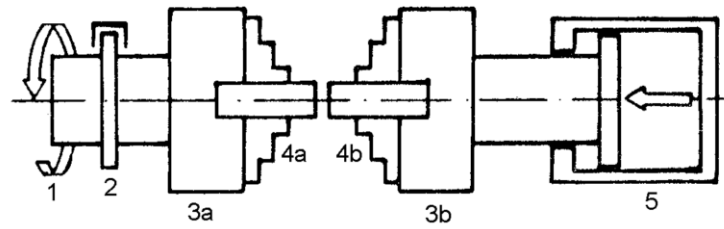
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι και πιο διαδεδομένοι τύποι συγκόλλησης δια τριβής [2], [3].



Εικόνα 1. Βασικές κατηγορίες συγκόλλησης δια τριβής [2]

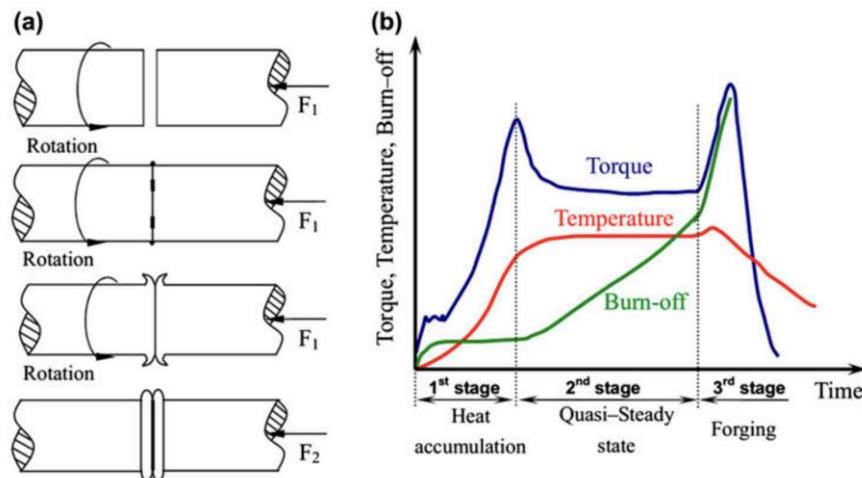
Συνεχής συγκόλληση δια τριβής - Direct drive friction welding (DDFW)

Ο συγκεκριμένος τύπος συγκόλλησης δια τριβής (Σχήμα 2) ανήκει στην κατηγορία της περιστροφικής συγκόλλησης και χρησιμοποιεί συνεχή ενέργεια από έναν ηλεκτρικό κινητήρα συνήθως για την περιστροφή του ενός τεμαχίου. Συναντάται πολύ συχνά στη βιομηχανία ενώ είναι ο τύπος συγκόλλησης που έχει επιλεγθεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εργασία.



Σχήμα 2. Τυπική διάταξη μηχανής συνεχούς συγκόλλησης δια τριβή [1]

Αρχικά το ένα τεμάχιο (4a) τοποθετείται στον κινητήρα (1) και περιστρέφεται ενώ το άλλο τεμάχιο (4b) παραμένει ακίνητο. Τα δύο κομμάτια έρχονται σε επαφή με πρόωση του δεύτερου και εφαρμόζεται η δύναμη τριβής (F_1) με κάποια διάταξη ελέγχου της ασκούμενης αξονικής δύναμης (5). Καθώς οι επιφάνειες των τεμαχίων τρίβονται αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για προκαθορισμένο χρόνο. Στη συνέχεια, το περιστρεφόμενο κομμάτι σταματάει, λόγω της τριβής με το άλλο κομμάτι ή με τη χρήση φρένου (2) και εφαρμόζεται η τελική δύναμη σφυρηλάτησης (F_2) που εξασφαλίζει την σύνδεση των δύο τεμαχίων.

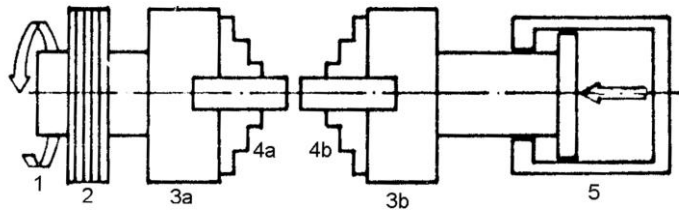


Σχήμα 3. Διαδικασία συνεχούς συγκόλλησης δια τριβή (a), μεταβολή συνθηκών σε κάθε στάδιο της συγκόλλησης (b) [5]

Συγκόλληση δια τριβής με αδράνεια - Inertia friction welding (IFW)

Η συγκόλληση δια τριβής με αδράνεια (Σχήμα 4) χρησιμοποιεί τον ίδιο μηχανισμό με τη συνεχή συγκόλληση δια τριβής με τη μόνη διαφορά ότι δεν υπάρχει συνεχόμενη τροφοδοσία ενέργειας περιστροφής στη μηχανή. Χρησιμοποιείται ένας σφόνδυλος (2) ο οποίος είναι τοποθετημένος στον άξονα του περιστρεφόμενου τεμαχίου. Ο κινητήρας περιστρέφει τον σφόνδυλο με μια καθορισμένη ταχύτητα περιστροφής και έτσι αποθηκεύεται σε αυτόν κινητική ενέργεια. Όταν έχει αποθηκευτεί αρκετή κινητική ενέργεια στον σφόνδυλο ο κινητήρας απεμπλέκεται και τα δύο τεμάχια έρχονται σε επαφή με

συγκεκριμένη πίεση. Η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική η οποία βοηθά στην δημιουργία δεσμού. Σε κάποιες περιπτώσεις εφαρμόζεται και πίεση σφυρηλάτησης λίγο πριν την ακινητοποίηση του σφονδύλου η οποία διατηρείται για συγκεκριμένο χρόνο μετά την παύση της περιστροφής.

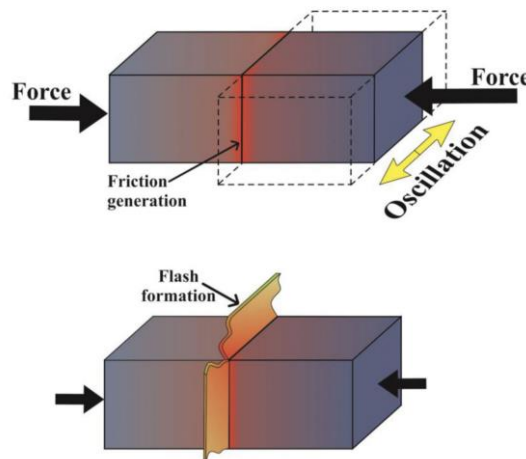


Σχήμα 4. Τυπική διάταξη μηχανής συγκόλλησης δια τριβής με αδράνεια [1]

Αυτός ο τύπος συγκόλλησης είναι ο πιο διαδεδομένος για συγκόλληση αξονοσυμμετρικών τεμαχίων.

Γραμμική συγκόλληση δια τριβής - Linear friction welding (LFW)

Η γραμμική συγκόλληση δια τριβής ανακαλύφθηκε για να επιτρέψει την συγκόλληση τεμαχίων πιο περίπλοκων γεωμετριών. Λειτουργεί με τον ίδιο μηχανισμό με τις περιστροφικές μεθόδους με τη διαφορά ότι εδώ η κίνηση είναι παλινδρομική αντί για περιστροφική. Το παλλόμενο τεμάχιο έρχεται σε επαφή με το ακίνητο τεμάχιο και ασκείται σε αυτό πίεση τριβής. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης υλικό αποβάλλεται έξω από την περιοχή συγκόλλησης και δημιουργεί προέκταμα (flash). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το τελικό μήκος του τεμαχίου να είναι τελικά μικρότερο από το αρχικό. Το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει και στη περιστροφική συγκόλληση, ωστόσο είναι αρκετά πιο ασθενές.



Σχήμα 5. Γραμμική συγκόλληση δια τριβή δύο τεμαχίων τετραγωνικής διατομής [3]

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι με αυτή τη μέθοδο, σε σχέση με την περιστροφική συγκόλληση, πετυχαίνουμε ομοιόμορφη παραγωγή θερμότητας καθώς οι επιφάνειες τρίβονται με την ίδια γραμμική ταχύτητα σε όλα τα σημεία. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης κάποιας ανομοιομορφίας στην επιφάνεια συγκόλλησης.

Τροχιακή συγκόλληση δια τριβής - Orbital friction welding (OFW)

Και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την ίδια αρχή λειτουργίας με την περιστρεφόμενη συγκόλληση δια τριβής. Η διαφορά τους είναι ότι και τα δύο τεμάχια περιστρέφονται με την ίδια φορά περιστροφής με τον άξονα περιστροφή τους να έχει μια απόκλιση μέχρι 3 mm. Έτσι επιτυγχάνεται ομοιόμορφη ταχύτητα στις συγκολλούμενες επιφάνειες μειώνοντας τα προβλήματα ανομοιόμορφης παραγωγής θερμότητας που συναντώνται στο περιστροφικό τύπο συγκόλλησης.

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η ιδέα της μετατροπής τórνου σε μηχανή συγκόλλησης δια τριβής έχει εξεταστεί από διάφορους ερευνητές στο παρελθόν. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν κάποιες από τις ερευνητικές εργασίες που έχουν γίνει σε αυτό το θέμα.

Οι Kamran Shah, Hassan Khurshid, Izhar Ul Haq, Nauman Khurram και Zeeshan Ali [6] κατασκεύασαν ένα εξάρτημα το οποίο μπορούσε να προσαρμοστεί σε τórνο και να τον μετατρέψει σε μηχανή συνεχούς συγκόλλησης δια τριβής. Η δύναμη στα δύο τεμάχια ασκούσαν από έναν πνευματικό κύλινδρο και ο έλεγχος της δύναμης γινόταν χειροκίνητα. Εκτέλεσαν πειράματα με διάφορες παραμέτρους δύναμης και ταχύτητας περιστροφής σε τεμάχια αλουμινίου και χάλυβα από τα οποία τα περισσότερα ήταν πετυχημένα. Έτσι κατέληξαν σε συμπεράσματα για την επίδραση των διαφορετικών παραμέτρων στην ποιότητα της συγκόλλησης. Έτσι κατάφεραν τελικά να μετατρέψουν έναν συμβατικό τórνο σε μηχανή συγκόλλησης δια τριβής με πολύ μικρότερο κόστος από αυτό μιας μηχανής συγκόλλησης δια τριβής.

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Ade Sunardi, Mariyana Mariyana, Adhes Gamayel, M. N. Mohammed και Mohamad Zaenudin [7] έγινε σχεδιασμός διάταξης συγκόλλησης δια τριβής σε τórνο με χρήση υδραυλικού συστήματος για την άσκηση δύναμης στα τεμάχια προς συγκόλληση. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε και φρένο στο περιστρεφόμενο τσοκ για την βελτίωση της διαδικασίας της συγκόλλησης. Δεν έγιναν πολλά πειράματα για την επιβεβαίωση της λειτουργίας της μηχανής ωστόσο σε δύο χαλύβδινα τεμάχια που έγινε δοκιμή τα αποτελέσματα ήταν εξαιρετικά.

Παρόμοια έρευνα έκαναν και οι B. Parandhaman, E. Indhumathi, M. Nivedha, M. Prema και D. Thamizharasi [8] όπου απέδειξαν ότι μπορεί να γίνει συγκόλληση δια τριβής σε συμβατικό τórνο ακόμα και ανόμοιων μεταλλικών υλικών, κράματος αλουμινίου και μαλακού χάλυβα σε αυτή τη περίπτωση. Μετά από ανάλυση διάφορων χαρακτηριστικών

της συγκόλλησης προέκυψε ότι η χρήση τόννου ήταν μια καλή επιλογή για συγκόλληση δια τριβής λόγω του μικρού κόστους αλλά και της υψηλής ποιότητας της συγκόλλησης.

Οι R. Bayindir και H. Ates [9] εξέτασαν τρεις τρόπους ελέγχου μηχανής συγκόλλησης δια τριβής. Τα συστήματα που χρησιμοποίησαν ήταν συμβατικός αυτόματος έλεγχος (Conventional automatic control – CAC), λογικός προγραμματιζόμενος ελεγκτής (Programmable logic controller – PLC) και έλεγχος περιφερειακής διεπαφής (Peripheral interface control – PIC). Μετά από πειράματα συγκόλλησης χαλύβδινων τεμαχίων, αποδείχθηκε ότι και οι τρεις τρόποι ελέγχου ήταν επιτυχημένοι ωστόσο το σύστημα που ελεγχόταν με PIC ήταν το πιο αποδοτικό καθώς είχε πλεονεκτήματα στο κόστος, στην ευκολία προγραμματισμού και την προσαρμογή σε διάφορες συνθήκες.

Τέλος, οι Rama Rao, A. Kiran Kumar Yadav και G. Sai Krishna Prasad [10] εκτέλεσαν πειράματα συγκόλλησης δια τριβής σε ανόμοια μεταλλικά υλικά σε συμβατικό τόννο χωρίς αυτόματο έλεγχο της δύναμης συγκόλλησης. Τα τεμάχια συγκολλήθηκαν επιτυχημένα και έτσι οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι είναι ασφαλές ένας τόννος να λειτουργεί σαν μηχανή συγκόλλησης δια τριβής.

1.4 Δομή εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής εργασίας. Ακολούθησε μια παρουσίαση της συγκόλλησης δια τριβής και αναφέρθηκαν οι βασικοί τύποι της δίνοντας στον αναγνώστη τη δυνατότητα να κατανοήσει την αρχή λειτουργίας μιας τέτοιας μηχανής. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάστηκαν άλλες προσπάθειες επιστημόνων για την κατασκευή παρόμοιων μηχανών.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική περιγραφή όλων των εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης καθώς και παρουσίαση διάφορων εργασιών που έγιναν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ για την σωστή λειτουργία των εξαρτημάτων που αναφέρονται.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι πιο γνωστές γλώσσες προγραμματισμού προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC). Γίνεται περιγραφή των καταστάσεων από τις οποίες περνάει η μηχανή κατά την λειτουργία της και παρουσιάζονται οι τρόποι ελέγχου δύναμης που δοκιμάστηκαν.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι δοκιμές συγκόλλησης που έγιναν σε τεμάχια καθώς και τα αποτελέσματά που προέκυψαν. Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν μέτρηση δύναμης επαφής τεμαχίων, δοκιμή αντοχής συγκόλλησης σε εφελκυσμό και παρατήρηση ποιότητας συγκόλλησης με μικροσκόπιο για προσδιορισμό τυχόν ατελειών.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από προέκυψαν ενώ στο κεφάλαιο 6 γίνονται προτάσεις για μελλοντική εργασία.

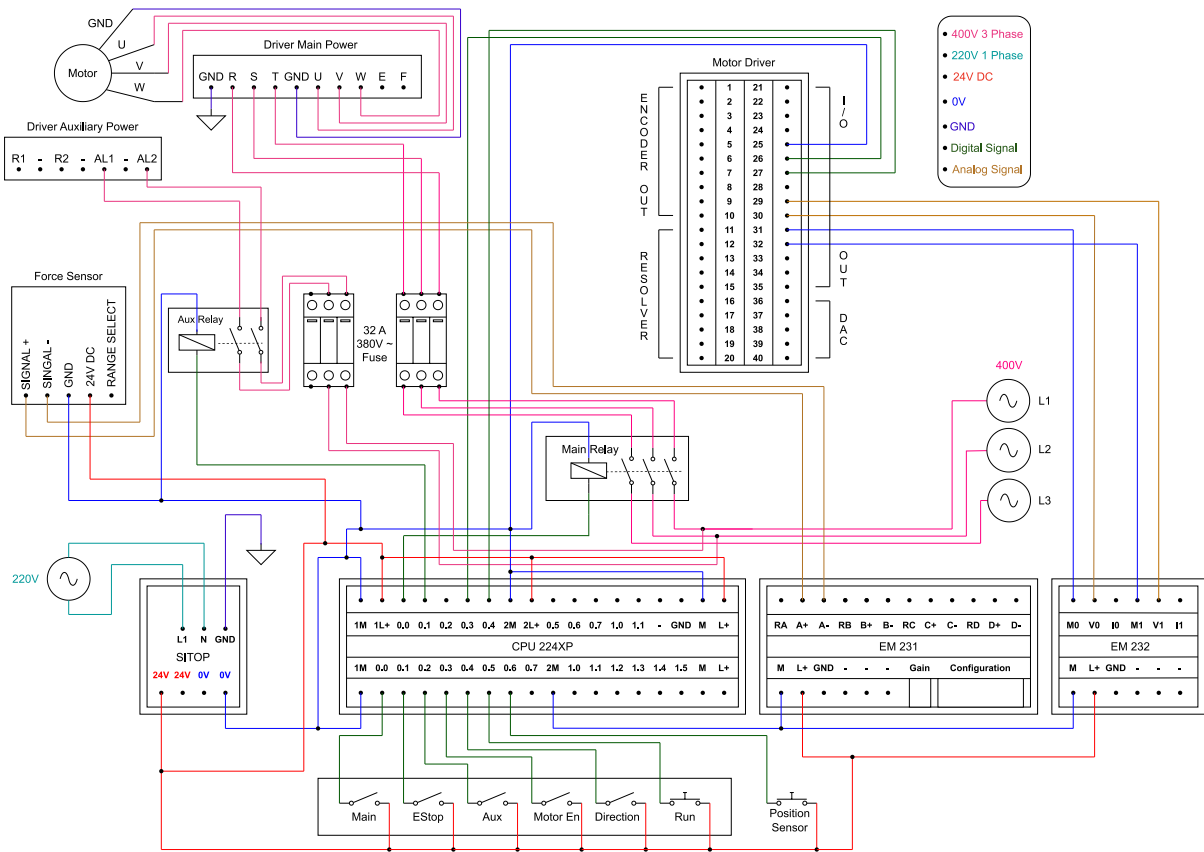
Το κεφάλαιο 7 αποτελεί τη βιβλιογραφία της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, παρατίθεται στο παράρτημα ο κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Ladder που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας και χρησιμοποιήθηκε στο PLC για την αυτόματη εκτέλεση της κατεργασίας καθώς και τα αποτελέσματα από τις δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό των τεμαχίων.

2. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

2.1 Γενική διάταξη

Για την υλοποίηση της μηχανής συγκόλλησης, χρειάστηκε να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί μια ηλεκτρομηχανική διάταξη. Αυτή με την βοήθεια των επιμέρους εξαρτημάτων που διαθέτει επιτυγχάνει τελικά τον έλεγχο της δύναμης που ασκείται μεταξύ των δύο τεμαχίων προς συγκόλληση. Η γενική ηλεκτρολογική διάταξη της μηχανής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Διαθέτει δύο πηγές τροφοδοσίας ρεύματος. Η πρώτη είναι τριφασική 400V για την τροφοδοσία του κινητήρα πρόωσης και η δεύτερη τροφοδοτεί με μονοφασικό ρεύμα τάσης 220V το τροφοδοτικό που με τη σειρά του τροφοδοτεί το PLC με 24V.



Σχήμα 6. Γενική ηλεκτρική διάταξη

Τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η διάταξη είναι:

- Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής PLC
- Μονάδες επέκτασης εισόδων εξόδων PLC
- Διεπαφή ανθρώπου μηχανής HMI
- Οδηγός κινητήρα
- Σερβοκινητήρας πρόωσης
- Αισθητήρας δύναμης
- Αισθητήρας θέσης
- Ρελέ κύριας και βοηθητικής παροχής ρεύματος οδηγού

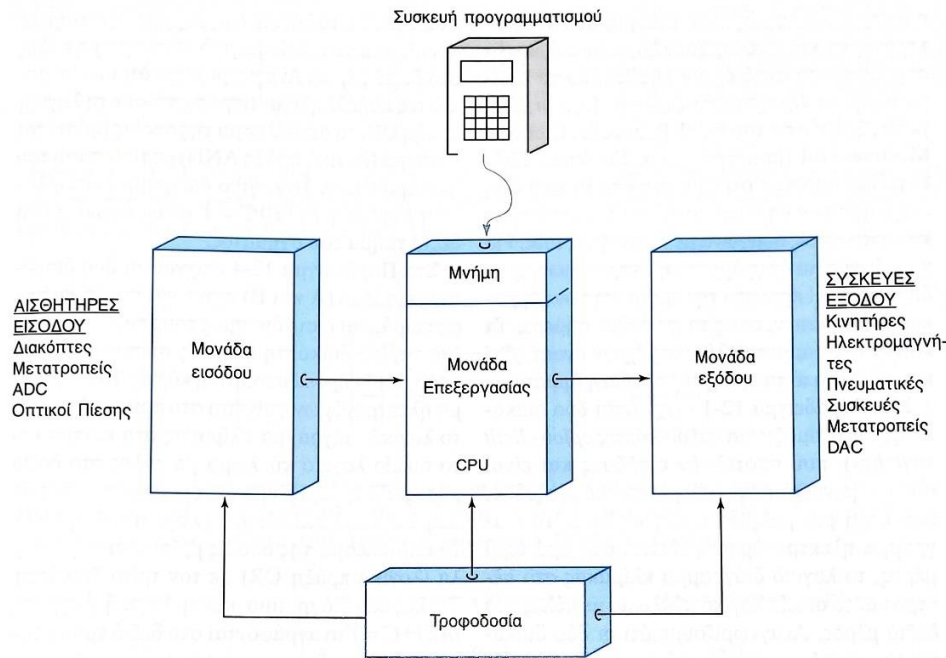
Η λειτουργία, η συνδεσμολογία και τα χαρακτηριστικά των παραπάνω εξαρτημάτων θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

2.2 Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC)

2.2.1 Εισαγωγή

Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (Programmable logic controller, PLC) είναι μια προγραμματιζόμενη υπολογιστική συσκευή η οποία δημιουργήθηκε για να αντικαταστήσει ομάδες ηλεκτρονόμενων σε διαδικασίες ελέγχου στη βιομηχανία. Τα πρώτα PLC εμφανίστηκαν το 1968 ενώ από τότε βελτιώνονται συνέχεια στην απόδοσή και την αξιοπιστία τους [11], [12]. Σε σχέση με τους υπολογιστές γενικής χρήσης είναι πιο εύρωστες συσκευές με το χαρακτηριστικό να μπορούν να λειτουργήσουν σε δυσμενές βιομηχανικό περιβάλλον το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει υψηλές θερμοκρασίες, υγρασία, δονήσεις και σκόνη.

Ο λογικός ελεγκτής αποτελείται από την μονάδα εισόδου, την μονάδα εξόδου την μονάδα επεξεργασίας και τη μνήμη όπως φαίνεται στο διάγραμμα βαθμίδων στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Οργάνωση ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC) [13]

Σκοπός της μονάδας εισόδου είναι να λαμβάνει τα σήματα από διάφορους αισθητήρες, διακόπτες, μετατροπείς ADC και να τα μετατρέπει σε ψηφιακές τιμές δεδομένων συμβατές με την μονάδα επεξεργασίας για να μπορούν να αξιοποιηθούν. Στην αρχή κάθε κύκλου εκτέλεσης του προγράμματος, λαμβάνεται ένα στιγμιότυπο όλων των εισόδων και οι τιμές τους αποθηκεύονται σε προσωρινές μνήμες (buffer). Έτσι κατά την εκτέλεση του προγράμματος δεν αλλάζουν οι τιμές εισόδου με αποτέλεσμα να αποφεύγονται σφάλματα από την μεταβολή τους. Οι τιμές σε αυτή την μνήμη ενημερώνονται στον επόμενο κύκλο εκτέλεσης του προγράμματος.

Το ίδιο συμβαίνει και στην μονάδα εξόδου όπου τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των σημάτων εισόδου καταλήγουν σε προσωρινές μνήμες (buffer) που ελέγχουν τις εξόδους. Η μονάδα ελέγχου μετατρέπει αυτές τις τιμές εξόδου σε σήματα εξόδου τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο βαλβίδων, κινητήρων πνευματικών συσκευών ή άλλων συσκευών που μπορεί να ελέγχει το PLC.

Στην μνήμη είναι αποθηκευμένο το λειτουργικό σύστημα του PLC καθώς και το πρόγραμμα ελέγχου του χρήστη. Τα παραπάνω εξαρτήματα τροφοδοτούνται από ένα τροφοδοτικό ρεύματος. Σε μικρά συστήματα τα τμήματα εισόδου και εξόδου μπορούν να αποτελούν τμήματα της ίδιας της συσκευής ενώ σε μεγαλύτερα συστήματα βρίσκονται συνήθως σε ξεχωριστές μονάδες ή κάρτες [13].

Το πρόγραμμα του PLC εκτελείται επαναληπτικά σε μία διαδικασία που ονομάζεται σάρωση (Σχήμα 8). Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά την ανάγνωση των εισόδων

από την CPU του PLC. Στη συνέχεια εκτελείται το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας τις τιμές των εισόδων που έχουν αποθηκευτεί στη προσωρινή μνήμη (buffer). Μετά, το PLC εκτελεί διαδικασίες εσωτερικού διαγνωστικού ελέγχου και τέλος ενημερώνει τις εξόδους σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του προγράμματος. Ο χρόνος εκτέλεσης εξαρτάται από το μέγεθος και την περιπλοκότητα του προγράμματος. Τυπικά είναι μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου και είναι σημαντικό αυτός ο χρόνος να είναι ο μικρότερος δυνατός ώστε να μπορεί να γίνει έλεγχος συστημάτων με γρήγορη απόκριση.



Σχήμα 8. Σάρωση PLC

Ο προγραμματισμός του PLC γίνεται με μια συσκευή προγραμματισμού. Αυτή μπορεί να είναι ένας απλός ηλεκτρονικός υπολογιστής γενικής χρήσης ή μια φορητή συσκευή προγραμματισμού. Οι φορητές συσκευές προγραμματισμού συνδέονται στο PLC με ένα καλώδιο και επιτρέπουν το προγραμματισμό τους με ένα ειδικό πληκτρολόγιο και μια μικρή οθόνη που διαθέτουν. Τα παραπάνω είναι μικρά και εύκολα στη μεταφορά, ωστόσο οι δυνατότητές τους είναι περιορισμένες. Γι' αυτό πιο σύνηθες είναι ο προγραμματισμός να γίνεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή (PC) στον οποίο έχει εγκατασταθεί το λογισμικό που δίνεται από τον κατασκευαστή (Εικόνα 2). Με την χρήση του υπολογιστή μπορεί να γίνει εκτέλεση του προγράμματος online έτσι ώστε να μπορεί να γίνει παρακολούθηση, διάγνωση και διόρθωση προβλημάτων ενώ λειτουργεί το PLC.

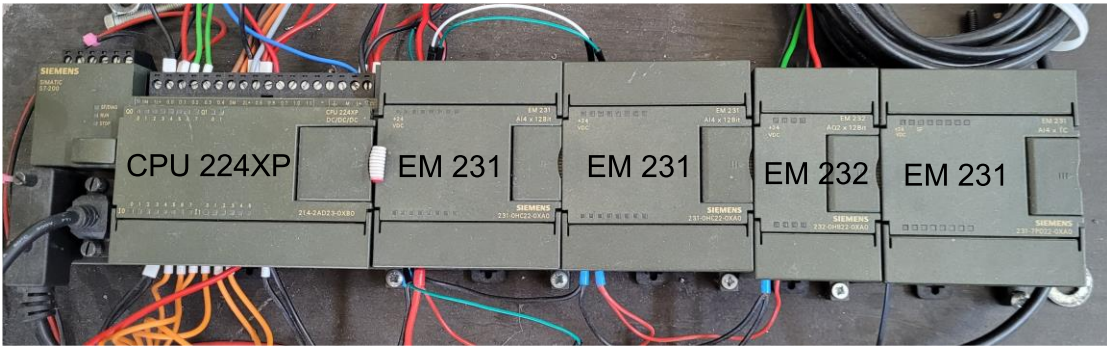


Εικόνα 2. Προγραμματισμός PLC με ηλεκτρονικό υπολογιστή

2.2.2 PLC που επιλέχθηκε

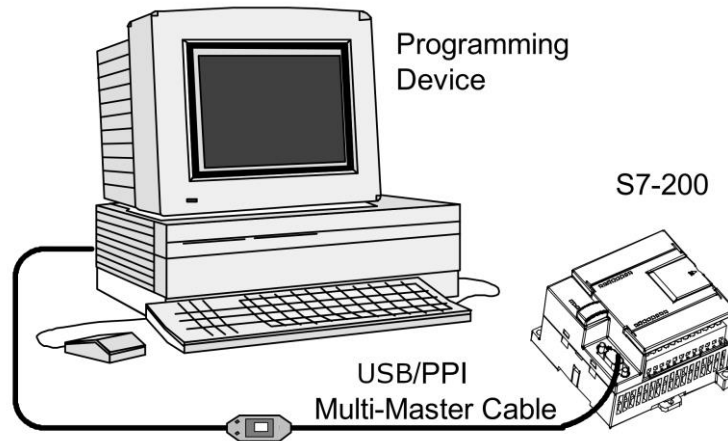
Στην δική μας πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε η μονάδα CPU S7-224XP της Siemens που διαθέτει 14 ψηφιακές εισόδους, 10 ψηφιακές εξόδους, 2 αναλογικές εισόδους και μία αναλογική έξοδο. Οι αναλογικές εισόδους / εξόδους έχουν ψηφιακή ανάλυση 12bit. Το εύρος λειτουργίας τάσεων για αναλογικές εισόδους είναι $\pm 10V$ ενώ για τις αναλογικές εξόδους είναι 0V - 10V και με ρεύμα 0 mA - 20 mA ενώ οι ψηφιακές εξόδους δίνουν τάση 24V. Για την μετατροπή σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό χρειάζονται 125 msec. Η τάση τροφοδοσίας του PLC είναι 24V. Επιπλέον, διαθέτει δύο θύρες RS-485 για επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές.

Η βασική μονάδα συνοδεύεται από μια μονάδα επέκτασης δύο αναλογικών εξόδων EM232 και από τρεις μονάδες επέκτασης τεσσάρων αναλογικών εισόδων EM231 από τις οποίες μέχρι στιγμής αξιοποιείται μόνο η μία. Ωστόσο, μπορούν να αξιοποιηθούν μελλοντικά και οι υπόλοιπες για χρήση περισσότερων αισθητήρων, διακοπών ή επενεργητών. Όλες οι μονάδες επέκτασης τροφοδοτούνται από το τροφοδοτικό ρεύματος με συνεχή τάση 24V και έχουν ίδια χαρακτηριστικά με αυτά που αναφέρθηκαν για τη βασική μονάδα PLC, με εξαίρεση τον χρόνο μετατροπής σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό που είναι μικρότερος από 250 msec. Οι μονάδες επέκτασης εισόδων έχουν ρυθμιστεί ώστε να δέχονται σήματα $\pm 5 V$ με ανάλυση 1.25 mV/bit [14].



Εικόνα 3. Κύρια μονάδα PLC μαζί με τις επεκτάσεις

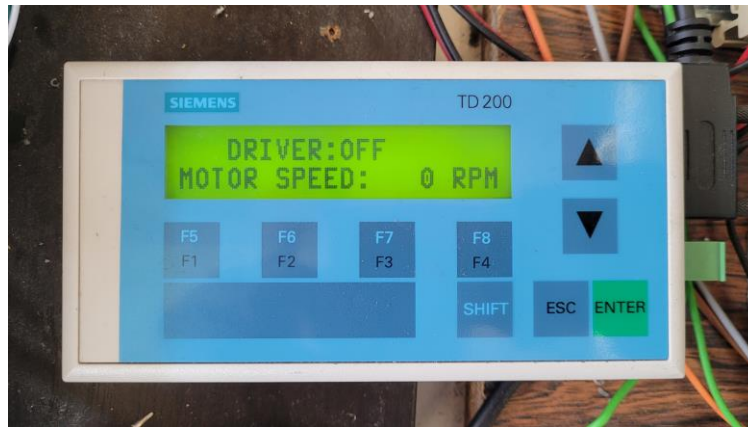
Η επικοινωνία του PLC με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται με το καλώδιο μεταφοράς δεδομένων “USB/PPI Multi-Master Cable” της Siemens (Εικόνα 4). Μετατρέπει το πρότυπο RS-485 από το PLC σε USB στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 4. Καλώδιο επικοινωνίας PLC με ηλεκτρονικό υπολογιστή

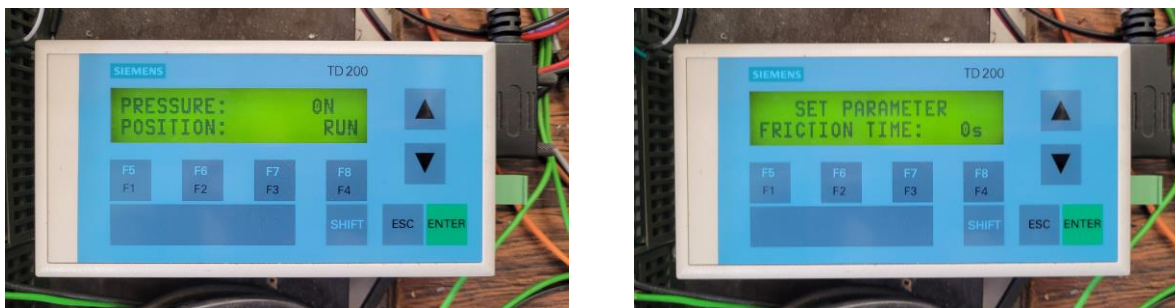
2.2.3 Διεπαφή ανθρώπου – μηχανής - Human Machine Interface (HMI)

Στο PLC έχει συνδεθεί και μια συσκευή HMI που είναι η διεπαφή μεταξύ του χειριστή της μηχανής και του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή. Συγκεκριμένα σε αυτή την εγκατάσταση χρησιμοποιείται το χειριστήριο TD 200 της Siemens. Διαθέτει μια ασπρόμαυρη οθόνη LCD με δυνατότητα εμφάνισης 20 χαρακτήρων σε 2 γραμμές. Επιπλέον, έχει 9 πλήκτρα από οποία μπορεί να γίνει έλεγχος της μηχανής. Ωστόσο, σε αυτή τη κατάσταση της μηχανής δεν αξιοποιούνται πλήρως όλα τα πλήκτρα καθώς ο έλεγχος της μηχανής γίνεται κυρίως από τους διακόπτες που βρίσκονται σε ξεχωριστό πίνακα. Η επικοινωνία με το PLC επιτυγχάνεται με ένα καλώδιο μέσω της θύρας επικοινωνίας RS-485 του PLC [15].



Εικόνα 5. Διεπαφή ανθρώπου - μηχανής (HMI)

Από την οθόνη που διαθέτει μπορούμε να λάβουμε πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της μηχανής, την πρόοδο της κατεργασίας και τυχόν σφάλματα που μπορεί να υπάρξουν κατά την διάρκεια. Συγκεκριμένα το HMI έχει 3 υπο-οθόνες στις οποίες μπορεί να επιλέξει ο χρήστης τι πληροφορίες θέλει να λαμβάνει κάθε φορά. Η πρώτη ονομάζεται "MOTOR" (Εικόνα 5) και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του οδηγού του κινητήρα και την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Στην οθόνη αυτή εμφανίζονται και οδηγίες προς τον χρήστη ανάλογα την κατάσταση που βρίσκεται η μηχανή ώστε να μπορεί να ξεκινήσει η κατεργασία. Η δεύτερη υπο-οθόνη ονομάζεται "SENSORS" και εμφανίζει την τιμή της δύναμης που καταγράφει ο αισθητήρας δύναμης καθώς και την κατάσταση του αισθητήρα θέσης ο οποίος όμως προς το παρόν δεν χρησιμοποιείται. Τέλος, υπάρχει μια τρίτη υπο-οθόνη που ονομάζεται "PROGRAM PARAMETER" και σε αυτή ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει τις παραμέτρους κατεργασίας .



Εικόνα 6. Υπο-οθόνες "Sensors" (αριστερά) και "Program Parameter" (δεξιά)

Στο αρχικό μενού του HMI υπάρχει και επιλογή εμφάνισης των προειδοποιητικών (alarms) όταν είναι ενεργοποιημένα. Υπάρχουν δύο alarm που μπορεί να εμφανιστούν:

1. Χάθηκε η σύνδεση με τον αισθητήρα δύναμης – Force sensor lost connection

Σε περίπτωση που ο αισθητήρας δύναμης αποσυνδεθεί ή για οποιοδήποτε λόγο δεν στέλνει δεδομένα στο PLC τότε σταματάει οποιαδήποτε διαδικασία στο σύστημα άσκησης δύναμης και δεν μπορεί να εκτελεστεί καμία ενέργεια μέχρι ο αισθητήρας να συνδεθεί ξανά. Η επίδραση που έχει στη μηχανή είναι η ίδια με αυτή που έχει το κουμπί διακοπής έκτακτης ανάγκης (Emergency stop).

2. Ενεργοποίηση διακοπής έκτακτης ανάγκης – Emergency stop engaged

Εμφανίζεται όταν πιεστεί το κουμπί διακοπής έκτακτης ανάγκης και ενημερώνει τον χρήστη ότι δεν μπορεί να εκτελεστεί καμία ενέργεια μέχρι να απεμπλακεί ο διακόπτης.

2.3 Κινητήρας

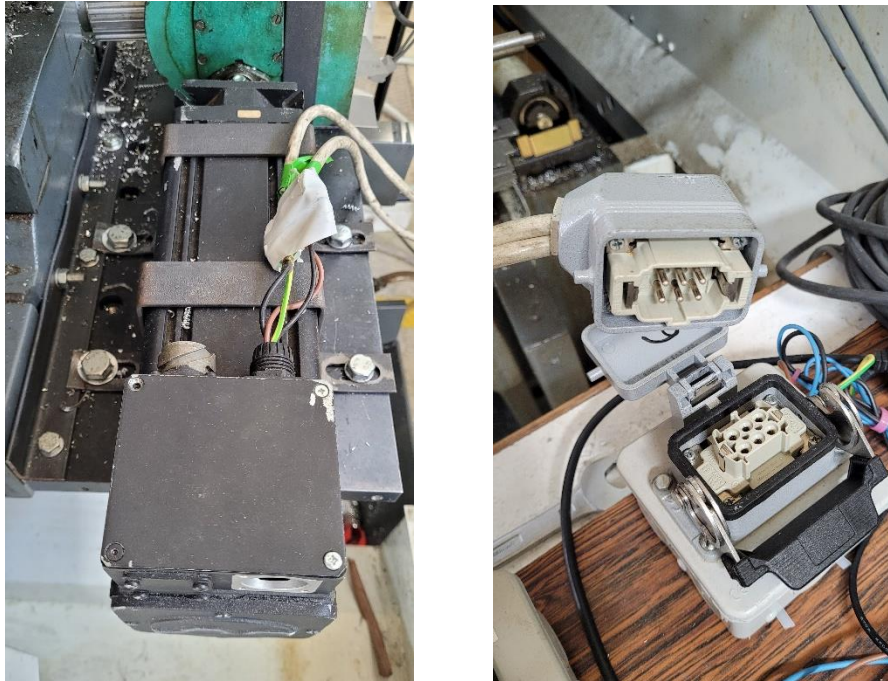
Για την γραμμική κίνηση πρόωσης του μη περιστρεφόμενου τσοκ χρησιμοποιείται ένας σερβοκινητήρας. Η κίνηση δίνεται αρχικά από τον κινητήρα σε έναν μειωτήρα και στη συνέχεια με έναν ιμάντα στον περιστρεφόμενο άξονα κεντροφορέα έτσι ώστε να μπορεί να κινηθεί η πινόλη στην οποία είναι προσαρμοσμένο το μη περιστρεφόμενο τσοκ. Έτσι με τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα μπορούν τα προς συγκόλληση τεμάχια να έρθουν σε επαφή και τελικά να συγκολληθούν. Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται είναι ο BMH0955N1RAC της εταιρίας Num ο οποίος είναι τύπου brushless, σύγχρονος τριφασικού ρεύματος. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρα

Μοντέλο	BMH0955N1RAC
Ισχύς	2.89 kW
Ροπή ονομαστική/μέγιστη	9.2/37 Nm
Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής	3000 RPM
Ονομαστική τάση τροφοδοσίας	300 V
Ρεύμα ονομαστικό/μέγιστο	5.8/23 A
Φρένο	Δεν διαθέτει

Είναι τοποθετημένος δίπλα στον κεντροφορέα σε μια ξεχωριστή μεταλλική βάση στην οποία εδράζεται μαζί με τον μειωτήρα. Η στήριξη επιτυγχάνεται με δύο ελάσματα τα οποία

είναι βιδωμένα στη βάση όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Η ηλεκτρική σύνδεση με τον οδηγό επιτυγχάνεται με δύο καλώδια από τα οποία περνάει η ηλεκτρική ισχύς που δίνει ο οδηγός σύμφωνα με την ταχύτητα που έχουμε ορίσει και επιστρέφει το σήμα του αναλυτή (resolver) του κινητήρα που μετράει την ταχύτητα περιστροφής του.



Εικόνα 7. Έδραση κινητήρα (αριστερά), σύνδεσμος τροφοδοσίας κινητήρα (δεξιά)

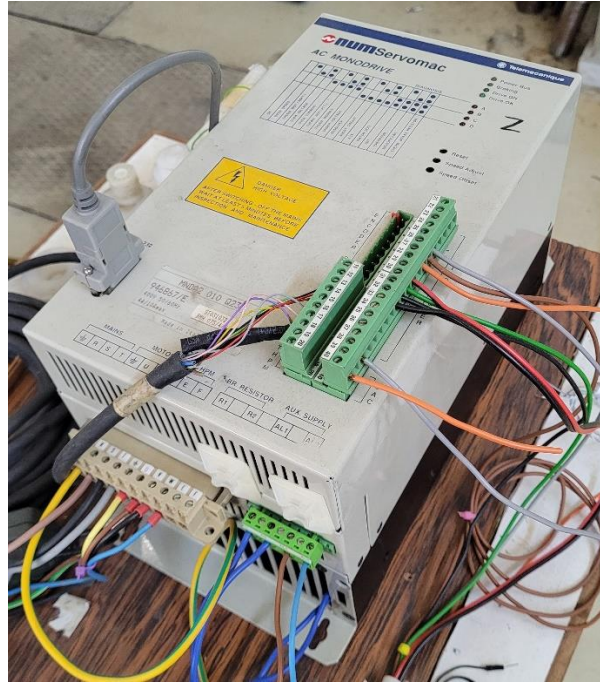
Το καλώδιο της ισχύος καταλήγει σε ακροδέκτη αρσενικό βύσμα βαρέως τύπου 6 pin όπως φαίνεται στην Εικόνα 7 όπου ενώνεται με τον αντίστοιχο θηλυκό σύνδεσμο. Το καλώδιο του αναλυτή συνδέεται στον κινητήρα με βύσμα ελέγχου βιομηχανικού κινητήρα 10 pin.

2.4 Οδηγός του κινητήρα

2.4.1 Χαρακτηριστικά

Ο κινητήρας που περιγράψαμε παραπάνω ελέγχεται από έναν οδηγό (Driver). Ο οδηγός (Εικόνα 8) βρίσκεται ανάμεσα στο PLC και στον κινητήρα καθώς παίρνει το σήμα του PLC για τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα και το μετατρέπει σε ισχύ στον κινητήρα. Επιπλέον με την ανατροφοδότηση (feedback) από τον αναλυτή (resolver) εφαρμόζει έλεγχο ταχύτητας στον κινητήρα σύμφωνα με κάποιες παραμέτρους που του έχουμε ορίσει. Ο οδηγός που χρησιμοποιούμε είναι ο MNDA2010Q23 της εταιρίας Num. Έχει ικανότητα παροχής ρεύματος rms ονομαστικό 4 A και μέγιστο 7,1 A. Για τον σερβοκινητήρα που έχουμε επιλέξει ο κατασκευαστής προτείνει την χρήση του οδηγού MNDA2015 ο οποίος καλύπτει πλήρως τις ανάγκες τροφοδοσίας του κινητήρα [16]. Ωστόσο επειδή στο εργαστήριο δεν υπήρχε διαθέσιμος αυτός ο οδηγός έχει χρησιμοποιηθεί ο μικρότερος

MNDA2010. Αυτό δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα στη συγκεκριμένη κατάσταση της μηχανής καθώς οι ροπές που πρέπει να εφαρμόσει ο κινητήρας είναι σχετικά μικρές με αποτέλεσμα η ισχύς που καταναλώνει να μην ξεπερνάει ποτέ την μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει ο οδηγός.



Εικόνα 8. Οδηγός κινητήρα

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η συνδεσμολογία του οδηγού με το PLC η οποία φαίνεται και στο Σχήμα 6. Για την επιλογή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, παρέχεται από το PLC αναλογικό σήμα $\pm 10V$ στους ακροδέκτες 30 και 31 του οδηγού από τις αναλογικές εξόδους MO και VO της μονάδας επέκτασης εξόδων. Μετρώντας την διαφορά τάσης, ο οδηγός μεταφράζει το σήμα αυτό σε ταχύτητα περιστροφής στον άξονα του κινητήρα στο εύρος ± 3000 RPM. Σε περίπτωση που θέλουμε την ακινητοποίηση του κινητήρα, εκτός από τον μηδενισμό της τάσης στους ακροδέκτες 30 και 31 του οδηγού, εφαρμόζεται και τάση 24 V στον ακροδέκτη 26 του οδηγού από την ψηφιακή έξοδο 0.3 της κύριας μονάδας PLC. Πριν από οποιαδήποτε εντολή κίνησης, ο κινητήρας θα πρέπει πρώτα να ενεργοποιηθεί, δηλαδή να αρχίζει να περνάει ρεύμα από το καλώδιο τροφοδοσίας του. Αυτό επιτυγχάνεται παρέχοντας τάση 24 V στον ακροδέκτη 27 του οδηγού από την ψηφιακή έξοδο 0.4 της κύριας μονάδας PLC. Επιπλέον, παρέχεται στους ακροδέκτες 29 και 32 του οδηγού αναλογική τάση από τις αναλογικές εξόδους V1 και M1 της μονάδας επέκτασης εξόδων για τον περιορισμό του μέγιστου ρεύματος που μπορεί να τροφοδοτήσει ο οδηγός στον κινητήρα με σκοπό την προστασία του οδηγού.

Για την ομαλή και επιθυμητή λειτουργία του οδηγού έχουν ορισθεί οι παράμετροι-κέρδη για έλεγχο ταχύτητας σύμφωνα με το εγχειρίδιο λειτουργίας του οδηγού [16]. Οι παράμετροι παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Συντελεστές λειτουργίας οδηγού

Kveff	32
Kiom	500
Krifu	29
Kpom	900

Για την αλλαγή αυτών των παραμέτρων, ο οδηγός θα πρέπει να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω της θύρας RS 232. Θα πρέπει να είναι εγκατεστημένο το λογισμικό του κατασκευαστή NUMtools στον υπολογιστή [17]. Με τη χρήση αυτού του λογισμικού είναι επίσης δυνατό να γίνει αυτόματη ρύθμιση των παραμέτρων και έλεγχος του κινητήρα σε πραγματικό χρόνο.

2.4.2 Αστοχία οδηγού

Κατά την διάρκεια δοκιμών και διορθώσεων του προγράμματος της μηχανής, ο οδηγός χρειάστηκε να μείνει σε αδράνεια για 20 λεπτά περίπου με ενεργοποιημένη την τροφοδοσία ρεύματος. Αυτό προκάλεσε την αστοχία του και χρειάστηκε να αντικατασταθεί με έναν ίδιο οδηγό για να μπορούν να συνεχίσουν οι δοκιμές. Οι κύριοι λόγοι για την αστοχία του φαίνεται να ήταν η παλαιότητά του και ενδεχομένως η αύξηση θερμοκρασίας σε κάποιο εσωτερικό εξάρτημά του την ώρα που ήταν υπό τάση αλλά δεν εκτελούσε κάποια κίνηση. Για την αποφυγή παρόμοιας κατάστασης έγιναν κάποιες μετατροπές στο πρόγραμμα.

- Η παροχή ρεύματος του οδηγού κόβεται μετά από 30 δευτερόλεπτα αδράνειας. Έτσι ο χειριστής δεν χρειάζεται χειροκίνητα να απενεργοποιεί τον οδηγό για να αποφύγει παρόμοια αστοχία.
- Ο κινητήρας τίθεται σε κατάσταση λειτουργίας (motor current enable) μόνο εάν υπάρχει εντολή για κίνηση του κινητήρα ή εάν βρισκόμαστε σε κατάσταση του προγράμματος όπου οι κινήσεις γίνονται αυτόματα.
- Προστέθηκε καθυστέρηση ενεργοποίησης του οδηγού τριών δευτερολέπτων έτσι ώστε από την στιγμή που θα ενεργοποιηθεί η παροχή ρεύματος του οδηγού να υπάρχει κάποιος χρόνος που δεν θα εκτελεί κάποια κίνηση για να μπορεί να βρεθεί με ασφάλεια σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας.

Τα παραπάνω μέτρα προστασίας του οδηγού είναι εμπειρικά και δεν είναι σίγουρο ότι συμβάλουν όλα στην αποφυγή αστοχίας του οδηγού. Ωστόσο, από την στιγμή εφαρμογής τους δεν παρατηρήθηκε κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία του νέου οδηγού.

Οι παραπάνω μετατροπές στο πρόγραμμα οδήγησαν στην δημιουργία κάποιων καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο κινητήρας οι οποίες εμφανίζονται και στο HMI για να γνωρίζει ο χειριστής εάν η μηχανή μπορεί να εκτελέσει κάποια κίνηση. Οι πιθανές καταστάσεις είναι 4 και παρουσιάζονται παρακάτω.

Driver OFF

Ο οδηγός είναι εκτός λειτουργίας και δεν μπορεί να εκτελέσει καμία κίνηση. Σε αυτή τη κατάσταση μπορεί να βρεθεί όταν οι διακόπτες Main Switch ή Motor Enable είναι κλειστοί.

Driver Starting

Σε αυτή τη κατάσταση ο οδηγός βρίσκεται σε διαδικασία εκκίνησης και δεν μπορεί να δώσει εντολή για κάποια κίνηση στον κινητήρα. Η κατάσταση διαρκεί 3 δευτερόλεπτα που είναι και ο χρόνος που έχει χρονομετρηθεί ότι χρειάζεται ο οδηγός για να βρεθεί σε κατάσταση λειτουργίας από την στιγμή που θα ενεργοποιηθεί η παροχή ρεύματος. Για να εμφανιστεί αυτή η κατάσταση θα πρέπει οι διακόπτες Main Switch και Motor Enable να είναι ενεργοποιημένοι.

Driver Ready

Στη κατάσταση Ready ο οδηγός είναι εκτός λειτουργίας επειδή έχουν περάσει 30 δευτερόλεπτα από την τελευταία φορά που εκτέλεσε κάποια κίνηση. Η διαφορά με την κατάσταση OFF είναι ότι εδώ ο οδηγός είναι σε κατάσταση ετοιμότητας, δηλαδή σε περίπτωση που δοθεί εντολή για κίνηση ο οδηγός θα ενεργοποιηθεί αυτόματα. Οι διακόπτες Main Switch και Motor Enable θα πρέπει να είναι ενεργοποιημένοι διαφορετικά ο οδηγός θα βρίσκεται σε κατάσταση OFF.

Driver ON

Ο οδηγός λειτουργεί και είναι έτοιμος να οδηγήσει τον κινητήρα. Για να φτάσουμε σε αυτή την κατάσταση θα πρέπει υποχρεωτικά ο οδηγός να βρεθεί πριν στη κατάσταση Starting ξεκινώντας από την κατάσταση OFF ή από την κατάσταση Ready. Οι διακόπτες Main Switch και Motor Enable θα πρέπει να είναι ενεργοποιημένοι ενώ δεν θα πρέπει να έχουν περάσει 30 δευτερόλεπτα από την τελευταία κίνηση που εκτέλεσε ο οδηγός.

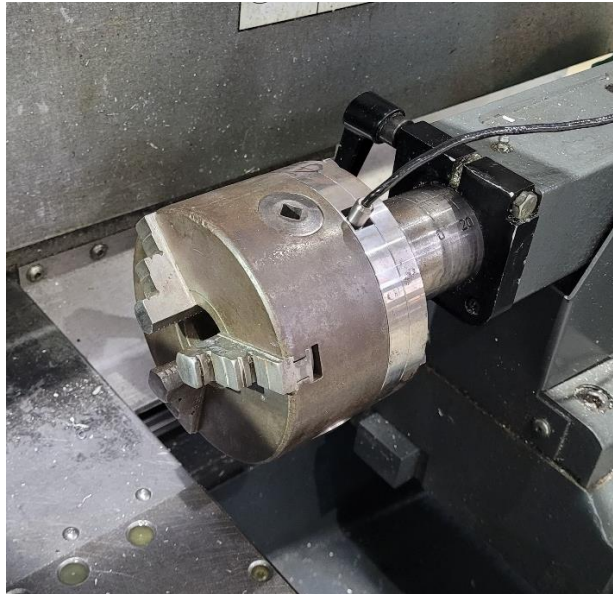


Εικόνα 9. Καταστάσεις οδηγού όπως εμφανίζονται στο HMI

2.5 Συσκευές εισόδου

2.5.1 Αισθητήρας δύναμης

Για τον έλεγχο της δύναμης η οποία ασκείται στα κομμάτια προς συγκόλληση κατά διαδικασία της τριβής και της σφυρηλάτησης, υπάρχει αισθητήρας δύναμης τοποθετημένος στο σταθερό τσόκ ανάμεσα στους σφικτήρες και στην βάση του (Εικόνα 10) έτσι ώστε να μπορεί να λαμβάνει τα αξονικά φορτία.



Εικόνα 10. Μη περιστρεφόμενο τσόκ με προσαρμοσμένο τον αισθητήρα δύναμης

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας της Kistler τύπου 9602. Είναι ρυθμισμένος να λειτουργεί στο Range 1. Στην διαμόρφωση Range 1 έχει ικανότητα να καταγράφει δυνάμεις στο εύρος -5.0 kN με 5.0 kN στον άξονα Z. Αυτές οι δυνάμεις αντιστοιχούν σε μεταβολές στην τάση εξόδου του αισθητήρα 1 mV/N . Για την λειτουργία του χρειάζεται ηλεκτρικό ρεύμα DC τάσης από $11\text{V} - 30\text{V}$ με ένταση 7 mA περίπου. Δύο χαρακτηριστικά που είναι επίσης σημαντικά είναι ο θόρυβος τον οποίο παράγει ο αισθητήρας που είναι $<2 \text{ mV}_{pp}$ και η μετατόπιση στο σήμα εξόδου που είναι 0.008 mV/s [18].

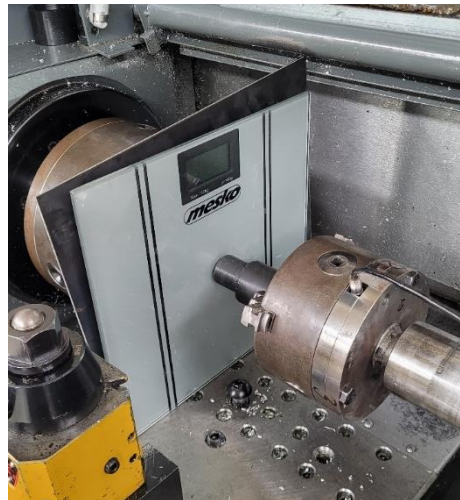
Η σύνδεσή του αισθητήρα με το PLC επιτυγχάνεται με δύο καλώδια τα οποία είναι συνδεδεμένα στις ακίδες 3 “GND (signal)” και 7 “Output 1 (Fz)” του αισθητήρα (Πίνακας 3). Τα καλώδια αυτά συνδέονται με τις αναλογικές εισόδους της μονάδας επέκτασης του PLC EM231 A+ και A- όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Έτσι το PLC διαβάζει την τιμή της διαφοράς τάσης που δίνει ο αισθητήρας και με κατάλληλους υπολογισμούς βρίσκει την τιμή της δύναμης που ασκείται στα κομμάτια προς συγκόλληση. Η τροφοδοσία ρεύματος του αισθητήρα εξασφαλίζεται από το τροφοδοτικό που παρέχει 24V DC . Τα τέσσερα αυτά

καλώδια βρίσκονται σε ένα ενιαίο καλώδιο που συνδέεται με την υπόλοιπη εγκατάσταση μέσω μιας σειριακής θύρας DB-9.

Πίνακας 3. Κατανομή ακροδεκτών βύσματος αισθητήρα δύναμης [18]

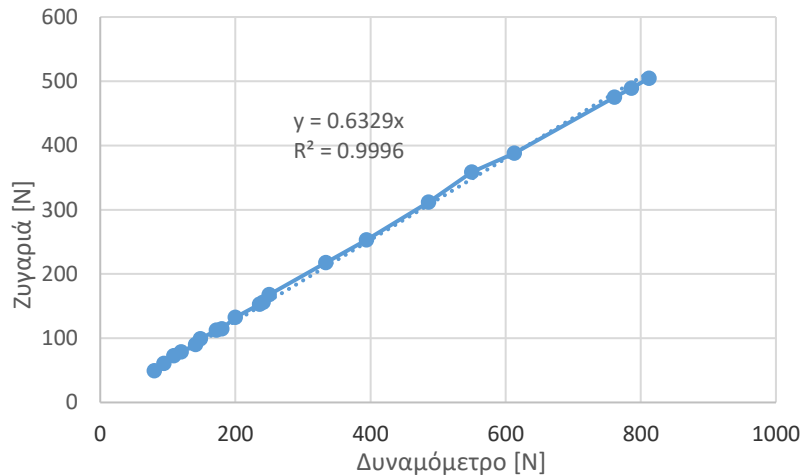
Pin	Color (open cable end)	Function
1	red	Supply
2	blue	Output 3 (F_x)
3	black	GND (signal)
4	green	Operate
5	orange	Range
6	gray	Output 2 (F_y)
7	white	Output 1 (F_z)
Screen		GND (Supply)

Για την εξασφάλιση των σωστών μετρήσεων του αισθητήρα χρειάστηκε να γίνει βαθμονόμηση. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε μια ζυγαριά σαν αναφορά η οποία τοποθετήθηκε ανάμεσα στο κινητό και στο σταθερό τσοκ (Εικόνα 11). Η στήριξή της έγινε σε μία επίπεδη επιφάνεια η οποία προσαρμόστηκε στο περιστρεφόμενο τσοκ της εργαλειομηχανής.



Εικόνα 11. Διάταξη βαθμονόμησης αισθητήρα δύναμης

Επιπλέον τοποθετήθηκε στην άκρη του σταθερού τσοκ ένα κυλινδρικό κομμάτι πλαστικού ώστε να μην έρχονται σε άμεση επαφή οι μεταλλικοί σφικτήρες του τσοκ με την γυάλινη επιφάνεια της ζυγαριάς. Στη συνέχεια το σταθερό τσοκ ασκούσε σταδιακά δύναμη στη ζυγαριά. Καταγράφηκαν οι τιμές των δυνάμεων του δυναμόμετρου που είναι τοποθετημένο στο τσοκ και της ζυγαριάς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.

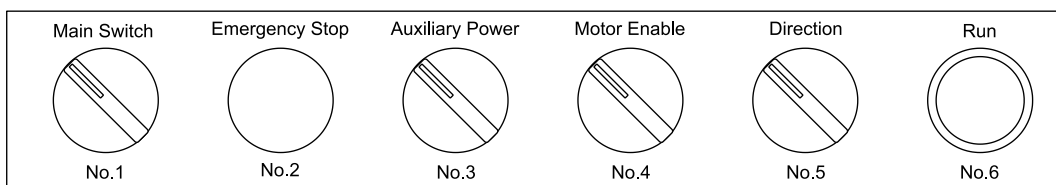


Σχήμα 9. Αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρα δύναμης

Όπως φαίνεται η σχέση των τιμών που έδινε η ζυγαριά και το δυναμόμετρο ήταν γραμμική. Έτσι, οι τιμές του δυναμόμετρου πολλαπλασιάζονται με έναν σταθερό συντελεστή 0.6329 ώστε να ταυτίζονται με τις τιμές που έδινε η ζυγαριά

2.5.2 Διακόπτες

Για την εκκίνηση και τον έλεγχο της μηχανής συγκόλλησης υπάρχουν 6 διακόπτες τοποθετημένοι σε έναν μεταλλικό πίνακα. Τροφοδοτούνται με 24 V DC και είναι συνδεδεμένοι με τις θύρες εισόδου της κύρια μονάδας PLC όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του κάθε διακόπτη ξεκινώντας από τα αριστερά.



Σχήμα 10. Διακόπτες ελέγχου μηχανής (Θέση Off)

Διακόπτης No.1 – Main Switch

Σκοπός του πρώτου διακόπτη είναι να ενεργοποιεί την μηχανή και να την φέρνει σε κατάσταση ετοιμότητας. Επιπλέον ορίζει την αντιστάθμιση του αισθητήρα δύναμης ώστε κατά την εκκίνηση η τιμή που θα λαμβάνουμε να είναι 0 N. Είναι συνδεδεμένος με την ψηφιακή είσοδο 0.0 του PLC.

Διακόπτης No.2 – Emergency stop

Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης αλλά και για οποιοδήποτε άλλο λόγο η μηχανή πρέπει να έχει τη δυνατότητα να σταματήσει αμέσως, για αυτόν τον λόγο υπάρχει το κουμπί έκτακτης ανάγκης. Όταν πιεστεί κλειδώνει στη θέση ενεργοποίησης και για να επανέλθει στην

ανενεργή θέση θα πρέπει να περιστραφεί. Όταν ενεργοποιηθεί, διακόπτει την παροχή ρεύματος στον οδηγό του κινητήρα, σταματάει οποιαδήποτε αυτόματη διαδικασία συγκόλλησης και δεν επιτρέπει να γίνει οποιαδήποτε ενέργεια στο σύστημα πρόωσης της πινόλης. Όταν επανέλθει στην ανενεργή θέση, βάζει το σύστημα στη κατάσταση χειροκίνητης λειτουργίας. Έτσι, αν πριν την ενεργοποίησή του γινόταν κάποια συγκόλληση, αυτή θα πρέπει να απορριφθεί και να ξεκινήσει από την αρχή η διαδικασία. Ο διακόπτης αυτός είναι συνδεδεμένος στην ψηφιακή έξοδο 0.1 της κύριας μονάδας PLC.

Διακόπτης No.3 – Auxiliary Power

Χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί την βοηθητική παροχή ρεύματος στον οδηγό όταν αυτό απαιτείται. Είναι συνδεδεμένος με την ψηφιακή είσοδο 0.2 της κύριας μονάδας PLC. Το PLC στη συνέχεια, ανάλογα με τη θέση του διακόπτη, δίνει το κατάλληλο ψηφιακό σήμα στο βοηθητικό ρελέ για να ελέγξει την παροχή βοηθητικού ρεύματος.

Διακόπτης No.4 – Motor Enable

Σκοπός του είναι να βάζει τον κινητήρα σε κατάσταση λειτουργίας, επιτρέπει δηλαδή την ροή ρεύματος στον κινητήρα. Είναι συνδεδεμένος στην ψηφιακή είσοδο 0.3 της κύριας μονάδας PLC. Το PLC όταν λάβει σήμα ενεργοποίησης κινητήρα, στέλνει τάση 24V στον ακροδέκτη 27 του οδηγού, έτσι ο κινητήρας μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας.

Διακόπτης No.5 – Direction

Ρυθμίζει την φορά περιστροφής του κινητήρα όταν η μηχανή βρίσκεται σε κατάσταση χειροκίνητης λειτουργίας. Στη θέση Off κινεί το μη περιστρεφόμενο τεμάχιο προς το περιστρεφόμενο τεμάχιο ενώ στη θέση On συμβαίνει το αντίθετο. Είναι συνδεδεμένος στη ψηφιακή είσοδο 0.4 της κύριας μονάδας PLC.

Διακόπτης No.6 – Run

Ο διακόπτης αυτός έχει πολλές λειτουργίες ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρισκόμαστε. Οι καταστάσεις θα αναλυθούν στο κεφάλαιο “3.3 Δομή προγράμματος”. Στην κατάσταση χειροκίνητης λειτουργίας με την πίεση του κουμπιού ξεκινάει η περιστροφή του κινητήρα για χειροκίνητη μετακίνηση του μη περιστρεφόμενου τεμαχίου. Όταν πιεστεί 2 φορές σε μικρό χρονικό διάστημα τότε αλλάζει την κατάσταση λειτουργίας. Στη κατάσταση επιλογής παραμέτρων επιβεβαιώνει τις παραμέτρους και μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση όπου με την πίεση του κουμπιού ξεκινάει η κατεργασία. Κατά την διάρκεια της κατεργασίας το κουμπί δεν εκτελεί κάποια ενέργεια. Ο διακόπτης είναι συνδεδεμένος με την ψηφιακή είσοδο 0.5 της κύριας μονάδας PLC.

2.6 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

2.6.1 Εξαρτήματα

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης αποτελείται από τρία εξαρτήματα. Τον σύνδεσμο που ενώνει τον άξονα του μειωτήρα με τον άξονα του κινητήρα, τον μειωτήρα, τον ιμάντα, και δύο τροχαλίες.

Σύνδεσμος

Ο σύνδεσμος (Εικόνα 12), είναι ένας μεταλλικός άξονας εξαγωνικής διατομής με οπή στο εσωτερικό του. Από την πλευρά του κινητήρα ασφαλίζει με δύο βίδες άλλεν, χωρίς κεφαλή, στο σφηνόδρομο του άξονα του κινητήρα. Από την πλευρά του μειωτήρα έχει σπείρωμα και βιδώνει στον άξονα του μειωτήρα. Επιπλέον υπάρχει οπή στον άξονα του μειωτήρα από την οποία περνάει μια βίδα με κοχλία που αποτρέπει την ελεύθερη περιστροφή του συνδέσμου.

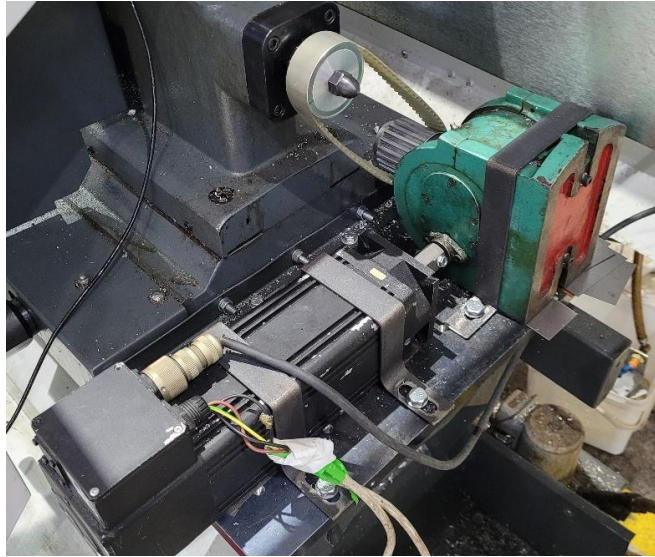


Εικόνα 12. Σύνδεσμος άξονα κινητήρα – μειωτήρα

Ο σύνδεσμος αυτός είναι η βελτιωμένη εκδοχή καθώς αρχικά δεν διέθετε τον κοχλία στη πλευρά που βρίσκεται ο άξονας του μειωτήρα με αποτέλεσμα να βιδώνει στο σπείρωμα του άξονα και να έρχεται σε επαφή με το σώμα του μειωτήρα αποτρέποντας την κίνηση του κινητήρα.

Μειωτήρας

Ο μειωτήρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαιρέτης εργαλειομηχανής στον οποίο έχει γίνει μετατροπή για να μπορεί να λειτουργήσει σαν μειωτήρας. Η κίνηση από τον μειωτήρα στον άξονα του κεντροφορέα επιτυγχάνεται με ιμαντοκίνηση (όπως φαίνεται στην Εικόνα 13) με λόγο μετάδοσης 1:1.



Εικόνα 13. Διάταξη μετάδοσης κίνησης από τον κινητήρα στον κεντροφορέα

Κεντροφορέας

Ο κεντροφορέας είναι το εξάρτημα του τόρνου το οποίο μετατρέπει την περιστροφική κίνηση του κινητήρα πρόωσης σε γραμμική στο μη περιστρεφόμενο τσοκ το οποίο είναι προσαρμοσμένο στον άξονά του. Έχει την ικανότητα να μετακινείται στους οδηγούς του τόρνου δίνοντάς την δυνατότητα ρύθμισης της απόστασης των κομματιών προς συγκόλληση πριν αυτή ξεκινήσει.

2.6.2 Ευθυγράμμιση

Ένα πρόβλημα που συναντήθηκε κατά την λειτουργία της μηχανής ήταν η ευθυγράμμιση του άξονα του κινητήρα με τον άξονα του μειωτήρα. Αυτή η απευθυγραμμία είχε σαν αποτέλεσμα ο κινητήρας να περιστρέφεται με δυσκολία και να μην μπορεί να ανταποκριθεί στις διάφορες κινήσεις που έπρεπε να εκτελέσει. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος τοποθετήθηκαν στα σημεία στήριξης του κινητήρα και του μειωτήρα μεταλλικά ελάσματα μικρού πάχους τα οποία φέρνουν στο ίδιο ύψος τους άξονές τους. Ωστόσο αυτή η λύση δεν είναι μόνιμη γιατί τα ελάσματα αυτά μπορούν να μετατοπιστούν. Αυτό μπορεί να συμβεί κατά την τοποθέτηση του ιμάντα όπου οι κοχλίες που συγκρατούν τον μειωτήρα λύνονται για να μπορεί να υπάρχει μικρή μετακίνηση του με σκοπό την ευκολότερη τοποθέτηση του ιμάντα και την εξασφάλιση της τάνυσής του.

2.7 Εργαλειομηχανή CNC

Η εργαλειομηχανή αποτελεί την βάση πάνω στην οποία εδράζονται ο κινητήρας και ο μειωτήρας. Έχει την ικανότητα να περιστρέφει το ένα τεμάχιο με συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής και μετακινεί το δεύτερο τεμάχιο ως προς το πρώτο με σκοπό την επαφή τους.

Η περιστροφή του πρώτου τεμαχίου επιτυγχάνεται από το περιστρεφόμενο τσοκ της εργαλειομηχανής. Η οριζόντια αξονική πρόωση του δευτέρου τεμαχίου γίνεται με τον κεντροφορέα της μηχανής στον οποίο έχει γίνει μετατροπή ώστε ο άξονας του να μπορεί να κινείται αυτόματα από τον κινητήρα πρόωσης της διάταξης.

Η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήσαμε είναι η Haas TL-1 η οποία έχει μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του τσοκ στις 3000 RPM.

2.8 Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός

2.8.1 Τροφοδοτικό

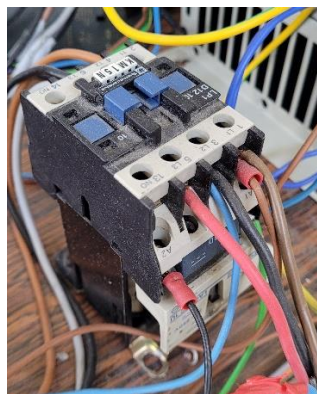
Για την τροφοδοσία του PLC καθώς και των μονάδων επέκτασης εισόδων και εξόδων έχει χρησιμοποιηθεί ένα τροφοδοτικό της Siemens από τη σειρά Sitop smart το οποίο μπορεί να παρέχει 24 V / 5 A από δύο εξόδους. Το PLC στη συνέχεια τροφοδοτεί όλο τον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.



Εικόνα 14. Τροφοδοτικό ρεύματος

2.8.2 Ηλεκτρονόμοι (Ρελέ)

Για τον έλεγχο της κύριας και της βοηθητικής παροχής ρεύματος υπάρχουν δύο ρελέ (Εικόνα 15) τα οποία ελέγχονται από την κύρια μονάδα PLC. Από το ρελέ κύριας τροφοδοσίας περνάνε οι 3 φάσεις που καταλήγουν στον οδηγό και ελέγχεται με τάση 10 V. Το ίδιο ισχύει και για το βοηθητικό ρελέ με εξαίρεση το ότι περνάει μόνο μία από τις τρεις φάσεις. Η συνδεσμολογία τους φαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 6.



Εικόνα 15. Ρελέ ελέγχου παροχής ρεύματος (κύριας αριστερά, βοηθητικής δεξιά)

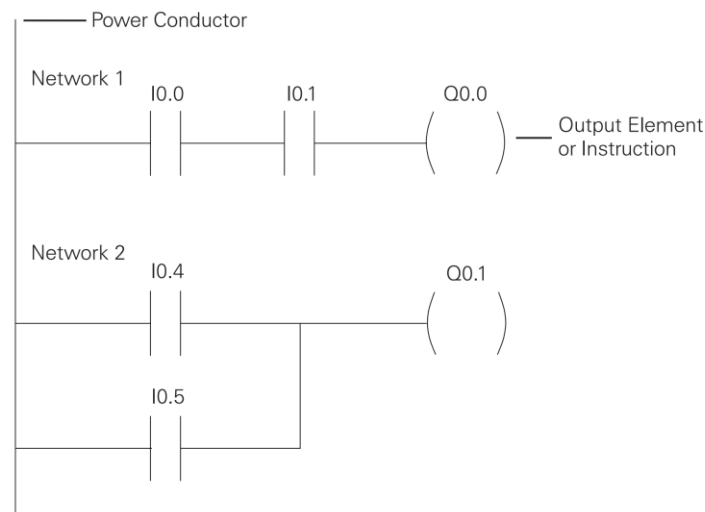
3. Προγραμματισμός λογικού ελεγκτή (PLC)

Για τον προγραμματισμό του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC) χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Ladder. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στη γλώσσα προγραμματισμού καθώς και ανάλυση του προγράμματος που δημιουργήθηκε για την επίτευξη της συγκόλλησης.

3.1 Εισαγωγή στη γλώσσα προγραμματισμού Ladder

Η γλώσσα προγραμματισμού Ladder είναι η πρώτη και μια από τις πιο δημοφιλείς γλώσσες για την δημιουργία προγραμμάτων για PLC. Αποτελεί μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού και βασίζεται στα διαγράμματα ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιούνταν για διάφορους αυτοματισμούς πριν αντικατασταθούν από τους προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές τη δεκαετία του 1970. Έχει πολλές ομοιότητες με το παλιό σύστημα των φυσικών κυκλωμάτων ώστε η μετάβαση σε αυτό να μπορούσε να γίνει εύκολα.

Η λογική του προγράμματος είναι απλή και εύκολη στην κατανόηση. Αποτελείται από δίκτυα (Σχήμα 11) τα οποία εκτελούνται ταυτόχρονα. Θεωρούμε ότι έχουμε στην αριστερή πλευρά υψηλό δυναμικό και αριστερά το χαμηλό.

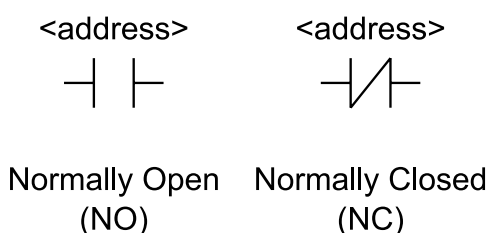


Σχήμα 11. Δίκτυα σε γλώσσα Ladder

Επομένως το υποθετικό ρεύμα ρέει με φορά προς τα δεξιά. Σε αυτή τη ροή μπορούμε να βάλουμε διάφορα εμπόδια με συνθήκες οι οποίες εάν ικανοποιούνται θα επιτρέπουν τη ροή ρεύματος ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα την αποτρέπουν. Τα δύο βασικά στοιχεία για τον προγραμματισμό παρουσιάζονται παρακάτω:

Επαφές

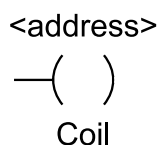
Οι επαφές (Σχήμα 12) είναι το πιο σημαντικό στοιχείο για την δημιουργία προγραμμάτων. Χρησιμοποιούνται σε κάθε δίκτυο και λειτουργούν σαν διακόπτες που υλοποιούν την εντολή “IF”. Αυτές μπορεί να είναι σε κατάσταση ηρεμίας ανοιχτές ή κλειστές και να κλείνουν ή να ανοίγουν αντίστοιχα όταν ικανοποιείται η συνθήκη που έχουμε ορίσει. Η συνθήκη μπορεί να είναι σύγκριση μεταξύ μεταβλητών ή παρακολούθηση μιας μεταβλητής. Η θέση μνήμης της μεταβλητής που έχουμε ορίσει μπορεί να αντιστοιχεί σε κάποια θέση εισόδου του PLC.



Σχήμα 12. Επαφές σε γλώσσα Ladder

Πηνία

Χρησιμοποιούνται σαν πηνίο σε ένα λογικό διάγραμμα με ρελέ. Αν υπάρχει ρεύμα που ρέει προς αυτό τότε η μεταβλητή που έχουμε ορίσει να εξαρτάται από το πηνίο παίρνει την τιμή 1. Αν δεν φτάνει ρεύμα στο πηνίο τότε η μεταβλητή παίρνει την τιμή 0. Η μεταβλητή μπορεί να αντιστοιχεί και σε κάποια θέση μνήμης που ελέγχει τις εξόδους του PLC.



Σχήμα 13. Πηνίο σε γλώσσα Ladder

Πέρα από τα παραπάνω βασικά στοιχεία υπάρχουν και άλλα όπως χρονόμετρα, λογικές πύλες, μετατροπή τύπων μεταβλητών και αριθμητικές πράξεις. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας υπορουτινών στις οποίες μπορούμε να ορίσουμε εισόδους και εξόδους δεδομένων βοηθώντας στη διατήρηση της οργάνωσης του προγράμματος και της πιο εύκολης κατανόησής του.

3.2 Άλλοι τρόποι προγραμματισμού PLC

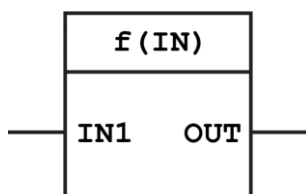
Πέρα από τη Ladder που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, υπάρχουν και άλλες γλώσσες προγραμματισμού PLC. Οι δύο βασικές κατηγορίες είναι οι γλώσσες κειμένου και οι γραφικές γλώσσες. Στις γραφικές γλώσσες προγραμματισμού ανήκει η

Ladder ενώ άλλες εναλλακτικές είναι το μπλοκ διάγραμμα λογικών γράφων (Function Block Diagram) και το διάγραμμα διαδοχικών συναρτήσεων (Sequential Function Chart). Στις γλώσσες κειμένου έχουμε την λίστα εντολών (Instructions List) και το δομημένο κείμενο (Structured Text). Οι παραπάνω γλώσσες προγραμματισμού συμπεριλαμβάνονται στο διεθνές πρότυπο για προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές IEC 61131-3 [19]. Στη συνέχεια ακολουθεί μια γρήγορη περιγραφή της κάθε γλώσσας προγραμματισμού μαζί με τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

- **Γραφικές Γλώσσες**

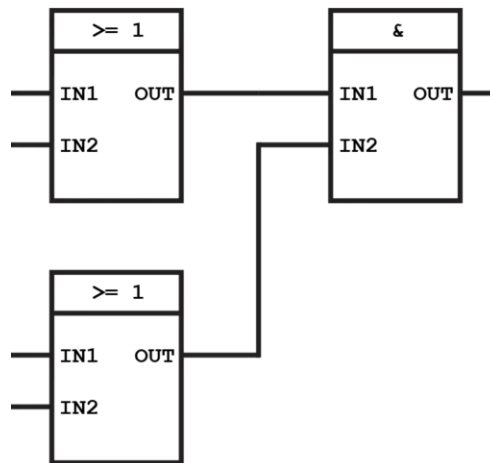
Function Block Diagram (FBD)

Η γλώσσα προγραμματισμού FBD είναι μια γραφική γλώσσα η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τον προγραμματισμό PLC. Είναι εύκολη στην εκμάθηση και διαθέτει πολλές δυνατότητες. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι ενσωματώνει λειτουργίες που διαφορετικά θα ήθελαν πολλές γραμμές κώδικα για να υλοποιηθούν σε κουτιά (blocks) (Σχήμα 14).



Σχήμα 14. Κουτί συνάρτησης στη γλώσσα FBD

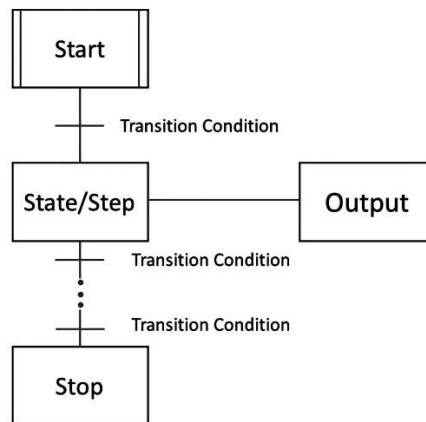
Έτσι, επιτρέπει την δημιουργία μεγαλύτερων προγραμμάτων PLC χωρίς να αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η πολυπλοκότητα. Τα κουτιά αυτά έχουν μία ή περισσότερες εισόδους από την αριστερή πλευρά και εξόδους στη δεξιά. Η λειτουργία του κάθε κουτιού είναι η συσχέτιση μεταξύ της κατάστασης των εισόδων και των εξόδων. Στο πάνω μέρος του κάθε κουτιού υπάρχει το όνομά του, το οποίο δείχνει ποια είναι η λειτουργία του. Ανάλογα με την δυσκολία της λειτουργίας που θέλουμε να πετύχουμε μπορούμε να συνδέσουμε την έξοδο κάποιου κουτιού στην είσοδο κάποιου άλλου χωρίς να υπάρχει περιορισμός στον αριθμό εισόδων και εξόδων. Έτσι τελικά δημιουργείται ένα διάγραμμα λειτουργικών μπλοκ όπως φαίνεται και από το όνομα της γλώσσας προγραμματισμού. Υπάρχουν διάφορα έτοιμα μπλοκ τα οποία εκτελούν διάφορες λειτουργίες όπως πράξεις, συγκρίσεις, ανίχνευση μεταβολών μέτρηση χρόνου και άλλα [20]. Ωστόσο ο προγραμματιστής μπορεί να φτιάξει και τα δικά του κουτιά συναρτήσεων ώστε να εκτελούν μια συγκεκριμένη λειτουργία που επιθυμεί αυτός.



Σχήμα 15. Δίκτυο κουτιών συναρτήσεων σε γλώσσα FBD

Sequential Function Chart (SFC)

Η γλώσσα προγραμματισμού SFC είναι και αυτή γραφική. Χρησιμοποιείται συνήθως σε σενάρια όπου υπάρχουν πολλές καταστάσεις λειτουργίας καθώς ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να σπάσει μια περίπλοκη διαδικασία σε μικρότερα βήματα τα οποία είναι εύκολα στην κατανόηση και τον προγραμματισμό. Η κύρια διαφορά με την προηγούμενη είναι ότι το πρόγραμμα σε αυτή τη γλώσσα γράφεται διαδοχικά. Οι λειτουργίες χωρίζονται σε βήματα τα οποία είναι διαδοχικά συνδεδεμένα. Η σύνδεση αυτή μπορεί να είναι σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα με το πότε θέλουμε να εκτελούνται. Μεταξύ των βημάτων αυτών υπάρχουν μεταβατικές συνθήκες για την μετάβαση στο επόμενο βήμα. Στη γλώσσα SFC τα βήματα συμβολίζονται με παραλληλόγραμμα κουτιά, οι μεταβατικές συνθήκες με μία κάθετη ευθεία γραμμή ενώ κάθε βήμα έχει και από μια έξοδο (σχήμα 16). Οι καταστάσεις μεταξύ τους ενώνονται με κάθετες γραμμές.



Σχήμα 16. Παράδειγμα διαγράμματος SFC

Το πρώτο μπλοκ συμβολίζει την αρχή της λειτουργίας. Αφού ένα βήμα έχει ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα προχωράει στο επόμενο βήμα μόνο όταν η συνθήκη μετάβασης ικανοποιείται. Τέλος, δύο βασικοί κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται σε κάθε πρόγραμμα SFC είναι ότι πάντα θα πρέπει να υπάρχει συνθήκη μετάβασης μεταξύ δύο βημάτων και ότι κάθε βήμα θα πρέπει να είναι ανάμεσα σε δύο συνθήκες μετάβασης[21].

- Γλώσσες κειμένου

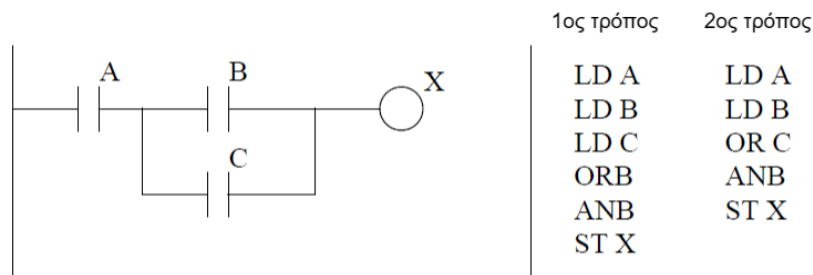
Instructions List (IL)

Η γλώσσα προγραμματισμού Instruction Lists είναι γλώσσα κειμένου χαμηλού επιπέδου και θυμίζει την γλώσσα assembly. Είναι μια σειρά οδηγιών που μπορεί να περιλαμβάνουν μαθηματικές πράξεις, κλήση ή επιστροφή από ξεχωριστές συναρτήσεις, λογικές πράξεις και μετάβαση σε κάποιο σημείο του προγράμματος. Η λογική του προγραμματισμού είναι ότι μια εντολή ακολουθείται από τους τελεστές στους οποίους εφαρμόζεται. Σε κάθε γραμμή γράφεται μια εντολή και η εκτέλεσή τους γίνεται διαδοχικά. Κάθε εταιρία χρησιμοποιεί τα δικά της ονόματα για τις εντολές ωστόσο το πρότυπο IEC 113-3 προτείνει κάποιες ονομασίες εντολών (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Ονομασίες εντολών γλώσσας Instruction List ανάλογα τον κατασκευαστή

IEC 1131-3	Mitsubishi	OMRON	Siemens	Operation	Ladder Diagram
LD	LD	LD	A	Load operand into result register.	Start a rung with open contacts.
LDN	LDI	LD NOT	AN	Load negative operand into result register.	Start a rung with closed contacts.
AND	AND	AND	A	Boolean AND.	Series element with open contacts.
ANDN	ANI	AND NOT	AN	Boolean AND with negative operand.	Series element with closed contacts.
OR	OR	OR	O	Boolean OR.	Parallel element with open contacts.
ORN	ORI	OR NOT	ON	Boolean OR with negative operand.	Parallel element with closed contacts.
ST	OUT	OUT	=	Store result register into operand.	An output.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της γλώσσας προγραμματισμού είναι ότι το πρόγραμμα εκτελείται πιο γρήγορα και καταλαμβάνει λιγότερη μνήμη στο PLC. Ωστόσο δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά καθώς οι περισσότεροι προτιμούν τις γραφικές γλώσσες προγραμματισμού.



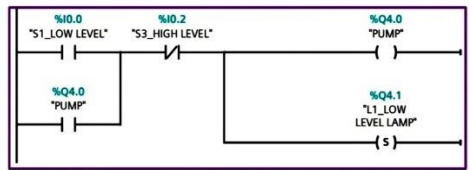
Σχήμα 17. Σύγκριση γλώσσας προγραμματισμού Ladder με Instruction List

Structured Text (ST)

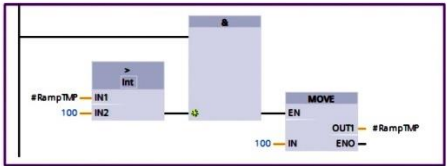
Είναι μια γλώσσα προγραμματισμού κειμένου υψηλού επιπέδου. Συντακτικά θυμίζει την Pascal στην οποία είναι βασισμένη. Σε σχέση με τη Ladder είναι πιο εύκολη για την κατανόηση μεγάλων προγραμμάτων PLC ενώ το μέγεθός των προγραμμάτων είναι σημαντικά μικρότερο. Υποστηρίζει σύνθετες εντολές όπως πολλές γνωστές γλώσσες προγραμματισμού που δεν χρησιμοποιούνται ειδικά για προγραμματισμό PLC [22]. Ωστόσο πολλοί άνθρωποι που δεν έχουν επαφή με τον προγραμματισμό θα προτιμήσουν μια γραφική γλώσσα όπου με μια πρώτη ματιά φαίνεται πιο απλή (Σχήμα 18).

```
IF #ControlValve1_Closed = false AND #ControlValve1_Open = True THEN
    #Pump_Start:= TRUE;
ELSIF #ControlValve1_Closed = True OR #ControlValve1_Open = False THEN
    #Pump_Start:= False;
END_IF;
```

Structured text (ST)



Ladder diagram (LD)



Function block diagram (FBD)

Σχήμα 18. Σύγκριση Structured Text με γραφικές γλώσσες προγραμματισμού [23]

3.3 Δομή προγράμματος

Το πρόγραμμα που έχει δημιουργηθεί (Παράρτημα Α – Κύριο πρόγραμμα Παράρτημα Β – Υπορουτίνες) για την λειτουργία της πειραματικής διάταξης βασίζεται στη λογική των πεπερασμένων καταστάσεων – μηχανής κατάστασης (State machine). Με αυτόν τον τρόπο

κάθε χρονική στιγμή η μηχανή βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση. Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί η μηχανή είναι 6 και αναλύονται παρακάτω.

1. Manual Approach
2. Parameter setting
3. Confirm process
4. Approach
5. Friction
6. Forging

Manual Approach

Σε αυτή τη κατάσταση η θέση του ακίνητου τσοκ ελέγχεται χειροκίνητα από τους διακόπτες ελέγχου με σταθερή ταχύτητα. Σκοπός είναι να έρθει το ακίνητο κομμάτι προς συγκόλληση σε κοντινή απόσταση με το περιστρεφόμενο κομμάτι. Επιπλέον χρησιμοποιείται και για την απομάκρυνση του σταθερού τσοκ όταν ολοκληρωθεί η συγκόλληση αφού πρώτα ελευθερώσουμε το συγκολλημένο κομμάτι από αυτό. Για να μεταβούμε στην επόμενη κατάσταση θα πρέπει να πιεστεί το κουπί No.6 δύο φορές.

Parameter Setting

Αμέσως μετά τη κατάσταση “Manual Approach” ακολουθεί η κατάσταση “Parameter setting”. Στη κατάσταση αυτή, η μηχανή μας δεν εκτελεί κάποια κίνηση και βρίσκεται σε αναμονή για να πληκτρολογήσει ο χρήστης τις παραμέτρους με τις οποίες θέλει να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση (friction force, friction time, forging force, forging time) μέσω του HMI. Η αλλαγή στην επόμενη κατάσταση γίνεται αυτόματα μόλις συμπληρωθούν όλες οι παράμετροι.

Confirm Process

Η κατάσταση αυτή δίνει στον χρήστη την ευκαιρία να επιβεβαιώσει ότι όλη η προετοιμασία έχει γίνει σωστά και ότι η μηχανή είναι έτοιμη για συγκόλληση. Εμφανίζει μήνυμα στην οθόνη του HMI και περιμένει από τον χρήστη να πιέσει το κουμπί No.6 για να ξεκινήσει η κατεργασία.

Approach

Στη κατάσταση προσέγγισης το τσοκ πρόωσης πλησιάζει με σταθερή αργή ταχύτητα το περιστρεφόμενο τσοκ. Η αλλαγή στην επόμενη κατάσταση συμβαίνει όταν ο αισθητήρας δύναμης δώσει σήμα ότι τα δύο κομμάτια προς συγκόλληση έχουν έρθει σε επαφή.

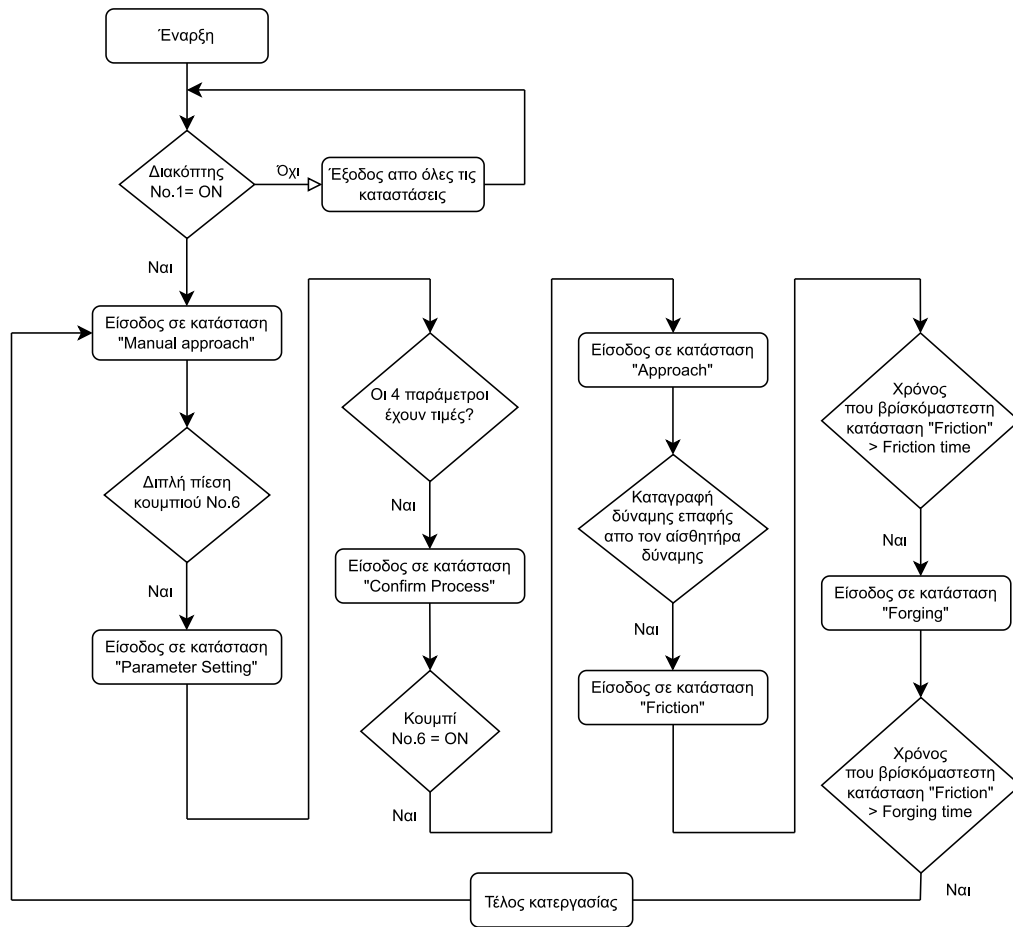
Friction

Στη κατάσταση της τριβής η κατεργασία έχει πλέον ξεκινήσει. Εφαρμόζεται ο έλεγχος δύναμης που έχει σχεδιαστεί με σκοπό να επιτευχθεί η δύναμη που έχει ορίσει ο χρήστης (Friction force). Η αλλαγή σε επόμενη κατάσταση γίνεται όταν περάσει ο προκαθορισμένος χρόνος (Friction time) που έχει ορισθεί σε προηγούμενη κατάσταση.

Forging

Η κατάσταση της σφυρηλάτησης υλοποιεί την ίδια λειτουργία με την κατάσταση συγκόλλησης με τη διαφορά ότι το περιστρεφόμενο τσοκ σταματάει να περιστρέφεται και οι παράμετροι δύναμης και χρόνου ορίζονται από το “Forging force” και “Forging time”. Μόλις περάσει ο χρόνος που έχει οριστεί για αυτό το κομμάτι της κατεργασίας η μηχανή επιστρέφει σε κατάσταση “Manual Approach” ώστε να γίνουν χειροκίνητα κινήσεις για να αφαιρεθεί το συγκολλημένο κομμάτι από τη μηχανή.

Συνοψίζοντας, ότι αναφέρθηκε παραπάνω παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 19.



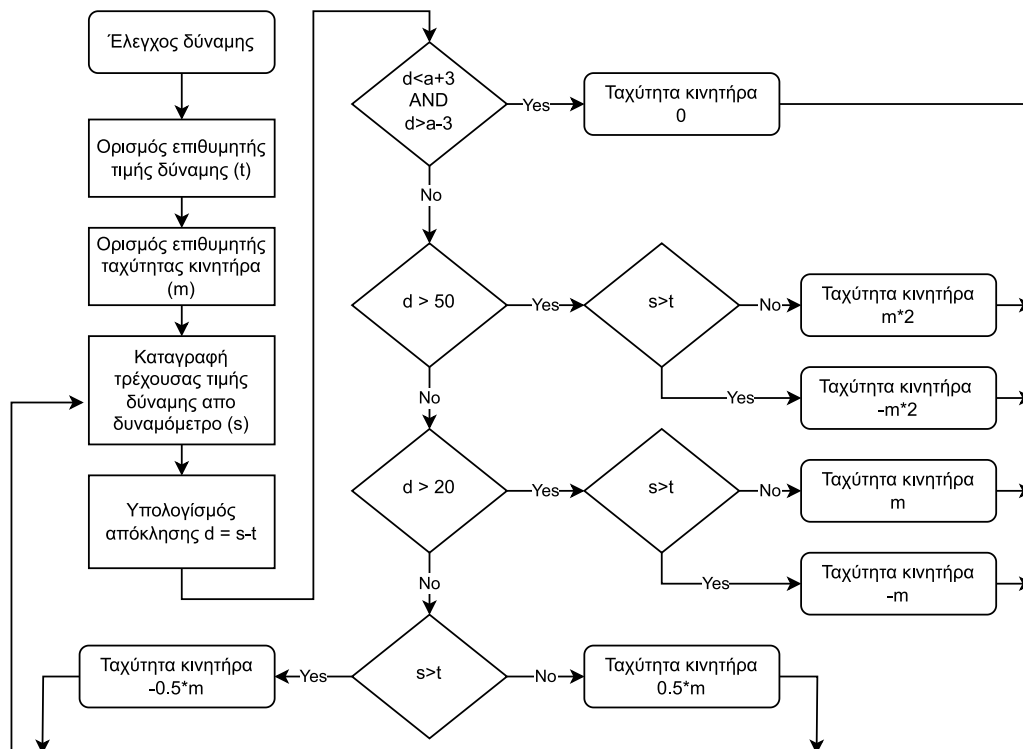
Σχήμα 19. Διάγραμμα ροής λειτουργίας προγράμματος

3.4 Έλεγχος δύναμης

Κατά της διάρκεια της συγκόλλησης υπάρχει ροή του υλικού στην επιφάνεια της συγκόλλησης των τεμαχίων με αποτέλεσμα η δύναμη που ασκούμε να μην παραμένει σταθερή και να χρειάζονται συνεχώς διορθώσεις για την διατήρησή της. Για την επίτευξη των συντελεστών δύναμης που επιλέγουμε στην κατάσταση τριβής και σφυρηλάτησης χρειάζεται να εφαρμόσουμε έναν έλεγχο δύναμης που ασκείται στα τεμάχια. Αυτός επιτυγχάνεται με έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα που είναι και η μόνη παράμετρος στην οποία μπορούμε να επεμβούμε κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Στη συνέχεια ακολουθούν οι διάφοροι έλεγχοι δύναμης που υλοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν. Η λογική στους παρακάτω ελέγχους είναι ότι ο χρήστης ορίζει μια επιθυμητή ταχύτητα ανάλογα με τις συνθήκες συγκόλλησης που έχει επιλέξει και αυτή η τιμή πολλαπλασιάζεται με κάποιους συντελεστές οι οποίοι διαμορφώνουν τελικά την καμπύλη ελέγχου.

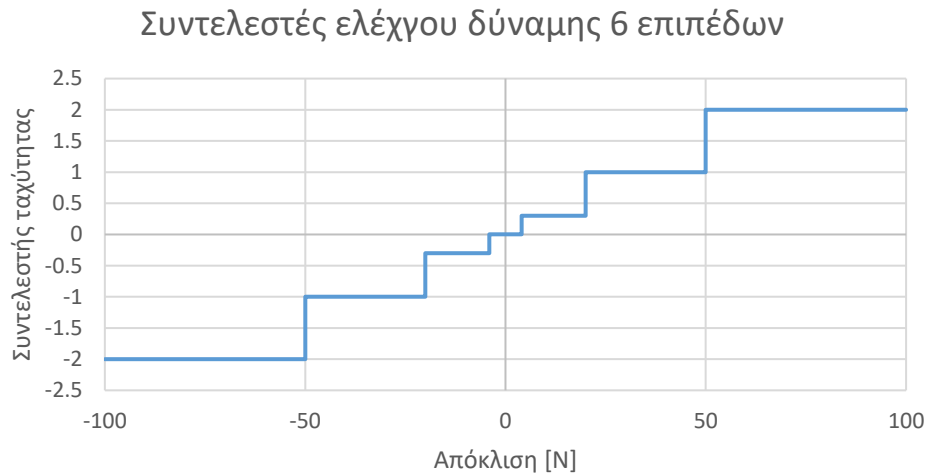
3.4.1 Έλεγχος δύναμης 6 σταδίων

Αρχικά δοκιμάστηκε εμπειρικός έλεγχος δύναμης 6 σταδίων ταχύτητας. Η επιλογή της ταχύτητας κάθε φορά γινόταν ανάλογα με την απόσταση που είχε η τιμή της επιθυμητής τιμής δύναμης από την τρέχουσα. Το διάγραμμα ροής του ελέγχου παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 20).



Σχήμα 20. Διάγραμμα ροής ελέγχου δύναμης με 6 στάδια ταχύτητας

Ο χρήστης πρέπει να ορίσει την επιθυμητή δύναμη που θέλει να επιτευχθεί (t) και ο προγραμματιστής ορίζει την επιθυμητή ταχύτητα του κινητήρα (m). Αυτή η ταχύτητα είναι η ταχύτητα αναφοράς που πολλαπλασιάζεται με κάποιους συντελεστές ανάλογα με την απόκλιση της τρέχουσας από την επιθυμητή τιμή δύναμης. Οι συντελεστές είναι 6 και διαμορφώνουν τα 6 επίπεδα ταχύτητας. Η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα επιλέγεται μέσα από δοκιμές για το κάθε υλικό και την ταχύτητα περιστροφής που επιλέγουμε. Οι συντελεστές βρέθηκαν εμπειρικά μετά από δοκιμές στη μηχανή αρχικά με δύο ακίνητα τεμάχια από ertalon και στη συνέχεια σε περιστρεφόμενα. Οι τιμές που προέκυψαν τελικά φαίνονται στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21. Συντελεστές ελέγχου δύναμης 6 επιπέδων

Επιπλέον υπάρχει μια περιοχή γύρω από τη μηδενική απόκλιση (± 4 N) στην οποία ο συντελεστής είναι 0 και έτσι ο κινητήρας δεν κάνει κίνηση διόρθωσης. Αυτό εφαρμόζεται σε όλους τους ελέγχους που υλοποιήθηκαν και υπάρχει για την αύξηση της ευστάθειας του συστήματος.

Τελικά μετά από δοκιμές αποδείχθηκε ότι αυτός ο έλεγχος δεν είναι επαρκής. Υπήρχε μεγάλη υπερακόντιση και ο κινητήρας εκτελούσε ταλαντωτικές κινήσεις χωρίς όμως το σύστημα να πετυχαίνει ποτέ την επιθυμητή τιμή δύναμης.

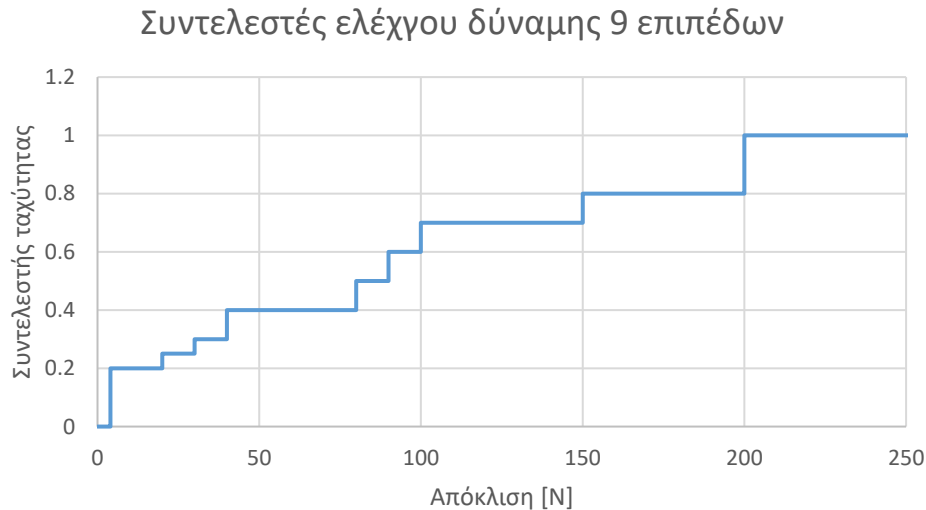
3.4.2 Έλεγχος δύναμης 2 σταδίων

Στη συνέχεια δοκιμάστηκε ένας πιο απλός έλεγχος στον οποίο δεν πολλαπλασιάζεται η τιμή επιθυμητής ταχύτητας με κάποιον συντελεστή. Ο κινητήρας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα μέχρι να μπει στην περιοχή απόκλισης ± 4 N όπου ακινητοποιείται. Όταν η τιμή της τρέχουσας δύναμης είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή ο κινητήρας περιστρέφεται με αντίθετη φορά για να διορθώσει το σφάλμα.

Μετά από δοκιμές σε ακίνητα τεμάχια αποδείχθηκε ότι ο έλεγχος αυτός είχε χειρότερη συμπεριφορά από τον προηγούμενο καθώς οι υπερακόντιση ήταν μεγαλύτερη ενώ ο χρόνος για να επιτύχουμε την επιθυμητή τιμή (rising time) ήταν ακόμα μεγαλύτερος.

3.4.3 Έλεγχος δύναμης 9 σταδίων

Παρατηρώντας την συμπεριφορά των προηγούμενων ελέγχων έγινε ακόμα μια προσπάθεια ελέγχου δύναμης αυτή τη φορά με 9 στάδια. Μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τους προηγούμενους ελέγχους είναι ότι δεν γινόταν ανάστροφη κίνηση για να διορθωθεί το σφάλμα σε περίπτωση που η τρέχουσα τιμή δύναμης ήταν πιο μεγάλη από την επιθυμητή. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφθηκαν οι ταλαντωτικές κινήσεις που εκτελούσε ο κινητήρας στη προσπάθεια να μειώσει την απόκλιση. Το αρνητικό αυτής της απόφασης είναι ότι η τιμή της δύναμης θα βρίσκεται για περισσότερο χρόνο πάνω από την επιθυμητή, ωστόσο αυτό φαίνεται να μην επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την διαδικασία της συγκόλλησης. Οι συντελεστές που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 22.

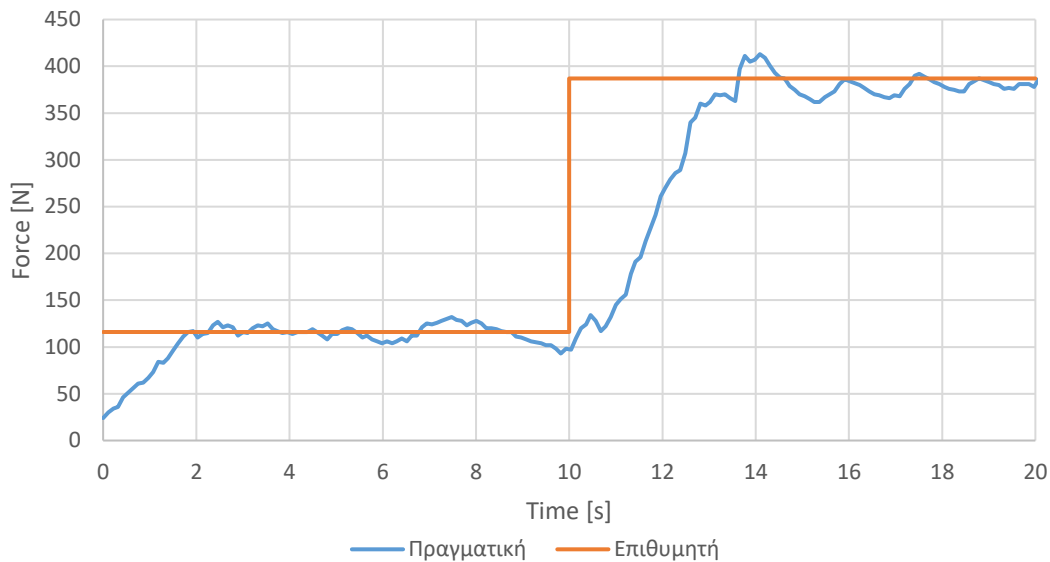


Σχήμα 22. Συντελεστές ελέγχου δύναμης 9 επιπέδων

Οι τιμές αυτές των συντελεστών προέκυψαν από τη συμπεριφορά που παρατηρήθηκε κατά την γραμμική κίνηση για την επαφή των δύο τεμαχίων χωρίς να έχουμε περιστροφή του ενός τεμαχίου. Κατά την επαφή τους η δύναμη αυξανόταν με μικρό ρυθμό ενώ στη συνέχεια αυξανόταν απότομα. Έτσι επιλέχθηκε η ταχύτητα του κινητήρα να μειώνεται σημαντικά όσο πλησιάζουμε στην επιθυμητή τιμή για να μην την ξεπεράσουμε σημαντικά λόγω αυτού του φαινομένου.

Ο έλεγχος αυτός παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα από τους προηγούμενους. Είχε την ικανότητα να επιτυγχάνει την επιθυμητή τιμή δύναμης και να κάνει διορθώσεις για να την διατηρεί κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Όταν η τρέχουσα τιμή δύναμης

ξεπερνούσε την ιδανική τότε ο κινητήρας ακινητοποιούταν και η δύναμη έπεφτε σταδιακά λόγω της ροής του υλικού των τεμαχίων στην επιφάνεια επαφής τους. Ο χρόνος ανύψωσης ήταν ικανοποιητικός στη συγκόλληση αλλά και στη σφυρηλάτηση που το φαινόμενο της απότομης αύξησης της δύναμης με μικρή κίνηση του κινητήρα ήταν ακόμα πιο έντονο. Στο Σχήμα 23 φαίνεται η μεταβολή της δύναμης με έλεγχο 9 σταδίων για κυλινδρικά τεμάχια από PVC διαμέτρου 15.7 mm με συνθήκες κόλλησης 0.6 MPa τριβή για 10 δευτερόλεπτα και συντελεστή ταχύτητας 1.1, 2 MPa σφυρηλάτηση για 10 δευτερόλεπτα με συντελεστή ταχύτητας 0.7.



Σχήμα 23. Δοκιμή ελέγχου 9 σταδίων σε τεμάχια PVC

4. Πειράματα – Μέθοδοι

4.1 Συγκόλληση τεμαχίων PVC

Έχοντας καταλήξει στο ότι θα χρησιμοποιήσουμε τον έλεγχο δύναμης με 9 επίπεδα, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει πείραμα επαναληψιμότητας της συγκόλλησης. Τα τεμάχια που επιλέχθηκαν ήταν 12 κυλινδρικά κομμάτια PVC διαμέτρου 15.7 mm με μήκος περίπου 50 mm το καθένα. Οι συνθήκες συγκόλλησης που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5).

Πίνακας 5. Συνθήκες συγκόλλησης πειράματος σε τεμάχια PVC

Πίεση Τριβής	0.6 MPa
Πίεση Σφυρηλάτησης	2 MPa
Χρόνος Τριβής	10 sec
Χρόνος Σφυρηλάτησης	10 sec
Ταχύτητα περιστροφής	500 RPM

Οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν βασίστηκαν στη διαθέσιμη βιβλιογραφία ως αρκετά καλές συνθήκες για κόλληση PVC με PVC [24].

Η επαναληψιμότητα της ποιότητας της κόλλησης ελέγχθηκε με δύο τρόπους. Με καταγραφή της δύναμης στο σημείο της κόλλησης για να ελέγξουμε ότι με αμετάβλητες συνθήκες συγκόλλησης που ορίζει ο χρήστης ο έλεγχος δύναμης συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο και με έλεγχο αντοχής σε εφελκυσμό των συγκολλημένων τεμαχίων.

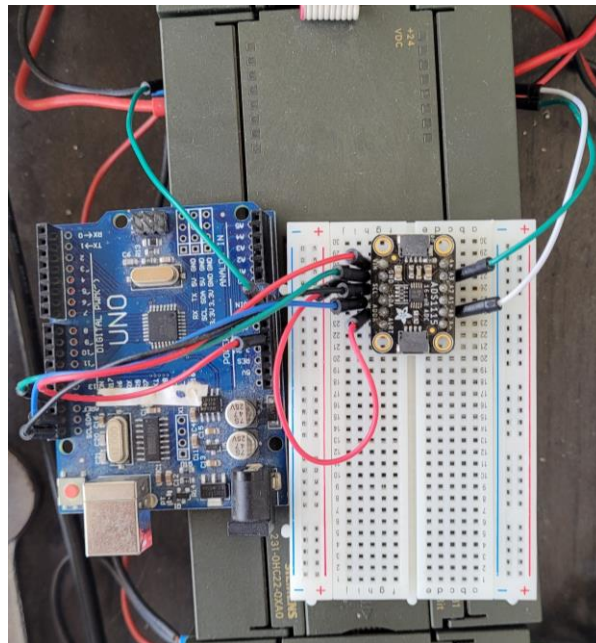


Εικόνα 16. Συγκολλημένα τεμάχια PVC

4.1.1 Απόκριση δύναμης

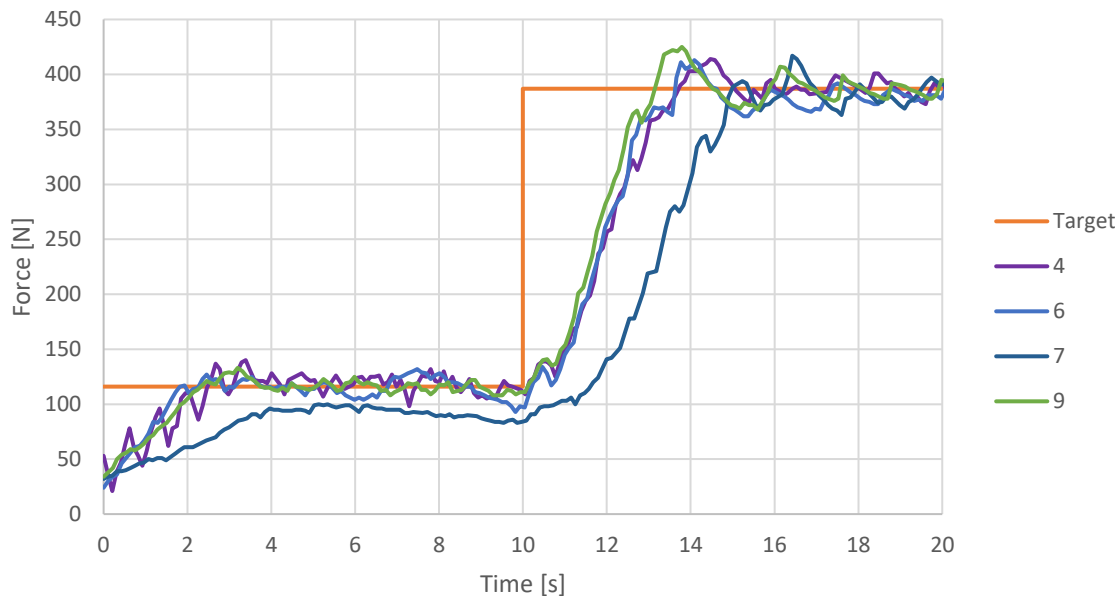
Η καταγραφή της δύναμης έγινε με τον μικροελεγκτή Arduino στον οποίο συνδέθηκε ο μετατροπέας σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό ADS1115 (Εικόνα 17) που έχει ανάλυση 16 bit. Ο εξωτερικός μετατροπέας επιλέχθηκε έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη ανάλυση στη καταγραφή του σήματος από αυτή που παρέχει ο εσωτερικός μετατροπέας του Arduino που έχει ανάλυση 10 bit.

Ο αισθητήρας δίνει αναλογική τάση $\pm 5V$ στην έξοδό του ωστόσο λόγω των μικρών σχετικά δυνάμεων που εξετάζουμε, η τάση δεν ξεπερνάει τα 200 mV. Έτσι στον μετατροπέα ADC χρησιμοποιήθηκε κέρδος 16 που διαμορφώνει τα όρια μέτρησης τάσης στα $\pm 0.256V$ και την ανάλυση 0.0078 mV/bit [25].



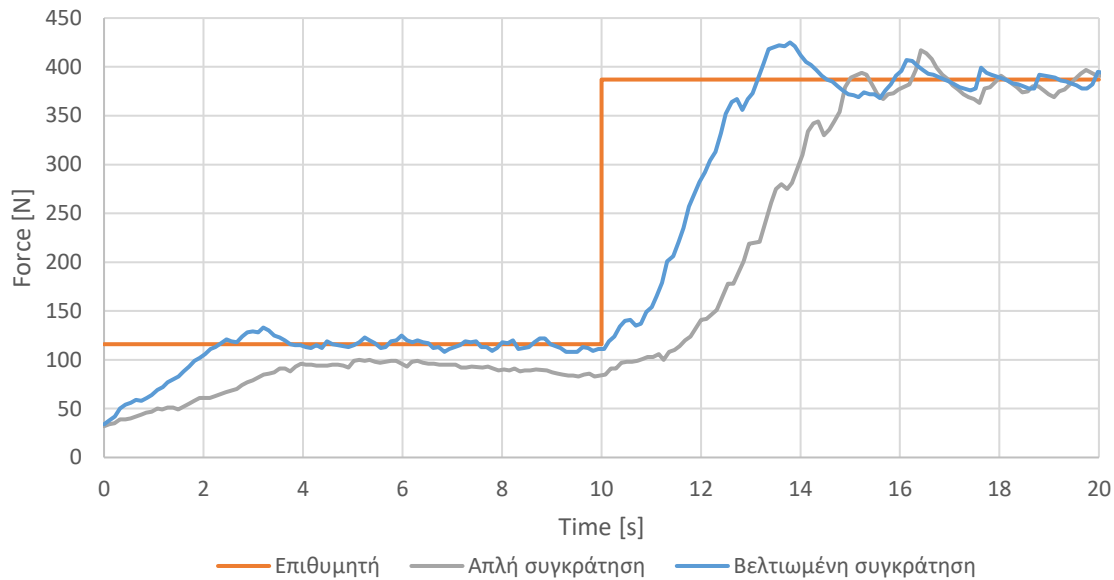
Εικόνα 17. Διάταξη καταγραφής δύναμης με Arduino

Από τα 6 τεμάχια προς συγκόλληση έγινε καταγραφή δύναμης στα 4 από αυτά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 24.



Σχήμα 24. Απόκριση δύναμης σε συγκόλληση PVC

Παρατηρούμε ότι η δύναμη που ασκείται στο κάθε τεμάχιο είναι ικανοποιητική ακολουθώντας την ιδανική γραμμή σε σχεδόν κάθε δοκιμή. Εξαίρεση σε αυτή την εικόνα αποτελεί το τεμάχιο 7 το οποίο φαίνεται να μην φτάνει ποτέ στην επιθυμητή τιμή δύναμης τριβής ενώ ο χρόνος ανύψωσης της δύναμης σφυρηλάτησης είναι πολύ μεγάλος. Έπειτα από παρατηρήσεις στη διάταξη κατά την στιγμή της συγκόλλησης βρέθηκε ότι αυτή η μη επιθυμητή συμπεριφορά του τεμαχίου 7 συμβαίνει λόγω ανεπαρκούς συγκράτησης του τεμαχίου στο μη περιστρεφόμενο τσοκ. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το τεμάχιο να ολισθαίνει έτσι ώστε η ταχύτητα του τσοκ πρόωσης να μην είναι αρκετή για να καλύψει αυτή τη μετατόπιση μαζί με την ροή του υλικού στην επιφάνεια επαφής. Το πρόβλημα αυτό δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα τεμάχια. Πιθανά αίτια της ανεπαρκούς συγκράτησης μπορεί να είναι η επαφή της εξωτερικής επιφάνειας του τεμαχίου με λιπαντικό το οποίο υπήρχε στον χώρο από προηγούμενη χρήση της εργαλειομηχανής, ανεπαρκής εφαρμογή δύναμης για την σύσφιξη των σφιγκτήρων του τσοκ και φθορά των δοντιών του τσοκ. Το φαινόμενο αυτό ωστόσο δεν ήταν μεμονωμένο και είχε παρουσιαστεί και σε άλλα τεμάχια. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν η τοποθέτηση εμποδίου στην ελεύθερη μετωπική επιφάνεια του τεμαχίου στο τσοκ. Έτσι το σώμα του τσοκ παραλάμβανε ένα μεγάλο μέρος του φορτίου με αποτέλεσμα τελικά να αποτρέπεται η ολίσθηση του τεμαχίου. Αυτό δεν παρατηρήθηκε στο περιστρεφόμενο τσοκ της εργαλειομηχανής καθώς η ολίσθηση ήταν αμελητέα. Στο Σχήμα 25 φαίνεται η διαφορά μεταξύ του κομματιού 7 στο οποίο εμφανίστηκε ολίσθηση και του κομματιού 9 στο οποίο εφαρμόστηκε η λύση που αναφέρθηκε παραπάνω.



Σχήμα 25. Επίδραση συγκράτησης στη δύναμη συγκόλλησης PVC

Τελικά, οι μέσοι όροι των συντελεστών συμπεριφοράς της δύναμης εφαρμόζοντας τον έλεγχο 9 επιπέδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά απόκρισης δύναμης

	Τριβή	Σφυρηλάτηση
Υπερακόντιση	14%	16%
Χρόνος κορυφής	2.27 sec	4.12 sec
Χρόνος ανύψωσης	2.00 sec	2.86 sec

Παρατηρούμε ότι οι χρόνοι ανύψωσης και κορυφής είναι σχετικά μικροί ενώ η υπερακόντιση δεν είναι αμελητέα. Στη περίπτωση μας όμως δεν επηρεάζει σημαντικά την διαδικασία της συγκόλλησης οπότε τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στη δοκιμή που έγινε με τις συγκεκριμένες παραμέτρους συγκόλλησης και σε διαφορετική περίπτωση θα προέκυπταν άλλα αποτελέσματα.

4.1.2 Δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό

Στη συνέχεια ακολούθησαν δοκιμές αντοχής των συγκολλημένων τεμαχίων PVC σε εφελκυσμό. Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η μηχανή δοκιμών Instron 4482 (Εικόνα 19). Η δοκιμή έγινε στα 4 τεμάχια για τα οποία είχε καταγραφεί η δύναμη συγκόλλησης.

Για τη συγκράτηση των τεμαχίων στη μηχανή χρησιμοποιήθηκαν δύο τσοκ.



Εικόνα 18. Μηχανή δοκιμής αντοχής σε εφελκυσμό

Κατά την διάρκεια της δοκιμής το πάνω τσοκ μετατοπιζόταν προς τα πάνω με ταχύτητα 5 mm/min ασκώντας σταδιακά μεγαλύτερη εφελκυστική τάση στο συγκολλημένο τεμάχιο. Το πείραμα διακοπτόταν όταν το τεμάχιο αστοχούσε (Εικόνα 19). Τα δεδομένα δύναμης από τον αισθητήρα μεταφέρονταν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος τα κατέγραφε.



Εικόνα 19. Αστοχία δοκιμίου PVC σε δοκιμή εφελκυσμού

Τα αποτελέσματα τα οποία συλλέχθηκαν από τις δοκιμές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7) ενώ παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ – Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής PVC σε εφελκυσμό.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα δοκιμής σε εφελκυσμό PVC με ίδιες συνθήκες συγκόλλησης

Τεμάχιο	Τάση αστοχίας
4	17.27 MPa
6	17.06 MPa
7	20.37 MPa
9	19.05 MPa

Παρατηρήθηκε ότι οι τιμές αντοχής που προέκυψαν βρίσκονται σε μια κοντινή περιοχή γύρω από τα 18.43 MPa. Επομένως φαίνεται ότι για σταθερές συνθήκες συγκόλλησης η αντοχή του υλικού θα είναι συγκεκριμένη. Έτσι προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο έλεγχος της δύναμης έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Επιπλέον, η διαφορά στην δύναμη συγκόλλησης λόγω της μη επαρκούς συγκράτησης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης φαίνεται να μην έχει κάποια σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του συγκολλημένου τεμαχίου.

Ο αριθμός των δοκιμών δεν είναι αρκετός για να προκύψουν στατιστικά αποτελέσματα για την συμπεριφορά των τεμαχίων, ωστόσο, είναι επαρκής για να γίνει μια πρώτη εκτίμηση. Γνωρίζοντας ότι η τάση αστοχίας από εφελκυσμό για το υλικό PVC είναι περίπου 50 MPa, με την συγκόλληση τριβής, τα τεμάχια είχαν μέση αντοχή 36% περίπου. Δεδομένου ότι οι παράμετροι συγκόλλησης δεν ήταν βέλτιστες τα αποτελέσματα αυτά είναι ικανοποιητικά.

Ένα πρόβλημα που συναντήθηκε στην δοκιμή εφελκυσμού είναι ότι τα τσοκ της μηχανής δοκιμών και ιδιαίτερα το πάνω σε κάποιες περιπτώσεις δεν συγκρατούσαν σωστά το τεμάχιο με αποτέλεσμα να υπάρχει ολίσθηση και επηρεασμός της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Εμφανίστηκε δηλαδή παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του ακίνητου τσοκ κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Έτσι φαίνεται ότι η συγκράτηση του τεμαχίου θέλει ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφεύγονται τέτοιου είδους σφάλματα.

4.2 Συγκόλληση τεμαχίων αλουμινίου

Γνωρίζοντας πλέον ότι ο έλεγχος της δύναμης λειτουργεί αρκετά αποτελεσματικά, έγινε προσπάθεια για συγκόλληση αλουμινίου. Τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκόλληση ήταν ένα τεμάχιο κυλινδρικής διατομής κατασκευασμένο από αλουμίνιο σειράς 1000 και ένα δεύτερο τεμάχιο μορφής σωλήνα. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8).

Πίνακας 8. Χαρακτηριστά τεμαχίων ανουμινίου

Τεμάχιο	Εσωτερική Διάμετρος	Εξωτερική Διάμετρος	Σκληρότητα κατά Vickers
10	-	10.4 mm	106
11	12.6 mm	20 mm	86

Οι παράμετροι της συγκόλλησης που επιλέχθηκαν είναι βασισμένοι στη βιβλιογραφία [26] και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9).

Πίνακας 9. Παράμετροι συγκόλλησης αλουμινίου

Πίεση τριβής	2.1 MPa
Πίεση σφυρηλάτησης	0
Χρόνος τριβής	32 sec
Χρόνος σφυρηλάτησης	0
Ταχύτητα περιστροφής	2000 RPM



Εικόνα 20. Συγκολλημένα τεμάχια από αλουμίνιο

Κατά την κόλληση παρατηρήθηκε ότι υπήρχε μια μικρή ταλάντωση στο τσοκ πρόωσης πιθανώς λόγω της έλλειψης στιβαρότητας της κατασκευής. Στην συγκόλληση PVC αυτό το φαινόμενο δεν παρατηρήθηκε καθώς το φορτίο που δεχόταν ήταν αρκετά μικρότερο.

4.2.1 Έλεγχος ποιότητας συγκόλλησης

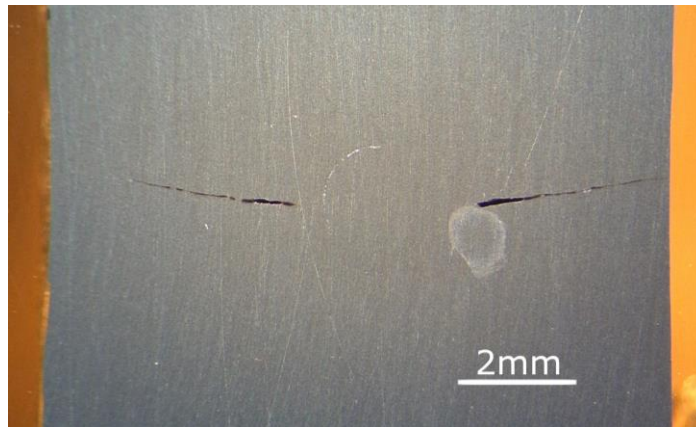
Για τον έλεγχο της συγκόλλησης επιλέχθηκε αυτή τη φορά να γίνει διαμήκης τομή στο τεμάχιο και να εξεταστεί η περιοχή συγκόλλησης στο μικροσκόπιο.

Αρχικά το τεμάχιο κόπηκε σε φρέζα στο μέσο της διατομής του ώστε να αποκαλυφθεί το εσωτερικό της συγκολλημένης επιφάνειας.

Στη συνέχεια ακολούθησε εγκιβωτισμός του τεμαχίου σε εποξική ρητίνη δύο μερών. Αυτό έγινε για να μπορεί να πραγματοποιηθεί ευκολότερα η λείανση της επίπεδης επιφάνειας του τεμαχίου αλλά και να μπορεί να μελετηθεί πιο εύκολα. Μετά από 24 ώρες που η εποξική ρητίνη είχε στερεοποιηθεί, έγινε λείανση στην επιφάνεια παρατήρησης χρησιμοποιώντας φύλλα λείανσης με P120 μέχρι P4000 σε μηχανή λείανσης Struers DAP-V. Έτσι, ολοκληρώθηκε η προετοιμασία του τεμαχίου για παρατήρηση.

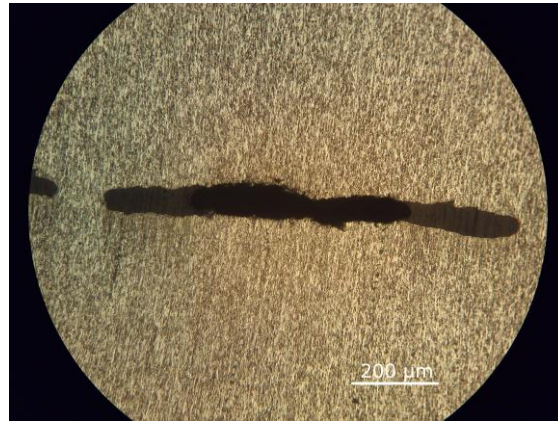
Για την λήψη των εικόνων προς ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ένα στερεοσκοπικό μικροσκόπιο (Leica MZ6) για μικρές τιμές μεγέθυνσης και ένα μεταλλογραφικό (Leica DMR) για μεγέθυνση μέχρι X100. Από το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο παρατηρήθηκε μια γενικότερη εικόνα του σημείου συγκόλλησης.

Συμπαγές αλουμίνιο – Τεμάχιο 10



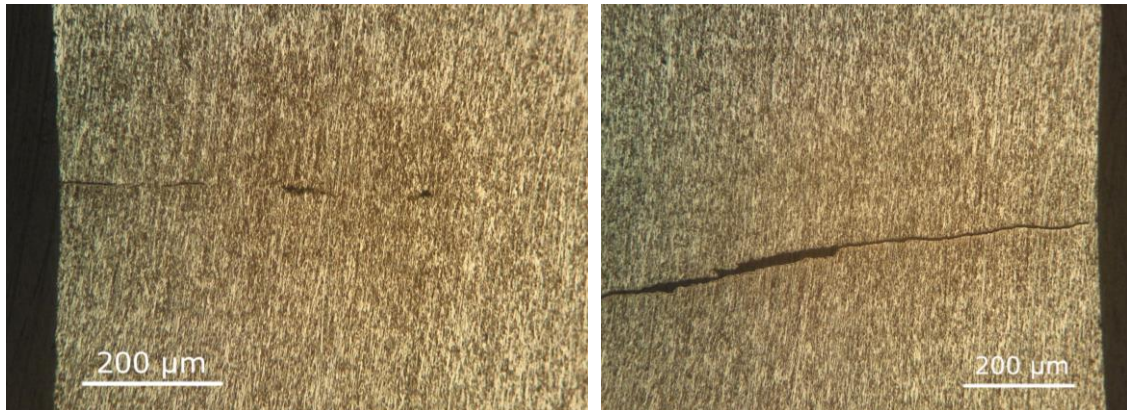
Εικόνα 21. Σημείο συγκόλλησης τεμαχίων (φωτογραφία από στερεοσκόπιο)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 21 τα δύο τεμάχια έχουν συγκολληθεί σχετικά καλά καθώς στη μέση του τεμαχίου δεν διακρίνεται καμιά διατάραξη του υλικού από την διαδικασία της συγκόλλησης. Ωστόσο, προς τα άκρα εμφανίζονται ρωγμές οι οποίες προφανώς έχουν άμεση επίδραση στην τελική αντοχή του τεμαχίου. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται να έχουν δημιουργηθεί ρωγμές οι οποίες εκτείνονται μέχρι το την άκρη του υλικού (Εικόνα 23) χωρίς όμως να καταλαμβάνουν όλο το εσωτερικό καθώς όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 η γεωμετρία τους μεταβάλλεται σε διαφορετικές ακτίνες.



Εικόνα 22. Κοιλότητες στην επιφάνεια συγκόλλησης

Αυτές οι ατέλειες ενδέχεται να οφείλονται στην έλλειψη σιβαρότητας της κατασκευής καθώς κατά την διάρκεια της συγκόλλησης το τσοκ πρόωσης εμφάνισε μια μικρή ταλάντωση. Η ταλάντωση αυτή επηρέασε και τα δεδομένα που έστειλε το αισθητήρας δύναμης στο PLC προσθέτοντας έναν ακόμα παράγοντα αβεβαιότητας στη συγκόλληση. Ένας ακόμα πιθανός λόγος είναι η επιλογή των συνθηκών κόλλησης οι οποίες δεν ήταν ιδανικές καθώς αυτή ήταν η πρώτη δοκιμή που έγινε σε μέταλλο. Επιπλέον, οι μετωπικές επιφάνειες των τεμαχίων συγκόλλησης δεν ήταν απολύτως επίπεδες και οι τραχύτητά τους δεν ήταν ορισμένη.



Εικόνα 23. Ρωγμή από συγκόλληση στα δύο άκρα του τεμαχίου



Εικόνα 24. Πανοραμική φωτογραφία επιφάνειας συγκόλλησης των τεμαχίων αλουμινίου

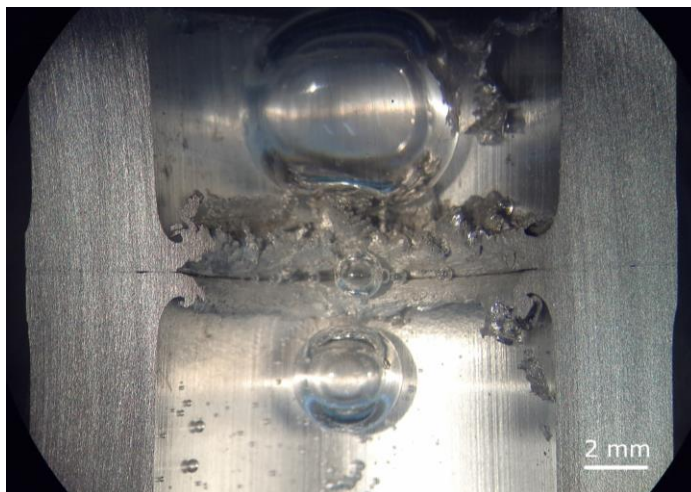
Έγινε επίσης μέτρηση της σκληρότητας του τεμαχίου στην φρεζαρισμένη επιφάνεια σε 5 σημεία απόστασης 6mm μεταξύ τους ξεκινώντας από το κέντρο της συγκόλλησης. Τα δεδομένα φαίνονται στο Σχήμα 26.



Σχήμα 26. Μεταβολή της σκληρότητας στην επιφάνεια του τεμαχίου από αλουμίνιο

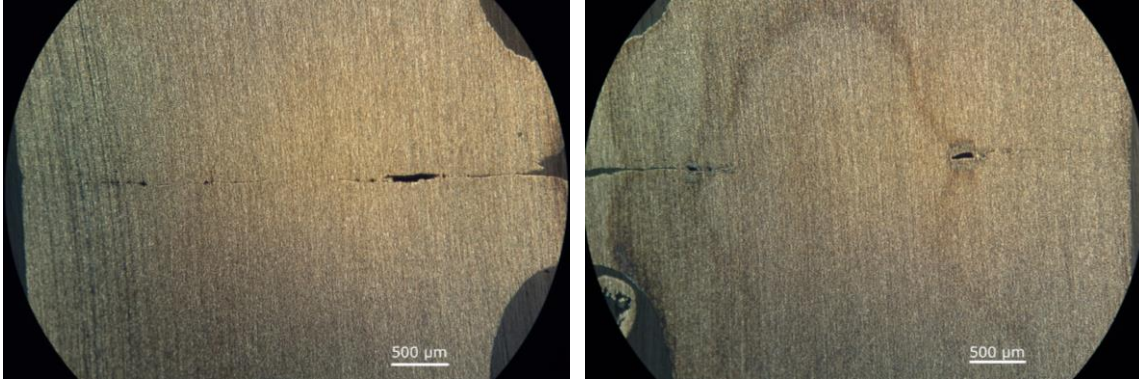
Παρατηρούμε ότι η σκληρότητα μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την συγκολλημένη επιφάνεια μέχρι την απόσταση των 12mm. Από το σημείο αυτό αρχίζει να αυξάνεται πάλι και καταλήγει σε μεγαλύτερη τιμή από αυτή στο σημείο συγκόλλησης. Οι μεταβολές στη σκληρότητα ενδέχεται να οφείλονται στην αύξηση της θερμοκρασίας στο σημείο της συγκόλλησης ενώ για την άκρη του υλικού η περιοχή αυτή επηρεάστηκε από την υψηλή θερμοκρασία λόγω της κοπής του τεμαχίου.

Συμπαγές αλουμίνιο – Τεμάχιο 11



Εικόνα 25. Σημείο συγκόλλησης τεμαχίου 11 (φωτογραφία από στερεοσκόπιο)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25 , υπάρχουν λιγότερες ρωγμές στην επιφάνεια συγκόλλησης οι οποίες έχουν αρκετά λιγότερες κοιλότητες σε σχέση με το τεμάχιο 10. Έτσι με μια πρώτη ματιά η συγκόλληση φαίνεται να είναι καλύτερη σε αυτό το τεμάχιο.



Εικόνα 26. Ρωγμή από συγκόλληση στα τέσσερα άκρα του τεμαχίου 11

Βλέποντας όμως σε μεγαλύτερη μεγέθυνση το σημείο της συγκόλλησης φαίνεται ότι η κόλληση δεν είναι ιδανική. Συγκεκριμένα εμφανίζονται ρωγμές οι οποίες είναι πιο έντονες προς την εσωτερική επιφάνεια του τεμαχίου. Οι κοιλότητες αν και μικρότερες εμφανίζονται και στις δύο επιφάνειες. Ένας πιθανός λόγος για την καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης είναι ότι σε αυτή τη περίπτωση υπήρχε μεγαλύτερη σχετική γραμμική ταχύτητα επαφής των δύο τεμαχίων λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου. Επιπλέον, δεν υπήρχε υλικό στο κέντρο το οποίο έχει ακόμα μικρότερη σχετική γραμμική ταχύτητα και δυσκολεύει τη διαδικασία της συγκόλλησης.

Σε αυτή τη περίπτωση λόγω της εσωτερικής οπής του τεμαχίου, η ροή του υλικού έχει γίνει και προς την εσωτερική επιφάνεια. Έτσι, οι ρωγμές εμφανίζονται σε μια ευθεία γραμμή σε σχέση με το τεμάχιο 10 στο οποίο φαίνεται η επιφάνεια συγκόλλησης να μην είναι επίπεδη και το ένα τεμάχιο να μπαίνει μέσα στο άλλο.

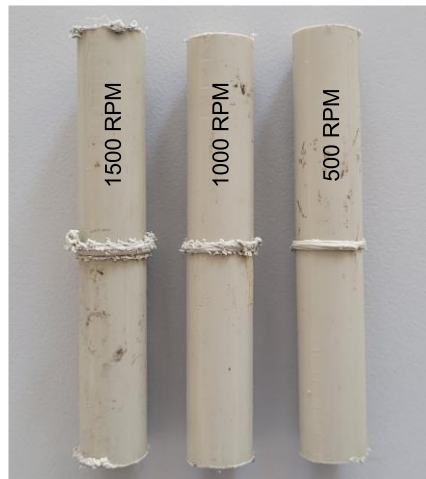
4.3 Συγκόλληση PVC σε διάφορες ταχύτητες

Για τον έλεγχο της επίδρασης στην ποιότητα της συγκόλλησης έγινε συγκόλληση δύο τεμαχίων PVC με ίδιους συντελεστές δυνάμεων αλλά με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.

Πίνακας 10. Συντελεστές συγκόλλησης πειράματος διαφορετικών ταχυτήτων

Τεμάχιο	1	3
Πίεση τριβής	0.6 MPa	
Πίεση σφυρηλάτησης	2 MPa	
Χρόνος τριβής	10 sec	
Χρόνος σφυρηλάτησης	10 sec	
Ταχύτητα περιστροφής	1000 RPM	1500 RPM

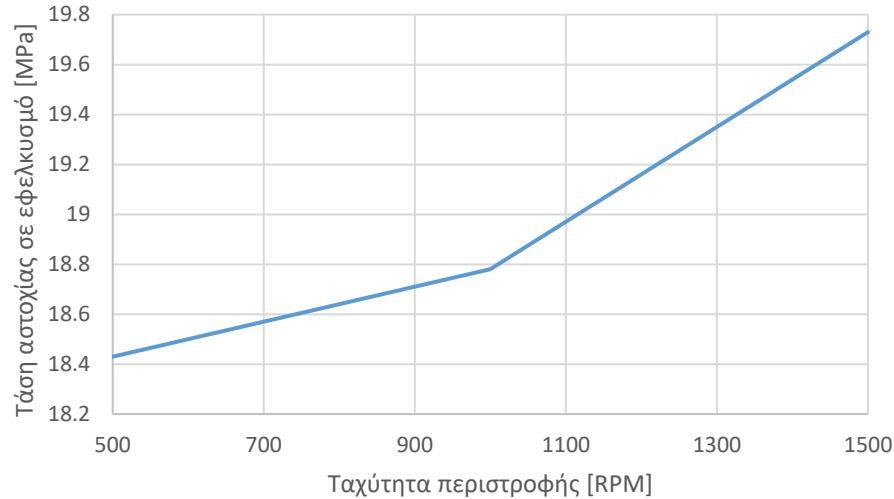
Από την Εικόνα 27 παρατηρούμε ότι το προέκταμα (flash) που δημιουργείται στο σημείο της κόλλησης είναι περίπου ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς για μεγαλύτερες ταχύτητες έχουμε περισσότερο όγκο υλικού που θερμανθεί ερχόμενο σε επαφή με το άλλο τεμάχιο και τελικά θα φτάσει στη περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης. Για τον λόγο αυτό κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης το τεμάχιο στο τσοκ πρόωσης θα πρέπει να κινηθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής ώστε να μπορεί διατηρηθεί η πίεση που έχουμε ορίσει στη κατάσταση της τριβής.



Εικόνα 27. Σύγκριση συγκόλλησης με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής

Αυτό ακριβώς παρατηρήθηκε στη δοκιμή καθώς ο έλεγχος της δύναμης που εφάρμοζε το PLC δεν ήταν ικανός να διατηρήσει σταθερή την δύναμη λόγω της μικρής επιθυμητής ταχύτητας που είχε επιλεγεί από το πείραμα της επαναληψιμότητας στο οποίο η ταχύτητα περιστροφής ήταν 500 RPM. Έτσι προκύπτει ότι είναι σημαντικό να επιλέγεται σωστή επιθυμητή ταχύτητα για διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης ώστε να μπορεί ο έλεγχος να ανταποκριθεί στις διαφορετικές απαιτήσεις.

Στη συνέχεια ακολούθησε δοκιμή σε εφελκυσμό στα τεμάχια για να προσδιοριστεί η αντοχή τους. Η διάταξη δοκιμής ήταν η ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα επαναληψιμότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 27.



Σχήμα 27. Αποτελέσματα δοκιμής σε εφελκυσμό PVC με διαφορετική ταχύτητα περιστροφής

Υπάρχει μια μικρή αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Η διαφορά όμως είναι πολύ μικρή για να μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποιο σίγουρο συμπέρασμα. Με προσαρμογή του ελέγχου δύναμης στις νέες συνθήκες συγκόλλησης τα αποτελέσματα ενδέχεται να ήταν πιο ξεκάθαρα.

5. Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία έγιναν πολλές δοκιμές με διαφορετικούς τρόπους ελέγχου της δύναμης που ασκείται στα δύο τεμάχια ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή που ορίζει ο χειριστής. Προέκυψε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα είχε ο έλεγχος 9 σταδίων ταχύτητας χωρίς να γίνεται διόρθωση σε περίπτωση που η πραγματική τιμή ξεπεράσει την ιδανική. Οι συντελεστές του νόμου ελέγχου προέκυψε ότι θα πρέπει να διορθώνονται για κάθε υλικό, διάμετρο και ταχύτητα περιστροφής καθώς δεν επιτυγχάνονται τα βέλτιστα αποτελέσματα αν αλλάξει κάποια από αυτές τις παραμέτρους. Ωστόσο, μπόρεσε να γίνει συγκόλληση σε αλουμίνιο με έλεγχο δύναμης που είχε σχεδιαστεί για PVC.

Σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη των επιθυμητών δυνάμεων είναι η συγκράτηση των τεμαχίων στα δύο τσοκ καθώς στις δοκιμές υπήρχε μια τάση ολίσθησης των τεμαχίων. Αυτό προκαλούσε πτώση της πίεσης που δέχονταν τα τεμάχια καθώς το σύστημα πρόωσης δεν προλάβει να καλύψει αυτή τη μετατόπιση.

Η επιλογή του κινητήρα του οδηγού και του PLC αποδείχθηκε ότι ήταν σωστή για την λειτουργία της διάταξης χωρίς να δημιουργείται κάποιο πρόβλημα.

6. Μελλοντική εργασία

Ως συνέχεια αυτής της εργασίας, θα μπορούσαν να γίνουν περισσότερες δοκιμές σε μεταλλικά τεμάχια ώστε να βελτιωθεί ο νόμος ελέγχου και για άλλα υλικά πέρα από το PVC. Μπορεί επίσης να δοκιμαστεί και έλεγχος PID που ενδέχεται να δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

Επιπλέον, μπορούν να γίνουν βελτιώσεις στον τρόπο μετάδοσης της κίνησης από τον κινητήρα στον κεντροφορέα καθώς κατά την διάρκεια των δοκιμών προέκυψαν διάφορα προβλήματα ευθυγράμμισης των εξαρτημάτων. Οι βελτιώσεις αυτές θα μπορούσαν να συμπεριλαμβάνουν και κάποιο σύστημα εύκολης αφαίρεσης των εξαρτημάτων του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να επαναφέρεται ο τόνος στη κανονική του λειτουργία όταν αυτό απαιτείται.

Σχετικά με τον αισθητήρα δύναμης, πρέπει να εξεταστούν οι τιμές που επιστρέφει καθώς υπάρχει πιθανότητα από τις ταλαντώσεις που προκαλούνται, ειδικά στη συγκόλληση μετάλλων, να μην δίνει σωστές μετρήσεις δύναμης.

Μπορεί να γίνει σχεδιασμός ώστε όλη η ηλεκτρική διάταξη με τα εξαρτήματά της να τοποθετηθεί σε κάποιο ηλεκτρολογικό πίνακα. Σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να δοθεί προσοχή στη σωστή ψύξη του οδηγού του κινητήρα.

Επιπλέον, θα μπορούσε να σχεδιαστεί σύστημα για την αυτόματη τοποθέτηση, σύσφιξη και αφαίρεση τεμαχίων στη μηχανή με σκοπό την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Η συγκεκριμένη ιδέα θα μπορούσε να έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη για συγκόλληση μεγάλου αριθμού τεμαχίων σε μικρό χρόνο.

Τελικά αφού έχουν διορθωθούν οι παραπάνω ατέλειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μηχανή για μελέτη της συγκόλλησης δια τριβής χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά και παραμέτρους συγκόλλησης ώστε να βρεθεί η συμπεριφορά τους σε αυτή τη κατεργασία καθώς και οι παράμετροι για τις οποίες προκύπτουν τα καλύτερα αποτελέσματα.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρα.....	23
Πίνακας 2. Συντελεστές λειτουργίας οδηγού	26
Πίνακας 3. Κατανομή ακροδεκτών βύσματος αισθητήρα δύναμης [18].....	29
Πίνακας 4. Ονομασίες εντολών γλώσσας Instruction List ανάλογα τον κατασκευαστή.....	40
Πίνακας 5. Συνθήκες συγκόλλησης πειράματος σε τεμάχια PVC.....	48
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά απόκρισης δύναμης	51
Πίνακας 7. Αποτελέσματα δοκιμής σε εφελκυσμό PVC με ίδιες συνθήκες συγκόλλησης ..	53
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά τεμαχίων ανουμινίου.....	54
Πίνακας 9. Παράμετροι συγκόλλησης αλουμινίου	54
Πίνακας 10. Συντελεστές συγκόλλησης πειράματος διαφορετικών ταχυτήτων.....	59

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Γραφική αναπαράσταση παραμέτρων συγκόλλησης δια τριβής [4]	9
Σχήμα 2. Τυπική διάταξη μηχανής συνεχούς συγκόλλησης δια τριβή [1]	11
Σχήμα 3. Διαδικασία συνεχούς συγκόλλησης δια τριβή (a), μεταβολή συνθηκών σε κάθε στάδιο της συγκόλλησης (b) [5]	11
Σχήμα 4. Τυπική διάταξη μηχανής συγκόλλησης δια τριβής με αδράνεια [1].....	12
Σχήμα 5. Γραμμική συγκόλληση δια τριβή δύο τεμαχίων τετραγωνικής διατομής [3]	12
Σχήμα 6. Γενική ηλεκτρική διάταξη.....	16
Σχήμα 7. Οργάνωση ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή (PLC) [13].....	18
Σχήμα 8. Σάρωση PLC	19
Σχήμα 9. Αποτελέσματα βαθμονόμησης αισθητήρα δύναμης	30
Σχήμα 10. Διακόπτες ελέγχου μηχανής (Θέση Off)	30
Σχήμα 11. Δίκτυα σε γλώσσα Ladder	36
Σχήμα 12. Επαφές σε γλώσσα Ladder.....	37
Σχήμα 13. Πηνίο σε γλώσσα Ladder.....	37
Σχήμα 14. Κουτί συνάρτησης στη γλώσσα FBD	38
Σχήμα 15. Δίκτυο κουτιών συναρτήσεων σε γλώσσα FBD	39
Σχήμα 16. Παράδειγμα διαγράμματος SFC	39
Σχήμα 17. Σύγκριση γλώσσας προγραμματισμού Ladder με Instruction List	41
Σχήμα 18. Σύγκριση Structured Text με γραφικές γλώσσες προγραμματισμού [23]	41
Σχήμα 19. Διάγραμμα ροής λειτουργίας προγράμματος	43
Σχήμα 20. Διάγραμμα ροής ελέγχου δύναμης με 6 στάδια ταχύτητας	44
Σχήμα 21. Συντελεστές ελέγχου δύναμης 6 επιπέδων	45
Σχήμα 22. Συντελεστές ελέγχου δύναμης 9 επιπέδων	46
Σχήμα 23. Δοκιμή ελέγχου 9 σταδίων σε τεμάχια PVC.....	47
Σχήμα 24. Απόκριση δύναμης σε συγκόλληση PVC.....	50
Σχήμα 25. Επίδραση συγκράτησης στη δύναμη συγκόλλησης PVC.....	51
Σχήμα 26. Μεταβολή της σκληρότητας στην επιφάνεια του τεμαχίου από αλουμίνιο	57
Σχήμα 27. Αποτελέσματα δοκιμής σε εφελκυσμό PVC με διαφορετική ταχύτητα περιστροφής.....	60

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Βασικές κατηγορίες συγκόλλησης δια τριβής [2]	10
Εικόνα 2. Προγραμματισμός PLC με ηλεκτρονικό υπολογιστή	20
Εικόνα 3. Κύρια μονάδα PLC μαζί με τις επεκτάσεις	21
Εικόνα 4. Καλώδιο επικοινωνίας PLC με ηλεκτρονικό υπολογιστή.....	21
Εικόνα 5. Διεπαφή ανθρώπου - μηχανής (HMI)	22
Εικόνα 6. Υπο-οθόνες "Sensors" (αριστερά) και "Program Parameter" (δεξιά)	22
Εικόνα 7. Έδραση κινητήρα (αριστερά), σύνδεσμος τροφοδοσίας κινητήρα (δεξιά).....	24
Εικόνα 8. Οδηγός κινητήρα	25
Εικόνα 9. Καταστάσεις οδηγού όπως εμφανίζονται στο HMI	27
Εικόνα 10. Μη περιστρεφόμενο τσοκ με προσαρμοσμένο τον αισθητήρα δύναμης.....	28
Εικόνα 11. Διάταξη βαθμονόμησης αισθητήρα δύναμης	29
Εικόνα 12. Σύνδεσμος άξονα κινητήρα – μειωτήρα	32
Εικόνα 13. Διάταξη μετάδοσης κίνησης από τον κινητήρα στον κεντροφορέα	33
Εικόνα 14. Τροφοδοτικό ρεύματος.....	34
Εικόνα 15. Ρελέ ελέγχου παροχής ρεύματος (κύριας αριστερά, βοηθητικής δεξιά).....	35
Εικόνα 16. Συγκολλημένα τεμάχια PVC	48
Εικόνα 17. Διάταξη καταγραφής δύναμης με Arduino.....	49
Εικόνα 18. Μηχανή δοκιμής αντοχής σε εφελκυσμό	52
Εικόνα 19. Αστοχία δοκιμίου PVC σε δοκιμή εφελκυσμού	52
Εικόνα 20. Συγκολλημένα τεμάχια από αλουμίνιο.....	54
Εικόνα 21. Σημείο συγκόλλησης τεμαχίων (φωτογραφία από στερεοσκόπιο)	55
Εικόνα 22. Κοιλότητες στην επιφάνεια συγκόλλησης.....	56
Εικόνα 23. Ρωγμή από συγκόλληση στα δύο άκρα του τεμαχίου.....	56
Εικόνα 24. Πανοραμική φωτογραφία επιφάνειας συγκόλλησης των τεμαχίων αλουμινίου	56
Εικόνα 25. Σημείο συγκόλλησης τεμαχίου 11 (φωτογραφία από στερεοσκόπιο).....	57
Εικόνα 26. Ρωγμή από συγκόλληση στα τέσσερα άκρα του τεμαχίου 11	58
Εικόνα 27. Σύγκριση συγκόλλησης με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.....	59

Κατάλογος Αναφορών

- [1] M. Uzkut, B. Ünlü, S. Yilmaz, and M. Akdağ, “Friction Welding And Its Applications In Today’s World,” *Sarajevo: International Symposium on Sustainable Development*, 2010.
- [2] M. B. Uday, M. N. A. Fauzi, H. Zuhailawati, and A. B. Ismail, “Advances in friction welding process: a review,” <http://dx.doi.org/10.1179/136217110X12785889550064>, vol. 15, no. 7, pp. 534–558, Oct. 2013, doi: 10.1179/136217110X12785889550064.
- [3] D. Kumar Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes, and A. Eyvazian, “Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding,” *J Adhes Sci Technol*, vol. 34, no. 24, pp. 2613–2637, Dec. 2020, doi: 10.1080/01694243.2020.1780716.
- [4] F. Khalfallah, Z. Boumerzoug, R. Selvarajan, and E. Raouache, “Optimization by RSM on rotary friction welding of AA1100 aluminum alloy and mild steel,” *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 11, Apr. 2020, doi: 10.1556/1848.2020.00005.
- [5] P. Li, J. Li, X. Li, J. Xiong, F. Zhang, and L. Liang, “A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding,” <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2015.1022499>, vol. 29, no. 12, pp. 1246–1257, Jun. 2015, doi: 10.1080/01694243.2015.1022499.
- [6] K. Shah, H. Khurshid, I. U. Haq, N. Khurram, and Z. Ali, “Conversion of a Conventional Lathe Machine into a Friction Welding Machine and Performing Some Experimental Tests for its Operational Feasibility,” *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 545–555, Jul. 2021, doi: 10.22581/muet1982.2103.09.
- [7] A. Sunardi, M. Mariyana, A. Gamayel, M. N. Mohammed, and M. Zaenudin, “Design & Development of Friction Welding Machine Based on Lathe Machine,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Nov. 2022. doi: 10.1063/5.0106341.
- [8] B. Parandhaman, E. Indhumathi, M. Nivedha, M. Prema, and D. Thamizharasi, “Analysis of friction welding in conventional lathe machine,” 2018. [Online]. Available: <http://www.ijpam.eu>
- [9] R. Bayindir and H. Ates, “Comparison of the constructed control methods for a friction-welding machine,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 20, no. 2, pp. 131–146, 2005, doi: 10.1081/AMP-200041826.
- [10] R. Rao, A. Kiran, K. Yadav, G. Sai, and K. Prasad, “Design and Fabrication of Rotary Friction Welding on Lathe Machine,” *Int J Eng Res Appl*, 2015.

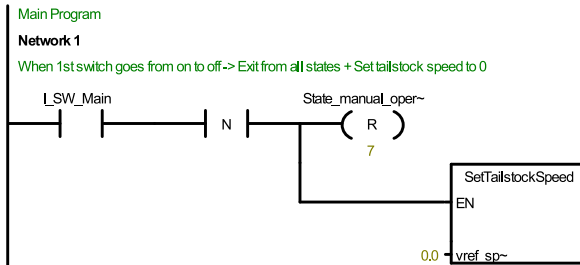
- [11] M. J. Walker, “The programmable logic controller : its prehistory, emergence and application,” 2012. [Online]. Available: <https://oro.open.ac.uk/54687/>
- [12] M. Walker, C. Bissell, and J. Monk, “The PLC: a logical development,” *Measurement and Control*, vol. 43, Nov. 2010, doi: 10.1177/002029401004300904.
- [13] Roger L. Tokheim, *Ψηφιακά Ηλεκτρονικά*, vol. 5. Εκδόσεις Τζιόλα, 2002.
- [14] Siemens, “S7-200 Programmable Controller,” 2008.
- [15] Siemens, “TD 200 Operator Interface (User Manual)”.
- [16] “AC MONODRIVE Digital Servodrive for brushless sinusoidal motors Installation and maintenance manual,” 1995.
- [17] NUM AG, “User communication software for MDLA digital drive (Instruction manual).”
- [18] K. A. Instrumente, “Data sheet, Type 9602.” [Online]. Available: www.kistler.com
- [19] IEC, “INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONALE Programmable controllers-Part 3: Programming languages,” 2013. [Online]. Available: www.iec.ch
- [20] Peter, “Function Block Diagram (FBD) PLC Programming Tutorial for Beginners.” [Online]. Available: <https://www.plcademy.com/function-block-diagram-programming/>
- [21] Anish Devasia, “An Overview of Sequential Function Chart (SFC) PLC Programming.” [Online]. Available: <https://control.com/technical-articles/an-overview-of-sequential-function-chart-sfc-programming/>
- [22] N. Roos, “Programming PLCs using Structured Text.”
- [23] Gregory Duranso, “Basics of Structured Text (ST) Programming.” [Online]. Available: <https://realpars.com/structured-text/>
- [24] C. B. Lin and L. I. Cheng, “Friction Welding of Similar and Dissimilar Materials: PMMA and PVC,” 2000.
- [25] Texas Instruments, “Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference, SBAS444B data sheet,” Oct. 2009.
- [26] Γ. Παντελεήμων, “Σχεδιασμός κατεργασίας συγκόλλησης με τριβή με χρήση νευρωνικών δικτύων,” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2022.

--- Τέλος εγγράφου ---

Παράρτημα Α – Κύριο πρόγραμμα

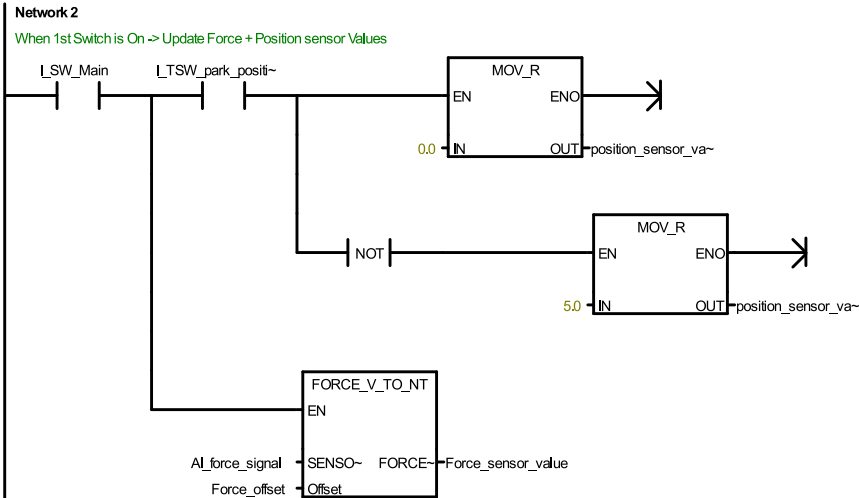
friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Symbol	Var Type	Data Type	Comment
	TEMP		
	TEMP		
	TEMP		
	TEMP		



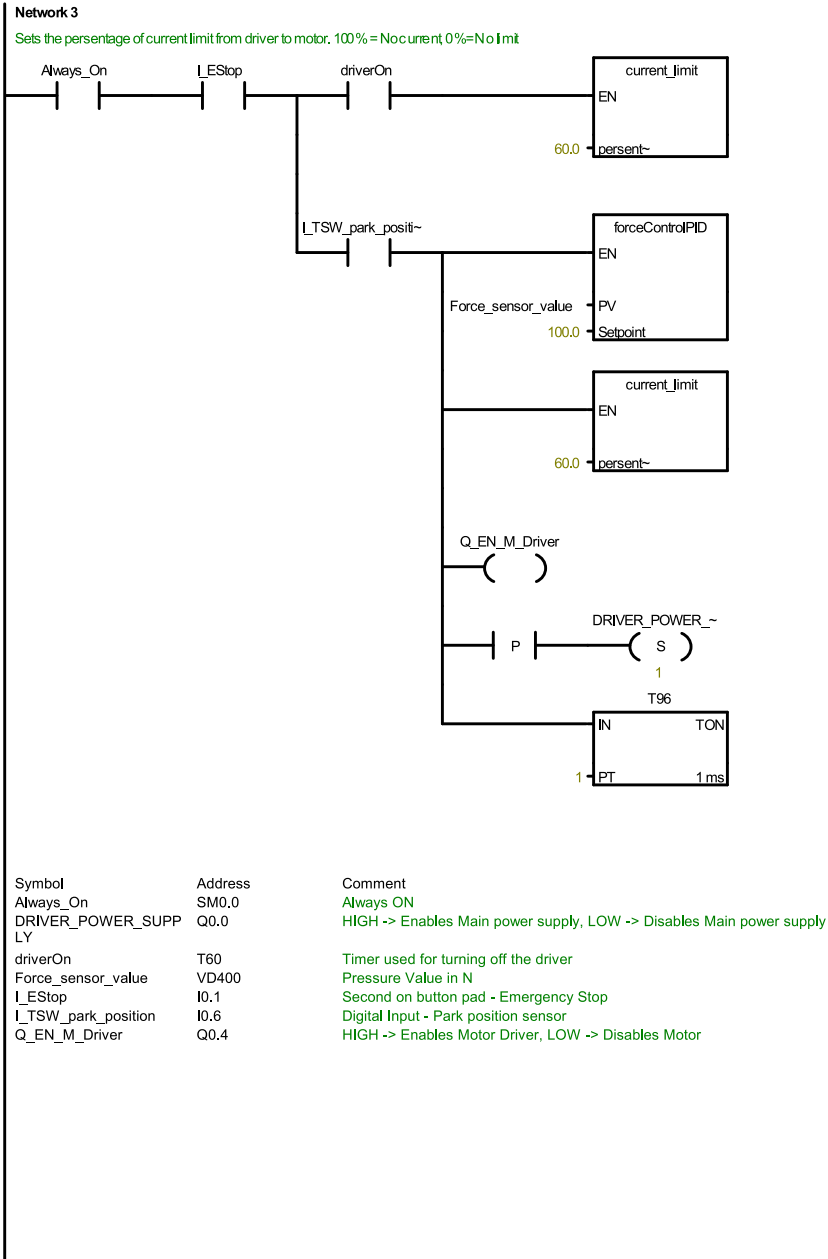
Symbol	Address	Comment
L_SW_Main	I0.0	First switch on button pad - Activates System
State_manual_operation	S0.1	Manual operation state - (Move manually tailstock)

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

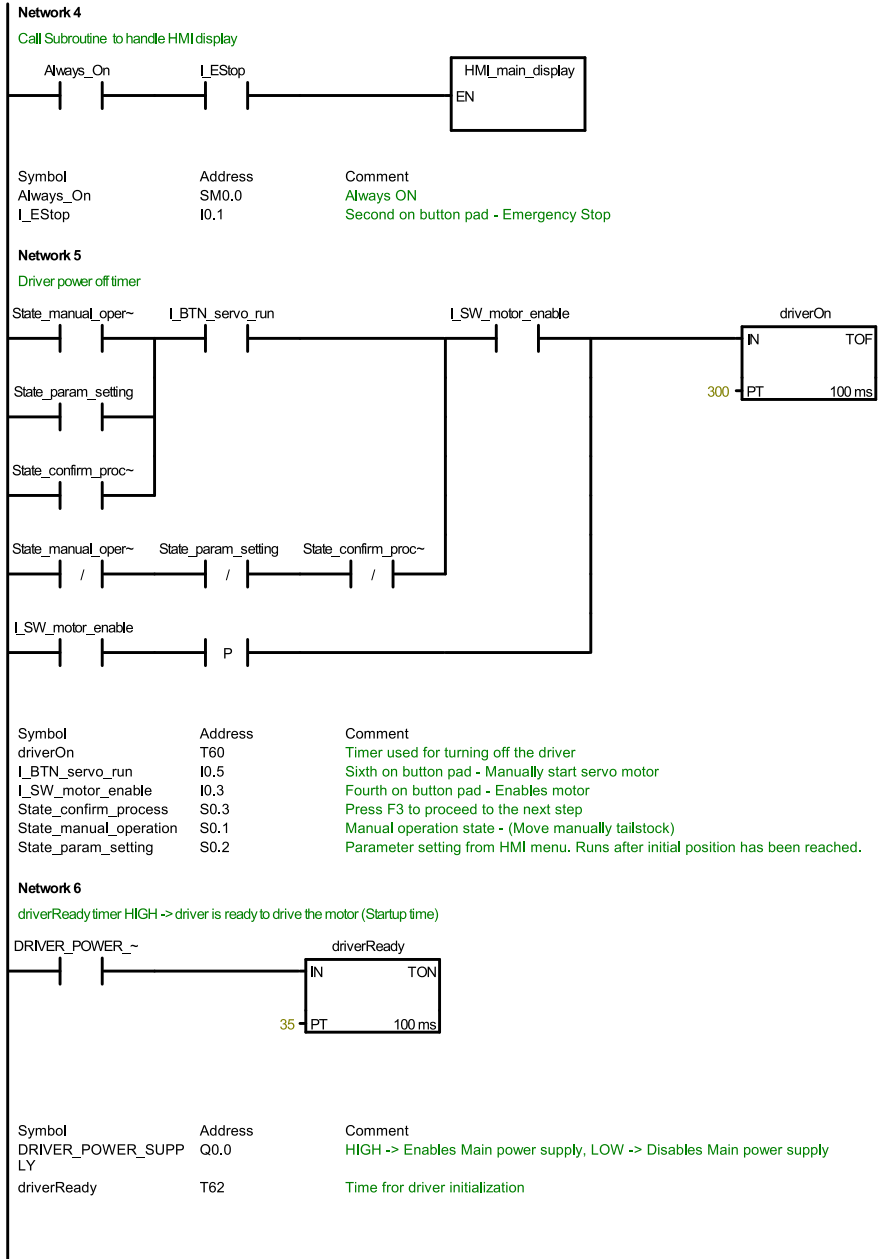


Symbol	Address	Comment
AI_force_signal	AIW4	Analog Input - Force sensor
Force_offset	VD440	Force sensor initialization offset
Force_sensor_value	VD400	Pressure Value in N
L_SW_Main	I0.0	First switch on button pad - Activates System
L_TSW_park_position	I0.6	Digital Input - Park position sensor
position_sensor_value	VD90	0 -> INITIAL, 5 -> RUN (Position of tailstock)

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



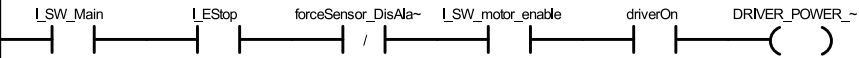
friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Network 7 Driver power supply

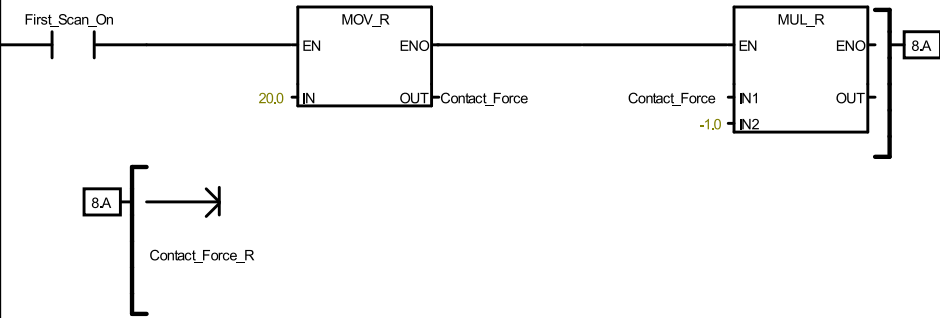
Activate driver power supply when main switch gets flipped and EStop is not pressed and force sensor disconnect alarm is not activated



Symbol	Address	Comment
DRIVER_POWER_SUPP LY	Q0.0	HIGH -> Enables Main power supply, LOW -> Disables Main power supply
driverOn	T60	Timer used for turning off the driver
forceSensor_DisAlarm	V702.6	Enable bit for Alarm 1
I_EStop	I0.1	Second on button pad - Emergency Stop
I_SW_Main	I0.0	First switch on button pad - Activates System
I_SW_motor_enable	I0.3	Fourth on button pad - Enables motor

Network 8

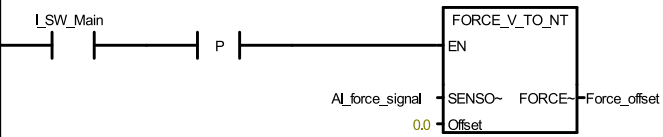
Set contact force value



Symbol	Address	Comment
Contact_Force	VD450	Contact force constant
Contact_Force_R	VD500	Reverse contact force constant
First_Scan_On	SM0.1	ON for the first scan cycle only

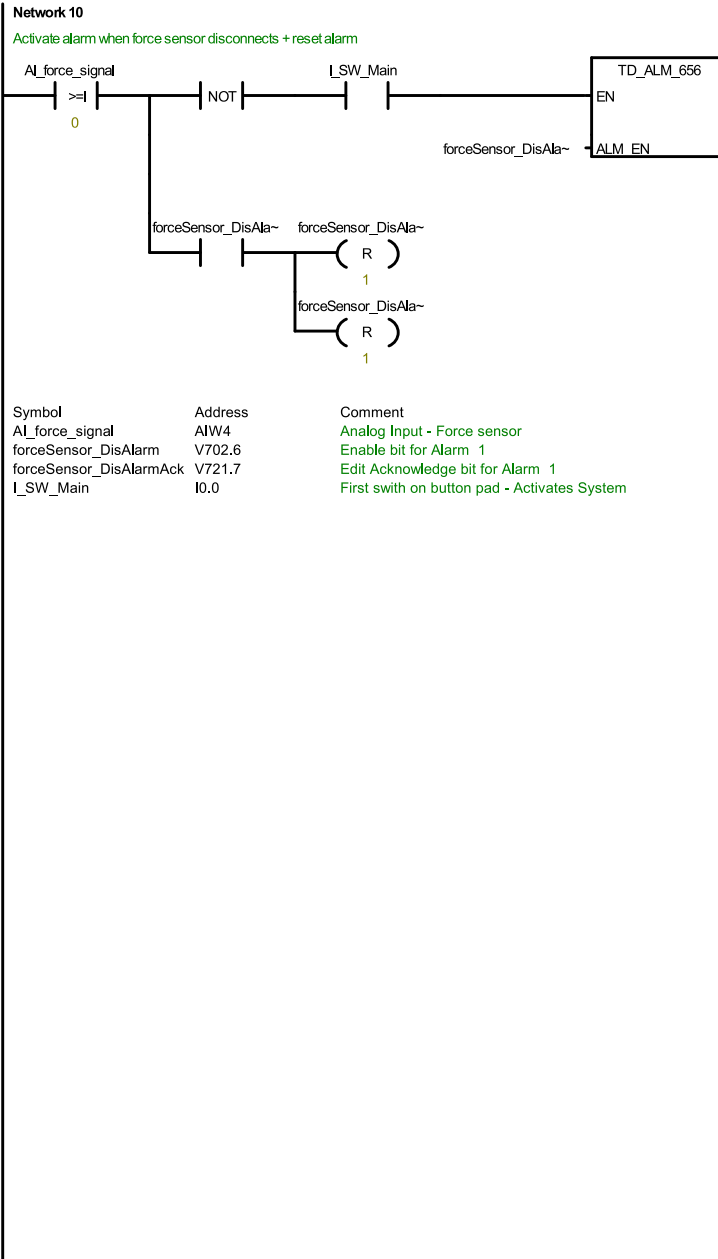
Network 9

When 1st switch turns on -> Set the force offset to current force value

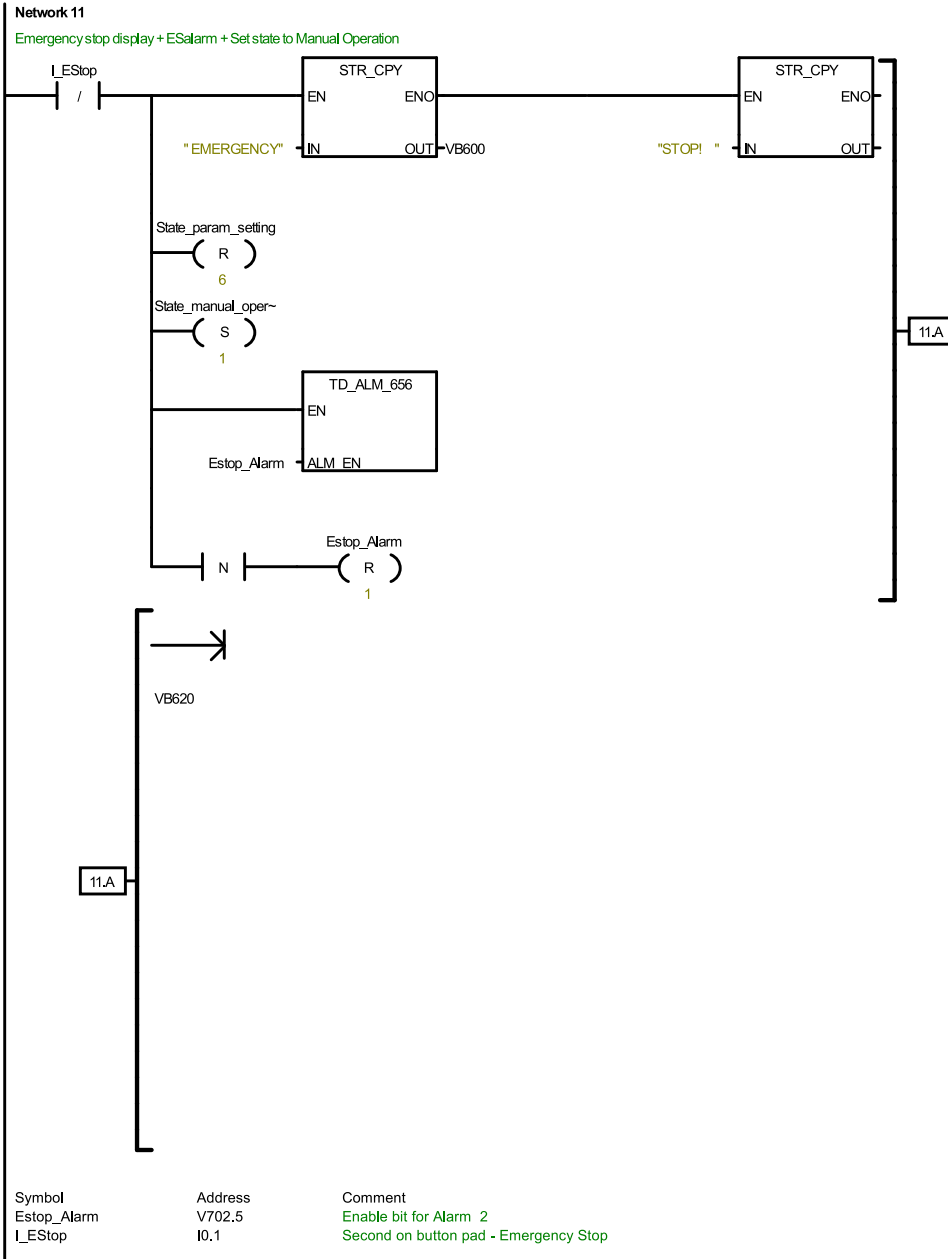


Symbol	Address	Comment
AI_force_signal	AIW4	Analog Input - Force sensor
Force_offset	VD440	Force sensor initialization offset
I_SW_Main	I0.0	First switch on button pad - Activates System

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

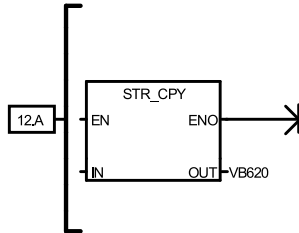
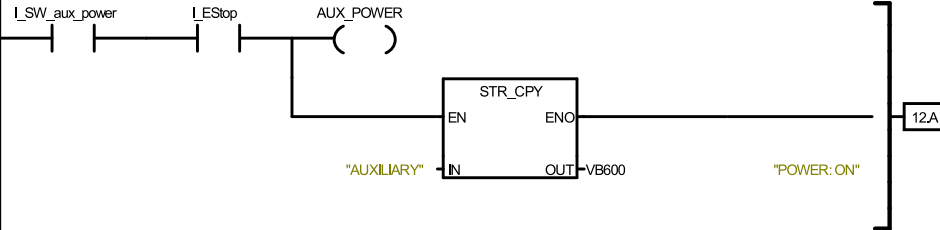


friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

State_manual_operation S0.1 Manual operation state - (Move manually tailstock)
 State_param_setting S0.2 Parameter setting from HMI menu. Runs after initial position has been reached.

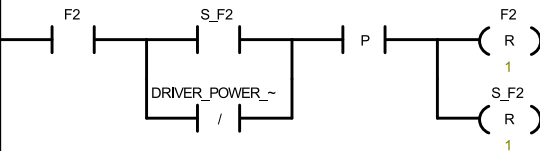
Network 12 Άιζαρόεεθ Όηιϊαίόβδά Driver

Provide auxiliary power to motor driver -> Does not seem to have any impact



Symbol	Address	Comment
AUX_POWER	Q0.1	HIGH -> Enables auxiliary power supply, LOW -> Disables auxiliary power supply
I_EStop	I0.1	Second on button pad - Emergency Stop
I_SW_aux_power	I0.2	Third on button pad - Enables auxiliary power

Network 13
 Reset F2 (MotorDisabler) by pressing S_F2



Symbol	Address	Comment
DRIVER_POWER_SUPP LY	Q0.0	HIGH -> Enables Main power supply, LOW -> Disables Main power supply
F2	V713.1	Symbol for keypad button 'F2' pressed (Set Bit)
S_F2	V715.5	Symbol for keypad button 'SHIFT+F2' pressed (Set Bit)

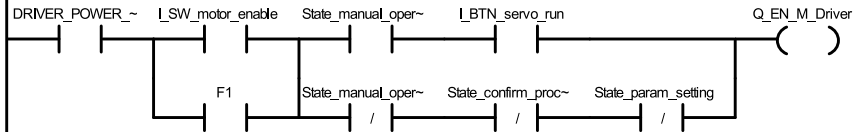
friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Network 14 Driver Enable

SECTION
HMIBUTTON HANDLERS

F1 DEFINITION

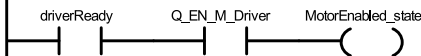
Enable motor driver communication



Symbol	Address	Comment
DRIVER_POWER_SUPP LY	Q0.0	HIGH -> Enables Main power supply, LOW -> Disables Main power supply
F1	V713.0	Symbol for keypad button 'F1' pressed (Set Bit)
I_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
I_SW_motor_enable	I0.3	Fourth on button pad - Enables motor
Q_EN_M_Driver	Q0.4	HIGH -> Enables Motor Driver, LOW -> Disables Motor
State_confirm_process	S0.3	Press F3 to proceed to the next step
State_manual_operation	S0.1	Manual operation state - (Move manually tailstock)
State_param_setting	S0.2	Parameter setting from HMI menu. Runs after initial position has been reached.

Network 15 Motor Enable

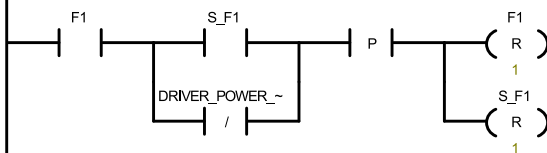
Copy output to state variable



Symbol	Address	Comment
driverReady	T62	Time for driver initialization
MotorEnabled_state	M0.1	Motor is enabled state (M bit-memory area)
Q_EN_M_Driver	Q0.4	HIGH -> Enables Motor Driver, LOW -> Disables Motor

Network 16

Reset F1 with S_F1 button

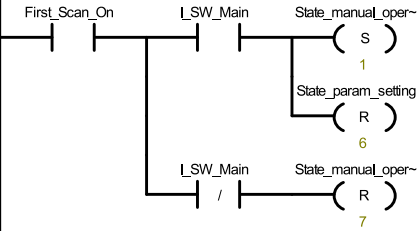


Symbol	Address	Comment
DRIVER_POWER_SUPP LY	Q0.0	HIGH -> Enables Main power supply, LOW -> Disables Main power supply
F1	V713.0	Symbol for keypad button 'F1' pressed (Set Bit)
S_F1	V715.4	Symbol for keypad button 'SHIFT+F1' pressed (Set Bit)

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Network 17 State initialization

On the first scan:
 1st Switch on -> Set Safe to Manual Operation
 1st Switch off -> Exit from all states

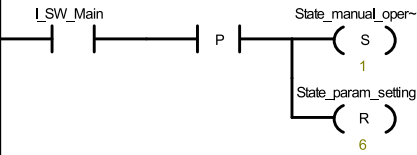


Symbol	Address	Comment
First_Scan_On	SM0.1	ON for the first scan cycle only
I_SW_Main	I0.0	First switch on button pad - Activates System
State_manual_operation	S0.1	Manual operation state - (Move manually tailstock)
State_param_setting	S0.2	Parameter setting from HMI menu. Runs after initial position has been reached.

Network 18 SENCTION 1- Manual operation

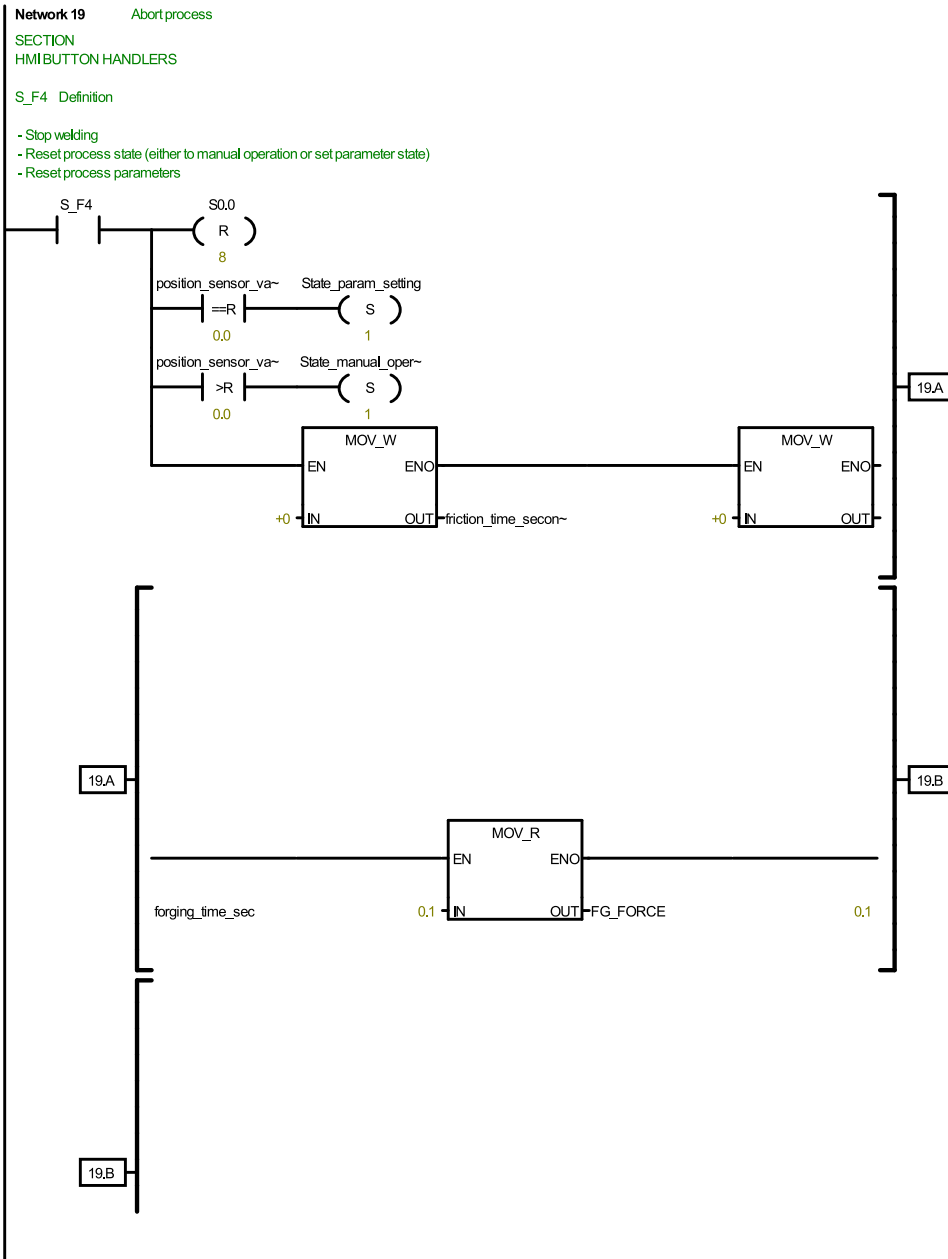
Initialization step

-When motor is enabled-> set state to Manual Operation



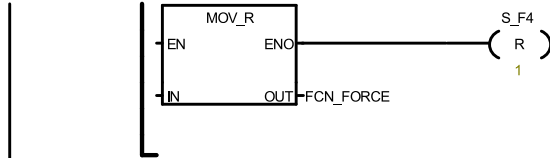
Symbol	Address	Comment
I_SW_Main	I0.0	First switch on button pad - Activates System
State_manual_operation	S0.1	Manual operation state - (Move manually tailstock)
State_param_setting	S0.2	Parameter setting from HMI menu, Runs after initial position has been reached.

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



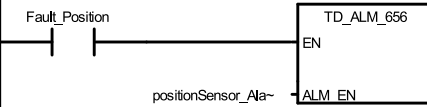
11 / 27

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



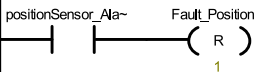
Symbol	Address	Comment
FCN_FORCE	VD320	User input for friction force
FG_FORCE	VD330	User input for forging force
forging_time_sec	VW62	Forging time as specified by user in seconds
friction_time_seconds	VW60	Friction time as specified by user in seconds
position_sensor_value	VD90	0 -> INITIAL, 5 -> RUN (Position of tailstock)
S_F4	V715.7	Symbol for keypad button 'SHIFT+F4' pressed (Momentary Contact)
State_manual_operation	S0.1	Manual operation state - (Move manually tailstock)
State_param_setting	S0.2	Parameter setting from HMI menu. Runs after initial position has been reached.

Network 20 Position Alarm
Position sensor fault (Not used)



Symbol	Address	Comment
Fault_Position	M1.7	Tailstock in park position during manufacturing state
positionSensor_Alarm	V702.7	Enable bit for Alarm 0

Network 21
Reset position error (Not used)

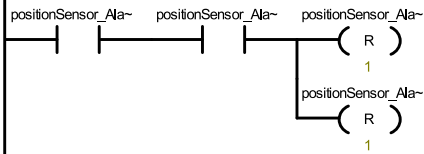


Symbol	Address	Comment
Fault_Position	M1.7	Tailstock in park position during manufacturing state
positionSensor_AlarmAck	V720.7	Edit Acknowledge bit for Alarm 0

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Network 22

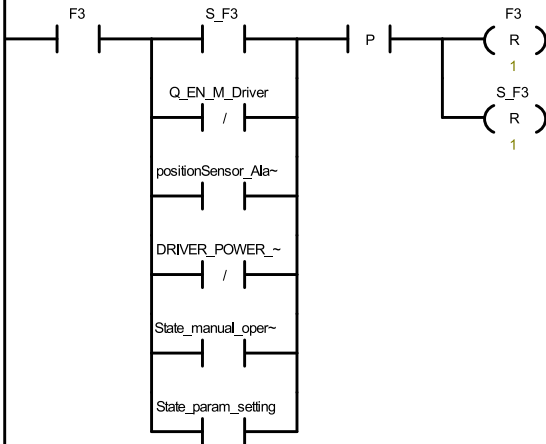
Reset position Alarm (Not used)



Symbol	Address	Comment
positionSensor_Alarm	V702.7	Enable bit for Alarm 0
positionSensor_AlarmAck	V720.7	Edit Acknowledge bit for Alarm 0

Network 23

Reset F3, SF3 conditions



Symbol	Address	Comment
DRIVER_POWER_SUPPLY	Q0.0	HIGH -> Enables Main power supply, LOW -> Disables Main power supply
F3	V713.2	Symbol for keypad button 'F3' pressed (Set Bit)
positionSensor_Alarm	V702.7	Enable bit for Alarm 0
Q_EN_M_Driver	Q0.4	HIGH -> Enables Motor Driver, LOW -> Disables Motor
S_F3	V715.6	Symbol for keypad button 'SHIFT+F3' pressed (Set Bit)
State_manual_operation	S0.1	Manual operation state - (Move manually tailstock)
State_param_setting	S0.2	Parameter setting from HMI menu. Runs after initial position has been reached.

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

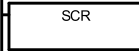
Network 24
Control Flow of Program Execution
state machine
.....

STATE MANUAL OPERATION

Manual Approach or Retract tailstock Operation -> S0.1

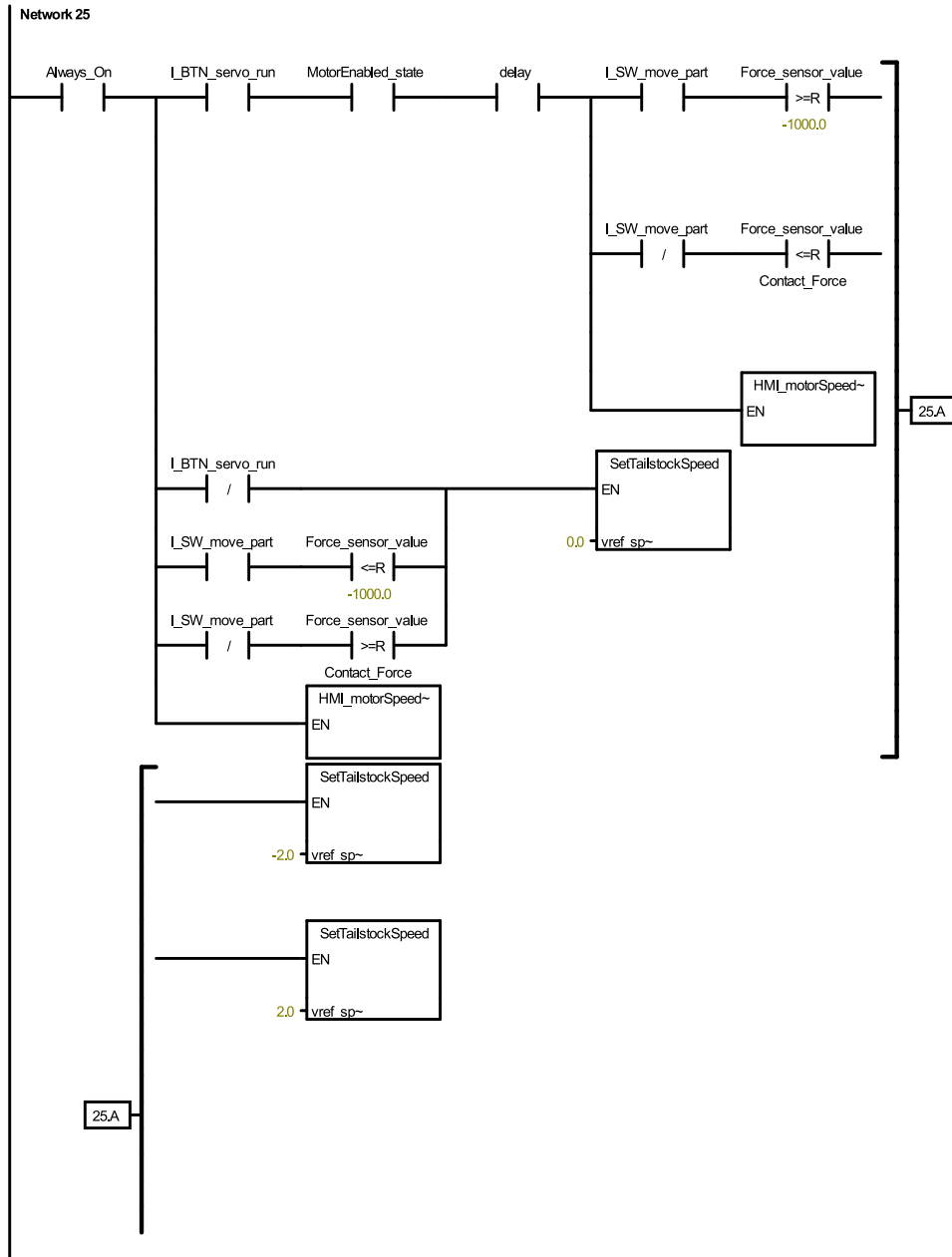
User can press the red button on the right (I0.5) and servo will rotate with default speed.
User can select the direction of rotation using the 5th switch (I0.4).

State_manual_oper~



Symbol	Address	Comment
State_manual_operation	S0.1	Manual operation state - (Move manually tailstock)

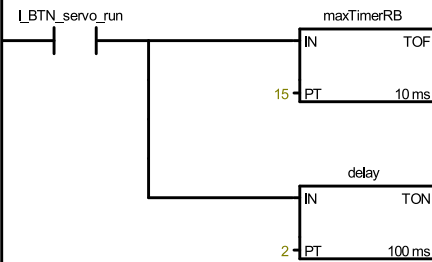
friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
Contact_Force	VD450	Contact force constant
delay	T150	Timer used for delaing the motor movement after the button is pressed
Force_sensor_value	VD400	Pressure Value in N
I_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
I_SW_move_part	I0.4	Fifth on button pad - Start moving non rotating part == F3 of HMI
MotorEnabled_state	M0.1	Motor is enabled state (M bit-memory area)

Network 26 Timers for red button double press control
 Set time before the second press to register as double press + time delay before the motor starts rotating

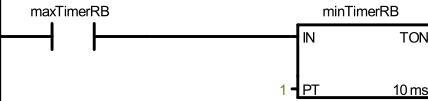


Symbol	Address	Comment
delay	T150	Timer used for delaing the motor movement after the button is pressed
I_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
maxTimerRB	T33	Sixth button - Time untill the second push to register as double press

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Network 27

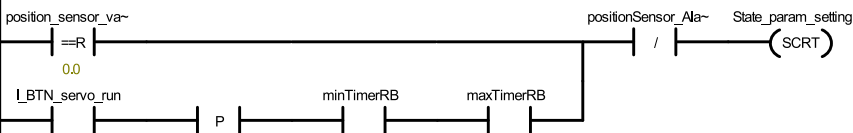
Set the the time that the button has to be reseed before the second press



Symbol	Address	Comment
maxTimerRB	T33	Sixth button - Time untill the second push to register as double press
minTimerRB	T34	Sixth button - Min time for second push to regsiter

Network 28

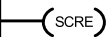
If tailstock position = 0 (away from chuck) or red button (6th) is double pressed -> Pass program execution to parameter setting state



Symbol	Address	Comment
I_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
maxTimerRB	T33	Sixth button - Time untill the second push to register as double press
minTimerRB	T34	Sixth button - Min time for second push to regsiter
position_sensor_value	VD90	0 -> INITIAL, 5 -> RUN (Position of tailstock)
positionSensor_Alarm	V702.7	Enable bit for Alarm 0
State_param_setting	S0.2	Parameter setting from HMI menu. Runs after initial position has been reached.

Network 29

End manual operation state

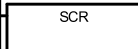


Network 30 SENCTION 2 - Set welding parameters
STATE PARAMETERS SETTING

Parameter Settings section -> S0.2

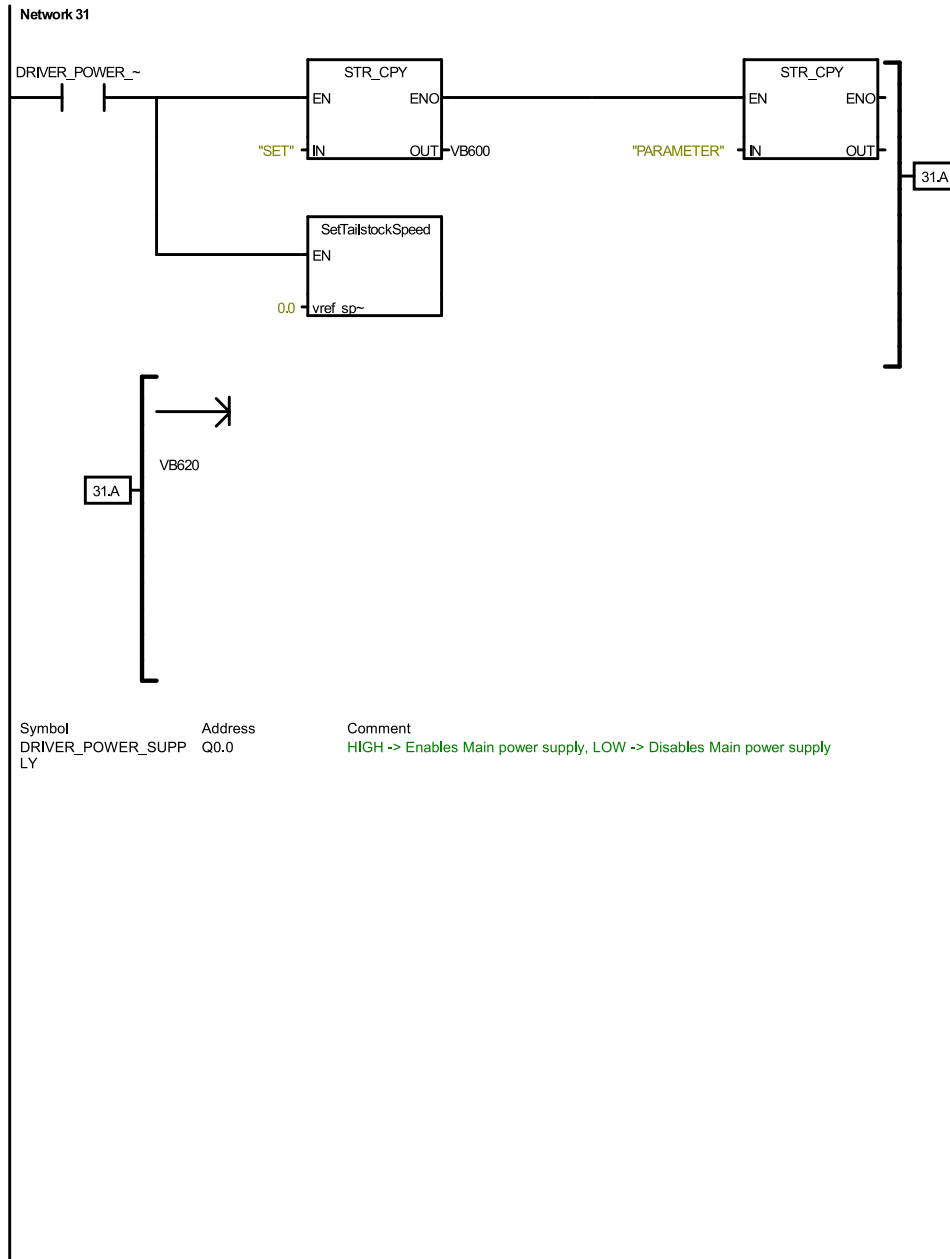
In this section the HMI will accept the manufacturing parameters

State_param_setting

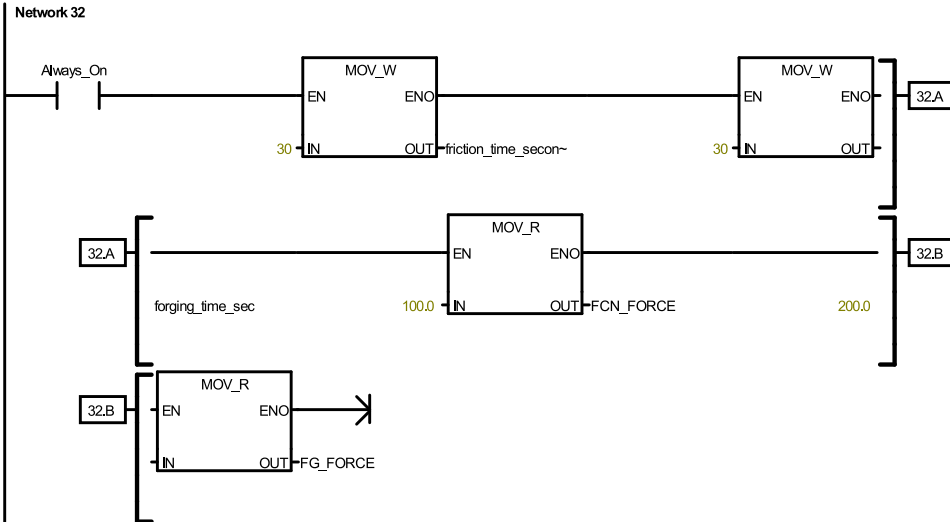


Symbol	Address	Comment
State_param_setting	S0.2	Parameter setting from HMI menu. Runs after initial position has been reached.

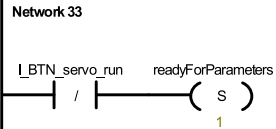
friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
FCN_FORCE	VD320	User input for friction force
FG_FORCE	VD330	User input for forging force
forging_time_sec	VW62	Forging time as specified by user in seconds
friction_time_seconds	VW60	Friction time as specified by user in seconds



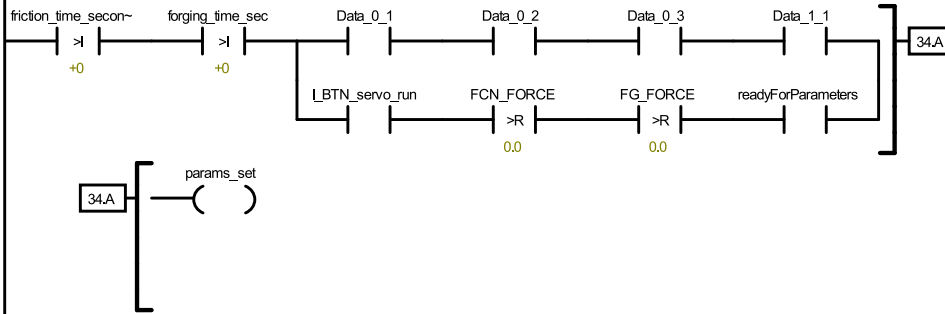
Symbol	Address	Comment
I_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
readyForParameters	M1.4	Set this will

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Network 34

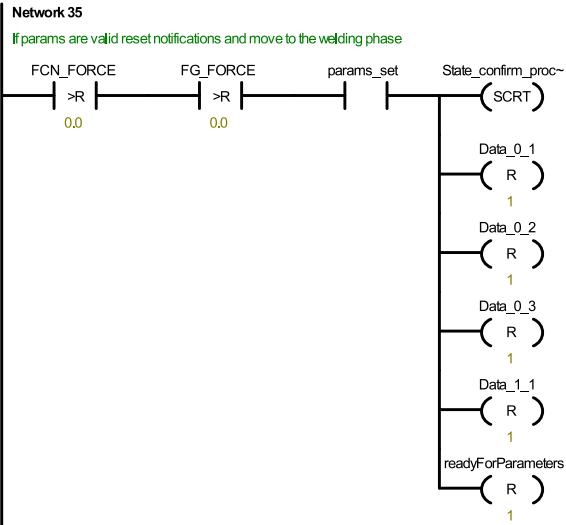
Confirm all parameter settings are available and validate user input

- Data_0_1 -> Notification for friction time param
- Data_0_2 -> Notification for forging time param
- Data_0_3 -> Notification for friction force (Need to confirm if this is accurate)
- Data_1_1 -> Notification for forging force (Need to confirm if this is accurate)



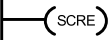
Symbol	Address	Comment
Data_0_1	V729.0	Edit Notification for VW60
Data_0_2	V730.0	Edit Notification for VW62
Data_0_3	V731.0	Edit Notification for VD330
Data_1_1	V730.1	Edit Notification for VD320
FCN_FORCE	VD320	User input for friction force
FG_FORCE	VD330	User input for forging force
forging_time_sec	VW62	Forging time as specified by user in seconds
friction_time_seconds	VW60	Friction time as specified by user in seconds
I_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
params_set	M2.0	Parameters have been set flag
readyForParameters	M1.4	Set this will

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



Symbol	Address	Comment
Data_0_1	V729.0	Edit Notification for VW60
Data_0_2	V730.0	Edit Notification for VW62
Data_0_3	V731.0	Edit Notification for VD330
Data_1_1	V730.1	Edit Notification for VD320
FCN_FORCE	VD320	User input for friction force
FG_FORCE	VD330	User input for forging force
params_set	M2.0	Parameters have been set flag
readyForParameters	M1.4	Set this will
State_confirm_process	S0.3	Press F3 to proceed to the next step

Network 36
 End param setting state



friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

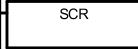
Network 37 SENCTION 3 - Start automated friction welding phase

Confirm Process state -> S0.3

User confirms that wants to start the process by pressing F3 or Red button.

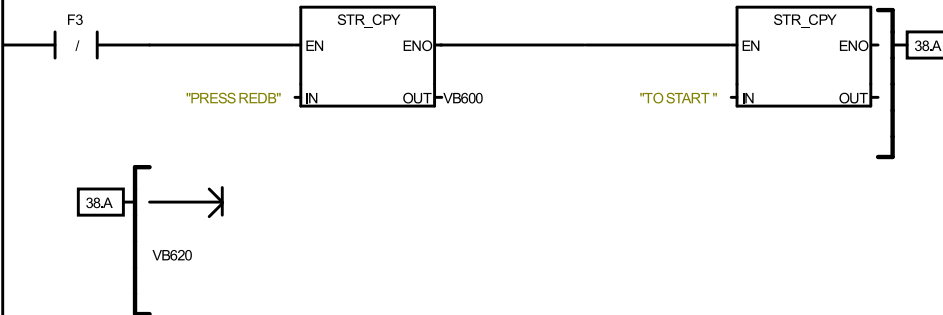
Automated friction welding state

State_confirm_proc-



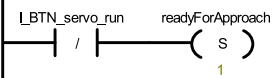
Symbol	Address	Comment
State_confirm_process	S0.3	Press F3 to proceed to the next step

Network 38



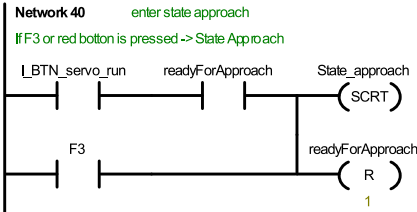
Symbol	Address	Comment
F3	V713.2	Symbol for keypad button 'F3' pressed (Set Bit)

Network 39



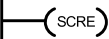
Symbol	Address	Comment
L_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
readyForApproach	M1.5	Set this will

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



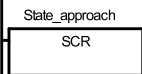
Symbol	Address	Comment
F3	V713.2	Symbol for keypad button 'F3' pressed (Set Bit)
I_BTN_servo_run	I0.5	Sixth on button pad - Manually start servo motor
readyForApproach	M1.5	Set this will
State_approach	S0.4	Approach chuck until tailstock encounters some pressure

Network 41
 End Confirm Process state



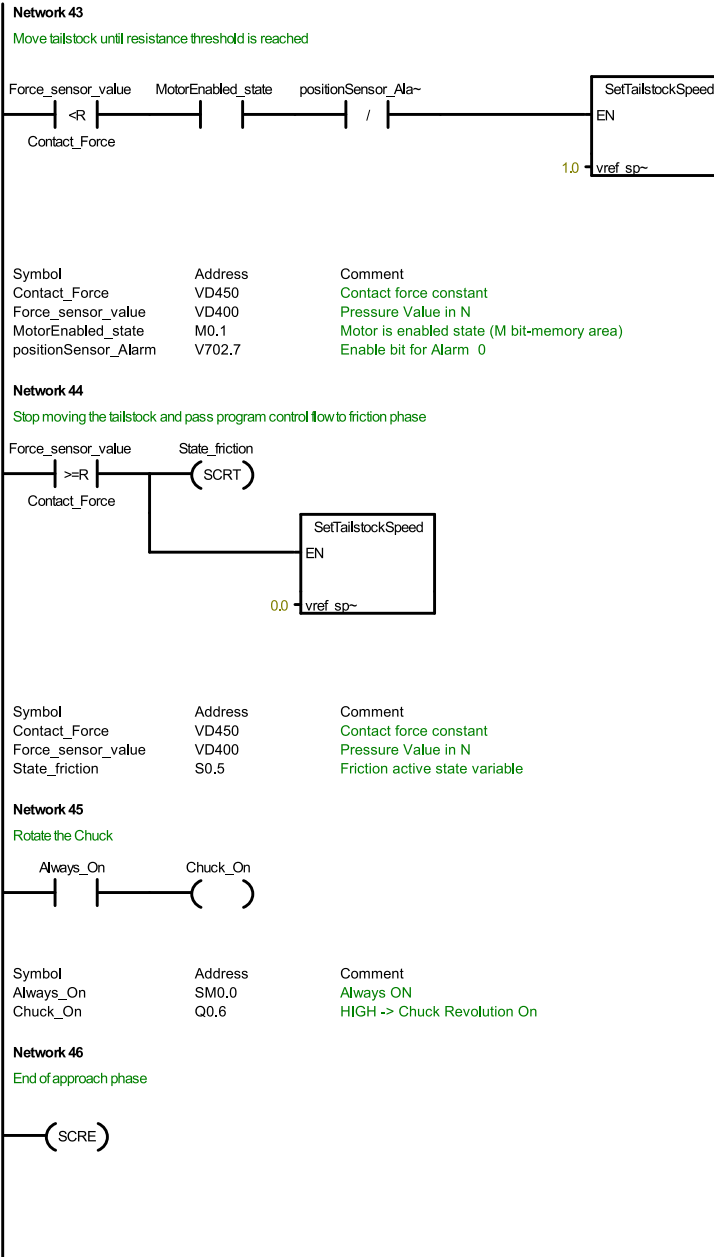
Network 42 STATE APPROACH
 Approach state -> S0.4

Tailstock Automatic Approach Phase
 Tailstock moves towards workpiece until threshold force is surpassed
 With S_F4 command we break out of this state
 Next is the friction phase.



Symbol	Address	Comment
State_approach	S0.4	Approach chuck until tailstock encounters some pressure

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

Network 47 STATE FRICTION

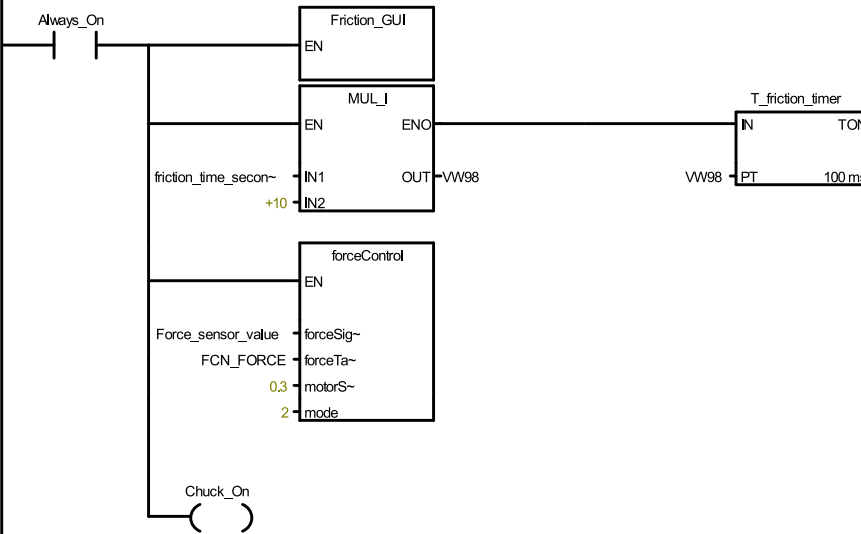
Friction Phase state -> S0.5

Friction Phase
Maintain constant pressure using PID control.
Abort by pressing S_F4



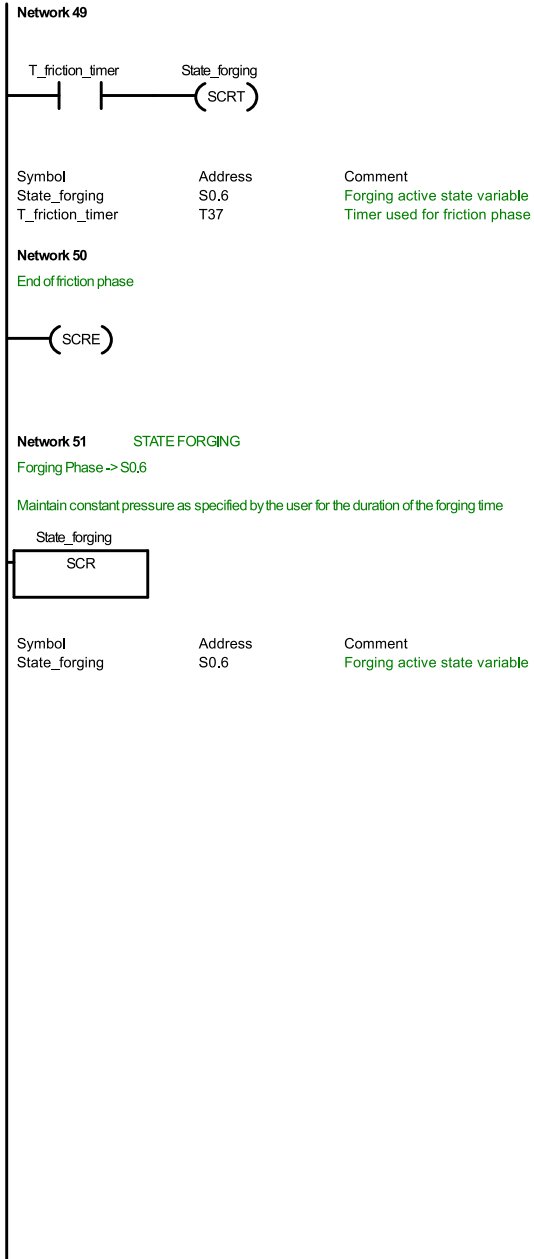
Symbol	Address	Comment
State_friction	S0.5	Friction active state variable

Network 48

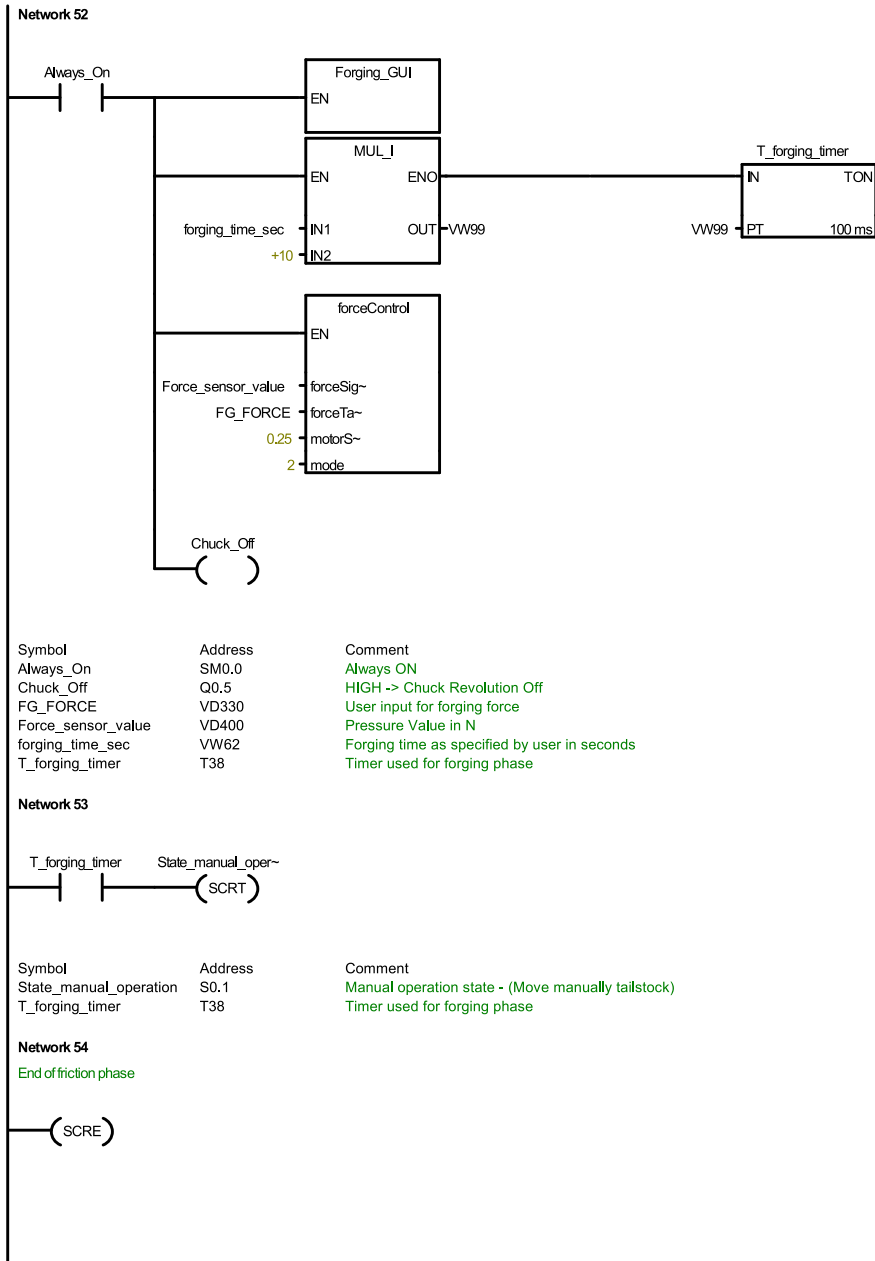


Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
Chuck_On	Q0.6	HIGH -> Chuck Revolution On
FCN_FORCE	VD320	User input for friction force
Force_sensor_value	VD400	Pressure Value in N
friction_time_seconds	VW60	Friction time as specified by user in seconds
T_friction_timer	T37	Timer used for friction phase

friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)



friction_welding_version_8_stef / MAIN (OB1)

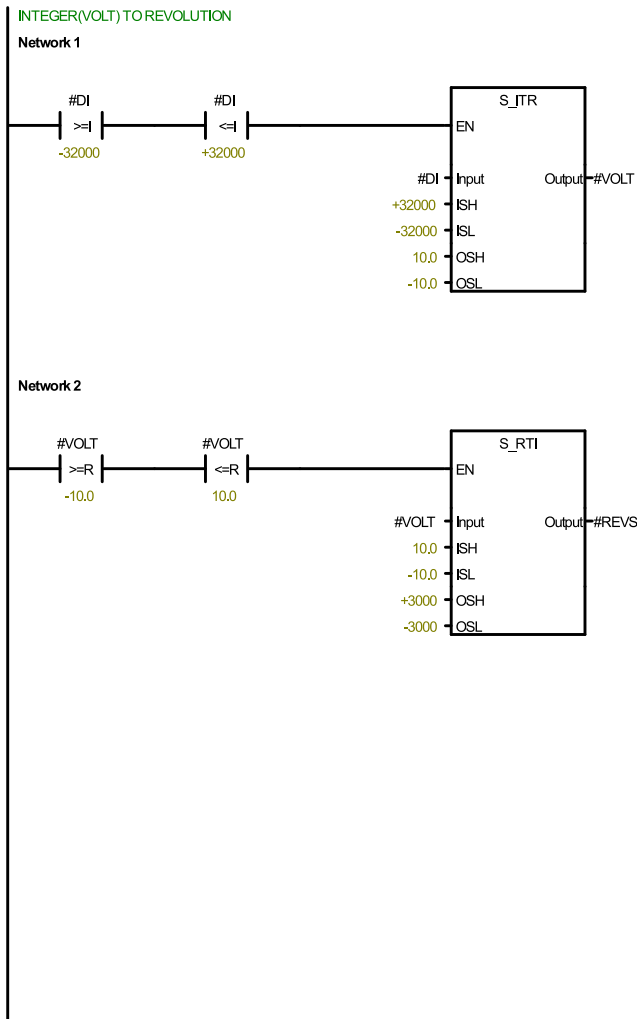


Παράρτημα Β – Υπορουτίνες

friction_welding_version_8_stef / DOUT_to_RPM_VOLTS (SBR0)

DOUT_to_RPM_VOLTS (SBR0)

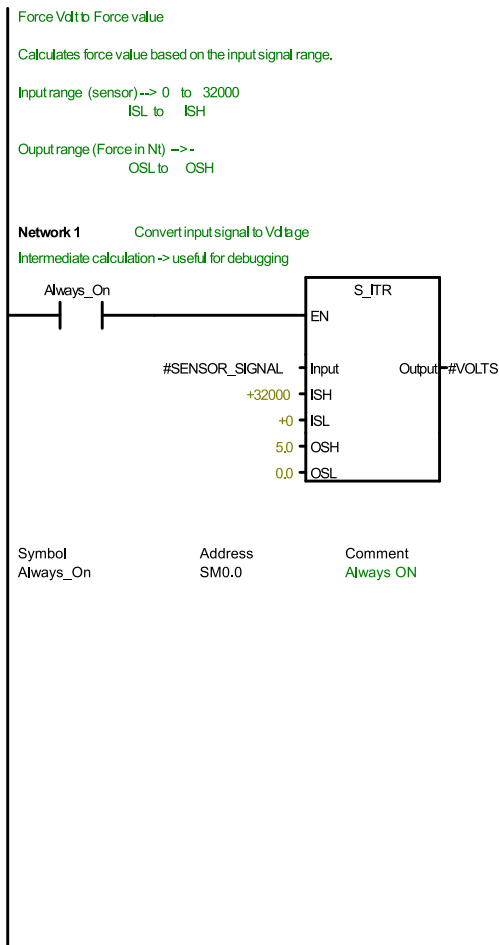
Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
LW0	DI	IN	INT
		IN	
		IN_OUT	
LD2	VOLT	OUT	REAL
LW6	REVS	OUT	INT
		OUT	
		TEMP	



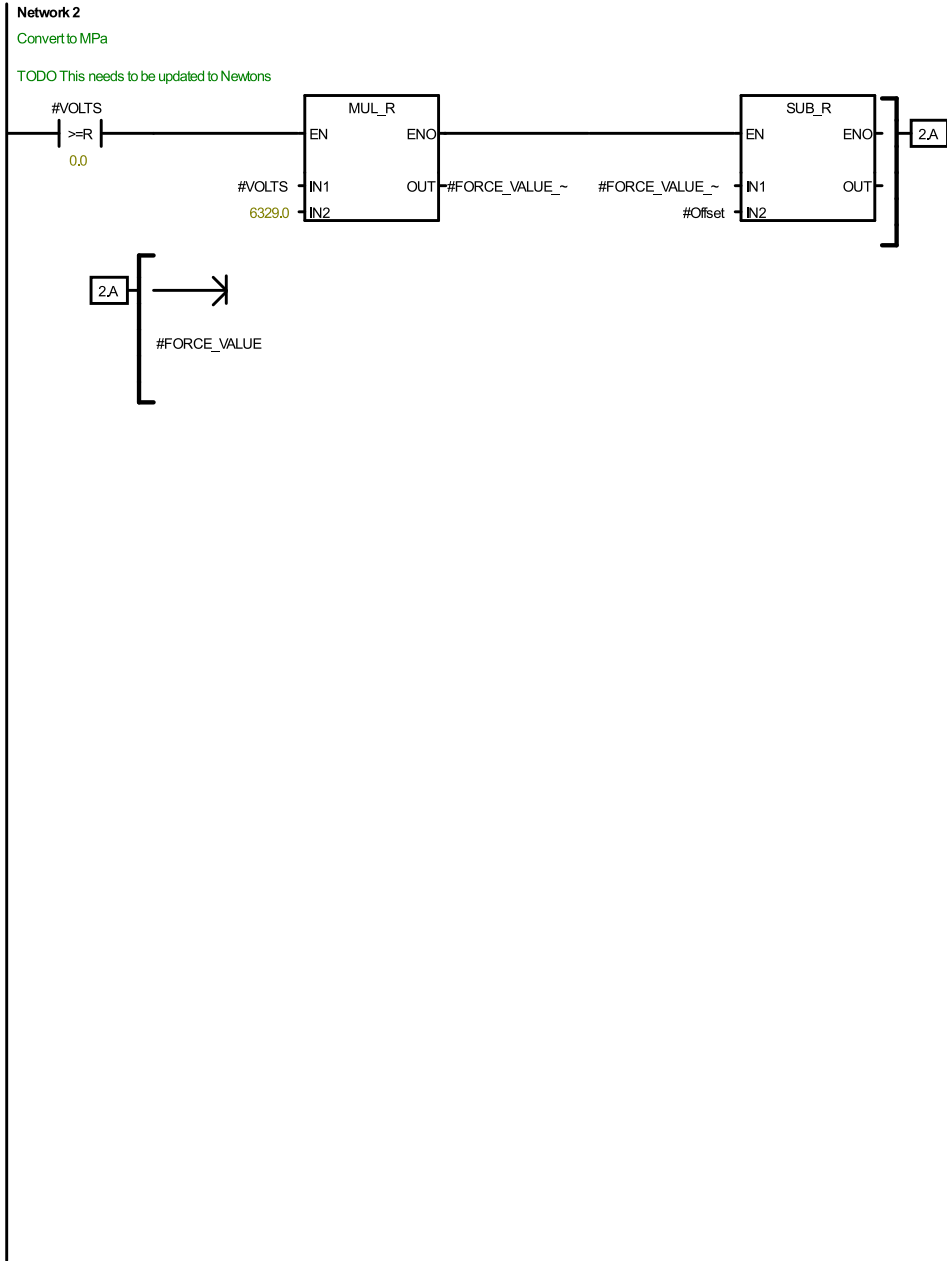
friction_welding_version_8_stef / FORCE_V_TO_NT (SBR4)

FORCE_V_TO_NT (SBR4)

Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
LW0	SENSOR_SIGNAL	IN	WORD
LD2	Offset	IN	REAL
		IN	
		IN_OUT	
LD6	FORCE_VALUE	OUT	REAL
		OUT	
LD10	VOLTS	TEMP	REAL
LD14	TEMP_FORCE	TEMP	REAL
			Local temp variable for force
LD18	FORCE_VALUE_WO	TEMP	REAL
		TEMP	



friction_welding_version_8_stef / FORCE_V_TO_NT (SBR4)

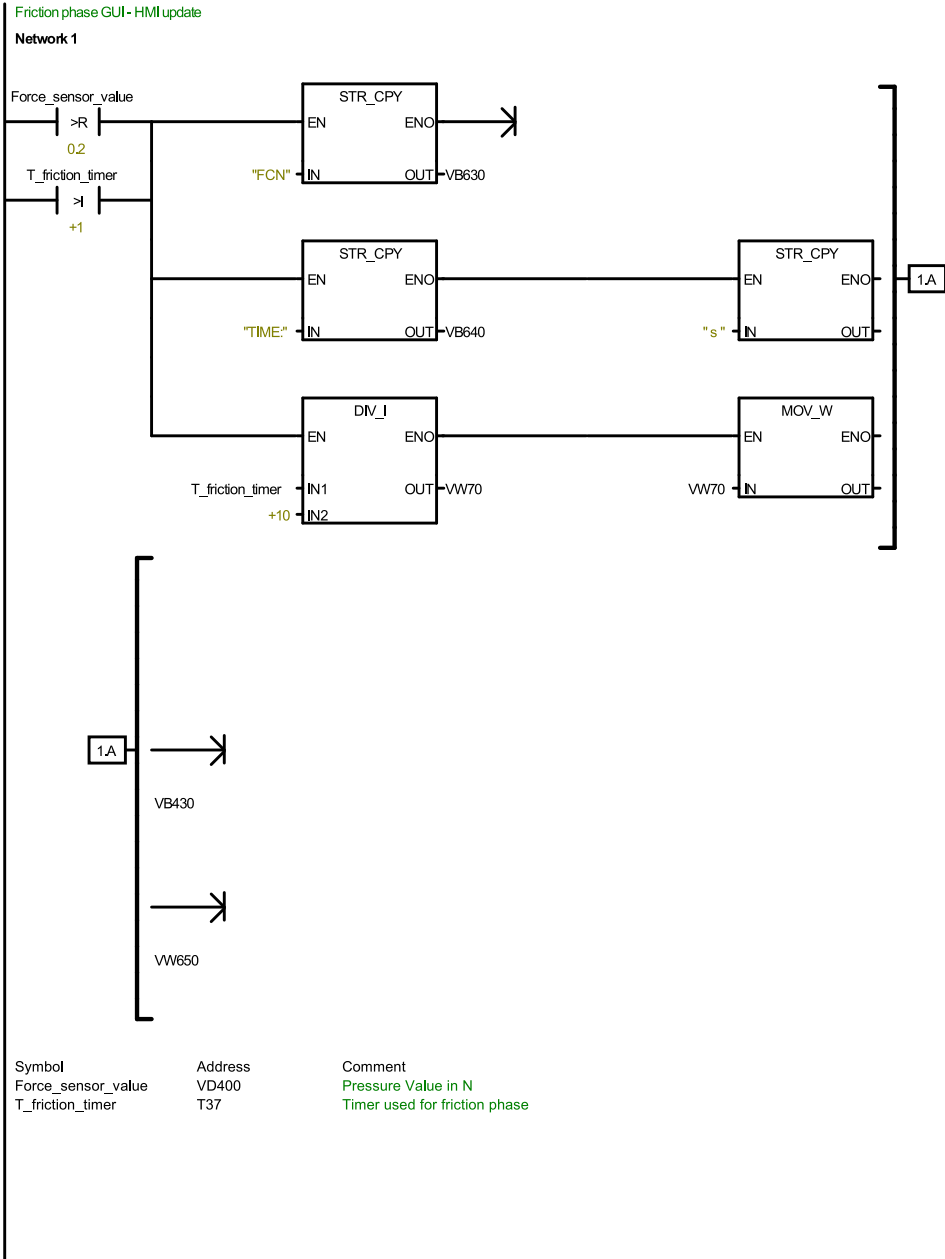


friction_welding_version_8_stef / Friction_GUI (SBR5)

Friction_GUI (SBR5)

Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
	TEMP		

friction_welding_version_8_stef / Friction_GUI (SBR5)

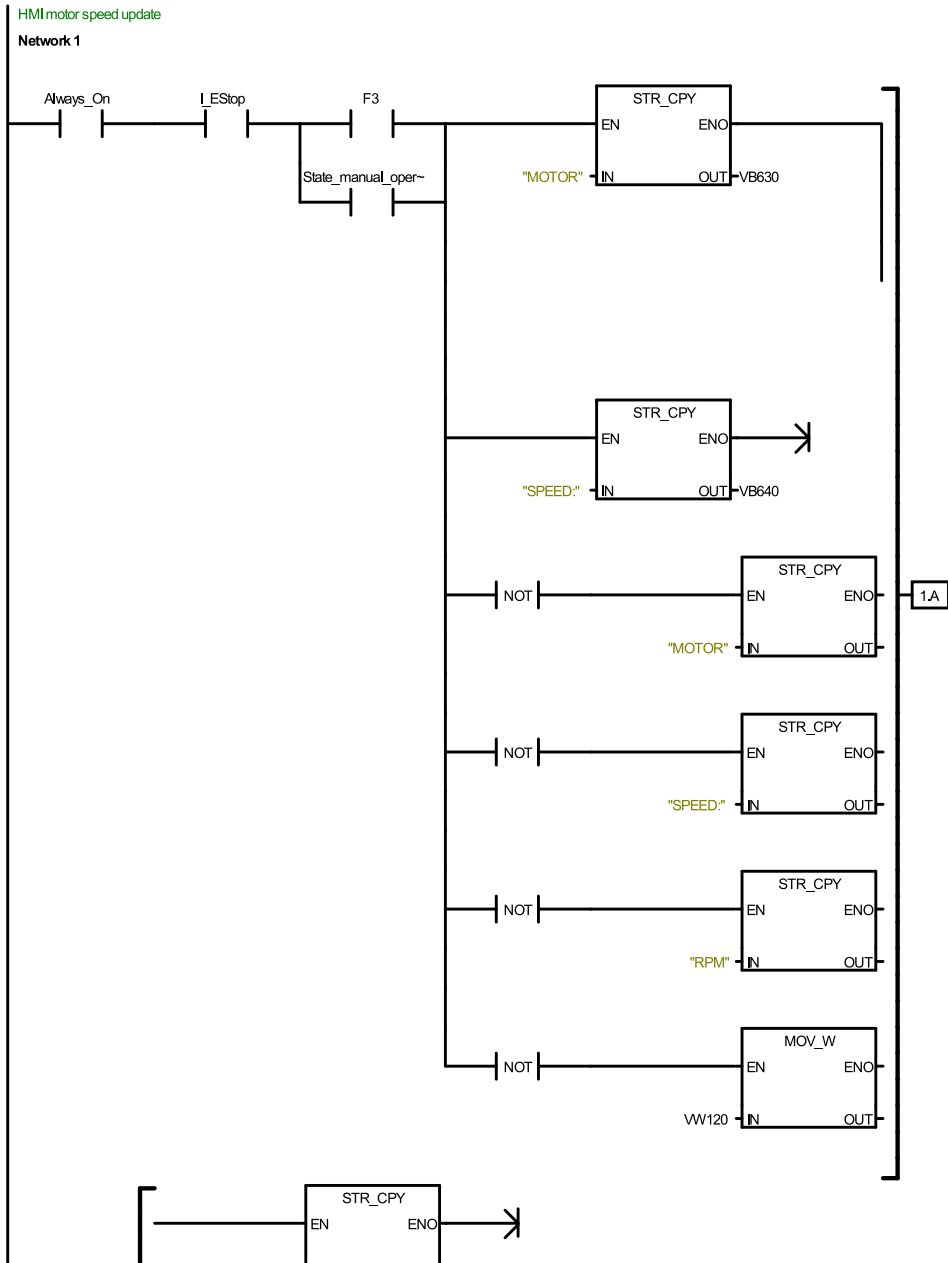


friction_welding_version_8_stef / HMI_motorSpeed_update (SBR8)

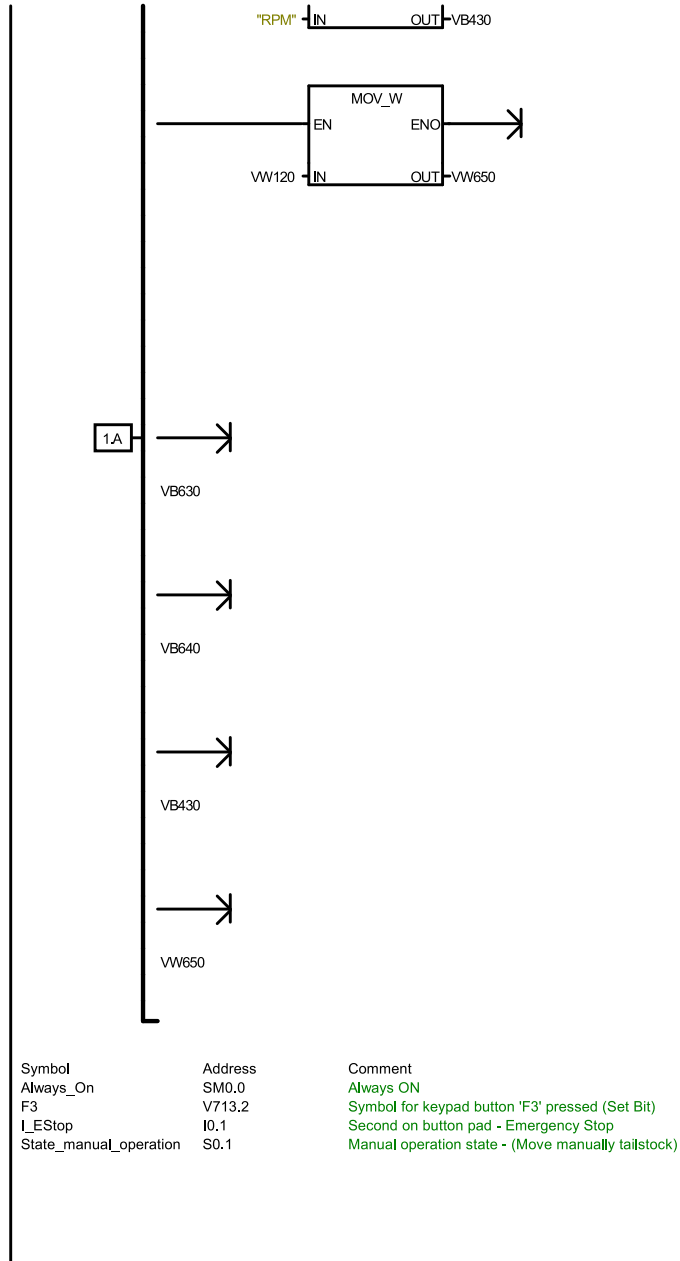
HMI_motorSpeed_update (SBR8)

Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
	TEMP		

friction_welding_version_8_stef / HMI_motorSpeed_update (SBR8)



friction_welding_version_8_stef / HMI_motorSpeed_update (SBR8)

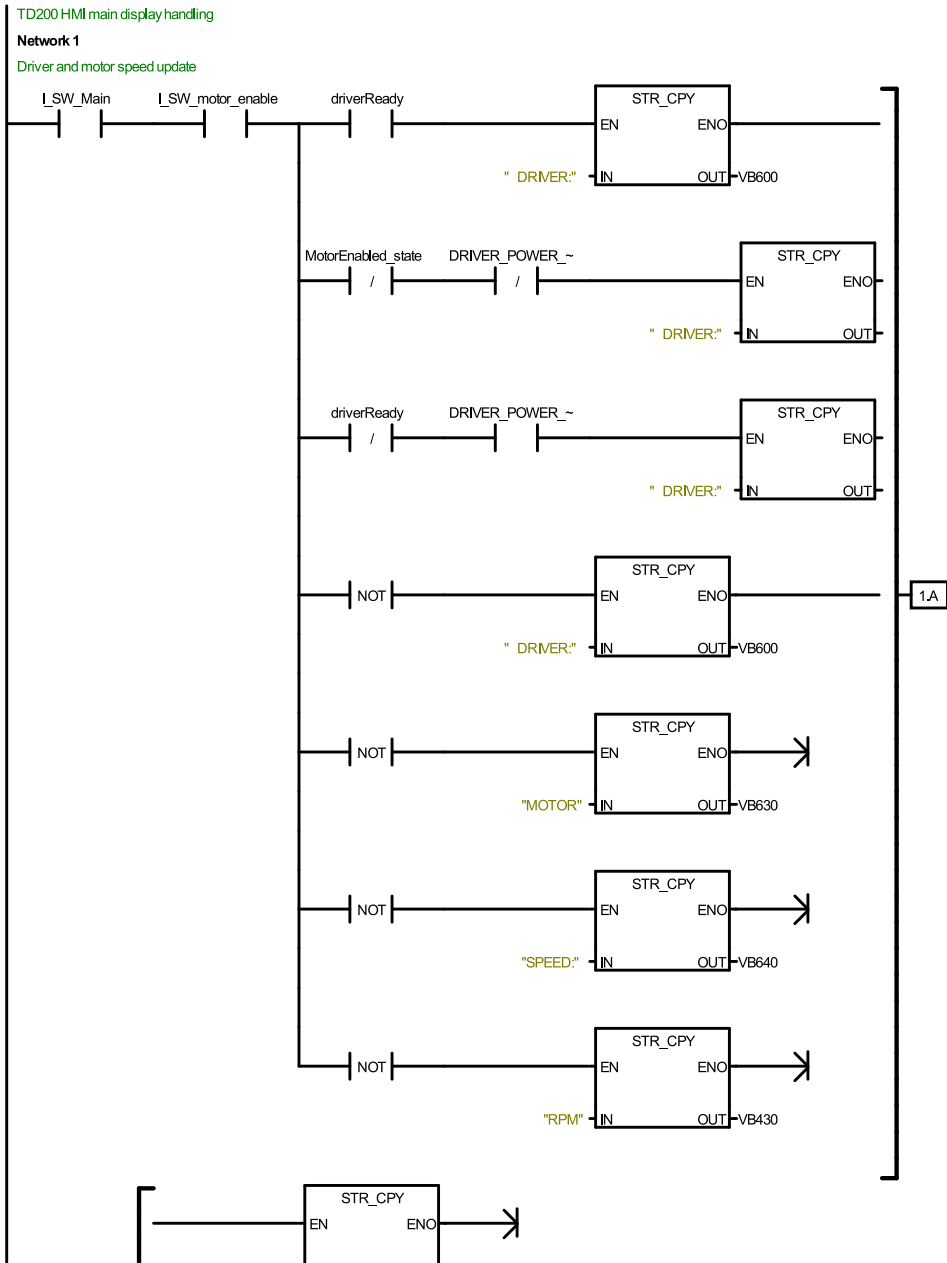


friction_welding_version_8_stef / HMI_main_display (SBR9)

HMI_main_display (SBR9)

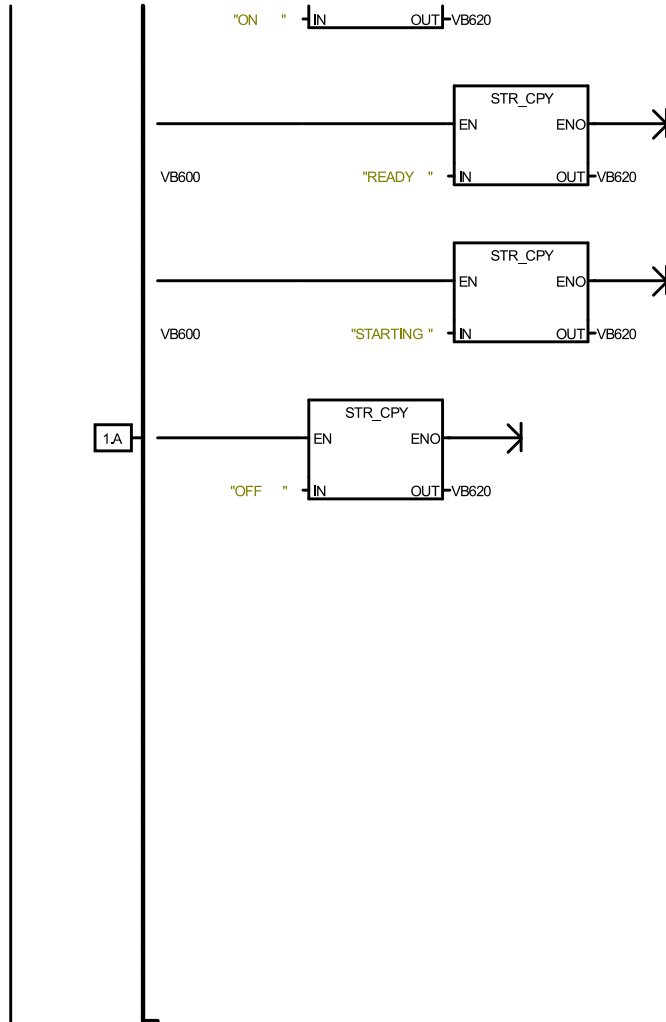
Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
	TEMP		

friction_welding_version_8_stef / HMI_main_display (SBR9)



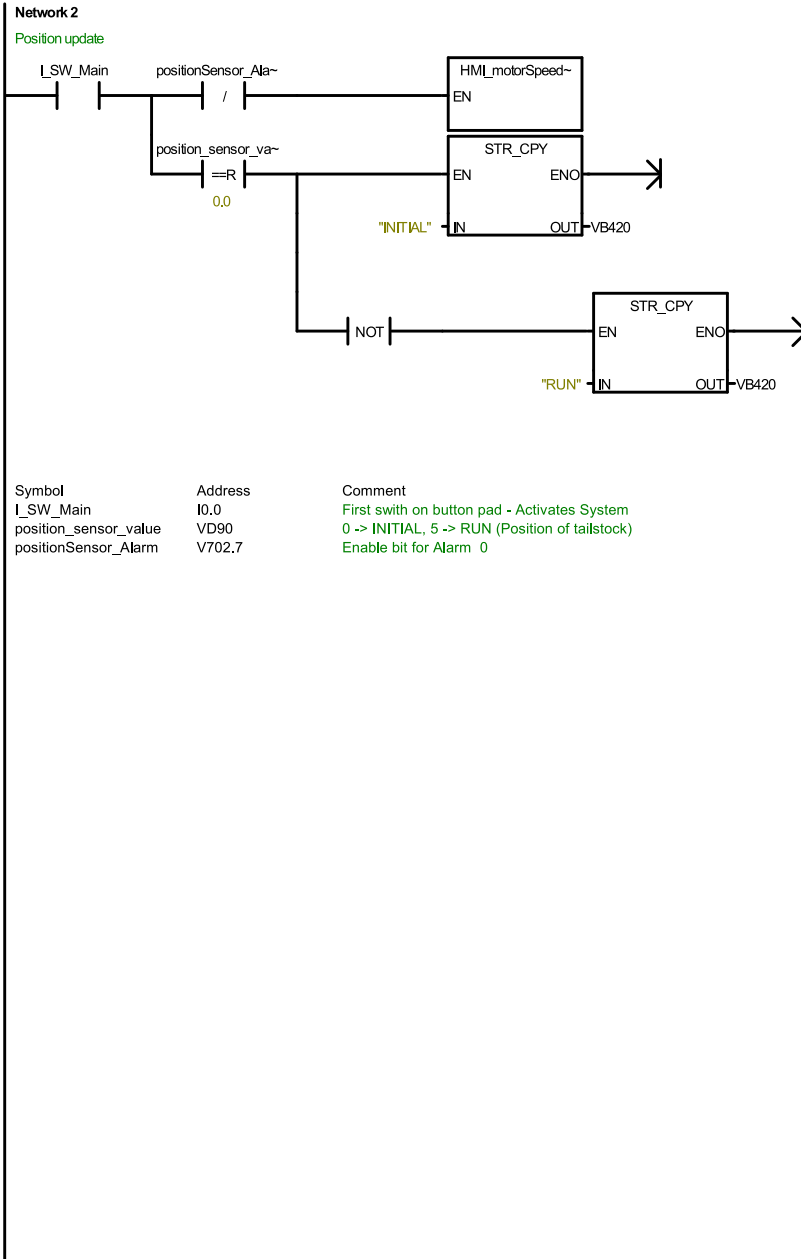
10 / 22

friction_welding_version_8_stef / HMI_main_display (SBR9)



Symbol	Address	Comment
DRIVER_POWER_SUPP	Q0.0	HIGH -> Enables Main power supply, LOW -> Disables Main power supply
LY		
driverReady	T62	Time for driver initialization
I_SW_Main	I0.0	First switch on button pad - Activates System
I_SW_motor_enable	I0.3	Fourth on button pad - Enables motor
MotorEnabled_state	M0.1	Motor is enabled state (M bit-memory area)

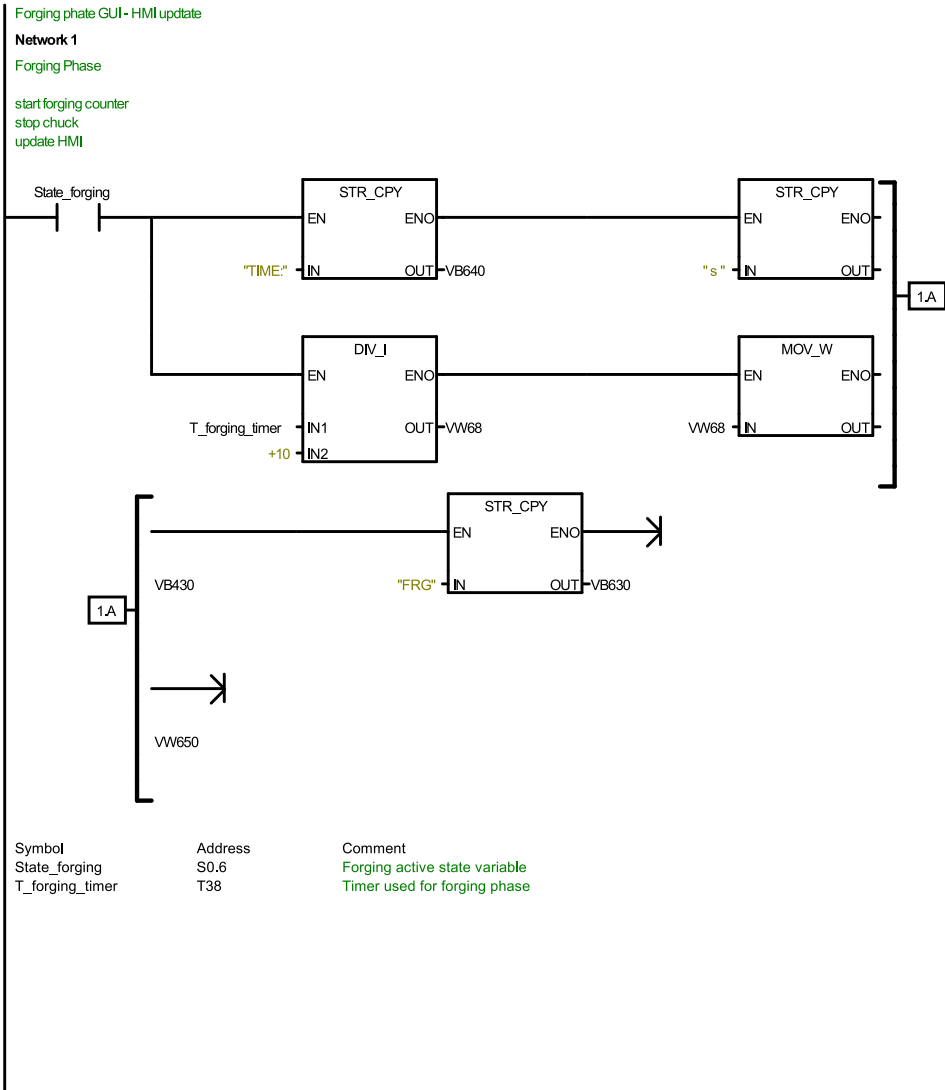
friction_welding_version_8_stef / HMI_main_display (SBR9)



friction_welding_version_8_stef / Forging_GUI (SBR11)

Forging_GUI (SBR11)

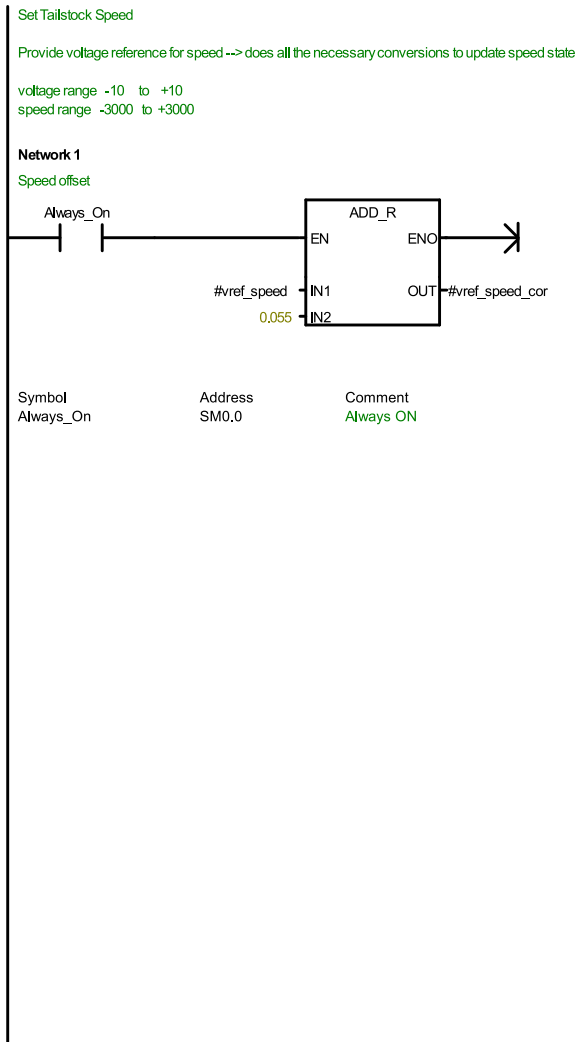
Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
	TEMP		



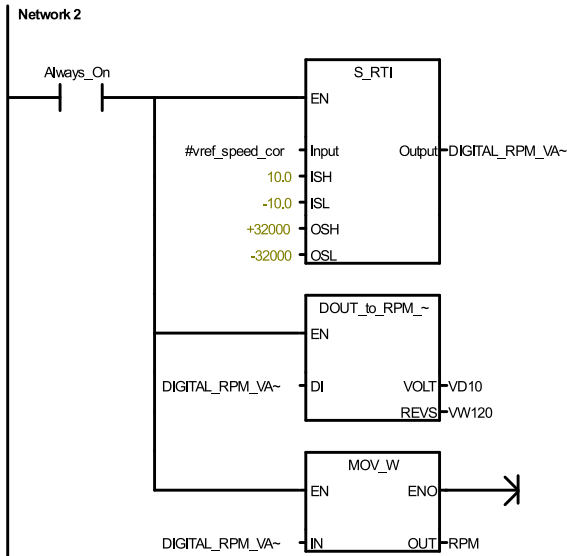
friction_welding_version_8_stef / SetTailstockSpeed (SBR12)

SetTailstockSpeed (SBR12)

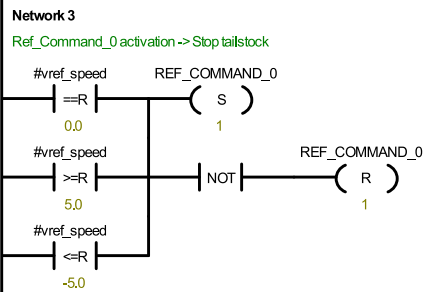
Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
LD0 vref_speed	IN	REAL	
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
LD4 vref_speed_cor	TEMP	REAL	
	TEMP		



friction_welding_version_8_stef / SetTailstockSpeed (SBR12)



Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON
DIGITAL_RPM_VALUE	VW100	
RPM	AQW4	Analog Output - Motor RPM



Symbol	Address	Comment
REF_COMMAND_0	Q0.3	HIGH -> A reference equal to 0 is introduced to the driver

friction_welding_version_8_stef / forceControl (SBR13)

forceControl (SBR13)

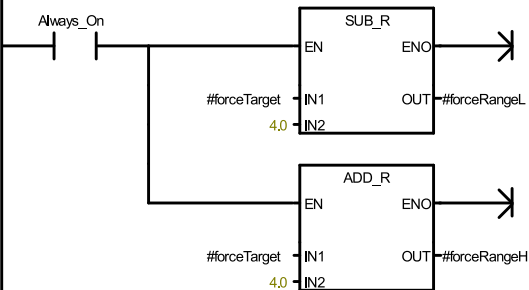
Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
LD0	forceSignal	IN	REAL
LD4	forceTarget	IN	REAL
LD8	motorSpeedTarget	IN	REAL
LW12	mode	IN	INT
	IN		
	IN_OUT		
	OUT		
	OUT		
LD14	forceRangeH	TEMP	REAL
LD18	forceRangeL	TEMP	REAL
LD22	motorSpeed	TEMP	REAL
LD26	targetForceDif	TEMP	REAL
	TEMP		

Force Control

- forceSignal -> Force value from force sensor in N
- forceTarget -> Desired force value
- motorSpeedTarget -> Speed reference value
- mode -> Type of control [1 -> 3 speed stages, 2 -> 10 speed stages, 3 -> constant speed] (Default = 1)

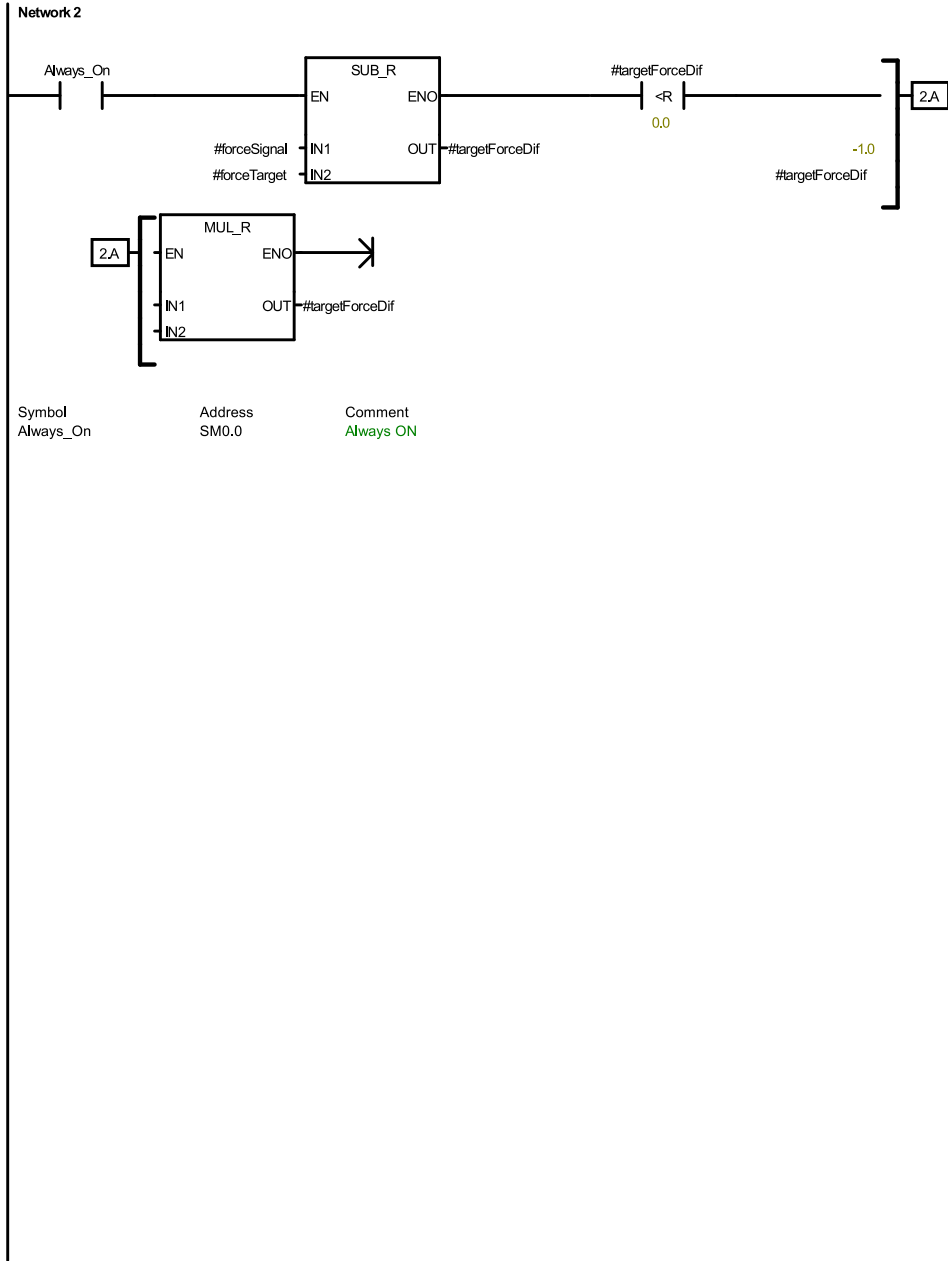
Network 1

Set 0 speed zone

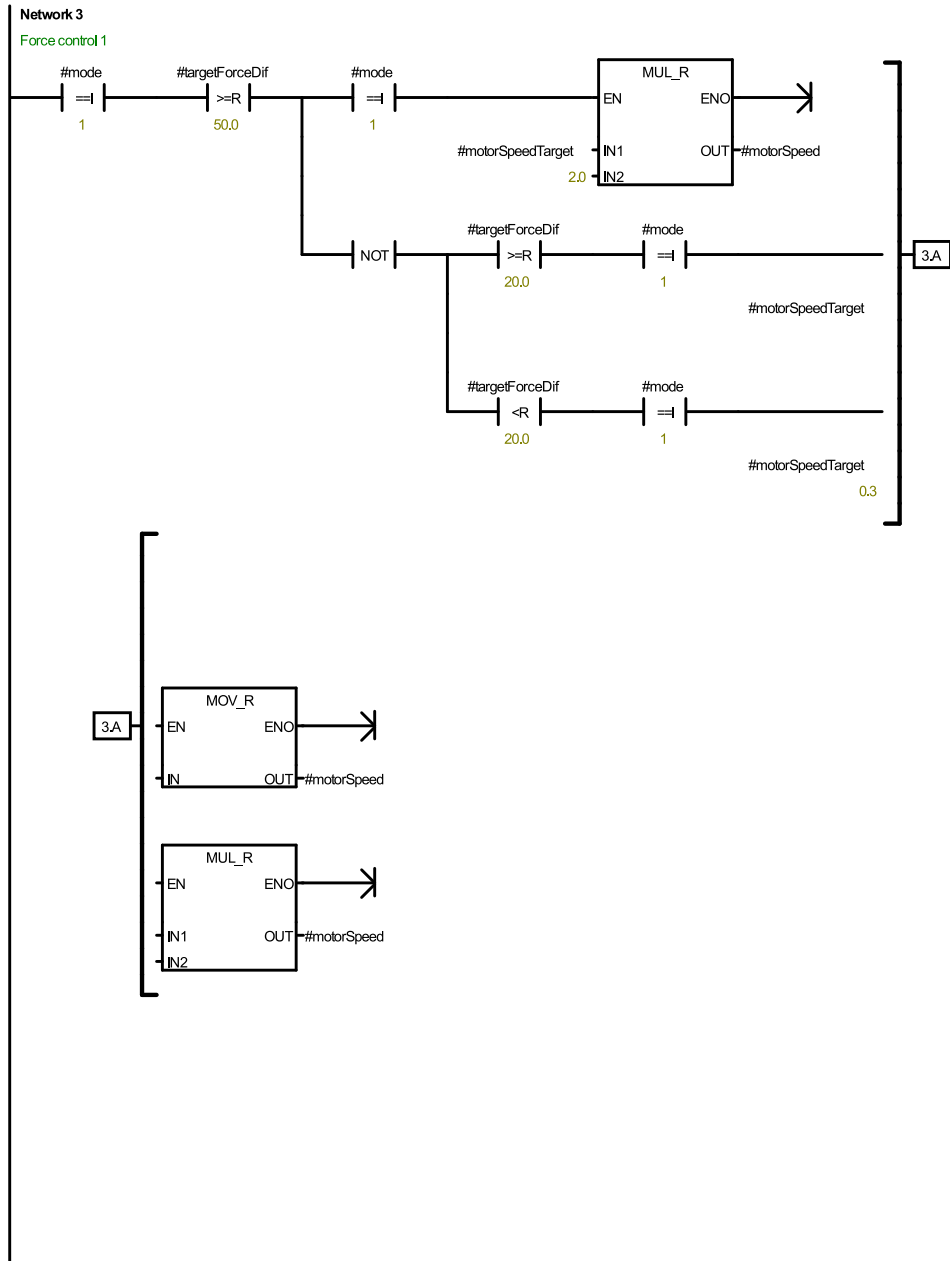


Symbol	Address	Comment
Always_On	SM0.0	Always ON

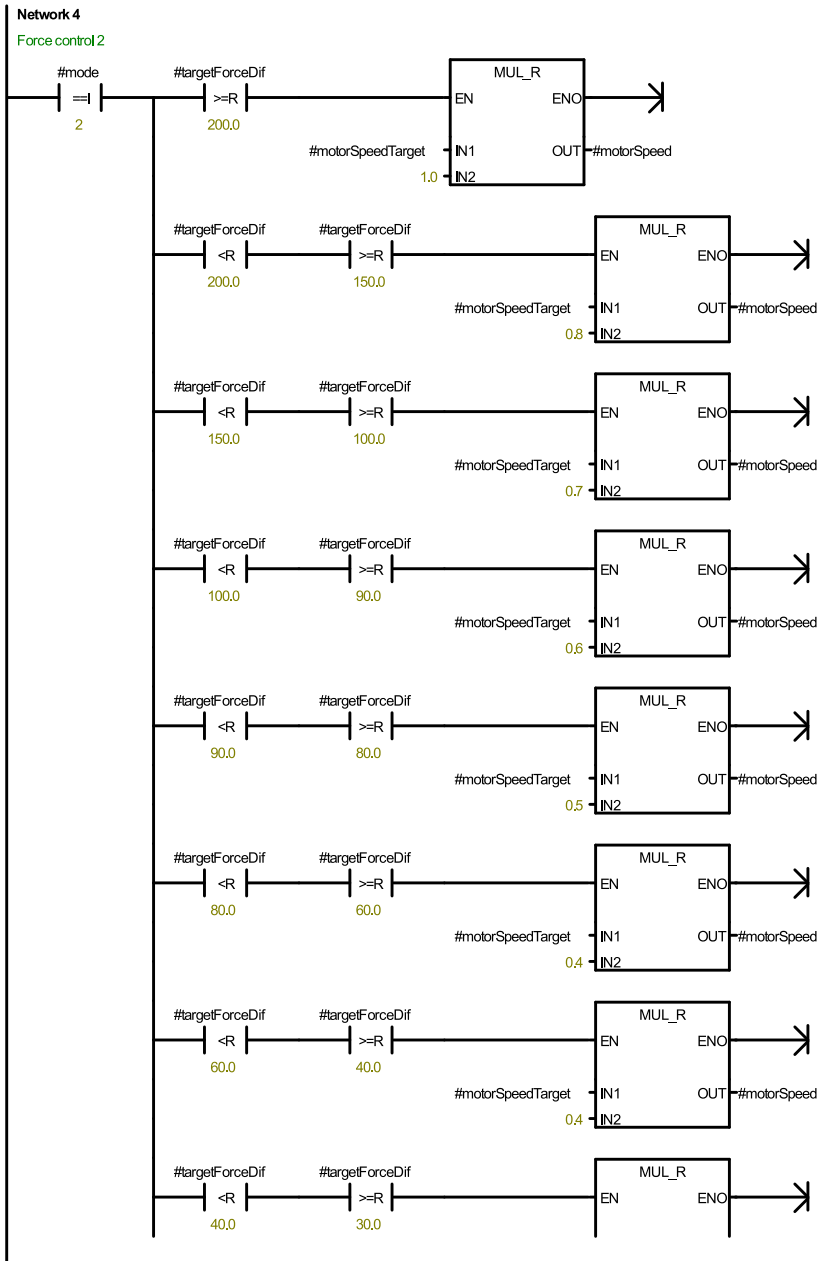
friction_welding_version_8_stef / forceControl (SBR13)



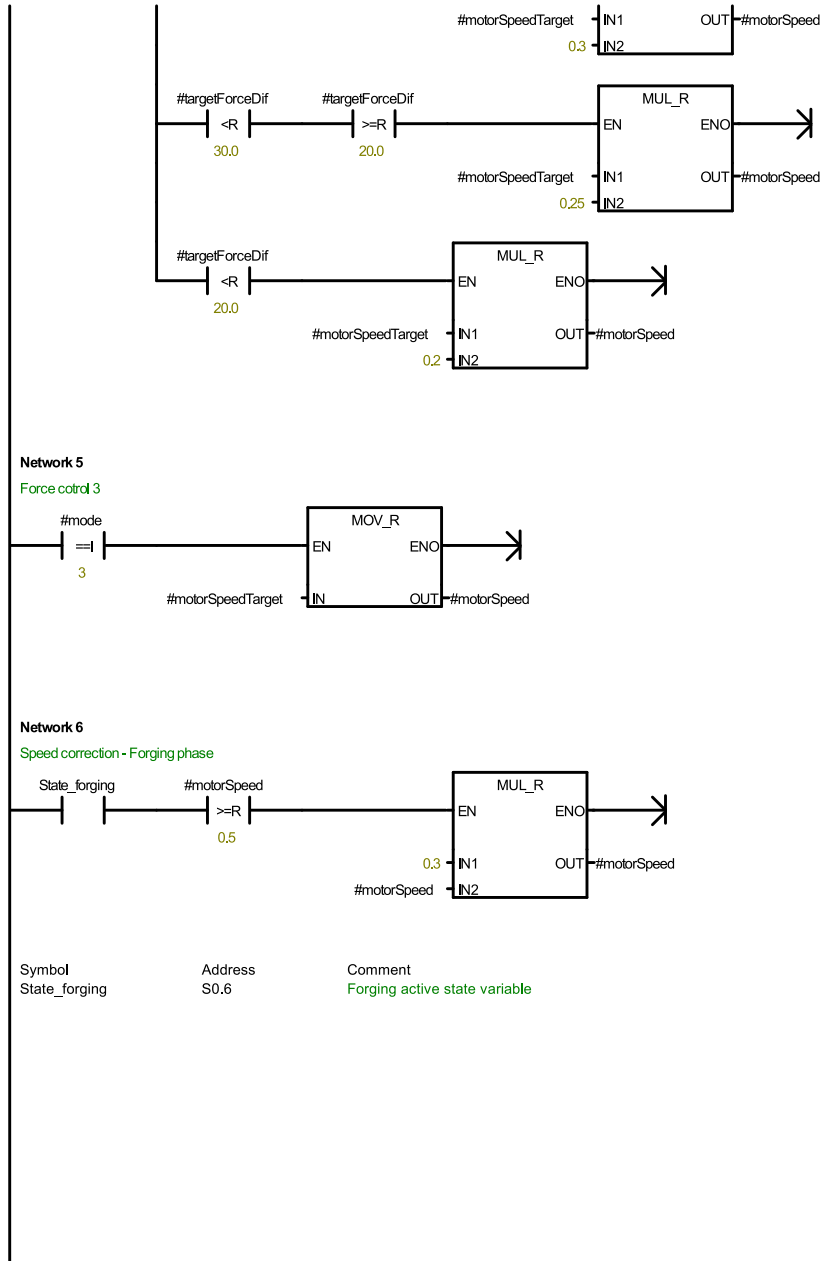
friction_welding_version_8_stef / forceControl (SBR13)



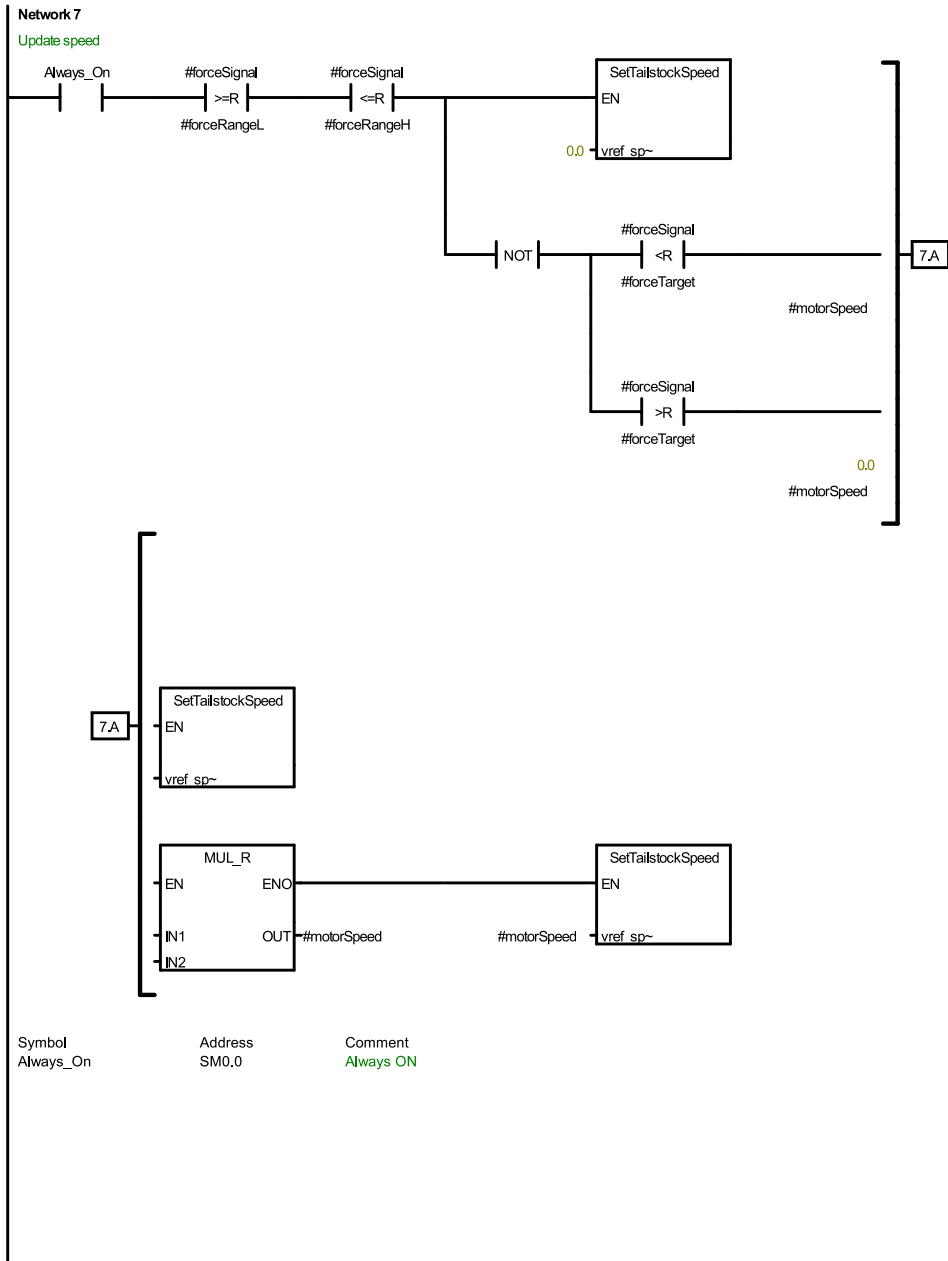
friction_welding_version_8_stef / forceControl (SBR13)



friction_welding_version_8_stef / forceControl (SBR13)



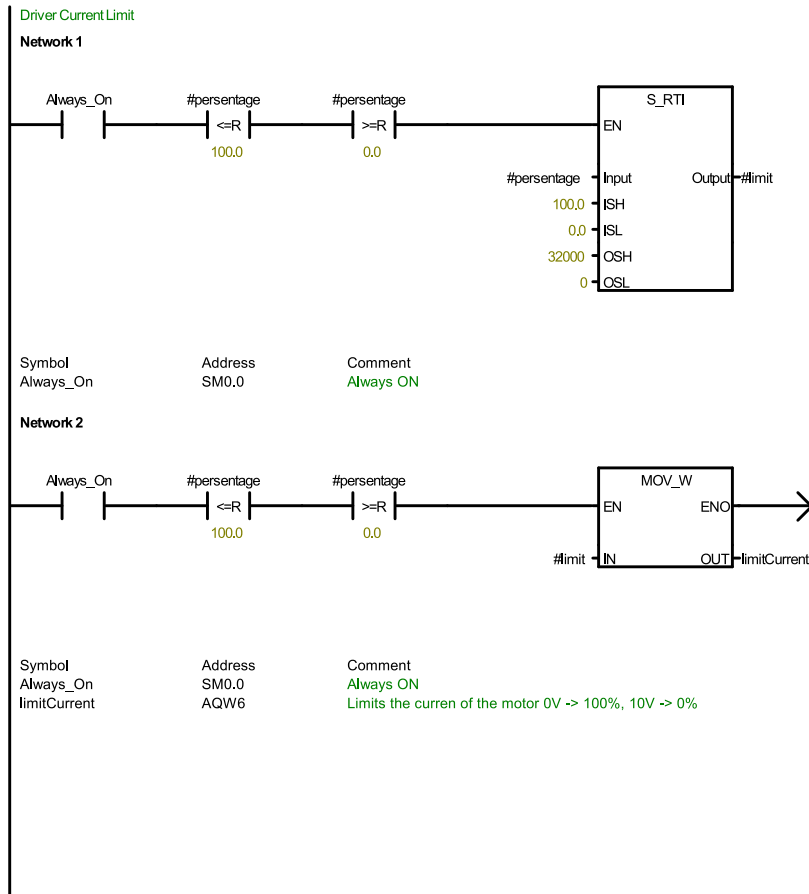
friction_welding_version_8_stef / forceControl (SBR13)



friction_welding_version_8_stef / current_limit (SBR14)

current_limit (SBR14)

Symbol	Var Type	Data Type	Comment
EN	IN	BOOL	
LD0	percentage	IN	REAL
		IN	
		IN	
		IN_OUT	
		OUT	
		OUT	
		OUT	
		OUT	
		OUT	
LW4	limit	TEMP	INT
		TEMP	
		TEMP	



Παράρτημα Γ – Αποτελέσματα δοκιμής αντοχής PVC σε εφελκυσμό

Δοκίμιο PVC

Δοκιμή Εφελκυσμού (Tension Test)

Company	Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Laboratory Name	Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών
Comment	Μηχανικές Δοκιμές
Operator ID	Παναγιώτης Ιωάννης
Rate 1	5.00000 mm/min
Geometry	Circular
Length	40.00000 mm
Thickness	2.14400 mm
Width	6.58300 mm

Specimen	Maximum Tensile stress (MPa)	Tensile strain at Maximum Tensile stress (mm/mm)	Tensile extension at Maximum Tensile stress (mm)
1	18.77845	0.13165	5.28590
3	19.73354	0.22711	9.08590
4	17.27564	0.05941	2.42760
6	17.06495	0.25797	10.31930
7	20.37963	0.10158	4.11140
9	19.05935	0.07255	2.93590

