

ΜΑΥΡΙΚΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

Σχεδιασμός και ανάπτυξη
συστήματος χαμηλού κόστους για
τη ρύθμιση της τάνυσης ταινίας
σε κατεργασία διαμόρφωσης με
ράουλα

Τομέας: Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Επιβλέπων: Μπενάρδος Πανώριος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2021



ΕΘΝ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓ. ΣΧΟΛΗ

MAVRIKOS STEFANOS

Design and development of a low-cost system for web tension control in a roll forming process

Section: Manufacturing Technology

Supervisor: Benardos Panorios, Assistant Professor NTUA

Athens 2021



SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Πανώριο Μπενάρδο, για την αγαστή συνεργασία μας και την ευκαιρία που μου έδωσε στα πλαίσια των σπουδών μου να αντιμετωπίσω ένα πραγματικό πρόβλημα. Μακαρίζω εαυτόν που κλήθηκα να σχεδιάσω και να αναπτύξω μία διάταξη που θα εγκατασταθεί στο πεδίο και πρόκειται να βελτιώσει την απόδοση της παραγωγής, κι όλα αυτά μέσα από το προστατευμένο ακαδημαϊκό περιβάλλον.

Στα πλαίσια της προετοιμασίας της διπλωματικής μου εργασίας, ήρθα σε επαφή με πλήθος διαφορετικών ανθρώπων, ο καθένας από τους οποίους συνέβαλε με τον δικό του τρόπο στην ολοκλήρωση του παρόντος πονήματος. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Απ. Γεωργόπουλο, προμηθευτή δυναμοκυψελών, Π. Μπαλάσκα, μηχανουργό, και Π. Σιφεριάν, περιελικτή. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και πιο συγκεκριμένα τους κ. Π. Ροβολή, μέλος ΕΔΙΠ ΕΜΠ, και κ. Π. Ζάννη μέλος ΕΤΕΠ ΕΜΠ. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ οφείλω στο προσωπικό της βιομηχανίας, ο εξοπλισμός της οποίας χρησιμοποιήθηκε ως αναφοράς στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, για τη συνεχή επικοινωνία και συνεργασία.

Για το τέλος άφησα την οικογένειά μου, η οποία με στηρίζει με κάθε μέσο και τρόπο σε κάθε μου βήμα, μικρό ή μεγαλύτερο, και πάντα προσπαθεί να με καθοδηγήσει προς την καλύτερη πορεία. Χαίρομαι και νιώθω υπερήφανος που αποτελώ πλέον μέρος της οικογενειακής παράδοσης στον τομέα των μηχανικών, ως η 4η γενιά, κάτι που θα ήταν αδύνατο χωρίς την στήριξη, υλική και ψυχική, της οικογένειάς μου. Χρήστο, Όλγα, Ελευθερία σας ευχαριστώ!

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.

Μαυρίκος Στέφανος

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Περίληψη	9
Abstract	10
1 Εισαγωγή	11
1.1 Αυτοματοποίηση	11
1.2 Διαμόρφωση με ράουλα (Roll forming)	13
1.3 Περιγραφή προβλήματος	15
1.4 Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	19
1.5 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	20
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση & έρευνα αγοράς	21
3 Προκαταρκτικός σχεδιασμός γενικής διάταξης.....	25
3.1 Μεθοδολογία σχεδιασμού	25
3.2 Εντοπισμός ευκαιρίας και έναρξη διαδικασίας.....	26
3.3 Ανάπτυξη ιδέας	27
3.3.1 Μεθοδολογία ανάπτυξης ιδέας	27
3.3.2 Δημιουργία ιδεών.....	28
3.3.3 Επιλογή ιδέας	33
3.4 Σχεδιασμός σε επίπεδο συστήματος.....	35
4 Λεπτομερής σχεδιασμός σταθμού μέτρησης τάνυσης.....	37
4.1 Υπολογισμός κύριων διαστάσεων.....	37
4.2 Προδιαγραφή δυναμοκυψέλης	42
4.3 Επιλογή δυναμοκυψέλης.....	43
4.4 Λεπτομερής σχεδιασμός ραούλων	45
4.5 Λεπτομερής σχεδιασμός πλαισίου σταθμού μέτρησης τάνυσης.....	45
4.6 Διάταξη απεμπλοκής δυναμοκυψέλης.....	48
4.7 Ηλεκτρονικό υποσύστημα σταθμού μέτρησης τάνυσης.....	49
5 Βαθμονόμηση και αξιολόγηση λειτουργίας σταθμού μέτρησης τάνυσης	51
6 Σχεδιασμός συστήματος αυτομάτου ελέγχου.....	61
6.1 Διαδικασία σχεδιασμού συστήματος αυτομάτου ελέγχου	61
6.2 Μοντελοποίηση εγκατάστασης	62
6.3 Περιγραφή ελεγκτή	69
6.4 Επιλογή ηλεκτρικού κινητήρα.....	71
6.5 Προσομοίωση συστήματος αυτομάτου ελέγχου	78
7 Συμπεράσματα και μελλοντική πορεία.....	85

7.1	Συμπεράσματα	85
7.2	Μελλοντική επέκταση	86
	Κατάλογος Εικόνων.....	89
	Κατάλογος Πινάκων.....	91
	Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	92
8	Βιβλιογραφία.....	93
	Παράρτημα Α.....	95
	Παράρτημα Β.....	99
	Παράρτημα Γ	
	Παράρτημα Δ	

Περίληψη

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα προϊόντων διαμόρφωσης με ράουλα, μίας κατεργασίας με πλήθος εφαρμογών, είναι η τάνυση της ταινίας κατά τη διαμόρφωσή της, η τιμή της οποίας στη συνήθη περίπτωση ρυθμίζεται χειροκίνητα. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός ευέλικτου συστήματος χαμηλού κόστους για την αυτόματη ρύθμιση της τάνυσης. Ως αναφορά χρησιμοποιείται γραμμή παραγωγής για «φυλλαράκι» αλουμινίου. Το πρόβλημα αποδομείται στην μέτρηση της τάνυσης και στη ρύθμιση της τάνυσης. Με συστηματικό τρόπο αποφασίστηκε η μέτρηση της τάνυσης να πραγματοποιείται με χρήση δυναμοκυψελών απλού σημείου σε συνδυασμό με τρία ράουλα για την κατάλληλη παραμόρφωση της ταινίας και για το λόγο αυτό εκπονήθηκαν τα σχέδια σταθμού μέτρησης τάνυσης και πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση και υπολογισμός του σφάλματος μέτρησης των δυναμοκυψελών. Η ρύθμιση της τάνυσης αποφασίστηκε να πραγματοποιείται με οδήγηση της ανέμης από ηλεκτρικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος, η τάση τροφοδοσίας του οποίου θα ελέγχεται από Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή, που θα υλοποιηθεί σε μικροελεγκτή AVR ATmega 328. Η ρύθμιση των παραμέτρων του έγινε στο περιβάλλον Matlab/Simulink/Simscare, αφού πρώτα αναπτύχθηκε μοντέλο της πραγματικής εγκατάστασης και υπολογίστηκε η ελάχιστη απαραίτητη ισχύς του κινητήρα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης, το σύστημα που σχεδιάστηκε πληροί όλες τις προδιαγραφές που τέθηκαν, το κόστος του είναι περίπου το ένα δέκατο ενός αντίστοιχου εμπορικού συστήματος και μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές γραμμές παραγωγής, επιτρέποντας την περαιτέρω αυτοματοποίησή τους.

Abstract

Web tension is one of the most important factors in the quality of roller-formed products. Usually, the web tension is manually regulated. The scope of this diploma thesis is the design and the development of a flexible low-cost system for automatic tension regulation. A roller shutter product line is used as a reference. The problem is deconstructed in tension measurement and tension regulation. It was systematically decided that the tension measurement take place by the use of single point load cells in combination with three rollers for the necessary web deformation and for this reason the drawings of the tension measurement station were prepared and the load cells were calibrated and the measurement error was calculated. The tension regulation was decided to take place by the unwinder driving by a direct current motor, whose voltage is controlled by a Proportional-Integral-Derivative Controller implemented in an AVR ATmega 328 microcontroller. The tuning was done in Matlab/Simulink/Simscape, after the system modelling and the calculation of the minimum motor power. According to the simulation results, the designed system meets the specifications, its cost is the 10% the one of a commercial system and it is installed in different production lines, allowing their automation.

1 Εισαγωγή

1.1 Αυτοματοποίηση

Ο όρος αυτοματοποίηση – προερχόμενος από την ελληνική λέξη αυτόματον που προσδιορίζει κάτι που «αυτενεργεί» - ορίζεται γενικά ως η προσέγγιση που δίνει σε μηχανές τη δυνατότητα να λειτουργούν βάσει μιας προκαθορισμένης ακολουθίας διαδικασιών με ελάχιστη ή καθόλου ανθρώπινη παρέμβαση, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό τόσο για την εκτέλεση όσο και για τον έλεγχο αυτών των διαδικασιών [1].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [1], οι βασικοί στόχοι της αυτοματοποίησης και τα πλεονεκτήματα που πηγάζουν από αυτή είναι:

- Αύξηση του ρυθμού παραγωγής
- Μείωση του κόστους παραγωγής, καθώς η ανθρώπινη εργασία μειώνεται, και κατ' επέκταση μειώνεται το κόστος εργασίας και σφάλματα που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα, η οργάνωση της παραγωγής γίνεται αποτελεσματικότερη, η χρήση των μηχανών πιο αποδοτική, εξοικονομείται χώρος στο περιβάλλον παραγωγής και επιτυγχάνεται αποδοτικότερη χρήση των υλικών
- Βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος καθώς αυξάνεται η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα των παραγωγικών διεργασιών
- Βελτίωση των συνθηκών υγιεινής και ασφάλειας, ιδιαίτερα όταν η φύση της παραγωγής απαιτεί εργασία εντός επικίνδυνου περιβάλλοντος και υπό ανθυγιεινές συνθήκες για τους εργαζομένους

Στον αντίποδα, ως μειονεκτήματα της αυτοματοποίησης αναφέρονται [2]:

- το υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης
- η δυσκολία εύρεσης εξειδικευμένου προσωπικού και το κόστος εκπαίδευσης του υπάρχοντος
- η γνώση των αρχών λειτουργίας και συντήρησης
- οι υψηλότεροι χρόνοι και τα υψηλότερα κόστη συντήρησης
- η μείωση της αξιοπιστίας των συστημάτων
- η μείωση της ευελιξίας των παραγωγικών διεργασιών

Αυτοματοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε παραγωγική διεργασία, από τη διαχείριση των πρώτων υλών ως και την παραγωγή και διαχείριση του τελικού προϊόντος. Ωστόσο, κάθε απόφαση που σχετίζεται με αυτοματοποίηση μίας νέας ή μίας υπάρχουσας εγκατάστασης πρέπει να λαμβάνεται με γνώμονα τα εξής [1]:

1. Τύπος κατασκευαζόμενου προϊόντος
2. Απαιτούμενος όγκος και ρυθμός παραγωγής
3. Επιλογή συγκεκριμένων φάσεων για αυτοματοποίηση, εάν δεν πρόκειται να αυτοματοποιηθεί στο σύνολό της η παραγωγική διαδικασία
4. Επίπεδο κατάρτισης και δεξιοτήτων του διαθέσιμου ανθρώπινου δυναμικού
5. Προβλήματα αξιοπιστίας και συντήρησης
6. Οικονομικές συνιστώσες της διαδικασίας αυτοματοποίησης

Λαμβάνοντας υπόψη τους κινδύνους και τα μειονεκτήματα της αυτοματοποίησης, αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιο πρόσφορη ή επιθυμητή η επιλεκτική αυτοματοποίηση παρά η πλήρης αυτοματοποίηση. Η απόφαση για το επίπεδο αυτοματοποίησης μιας παραγωγικής διεργασίας θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη το ανθρώπινο δυναμικό που θα κληθεί να προετοιμάσει, ρυθμίσει, χειριστεί, συντηρήσει και συνεργαστεί με τις μηχανές, ώστε η τεχνολογία να διευκολύνει την ανθρώπινη εργασία και όχι να τη δυσκολεύει.

Ως προς το βαθμό ευελιξίας, η αυτοματοποίηση μπορεί να διακριθεί σε σταθερή αυτοματοποίηση (hard automation), προγραμματιζόμενη αυτοματοποίηση (programmable automation) και σε ευέλικτη αυτοματοποίηση (flexible automation) [1] [2].

Η αυτοματοποίηση σταθερής χωροταξίας (fixed-position automation) συνίσταται σε συστήματα που είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα για την παραγωγή ενός τυποποιημένου προϊόντος, και υλοποιούνται συνήθως μέσω σταθερής αυτοματοποίησης. Αν και υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης του μεγέθους του προϊόντος ή των παραμέτρων της κατεργασίας, τέτοια συστήματα είναι «εξειδικευμένα» για ένα είδος παραγωγής και ως εκ τούτου στερούνται ευελιξίας [3]. Ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από υψηλή αρχική επένδυση, με αποτέλεσμα να είναι αποδοτικά και οικονομικά συμφέροντα για μεγάλους όγκους παραγωγής. Παραδείγματα αυτοματοποίησης σταθερής χωροταξίας συναντώνται κατά κόρον στην αυτοκινητοβιομηχανία και στη χημική βιομηχανία.

Η προγραμματιζόμενη αυτοματοποίηση είναι κατάλληλη για παραγωγή προϊόντων σε παρτίδες. Πριν την παραγωγή μιας νέας παρτίδας οι μηχανές επαναπρογραμματίζονται προκειμένου να προσαρμοστούν στην παραγωγή ενός διαφορετικού προϊόντος. Η διαδικασία αυτή απαιτεί χρόνο με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο νεκρός χρόνος της παραγωγής και να μειώνεται ο ρυθμός παραγωγής. Καλό παράδειγμα τέτοιου τύπου αυτοματοποίησης είναι οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου και τα βιομηχανικά ρομπότ.

Η ευέλικτη αυτοματοποίηση μπορεί να θεωρηθεί επέκταση της προηγούμενης κατηγορίας. Ο τύπος αυτός καλείται να υποσκελίσει το κύριο μειονέκτημα της προγραμματιζόμενης αυτοματοποίησης που είναι το υψηλό ποσοστό νεκρού χρόνου. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία επαναπρογραμματισμού να πραγματοποιείται σε υπολογιστή, χωρίς τη χρήση του εξοπλισμού παραγωγής (off-line). Έτσι, τα προϊόντα δεν χρειάζεται πλέον να ταξινομούνται σε παρτίδες και η παραγωγή μπορεί να αποτελείται από ένα μίγμα διαφορετικών προϊόντων.



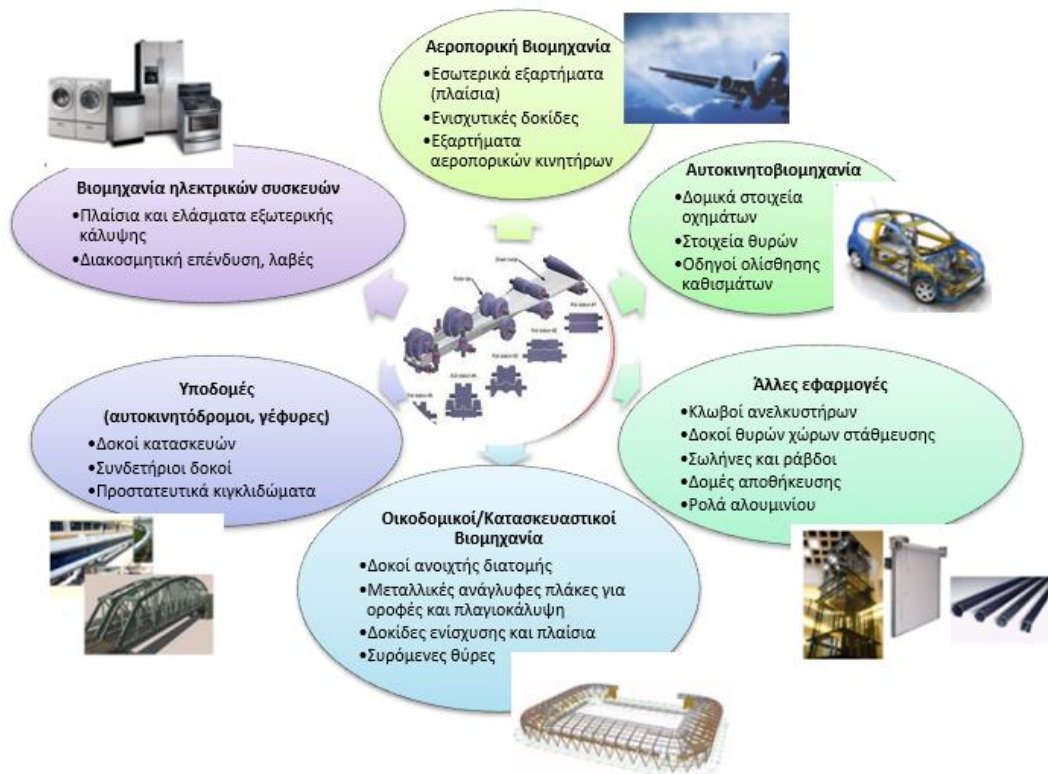
Εικόνα 1.1: Δομή σύγχρονων συστημάτων παραγωγής σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62264 (προσαρμοσμένη από [3])

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων που υλοποιούν την αυτοματοποίηση, ως αναπόσπαστο τμήμα των συστημάτων παραγωγής, περιγράφεται από πρότυπα όπως το ISA-95/IEC 62264, που είναι ευρύτερα διαδεδомένο και εφαρμοσμένο στην πράξη [3]. Τυπικά, τα σύγχρονα συστήματα παραγωγής είναι δομημένα σε πέντε επίπεδα (Εικόνα 1.1). Η αυτοματοποίηση εντάσσεται στα επίπεδα 1 και 2.

1.2 Διαμόρφωση με ράουλα (Roll forming)

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [4], η διαμόρφωση με ράουλα κατατάσσεται στην κατηγορία των κατεργασιών διαμόρφωσης επιπέδου ελάσματος με περιστροφική κίνηση των εργαλείων. Πιο αναλυτικά, η διαμόρφωση με ράουλα είναι η κατεργασία συνεχούς κάμψης επιπέδου ελάσματος ή επίπεδης ταινίας μετάλλου για την παραγωγή επιμηκών προϊόντων ομοιόμορφης διατομής. Για το σκοπό αυτό το έλασμα ή η ταινία διέρχονται μεταξύ μίας σειράς ζευγών ραούλων κατάλληλου σχήματος [5].

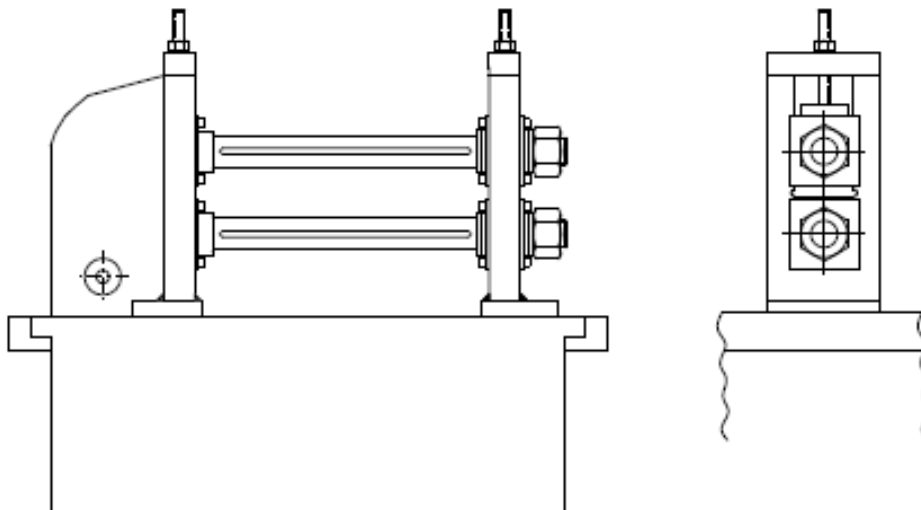
Τα προϊόντα διαμόρφωσης με ράουλα παρουσιάζουν ένα εξαιρετικά ευρύ πεδίο εφαρμογών [5] [6]. Μερικές από τις βιομηχανίες που συνήθως χρησιμοποιούν τη διαμόρφωση με ράουλα στην παραγωγική τους διαδικασία είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορική βιομηχανία, η βιομηχανία οικιακών συσκευών, οι κατασκευές/κτιριακός εξοπλισμός και οι υποδομές. Στην Εικόνα 1.2 φαίνονται τα κυριότερα πεδία εφαρμογής της διαμόρφωσης με ράουλα και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα ανά πεδίο.



Εικόνα 1.2: Εφαρμογές της κατεργασίας διαμόρφωσης με ράουλα (προσαρμοσμένη από [6])

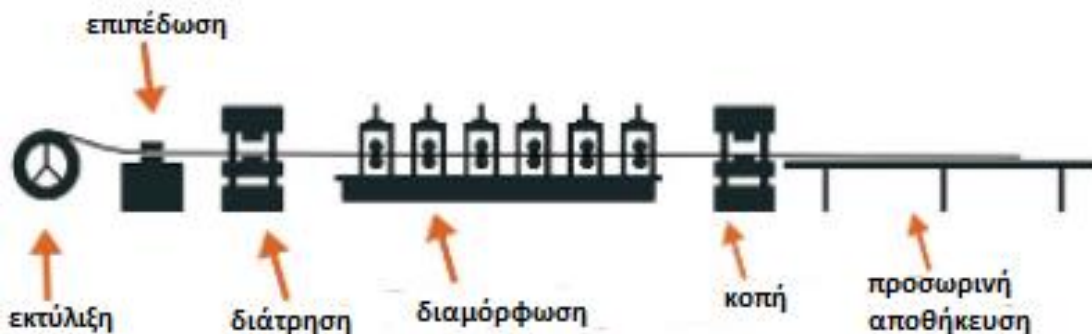
Η διαμόρφωση με ράουλα είναι κατάλληλη για μαζική παραγωγή ποικίλων επιμηκών προϊόντων περίπλοκης διατομής κατασκευασμένα από ένα ευρύ φάσμα μεταλλικών υλικών διαφόρων παχών χάρη στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Τα σημαντικότερα από αυτά τα είναι το χαμηλό κόστος επένδυσης σχετικά με άλλες κατεργασίες διαμόρφωσης διατομών όσον αφορά τη μαζική παραγωγή.

Σύμφωνα με τη Dahlroll [5], κορυφαίο κατασκευαστή εξοπλισμού, η διαμόρφωση με ράουλα είναι οικονομικά αποδοτική για παραγωγή μεγαλύτερη από 3000 με 6000 μέτρα προϊόντος ετησίως. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ο υψηλός ρυθμός παραγωγής καθώς η ταχύτητα παραγωγής κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 30 και 60 m/min. Επιπλέον, ο εξοπλισμός απαιτεί χαμηλό κόστος συντήρησης και παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά την αλλαγή και την προσαρμογή διαφορετικών ραούλων διαμόρφωσης. Ακόμη, πολύ σημαντικό είναι ότι δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το μήκος του προϊόντος, το οποίο καθορίζεται από το μήκος της διαθέσιμης πρώτης ύλης. Οπότε το τελικό προϊόν μπορεί να έχει κάθε φορά το μήκος που εξυπηρετεί περισσότερο τον κατασκευαστή ή επιθυμεί ο πελάτης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η διαστατική και γεωμετρική ακρίβεια των προϊόντων, καθώς η κατεργασία παρουσιάζει αρκετά μικρό και επαναλαμβανόμενο σφάλμα. Τέλος, η διαμόρφωση με ράουλα μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με κατεργασίες διάτρησης, διαμόρφωσης ανάγλυφου ή κοπής, διαμορφώνοντας με αυτό τον τρόπο γραμμές συνεχούς παραγωγής και μειώνοντας ταυτόχρονα το απορριπτόμενο υλικό. Παρόλα αυτά, μέσω διαμόρφωσης με ράουλα μπορούν να παραχθούν μόνο προϊόντα σταθερής διατομής και ανοιχτών άκρων. Όμως, ο βασικότερος περιορισμός της συγκεκριμένης κατεργασίας έγκειται στο γεγονός ότι, λόγω της περιπλοκότητας που παρουσιάζει, που είναι ανάλογη της περιπλοκότητας της διατομής του προϊόντος, απαιτείται ιδιαίτερη εξειδίκευση



Εικόνα 1.3: Τυπικός σταθμός ραούλων διαμόρφωσης (προσαρμοσμένη από [7])

και εμπειρία για το σχεδιασμό νέων προϊόντων και του αντίστοιχου εξοπλισμού καθώς και για τη ρύθμιση και το χειρισμό των γραμμών παραγωγής.



Εικόνα 1.4: Γραμμή παραγωγής βασισμένη στη διαμόρφωση με ράουλα (προσαρμοσμένη από το διαδίκτυο)

Η καρδιά μίας παραγωγικής διάταξης διαμόρφωσης με ράουλα είναι η μηχανή διαμόρφωσης («ραουλιέρα» στην καθομιλουμένη) [7]. Η μηχανή αυτή συνίσταται από ένα πλαίσιο, το οποίο φέρει τα ράουλα που επιτελούν την κατεργασία καθώς και τον απαιτούμενο εξοπλισμό. Το ζεύγος – ή η τετράδα- τέτοιων ραούλων αποτελούν ένα σταθμό (stand), όπως αποτυπώνεται Εικόνα 1.3. Πολλοί τέτοιοι σταθμοί αποτελούν μία ομάδα (group) και στο ίδιο πλαίσιο μπορεί να τοποθετηθεί διαφορετική ομάδα ραούλων κάθε φορά για την παραγωγή διαφορετικού προϊόντος, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την ευελιξία της παραγωγής. Τα ράουλα μπορούν, συνδεδεμένα με σύστημα οδοντωτών τροχών ή αλυσσοτροχών, να στρέφονται από έναν κεντρικό ηλεκτροκινητήρα ή κάθε ζεύγος ραούλων να στρέφεται από διαφορετικό ηλεκτροκινητήρα. Η μηχανή διαμόρφωσης συνδυάζεται με άλλες μηχανές που κατεργάζονται την πρώτη ύλη ή το τελικό προϊόν, ώστε να προκύψει μία γραμμή συνεχούς παραγωγής, όπως αυτή που αποτυπώνεται σχηματικά στην Εικόνα 1.4.

Όταν το πλάτος του προϊόντος είναι σχετικά μικρό, η πρώτη ύλη εισέρχεται στην παραγωγική διεργασία σε μορφή ρολού (coil), ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά και η εισαγωγής της στην παραγωγική διεργασία. Η μηχανή που πραγματοποιεί την εκτύλιξη της ταινίας ονομάζεται ανέμη (unwinder ή uncoiler ή decoiler) και ουσιαστικά συνίσταται από μία πακτωμένη βάση που φέρει οριζόντιο – τις πλείστες των περιπτώσεων- άξονα πάνω στον οποίο προσδένεται το ρολό της πρώτης ύλης και μηχανισμό ελέγχου της περιστροφής του.

1.3 Περιγραφή προβλήματος

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας ως αναφορά θεωρείται μία γραμμή παραγωγής, τελικό προϊόν της οποίας είναι «φυλλαράκι» αλουμινίου πληρωμένο με αφρό πολυουρεθάνης για την κατασκευή ρολών (rolling shutters), όπως αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 1.5, που στόχος τους είναι η προστασία παραθύρων και πορτών. Το τελικό προϊόν παράγεται από ταινία αλουμινίου, η οποία μορφοποιείται και πληρώνεται με πολυουρεθάνη σε μηχανή διαμόρφωσης με ράουλα.



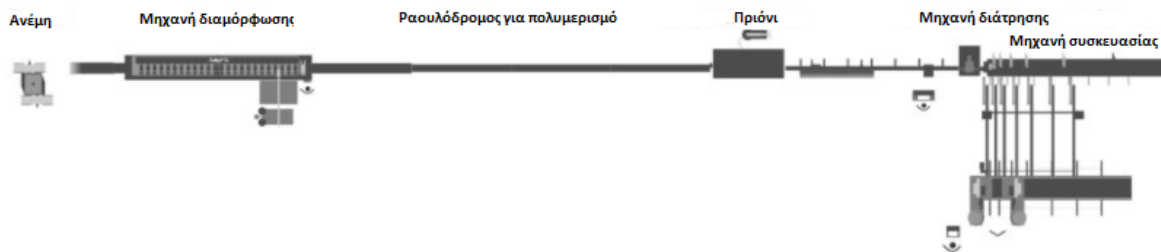
Εικόνα 1.5: «Φυλλαράκι» αλουμινίου με πλήρωση από αφρό πολυουρεθάνης για την κατασκευή ρολών (πηγή: dallan.com)

Πιο αναλυτικά, η ταινία εισέρχεται στην παραγωγική διαδικασία σε μορφή ρολού ταινίας αλουμινίου, που φέρει στη μία πλευρά προστατευτική έγχρωμη επίστρωση. Το ρολό τοποθετείται σε ανέμη. Κατά τη λειτουργία της γραμμής παραγωγής, η ταινία εκτυλίσσεται σταδιακά και εισέρχεται στη μηχανή διαμόρφωσης, όπου σταδιακά λαμβάνει το σχήμα του εξωτερικού περιβλήματος του προϊόντος. Κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης, στο εσωτερικό της ταινίας τοποθετείται αφρός πολυουρεθάνης. Επόμενο στάδιο της παραγωγής είναι η κοπή του συνεχούς προϊόντος σε επιθυμητό μήκος. Το πριόνι όμως απέχει μεγάλη απόσταση από τη μηχανή διαμόρφωσης, ώστε να πραγματοποιηθεί ο πολυμερισμός και η στερεοποίηση του αφρού πολυουρεθάνης ενόσω το προϊόν κινείται σε περικλειστο ραουλόδρομο. Έπειτα από την κοπή, δημιουργείται η διάτρηση που φέρει το τελικό

προϊόν στη μία του πλευρά και κατόπιν αποθηκεύεται προσωρινά ώστε στη συνέχεια να συσκευαστεί. Η κάτοψη μίας τέτοιας γραμμής παραγωγής αναπαρίσταται στην Εικόνα 1.6 .

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χωρίς βλάβη της γενικότητας, θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά μία υπάρχουσα γραμμή που παράγει «φυλλαράκι» αλουμινίου. Η διαφορά της γραμμής αυτής σε σχέση με την τυπική που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6 είναι ότι, πριν την εισαγωγή της στη μηχανή διαμόρφωσης, η ταινία θερμαίνεται στους 40-45 °C, για την αύξηση της διαμορφωσιμότητάς της.

Σύμφωνα με την εμπειρία και τη βιβλιογραφία [7] [8] [9], η τάση, δηλαδή η εφελκυστική τάση, της ταινίας επιδρά σημαντικά στην ποιότητα του τελικού προϊόντος καθώς επηρεάζει άμεσα την κατεργασία διαμόρφωσης. Όμως, εξαιτίας διαφόρων παραγόντων η τάση της ταινίας δεν παραμένει σταθερή κατά την εκτύλιξη του ρολού. Μερικοί από τους λόγους αυτούς, σε τυχαία σειρά κατάταξης, είναι:

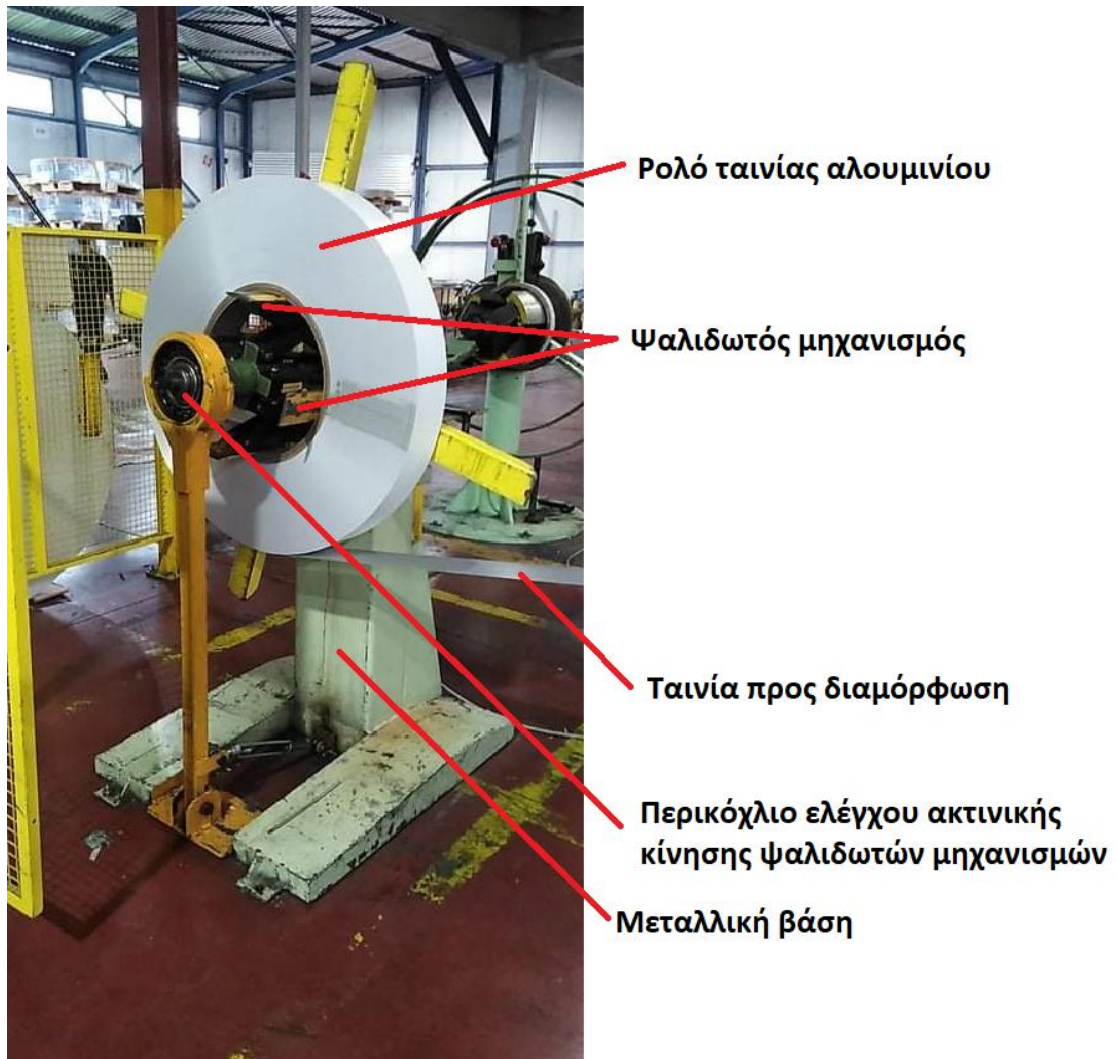


Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση κάτοψης γραμμής που παράγει «φυλλαράκι» αλουμινίου

(προσαρμοσμένο από dallan.com)

- Συνεχής μεταβολή της εξωτερικής διαμέτρου του ρολού κατά την εκτύλιξη. Έτσι, ο μοχλοβραχίονας της δύναμης έλξης της ταινίας μειώνεται συνεχώς με αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής που ασκείται στην άτρακτο. Ταυτόχρονα, εάν δεν παρέμβει ο χειριστής, η ροπή πέδησης που δημιουργείται στο δισκόφρενο παραμένει σταθερή. Για το λόγο αυτό, η δυναμική της εκτύλιξης μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της τάσης της ταινίας πριν την μορφοποίησής της.
- Μεταβολές στην ταχύτητα λειτουργίας της γραμμής παραγωγής, δηλαδή της ταχύτητας με την οποία κινείται η ταινία. Ο καθορισμός της ταχύτητας αυτής επαφίεται στη διακριτική ευχέρεια του χειριστή. Επιπλέον, μπορεί να σημειωθούν μικρές μεταβολές στην ταχύτητα που οφείλονται στη μηχανή διαμόρφωσης.
- Μεταβολή της ροπής πέδησης, αφού τα συστήματα που εφαρμόζονται συνήθως στην πράξη, όπως είναι υδραυλικά ή πνευματικά φρένα, παρουσιάζουν περιοδικότητα και η ρύθμισή τους στην τυπική περίπτωση γίνεται χειροκίνητα.
- Μεταβολές στη σκληρότητα του υλικού της ταινίας και της επιφανειακής επίστρωσης αυτής, ακόμη και στο υλικό του ίδιου ρόλου.
- Μεταβολή στην τριβή μεταξύ ταινίας και ραούλων κατά τη διαμόρφωση εξαιτίας μεταβολών στο υλικό και την επίστρωση της ταινίας ή/και φθοράς των ραούλων.
- Το ίδιο βάρος της ταινίας

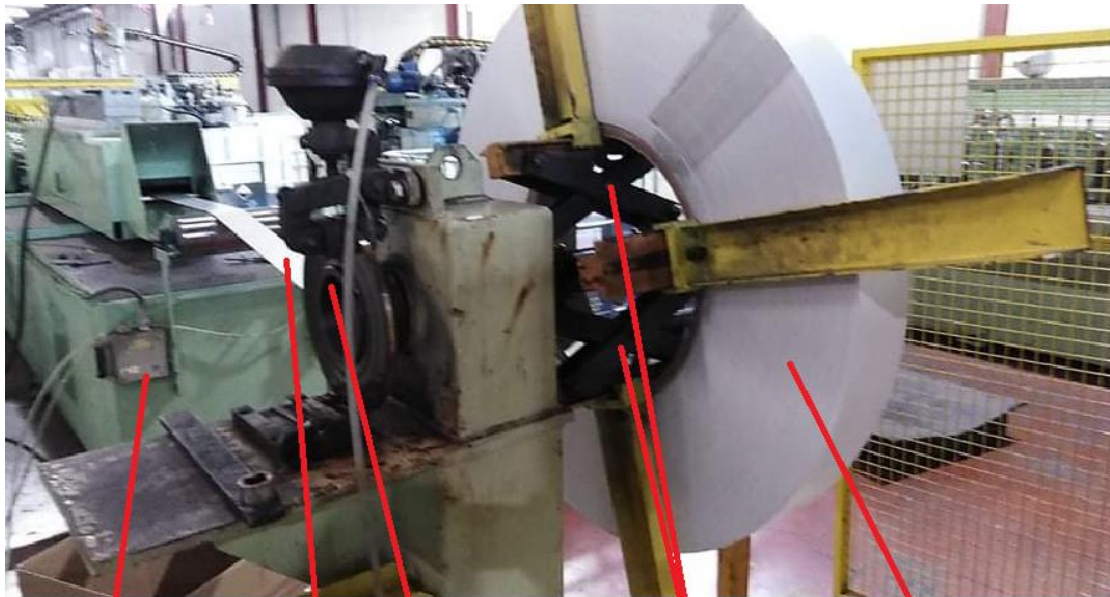
Οι λόγοι με την μεγαλύτερη επίδραση στην διαφοροποίηση της τάσης δαισθητικά πιστεύεται ότι είναι η μεταβολή της εξωτερικής διαμέτρου του ρολού, της ταχύτητας λειτουργίας της γραμμής παραγωγής και της ροπής πέδησης.



Εικόνα 1.7: Άποψη της ανέμης της γραμμής αναφοράς

Όσον αφορά την ανέμη, στην πράξη εφαρμόζονται διάφορες κατασκευαστικές προσεγγίσεις, χωρίς όμως να διαφέρει ουσιαστικά η βασική δομή τους. Έτσι, μέσω της περιγραφής της ανέμης της γραμμής αναφοράς, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.7, θα μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή η δομή όλων των διαφορετικών τύπων που εντάσσονται σε τέτοιου είδους γραμμές παραγωγές. Πιο συγκεκριμένα, η υφιστάμενη ανέμη αποτελείται από τέσσερις ψαλιδωτούς μηχανισμούς (μονού ψαλιδιού) οι οποίοι συγκρατούν το ρολό ταινίας αλουμινίου. Ο κάθε μηχανισμός συγκρατείται μέσω δύο κοχλιώσεων σε άτρακτο, η οποία με τη σειρά της εδράζεται μέσω εδράνων κύλισης σε μεταλλική βάση. Η μία θέση συγκράτησης κάθε ψαλιδωτού μηχανισμού είναι ακλόνητα στερεωμένη στην άτρακτο, ενώ η δεύτερη δύναται να μετακινηθεί κατά μήκος της ατράκτου μέσω της περιστροφής περικοχλίου που βρίσκεται στο άκρο της ατράκτου. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η ακτινική κίνηση των μηχανισμών και τελικά η στερέωση του ρολού στην ανέμη. Εναλλακτικά, η έκταση και η σύμπτυξη του ακτινικού μηχανισμού μπορεί να γίνει μέσω υδραυλικού ή πνευματικού συστήματος, χωρίς όμως κάποια επίδραση στη διαδικασία της εκτύλιξης. Η περιστροφή της ατράκτου επιτυγχάνεται αποκλειστικά χάρη στην τριβή μεταξύ της ταινίας και των ραούλων διαμόρφωσής της.

Αρκετά δημοφιλές σύστημα για την παραγωγή της ροπής πέδησης σε τέτοιου είδους γραμμές παραγωγής είναι η χρήση υδραυλικών ή πνευματικών δισκόφρενων. Στην ανέμη της γραμμής αναφοράς χρησιμοποιείται το πνευματικό δισκόφρενο της Εικόνα 1.8. Πιο αναλυτικά, στο άλλο άκρο



**Βαλβίδα ρύθμισης
πίεσης αέρα**

Πνευματικό φρένο

**Ψαλιδωτός
μηχανισμός**

**Ρολό ταινίας
αλουμινίου**

**Ταινία προς
διαμόρφωση**

Εικόνα 1.8: Άποψη της ανέμης της γραμμής αναφοράς στην οποία διακρίνονται με ευκρίνεια οι ψαλιδωτοί μηχανισμοί, το πνευματικό φρένο και η βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης του αέρα

της ατράκτου από αυτό που στερεώνεται το ρολό υφίσταται κατάλληλα στερεωμένος δίσκος. Μέσω κατάλληλου μηχανισμού, πεπιεσμένος αέρας πιέζει δύο σιαγόνες στο δίσκο, με σκοπό μέσω της δημιουργούμενης τριβής να επιτευχθεί η επιθυμητή πέδηση της ατράκτου. Η πίεση του αέρα ρυθμίζεται μέσω χειροκίνητης βαλβίδας.

Λόγω της επίδρασης της τάνυσης της ταινίας στην ποιότητα του τελικού προϊόντος και τη συνεχή μεταβολή αυτής, η ρύθμισή της αποτελεί ένα από τα κύρια καθήκοντα των χειριστών της γραμμής παραγωγής. Χωρίς την ύπαρξη άμεσης και ασφαλούς μέτρησης της τάνυσης, η ρύθμισή της επαφίεται στην εμπειρία του προσωπικού, χωρίς να υφίσταται σαφώς καθορισμένος και ενδεδειγμένος τρόπος. Στη γραμμή αναφοράς, ο χειριστής ασκεί πίεση στο ελεύθερο τμήμα της ταινίας μεταξύ ανέμης και φούρνου και αναλόγως ρυθμίζει την πίεση του αέρα μέσω της βαλβίδας. Ο τρόπος αυτός ρύθμισης απαιτεί τη συνεχή επαγρύπνηση του χειριστή, ιδίως όταν έχει μειωθεί αρκετά η εξωτερική διάμετρος του ρολού, κάτι που γίνεται δυσκολότερο εξαιτίας του μεγάλου μήκους της γραμμής παραγωγής. Επιπλέον, ο τρόπος αυτός μπορεί να ενέχει πιθανούς κινδύνους για την ασφάλεια του προσωπικού και απαιτεί την εμπειρία των χειριστών.

Το υλικό της ταινίας που χρησιμοποιείται στην γραμμή αναφοράς είναι αλουμίνιο 3005 και οι διαστάσεις των ρολών που εισέρχονται στην παραγωγική διεργασία καταγράφονται στον *Πίνακα 1.1*.

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά ρολών ταινίας που εισέρχονται στην παραγωγική διαδικασία αναφοράς

Διάσταση ρολού	Ελάχιστη τιμή (mm)	Μέγιστη τιμή (mm)
Εξωτερική διάμετρος	800	2000
Εσωτερική διάμετρος	400	400
Πλάτος	100	200
Πάχος ταινίας	0,23	0,35

1.4 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση συστήματος αυτομάτου ελέγχου για την αυτοματοποίηση της ρύθμισης της τάνυσης της ταινίας αλουμινίου κατά την εισαγωγή της στη μηχανή διαμόρφωσης. Ως αναφορά χρησιμοποιείται μία υπάρχουσα γραμμή παραγωγής, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως η εφαρμογή του συστήματος περιορίζεται μόνον σε αυτή.

Το νέο σύστημα αυτομάτου ελέγχου θα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες προδιαγραφές, οι οποίες μπορούν να χωρισθούν σε ποσοτικές και ποιοτικές. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι ποσοτικές προδιαγραφές του σχεδιαζόμενου συστήματος.

Πίνακας 1.2: Ποσοτικές προδιαγραφές νέου αυτόματου συστήματος ρύθμισης τάνυσης

Μέγεθος που προδιαγράφεται	Τιμή προδιαγραφής
Γραμμική ταχύτητα ταινίας	Από 15 ως 75 m/min
Τάνυση ταινίας	Από 80 ως 150 N
Χρόνος αποκατάστασης	Επιθυμία: < 30 s Απαίτηση: < 60 s
Υπερακόντιση (σε μοναδιαία βηματική μεταβολή της ονομαστικής τιμής της τάνυσης ή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής)	< 5%

Πέραν των παραπάνω ποσοτικών προδιαγραφών, το νέο αυτόματο σύστημα ρύθμισης τάνυσης θα πρέπει να ικανοποιεί και της εξής ποιοτικές προδιαγραφές:

- Ευελιξία εφαρμογής του ίδιου συστήματος σε διαφορετικές μηχανές εκτύλιξης
- Εφαρμογή του νέου συστήματος με τις λιγότερες κατά το δυνατό τροποποιήσεις στον υπάρχοντα εξοπλισμό
- Ελάχιστο κόστος
- Δυνατότητα αλλαγής της ονομαστικής τιμής της τάνυσης από τον χειριστή
- Απλή συντήρηση

1.5 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Οι φάσεις της συστηματικής επίλυσης του προβλήματος που εξετάζεται αποτελούν και τα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, οριοθετήθηκε το πρόβλημα και τέθηκαν οι προδιαγραφές της λύσης του (Κεφάλαιο 1). Πριν ξεκινήσει ο σχεδιασμός του συστήματος αυτόματης ρύθμισης της τάνυσης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα για παρόμοια συστήματα που έχουν προταθεί και έρευνα αγοράς για συστήματα που είναι εμπορικά διαθέσιμα (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια, συγκεντρώθηκαν οι κυριότερες ιδέες όσον αφορά τη διαμόρφωση του συστήματος, αξιολογήθηκαν και τελικά επιλέχθηκε η επικρατέστερη για περαιτέρω ανάλυση (Κεφάλαιο 3). Ο σχεδιασμός του συστήματος χωρίστηκε σε δύο επιμέρους προβλήματα που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, τη μέτρηση της τάνυσης και τον έλεγχο της τάνυσης. Η μέτρηση της τάνυσης αφορά την επιλογή και βαθμονόμηση των αισθητήρων αλλά και το σχεδιασμό των περιφερειακών μηχανολογικών και ηλεκτρονικών διατάξεων για την υποστήριξη της λειτουργίας τους (Κεφάλαια 4 & 5). Ο έλεγχος της τάνυσης αφορά το σχεδιασμό του ελεγκτή και την επιλογή του κατάλληλου επενεργητή, ώστε το σύστημα να ανταποκρίνεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό στις προδιαγραφές που έχουν τεθεί (Κεφάλαιο 6). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και για το λόγο αυτό απαιτήθηκε σε πρώτη φάση η μοντελοποίηση της υφιστάμενης εγκατάστασης. Τέλος, παρατίθενται τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν καθ' όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού και της υλοποίησης του νέου συστήματος, και δίνονται ορισμένες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας και βελτίωσης (Κεφάλαιο 7).

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση & έρευνα αγοράς

Ο έλεγχος της τάνυσης παρουσιάζει πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών, καθώς η τάνυση ταινίας επηρεάζει άμεσα πολλές παραγωγικές διαδικασίες. Πεδία ευρείας εφαρμογής είναι η παραγωγή πρώτων υλών, όπως χαρτιού, αλουμινόχαρτο, καλώδια και ίνες, διεργασίες επεξεργασίας, όπως εκτύπωση, πλαστικοποίηση, επιστρώσεις (coating) και σχίσιμο (slitting) και ο ποιοτικός έλεγχος [10]. Η ταινία μπορεί να είναι κατασκευασμένη από χαρτί, πλαστικό, πολυστρωματικά υλικά, μέταλλα και άλλα. Για το λόγο αυτό, κατά καιρούς, έχουν δημοσιευθεί διάφορες εργασίες και διατίθεται ποικιλία εμπορικών προϊόντων, λιγότερο ή περισσότερο εξειδικευμένων.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [8], σε τέτοιου τύπου συστήματα είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη η ισχυρή σύζευξη της τάνυσης με την ταχύτητα, που εισάγεται μέσω της ελαστικότητας της ταινίας. Κύριος στόχος του ελέγχου τάνυσης είναι η αποσύζευξη των δύο αυτών μεγεθών. Επιπλέον, σημειώνεται ότι τέτοια συστήματα είναι χρονικά μεταβαλλόμενα, μη γραμμικά, πολυμεταβλητά και χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα (όπως διαταραχές ως προς τις παραμέτρους, κατανομή φορτίου, μη μοντελοποιημένη δυναμική και άλλα) [11].

Για την μέτρηση της τάνυσης προτείνεται η χρήση δυναμοκυψελών (load cells) ή ραούλου με δυνατότητα γραμμικής ή περιστροφικής μετατόπισης (dancer roller) συνδυασμένο με ποτενσιόμετρο [12] [13] [14]. Πιο αναλυτικά, η χρήση δυναμοκυψελών επιτρέπει την άμεση μέτρηση, κι επομένως τον άμεσο έλεγχο, της τάνυσης αλλά συνιστάται για υλικά που παρουσιάζουν υψηλή ολκιμότητα ή στιβαρότητα. Από την άλλη, η χρήση ραούλου με δυνατότητα γραμμικής ή περιστροφικής μετατόπισης συνιστάται για διακίνηση εύθραυστων υλικών ή όταν η τάνυση είναι χαμηλή και η ταχύτητα της ταινίας υψηλή. Η συγκεκριμένη διάταξη συνιστάται από τη χρήση ενός ραούλου ο άξονας του οποίου έχει τη δυνατότητα να μετατοπιστεί γραμμικά ή περιστροφικά εντός συγκεκριμένων ορίων. Η μετατόπιση αυτή μετρείται μέσω κατάλληλα προσαρμοσμένου ποτενσιόμετρου και μέσω της γεωμετρίας της διάταξης υπολογίζεται η τάνυση της ταινίας. Η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει σχετική σταθερότητα έναντι κραδασμών και απαιτεί τη χρήση ελεγκτή ταχύτητας υψηλής ποιότητας. Επιπλέον, η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα κι ως επεργητής, λόγω χάρη με το συνδυασμό της με πνευματικό κύλινδρο.

Ως επενεργητής μπορεί να χρησιμοποιηθεί πνευματικό φρένο, όπως και στην περίπτωση της υφιστάμενης εγκατάστασης, ηλεκτρομαγνητικό φρένο ή ηλεκτρικός κινητήρας με ενσωματωμένο έλεγχο ταχύτητας ή ροπής ή ταχύτητας και ροπής ή έλεγχο μέσω συμπλέκτη [10] [12].

Για τον έλεγχο της τάνυσης έχουν προταθεί και εφαρμοστεί διάφορα σχήματα και μεθοδολογίες. Όσον αφορά σε εμπορικά προϊόντα, διατίθενται συστήματα ανοιχτού και κλειστού βρόχου [14]. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου περιλαμβάνουν μέτρηση ή υπολογισμό της διαμέτρου του ρολού και σύστημα οδήγησης του επενεργητή. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, τέτοιου είδους συστήματα προσφέρουν χαμηλή ακρίβεια, η λειτουργικότητά τους εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του μηχανολογικού εξοπλισμού και δεν μπορούν να αλληλεπιδράσουν με την ταχύτητα της ταινίας. Ωστόσο, τα προβλήματα αυτά υποσκελίζονται μερικώς από την ευκολία εφαρμογής τους και το χαμηλό κόστος τους. Από την άλλη μεριά, τα συστήματα κλειστού βρόχου προσφέρουν υψηλή ακρίβεια, προσαρμοστικότητα σε μεταβολές της κατάστασης της μηχανής, όπως η χρονική μεταβολή της τριβής στα κινούμενα μέρη της μηχανής, και μπορούν να παρακολουθήσουν μεταβολές της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής χωρίς τη λήψη σήματος. Συνήθως τέτοια συστήματα υλοποιούν έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI controller) [8].

Πέραν τούτων, σε ερευνητικό επίπεδο, έχουν προταθεί και πιο περίπλοκα σχήματα ελέγχου. Αρχικά, έχει προταθεί η χρήση ενός PI ελεγκτή τα κέρδη του οποίου ρυθμίζονται συνεχώς με βάση την ασαφή λογική. Με τον τρόπο αυτό, αντιμετωπίζεται η χρονική μεταβολή των παραμέτρων του συστήματος και η μη γραμμικότητα που παρουσιάζει, καθώς και δίνεται η δυνατότητα το σύστημα να ικανοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς την ακρίβειά του και την ευρωστία του [15]. Επιπλέον, έχει υπολογιστεί και προσομοιωθεί η χρήση ενός Γραμμικού Τετραγωνικού Γκαουσιανού (Linear Quadratic Gaussian – LQG) ελέγχου συνδυασμένου με εκτίμηση κατάστασης βασισμένη σε φίλτρο Kalman, ο οποίος παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με έναν βελτιστοποιημένο PI έλεγχο, αλλά η υλοποίηση του απαιτεί τη χρήση ισχυρού υλισμικού και λογισμικού, με ανάλογη αύξηση της περιπλοκότητας και του κόστους [8]. Ακόμη, έχει γίνει προσπάθεια εφαρμογής εύρωστου ελέγχου της νόρμας-άπειρο (H_∞ robust control) παρουσιάζοντας πολύ καλή παρακολούθηση μεταβολών στην τιμή αναφοράς και την ταχύτητα της ταινίας και μηδενική υπερακόντιση [16]. Η υλοποίησή του ωστόσο απαιτεί την χρήση ισχυρών ηλεκτρονικών. Παρόμοιες παρατηρήσεις εξάγονται και από τον υπολογισμό και προσομοίωση προσαρμοστικού εύρωστου ελέγχου (adaptive robust control) βασισμένου στη θεωρία Hamilton [11]. Η ακρίβεια των προσεγγίσεων που βασίζονται στο μοντέλο (model-based), όπως είναι όλες οι προαναφερθείσες μεθοδολογίες εκτός του PI ελεγκτή, εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια της μοντελοποίησης του φυσικού συστήματος. Η μοντελοποίηση αυτή απαιτεί την αποδοχή ορισμένων παραδοχών με κίνδυνο ο έλεγχος να παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στην πραγματική εγκατάσταση.

Προκειμένου να ξεπεραστεί το μειονέκτημα αυτό των προσεγγίσεων που βασίζονται σε αναλυτικό μοντέλο, προτείνεται η χρήση τεχνικών βασισμένων σε δεδομένα (data-based). Σύμφωνα με αυτές, συλλέγονται δεδομένα από την πραγματική εγκατάσταση τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μοντέλων που έχουν την ικανότητα να προβλέπουν τη συμπεριφορά του εξεταζόμενου συστήματος για ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα. Η ανάπτυξη τέτοιου είδους μοντέλων βασίζεται σε μεθόδους βελτιστοποίησης ή προσαρμογής δεδομένων μέσω των οποίων επιχειρείται η εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου για τις οποίες επιτυγχάνεται η μέγιστη σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και υπολογισθισών εξόδων για δεδομένες εισόδους. Τέτοιου είδους μοντέλα είναι σύνθητες να βασίζονται σε Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks). Εναλλακτικά, ο σχεδιασμός του ελεγκτή μπορεί να πραγματοποιηθεί όπως και στις τεχνικές που βασίζονται σε μοντέλο. Μία τέτοια μεθοδολογία είναι ο νευρωνικός γενικευμένος προβλεπτικός έλεγχος (Neural Generalized Predictive Control – Neural GPC). Πλεονεκτήματα της εφαρμογής τέτοιου είδους ελέγχου είναι ότι στην περίπτωση ιδιαίτερα περίπλοκων συστημάτων ο σχεδιασμός του ελέγχου μπορεί να επισπευσθεί σημαντικά και δύναται να προκύψει μεγαλύτερη συμφωνία μεταξύ πειραματικών δεδομένων και μοντέλου, κάτι όμως που εξαρτάται από το πλήθος και την ποιότητα των δεδομένων. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα ευκολότερης υλοποίησης του ελέγχου μέσω της χρήσης σύγχρονων εμπορικών συστημάτων που υποστηρίζουν την άμεση υλοποίηση τέτοιου είδους ελέγχου. Όμως, μειονέκτημα των τεχνικών αυτών είναι ότι για τη συλλογή των δεδομένων απαιτείται η χρήση πλήθους αισθητήρων. Παρόλο που το κόστος κτήσης τέτοιου είδους εξοπλισμού έχει πλέον μειωθεί σημαντικά σε σύγκριση με το όφελος που προσφέρει, η εγκατάστασή του και η θέση του σε λειτουργία μπορεί να είναι μία ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί την παύση της παραγωγικής διαδικασίας και μετατροπές στον υπάρχοντα μηχανολογικό εξοπλισμό. Οπότε, αθροίζοντας το κόστος από τη μη παραγωγή προϊόντος και το κόστος των απαιτούμενων προσαρμογών, το κόστος χρήσης αισθητήρων μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα υψηλό. Ένα άλλο μειονέκτημα των τεχνικών που βασίζονται σε δεδομένα είναι η μη ακριβής

γνώση της δομής του ελεγκτή, που ενδεχομένως μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτη συμπεριφορά του συστήματος υπό ορισμένες συνθήκες, κι εφόσον δεν έχει προβλεφθεί κατά τη φάση του σχεδιασμού [16]. Έτσι, αναδεικνύεται για άλλη μία φορά η συσχέτιση της επιτυχούς εφαρμογής ελέγχου βασισμένου σε δεδομένα με την ακρίβεια, την ποιότητα και το πλήθος των δεδομένων.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι, στην πράξη, συνήθως τα όρια μεταξύ ελέγχου βασισμένου σε αναλυτικό μοντέλο και ελέγχου βασισμένου σε δεδομένα δεν είναι ευδιάκριτα και προτείνονται προσεγγίσεις που συνδυάζουν χαρακτηριστικά και από τα δύο είδη ελέγχου.

3 Προκαταρκτικός σχεδιασμός γενικής διάταξης

3.1 Μεθοδολογία σχεδιασμού

Το έργο ανάπτυξης, δηλαδή η μετουσίωση της ανάγκης για αυτόματη ρύθμιση της τάνυσης της ταινίας αλουμινίου σε μία λειτουργική διάταξη που θα την ικανοποιεί, είναι πολύ σημαντικό να βασίζεται σε μία καλά καθορισμένη διαδικασία ανάπτυξης για τους ακόλουθους λόγους [16]:

- **Διασφάλιση ποιότητας:** Μία διαδικασία ανάπτυξης εξασφαλίζει τη ποιότητα του προϊόντος που θα προκύψει μέσω του καθορισμού των φάσεων και των σημείων ελέγχου από τις οποίες θα διέλθει το έργο ανάπτυξης.
- **Συντονισμός:** Μία σαφώς καθορισμένη διαδικασία ανάπτυξης λειτουργεί ως ένα γενικό πρόγραμμα με βάση το οποίο κατανέμονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι πόροι που είναι διαθέσιμοι για το έργο ανάπτυξης, όπως είναι ανθρωποώρες απασχόλησης, υλικά, άδειες λογισμικού και άλλα.
- **Προγραμματισμός:** Τα κομβικά σημεία της διαδικασίας σχεδιασμού, που αντιστοιχούν στην ολοκλήρωση της κάθε φάσης, μπορούν να λειτουργήσουν ως ορόσημα για την κατάρτιση χρονοδιαγράμματος του έργου ανάπτυξης.
- **Διαχείριση:** Η διαδικασία ανάπτυξης μπορεί να λειτουργήσει ως σημείο αναφοράς για την τήρηση του χρονοδιαγράμματος του έργου και την αξιολόγηση της απόδοσης των περατωμένων και των εν εξελίξει ενεργειών.
- **Βελτίωση:** Η συνεχής παρακολούθηση και αναθεώρηση της διαδικασίας ανάπτυξης συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης τόσο του τρέχοντος όσο και μελλοντικών έργων ανάπτυξης, ή και παρόμοιων διαδικασιών.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι η διαδικασία σχεδιασμού θα πρέπει να είναι, εκτός από καλά καθορισμένη και τεκμηριωμένη, ευέλικτη ώστε να προσαρμόζεται στις ιδιαίτερες ανάγκες και δυσκολίες του εκάστοτε έργου ανάπτυξης. Θεμελιώδης σκοπός της είναι η αύξηση της απόδοσης του έργου κι όχι η κατανάλωση πόρων χωρίς το αντίστοιχο όφελος.

Η διαδικασία ανάπτυξης που ακολουθήθηκε βασίζεται στη μέθοδο που περιγράφεται από τους Ulrich και Eppinger [17], κατάλληλα προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες και τις ανάγκες του έργου σχεδιασμού του νέου συστήματος αυτόματης ρύθμισης της τάνυσης.

Οι φάσεις από τις οποίες θα διέλθει η ανάπτυξη του συστήματος είναι οι ακόλουθες:

0. **Προγραμματισμός:** Η δραστηριότητα προγραμματισμού αναφέρεται ως «στάδιο μηδέν» γιατί προηγείται της απόφασης για έναρξη της διαδικασίας ανάπτυξης. Η φάση αυτή ξεκινά με τον προσδιορισμό της ευκαιρίας και τον εντοπισμό των ενδιαφερόμενων μερών. Στην συνέχεια, θα πρέπει να ενημερωθούν όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη σχετικά με την πρόθεση ανάπτυξης και να εντοπιστούν οι διαθέσιμοι πόροι, όπως ανθρωποώρες απασχόλησης, χρηματοδότηση, πληροφορίες και άλλα. Επιπλέον, θα πρέπει να καταρτιστεί ένα γενικό χρονοδιάγραμμα, έστω και σε πρωτόλεια μορφή, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κατά τη λήψη της απόφασης για έναρξη ή μη της διαδικασίας ανάπτυξης, κι εφόσον αυτή είναι θετική ως αναφορά για τον λεπτομερή προγραμματισμό και την διαχείριση του έργου.

1. **Ανάπτυξη ιδέας:** Η φάση ανάπτυξης της ιδέας περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των αναγκών που καλείται το προς ανάπτυξη σύστημα να ικανοποιήσει, την κατάρτιση των προδιαγραφών του, την παραγωγή και αξιολόγηση εναλλακτικών ιδεών υλοποίησης του συστήματος και τελικά την επιλογή μίας ή περισσότερων ιδεών για περαιτέρω ανάπτυξη και δοκιμή. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί στο συγκεκριμένο στάδιο αναλύεται σε περισσότερη λεπτομέρεια στην ενότητα 3.2 που ακολουθεί.
2. **Σχεδιασμός σε επίπεδο συστήματος:** Η φάση αυτή αποτελείται από τον ορισμό της βασικής αρχιτεκτονικής του συστήματος, την αποσύνθεσή του σε υποσυστήματα και την προμελέτη των βασικότερων μερών του. Έξοδος της φάσης αυτής είναι η γενική μορφή του συστήματος και οι προδιαγραφές των επιμέρους υποσυστημάτων.
3. **Λεπτομερής σχεδιασμός:** Ο σχεδιασμός αυτός περιλαμβάνει την πλήρη προδιαγραφή της κατασκευής και της λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής. Πιο αναλυτικά, περιλαμβάνει την διαστασιολόγηση όλων των εξαρτημάτων της διάταξης, την επιλογή των τυποποιημένων τεμαχίων, την εκπόνηση των κατασκευαστικών σχεδίων των μη τυποποιημένων τεμαχίων και αναλυτικές οδηγίες συναρμολόγησης των επιμέρους τεμαχίων και συστημάτων για την ολοκλήρωση της κατασκευής του συστήματος. Στη φάση αυτή εντάσσεται και ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του συστήματος αυτομάτου ελέγχου.
4. **Δοκιμαστική λειτουργία και βελτιώσεις:** Η φάση αυτή ακολουθεί την ολοκλήρωση της κατασκευής και συναρμολόγησης του πλήρους συστήματος και περιλαμβάνει τη θέση σε λειτουργία του συστήματος, την αξιολόγηση της λειτουργίας του και της ένταξής του στην υφιστάμενη εγκατάσταση και βελτιώσεις επί αυτής. Η φάση αυτή επίσης περιλαμβάνει την επίλυση τυχόν ζητημάτων που δεν προβλέφθηκαν ή προβλέφθηκαν ελλιπώς κατά τη φάση του σχεδιασμού και την επικοινωνία με τα ενδιαφερόμενα μέρη προκειμένου να ληφθούν παρατηρήσεις επί του πραγματικού πλέον συστήματος, ώστε το τελικό σύστημα να ικανοποιεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό τις ανάγκες και απαιτήσεις τους.
5. **Ολοκλήρωση έργου ανάπτυξης:** Αποτελεί την τελευταία φάση της ανάπτυξης του συστήματος και περιλαμβάνει την αναλυτική τεκμηρίωση ολόκληρου του έργου και την σύνταξη οδηγιών σχετικών με την λειτουργία και τη συντήρηση του συστήματος.

Με την ολοκλήρωση του έργου είναι πολύ χρήσιμο να πραγματοποιηθεί αξιολόγησή του σε επίπεδο προγραμματισμού και διοίκησης, ώστε να εξαχθεί πληροφορία που θα βοηθήσει στον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό και παρακολούθηση μελλοντικών έργων ανάπτυξης. Τέλος, σημαντικό είναι με την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου έργου να εντοπιστούν προοπτικές και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας και ανάπτυξης.

3.2 Εντοπισμός ευκαιρίας και έναρξη διαδικασίας

Λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων σε παραγωγή και της αύξησης του ανταγωνισμού, κρίνεται αναγκαίος ο εκσυγχρονισμός γραμμών παραγωγής παλαιότερης τεχνολογίας. Ο εκσυγχρονισμός αυτός επιτελείται με τη σταδιακή αυτοματοποίηση διαδικασιών που στην υφιστάμενη κατάσταση πραγματοποιούνται χειροκίνητα. Όσον αφορά το «φυλλαράκι» αλουμινίου, πρώτο βήμα προς την αυτοματοποίηση είναι η αυτόματη ρύθμιση της τάνυσης, λόγω της άμεσης εξάρτησης της ποιότητας του τελικού προϊόντος από αυτή και της δαπάνης χρόνου από τον χειριστή για τη χειροκίνητη ρύθμισή της. Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικό το κόστος του συστήματος να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερο και η ευελιξία εφαρμογής του αρκετά μεγάλη.

Λόγω οικονομικών και χρονικών περιορισμών, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν η ανάπτυξη της ιδέας, ο σχεδιασμός σε επίπεδο συστήματος και ο λεπτομερής σχεδιασμός του νέου συστήματος αυτόματης ρύθμισης της τάνυσης, ήτοι οι φάσεις 1, 2 και 3 της μεθόδου των Ulrich και Eppinger, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

3.3 Ανάπτυξη ιδέας

3.3.1 Μεθοδολογία ανάπτυξης ιδέας

Η φάση ανάπτυξης της ιδέας απαιτεί την περισσότερη επικοινωνία με τα ενδιαφερόμενα μέρη και για το λόγο αυτό τον περισσότερο συντονισμό. Αν και η φάση αυτή απαιτεί συνεχείς επαναλήψεις προκειμένου να εξαχθεί το τελικό αποτέλεσμα, θα γίνει μία προσπάθεια συστηματικής περιγραφής της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Για τη διευκόλυνση της περιγραφής και της κατανόησης της διαδικασίας αυτή θα αναπαρασταθεί ως μία σειριακή αλληλουχία βημάτων. Θα πρέπει όμως να γίνει σαφές ότι σε κάθε στάδιο μπορεί να προκύπτουν νέες πληροφορίες ή αποτελέσματα που θα επιβάλλουν την επιστροφή σε κάποια προηγούμενη δραστηριότητα και την επικαιροποίηση αυτής.

Η διαδικασία ανάπτυξης της ιδέας περιλαμβάνει τις ακόλουθες δραστηριότητες [17]:

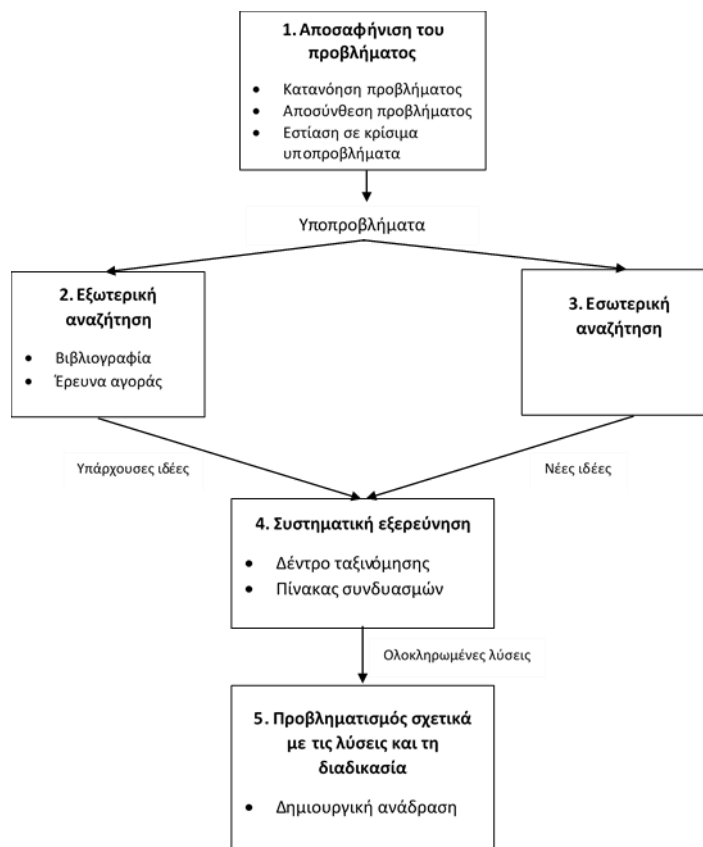
- **Προσδιορισμός αναγκών:** Η δραστηριότητα αυτή περιλαμβάνει την επικοινωνία με όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη και τον συστηματικό προσδιορισμό των αναγκών και των επιθυμιών που προσβλέπουν να ικανοποιεί το νέο σύστημα.
- **Καθορισμός προδιαγραφών:** Η δραστηριότητα αυτή αποτελεί τη μετουσίωση των αναγκών που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη δραστηριότητα σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος προς ανάπτυξη και τιμές αυτών των χαρακτηριστικών αυτών όπου είναι δυνατό. Οι προδιαγραφές χωρίζονται σε αναγκαίες, που το νέο σύστημα θα πρέπει οπωσδήποτε να ικανοποιεί, και επιθυμητές, που θα ήταν επιθυμητό αλλά όχι υποχρεωτικό να ικανοποιηθούν.
- **Δημιουργία ιδεών:** Σκοπός της συγκεκριμένης δραστηριότητας είναι η εύρεση διατάξεων που θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Οι ιδέες αυτές μπορούν να είναι είτε διατάξεις που ήδη υπάρχουν, σε εμπορικό ή πειραματικό στάδιο, ή εντελώς νέες. Έξοδος αυτής της δραστηριότητας είναι μία σειρά ιδεών με ένα σύντομο σχολιασμό της κάθε μίας.
- **Επιλογή ιδέας:** Η επιλογή της ιδέας περιλαμβάνει την συστηματική διερεύνηση όλων των πιθανών διατάξεων που έχουν προταθεί κατά την προηγούμενη δραστηριότητα και τη συνεχή μείωση του πλήθους τους μέχρις ότου προκύψει η πιο υποσχόμενη ιδέα ή ιδέες, που θα αποτελέσει και την έξοδο της φάσης της ανάπτυξης ιδέας. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι πιθανό κατά τη διερεύνηση των ιδεών να προκύψουν νέες ιδέες ή βελτιώσεις κάποιας υπάρχουσας, με αποτέλεσμα το πλήθος των πιθανών λύσεων να μη βαίνει πάντοτε συνεχώς μειούμενο.

Τα αποτελέσματα των δραστηριοτήτων προσδιορισμού των αναγκών και καθορισμού των προδιαγραφών για το νέο σύστημα αυτόματης ρύθμισης τάνυσης έχουν συζητηθεί εκτενώς στην παράγραφο 1.3 «Περιγραφή προβλήματος».

3.3.2 Δημιουργία ιδεών

Η δραστηριότητα δημιουργίας ιδεών αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ προδιαγραφών και της τελικής ιδέας που θα αναλυθεί σε μεγαλύτερο βάθος. Είναι πολύ σημαντικό κατά τη διάρκειά της να ερευνηθεί όσο κατά το δυνατόν καλύτερα ο χώρος των πιθανών λύσεων προκειμένου να αποφευχθεί η επιλογή δαπανηρών και περίπλοκων λύσεων, που ενδεχομένως δεν θα μπορούν να ανταποκριθούν πλήρως στις ανάγκες των χειριστών του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η δημιουργία ιδεών θα βασιστεί στη μέθοδο πέντε βημάτων που περιγράφεται από τους Ulrich και Eppinger [17] και αποτυπώνεται γραφικά στην Εικόνα 3.1 .

Αρχικά, θα πρέπει να κατανοηθεί το πρόβλημα σε βάθος. Σημείο εκκίνησης αποτελούν οι ανάγκες και οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί στην παράγραφο 1.3. Βασική επιδίωξη είναι ο σχεδιασμός ενός κατά το δυνατόν οικονομικού, αξιόπιστου και απλού συστήματος που θα ρυθμίζει αυτόματα την τάνυση της ταινίας. Το βασικότερο πρόβλημα είναι η ισχυρή σύζευξη της τάνυσης από την ταχύτητα της ταινίας και η χρονική μεταβολή των παραμέτρων του συστήματος. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του συστήματος θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την αναπαραγωγή του και την ένταξή του με τις κατά το δυνατό λιγότερες τροποποιήσεις σε παρόμοιες γραμμές παραγωγής, αλλά και το χειρισμό ταινιών διαφορετικών διαστάσεων, οι οποίες καταγράφονται στον Πίνακα 1.1.



Εικόνα 3.1: Η μέθοδος δημιουργίας ιδεών των πέντε βημάτων (προσαρμοσμένη από [17])

Για την καλύτερη διαχείριση του προβλήματος κρίνεται σκόπιμη η αποσύνθεσή του σε απλούστερα υποπροβλήματα. Προκειμένου η αποσύνθεση αυτή να είναι συστηματική θα πραγματοποιηθεί βάσει της αλληλουχίας των ενεργειών του χειριστή στην υφιστάμενη εγκατάσταση. Σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 1.3, η ρύθμιση της τάνυσης μπορεί να χωριστεί στα εξής υποπροβλήματα:

- προσδιορισμός της τιμής της τάνυσης και
- ρύθμιση της εκτύλιξης της ταινίας στην ανέμη.

Λόγω της προδιαγραφής για δυνατότητα αλλαγής της ονομαστικής τιμής από τον χειριστή, ένα τρίτο υποπρόβλημα είναι η διεπαφή του συστήματος με τον χειριστή. Ωστόσο, κρίνεται πως το υποπρόβλημα της διεπαφής είναι μικρότερης σημασίας για το συνολικό σύστημα και για το λόγο αυτό η επίλυση του αναβάλλεται για μεταγενέστερο στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης.

Επόμενο βήμα είναι η εξωτερική αναζήτηση, η οποία όμως έχει συζητηθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 «Βιβλιογραφική ανασκόπηση & έρευνα αγοράς». Ταυτόχρονα, καταβάλλεται προσπάθεια δημιουργίας νέων ιδεών μέσω της εσωτερικής αναζήτησης. Προκειμένου η αναζήτηση να είναι πιο αποτελεσματική, πραγματοποιείται ανεξάρτητα για τα δύο κύρια υποπροβλήματα.

Προσδιορισμός τιμής τάνυσης

Όσον αφορά τον προσδιορισμό της τιμής της τάνυσης, τα αποτελέσματα της εξωτερικής και εσωτερικής αναζήτησης παρουσιάζονται υπό μορφή δέντρου ταξινόμησης στην Εικόνα 3.2. Ο προσδιορισμός μπορεί να είναι άμεσος ή έμμεσος. Γενικά οι άμεσοι τρόποι προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και επηρεάζονται λιγότερο από μεταβολές στις παραμέτρους του συστήματος. Από την άλλη μεριά, για τους έμμεσους τρόπους θα μπορούσε να πει κανείς πως απαιτούν λιγότερες παρεμβάσεις στην υφιστάμενη εγκατάσταση, ενώ απαιτούν μεγαλύτερη υπολογιστή ισχύ και ενδεχομένως το σφάλμα να είναι αρκετά υψηλό.

Στους άμεσους τρόπους προσδιορισμού συγκαταλέγονται η χρήση δυναμοκυψελών, σε συνδυασμό με ένα ή τρία ράουλα (Εικόνα 3.3), η χρήση ραούλου (dancer roller) που δύναται να κινηθεί γραμμικά ή περιστροφικά (Εικόνα 3.4), και η χρήση μεθόδων φωτοελαστικότητας.

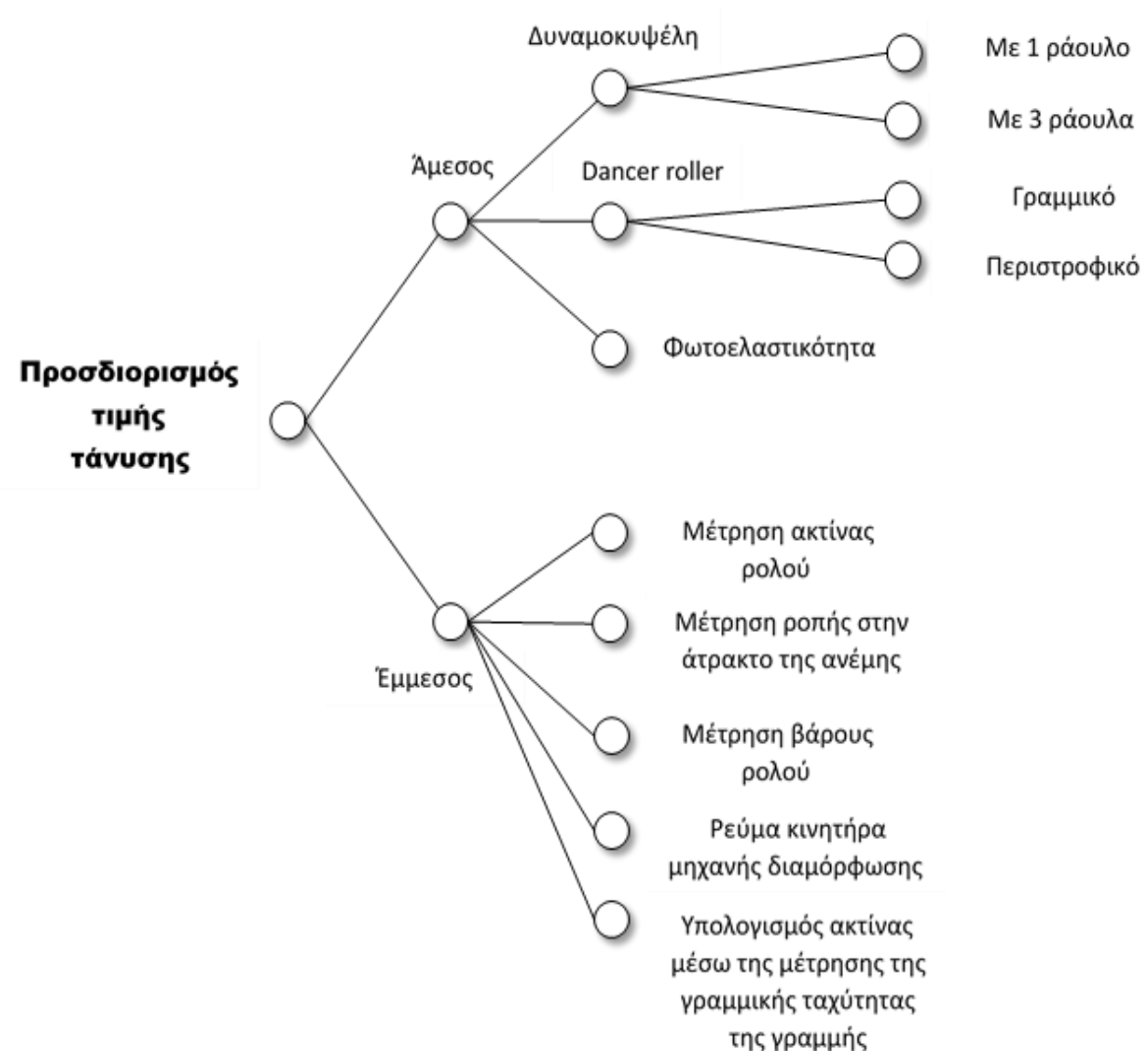
Οι δυναμοκυψέλες (load cells) είναι αισθητήρια φορτίου που μετατρέπουν τη δύναμη σε ηλεκτρικό σήμα. Η πλειονότητα των αισθητηρίων αυτών βασίζεται στη χρήση επιμηκυνσιομέτρων (strain gauge). Στη συνήθη περίπτωση χρησιμοποιούνται τέσσερα επιμηκυνσιομέτρα ανά δυναμοκυψέλη σχηματίζοντας μία πλήρη γέφυρα Wheatstone, επιτυγχάνοντας υψηλότερη ακρίβεια. Επιπλέον, στο εμπόριο διατίθεται μία μεγάλη ποικιλία δυναμοκυψελών διαφορετικών μορφών, προσφέροντας μεγάλη ευελιξία κατά το σχεδιασμό της κατασκευής που θα τις υποδεχθεί.

Το ράουλο με δυνατότητα κίνησης μετατρέπει την τάνυση της ταινίας σε μετατόπιση, γραμμική ή περιστροφική. Οπότε, μετρώντας τη μετατόπιση αυτή προκύπτει η ζητούμενη τάνυση της ταινίας. Ως αισθητήρες μέτρησης μετατόπισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορων ειδών συσκευές. Η απλούστερη είναι το ποτενσιόμετρο, το οποίο όμως είναι ευαίσθητο σε ηλεκτρονικό θόρυβο, προσφέροντας μετρήσεις χαμηλής ποιότητας. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπτικός κωδικοποιητής (optical encoder), ώστε να μειωθεί το σφάλμα μέτρησης. Το σφάλμα αυτό εξαρτάται άμεσα από το πλήθος ψηφίων του κωδικοποιητή. Βασικό μειονέκτημα του ραούλου με δυνατότητα κίνησης είναι η τριβή που εμφανίζεται μεταξύ των κινούμενων μερών του, η οποία μπορεί να

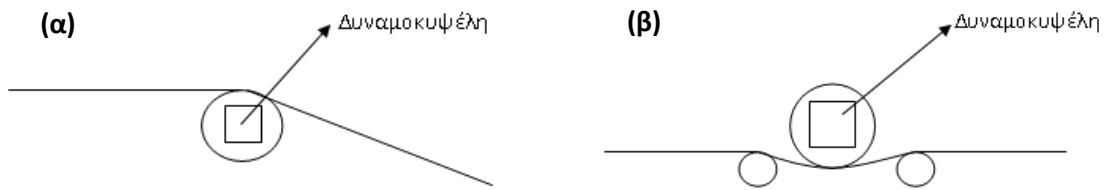
προκαλέσει καθυστέρηση στη λήψη μέτρησης και μπορεί να αυξήσει το σφάλμα μέτρησης. Ακόμη, κατά την κατασκευή του συστήματος θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη μέριμνα για την αποφυγή ταλαντώσεων του ρολούλου.

Η χρήση φωτοελαστικότητας, με τη σειρά της, προσφέρει το πλεονέκτημα της μη ανάγκης επαφής με την ταινία. Ωστόσο, εξαιτίας της σχετικά υψηλής ταχύτητας της ταινίας θα ήταν πολύ δύσκολο να βρεθεί εξοπλισμός λήψης και επεξεργασίας εικόνας, κι αν βρισκόταν το κόστος του θα ήταν υψηλό. Επιπλέον, εγείρονται και ζητήματα σχετικά με τη δυσκολία συντήρησης ενός τέτοιου συστήματος.

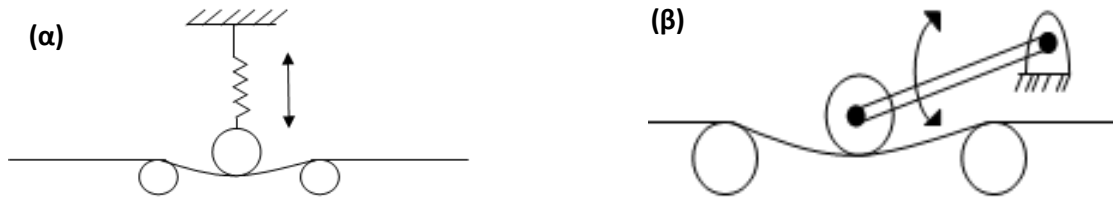
Ως προς τους έμμεσους τρόπους προσδιορισμού της τιμής της τάνυσης διατίθεται πλήθος αισθητήρων που θα μπορούσαν να λαμβάνουν μετρήσεις των εν λόγω μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα, η μέτρηση της ακτίνας του ρολού θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με αισθητήρα υπερήχων, laser ή μαγνητικό αισθητήρα, η ροπή στην άτρακτο της ανέμης με ροπόμετρο και το βάρος του ρολού με πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα κατάλληλα προσαρμοσμένο στην άτρακτο ή δυναμοκυψέλη. Ακόμη, μετρήσεις του ρεύματος που απορροφά ο κινητήρας της μηχανής διαμόρφωσης και της γραμμικής ταχύτητας της γραμμής παραγωγής διατίθενται ήδη στην υφιστάμενη εγκατάσταση.



Εικόνα 3.2: Δέντρο ταξινόμησης για το τμήμα ιδεών που σχετίζονται με τον προσδιορισμό της τιμής της τάνυσης



Εικόνα 3.4: Χρήση δυναμοκυψέλης για τη μέτρηση της τάνυσης σε συνδυασμό με (α) ένα ραούλο και (β) τρία ραούλα



Εικόνα 3.4: Χρήση ραούλου (dancer roller) που δύναται να κινηθεί (α) γραμμικά ή (β) περιστροφικά

Έπειτα από την παράθεση και το σύντομο σχολιασμό υπάρχουσών και νέων ιδεών, αφαιρούνται οι λιγότερο ελπιδοφόροι κλάδοι του δέντρου ταξινόμησης με σκοπό να εισέλθουν στη δραστηριότητα της επιλογής της ιδέας ολοκληρωμένες και περισσότερο υποσχόμενες λύσεις. Έχοντας αυτά υπόψη, καθώς και τις προδιαγραφές του συστήματος που αναπτύσσεται, σε πρώτη φάση αφαιρείται ο κλάδος των έμμεσων τρόπων προσδιορισμού της τιμής της τάνυσης, γιατί εισάγουν πολυπλοκότητα στο σύστημα, απαιτούν αυξημένη υπολογιστική ισχύ και κυρίως εξαρτώνται άμεσα από τις τρέχουσες τιμές των παραμέτρων της εγκατάστασης, γεγονός που θα δημιουργούσε δυσκολίες στο χειρισμό ρολών ταινίας διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και ταινιών διαφορετικής σύστασης και στην ένταξη του νέου συστήματος σε διαφορετικές μηχανές εκτύλιξης.

Επίσης, από την δραστηριότητα της επιλογής ιδέας αποκλείεται η χρήση της φωτοελαστικότητας, επειδή, αν και θα μπορούσε να είναι ακριβέστερη μέθοδος, εισάγει αρκετή πολυπλοκότητα στην εγκατάσταση και εκτιμάται ότι το κόστος του απαιτούμενου εξοπλισμού θα είναι αρκετά υψηλό. Επιπλέον, δεν βρέθηκε κάποια αναφορά, σε πειραματικό ή εμπορικό επίπεδο, εφαρμογής φωτοελαστικότητας σε κινούμενο δοκίμιο. Οπότε, πέραν του κόστους προμήθειας εξοπλισμού, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το κόστος ανάπτυξης της διάταξης, καθώς και η αβεβαιότητα επίτευξης του επιθυμητού αποτελέσματος.

Ρύθμιση εκτύλιξης ταινίας

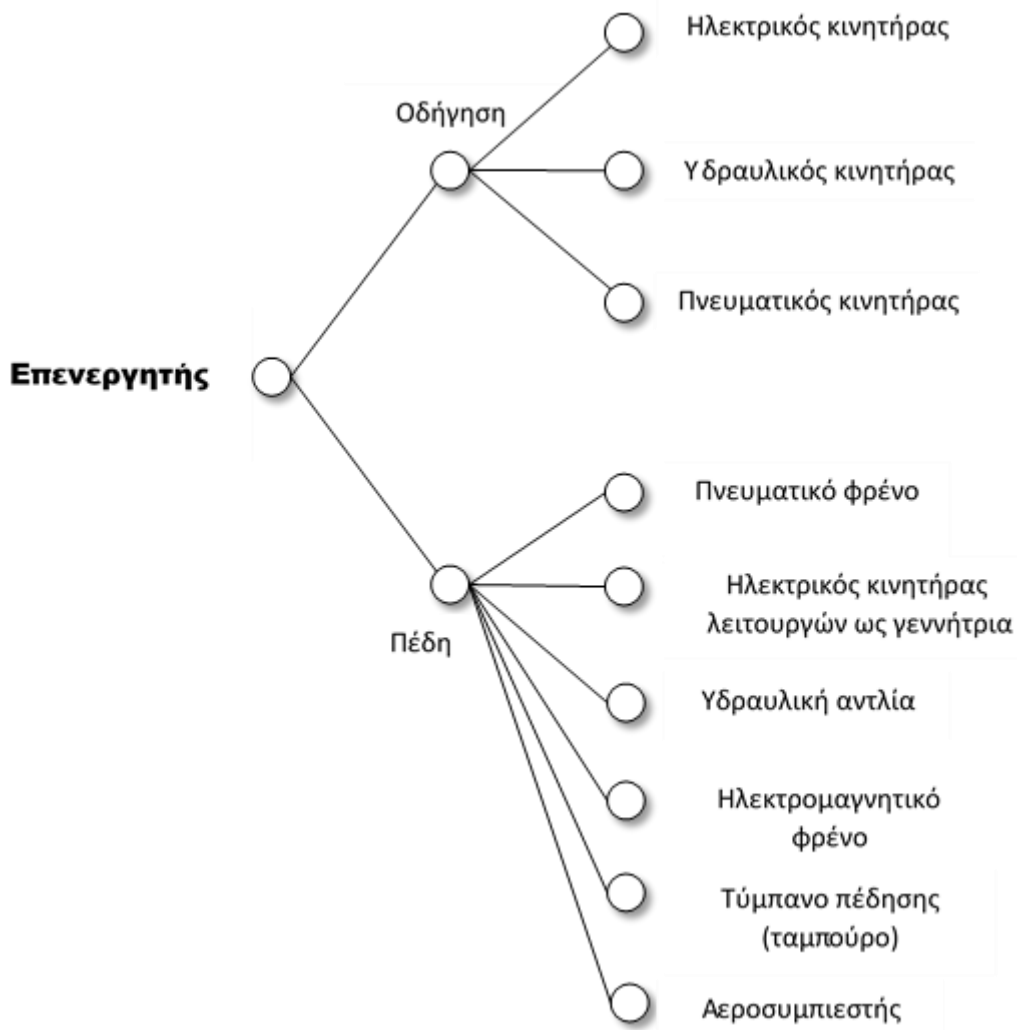
Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται και για την δημιουργία ιδεών ως προς το δεύτερο σκέλος του προβλήματος της ανάπτυξης του νέου συστήματος, τη ρύθμιση της εκτύλιξης της ταινίας. Για καλύτερη εποπτεία του εξεταζόμενου υποπροβλήματος προτείνεται η περαιτέρω αποσύνθεσή του σε δύο σκέλη, που είναι τα εξής: η επιλογή επενεργητή και η επιλογή μονάδας ελέγχου.

Όσον αφορά τη μονάδα ελέγχου, δηλαδή της συσκευής που θα λαμβάνει τις μετρήσεις, θα πραγματοποιεί την απαραίτητη επεξεργασία επί αυτών και θα ελέγχει τον επενεργητή, θα χρησιμοποιηθεί ο μικροελεγκτής AVR ATmega328. Η επιλογή αυτή κρίνεται ότι μπορεί να γίνει από το παρόν, σχετικά πρώιμο, στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης λαμβάνοντας υπόψη την ευκολία προγραμματισμού του συγκεκριμένου μικροελεγκτή, τη πλούσια βιβλιογραφία που διατίθεται για το σκοπό αυτό, το πολύ μικρό κόστος κτήσης του και τη συμβατότητα του με πλήθος αισθητήρων και

επενεργητών. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, λόγω της μικρής υπολογιστικής ισχύς θα γίνει προσπάθεια ανάπτυξης ελεγκτή τύπου PID.

Όσον αφορά το σκέλος της επιλογής επενεργητή, θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία δημιουργίας ιδεών που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της τιμής της τάνυσης, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται με τη μορφή δέντρου ταξινόμησης στην Εικόνα 3.5.

Ως επενεργητής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιο στοιχείο που αφαιρεί ενέργεια από το σύστημα, δηλαδή πέδη, ή κάποιο σύστημα που να οδηγεί το σύστημα (τέτοιου τύπου επενεργητές στην αγγλική βιβλιογραφία αναφέρονται ως «drivers»). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [18], η εφαρμογή συστήματος οδήγησης προσφέρει υψηλότερη απόδοση όσον αφορά τη ρύθμιση της τάνυσης έναντι της εφαρμογής πέδης. Πιο αναλυτικά, όσον αφορά τα συστήματα οδήγησης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρικός, υδραυλικός ή πνευματικός. Από την άλλη μεριά, ως πέδη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το υπάρχον πνευματικό φρένο συνδυασμένο με κατάλληλη βαλβίδα ελέγχου ροής του αέρα, ηλεκτρικός κινητήρας λειτουργών ως γεννήτρια, υδραυλική αντλία, ηλεκτρομαγνητικό φρένο, τύμπανο πέδησης ή αεροσυμπιεστής.



Εικόνα 3.5: Δέντρο ταξινόμησης ιδεών που σχετίζονται με την επιλογή επενεργητή

Καθεμία από τις διατάξεις αυτές παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αρχικά, η χρήση πνευματικού φρένου, αν και αρκετά δημοφιλής τρόπος πέδησης, παρουσιάζει προβλήματα διακύμανσης της ροπής πέδησης, απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας και τακτικής αντικατάστασης των στοιχείων τριβής («τακάκια»). Ωστόσο, η εγκατάστασή του είναι εύκολη, πλήθος πνευματικών βαλβίδων διαφόρων τύπων διατίθεται στο εμπόριο, στους περισσότερους βιομηχανικούς χώρους, όπως και στον προς μελέτη, παρέχεται πεπιεσμένος αέρας και υπάρχει διαθέσιμη βιβλιογραφία για τον έλεγχό του.

Κύρια διαφορά της εγκατάστασης ηλεκτρικού κινητήρα λειτουργούντος ως γεννήτρια συγκριτικά με το αντίστοιχο σύστημα οδήγησης είναι το σύστημα ελέγχου με το οποίο θα συνδυαστεί. Στην περίπτωση του συστήματος οδήγησης τα αντίστοιχα συστήματα ελέγχου είναι πολύ δημοφιλή, οπότε η εύρεση και η θέση σε λειτουργία του καταλληλότερου συστήματος ελέγχου θα είναι ευκολότερη διαδικασία. Βασικό ζήτημα της γεννήτριας είναι η διάθεση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Πιθανές λύσεις είναι η σύνδεση της γεννήτριας με το ηλεκτρικό δίκτυο του εργοστασίου, επιλογή όμως που απαιτεί ηλεκτρονικά ισχύος, ή η χρήση του για τη θέρμανση ύδατος, μιας και η βιομηχανική εγκατάσταση που μελετάται παρουσιάζει ανάγκες σε ζεστό νερό.

Παρόμοια σχόλια με την περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανών, θα μπορούσαν να σημειωθούν αν συγκριθεί η χρήση υδραυλικής αντλίας και αεροσυμπιεστή με τη χρήση υδραυλικού κινητήρα με δυνατότητα λειτουργίας και ως αντλία και πνευματικού κινητήρα με τη δυνατότητα λειτουργίας και ως αεροσυμπιεστής. Βασική διαφορά μεταξύ της χρήσης υδραυλικού και πνευματικού συστήματος είναι η ύπαρξη δικτύου πεπιεσμένου αέρα στην συντριπτική πλειονότητα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Η λειτουργία του ηλεκτρομαγνητικού φρένου συνήθως βασίζεται στη χρήση ειδικής κόνεως που ανάλογα με την ηλεκτρική τάση που εφαρμόζεται σε αυτή παρουσιάζει διαφορετική πρόσφυση με τα κινούμενα μέρη της διάταξης, οπότε παράγεται διαφορετική ροπή πέδησης εξαιτίας της δημιουργούμενης τριβής. Τέτοια συστήματα είναι εμπορικά διαθέσιμα για μηχανές εκτύλιξης διαφόρων τύπων, ωστόσο εγείρονται ερωτήματα σχετικά με την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας και κατ' επέκταση για την περίοδο συνεχούς λειτουργίας του.

Η πρόταση χρήσης τυμπάνου πέδησης, αντίστοιχου με αυτά που συναντώνται σε οχήματα, αφορά την αντικατάσταση του δισκόφρενου από ένα τύμπανο πέδησης, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η περιοδικότητα στη ροπή πέδησης, διατηρώντας τη χρήση πεπιεσμένου αέρα και του αντίστοιχου ελέγχου της ροής του. Ωστόσο, και σε αυτήν την περίπτωση, θα παρουσιαστούν προβλήματα σχετικά με την ψύξη του συστήματος πέδησης.

3.3.3 Επιλογή ιδέας

Τα δύο υποπροβλήματα για τα οποία προτάθηκαν λύσεις, δηλαδή ο προσδιορισμός της τιμής της τάσης και η επιλογή επενεργητή, είναι εντελώς ανεξάρτητα. Επομένως, η επιλογή της ιδέας μπορεί να γίνει για κάθε υποπρόβλημα ξεχωριστά. Η επιλογή ιδέας θα γίνει μέσω της αξιολόγησης των πλεονεκτημάτων και των αδυναμιών κάθε προτεινόμενης λύσης, όπως αυτές παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Προσδιορισμός τιμής τάνυσης

Για τον προσδιορισμό της τιμής της τάνυσης, οι ιδέες που προκρίθηκαν είναι η χρήση δυναμοκυψέλης και η χρήση ραούλου με δυνατότητα κίνησης. Οι δυναμοκυψέλες, συγκριτικά με τα ράουλα με δυνατότητα κίνησης, είναι εκ φύσεως απλούστερες στη λειτουργία, προσφέρουν μετρήσεις υψηλότερης ακρίβειας και απαιτούν λιγότερη συντήρηση. Επιπλέον, η ποικιλία διαφορετικών τύπων δυναμοκυψελών που διατίθενται στην αγορά προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό της συνολικής διάταξης. Για τους λόγους αυτούς, επιλέγεται η χρήση δυναμοκυψελών για τον προσδιορισμό της τιμής της τάνυσης.

Όσον αφορά τον συνδυασμό των δυναμοκυψελών με ένα ή τρία ράουλα, επιλέγεται το δεύτερο προκειμένου το νέο σύστημα να είναι όσο το δυνατόν ανεξάρτητο από την υφιστάμενη εγκατάσταση και να είναι ευκολότερη η προσαρμογή του σε διαφορετικού τύπου ανέμες και γραμμές παραγωγής, παρόλο το υψηλότερο κόστος κατασκευής της διάταξης αυτής.

Η παραπάνω απόφαση συνηγορείται και από τον Πίνακα Απόφασης που ακολουθεί (*Πίνακας 3.1*). Τέθηκαν τέσσερα κριτήρια αξιολόγησης και ανάλογα με την σημασία που πιστεύεται ότι έχει καθένα από αυτά στη διάταξη προσδιορισμού της τιμής της τάνυσης τέθηκαν και οι ανάλογοι συντελεστές βαρύτητας. Κάθε λύση βαθμολογείται με 1 έως 5 σε κάθε κριτήριο, όπου το 1 αντιπροσωπεύει πολύ κακή αξιολόγηση της συγκεκριμένης λύσης στο συγκεκριμένο κριτήριο και το 5 πολύ καλή αξιολόγηση. Προσφορότερη λύση είναι αυτή με την μεγαλύτερη τελική βαθμολογία.

Πίνακας 3.1: Πίνακας απόφασης για τη διάταξη προσδιορισμού τιμής τάνυσης

Προτεινόμενη διάταξη	Κριτήριο επιλογής				Άθροισμα
	Ακρίβεια μέτρησης (35%)	Κόστος (25%)	Ευκολία υλοποίησης (20%)	Ευκολία συντήρησης (20%)	
Δυναμοκυψέλη με ένα ράουλο	3	5	5	4	4,10
Δυναμοκυψέλη με τρία ράουλα	4	4	5	4	4,20
Γραμμικό dancer roller	1	2	2	3	1,85
Περιστροφικό dancer roller	2	3	3	3	2,65

Και με τις δύο μεθόδους, προσφορότερη λύση κρίνεται η χρήση δυναμοκυψέλης σε συνδυασμό με τρία ράουλα.

Ρύθμιση εκτύλιξης ταινίας

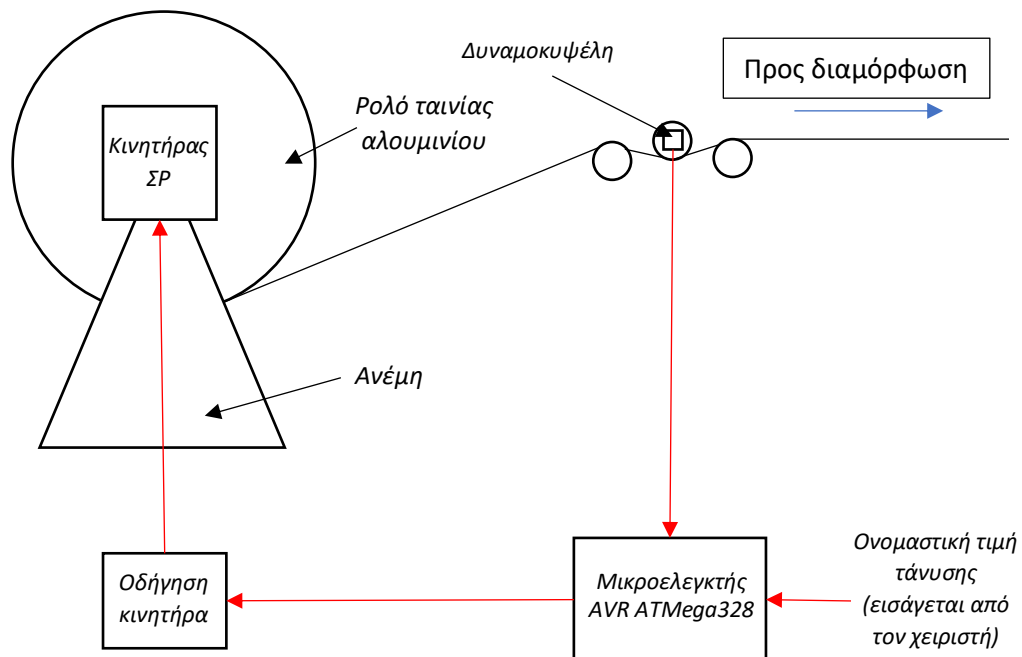
Ο επενεργητής που θα χρησιμοποιηθεί επιλέγεται να είναι σύστημα οδήγησης κι όχι πέδησης, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό του ελεγκτή, η απόδοση του οποίου λόγω της μικρής υπολογιστικής ισχύος παρουσιάζει περιορισμούς. Μεταξύ των τριών τύπων επενεργητών που προτείνονται επιλέγεται αυτή του ηλεκτρικού κινητήρα καθώς η απόκριση του είναι άμεση, ο έλεγχος του παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία, η τροφοδοσία του δεν απαιτεί ιδιαίτερη υποδομή, προσφέρει μεγάλη αξιοπιστία και η συντήρησή του είναι εύκολη.

3.4 Σχεδιασμός σε επίπεδο συστήματος

Συνοψίζοντας, το σύστημα αποτελείται από δύο επιμέρους υποσυστήματα:

- Το υποσύστημα προσδιορισμού της τιμής της τάνυσης, το οποίο αποτελείται από τρία ράουλα που παραμορφώνουν κατάλληλα την ταινία προκειμένου να μπορεί να ληφθεί μέτρηση της τάνυσης από την δυναμοκυψέλη που είναι προσαρμοσμένη στο μεσαίο εξ αυτών.
- Το υποσύστημα ρύθμισης της εκτύλιξης της ταινίας, το οποίο συνίσταται από τη μονάδα ελέγχου και τον επενεργητή. Ως μονάδα ελέγχου έχει επιλεγεί ο μικροελεγκτής AVR ATmega328 και ως επενεργητής ηλεκτρικός κινητήρας.

Στα πλαίσια του σχεδιασμού σε επίπεδο συστήματος θα πρέπει να επιλεγεί ο τύπος του κινητήρα. Οι κύριες επιλογές που είναι διαθέσιμες είναι κινητήρας συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) και κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [19], κύρια πλεονεκτήματα των κινητήρων ΣΡ είναι η ευκολία ρύθμισης των στροφών τους, η δυνατότητα μεταβολής της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής-στροφών σε σχεδόν οποιαδήποτε μορφή και με μεγάλο βαθμό απόδοσης και η δυνατότητα εφαρμογής μέχρι και πενταπλάσιας ροπής της ονομαστικής τους. Ωστόσο, για να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικό περιβάλλον θα πρέπει να προηγηθεί η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος που είναι διαθέσιμο μέσω του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε συνεχές, κάτι όμως που μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά εύκολα και οικονομικά. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά, επιλέγεται η χρήση κινητήρα ΣΡ. Στην Εικόνα 3.6 συνοψίζεται γραφικά η αρχιτεκτονική του συστήματος ρύθμισης τάνυσης που αναπτύσσεται. Η μέτρηση της τάνυσης που λαμβάνεται από τη δυναμοκυψέλη εισάγεται στον μικροελεγκτή, όπου συγκρίνεται με την ονομαστική τιμή της τάνυσης που εισάγεται από τον χειριστή, και στη συνέχεια ο μικροελεγκτής, μέσω της υλοποίησης κατευθυντή PID, αποστέλλει κατάλληλο σήμα στο σύστημα οδήγησης του κινητήρα, ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα η εκτύλιξη της ταινίας.



Εικόνα 3.6: Αρχιτεκτονική νέου συστήματος αυτόματης ρύθμισης τάνυσης ταινίας

4 Λεπτομερής σχεδιασμός σταθμού μέτρησης τάνυσης

Στα πλαίσια του προκαταρκτικού σχεδιασμού τέθηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές αναφορικά με τη μορφή και τη λειτουργία του σταθμού μέτρησης τάνυσης, δηλαδή της διάταξης όπου θα προσδιορίζεται η τιμή της τάνυσης της ταινίας. Ακολουθεί ο λεπτομερής σχεδιασμός του σταθμού, έξοδος του οποίου είναι η πλήρης προδιαγραφή της κατασκευής και της λειτουργίας του σταθμού μέτρησης τάνυσης.

Οι επιπλέον προδιαγραφές που αφορούν τις διαστάσεις του σταθμού είναι:

- Το πλάτος του σταθμού, κατά την έννοια της γραμμικής ταχύτητας της ταινίας, για λόγους χωροταξίας της υφιστάμενης εγκατάστασης, δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 300 mm.
- Η ταινία κατά την είσοδο και έξοδο της από τον σταθμό θα βρίσκεται σε ύψος 1050 mm από το οριζόντιο επίπεδο.
- Τα ράουλα θα είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα.

Τα κυριότερα υποσυστήματα του σταθμού και τα οποία θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια είναι:

- Διάταξη ραούλων για μέτρηση της τάνυσης
- Δυναμοκυψέλες
- Πλαίσιο σταθμού για τη στήριξη των ραούλων
- Διάταξη απεμπλοκής δυναμοκυψελών
- Ηλεκτρονικό υποσύστημα λήψης μετρήσεων

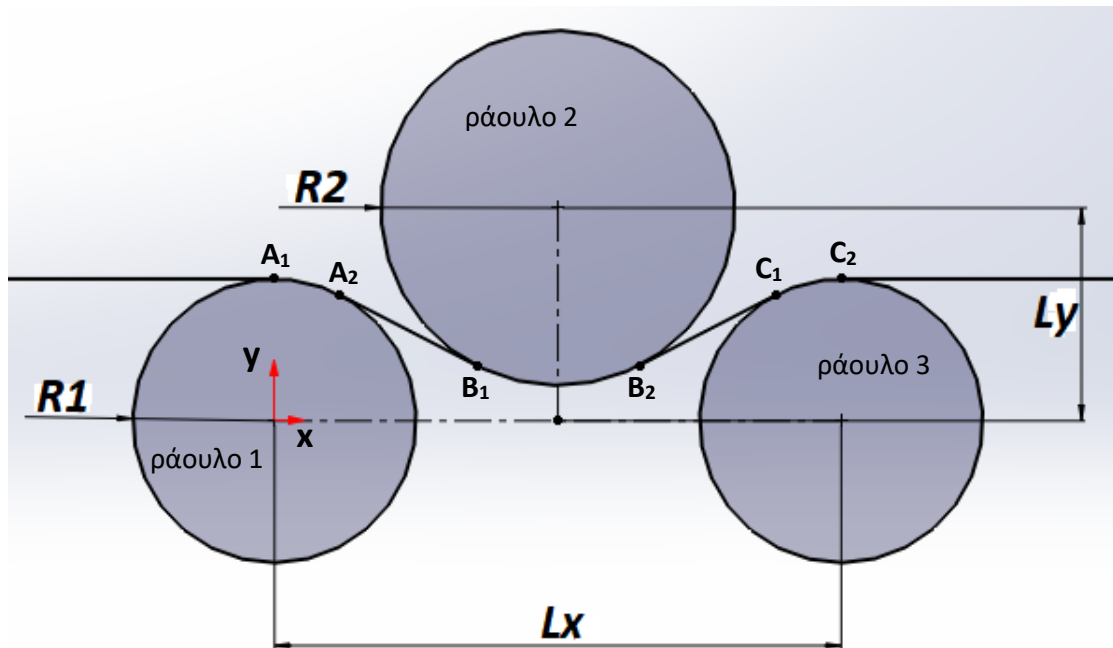
4.1 Υπολογισμός κύριων διαστάσεων

Ανάμεσα στις κυριότερες διαστάσεις του σταθμού μέτρησης της τάνυσης είναι οι διάμετροι και οι σχετικές θέσεις των τριών ραούλων. Οι διαστάσεις αυτές θα πρέπει να τεθούν με τέτοιο τρόπο ώστε η ακρίβεια των μετρήσεων της τάνυσης να είναι αποδεκτή, προκειμένου να διευκολυνθεί και ο σχεδιασμός του ελεγκτή στη συνέχεια, και ταυτόχρονα να μην προκαλούνται ελαττώματα στην ταινία αλουμινίου που θα υποβαθμίσουν την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταινία που εισέρχεται στην παραγωγική διαδικασία αναφοράς είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο σειράς 3005 και καλύπτεται από προστατευτική επίστρωση.

Οι άξονες των τριών ραούλων είναι οριζόντιοι. Θεωρούμε κατακόρυφη τομή των τριών ραούλων, όπως αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1. Για λόγους απλότητας, επιλέχθηκε τα δύο πλευρικά ράουλα να έχουν ίδια διάμετρο και να είναι συμμετρικά τοποθετημένα εκατέρωθεν του μεσαίου, μέσω του οποίου θα λαμβάνεται η μέτρηση της τάνυσης. Η ακτίνα του κεντρικού ραούλου συμβολίζεται με R_2 και η ακτίνα των πλευρικών ραούλων με R_1 . Οι άξονες των πλευρικών ραούλων τοποθετούνται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο και απέχουν μεταξύ τους απόσταση L_x , ενώ η (κατακόρυφη) απόσταση του άξονα του κεντρικού ραούλου από το επίπεδο αυτό είναι L_y .

Η ταινία κατά το πέρασμα της από το σταθμό μέτρησης τάνυσης έρχεται σε επαφή διαδοχικά με το ράουλο 1, με το ράουλο 2 και με το ράουλο 3. Τα σημεία A_1 και A_2 είναι το σημείο πρώτης επαφής και αποχωρισμού από το ράουλο 1 αντίστοιχα. Αντίστοιχα τα σημεία B_1 και B_2 για το ράουλο 2 και τα σημεία C_1 και C_2 για το ράουλο 3. Ως κύκλος 1, κύκλος 2 και κύκλος 3 ονομάζονται οι διατομές των ραούλων 1, 2 και 3 αντίστοιχα, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 4.1.

Θεωρείται ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων με αρχή το κέντρο του κύκλου 1. Ο άξονας x του συστήματος θεωρείται παράλληλος στην οριζόντια κατεύθυνση και με θετική φορά παράλληλη προς



Εικόνα 4.1: Οι κύριες διαστάσεις του σταθμού μέτρησης τάνυσης (σχήμα χωρίς κλίμακα)

την ταχύτητα της ταινίας κατά τη φάση εκτύλιξης. Η θέση και ο προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων είναι αυθαίρετος και δεν επηρεάζει την λύση του προβλήματος.

Το πάχος της ταινίας είναι σημαντικά μικρότερο από τις υπόλοιπες διαστάσεις, από 0,23 έως 0,35 mm, και για το λόγο αυτό θεωρείται αμελητέο κατά την ανάλυση που ακολουθεί.

Οι καταπονήσεις που δέχεται η ταινία είναι εφελκυσμός, λόγω της τάνυσης της, και κάμψη που προκαλείται από τα ράουλα. Οι τριβές μεταξύ ραούλων και ταινίας αμελούνται.

Λόγω της τάνυσης, θεωρείται ότι η ταινία εφάπτεται πλήρως στα ράουλα. Επομένως, μεταξύ των σημείων A_1 και A_2 , B_1 και B_2 και C_1 και C_2 η ταινία λαμβάνει τη μορφή κυκλικού τόξου ακτίνας ίσης με το αντίστοιχο ράουλο. Επιπλέον, τα τμήματα της ταινίας A_2B_1 και B_2C_1 συμπίπτουν με τις κοινές εσωτερικές εφαπτομένες των κύκλων 1 και 2 και των κύκλων 2 και 3 αντίστοιχα. Σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων που έχει ορισθεί, το ευθύγραμμο τμήμα A_2B_1 θα έχει αρνητική κλίση ενώ το ευθύγραμμο τμήμα B_2C_1 θετική κλίση.

Το πρόβλημα που θα πρέπει να λυθεί είναι η εύρεση της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται στην ταινία κατά το πέρασμά της από το σταθμό μέτρησης τάνυσης. Επειδή το πρόβλημα παρουσιάζει συμμετρία ως προς την κατακόρυφο που διέρχεται από το κέντρο του κύκλου 2, αρκεί να λυθεί το ήμισυ του προβλήματος, δεξιά ή αριστερά αυτού.

Οι συντεταγμένες των σημείων A_2 και B_1 θεωρούνται ότι είναι $A_2(x_0, y_0)$ και $B_1(x_1, y_1)$. Το κέντρο του κύκλου 1 είναι $O_1(0,0)$ και του κύκλου 2 $O_2\left(\frac{L_x}{2}, L_y\right)$ αντίστοιχα. Οι κοινές εσωτερικές εφαπτομένες των δύο κύκλων διέρχονται από το εσωτερικό κέντρο ομοιοθεσίας (internal homothetic center), έστω το σημείο $I(x_{hc}, y_{hc})$. Για το σημείο I ισχύει:

$$\begin{aligned}
 (x_{hc}, y_{hc}) &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} (x_{O1}, y_{O1}) + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (x_{O2}, y_{O2}) \Rightarrow \\
 (x_{hc}, y_{hc}) &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} (0, 0) + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(\frac{L_x}{2}, L_y \right) \Rightarrow \\
 (x_{hc}, y_{hc}) &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(\frac{L_x}{2}, L_y \right)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Έστω $P_1(x_{P1}, y_{P1})$ και $P_2(x_{P2}, y_{P2})$ τα σημεία που τέμνουν τον κύκλο 1 οι εφαπτομένες που άγονται από το σημείο $I(x_{hc}, y_{hc})$. Οπότε ισχύει [20]:

$$\begin{pmatrix} x_{P1/2} \\ y_{P1/2} \end{pmatrix} = \frac{R_1^2}{d^2} \begin{pmatrix} x_{hc}' \\ y_{hc}' \end{pmatrix} \pm \frac{R_1}{d^2} \sqrt{d^2 - R_1^2} \begin{pmatrix} -y_{hc}' \\ x_{hc}' \end{pmatrix} \tag{4.2}$$

όπου $x_{hc}' = x_{hc} - x_{O1}$, $y_{hc}' = y_{hc} - y_{O1}$ και $d = \sqrt{(x_{hc}')^2 + (y_{hc}')^2}$

Επιλέγεται το σημείο στο οποίο αντιστοιχεί εφαπτομένη με αρνητική κλίση, δηλαδή:

$$\frac{y_{hc} - y_{Pi}}{x_{hc} - x_{Pi}} < 0, i = 1, 2 \tag{4.3}$$

και το σημείο αυτό ταυτίζεται με το σημείο A_2 .

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για την εύρεση του σημείου B_1 .

Για την αυτοματοποιημένη εκτέλεση των υπολογισμών η παραπάνω διαδικασία μεταγράφηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab ως συνάρτηση, με την ονομασία itang Παράρτημα Α. Οι είσοδοι που απαιτούνται είναι οι συντεταγμένες των κέντρων των δύο κύκλων και οι ακτίνες αυτών και οι έξοδοι που λαμβάνονται είναι οι συντεταγμένες των σημείων A_2 και B_1 .

Η ονομαστική παραμόρφωση της ταινίας στη διαμήκη κατεύθυνση, δηλαδή κατά τον άξονα x του συστήματος συντεταγμένων που ορίστηκε, λόγω της τάνυσης, υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή είναι:

$$e_t = \frac{T}{E \cdot b \cdot t} \tag{4.4}$$

όπου T η τάνυση, E το μέτρο ελαστικότητας της ταινίας, b το πλάτος της ταινίας και t το πάχος αυτής.

Για την καμπυλότητα της ταινίας, ρ , σε κάθε σημείο επαφής της με το ράουλο ισχύει:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} \quad (4.5)$$

όπου $y = y(x)$ η εξίσωση που περιγράφει τη διαδρομή της ταινίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Επειδή θεωρείται ότι εξαιτίας της τάνυσης η ταινία κατά την επαφή της με το κάθε ράουλο εφάπτεται σε αυτό, η εξίσωση $y = y(x)$ είναι η εξίσωση του εκάστοτε κύκλου, δηλαδή:

$$y(x) = \sqrt{R_i^2 - x^2}, i = 1, 2 \quad (4.6)$$

$$\text{και } -R \leq x \leq R$$

με την αρχή των αξόνων του τοπικού συστήματος να ταυτίζεται με το κέντρο του κάθε κύκλου και τον άξονα x να είναι παράλληλος στην εφαπτομένη στο σημείο πρώτης επαφής της ταινίας με το εκάστοτε ράουλο.

Οπότε η σχέση (4.5) γίνεται:

$$\rho = -\frac{\left(\left(R^2 - x^2\right)^2 + 1\right)^{3/2}}{2} \quad (4.7)$$

Η ονομαστική παραμόρφωση της ταινίας εξαιτίας της κάμψης είναι:

$$e_b = -\frac{z}{\rho} \quad (4.8)$$

όπου z η απόσταση κατά την έννοια του πάχους από το μέσο επίπεδο της ταινίας.

Η μέγιστη ονομαστική παραμόρφωση που προκαλείται εξαιτίας της κάμψης είναι:

$$e_{b,\max} = \frac{t}{2|\rho|} \quad (4.9)$$

που εμφανίζεται στην επιφάνεια της ταινίας.

Η συνολική μέγιστη ονομαστική παραμόρφωση της ταινίας, σύμφωνα και με τις σχέσεις (4.4) και (4.9) είναι:

$$e_x = e_t + e_{b,\max} \Rightarrow e_x = \frac{T}{E \cdot b \cdot t} + \frac{t}{2 \cdot |\rho|} \quad (4.10)$$

Η συνάρτηση $\frac{1}{|\rho|} = \frac{2}{\left(\left(R^2 - x^2\right)^2 + 1\right)^{3/2}}$, που προκύπτει από αντιστροφή της σχέσης (4.7) είναι

αύξουσα στο πεδίο τιμών της ως σύνθεση αυξουσών συναρτήσεων.

Προφανώς, η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης προκύπτει για την μέγιστη τιμή της τάνυσης, την ελάχιστη τιμή του πλάτους της ταινίας και τη μέγιστη τιμή του x .

Παραγωγίζοντας τη σχέση (4.8) ως προς το πάχος της ταινίας, t , προκύπτει:

$$e_x'(t) = -\frac{T}{E \cdot b \cdot t^2} + \frac{1}{2 \cdot \rho} \quad (4.11)$$

Επομένως:

$$e_x'(t) = 0 \Rightarrow t_0 = \sqrt{\frac{2\rho T}{Eb}} \quad (4.12)$$

Επιπλέον, ισχύει:

$$e_x''(t) = \frac{2T}{Ebt^3} > 0 \forall t > 0 \quad (4.13)$$

Άρα, για πάχος ταινίας t_0 η παραμόρφωση γίνεται ελάχιστη, για σταθερές τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων.

Για τις τιμές των παραμέτρων που αφορούν την περίπτωση εφαρμογής, προκύπτει ότι $t_0 \approx 10^{-5} m$. Αφού το πάχος της ταινίας είναι μεταξύ $2.3 \cdot 10^{-4} m$ και $3.5 \cdot 10^{-4} m$, η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης προκύπτει για το μέγιστο δυνατό πάχος της ταινίας.

Η πραγματική παραμόρφωση της ταινίας κατά την έννοια του μήκους της είναι:

$$\varepsilon_x = \ln(1 + e_x) \quad (4.14)$$

Εξαιτίας της περιπλοκότητας του προβλήματος και της αδυναμίας πραγματοποίησης πειραμάτων, ο υπολογισμός των κυριότερων διαστάσεων του σταθμού θα γίνει με βάση διατάξεις με ράουλα που χρησιμοποιούνται στην υφιστάμενη εγκατάσταση για την αλλαγή της διεύθυνσης κίνησης της ταινίας, όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

Ως μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση της ταινίας λαμβάνεται η υπολογιζόμενη παραμόρφωση της ταινίας στο ράουλο της Εικόνα 4.2, του οποίου η διάμετρος μετρήθηκε ότι είναι 120 mm, που είναι:

$$\varepsilon_{x,\max} = 3,58\%$$



Εικόνα 4.2: Υφιστάμενο ράουλο αλλαγής διεύθυνσης κίνησης ταινίας μεταξύ ανέμης και φούρνου

Για μεγαλύτερη απλοποίηση και μείωση του κόστους της κατασκευής καθώς και διευκόλυνση της συντήρησης, αποφασίστηκε τα τρία ράουλα να είναι της ίδιας διαμέτρου, δηλαδή:

$$R_1 = R_2 = R$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον Matlab μέσω του κώδικα *web_bending* που παρατίθεται στο Παράρτημα Α, και στον οποίο εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ταινίας και του σταθμού, καθώς και οι ιδιότητες του υλικού της ταινίας, και υπολογίζεται η μέγιστη παραμόρφωση της ταινίας.

Οι βέλτιστες τιμές των κύριων διαστάσεων του σταθμού προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (trial and error method). Ιδιαίτερα για τον προσδιορισμό της διαμέτρου των ραούλων, δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα προκειμένου η τιμή της να είναι πλησίον των διαμέτρων των τυποποιημένων διάτρητων αξόνων AISI 304 του εμπορίου. Οι τιμές αυτές είναι:

$$D = 2R = 122mm$$

$$L_x = 155mm$$

$$L_y = 110mm$$

Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη πραγματική παραμόρφωση της ταινίας είναι $\varepsilon_x = 3,53\% < \varepsilon_{x,max}$.

4.2 Προδιαγραφή δυναμοκυψέλης

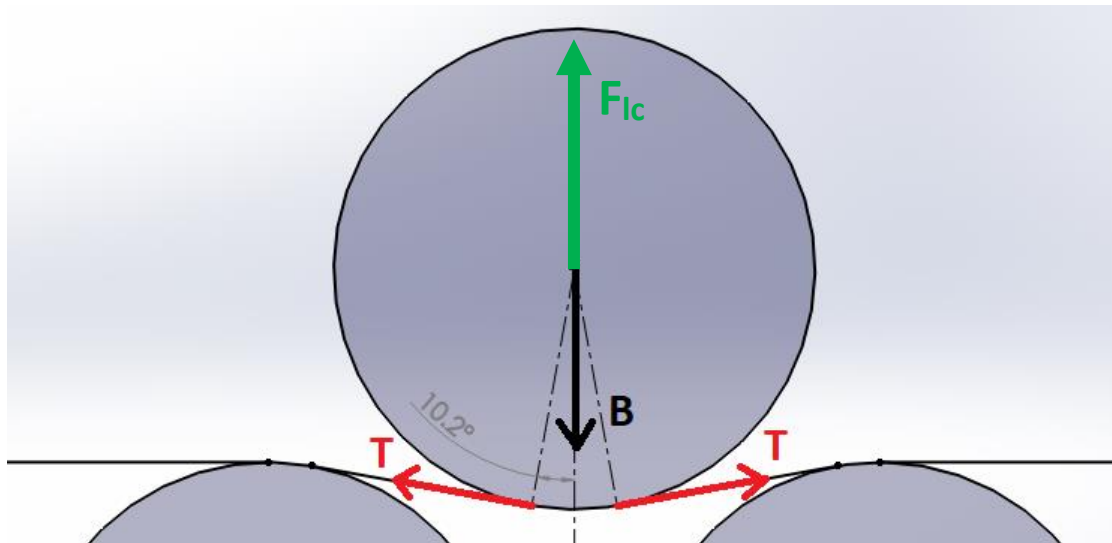
Με βάση τις κύριες διαστάσεις του σταθμού πραγματοποιείται η προδιαγραφή του εύρους μέτρησης της δυναμοκυψέλης. Οι οριακές καταστάσεις λειτουργίας είναι όταν η μηχανή βρίσκεται εκτός λειτουργίας, οπότε η δυναμοκυψέλη θα πρέπει να παραλάβει το βάρος του ραούλου μέτρησης, και όταν η τάνυση της ταινίας λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

Το πλάτος της ταινίας κυμαίνεται από 100 έως 200 mm, σύμφωνα με τις αρχικές προδιαγραφές του συστήματος (Πίνακας 1.1). Οπότε το πλάτος των ραούλων ορίζεται στα 250 mm. Στην περίπτωση αυτή το βάρος του ραούλου μέτρησης εκτιμάται ότι θα είναι περίπου 120 N.

Στην Εικόνα 4.3 αποτυπώνονται γραφικά οι δυνάμεις που ασκούνται στο ράουλο μέτρησης κατά την λειτουργία της γραμμής παραγωγής. Σύμφωνα με την ισορροπία δυνάμεων κατά τον κατακόρυφο άξονα προκύπτει το φορτίο, F_{lc} , που δέχεται η δυναμοκυψέλη:

$$F_{lc} = B - 2 \cdot T \cdot \sin(10.2^\circ) \quad (4.15)$$

όπου B το βάρος του ραούλου και T η τάνυση της ταινίας.



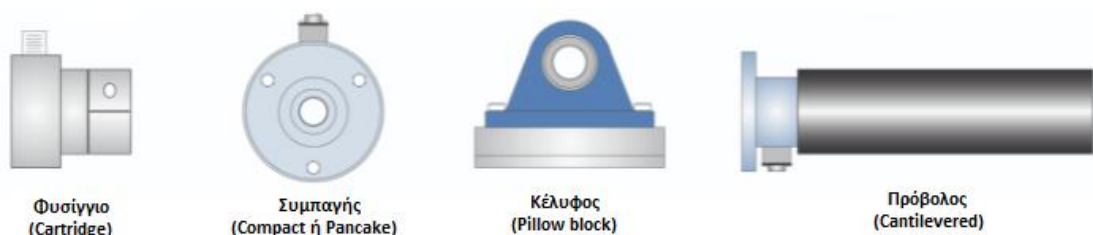
Εικόνα 4.3: Ισορροπία δυνάμεων στο ράουλο μέτρησης κατά τη λειτουργία της γραμμής παραγωγής

Επομένως, για το εύρος μέτρησης της δυναμοκυψέλης ισχύει:

$$66\text{N} \leq F_{lc} \leq 120\text{N}$$

4.3 Επιλογή δυναμοκυψέλης

Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμοι ποικίλοι τύποι δυναμοκυψελών, λιγότερο ή περισσότερο εξειδικευμένων για συγκεκριμένες εφαρμογές. Όσον αφορά τα συστήματα μέτρησης τάνυσης, οι δυναμοκυψέλες που διατίθενται είναι κατάλληλα σχεδιασμένες ώστε να προσαρμόζονται σε ράουλο. Καθώς τυπικά αποτελούν τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του ραούλου μέτρησης και του πλαισίου της μηχανής που το φιλοξενεί, ο σχεδιασμός τους επιτρέπει την εύκολη συναρμογή τους με έδρανο κύλισης και την εύκολη έδρασή τους μέσω κοχλιών στο πλαίσιο της μηχανής, ενώ διατίθενται και δυναμοκυψέλες απευθείας ενσωματωμένες σε ράουλο. Ορισμένοι τύποι εξ αυτών φαίνονται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Τύποι δυναμοκυψελών για εφαρμογή σε συστήματα μέτρησης τάνυσης (πηγή: <https://www.pffc-online.com/news/15515-web-tension-control-fundamentals>)

Σύμφωνα με έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε σε Ελλάδα και Ευρώπη σχετικά με εταιρίες διάθεσης δυναμοκυψελών για μέτρηση τάνυσης, η επιλογή περιορίστηκε στον συμπαγή τύπο δυναμοκυψέλης ή «pancake» όπως συναντάται συνήθως χάρη στο κυλινδρικό σχήμα και το μικρό πάχος του.

Στην περίπτωση αυτή, επιλέγεται η στήριξη του ραούλου μέτρησης σε δύο δυναμοκυψέλες, μία σε κάθε πλευρά του, για μεγαλύτερη ευστάθεια και ακρίβεια.

Σύμφωνα με προσφορές που ελήφθησαν από διάφορους οίκους του εξωτερικού, η πιο συμφέρουσα προσφορά ανερχόταν στα 2016,50€ και με χρόνο παράδοσης 20 με 30 εργάσιμες ημέρες. Πιο αναλυτικά, η προσφορά περιελάμβανε:

- Δύο δυναμοκυψέλες συμπαγούς τύπου ονομαστικού φορτίου 100N η κάθε μία με κόστος 773,00 € έκαστη.
- Ο αντίστοιχος ενισχυτής με κόστος 421,00 €.
- Έξοδα συσκευασίας και μεταφοράς 49,50€.

Παρόλη την καταλληλότητα των συγκεκριμένων δυναμοκυψελών για την παρούσα εφαρμογή και την διευκόλυνση που θα παρείχαν στο σχεδιασμό του πλαισίου του σταθμού, το κόστος και κυρίως ο χρόνος παράδοσης κρίθηκαν απαγορευτικά για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου.

Για το λόγο αυτό, η επιλογή αισθητηρίου κατευθύνθηκε σε πιο εμπορικούς και λιγότερο εξειδικευμένους τύπους δυναμοκυψελών. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι εξ αυτών και οι κυριότερες εφαρμογές τους καταγράφονται στον Πίνακα 4.1.

Εξ αυτών, ο τύπος που θα μπορούσε να εξυπηρετήσει καλύτερα τις ανάγκες του σχεδιασμού του πλαισίου του σταθμού και διατίθεται σε εύρος μέτρησης πλησίον του προδιαγεγραμμένου είναι οι δυναμοκυψέλες απλού σημείου.

Πίνακας 4.1: Ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τύποι δυναμοκυψελών και εφαρμογές αυτών

(πηγή: <https://www.zemiceurope.com/loadcell>)

Ονομασία στα ελληνικά	Ονομασία στα αγγλικά	Συνήθεις εφαρμογές
Απλού σημείου	Simple point	Ζυγοί μικρού και μεσαίου μεγέθους
Καμπτόμενης δοκού	Bending beam	Παλέτες, χοάνες
Δοκού διάτμησης	Shear beam	Εφαρμογές διεργασιών
Διπλής δοκού διάτμησης	Dual shear beam	Ζύγιση φορτηγών οχημάτων, δεξαμενές, χοάνες
Τύπου S	S-type	Βαρούλκα
Συμπίεσης	Compression	Ζύγιση φορτηγών οχημάτων, γεφυροπλάστιγγες, χοάνες

Σύμφωνα με προμηθευτή, οι δυναμικότητες που πλησιάζουν την προδιαγραφή είναι ονομαστικής φορτίου 6kg, 10kg και 15kg. Για λόγους ασφαλείας έναντι υπερφόρτισης και επειδή εκτιμάται ότι το σφάλμα δεν θα διαφέρει σημαντικά στα εύρη μέτρησης αυτά, επιλέγεται να τοποθετηθούν δύο δυναμοκυψέλες ονομαστικού φορτίου 15kg η καθμία και με συνολικό κόστος 142,00€. Στην Εικόνα 4.5 φαίνεται η δυναμοκυψέλη που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της τάνυσης.



Εικόνα 4.5: Η δυναμοκυψέλη PW6C 15kg της εταιρείας HBM, που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της τάνυσης (πηγή: HBM)

4.4 Λεπτομερής σχεδιασμός ραούλων

Σύμφωνα με την προδιαγραφή τα ράουλα θα κατασκευαστούν από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 και ως πρώτη ύλη θα χρησιμοποιηθεί διάτρητος άξονας εξωτερικής διαμέτρου 125mm και εσωτερικής 100mm. Για απλοποίηση της κατασκευής, τα τρία ράουλα θα είναι πανομοιότυπα, με εξωτερική διάμετρο 122mm και πλάτος 250mm.

Κάθε ράουλο θα στηρίζεται εκατέρωθεν σε έδρανα κύλισης βαθιάς αύλακος τύπου 6310 – 2RS1. Το επίθεμα 2RS1 αναφέρεται σε έδρανα με πλαστικά προστατευτικά καλύμματα για προστασία από σκόνη και επικαθίσεις. Η επιλογή των εδράνων πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής που παρέχει διαδικτυακά η εταιρεία SKF (www.skfbearingselect.com).

4.5 Λεπτομερής σχεδιασμός πλαισίου σταθμού μέτρησης τάνυσης

Το πλαίσιο του σταθμού θα αποτελείται από δύο κατοπτρικές βάσεις στήριξης που θα τοποθετηθούν εκατέρωθεν των ραούλων. Κάθε βάση στήριξης θα είναι κατασκευασμένη από μία δοκό UPN, που θα κατεργαστεί κατάλληλα. Το συνολικό πλάτος των ραούλων είναι:

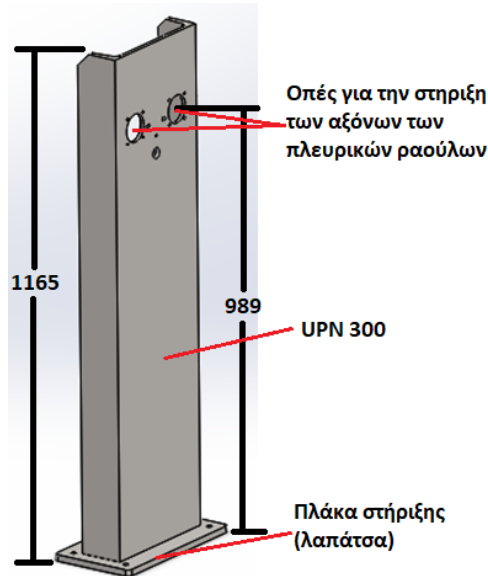
$$L_x + 2R = 155 + 2 \cdot 61 = 277mm$$

Οπότε το πλαίσιο του σταθμού θα κατασκευαστεί από δοκούς UPN300.

Οι άξονες των δύο πλευρικών ραούλων θα βρίσκονται σε ύψος:

$$\text{Επιθυμητό ύψος ταινίας – ακτίνα ραούλου} = 1050 - \frac{122}{2} = 989mm$$

Το συνολικό ύψος του πλαισίου θα είναι 1165mm, ύψος ικανό ώστε τα ράουλα και οι δυναμοκυψέλες να προστατεύονται από τυχούσες ανεπιθύμητες επαφές με αντικείμενα ή οχήματα που κινούνται στο χώρο του εργοστασίου. Η μέχρι στιγμής διαμόρφωση

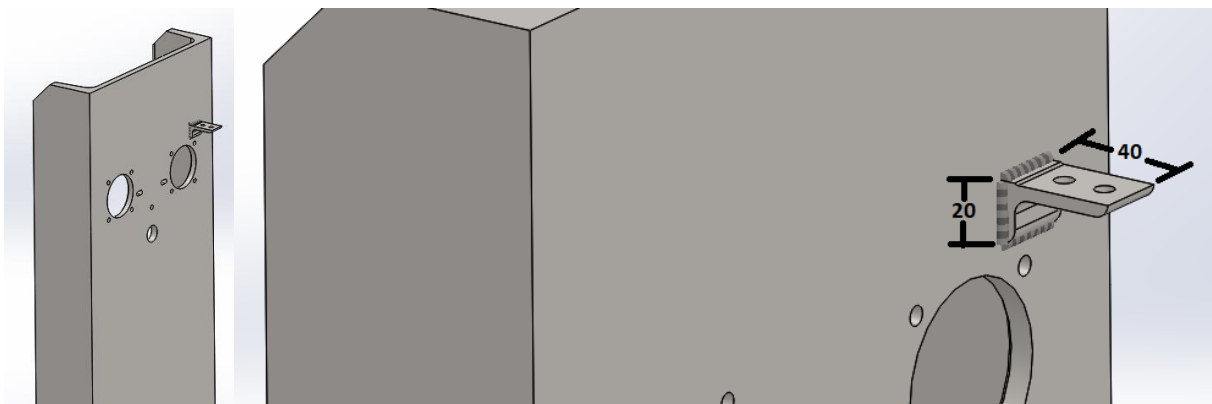


Εικόνα 4.6: Η μία εκ των δύο βάσεων στήριξης που αποτελούν το πλαίσιο του σταθμού μέτρησης τάνυσης

Οι βάσεις στήριξης των δυναμοκυψελών θα κατασκευαστούν από ανισοσκελείς γωνίες 40x20x5, που θα συγκολληθούν στις δοκούς UPN, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7. Το μήκος κάθε γωνίας θα είναι 24mm, ίσο με το μήκος της βάσης στήριξης κάθε δυναμοκυψέλης. Το πάχος της συγκόλλησης υπολογίζεται σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία σχεδιασμού από την American Welding Society (AWS) [21]. Το συνολικό βάρος του ραούλου μέτρησης υπολογίζεται ότι θα είναι 130N. Το φορτίο σχεδιασμού, για συντελεστή ασφαλείας έναντι υπερφόρτισης ίσο με 3, είναι:

$$P = 1,5 \cdot \frac{130}{2} = 97,5N$$

το οποίο ασκείται σε απόσταση $a = 0.0225m$ κατά την παράλληλη και $r = 0.106m$ κατά την κάθετη διεύθυνση ως προς τον άξονα του ραούλου.



Εικόνα 4.7: Θέση βάσης στήριξης δυναμοκυψέλης στο πλαίσιο του σταθμού μέτρησης τάνυσης

Η συγκόλληση θα είναι περιφερειακή και θα πραγματοποιηθεί στην περίμετρο ενός ορθογωνίου παραλληλογράμμου με πλευρές $b = 24mm$ (κατά την οριζόντια διεύθυνση) και $d = 20mm$ (κατά την κατακόρυφη διεύθυνση). Το μήκος της συγκόλλησης θα είναι:

$$\sum L_i = 2 \cdot (b + d) \quad (4.16)$$

Η ειδική ροπή αντίστασης σε κάμψη είναι:

$$W_l = bd + \frac{d^2}{3} \quad (4.17)$$

και η ειδική πολική ροπή αδρανείας σε στρέψη είναι:

$$J_l = \frac{(b + d)^3}{6} \quad (4.18)$$

Οι ειδικές τάσεις που θα αναπτυχθούν στην συγκόλληση είναι:

$$\text{Εφελκυστικές } f_{\varepsilon\varphi} = \frac{P}{\sum L_i} \quad (4.19)$$

$$\text{Διατμητικές } f_{\delta} = \frac{P}{\sum L_i} \quad (4.20)$$

$$\text{Καμπτικές } f_{\kappa} = \frac{P \cdot a}{W} \quad (4.21)$$

$$\text{Στρεπτικές } f_{\sigma\tau} = \frac{P \cdot r^2}{J} \quad (4.22)$$

Οι ολικές ορθές τάσεις ανά μονάδα μήκους είναι:

$$f_{\sigma} = f_{\varepsilon\varphi} + f_{\kappa} \quad (4.23)$$

και οι ολικές διατμητικές ανά μονάδα μήκους είναι:

$$f_{\tau} = f_{\delta} + f_{\sigma\tau} \quad (4.24)$$

Οπότε η ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται είναι:

$$f_{eq} = \sqrt{f_{\sigma}^2 + 1.8f_{\tau}^2} \quad (4.25)$$

Για το μορφοσίδηρο St37 είναι $\sigma_{\varepsilon\pi} = 135MPa$ και ο συντελεστής ασφαλείας είναι $N = 3.34$.

Επομένως, το ελάχιστο θεωρητικό πάχος της συγκόλλησης θα είναι:

$$h_{\min} = \frac{f_{eq} N}{0.707 \sigma_{\varepsilon\pi}} \Rightarrow h_{\min} = 3.7mm \quad (4.26)$$

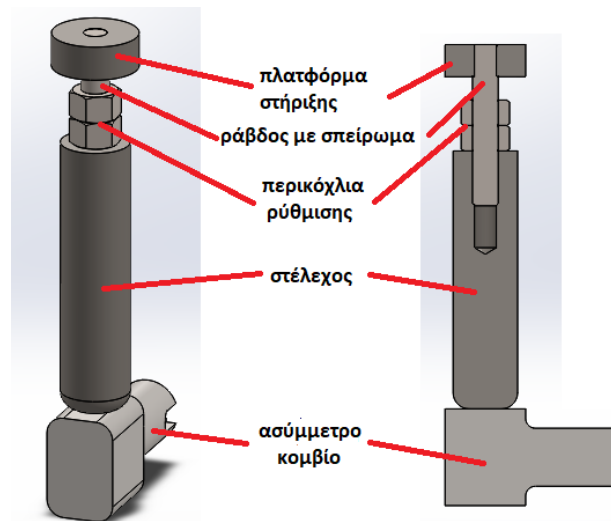
Άρα, το θεωρητικό πάχος της συγκόλλησης που θα προδιαγεγραφεί στα σχέδια είναι 4mm.

Τα λεπτομερή σχέδια του σταθμού μέτρησης τάνυσης παρατίθενται στο Παράρτημα Δ.

4.6 Διάταξη απεμπλοκής δυναμοκυψέλης

Προκειμένου να προστατευτούν οι δυναμοκυψέλες από το φαινόμενο του ερπυσμού, και τη συνεπαγόμενη αύξηση του σφάλματος μέτρησης, κρίνεται αναγκαία η στήριξη των δυναμοκυψελών και ο μηδενισμός του φορτίου που δέχονται όταν η γραμμή παραγωγής βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

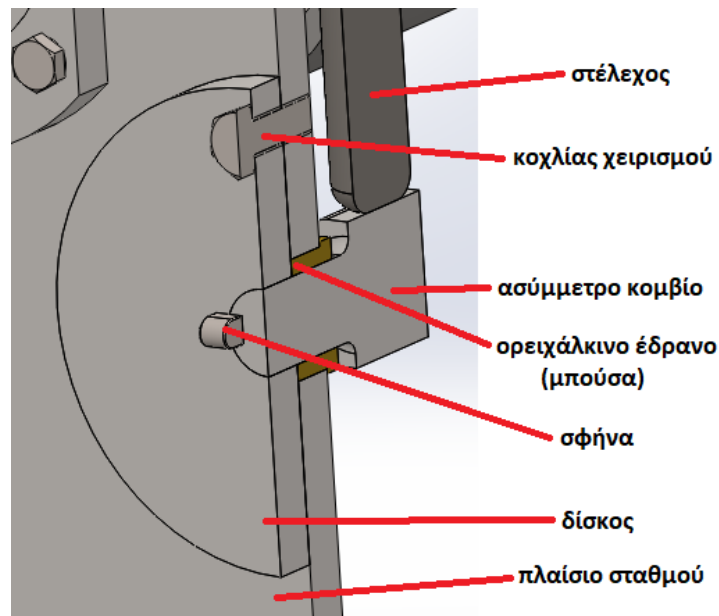
Για το σκοπό αυτό προτείνεται η διάταξη της Εικόνα 4.8. Το ασύμμετρο κομβίο δύναται να περιστραφεί από τον χειριστή της γραμμής παραγωγής. Όταν η διάταξη βρίσκεται σε θέση απεμπλοκής, όπως στην Εικόνα 4.8, η πλατφόρμα στήριξης έρχεται σε επαφή με το ελεύθερο άκρο της δυναμοκυψέλης, οπότε το φορτίο που δέχεται η δυναμοκυψέλη από το ράουλο μέτρησης μεταβιβάζεται στη διάταξη απεμπλοκής. Η πλατφόρμα ενώνεται μέσω σπειροτομημένης ράβδου



Εικόνα 4.8: Βασική δομή της προτεινόμενης διάταξης απεμπλοκής δυναμοκυψελών (αριστερά σε διμετρική προβολή και δεξιά σε τομή)

(ντίζας) με το στέλεχος. Όταν η γραμμή παραγωγής είναι έτοιμη να τεθεί σε λειτουργία, ο χειριστής θα πρέπει να περιστρέψει το κομβίο κατά 90 μοίρες, ώστε η πλατφόρμα να κατέλθει και η δυναμοκυψέλη να είναι σε θέση να λάβει μετρήσεις της τάνυσης. Η ρύθμιση της διάταξης, ώστε στη θέση απεμπλοκής η δυναμοκυψέλη να υπόκειται σε μηδενική παραμόρφωση, επιτυγχάνεται μέσω των δύο περικοχλίων στην κορυφή του στελέχους, εκ των οποίων το ένα είναι συγκολλημένο στο στέλεχος.

Για τον ευκολότερο χειρισμό της διάταξης, το κομβίο φέρει στο άκρο του δίσκο, ο οποίος συναρμολύεται στο κομβίο μέσω σφήνας. Ακόμη, ο δίσκος φέρει κοχλίας, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ευκολότερη περιστροφή του δίσκου, αλλά και η ασφάλιση του έναντι περιστροφής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9: Συναρμολγή διάταξης απεμπλοκής δυναμοκυψέλης στο πλαίσιο του σταθμού μέτρησης τάνυσης (σε τομή)

Το κομβίο στηρίζεται στο πλαίσιο του σταθμού μέτρησης τάνυσης μέσω εδράνου ολίσθησης (μπούσας) κατασκευασμένο από ορείχαλκο.

Η διάταξη σχεδιάστηκε για την απεμπλοκή μίας δυναμοκυψέλης, οπότε ο σταθμός θα πρέπει να φέρει δύο ανεξάρτητες διατάξεις απεμπλοκής. Επειδή πρόκειται να κατασκευαστούν μόνον δύο τέτοιες διατάξεις και για να μην αυξηθεί άσκοπα το κόστος κατασκευής, η προδιαγραφή της διάταξης απεμπλοκής δυναμοκυψέλης γίνεται σε επίπεδο συνοπτικού σχεδίου, που παρατίθεται στο Παράρτημα Δ, χωρίς ανοχές. Για την επιτυχή κατασκευή της, θα πρέπει να μετρηθούν και να ληφθούν υπόψη τα σφάλματα κατασκευής των συναρμολζόμενων με τη διάταξη επιφανειών του πλαισίου του σταθμού.

Σε επόμενη φάση, υπάρχει η δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας απεμπλοκής των δυναμοκυψελών μέσω της προσθήκης βηματικών κινητήρων για την περιστροφή των κομβίων.

4.7 Ηλεκτρονικό υποσύστημα σταθμού μέτρησης τάνυσης

Στόχος του ηλεκτρονικού υποσυστήματος του σταθμού μέτρησης τάνυσης είναι η μεταφορά του ηλεκτρικού σήματος που παράγουν οι δυναμοκυψέλες στον μικροελεγκτή. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση αναλογοψηφιακού μετατροπέα (A/D Converter- ADC) ανάλυσης 24-bits, κατάλληλο για δυναμοκυψέλες. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας υλοποιείται μέσω του ολοκληρωμένου κυκλώματος HX711 και έχει ρυθμό δειγματοληψίας 10 ή 80 Hz (ανάλογα τη συνδεσμολογία). Η συνδεσμολογία μεταξύ δυναμοκυψελών και αναλογοψηφιακού μετατροπέα και αυτού με τον μικροελεγκτή καταγράφεται στους Πίνακες 4.2 και Πίνακας 4.3 και αναπαρίσταται γραφικά στην Εικόνα 4.10.

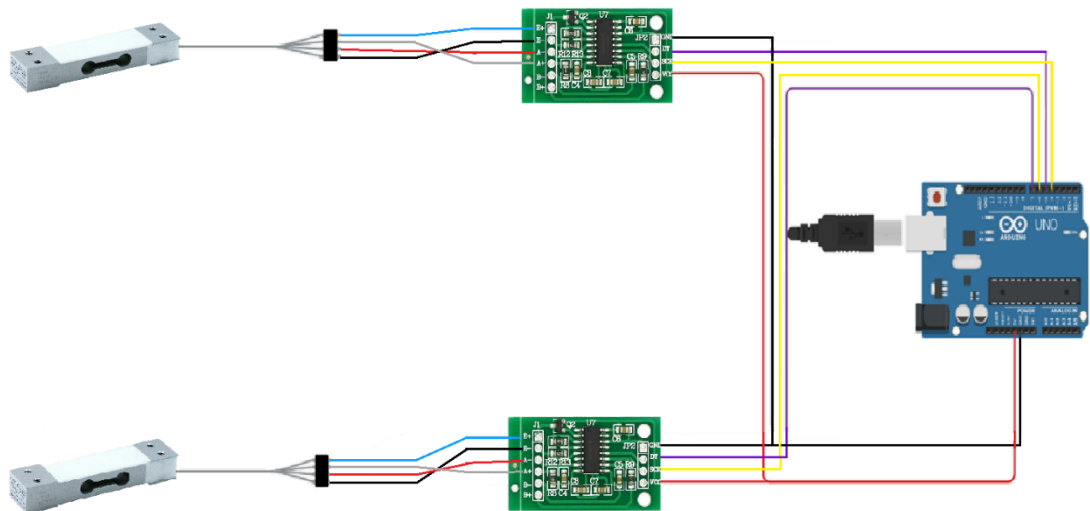
Για την ανάγνωση των σημάτων από τον μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη *HX711.h* ενώ ο κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Σκοπός του κώδικα αυτού είναι η ανάγνωση των σημάτων από τις δύο δυναμοκυψέλες και η εμφάνιση του αθροίσματός τους σε μονάδες βάρους.

Πίνακας 4.2: Συνδεσμολογία δυναμοκυψέλης - ADC

Θύρα δυναμοκυψέλης	Θύρα ADC	Χρώμα καλωδίου
Excitation (+)	E+	Μπλε
Signal (+)	A+	Λευκό
Signal (-)	A-	Κόκκινο
Excitation (-)	E-	Μαύρο

Πίνακας 4.3: Συνδεσμολογία ADC - μικροελεγκτή

Θύρα ADC	Θύρα μικροελεγκτή	Χρώμα καλωδίου	Χρήση
GND	GND	Μαύρο	Γείωση
DT	5 / 7	Μωβ	Δεδομένα
SCK	4 / 6	Κίτρινο	Χρονισμός
VCC	5V	Κόκκινο	Τάση



Εικόνα 4.10: Γραφική αναπαράσταση ηλεκτρονικού υποσυστήματος σταθμού μέτρησης τάσης

5 Βαθμονόμηση και αξιολόγηση λειτουργίας σταθμού μέτρησης τάνυσης

Στόχος είναι ο έλεγχος και η αξιολόγηση της λειτουργίας των δυναμοκυψελών, καθώς δεν έχει εντοπιστεί στη βιβλιογραφία αναφορά στη χρήση του συγκεκριμένου τύπου δυναμοκυψελών για μέτρηση δυνάμεων σε ραούλα. Για το λόγο αυτό, η βαθμονόμηση και ο έλεγχος λειτουργίας προηγείται της κατασκευής του σταθμού και πραγματοποιείται σε ψευδο-εγκατάσταση, που μιμείται την πραγματική, αγνοώντας όμως τυχόντα δυναμικά φαινόμενα ή φαινόμενα που σχετίζονται με την κίνηση της ταινίας. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο δυναμοκυψέλες κοχλιώνονται σε πακτωμένη δοκό και τα ελεύθερα άκρα τους συνδέονται με ξύλινη δοκό. Στο μέσο της ξύλινης δοκού αναρτάται δοχείο με νερό που προσομοιάζει το βάρος του ραούλου μέτρησης και την κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης τάνυσης της ταινίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1. Για την μέτρηση της μάζας του νερού που προστίθεται χρησιμοποιείται ζυγός ακριβείας οικιακής χρήσης με σφάλμα μέτρησης 1g, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του. Οι μετρήσεις μεταδίδονται απευθείας και αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω του λογισμικού Microsoft Excel και της λειτουργίας «DataStreamer» που παρέχει. Η συχνότητα λήψης μετρήσεων καθορίζεται από τον χρησιμοποιούμενο αναλογοψηφιακό μετατροπέα HX711 και είναι 10Hz.



Εικόνα 5.1: Η πειραματική διάταξη για τη βαθμονόμηση και αξιολόγηση της λειτουργίας των δυναμοκυψελών

Το συνολικό βάρος του ραούλου μέτρησης υπολογίζεται ότι θα είναι 13.3 kg. Επομένως, το εύρος μέτρησης των δυναμοκυψελών είναι:

$$F_{lc} = B - 2 \cdot T \cdot \sin(10.2^\circ) \Rightarrow F_{lc} = 13.3 \cdot 9.81 - 2 \cdot (80 \div 150) \cdot \sin(10.2^\circ) \Rightarrow F_{lc} = 77 \div 102 \text{ N} \quad (5.1)$$

Η βαθμονόμηση (calibration) πραγματοποιήθηκε με αναρτημένη μάζα μεταξύ 7kg και 11kg.

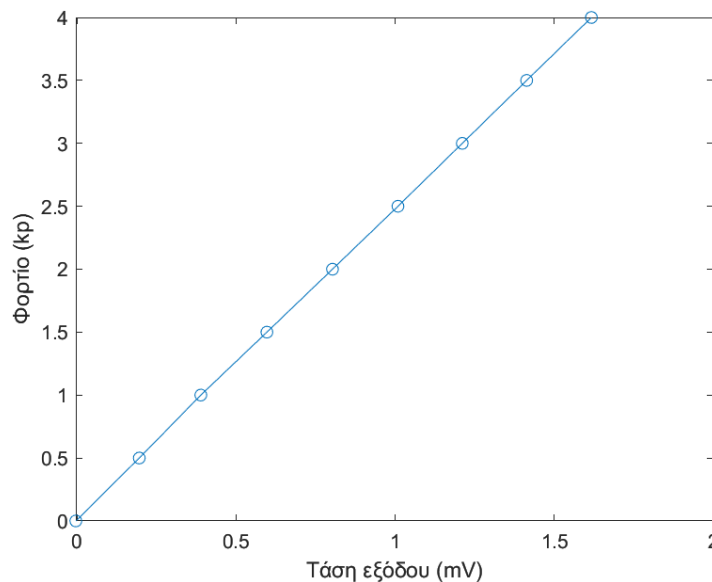
Ουσιαστικός στόχος της διαδικασίας βαθμονόμησης είναι η επιβεβαίωση της γραμμικής, ή οποιασδήποτε άλλης μορφής, συμπεριφοράς των αισθητήρων στο πεδίο μετρήσεων τους και ο προσδιορισμός των συντελεστών της εξίσωσης της καμπύλης βαθμονόμησης. Η διαδικασία αυτή

πραγματοποιήθηκε συνολικά για τη διάταξη, δηλαδή θα εξαχθεί μία καμπύλη βαθμονόμησης που θα αφορά συνολικά τις δύο δυναμοκυψέλες και τους δύο αναλογοψηφιακούς μετατροπείς, για

αναρτημένη μάζα μεταξύ 7kg και 11kg και με βήμα 0,5kg. Επειδή ο ακριβής προσδιορισμός της απόλυτης τιμής της κατακόρυφης δύναμης που δέχεται η διάταξη είναι αρκετά δύσκολος και θα εισαγάγει σφάλματα στους υπολογισμούς, κρίθηκε πως είναι προτιμότερο η αρχική αναρτημένη μάζα να μετρηθεί κατά προσέγγιση και να αναρτηθεί χωρίς η διάταξη να ευρίσκεται υπό τάση. Με αυτόν τον τρόπο, ενώ η αναρτημένη μάζα είναι 7 kg, η ένδειξη είναι μηδενική. Έτσι, η διαδικασία βαθμονόμησης δεν επηρεάζεται από σφάλματα μέτρησης της αρχικής αναρτημένης μάζας.

Οι μετρήσεις που λήφθηκαν για τη βαθμονόμηση της διάταξης και η προκύπτουσα καμπύλη βαθμονόμησης παρατίθενται στο Διάγραμμα 5-1. Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τη μεταβολή του φορτίου που δέχεται η διάταξη ενόσω ευρίσκεται υπό τάση.

Διάγραμμα 5-1: Καμπύλη βαθμονόμησης



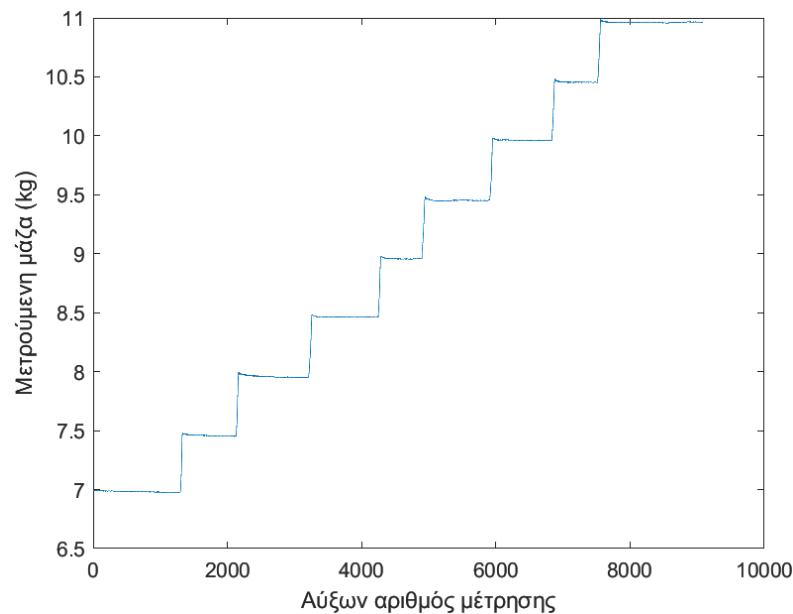
Από το Διάγραμμα 5-1 επιβεβαιώνεται η γραμμική συμπεριφορά της διάταξης στο πεδίο μετρήσεών της. Η εξίσωση της προκύπτουσας καμπύλης βαθμονόμησης είναι:

$$F = 316100 \cdot V_{lc}$$

όπου F το μετρούμενο φορτίο σε kr και V_{lc} η τάση εξόδου της διάταξης σε V.

Αφού προσδιορίστηκαν οι συντελεστές της καμπύλης βαθμονόμησης, ελήφθησαν τρεις σειρές μετρήσεων για αναρτημένη μάζα μεταξύ 7kg και 11kg και με βήμα 0,5kg για τον υπολογισμό του σφάλματος μέτρησης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι πανομοιότυπη με τη διαδικασία μετρήσεων κατά τη βαθμονόμηση, με τη διαφορά ότι η συλλογή μετρήσεων δεν σταματούσε κατά την αλλαγή της αναρτημένης μάζας. Ενδεικτικά παρατίθεται μία σειρά μετρήσεων στο Διάγραμμα 5-2. Λόγω των περιορισμών της πειραματικής διάταξης, ελήφθησαν μετρήσεις μόνο για αύξηση της αναρτημένης μάζας. Η πραγματοποίηση και η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε βάσει του προτύπου ISO 7500-1:2004 [22].

Διάγραμμα 5-2: Ενδεικτική σειρά μετρήσεων για τον υπολογισμό του σφάλματος μέτρησης



Τα δύο βασικά μεγέθη βάσει των οποίων αξιολογείται η ποιότητα μετρήσεων που λαμβάνει η διάταξη είναι [22]:

- Σχετικό σφάλμα ακριβείας (relative accuracy error)

Καθώς ο έλεγχος πραγματοποιείται με σταθερό πραγματικό φορτίο, το σχετικό σφάλμα ακριβείας, q , είναι:

$$q = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \cdot 100 \quad (5.2)$$

όπου \bar{F}_i η μέση τιμή των μετρήσεων που ελήφθησαν με σταθερό πραγματικό φορτίο, F .

- Σχετικό σφάλμα επαναληψιμότητας (relative repeatability error)

Για σταθερό πραγματικό φορτίο, το σχετικό σφάλμα επαναληψιμότητας, b , είναι:

$$b = \frac{F_{i\max} - F_{i\min}}{F} \cdot 100 \quad (5.3)$$

όπου $F_{i\max}$ και $F_{i\min}$ η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή αντίστοιχα των μετρήσεων που ελήφθησαν με σταθερό πραγματικό φορτίο, F .

Πριν όμως τον υπολογισμό των σφαλμάτων, ταυτοποιούνται και αφαιρούνται οι ακραίες τιμές με βάση τη μέθοδο ταυτοποίησης Hampel (Hampel identification method), που αποτελεί γενίκευση του κανόνα των τριών τυπικών αποκλίσεων (3-sigma rule) [23]. Σύμφωνα με την ταυτοποίηση Hampel, για μία ακολουθία δεδομένων $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ και για δεδομένο πλήθος γειτονικών μετρήσεων ανάντι και κατόντι, k , το μήκος κυλιόμενου παραθύρου είναι $2k+1$ και η τοπική διάμεσος, m_i , υπολογίζεται σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$m_i = \text{median}(x_{i-k}, x_{i-k+1}, x_{i-k+2}, \dots, x_i, \dots, x_{i+k-2}, x_{i+k-1}, x_{i+k}) \quad (5.4)$$

και την εκτιμώμενη διάμεση απόκλιση (median estimated deviation - MADse), S_i , σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$S_i = \kappa \cdot \text{median}(|x_{i-k} - m_i|, \dots, |x_{i+k} - m_i|) \quad (5.5)$$

όπου $\kappa = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \text{erfc}^{-1}\left(\frac{1}{2}\right)} \approx 1.4826$ αποτελεί αμερόληπτη εκτίμηση της κανονικής κατανομής.

Αν για την μέτρηση x_i και για δεδομένη τιμή του κατωφλιού n_σ ισχύει:

$$|x_i - m_i| > n_\sigma \cdot S_i \quad (5.6)$$

τότε η μέτρηση x_i αναγνωρίζεται ως ακραία τιμή και αντικαθίσταται από την αντίστοιχη διάμεση τιμή m_i .

Για τις μετρήσεις που βρίσκονται πλησίον των άκρων της ακολουθίας δεδομένων, ο υπολογισμός της διάμεσης τιμής και της αντίστοιχης απόκλισης γίνεται ως εξής:

- Για $i < k + 1$

$$\begin{aligned} m_i &= \text{median}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_{i+k-2}, x_{i+k-1}, x_{i+k}) \\ S_i &= \kappa \cdot \text{median}(|x_1 - m_i|, \dots, |x_{i+k} - m_i|) \end{aligned} \quad (5.7)$$

- Για $i > n - k$

$$\begin{aligned} m_i &= \text{median}(x_{i-k}, x_{i-k+1}, x_{i-k+2}, \dots, x_i, \dots, x_{n-2}, x_{n-1}, x_n) \\ S_i &= \kappa \cdot \text{median}(|x_{i-k} - m_i|, \dots, |x_n - m_i|) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Η μέθοδος ταυτοποίησης Hampel υλοποιείται μέσω της συνάρτησης *hampel* του περιβάλλοντος MATLAB, για $k = 3$ και $n_\sigma = 3$, που είναι οι τιμές που δίνονται συνήθως στα συγκεκριμένα μεγέθη.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η κλίση (gradient) των δεδομένων και αποθηκεύονται οι θέσεις των δεδομένων για τα οποία η απόλυτη τιμή της κλίσης είναι μεγαλύτερη του 0,005. Με βάση τις θέσεις αυτές προσδιορίζονται οι θέσεις μεταβολής της τιμής του πραγματικού φορτίου. Έτσι, οι μετρήσεις ταξινομούνται αυτόματα σε διαφορετικές ομάδες δεδομένων, με την κάθε ομάδα να αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή του πραγματικού φορτίου. Για να αποφευχθεί η δημιουργία δύο ομάδων δεδομένων για την ίδια τιμή πραγματικού φορτίου, τίθεται ως περιορισμός το πλήθος δεδομένων ανά ομάδα να είναι μεγαλύτερο από 80. Επιπλέον, προκειμένου στους υπολογισμούς να μην ληφθούν υπόψη μεταβατικά φαινόμενα που σχετίζονται με την προσθήκη νερού στο δοχείο, αφαιρούνται 200 μετρήσεις πριν και μετά από κάθε θέση μεταβολής του πραγματικού φορτίου.

Η καλύτερη εκτίμηση του σχετικού σφάλματος, E , είναι το σχετικό σφάλμα ακρίβειας, q . Ωστόσο, η εκτίμηση αυτή εμπεριέχει αβεβαιότητα. Αν U η ανηγμένη αβεβαιότητα, για το σχετικό σφάλμα ισχύει:

$$E = q \pm U \quad (5.9)$$

Η ανηγμένη αβεβαιότητα εμπεριέχει όρους που σχετίζονται με την επαναληψιμότητα, την ανάλυση και το πρότυπο μεταφοράς, που εμπεριέχει σφάλματα που οφείλονται σε παράγοντες, όπως η βαθμονόμηση, η θερμοκρασία και η μη γραμμικότητα. Πιο συγκεκριμένα:

- Επαναληψιμότητα

Εκτίμηση της τυπικής αβεβαιότητας που σχετίζεται με την επαναληψιμότητα, u_{rep} , δίνεται από την εξής σχέση:

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{100}{\bar{F}} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (F_j - \bar{F})^2} \right) \quad (5.10)$$

όπου n το πλήθος των μετρήσεων που λαμβάνονται για κάθε επίπεδο πραγματικού φορτίου, F_j το μετρούμενο φορτίο και \bar{F} το μέσο μετρούμενο φορτίο για την ίδια τιμή του πραγματικού φορτίου.

- Ανάλυση (Resolution)

Η ευαισθησία των δυναμοκυψελών, σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους (Παράρτημα Γ), είναι:

$$C_n = 2.2mV / V$$

Η τάση τροφοδοσίας είναι $V_{IN} = 5VDC$, επομένως η μέγιστη τάση εξόδου των δυναμοκυψελών είναι $2.2 \frac{mV}{V} \cdot 5V = 11mV$. Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας ΗΧ711 ενισχύει το σήμα κατά 128 φορές, οπότε η μέγιστη τάση εξόδου ύστερα από την ενίσχυση είναι:

$$FS = 11mV \cdot 128 = 1408mV.$$

Τα ψηφία χωρίς θόρυβο (noise-free bits) του αναλογοψηφιακού μετατροπέα δίνονται από τη σχέση:

$$noise - free - bits = \frac{\ln \left(\frac{FS}{2\sqrt{2} \cdot V_{noise,rms}} \right)}{\ln(2)} \quad (5.11)$$

όπου $V_{noise,rms}$ είναι η μέση τετραγωνική ρίζα (rms) του εισαγόμενου θορύβου (input noise) από τον μετατροπέα και είναι $V_{noise,rms} = 50nV$ (Παράρτημα Γ).

Επομένως, είναι:

$$\text{noise-free-bits} = \frac{\ln\left(\frac{1408}{2\sqrt{2} \cdot 0.050}\right)}{\ln(2)} = 13.3 \approx 13\text{bits}$$

Οπότε, η ανάλυση του ψηφιακού σήματος εξόδου, DR , είναι:

$$DR = \frac{V_{IN}}{2^{\text{noise-free-bits}}} = \frac{5V}{2^{13}} = 6.1 \cdot 10^{-4}V \quad (5.12)$$

Επομένως, η ανάλυση, r , των δυναμοκυψελών είναι:

$$r = \frac{DR}{FS} \cdot F_{nom} \Rightarrow r = \frac{6.1 \cdot 10^{-4}V}{1.408V} \cdot 15kg = 6.5 \cdot 10^{-3}kg \quad (5.13)$$

Άρα, η σχετική ανάλυση (relative resolution), a , είναι:

$$a = \frac{r}{F} \cdot 100 \quad (5.14)$$

όπου F το εκάστοτε ασκούμενο πραγματικό φορτίο.

Η αβεβαιότητα λόγω ανάλυσης είναι:

$$u_{res} = \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad (5.15)$$

- Πρότυπο μεταφοράς (Transfer standard)

Η αβεβαιότητα σύμφωνα με το πρότυπο μεταφοράς, u_{std} , λαμβάνει την τυπική τιμή, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7500-1:2004 που είναι:

$$u_{std} = 0.12\%$$

Η ανηγμένη αβεβαιότητα είναι:

$$U = 2\sqrt{u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_{std}^2} \quad (5.16)$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον MATLAB μέσω του προγράμματος «water calibration data processing», που παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

Στους Πίνακες Πίνακας 5.1: Σχετικό σφάλμα ακριβείας για τις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου Πίνακας 5.1 και Πίνακας 5.2 καταγράφονται οι υπολογισθείσες τιμές των σχετικών σφαλμάτων ακριβείας και επαναληψιμότητας αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σχετικό σφάλμα ακριβείας δεν ξεπερνά κατ' απόλυτη τιμή το 0,8% και το σχετικό σφάλμα επαναληψιμότητας το 0,7%. Όσον αφορά την ανηγμένη αβεβαιότητα προσδιορισμού του σχετικού σφάλματος, ο όρος u_{rep} είναι κατά πολύ μικρότερος των άλλων δύο όρων και για το λόγο αυτό οι τιμές της αβεβαιότητας που δίνονται στον Πίνακας 5.3 είναι κοινές για τις τρεις σειρές μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανηγμένη αβεβαιότητα είναι μικρότερη του 0,13% του πραγματικού φορτίου.

Το μέσο σχετικό σφάλμα μέτρησης των δυναμοκυψελών υπολογίστηκε ότι είναι:

$$E_{mean} = -(0.3 \pm 0.13)\%$$

το οποίο κρίνεται ως εξαιρετικά ικανοποιητικό.

Πέραν τούτων, πραγματοποιήθηκαν τρεις επιπλέον σειρές μετρήσεων κατά τις οποίες ασκούνταν στην ξύλινη δοκό οριζόντιο φορτίο 2kr, 3kr και 4kr αντίστοιχα, ώστε να διαπιστωθεί αν η ακρίβεια των μετρήσεων επηρεάζεται από οριζόντια φορτία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2, το οριζόντιο φορτίο μετριόταν με «ζυγαριά-καντάρι». Οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως και οι αντίστοιχες των τριών αρχικών σειρών.

Πίνακας 5.1: Σχετικό σφάλμα ακριβείας για τις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου

Πραγματικό φορτίο (kg)	Σχετικό σφάλμα ακριβείας (%)			
	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	3 ^η σειρά	Μέγιστο(κατ' απόλυτη τιμή)
7,000	-0,066	-0,044	-0,341	-0,341
7,500	0,177	-0,027	-0,752	-0,752
8,000	-0,174	-0,280	-0,693	-0,693
8,500	-0,095	-0,410	-0,563	-0,563
9,000	0,005	-0,308	-0,586	-0,586
9,500	0,011	-0,445	-0,634	-0,634
10,000	0,046	-0,515	-0,467	-0,515
10,500	0,085	-0,357	-0,522	-0,522
11,000	-0,013	-0,355	-0,414	-0,414

Πίνακας 5.2: Σχετικό σφάλμα επαναληψιμότητας για τις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου

Πραγματικό φορτίο (kg)	Σχετικό σφάλμα επαναληψιμότητας (%)			
	1 ^η σειρά	2 ^η σειρά	3 ^η σειρά	Μέγιστο(κατ' απόλυτη τιμή)
7,000	0,120	0,460	0,400	0,460
7,500	0,582	0,382	0,527	0,582
8,000	0,483	0,583	0,667	0,667
8,500	0,385	0,585	0,400	0,585
9,000	0,414	0,400	0,400	0,414
9,500	0,413	0,293	0,453	0,453
10,000	0,212	0,288	0,325	0,325
10,500	0,376	0,659	0,306	0,659
11,000	0,356	0,267	0,344	0,356

Πίνακας 5.3: Ανηγμένη αβεβαιότητα για τις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου

Πραγματικό φορτίο (kg)	Ανηγμένη αβεβαιότητα (%)
7,000	0,1257
7,500	0,1248
8,000	0,1240
8,500	0,1234
9,000	0,1230
9,500	0,1226
10,000	0,1223
10,500	0,1220
11,000	0,1218

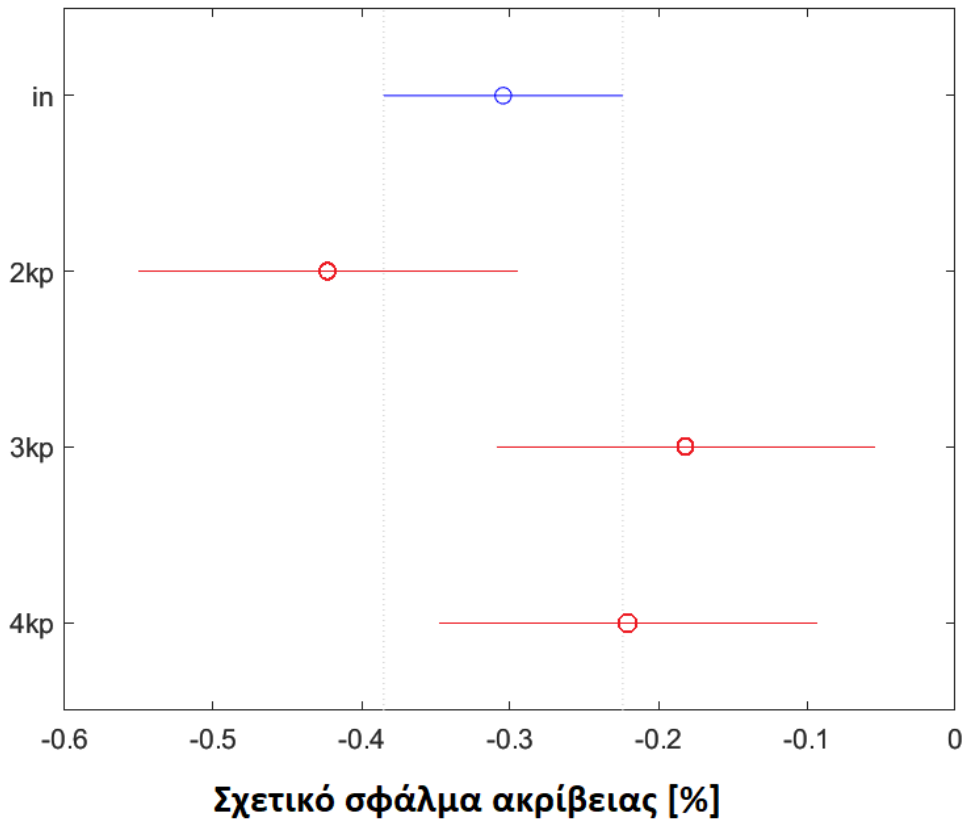


Εικόνα 5.2: Η πειραματική διάταξη αξιολόγησης της λειτουργίας των δυναμοκυψελών ενεργού οριζόντιου φορτίου

Στη συνέχεια, διερευνάται η επίδραση του οριζόντιου φορτίου στην ακρίβεια των μετρήσεων μέσω Ανάλυσης Διακύμανσης κατά ένα παράγοντα (One-way ANOVA) μεταξύ των μετρήσεων χωρίς την επίδραση οριζόντιου φορτίου και καθεμιάς σειράς μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε με την επίδραση οριζόντιου φορτίου. Η Ανάλυση Διακύμανσης πραγματοποιήθηκε μέσω της συνάρτησης *anova1* του περιβάλλοντος MATLAB και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στο Διάγραμμα 5-3. Μηδενική υπόθεση της συγκεκριμένης δοκιμασίας είναι ότι τα δείγματα προέρχονται από πληθυσμούς με την ίδια μέση τιμή. Το επίπεδο σημαντικότητας επιλέγεται να είναι 5%, δηλαδή εάν η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή εάν η υπολογιζόμενη πιθανότητα είναι μεγαλύτερη του 5%. Η υπολογιζόμενη πιθανότητα είναι 7%, οπότε η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή με επίπεδο σημαντικότητας 5%. Με άλλα λόγια, οι μέσες τιμές των δειγμάτων δεν διαφέρουν στατιστικά

σημαντικά που σημαίνει ότι η επίδραση οριζόντιου φορτίου δεν φαίνεται να επηρεάζει την ακρίβεια μέτρησης. Ωστόσο, το σχετικά μικρό ποσοστό αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης δείχνει ότι διάφοροι άλλοι παράγοντες ασκούν πιθανώς σημαντική επίδραση στην ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση όμως τα επίπεδα του σχετικού σφάλματος ακρίβειας παραμένουν σε ικανοποιητικά επίπεδα για το προς σχεδίαση σύστημα.

Διάγραμμα 5-3: Ανάλυση Διακύμανσης κατά ένα παράγοντα

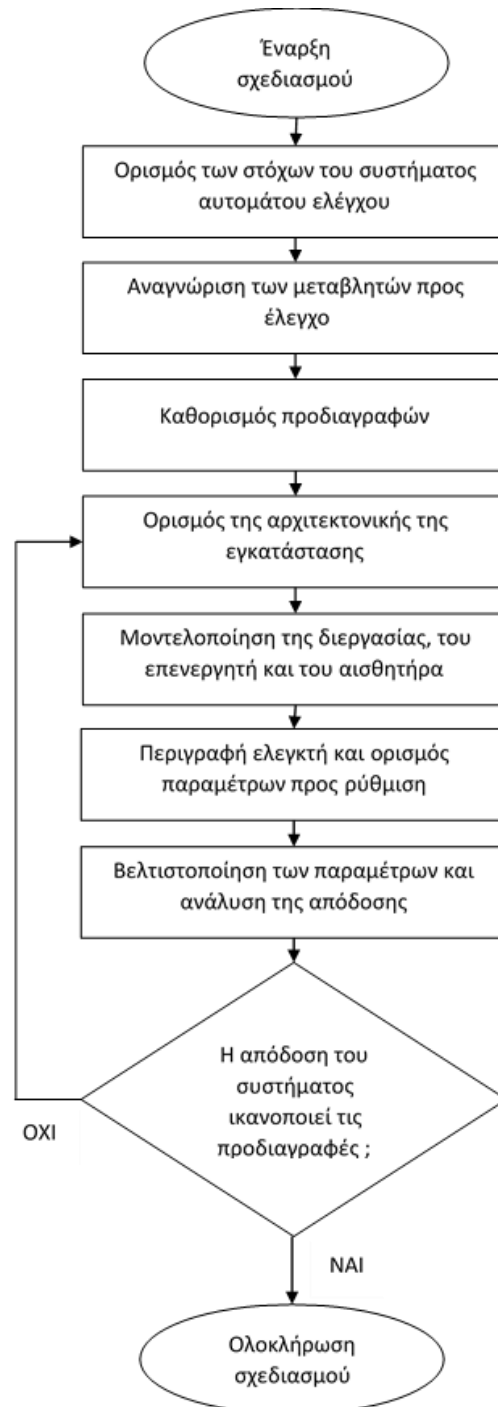


Με «in» συμβολίζεται το δείγμα των τριών σειρών μετρήσεων χωρίς την επίδραση οριζόντιου φορτίου και με «2kr», «3kr», «4kr» οι μετρήσεις με την επίδραση της αντίστοιχης τιμής οριζόντιου φορτίου.

6 Σχεδιασμός συστήματος αυτομάτου ελέγχου

6.1 Διαδικασία σχεδιασμού συστήματος αυτομάτου ελέγχου

Ο σχεδιασμός συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αποτελεί ειδική περίπτωση μηχανολογικού σχεδιασμού [24]. Ωστόσο, παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες και για το λόγο αυτό γίνεται ιδιαίτερη μνεία. Η διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου αποτελείται από επτά βήματα, τα οποία καταγράφονται στην Εικόνα 6.1. Πρώτο βήμα είναι ο ορισμός των στόχων που θα πρέπει να επιτύχει το προς σχεδιασμό σύστημα και ακολουθούν η αναγνώριση των μεταβλητών που θα ελεγχθούν καθώς και ο ορισμός των προδιαγραφών που θα πρέπει να ικανοποιηθούν, οι οποίες στη συνέχεια



Εικόνα 6.1: Η διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (προσαρμοσμένη από [24])

θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν. Οι προδιαγραφές απόδοσης, δηλαδή η περιγραφή της απόδοσης του συστήματος κλειστού βρόγχου, μπορούν να περιλαμβάνουν καλή ρύθμιση έναντι διαταραχών, επιθυμητή απόκριση σε εντολές, ρεαλιστικά σήματα προς τους επενεργητές, χαμηλή ευαισθησία και ευρωστία. Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός της αρχιτεκτονικής της εγκατάστασης (system configuration), δηλαδή η περιγραφή του φυσικού συστήματος που πρόκειται να ελεγχθεί και ο τρόπος με τον οποίον θα επιτευχθεί αυτό σε επίπεδο υλισμικού. Ακολουθεί η μοντελοποίηση της εγκατάστασης, του επενεργητή και του αισθητήρα και στη συνέχεια η περιγραφή του σχήματος ελέγχου που θα εφαρμοστεί και ο ορισμός των παραμέτρων του που θα υπολογισθούν. Τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι ο υπολογισμός των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή και η ανάλυση της απόδοσης του συστήματος, μέσω προσομοιώσεων ή/και πειραμάτων. Αν από την ανάλυση αυτή προκύψει ότι το προς σχεδιασμό σύστημα ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί, η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρώνεται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο σχεδιασμός επιστρέφει στον ορισμό της αρχιτεκτονικής του φυσικού συστήματος ή σε κάποιο επόμενο βήμα, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές.

Σχετικά με το σχεδιασμό του συστήματος αυτομάτου ελέγχου της διάταξης ρύθμισης τάνυσης της ταινίας, τα βήματα που αφορούν τον ορισμό των στόχων, την αναγνώριση των μεταβλητών προς έλεγχο και τον καθορισμό των προδιαγραφών έχουν πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 1 και ο ορισμός της αρχιτεκτονικής του συνολικού συστήματος έχει πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 3 και για το λόγο αυτό παραλείπεται να αναφερθούν εκ νέου. Επόμενο βήμα στο σχεδιασμό του συστήματος αυτομάτου ελέγχου είναι η μοντελοποίηση της εγκατάστασης.

6.2 Μοντελοποίηση εγκατάστασης

Η μοντελοποίηση της εγκατάστασης αφορά τη δημιουργία ενός μοντέλου που θα προσομοιώνει με την επιθυμητή συνέπεια την υφιστάμενη εγκατάσταση, το σύστημα μέτρησης της τάνυσης και τον επενεργητή που θα τοποθετηθεί. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [11], τα συστήματα τάνυσης χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητα και άμεση εξάρτηση από τον χρόνο, είναι πολυμεταβλητά και εμπεριέχουν διαφόρων ειδών αβεβαιότητες. Για τους λόγους αυτούς και προκειμένου να γίνουν οι ελάχιστες κατά το δυνατόν παραδοχές και απλουστεύσεις, επιλέχθηκε η μοντελοποίηση να πραγματοποιηθεί αποκλειστικά στο περιβάλλον Simulink/SimSpace που παρέχεται μέσω του MATLAB.

Τα κύρια μέρη της εγκατάστασης είναι:

- Η ταινία αλουμινίου
- Η ανέμη, όπου πραγματοποιείται η εκτύλιξη του ρολού ταινίας
- Η μηχανή διαμόρφωσης, ως προς την επίδραση που ασκεί στην τάνυση της ταινίας
- Ο σταθμός μέτρησης τάνυσης
- Ο επενεργητής, δηλαδή ο ηλεκτρικός κινητήρας που οδηγεί την ανέμη

Στη συνέχεια, επιχειρείται η μοντελοποίηση καθενός από τα μέρη αυτά και η μεταξύ τους σύζευξη. Η θέρμανση της ταινίας δεν λαμβάνεται υπόψη καθώς η τελική θερμοκρασία της ταινίας είναι 40-45 °C.

Η ταινία αλουμινίου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ιδανικό ελατήριο, αγνοώντας τυχούσες μη γραμμικότητες του υλικού και ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Για την ελαστική περιοχή ισχύει:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

όπου σ η τάση, E το μέτρο ελαστικότητας και ε η παραμόρφωση. Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή της δύναμης στη διατομή της ταινίας, ισχύει για την τάση:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6.2)$$

όπου F η δύναμη τάνυσης και A το εμβαδόν της διατομής της ταινίας. Από με τον ορισμό της παραμόρφωσης προκύπτει:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6.3)$$

όπου L το αρχικό μήκος της ταινίας και ΔL η προκληθείσα επιμήκυνση της ταινίας εξαιτίας της δύναμης F . Αντικαθιστώντας τις σχέσεις $\sigma = \frac{F}{A}$ (6.2) και

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6.2) \text{ στη σχέση } \sigma = E \cdot \varepsilon$$

(6.1), προκύπτει:

$$\frac{F}{A} = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \Rightarrow F = \frac{AE}{L} \cdot \Delta L \Rightarrow F = \frac{Ebt}{L} \cdot \Delta L \quad (6.4)$$

όπου b το πλάτος της ταινίας και t το πάχος της.

Οπότε η ταινία μοντελοποιείται ως ιδανικό ελατήριο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2, με σταθερά:

$$k = \frac{AE}{L} \quad (6.5)$$

Το κράμα κατασκευής της ταινίας είναι 3005. Σύμφωνα με στοιχεία της ιστοσελίδα matweb.com ισχύει:

$$E_{3005} = 69GPa$$

Ως αρχικό μήκος της ταινίας νοείται το μήκος απαραμόρφωτης ταινίας μεταξύ του σημείου που αυτή εκτυλίσσεται από το ρολό στην ανέμη και τη μηχανή διαμόρφωσης. Το μήκος αυτό εκτιμάται ότι είναι:

$$L = 5m$$

Για το πλάτος και το ύψος της ταινίας λαμβάνονται για τη φάση του σχεδιασμού μέσες τιμές των προδιαγραφών που έχουν τεθεί, ήτοι:

$$b = 150mm \text{ και } t = 0.3mm$$



Εικόνα 6.2: Δομικό στοιχείο ιδανικού ελατηρίου μέσω του οποίου μοντελοποιείται η ταινία στο περιβάλλον Simscape

Το ρολό της ταινίας μοντελοποιείται με τη χρήση της σπείρας του Αρχιμήδη. Σε πολικές συντεταγμένες η εξίσωση της σπείρας του Αρχιμήδη είναι [25]:

$$r = \frac{s}{2\pi} \theta, \Theta_i \leq \theta \leq \Theta_o \quad (6.6)$$

όπου s το βήμα της σπείρας, που εν προκειμένω ισούται με το πάχος της ταινίας, Θ_i και Θ_o η γωνία του αρχικού και του τελικού σημείου της σπείρας. Οι γωνίες αυτές, με βάση τη σχέση

$$r = \frac{s}{2\pi} \theta, \Theta_i \leq \theta \leq \Theta_o \quad (6.6), \text{ ισούνται:}$$

$$\Theta_i = \frac{2\pi R_i}{s} \quad (6.7)$$

$$\text{και } \Theta_o = \frac{2\pi R_o}{s} \quad (6.8)$$

όπου R_i και R_o η εσωτερική και η εξωτερική ακτίνα αντίστοιχα του ρολού. Παραγωγίζοντας ως προς το χρόνο τη σχέση $r = \frac{s}{2\pi} \theta, \Theta_i \leq \theta \leq \Theta_o$ (6.6) προκύπτει:

$$\dot{r} = -\frac{s}{2\pi} \dot{\theta} \quad (6.9)$$

Όμως, για την γωνιακή ταχύτητα ισχύει:

$$\dot{\theta} = \frac{u}{r} \quad (6.10)$$

όπου u η γραμμική ταχύτητα της ταινίας στο σημείο που αποχωρίζεται από το ρολό.

Αντικαθιστώντας τη σχέση $\dot{\theta} = \frac{u}{r}$ (6.10) στην σχέση

(6.9) προκύπτει:

$$\dot{r} = -\frac{s}{2\pi} \frac{u}{r} \Rightarrow$$

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{s}{2\pi} \frac{u}{r} \Rightarrow$$

$$2rdr = -\frac{s \cdot u}{2\pi} dt \Rightarrow \int$$

$$r^2 = -\frac{S}{\pi} \int u dt + c \quad (6.11)$$

Για $t=0, r=R_o$. Επομένως $c = R_o^2$ και προκύπτει:

$$r^2 = R_o^2 - \frac{S}{\pi} \int u dt \Rightarrow$$

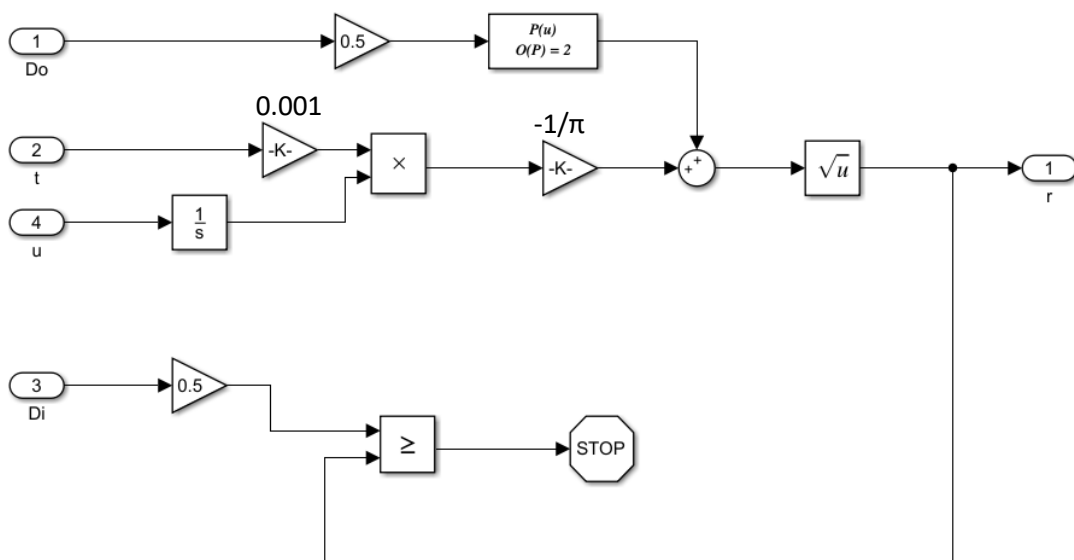
$$r = \sqrt{R_o^2 - \frac{S}{\pi} \int u dt} \quad (6.12)$$

Η σχέση $r = \sqrt{R_o^2 - \frac{S}{\pi} \int u dt}$ (6.12) υλοποιείται στο περιβάλλον Simulink μέσω του υποσυστήματος (subsystem) της Εικόνα 6.3.

Η ροπή αδρανείας του ρολού αλουμινίου ως προς τον άξονα συμμετρίας του, που συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής του στην ανέμη κατά την εκτύλιξη, είναι:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho_{Al} \cdot b \cdot (R_o^4 - r^4) \quad (6.13)$$

όπου $\rho_{Al} = 2730 \frac{kg}{m^3}$ η πυκνότητα του κράματος αλουμινίου 3005 σύμφωνα με την ιστοσελίδα matweb.com.

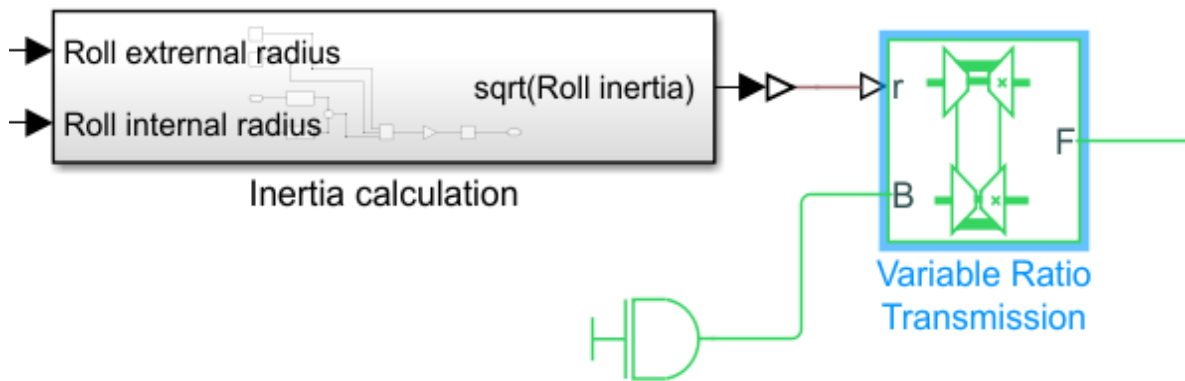


Εικόνα 6.3: Το υποσύστημα (subsystem) του Simulink “Coil radius calculator” που υπολογίζει την εξωτερική ακτίνα του ρολού αλουμινίου

Με D_o και D_i συμβολίζεται η εξωτερική και η εσωτερική διάμετρος αντίστοιχα του ρολού αλουμινίου, t το πάχος της ταινίας και u η γραμμική ταχύτητα της ταινίας όταν αποχωρίζεται από το ρολό.

Η ροπή αδρανείας του ρολού μοντελοποιείται ως μία μοναδιαία αδράνεια που συνδέεται στο σύστημα μέσω δομικού στοιχείου Μεταβλητής Σχέσης Μετάδοσης (Variable Ratio Transmission) όπου

η τιμή της σχέσης μετάδοσης θα ισούται με την τετραγωνική ρίζα της ροπής αδρανείας του ρολού αφού για το δομικό στοιχείο ισχύει:

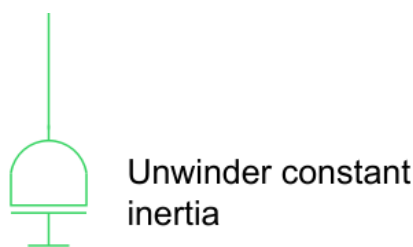


Εικόνα 6.4: Μοντελοποίηση ροπής αδρανείας ρολού αλουμινίου

Στο υποσύστημα «Inertia calculation» υλοποιείται η σχέση (6.14)

$$I_{eff} = r^2 \cdot I_{con} \quad (6.14)$$

όπου I_{con} η σταθερή ροπή αδρανείας που συνδέεται στην πύλη B του στοιχείου, r η σχέση μετάδοσης και I_{eff} η ενεργούσα ροπή αδρανείας στην πύλη F. Το στοιχείο φαίνεται στην Εικόνα 6.4 .



Εικόνα 6.5: Δομικό στοιχείο αδρανείας (inertia) μέσω του οποίου εισάγεται η ροπή αδρανείας των περιστρεφόμενων μερών της ανέμης στο περιβάλλον Simscape

Η ανέμη αποτυπώθηκε μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και μοντελοποιήθηκε με ακρίβεια στο λογισμικό Solidworks, μέσω του οποίου υπολογίστηκε ότι η ροπή αδρανείας των περιστρεφόμενων μερών της ανέμης είναι:

$$I_{unwinder} = 2.45 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιήθηκε θεωρώντας ότι το υλικό της ατράκτου είναι χάλυβας AISI 4340 Steel, annealed και των υπόλοιπων τεμαχίων είναι χάλυβας κατά DIN 1.0037 (S235JR). Η ροπή

αδρανείας των περιστρεφόμενων μερών της ανέμης εισήχθη στο περιβάλλον Simscape μέσω ενός δομικού στοιχείου αδράνειας (inertia), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.5.



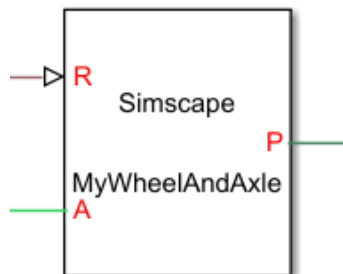
Εικόνα 6.6: Δομικό στοιχείο περιστροφικού αποσβεστήρα (rotational damper)

Ο συντελεστής ιξώδους τριβής στα έδρανα της ατράκτου της ανέμης εκτιμήθηκε ότι είναι [26]:

$$B_{unwinder} = 0.005 \frac{Nm}{\frac{rad}{s}}$$

Οι απώλειες λόγω ιξώδους τριβής στα έδρανα της ανέμης εισήχθησαν στο περιβάλλον Simscape μέσω του δομικού στοιχείου περιστροφικού αποσβεστήρα (rotational damper), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.6 .

Η μοντελοποίηση της ανέμης ολοκληρώνεται με το προσαρμοσμένο δομικό στοιχείο (custom block) «Τροχός και άξονας» (My Wheel And Axle), μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η σύζευξη του



Εικόνα 6.7: Το προσαρμοσμένο δομικό στοιχείο «τροχός και άξονας» (My Wheel And Axle)

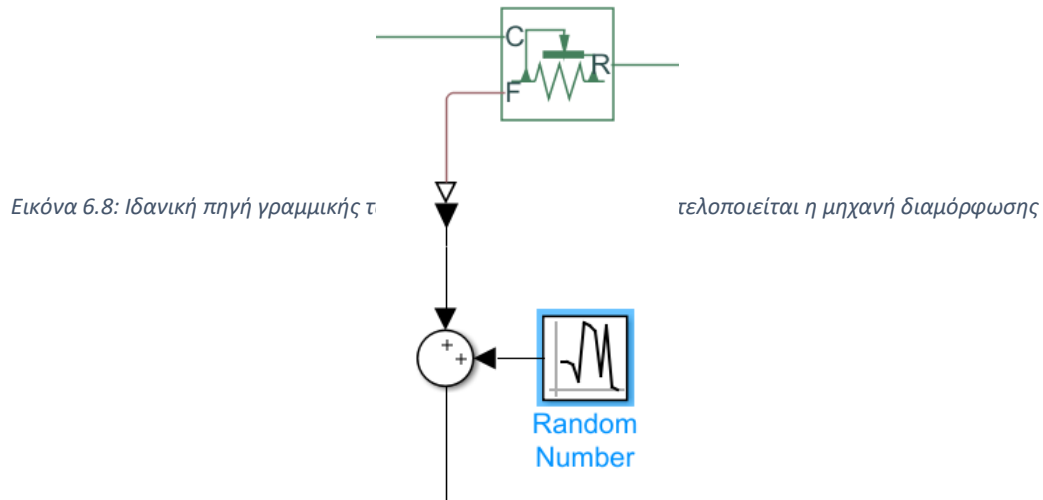
περιστροφικού συστήματος της ανέμης με το γραμμικό σύστημα της ταινίας και αντιστοιχεί στο σημείο αποχωρισμού της ταινίας από το ρολό. Το στοιχείο φαίνεται στην Εικόνα 6.7 .

Το συγκεκριμένο στοιχείο υλοποιεί τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} T + r \cdot F &= 0 \\ u - r \cdot \omega &= 0 \end{aligned} \tag{6.15}$$

όπου T και ω η ροπή και η στροφική ταχύτητα αντίστοιχα στην πύλη A, F και u η δύναμη και η γραμμική ταχύτητα στην πύλη P και r η ακτίνα του ρολού.

Η μηχανή διαμόρφωσης μοντελοποιείται ως ιδανική πηγή γραμμικής ταχύτητας (Ideal translational velocity source), το σύμβολο της οποίας φαίνεται στην Εικόνα 0.8 και η οποία επιβάλλει μεταξύ των άκρων της προδιαγεγραμμένη διαφορά γραμμικής ταχύτητας ανεξάρτητα από τη δύναμη που απαιτείται για να επιτευχθεί αυτό.



Εικόνα 6.8: Ιδανική πηγή γραμμικής v

τελοποιείται η μηχανή διαμόρφωσης

Εικόνα 6.10: Πρόσθεση ενός τυχαίου αριθμού στην ένδειξη του ιδανικού αισθητήρα δύναμης για τη μοντελοποίηση του σφάλματος μέτρησης

Ο σταθμός μέτρησης τάνυσης μοντελοποιείται ως ιδανικός αισθητήρας δύναμης (Ideal Force Sensor), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.10 . Το σφάλμα μέτρησης των δυναμοκυψελών εισάγεται μέσω της πρόσθεσης στην μέτρηση του ιδανικού αισθητήρα ενός τυχαίου αριθμού (Εικόνα 6.9), που προέρχεται από κανονική κατανομή προδιαγεγραμμένης μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης.



Εικόνα 6.9: Ιδανικός αισθητήρας δύναμης (Ideal Force Sensor)

Το μέσο σχετικό σφάλμα μέτρησης των δυναμοκυψελών υπολογίστηκε ότι είναι 0,3% και η μέγιστη κατακόρυφη δύναμη που θα ασκηθεί στις δυναμοκυψέλες εκτιμάται στα 11kp. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η μέτρηση σχεδόν πάντοτε ήταν μικρότερη του πραγματικού φορτίου. Οπότε, η μέση τιμή της κανονικής κατανομής επιλέχθηκε να είναι:

$$\mu = -0.003 \cdot 11kp \cdot 9.81 \frac{N}{kp} = -0.32N$$

και η τυπική απόκλιση επιλέχθηκε περίπου ίση με την τυπική απόκλιση των μέσων τιμών των σχετικών σφαλμάτων που υπολογίσθηκαν στις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου:

$$\sigma = 0.0008 \cdot 11kp \cdot 9.81 \frac{N}{kp} = 0.09N$$

Ο επενεργητής μοντελοποιήθηκε σε πρώτη φάση ως ιδανική πηγή ροπής (Ideal Torque Source), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.11. Το δομικό στοιχείο αυτό επιβάλλει στο άκρο του προδιαγεγραμμένη τιμή ροπής, ανεξάρτητα από την γωνιακή ταχύτητα.



Εικόνα 6.11: Το δομικό στοιχείο ιδανικής πηγής ροπής (Ideal Torque Source)

Ο αναλοψηφιακός μετατροπέας μοντελοποιείται μέσω του δομικού στοιχείου κυκλώματος συγκράτησης μηδενικής τάξης (Zero-Order Hold), που φαίνεται στην Εικόνα 6.12 .



Εικόνα 6.12: Δομικό στοιχείο κυκλώματος συγκράτησης μηδενικής τάξης (Zero-Order Hold)

6.3 Περιγραφή ελεγκτή

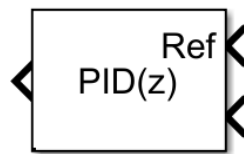
Ο ελεγκτής που θα υλοποιηθεί είναι της μορφής Αναλογικού – Ολοκληρωτικού – Διαφορικού Ελεγκτή (Proportional – Integral – Derivative Controller - PID Controller) διακριτού χρόνου 2 βαθμών ελευθερίας σε παράλληλη μορφή.

Η σχέση που συνδέει την έξοδο του ελεγκτή, u , με τις εισόδους του, που είναι η μέτρηση, y , και η ονομαστική τιμή, r , είναι:

$$u = K_p (b \cdot r - y) + K_I \cdot T_s \frac{1}{z-1} (r - y) + K_D \frac{N}{1 + N \cdot T_s \frac{1}{z-1}} (c \cdot r - y) \quad (6.16)$$

- όπου
- K_p το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή
 - K_I το ολοκληρωτικό κέρδος του ελεγκτή
 - K_D το διαφορικό κέρδος του ελεγκτή
 - T_s η περίοδος δειγματοληψίας
 - b ο συντελεστής βάρους της ονομαστικής τιμής (setpoint weight) στο αναλογικό μέρος
 - N ο συντελεστής φίλτρου (filter coefficient)
 - c ο συντελεστής βάρους της ονομαστικής τιμής (setpoint weight) στο διαφορικό μέρος

Ο παραπάνω ελεγκτής εισάγεται στο περιβάλλον Simscape μέσω του αντίστοιχου δομικού στοιχείου, που φαίνεται στην Εικόνα 6.13 .



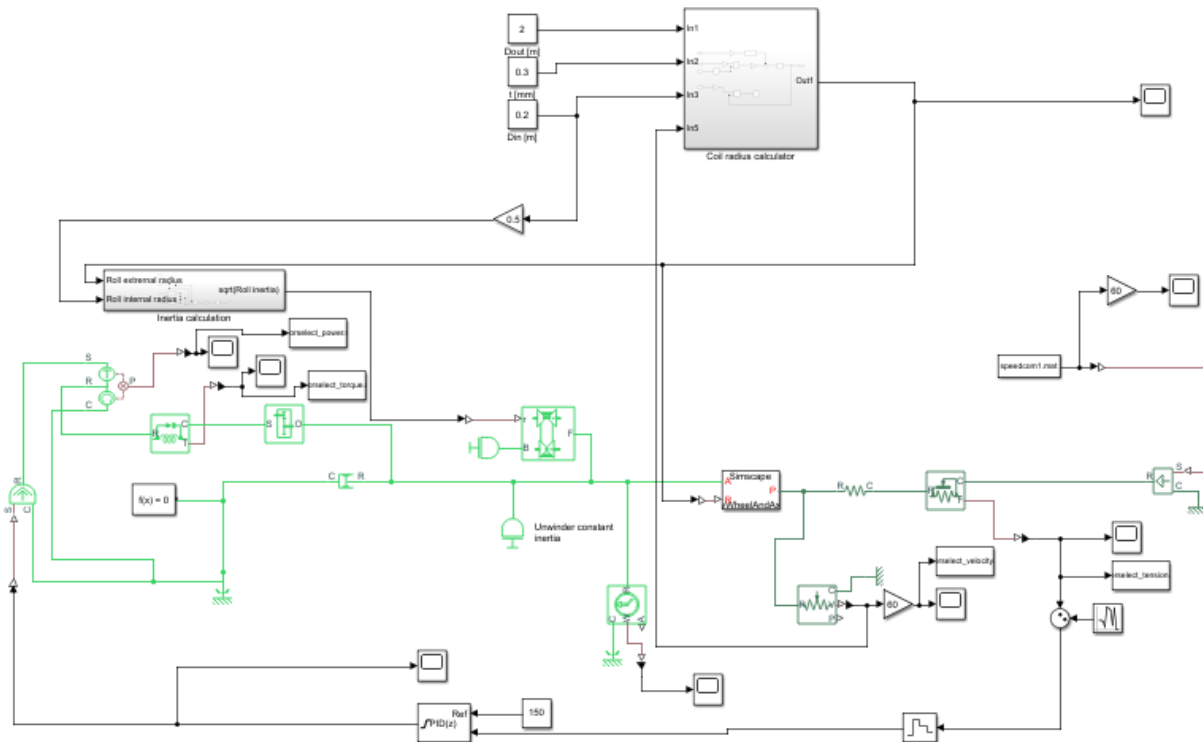
Εικόνα 6.13: Το δομικό στοιχείο PID ελεγκτή διακριτού χρόνου δύο βαθμών ελευθερίας (PID Controller 2 DOF) του περιβάλλοντος Simulink

Η ρύθμιση των παραμέτρων (tuning) του ελεγκτή γίνεται αυτόματα μέσω της εφαρμογής PID Tuner του περιβάλλοντος Simulink, η οποία αποτελεί μία γρήγορη και εύχρηστη μέθοδο για τον εύρωστο σχεδιασμό ελεγκτών PID που θα έχουν τον επιθυμητό χρόνο απόκρισης. Η εφαρμογή λαμβάνει υπόψη ως εγκατάσταση οτιδήποτε παρεμβάλλεται μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του δομικού στοιχείου του ελεγκτή. Η εγκατάσταση γραμμικοποιείται αυτόματα γύρω από ένα αρχικό σημείο αναφοράς και η ρύθμιση μπορεί να γίνει στο πεδίο του χρόνου μέσω της επιλογής της μεθόδου Συνάρτησης Μεταφοράς (Transfer Function Based) ή στο πεδίο της συχνότητας μέσω της επιλογής της μεθόδου Απόκρισης στο Πεδίο της Συχνότητας (Frequency Response Based). Για τις ανάγκες του παρόντος σχεδιασμού επιλέχθηκε η πρώτη μέθοδος καθώς όλες οι προδιαγραφές δίνονται στο πεδίο του χρόνου. Η ρύθμιση των κερδών γίνεται χειροκίνητα από το χρήστη εισάγοντας τιμές για τον χρόνο απόκρισης (Response time) και την παροδική απόκριση (Transient behavior). Εξαιτίας όμως της γραμμικοποίησης, για να εξαχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα όσον αφορά την απόκριση του συστήματος η ρύθμιση θα πρέπει να γίνει επαναληπτικά, εφόσον τα χαρακτηριστικά της απόκρισης κριθούν τουλάχιστον ικανοποιητικά. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή παρέχονται στην ηλεκτρονική τεκμηρίωση της Mathworks, παρόχου του λογισμικού Matlab/Simulink/Simscape (<https://www.mathworks.com/help/slcontrol/gs/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>).

Για καλύτερα αποτελέσματα, η συχνότητα δειγματοληψίας επιλέγεται να είναι 80Hz, συχνότητα που παρέχεται από τον χρησιμοποιούμενο αναλογοψηφιακό μετατροπέας HX711.

6.4 Επιλογή ηλεκτρικού κινητήρα

Η επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίστηκε σε προσομοίωση στο περιβάλλον Simulink/Simscape. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.14 .



Εικόνα 6.14: Μοντέλο στο περιβάλλον Simscape για την προσομοίωση της εγκατάστασης

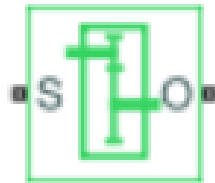
Η ελάχιστη και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της ανέμης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, αντίστοιχα είναι:

$$\omega_{\min} = \frac{u_{\min}}{r_{\max}} = \frac{15 \frac{m}{\min}}{1m} = 15 \frac{rad}{\min} = 0.25 \frac{rad}{s} = 2.4rpm$$

$$\omega_{\max} = \frac{u_{\max}}{r_{\min}} = \frac{75 \frac{m}{\min}}{0.2m} = 375 \frac{rad}{\min} = 6.25 \frac{rad}{s} = 60rpm$$

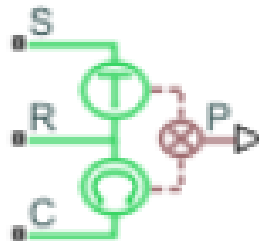
Όπως φαίνεται η ανέμη περιστρέφεται αρκετά αργά, σχετικά με τους συνήθεις ηλεκτρικούς κινητήρες. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι ο κινητήρας συνδέεται μέσω μειωτήρα στροφών με την άτρακτο της ανέμης. Σύμφωνα με δεδομένα από έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε, διατίθενται μειωτήρες κατάλληλα σχεδιασμένοι για ηλεκτρικούς κινητήρες με σχέση μετάδοσης 1:10, 1:20, ..., 1:100, των οποίων το εξωτερικό περίβλημα και το κόστος κτήσης παραμένουν σταθερά για την ίδια ισχύ κινητήρα ανεξαρτήτως σχέσης μετάδοσης. Μία αρχική επιλογή θα μπορούσε να είναι η σχέση αυτή να είναι 1:100.

Ο μειωτήρας εισάγεται στο μοντέλο μέσω του αντίστοιχου δομικού στοιχείου (Gearbox), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη απώλειες ισχύος. Το στοιχείο φαίνεται στην Εικόνα 6.15 .



Εικόνα 6.15: Δομικό στοιχείο μειωτήρα (Gearbox)

Επιπλέον μετριέται η ισχύς και η ροπή που αποδίδει ο κινητήρας στην άτρακτό του πριν τη βαθμίδα μείωσης μέσω των δομικών στοιχείων του αισθητήρα στροφικής ισχύος (Rotational Power Sensor) και του ιδανικού αισθητήρα ροπής (Ideal Torque Sensor) αντίστοιχα, τα οποία αποτυπώνονται στην Εικόνα 6.16 και στην Εικόνα 6.17 .



Εικόνα 6.17: Δομικό στοιχείο αισθητήρα στροφικής ισχύος (Rotational Power Sensor)



Εικόνα 6.16: Δομικό στοιχείο ιδανικού αισθητήρα ροπής (Ideal Torque Sensor)

Σύμφωνα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην υφιστάμενη εγκατάσταση, η μέγιστη επιτάχυνση της ταινίας είναι:

$$a_{\max} = 1/8 \frac{m}{s^2}$$

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, η μέγιστη γραμμική ταχύτητα της γραμμής παραγωγής είναι 75 m/min. Με τα δεδομένα αυτά, η διαστασιολόγηση του κινητήρα πραγματοποιήθηκε για μεταβολή της ταχύτητας από τα 74 m/min στα 75m/min με επιτάχυνση ίση με a_{\max} και για ονομαστική τιμή τάνυσης στα 150N. Για τις ανάγκες της διαστασιολόγησης δεν δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον σχεδιασμό του ελεγκτή PID, καθώς η προσομοίωση δεν λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κινητήρα. Οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε καταγράφονται στον Πίνακας 6.1 .

Πίνακας 6.1: Τιμές παραμέτρων ελεγκτή PID για διαστασιολόγηση κινητήρα

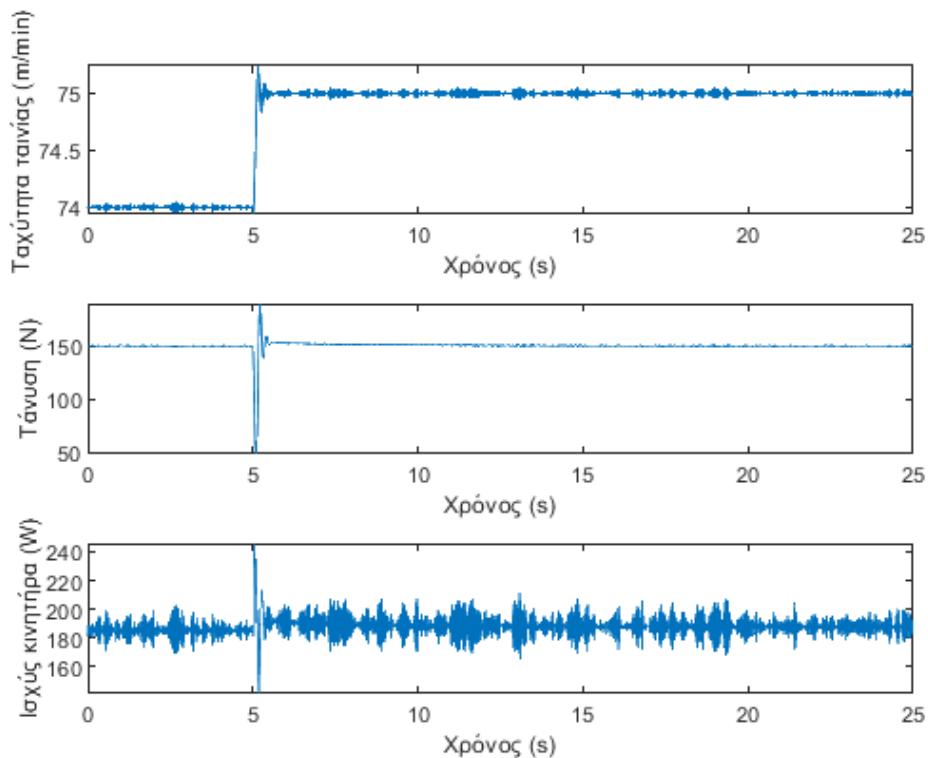
Παράμετρος	Τιμή
K_P	0,0018
K_I	0,0041
K_D	0,0002
T_s	1/80
b	2
N	155
c	0,84

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 6-1, που αποτυπώνει την απαιτούμενη ισχύ από τον κινητήρα, η μέγιστη απαίτηση σε ισχύ είναι:

$$P_{motor,max} = 246W$$

Η αρχική προδιαγραφή του κινητήρα επιλέγεται να δοθεί ως προς την ισχύ του, καθώς η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του δύνανται να μεταβληθούν ανάλογα με τη σχέση μετάδοσης του μειωτήρα που θα επιλεγθεί.

Διάγραμμα 6-1: Απόκριση συστήματος σε αλλαγή ταχύτητας από 74 σε 75 m/min και με ονομαστική τιμή τάνυσης 150N



Αποφασίστηκε σε πρώτη φάση να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών ισχύος 1,75 HP (Εικόνα 6.18), που ήταν ήδη διαθέσιμος στην εγκατάσταση που μελετάται.

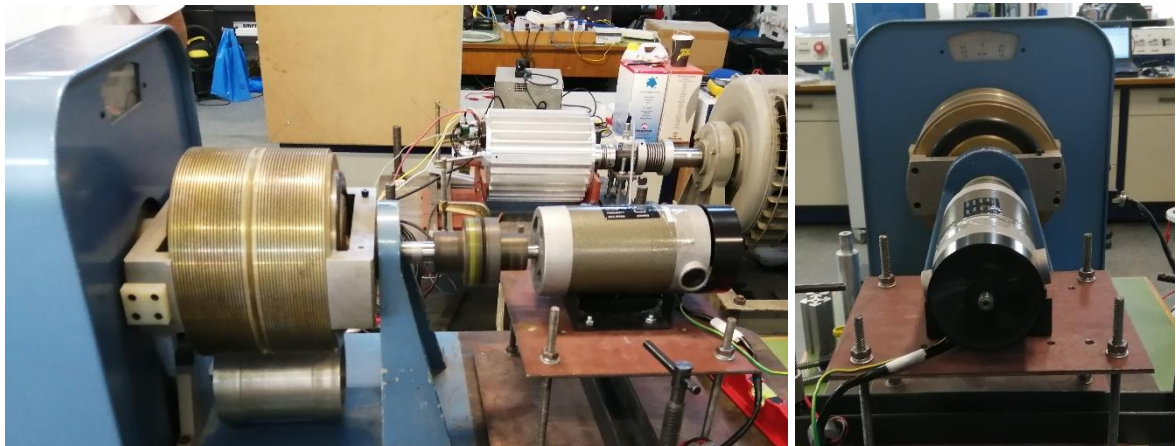


Εικόνα 6.18: Όψεις του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών που θα χρησιμοποιηθεί ως επενεργητής.

Σύμφωνα με την πινακίδα του είναι ισχύος 1.75HP, ονομαστικής τάσης 220VDC και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του είναι 4000 rpm.

Ωστόσο η δυσκολία με τον συγκεκριμένο κινητήρα είναι η πλήρης απουσία στοιχείων, πέραν των όσων αναγράφονται στην πινακίδα του. Για το λόγο αυτό, διενεργήθηκαν δοκιμές για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του κινητήρα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

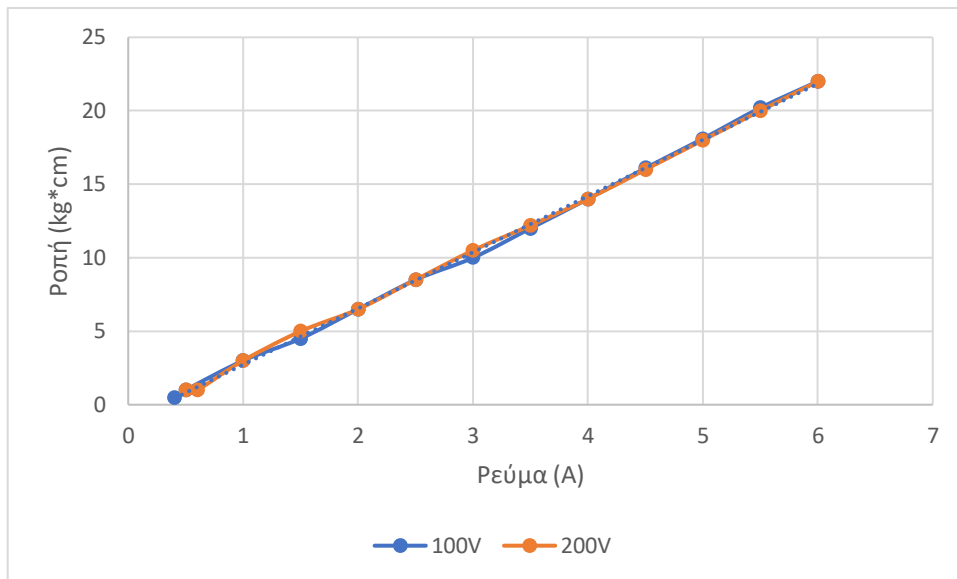
Ο κινητήρας τροφοδοτήθηκε με συνεχή τάση 200V και 100V και μετρήθηκαν η μηχανική ροπή που αποδίδεται στην άτρακτο του κινητήρα και η ταχύτητα περιστροφής του για ρεύμα μεταξύ 0,5 A και 6 A, με βήμα 0,5 A. Η ροπή μετρήθηκε με τη χρήση πέδης δινορευμάτων (Εικόνα 6.19) και η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου με τη χρήση στροφόμετρου λείζερ.



Εικόνα 6.19: Ο προς εξέταση κινητήρας συνδεδεμένος με την πέδη δινορευμάτων

Στο Διάγραμμα 6-2 αποτυπώνονται οι πειραματικές μετρήσεις ροπής και ρεύματος. Περισσότερο αξιόπιστες θεωρούνται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τάση τροφοδοσίας 100V επειδή η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ήταν μικρότερη με αποτέλεσμα και το πλάτος των ταλαντώσεων του συστήματος κινητήρας-πέδη να είναι μικρότερο. Με παρεμβολή σύμφωνα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, η σταθερά ροπής του κινητήρα προκύπτει:

Διάγραμμα 6-2: Πειραματική καμπύλη ροπής-ρεύματος



$$K_T = 3.81 \frac{kg \cdot cm}{A} = 0.37 \frac{Nm}{A}$$

Επιπλέον, υπολογίστηκαν η αντίσταση και η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων του κινητήρα. Για τον υπολογισμό της αντίστασης, ο κινητήρας τροφοδοτήθηκε εν κενώ με συνεχές ρεύμα 4 A. Η τάση μετρήθηκε ότι ήταν 21V, οπότε η αντίσταση των τυλιγμάτων του κινητήρα, R_a , είναι:

$$R_a = \frac{V}{I} = \frac{21V}{4A} = 5.25\Omega$$

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής, L , ο κινητήρας τροφοδοτήθηκε εν κενώ με εναλλασσόμενο ρεύμα 1 A και συχνότητας $f = 50Hz$. Η τάση στους ακροδέκτες του μετρήθηκε ότι ήταν 8,2V, οπότε η σύνθετη αντίσταση, Z_a , είναι:

$$Z_a = \frac{V}{I} = \frac{8.2V}{1A} = 8.2\Omega$$

Από τον ορισμό της σύνθετης αντίστασης ισχύει:

$$Z_a^2 = R_a^2 + x_L^2 \Rightarrow x_L = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2} \quad (6.17)$$

όπου x_L η επαγωγική αντίσταση και για την οποία ισχύει:

$$x_L = 2\pi f \cdot L \quad (6.18)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (6.17) και (6.18) προκύπτει:

$$L = \frac{\sqrt{Z_a^2 - R_a^2}}{2\pi f} \Rightarrow L = 20mH$$

Όταν η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ήταν 100V, το καταναλισκόμενο ρεύμα από το κινητήρα χωρίς φορτίο μετρήθηκε ότι ήταν 0.4 A.

Τέλος, προσδιορίστηκε η ροπή αδρανείας των περιστρεφόμενων μερών του κινητήρα. Επειδή κρίθηκε δύσκολη η αφαίρεση της ατράκτου του προς εξέταση κινητήρα και η μέτρηση αυτής, αποφασίστηκε η ροπή αδρανείας να εκτιμηθεί βάσει μετρήσεων σε ατράκτους παρόμοιων κινητήρων. Για το σκοπό αυτό, μετρήθηκαν και μοντελοποιήθηκαν στο λογισμικό Solidworks οι άτρακτοι δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών ισχύος 1HP και 3HP αντίστοιχα, που φαίνονται στην Εικόνα 6.20 .



Εικόνα 6.20: Άτρακτοι κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών (επάνω: από κινητήρα ισχύος 3HP και κάτω: από κινητήρα ισχύος 1HP)

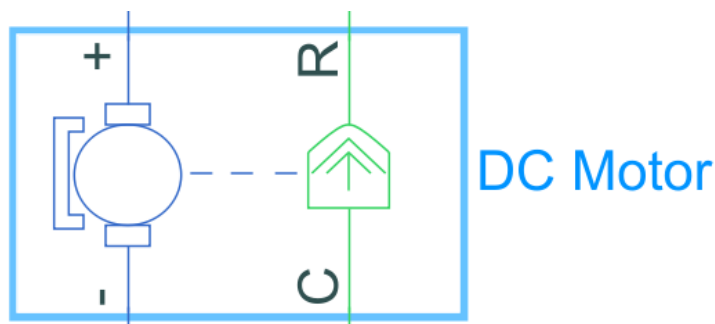
Σύμφωνα με το λογισμικό Solidworks, η ροπή αδρανείας των ατράκτων των κινητήρων είναι:

$$I_{1HP} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \text{ και } I_{3HP} = 15 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Μέσω γραμμικής παρεμβολής προκύπτει:

$$I_{1.75HP} = I_{1HP} + \frac{I_{3HP} - I_{1HP}}{3HP - 1HP} \cdot (1.75HP - 1HP) \Rightarrow I_{1.75HP} = 10 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Ο κινητήρας εισήχθη στο περιβάλλον Simscape μέσω του δομικού στοιχείου Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος (DC Motor), που φαίνεται στην Εικόνα 6.21 .



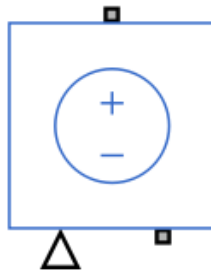
Εικόνα 6.21: Δομικό στοιχείο Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος (DC Motor)

Ο έλεγχος του κινητήρα θα πραγματοποιηθεί μέσω ελέγχου της τάσης τροφοδοσίας του, που μοντελοποιείται στο περιβάλλον Simscape, μέσω του δομικού στοιχείου ελεγχόμενης πηγής τάσης (Controlled Voltage Source), που φαίνεται στην Εικόνα 6.23.

Επιπλέον, μέσω του στοιχείου αισθητήρα ρεύματος (Current Sensor), που αποτυπώνεται στην Εικόνα 6.22, μετριέται το ρεύμα τροφοδοσίας του κινητήρα.



Εικόνα 6.23: Δομικό στοιχείο αισθητήρα ρεύματος (Current Sensor)



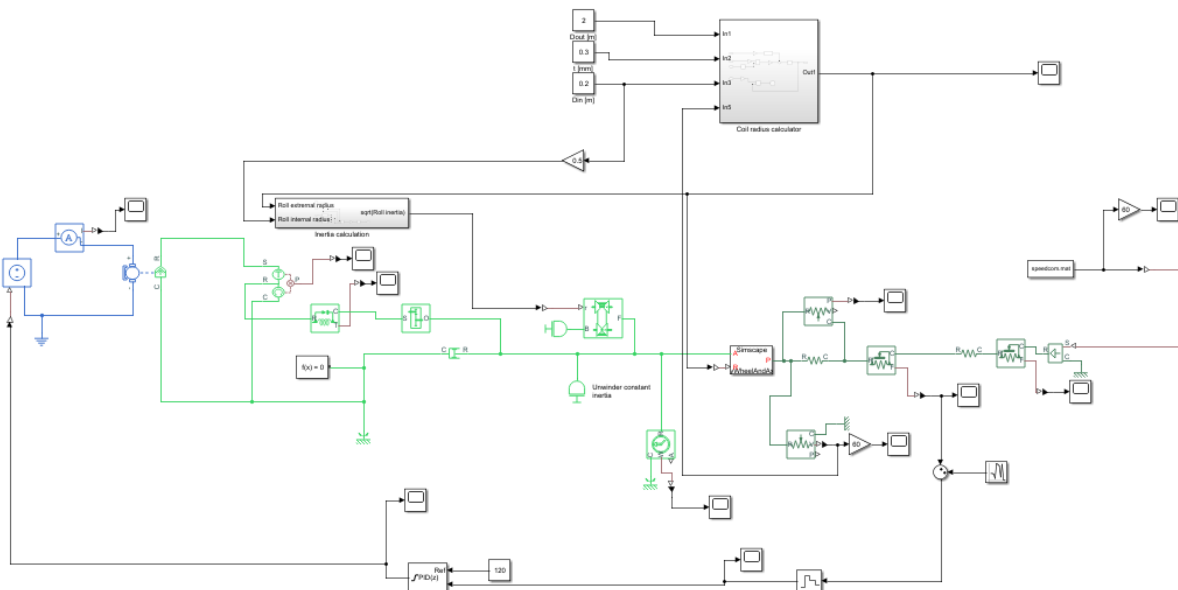
Εικόνα 6.22: Δομικό στοιχείο ελεγχόμενης πηγής τάσης (Controlled Voltage Source)

Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι 4000 rpm και της ανέμης 60 rpm. Οπότε η σχέση μετάδοσης του μειωτήρα επιλέγεται να είναι:

$$i = \frac{4000rpm}{60rpm} = 66.6 \approx 60$$

6.5 Προσομοίωση συστήματος αυτομάτου ελέγχου

Ενσωματώνοντας τον κινητήρα στη μοντελοποίηση, το μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτυπώνεται στην Εικόνα 6.24 .



Εικόνα 6.24: Τελικό μοντέλο στο περιβάλλον Simscape/Simulink

Σύμφωνα με τη χωροταξία της υφιστάμενης εγκατάστασης, ο σταθμός μέτρησης τάσης θα τοποθετηθεί περίπου στο ήμισυ της απόστασης μεταξύ ανέμης και μηχανής διαμόρφωσης. Για το λόγο αυτό, τοποθετούνται δύο στοιχεία ελατηρίου, εκατέρωθεν του στοιχείου του αισθητήρα δύναμης. Καθένα από τα στοιχεία ελατηρίου έχει σταθερά το ήμισυ της αρχικής σταθεράς.

Ύστερα από επαναληπτικές δοκιμές μέσω της εφαρμογής PID Tuner, τα κέρδη του ελεγκτή που θα χρησιμοποιηθεί καταγράφονται στον Πίνακα 6.2 .

Πίνακας 6.2: Τιμές παραμέτρων τελικού ελεγκτή PID

Παράμετρος	Τιμή
K_P	0,17
K_I	0,48
K_D	0,014
T_s	1/80
b	1,37
N	157
c	0,97

Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για μηδενικές αρχικές συνθήκες, πλην της τάνυσης, ορίστηκε στα 120 N, και της παραμόρφωσης κάθε στοιχείου ελατηρίου, που ορίστηκε στα 0,1 mm.

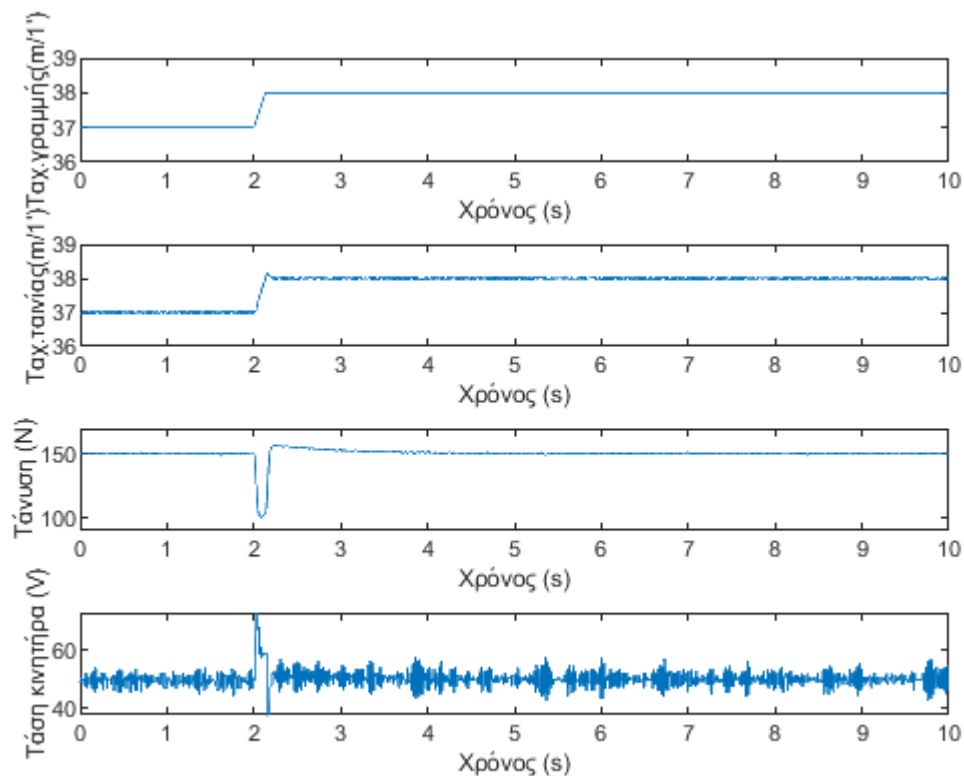
Επιπλέον, η επιτάχυνση είναι σταθερή και ίση με $a_{\max} = 1/8 \frac{m}{s^2}$, εξωτερική διάμετρος του ρολού

αλουμινίου 2m, το πάχος της ταινίας 0,3mm και το πλάτος αυτής 150 mm. Οι δοκιμές αφορούν σε πρώτη φάση σε μεταβολές της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής με σταθερή ονομαστική τιμή τάνυσης, ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του συστήματος κατά την επιτάχυνση της γραμμής παραγωγής κατά την οποία επιθυμείται να παραμένει σταθερή η τάνυση της ταινίας, και στη συνέχεια σε μεταβολές της ονομαστικής τιμής της τάνυσης για σταθερή ταχύτητα της γραμμής, ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του συστήματος όταν ο χειριστής επιθυμεί, με σταθερή ταχύτητα της γραμμής παραγωγής, να μεταβάλλει την τάνυση της ταινίας. Οι μεταβολές της ταχύτητας και της τάνυσης είναι κυρίως βηματικές, δηλαδή μεταβολές κατά 1 m/min και 1 N αντίστοιχα, καθώς σε τέτοιου είδους μεταβολές αναφέρονται οι προδιαγραφές που τέθηκαν στην αρχή.

Δοκιμές με μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής

Η πρώτη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε αφορά μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 37 m/min στα 38 m/min και για ονομαστική τιμή της τάνυσης στα 150N. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6-3. Η μέγιστη τιμή της τάνυσης είναι 157.1 N, δηλαδή η υπερακόντιση είναι 4,7%, ο χρόνος αποκατάστασης μικρότερος του 1 sec και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενικό. Επιπλέον, η ταχύτητα της ταινίας όταν εξέρχεται από την ανέμη δεν διαφέρει σημαντικά από την ταχύτητα της γραμμής παραγωγής. Τέλος, η τάση που επιβάλλεται στον κινητήρα από τον ελεγκτή PID είναι απολύτως αποδεκτή.

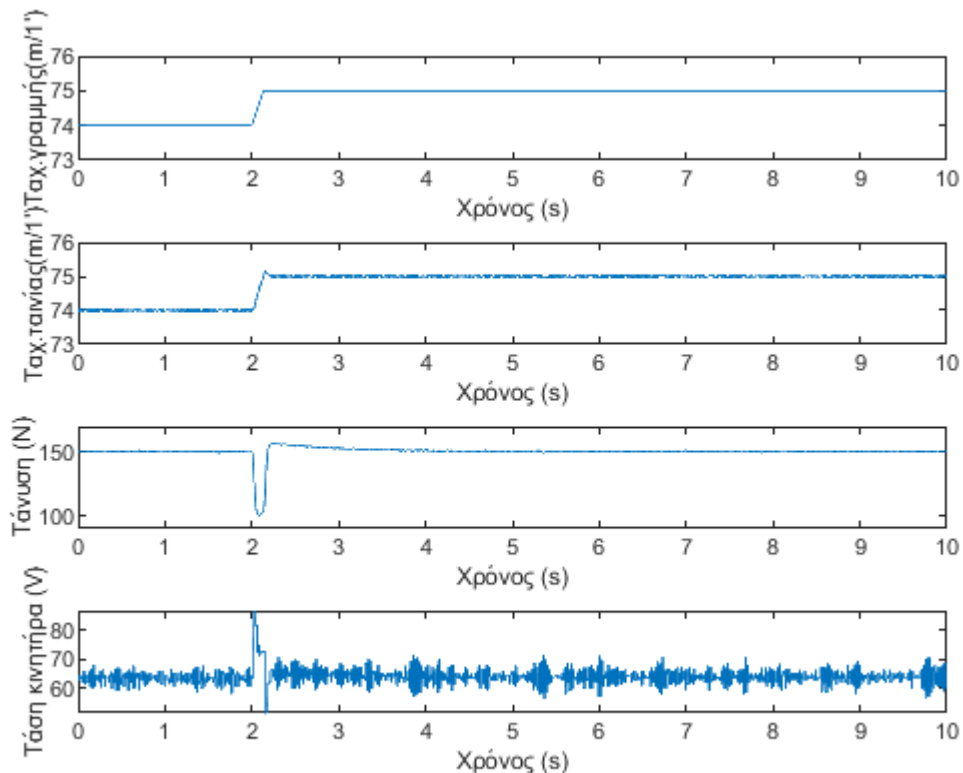
Διάγραμμα 6-3: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 37 m/min στα 38 m/min



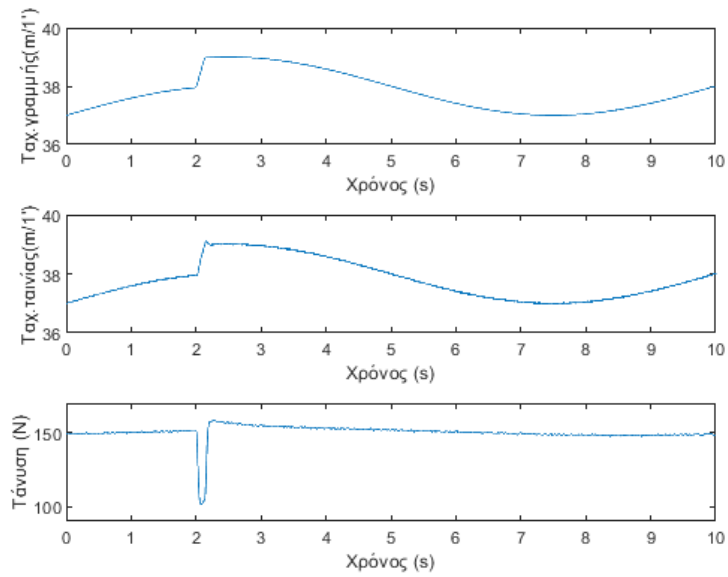
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η ίδια δοκιμή αλλά για μεταβολή της ταχύτητας από τα 74 m/min στα 75 m/min και τα αποτελέσματα δίνονται στο Διάγραμμα 6-4. Όσον αφορά την τάνυση, η υπερακόντιση είναι 4,7%, ο χρόνος αποκατάστασης μικρότερος του 1 sec και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενικό, ενώ όσον αφορά την ταχύτητα της ταινίας προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ταχύτητα της γραμμής παραγωγής. Δηλαδή δεν σημειώνεται κάποια διαφορά με την προηγούμενη δοκιμή. Η επιβαλλόμενη τάση στον κινητήρα είναι σαφώς υψηλότερη, αλλά παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα. Η αύξηση αυτή είναι απολύτως αναμενόμενη καθώς η ονομαστική τιμή της τάνυσης παραμένει η ίδια και η ταχύτητα αυξάνεται, κι επομένως απαιτείται μεγαλύτερη ισχύ από τον κινητήρα.

Ακόμη, εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος υπό τις συνθήκες των δύο προηγούμενων δοκιμών για ταλάντωση της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής γύρω από την ονομαστική της τιμή με πλάτος 1 m/min και περίοδο 10 sec. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6-5 και στο Διάγραμμα 6-6 αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις η ταχύτητα της ταινίας τείνει με μεγάλη ακρίβεια στην ταχύτητα της γραμμής παραγωγής. Όσον αφορά την τάνυση, και στις δύο περιπτώσεις, η υπερακόντιση αυξήθηκε από το 4,7% στο 5,7% και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή από τα 3sec έως τα 10sec της προσομοίωσης, αυξήθηκε από το 0,7 στο 4,2. Ωστόσο, οι αποκλίσεις αυτές είναι αποδεκτές.

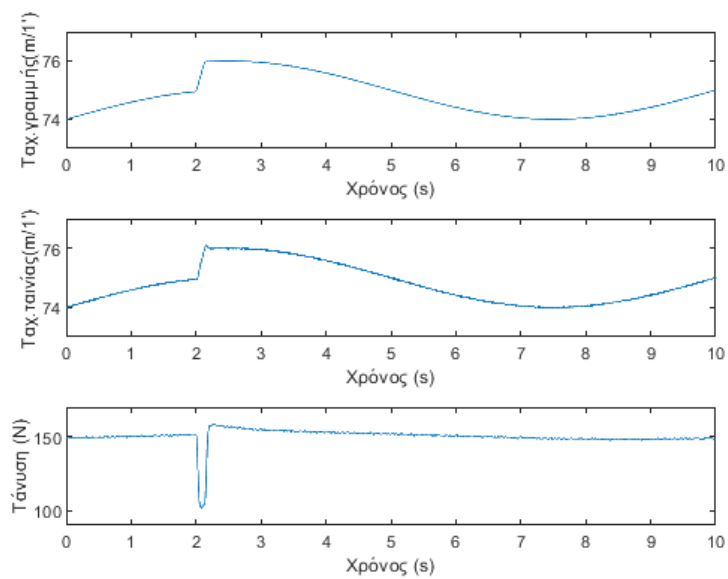
Διάγραμμα 6-4: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 74 m/min στα 75 m/min



Διάγραμμα 6-5: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 37 m/min στα 38 m/min και για ταλάντωση αυτής με πλάτος 1 m/min και περίοδο 10 sec

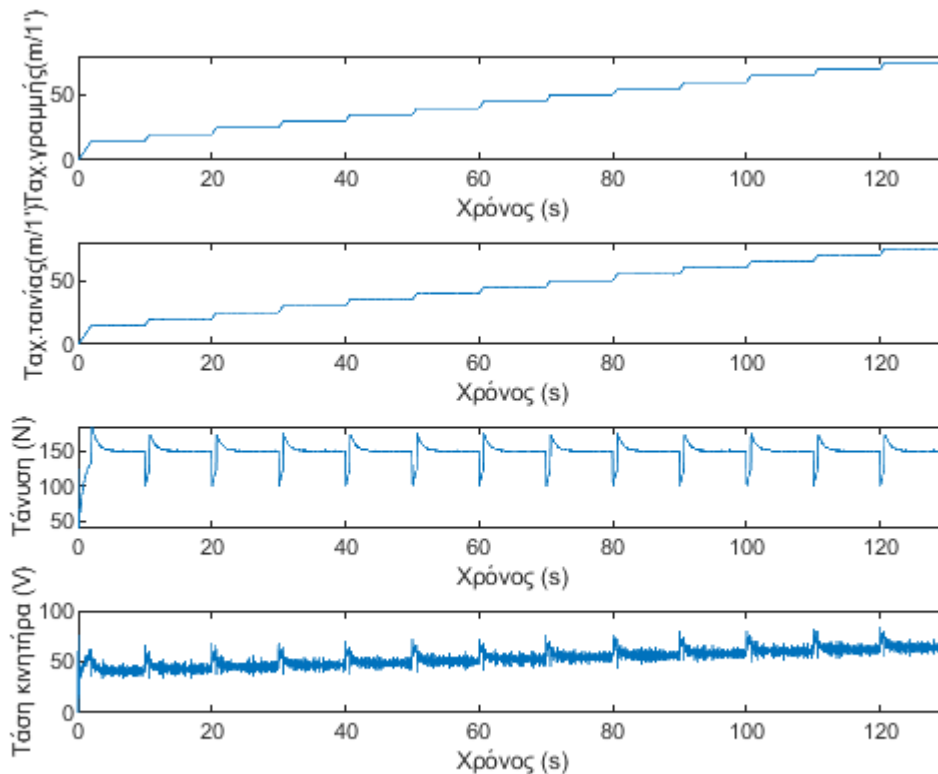


Διάγραμμα 6-6: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 74 m/min στα 75 m/min και για ταλάντωση αυτής με πλάτος 1 m/min και περίοδο 10 sec



Οι δοκιμές που αφορούν μεταβολές της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής ολοκληρώνονται με προσομοίωση λειτουργίας της εγκατάστασης για αρχική μεταβολή της ταχύτητας από την ακινησία στα 15 m/min και στη συνέχεια διαδοχικές αυξήσεις της ταχύτητας κατά 5 m/min μέχρι την ταχύτητα των 75 m/min. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6-7. Σύμφωνα με αυτά, δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ της ταχύτητας της ταινίας όταν εξέρχεται από την ανέμη και την ταχύτητα της γραμμής παραγωγής. Όσον αφορά την τάση, η συμπεριφορά του συστήματος είναι πανομοιότυπη σε όλες τις διαδοχικές μεταβολές της ταχύτητας των 5 m/min, όπου ο χρόνος

Διάγραμμα 6-7: Διαδοχικές αυξήσεις της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής



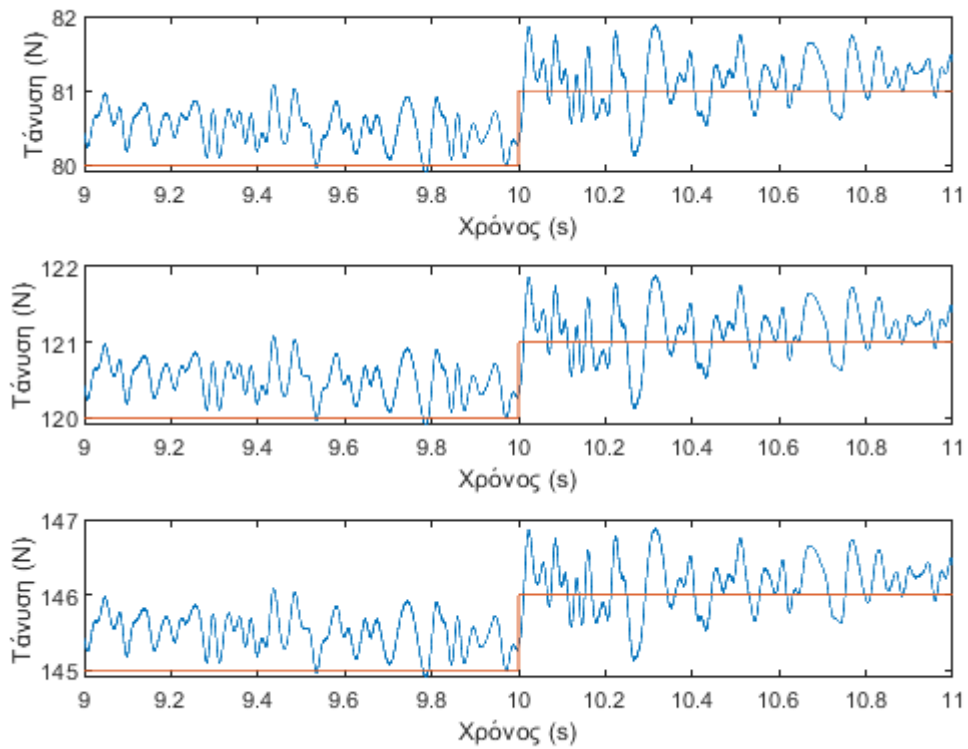
αποκατάστασης είναι περίπου 4 sec και η μέγιστη τιμή της τάσης 175 N, δηλαδή η υπερακόντιση είναι 16,7%. Όσον αφορά την αρχική βαθμίδα της ταχύτητας, η τάση παρουσιάζει χρόνο αποκατάστασης περίπου 4 sec και μέγιστη τιμή 185,5 N, δηλαδή υπερακόντιση 23,7%. Τέλος, όσον αφορά την επιβαλλόμενη τάση στον κινητήρα είναι απολύτως αποδεκτή.

Δοκιμές με μεταβολή της ονομαστικής τιμής της τάσης

Κατόπιν, πραγματοποιούνται δοκιμές για μοναδιαία βηματική αύξηση της τάσης με την ταχύτητα της γραμμής παραγωγής να είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή, δηλαδή 37 m/min. Οι αρχικές τιμές της τάσης είναι 80 N, 120 N και 145 N. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο

Διάγραμμα 6-8 και σύμφωνα με αυτά η μεταβολή στην ονομαστική τιμή της τάσης επηρεάζει το σύστημα λιγότερο από το σφάλμα μέτρησης, οπότε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Ο χρόνος αποκατάστασης είναι μηδενικός και η υπερακόντιση αμελητέα.

Διάγραμμα 6-8: Μοναδιαία βηματική αύξηση τάνσης με ταχύτητα 37 m/min



Συμπερασματικά, η συμπεριφορά του συστήματος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είναι εξαιρετικά ικανοποιητική καθώς το σύστημα παρουσιάζει σιβαρότητα έναντι μεταβολών στην ταχύτητα της γραμμής παραγωγής και στην ονομαστική τιμή της τάνσης.

7 Συμπεράσματα και μελλοντική πορεία

7.1 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης του συστήματος αυτόματης ρύθμισης της τάνυσης είναι πολύ σημαντικό να καταγραφούν η κύρια γνώση που αποκτήθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Μέσω της διαδικασίας σχεδιασμού που ακολουθήθηκε συνολικά για το νέο σύστημα, γίνονται σαφή τα πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνολογιών λογισμικού προσομοίωσης και τρισδιάστατης μοντελοποίησης στο σχεδιασμό νέων συστημάτων. Ουσιαστικά, με ελάχιστη παρουσία στον χώρο της υφιστάμενης εγκατάστασης και πολύ μικρό κόστος δοκιμών, συμπεριλαμβανομένου του κόστους από τη μη λειτουργία της γραμμής παραγωγής, επιτεύχθηκε ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός νέου συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, με ελάχιστο κόστος επιτυγχάνεται μέγιστο όφελος. Ωστόσο, η χρήση νέων τεχνολογιών όπως αυτή, απαιτεί την κατάλληλη εκπαίδευση και την απαραίτητη εμπειρία. Επιπλέον, θα ήταν παράλειψη να μην γίνει ιδιαίτερη μνεία στα πιθανά πλεονεκτήματα από τη χρήση τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν για ερασιτεχνική χρήση, όπως ο μικροελεγκτής AVR ATmega 328, σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως η παρούσα. Το κόστος τους είναι χαμηλό, διατίθεται ποικιλία προϊόντων σχεδόν για κάθε ανάγκη και υπάρχει αρκετή διαθέσιμη πληροφορία στο διαδίκτυο για την χρήση τους. Το κυριότερο μειονέκτημα τους και ο βασικότερος λόγος που δεν χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι η μειωμένη αξιοπιστία, καθώς το κόστος παύσης της παραγωγής που οφείλεται σε αστοχίες ή/και κακή λειτουργία του εξοπλισμού είναι μακράν χειρότερη από όποιο κόστος προμήθειας και εγκατάστασης εξοπλισμού. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος εξοπλισμός είναι πολύ ευαίσθητος σε αυξομειώσεις της ηλεκτρικής τάσης, γεγονός καθόλου σπάνιο στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Αναφορικά με το σχεδιασμό του σταθμού μέτρησης τάνυσης και την επιλογή και βαθμονόμηση των δυναμοκυψελών, εξαιτίας και της πρακτικής φύσης της φάσης αυτής, έγιναν σαφή τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει κανείς όταν μεταβαίνει από τη θεωρία στην πράξη, και αναδείχθηκε η σπουδαιότητα της εμπειρίας. Πιο συγκεκριμένα:

- Ο υπολογισμός της θέσης των ραούλων στο σταθμό μέτρησης τάνυσης πραγματοποιήθηκε με βάση υφιστάμενη διάταξη με ράουλο για την αλλαγή της διεύθυνσης κίνησης της ταινίας. Με τρόπο αυτό, υποσκελίστηκε η αδυναμία πραγματοποίησης πειραμάτων και αποφεύχθηκε μία χρονοβόρα και αμφιβόλου αποτελέσματος διαδικασία μοντελοποίησης της παραμόρφωσης της ταινίας.
- Έγινε σαφής η αξία της χρήσης λογισμικού για τη σχεδιασμό με πρόβλεψη για άμεση ενημέρωση των τρισδιάστατων μοντέλων και των σχεδίων κατά τις διάφορες αναθεωρήσεις που πραγματοποιούνται κατά τη φάση του σχεδιασμού, αλλά και κατά τη φάση της κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής επιταχύνεται χρονικά και αποφεύγονται δαπάνες που οφείλονται στην κακή επικοινωνία μεταξύ των διάφορων εμπλεκόμενων μερών.
- Το κόστος του προτεινόμενου συστήματος μέτρησης τάνυσης είναι μόλις το 10% ενός αντίστοιχου εμπορικού συστήματος και τα υλικά κατασκευής διατίθενται ευρέως στο εμπόριο. Βέβαια στο κόστος του προτεινόμενου συστήματος δεν συμπεριλαμβάνεται το κόστος έρευνας και ανάπτυξης.
- Ταυτόχρονα, το μέσο σχετικό σφάλμα μέτρησης υπολογίστηκε ότι είναι μικρότερο του 1%. Με άλλα λόγια, η υπολογιζόμενη ακρίβεια του συστήματος είναι εξαιρετικά ικανοποιητική και αποδεκτή για το σχεδιασμό του συστήματος αυτομάτου ελέγχου.

Όσον αφορά το σύστημα ελέγχου αξίζει να σημειωθούν τα εξής:

- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο περιβάλλον Simulink/Simscap, φαίνεται πως παρουσιάζει εξαιρετικά ικανοποιητική συμπεριφορά και ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές που τέθηκαν με την έναρξη του έργου. Συγκεκριμένα, η υπερακόντιση σε μοναδιαία βηματική αύξηση της ταχύτητας είναι 4,7%, με την προδιαγεγραμμένη μέγιστη υπερακόντιση να είναι 5%, και ο χρόνος αποκατάστασης είναι μικρότερος του 1 sec, όταν ο επιθυμητός χρόνος αποκατάστασης σύμφωνα με την προδιαγραφή είναι 30 sec. Επιπλέον, το σύστημα παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά έναντι διαταραχών στην ταχύτητα.
- Το κόστος του συστήματος αυτομάτου ελέγχου είναι μηδενικό όσον αφορά το ηλεκτρονικό του μέρος, καθώς θα υλοποιηθεί στον ίδιο μικροελεγκτή που λαμβάνει τις μετρήσεις από τις δυναμοκυψέλες. Ακόμη, το κόστος του κινητήρα, εφόσον αυτός έπρεπε να αγοραστεί, και του μειωτήρα είναι αρκετά μικρό.
- Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης γίνεται φανερό η αλληλεξάρτηση μεταξύ ταχύτητας και τάνυσης, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Μέσω του προτεινόμενου συστήματος επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρης αποσύζευξη της ταχύτητας και της τάνυσης, αφού το σύστημα αυτομάτου ελέγχου της τάνυσης δεν λαμβάνει καμία πληροφορία για την ταχύτητα της γραμμής παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν βρέθηκε σύστημα στην βιβλιογραφία ή στο εμπόριο που να το επιτυγχάνει αυτό.

Πέραν τούτων, αξίζει να επισημανθεί η εγκατάσταση του νέου συστήματος στην υφιστάμενη γραμμή παραγωγής, αλλά και γενικότερα, απαιτεί ελάχιστες μετατροπές, που αφορούν ουσιαστικά την αφαίρεση του υπάρχοντος συστήματος πέδησης, ενώ δεν απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος χειρισμός για τη συντήρηση του συστήματος πέραν περιοδικής βαθμονόμησης των δυναμοκυψελών και έλεγχο ορθής λειτουργίας του ηλεκτρονικού υποσυστήματος και τυχόν ανταλλακτικά είναι πολύ εύκολο να βρεθούν σε προσιτές τιμές και εύλογο χρόνο παράδοσης. Λόγω της επίδρασης της τάνυσης στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, η αυτόματη ρύθμιση της τάνυσης αποτελεί προϋπόθεση για την περαιτέρω αυτοματοποίηση της γραμμής παραγωγής.

7.2 Μελλοντική επέκταση

Στο σημείο γίνεται προσπάθεια καταγραφής μελλοντικών επεκτάσεων του έργου, σε πρακτικό και ερευνητικό επίπεδο. Ωστόσο, κάτι τέτοιο είναι δύσκολο λόγω της πρωτοτυπίας της διάταξης και κυρίως λόγω του πλήθους των εμπλεκόμενων μερών και της επίδρασης που ασκούν αυτά.

Οι κυριότερες ενέργειες που θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν σε μελλοντική επέκταση του έργου σε πρακτικό επίπεδο κατά χρονολογική σειρά είναι:

- Η κατασκευή του σταθμού μέτρησης τάνυσης. Θα μπορούσε να διερευνηθεί η αναθεώρηση του σχεδιασμού με σκοπό τη μείωση του κόστους κατασκευής. Η αναθεώρηση μπορεί να περιλαμβάνει την αντικατάσταση εσωτερικών γεωμετριών με αντίστοιχες εξωτερικές και την αντικατάσταση των συγκολλήσεων με κοχλιοσυνδέσεις.
- Η βαθμονόμηση και αξιολόγηση λειτουργίας του σταθμού μέτρησης τάνυσης στο πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας του. Η διαδικασία της βαθμονόμησης και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και με χρήση του κώδικα που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5.

- Η επαλήθευση του μοντέλου ανοιχτού βρόχου στο περιβάλλον Simulink/Simscap. Η επαλήθευση θα πραγματοποιηθεί βάσει μετρήσεων της τάνυσης στην υφιστάμενη εγκατάσταση για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων λειτουργίας αυτής, όπως είναι η ταχύτητα της γραμμής παραγωγής και η πίεση του αέρα στο πνευματικό φρένο. Όσον αφορά τη συμπεριφορά του πνευματικού φρένου έχουν βρεθεί οι προδιαγραφές λειτουργίας του από την κατασκευάστρια εταιρεία και παρέχεται δομικό στοιχείο μοντελοποίησής του στο περιβάλλον Simscap.
- Η ρύθμιση εκ νέου των παραμέτρων του ελεγκτή PID σύμφωνα με το επαληθευμένο μοντέλο.
- Η αντικατάσταση του υφιστάμενου πνευματικού φρένου με τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Ο έλεγχος τάσης του κινητήρα μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ρυθμιστή τάσης που μετατρέπει εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές επιθυμητής τάσης.
- Η επαλήθευση του μοντέλου κλειστού βρόχου προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια στο μοντέλο και να περιοριστούν στο ελάχιστο οι δοκιμές ρύθμισης του ελεγκτή στην πραγματική εγκατάσταση.
- Η υλοποίηση του ελεγκτή PID σύμφωνα με το επαληθευμένο μοντέλο του κλειστού βρόχου. Η υλοποίηση θα γίνει με χρήση του μικροελεγκτή AVR ATmega328 και της βιβλιοθήκης pid που παρέχεται.
- Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της διεπιφάνειας επικοινωνίας του συστήματος με τον χειριστή. Ο βασικός σχεδιασμός θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ονομαστική τιμή της τάνυσης να εισάγεται στο σύστημα μέσω ενός γραμμικού ποτενσιόμετρου και να εμφανίζεται σε οθόνη η ονομαστική και η πραγματική τιμή της τάνυσης.
- Η συνολική αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες. Η αξιολόγηση αυτή θα περιλαμβάνει έλεγχο της απόδοσης του συστήματος και την ευκολία χειρισμού του. Ανάλογα με τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν μπορεί να χρειαστούν μικρές μετατροπές του συστήματος ώστε να ανταποκρίνεται πλήρως στις ανάγκες της γραμμής παραγωγής.
- Η σύνταξη οδηγιών χρήσης και συντήρησης.

Σε ερευνητικό επίπεδο, πιστεύεται πως χρήζει διερεύνησης η εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό ελεγκτών PID. Ιδιαίτερη έμφαση αξίζει να δοθεί στην εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων συνεπικούρουμένων από τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων και την εφαρμογή των αρχών του πειραματικού σχεδιασμού για το σκοπό αυτό.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Δομή σύγχρονων συστημάτων παραγωγής σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62264 (προσαρμοσμένη από [3])	12
Εικόνα 1.2: Εφαρμογές της κατεργασίας διαμόρφωσης με ράουλα (προσαρμοσμένη από [6])	13
Εικόνα 1.3: Τυπικός σταθμός ραούλων διαμόρφωσης (προσαρμοσμένη από [6])	14
Εικόνα 1.4: Γραμμή παραγωγής βασισμένη στη διαμόρφωση με ράουλα (προσαρμοσμένη από το διαδίκτυο)	14
Εικόνα 1.5: «Φυλλαράκι» αλουμινίου με πλήρωση από αφρό πολυουρεθάνης για την κατασκευή ρολών (πηγή: dallan.com)	15
Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση κάτοψης γραμμής που παράγει «φυλλαράκι» αλουμινίου	16
Εικόνα 1.7: Άποψη της ανέμης της γραμμής αναφοράς	17
Εικόνα 1.8: Άποψη της ανέμης της γραμμής αναφοράς στην οποία διακρίνονται με ευκρίνεια οι ψαλιδωτοί μηχανισμοί, το πνευματικό φρένο και η βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης του αέρα	18
Εικόνα 3.1: Η μέθοδος δημιουργίας ιδεών των πέντε βημάτων (προσαρμοσμένη από [16])	28
Εικόνα 3.2: Δέντρο ταξινόμησης για το τμήμα ιδεών που σχετίζονται με τον προσδιορισμό της τιμής της τάνυσης	30
Εικόνα 3.3: Χρήση δυναμοκυψέλης για τη μέτρηση της τάνυσης σε συνδυασμό με (α) ένα ράουλο και (β) τρία ράουλα	31
Εικόνα 3.4: Χρήση ραούλου (dancer roller) που δύναται να κινηθεί (α) γραμμικά ή (β) περιστροφικά	31
Εικόνα 3.5: Δέντρο ταξινόμησης ιδεών που σχετίζονται με την επιλογή επενεργητή	32
Εικόνα 3.6: Αρχιτεκτονική νέου συστήματος αυτόματης ρύθμισης τάνυσης ταινίας	35
Εικόνα 4.1: Οι κύριες διαστάσεις του σταθμού μέτρησης τάνυσης (σχήμα χωρίς κλίμακα)	38
Εικόνα 4.2: Υφιστάμενο ράουλο αλλαγής διεύθυνσης κίνησης ταινίας μεταξύ ανέμης και φούρνου	41
Εικόνα 4.3: Ισορροπία δυνάμεων στο ράουλο μέτρησης κατά τη λειτουργία της γραμμής παραγωγής	43
Εικόνα 4.4: Τύποι δυναμοκυψελών για εφαρμογή σε συστήματα μέτρησης τάνυσης (πηγή: https://www.pffc-online.com/news/15515-web-tension-control-fundamentals)	43
Εικόνα 4.5: Η δυναμοκυψέλη PW6C 15kg της εταιρείας HBM, που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της τάνυσης (πηγή: HBM)	45
Εικόνα 4.6: Η μία εκ των δύο βάσεων στηρίξης που αποτελούν το πλαίσιο του σταθμού μέτρησης τάνυσης	46
Εικόνα 4.7: Θέση βάσης στηρίξης δυναμοκυψέλης στο πλαίσιο του σταθμού μέτρησης τάνυσης	46
Εικόνα 4.8: Βασική δομή της προτεινόμενης διάταξης απεμπλοκής δυναμοκυψελών (αριστερά σε διμετρική προβολή και δεξιά σε τομή)	48
Εικόνα 4.9: Συναρμογή διάταξης απεμπλοκής δυναμοκυψέλης στο πλαίσιο του σταθμού μέτρησης τάνυσης (σε τομή)	49
Εικόνα 4.10: Γραφική αναπαράσταση ηλεκτρονικού υποσυστήματος σταθμού μέτρησης τάνυσης	50
Εικόνα 5.1: Η πειραματική διάταξη για τη βαθμονόμηση και αξιολόγηση της λειτουργίας των δυναμοκυψελών	51
Εικόνα 5.2: Η πειραματική διάταξη αξιολόγησης της λειτουργίας των δυναμοκυψελών ενεργού οριζόντιου φορτίου	58
Εικόνα 6.1: Η διαδικασία σχεδιασμού συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (προσαρμοσμένη από [24])	61
Εικόνα 6.2: Δομικό στοιχείο ιδανικού ελατηρίου μέσω του οποίου μοντελοποιείται η ταινία στο περιβάλλον Simscape	63

Εικόνα 6.3: Το υποσύστημα (subsystem) του Simulink “Coil radius calculator” που υπολογίζει την εξωτερική ακτίνα του ρολού αλουμινίου	65
Εικόνα 6.4: Μοντελοποίηση ροπής αδρανείας ρολού αλουμινίου	66
Εικόνα 6.5: Δομικό στοιχείο αδρανείας (inertia) μέσω του οποίου εισάγεται η ροπή αδρανείας των περιστρεφόμενων μερών της ανέμης στο περιβάλλον Simscape	66
Εικόνα 6.6: Δομικό στοιχείο περιστροφικού αποσβεστήρα (rotational damper)	67
Εικόνα 6.7: Το προσαρμοσμένο δομικό στοιχείο «τροχός και άξονας» (My Wheel And Axle).....	67
Εικόνα 6.8: Ιδανική πηγή γραμμικής ταχύτητας μέσω της οποίας μοντελοποιείται η μηχανή διαμόρφωσης.....	67
Εικόνα 6.10: Ιδανικός αισθητήρας δύναμης (Ideal Force Sensor)	68
Εικόνα 6.9: Πρόσθεση ενός τυχαίου αριθμού στην ένδειξη του ιδανικού αισθητήρα δύναμης για τη μοντελοποίηση του σφάλματος μέτρησης	68
Εικόνα 6.11: Το δομικό στοιχείο ιδανικής πηγής ροπής (Ideal Torque Source)	69
Εικόνα 6.12: Δομικό στοιχείο κυκλώματος συγκράτησης μηδενικής τάξης (Zero-Order Hold)	69
Εικόνα 6.13: Το δομικό στοιχείο PID ελεγκτή διακριτού χρόνου δύο βαθμών ελευθερίας (PID Controller 2 DOF) του περιβάλλοντος Simulink	70
Εικόνα 6.14: Μοντέλο στο περιβάλλον Simscape για την προσομοίωση της εγκατάστασης	71
Εικόνα 6.15: Δομικό στοιχείο μειωτήρα (Gearbox).....	72
Εικόνα 6.17: Δομικό στοιχείο ιδανικού αισθητήρα ροπής (Ideal Torque Sensor).....	72
Εικόνα 6.16: Δομικό στοιχείο αισθητήρα στροφικής ισχύος (Rotational Power Sensor)	72
Εικόνα 6.18: Όψεις του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών που θα χρησιμοποιηθεί ως επενεργητής.	74
Εικόνα 6.19: Ο προς εξέταση κινητήρας συνδεδεμένος με την πέδη δινορευμάτων	74
Εικόνα 6.20: Άτρακτοι κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών (επάνω: από κινητήρα ισχύος 3HP και κάτω: από κινητήρα ισχύος 1HP)	76
Εικόνα 6.21: Δομικό στοιχείο Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος (DC Motor)	76
Εικόνα 6.23: Δομικό στοιχείο ελεγχόμενης πηγής τάσης (Controlled Voltage Source)	77
Εικόνα 6.22: Δομικό στοιχείο αισθητήρα ρεύματος (Current Sensor)	77
Εικόνα 6.24: Τελικό μοντέλο στο περιβάλλον Simscape/Simulink.....	78

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά ρολών ταινίας που εισέρχονται στην παραγωγική διαδικασία αναφοράς</i>	19
<i>Πίνακας 1.2: Ποσοτικές προδιαγραφές νέου αυτόματου συστήματος ρύθμισης τάνυσης</i>	19
<i>Πίνακας 3.1: Πίνακας απόφασης για τη διάταξη προσδιορισμού τιμής τάνυσης</i>	34
<i>Πίνακας 4.1: Ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τύποι δυναμοκυψελών και εφαρμογές αυτών</i>	44
<i>Πίνακας 4.2: Συνδεσμολογία δυναμοκυψέλης - ADC</i>	50
<i>Πίνακας 4.3: Συνδεσμολογία ADC - μικροελεγκτή</i>	50
<i>Πίνακας 5.1: Σχετικό σφάλμα ακριβείας για τις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου</i>	57
<i>Πίνακας 5.2: Σχετικό σφάλμα επαναληψιμότητας για τις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου</i>	57
<i>Πίνακας 5.3: Ανηγμένη αβεβαιότητα για τις διάφορες στάθμες πραγματικού φορτίου</i>	58
<i>Πίνακας 6.1: Τιμές παραμέτρων ελεγκτή PID για διαστασιολόγηση κινητήρα</i>	73
<i>Πίνακας 6.2: Τιμές παραμέτρων τελικού ελεγκτή PID</i>	78

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5-1: Καμπύλη βαθμονόμησης	52
Διάγραμμα 5-2: Ενδεικτική σειρά μετρήσεων για τον υπολογισμό του σφάλματος μέτρησης.....	53
Διάγραμμα 5-3: Ανάλυση Διακύμανσης κατά ένα παράγοντα.....	59
Διάγραμμα 6-1: Απόκριση συστήματος σε αλλαγή ταχύτητας από 74 σε 75 m/min και με ονομαστική τιμή τάνυσης 150N	73
Διάγραμμα 6-2: Πειραματική καμπύλη ροπής-ρεύματος	75
Διάγραμμα 6-3: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 37 m/min στα 38 m/min	79
Διάγραμμα 6-4: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 74 m/min στα 75 m/min	80
Διάγραμμα 6-5: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 37 m/min στα 38 m/min και για ταλάντωση αυτής με πλάτος 1 m/min και περίοδο 10 sec	81
Διάγραμμα 6-6: Μεταβολή της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής από τα 74 m/min στα 75 m/min και για ταλάντωση αυτής με πλάτος 1 m/min και περίοδο 10 sec.....	81
Διάγραμμα 6-7: Διαδοχικές αυξήσεις της ταχύτητας της γραμμής παραγωγής	82
Διάγραμμα 6-8: Μοναδιαία βηματική αύξηση τάνυσης με ταχύτητα 37 m/min.....	83

8 Βιβλιογραφία

- [1] S. Kalpakjian και S. Schmid, Μηχανουργική επιστήμη & τεχνολογία, 7η Έκδοση επιμ., Δ. Μανωλάκος και Α. Μαρκόπουλος, Επιμ., Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- [2] M. Groover, Automation, production systems and computer-integrated manufacturing, 2η Έκδοση επιμ., Prentice Hall, 2001.
- [3] IEC, Enterprise-control system integration - part 3: activity models of manufacturing operations management (IEC 62264-3), 2007.
- [4] G. Chryssolouris, Manufacturing Systems: Theory and Practice, New York: Springer Science+Business Media, Inc., 2006.
- [5] Dahlstrom Roll Form, «Why roll forming?», Dahlstrom Roll Form, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dahlstromrollform.com/why-roll-forming/>. [Πρόσβαση 3 Ιούνιος 2021].
- [6] I. Paralikas, *Cold roll forming process energy efficiency optimization*, Patras: University of Patras, 2012.
- [7] G. T. Halmos, Roll forming handbook, Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- [8] S. Leirens και J. Pierquin, Modelling and control of an aluminium strip unwinder-rewinder, European Control Conference, 2003.
- [9] I. S. Choi, A. Rossiter και P. Fleming, A survey of the looper-tension control technology in hot rolling mills, Prague: 16th Triennial World Congress, IFAC , 2005, pp. 37-44.
- [10] Mitsubishi Electric Corporation, *Tension control complete guide*, Tokyo, 2019.
- [11] L. Liu, N. Shao, M. Lin και Y. Fang, *Hamilton-based adaptive robust control for the speed and tension system of reversible cold strip rolling mill*, International journal of adaptive control and signal processing, 2019.
- [12] C.-H. Wei και C.-H. Wu, «A simulator of winding machine controller using LabView environment,» σε *IEEE Xplore*, 2005.
- [13] M. Chen, B. Wu, Y. Chen, T. Luo και F. Yang, «Design of Tension Control System for Automated Fibre Placement,» σε *Proceedings of the 5th International Conference on Mechanical Engineering, Materials and Energy (5th ICMEME2016)* , 2016.
- [14] Wichita Company Ltd, *Tension control systems*.
- [15] X.-M. Xu, W.-X. Zhang, X.-L. Ding, M. Zhang και S.-H. Wei, «Design and Analysis of a Novel Tension Control Method for Winding Machine,» *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, τόμ. 31, αρ. 101, 2018.
- [16] J. Yan και X. Du, «Web Tension and Speed Control in Roll-to-Roll Systems,» σε *Control Theory in Engineering*, Intech Open, 2020.

- [17] K. Ulrich και S. Eppinger, Σχεδιασμός και ανάπτυξη προϊόντων, Ν. Μπιλάλης, Επιμ., Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
- [18] W. Gilbert, «Optimizing web tension control for high productivity: Part 1,» *Converting Quarterly*, τόμ. 9, αρ. 2, pp. 66-69, 2019.
- [19] Ε. Παπαδόπουλος, Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις Φούντα, 2010.
- [20] Α. Χρυσάκης, Γραμμική Άλγεβρα και Αναλυτική Γεωμετρία, Αθήνα: Προσωπική έκδοση, 2013.
- [21] Χ. Παπαδόπουλος, Στοιχεία Μηχανών, Τζιόλα, 2017.
- [22] International Organization for Standardization (ISO), Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system, 2004.
- [23] V. Barnett και T. Lewis, Outliers in Statistical Data, Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1994.
- [24] R. Dorf και R. Bishop, Modern Control Systems, Pearson Education, 2011.
- [25] E. Lockwood, A book of curves, Cambridge, MA, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [26] Y. Altintas, Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design.

Παράρτημα Α

Συνάρτηση itang

```
function [x11,y11,x22,y22] = itang(x1,y1,r1,x2,y2,r2)
hcx = (r2/(r1+r2))*x1 + (r1/(r1+r2))*x2;
hcy = (r2/(r1+r2))*y1 + (r1/(r1+r2))*y2;
P = [hcx hcy]-[x1 y1];
d2 = dot(P,P);
Q0 = [x1 y1]+r1^2/d2*P;
T = r1/d2*sqrt(d2-r1^2)*P*[0,1;-1,0];
X1= Q0+T;
P = [hcx hcy]-[x2 y2];
d2 = dot(P,P);
Q0 = [x2 y2]+r2^2/d2*P;
T = r2/d2*sqrt(d2-r2^2)*P*[0,1;-1,0];
X2 = Q0+T;
x11=X1(1);
y11=X1(2);
x22=X2(1);
y22=X2(2);
end
```

Κώδικας web_bending

```
% Data for Al 3005 (matweb)
E=69*10^9;
v=0.34;
%
% Strip data
t=0.00035; % web thickness
b=0.1; % web width
T=150; % tension
%
% Unit dimensions
Lx=0.155;
Ly=0.110;
R1=0.061;
R2=0.061;
R=R1;
%
[x0,y0,x1,y1]=itang(0,0,R1,Lx/2,Ly,R2);
%
syms x
w0= @(x) (R^2-x^2)^0.5;
kx(x)=diff(w0(x),x,2);
Rm= @(x) 1/abs(kx(x)/((1+(w0(x))^2)^1.5));
a1=atand((x1-0.5*Lx)/(y1-Ly))
x0=R*cos(deg2rad(90-2*a1));
ee=T/(b*t*E)+t/(2*Rm(x0));
e=vpa(log(1+ee),5)
```

Κώδικας water_calibration_data_processing

```

weights=7:0.5:11;
datafile=["data1.txt","data2.txt","data3.txt"];
N=length(datafile);
serie={'1';'2';'3';'total'};
Systematic_error_percent=zeros(length(datafile)+1,1);
Random_error_percent=zeros(length(datafile)+1,1);
Total_error_percent=zeros(length(datafile)+1,1);

relative_accuracy_errors_kg=zeros(length(weights),length(datafile)+1);
std_errors_kg=relative_accuracy_errors_kg;
uncertainty=relative_accuracy_errors_kg;
relative_repeatability_errors_kg=zeros(length(weights),length(datafile)+1);
%
for s=1:N
group=zeros(length(weights)+10,2);
group(1,1)=1;
meas_group=cell(length(weights),1);
data=load(datafile(s));
data=data+7;
data=hampel(data);
datgrad=gradient(data);
datgraddig=zeros(length(datgrad),1);
for i=1:length(datgrad)
    if abs(datgrad(i))>0.005
        datgraddig(i)=1;
    end
end
gradindecex=find(datgraddig);
group(1,2)=gradindecex(1);
k=2;
for i=1:length(gradindecex)-1
    if (gradindecex(i+1)-gradindecex(i))>80
        group(k,2)=gradindecex(i+1);
        k=k+1;
    end
end
k=2;
for i=1:length(gradindecex)-1
    if (gradindecex(i+1)-gradindecex(i))>80
        group(k,1)=gradindecex(i);
        k=k+1;
    end
end
group(k,1)=gradindecex(end);
group(k,2)=length(data);
group=group(1:length(find(group(:,1))),:);
% αφαιρώ 200 μετρήσεις μπρος και πίσω από κάθε σκαλί
group(:,1)=group(:,1)+200;
group(:,2)=group(:,2)-200;
%
means=zeros(length(group),1);

```



```

fmax=means;
fmin=means;
for i=1:length(group)
    means(i)=mean(data(group(i,1):group(i,2)));
    fmax(i)=max(data(group(i,1):group(i,2)));
    fmin(i)=min(data(group(i,1):group(i,2)));
end
grouprem=[];
for i=1:length(means)-1
    if means(i+1)-means(i)<0.05
        grouprem=[grouprem i+1];
    end
end
for i=1:length(grouprem)
    k=grouprem(i)-i+1;
    group(k-1,2)=group(k,2);
    group(k,:)=[];
    means(k)=[];
    means(k-1)=mean(data(group(k-1,1):group(k-1,2)));
    fmax(k)=[];
    fmax(k-1)=max(data(group(k-1,1):group(k-1,2)));
    means(k)=[];
    fmin(k-1)=min(data(group(k-1,1):group(k-1,2)));
end
stds=zeros(length(group),1);
for i=1:length(group)
    stds(i)=std(data(group(i,1):group(i,2)));
end
% Relative accuracy error
q=((means-weights')./weights')*100;
% Relative repeatability error
b=((fmax-fmin)./weights')*100;

urep=(group(:,2)-group(:,1)).^(-0.5).*(100./means).*stds;
r=6.5*10^(-3); % resolution of load cell
a=(r./weights')*100; % relative resolution
ures=a./(2*sqrt(3));
ustd=0.12;
uc=max((urep.^2+ures.^2+ustd^2).^0.5);
U=2*uc;
Q=max(q)/100
Emin=Q-U;
Emax=Q+U;
E=max(abs(Emax),abs(Emin))*100; %relative error SOS!!!
sprintf('The relative error is %3.1d %%',E)
Systematic_error_percent(s)=Q*100;
Random_error_percent(s)=U*100;
Total_error_percent(s)=E;
relative_accuracy_errors_kg(:,s)=q;
std_errors_kg(:,s)=stds;
uncertainty(:,s)=(urep.^2+ures.^2+ustd^2).^0.5;
relative_repeatability_errors_kg(:,s)=b;
end

```

```
Systematic_error_percent(end)=mean(Systematic_error_percent(1:end-1));  
Random_error_percent(end)=mean(Random_error_percent(1:end-1));  
Total_error_percent(end)=mean(Total_error_percent(1:end-1));  
relative_accuracy_errors_kg(:,N+1)=mean(relative_accuracy_errors_kg(:,1:N)');  
std_errors_kg(:,4)=mean(std_errors_kg(:,1:N)');  
relative_repeatability_errors_kg(:,N+1)=mean(relative_repeatability_errors_kg(:,1:N)');
```

Παράρτημα Β

Κώδικας ανάγνωσης τιμών από δυναμοκυψέλες

```
#include "HX711.h"

HX711 scale1;
HX711 scale2;

float calibration_factor = 316100; /

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  scale1.begin(7, 6); // DOUT = 7, CLK = 6
  scale2.begin(5, 4); // DOUT = 5, CLK = 4
  scale1.set_scale();
  scale2.set_scale();
  scale1.tare(); //Reset the scale1 to 0
  scale2.tare(); //Reset the scale2 to 0
  long zero_factor1 = scale1.read_average(); //Get a baseline reading
  long zero_factor2 = scale2.read_average(); //Get a baseline reading
}

void loop() {
  scale1.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor
  scale2.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor
  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale1.get_units()+scale2.get_units(), 3);
}
```

precix 6

PW6C

Single point load cells

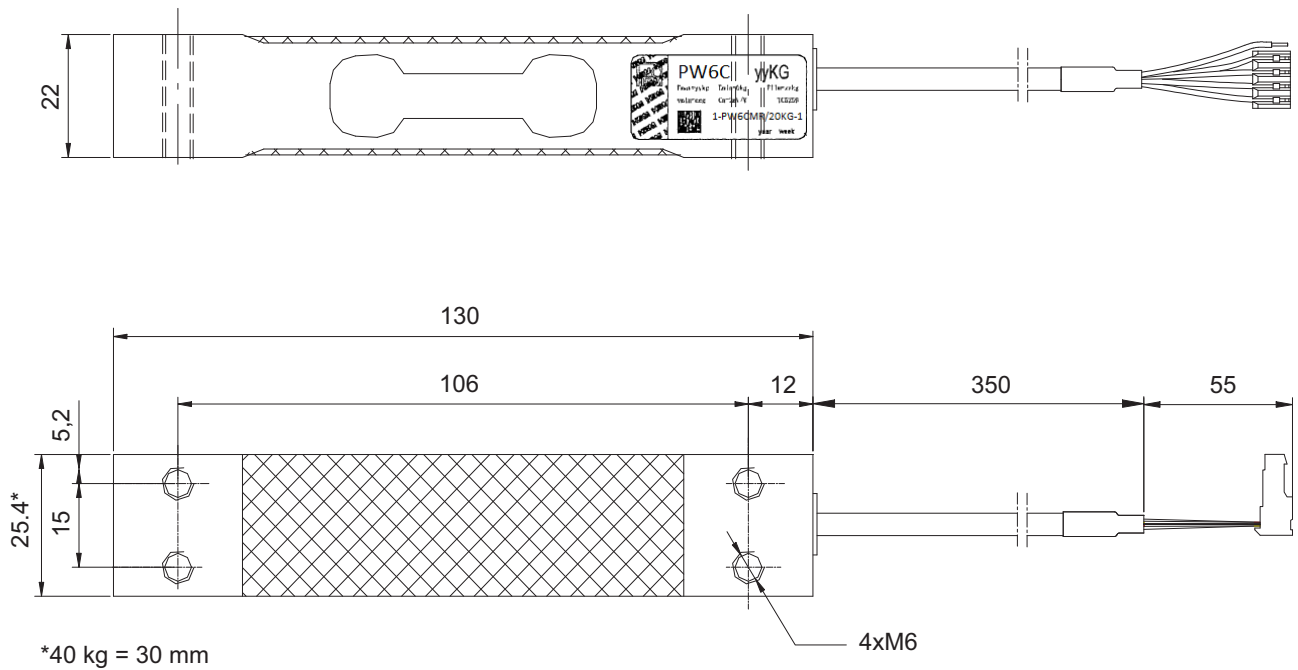
Special features

- Max. capacities: 1.5 kg ... 40 kg
- Aluminum
- Accuracy class C3MR & C6
- Off center load compensated
- Shielded connection cable
- Different cable lengths and other options deliverable



Data sheet

Dimensions (in mm; 1 mm = 0.03937 inches)



Specifications

Type			PW6C...							
Accuracy class ¹⁾			C3 Multi Range (MR)							
Number of load cell verification intervals	n_{LC}		3000							
Maximum capacity	E_{max}	kg	1.5	3	5	10	15	20	30	40
Minimum load cell verification interval	v_{min}	g	0.1	0.2	0.5	1		2		5
Temperature coefficient of zero signal	TK_0	% of $C_n/10K$	± 0.0093		± 0.0140		± 0.0093	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0175
Ratio of minimum verification interval	γ		15,000		10,000		15,000	10,000	15,000	8,000
Max. platform size		mm	300 x 300							
Sensitivity	C_n	mV/V	2.2 \pm 0.2							
Zero signal			0 \pm 0.12							
Temperature effect on sensitivity ²⁾ in the temperature range +20 ... +40 °C [+68 ... +104 °F] -10 ... +20 °C [+14 ... +68 °F]	TK_C	% of $C_n/10 K$	± 0.0175 ± 0.0117							
Relative reversibility error ²⁾	d_{hy}	% of C_n	± 0.0166							
Non-linearity ²⁾	d_{lin}		± 0.0166							
Ratio of minimum dead load output return	MDLOR		± 0.0166							
Off-center load error ³⁾			± 0.0233							
Input resistance	R_{LC}	Ω	300...500							
Output resistance	R_0		300...500							
Reference excitation voltage	U_{ref}	V	5							
Nom. range of excitation voltage	B_U		1 ... 12							
Max. excitation voltage		V	15							
Isolation resistance at 100 V _{DC}	R_{is}	G Ω	> 2							
Nominal (rated) range of ambient temperature	B_T	°C [°F]	-10 ... +40 [+14 ... +104]							
Operating temperature range	B_{tu}		-10 ... +50 [+14 ... +122]							
Storage temperature range	B_{tl}		-25 ... +70 [-13 ... +158]							
Limit load at max. 100 mm eccentricity	E_L	% of E_{max}	150							
Lateral load limit, static	E_{lq}		300							
Service load at max. 100 mm eccentricity	E_U		150							
Breaking load at max. 20 mm eccentricity	E_d		300							
Relative permissible oscillation stress at max. 20 mm eccentricity	F_{srel}		70							
Nominal (rated) displacement at E_{max} , approx.	s_{nom}		mm	< 0.5						
Weight, approx.	m	kg	0.25							
Degree of protection ⁴⁾			IP67							
Material Measuring body Application protection Cable sheath			Aluminum Silicone rubber PVC							

1) According to OIMLR60 with $P_{LC} = 0.7$

2) The values for linearity deviation (d_{lin}), relative reversibility error (d_{hy}) and temperature effect on sensitivity (TK_C) are recommended values. The sum of these values remain within the cumulated error limit acc. to OIML R60.

3) According to OIML R76.

4) According to EN60529 (IEC529)

Specifications (continuation)

Type			PW6C...						
Accuracy class ¹⁾			C6						
Maximum number of load cell intervals	n_{LC}		6000						
Maximum capacity	E_{max}	kg	3	5	10	15	20	30	40
Minimum LC verification interval	v_{min}	g	0.2	0.5	1	1	2	2	5
Temperature effect on zero balance	TK_0	% of C_n / 10 K	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0175
Max. platform size		mm	300 x 300						
Sensitivity	C_n	mV/V	2.2 ± 0.2						
Zero signal			0 ± 0.10						
Temperature effect on sensitivity ²⁾ in the temperature range +20 ... +40 °C [+68 ... +104 °F] -10 ... +20 °C [+14 ... +68 °F]	TK_C	% of C_n / 10 K	± 0.0087 ± 0.0058						
Relative reversibility error ²⁾	d_{hy}	% of C_n	± 0.0083						
Non-linearity ²⁾	d_{lin}		± 0.0083						
Ratio of minimum dead load output return	DR		± 0.0083						
Off-center load error ³⁾			± 0.0116						

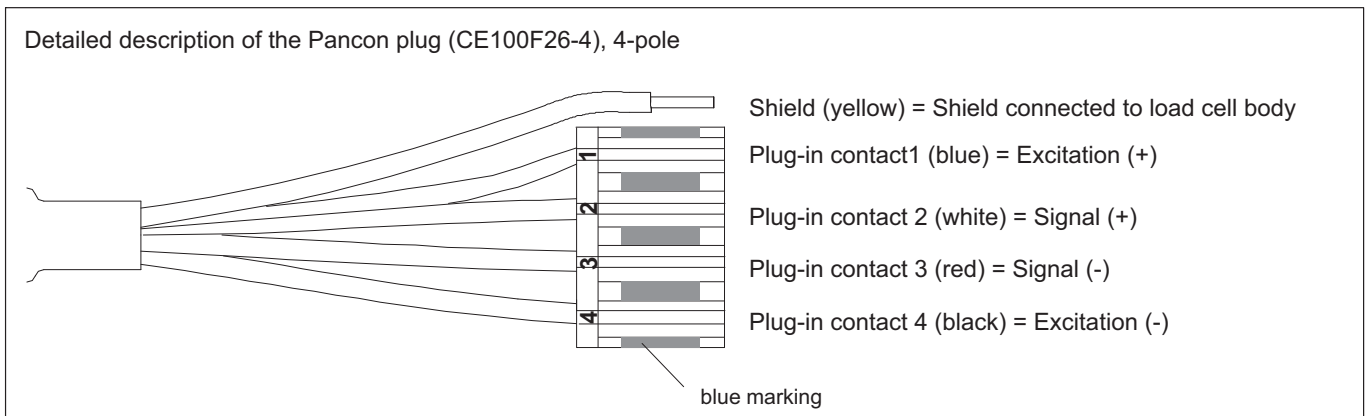
1) According to OIMLR60 with $P_{LC} = 0.7$

2) The values for linearity deviation (d_{lin}), relative reversibility error (d_{hy}) and temperature effect on sensitivity (TK_C) are recommended values. The sum of these values remain within the cumulated error limit acc. to OIML R60.

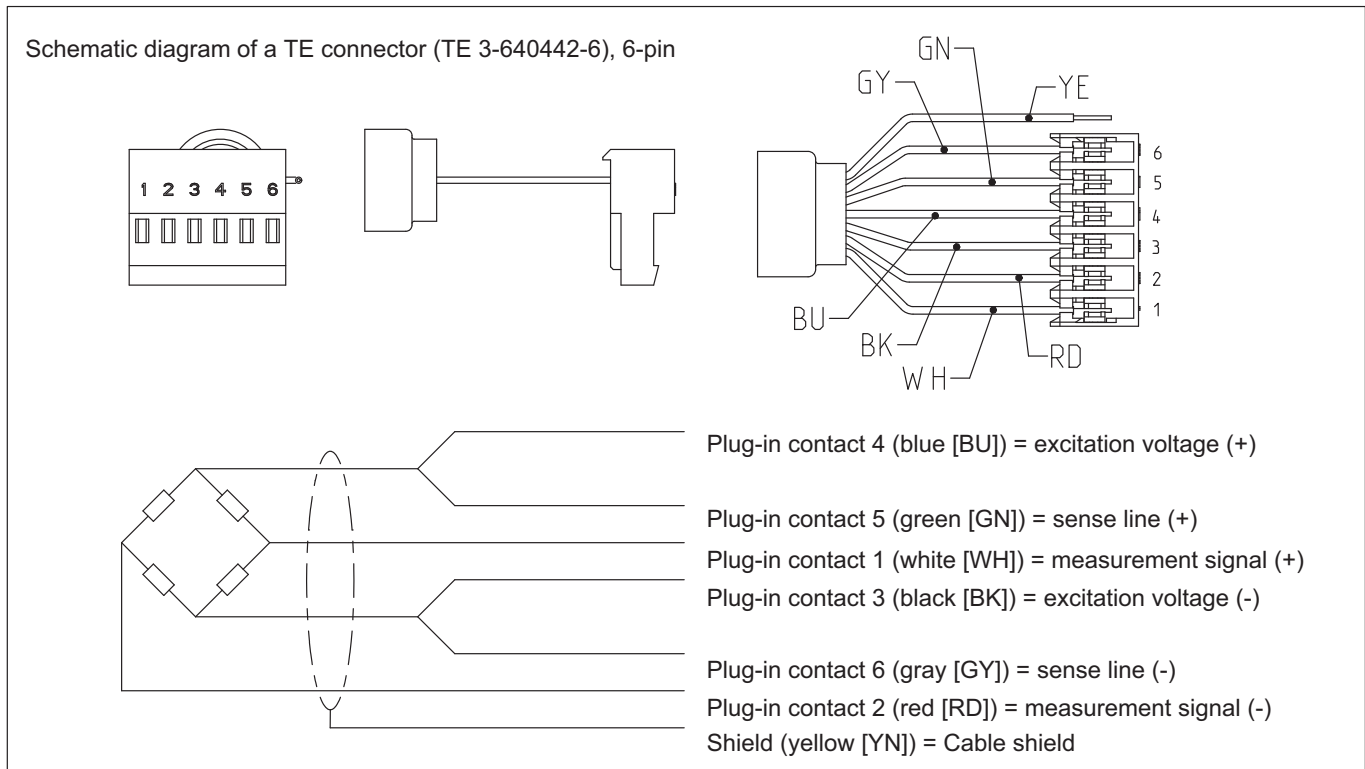
3) According to OIML R76.

Wiring code

Connection with 4 wire cable (cable length: 0.35 m)



Connection with 6 wire cable, 6 x 0.14 mm²/AWG 26 (cable length, selectable: 1.5 m; 3 m; 6 m)



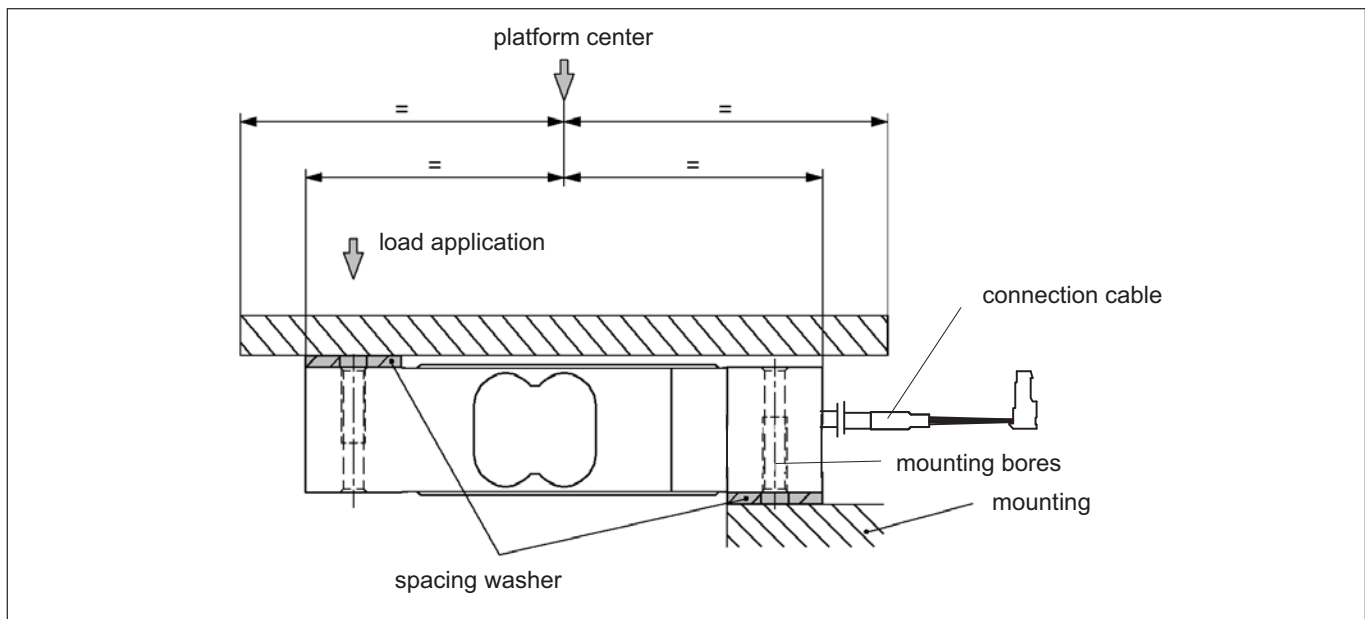
Mounting and Load application

The load cells are fixed at the mounting bores. For the recommended screws and tightening torques refer to the table below:

Max. capacity	Thread	Min. property class	Tightening torque ¹⁾
1.5...40 kg	M6	8.8	10 N·m

¹⁾ Recommended value for the stated property class. For screw dimensioning please refer to the appropriate information given by the screw manufacturers.

Load must not be applied to the side where the cable connection is located, as this would cause a force shunt.



Ordering codes

PW6C... (Aluminum)

Type	PW6C
Accuracy	C3-MR (OIML) (Multi Range)
Note	Cable length 0.35 m (4 wire)
Capacity [kg]	Order no.
1.5	1-PW6CMR/1.5KG-1
3	1-PW6CMR/3KG-1
5	1-PW6CMR/5KG-1
10	1-PW6CMR/10KG-1
15	1-PW6CMR/15KG-1
20	1-PW6CMR/20KG-1
30	1-PW6CMR/30KG-1
40	1-PW6CMR/40KG-1

K-PW6C-... (Aluminum), optional versions

Order no.	
K-PW6C	

Code	Option 1: Mechanical version
N	-

Code	Option 2: Accuracy
MR	C3-MR (OIML) (Multi Range)
C6	C6 (OIML)

Code	Option 3: Capacity
1.5	1.5 kg [only with option 2 = MR]
3	3 kg
5	5 kg
10	10 kg
15	15 kg
20	20 kg
30	30 kg
40	40 kg

Code	Option 4: NN
N	-

Code	Option 5: cable length
4_0.35	0,35 m (4 wire), (Standard)
6_0.35	0,35 m (6 wire)
6_1.5	1,5 m (6 wire)
6_3	3 m (6 wire)
6_6	6 m (6 wire)

Code	Option 6: Miscellaneous
N	without
A	2mV/V ±0,1% / 410 Ω ±0,2 Ω (aligned output, suitable for connection in parallel)

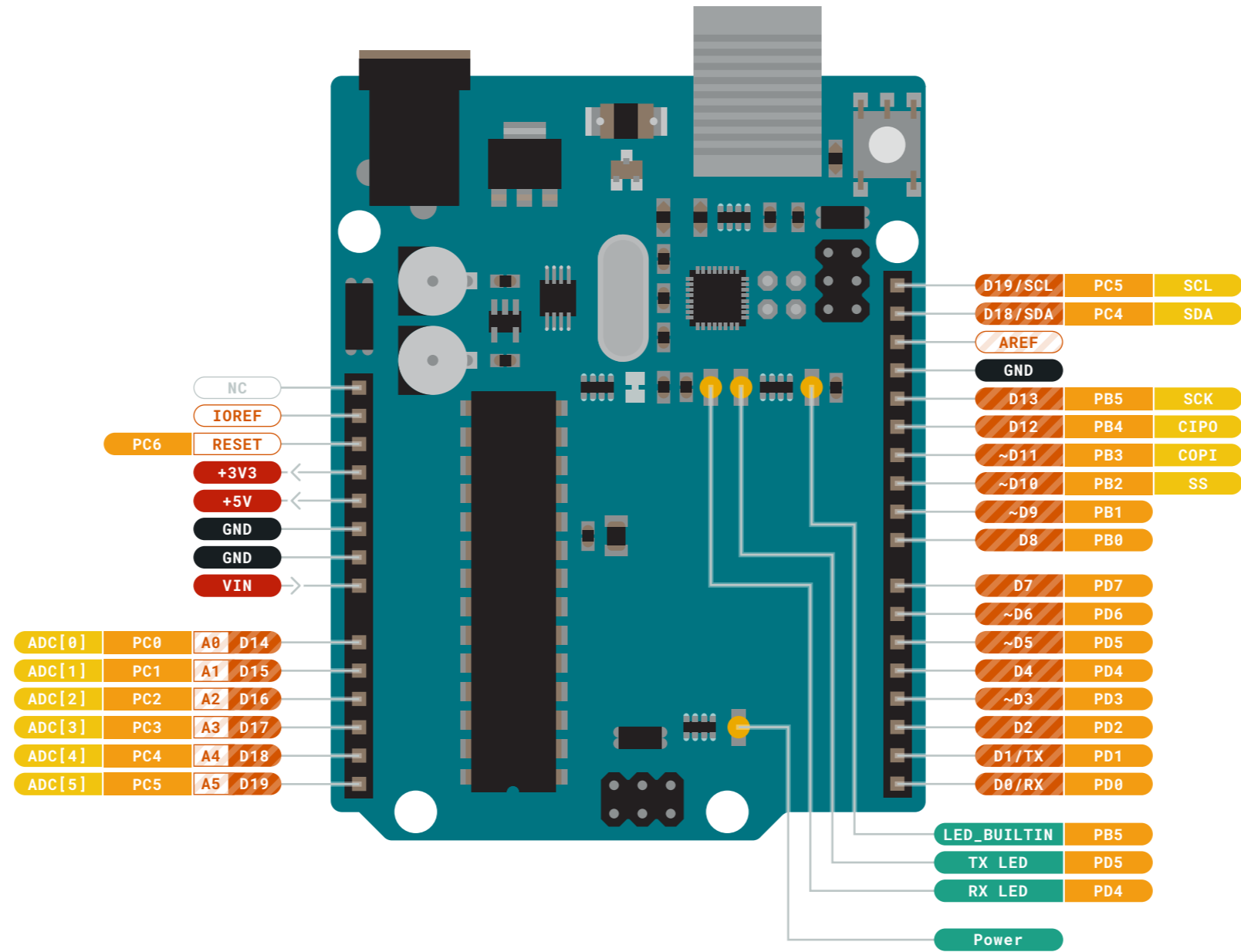
K-PW6C	-	N	-	-	-	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-
---------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Subject to modifications.
All product descriptions are for general information
only. They are not to be understood as a guarantee
of quality or durability.

Hottinger Brüel & Kjaer GmbH
Im Tiefen See 45 · 64293 Darmstadt · Germany
Tel. +49 6151 803-0 · Fax +49 6151 803-9100
Email: info@hbm.com · www.hbm.com

measure and predict with confidence





- Ground
- Power
- LED
- Internal Pin
- SWD Pin
- Digital Pin
- Analog Pin
- Other Pin
- Microcontroller's Port
- Default

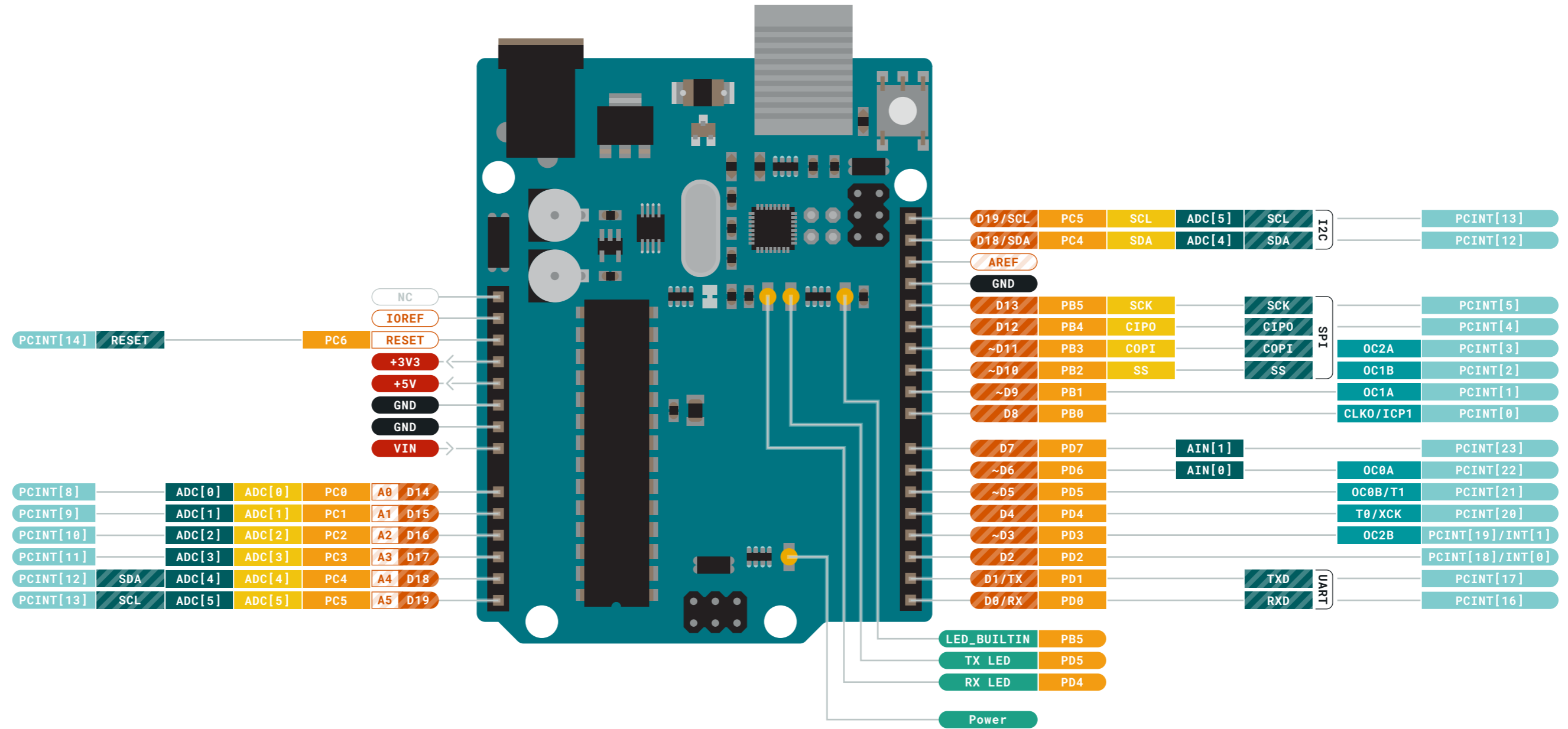
⚠ **MAXIMUM** current per I/O pin is 20mA

⚠ **MAXIMUM** current per +3.3V pin is 50mA

VIN 6-20 V input to the board.

NOTE: CIPO/COPI have previously been referred to as MISO/MOSI





- Ground
- Power
- LED
- Internal Pin
- SWD Pin
- Digital Pin
- Analog Pin
- Other Pin
- Microcontroller's Port
- Default
- Analog
- Communication
- Timer
- Interrupt
- Sercom

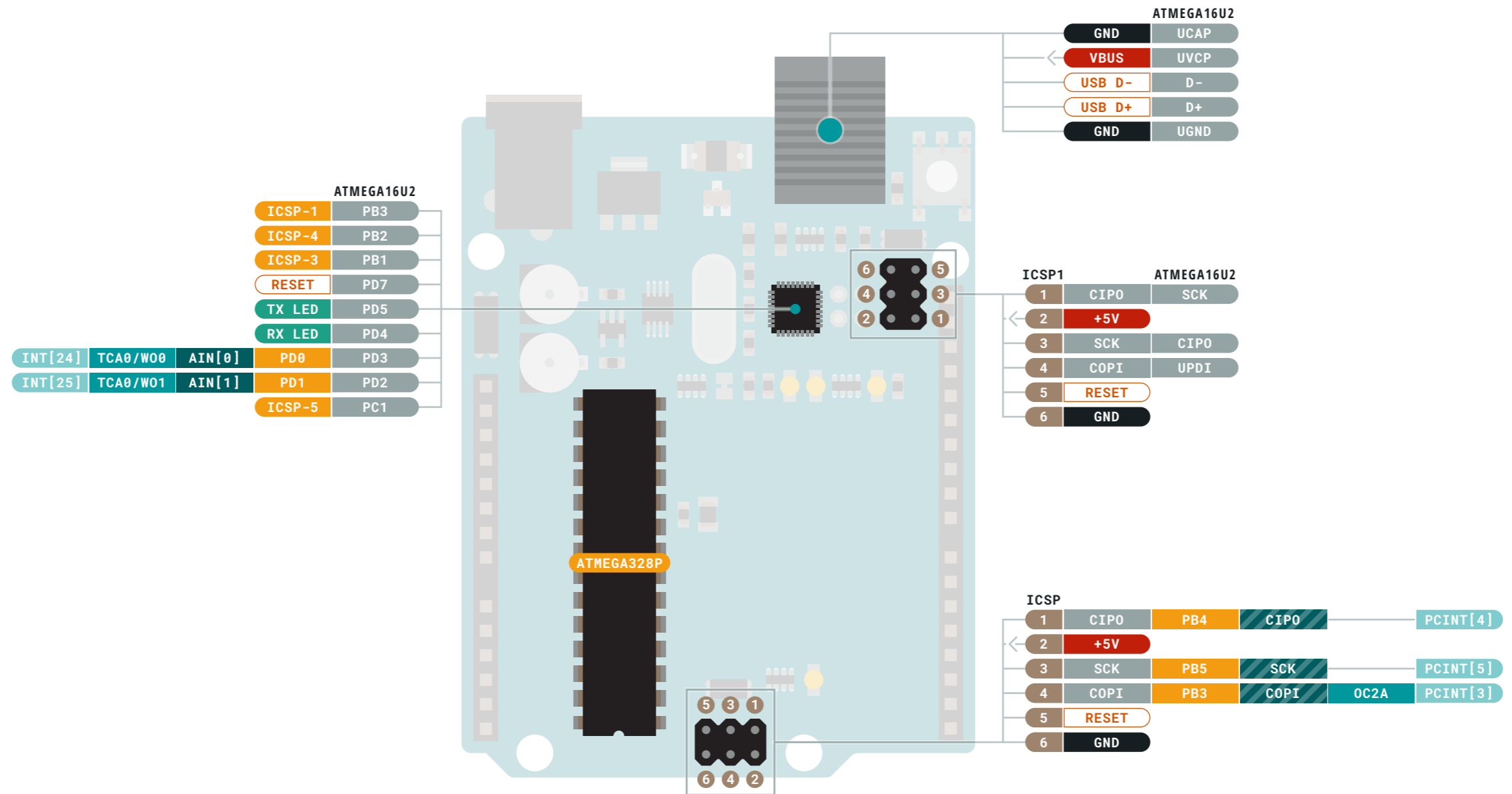
MAXIMUM current per I/O pin is 20mA

MAXIMUM current per +3.3V pin is 50mA

VIN 6-20 V input to the board.

NOTE: CIP0/COPI have previously been referred to as MISO/MOSI





- Ground
- Power
- LED
- Internal Pin
- SWD Pin
- Digital Pin
- Analog Pin
- Other Pin
- Microcontroller's Port
- Default
- Analog
- Communication
- Timer
- Interrupt
- Sercom

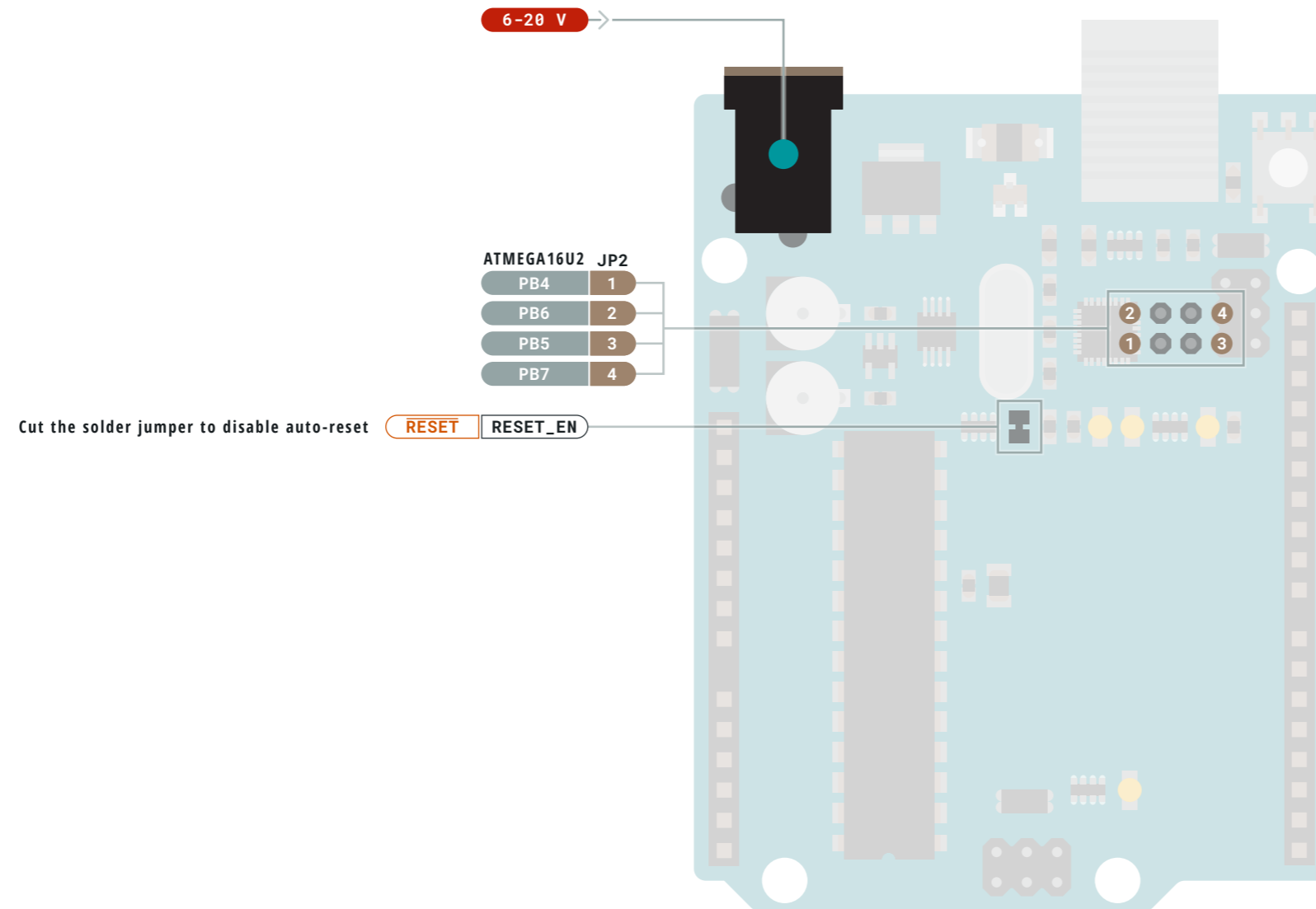
⚠️ MAXIMUM current per I/O pin is 20mA

⚠️ MAXIMUM current per +3.3V pin is 50mA

VIN 6-20 V input to the board.

NOTE: CIPO/COPI have previously been referred to as MISO/MOSI





- Ground
- Power
- LED
- Internal Pin
- SWD Pin
- Digital Pin
- Analog Pin
- Other Pin
- Microcontroller's Port
- Default
- SJ Pin
Making a short circuit using the solder jumper allows only the function in the SJ Pin cells.

- ⚠ **MAXIMUM** current per I/O pin is 20mA
- ⚠ **MAXIMUM** current per +3.3V pin is 50mA

VIN 6-20 V input to the board.



24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
 - normal operation $< 1.5\text{mA}$, power down $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range: $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

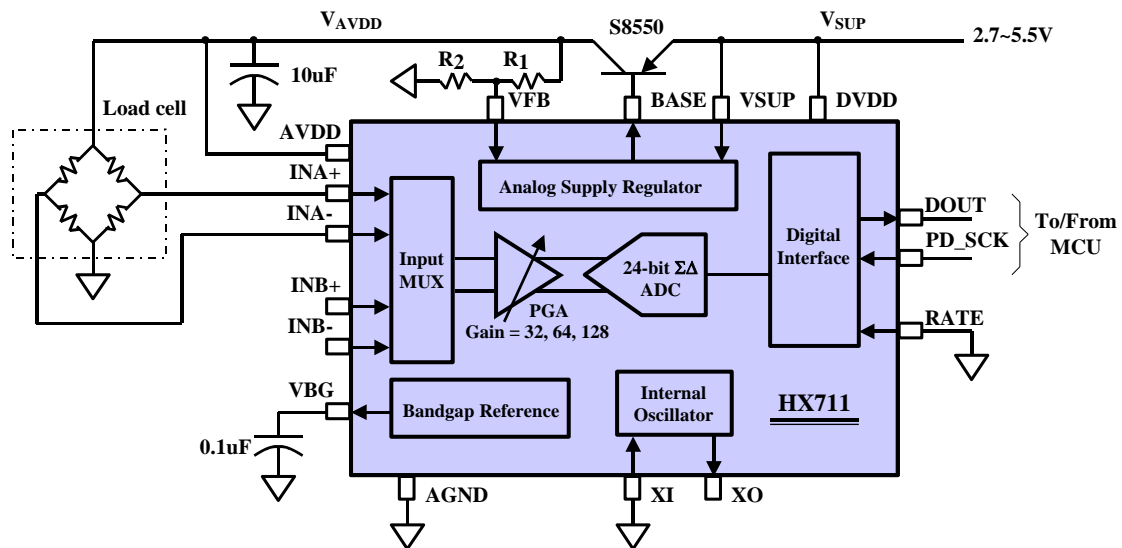
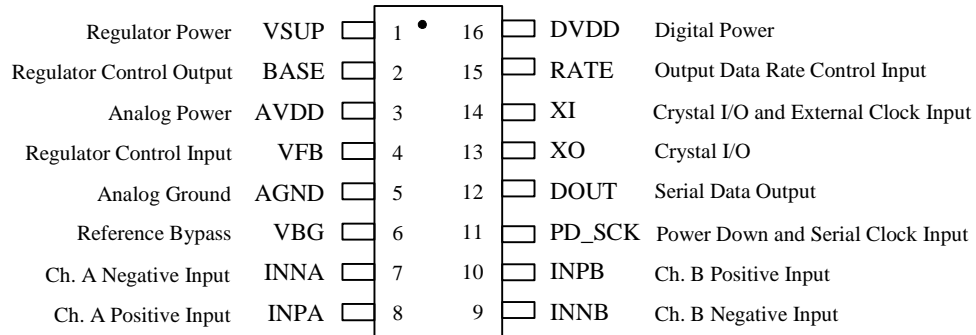


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

Pin Description


SOP-16L Package

Pin #	Name	Function	Description
1	VSUP	Power	Regulator supply: 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Analog Output	Regulator control output (NC when not used)
3	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Analog Input	Regulator control input (connect to AGND when not used)
5	AGND	Ground	Analog Ground
6	VBG	Analog Output	Reference bypass output
7	INA-	Analog Input	Channel A negative input
8	INA+	Analog Input	Channel A positive input
9	INB-	Analog Input	Channel B negative input
10	INB+	Analog Input	Channel B positive input
11	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
12	DOUT	Digital Output	Serial data output
13	XO	Digital I/O	Crystal I/O (NC when not used)
14	XI	Digital Input	Crystal I/O or external clock input, 0: use on-chip oscillator
15	RATE	Digital Input	Output data rate control, 0: 10Hz; 1: 80Hz
16	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V

Table 1 Pin Description

KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	V(inp)-V(inn)	$\pm 0.5(AVDD/GAIN)$			V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0		10		Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD		80		
	Crystal or external clock, RATE = 0		$f_{clk}/1,105,920$		
	Crystal or external clock, RATE = DVDD		$f_{clk}/138,240$		
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFF	HEX
Output settling time ⁽¹⁾	RATE = 0		400		ms
	RATE = DVDD		50		
Input offset drift	Gain = 128		0.2		mV
	Gain = 64		0.4		
Input noise	Gain = 128, RATE = 0		50		nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD		90		
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)		± 6		nV/°C
	Gain (Gain = 128)		± 5		ppm/°C
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Power supply rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Reference bypass (V _{BG})			1.25		V
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD, VSUP	2.6		5.5	
Analog supply current (including regulator)	Normal		1400		μA
	Power down		0.3		
Digital supply current	Normal		100		μA
	Power down		0.2		

(1) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics

Analog Inputs

Channel A differential input is designed to interface directly with a bridge sensor's differential output. It can be programmed with a gain of 128 or 64. The large gains are needed to accommodate the small output signal from the sensor. When 5V supply is used at the AVDD pin, these gains correspond to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively.

Channel B differential input has a fixed gain of 32. The full-scale input voltage range is $\pm 80\text{mV}$, when 5V supply is used at the AVDD pin.

Power Supply Options

Digital power supply (DVDD) should be the same power supply as the MCU power supply.

When using internal analog supply regulator, the dropout voltage of the regulator depends on the external transistor used. The output voltage is equal to $V_{AVDD} = V_{BG} * (R1 + R2) / R2$ (Fig.1). This voltage should be designed with a minimum of 100mV below VSUP voltage.

If the on-chip analog supply regulator is not used, the VSUP pin should be connected to either AVDD or DVDD, depending on which voltage is higher. Pin VFB should be connected to Ground and pin BASE becomes NC. The external 0.1uF bypass capacitor shown on Fig. 1 at the VBG output pin is then not needed.

Clock Source Options

By connecting pin XI to Ground, the on-chip oscillator is activated. The nominal output data rate when using the internal oscillator is 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

If accurate output data rate is needed, crystal or external reference clock can be used. A crystal can be directly connected across XI and XO pins. An external clock can be connected to XI pin, through a 20pF ac coupled capacitor. This external clock is not required to be a square wave. It can come directly from the crystal output pin of the MCU chip, with amplitude as low as 150 mV.

When using a crystal or an external clock, the internal oscillator is automatically powered down.

Output Data Rate and Format

When using the on-chip oscillator, output data rate is typically 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

When using external clock or crystal, output data rate is directly proportional to the clock or crystal frequency. Using 11.0592MHz clock or crystal results in an accurate 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1) output data rate.

The output 24 bits of data is in 2's complement format. When input differential signal goes out of the 24-bit range, the output data will be saturated at 800000h (MIN) or 7FFFFFFh (MAX), until the input signal comes back to the input range.

Serial Interface

Pin PD_SCK and DOUT are used for data retrieval, input selection, gain selection and power down controls.

When output data is not ready for retrieval, digital output pin DOUT is high. Serial clock input PD_SCK should be low. When DOUT goes to low, it indicates data is ready for retrieval. By applying 25~27 positive clock pulses at the PD_SCK pin, data is shifted out from the DOUT output pin. Each PD_SCK pulse shifts out one bit, starting with the MSB bit first, until all 24 bits are shifted out. The 25th pulse at PD_SCK input will pull DOUT pin back to high (Fig.2).

Input and gain selection are controlled by the number of the input PD_SCK pulses (Table 3). PD_SCK clock pulses should not be less than 25 or more than 27 within one conversion period, to avoid causing serial communication error.

PD_SCK Pulses	Input channel	Gain
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Table 3 Input Channel and Gain Selection

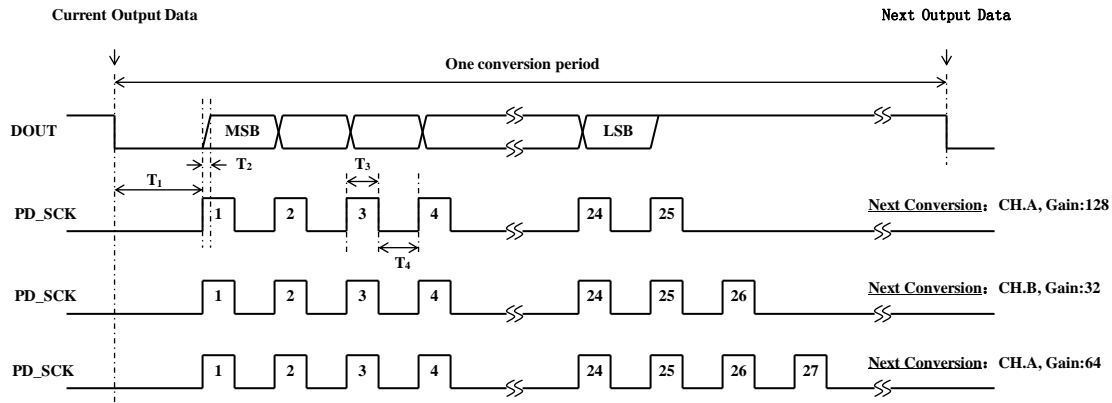


Fig.2 Data output, input and gain selection timing and control

Symbol	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T ₁	DOUT falling edge to PD_SCK rising edge	0.1			μs
T ₂	PD_SCK rising edge to DOUT data ready			0.1	μs
T ₃	PD_SCK high time	0.2	1	50	μs
T ₄	PD_SCK low time	0.2	1		μs

Reset and Power-Down

When chip is powered up, on-chip power on rest circuitry will reset the chip.

Pin PD_SCK input is used to power down the HX711. When PD_SCK Input is low, chip is in normal working mode.

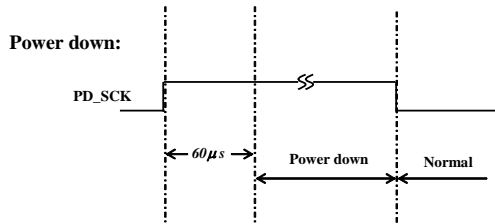


Fig.3 Power down control

When PD_SCK pin changes from low to high and stays at high for longer than 60μs, HX711 enters power down mode (Fig.3). When internal regulator is used for HX711 and the external transducer, both HX711 and the transducer will be powered down. When PD_SCK returns to low,

chip will return back to the setup conditions before power down and enter normal operation mode.

If PD_SCK pulse number is changed during the current conversion period, power down should be executed after current conversion period is completed. This is to ensure that the change is saved. When chip returns back to normal operation from power down, it will return to the set up conditions of the last change.

Application Example

Fig.1 is a typical weigh scale application using HX711. It uses on-chip oscillator (XI=0), 10Hz output data rate (RATE=0). A Single power supply (2.7~5.5V) comes directly from MCU power supply. Channel B can be used for battery level detection. The related circuitry is not shown on Fig. 1.

Reference PCB Board (Single Layer)

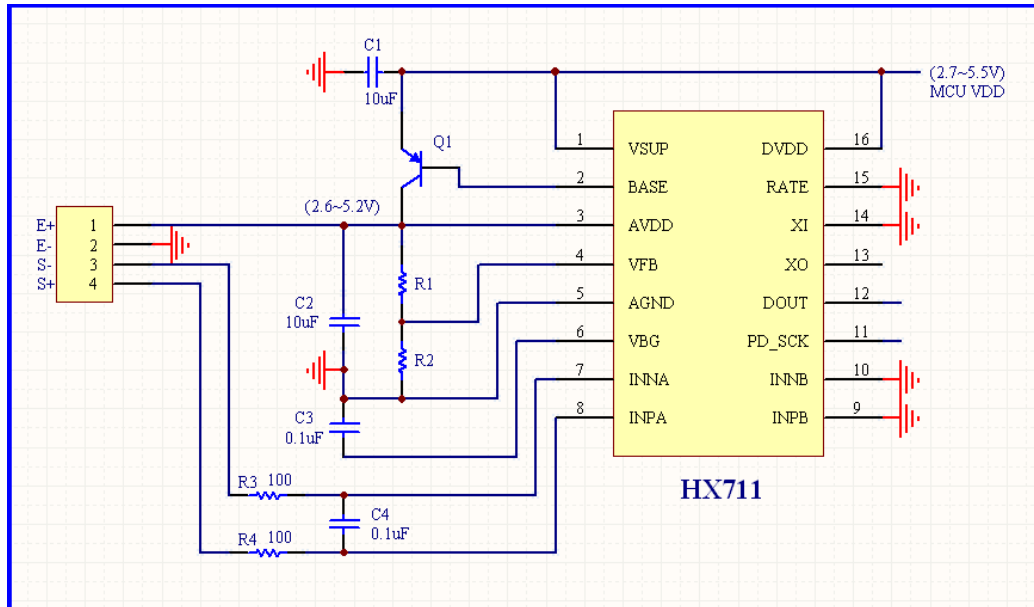


Fig.4 Reference PCB board schematic

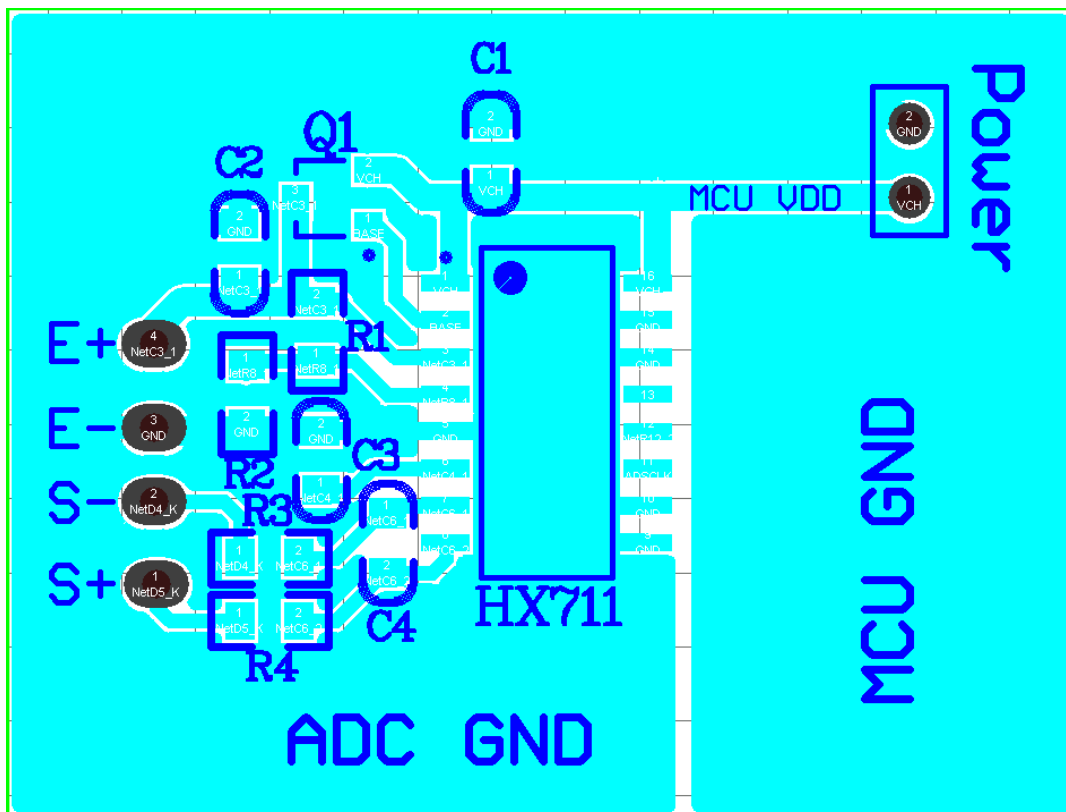


Fig.5 Reference PCB board layout

Reference Driver (Assembly)

```

/*-----
Call from ASM:      LCALL  ReaAD
Call from C:      extern unsigned long ReadAD(void);
                  .
                  .
                  unsigned long data;
                  data=ReadAD();
                  .
                  .
-----*/

PUBLIC      ReadAD
HX711ROM    segment code
rseg       HX711ROM

sbit       ADDO = P1.5;
sbit       ADSK = P0.0;
/*-----
OUT:      R4, R5, R6, R7  R7=>LSB
-----*/

ReadAD:
    CLR    ADSK          //AD Enable (PD_SCK set low)
    SETB   ADDO          //Enable 51CPU I/O
    JB     ADDO,$        //AD conversion completed?
    MOV    R4,#24

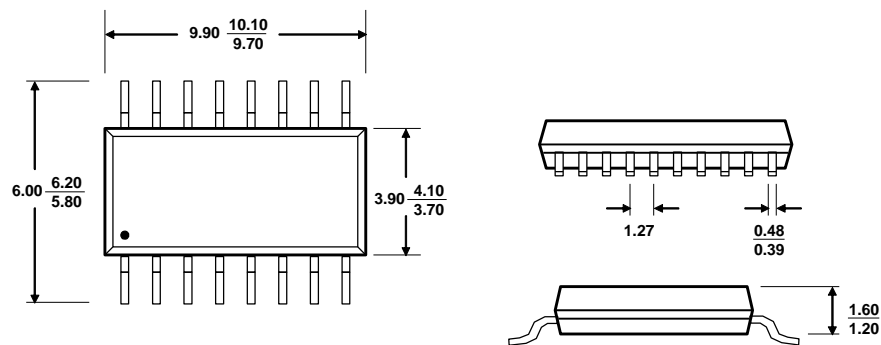
ShiftOut:
    SETB   ADSK          //PD_SCK set high (positive pulse)
    NOP
    CLR    ADSK          //PD_SCK set low
    MOV    C,ADD0        //read on bit
    XCH   A,R7           //move data
    RLC   A
    XCH   A,R7
    XCH   A,R6
    RLC   A
    XCH   A,R6
    XCH   A,R5
    RLC   A
    XCH   A,R5
    DJNZ  R4,ShiftOut    //moved 24BIT?
    SETB   ADSK
    NOP
    CLR    ADSK
    RET
    END

```

Reference Driver (C)

```
//-----
sbit  ADD0 = P1^5;
sbit  ADSK = P0^0;
unsigned long ReadCount(void) {
    unsigned long Count;
    unsigned char i;
    ADD0=1;
    ADSK=0;
    Count=0;
    while(ADD0);
    for (i=0;i<24;i++){
        ADSK=1;
        Count=Count<<1;
        ADSK=0;
        if(ADD0) Count++;
    }
    ADSK=1;
    Count=Count^0x800000;
    ADSK=0;
    return(Count);
}
```

Package Dimensions

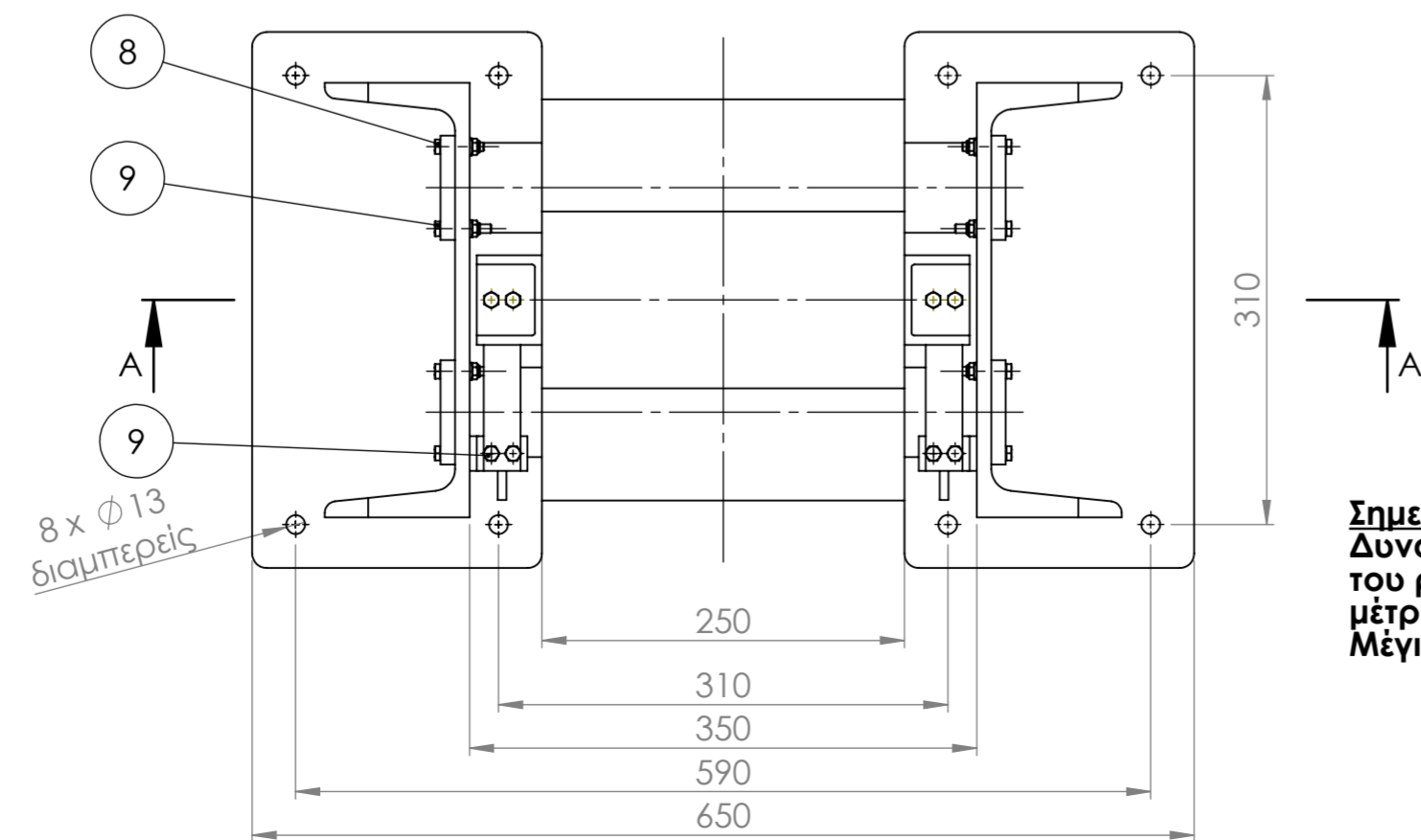
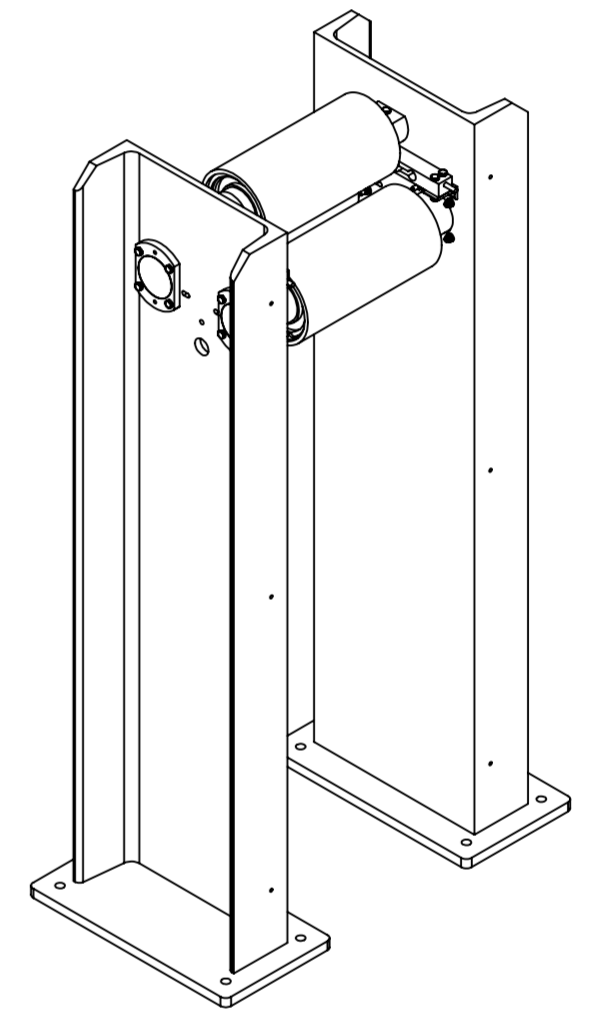
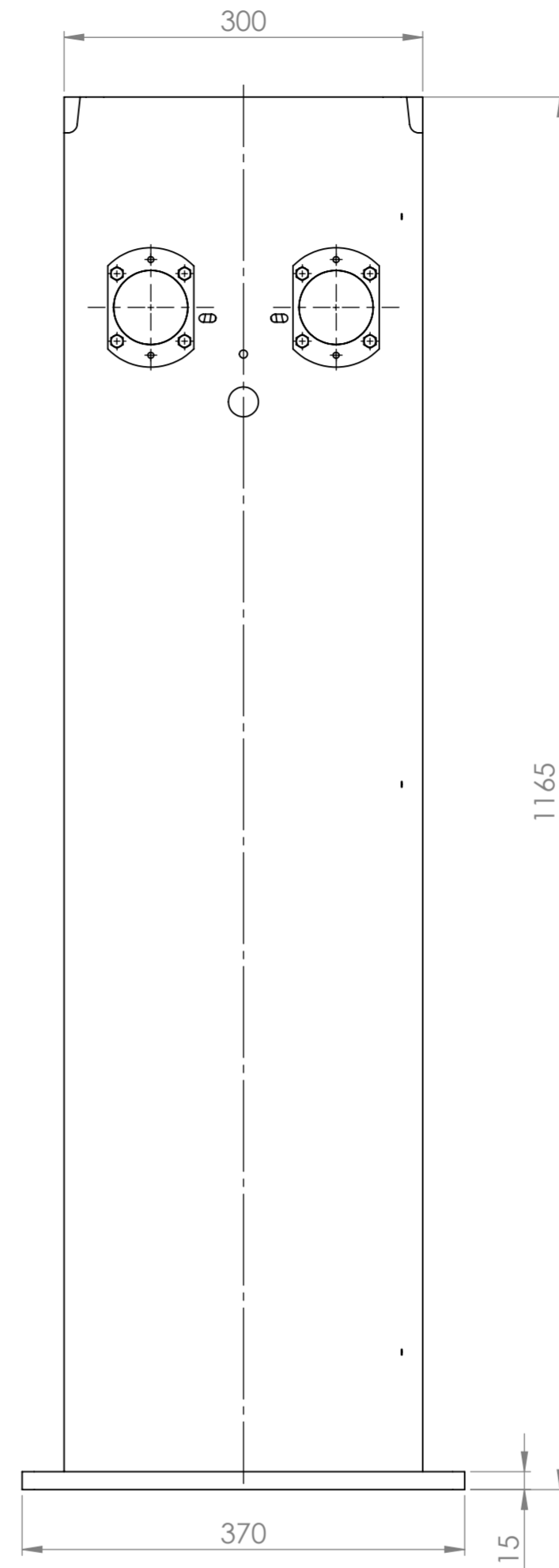
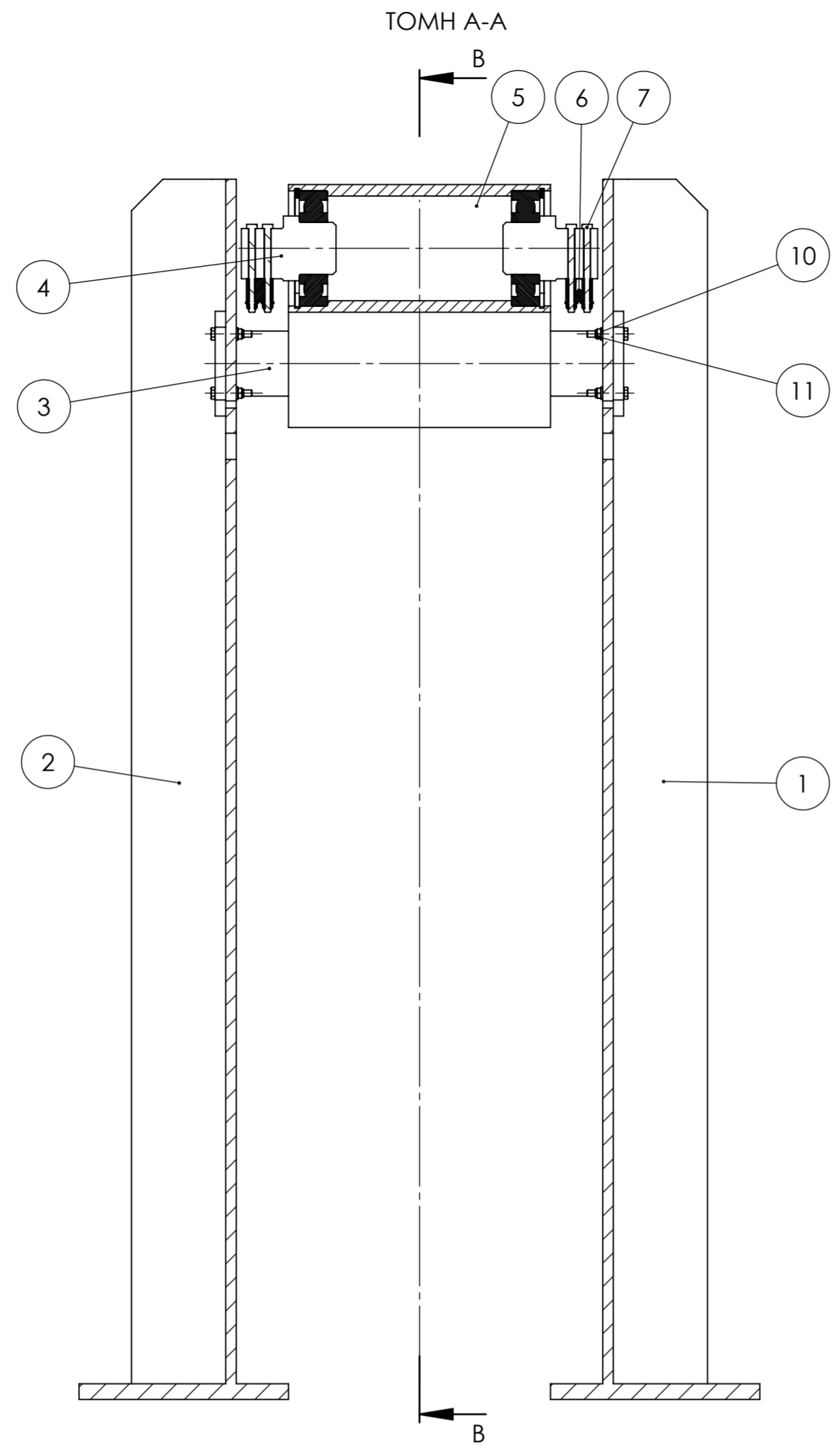
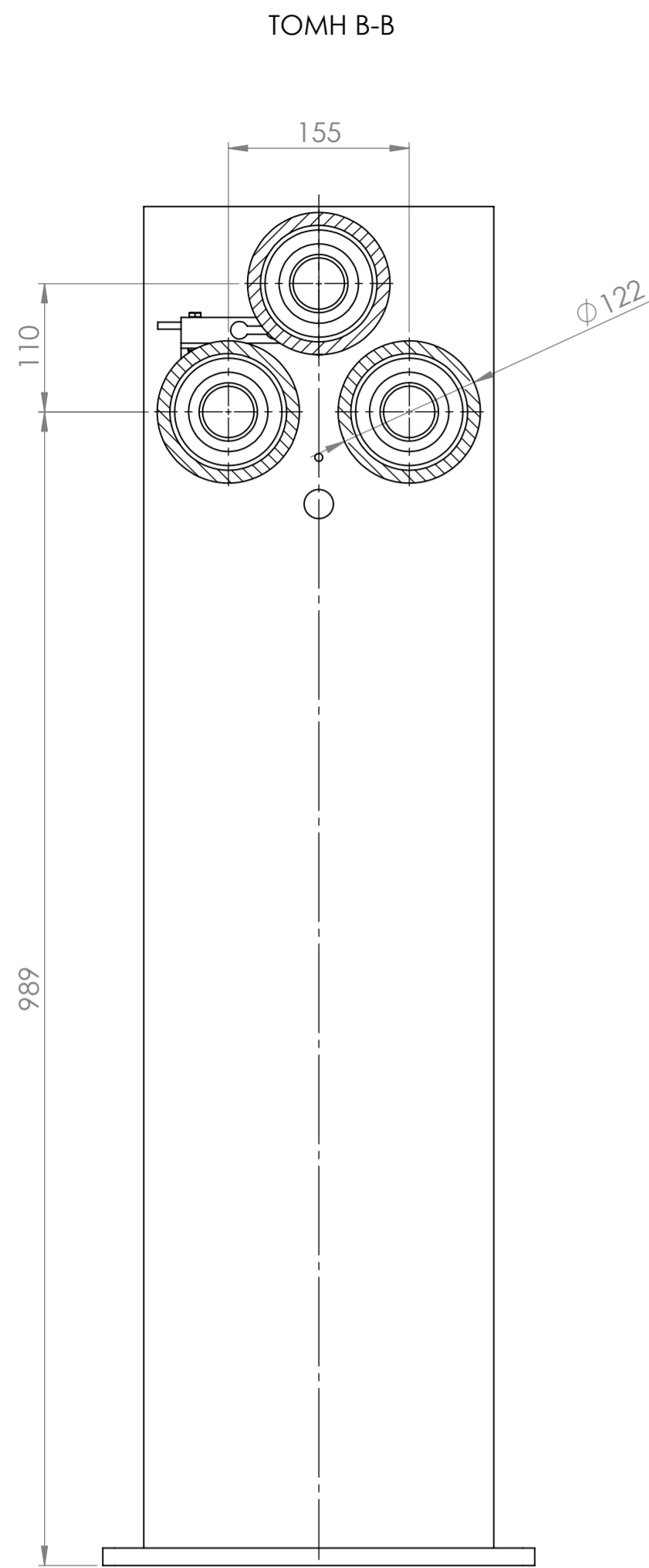


Typ $\frac{\text{MAX}}{\text{MIN}}$ Unit: mm

SOP-16L Package

Revision History

revision	record
1.0	initial version
2.0	change “Reset and Power-Down”

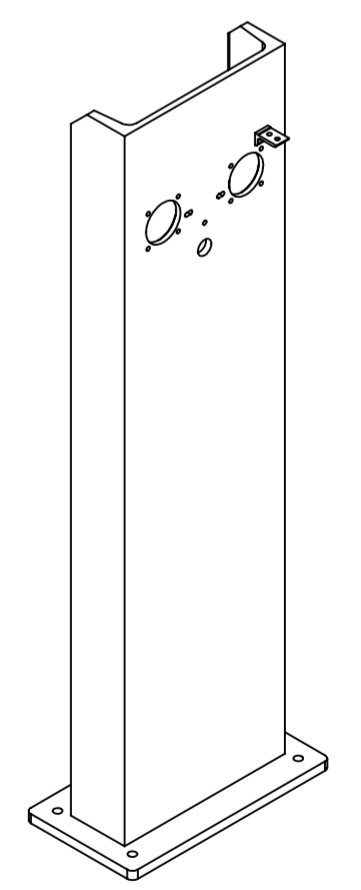
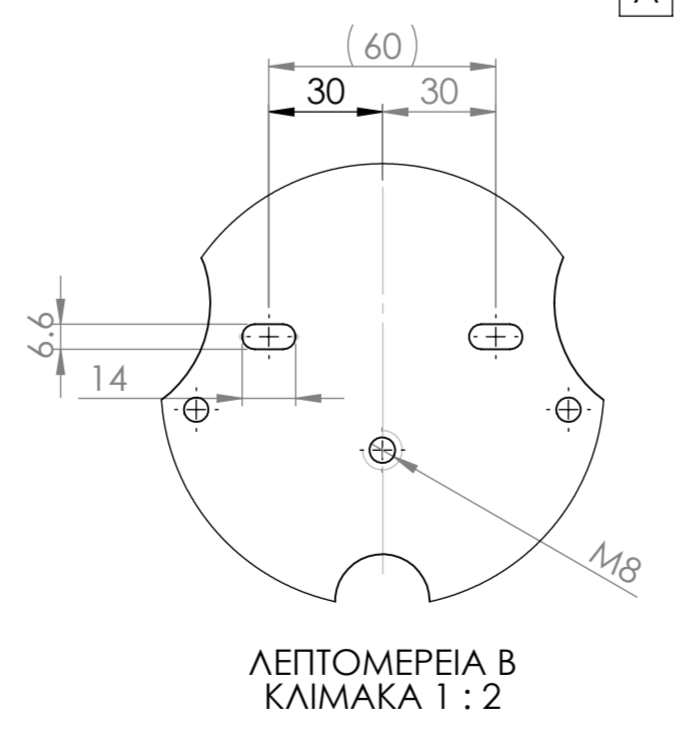
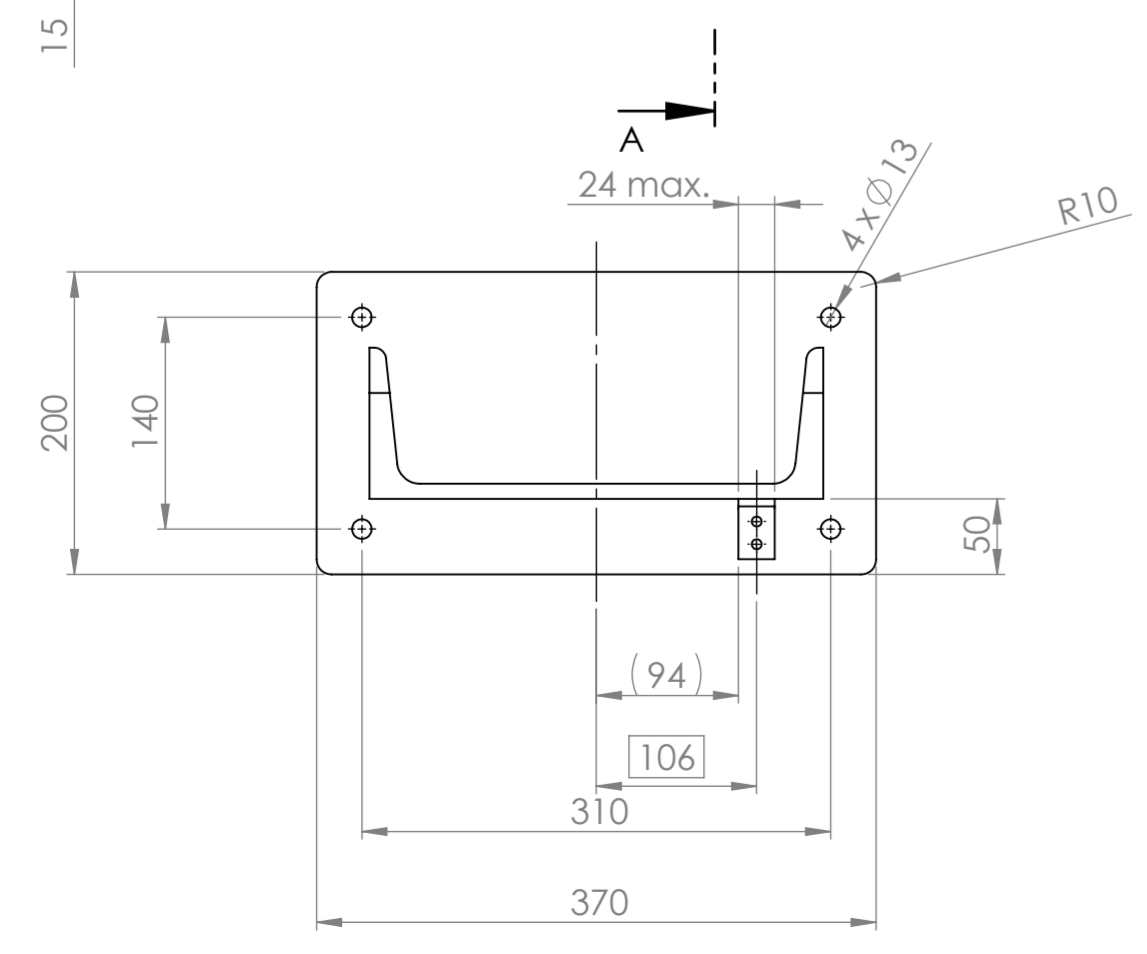
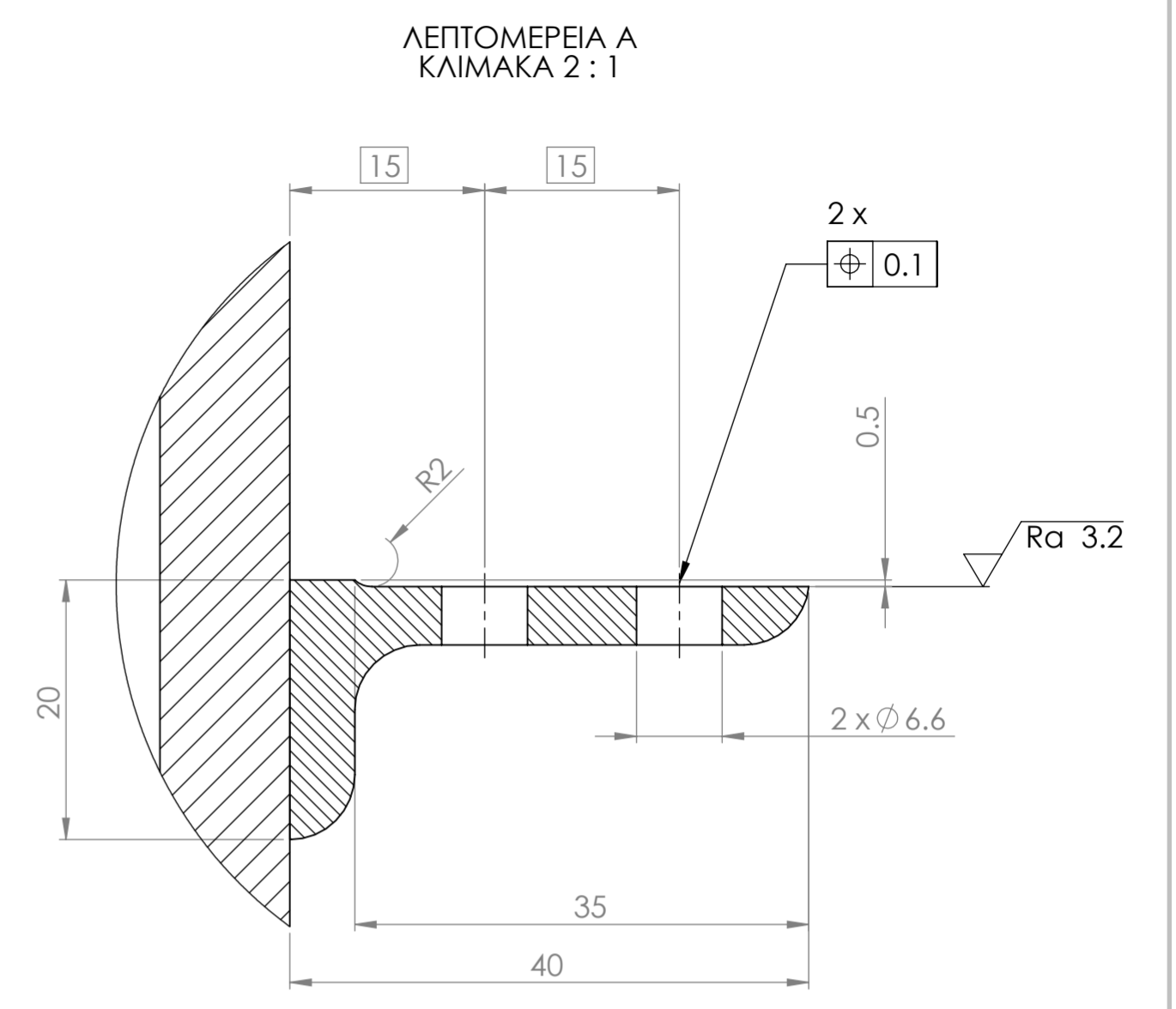
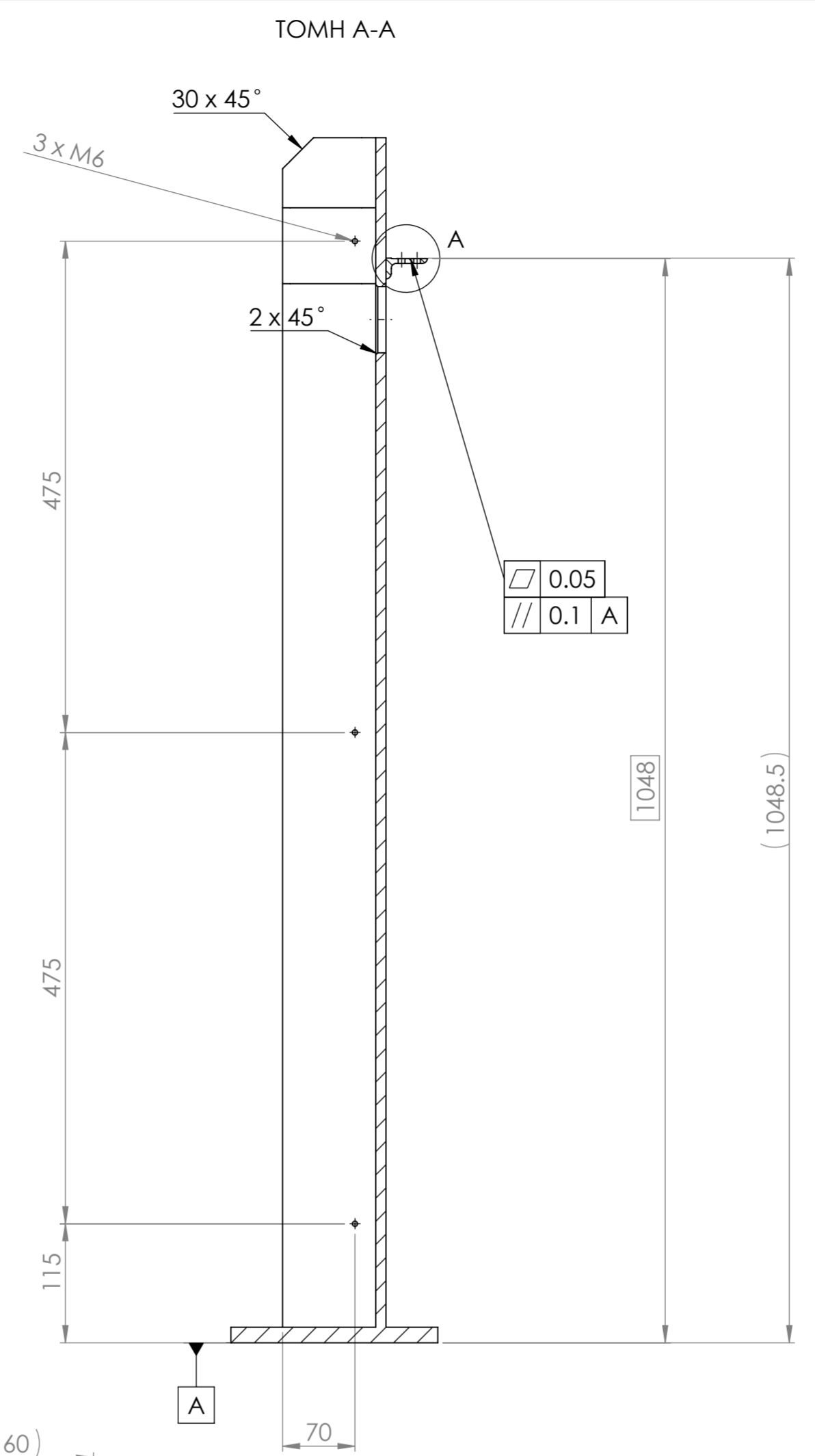
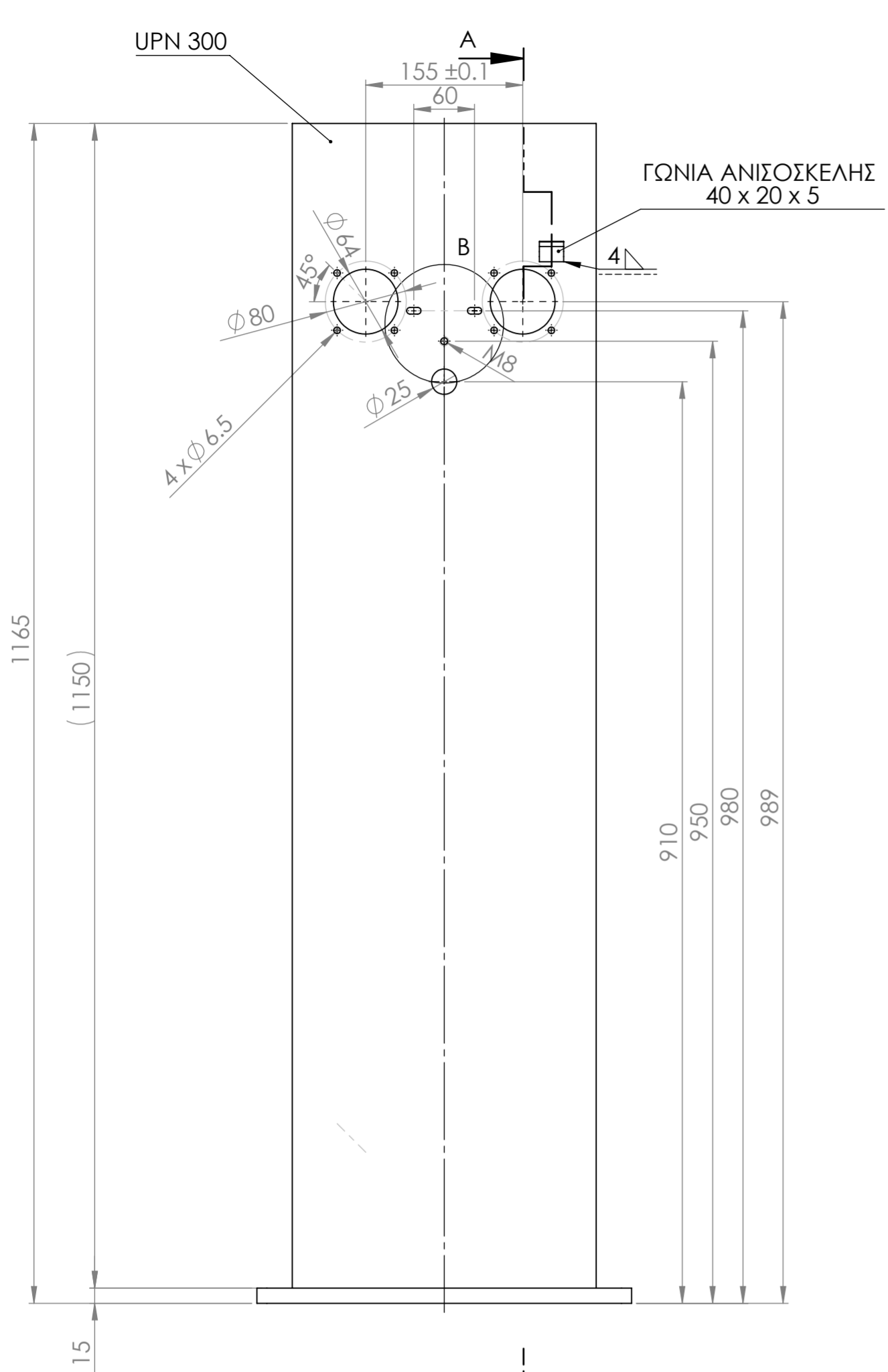


Σημείωση:
 Δυναμική ζυγοστάθμιση του υποσυναρμολογήματος του ραούλου (5) με τους άξονες του ραούλου μέτρησης (4) κατά ISO-1940: 2003 Grade 6.3
 Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής: 210 RPM

11	24	ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	DIN 985 M6	
10	24	ΡΟΔΕΛΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	DIN 128 6	
9	12	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕ ΕΞΑΓΩΝΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ	DIN 933 M6 x 35	ΠΟΙΟΤΗΤΑ 8.8
8	8	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕ ΕΞΑΓΩΝΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ	DIN 931 M6 x 30	ΠΟΙΟΤΗΤΑ 8.8
7	4	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕ ΕΞΑΓΩΝΙΚΗ ΚΕΦΑΛΗ	DIN 931 M6 x 80	ΠΟΙΟΤΗΤΑ 8.8
6	2	ΔΥΝΑΜΟΚΥΨΕΛΗ HBM 15kg	SPO - HBM - 15kg	
5	3	ΡΑΟΥΛΟ	Tension - 01 - 04	ΥΛΙΚΟ: AISI 304
4	2	ΑΞΟΝΑΣ ΡΑΟΥΛΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	Tension - 01 - 03	ΥΛΙΚΟ: Ck60
3	4	ΑΞΟΝΑΣ	Tension - 01 - 03	ΥΛΙΚΟ: S137-2
2	1	ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ Β	Tension - 01 - 02	ΥΛΙΚΟ: S137-2
1	1	ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ Α	Tension - 01 - 01	ΥΛΙΚΟ: S137-2
a/a	ποσότητα	Όνομασία τεμαχίου	Αριθμός σχεδίου ή τυποποιημένη ονομασία	Παρατηρήσεις

Scale: 1:5
 Weight: 165 kg approx.

Created by Μαυρίκος Στέφανος	Approved by Μπενάρδος Πανάριος	Document type Ισοπλεκτικό Σχέδιο	Document status Υπό έγκριση
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ		Τίτλος ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΝΥΣΗΣ	Τension - 01- 00
Paper size A2	Date of issue 24/5/2021	Sheet 1 / 1	



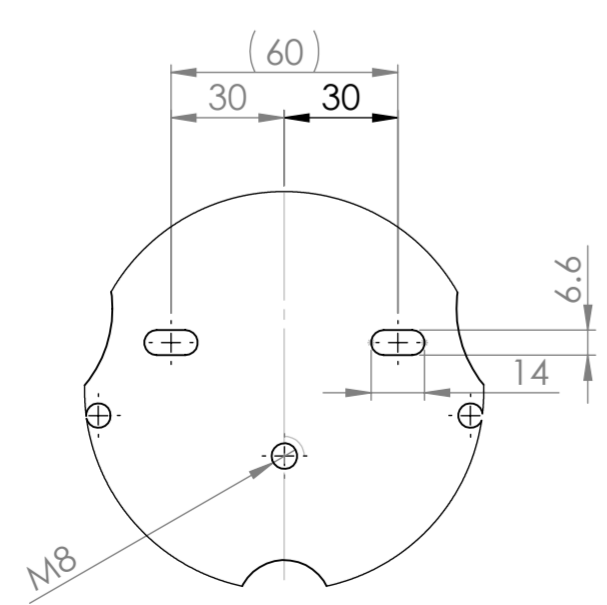
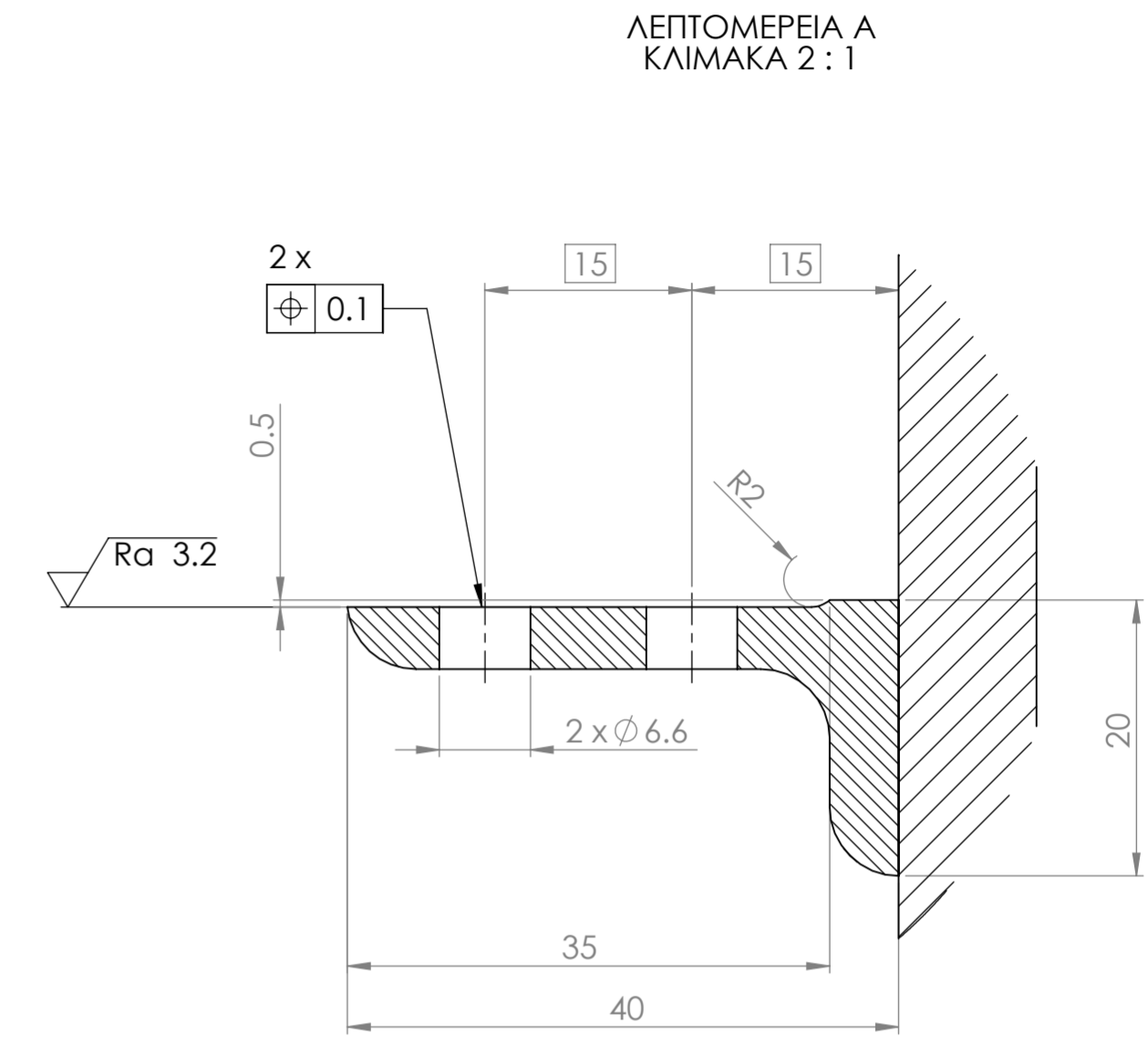
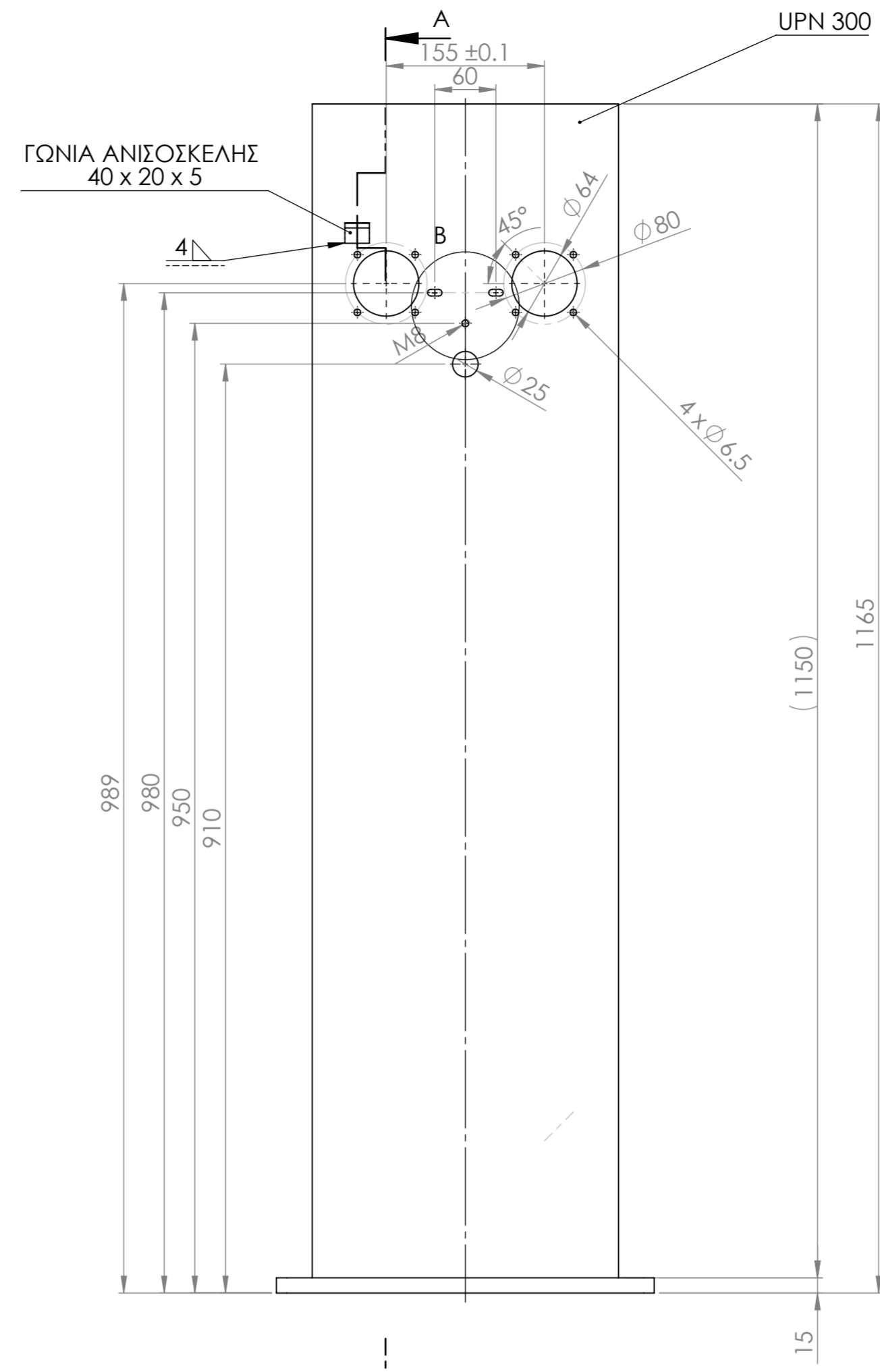
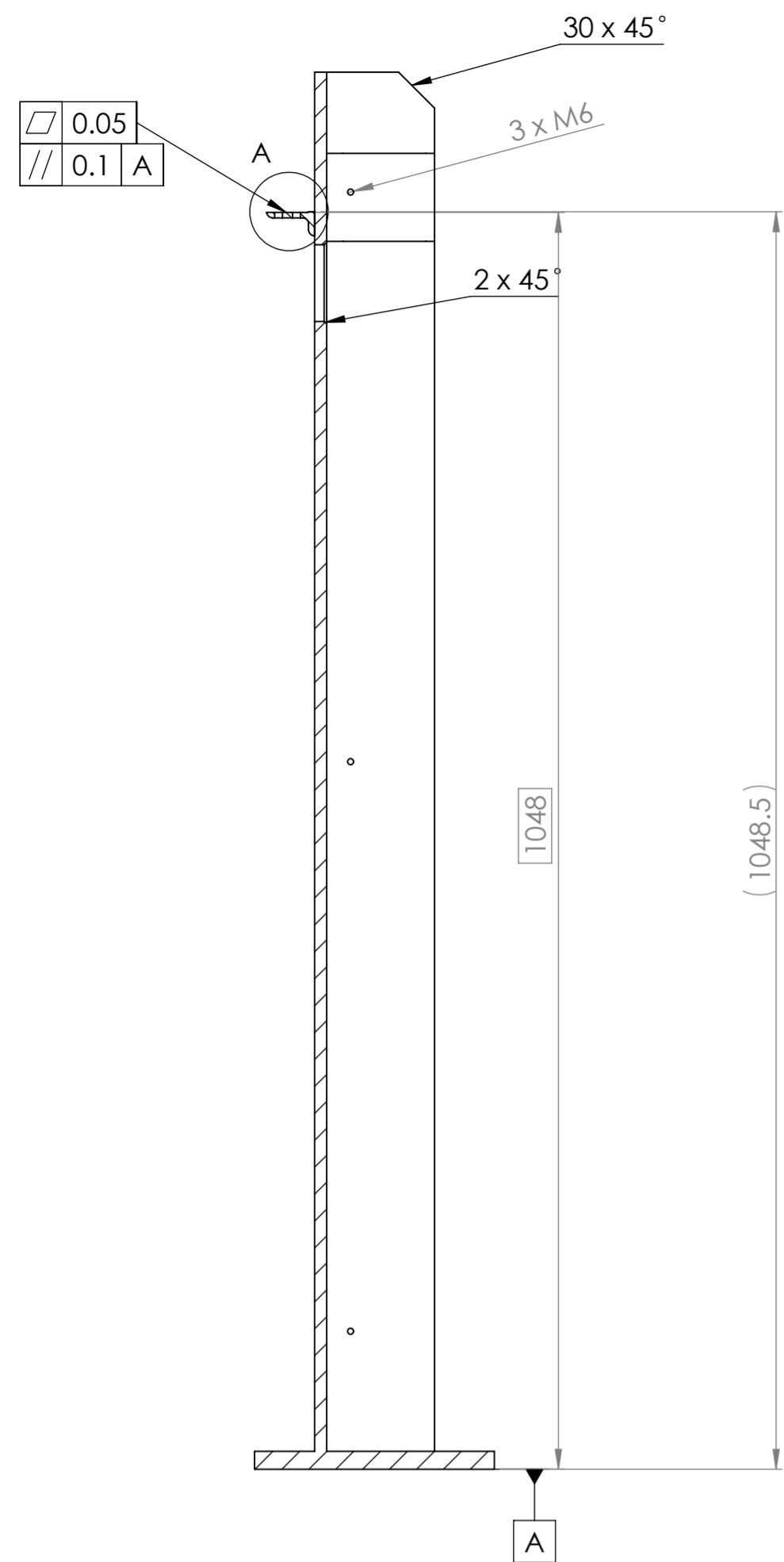
Σημειώσεις:
 1. Οι συγκολλήσεις να προηγηθούν των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού.
 2. Όλες οι οπές είναι διαμπερείς.
 3. Οι μη κατεργασμένες επιφάνειες να βαφούν με αντισκωριακό και χρώμα Πράσινο RAL 6018.

√ Ra 6.3 (✓)

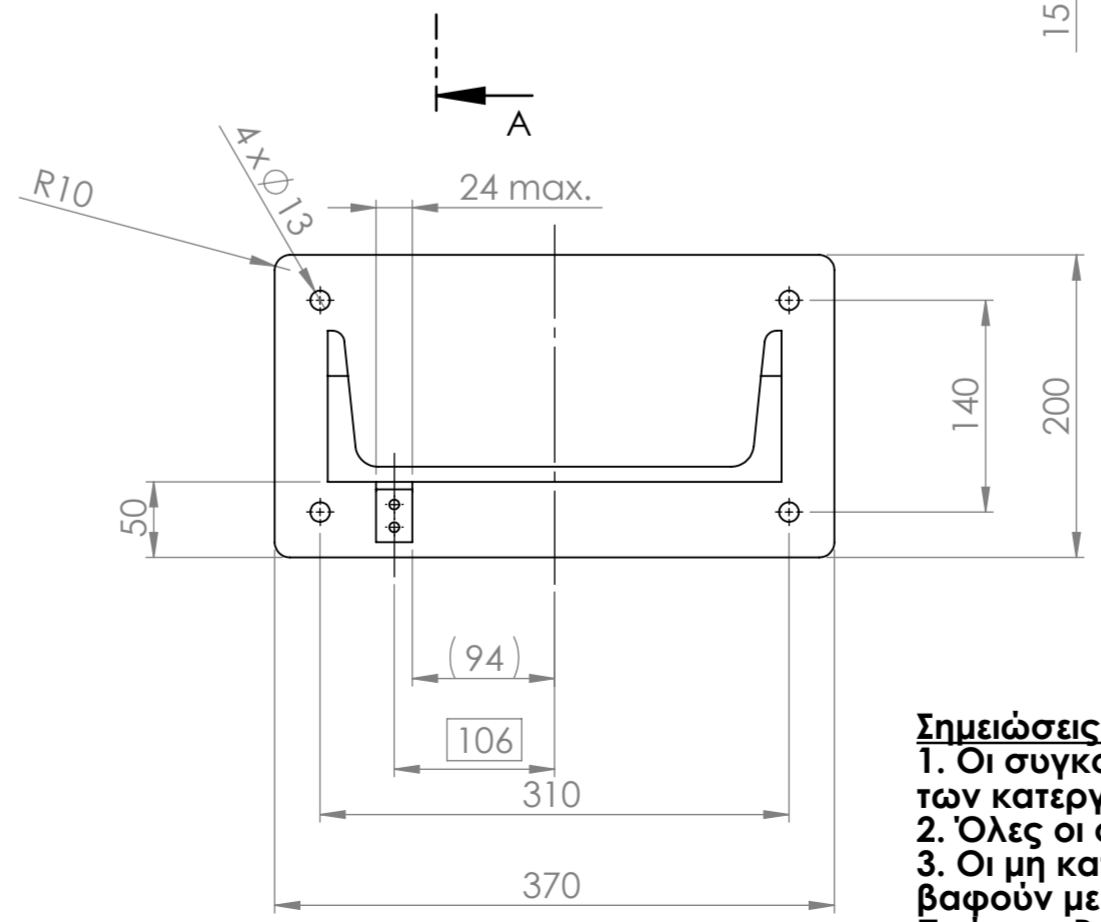
Material: S137-2
 Weight: 59.6 kg
 Scale: 1:5

Created by Μαυρίκος Στέφανος	Approved by Μπενάρδος Πανάριος	Document type Κατασκευαστικό σχέδιο	Document status Υπό έγκριση
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ		Title ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ Α	Tension - 01- 01
Paper size A2	Date of issue 24/5/2021	Sheet 1 / 1	

TOMH A-A

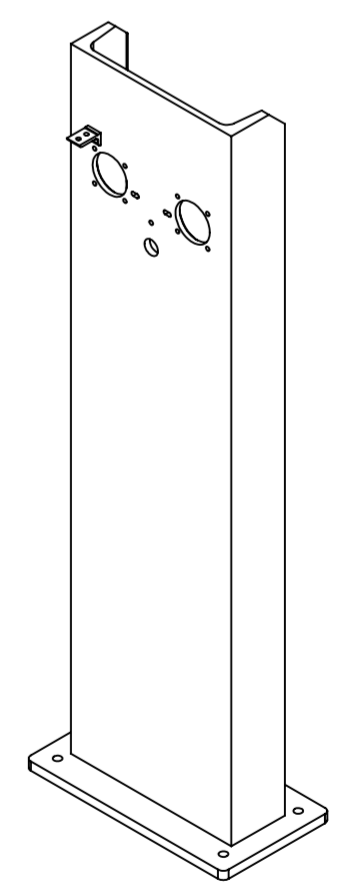


ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ Β ΚΛΙΜΑΚΑ 1:2



Σημειώσεις:
 1. Οι συγκολλήσεις να προηγηθούν των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού.
 2. Όλες οι οπές είναι διαμπερείς.
 3. Οι μη κατεργασμένες επιφάνειες να βαφούν με αντισκωριακό και χρώμα Πράσινο RAL 6018.

✓ Ra 6.3 ✓



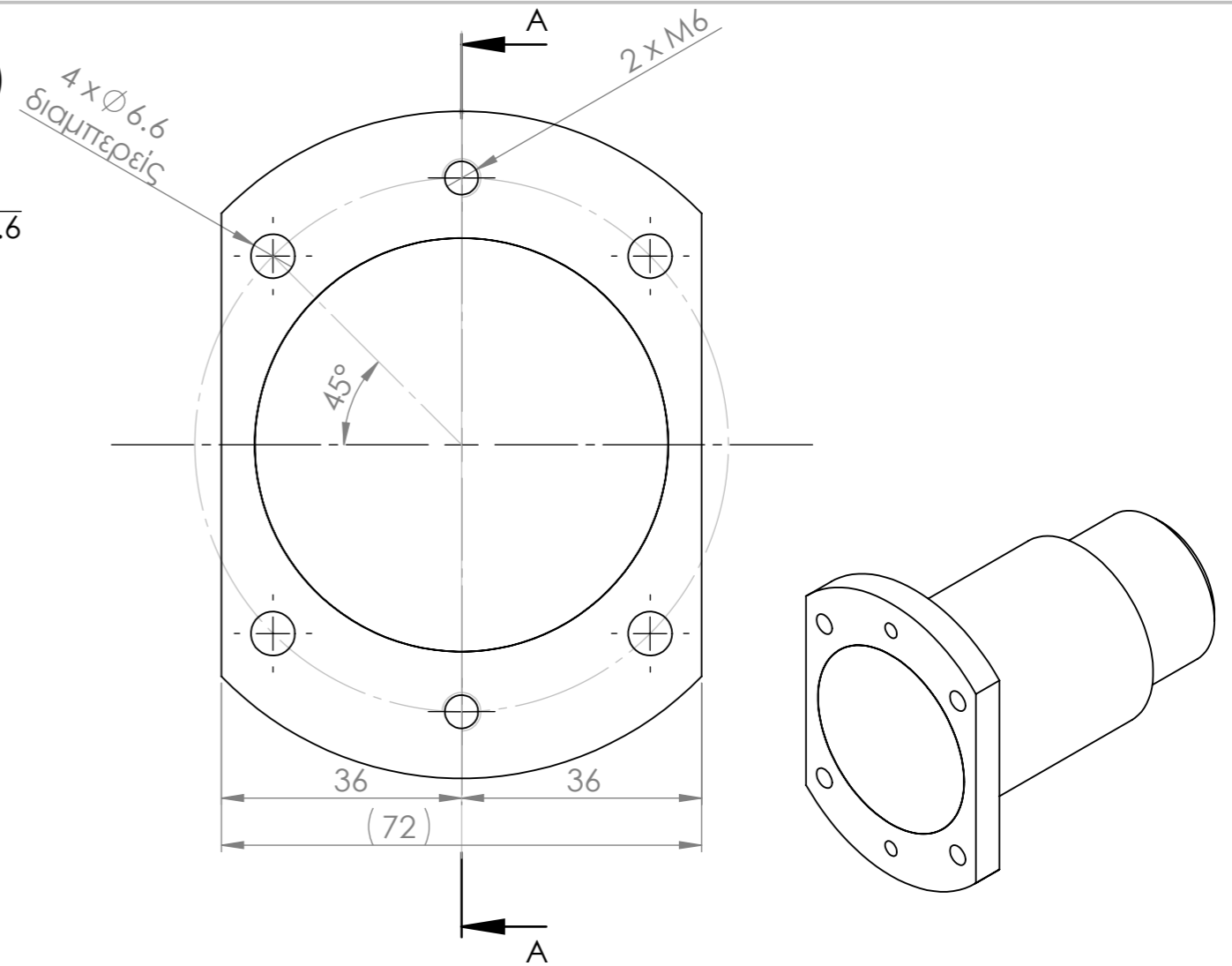
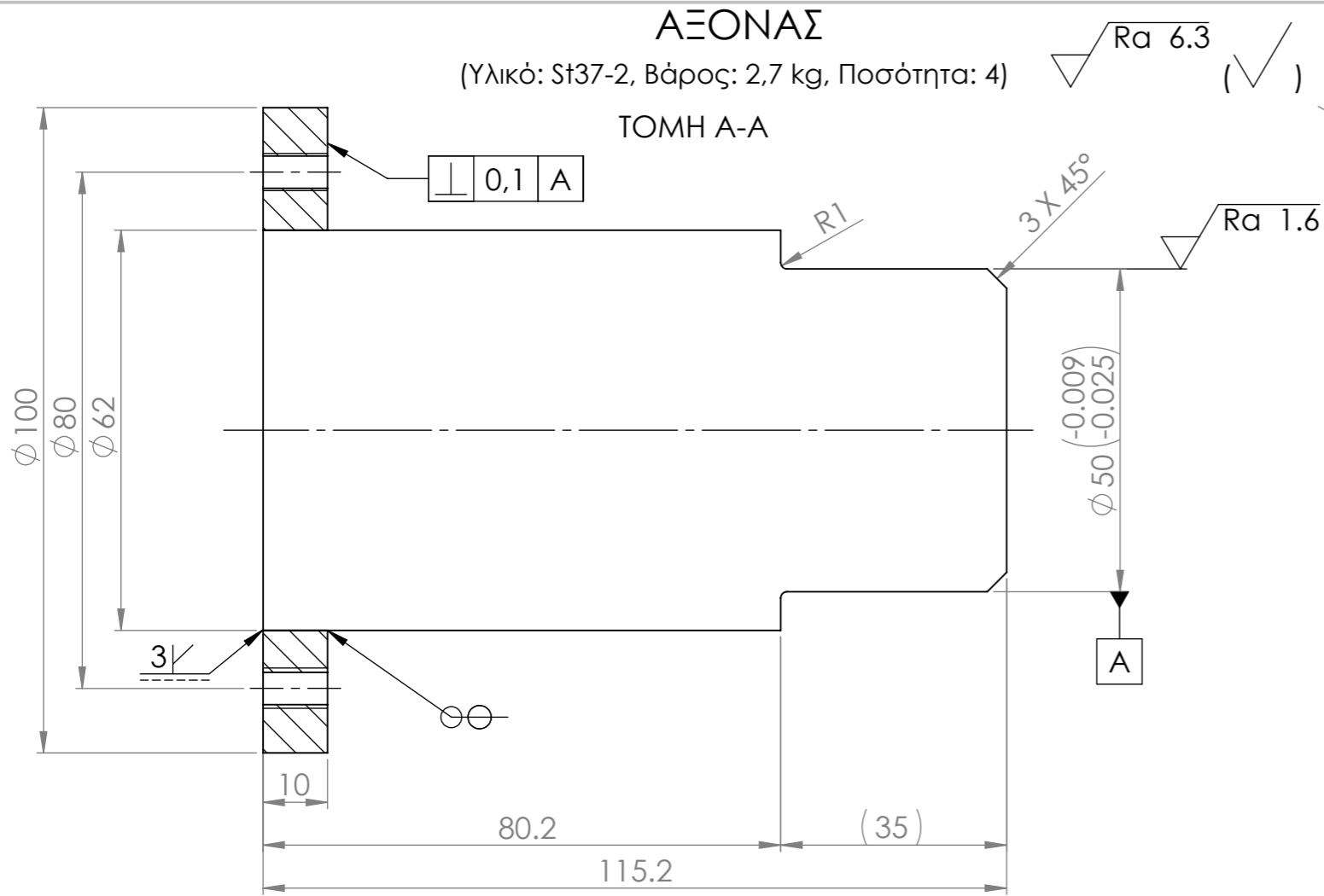
Material: S137-2
 Weight: 59.6 kg
 Scale: 1:5

Created by Μαυρίκος Στέφανος	Approved by Μπενάρδος Πανάριος	Document type Κατασκευαστικό σχέδιο	Document status Υπό έγκριση
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ		Title ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ Β	Tension - 01- 02
Paper size A2	Date of issue 24/5/2021	Sheet 1 / 1	

ΑΞΟΝΑΣ

(Υλικό: St37-2, Βάρος: 2,7 kg, Ποσότητα: 4)

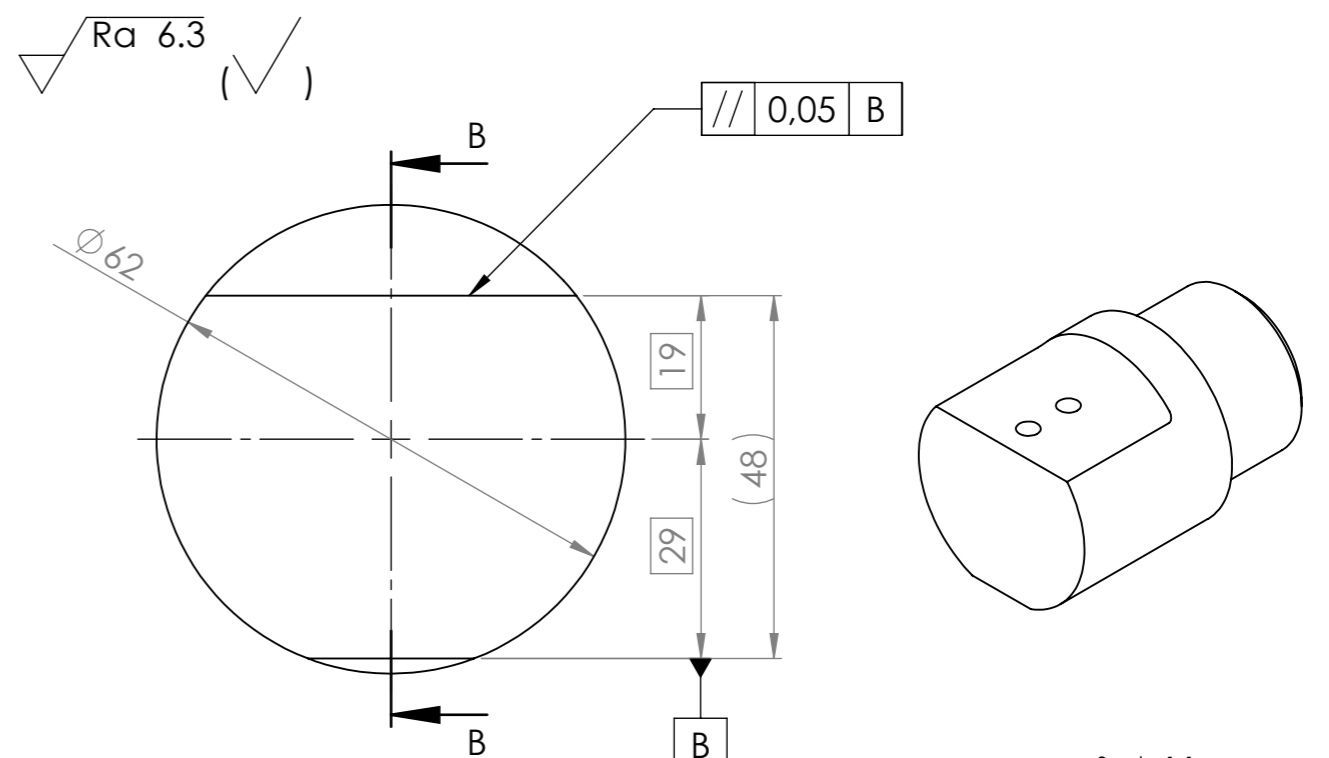
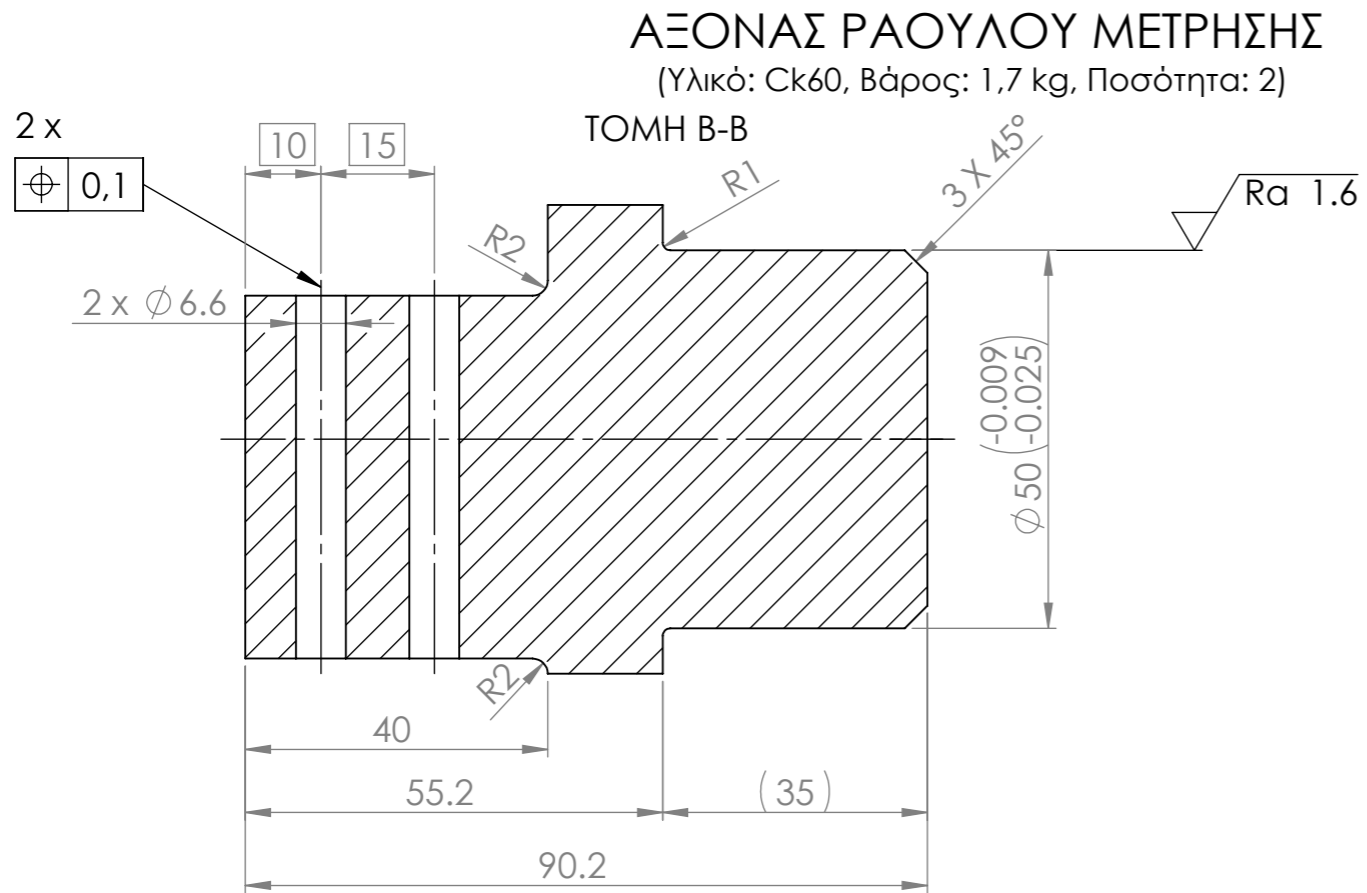
ΤΟΜΗ A-A



ΑΞΟΝΑΣ ΡΑΟΥΛΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

(Υλικό: Ck60, Βάρος: 1,7 kg, Ποσότητα: 2)

ΤΟΜΗ B-B

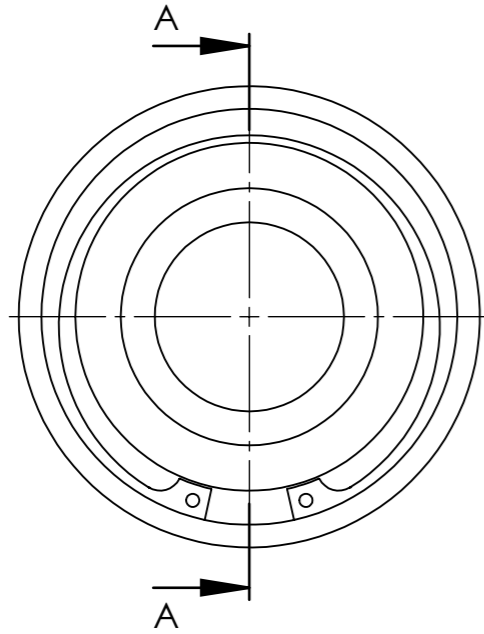


Σημείωση:
Να γίνει λοξή κοπή ("σπάσιμο") όλων των ακμών.

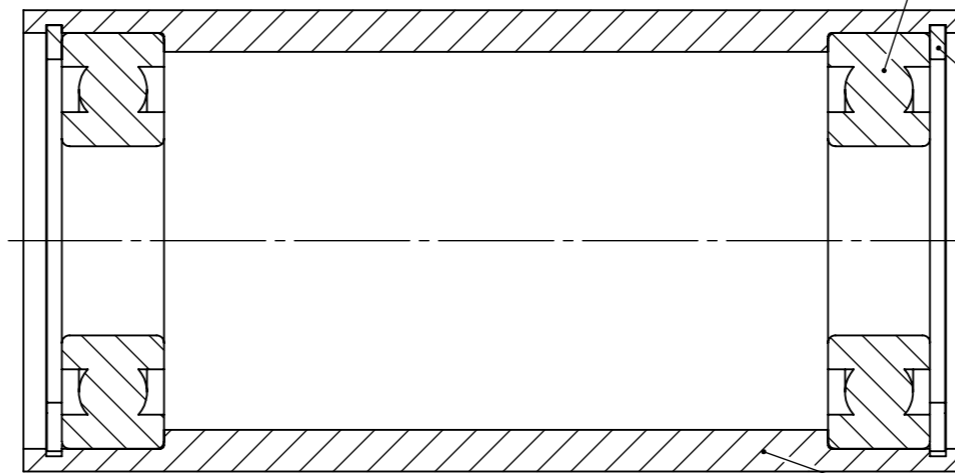
Created by Μαυρίκος Στέφανος	Approved by Μπενάρδος Πανώριος	Document type Κατασκευαστικό Σχέδιο	Document status Υπό έγκριση
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ		Title ΑΞΟΝΕΣ	Tension - 01 - 03
Paper size A3	Date of issue 4/6/2021	Sheet 1 / 1	

Scale: 1:1

ΡΑΟΥΛΟ
(Ποσότητα: 3)



ΤΟΜΗ Α-Α



ΕΔΡΑΝΟ ΚΥΛΙΣΗΣ SKF 6310 - 2RS1
ΠΟΣΟΤΗΤΑ: 2

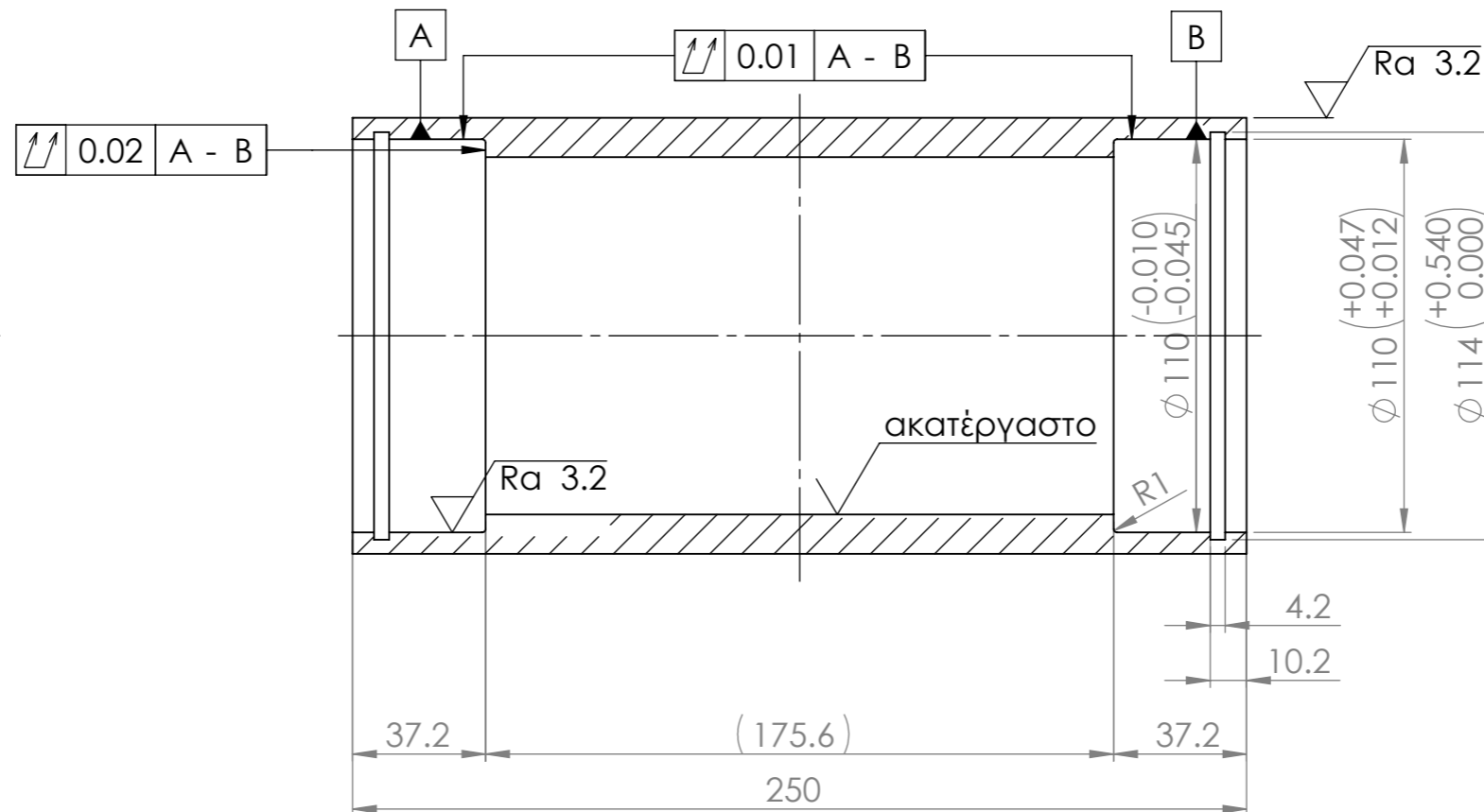
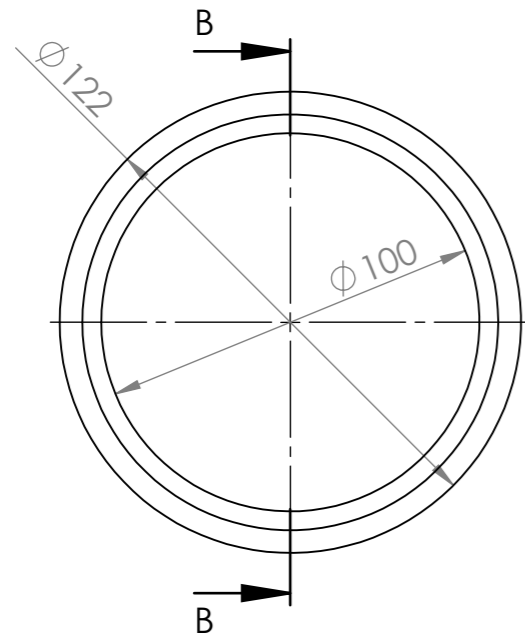
ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΟΠΗΣ
DIN 472 - 110 x 4
ΠΟΣΟΤΗΤΑ: 2

ΣΩΜΑ ΡΑΟΥΛΟΥ
ΠΟΣΟΤΗΤΑ: 1

ΣΩΜΑ ΡΑΟΥΛΟΥ
(Υλικό: AISI 304, Βάρος: 7,6 kg)

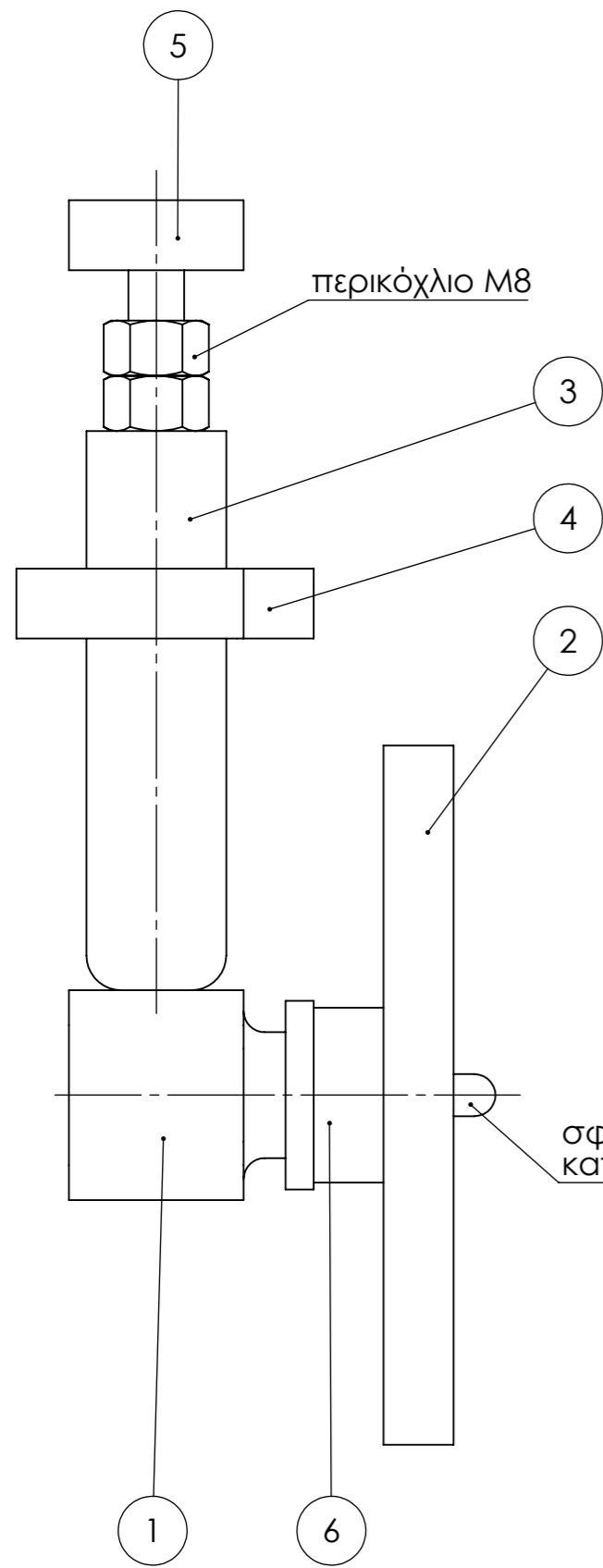
$\sqrt{Ra\ 6.3}$ (✓)

ΤΟΜΗ Β-Β

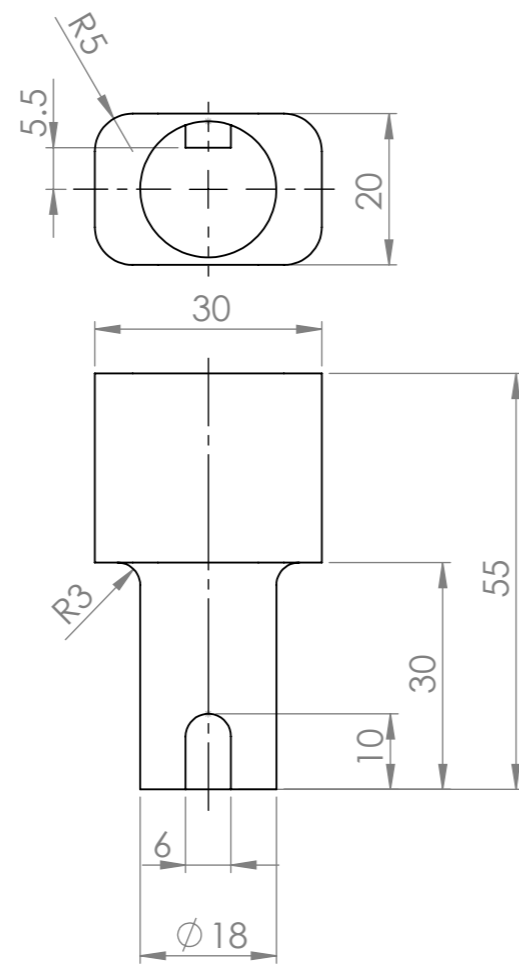


Scale: 1:2

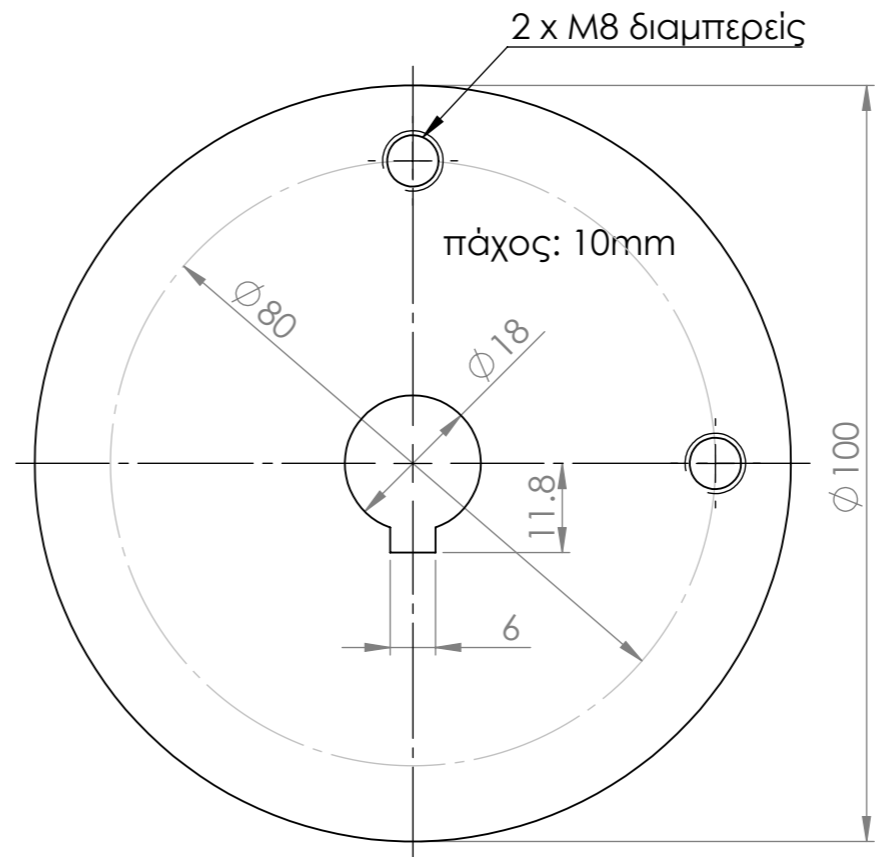
Created by Μαυρικός Στέφανος	Approved by Μπενάρδος Πανώριος	Document type Συναρμολόγημα - Κατασκευαστικό Σχέδιο	Document status Υπό έγκριση
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ		Title ΡΑΟΥΛΟ	Tension - 01 - 04
Paper size A3	Date of issue 24/5/2021	Sheet 1 / 1	



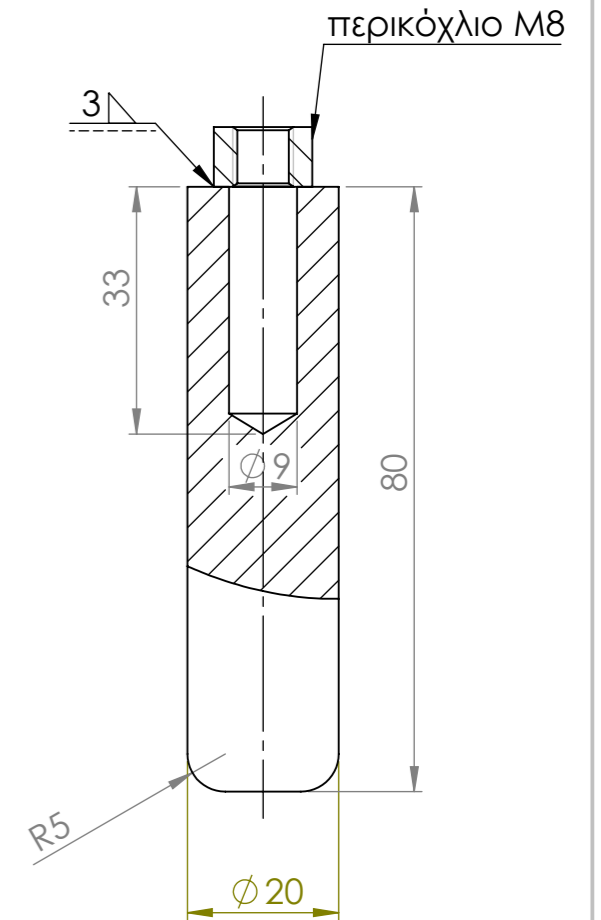
1. Ασύμμετρο κομβίο
(Υλικό: St37-2)



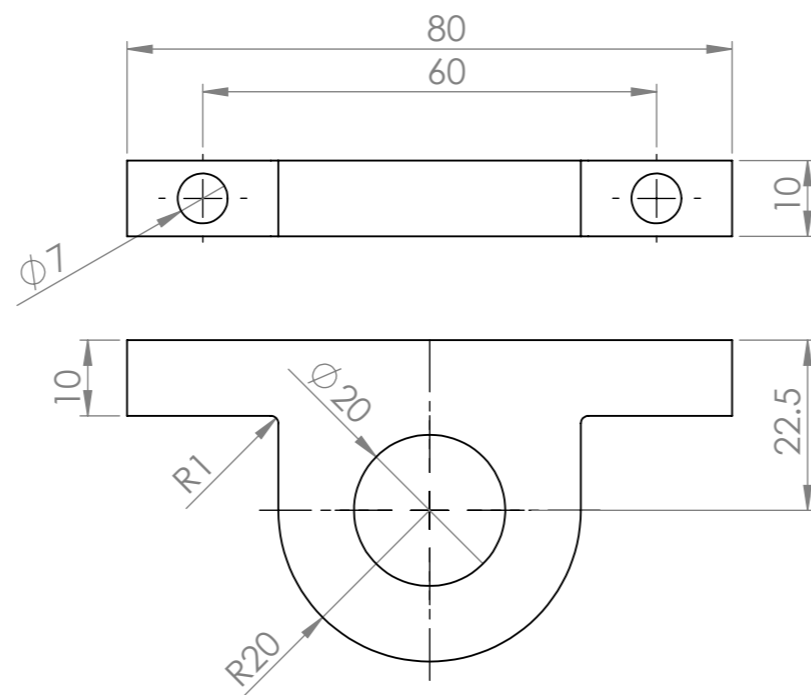
2. Δίσκος
(Υλικό: St37-2)



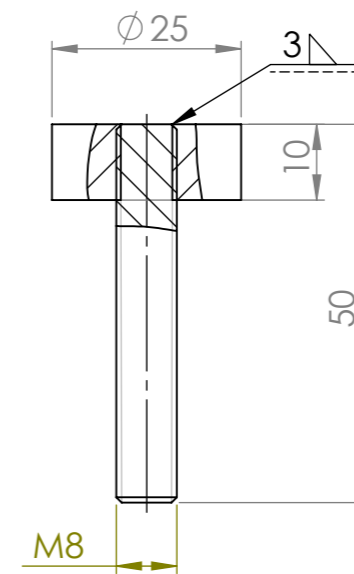
3. Στέλεχος
(Υλικό: St37-2)



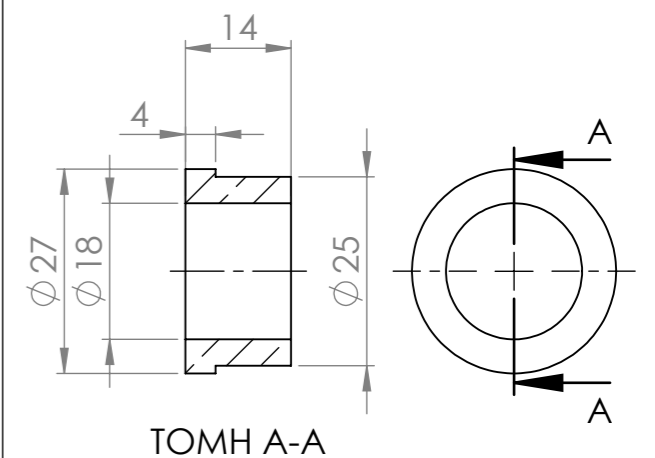
4. Στήριξη στελέχους
(Υλικό: St 37-2)



5. Πλατφόρμα στήριξης
(Υλικό: St 37-2)



6. Έδρανο
(Υλικό: Ορείχαλκος)



Scale: 1:1

Created by Μαυρίκος Στέφανος	Approved by Μπενάρδος Πανώριος	Document type Συνοπτικό Σχέδιο	Document status Υπό έγκριση
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ		Title ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΕΜΠΛΟΚΗΣ ΔΥΝΑΜΟΚΥΨΕΛΗΣ	Tension - 02
Paper size A3	Date of issue 22/7/2021	Sheet 1 / 1	