ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΕΚΤΥΠΩΤΗ

ΚΑΡΟΥΖΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: **Γεώργιος Βοσνιάκος**

Αθήνα, Μάρτιος 2015

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την μελέτη και τον σχεδιασμό ενός συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, όσον αφορά την οδήγηση, τον έλεγχο και τον προγραμματισμό των λειτουργικών του στοιχείων. Πρόκειται για τον σχεδιασμό ενός αυτόνομου συστήματος το οποίο δέχεται εντολές της γλώσσας ελέγχου εργαλειομηχανών G-Code και επιδρά σε ένα καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα 2 ½ βαθμών ελευθερίας που φέρει μηχανισμό θέρμανσης και εξώθησης πλαστικού. Η λογική της εφαρμογής και η επεξεργασία των διαφόρων δεδομένων υλοποιείται από ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές, οι οποίοι αλληλεπιδρούν με τα περιφερειακά συστήματα μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Μελετήθηκε και σχεδιάστηκε σύστημα οδήγησης ηλεκτρικών βηματικών κινητήρων με την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, αλλά και κυκλωμάτων υλοποίησης λογικής με την βοήθεια μικροελεγκτών. Αντίστοιχο σύστημα οδήγησης σχεδιάστηκε και για τον έλεγχο του μηχανισμού θέρμανσης του θερμοπλαστικού υλικού. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας εφαρμόστηκε σύστημα αυτομάτου ελέγχου διακριτού χρόνου τριών όρων, υλοποιημένο σε λογισμικό. Η λειτουργία των συστημάτων οδήγησης ρυθμίζεται με την χρήση σημάτων ελέγχου με βάση γενικευμένο πρωτόκολλο διεπαφής.

Για τον έλεγχο των συστημάτων οδήγησης μελετήθηκε και σχεδιάστηκε σύστημα ανάλυσης των εντολών κίνησης. Το σύστημα αυτό εφαρμόζει την τεχνική Ψηφιακής Διαφορικής Ανάλυσης για την παρεμβολή κινήσεων γραμμικής και κυκλικής τροχιάς και παράγει τα χρονικά σήματα που καθορίζουν την κίνηση των κινητήρων. Παράλληλα γίνεται έλεγχος της στιγμιαίας ταχύτητας της κεφαλής χρησιμοποιώντας τεχνική ρύθμισης διάρκειας της περιόδου δειγματοληψίας, ώστε η κυματομορφή της ταχύτητας να παρουσιάζει συνέχεια ως προς τον χρόνο με σκοπό την εξομάλυνση της κίνησης.

Κατά την μελέτη των ανωτέρων συστημάτων σχεδιάστηκαν τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά κυκλώματα και γράφτηκε το λογισμικό των διάφορων διεργασιών σε γλώσσα C, κυρίως για εκτέλεση από μικροελεγκτές της οικογένειας Atmel AVR ATmega.

Abstract

The concept of this master thesis is the study and design of a prototype 3D printing system, as far as the driving, control and programming of its actuators is concerned. The object of the study is an autonomous system that receives commands of the G-code machine numerical control programming language, and acts on a Cartesian robotic system with 2 ½ degrees of freedom carrying a thermoplastic heater and extruder mechanism. The system utilizes embedded microcontrollers for the implementation of logic and manipulation of data, interconnecting them with the peripheral units by means of electronic circuitry.

A stepper motor driving system was studied and designed that uses power electronics, logic circuitry and a microcontroller central unit. A similar driving system was implemented for the control of the thermoplastic heating process. The temperature control is being carried by a discrete-time PID controller, implemented by software. The overall driver functionality is managed by a set of control signals that comply with a generic interface protocol.

A movement analysis system was studied and designed for the manipulation of the driver control signals. This system utilizes the Digital Differential Analyzer interpolation technique, producing the time signals that define the motor movements for linear and cyclic trajectories. The speed of the moving printing head is controlled by means of controlling the duration of the period between subsequent executions of the interpolation algorithm, so that the speed curve demonstrates time continuity.

This paper includes the designs of all electronic circuits involved in the system, as well as the source code for the software written in C programming language, mostly for execution by microcontrollers of the product family Atmel AVR ATmega.

Αφιερωμένο στην οικογένειά μου και τους φίλους μου
Για την πολύτιμη συνδρομή και βοήθειά τους

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή ... 9

1.1 Σκοπός Εργασίας ... 9

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση ... 10

1.3 Δομή Εργασίας ... 12

2 Στοιχεία συστήματος – Επενεργητές, Αισθητήρες ... 13

2.1 Σημασία των Επενεργητών: ... 13

2.2 Επιλογή επενεργητών ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή ... 14

2.2.1 Υποσυστήματα τρισδιάστατου εκτυπωτή ... 14

2.2.2 Ρομποτικό σύστημα κίνησης της κεφαλής ... 14

2.2.3 Κεφαλή ... 15

2.3 Κινητήρες ... 16

2.3.1 Επιλογή είδους κινητήρα - Αυτόματος έλεγχος κλειστού και ανοιχτού βρόχου ... 16

2.3.2 Βηματικοί κινητήρες ... 17

2.4 Θερμαντικό στοιχείο ... 20

2.5 Μικροελεγκτής ... 21

2.5.1 Γενικά για τους μικροελεγκτές ... 21

2.5.2 Ο μικροελεγκτής Atmel AVR ATmega32 ... 22

2.6 Αισθητήρες ... 24

2.6.1 Μετρήσιμα μεγέθη του συστήματος ... 24

2.6.2 Αισθητήρες Θέσης ... 24

2.6.3 Αισθητήρες Θερμοκρασίας ... 27

3 Έλεγχος και Οδήγηση Επενεργητών ... 29

3.1 Συστήματα Οδήγησης ... 29

3.2 Έλεγχος και Οδήγηση Κινητήρων ... 30

3.2.1 Είσοδοι του συστήματος οδήγησης ... 30

3.2.2 Τροφοδότηση ενός πηνίου – Στάδιο ισχύος ... 31

3.2.3 Μέτρηση και έλεγχος ρεύματος ... 34

3.2.4 Διασύνδεση Κινητήρα ... 36

3.2.5 Αλληλουχία διεγέρσεων – Στάδιο σήματος ... 38

3.2.6 Λογική Συστήματος οδήγησης ... 39

3.2.7 Πρόγραμμα μικροΕλεγκτή ... 42

3.2.8 Ηλεκτρονικό κύκλωμα ... 48

3.3 Έλεγχος και Οδήγηση Θερμαντικού Κεφαλής ... 51

3.3.1 Στοιχεία, είσοδοι και έξοδοι του υποσυστήματος ... 51

3.3.2 Ηλεκτρονικά οδήγησης αντιστάτη ισχύος ... 52

3.3.3 Ηλεκτρονικά διασύνδεσης αισθητήρα ... 54

3.3.4 Τεχνική Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών (PWM) ... 55

3.3.5 Εφαρμογή της τεχνικής στο θερμαντικό στοιχείο ... 56

3.3.6 Παραγωγή σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών ... 58

3.3.7 Ελεγκτής ... 60

3.3.8 Πρόγραμμα ΜικροΕλεγκτή ... 63

3.3.9 Ηλεκτρονικό Κύκλωμα ... 68

4 Παραγωγή σημάτων ελέγχου 70

4.1 Μετασχηματισμός εντολών απλών κινήσεων σε σήματα ελέγχου 70

4.2 Γλώσσα G-Code 71

4.3 2 ½ Βαθμοί ελευθερίας 72

4.4 Παρεμβολή κινήσεων σε δύο άξονες 73

4.5 Παρεμβολή ευθύγραμμης κίνησης 74

4.5.1 Θεωρητική ανάλυση αλγορίθμου 74

4.5.2 Υλοποίηση αλγορίθμου παρεμβολής 75

4.5.3 Επεξεργασία εντολών ευθύγραμμης κίνησης G-Code 79

4.6 Παρεμβολή κυκλικής κίνησης 80

4.6.1 Θεωρητική ανάλυση αλγορίθμου 80

4.6.2 Υλοποίηση αλγορίθμου παρεμβολής 82

4.6.3 Συνθήκη τερματισμού αλγορίθμου 86

4.6.4 Επεξεργασία εντολών κυκλικής κίνησης G-Code 87

4.7 Κίνηση άξονα εξώθησης πλαστικού 91

4.7.1 Αποσύνδεση εντολών κίνησης G-Code από άξονα εξώθησης πλαστικού 92

4.8 Κίνηση άξονα Z 93

4.9 Προφίλ ταχύτητας 94

4.9.1 Σημασία και είδη ελέγχου προφίλ ταχύτητας 94

4.9.2 Αποσύνδεση συστήματος παρεμβολής από ρύθμιση ταχύτητας: Δυναμική ρύθμιση περιόδου ΔΤ 96

4.9.3 Υλοποίηση αλγορίθμου ελέγχου ταχύτητας 102

4.10 Υλοποίηση αλγορίθμου 103

4.10.1 Δια-πλατφορμική υλοποίηση 103

4.10.2 Αλγόριθμος επεξεργασίας εντολών G-Code 104

5 Συμπεράσματα – Σκέψεις για μελλοντική επέκταση 106

6 Βιβλιογραφία 107

Παράρτημα Α: Πρόγραμμα σε MATLAB για τις απεικονίσεις της ενότητας 4.9 109

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί και να σχεδιαστεί ένα αυτόνομο ηλεκτρονικό σύστημα οδήγησης και ελέγχου των στοιχείων ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση διαφαίνεται ως η επικρατέστερη τεχνολογία ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων και το ενδιαφέρον έχει στραφεί προς την εύρεση ολοκληρωμένων και προσιτών λύσεων για συστήματα μικρής έως μεσαίας κλίμακας.

Στο πλαίσιο αυτό αναζητούνται λύσεις επαρκείς να καλύψουν τις απαιτήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιώντας υλικό χαμηλού κόστους. Έμφαση έχει δοθεί ώστε το υπό σχεδίαση σύστημα να είναι αυτόνομο ως προς την τροφοδοσία, την λειτουργία και την εκτέλεση της λογικής που απαιτεί η λειτουργικότητά του. Ζητούμενο επίσης είναι οι εντολές που δέχεται να είναι συμβατές με μία ευρέως χρησιμοποιούμενη γλώσσα προγραμματισμού εργαλειομηχανών, την G-Code. Κατ' αυτόν τον τρόπο ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αξιοποιήσει υπάρχουσα υποδομή και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για διαφορετικά μηχανήματα, όπως εργαλειομηχανές CNC.

Η προσπάθεια μείωσης του κόστους κατασκευής έγκειται την χρήση απλών επενεργητών και την υλοποίηση με λογισμικό παρά με υλικό μεγάλου μέρους της λειτουργικότητας. Παράδειγμα αποτελεί η χρήση ελέγχου ανοιχτού βρόχου σε βηματικούς κινητήρες και η υλοποίηση ελεγκτή τριών όρων σε λογισμικό. Η εκτέλεση της λογικής έχει ανατεθεί ως επί το πλείστον σε μικροελεγκτές γενικής χρήσης και χαμηλού κόστους.

Η σχεδιαστική επιλογή χρήσης μικροελεγκτών χαμηλού κόστους οδήγησε στην υλοποίηση αριθμητικών μεθόδων για την ανάλυση των εντολών κινήσεως του συστήματος. Ζητούμενο υπήρξε η ταχύτητα εκτέλεσης και η ακρίβεια, καθώς και η μέγιστη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του υλικού, χωρίς την εφαρμογή χρονικά και επεξεργαστικά ακριβών αλγορίθμων κίνησης.

Τέλος, η εργασία αυτή συνοδεύει την αντίστοιχη μελέτη που εκπονείται από τον συμφοιτητή Αναγνωστάκη Θεολόγο και αφορά τα μηχανολογικά στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης που μελετάται.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τα αρχικά ερεθίσματα για τους τρισδιάστατους εκτυπωτές και την τεχνολογία που τους διέπει αντλήθηκαν από πολυπληθή διεθνή άρθρα και διαδικτυακά φόρα. Στην συνέχεια παρατίθενται κάποια από αυτά που μελετήθηκαν στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας εργασίας, συνοδευόμενα από μία σύντομη περιγραφή:

Στις αναφορές [1], [2] γίνεται ανάλυση της ιδέας του RepRap και της χρήσης υλικού και λογισμικού ανοιχτής αρχιτεκτονικής για τρισδιάστατους εκτυπωτές. Στο άρθρο [3] βλέπουμε τον σχεδιασμό ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή έκχυσης πολυμερούς υψηλής ακριβείας χαμηλού έως μεσαίου κόστους. Χρησιμοποιείται έκχυση σταγονιδίων υλικού σε υψηλές συχνότητες και διαμόρφωση του πλαστικού με την χρήση υπεριώδους φωτός. Μία λύση παρεμφερής με την παρούσα εργασία μελετάται στην αναφορά [4], όπου γίνεται σχεδίαση συστήματος οδήγησης και ελέγχου τρισδιάστατου εκτυπωτή με την χρήση μικροελεγκτή ARM και βηματικών κινητήρων. Για πιο μεγάλης κλίμακας, βιομηχανικές εφαρμογές βλέπουμε στο άρθρο [5] μια προσέγγιση κατασκευής τρισδιάστατου εκτυπωτή σε ρομποτικό σύστημα γέφυρας. Γίνεται επίσης σχεδιασμός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου για την σταθεροποίηση του οδηγούμενου συστήματος. Τα βασικά χαρακτηριστικά, ο τρόπος λειτουργίας και η επίδραση των τρισδιάστατων εκτυπωτών στον χώρο της πρωτοτυποποίησης γίνεται στην αναφορά [6]. Στο άρθρο [7] παρουσιάζεται η μελέτη και ο σχεδιασμός ακροφυσίου για τρισδιάστατους εκτυπωτές με τεχνολογία αποφυγής φαινομένου στάλαξης. Στην παραπομπή υπ' αριθμόν [8] βρίσκει κανείς μία προσέγγιση διπλής λειτουργικότητας: Τρισδιάστατος εκτυπωτής και εργαλειομηχανή τύπου φρέζας χαμηλού κόστους. Αναλύεται ο σχεδιασμός και η μελέτη του συνδυασμένου συστήματος.

Στο άρθρο [9] παρουσιάζεται το ιστορικό της ανάπτυξης της τεχνολογίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών και των τεχνικών που αυτοί υλοποιούν, ενώ μία ενημερωμένη συλλογή πληροφοριών και τεχνολογιών για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή μπορεί να βρεθεί στην αναφορά [10]. Στην αναφορά [11] γίνεται ανάλυση της τεχνολογίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών όσον αφορά τα υλικά, την λειτουργικότητα και το λογισμικό, ενώ το άρθρο [12] επικεντρώνεται περισσότερο στην μελέτη και παρουσίαση των τεχνολογιών της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στην παραπομπή [13] συναντάμε τα αποτελέσματα έρευνας για τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στον τομέα.

Στην αναφορά [14] γίνεται σχεδιασμός ενός συστήματος ελέγχου εργαλειομηχανών CNC με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας και της αποδοτικότητας. Η μελέτη έχει βασιστεί στις αρχές του σχεδιασμού ανοιχτής αρχιτεκτονικής. Στο [15] ο αναγνώστης συναντάει ένα σύστημα ελέγχου δύο βαθμών ελευθερίας με διασύνδεση των αξόνων και έλεγχο κλειστού βρόχου για βελτίωση της ποιότητας καμπύλων και ειδικών τροχιών. Παρόμοιο ζητούμενο συναντάται και στην παραπομπή [16], όπου μελετώνται συστήματα ελέγχου και η απόδοσή τους σε καμπύλες τροχιές. Γενικότερες πληροφορίες για τις διάφορες τεχνικές ελέγχου εργαλειομηχανών των τελευταίων τριών δεκαετιών βρίσκει κανείς στην αναφορά [17]. Γίνεται επίσης αναφορά και ανάλυση των διαφόρων τεχνικών οδήγησης. Τέλος, στο άρθρο [18] παρουσιάζεται μελέτη σχετικά με την τεχνολογία ανοιχτής αρχιτεκτονικής και την επιρροή της στην πληροφορική. Γίνεται επίσης συσχέτιση με την τεχνολογία οδήγησης εργαλειομηχανών και ρομποτικών συστημάτων

Πέρα από την σχετική με τρισδιάστατους εκτυπωτές και εργαλειομηχανές βιβλιογραφία, η μελέτη και ο σχεδιασμός του όλου συστήματος βασίστηκε σε γενικές αρχές που πηγάζουν από επιστημονικά συγγράμματα. Για τα συστήματα οδήγησης των διαφόρων επενεργητών χρειάστηκαν βασικές γνώσεις ηλεκτρονικής και ηλεκτρικών σημάτων οι οποίες αντλήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τα βιβλία [19], [20]. Στοιχεία για τον τρόπο λειτουργίας των βηματικών κινητήρων αναζητήθηκαν σε διάφορες σχετικές ιστοσελίδες και στο βιβλίο [21]. Ο προγραμματισμός έγινε σε γλώσσα C για την

οποία ιδιαίτερα χρήσιμο φάνηκαν τα βιβλία [22] και [23], ενώ χρειάστηκε εκτενής μελέτη του φύλλου δεδομένων για τον μικροελεγκτή Atmel AVR ATmega32 [24]. Το βιβλίο [25] συνεισέφερε σε χρήσιμες πληροφορίες για την δομή και τον τρόπο λειτουργίας των μικροελεγκτών γενικότερα. Για τα συστήματα ελέγχου πληροφορίες αντλήθηκαν από τα συγγράμματα [26], [27].

Το βιβλίο [28] βοήθησε σημαντικά την κατανόηση της γλώσσας G-Code. Για την παρεμβολή των κινήσεων μελετήθηκαν διάφορα συγγράμματα και επιστημονικά άρθρα, κάποια από τα οποία είναι τα: [29], [30], [31]. Το τελευταίο ειδικά αποτέλεσε σημαντική πηγή πληροφοριών για τις μεθόδους ελέγχου της ταχύτητας στις εργαλειομηχανές, μάλιστα εικόνα του χρησιμοποιήθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

1.3 Δομή Εργασίας

Η δομή που ακολουθήθηκε κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας ακολουθεί τα επίπεδα αφαίρεσης της λειτουργικότητας του συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, ξεκινώντας από το πιο χαμηλό, που είναι το υλικό του συστήματος, προς το πιο υψηλό, που είναι οι διάφορες κινήσεις που επιτελεί.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το υλικό που απαρτίζει ένα σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό περιλαμβάνει τους διάφορους επενεργητές και αισθητήρες. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η δομή και ο τρόπος λειτουργίας και ελέγχου των κινητήρων, του θερμαντικού στοιχείου, του μικροελεγκτή, του αισθητήρα θερμοκρασίας και των αισθητήρων θέσης.

Στο κεφάλαιο 3 μελετάται και σχεδιάζεται σύστημα οδήγησης και ελέγχου των επενεργητών του συστήματος. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που συμμετέχουν στην διαδικασία οδήγησης και τον πηγαίο κώδικα εκτέλεσης των διάφορων αλγορίθμων. Παράλληλα αναλύεται η θεωρία πίσω από τις διάφορες σχεδιαστικές επιλογές και παρουσιάζεται η λογική με την οποία πραγματοποιήθηκαν.

Το κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει της έννοιες ανώτερου επιπέδου, που είναι οι διάφορες εντολές κίνησης που αποτελούν είσοδο στον εκτυπωτή. Η μελέτη είναι πλήρως αποσυνδεδεμένη από την τεχνολογία οδήγησης των επενεργητών και περιορίζεται στην παραγωγή των σημάτων που ελέγχουν τα συστήματα οδήγησης. Μελετάται και σχεδιάζεται σύστημα παρεμβολής ευθύγραμμης και κυκλικής κίνησης με υλοποίηση συστήματος Διακριτού Διαφορικού Αναλυτή, ενώ παρουσιάζεται και ο αντίστοιχος πηγαίος κώδικας. Παράλληλα, μελετάται η κίνηση του άξονα εξώθησης πλαστικού και του κατακόρυφου, αποσυνδεδεμένου από τους υπόλοιπους, άξονα Z. Τέλος αναλύεται και σχεδιάζεται μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας της κεφαλής με σκοπό να επιτευχθεί ομαλοποίησης των ασκούμενων στην κατασκευή δυνάμεων. Ο κώδικάς εκτέλεσης των διάφορων αλγορίθμων σε αυτό το κεφάλαιο έχει διατηρηθεί ανεξάρτητος από συγκεκριμένα πλατφόρμα μικροελεγκτή με σκοπό της ευρύτητα της υλοποίησής του

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια ανασκόπηση των επιτευγμάτων της εργασίας και διατυπώνονται ιδέες για μελλοντική επέκταση και βελτίωση

2 Στοιχεία συστήματος – Επενεργητές, Αισθητήρες

2.1 Σημασία των Επενεργητών:

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γνωρίσουμε το κατώτερο επίπεδο αφαίρεσης του συστήματός μας, που είναι το υλικό του συστήματος. Τα μέρη του υλικού του συστήματος που ενδιαφέρουν από μεριάς ελέγχου και οδήγησης είναι οι **επενεργητές** του.

Επενεργητές ενός συστήματος ονομάζουμε τα στοιχεία εκείνα τα οποία έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν την κατάστασή του. Πρόκειται φυσικά για λειτουργικά και όχι δομικά στοιχεία της κατασκευής.

Το γεγονός ότι οι επενεργητές είναι τα μόνα στοιχεία που επηρεάζουν την κατάσταση του συστήματος υπαγορεύει ότι όλη η ροή ελέγχου προς το σύστημα θα περάσει αναγκαστικά από αυτούς. Επομένως είναι τα στοιχεία που ενδιαφέρουν τον μηχανικό που σχεδιάζει τον έλεγχο του συστήματος.

Παράλληλα, το γεγονός ότι οι επενεργητές αποτελούν τμήμα του φυσικού υλικού (Hardware) του συστήματος, σημαίνει ότι οι δυνατότητές τους και η ακρίβειά τους είναι κατασκευαστικές σταθερές. Αυτό, σε συνδυασμό με την ακρίβεια των αισθητήριων οργάνων που διαθέτει καθορίζει τα όρια λειτουργίας της μηχανής και τον δυνατό βαθμό ελέγχου της.

Για τους λόγους αυτούς η επιλογή των επενεργητών είναι ίσως το πιο σημαντικό στάδιο κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος και ο βασικός παράγοντας χαρακτηρισμού του συστήματος σχετικά με τις δυνατότητές του

2.2 Επιλογή επενεργητών ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή

2.2.1 Υποσυστήματα τρισδιάστατου εκτυπωτή

Ας μελετήσουμε ποιοι είναι οι απαραίτητοι επενεργητές σε ένα σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης:

Ένα σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης ουσιαστικά μπορεί να διαχωριστεί σε δύο ανεξάρτητα υποσυστήματα:

- Ένα ρομποτικό σύστημα που έχει την δυνατότητα να τοποθετεί την κεφαλή σε οποιοδήποτε σημείο του τριών διαστάσεων χώρου εργασίας του, αλλά με συγκεκριμένο σταθερό προσανατολισμό.
- Την κεφαλή, η οποία είναι υπεύθυνη να θερμαίνει το θερμοπλαστικό υλικό και να το εξωθεί

2.2.2 Ρομποτικό σύστημα κίνησης της κεφαλής

Το ρομποτικό σύστημα κίνησης της κεφαλής πρέπει να πληροί τις εξής προδιαγραφές:

- Δυνατότητα τοποθέτησης σε όλες τις δυνατές θέσεις εντός του χώρου εργασίας
- Διατήρηση σταθερού προσανατολισμού της κεφαλής κατά την κίνηση

Επίσης, τα παρακάτω χαρακτηριστικά αποτελούν κριτήρια για την επιλογή του καταλληλότερου

- Διατήρηση χώρου εργασίας ελεύθερου από κινούμενα μέρη για την κατασκευή του δοκιμίου
- Μικρός όγκος υλικού επιπλέον του χώρου εργασίας
- Χώρος εργασίας σε σχήμα παραλληλεπιπέδου για μέγιστη εκμετάλλευση
- Όσο το δυνατόν λιγότεροι βαθμοί ελευθερίας (οι ελάχιστοι για προσπέλαση του πλήρους χώρου εργασίας ανεξάρτητα από προσανατολισμό είναι τρείς)
- Στιβαρότητα
- Απλότητα κατασκευής
- Ευκολία ελέγχου

Μελετώντας τα παραπάνω ζητούμενα καταλήγουμε στην επιλογή του **καρτεσιανού ρομπότ**. Με την επιλογή αυτή έχουμε τα εξής πλεονεκτήματα:

- Χρήση τριών (ελάχιστων) γραμμικών βαθμών ελευθερίας
- Ταύτιση των βαθμών ελευθερίας με τις διαστάσεις X,Y,Z: Ευκολία στον έλεγχο
- Ελαχιστοποίηση επιπλέον όγκου υλικού
- Απλή και φθηνή κατασκευή
- Μεγιστοποίηση ωφέλιμου χώρου εργασίας

Συνεπώς οι επενεργητές που θα χρειαστούμε είναι οι τρείς γραμμικοί βαθμοί ελευθερίας στους οποίους πρέπει αν εφαρμοστεί **έλεγχος θέσης**.
Για τους γραμμικούς επενεργητές υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής της κυκλικής κίνησης σε γραμμική με την **χρήση κοχλιών**.

Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **κινητήρες** ως επενεργητές.

2.2.3 Κεφαλή

2.2.3.1 Υποσυστήματα κεφαλής

Το δεύτερο υποσύστημα που απαρτίζει τον τρισδιάστατο εκτυπωτή είναι η κεφαλή. Η κεφαλή είναι το **Στοιχείο Δράσης** του ρομποτικού μηχανισμού μας και είναι ουσιαστικά αυτό που αλληλοεπιδρά με τον εξωτερικό κόσμο.

Η κεφαλή είναι υπεύθυνη για την προετοιμασία του θερμοπλαστικού υλικού και την εξώθησή του επάνω στην τράπεζα εκτύπωσης. Αποτελείται και αυτή από δύο υποσυστήματα:

- Σύστημα θέρμανσης του θερμοπλαστικού υλικού
- Σύστημα οδήγησης και εξώθησης του θερμοπλαστικού υλικού

2.2.3.2 Σύστημα θέρμανσης θερμοπλαστικού υλικού

Η ιδιότητα του θερμοπλαστικού υλικού να σχηματίζει συσσωματώματα εκφράζεται όταν αυτό βρίσκεται σε συγκεκριμένη περιοχή θερμοκρασιών.

Στην περίπτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης η απαίτηση δεν είναι απλώς η νεοεναποθείσα ποσότητα υλικού να συσσωματωθεί με το προ υπάρχον υλικό επάνω στην τράπεζα. Είναι επίσης απαραίτητο η νέα ποσότητα υλικού να διατηρήσει το σχήμα και τον όγκο της.

Εφόσον πρέπει να πληρούνται οι ως άνω δύο απαιτήσεις, η θερμοκρασία του υλικού κατά την εξώθησή του πρέπει να είναι **συγκεκριμένη**, **ακριβής** και **σταθερή**.
Επιπλέον, η παροχή του υλικού δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να υποτεθεί σταθερή. Μάλιστα, η ροή του πλαστικού διακυμαίνεται συνεχώς σε όλο το φάσμα από την πλήρη ακινησία ως την μέγιστη παροχή που προβλέπει η κατασκευή μας.

Συνεπώς χρειαζόμαστε ένα σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας του **Θερμού Άκρου** της κεφαλής, του τελικού τμήματος εξώθησης του θερμοπλαστικού.

Το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας θα πρέπει να περιλαμβάνει έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και έναν επενεργητή – **θερμαντικό στοιχείο**

2.2.3.3 Σύστημα οδήγησης και εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού

Το σύστημα εξώθησης του θερμοπλαστικού υλικού είναι υπεύθυνο για την οδήγηση της δέσμης πλαστικού διαμέσου του θερμού άκρου της κεφαλής προς την τράπεζα εναπόθεσης.

Η ροή του πλαστικού έξω από το θερμό άκρο πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να εξασφαλίζεται ότι επάνω στην τράπεζα εναποτίθεται μία δέσμη υλικού που εμφανίζει σταθερή γεωμετρία καθώς η κεφαλή κινείται. Ισοδύναμα, ο στοιχειώδης όγκος πλαστικού που εναποτίθεται στην τράπεζα ανά μονάδα μετατόπισης της κεφαλής πρέπει να είναι σταθερός.

Για αν επιτευχθεί αυτό, η κίνηση του πλαστικού πρέπει να ελέγχεται, λαμβάνοντας υπόψιν την κίνηση της κεφαλής. Ο επενεργητής του συστήματος αυτού θα πρέπει να είναι ένας **κινητήρας.**

2.3 Κινητήρες

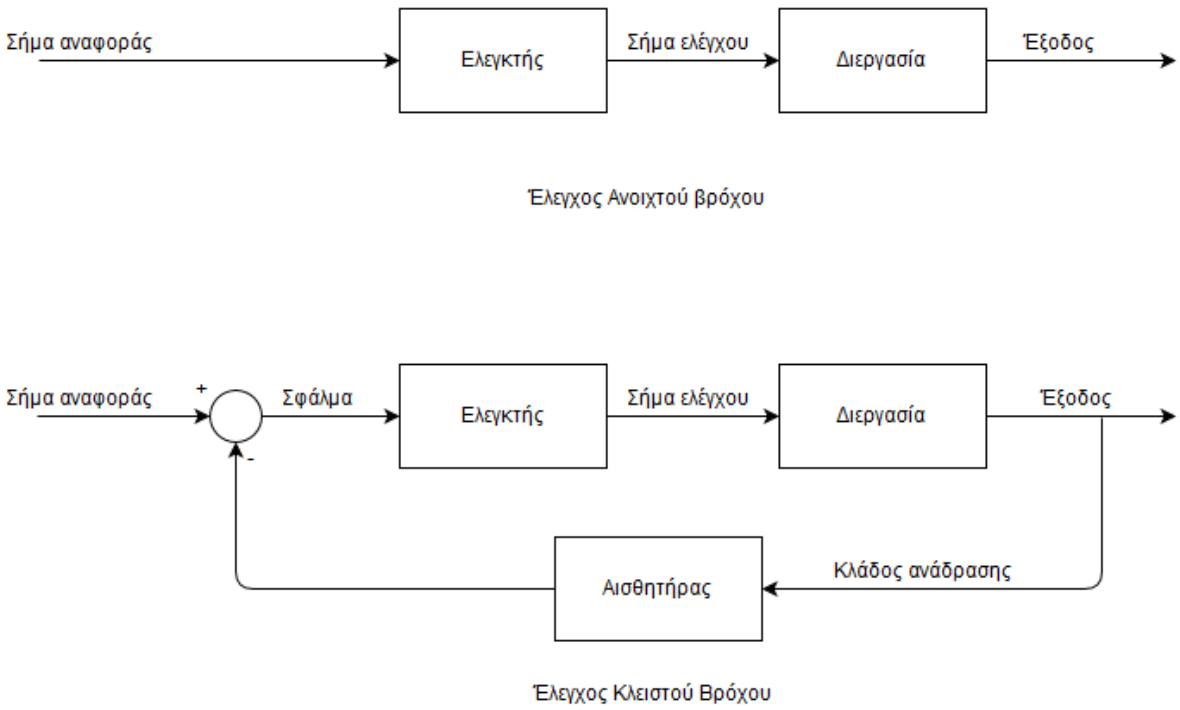
2.3.1 Επιλογή είδους κινητήρα - Αυτόματος έλεγχος κλειστού και ανοιχτού βρόχου

Όπως είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους ο βασικός επενεργητής του συστήματός μας είναι ο κινητήρας. Επίσης, τόσο στο καρτεσιανό ρομποτικό μηχανισμό όσο και στο σύστημα εξώθησης του θερμοπλαστικού υλικού, στους κινητήρες πρέπει να εφαρμοστεί **έλεγχος θέσης**.

Το κλασικό μοντέλο σχεδίασης ενός συστήματος ελέγχου είναι ο συνδυασμός ενός επενεργητή και ενός αισθητήριου συστήματος. Ο αισθητήρας μας παρέχει μία μέτρηση της κατάστασης του υπό ελέγχου συστήματος. Η πληροφορία αυτή αφαιρείται από την επιθυμητή κατάσταση του συστήματος και προκύπτει το **σφάλμα**. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **αρνητική ανάδραση**. Το σύστημα ελέγχου μας, ή αλλιώς, **ελεγκτής**, λαμβάνει ως είσοδο το σφάλμα. Στην συνέχεια, αφού πραγματοποιήσει υπολογισμούς με τα δεδομένα που έχει, παράγει μία **έξοδο**. Η έξοδος αυτή οδηγεί τον επενεργητή μας. Ο ελεγκτής μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι η πραγματική κατάσταση του υπό ελέγχου συστήματος θα συγκλίνει στην επιθυμητή. Το σύστημα ελέγχου που περιγράψαμε ονομάζεται **έλεγχος κλειστού βρόχου.**

Υπάρχουν κάποια συστήματα τα οποία δέχονται σαφείς εντολές από τον ελεγκτή που επιδρούν άμεσα στην κατάσταση που θέλουμε να ελέγξουμε και είναι εκ κατασκευής ευσταθή. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούμε να αποφύγουμε την χρήση ανάδρασης και αισθητήρα στον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου. Αυτόν τον σχεδιασμό τον ονομάζουμε **έλεγχο ανοιχτού βρόχου**

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τα διαγράμματα ροής για τις δύο μορφές ελέγχου που περιγράψαμε:



Σχήμα 2.1: Συστήματα ελέγχου ανοιχτού και κλειστού βρόχου

Ένα παράδειγμα κινητήρων στους οποίους μπορούμε αν ελέγξουμε την θέση χρησιμοποιώντας έλεγχο ανοιχτού βρόχου είναι οι **Βηματικοί κινητήρες.** Χρησιμοποιώντας αυτό το υβριδικό είδος

κινητήρων μπορούμε να αποφύγουμε την χρήση αισθητήρων θέσης στους επενεργητές μας και έτσι να απλοποιήσουμε τα συστήματα ελέγχου τους. Προϋπόθεση αποτελεί η ισχύς του κινητήρα να υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις της εφαρμογής ώστε να μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι ο κινητήρας επιτυγχάνει να κινηθεί όταν του δίνουμε τις αντίστοιχες εντολές.

2.3.2 Βηματικοί κινητήρες

Οι βηματικοί κινητήρες είναι ένα υβριδικό είδος κινητήρα το οποίο δεν μπορεί να καταταχθεί γνησίως σε καμία από τις δύο κατηγορίες των κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος ή Εναλλασσόμενου Ρεύματος. Ωστόσο χαρακτηρίζεται ως ένας από τους κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψύκτρες

Πρόκειται για ένα **στοιχείο θέσης**, αφού η είσοδος που του δίνουμε καθορίζει την γωνιακή θέση του ρότορά του και όχι την ταχύτητα ή επιτάχυνση του. Συνήθως αποτελείται από έναν στάτη με τυλίγματα και έναν ρότορα ο οποίος φέρει έναν οδοντωτό σιδηρομαγνητικό δίσκο ή μόνιμους μαγνήτες.

Τα τυλίγματα του στάτη είναι συνήθως δύο και ονομάζονται **φάσεις**. Υπάρχουν και βηματικοί κινητήρες με περισσότερες φάσεις για εφαρμογές ευαίσθητες στους κραδασμούς. Η κάθε φάση τροφοδοτείται με Συνεχές Ρεύμα.

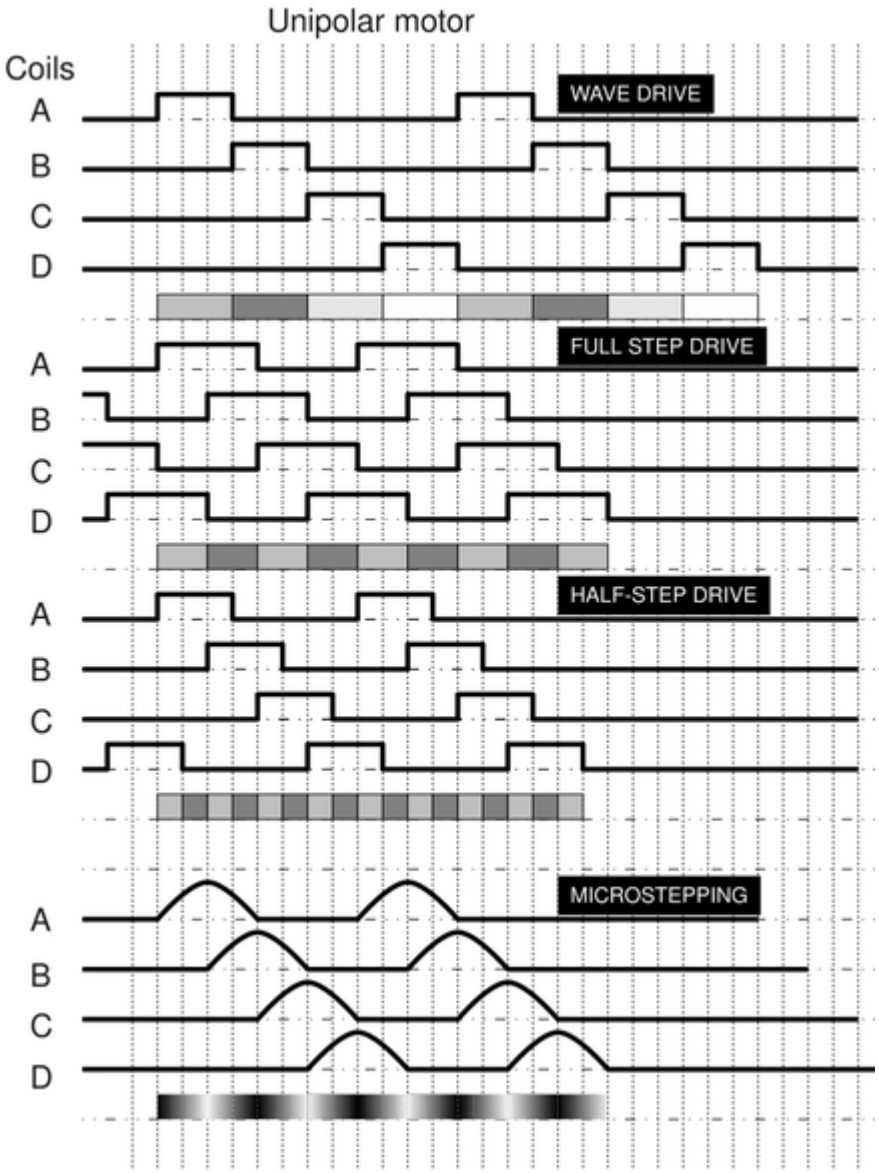
Η δομή του ρότορα του επιτρέπει να παίρνει μόνο συγκεκριμένες θέσεις κατά την περιστροφή του. Οι θέσεις αυτές ισαπέχουν μεταξύ τους κατά μία γωνία που είναι κατασκευαστική σταθερά του κινητήρα και ονομάζεται **βήμα.**

Εφαρμόζοντας στις φάσεις του κινητήρα αλληλουχίες παλμών με συγκεκριμένες πολικότητες μπορούμε να μετακινούμε τον ρότορα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση κατά ένα βήμα την φορά. Εάν η τροφοδοσία των φάσεων παραμείνει σταθερή, τότε ο ρότορας παραμένει σταθερός σε μία θέση, εξ ου και ο χαρακτηρισμός του ως στοιχείο θέσης.

Ανάλογα με τον τρόπο που διεγείρουμε διαδοχικά τις φάσεις του κινητήρα, υπάρχουν οι εξής τρόποι οδήγησης:

- Οδήγηση κύματος (μία φάση τροφοδοτείται ανά δεδομένη χρονική στιγμή)
- Οδήγηση πλήρους βήματος (δύο φάσεις τροφοδοτούνται ανά δεδομένη χρονική στιγμή)
- Οδήγηση μισού βήματος (μία ή δύο φάσεις τροφοδοτούνται ανά δεδομένη χρονική στιγμή)
- Οδήγηση μικρο-βήματος (ημιτονοειδής διέγερση)

Ας δούμε σχηματικά τις αλληλουχίες παλμών για τα παραπάνω είδη οδήγησης:
Σημείωση: η τροφοδότηση των δύο φάσεων με τάση ορθής πολικότητας ονομάζεται καταστάσεις A και B, ενώ η τροφοδότησή τους με αντίθετη πολικότητα C και D αντίστοιχα



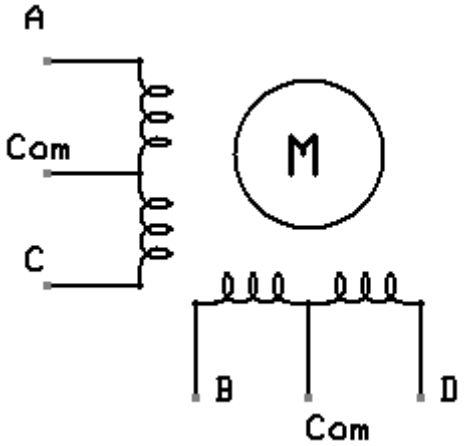
Σχήμα 2.2: Τρόποι διέγερσης βηματικών κινητήρων

Από τους αναφερθέντες τρόπους διέγερσης η λύση που συνδυάζει βέλτιστα την ακρίβεια με την ροπή είναι η οδήγηση πλήρους βήματος.

Όσον αφορά την τοπολογία των φάσεων, οι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε **Μονοπολικούς** και **Διπολικούς:**

Οι **Διπολικοί** κινητήρες παρέχουν δύο ακροδέκτες για κάθε τύλιγμα. Επομένως συνολικά χρησιμοποιούμε 4 ακροδέκτες και όταν θέλουμε να τροφοδοτήσουμε μία φάση με αντίθετη πολικότητα πρέπει να φροντίσουμε το ηλεκτρικό κύκλωμα οδήγησης να αντιστρέφει την πολικότητα κατάλληλα. Αυτό προϋποθέτει την χρήση των κυκλωματικών στοιχείων **Γέφυρες-Η** για κάθε τύλιγμα, κάτι που αυξάνει την περιπλοκότητα του κυκλώματος.

Οι **Μονοπολικοί** κινητήρες εκθέτουν τρείς ακροδέκτες για κάθε τύλιγμα: τις δύο άκρες του πηνίου και μία επαφή που συνδέεται στο κέντρο του. Αυτό δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιούμε τον μεσαίο ακροδέκτη ως κοινό και να τροφοδοτούμε τις δύο άκρες του πηνίου διαδοχικά με την ίδια πολικότητα, κάτι το οποίο είναι ισοδύναμο με το να αντιστρέφαμε την πολικότητα στο ίδιο τμήμα του πηνίου. Αυτή η τακτική επιτρέπει την απλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος οδήγησης σε μεγάλο βαθμό. Παράλληλα, οι μονοπολικοί κινητήρες μπορούν να συνδεθούν και ως διπολικοί αν δεν χρησιμοποιήσουμε δύο ακροδέκτες. Για αυτούς τους λόγους οι μονοπολικοί κινητήρες είναι οι συνηθέστερη επιλογή των σχεδιαστών.



Σχήμα 2.3: Κυκλωματική απεικόνηση μονοπολικού βηματικού κινητήρα

2.4 Θερμαντικό στοιχείο

Θερμαντικό στοιχείο ονομάζεται οποιοδήποτε στοιχείο μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε θερμική. Το αντίστοιχο ηλεκτρικό στοιχείο που επιτελεί αυτόν τον ρόλο ονομάζεται **αντιστάτης.**

Επομένως ο επενεργητής μας πρόκειται για έναν αντιστάτη. Οι αντιστάτες του εμπορίου χαρακτηρίζονται από τα εξής στοιχεία:

- Μέτρο αντίστασης (Ohm)
- Ισχύς (Watts)

Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε την επιθυμητή ισχύ που θέλουμε να μας παρέχει η αντίσταση. Αυτή θα βρεθεί χρησιμοποιώντας την επιθυμητή θερμοκρασία που θέλουμε για το θερμοπλαστικό υλικό καθώς και την θερμοχωρητικότητα της ποσότητας υλικού που εξωθούμε. Φυσικά πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν και την θερμοχωρητικότητα ολόκληρου του θερμού άκρου, καθώς και την ισχύ των απωλειών θερμότητας από τις εκτεθειμένες επιφάνειες. Στην συνέχεια πρέπει να επιλεχθεί ένας αντιστάτης με αρκετά μεγαλύτερη ισχύ, ώστε το σύστημα ελέγχου να μπορεί να αντισταθμίσει την οποιαδήποτε διαταραχή θερμοκρασίας σε μικρό χρόνο. Μόνο με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι η ποιότητα της επιφάνειας του αντικειμένου υπό εκτύπωση θα διατηρηθεί ικανοποιητικά σταθερή.

Εφόσον έχουμε αποφασίσει για την ισχύ που πρέπει να έχει ο αντιστάτης μας, μένει να βρούμε την τιμή της αντίστασής του. Αυτό θα μας καθορίσει την τάση και το ρεύμα που θα διαρρέουν το στοιχείο. Η τάση και το ρεύμα παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή της τάσης τροφοδοσίας του κυκλώματος και την επιλογή των ηλεκτρονικών στοιχείων που θα χρησιμοποιήσουμε στο κύκλωμα οδήγησης του αντιστάτη. Περισσότερα θα αναλυθούν κατά την μελέτη του συστήματος οδήγησης του θερμαντικού στοιχείου.

2.5 Μικροελεγκτής

2.5.1 Γενικά για τους μικροελεγκτές

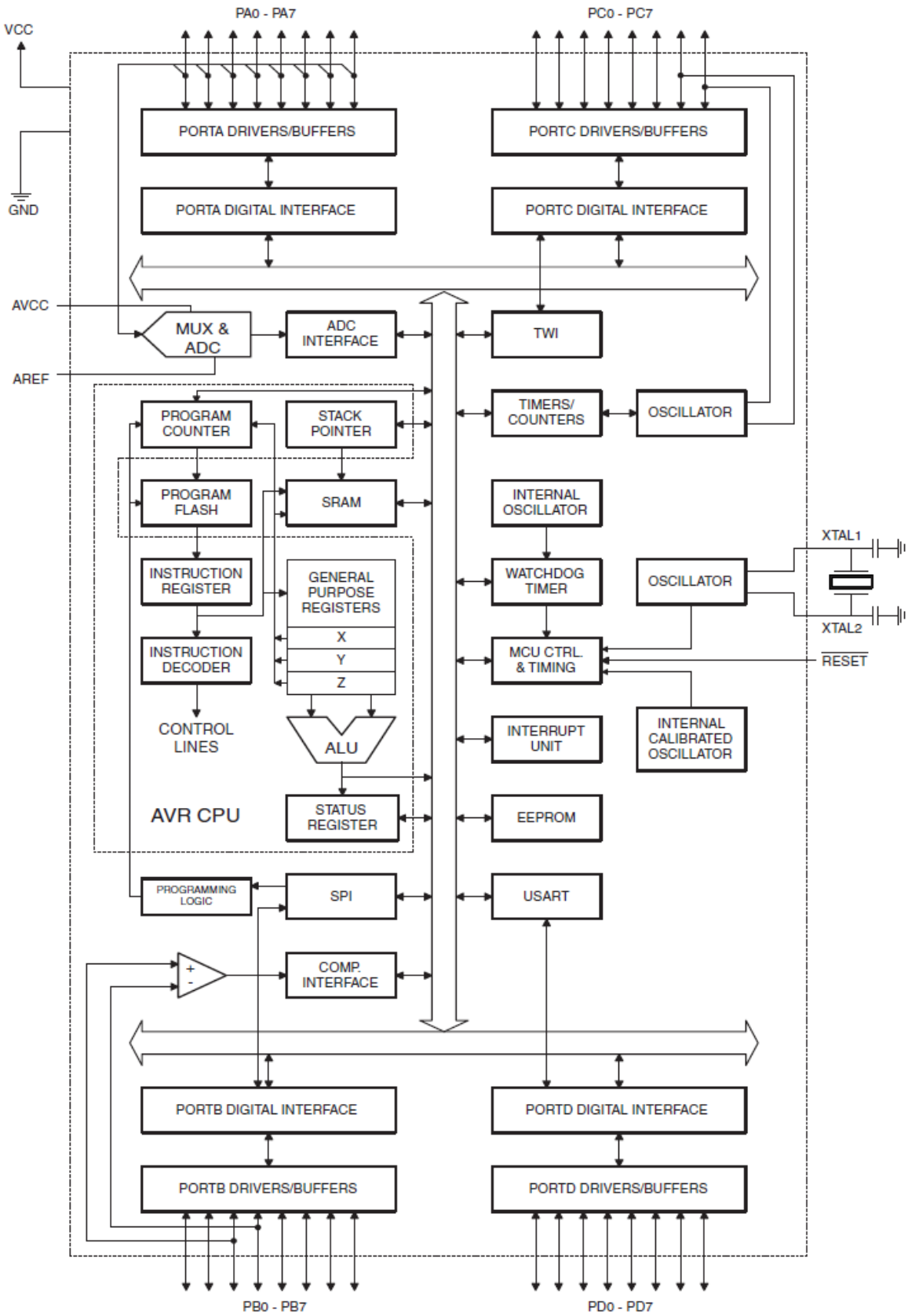
Με τον όρο μικροελεγκτές αναφερόμαστε σε ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία ενσωματώνουν έναν επεξεργαστή και διάφορες περιφερειακές μονάδες. Επικοινωνούν με το περιβάλλον τους μέσω ηλεκτρικών σημάτων από τους διάφορους ακροδέκτες τους. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε αυτόνομες εφαρμογές όπου δεν επιθυμείται η χρήση υπολογιστή και χρειάζεται η υλοποίηση λογικής. Αποτελούν πολύ δημοφιλείς σχεδιαστικές επιλογές σχεδόν σε κάθε αυτόνομη εφαρμογή. Το οπλοστάσιο των περιφερειακών τους περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τα εξής:

- Μνήμη προγράμματος (τύπου ROM, FLASH, EPROM κλπ.) η οποία περιέχει το λογισμικό του συστήματος. Σε κάποια μοντέλα, είναι δυνατό το κλείδωμα αυτής της μνήμης, μετά την εγγραφή της, ώστε να προστατευτεί το περιεχόμενό της από αντιγραφή.
- Μνήμη τυχαίας προσπέλασης RAM.
- Μόνιμη μνήμη αποθήκευσης παραμέτρων λειτουργίας (τύπου EEPROM ή NVRAM). Αυτή η μνήμη έχει, έναντι της FLASH, το πλεονέκτημα της δυνατότητας διαγραφής και εγγραφής οποιουδήποτε μεμονωμένου byte από τον πυρήνα του μικροελεγκτή.
- Κύκλωμα αρχικοποίησης (reset).
- Διαχειριστή αιτήσεων διακοπής (interrupt request controller) από τα περιφερειακά.
- Κύκλωμα επιτήρησης τροφοδοσίας (brown-out detection) το οποία παρακολουθεί την τροφοδοσία και αρχικοποιεί ολόκληρο το σύστημα όταν αυτή πέσει κάτω από τα ανεκτά όρια, προλαμβάνοντας έτσι την αλλοίωση των δεδομένων.
- Κύκλωμα επιτήρησης λειτουργίας (watchdog timer) το οποίο αρχικοποιεί το σύστημα, αν αυτό εμφανίσει σημάδια δυσλειτουργίας λόγω κολλήματος (hang).
- Τοπικό ταλαντωτή για την παροχή παλμών χρονισμού (internal clock).
- Έναν ή περισσότερους χρονιστές - μετρητές υψηλής ταχύτητας (hardware timer-counter) για τη δημιουργία καθυστερήσεων, μέτρηση διάρκειας γεγονότων, απαρίθμηση γεγονότων και άλλων λειτουργιών ακριβούς χρονισμού.
- Ρολόι πραγματικού χρόνου (Real Time Clock, RTC) για μέτρηση χρόνου με ελάχιστη κατανάλωση ισχύος
- Μία ή περισσότερες ασύγχρονες σειριακές θύρες επικοινωνίας (Universal Asynchronous Receiver Transmitter, UART).
- Σύγχρονες σειριακές θύρες επικοινωνίας (πχ I^2C, SPI, Ethernet).
- Ολόκληρα υποσυστήματα για την άμεση υποστήριξη από υλικό (hardware) των πιο σύνθετων πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπως CAN, HDLC, ISDN, ADSL.
- Μονάδα άμεσης εκτέλεσης πράξεων κινητής υποδιαστολής (Floating Point Processing Unit, FPU), η οποία είναι πάντοτε πιο γρήγορη από την ALU του επεξεργαστή. Τέτοιες μονάδες χαρακτηρίζουν τους μικροελεγκτές με δυνατότητες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing, DSP). Τα τελευταία χρόνια, με την ευρύτατη διάδοση των φορητών συσκευών ήχου και εικόνας, παρατηρείται μια τάση σύγκλισης των μικροελεγκτών με τους DSP.
- Είσοδοι για μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital converter, ADC).
- Μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (Digital to Analog converter, DAC).
- Ελεγκτή οθόνης υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display, LCD).
- Υποσύστημα προγραμματισμού πάνω στο κύκλωμα (ISP)
- Υποσύστημα προγραμματισμού και διάγνωσης (συνήθως είναι το καθιερωμένο πρότυπο JTAG)

2.5.2 Ο μικροελεγκτής Atmel AVR ATmega32

Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής αποτελεί μία αρκετά δημοφιλής συσκευή, αφού χρησιμοποιείται και από την εμπορική πλατφόρμα Arduino™. Διαθέτει αρκετά από τα περιφερειακά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται ένα διάγραμμα βαθμίδων που απεικονίζει την εσωτερική δομή του μικροελεγκτή. Βλέπουμε ότι η επικοινωνία της συσκευής με το περιβάλλον της γίνεται μέσω 4 πορτών εύρους 8 bits. Το κάθε bit αντιπροσωπεύει έναν φυσικό ακροδέκτη του ολοκληρωμένου. Οι ακροδέκτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως έξοδοι είτε ως είσοδοι του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, η κατάστασή τους απεικονίζεται στο εσωτερικό του συστήματος ως μία θέση μνήμης. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η μετάβαση από το υλικό (Hardware) στο λογισμικό (Software). Δίνεται, δηλαδή, πρόσβαση στην κατάσταση των φυσικών ακροδεκτών στον προγραμματιστή του προγράμματος που εκτελείται από τον πυρήνα του μικροελεγκτή. Οι ακροδέκτες αυτοί, εκτός από απλές ψηφιακές είσοδοι ή έξοδοι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από τα διάφορα περιφερειακά του μικροελεγκτή.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα βαθμίδων μικροελεγκτή Atmel AVR ATmega32

2.6 Αισθητήρες

2.6.1 Μετρήσιμα μεγέθη του συστήματος

Αισθητήρας ονομάζεται ένα στοιχείο το οποίο μετατρέπει ένα φυσικό μέγεθος σε ένα άλλο, το οποίο είναι εύκολο να επεξεργαστούμε. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες, καθώς μας δίνουν την δυνατότητα να μετατρέψουμε ενδιαφέροντα φυσικά μεγέθη σε ηλεκτρικά, τα οποία είναι πολύ εύκολα επεξεργάσιμα από ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Για να μπορέσουμε να ελέγξουμε ένα οποιοδήποτε σύστημα, βασική προϋπόθεση είναι να έχουμε διαθέσιμη την πληροφορία της κατάστασης του συστήματος. Έτσι μόνο ο ελεγκτής μας θα είναι σε θέση να υπολογίσει την επίδραση που χρειάζεται να ασκήσει στον επενεργητή ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή κατάσταση.

Οι επενεργητές του συστήματός μας και τα μεγέθη τα οποία χρειάζεται να ελέγξουμε χρησιμοποιώντας τους είναι τα εξής:

- Κινητήρες – **Έλεγχος θέσης** της κεφαλής
- Θερμαντικό στοιχείο – **Έλεγχος θερμοκρασίας** του θερμού άκρου

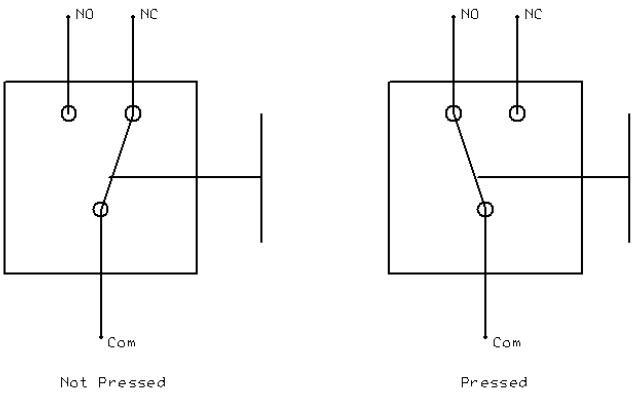
2.6.2 Αισθητήρες Θέσης

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη παράγραφο, οι βηματικοί κινητήρες που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μας δίνουν την δυνατότητα να ελέγξουμε την θέση τους χωρίς να χρησιμοποιήσουμε κλάδο ανάδρασης στο σύστημα αυτομάτου ελέγχου μας. Επομένως δεν είναι απαραίτητη η χρήση αισθητήρων θέσης. Αυτό είναι μία σχεδιαστική επιλογή. Φυσικά θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιήσουμε και αισθητήρες θέσης ώστε να δώσουμε στο σύστημά μας την πληροφορία για την πραγματική θέση της κεφαλής. Έτσι θα μπορούμε να διορθώνουμε τυχόντα σφάλματα και υποβοηθούμε την διαδικασία καλιμπραρίσματος της μηχανικής κατασκευής.

Ωστόσο, δεν μπορούμε να αποφύγουμε εντελώς την παροχή πληροφορίας για την θέση της κεφαλής στο σύστημα. Όπως έχουμε αναφέρει, ένας ρομποτικός μηχανισμός μπορεί να κινηθεί μέσα σε έναν συγκεκριμένο χώρο εργασίας, ο οποίος αποτελεί κατασκευαστική σταθερά του συστήματός μας. Η οδήγηση των κινητήρων πέρα από τα όρια του χώρου εργασίας είναι επικίνδυνη για την μηχανική κατασκευή και πρέπει να αποφευχθεί.

Για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητη η χρήση **οριακών διακοπτών.**
Οι οριακοί διακόπτες είναι αισθητήρες δύο καταστάσεων και μπορούν να μας δώσουν την πληροφορία για το αν η κεφαλή βρίσκεται σε ένα προκαθορισμένο σημείο ή όχι. Έτσι, χρειάζονται δύο από αυτούς τους διακόπτες για κάθε βαθμό ελευθερίας, ένας σε κάθε άκρο του αντίστοιχου άξονα. Με αυτήν την πληροφορία το σύστημά μας μπορεί να γνωρίζει πότε η κεφαλή έχει προσεγγίσει κάποια έδρα του χώρου εργασίας και να λάβει ανάλογες αποφάσεις. Οι αισθητήρες αυτοί είναι επίσης χρήσιμοι για την **διαδικασία αρχικοποίησης** του συστήματος, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

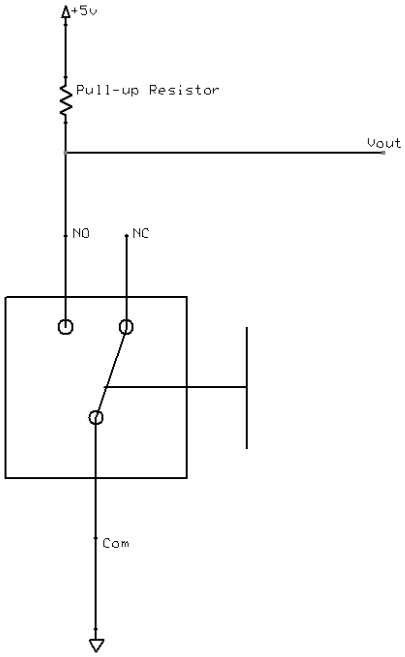
Πρόκειται για μηχανικά κινούμενες ηλεκτρικές επαφές, το κινούμενο μέρος των οποίων είναι συνδεδεμένο με ένα έλασμα. Η τοποθέτηση του διακόπτη γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η κεφαλή να ωθήσει το κινούμενο μέρος και να κλείσει η επαφή μόλις η κεφαλή βρεθεί στο κατάλληλο σημείο. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε τις δύο καταστάσεις του διακόπτη:



Σχήμα 2.5: Οριακοί διακόπτες

2.6.2.1 Ηλεκτρονικό κύκλωμα διασύνδεσης οριακών διακοπτών

Όπως αναφέραμε προηγουμένως οι οριακοί διακόπτες λειτουργούν ως απλοί διακόπτες. Για να μπορέσουμε, ωστόσο να διαβάσουμε την κατάστασή τους από ένα ηλεκτρονικό σύστημα, θα πρέπει να την μετατρέψουμε σε ένα σήμα τάσης. Οι δύο καταστάσεις του διακόπτη θα πρέπει να αντιστοιχούν σε υψηλή και χαμηλή τάση του σήματος αυτού. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξής συνδεσμολογία:



Σχήμα 2.6: Κυκλωματική διασύνδεση οριακού διακόπτη

Ο ένας ακροδέκτης συνδέεται στην γείωση και ο άλλος στην τάση τροφοδοσίας μέσω μίας αντίστασης ανύψωσης, ενώ παράλληλα αποτελεί και την έξοδο του αισθητήρα. Η αντίσταση ανύψωσης λειτουργεί ως εξής: Όταν ο ακροδέκτης εξόδου δεν συνδέεται με την γείωση μέσω του διακόπτη, η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας. Αυτό συμβαίνει επειδή ο κλάδος δεν διαρρέεται από ρεύμα, με αποτέλεσμα η πτώση τάσης επάνω στην αντίσταση να είναι μηδενική και επομένως η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας. Αντίθετα, όταν ο διακόπτης κλείσει τότε

ο ακροδέκτης εξόδου συνδέεται με την γείωση και η τάση εξόδου είναι ίση με μηδέν. Η αντίσταση διαρρέεται από ρεύμα και παρουσιάζει πτώση τάσης ίση με την τάση τροφοδοσίας.

Παρατηρούμε ότι οι οριακοί διακόπτες διαθέτουν δύο επαφές εξόδου. Η μία ονομάζεται **Κανονικά Κλειστή** και η άλλη **Κανονικά Ανοικτή**. Μπορούμε να τοποθετήσουμε το κύκλωμα του σχήματος σε όποιον από αυτούς τους ακροδέκτες θέλουμε, ανάλογα με το ποια κατάσταση του διακόπτη θέλουμε να αντιστοιχεί στην ψηλή τάση του σήματος εξόδου και ποια στην χαμηλή.

2.6.3 Αισθητήρες Θερμοκρασίας

Αντίθετα με την κίνηση, όπου η πολυπλοκότητα των βηματικών κινητήρων μας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε έλεγχο ανοιχτού βρόχου, με τον έλεγχο θερμοκρασίας δεν συμβαίνει το ίδιο.

Ο αντιστάτης είναι ίσως το απλούστερο κυκλωματικό στοιχείο, το οποίο μετατρέπει το ρεύμα που τον διαρρέει σε θερμική ισχύ, σύμφωνα με τον νόμο του Joule. Επομένως για τον έλεγχο του στοιχείου αυτού θα χρειαστούμε έναν **αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας**.

Ο αισθητήρας που θα χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να παρέχει έξοδο σε μορφή αντιληπτή από το σύστημά μας, δηλαδή σε μορφή **ηλεκτρικού σήματος τάσης**.

Οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες θερμοκρασίας κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Θερμίστορ
- Θερμοζεύγη
- Θερμικοί αισθητήρες αντίστασης
- Θερμικοί αισθητήρες ενεργειακού διακένου πυριτίου

Το καθένα από τα παραπάνω είδη αισθητήρων θερμοκρασίας παρουσιάζουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι βασικοί τομείς που χαρακτηρίζουν έναν αισθητήρα είναι η εξής:

- Ακρίβεια
- Περιοχή λειτουργίας
- Γραμμικότητα
- Χρόνος απόκρισης

Ας ασχοληθούμε λίγο με την έννοια της **γραμμικότητας:**
Ένας αισθητήρας, όπως έχουμε αναφέρει, μετατρέπει ένα φυσικό μέγεθος σε ένα άλλο. Ο τρόπος που γίνεται η μετατροπή χαρακτηρίζεται από κάποια μαθηματική σχέση που σχετίζεται με την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα. Γραμμικός ονομάζεται ένας αισθητήρας όταν η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών είναι γραμμική. Σε αυτήν την περίπτωση, έχοντας γνώση δύο και μόνο μετρήσεων, μπορούμε να εξάγουμε την σχέση που συνδέει τα μεγέθη και να υπολογίζουμε το ένα από τις τιμές του άλλου.

Στην περίπτωση των μη γραμμικών αισθητήρων θα πρέπει να γνωρίζουμε τον ακριβή μαθηματικό τύπο που συνδέει τα μεγέθη και να τον επιλύουμε για κάθε μέτρηση του αισθητήρα. Εναλλακτικά, μπορούμε να έχουμε καταγράψει εκ των προτέρων έναν **πίνακα μετρήσεων** με τις αντιστοιχίες του και να τον συμβουλευόμαστε.

Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε το εξής:
Στις **εφαρμογές ρύθμισης** ενός μεγέθους σε σταθερή τιμή, αντίθετα με τις **εφαρμογές μέτρησης**, η γραμμικότητα του αισθητήρα δεν φέρει τόσο μεγάλη βαρύτητα. Αυτό συμβαίνει επειδή στον έλεγχο μας ενδιαφέρει μία περιοχή μόνο του αισθητήρα γύρω από την επιθυμητή τιμή.

Ο αισθητήρας που επιλέγουμε για την εφαρμογή του τρισδιάστατου εκτυπωτή είναι το θερμίστορ.

2.6.3.1 Θερμίστορ

Το θερμίστορ είναι στην πραγματικότητα ένας απλός κεραμικός αντιστάτης, του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- PTC : η αντίστασή τους αυξάνεται με την αύξησης της θερμοκρασίας
- NTC : η αντίστασή τους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας

Η συνάρτηση μεταφοράς των θερμίστορ είναι γενικά **μη γραμμική,** ωστόσο παρουσιάζουν καλή ακρίβεια γύρω από συγκεκριμένες περιοχές λειτουργίας. Είναι εύχρηστοι λόγω του μικρού μεγέθους τους και της αντοχής τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Όπως είπαμε, το θερμίστορ μετατρέπει εκφράζει το μέγεθος της θερμοκρασίας σε αντίσταση. Χρειάζεται, επομένως, η μετατροπή της αντίστασης σε τάση. Αυτό μπορεί να γίνει με απλά κυκλώματα, όπως οι **διαιρέτες τάσης**. Θα ασχοληθούμε με την επεξεργασία του σήματος του αισθητήρα αυτού σε επόμενο κεφάλαιο.

3 Έλεγχος και Οδήγηση Επενεργητών

3.1 Συστήματα Οδήγησης

Ως Συστήματα Οδήγησης καλούμε τα συστήματα εκείνα που αναλαμβάνουν τον χειρισμό του υλικού, η αλλιώς, των συσκευών που απαρτίζουν ένα ευρύτερο σύστημα.

Η σημασία τους είναι μεγάλη, καθώς εισάγουν ένα **επίπεδο αφαίρεσης** στον σχεδιασμό μίας εφαρμογής, διαχωρίζοντας το κατώτατο επίπεδο του υλικού από τα ανώτερα υποσυστήματα. Η επικοινωνία των συστημάτων οδήγησης με τα ανώτερα επίπεδα γίνεται μέσω ενός καλώς ορισμένου **πρωτόκολλου διεπαφής** το οποίο αποκρύπτει τις λεπτομέρειες της υλοποίησής τους από τα υποσυστήματα που το χρησιμοποιούν.

Ας δούμε ένα απλό παράδειγμα:
Για τον χειρισμό ενός αυτοκινήτου ο οδηγός έχει στην διάθεσή του ένα σύνολο χειριστηρίων στα οποία έχει πρόσβαση από την καμπίνα του οδηγού. Τα βασικότερα από αυτά είναι ας πούμε το γκάζι, το φρένο και το τιμόνι. Ο χρήστης με αυτά μπορεί να επιταχύνει, να επιβραδύνει και να κατευθύνει το αυτοκίνητο.

Αυτά τα τρία χειριστήρια αποτελούν το πρωτόκολλο διεπαφής του χρήστη με το αυτοκίνητο. Πίσω από αυτά υπάρχει μία πλειάδα συστημάτων που λειτουργούν με αρκετά πολύπλοκο τρόπο. Για παράδειγμα με το πάτημα του γκαζιού κάποιο σύστημα αυξάνει την ποσότητα του καυσίμου που ψεκάζεται στους κυλίνδρους του κινητήρα, ενώ με το στρίψιμο του τιμονιού ενεργοποιείται ένα υδραυλικό σύστημα που αλλάζει τον προσανατολισμό των τροχών. Οι λεπτομέρειες αυτές αποκρύπτονται από τον χρήστη.

Επίσης, ο ίδιος χρήστης θα μπορούσε να χειριστεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ή ένα αυτοκίνητο με ηλεκτρική υποβοήθηση τιμονιού. Σε αυτή την περίπτωση οι ενέργειες που θα προκαλούσε με τους χειρισμούς του θα ήταν τελείως διαφορετικές, αυτό όμως δεν επηρεάζει τον τρόπο χειρισμού. Αρκεί να γνωρίζει το πρωτόκολλο διεπαφής με το σύστημα οδήγησης της συσκευής αυτής, που ονομάζεται αυτοκίνητο.

Ο σχεδιασμός ενός πρωτόκολλου διεπαφής απαιτεί πολύ προσοχή. Χρειάζεται να συνδυάζει τα εξής στοιχεία:

- Γενικότητα – πρέπει να μην εκθέτει καμία λεπτομέρεια της υλοποίησης
- Ισχύς – πρέπει να παρέχει τον τρόπο αξιοποίησης όλων των δυνατοτήτων της υλοποίησης
- Απλότητα – η χρήση του πρέπει να είναι απλή

3.2 Έλεγχος και Οδήγηση Κινητήρων

3.2.1 Είσοδοι του συστήματος οδήγησης

Το σύστημα οδήγησης των κινητήρων είναι το σύστημα εκείνο που ελέγχει και τροφοδοτεί τα τυλίγματα των κινητήρων. Σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο, το σύστημα αυτό πρέπει να επιτελεί όλες τις ενέργειες που απαιτούνται για την ελεγχόμενη κίνηση των κινητήρων και να παρέχει στα υποσυστήματα που το ελέγχουν ένα πρωτόκολλο διεπαφής για τον χειρισμό του. Θα σχεδιάσουμε το πρωτόκολλο αυτό.

Εφόσον τόσο το σύστημα οδήγησης όσο και τα άλλα συστήματα της εφαρμογής μας είναι ηλεκτρονικά, το πρωτόκολλο διεπαφής θα πρέπει να έχει την μορφή **ηλεκτρικών σημάτων**. Μάλιστα, επειδή τα συστήματά μας είναι ψηφιακά, επιλέγουμε την χρήση **ψηφιακών παλμών**.

Οι δυνατότητες των κινητήρων, οι οποίες θα πρέπει να εκτίθενται μέσω της διεπαφής, είναι οι εξής:

- Επιλογή τροφοδοσίας ή μη (σήμα ενεργοποίησης)
- Δυνατότητα κίνησης προς κάθε φορά περιστροφής κατά ακέραια πολλαπλάσια της ελάχιστης δυνατής μετατόπισης

Ακολουθεί το πρωτόκολλο διεπαφής του συστήματος οδήγησης των κινητήρων:

Η διεπαφή του συστήματος οδήγησης αποτελείται από τρία ηλεκτρικά σήματα τάσης δύο καταστάσεων (HIGH,LOW). Τα επίπεδα τάσης των καταστάσεων αυτών ορίζονται σύμφωνα με την κλάση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων **TTL:**

Τάση τροφοδοσίας: 5 Volt.
Low level: 0 έως 0,8 Volt ως προς τον ακροδέκτη γείωσης
High level: Από 2,2 Volt έως όσο η τάση τροφοδοσίας ως προς τον ακροδέκτη γείωσης

Τα σήματα είναι τα εξής:

- **Ενεργοποίηση:**
  Όταν η τάση είναι στο υψηλό επίπεδο ο κινητήρας είναι ενεργοποιημένος
- **Διεύθυνση:**
  Το επίπεδο τάσης καθορίζει την φορά περιστροφής του κινητήρα. Το υψηλό επίπεδο σηματοδοτεί την δεξιόστροφη φορά ενώ το χαμηλό την αριστερόστροφη
- **Βήματα:**
  Κάθε παλμός σηματοδοτεί την κίνηση του κινητήρα κατά την ελάχιστη μετατόπιση. Ως νέος παλμός λαμβάνεται κάθε θετική ακμή του σήματος

Η απόκριση του συστήματος οδήγησης περιγράφεται ως εξής:
*Εφόσον το σήμα **Ενεργοποίησης** είναι σε υψηλό επίπεδο, σε κάθε θετική ακμή του σήματος **Βημάτων**, ο κινητήρας μετακινείται κατά ένα βήμα προς την φορά που καθορίζει το επίπεδο του σήματος **Διεύθυνσης***

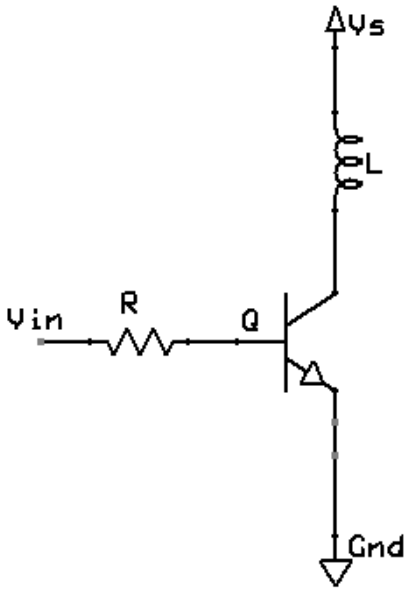
Εφόσον πλέον έχουμε σχεδιάσει το πρωτόκολλο διεπαφής του συστήματος οδήγησης, μένει να ασχοληθούμε με την εσωτερική δομή του.

3.2.2 Τροφοδότηση ενός πηνίου – Στάδιο ισχύος

Σε αυτό το στάδιο ξεκινάμε την μελέτη των εσωτερικών δομών του συστήματος οδήγησης. Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούν ηλεκτρικά τυλίγματα (πηνία). Ας δούμε πώς τροφοδοτούμε τέτοια τυλίγματα.

Το ρεύμα που διαρρέει τα πηνία είναι αυτό που θα προκαλέσει την μηχανική ροπή στον άξονα του ρότορα του κινητήρα. Επομένως, θα χρειαστούμε ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος. Για να μπορέσουμε να ελέγξουμε την τροφοδοσία των τυλιγμάτων θα χρησιμοποιήσουμε τρανζίστορ.

Το τρανζίστορ μας δίνει την δυνατότητα να ελέγξουμε μία σημαντική ροή ρεύματος μέσω μίας μικρότερης. Συγκεκριμένα, το ρεύμα συλλέκτη-εκπομπού είναι πολλαπλάσιο του ρεύματος βάσης-εκπομπού. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε σήματα χαμηλής ισχύος για να οδηγήσουμε υψηλά ρεύματα. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την διασύνδεση κυκλωμάτων ισχύος με κυκλώματα λογικής, όπως τα ολοκληρωμένα ψηφιακά κυκλώματα.

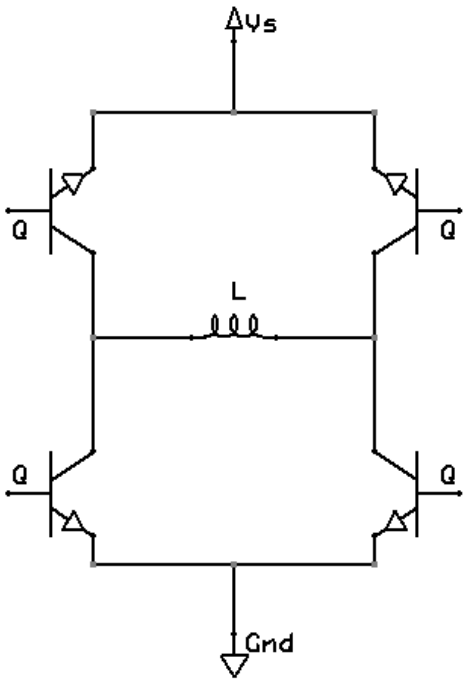


Σχήμα 3.1: Κύκλωμα οδήγησης πηνίου

Θετική τάση στην βάση του τρανζίστορ θα το οδηγήσει στην κατάσταση αγωγής και έτσι το πηνίο θα τροφοδοτηθεί. Αντίθετα χαμηλή τάση στην βάση του τρανζίστορ θα κρατήσει το πηνίο εκτός τροφοδοσίας. Η αντίσταση στην βάση του τρανζίστορ είναι για να περιορίσει το ρεύμα βάσης-εκπομπού.

Στο σχήμα δείχνουμε την υλοποίηση με ένα διπολικό τρανζίστορ NPN. ΤΟ ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσαμε επιτύχουμε και με PNP τρανζίστορ με μία κάπως συμπληρωματική σχεδίαση. Ωστόσο, η χρήση του NPN μας δίνει την δυνατότητα το V_{in} να κινείται σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης από ότι το V_s. Έτσι μπορούμε να εφαρμόσουμε μεγαλύτερη τάση στο τρανζίστορ και να επιτύχουμε μεγάλη ισχύ χωρίς ιδιαίτερη αύξηση του ρεύματος, κάτι που θα δυσκόλευε στην επιλογή των στοιχείων. Επίσης, θα μπορούσαμε να επιλέξουμε τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET - MOSFET) αντί για διπολικά, χωρίς να αλλάζει ιδιαίτερα η σχεδίαση του κυκλώματος.

Να σημειώσω ότι η διάταξη του σχήματος δίνει την δυνατότητα να τροφοδοτήσουμε το πηνίο με μία μόνο πολικότητα ρεύματος. Σε περίπτωση που θέλαμε ένα κύκλωμα που να μας δίνει την δυνατότητα να τροφοδοτήσουμε το πηνίο και με τις δύο πολικότητες, θα καταφεύγαμε σε μία διάταξη που ονομάζεται **Γεφυρα-Η**:



Σχήμα 3.2: Κυκλωματική διάταξη γέφυρας-Η

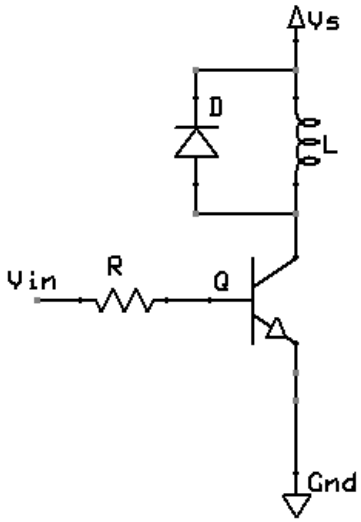
Η διάταξη αυτή απαιτεί τέσσερα τρανζίστορ ανά τύλιγμα και αυξάνει τις εισόδους του κυκλώματος. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, η χρήση των μονοπολικών βηματικών κινητήρων μας δίνει την δυνατότητα να τροφοδοτούμε τα πηνία με την ίδια πολικότητα κάθε φορά, επομένως μπορούμε να συνεχίσουμε την σχεδίαση χρησιμοποιώντας την προηγούμενη διάταξη.

3.2.2.1 Πρόβλημα αιχμών τάσης

Το πηνίο πρόκειται να δεχτεί τροφοδοσία κατά παλμούς. Αυτό σημαίνει ότι ιδανικά το ρεύμα που το διαρρέει θα θέλαμε επίσης να είναι παλμικό. Ωστόσο, η εξίσωση που περιγράφει την συμπεριφορά του πηνίου είναι η εξής:

$$V = L\frac{di}{dt}$$

Αυτό σημαίνει πως αν προσπαθήσουμε να μηδενίσουμε ακαριαία το ρεύμα ενός πηνίου, θα παραχθεί τάση στα άκρα του με πολύ μεγάλο μέτρο και αντίθετη πολικότητα. Αυτό μπορεί να αποβεί καταστροφικό για τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούμε μία δίοδο με ανάστροφη πόλωση παράλληλα με το πηνίο. Έτσι παρέχουμε έναν αγώγιμο κλάδο στο πηνίο για αυτήν την ανάστροφη τάση ώστε να αποσβεστεί αυτό το μεταβατικό φαινόμενο.



Σχήμα 3.3: Οδήγηση πηνίου με αντιστάθμιση αιχμών τάσης

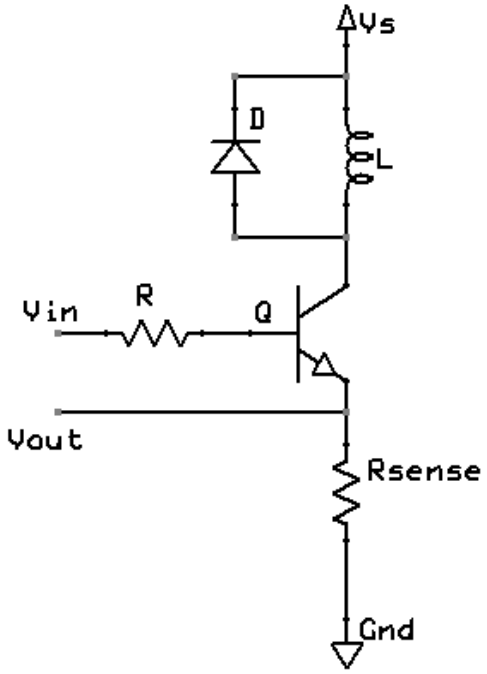
3.2.3 Μέτρηση και έλεγχος ρεύματος

Όπως έχουμε αναφέρει ξανά, η ροπή που θέλουμε να ασκηθεί στον άξονα του ρότορα οφείλεται στο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του κινητήρα. Επομένως, θέλουμε η τιμή του να είναι μεγάλη. Ωστόσο ο κατασκευαστής του κινητήρα δίνει ένα όριο ρεύματος πάνω από το οποίο δεν εγγυάται την σωστή λειτουργία.

Το κάθε τύλιγμα εκτός από αυτεπαγωγή διαθέτει και κάποια τιμή αντίστασης. Επομένως, θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί να υπολογίσουμε την τιμή της τάσης τροφοδοσίας σύμφωνα με τον νόμο του Ohm ώστε το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα να είναι όσο το ονομαστικό. Ωστόσο αυτό δεν είναι αρκετά αποδοτικό αν σκεφτούμε το εξής:

Το ρεύμα που διαρρέει ένα πηνίο ισούται με το ολοκλήρωμα της τάσης στα άκρα του. Επομένως, εφόσον ένας παλμός έχει κατά την διάρκειά του σταθερή τάση, η μορφή του ρεύματος που διαρρέει ένα πηνίο περιμένουμε να είναι τριγωνική. Η σταθερά χρόνου της τριγωνικής κυματομορφής εξαρτάται από την αυτεπαγωγή του πηνίου. Αυτό σημαίνει ότι ίσως για σημαντικό μέρος του παλμού να μην ασκούμε την μέγιστη ροπή. Αν εφαρμόσουμε μεγαλύτερη τάση στο πηνίο θα καταφέρουμε να κάνουμε την άνοδο του τριγωνικού παλμού πιο σύντομη. Όμως στην μόνιμη κατάσταση τροφοδότησης του πηνίου κινδυνεύουμε να υπερβούμε την επιτρεπόμενη τιμή ρεύματος.

Για αυτόν τον λόγο μπορούμε να παρακολουθούμε το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο και να ρυθμίζουμε την τάση που του εφαρμόζουμε ανάλογα. Όμως εμφανίζεται το εξής πρόβλημα: Ενώ είναι εύκολο να μετρήσουμε τάση, με ένα κύκλωμα, δεν είναι εύκολο να μετρήσουμε ρεύμα. Επιπλέον, το ρεύμα που θέλουμε να μετρήσουμε αποτελεί στοιχείο του τμήματος ισχύος του κυκλώματος, άρα είναι επικίνδυνο να τοποθετήσουμε στοιχεία λογικής εκεί. Χρειάζεται για αυτόν τον λόγο να μετατρέψουμε το ρεύμα σε τάση και να μετρήσουμε την τάση αυτή. Θα χρειαστεί η προσθήκη μίας επιπλέον αντίστασης στο κύκλωμα:



Σχήμα 3.4: Οδήγηση πηνίου με έξοδο μέτρησης ρεύματος

Η τάση στα άκρα της αντίστασης R_{sense} είναι ανάλογη με το ρεύμα που την διαπερνάει σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:

$$V = IR$$

Πρέπει να πληροί τις εξής προδιαγραφές:

- Να είναι αντίσταση ισχύος, εφόσον είναι σε σειρά με το κύκλωμα ισχύος
- Να έχει αρκετά μικρή τιμή ώστε να μην έχουμε μεγάλη απώλεια ισχύος από το τύλιγμα
- Να έχει τέτοια τιμή ώστε η τάση που μετράμε να είναι αρκετά χαμηλότερη από την τάση τροφοδοσίας των λογικών κυκλωμάτων (5V)

Η τάση V_{out} είναι ένα αναλογικό σήμα τάσης. Για να χρησιμοποιήσουμε την μέτρηση από ένα ψηφιακό κύκλωμα θα χρειαστούμε έναν **μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό.** Τέτοιοι μετατροπείς υπάρχουν στους μικροεπεξεργαστές όπως έχουμε ήδη δει.

Η ρύθμιση της τάσης που εφαρμόζεται στο πηνίο μπορεί να γίνει με ψηφιακό τρόπο χρησιμοποιώντας την **τεχνική Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών (PWM)**. Η τεχνική αυτή θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Σε αυτήν την περίπτωση θα χρειαστεί ένας **PID** ελεγκτής ο οποίος να ρυθμίζει το πλάτος των παλμών ανάλογα με τις μετρήσεις που έχουμε για το ρεύμα του πηνίου.

Εναλλακτικά μπορούμε να εφαρμόσουμε μία πιο απλή λογική ελέγχου που έχει ως εξής:

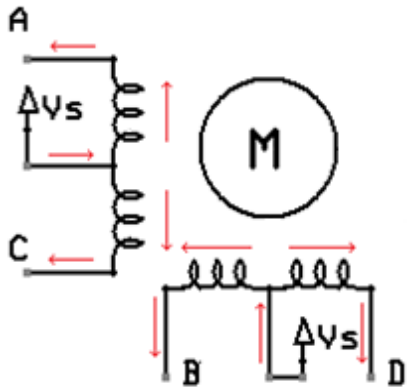
Λαμβάνουμε μετρήσεις του ρεύματος του πηνίου ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Κάθε φορά που έχουμε μια καινούρια μέτρηση, αν η τιμή υπερβαίνει το μέγιστο ρεύμα τότε διακόπτουμε την τροφοδοσία. Διαφορετικά τροφοδοτούμε κανονικά. Αυτή η τεχνική αποδεικνύεται ότι συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή και είναι ιδιαίτερα απλή. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι οι αρμονικές συχνότητες που εισάγονται στο σύστημα μπορούν να προκύψουν σε συχνότητες αρκετά χαμηλότερες από την συχνότητα που γίνονται οι μετρήσεις και δεν είναι σταθερές. Αυτό ενδέχεται να προκαλέσει θόρυβο και ταλαντώσεις στον κινητήρα. Η τεχνική αυτή λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς της είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως για αυτόν τον σκοπό.

Σε αυτό το στάδιο έχουμε σχεδιάσει το κύκλωμα οδήγησης του κάθε τυλίγματος. Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει ολόκληρο το στάδιο ισχύος και δέχεται μία είσοδο και μία έξοδο:

Η **είσοδος** είναι ένα ψηφιακό σήμα τάσης και η **έξοδος** ένα αναλογικό σήμα τάσης.

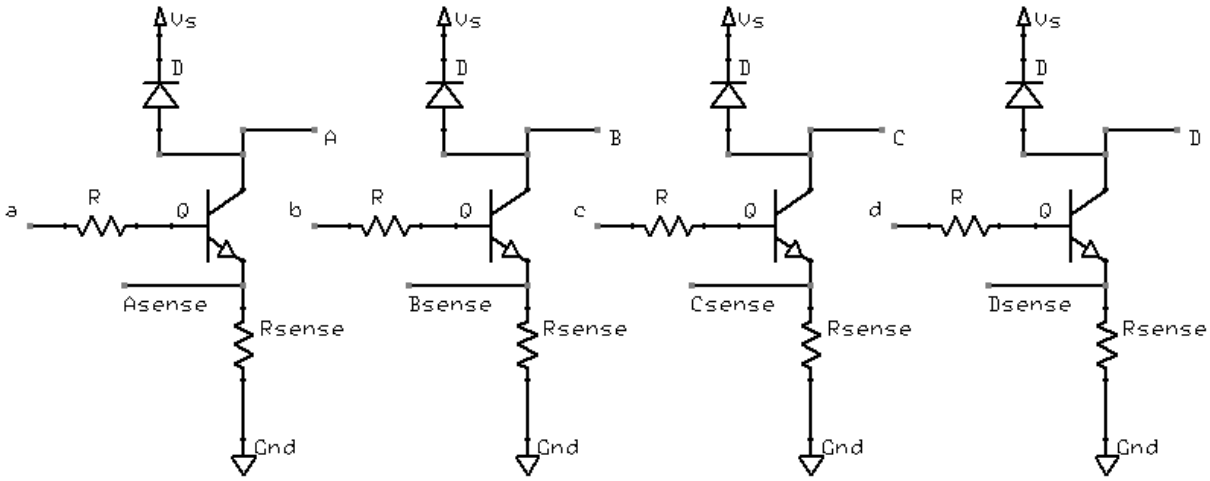
3.2.4 Διασύνδεση Κινητήρα

Όπως έχουμε δει σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο τρόπος να οδηγήσουμε έναν βηματικό κινητήρα είναι να του εφαρμόσουμε την κατάλληλη αλληλουχία παλμών στα τυλίγματά του. Στους μονοπολικούς κινητήρες τα τυλίγματα αυτά είναι τέσσερα, και η συνδεσμολογία όπως βλέπουμε στο σχήμα.



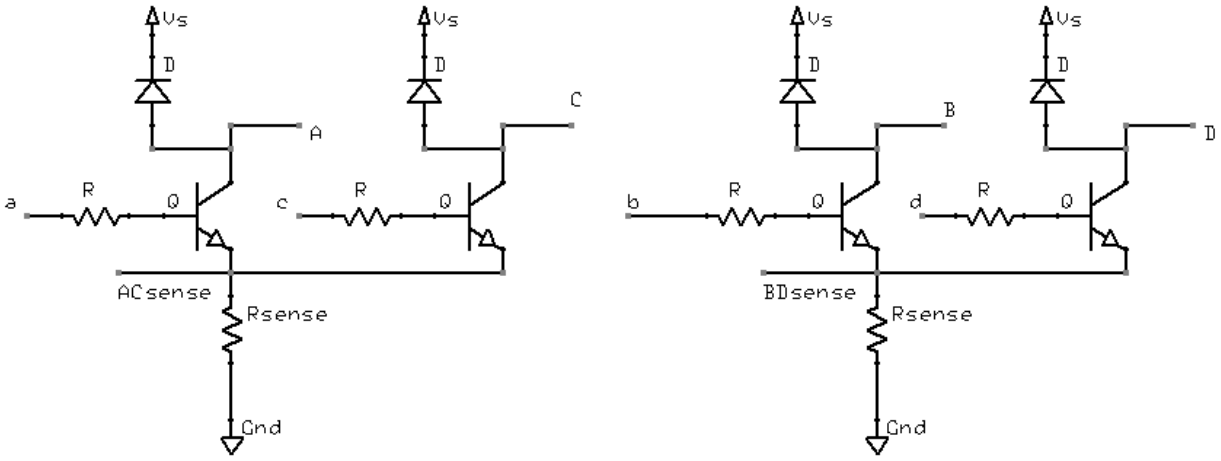
Σχήμα 3.5: Διασύνδεση και ροή ρεύματος σε βηματικό κινητήρα

Παρατηρούμε ότι το κέντρο του κάθε διπλού τυλίγματος έχει συνδεθεί στην τάση τροφοδοσίας. Βλέπουμε και την φορά του ρεύματος στο κάθε μισό των τυλιγμάτων η οποία αν και προκαλεί αντίθετο μαγνητικό πεδίο στον ρότορα, εξέρχεται από τους ακροδέκτες **A,B,C,D** πάντα με την ίδια διεύθυνση. Επομένως, το κάθε μισό των τυλιγμάτων μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ξεχωριστό πηνίο και να τροφοδοτηθεί με το κύκλωμα που δείξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το κύκλωμα αυτό δέχεται ένα σήμα εισόδου και τροφοδοτεί το πηνίο όταν αυτό το σήμα βρίσκεται σε υψηλή στάθμη τάσης. Θα ονομάσουμε τα σήματα αυτά όπως και τα τυλίγματα που ελέγχουν: **a**,**b**,**c**,**d**. Προκύπτουν τα κάτωθι κυκλώματα:



Σχήμα 3.6: Κύκλωμα οδήγησης κινητήρων

Επειδή τα τυλίγματα A,C και B,D δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα ενεργοποιημένα, μπορούμε να ενώσουμε τους εκπομπούς των τρανζίστορ που τα ελέγχουν και να χρησιμοποιήσουμε κοινό σήμα μέτρησης ρεύματος:



Σχήμα 3.7: Διασύνδεση εξόδων μέτρησης ρεύματος

3.2.5 Αλληλουχία διεγέρσεων – Στάδιο σήματος

Σύμφωνα με προηγούμενο κεφάλαιο όπου είδαμε τους τρόπους διέγερσης ενός βηματικού κινητήρα, για οδήγηση πλήρους βήματος η αλληλουχία των ενεργοποιούμενων τυλιγμάτων είναι η εξής:

A	**B**	**C**	**D**
B	**C**	**D**	**A**

Παρατηρούμε ότι σε κάθε στάδιο δύο τυλίγματα είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένα. Οι καταστάσεις αυτές επαναλαμβάνονται κυκλικά. **Όταν θέλουμε ο κινητήρας να κινηθεί δεξιόστροφα κινούμαστε προς τα δεξιά στον ανωτέρω πίνακα. Για αριστερόστροφη περιστροφή κινούμαστε προς τα αριστερά**.

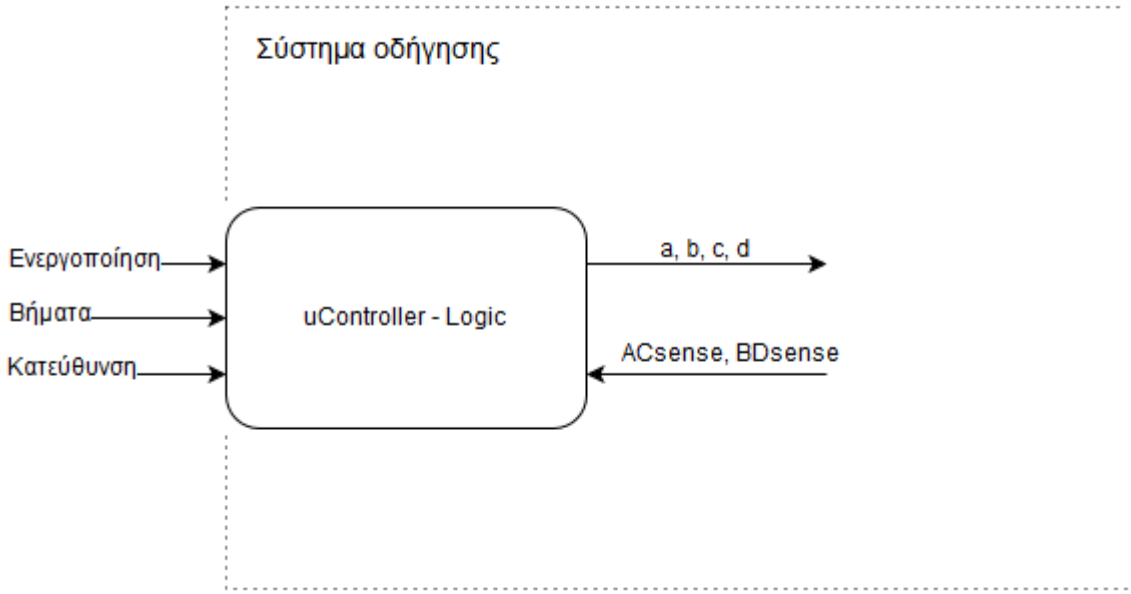
Εφόσον το κάθε τύλιγμα ενεργοποιείται όταν το σήμα εισόδου του είναι σε υψηλή στάθμη, ο πίνακας διαδοχικών καταστάσεων μετασχηματίζεται στον εξής πίνακα για τα σήματα ελέγχου:

Σήμα				
a	H	L	L	H
b	H	H	L	L
c	L	H	H	L
d	L	L	H	H

Όπου H: Υψηλή στάθμη, L: χαμηλή στάθμη

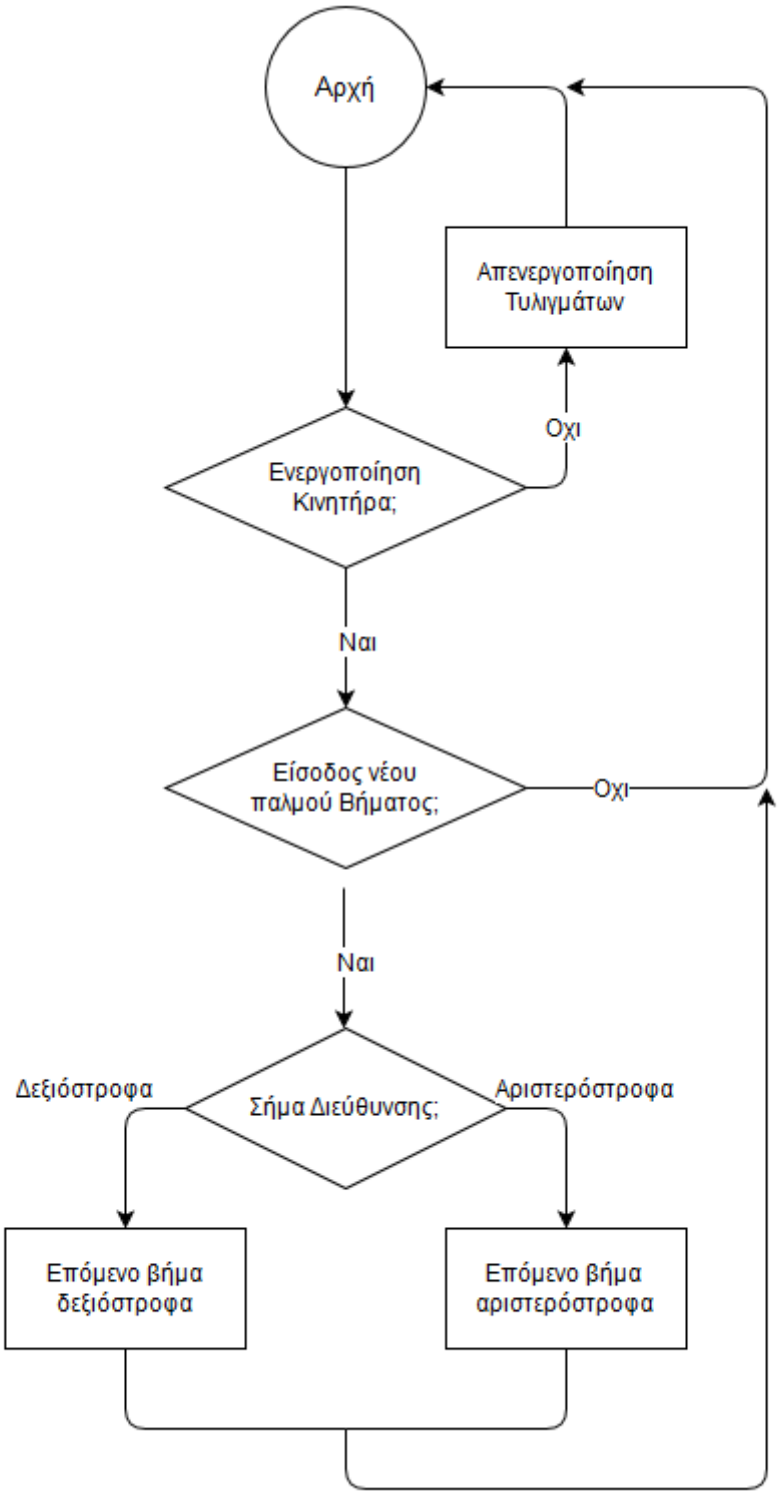
3.2.6 Λογική Συστήματος οδήγησης

Σε αυτό το σημείο πρέπει να κατασκευάσουμε την λογική του κυκλώματος οδήγησης. Η λογική αυτή θα εκτελείται από ένα ψηφιακό μικροεπεξεργαστή, και είναι εξολοκλήρου στο στάδιο σήματος. Πρόκειται για το σύστημα που δέχεται τις εξωτερικές εντολές ελέγχου σύμφωνα με το πρωτόκολλο διεπαφής που έχουμε κατασκευάσει και παράγει τα εσωτερικά σήματα για να οδηγήσει τα διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα.



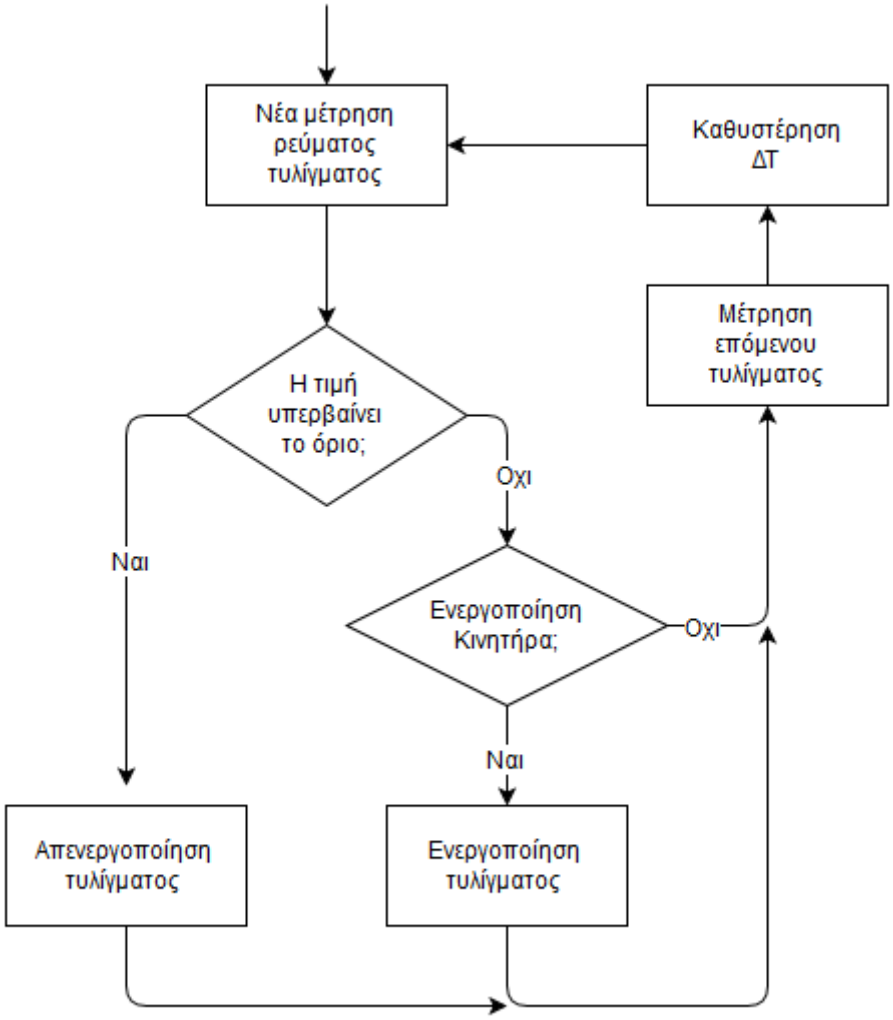
Σχήμα 3.8: Σύστημα οδήγησης κινητήρα

Η λογική του συστήματος περιγράφεται από τα επόμενα διαγράμματα ροής:



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ροής συστήματος οδήγησης κινητήρα

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής του ελέγχου του ρεύματος των τυλιγμάτων. Είναι ανεξάρτητο από το υπόλοιπο πρόγραμμα καθώς οι μετατροπές του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό γίνονται ασύγχρονα και ο έλεγχος του προγράμματος περνάει στην αντίστοιχη ρουτίνα αυτόματα κάθε φορά που μία νέα μέτρηση είναι έτοιμη. Κάθε προσπέλαση του διαγράμματος αφορά την μέτρηση για ένα τύλιγμα – ή για ένα ζευγάρι τυλιγμάτων σύμφωνα με την διασύνδεση που κάναμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα ροής συστήματος ελέγχου ρεύματος τυλιγμάτων

Το επιτρεπόμενο όριο για την τιμή του ρεύματος των κυκλωμάτων μπορεί να είναι προαποφασισμένη κατά τον προγραμματισμό του μικροΕλεγκτή ή μπορεί να δίνεται σε αυτόν με την μορφή αναλογικού σήματος αναφοράς. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να αξιοποιήσουμε ένα ακόμη κανάλι του μετατροπέα από αναλογικά σε ψηφιακά, και να χρησιμοποιήσουμε έναν διαιρέτη τάσης ή ένα ποτενσιόμετρο για να θέσουμε την τιμή αυτή.

3.2.7 Πρόγραμμα μικροΕλεγκτή

Σε αυτό το σημείο πρέπει να υλοποιήσουμε την λογική του συστήματος οδήγησης ως πρόγραμμα του μικροΕλεγκτή. Όπως έχω αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχουμε επιλέξει την οικογένεια **AVR** της εταιρείας **ATMEL**, και συγκεκριμένα τον **ATmega32.**

Ο αλγόριθμος αναλαμβάνει σε κάθε νέο παλμό βήματος που δέχεται να μεταβάλλει την κατάσταση των τυλιγμάτων. Επειδή όπως έχουμε πει, λογαριάζουμε ως νέο παλμό την κάθε θετική ακμή στο σήμα των βημάτων, η υλοποίηση χρησιμοποιεί **σήματα διακοπών επεξεργαστή**. Αυτό μας επιτρέπει να εκτελέσουμε συγκεκριμένα τμήματα κώδικα κάθε φορά που συμβαίνει κάποιο γεγονός, ανεξάρτητα από το σημείο του κώδικα που εκτελούνταν προηγουμένως. Έτσι καταφέρνουμε μια μορφή παράλληλου προγραμματισμού όπου το σύστημά μας έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί και να διευθετήσει ασύγχρονα γεγονότα, χωρίς αυτό να καταλαμβάνει χρόνο εκτέλεσης για την παρακολούθησή τους.

Με όμοιο τρόπο έχουμε αντιμετωπίσει και την μέτρηση των αναλογικών μεγεθών. Εκεί έχουμε ορίσει συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στα οποία πυροδοτείται και από μία μέτρηση. Όταν πλέον η μέτρηση είναι έτοιμη, ο αντίστοιχος κώδικας αναλαμβάνει να την επεξεργαστεί διακόπτοντας την προηγούμενη εκτέλεση.

Μάλιστα, ολόκληρη η λογική του αλγόριθμού μας είναι δομημένη στις ρουτίνες εξυπηρέτησης των σημάτων διακοπών. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτούμε την φύση του συστήματος, η οποία καθορίζει δράσεις μόνο κάθε φορά που συμβαίνει ένα γεγονός στα σήματα ελέγχου.

Ας δούμε αναλυτικά τα τμήματα του κώδικα:

Αρχικά εισάγουμε τις απαραίτητες βιβλιοθήκες που θα χρησιμοποιήσουμε και ορίζουμε την συχνότητα ρολογιού του μικροΕλεγκτή:

```
#define F_CPU 16000000UL
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <inttypes.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
```

Κώδικας 3.1

Αυτό είναι το υπόμνημα για τις συνδέσεις των διάφορων κυκλωματικών στοιχείων στους ακροδέκτες του μικροελεγκτή:

```
//=====================================================
//PHYSICAL CONNECTIONS:
//=====================================================
/*
INPUTS:
PC pulses (steps) int0 (PIND2)
PC direction bit PIND0
PC enable bit PIND1

ACsense: ADC0 - PINA0
BDsense: ADC1 - PINA1


OUTPUTS:
motor coils signals:
a: PINB0
c: PINB1
b: PINB2
d: PINB3
*/
```

Κώδικας 3.2

Παρακάτω έχουμε την δήλωση των διάφορων σταθερών που διαχειρίζεται το πρόγραμμα:

```
//=====================================================
//CONSTANTS:
//=====================================================
#define COIL_A                (1 << 0)
#define COIL_C                (1 << 1)
#define COIL_B                (1 << 2)
#define COIL_D                (1 << 3)

#define STATE1                (COIL_A | COIL_B)
#define STATE2                (COIL_B | COIL_C)
#define STATE3                (COIL_C | COIL_D)
#define STATE4                (COIL_D | COIL_A)


#define DIRECTION_RIGHT       (PIND & 1)
#define DIRECTION_LEFT        !(PIND & 1)

#define MOTOR_ENABLED         (PIND & (1<<1))
#define DISABLE_COILS()       PORTB &= 0xF0

#define SENSE_AC              0
#define SENSE_BD              1
#define AC_MASK               (COIL_A | COIL_C)
#define BD_MASK               (COIL_B | COIL_D)
#define CURRENT_LIMIT         100
#define ADC_PRESCALER         50
```

Κώδικας 3.3

Στην συνέχεια ορίζουμε τις παγκόσμιες μεταβλητές:

```
//=====================================================
//GLOBAL VARIABLES:
//=====================================================
volatile int8_t motorState = STATE1;
```

Κώδικας 3.4

Και συνεχίσουμε με τις συναρτήσεις. Πρώτη είναι η ρουτίνα εξυπηρέτησης σήματος διακοπής από έλευση νέου παλμού βήματος:
Η ρουτίνα αυτή αλλάζει την κατάσταση του κινητήρα κάθε φορά που δέχεται ένα νέο σήμα βήματος, ανάλογα με την καθορισμένη διεύθυνση κίνησης. Υλοποιεί τον πίνακα καταστάσεων τροφοδοσίας των τυλογμάτων που είδαμε νωρίτερα.

```
//=====================================================
//FUNCTIONS:
//=====================================================
//Interrupt service routine, new step pulse arrived
ISR(INT0_vect,ISR_NOBLOCK){

      if (!MOTOR_ENABLED){
            return;
      }
      if DIRECTION_RIGHT{
            if      (motorState == STATE1) motorState = STATE2;
            else if(motorState == STATE2) motorState = STATE3;
            else if(motorState == STATE3) motorState = STATE4;
            else if(motorState == STATE4) motorState = STATE1;
      }
      else {
            if      (motorState == STATE1) motorState = STATE4;
            else if(motorState == STATE2) motorState = STATE1;
            else if(motorState == STATE3) motorState = STATE2;
            else if(motorState == STATE4) motorState = STATE3;
      }


      PORTB = (PORTB & 0xF0) | motorState;
      return;
}
```

Κώδικας 3.5

Επόμενη συνάρτηση η ρουτίνα εξυπηρέτησης σήματος διακοπής από την ολοκλήρωση μίας αναλογικής μέτρησης. Ο καταχωρητής **ADMUX** περιέχει το ενεργό κανάλι του μετατροπέα.

```
//New measurement for the coil current
ISR (ADC_vect){

      if (!MOTOR_ENABLED){
            return;
      }

      int8_t currentMeasurement = ADCH;

      if ((ADMUX & 0x0F) == SENSE_AC) {
            if (currentMeasurement > CURRENT_LIMIT){
                  PORTB &= ~AC_MASK;
            } else {
                  PORTB |= (motorState & AC_MASK);
            }
            ADMUX &= 0xF0;
            ADMUX |= SENSE_BD;
      } else if ((ADMUX & 0x0F) == SENSE_BD){
            if (currentMeasurement > CURRENT_LIMIT){
                  PORTB &= ~BD_MASK;
            } else {
                  PORTB |= (motorState & BD_MASK);
            }
            ADMUX &= 0xF0;
            ADMUX |= SENSE_AC;
      }
}
```

Κώδικας 3.6

Η ρουτίνα αυτή αναλαμβάνει να διακόψει την τροφοδοσία του αντίστοιχου τυλίγματος όταν η τιμή του ρεύματος υπερβεί το όριο που έχουμε θέσει, μέχρι την επόμενη φορά που θα εκτελεστεί και θα μετρηθεί η τιμή του ρεύματος εκ νέου.

Στην συνέχεια ακολουθούν οι συναρτήσεις ρύθμισης και αρχικοποίησης των διάφορων περιφερειακών του μικροΕλεγκτή:

```
void configure_ADC() {
      ADMUX  =  (0<<REFS1)
             |  (1<<REFS0)
             |  (1<<ADLAR)
             |  SENSE_AC;

      ADCSRA = (1<<ADATE)
             | (1<<ADEN)
             | (1<<ADIE)
             | (128);

      SFIOR = (3<<ADTS0);
}
```

Κώδικας 3.7

```
void configure_timer1() {
      TCCR1A = (0<<WGM10)
             | (0<<WGM11);

      TCCR1B = (1<<WGM12)
             | (1<<CS10)
             | (1<<CS11)
             | (0<<CS12);


      OCR1A = ADC_PRESCALER;
      OCR1B = OCR1A;

      TIMSK |= OCIE1B;
}
```

Κώδικας 3.8

```
void configure_IO() {
      DDRB =  0xFF;
      DDRD =  0;
      PORTD = 0xFF;

      //configuring the external interrupts settings
      MCUCR = (3<<ISC00);
      GICR  = (1<<INT0);

      sei();
}
```

Κώδικας 3.9

Οι ρουτίνες αυτές ρυθμίζουν και αρχικοποιούν τα διάφορα περιφερειακά του μικροελεγκτή

Τέλος βλέπουμε την κύρια ρουτίνα **main**:

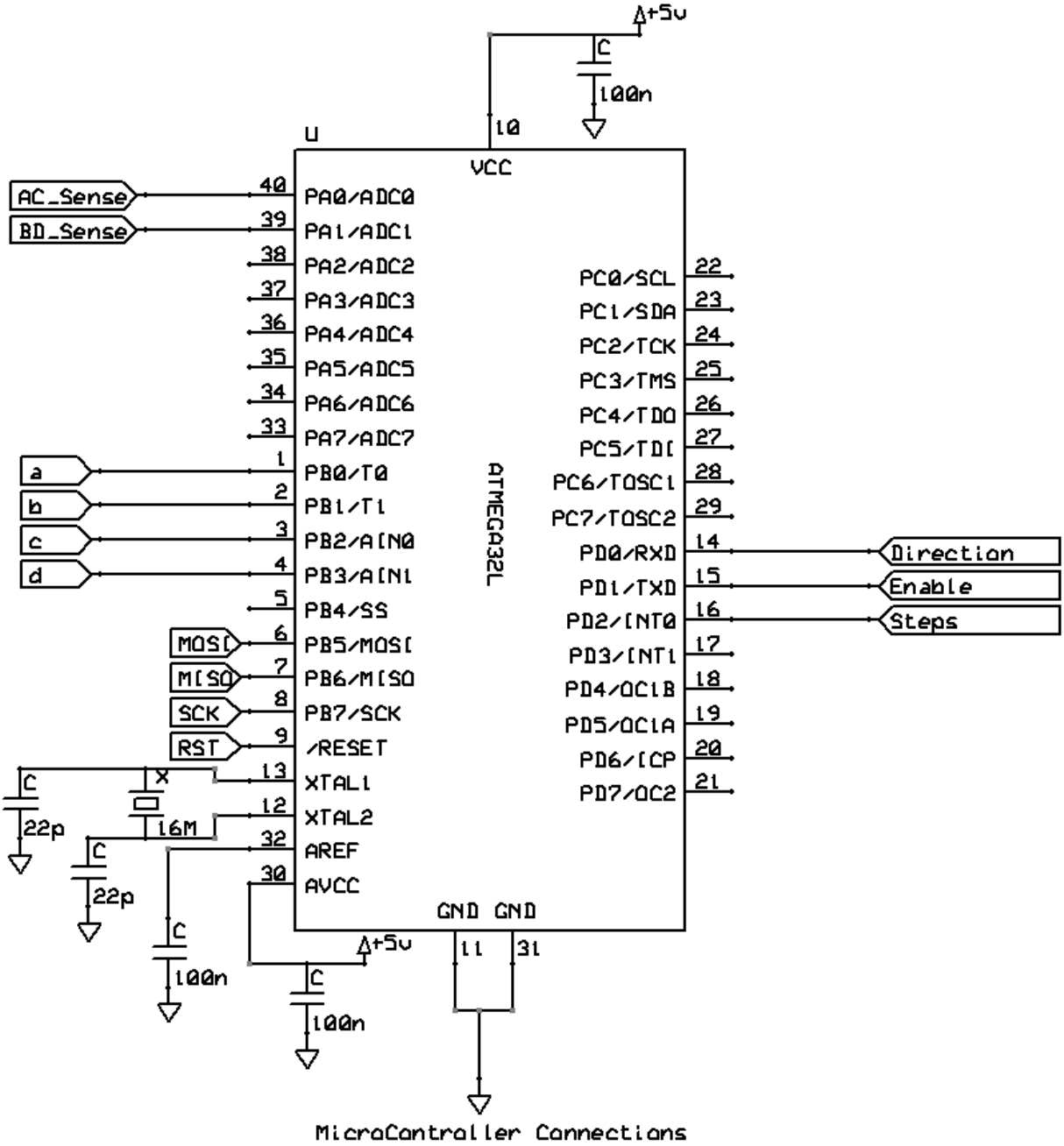
```
//=====================================================
//MAIN:
//=====================================================
int main(void)
{
    configure_ADC();
    configure_timer1();
    configure_IO();

    while(1)
    {
            if(!MOTOR_ENABLED) DISABLE_COILS();
    }
}
```

Κώδικας 3.7

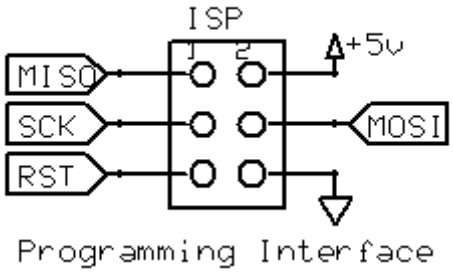
Εφόσον χρησιμοποιούμε διακοπές συστήματος, λίγα πράγματα υλοποιούνται από την κύρια ρουτίνα του συστήματος. Ουσιαστικά φροντίζει να αρχικοποιήσει τα περιφερειακά καλώντας τις κατάλληλες ρουτίνες και εισέρχεται σε έναν ατέρμονα βρόχο κατά τον οποίο ελέγχει μόνο αν έχει δοθεί σήμα απενεργοποίησης των κινητήρων ώστε να δράσει καταλλήλως. Αυτό αποτελεί και μία μορφή ελέγχου ασφαλείας. Είναι σημαντικό η ρουτίνα αυτή να μην ολοκληρώσει την εκτέλεσή της ποτέ, γιατί αλλιώς παύει να λειτουργεί ο μικροελεγκτής.

3.2.8 Ηλεκτρονικό κύκλωμα

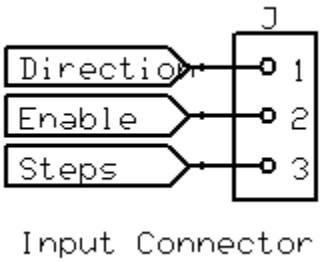
Ας δούμε πώς έχει διαμορφωθεί το ηλεκτρονικό κύκλωμα του συστήματος οδήγησης:



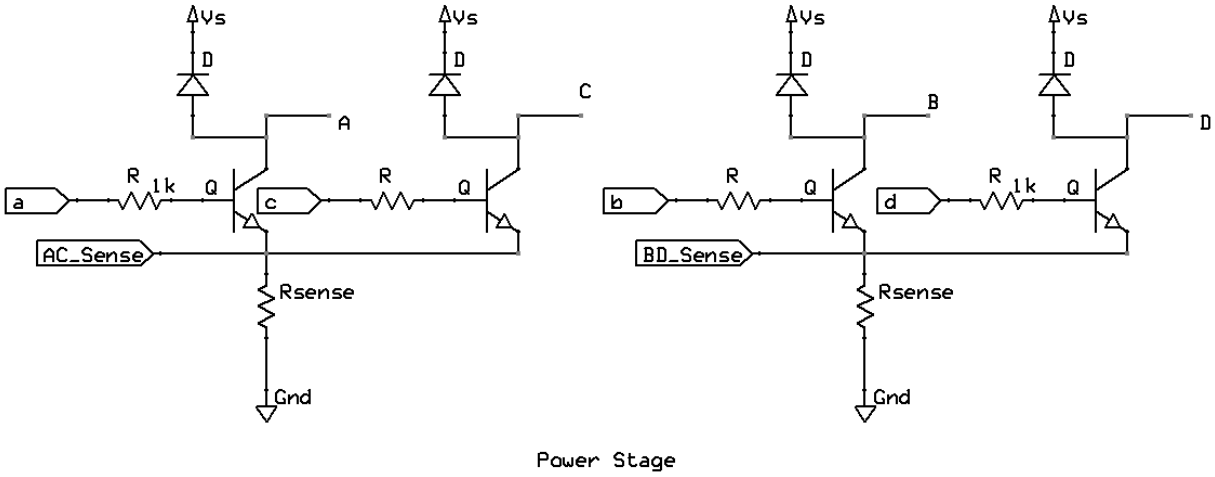
Σχήμα 3.11: Κυκλωματική διασύνδεση μικροελεγκτή



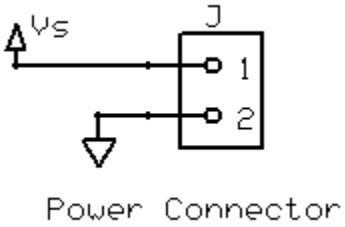
Σχήμα 3.12: Ακροδέκτης προγραμματισμού μικροελεγκτή



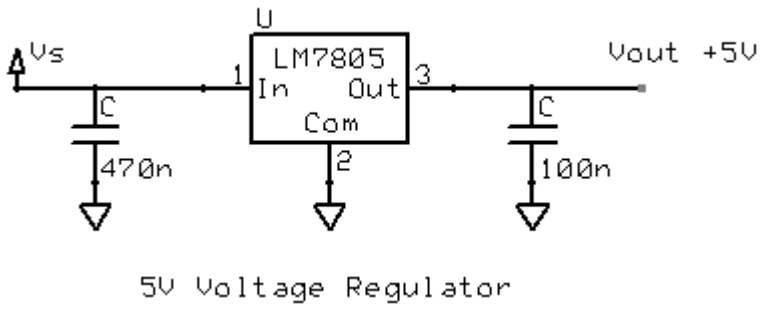
Σχήμα 3.13: Ακροδέκτης εξόδου συστήματος οδήγησης κινητήρα



Σχήμα 3.14: Κύκλωμα οδήγησης τυλιγμάτων



Σχήμα 3.15: Ακροδέκτης τροφοδοσίας



Σχήμα 3.16: Κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης

3.3 Έλεγχος και Οδήγηση Θερμαντικού Κεφαλής

3.3.1 Στοιχεία, είσοδοι και έξοδοι του υποσυστήματος

Το υποσύστημα της Κεφαλής είναι υπεύθυνο για την επίτευξη και διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας του υλικού που εξωθείται, και για την πρόωσή του. Η πρόωση του πλαστικού, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται με την χρήση ενός κινητήρα. Εφ' όσον έχουμε καλύψει την οδήγηση κινητήρων στα προηγούμενα, σε αυτό το σημείο θα μας απασχολήσει η οδήγηση του θερμαντικού στοιχείου. Ας δούμε τα βασικά στοιχεία που θα πρέπει να απαρτίζουν το σύστημα οδήγησης:

- Ελεγκτής
- Ηλεκτρονικά οδήγησης θερμαντικού στοιχείου
- Θερμαντικό στοιχείο
- Αισθητήρας θερμοκρασίας

Η **είσοδος** του συστήματος οδήγησης του θερμαντικού στοιχείου της κεφαλής είναι η **επιθυμητή θερμοκρασία** του θερμού άκρου. Εφόσον η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης κάνει χρήση συγκεκριμένου θερμοπλαστικού υλικού, το θερμοκρασιακό σημείο λειτουργίας της συσκευής που επιτρέπει την ορθή λειτουργία της είναι συγκεκριμένη και αποτελεί χαρακτηριστική σταθερά του θερμοπλαστικού. Επομένως, η τιμή της δεν είναι κάτι που αλλάζει δυναμικά και καθορίζεται από ένα εξωτερικό σύστημα όπως στην περίπτωση οδήγησης των κινητήρων που είδαμε νωρίτερα. Συμπερασματικά, το σύστημα οδήγησης του θερμαντικού αποτελεί ένα **αυτόνομο σύστημα** που δεν χρειάζεται είσοδο. Φυσικά, μπορεί να δοθεί η δυνατότητα μικρορυθμίσεων την επιθυμητής θερμοκρασίας από τον χρήστη ή από άλλο ψηφιακό σύστημα.

Εφόσον η θερμοκρασία του πλαστικού είναι καθοριστικής σημασίας για την ορθή λειτουργία του τρισδιάστατου εκτυπωτή, είναι απαραίτητο τα συστήματα ανώτερου επιπέδου να λαμβάνουν κάποια ανάδραση από τος σύστημα ελέγχου της. Έτσι, η **έξοδος** του συστήματος θα είναι ένα ψηφιακό σήμα ένδειξης επίτευξης της επιθυμητής θερμοκρασίας. Όταν το θερμό άκρο βρίσκεται σε μία περιοχή εντός μίας επιτρεπτής τιμής σφάλματος από την επιθυμητή θερμοκρασία, το σήμα αυτή θα μεταβαίνει στην υψηλή στάθμη. Διαφορετικά θα βρίσκεται σε χαμηλή στάθμη.

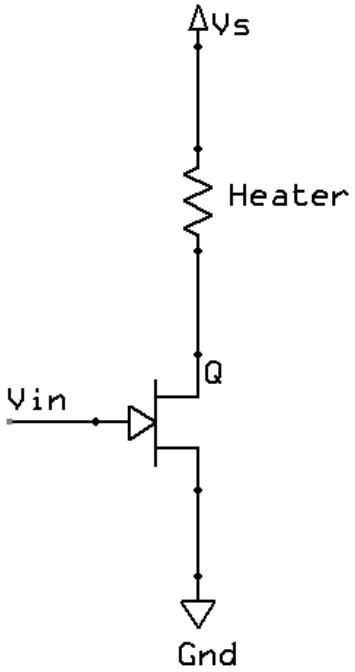
Όπως και στα προηγούμενα, θα αρχίσουμε την ανάλυσή μας από το κατώτερο επίπεδο

3.3.2 Ηλεκτρονικά οδήγησης αντιστάτη ισχύος

Το θερμαντικό σώμα, όπως έχουμε ξαναδεί, είναι ένα ιδιαίτερα απλό κυκλωματικό στοιχείο: Συνίσταται από έναν απλό αντιστάτη. Επομένως τα μόνα χρήσιμα για εμάς στοιχεία που το χαρακτηρίζουν είναι:

- Αντίσταση
- Ισχύς (Μέγιστη επιτρεπόμενη)

Επειδή η ισχύς που θα χρειαστούμε είναι αρκετά μεγάλη και επειδή ο έλεγχος θα γίνει από ψηφιακά κυκλώματα χαμηλής ισχύος, όπως και στην περίπτωση των κινητήρων, θα χρειαστούμε κάποιο τρανζίστορ για να οδηγήσουμε το φορτίο ισχύος από ένα ψηφιακό υποκύκλωμα. Επιλέγουμε ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου MOSFET.



Σχήμα 3.17: Κύκλωμα οδήγησης αντιστάτη ισχύος

Παρατηρούμε ότι η σχεδίαση θυμίζει αρκετά αυτήν για την οδήγηση ενός πηνίου.
Να σημειώσουμε ότι τα ωμικά φορτία δεν παρουσιάζουν μεταβατικά φαινόμενα όπως τα επαγωγικά και έτσι δεν είναι απαραίτητη η χρήση διόδου παράλληλά με το θερμαντικό στοιχείο στις περιπτώσεις που εφαρμόζουμε διακοπτόμενη διέγερση. Ωστόσο, κάποιοι αντιστάτες είναι κατασκευασμένοι με περιέλιξη σύρματος και παρουσιάζουν κάποιο παρασιτικό συντελεστή αυτεπαγωγής. Σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν συνετή η χρήση διόδου.

Ας μελετήσουμε όμως την έξοδο του κυκλώματος σε ισχύ. Η ισχύς ενός αντιστάτη προκύπτει από τον νόμο του Joule ως:

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R} \qquad [Watts]$$

Από το σχήμα προκύπτει ότι δεν έχουμε έλεγχο στην τιμή της τάσης τροφοδοσίας. Επομένως θα πρέπει να ελέγξουμε το ρεύμα που διαρρέει τον αντιστάτη ή να καταφύγουμε σε κάποια άλλη λύση. Θυμίζω ότι στα διπολικά τρανζίστορ θα μπορούσαμε να καθορίσουμε την τιμή του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο ρυθμίζοντας την τιμή του ρεύματος που εισέρχεται από την βάση του. Αυτό όμως

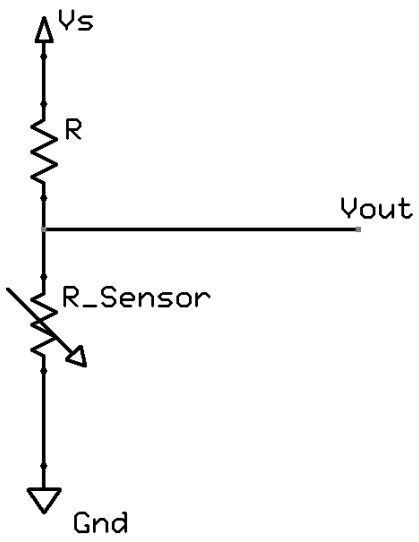
θα σήμαινε ότι και η τάση Vin θα ήταν ένα αναλογικό σήμα. Επίσης οποιοσδήποτε αναλογικό τρόπος οδήγησης, θα αύξανε σημαντικά την ποσότητα ισχύος που καταναλώνεται στο εσωτερικό του τρανζίστορ και όχι στον αντιστάτη. Αυτό θα δυσκόλευε την κατασκευή του κυκλώματος καθώς θα έπρεπε να ψυχθεί το στοιχείο και θα αύξανε τις απαιτήσεις σε υλικό.

Αντίθετα, θα καταφύγουμε σε ψηφιακό έλεγχο

3.3.3 Ηλεκτρονικά διασύνδεσης αισθητήρα

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας τύπου NTC θερμίστορ πρόκειται κυκλωματικά για έναν απλό αντιστάτη, η αντίσταση του οποίου μεταβάλλεται σε σχέση με την θερμοκρασία του περιβάλλοντός της. Επομένως το μέγεθος το οποίο καλούμαστε να μετρήσουμε είναι η τιμή της αντίστασης. Ωστόσο, τα στοιχεία που έχουμε μας διευκολύνουν στην μέτρηση σημάτων τάσεων. Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να μετατρέψουμε την αντίσταση σε τάση.

Ένας απλός τρόπος για να γίνει αυτό είναι να τοποθετήσουμε την μετρούμενη αντίσταση σε έναν **διαιρέτη τάσης**, και να λάβουμε την τάση στα άκρα του ως σήμα εξόδου:



Σχήμα 3.18: Κύκλωμα διασύνδεσης αισθητήρα θερμοκρασίας

Για την τάση εξόδου ισχύει:

$$Vout = Vs\frac{Rsensor}{R + Rsensor} \qquad [Volts]$$

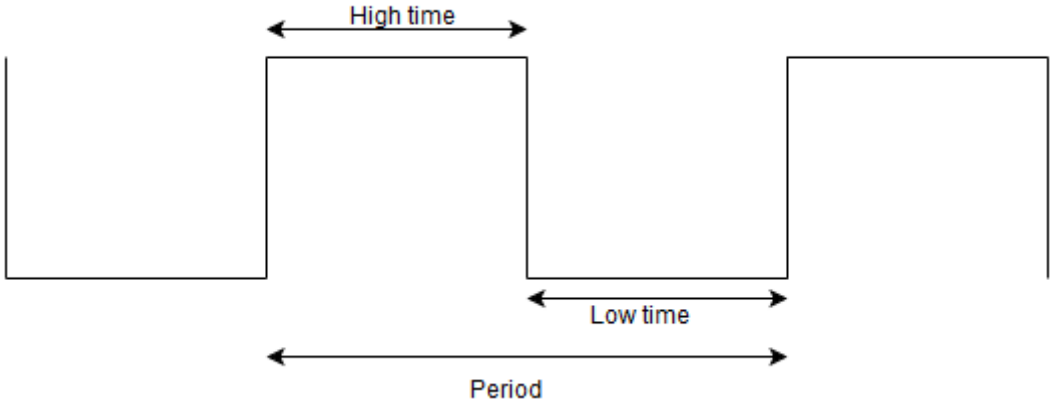
Με το κύκλωμα αυτό έχουμε καταφέρει να μετατρέψουμε την αντίσταση σε τάση, αφού τα υπόλοιπα στοιχεία που εμφανίζονται στην σχέση είναι σταθερά.

Η παραπάνω σχέση γενικά δεν είναι γραμμική. Ωστόσο, παρουσιάζει το σημείο καμπής της στην κατάσταση όπου έχουμε R_{sensor} = R. Επομένως, επιλέγοντας κατάλληλη τιμή αντίστασης για τον αντιστάτη R μπορούμε να φέρουμε το επιθυμητό σημείο λειτουργίας του κυκλώματος (επιθυμητή θερμοκρασία) στο γραμμικό σημείο της συνάρτησης εξόδου. Έτσι η θερμοκρασιακή περιοχή γύρω από την οποία κάνουμε τον έλεγχό μας θα παρουσιάζει κάποια γραμμικότητα. Βέβαια, έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι η γραμμικότητα των αισθητήρων σε προβλήματα ρύθμισης κάποιου μεγέθους δεν χρήζει ιδιαίτερης σημασίας.

3.3.4 Τεχνική Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών (PWM)

Η τεχνική διαμόρφωσης πλάτους παλμών είναι μία τεχνική για την σύνθεση διαφόρων κυματομορφών με την χρήση τετραγωνικών παλμοσειρών σταθερής συχνότητας.

Η περίοδος μίας τετραγωνικής παλμοσειράς είναι η διάρκεια κατά την οποία το σήμα κάνει έναν πλήρη κύκλο υψηλής και χαμηλής στάθμης. Το ποσοστό χρόνου της περιόδου κατά τον οποίο η παλμοσειρά βρίσκεται σε υψηλή στάθμη τον ονομάζουμε **κύκλο υπηρεσίας (duty cycle)**.



Σχήμα 3.19: Κύκλος Υπηρεσίας παλμοσειράς

$$Duty\ Cycle = \frac{High\ time}{Period} = \frac{High\ time}{High\ time + Low\ time}$$

Η τεχνική που περιγράφουμε συνίσταται στην ρύθμιση της στιγμιαίας τιμής του κύκλου υπηρεσίας με τέτοιο τρόπο ώστε να καθορίζουμε την στιγμιαία μέση τιμή του σήματος. Θυμίζω την ανάλυση ενός περιοδικού σήματος σε σειρές Fourier:

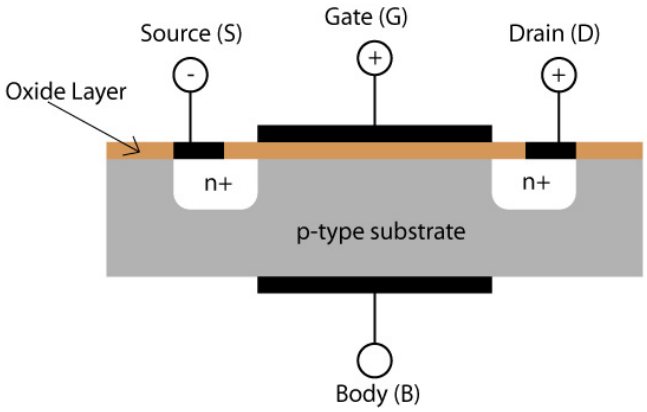
$$f(x) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\frac{n\pi x}{L}) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(\frac{n\pi x}{L})$$

Ο πρώτος όρος του αθροίσματος είναι η **σταθερή συνιστώσα,** ή αλλιώς **μέση τιμή** του σήματος. Οι περιοδικοί όροι έχουν όλοι μέση τιμή μηδενική και συχνότητες μεγαλύτερες ή ίσες της διακοπτικής συχνότητας της παλμοσειράς. Έτσι, αν φροντίσουμε η διακοπτική συχνότητα να είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν του σήματος που θέλουμε να κατασκευάσουμε, μπορούμε να φιλτράρουμε κατάλληλα το σήμα εξόδου και να απομονώσουμε μόνο το επιθυμητό. Επί πλέον, για κάποιες εφαρμογές με αργά μεταβαλλόμενα φορτία η επίδραση της διακοπτικής συχνότητας μπορεί να μην επηρεάζει καν τα φορτία που τροφοδοτούνται από αυτό. Η θέρμανση ενός σώματος είναι ένα από αυτά.

Η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος λειτουργεί ως αδρανειακή δύναμη που αντιτίθεται στις απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του, με παρόμοιο τρόπο όπως η μάζα ενός σώματος αντιτίθεται στις μεταβολές την κινητικής του κατάστασης. Έτσι, αν η παροχή θερμότητας παρουσιάζει αρμονικές συχνότητες της τάξης πολλών εκατοντάδων Hz, ένα σώμα με συγκριτικά υψηλή θερμοχωρητικότητα δεν θα εμφανίσει καμία αντίδραση στην επιρροή αυτής.

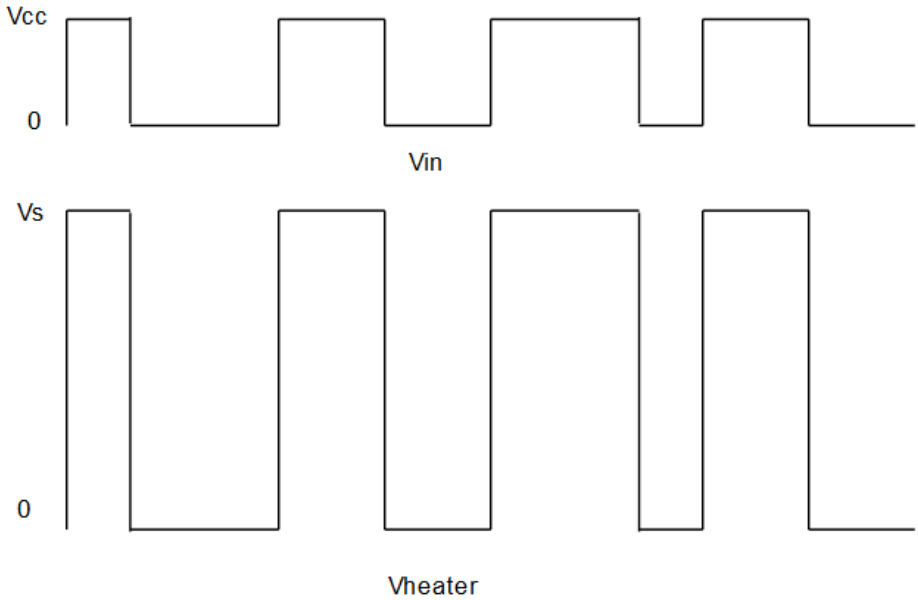
3.3.5 Εφαρμογή της τεχνικής στο θερμαντικό στοιχείο

Ας επανέλθουμε στο κύκλωμα τροφοδοσίας του αντιστάτη. Το τρανζίστορ MOSFET N-καναλιού είναι ένα διακοπτικό στοιχείο τάσης, το οποίο οδηγείται στην κατάσταση αγωγής όταν η τάση στην πύλη του είναι μεγαλύτερη από αυτήν της πηγής. Διαφορετικά βρίσκεται στην κατάσταση αποκοπής.



Σχήμα 3.20: Δομή Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου

Εάν εφαρμόσουμε μια παλμοσειρά στην πύλη του τρανζίστορ, η τάση στα άκρα του αντιστάτη θα έχει την ίδια ακριβώς μορφή. Εφόσον η θέρμανση της κεφαλής είναι μια αρκετά αδρανής διαδικασία, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τάση που δέχεται το φορτίο ανά πάσα χρονικής στιγμή, είναι ίση με την μέση τιμή της τάσης στα άκρα του. Ας υπολογίσουμε την τιμή αυτή.



Σχήμα 3.21: Σήματα εισόδου και εξόδου του τρανζίστορ

Εφόσον η μέση τιμή ενός σήματος ισούται με το ολοκλήρωμα του σήματος σε μία περίοδο, προς την διάρκεια της περιόδου, η μέση τιμή ενός σήματος είναι ίση με την τιμή του κύκλου υπηρεσίας επί την μέγιστη τιμή

$$V_{average} = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt$$

$$= \frac{1}{Period}\int_0^{High\ time} Vs\ dt + \frac{1}{Period}\int_{High\ time}^{Period} 0\ dt$$

$$= \frac{1}{Period} Vs * High\ time$$

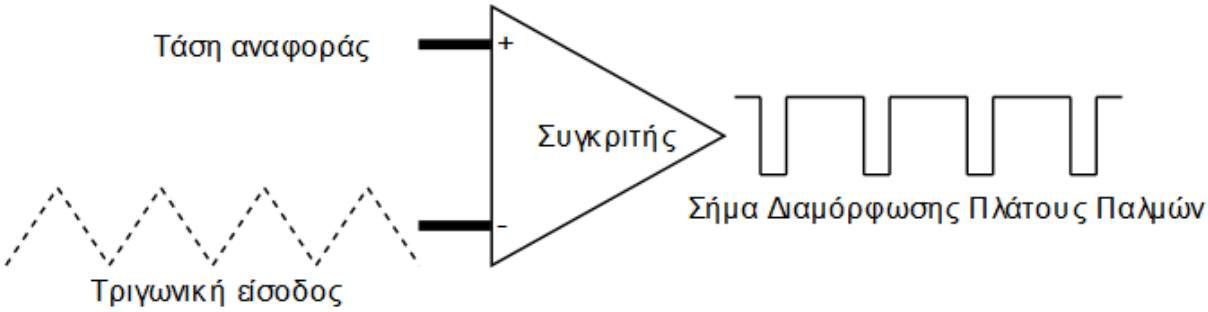
$$V_{heater} = V_{average} = \ Duty\ Cycle * Vs \qquad [Volts]$$

Επομένως, ρυθμίζοντας τον κύκλο υπηρεσίας του σήματος χαμηλής ισχύος που τροφοδοτούμε στο τρανζίστορ, ρυθμίζουμε ουσιαστικά την τάση στα άκρα του φορτίου μας. Αυτό μας παρέχει έναν πολύ χρήσιμο τρόπο οδήγησης ψηφιακής φύσης.

3.3.6 Παραγωγή σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών

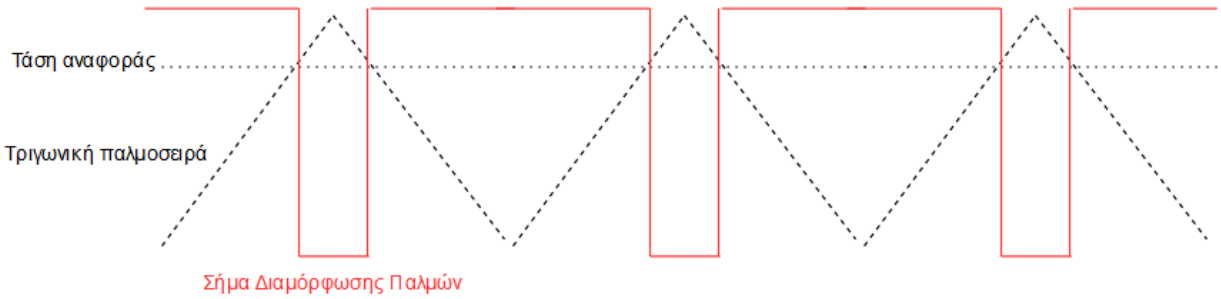
3.3.6.1 Βασική αρχή παραγωγής σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών

Η παραγωγή ενός σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Η βασική αρχή στηρίζεται στην χρήση μιας τριγωνικής κυματομορφής με την επιθυμητή συχνότητα και ενός σήματος αναφοράς. Η σύγκριση αυτών των δύο σημάτων αποτελεί την έξοδο του συστήματος.



Σχήμα 3.22: Μηχανισμός δημιουργίας σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών

Η έξοδος του συγκριτή είναι μία τετραγωνική παλμοσειρά με συχνότητα ίδια με της τριγωνικής. Το σήμα βρίσκεται σε υψηλή στάθμη τις χρονικές στιγμές όπου το σήμα αναφοράς είναι πιο υψηλό από την τρέχουσα τιμή του τριγωνικού παλμού. Όταν η τιμή αναφοράς είναι χαμηλότερη από την τιμή του τριγωνικού παλμού, η τάση εξόδου βρίσκεται σε χαμηλή στάθμη. Στην είσοδο της τάσης αναφοράς μπορούμε να βάλλουμε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα, αρκεί η συχνότητά του να είναι αρκετά χαμηλότερη από την συχνότητα της τριγωνικής παλμοσειράς. Τότε από το σήμα που θα πάρουμε στην έξοδο μπορούμε να ανακατασκευάσουμε το αρχικό φιλτράροντας τις συχνότητες που είναι μεγαλύτερες ή ίσες από την διακοπτική (συχνότητα τριγωνικού παλμού).



Σχήμα 3.23: Είσοδοι και έξοδος συγκριτή

3.3.6.2 Παραγωγή σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών με την βοήθεια μικροΕλεγκτών

Οι σύγχρονοι μικροΕλεγκτές παρέχουν ενσωματωμένο υλικό για την κατασκευή τέτοιων σημάτων. Έτσι μπορεί να αποφευχθεί η παραγωγή φυσικού τριγωνικού σήματος και η χρήση εξωτερικών στοιχείων. Αυτό γίνεται με την χρήση κυκλωμάτων **χρονιστών - μετρητών.** Οι μετρητές αυτοί μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να αυξάνουν την τιμή τους κατά μία μονάδα σε κάθε παλμό που δέχονται από ένα προγραμματιζόμενο ρολόι. Επίσης μπορούν να προγραμματιστούν έτσι ώστε όταν φτάσουν την μέγιστη τιμή τους να μηδενίσουν και να ξανά αρχίσουν να μετρούν ή να αρχίσουν να μετρούν αντίστροφα. Με αυτούς τους τρόπους προσομοιώνεται η τριγωνική παλμοσειρά. Επιπλέον, οι μετρητές αυτοί δίνουν την δυνατότητα προγραμματισμού μιας τιμή αναφοράς η οποία συγκρίνεται συνεχώς με την τρέχουσα τιμή του μετρητή. Όταν η σύγκριση αλλάζει τιμή υπάρχει η δυνατότητα ένα σήμα εξόδου να αλλάζει αυτόματα στάθμη. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε ένα πολύ εύχρηστο τρόπο παραγωγής διαφόρων ειδών σημάτων διαμόρφωσης εύρους παλμών με πολλή μεγάλη ακρίβεια και χωρίς να χρησιμοποιούμε προγραμματιστική ισχύ, αφού η όλη διαδικασία επιτελείται από ανεξάρτητο υλικό.

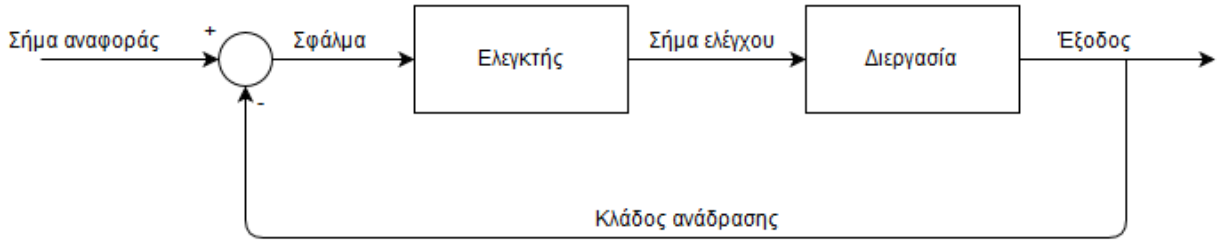
Έτσι, θα χρησιμοποιήσουμε το υλικό του μικροΕλεγκτή μας για την παραγωγή του σήματος αυτού. Το κύκλωμα του χρονιστή αρκεί να έχει προγραμματιστεί κατάλληλα για την επιθυμητή λειτουργία και συχνότητα, αρκεί η υπόλοιπη υλοποίηση να παρέχει την τιμή αναφοράς για την έξοδο. Η τιμή αναφοράς αυτή είναι ουσιαστικά ο κύκλος υπηρεσίας του σήματος που, όπως έχουμε δει, περιγράφει μονοσήμαντα την επιθυμητή τάση εξόδου.

Επομένως σε αυτό το στάδιο χρειαζόμαστε απλώς την επιθυμητή τάση εξόδου για το θερμαντικό μας στοιχείο. Η πληροφορία αυτή θα προκύψει ως έξοδος του ελεγκτή μας

3.3.7 Ελεγκτής

3.3.7.1 Έλεγχος κλειστού βρόχου

Εφόσον θέλουμε να διατηρήσουμε σταθερή την τιμή της θερμοκρασίας του εξωθούμενου υλικού, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο **Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου**. Η γενική μορφή ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου είναι η εξής:



Σχήμα 3.24: Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου

Στο εσωτερικό του ελεγκτή γίνονται υπολογισμοί χρησιμοποιώντας το **Σφάλμα**, που είναι η διαφορά της επιθυμητής τιμής της εξόδου (σήμα αναφοράς) από την πραγματική. Η πραγματική τιμή της εξόδου παρέχεται από τον **κλάδο ανάδρασης** του συστήματος, που συνήθως κάνει χρήση κάποιου αισθητήρα.

Στην δική μας περίπτωση έχουμε τις εξής αντιστοιχίες:

- Σήμα αναφοράς: Επιθυμητή Θερμοκρασία
- Έξοδος: Πραγματική θερμοκρασία
- Κλάδος ανάδρασης: Μέτρηση αισθητήρα θερμοκρασίας
- Σήμα Ελέγχου: Τάση τροφοδοσίας θερμαντικού στοιχείου

Ένας ευρέως διαδεδομένος και εύχρηστος ελεγκτής είναι ο **Ελεγκτής Τριών Όρων**, τον οποίο θα δούμε αναλυτικά στην συνέχεια

3.3.7.2 Ελεγκτής Τριών Όρων (PID)

Ο ελεγκτής PID είναι ίσως ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος ελεγκτής συστημάτων κλειστού βρόχου στην βιομηχανία. Η χρήση του είχε ξεκινήσει ήδη το 1890 περίπου, ενώ η πρώτη θεωρητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε από τον Ρώσσο - Αμερικάνο Nicolas Minorsky. Ο μηχανικός αυτός σχεδίαζε συστήματα αυτόματης πλοήγησης πλοίων, και η ιδέα του στηρίχθηκε στην παρακολούθηση των πηδαλιούχων στα πλοία κατά τον χειρισμό του τιμονιού. Ο Minorsky παρατήρησε ότι οι χειριστές του πηδαλίου ήλεγχαν το πλοίο βασιζόμενοι όχι μόνο στο παρόν σφάλμα της τροχιάς, αλλά και σε προηγούμενα σφάλματα, καθώς και στον ρυθμό μεταβολής τους. Αυτή η διαδικασία μοντελοποιήθηκε μαθηματικά και έδωσε τον ελεγκτή τριών όρων.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, ο ελεγκτής αυτός πραγματοποιεί μαθηματικές πράξεις στην τιμή του σφάλματος και τροφοδοτεί το αποτέλεσμα των πράξεων αυτών στην υπό έλεγχο διεργασία. Το ζητούμενο είναι το όλο σύστημα, που αποτελείται από τον ελεγκτή και την διεργασία να **συγκλίνει** στην επιθυμητή τιμή και να είναι **ευσταθές.** Επιπλέον ζητούμενα συναντώνται ανά εφαρμογή.

Ο ελεγκτής PID αποτελείται από τρείς παράλληλους κλάδους, το αποτέλεσμα των οποίων προστίθεται. Η συνεισφορά του κάθε κλάδου ονομάζεται P , I και D όρος. Ας μελετήσουμε κάθε κλάδο ξεχωριστά:

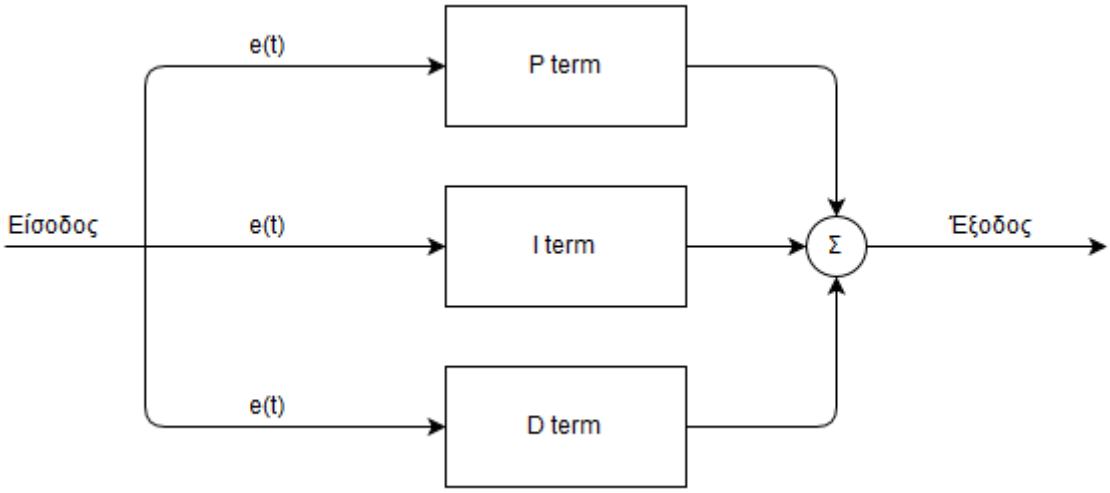
- Ο P κλάδος πολλαπλασιάζει την τρέχουσα τιμή του σφάλματος με κάποιο κέρδος, το K_p.
- Ο I κλάδος ολοκληρώνει το σφάλμα στον χρόνο, και πολλαπλασιάζει το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης με τον κέρδος K_i.
- Ο D κλάδος παραγωγίζει το σφάλμα ως προς τον χρόνο και πολλαπλασιάζει την παράγωγό του με την σταθερά K_d.

Οι τρείς αυτοί όροι προστιθέμενοι αποτελούν την έξοδο του ελεγκτή:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

,όπου $u(t)$ η έξοδος του ελεγκτή και $e(t)$ το σήμα σφάλματος

Βλέπουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα ροής:



Σχήμα 3.25: Διάγραμμα βαθμίδων ελεγκτή τριών όρων

Στο πεδίο της συχνότητας, η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή παίρνει την μορφή:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d * s$$

Όπου τα διάφορα σήματα είναι οι μετασχηματισμοί κατά Laplace των αντίστοιχων σημάτων χρόνου.

Ο ελεγκτής συμπεριφέρεται ως ελεγκτής καθυστέρησης - προήγησης φάσης και βελτιώνει τόσο το μόνιμο σφάλμα όσο και την χρονική απόκριση του συστήματος. Συγκεκριμένα, το κέρδος του κάθε όρου έχει την εξής επίδραση:

- Το αναλογικό κέρδος K_p βελτιώνει τον χρόνο ανόδου της βηματικής απόκρισης του συστήματος και μειώνει το μόνιμο σφάλμα, όταν υπάρχει - χωρίς όμως να το εξαλείφει ποτέ τελείως.
- Το ολοκληρωτικό κέρδος K_i χρησιμοποιείται μόνο όταν υπάρχει μόνιμο σφάλμα για την εξάλειψή του, όμως παράλληλα χειροτερεύει την μεταβατική απόκριση του συστήματος και εισάγει ταλαντώσεις αν αυξηθεί περισσότερο από όσο χρειάζεται.
- Το διαφορικό κέρδος ρυθμίζει μόνο την μεταβατική απόκριση του συστήματος. μειώνει τον χρόνο ανόδου, τον χρόνο αποκατάστασης και την υπερύψωση. Χρησιμοποιείται γενικά για να κάνει το σύστημα πιο γρήγορο και πιο σταθερό.

3.3.7.3 Έκφραση Ελεγκτή Τριών Όρων στο πεδίο διακριτού χρόνου

Εφόσον ο ελεγκτής μας θα υλοποιηθεί από ένα ψηφιακό κύκλωμα, τα μεγέθη μας δεν είναι συνεχή αλλά διακριτά. Ομοίως και οι διάφορες μετρήσεις που παίρνουμε από τον αισθητήρα δεν μας είναι διαθέσιμες ανά πάσα στιγμή, αλλά μεταξύ καθορισμένων χρονικών διαστημάτων – την **περίοδο δειγματοληψίας.** Έτσι, ένα χρονικό σήμα $e(t)$ αντιμετωπίζεται ως μια ακολουθία διακριτών όρων $e(n)$. Οι μαθηματικές πράξεις που χρησιμοποιούμε πρέπει να προσαρμοστούν αντίστοιχα στον διακριτό χρόνο:

Διακριτή ολοκλήρωση: $\int_0^t e(t)dt \approx T_s * \sum_0^n e(n)$

Διακριτή παραγώγιση: $\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(n)-e(n-1)}{T_s}$

, όπου T_s η περίοδος δειγματοληψίας

Η εξίσωση μεταφοράς του ελεγκτή πλέον μετασχηματίζεται στην εξής:

$$u(n) = K_p * e(n) + K_i * T_s * \sum e(n) + \frac{K_d}{T_s} * (e(n) - e(n-1))$$

Η συνάρτηση αυτή μπορεί να υλοποιηθεί από ένα ψηφιακό σύστημα όπως ο μικροελεγκτής, καθώς χρησιμοποιεί μόνο διακριτές τιμές του σήματος και απλές πράξεις για την παραγωγή του σήματος εξόδου.

3.3.8 Πρόγραμμα ΜικροΕλεγκτή

Ο αλγόριθμος του μικροΕλεγκτή θα αναλάβει τόσο την δημιουργία του σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών όσο και την εκτέλεση των διεργασιών του ελεγκτή. Ο κώδικας γράφεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί στον κώδικά για τον έλεγχο των κινητήρων

3.3.8.1 Αλγόριθμος παραγωγής Σήματος Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών

Διαλέγουμε τον χρονιστή Timer2 για την παραγωγή του σήματος και τον αρχικοποιούμε με τις αντίστοιχες ρυθμίσεις. Αρχικά εισάγουμε στο υπόμνημά μας την νέα έξοδο:

```
//=====================================================
//PHYSICAL CONNECTIONS:
//=====================================================
/*
OUTPUTS:
PWM signal for heater: PD7
```

Κώδικας 3.8

Στην συνέχεια γράφουμε την ρουτίνα που ρυθμίζει και αρχικοποιεί τον χρονιστή:

```
void configure_timer2(){
      TCCR2 = (1<<WGM21)   //fast-pwm
            | (1<<WGM20)
            | (1<<COM21)   //non inverted output
            | (0<<COM20)
            | (1<<CS22)    //prescaler:128
            | (0<<CS21)
            | (1<<CS20);
}
```

Κώδικας 3.9

Πλέον το σήμα Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών είναι ενεργό.

Η συχνότητά του ορίζεται με την χρήση ενός διαιρέτη που εφαρμόζεται στο ρολόι του επεξεργαστή και από την μέγιστη τιμή την οποία μετράει ο χρονιστής. Στην περίπτωσή μας έχει συχνότητα:

$$\frac{16MHz}{128 * 256} \sim 490\ Hz$$

Ο κύκλος υπηρεσίας του εξαρτάται από την τιμή του καταχωρητή **OCR2.**
Οι δυνατές τιμές του καταχωρητή είναι από 0 (0% duty cycle) ως 255 (100% duty cycle), που είναι και η μέγιστη τιμή που μετράει ο μετρητής αφού έχει εύρος 8 bits.

Επίσης προσθέτουμε στην ρουτίνα `configure_IO()` τις κατάλληλες γραμμές ώστε να ενεργοποιήσουμε την έξοδο του σήματος στον ανάλογο ακροδέκτη του ολοκληρωμένου:

```
      DDRD |= (1<<7);    //port D pin 7 output for PWM signal
      PORTD &= ~(1<<7); //with initial value 0
```

Κώδικας 3.10

3.3.8.2 Αλγόριθμος υλοποίησης ελεγκτή

Προσθέτουμε την σύνδεση του αισθητήρα:

```
//=====================================================
//PHYSICAL CONNECTIONS:
//=====================================================
/*
INPUTS:
Temperature sense: ADC2 - PINA2

OUTPUTS:
TEMP_OK signal: PD6

*/
```

Κώδικας 3.11

Προσθέτουμε τις σταθερές που σχετίζονται με τον ελεγκτή:

```
#define KP                    200
#define KI                    1
#define KD                    500

#define SENSE_TEMPERATURE     2
#define REFERENCE_TEMP        190
#define TEMP_ACCEPTABLE_ERR   5
#define TEMP_OK()             PORTD |= (1<<6)
#define TEMP_NOT_OK()         PORTD &= ~(1<<6)
```

Κώδικας 3.12

Προσθέτουμε και τις εξής παγκόσμιες μεταβλητές:

```
volatile int16_t temperatureError;
volatile int16_t previousError = 0;
volatile int16_t errorSum = 0;
```

Κώδικας 3.13

Και τις αντίστοιχες γραμμές στην ρουτίνα αρχικοποίησης εισόδων – εξόδων `configure_IO()`:

```
DDRD |= (1<<6); //port D pin 6 output for the TEMP_OK signal
PORTD &= ~(1<<6); //with initial value 0
```

Κώδικας 3.14

Στην συνέχεια ακολουθεί η ρουτίνα εκτέλεσης του ελεγκτή.
Σημείωση: Η ρουτίνα αυτή πρέπει να εκτελείται σε διαστήματα ΔΤ για την παραγωγή της κάθε μίας τιμής του σήματος ελέγχου

```
void execute_PID(){

      int16_t error = temperatureError;
      int32_t temp;

      //P term:
      temp = (int32_t) error * KP;

      //I term:
      errorSum += error;
      temp += errorSum * KI;

      //D term:
      temp += (int32_t) (error-previousError)* KD;
      previousError=error;

      if (temp > 255)
            OCR2 = 255;
      else if (temp < 0)
            OCR2 = 0;
      else
      OCR2 = (uint8_t) temp;

      return;
}
```

Κώδικας 3.15

Η ρουτίνα αυτή υλοποιεί τον αλγόριθμο του ελεγκτή. Σε κάθε της εκτέλεση έχει διαθέσιμη την τρέχουσα τιμή του σφάλματος, την προηγούμενη τιμή και το ολοκλήρωμα – άθροισμα των σφαλμάτων. Με βάση αυτά τα στοιχεία υλοποιεί την έξοδο – κύκλο υπηρεσίας του σήματος διαμόρφωσης πλάτους παλμών – υλοποιώντας τις εξισώσεις που έχουν περιγραφεί νωρίτερα.

Επίσης πρέπει να προσθέσουμε και τις ακόλουθες γραμμές στην ρουτίνα μέτρησης από τον μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό:

```
if ((ADMUX & 0x0F) == SENSE_TEMPERATURE){
      temperatureError = REFERENCE_TEMP - currentMeasurement;
      execute_PID();

      if (abs(temperatureError) < TEMP_ACCEPTABLE_ERR)
            TEMP_OK();
      else
            TEMP_NOT_OK();

}
```

Κώδικας 3.16

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σχεδιάσουμε τον τρόπο που θα εκτελείται ο κάθε κύκλος του ελεγκτή. Μπορούμε να ρυθμίσουμε έναν ακόμα χρονιστή του συστήματος να πυροδοτεί την εκτέλεση του σώματος του ελεγκτή σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο δεν μπορούμε να έχουμε την ίδια ελευθερία και με την μέτρηση της τιμής του αισθητήρα, Καθώς ο μικροΕλεγκτής διαθέτει μία μόνο μονάδα μετατροπέα Αναλογικού σε ψηφιακό, η οποία ήδη χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ρεύματος των τυλιγμάτων, μπορούμε να προσθέσουμε ένα ακόμα κανάλι σε εκείνον για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο θα πρέπει ο ρυθμός που μετράμε την θερμοκρασία να είναι ίδιος με αυτόν που μετράμε το ρεύμα. Αν μας ικανοποιεί αυτό, μπορούμε επίσης σε κάθε νέα μέτρηση να πυροδοτούμε και την εκτέλεση του ελεγκτή. Επομένως, η ίδια συχνότητα θα χαρακτηρίζει και την εκτέλεση του ελέγχου. Διαφορετικά θα πρέπει να καταφύγουμε σε υλοποίησης του ελεγκτή κεφαλής από ξεχωριστό μικροΕλεγκτή.

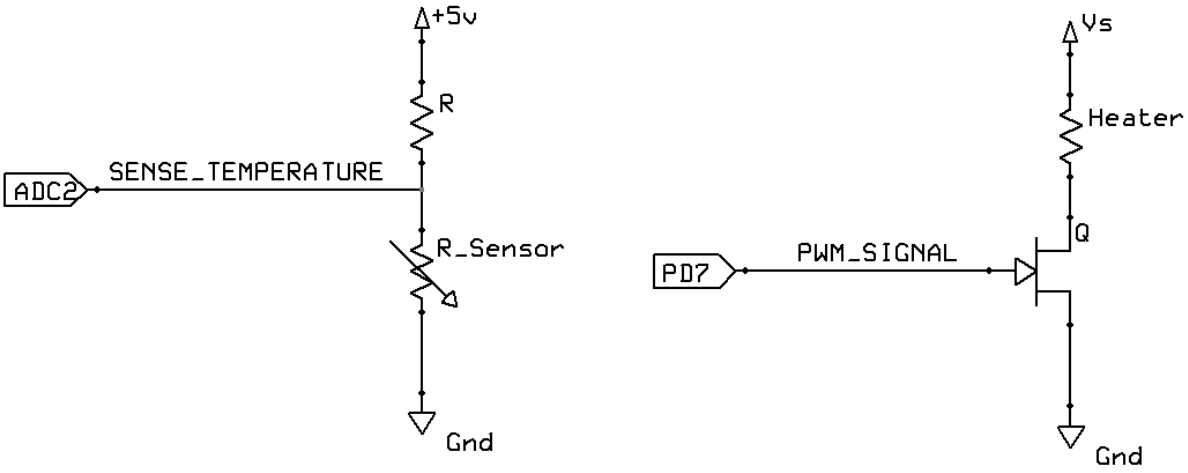
Η φύση του ελέγχου θερμοκρασίας μίας μάζας, που είναι αρκετά αργή διαδικασία δεν ρίχνει βάρος επάνω στην επιλογή της συχνότητας ελέγχου, αρκεί ο έλεγχος να είναι αρκετά γρήγορος συγκριτικά με την σταθερά χρόνου του μοντέλου μας. Στην περίπτωσή μας μπορούμε να ενσωματώσουμε τον ελεγκτή στον μικροεπεξεργαστή που ελέγχει και κινητήρα χωρίς πρόβλημα. Έτσι, η ρουτίνα εξυπηρέτησης νέας μέτρησης του μετατροπέα αναλογικού – ψηφιακού μετατρέπεται στην εξής, ώστε να ενσωματώσει την λειτουργικότητα του ελεγκτή:

```
//New measurement from the ADC unit
ISR (ADC_vect){

	int8_t currentMeasurement = ADCH;

	if ((ADMUX & 0x0F) == SENSE_AC) {
		if (MOTOR_ENABLED){
			if (currentMeasurement > CURRENT_LIMIT){
				PORTB &= ~AC_MASK;
			} else {
				PORTB |= (motorState & AC_MASK);
			}
		}
		ADMUX &= 0xF0;
		ADMUX |= SENSE_BD;
	} else if ((ADMUX & 0x0F) == SENSE_BD){
		if (MOTOR_ENABLED){
			if (currentMeasurement > CURRENT_LIMIT){
				PORTB &= ~BD_MASK;
			} else {
				PORTB |= (motorState & BD_MASK);
			}
		}
		ADMUX &= 0xF0;
		ADMUX |= SENSE_TEMPERATURE;
	} else if ((ADMUX & 0x0F) == SENSE_TEMPERATURE){
		temperatureError = REFERENCE_TEMP - currentMeasurement;
		execute_PID();
		ADMUX &= 0xF0;
		ADMUX |= SENSE_AC;
		if (abs(temperatureError) < TEMP_ACCEPTABLE_ERR)
			TEMP_OK();
		else
			TEMP_NOT_OK();
	}
}
```

Κώδικας 3.17

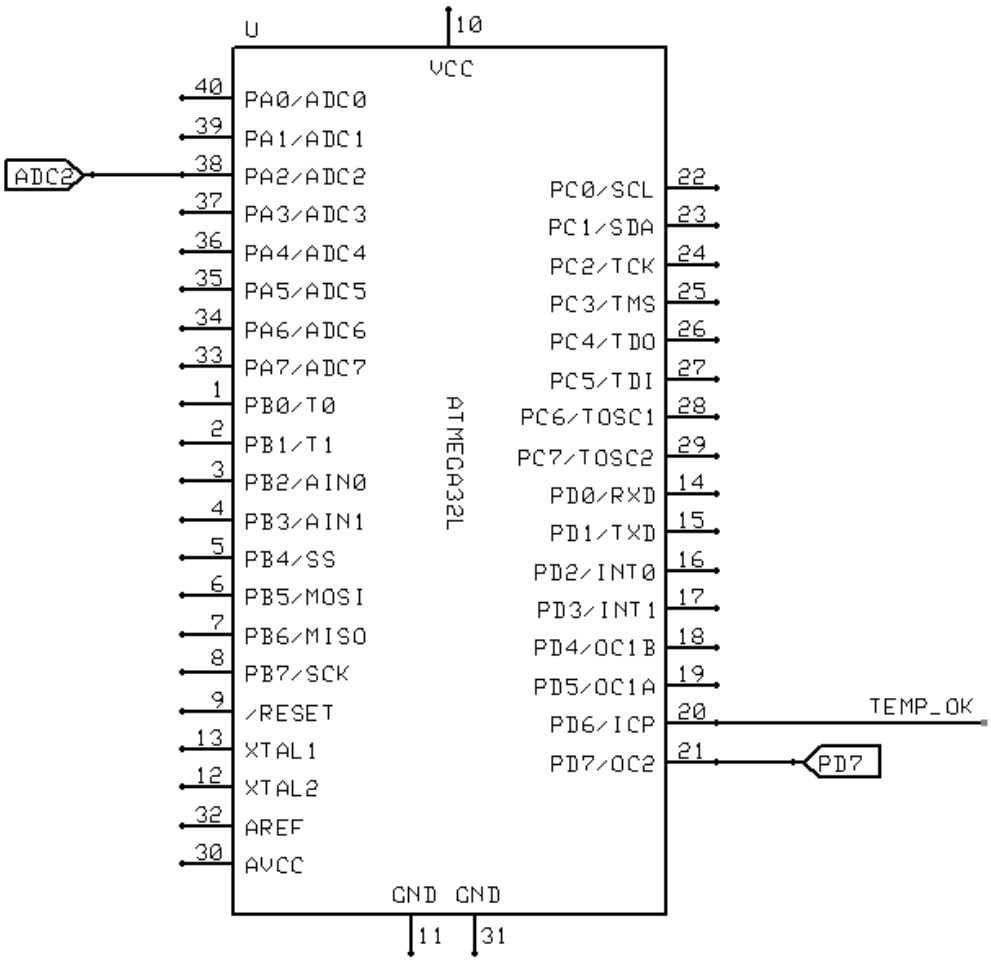
3.3.9 Ηλεκτρονικό Κύκλωμα

Τα ηλεκτρονικά που πρέπει να προστεθούν στο κύκλωμα για την οδήγηση της κεφαλής είναι τα εξής:



Σχήμα 3.26: Κύκλωμα οδήγησης θερμαντικού κεφαλής

Και οι νέες διασυνδέσεις του μικροΕλέγκτή:



Σχήμα 3.27: Κυκλωματική διασύνδεση μικροελεγκτή

4 Παραγωγή σημάτων ελέγχου

4.1 Μετασχηματισμός εντολών απλών κινήσεων σε σήματα ελέγχου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο καλύψαμε την εσωτερική δομή και λειτουργία των συστημάτων οδήγησης των επενεργητών ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Ο σχεδιασμός έγινε με τέτοιον τρόπο ώστε το κάθε σύστημα οδήγησης να μπορεί να ελεγχθεί μέσω ενός πρωτόκολλου διεπαφής που καθιστά τις εισόδους του, ή αλλιώς τα **σήματα ελέγχου** του. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε το επόμενο επίπεδο του συστήματός μας, που είναι η παραγωγή των σημάτων αυτών. Το σύστημα που επιδρά σε αυτό το επίπεδο σχεδιασμού ονομάζεται **Σύστημα Παρεμβολής**.

Το σύστημα παρεμβολής έχει έξοδο τα σήματα ελέγχου των συστημάτων οδήγησης των κινητήρων. Οι είσοδοί του είναι εντολές για την πραγματοποίηση στοιχειωδών κινήσεων. Όπως και στην περίπτωση των συστημάτων οδήγησης, οι είσοδοι θα πρέπει να είναι συμβατοί με κάποιο σαφώς ορισμένο πρωτόκολλο διεπαφής ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχός από τα συστήματα ανώτερου επιπέδου. Το πρωτόκολλο που αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί είναι το **G-Code**.

Σχήμα 4.1: Απεικόνιση συστήματος παρεμβολής

4.2 Γλώσσα G-Code

Η γλώσσα G-Code είναι μία γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικά ελεγχόμενων εργαλειομηχανών. Περιλαμβάνει ένα συμπαγές ρεπερτόριο εντολών που περιγράφουν διάφορες στοιχειώδεις κινήσεις στον χώρο αλλά και ρυθμίσεις των διάφορων παραμέτρων μίας εργαλειομηχανής. Είναι η πιο δημοφιλής γλώσσα για αυτήν την χρήση, και το λεξιλόγιό της έχει εμπλουτιστεί κατά καιρούς από διάφορες εταιρείες και οργανισμούς που δραστηριοποιούνται στον χώρο.

Στην περίπτωση του τρισδιάστατου εκτυπωτή μας ενδιαφέρει μόνο ένα υποσύνολο των εντολών αυτών. Οι βασικότερες είναι οι εξής:

Εντολή	Περιγραφή
G00	Γρήγορη κίνηση - Μεταφορά
G01	Γραμμική Κίνηση
G02	Δεξιόστροφη κυκλική κίνηση
G03	Αριστερόστροφη κυκλική κίνηση
G28	Μετακίνηση στο σημείο Αφετηρίας
M03	Θερμαντικό κεφαλής ενεργό
M05	Θερμαντικό κεφαλής ανενεργό

- G00: Η εντολή αυτή περιγράφει γρήγορη γραμμική μετακίνηση της κεφαλής. Κατά την διάρκεια αυτής της κίνησης δεν συμβαίνει εξώθηση πλαστικού. Χρησιμοποιείται για την μετακίνηση της κεφαλής μεταξύ διαφορετικών σημείων εργασίας
- G01: Η εντολή αυτή είναι η βασικότερη όλων. Περιγράφει την γραμμική κίνηση της κεφαλής, με παράλληλη εξώθηση πλαστικού.
- G02: Η εντολή αυτή περιγράφει την κίνηση της κεφαλής επάνω σε κυκλικό τόξο με δεξιόστροφη φορά, με παράλληλη εξώθηση πλαστικού
- G02: Η εντολή αυτή περιγράφει την κίνηση της κεφαλής επάνω σε κυκλικό τόξο με αριστερόστροφη φορά, με παράλληλη εξώθηση πλαστικού
- G28: Η εντολή αυτή περιγράφει την αρχικοποίηση της κεφαλής, δηλαδή την μεταφορά στο Σημείο Αφετηρίας. Το σημείο αφετηρίας ορίζεται με την βοήθεια των οριακών διακοπτών
- M03: Η εντολή αυτή περιγράφει την ενεργοποίηση του θερμαντικού κεφαλής
- M04: Η εντολή αυτή περιγράφει την απενεργοποίηση του θερμαντικού κεφαλής

Λεπτομέρειες για την σύνταξη και χρήση των παραπάνω θα δοθούν στην συνέχεια

4.3 2 ½ Βαθμοί ελευθερίας

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα υποσύστημα του τρισδιάστατου εκτυπωτή πρόκειται για ένα καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα. Το ρομπότ αυτό έχει τρείς βαθμούς ελευθερίας, όσους και επενεργητές. Αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο δράσης μπορεί να διαγράψει οποιαδήποτε τροχιά μέσα στον τρισδιάστατο χώρο εργασίας της κατασκευής. Μελετώντας όμως την φύση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, εντοπίζουμε ένα χαρακτηριστικό που μπορεί να απλοποιήσει τον σχεδιασμό μας.

Για την εκτύπωση ενός αντικειμένου χρειάζεται να εναποθέσουμε υλικό επάνω σε μία τράπεζα. Η βαρύτητα επιβάλλει ότι θα πρέπει να ξεκινήσουμε να εκτυπώνουμε πρώτα τα κατώτερα στρώματα του αντικειμένου και κατόπιν να συνεχίσουμε καθ' ύψος. Παράλληλα, το να ολοκληρώσουμε πολλές οριζόντιες στρώσεις ενός τμήματος του αντικειμένου πριν εκτυπώσουμε τις αντίστοιχες στρώσεις ενός άλλου τμήματός του μπορεί να εισαγάγει προβλήματα με τον χειρισμό του όγκου της κεφαλής. Για αυτούς τους λόγους ενδείκνυται η εκτύπωση ενός αντικειμένου να γίνεται ανά στρώσεις, η κάθε μία από τις οποίες να είναι παράλληλη με το οριζόντιο επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι η κεφαλή μας χρειάζεται να κινείται μόνο σε δύο άξονες κατά την εκτύπωση κάθε στρώσης. Ανάμεσα στις στρώσεις μπορεί να μετακινείται μόνο καθ' ύψος.

Αυτό το χαρακτηριστικό μας επιτρέπει ουσιαστικά να αποσυνδέσουμε τον κάθετο άξονα από τους υπόλοιπους και να κατηγοριοποιήσουμε τις δυνατές κινήσεις της κεφαλής στις εξής:

- Κινήσεις στο επίπεδο XY
- Κινήσεις κατά τον άξονα Z

Ένα σύστημα που κινείται κατ' αυτόν τον τρόπο ονομάζεται σύστημα 2 ½ αξόνων. Να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο ότι ένα σύστημα 2 ½ αξόνων εξακολουθεί να μπορεί να βρεθεί σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου εργασίας. Ωστόσο, οι τροχιές στις οποίες κινείται πρέπει να αποτελούνται μόνον από τις κινήσεις που περιγράψαμε ανωτέρω.

4.4 Παρεμβολή κινήσεων σε δύο άξονες

Με τον όρο **Παρεμβολή** εννοούμε την συσχέτιση μίας καμπύλης με ένα σύνολο διακριτών σημείων. Ο όρος αυτός έχει ευρεία σημασία και χρήση στην επιστήμη των μαθηματικών, και ιδιαίτερα της **αριθμητικής ανάλυσης**. Η χρήση που μας ενδιαφέρει σε αυτήν την εργασία είναι μάλλον η αντίθετη από αυτήν που απασχολεί συνήθως τους μαθηματικούς. Το σύνηθες πρόβλημα είναι να βρεθεί μία καμπύλη η οποία να προσεγγίζει με τον βέλτιστο τρόπο ένα σύνολο σημείων. Συνήθως τέτοια προβλήματα είναι υπερορισμένα, και η λύση που ζητούμε είναι αυτή που παρουσιάζει το ελάχιστο σφάλμα

Στην περίπτωσή μας το πρόβλημα ορίζεται με τον αντίθετο τρόπο. Μας είναι γνωστή μία καμπύλη εκ των προτέρων και θέλουμε να βρούμε τα σημεία ενός τετραγωνικού πλέγματος που βρίσκονται πιο κοντά στην καμπύλη αυτή.

Θα ορίσουμε το πρόβλημα στις συνθήκες του συστήματός μας:
Έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι αρκεί να κινούμε την κεφαλή του εκτυπωτή μας σε ένα οριζόντιο επίπεδο ή κατά τον κατακόρυφο άξονα. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να διαγράψουμε μία τροχιά στο επίπεδο και πως γνωρίζουμε τον μαθηματικό τύπο της τροχιάς αυτής. Επίσης επιθυμούμε η γραμμική ταχύτητα της κεφαλής να παραμείνει σταθερή και συγκεκριμένη κατά την διάρκεια της κίνησης αυτής. Θυμίζω ότι οι κινητήρες μας μπορούν να κινηθούν μόνο κατά ακέραια πολλαπλάσια μίας ελάχιστης μετατόπισης που ονομάζουμε **βήμα**. Το βήμα αυτό σε συνδυασμό με την χρήση κάποιου μειωτήρα η/και κάποιου κοχλία αντιστοιχεί σε μία στοιχειώδη γραμμική μετατόπιση.
*Η μετατόπιση αυτή θα χρησιμεύει από εδώ και στο εξής ως μονάδα μέτρησης του μήκους για τους υπολογισμούς μας και θα την ονομάσουμε **Στοιχειώδες Μήκος ΣΜ** (Basic Length Unit - BLU)*

Επομένως, οι θέσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί η κεφαλή μας σε κάθε επίπεδο είναι τα σημεία τομής των γραμμών ενός τετραγωνικού πλέγματος με αποστάσεις 1 ΣΜ. Γνωρίζοντας τώρα την επιθυμητή τροχιά καλούμαστε να επιλέξουμε από ποια σημεία του πλέγματος πρέπει να περάσει η κεφαλή και πότε. Αυτό το πρόβλημα ισοδυναμεί με την παραγωγή των χρονικών σημάτων των βημάτων για κάθε άξονα, δεδομένης της επιθυμητής κίνησης.

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι και τεχνικές για την λύση του προβλήματος που αναφέραμε. Εμείς θα ασχοληθούμε με την τεχνική του **Ψηφιακού Διαφορικού Αναλυτή (Digital Differential Analyzer - DDA)** και θα χρησιμοποιήσουμε αριθμητική ακεραίων για την εφαρμογή της. Έτσι ο σχεδιασμός θα είναι κατάλληλος για υλοποίηση σε μικροΕλεγκτή.

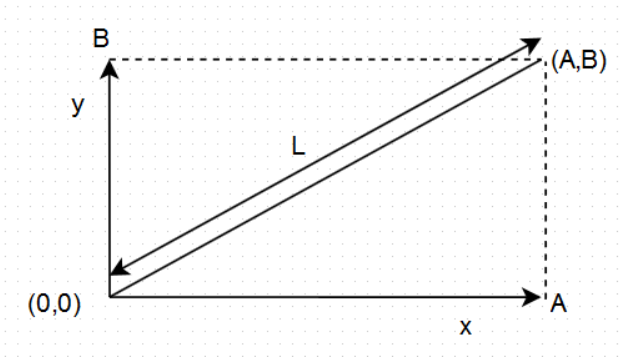
4.5 Παρεμβολή ευθύγραμμης κίνησης

4.5.1 Θεωρητική ανάλυση αλγορίθμου

Αρχικά θα ασχοληθούμε με την ευθύγραμμη κίνηση. Τα δεδομένα μας είναι τα εξής:

- ΔΧ = Α: Η συνολική μετατόπιση κατά τον άξονα Χ
- ΔΥ = Β: Η συνολική μετατόπιση κατά τον άξονα Υ
- $L = \sqrt{A^2 + B^2}$: το συνολικό μήκος της μετατόπισης
- V = 1 ΣΜ/ΔΤ Η γραμμική ταχύτητα της κεφαλής
- ΔΤ: Περίοδος Δειγματοληψίας

Η επιθυμητή κίνηση είναι γραμμική με αρχή το σημείο (0,0) και τέλος το (Α,Β). Ζητούμενο είναι να κατασκευαστούν οι διακριτές παλμοσειρές βημάτων για τους άξονες Χ,Υ. Η στοιχειώδης μονάδα χρόνου είναι η περίοδος δειγματοληψίας ΔΤ. Η γραμμική ταχύτητα της κεφαλής επιθυμούμε να είναι σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης και ίση με 1 ΣΜ/ΔΤ



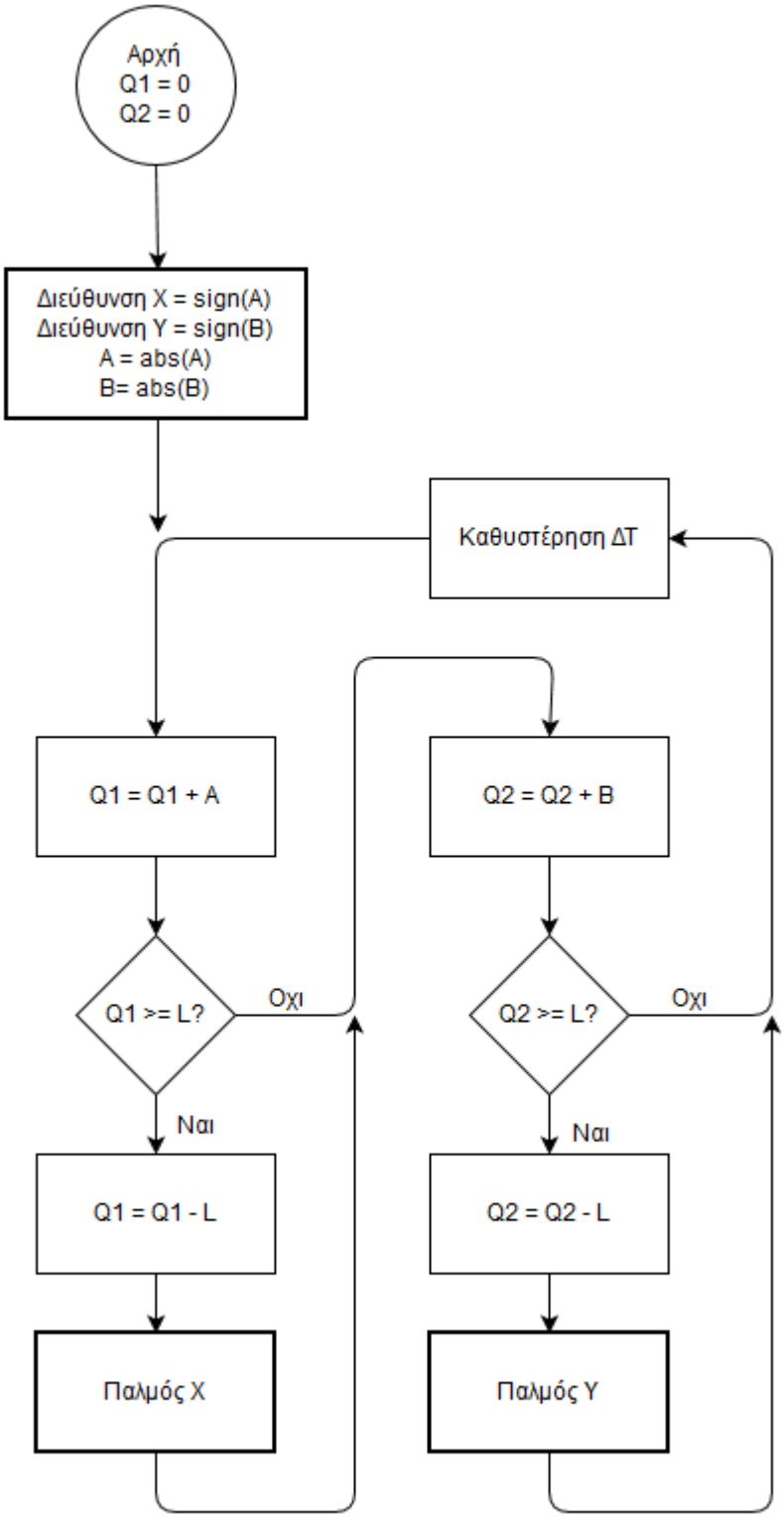
Σχήμα 4.2: Στοιχεία ευθύγραμμης κίνησης

Η μέθοδος Ψηφιακού Διαφορικού Αναλυτή υλοποιεί το εξής σκεπτικό:
Η επιθυμητή σταθερή ταχύτητα μπορεί να αναλυθεί στις δύο συνιστώσες της V_x=A/L και V_y=B/L. Ανά διαστήματα ΔΤ αυξάνουμε την μεταβλητή θέσης του άξονα Χ κατά την ποσότητα A/L και την μεταβλητή θέσης του άξονα Υ κατά B/L. Κάθε φορά που οι μεταβλητές θέσεις συμπληρώνουν έναν ακέραιο αριθμό τότε προωθούμε τον αντίστοιχο άξονα κατά μία μονάδα, δηλαδή σχηματίζουμε έναν παλμό βήματος στο αντίστοιχο σήμα ελέγχου.

Μετά από L εκτελέσεις έχουμε μεταφερθεί κατά Α μονάδες στον άξονα Χ και Β μονάδες στον άξονα Υ, που ήταν και το επιθυμητό. Εφόσον L είναι η συνολική μετατόπιση και η διάρκεια την μετακίνησης, η γραμμική ταχύτητα κατά την διάρκεια της κίνησης ήταν 1 ΣΜ/ΔΤ. Επομένως έχουμε επιτύχει τα ζητούμενά μας. Βέβαια, οι ποσότητες Α/L, Β/L δεν μπορούν να υποτεθούν ακέραιες. Για υλοποίηση αποκλειστικά με την χρήση ακεραίων αριθμών χρησιμοποιούμε μία παραλλαγή που θα δούμε σε μορφή διαγράμματος ροής.

Όσον αφορά τα σήματα διεύθυνσης, η περίπτωση της ευθύγραμμης κίνησης είναι ιδιαίτερα εύκολη. Η διεύθυνση του κάθε άξονα μπορεί να καθοριστεί στην αρχή της κάθε κίνησης από τα πρόσημα των Α,Β. Κατά την διάρκεια της κίνησης οι διευθύνσεις παραμένουν σταθερές.

4.5.2 Υλοποίηση αλγορίθμου παρεμβολής



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου γραμμικής παρεμβολής

Ας δούμε τον αλγόριθμο παρεμβολής σε κώδικα για εκτέλεση από υπολογιστή:

Αρχικά έχουμε τις σταθερές και τις παγκόσμιες μεταβλητές που χρειάζονται για την εκτέλεση του αλγόριθμου παρεμβολής:

```
#define RIGHT     0
#define LEFT      1

volatile unsigned int q1;
volatile unsigned int q2;

//linear DDA:
volatile unsigned int a;
volatile unsigned int b;
volatile unsigned int L;

volatile unsigned int total_movement_length;
volatile unsigned int number_of_executions;
```

Κώδικας 4.1

Στην συνέχεια βλέπουμε την ρουτίνα αρχικοποίησης του παρεμβολέα, η οποία αναλαμβάνει να θέσει τις κατάλληλες τιμές στις παγκόσμιες μεταβλητές που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος. Δέχεται ως ορίσματα τις τιμές A και B που είναι η επιθυμητή μετατόπιση στους άξονες X,Y αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η ρουτίνα κάνει χρήση των συναρτήσεων `set_direction_x()`, `set_direction_y()`. Αυτές οι συναρτήσεις αναλαμβάνουν να οδηγήσουν τις εξόδους του συστήματος.

```
void initialize_linear_DDA(int _a, int _b){

	q1 = 0;
	q2 = 0;

	L = (unsigned int) round(sqrt(_a*_a + _b*_b));

	if (_a > 0)
		set_direction_x(RIGHT);
	else
		set_direction_x(LEFT);

	if (_b > 0)
		set_direction_y(RIGHT);
	else
		set_direction_y(LEFT);

	a = abs(_a);
	b = abs(_b);

	number_of_executions = 0;
	total_movement_length = L;

	return;
}
```

Κώδικας 4.2

Τέλος βλέπουμε την βασική ρουτίνα εκτέλεσης., η οποία θα πρέπει να εκτελείται ανά διαστήματα ΔΤ. Παρατηρούμε ότι η ρουτίνα κάνει χρήση των συναρτήσεων `pulse_x()`, `pulse_y()` Αυτές οι συναρτήσεις αναλαμβάνουν να οδηγήσουν τις εξόδους του συστήματος.

```
void execute_linear_DDA(){

      if (number_of_executions < total_movement_length){
            q1 += a;
            if (q1 >= L){
                  q1 -= L;
                  pulse_x();
            }

            q2 += b;
            if (q2 >= L){
                  q2 -= L;
                  pulse_y();
            }
            number_of_executions++;
      }
      return;
}
```

Κώδικας 4.3

4.5.3 Επεξεργασία εντολών ευθύγραμμης κίνησης G-Code

Μία εντολή ευθύγραμμης κίνησης G-Code στο επίπεδο XY έχει την εξής μορφή:

```
G00 X<x_value> Y<y_value> F<feed_value>
G01 X<x_value> Y<y_value> F<feed_value>
```

Όπου οι παράμετροι x_value, y_value είναι τα σημεία όπου θέλουμε να φτάσει η κεφαλή κινούμενη ευθύγραμμα και f_value η σταθερή ταχύτητα με την οποία θέλουμε να κινηθεί.

Εάν υποτεθεί ότι οι εντολές χρησιμοποιούν σχετικό σύστημα συντεταγμένων και μετρικό σύστημα έχουμε τα εξής:

- A = x_value * mm_to_BLUs
- B = y_value * mm_to_BLUs
- $L = \sqrt{A^2 + B^2}$
- ΔT = (feed_value * mm_to_BLUs)$^{-1}$

Η σταθερά mm_to_BLUs (μονάδων BLUs/mm) είναι κατασκευαστική σταθερά του μηχανήματος και χρησιμοποιείται για την μετατροπή από χιλιοστά του μέτρου σε μονάδες ΣΜ.

Σε περίπτωση που οι εντολές χρησιμοποιούν απόλυτο σύστημα συντεταγμένων τότε το σύστημά μας πρέπει να διατηρεί σε μία μεταβλητή την τρέχουσα θέση σε κάθε άξονα και να υπολογίζει την μετατόπιση ως την διαφορά της επιθυμητής θέσης από την τρέχουσα.

Στην εντολή G01, παράλληλα με τον αλγόριθμο παρεμβολής της κίνησης πρέπει να εκτελεστεί και ο αλγόριθμος για την εξώθηση του πλαστικού. Αυτός θα μελετηθεί σε επόμενη ενότητα

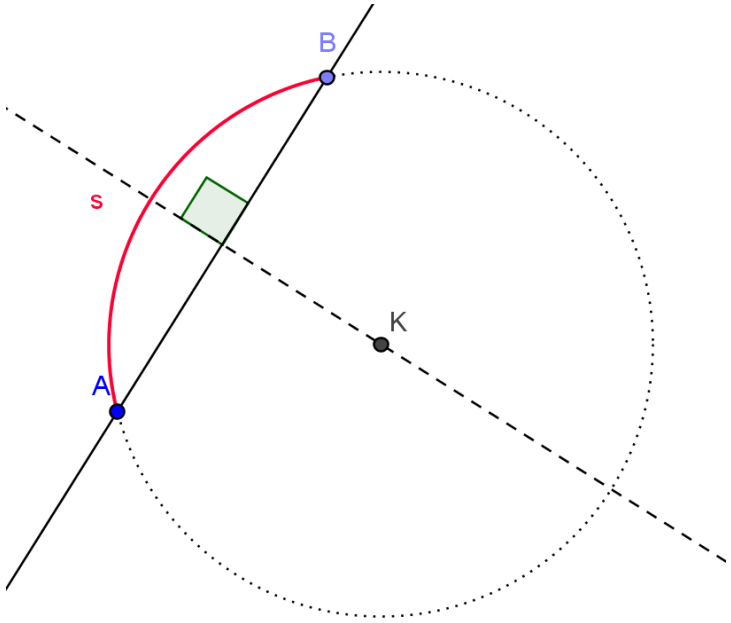
4.6 Παρεμβολή κυκλικής κίνησης

4.6.1 Θεωρητική ανάλυση αλγορίθμου

Η υλοποίηση του αλγορίθμου παρεμβολής κυκλικής κίνησης με την τεχνική του Ψηφιακού Διαφορικού Αναλυτή είναι ελαφρώς πιο περίπλοκη από ότι η περίπτωση της γραμμικής κίνησης. Για να αναλύσουμε το σχετικό πρόβλημα ας δούμε αρχικά τα δεδομένα μας:

- Α: Σημείο Αφετηρίας
- Β: Σημείο Προορισμού
- Κ: Κέντρο κύκλου
- Φορά περιστροφής
- Εφαπτομενική ταχύτητα V σταθερή και ίση με 1 ΣΜ/ΔΤ

Να σημειώσω ότι για να είναι έγκυρη μια τριάδα σημείων (Α,Β,Κ) θα πρέπει το σημείο Κ να βρίσκεται επάνω στην μεσοκάθετο του ευθύγραμμου τμήματος ΑΒ. Υπάρχουν εναλλακτικοί ορισμοί της κυκλικής κίνησης, με τους οποίους θα ασχοληθούμε αργότερα.



Σχήμα 4.4: Στοιχεία κίνησης σε κυκλικό τόξο

Για κάθε έγκυρη τριάδα των παραπάνω σημείων και φορά περιστροφής, υπάρχει ένα ακριβώς τόξο κύκλου που αποτελεί λύση του προβλήματός μας. Ας εξετάσουμε τις εξισώσεις που περιγράφουν την κυκλική κίνηση:

Ακτίνα κύκλου	R
Διάνυσμα θέσης	$P\ (Px, Py)$
Εφαπτομενική ταχύτητα	$V\ (Vx, Vy)$
Γωνιακή ταχύτητα	ω
Χρόνος	t

Ας θεωρήσουμε αρχικά ότι το κέντρο του κύκλου συμπίπτει με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων (0,0) και πως το σημείο αφετηρίας είναι το (R,0)
Για κίνηση ευθύγραμμη ομαλή έχουμε:

$$P_x = R\cos(\omega t)$$

$$P_y = R\sin(\omega t)$$

Για την εφαπτομενική ταχύτητα έχουμε:

$$V = \omega R$$

Αν απαιτήσουμε η εφαπτομενική ταχύτητα να είναι ίση με 1 ΣΜ/ΔΤ, τότε έχουμε:

$$\omega = \frac{V}{R} = \frac{1}{R}$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$P_x = R\cos\left(\frac{1}{R}t\right)$$

$$P_y = R\sin\left(\frac{1}{R}t\right)$$

Παραγωγίζοντας τις παραπάνω παίρνουμε τις σχέσεις για τις συνιστώσες της εφαπτομενικής ταχύτητας:

$$V_x = -\sin\left(\frac{1}{R}t\right)$$

$$V_y = \cos\left(\frac{1}{R}t\right)$$

Επομένως:

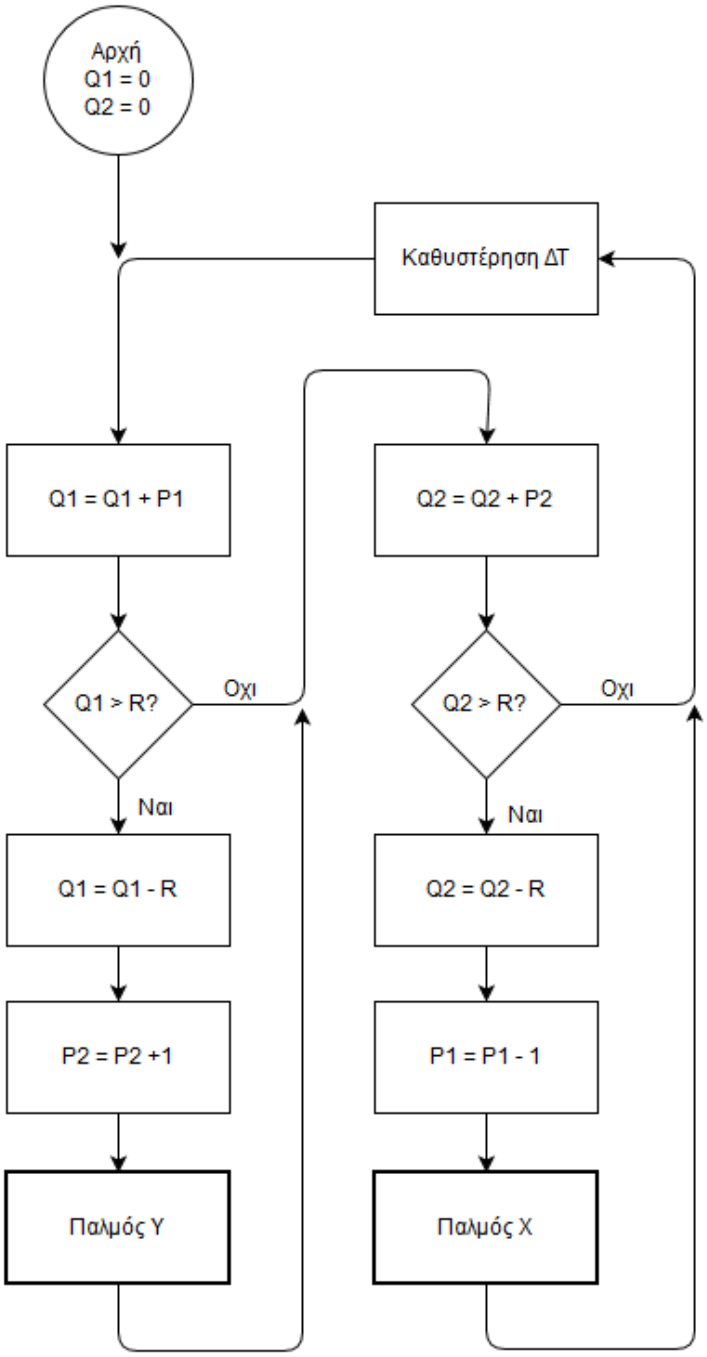
$$V_x = -\frac{1}{R}P_y$$

$$V_y = \frac{1}{R}P_x$$

Το σκεπτικό της μεθόδου παρεμβολής είναι παρόμοιο με την περίπτωση ευθύγραμμης κίνησης: Ανά διαστήματα ΔΤ αυξάνουμε την μεταβλητή θέσης του άξονα Χ (P_x) κατά την ποσότητα $-\frac{P_y}{R}$ και την μεταβλητή θέσης του άξονα Υ (P_y) κατά ην ποσότητα $\frac{P_x}{R}$. Κάθε φορά που κάποια μεταβλητή θέσης συμπληρώνει μία ακέραιη μονάδα, προωθούμε τον αντίστοιχο άξονα κατά ένα βήμα σχηματίζοντας έναν παλμό στο αντίστοιχο σήμα ελέγχου. Σημαντικό στοιχείο της κίνησης είναι ότι κάθε φορά που συμβαίνει μετακίνηση σε κάποιον άξονα, αλλάζει αντιστοίχως και το μέτρο της ταχύτητας του άλλου άξονα. Στην κυκλική κίνηση, δηλαδή, παρατηρείται αυτή η διασύνδεση μεταξύ των αξόνων.

Όπως και στην περίπτωση της ευθύγραμμης κίνησης, θα παρουσιάσουμε τον αλγόριθμο σε εκδοχή που μεταχειρίζεται αποκλειστικά ακεραίους αριθμούς σε μορφή διαγράμματος ροής

4.6.2 Υλοποίηση αλγορίθμου παρεμβολής



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου κυκλικής παρεμβολής

Σημείωση: Το παραπάνω διάγραμμα ροής δεν αλλάζει τη διεύθυνση κίνησης και αφορά μετακίνηση εντός του ίδιου τεταρτημόριου του κύκλου. Επίσης δεν επιλέγει φορά περιστροφής. Η αντιστοιχία με τις μεταβλητές στους τύπους είναι: $P1 = P_x$, $P2 = P_y$

Ας δούμε τώρα τον αλγόριθμο κυκλικής παρεμβολής σε μορφή για εκτέλεση από υπολογιστή:

Αρχικά βλέπουμε τις σταθερές και τις παγκόσμιες μεταβλητές που χρειαζόμαστε:

```
#define RIGHT     0
#define LEFT      1

#define CW        0
#define CCW       1

volatile unsigned int q1;
volatile unsigned int q2;

//circular DDA:
volatile int p1;
volatile int p2;
volatile unsigned int R;
volatile rotation_dir;

volatile unsigned int total_movement_length;
volatile unsigned int number_of_executions;
```

Κώδικας 4.4

Στην συνέχεια βλέπουμε την ρουτίνα αρχικοποίησης του αλγορίθμου. Η ρουτίνα αυτή αναλαμβάνει να θέσει τις κατάλληλες τιμές στις μεταβλητές που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος. Δέχεται ως ορίσματα τις συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου και του αρχικού σημείου, καθώς και την επιθυμητή φορά της κυκλικής κίνησης.
Σημείωση: Η ρουτίνα `calculate_arc_length()` υπολογίζει το συνολικού μήκος του τόξου προς διάνυση. Ο σκοπός της θα επεξηγηθεί στην επόμενη ενότητα.

```
void initialize_circular_DDA(int _center_x, int _center_y, int _stop_x, int
_stop_y, unsigned int _rotation_dir){

	q1 = 0;
	q2 = 0;

	p1 = _center_x;
	p2 = - _center_y;
	R = (unsigned int) round(sqrt(p1*p1 + p2*p2));
	rotation_dir = _rotation_dir;

	number_of_executions = 0;
	total_movement_length = calculate_arc_length(_center_x, _center_y,
_stop_x, _stop_y);

	return;
}
```

Κώδικας 4.5

Τέλος βλέπουμε την ρουτίνα εκτέλεσης του αλγορίθμου. Θα πρέπει να εκτελείται ανά διαστήματα ΔΤ.

```
void execute_circular_DDA(){

	if (number_of_executions < total_movement_length){
		q1 += abs(p1);
		if (q1 >= R){
			q1 -= R;
			if (p1 > 0){
				if (rotation_dir == CW){
					p2++;
					set_direction_y(RIGHT);
				}
				else{
					p2--;
					set_direction_y(LEFT);
				}
			} else {
				if (rotation_dir == CW){
					p2--;
					set_direction_y(LEFT);
				}
				else{
					p2++;
					set_direction_y(RIGHT);
				}
			}
			pulse_y();
		}

		q2 += abs(p2);
		if (q2 >= R){
			q2 -= R;
			if (p2 > 0){
				if (rotation_dir == CW){
					p1--;
					set_direction_x(RIGHT);
				}
				else{
					p1++;
					set_direction_x(LEFT);
				}
			} else {
				if (rotation_dir == CW){
					p1++;
					set_direction_x(LEFT);
				}
				else{
					p1--;
					set_direction_x(RIGHT);
				}
			}
			pulse_x();
		}
		number_of_executions++;
	}
	return;
}
```

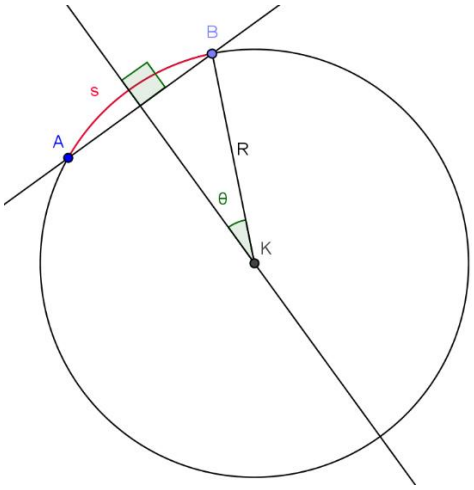
Κώδικας 4.6

4.6.3 Συνθήκη τερματισμού αλγορίθμου

Στην περίπτωση της ευθύγραμμης κίνησης είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι μετά από L εκτελέσεις του αλγορίθμου η κεφαλή θα βρεθεί στο επιθυμητό σημείο. Αντίθετα, στην κυκλική κίνηση το πλήθος των εκτελέσεων που θα χρειαστούν δεν είναι γνωστό εξ' αρχής. Επομένως θα πρέπει να κατασκευάσουμε μια συνθήκη τερματισμού η οποία θα αποφασίζει πότε η κίνηση έχει ολοκληρωθεί. Ας δούμε πιθανούς σχεδιασμούς για αυτήν την συνθήκη.

- Έλεγχος για τοποθέτηση στην επιθυμητή τελική θέση
  Θα μπορούσαμε να ελέγχουμε πότε η κεφαλή βρέθηκε στην επιθυμητή τελική θέση (αυτό το στοιχείο είναι δεδομένο κατά την αρχή της κίνησης, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως) και τότε να τερματίζουμε την εκτέλεση. Ωστόσο, η μέθοδος της παρεμβολής είναι μία αριθμητική μέθοδος η οποία επιτρέπει κάποιο σφάλμα στρογγυλοποιήσεων. Αν και το σφάλμα είναι απολύτως αποδεκτό, εφόσον σχετίζεται με το μέγεθος του βήματός μας, **δεν είναι εξασφαλισμένο πάντα ότι η κεφαλή θα βρεθεί ακριβώς στο επιθυμητό σημείο**. Μπορεί να βρεθεί σε ένα γειτονικό σημείο του πλέγματος. Σε αυτήν την περίπτωση η συγκεκριμένη τεχνική θα αποτύγχανε.

- Μέτρηση μήκους τόξου
  Έχει δειχθεί ότι ο τρόπος σχεδιασμού του συστήματος παρεμβολής μας εξασφαλίζει ότι η κεφαλή κινείται με σταθερή εφαπτομενική ταχύτητα 1ΣΜ/ΔΤ. Αυτό σημαίνει ότι καλύπτει έναν πλήρη κύκλο σε ακριβώς $2\pi R$ εκτελέσεις, μέγεθος ίσο με την περιφέρεια του κύκλου. Επομένως αν μετρήσουμε το μήκος του τόξου (s) που θέλουμε να διαγράψει η κεφαλή μας κατά την διάρκεια της πλήρους κίνησης, θα γνωρίζουμε το πλήθος των εκτελέσεων του συστήματος παρεμβολής που θα χρειαστούν. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει ως εξής:



Σχήμα 4.6: Μέτρηση μήκους τόξου

$$\theta = \arcsin\left(\frac{AB}{2} * \frac{1}{R}\right) \qquad [rad]$$

$$s = 2\theta R \qquad [\Sigma M]$$

4.6.4 Επεξεργασία εντολών κυκλικής κίνησης G-Code

Μία εντολή ευθύγραμμης κίνησης G-Code στο επίπεδο XY έχει την εξής μορφή:

```
     G02 X<x_value> Y<y_value> R <r_value>
     G03 X<x_value> Y<y_value> R <r_value>
G02 X<x_value> Y<y_value> I<i_value> J<j_value>
G03 X<x_value> Y<y_value> I<i_value> J<j_value>
```

Για τις παραμέτρους έχουμε τα εξής:

- G02 – G03: αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη κίνηση
- x_value: Η τετμημένη (x) του σημείου στο οποίο θέλουμε να φτάσουμε
- y_value: Η τεταγμένη (y) του σημείου στο οποίο θέλουμε να φτάσουμε
- r_value: Η ακτίνα του κύκλου επάνω στον οποίο θέλουμε να κινηθούμε
- i_value: Η τετμημένη (x) του κέντρου του κύκλου επάνω στον οποίο θέλουμε να κινηθούμε
- j_value: Η τεταγμένη (y) του κέντρου του κύκλου επάνω στον οποίο θέλουμε να κινηθούμε

Όπως φαίνεται, υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι να δηλώσουμε κυκλική κίνηση με τις εντολές G-Code. Πέρα από τις συντεταγμένες του σημείου – προορισμού, μπορούμε να δηλώσουμε την ακτίνα του κύκλου πάνω στον οποίο θέλουμε να κινηθούμε ή εναλλακτικά τις συντεταγμένες του κέντρου του. Οι δύο τρόποι αυτοί είναι ισοδύναμοι. Κάθε κίνηση μπορεί να γραφτεί με την χρήση οποιουδήποτε από τους δύο τρόπους.

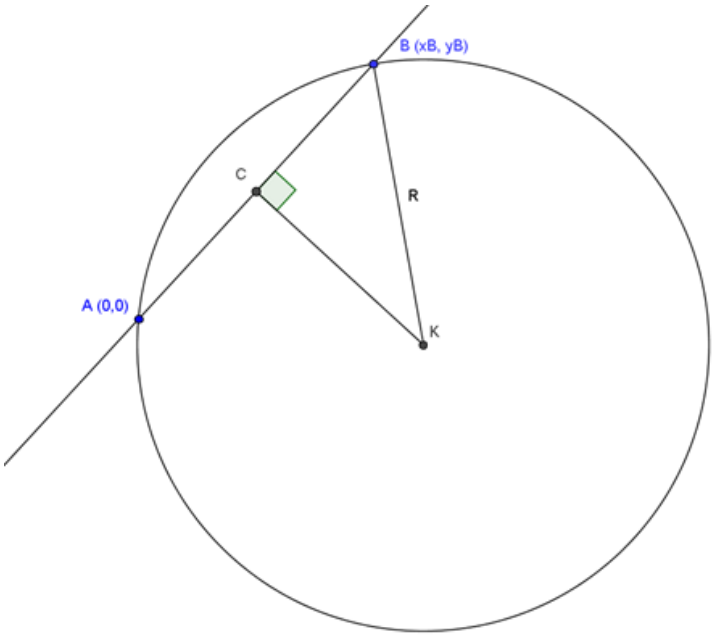
Ας δούμε πώς προκύπτουν οι παράμετροι του συστήματος κυκλικής παρεμβολής από τα παραπάνω στοιχεία. Θα ξεκινήσουμε με την εντολή που δίνει τις συντεταγμένες του κέντρου. Έχει υποτεθεί ότι χρησιμοποιείται σχετικό σύστημα συντεταγμένων και πως οι τιμές είναι στο μετρικό σύστημα. Θα χρησιμοποιήσουμε πάλι την σταθερά μετατροπής mm σε ΣΜ: mm_to_BLUs.

- $P_1 = i_value$
- $P_2 = -j_value$
- $R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$

Σε περίπτωση που οι εντολές χρησιμοποιούν απόλυτο σύστημα συντεταγμένων τότε το σύστημά μας πρέπει να διατηρεί σε μία μεταβλητή την τρέχουσα θέση σε κάθε άξονα και να υπολογίζει την τα διάφορα μήκη ως την διαφορά των δοθέντων θέσεων από την τρέχουσα.

4.6.4.1 Μεταφορά από παραμέτρους X, Y, R σε X, Y, I, J

Ο αλγόριθμος κυκλικής παρεμβολής έχει δειχθεί ότι κάνει χρήση των συντεταγμένων του κέντρου του κύκλου. Σε περίπτωση που η εντολή μας δίνει απλώς την ακτίνα του κύκλου και το σημείο άφιξης, οι συντεταγμένες του κέντρου θα πρέπει να κατασκευαστούν. Στο σήμα φαίνεται η επιθυμητή διαδρομή όπου το Α είναι το σημείο αφετηρίας, που έχει υποτεθεί ότι βρίσκεται στο σημείο (0,0) για σχετικό σύστημα συντεταγμένων, το Β είναι το σημείο άφιξης και το Κ το κέντρο του κύκλου



Σχήμα 4.7: Στοιχεία κυκλικής κίνησης

Για το σχήμα έχουμε:

Χορδή ΑΒ:

$$AB = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2}$$

Το σημείο C είναι το μέσο της, οπότε έχουμε:

$$AC = CB = \frac{AB}{2}$$

Για το απόστημα CK έχουμε:

$$CK = \sqrt{R^2 - CB^2}$$

Θα κατασκευάσουμε τα μοναδιαία διανύσματα $\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{CK}$:

$$\overrightarrow{AB} = \left(\frac{X_B}{AB}, \frac{Y_B}{AB}\right)$$

Το διάνυσμα $\overrightarrow{CK}$ προκύπτει ως το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στο $\overrightarrow{AB}$ (υπάρχουν δύο λύσεις)

$$\overrightarrow{CK} = (Y_{\overrightarrow{AB}}, -X_{\overrightarrow{AB}}) \text{ ή } \overrightarrow{CK} = (-Y_{\overrightarrow{AB}}, X_{\overrightarrow{AB}})$$

Έτσι κατασκευάζουμε τις συντεταγμένες του κέντρου:

$$K = \overrightarrow{AB} * AC + \overrightarrow{CK} * CK = (\text{i_value}, \text{j_value})$$

Αντικαθιστώντας τις παραμέτρους έχουμε:

$$AB = \text{sqrt}(x_value^2 + y_value^2)$$

$$AC = AB/2$$

$$CK = \text{sqrt}(r_value^2 - AC^2)$$

Οπότε καταλήγουμε στις εξής εξισώσεις:

i_value = x_value/2 + (y_value/AB)*CK

i_value = x_value/2 + (y_value/AB)*CK

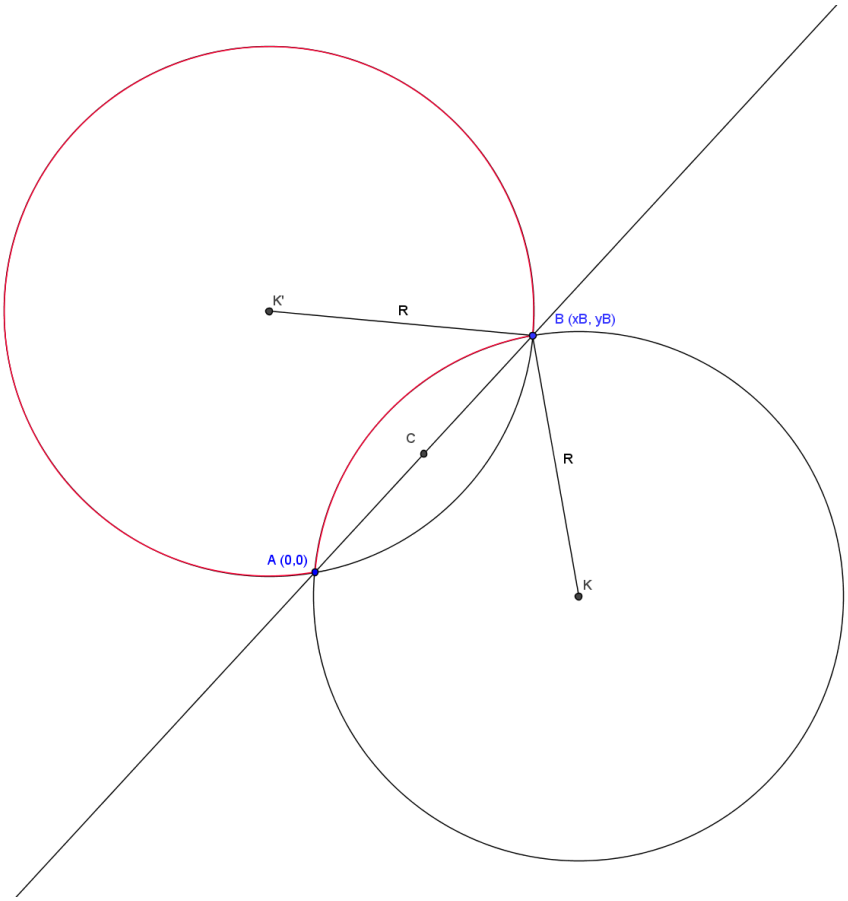
ή

i_value = x_value/2 - (y_value/AB)*CK

i_value = x_value/2 + (y_value/AB)*CK

Η τελευταίες σχέσεις αποτελούν τους τύπους εύρεσης των τιμών i_value, j_value από την τριάδα παραμέτρων x_value, y_value, r_value. Η ύπαρξη δύο λύσεων οφείλεται στα δύο δυνατά κάθετα διανύσματα στην χορδή. Αυτό αποδεικνύει ότι η χρήση της εντολής με την ακτίνα αντί για τις συντεταγμένες του κύκλου έχει δύο δυνατές υλοποιήσεις. Συνήθως οι εργαλειομηχανές επιλέγουν την λύση που καταλήγει σε μικρότερο μήκος τόξου, ή δέχονται μια επιπλέον παράμετρο για την απόφαση αυτή.

Στο παρακάτω σχήμα με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα δύο δυνατά τόξα που επαληθεύουν την ίδια τριάδα x_value, y_value, r_value για δεξιόστροφη κίνηση με αφετηρία το σημείο Α και προορισμό το σημείο Β.



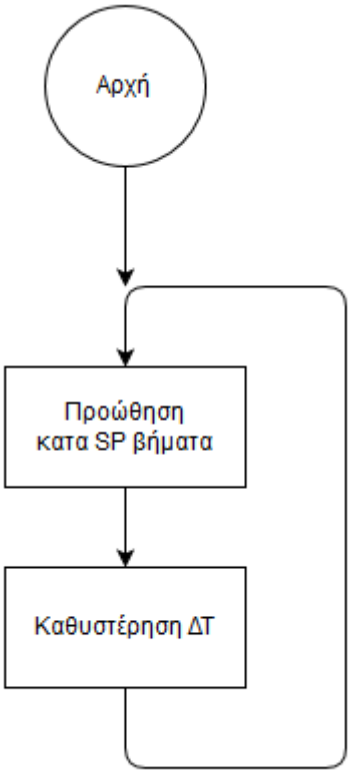
Σχήμα 4.8: Ζεύγος λύσεων τριάδας X Y R

4.7 Κίνηση άξονα εξώθησης πλαστικού

Οι κινήσεις της κεφαλής στο επίπεδο χρειάζεται να συνοδεύονται από παράλληλη εξώθηση θερμοπλαστικού με τέτοιον τρόπο ώστε η εναποτιθέμενη ποσότητα υλικού να διατηρεί σταθερή γεωμετρία και όγκο ανά μονάδα μήκους. Αυτό προϋποθέτει συγχρονισμό του κινητήρα εξώθησης με τους κινητήρες που μεταφέρουν την κεφαλή.

Ας εξετάσουμε τα δεδομένα του προβλήματος:
Χρειαζόμαστε σταθερό όγκο υλικού ανά μονάδα μήκους μετακίνησης της κεφαλής. Το υλικό παρέχεται με την μορφή ενός ινιδίου πρακτικά απείρου μήκους το οποίο εισχωρεί στο θερμό άκρο της κεφαλής με την ώθηση που δέχεται από τον κινητήρα εξώθησης. Στην συνέχεια εξέρχεται από την οπή του θερμού άκρου έχοντας αποκτήσει την κατάλληλη θερμοκρασία. Το ινίδιο αυτό έχει σταθερή διάμετρο και η γεωμετρία του δεν αλλάζει κατά μήκος. Επομένως, μπορούμε να αναγάγουμε τον όγκο της εξωθούμενης ποσότητας σε μήκος προώθησης του ινιδίου. Έτσι το πρόβλημά μας μετασχηματίζεται στο εξής: *Χρειαζόμαστε σταθερό μήκος μετακίνησης του υλικού ανά μονάδα μήκους μετακίνησης της κεφαλής.*

Έχει δειχθεί ότι ο σχεδιασμός των συστημάτων παρεμβολής τόσο της ευθύγραμμης όσο και της κυκλικής κίνησης, επιτυγχάνουν σταθερό μέτρο γραμμικής ταχύτητας κίνησης της κεφαλής ίσο με 1 ΣΜ/ΔΤ. Επομένως, αν εξασφαλίσουμε ότι ο κινητήρας εξώθησης πλαστικού προωθείται κατά ένα συγκεκριμένο αριθμό βημάτων σε κάθε εκτέλεση των αλγορίθμων παρεμβολής, τότε έχουμε επιτύχει σταθερό όγκο εξωθούμενου πλαστικού ανά μονάδα μήκους μετακίνησης της κεφαλής. Η σταθερά αυτή, έστω SP, καθορίζει το μέγεθος του όγκου αυτού.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εξώθησης πλαστικού

4.7.1 Αποσύνδεση εντολών κίνησης G-Code από άξονα εξώθησης πλαστικού

Όπως φάνηκε στα προηγούμενα, η σταθερά που καθορίζει τον όγκο του εξωθούμενου πλαστικού και ο χρονισμός των συστημάτων παρεμβολής των κινήσεων στο επίπεδο XY είναι αρκετά για τον πλήρη καθορισμό της κίνησης του κινητήρα εξώθησης πλαστικού. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημά μας δεν χρειάζεται να μεταχειρίζεται εντολές G-Code σχετικές με την κίνηση του άξονα αυτού. Αντίθετα, κάνει χρήση κάποιων *εντολών ρυθμίσεων* της γλώσσας G-Code:

```
M03
M05
```

Η εντολή M03 σηματοδοτεί την ενεργοποίηση του συστήματος εξώθησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ενεργοποιείται ο έλεγχος θερμοκρασίας του θερμού άκρου και το σύστημα εξώθησης να προωθείται κάθε φορά που εκτελείται ο αλγόριθμος παρεμβολής των κινήσεων του επιπέδου XY.

Η εντολή M05 σηματοδοτεί την απενεργοποίηση του συστήματος εξώθησης. Μετά την εκτέλεσή της το θερμό άκρο αφήνεται να ψυχθεί και το σύστημα εξώθησης δεν αντιδρά σε δραστηριότητα των συστημάτων παρεμβολής.

Εκτός από την χρήση της εντολής M05 για την απενεργοποίηση του συστήματος εξώθησης, κάποιες από τις εντολές κίνησης της κεφαλής δεν συνοδεύονται από παράλληλη εξώθηση υλικού. Τέτοιες είναι η εντολή ταχείας κίνησης G00 και οποιαδήποτε εντολή κίνησης κατά τον άξονα Z.

4.7.1.1 Αποφυγή φαινομένου στάλαξης

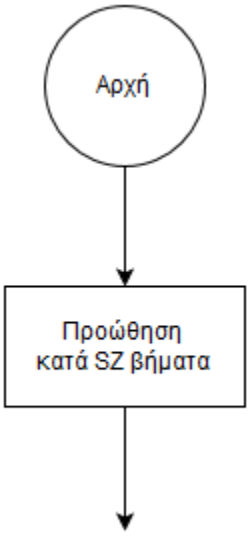
Όταν το σύστημα εξώθησης μεταβαίνει από την ενεργή στην ανενεργή κατάσταση, στην εσωτερική κοιλότητα του θερμού άκρου έχει παραμείνει μια ποσότητα υλικού η οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία που καθιστά την κατάστασή του ημίρρευστη. Επομένως, και με το δεδομένο ότι ο προσανατολισμός του θερμού άκρου είναι κάθετος, είναι πιθανό μία ποσότητα υλικού να εξέλθει από το θερμό άκρο ακόμα και όταν δεν δέχεται ανάλογη ώθηση από το σύστημα εξώθησης. Αυτό το φαινόμενο το ονομάζουμε στάλαξη του υλικού και είναι ανεπιθύμητο.

Για την πρόληψη του φαινομένου αυτού μπορούμε να δημιουργούμε μία ελαφρώς αρνητική πίεση στην κοιλότητα του θερμού άκρου όταν δεν επιθυμούμε την έξοδο υλικού. Αυτό μπορεί να συμβεί με μετακίνηση του άξονα εξώθησης κατά την αντίθετη φορά κατά κάποια βήματα. Η διαδικασία αυτή χρειάζεται να γίνεται μόνο κάθε φορά που απενεργοποιούμε το σύστημα εξώθησης είτε χρησιμοποιώντας την εντολή ελέγχου, είτε επειδή λάβαμε κάποια εντολή κίνησης χωρίς εναπόθεση.

4.8 Κίνηση άξονα Z

Η κίνηση του άξονα Z είναι ιδιαίτερα απλή στα συστήματα 2 ½ αξόνων. Σύμφωνα με αυτόν τον σχεδιασμό, η κίνηση του τρίτου άξονα είναι εντελώς αποσυνδεδεμένη από οποιαδήποτε κίνηση στο επίπεδο XY. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση κατά οριζόντια επίπεδα, που έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα, περιλαμβάνει εξώθηση πλαστικού μόνο κατά τις κινήσεις στα οριζόντια επίπεδα. Επομένως, ο άξονας Z είναι αποσυνδεδεμένος και από τον κινητήρα εξώθησης πλαστικού. Η κίνηση κατά τον άξονα Z, δηλαδή, αποτελεί ένα εντελώς ανεξάρτητο τμήμα της συνολικής κίνησης της συσκευής. Όταν η συσκευή μας πραγματοποιεί κίνηση κατά αυτόν τον άξονα δεν πραγματοποιείται καμία άλλη κίνηση.

Επιπλέον, η διαφορά ύψους του κάθε επιπέδου από το επόμενο είναι μία σταθερά που σχετίζεται με τις διαστάσεις του υλικού που εξωθούμε. Άλλωστε, η κάθε επίπεδη στρώση αποτελείται από θερμοπλαστικό και χρειάζεται να βρίσκεται σε επαφή με την προηγούμενή της ώστε να επέλθει συσσωμάτωση του υλικού. Έτσι, σε κάθε κίνηση του άξονα Z αρκεί ο αντίστοιχος κινητήρας να προωθείται κατά έναν συγκεκριμένο αριθμό βημάτων, έστω SZ. Ο χρονισμός μεταξύ των βημάτων αυτών δεν επηρεάζει τις υπόλοιπες συνιστώσες του συστήματος.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου κίνησης στον άξονα Z

Οι εντολές του G-Code που σχετίζονται με την κίνηση του άξονα Z είναι της εξής μορφής:

```
G00 Z <z_value> F <feed_value>
G01 Z <z_value> F <feed_value>
```

4.9 Προφίλ ταχύτητας

4.9.1 Σημασία και είδη ελέγχου προφίλ ταχύτητας

Στις προηγούμενες ενότητες μελετήθηκε ο τρόπος παραγωγής των σημάτων ελέγχου για τα δύο βασικά είδη κίνησης του ρομποτικού μηχανισμού. Τα συστήματα παρεμβολής εξασφαλίζουν τον σωστό συγχρονισμό μεταξύ των χρονικών σημάτων ελέγχου για τον κάθε άξονα. Ο αλγόριθμος της παρεμβολής εκτελείται ανά χρονικά διαστήματα ΔΤ και εξασφαλίζει γραμμική ταχύτητα κίνησης με μέτρο ίσο με 1 ΣΜ/ΔΤ. Δείχθηκε επίσης πώς υπολογίζεται η χρονική διάρκεια ΔΤ ανάλογα με την επιθυμητή ταχύτητα της κεφαλής σε φυσικές μονάδες. Ο σχεδιασμός του συστήματος έχει γίνει με τέτοιον τρόπο ώστε η ταχύτητα της κεφαλής να παραμένει σταθερή κατά την εκτέλεση μίας εντολής κίνησης.

Ωστόσο η κεφαλή, που είναι το κινούμενο τμήμα του συστήματος, πρόκειται για ένα στερεό σώμα το οποίο κατέχει κάποια μάζα. Φυσικά η μάζα αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα συγκρινόμενη με τα υπόλοιπα στοιχεία του συνολικού συστήματος. Συνεπώς, εφόσον η κεφαλή αρχικοποιείται σε κατάσταση ηρεμίας, δεν μπορεί να υποτεθεί ότι τίθεται σε κίνηση σταθερής ταχύτητας ακαριαία. Μάλιστα, ο δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα υπαγορεύει ότι όσο πιο εσπευσμένα γίνει η απόκτηση της ταχύτητας αυτής από την κεφαλή, τόσο πιο μεγάλες δυνάμεις πρέπει να ασκηθούν σε αυτήν. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούμε, τα ηλεκτρονικά και η μηχανική κατασκευή του συστήματος, μας οριοθετούν το μέγεθος των δυνάμεων που μπορούμε να ασκήσουμε στην κεφαλή. Επιπλέον, επιθυμούμε οι δυνάμεις που ασκούνται εσωτερικά του συστήματος να είναι ομαλές και ήπιες ώστε να αποφύγουμε ανεπιθύμητους συντονισμούς και ταλαντώσεις της κατασκευής.

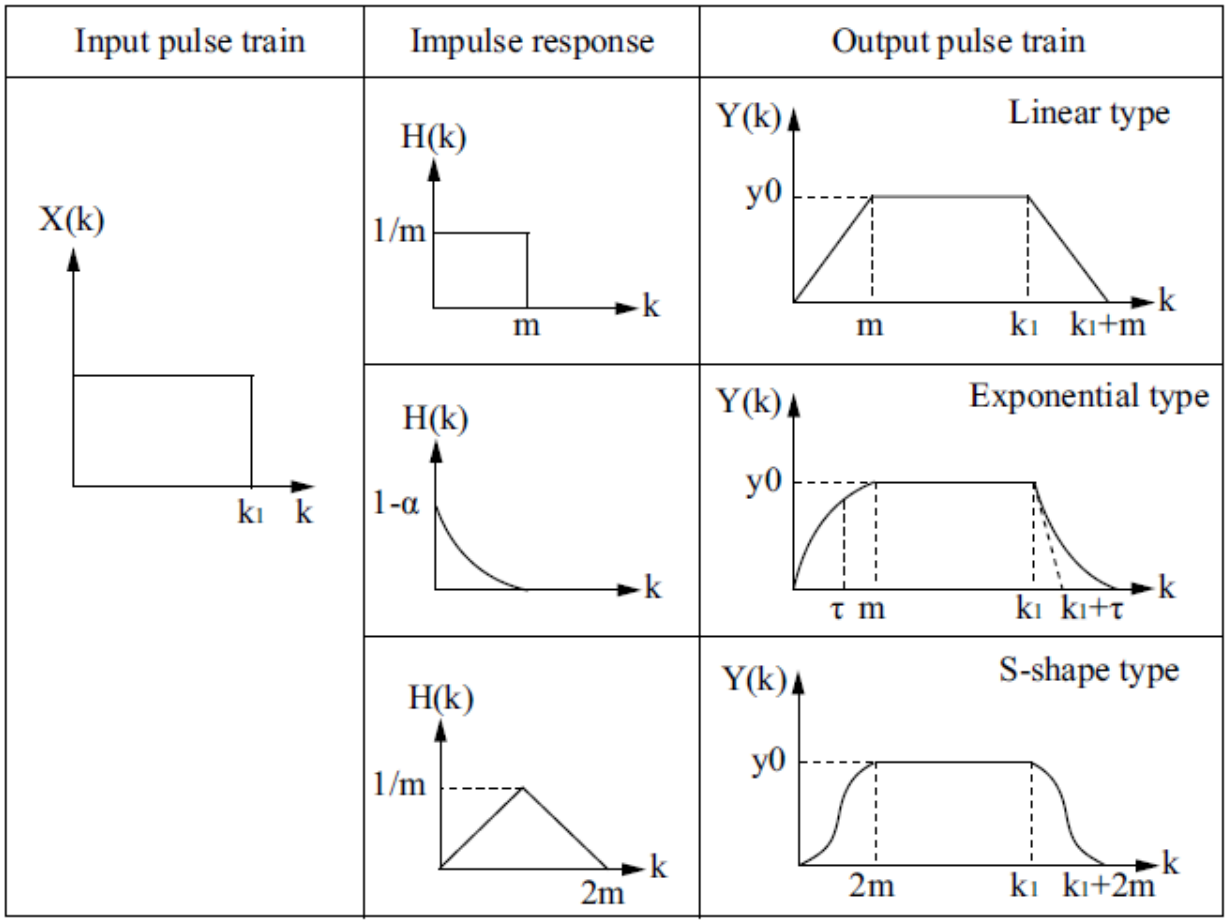
Επομένως, χρειάζεται να ελέγξουμε τον ρυθμό επιτάχυνσης και επιβράδυνσης του συστήματος. Δηλαδή, την μορφή ανόδου και καθόδου της κυματομορφής της ταχύτητας ως προς τον χρόνο. Τα συστήματα ελέγχου της ταχύτητας κατηγοριοποιούνται σε αυτά που ενεργούν **πριν** την διαδικασία της παρεμβολής και σε αυτά που ενεργούν **μετά**. Οι πιο δημοφιλείς τεχνικές ελέγχου του προφίλ ταχύτητας που εφαρμόζονται μετά την διαδικασία της παρεμβολής είναι οι εξής:

- Γραμμική ράμπα ανόδου/καθόδου
  Η μορφή αυτή ονομάζεται και ως τραπεζοειδής ταχύτητα. Αποτελεί ίσως τον πιο απλό και πιο διαδεδομένο τρόπο ελέγχου της ταχύτητας στις εργαλειομηχανές. Η στιγμιαία τιμή της ταχύτητας φιλτράρεται με ένα φίλτρο κινούμενου μέσου

- Εκθετική ράμπα ανόδου/καθόδου
  Η μορφή αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση αριθμητικών μεθόδων παρόμοιες με αυτές των συστημάτων παρεμβολής

- Ράμπα σχήματος – S
  Η μορφή αυτή επιτυγχάνει την πιο ομαλή ράμπα μεταβολής της ταχύτητας επειδή η κυματομορφή που προκύπτει παρουσιάζει συνέχεια και ως προς της παράγωγό της. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε ομαλές μεταβάσεις και στην επιτάχυνση που αναπτύσσεται. Το φιλτράρισμα πραγματοποιείται από ένα φίλτρο τριγωνικής κρουστικής απόκρισης

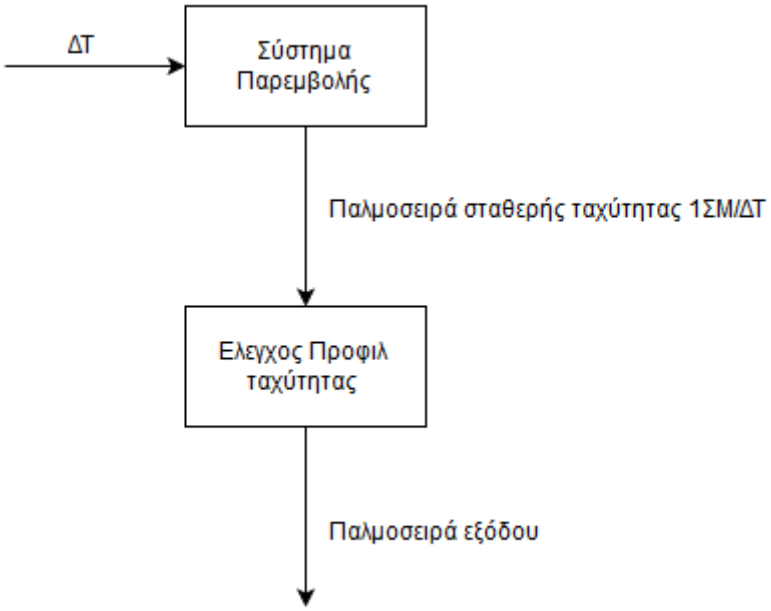
Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την επίδραση των φίλτρων για τις αναφερθείσες μορφές μεταβολής της ταχύτητας.



Σχήμα 4.11: Μορφές ρύθμισης προφίλ ταχύτητας [31]

4.9.2 Αποσύνδεση συστήματος παρεμβολής από ρύθμιση ταχύτητας: Δυναμική ρύθμιση περιόδου ΔΤ

Οι προαναφερθέντες τρόποι ρύθμισης του προφίλ ταχύτητας έχουν ως κοινό τόπο το γεγονός ότι προκύπτουν μετά από φιλτράρισμα της παλμοσειράς εξόδου που παράγεται από τα συστήματα παρεμβολής των κινήσεων.



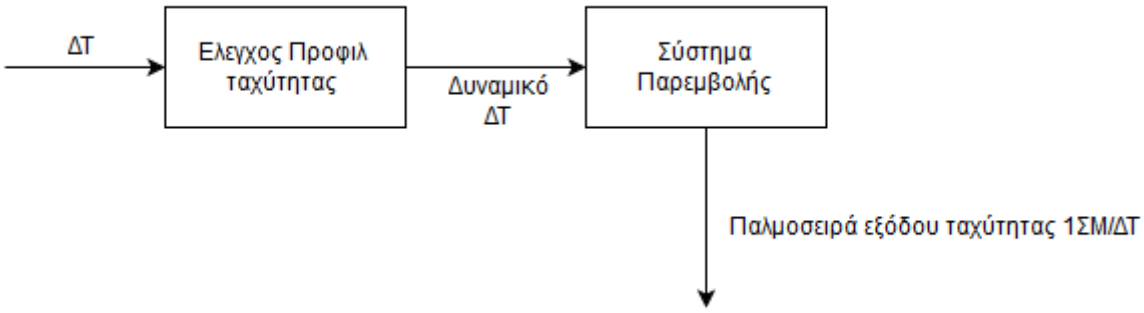
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ροής συστήματος ελέγχου της ταχύτητας μετά την παρεμβολή

Η εφαρμογή τους είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για συστήματα τα οποία μεταχειρίζονται την στιγμιαία ταχύτητα των αξόνων, η οποία συνελίσσεται με την κρουστική απόκριση των φίλτρων για την παραγωγή των ταχυτήτων εξόδου. Οι τεχνικές αυτές στην πλειοψηφία τους απαιτούν ακρίβεια στους υπολογισμούς και τα μεγέθη. Συνίσταται η χρήση αριθμητικής κινητής υποδιαστολής. Για παράδειγμα, οι κρουστικές αποκρίσεις των φίλτρων είναι απαραίτητο να έχουν ολοκλήρωμα ίσο με την μονάδα ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα επηρεαστεί η συνολική μετατόπιση της κεφαλής. Κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό με χρήση αριθμητικής ακεραίων. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση του εκθετικού τύπου όπου είναι εφικτή αριθμητική μέθοδος υπολογισμού. Επιπλέον, η υλοποίηση δυσχεραίνεται και από την ανάγκη ενσωμάτωσης της κυματομορφής του σήματος διεύθυνσης στα συστήματα ελέγχου ταχύτητας. Τέλος, όλες οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόζονται ξεχωριστά σε κάθε άξονα και αυτό οδηγεί στην εμφάνιση σφαλμάτων θέσης με αποτέλεσμα η κίνησης να αποκλίνει από την επιθυμητή τροχιά. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο εμφανές στα σημεία όπου η τροχιά παρουσιάζει αιχμές.

Κατά την διερεύνηση για εναλλακτική λύση ας εξετάσουμε μία φορά ακόμη την έξοδο του συστήματος παρεμβολής και το πρόβλημα ρύθμισης της ταχύτητας:
Το σύστημα παρεμβολής παράγει μία σειρά παλμών για τον κάθε άξονα και τα αντίστοιχα σήματα διεύθυνσης. Ο σχεδιασμός εξασφαλίζει γραμμική ταχύτητα μέτρου 1 ΣΜ/ΔΤ. Η ταχύτητα αυτή είναι σχετική με την χρονική διάρκεια ΔΤ και την κατασκευαστική σταθερά ΣΜ. Είναι επιθυμητό να μεταβληθεί η χρονική συνάρτηση της παλμοσειράς αλλάζοντας την διάρκεια μεταξύ των παλμών που παράγονται. Φυσικά είναι απαραίτητο το πλήθος των παραγόμενων παλμών να παραμείνει αμετάβλητο, αφού αυτό αντιστοιχεί στην μετατόπιση της κεφαλής.

Μπορούμε να αποσυνδέσουμε εντελώς την διαδικασία ελέγχου της ταχύτητας από την διαδικασία παρεμβολής, με τέτοιο τρόπο ώστε η έξοδος της δεύτερης να συνεχίσει να οδηγεί απευθείας τα συστήματα οδήγησης των κινητήρων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την **δυναμική ρύθμιση της περιόδου ΔΤ.**

Η μέθοδος αυτή αφορά την ρύθμιση της χρονικής διάρκειας ΔΤ, δηλαδή του χρονικού διαστήματος μεταξύ των διαδοχικών εκτελέσεων των αλγορίθμων παρεμβολής. Κατ' αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται αποτελεσματικά η χρονική απόσταση μεταξύ των παραγόμενων παλμών, ενώ το σύστημα παρεμβολής συνεχίζει να **λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο παράγοντας παλμούς με ρυθμό 1 ΣΜ/ΔΤ**. Βλέπουμε την μέθοδο αυτή και σχηματικά:



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα ροής συστήματος ελέγχου της ταχύτητας με δυναμικό ΔΤ

Η μέθοδος αυτή δεν αλλοιώνει και δεν παρεμβάλλεται στην διαδικασία παραγωγής των παλμοσειρών εξόδου. Επίσης επιδρά από κοινού στις παλμοσειρές του κάθε άξονα χωρίς να τους διαχωρίζει, αφού σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου παρεμβολής η επίδρασή του στα σήματα εξόδου είναι ακριβώς η ίδια ανεξάρτητα με την διάρκεια της περιόδου ΔΤ. Επομένως, η εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου **δεν προκαλεί σφάλματα θέσης και απόκλιση από την επιθυμητή τροχιά κίνησης**.

Επίσης, η συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου ταχύτητας θα λέγαμε ότι ενεργεί **κατά την διάρκεια** της διαδικασίας παρεμβολής, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνικές που αποτελούν ανεξάρτητες διαδικασίες και εκτελούνται πριν την παρεμβολή ή μετά από αυτήν.

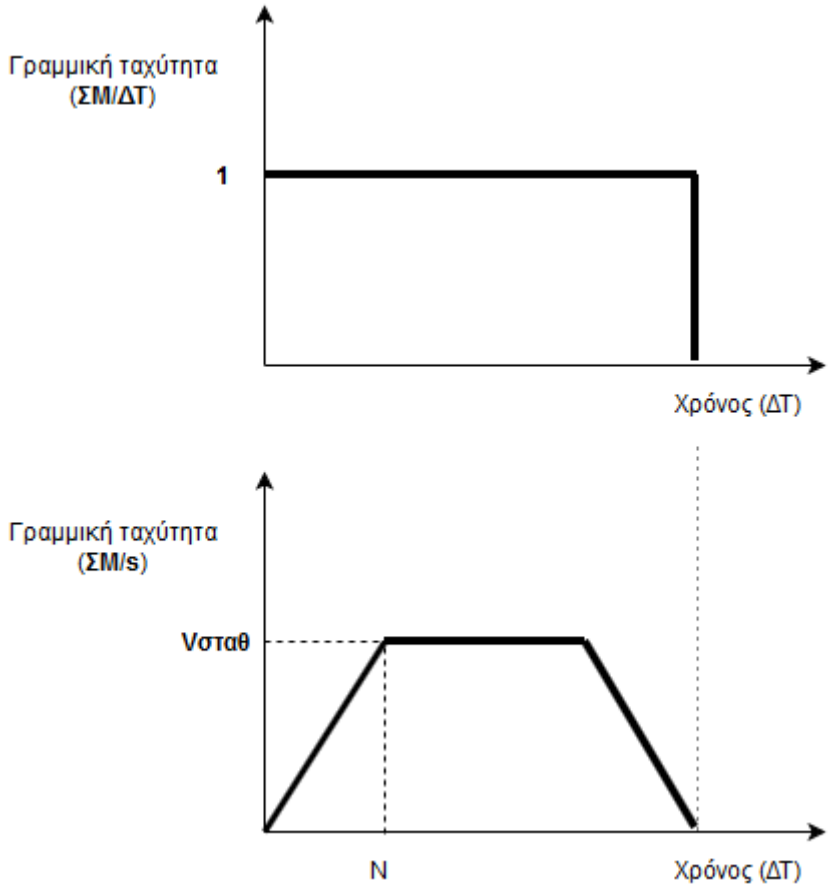
4.9.2.1 Σχεδιασμός συστήματος δυναμικής ρύθμισης ΔΤ

Η ρύθμιση της χρονικής διάρκειας ΔΤ γίνεται με σκοπό η καμπύλη της γραμμικής ταχύτητας να παρουσιάζει συνεχή άνοδο και κάθοδο. Ας ασχοληθούμε μεμονωμένα με την άνοδο. Ζητούμενο είναι η αρχική τιμή να είναι ίση με το 0. Η τελική τιμή της ράμπας ανόδου θα πρέπει να είναι ίση με την τιμή εκείνη που καθορίζεται από την επιθυμητή ταχύτητα πρόωσης της κεφαλής για σχετική ταχύτητα 1ΣΜ/ΔΤ. Προκειμένου να εξαλείψουμε την σταθερά ΣΜ από τις σχέσεις θα εκφράσουμε την ταχύτητα αυτή σε μονάδες ΣΜ/s και θα την ονομάσουμε $\mathbf{V_{σταθ}}$. Την αντίστοιχη διάρκεια της περιόδου ΔΤ θα την ονομάσουμε $\mathbf{ΔΤ_{σταθ}}$. Ισχύει η σχέση:

$$V_{σταθ} = \frac{1}{ΔT_{σταθ}} \qquad \left[\frac{ΣM}{s}\right]$$

Για το επόμενο τμήμα του σχεδιασμού ας συνεχίσουμε να εξετάζουμε τον χρόνο σε μονάδες ΔΤ.

Η διάρκεια της ανόδου, μέχρι να σταθεροποιηθεί η ταχύτητα στην τιμή $V_{σταθ}$ ορίζεται ως **N** μονάδες ΔΤ. Ο αριθμός αυτός μπορεί να χαρακτηριστεί και **τάξη του φίλτρου** το οποίο εφαρμόζουμε στην κυματομορφή της ταχύτητας. Αυτό σημαίνει ότι η περίοδος ΔΤ θα λάβει Ν τιμές μέχρι την σταθεροποίησή της. Οι τιμές αυτές θα ρυθμιστούν με τέτοιον τρόπο ώστε **η ταχύτητα της κεφαλής να αυξάνεται γραμμικά ως προς ΔΤ**. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε νέα τιμή της περιόδου ΔΤ η ταχύτητα θα παρουσιάζει προσαύξηση κατά την σταθερά $V_{σταθ} * \frac{1}{N}$. Με παρόμοιο τρόπο ορίζεται και η κάθοδος.



Σχήμα 4.14: Κυματομορφή ταχύτητας ως προς ΔΤ

Η κλίση της ανόδου και της καθόδου χαρακτηρίζεται από τον αριθμό N. Οι N διαδοχικές τιμές της ταχύτητας κατά την φάση ανόδου είναι οι εξής:

$$V_1 = V_{\sigma\tau\alpha\theta}\frac{1}{N},\ \ V_2 = V_{\sigma\tau\alpha\theta}\frac{2}{N}, \ldots, V_N = V_{\sigma\tau\alpha\theta}\frac{N}{N} = V_{\sigma\tau\alpha\theta} \qquad \left[\frac{\Sigma M}{s}\right]$$

Παρατηρούμε ότι V_N=$V_{\sigma\tau\alpha\theta}$, επομένως η κυματομορφή της ταχύτητας παρουσιάζει συνέχεια ως προς τον χρόνο. Από την παραπάνω σχέση με αντικατάσταση προκύπτει ότι οι διαδοχικές τιμές της περιόδου ΔΤ χρειάζεται να μεταβάλλονται με την μορφή **υπερβολικής συνάρτησης**.

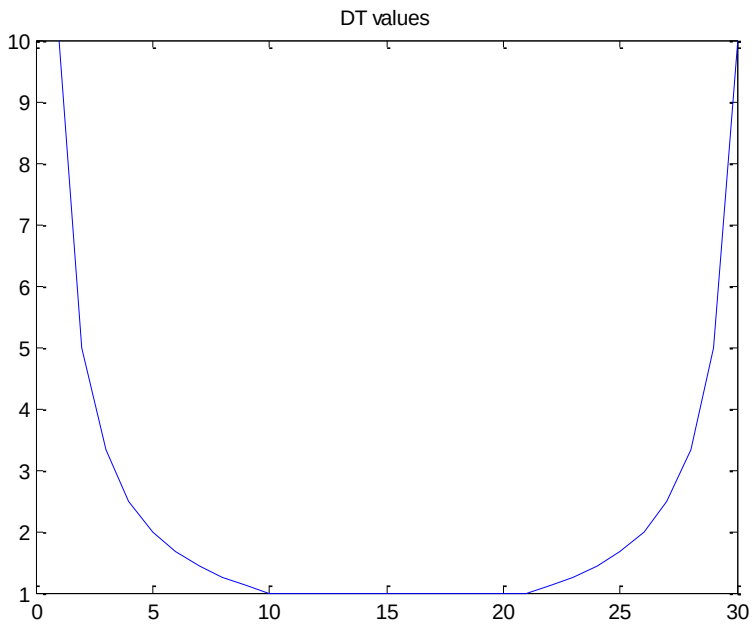
$$\Delta T_1 = \frac{N*\Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}}{1}, \Delta T_2 = \frac{N*\Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}}{2}, \ldots, \Delta T_N = \frac{N*\Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}}{N} = \Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta} \qquad [s]$$

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, οι περίοδοι ΔΤ μεσολαβούν ανάμεσα στις εκτελέσεις του αλγορίθμου παρεμβολής. Επομένως, οι διαδοχικές στιγμές εκτέλεσης του αλγορίθμου παρεμβολής υπολογίζονται με άθροιση των παραπάνω περιόδων:

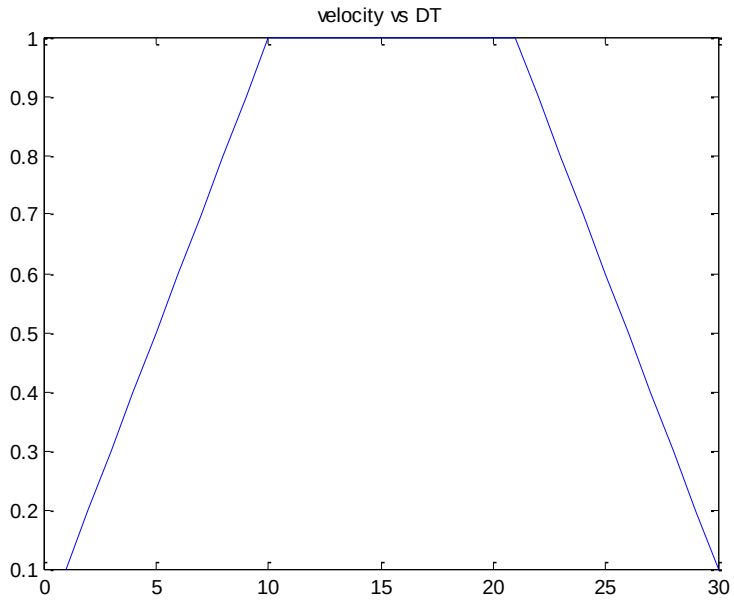
$$t_n = \sum_{k=1}^{n} \Delta T_k$$

$$t_n = N * \Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{n}\right) \qquad [s]$$

Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε την απεικόνιση των διαδοχικών τιμών ΔΤ και την απεικόνιση της ταχύτητας ως προς τις περιόδους ΔΤ:

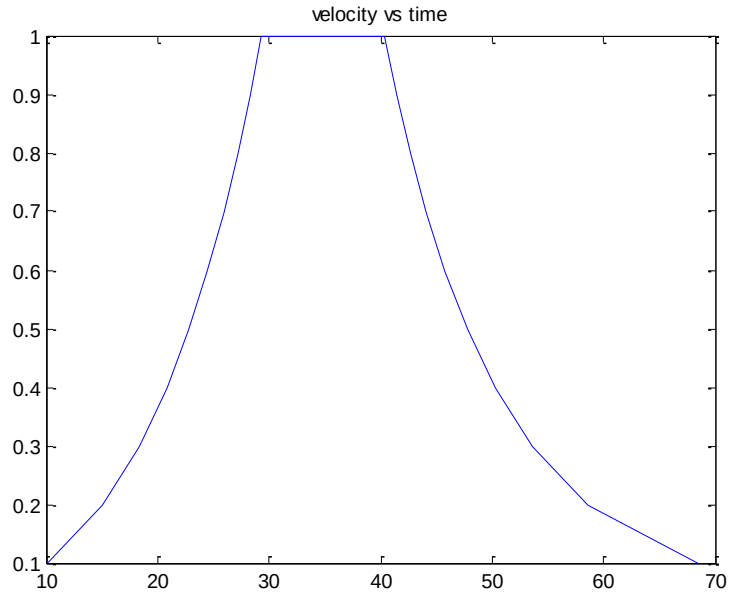


Σχήμα 4.15: Διαδοχικές τιμές περιόδου ΔΤ



Σχήμα 4.16: Κυματομορφή ταχύτητας ως προς ΔΤ

Επαναφέροντας τώρα το σύστημα μέτρησης του χρόνου σε φυσικές μονάδες, στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το μέτρο της ταχύτητας ως προς τον χρόνο. Αυτή είναι η **πραγματική μορφή της κυματομορφής της ταχύτητας**. Η κυματομορφή παρουσιάζει συνέχεια ως προς τον χρόνο και οι ακραίες τιμές είναι μηδενικές. Επομένως έχουμε επιτύχει στην ρύθμιση του προφίλ ταχύτητας.



Σχήμα 4.17: Κυματομορφή ταχύτητας ως προς τον χρόνο

Η **επιτάχυνση** που εμφανίζεται κατά την διάρκεια της ανόδου (και αντίστοιχα της καθόδου) είναι γραμμική και αύξουσα, με αρχή το 0 και μέγιστη τιμή ίση με:

$$a_{max} = \frac{V_N - V_{N-1}}{t_N - t_{N-1}}$$

$$= \frac{V_N - V_{N-1}}{\Delta T_N}$$

$$= \frac{1}{\Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}^2}\frac{1}{N} = V_{\sigma\tau\alpha\theta}^2\frac{1}{N} \qquad \left[\frac{\Sigma M}{s^2}\right]$$

Τέλος, να σημειωθεί ότι η διαδικασία ελέγχου ταχύτητας που περιγράψαμε αμβλύνει την διάρκεια της κάθε εντολής κίνησης εισάγοντας μία **χρονική καθυστέρηση** που υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{\kappa\alpha\theta\upsilon\sigma\tau} = 2\,N\,\Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{N}\right) - 2\,N\,\Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}$$

$$= 2\,N\,\Delta T_{\sigma\tau\alpha\theta}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{N}\right) \qquad [s]$$

Το άθροισμα στην παρένθεση ονομάζεται **Ν-οστός αρμονικός όρος** και βρίσκεται κατά προσέγγιση από την σχέση:

$$\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{N}\right) \approx ln(N) + \gamma$$

,όπου γ είναι η σταθερά των *Euler-Mascheroni* και ισούται με την οριακή διαφορά της αρμονικής αριθμητικής σειράς από τον φυσικό λογάριθμο:

$$\gamma = \lim_{n\to\infty}\left(\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{k} - \ln(n)\right)$$

4.9.3 Υλοποίηση αλγορίθμου ελέγχου ταχύτητας

Η υλοποίηση του ελέγχου του προφίλ ταχύτητας είναι ιδιαίτερα απλή. Αρκεί σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου παρεμβολής να υπολογίζεται, αν χρειάζεται, η νέα τιμή του ΔΤ. Αυτό αρκεί να γίνει κατά τις πρώτες Ν και τις τελευταίες Ν εκτελέσεις του αλγορίθμου παρεμβολής για κάθε εντολή κίνησης. Ας δούμε τον αντίστοιχο κώδικα:

Οι σταθερές και οι παγκόσμιες μεταβλητές που χρειάζονται:

```
#define N 50

volatile unsigned int total_movement_length;
volatile unsigned int number_of_executions;
volatile unsigned int dt_const;
volatile unsigned int dt;
```

Κώδικας 4.7

Και η σχετική ρουτίνα:

```
void control_velocity(){
      if (number_of_executions < N)
            dt = (N*dt_const) / number_of_executions;
      else if (number_of_executions > total_movement_length - N)
            dt = (N*dt_const) / (total_movement_length -
number_of_executions + 1);
      else
            dt = dt_const;

      set_dt_period();
}
```

Κώδικας 4.8

Η ρουτίνα αυτή ελέγχει αν η κίνηση βρίσκεται στις πρώτες ή τελευταίες Ν εκτελέσεις του αλγόριθμου παρεμβολής ώστε να ρυθμίσει κατάλληλα την περίοδο ΔΤ. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιεί την υπολογισμένη τιμή $ΔΤ_{σταθ}$. Η κλήση της πρέπει να γίνεται μετά την κάθε εκτέλεση του αλγόριθμου παρεμβολής.

4.10 Υλοποίηση αλγορίθμου

4.10.1 Δια-πλατφορμική υλοποίηση

Στις προηγούμενες ενότητες παρατέθηκαν οι ρουτίνες υλοποίησης των διάφορων αλγορίθμων. Σε αντίθεση με την σχεδίαση των συστημάτων οδήγησης, στο κεφάλαιο αυτό δεν έγινε επιλογή συγκεκριμένου μικροελεγκτή για την υλοποίηση του κώδικα. Αυτό αποφασίστηκε επειδή οι λειτουργίες αφορούν ανώτερο λογικό επίπεδο της εφαρμογής και επικοινωνούν άμεσα με το σύστημα παραγωγής των εντολών G-code. Με το σύστημα αυτό θα πρέπει να καθοριστεί συγκεκριμένος τρόπος επικοινωνίας, ο οποίος αποτελεί καταλυτικό κριτήριο για την επιλογή πλατφόρμας υλοποίησης. Διάφορες επιλογές επικοινωνίας αποτελούν οι εξής:

- Σειριακή επικοινωνία
- Επικοινωνία μέσω Ethernet, χρήση πρωτοκόλλου HTTP
- Μεταφορά εντολών μέσω αποθηκευτικού μέσου

Τέλος, το σύστημα αυτό θα μπορούσε να ενσωματώνει την λειτουργικότητα παραγωγής των εντολών κίνησης και να δέχεται ως είσοδο απ' ευθείας αρχεία σχεδίων από προγράμματα τύπου CAD.

Γι' αυτόν τον λόγο οι ρουτίνες χαμηλού επιπέδου που αφορούν την δημιουργία των ηλεκτρικών σημάτων και την ρύθμιση χρονιστών ή που χρησιμοποιούν εξειδικευμένα περιφερειακά δεν συμπεριλήφθηκαν στον κώδικα. Αυτές είναι οι εξής:

```
void pulse_x()
void pulse_y()
void pulse_z()
void set_direction_x(unsigned int dir)
void set_direction_y(unsigned int dir)
void set_direction_z(unsigned int dir)
void enable_extruder()
void disable_extruder()
void set_dt_period()
void go_to_home()
void fromIJtoR (g_code_t * gcptr)
unsigned int calculate_arc_length(int _center_x, int _center_y, int _stop_x, int _stop_y)
```

Κώδικας 4.9

Οι παραπάνω ρουτίνες έχουν περιγραφεί ως προς την λειτουργικότητά τους και η αναφορά τους στα αντίστοιχα τμήματα κώδικα έχει επισημανθεί.

4.10.2 Αλγόριθμος επεξεργασίας εντολών G-Code

Παρατίθεται ο κώδικας για την επεξεργασία των εντολών κίνησης. Αρχικά έχει κατασκευασθεί μία δομή δεδομένων για την αποθήκευση των στοιχείων της κάθε κίνησης. Η ονομασία των μεταβλητών συμπίπτει με την ονομασία των αντίστοιχων πεδίων στην σύνταξη των εντολών G-Code:

```
typedef struct {
      char command_letter;
      int command_number;
      int x,y,z,f,i,j,r; //all in BLUs
}g_code_t;
```

Κώδικας 4.10

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα διάφορα μεγέθη που περιγράφουν μήκος αφορούν μονάδες ΣΜ (BLU). Συνεπώς, χρειάζεται η χρήση της κατασκευαστικής σταθεράς μετατροπής μετρικών μονάδων σε ΣΜ:

```
#define BLU_PER_MM            1000
```

Κώδικας 4.11

Στην συνέχεια παρατίθεται η ρουτίνα που δέχεται τις εντολές κίνησης. Η ρουτίνα αυτή έχει ως όρισμα την εκάστοτε εντολή εισόδου ως συμβολοσειρά (String – character array). Η ρουτίνα αυτή επιστρέφει ένα αντικείμενο της δομής που περιγράψαμε νωρίτερα, το οποίο περιέχει όλα τα δεδομένα της εντολής σε μορφή εύχρηστη για οποιαδήποτε συνάρτηση χρειαστεί να τα επεξεργαστεί.

Να σημειώσουμε ότι η ρουτίνα αυτή κάνει χρήση συναρτήσεων για μεταχείριση συμβολοσειρών της βιβλιοθήκης `<string.h>`

```
g_code_t expand_Gcode_command(char * _s){

      g_code_t gc;
      char s[50];
      strcpy(s,_s);

      gc.command_letter = s[0];
      gc.command_number = atoi(&s[1]);
      gc.x = (int) (strchr(s, 'X') ? (atof(strchr(s, 'X')+1) * BLU_PER_MM) : 0);
      gc.y = (int) (strchr(s, 'Y') ? (atof(strchr(s, 'Y')+1) * BLU_PER_MM) : 0);
      gc.z = (int) (strchr(s, 'Z') ? (atof(strchr(s, 'Z')+1) * BLU_PER_MM) : 0);
      gc.f = (int) (strchr(s, 'F') ? (atof(strchr(s, 'F')+1) * BLU_PER_MM) : 0);
      gc.i = (int) (strchr(s, 'I') ? (atof(strchr(s, 'I')+1) * BLU_PER_MM) : 0);
      gc.j = (int) (strchr(s, 'J') ? (atof(strchr(s, 'J')+1) * BLU_PER_MM) : 0);
      gc.r = (int) (strchr(s, 'R') ? (atof(strchr(s, 'R')+1) * BLU_PER_MM) : 0);

      return gc;
}
```

Κώδικας 4.12

Η επόμενη ρουτίνα αναλαμβάνει να επεξεργαστεί τα δεδομένα της εντολής κίνησης και να καλέσει τις κατάλληλες ρουτίνες αρχικοποίησης των συστημάτων παρεμβολής και κίνησης. Δέχεται ως όρισμα ένα αντικείμενο του τύπου `g_code_t` που έχει ορισθεί νωρίτερα.

```
void parse_Gcode_command(g_code_t gc){

	if (gc.command_letter == 'G'){

		dt_const = 1000000 / gc.f; //dt in microseconds
		set_dt_period();

		switch (gc.command_number){
			case 0:
				initialize_linear_DDA(gc.x, gc.y);
				break;
			case 1:
				initialize_linear_DDA(gc.x, gc.y);
				enable_extruder();
				break;
			case 2:
				if (gc.r) fromIJtoR(&gc);
				initialize_circular_DDA(gc.i, gc.j, gc.x, gc.y, CW);
				enable_extruder();
				break;
			case 3:
				if (gc.r) fromIJtoR(&gc);
				initialize_circular_DDA(gc.i, gc.j, gc.x, gc.y, CCW);
				enable_extruder();
				break;
			case 28:
				go_to_home();
				break;
		}
	} else if (gc.command_letter == 'M'){
		switch (gc.command_number){
			case 3:
				enable_extruder();
				break;
			case 5:
				disable_extruder();
				break;
		}
	}

	return;
}
```

Κώδικας 4.13

5 Συμπεράσματα – Σκέψεις για μελλοντική επέκταση

Η παρούσα εργασία αποτελεί εγχείρημα σχεδιασμού ενός αυτόνομου συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης χαμηλού κόστους. Ο μελέτη και ο σχεδιασμός ξεκίνησε από το υλικό του συστήματος και κάλυψε όλον τον χώρο μέχρι τις εντολής κίνησης σε μορφή G-Code.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προοπτική επέκτασης της αυτονομίας του συστήματος ώστε η συσκευή να μεταχειρίζεται αυτούσια σχέδια προγράμματος τύπου CAD. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα θα είχε την ευχέρεια να λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την τοποθέτηση και την στήριξη του προς εκτύπωση σχεδίου, καθώς και για τον τρόπο εκτύπωσης συμπαγών όγκων. Ειδικά το τελευταίο (σχεδίαση μοτίβων πλήρωσης όγκου) αποτελεί πεδίο με έντονο ενδιαφέρον στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έτσι θα δινόταν η δυνατότητα χρήσης προγραμμάτων σχεδιασμού ως έχουν, χωρίς την ανάγκη διαφοροποίησης με την προσθήκη εξειδικευμένης λογικής για τρισδιάστατους εκτυπωτές.

Η παρούσα σχεδιαστική υλοποίηση επιδέχεται επίσης βελτιώσεων και ως προς την πληθώρα των εντολών G-Code που έχει την δυνατότητα να εκτελεί. Αν και το επιλεγμένο υποσύνολο εντολών είναι πλήρες για εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης, επέκτασή του θα καθιστούσε το σύστημα πιο ευέλικτο και πιο συμβατό με υπάρχουσες σχεδιαστικές εφαρμογές.

Οι αλγόριθμοι παρεμβολής των κινήσεων αφορούν την διάνυση ευθύγραμμων τμημάτων και κυκλικών τόξων. Αυτό συνεπάγεται την κατάτμηση περίπλοκων καμπυλών σε τμήματα τέτοιας φύσης από τα συστήματα δημιουργίας των εντολών G-Code. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό από εργαλειομηχανές, η εγγενής υποστήριξη καμπύλων τροχιών από τους αλγορίθμους παρεμβολής θα συνέβαλλε στην αύξηση της ποιότητας του αποτελέσματος εκτύπωσης στις περιπτώσεις αυτές.

6 Βιβλιογραφία

[1] R. Arnott, «The RepRap Project—Open Source meets 3D printing,» σε *Computer and Information Science Seminar Series*, 2008.

[2] «reprap.org,» 2004. [Ηλεκτρονικό].

[3] K. G. Joyce, «Master of Science Thesis: Design of electronics for a high-resolution, multi-material, and modular 3D printer,» Massachusetts Institute of Technology, 2013.

[4] S. Mojie, «Design for the Controller of Desktop 3D Printer,» *Applied Mechanics and materials,* τόμ. 672, pp. 894-897, 2014.

[5] W. Benjamin, «Master of Science Thesis: Closed-Loop Control of a 3D Printer Gantry,» University of Washington, 2014.

[6] E. Brian, «Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing,» Apressus Series, Technology in Action, 2012.

[7] A. Klodowski, «Leakage-proof nozzle design for RepRap community 3D printer,» Cambridge University Press, 2014.

[8] A. Grieve, K. Klingler, M. Acuna, P. Ikonomov και J. Rodriguez, «Dual Purpose Desktop Machine – 3D Printer and CNC Milling,» σε *ASEE North Central Section Conference*, 2014.

[9] W. Paul, «3D printers Proliferate,» IEEE Spectrum, 2010.

[10] J. Kelly, 3D Printing: Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects, Que Publishing, 2014.

[11] P. Zamiska, «Literature Review: 3D Printer,» Saluki Engineering Company, 2013.

[12] H. Lipson και M. Kurman, Fabricated: The New World of 3D Printing, John Wiley & Sons, 2013.

[13] H. Stett, «Ultimate guide to 3D printing,» *Make Magazine,* τόμ. 42, pp. 6-76, 2013.

[14] K. Yamazaki και H. Yoshimaro, «Autonomously Proficient CNC Controller for High-Performance Machine Tools Based on an Open Architecture Concept,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* τόμ. 46, αρ. 1, pp. 275-278, 1997.

[15] K. Srinivasan, «Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms,» *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,* τόμ. 112, pp. 225-232, 2008.

[16] Koren, «Advanced Controllers for Feed Drives,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* τόμ. 41, αρ. 2, pp. 689-698, 1992.

[17] Y. Koren, «Control of Machine Tools,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* τόμ. 119(4B), pp. 749-755, 1997.

[18] M. F. Proctor και J. S. Albus, «Open architecture controllers,» *IEEE Spectrum,* τόμ. 34, αρ. 6, pp. 60-64, 1997.

[19] Σ. Μανιάς και Α. Καλετσάνος , Βιομηχανικά ηλεκτρονικά, Εκδόσεις Συμεών, 2003.

[20] J. M. X. Χαλκιάς, Ωλοκληρωμένη Ηλεκτρονική, Εκδόσεις Συμμετρία, 2000.

[21] Μ. Ιωαννίδου, Συστήματα Ειδικών Ηλεκτρικών Κινητήρων, Cluj-Romania: Mediamira Publisher, 2005.

[22] R. Sedgewick, Αλγόριυμοι σε C, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005.

[23] Ν. Μισυρλής, Δομές Δεδομένων με C, Αυτοέκδοση, 2002.

[24] Atmel, «ATmega32 Datasheet,» 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.atmel.com/images/doc2503.pdf.

[25] Κ. Πεκμεστζή, Συστήματα μικρουπολογιστών, Εκδόσεις Συμμετρία, 2005.

[26] Σ. Τζαφέστας, Αυτόματος Ελεγχος γραμμικών και μη γραμμικών συστημάτων συνεχούς και διακριτού χρόνου, Αυτοέκδοση, 2004.

[27] R. C. Dorf και R. H. Bishop, Σύγχρονα Συστήματα αυτομάτου ελέγχου, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.

[28] P. Smid, CNC Programming Handbook, Industrial Press Inc, 2007.

[29] G. Kenneth, «XY Interpolation ALgorithms,» *Robotics Age,* τόμ. May/June 1983, pp. 22-25, 1983.

[30] Y. Koren και M. Shpitalni, «CNC Interpolators: Algorithms and Analysis,» *Manufacturing Science and Engineering,* τόμ. 64, pp. 83-92, 1993.

[31] S. H. Suh, S. K. Kang, D. H. Chung και I. Stroud, Theory and Design of CNC Systems, Springer, 2008.

[32] Ι. Ν. Αβαριτσιώτης, Τεχνολογία πολυψιφιδικών πακέτων, Αθήνα: Εσωτερικές εκδόσεις ΕΜΠ, 1997.

[33] M. Mano και M. Ciletti, Ψηφιακή Σχεδίαση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2010.

Παράρτημα Α: Πρόγραμμα σε MATLAB για τις απεικονίσεις της ενότητας 4.9

```
clear all
close all
clc

%% Inputs:
N = 10;
dt_const = 1;
steady_phase_duration = 10;

%% Calculations:
dt = (dt_const*N) ./ [1:N];
dt = [dt,ones(1,steady_phase_duration)*dt_const];
dt = [dt, (dt_const*N) ./ [N:-1:1]];

t = cumsum(dt);
velocity = 1 ./ dt;
acceleration = diff(velocity) ./ diff(t);

%% Output:
figure,plot(dt)
title('DT values')

figure,plot(velocity)
title('velocity vs DT')

figure,plot(t, velocity)
title('velocity vs time')

figure,plot(acceleration)
title('acceleration vs time')
```