



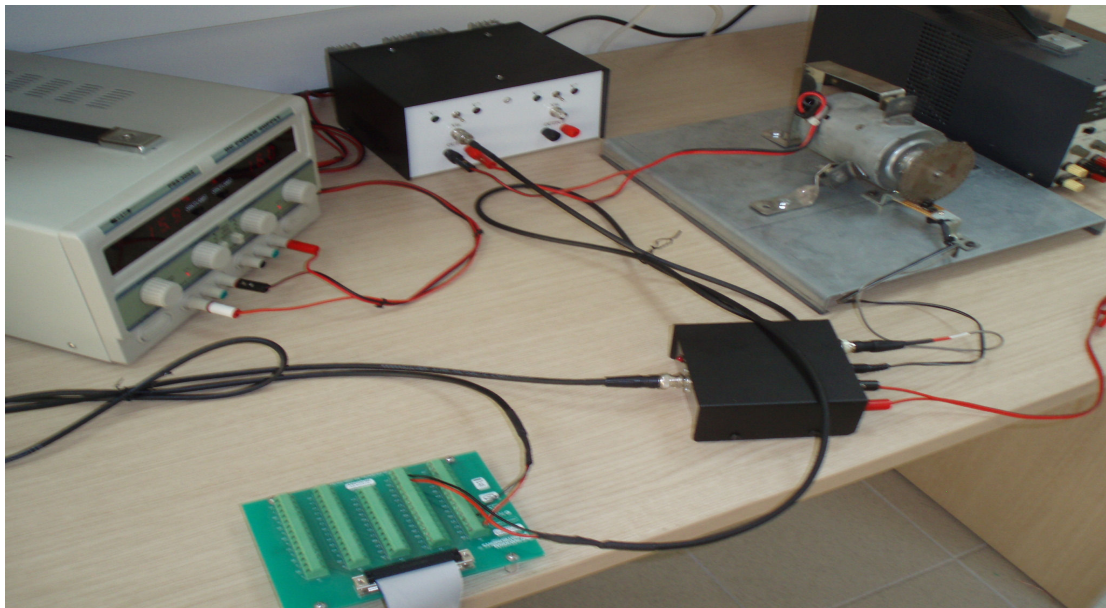
**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

***ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ***

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εισηγητές: Σκυλουράκης Ιωάννης, Γιαννακέλος Φώτης

Επιβλέπων: Φουσκιτάκης Γεώργιος



©
2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πτυχιακή εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε κατά τη φοιτήσή μας στο Τμήμα Ηλεκτρονικής του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης, Παραρτήματος Χανίων υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεώργιου Φουσκιτάκη τον οποίο θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά για την πολύτιμη βοήθεια του και την άψογη συνεργασία που είχαμε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η σχεδίαση και η κατασκευή ενός ψηφιακού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου για τη ρύθμιση της γωνιακής ταχύτητας ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το πλήρες σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου αποτελείται από τον κινητήρα (ελεγχόμενο σύστημα), το στροφόμετρο (αισθητήρας μέτρησης γωνιακής ταχύτητας), το τελικό στοιχείο ελέγχου (ενισχυτής ισχύος), και μια κάρτα συλλογής δεδομένων που αποτέλεσε και τον ψηφιακό ελεγκτή.

Η κάρτα συλλογής δεδομένων συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή και η διαχείριση του συστήματος ελέγχου υλοποιείται μέσω του λογισμικού Matlab/Simulink.

Το σχεδιασθέν ψηφιακό σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου χαρακτηρίζεται από υψηλή αποτελεσματικότητα ενώ ο κινητήρας έχει πλέον τη δυνατότητα να ακολουθήσει διάφορα “προφίλ” ταχύτητας.

ABSTRACT

The subject of the present thesis is the design and implementation of a closed-loop digital control system for the rotational speed adjustment of a D.C. motor. The complete control system consists of the motor (controlled system), the sensor (optical-based tachometer), the actuator (power amplifier) and the data acquisition card connected to the computer for digital control implementation purposes, programmed via Matlab/Simulink.

The designed/implemented digital control system, is characterized by high efficiency as the motor may now follow any speed profile with considerably small error in both the transient and steady state responses.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ1.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	1
1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	2
1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
1.4 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	6
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	6
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2.2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ D.C.	6
2.3 ΣΤΡΟΦΟΜΕΤΡΟ	8
2.3.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	8
2.3.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΤΑΣΗ	10
2.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	14
2.4 ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ (ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ).....	16
2.5 ΚΑΡΤΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DAQ CARD)	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	26
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	26
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	26
3.2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	26
3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	34
3.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΙΣΟΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑ.....	37
3.5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΙΣΟΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ.....	43
3.6 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΥΘΑΙΡΕΤΗ ΕΙΣΟΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ...	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	50
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	50
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός ψηφιακού συστήματος έλεγχου για τη ρύθμιση της γωνιακής ταχύτητας ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος (D.C.) με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

1.1 ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ [1]

Ο αυτόματος έλεγχος είναι από τις σημαντικότερες επιστημονικές περιοχές στις μέρες μας. Αυτό συμβαίνει διότι οι αυτοματισμοί συνδέονται άμεσα με όλες σχεδόν τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες.

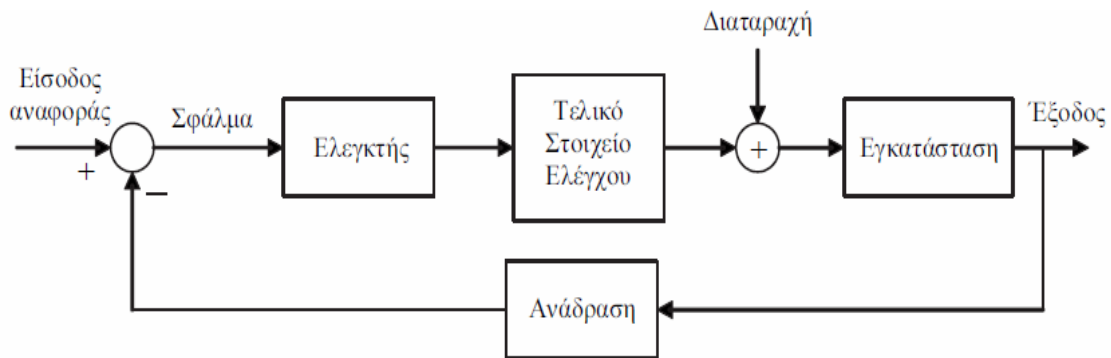
Η θεωρία αυτομάτου ελέγχου αναπτύχθηκε κυρίως τα 20 τελευταία χρόνια λόγω της ταχείας εξέλιξης των ψηφιακών υπολογιστών. Πράγματι, το ιδιαίτερα χαμηλό τους κόστος ενισχύει τη χρήση τους στον έλεγχο πολύπλοκων συστημάτων και διεργασιών.

Τα ψηφιακά συστήματα έλεγχου (digital control systems), ή συστήματα ελεγχόμενα με υπολογιστή (computer-controlled systems), είναι η επιστημονική περιοχή που σκοπό έχει την ανάπτυξη μεθόδων σχεδιασμού συστημάτων έλεγχου βασισμένα σε ψηφιακό υπολογιστή. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Για παράδειγμα:

- Έλεγχος θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης,
- Έλεγχος ηλεκτρικής τάσης, θερμοκρασίας, πίεσης και στάθμης,
- Έλεγχος εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,
- Αεροπορική βιομηχανία, ρομποτική, αεροδιαστημική τεχνολογία, βιοτεχνολογία, ιατρική, κλπ.

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ [1]

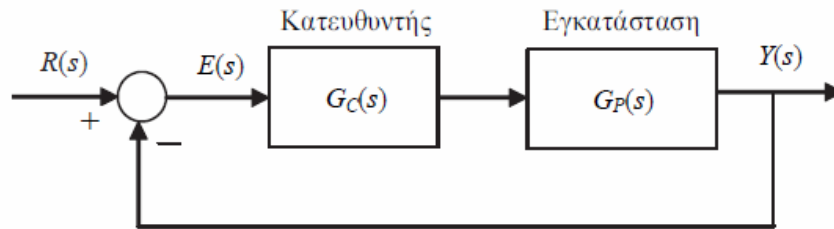
Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ένα κλασικό σύστημα αυτομάτου ελέγχου με τη μορφή δομικού διαγράμματος. Η βασική λειτουργία του είναι η εξής: Στόχος του συστήματος κλειστού βρόγχου, είναι η έξοδος να ακολουθεί όσο πιο πιστά την είσοδο αναφοράς (reference input). Στην ιδανική περίπτωση, η έξοδος ταυτίζεται με την είσοδο αναφοράς. Η ανάδραση (feedback), αποτελεί ουσιαστικά το αισθητήριο όργανο, σκοπός του οποίου είναι η “μέτρηση” της εξόδου. Η διαφορά μεταξύ της εισόδου αναφοράς και της μετρούμενης εξόδου αποτελεί το σφάλμα (error) το οποίο επεξεργάζεται ο ελεγκτής [κατευθυντής (controller)]. Βάσει του νόμου ελέγχου που εκτελείται από τον ελεγκτή, παράγεται το απαιτούμενο σήμα που θα οδηγήσει την εγκατάσταση προς την επιθυμητή έξοδο. Πολλές φορές, μεταξύ του κατευθυντή και της ελεγχόμενης εγκατάστασης, παρεμβάλλεται το τελικό στοιχείο ελέγχου. Αυτό διαμορφώνει κατάλληλα (εφόσον απαιτείται) την έξοδο του κατευθυντή και την καθιστά ικανή να “οδηγήσει” την εγκατάσταση. Η διαταραχή συμβολίζει τους πιθανούς παράγοντες (συνήθως μη-μετρήσιμους), που αλλοιώνουν την απόκριση της εγκατάστασης. Στόχος του συστήματος κλειστού βρόγχου είναι και η ελαχιστοποίηση της επίδρασης της διαταραχής.



Σχήμα 1.1: Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου.

Στον αναλογικό αυτόματο έλεγχο το σύστημα περιγράφεται (μαθηματικά) από διαφορικές εξισώσεις με πραγματικές μεταβλητές. Για την ανάλυση του χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Laplace ο οποίος μετατρέπει τις διαφορικές εξισώσεις πραγματικών μεταβλητών σε αλγεβρικές εξισώσεις μιγαδικών μεταβλητών, διότι έτσι απλοποιείται η μαθηματική ανάλυση. Στην περίπτωση αναλογικού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου,

το Σχήμα 1.1 παίρνει την μορφή του Σχήματος 1.2, όπου όλα τα σήματα και υποσυστήματα περιγράφονται από τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς Laplace.

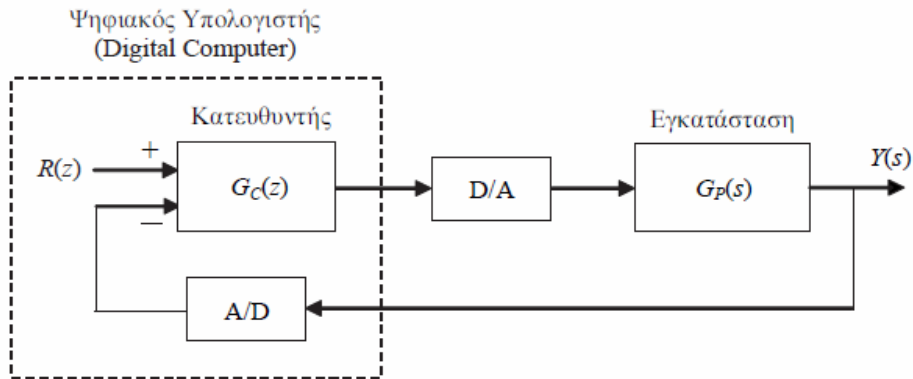


Σχήμα 1.2: Αναλογικό (συνεχούς χρόνου) σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου.

- $R(s)$ ο μετ/μος Laplace της εισόδου αναφοράς (Reference)
- $E(s)$ ο μετ/μος Laplace του σφάλματος (Error)
- $G_C(s)$ η συνάρτηση μεταφοράς του κατευθυντή (Controller)
- $G_P(s)$ η συνάρτηση μεταφοράς της εγκατάστασης (Plant)

Στα ψηφιακά (διακριτά) συστήματα ελέγχου, το σύστημα περιγράφεται (μαθηματικά) από εξισώσεις διαφορών με πραγματικές μεταβλητές. Για την ανάλυση του χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Ζήτα, ο οποίος μετατρέπει τις εξισώσεις διαφορών πραγματικών μεταβλητών σε αλγεβρικές εξισώσεις μιγαδικών μεταβλητών, διότι έτσι απλοποιείται η μαθηματική ανάλυση.

Στην περίπτωση ψηφιακού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου (ψηφιακός αυτόματος έλεγχος), το Σχήμα 1.1 παίρνει την μορφή του Σχήματος 1.3, όπου όλα τα σήματα περιγράφονται από τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς Laplace και Ζήτα.



Σχήμα 1.3: Ψηφιακό (διακριτού χρόνου) σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου.

- $R(z)$ ο μετ/μος Ζήτα της εισόδου αναφοράς,
- $G_C(z)$ η συνάρτηση μεταφοράς του κατευθυντή,
- $G_P(s)$ η συνάρτηση μεταφοράς της εγκατάστασης (ελεγχόμενο σύστημα),
- D/A μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (Digital to Analog converter),
- A/D μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Analog to Digital converter)

Το στοιχείο D/A μετατρέπει τη διακριτή (ψηφιακή) έξοδο του ψηφιακού ελεγκτή σε σήμα συνεχούς χρόνου, κατάλληλου για την “οδήγηση” της εγκατάστασης. Το στοιχείο A/D είναι απαραίτητο για να μετατρέψει την αναλογική έξοδο συνεχούς χρόνου της εγκατάστασης σε σήμα διακριτού χρόνου, κατάλληλου για την τροφοδότηση του στον ψηφιακό κατευθυντή.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας είναι η κατασκευή ενός ψηφιακού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου για τον έλεγχο της γωνιακής ταχύτητας ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Ο έλεγχος του κινητήρα υλοποιείται μέσω μιας κάρτας συλλογής δεδομένων [Data Acquisition Card (DAQ)], εγκατεστημένη σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή (Η/Υ). Η επικοινωνία της κάρτας DAQ με τον Η/Υ επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού MATLAB και του πακέτου εξομοίωσης Simulink. Για την μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα κατασκευάστηκε στροφόμετρο το οποίο μετατρέπει τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα

σε αναλογική τάση, που στη συνέχεια οδηγείται στην αναλογική είσοδο της κάρτας συλλογής δεδομένων (DAQ card).

1.4 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της εργασίας είναι εκπαιδευτικός και συνίσταται στην ευκολότερη κατανόηση των βασικών αρχών των συστημάτων ελέγχου και ειδικότερα των ψηφιακών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόγχου, τον υπολογισμό και την τοποθέτηση του κατάλληλου κατευθυντή σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόγχου και την ανάλυση και σύγκριση της συμπεριφοράς της εξόδου του με την εφαρμογή διαφορετικών εισόδων αναφοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά όλα τα μέρη που συνθέτουν το Ψηφιακό Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου Κλειστού Βρόγχου (Σ.Α.Ε.Κ.Β.).

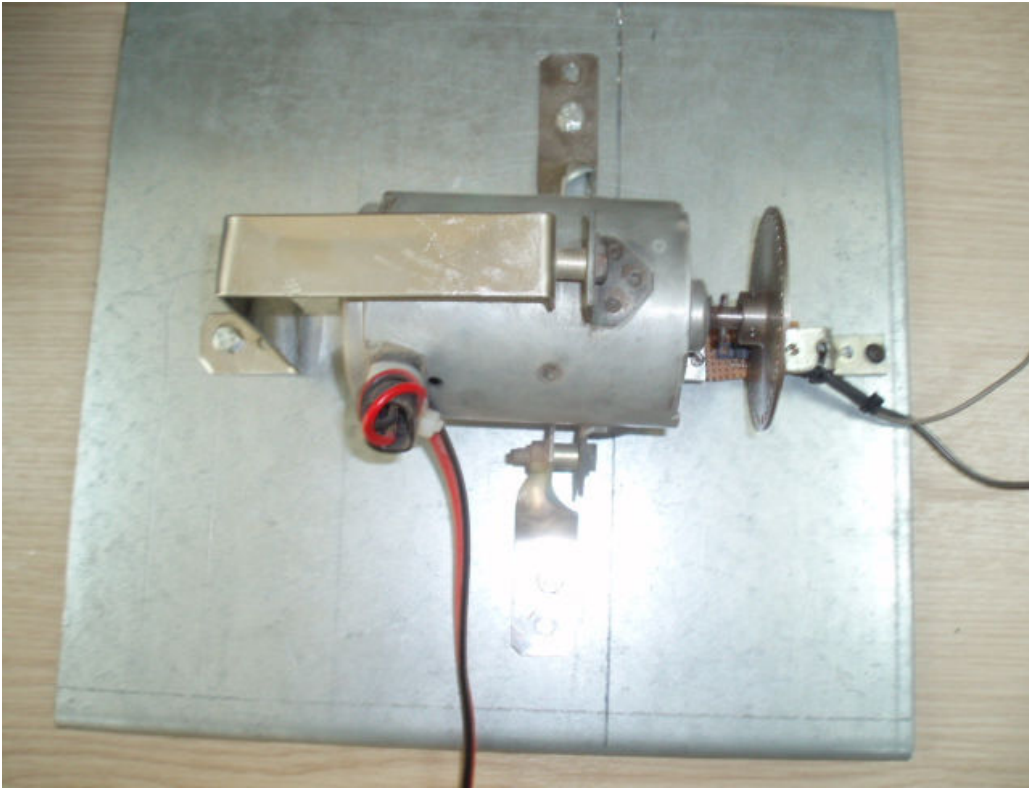
2.2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ D.C.

Ο κινητήρας που επιλέχθηκε για την υλοποίηση του Ψηφιακού Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου Κλειστού Βρόγχου είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος D.C. της εταιρίας BOSCH με χαρακτηριστικά λειτουργίας (12V DC/1.3Amp). Η προμήθεια του έγινε από ηλεκτρολογείο αυτοκινήτων και αποτελεί τον κινητήρα περιστροφής του ανεμιστήρα του κυκλώματος ψύξης του αυτοκινήτου.

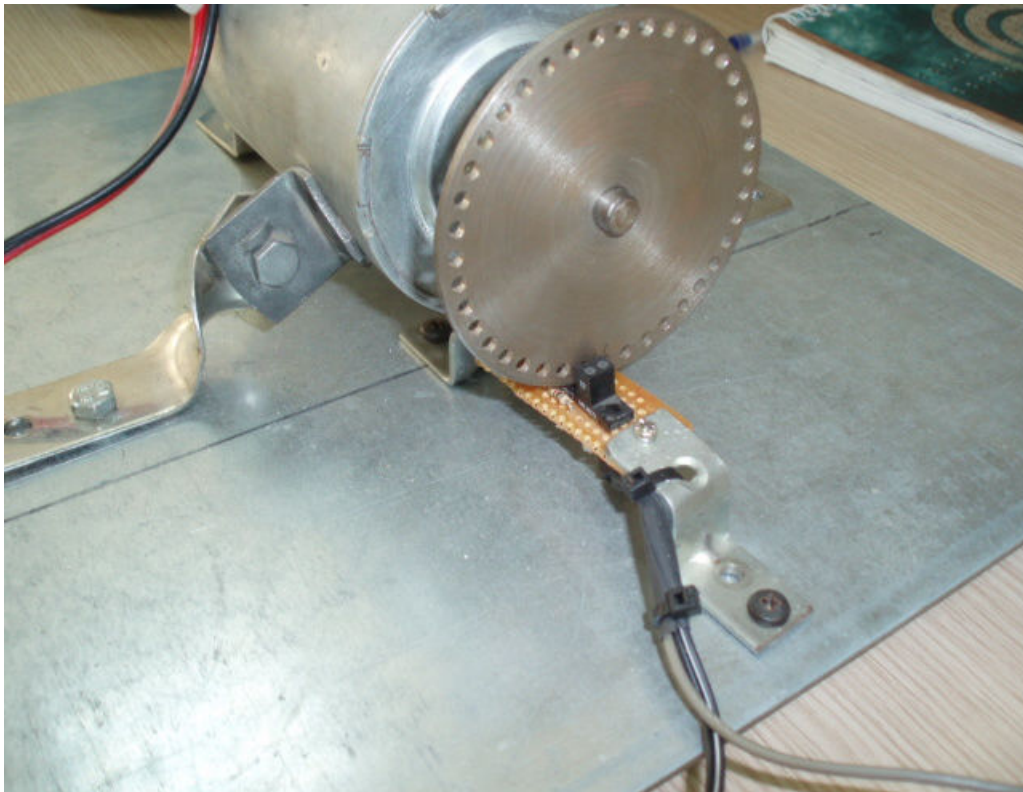
Στην συνέχεια, σε ένα μηχανουργείο διαμορφώθηκε ένας κατάλληλος αλουμινένιος δίσκος διαμέτρου 8 cm περίπου που φέρει 40 οπές στην περιφέρειά του, ο οποίος προσαρμόστηκε και στηρίχτηκε κατάλληλα με 2 βίδες τύπου allen πάνω στον άξονα του κινητήρα.

Ο μεταλλικός δίσκος σε συνδυασμό με τον οπτοζεύκτη και το στροφόμετρο που περιγράφεται παρακάτω, κατέστησαν δυνατή την ακριβή μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα. Η στήριξη του κινητήρα και του οπτοζεύκτη επετεύχθη με 3 μεταλλικούς συνδέσμους πάνω σε κατάλληλα διαμορφωμένη τετράγωνη βάση κατασκευασμένη από γαλβανισμένη λαμαρίνα.

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται ο κινητήρας τοποθετημένος πάνω στην βάση στήριξης, ο διάτρητος δίσκος στερεωμένος επί του άξονα του κινητήρα και ο οπτοζεύκτης.



Σχήμα 2.1: Κάτοψη του κινητήρα και της βάσης στήριξης.



Σχήμα 2.2: Διάτρητος δίσκος και αισθητήριο μέτρησης γωνιακής ταχύτητας.

2.3 ΣΤΡΟΦΟΜΕΤΡΟ

Για την ακριβή μέτρηση της ταχύτητας του κινητήρα, χρησιμοποιήθηκε ένα αισθητήριο το οποίο παράγει τετραγωνικό παλμό με συχνότητα ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας. Στην συνέχεια, ο παραγόμενος τετραγωνικός παλμός οδηγείται σε έναν μετατροπέα συχνότητας σε τάση.

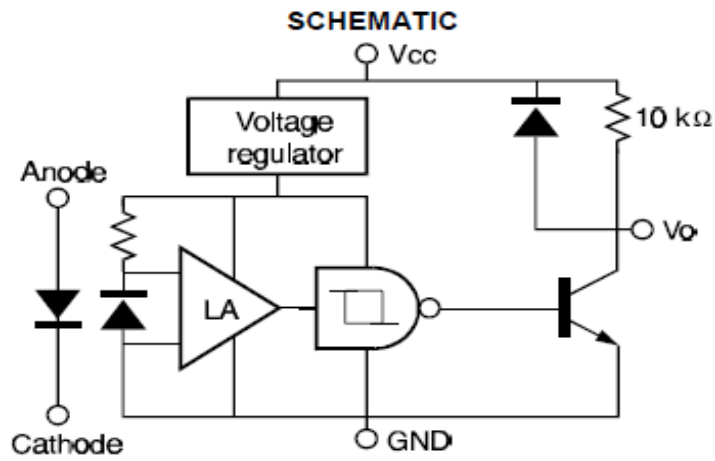
2.3.1 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Για την μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα, χρησιμοποιήθηκε το αισθητήριο HOA2001 της εταιρίας Honeywell το οποίο είναι ένας οπτοζεύκτης υπέρυθρων. Τα δύο βασικά μέρη του είναι το LED εκπομπής υπέρυθρου φωτός (IR Led) και το κύκλωμα του δέκτη που αποτελείται από τη φωτοδίοδο, τον ενισχυτή, το σταθεροποιητή τάσης, την πύλη Schmitt trigger η οποία παράγει τετραγωνικό παλμό στην έξοδο και το NPN τρανζίστορ εξόδου.

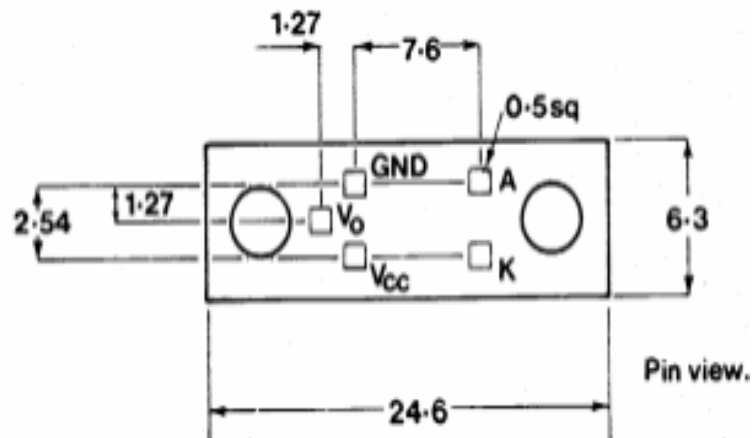
Στη συνέχεια, το αισθητήριο στηρίχτηκε κατάλληλα ανάμεσα στον μεταλλικό δίσκο του κινητήρα, με τρόπο ώστε όταν κατά την περιστροφή του δίσκου μεταξύ του IR LED και της φωτοδίοδου υπάρχει οπή, δηλαδή οπτική επαφή, τότε στην έξοδο παράγεται λογικό “1”. Με αυτόν τον τρόπο στην έξοδο του οπτοζεύκτη παράγεται μια συνεχής τάση με μορφή τετραγωνικού παλμού, η συχνότητα της οποίας είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα.

Η τροφοδοσία του αισθητηρίου γίνεται με σταθεροποιημένη τάση 5 Volt που παράγεται από το κύκλωμα του μετατροπέα συχνότητας σε τάση (περιγράφεται στη συνέχεια), ενώ για τον περιορισμό του ρεύματος τροφοδοσίας του IR LED έχει τοποθετηθεί μια αντίσταση 330 Ω σε σειρά με την τάση τροφοδοσίας.

Ακολουθούν το εσωτερικό σχηματικό διάγραμμα (Σχήμα 2.3), το διάγραμμα ακροδεκτών (Σχήμα 2.4) και τα βασικά χαρακτηριστικά του αισθητηρίου HOA2001, Πίνακας 2.1 [2].



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα του στοιχείου HOA2001.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ακροδεκτών HOA2001.

Πίνακας 2.1: Βασικά χαρακτηριστικά του στοιχείου HOA2001.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25°C unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
IR EMITTER						
Forward Voltage	V_F			1.6	V	$I_F=20\text{ mA}$
Reverse Leakage Current	I_R			10	μA	$V_R=3\text{ V}$
DETECTOR						
Operating Supply Voltage	V_{CC}	4.5		10	V	
Low Level Supply Current	I_{CCL}	4.0		12	mA	$V_{CC}=5\text{ V}$
Low Level Supply Current		5.0		15		$V_{CC}=12\text{ V}$
High Level Supply Current	I_{CCH}	2.0		10	mA	$V_{CC}=5\text{ V}$
High Level Supply Current		3.0		12		$V_{CC}=12\text{ V}$
Low Level Output Voltage	V_{OL}			0.4	V	$I_{OL}=12.8\text{ mA}, I_F=0\text{ mA}$
High Level Output Voltage	V_{OH}	2.4			V	$I_{OH}=0, I_F=10\text{ mA}$
Hysteresis (2)	HYST		10		%	
Propagation Delay, Low-High	t_{PLH}		5		μs	$V_{CC}=5\text{ V}, I_F=10\text{ mA}$
Propagation Delay, High-Low	t_{PHL}		5		μs	$V_{CC}=5\text{ V}, I_F=10\text{ mA}$
Rise Time	t_r		60		ns	$R_L=390\ \Omega, C_L=50\text{ pF}$
Fall Time	t_f		15		ns	$R_L=390\ \Omega, C_L=50\text{ pF}$
COUPLED CHARACTERISTICS						
IRED Trigger Current HOA2001-001	I_{FT}			10	mA	$V_{CC}=5\text{ V}$

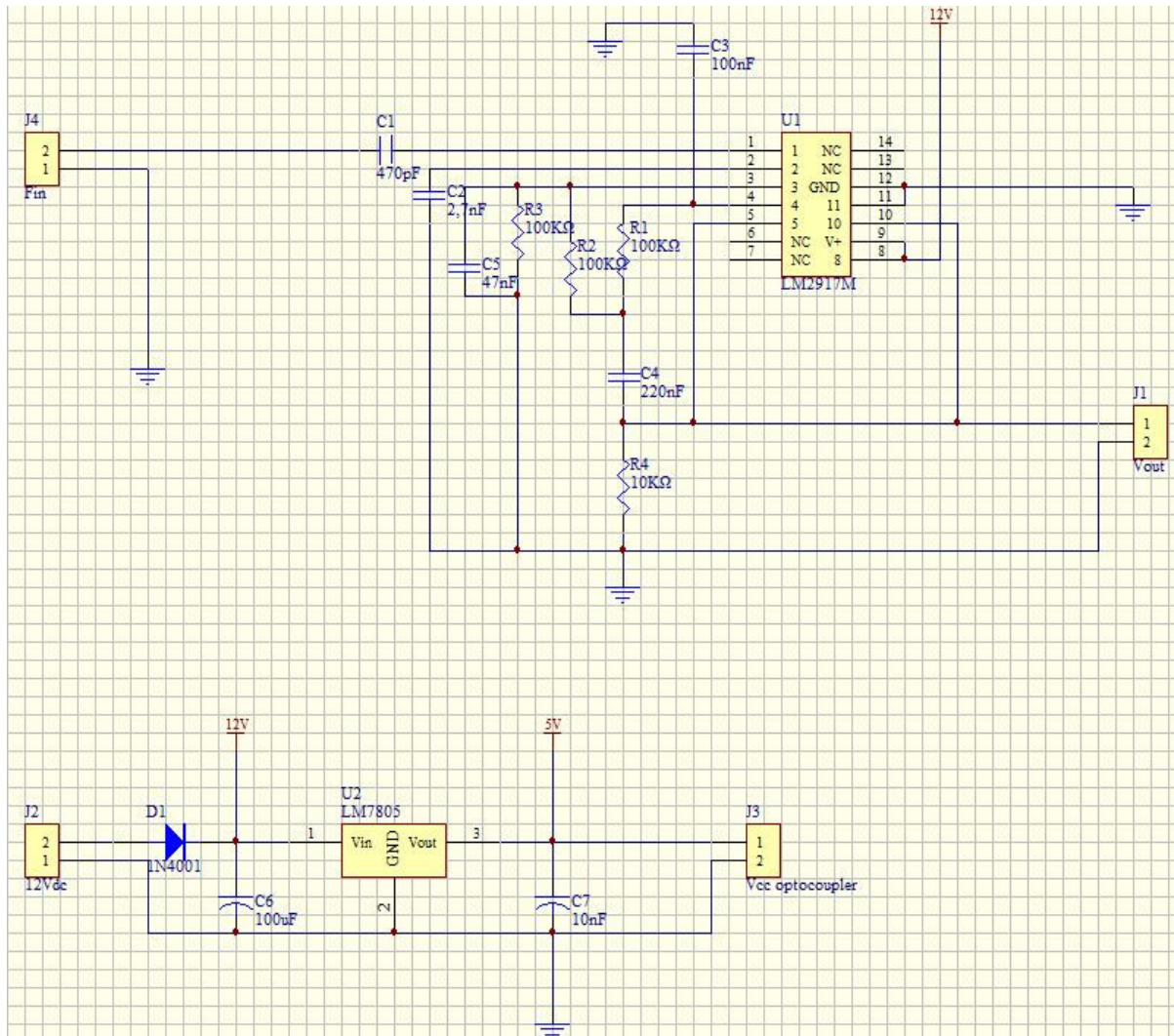
2.3.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΤΑΣΗ

Το αισθητήριο μέτρησης γωνιακής ταχύτητας (HOA2001) μαζί με τον μετατροπέα συχνότητας σε τάση, συνιστούν το στοιχείο ανάδρασης του ψηφιακού Σ.Α.Ε.Κ.Β. Σκοπό έχει τη μετατροπή της συχνότητας που παράγεται από το αισθητήριο, σε μια τάση DC ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα. Στη συνέχεια, αυτή η τάση οδηγείται σε μια αναλογική είσοδο της κάρτας συλλογής δεδομένων και μέσω των λογισμικών MATLAB και Simulink, μετατρέπεται κατάλληλα σε γωνιακή ταχύτητα (ω).

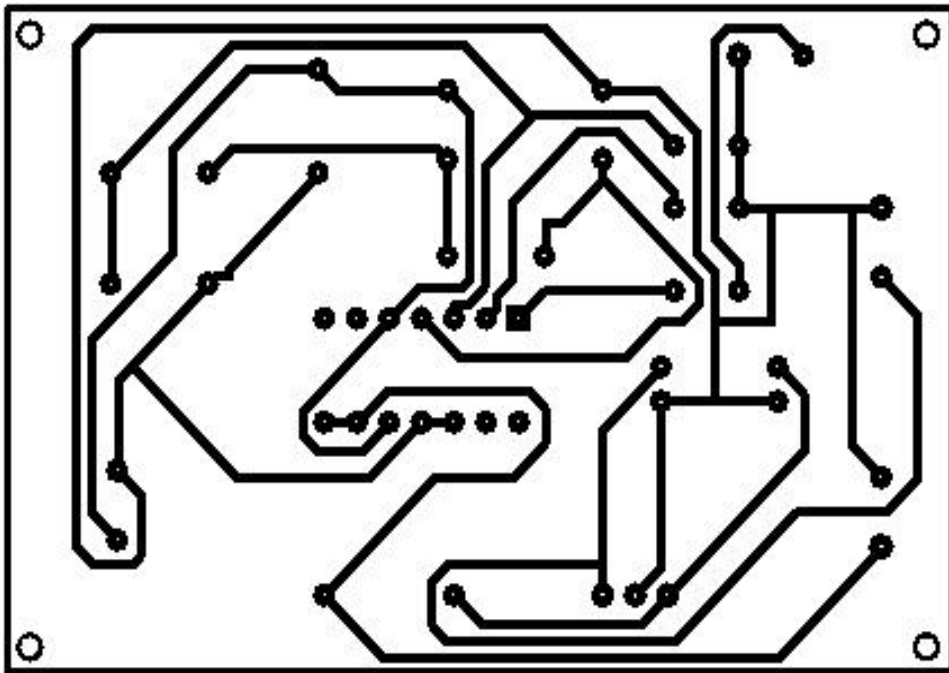
Η υλοποίηση του μετατροπέα βασίζεται στο ολοκληρωμένο LM 2917N της εταιρίας National, το οποίο είναι ένας γραμμικός μετατροπέας συχνότητας σε τάση, ενώ στην έξοδό του έχει προστεθεί ένα φίλτρο τύπου Butterworth 2 πόλων για τον περιορισμό της κυμάτωσης της DC τάσης. Η γραμμικότητα του συγκεκριμένου μετατροπέα είναι $\pm 0.3\%$. Η σχέση που καθορίζει την τάση εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα εισόδου είναι:

$$V_{out} = F_{in} \cdot V_{supp} \cdot R_1 \cdot C_1 \quad (1)$$

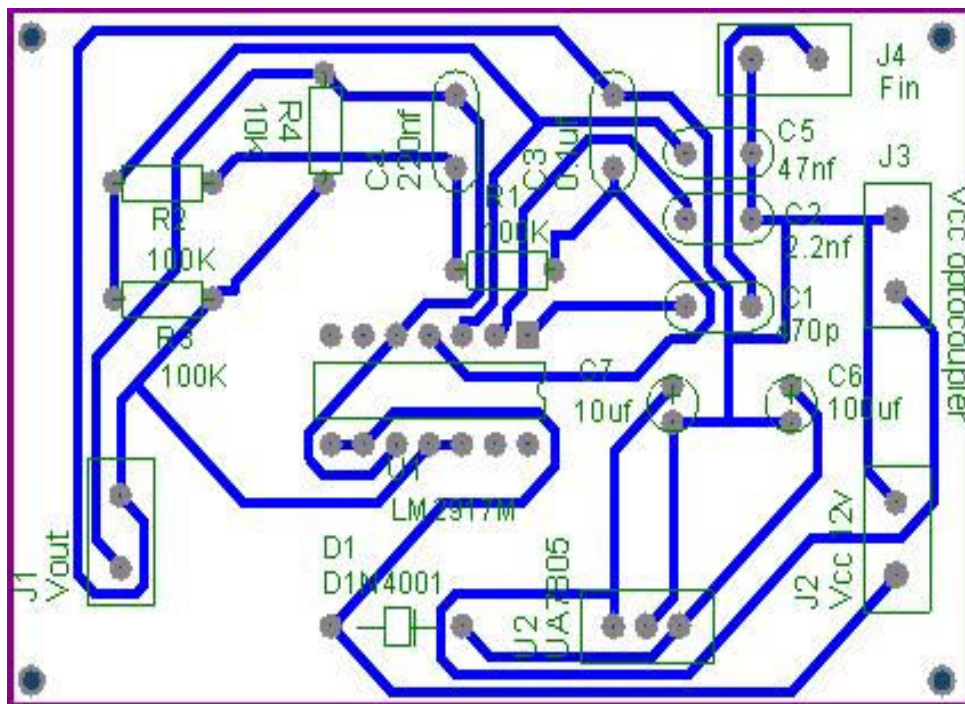
όπου V_{out} η τάση εξόδου του μετατροπέα, F_{in} η συχνότητα εισόδου του και V_{supp} η τάση τροφοδοσίας του. Επειδή η τάση εξόδου εξαρτάται άμεσα από την τάση τροφοδοσίας, ένας σταθεροποιητής τάσης LM7812 παρεμβάλλεται στην τροφοδοσία του ολοκληρωμένου LM2917 με στόχο η τάση τροφοδοσίας V_{supp} να παραμένει σταθεροποιημένη στα 12Volts ανεξαρτήτως της τάσης V_{cc} που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετατροπέα. Επιπλέον στο κύκλωμα έχει προστεθεί και ένας σταθεροποιητής τάσης LM7805, ο οποίος τροφοδοτεί με σταθεροποιημένη τάση 5 Volts το αισθητήριο μέτρησης γωνιακής ταχύτητας. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το σχηματικό του κυκλώματος καθώς και το τυπωμένο της πλακέτας χωρίς (Σχήμα 2.6) αλλά και με τα εξαρτήματα (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος μετατροπέα συχνότητας σε τάση.



Σχήμα 2.6: Τυπωμένο πλακέτας μετατροπέα συχνότητας σε τάση χωρίς τα εξαρτήματα.



Σχήμα 2.7: Τυπωμένο πλακέτας μετατροπέα συχνότητας σε τάση με τοποθετημένα τα εξαρτήματα.

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα τοποθετήθηκε σε κλειστό κουτί, στο εμπρός μέρος του οποίου (Σχήμα 2.8) διακρίνεται ο ακροδέκτης της τάσης εξόδου BNC και το ενδεικτικό led λειτουργίας. Η τάση τροφοδοσίας του μετατροπέα είναι 14-18Volt DC (τύπου “μπανάνα”). Στο πίσω μέρος του κουτιού (Σχήμα 2.9) παρατηρούνται οι μπόρνες τροφοδοσίας του μετατροπέα (V_{cc}), ο ακροδέκτης τροφοδοσίας του οπτοζεύκτη (V_{cc} opto) και ο ακροδέκτης τύπου BNC της συχνότητας εισόδου.



Σχήμα 2.8: Εμπρός όψη του μετατροπέα συχνότητας σε τάση.



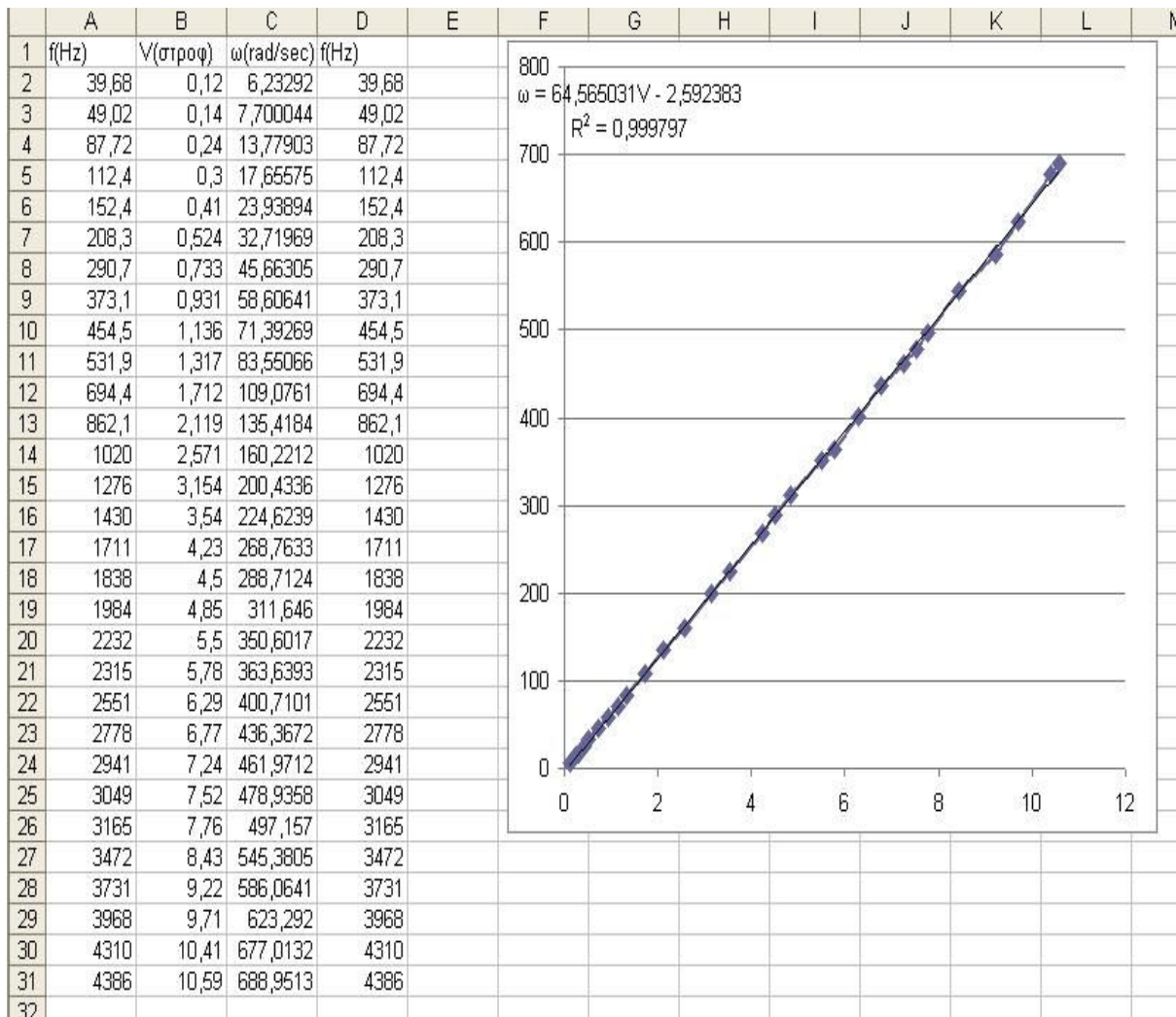
Σχήμα 2.9: Πίσω όψη του μετατροπέα συχνότητας σε τάση.

2.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο μετατροπέας μετατρέπει τη συχνότητα που λαμβάνει από το αισθητήριο μέτρησης γωνιακής ταχύτητας σε συνεχή τάση, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Στη συνέχεια, αυτή η τάση DC εισάγεται σε αναλογική είσοδο της κάρτας συλλογής δεδομένων (DAQ) και μετατρέπεται σε γωνιακή ταχύτητα (rad/sec) χρησιμοποιώντας κατάλληλη εξίσωση η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

Γνωρίζοντας ότι η DC τάση εξόδου του μετατροπέα είναι γραμμική συνάρτηση της συχνότητας που λαμβάνεται στην είσοδο από το αισθητήριο μέτρησης γωνιακής ταχύτητας, για να υπολογιστεί η σχέση με την οποία μετατρέπεται η τάση εξόδου του μετατροπέα σε γωνιακή ταχύτητα, αρχικά δίνονται στην είσοδο του μετατροπέα μέσω μιας γεννήτριας συχνοτήτων διαφορετικές τιμές συχνότητας τετραγωνικής μορφής και κάθε φορά καταγράφεται η τάση εξόδου. Τοποθετώντας τα ζεύγη τιμών που κατεγράφησαν στο λογισμικό MS Excel, υπολογίζεται (με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων) η εξίσωση της ευθείας της τάσης εξόδου του μετατροπέα και της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2: Η εξίσωση της ευθείας με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.



Στο πεδίο **A** παρουσιάζονται οι τιμές της συχνότητας που εισήχθησαν στον μετατροπέα, ενώ στο πεδίο **B** παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης εξόδου για κάθε μία από τις εισαχθείσες συχνότητες.

Στο πεδίο **C** παρουσιάζεται η γωνιακή ταχύτητα (ω) του κινητήρα για κάθε μια συχνότητα. Γνωρίζοντας ότι ο δίσκος που προσαρμόστηκε στον κινητήρα διαθέτει 40 οπές, η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\omega = \frac{f \cdot 2 \cdot \pi}{40} \text{ (rad/sec)} \quad (2)$$

όπου f η συχνότητα εισόδου στον μετατροπέα.

Στη συνέχεια, με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, υπολογίστηκε η εξίσωση της ευθείας που καθορίζει την γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα συναρτήσει της τάσης εξόδου του μετατροπέα:

$$\omega=64.5650 \cdot V-2.5923 \quad (3)$$

2.4 ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ (ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ)

Ο ενισχυτής είναι το τελικό στοιχείο ελέγχου, με σκοπό να διαμορφώσει κατάλληλα την έξοδο της κάρτας συλλογής δεδομένων ώστε να μπορέσει να “οδηγήσει” την εγκατάσταση, δηλαδή τον κινητήρα. Στην ουσία πρόκειται για έναν ενισχυτή ρεύματος παρέχοντας την απαραίτητη ισχύ για να λειτουργήσει ο κινητήρας. Το κύκλωμα του ενισχυτή αποτελείται από το ολοκληρωμένο με κωδικό LM675 της εταιρίας National με κέλυφος TO-220, πρόκειται δε για τελεστικό ενισχυτή ισχύος, υλοποιημένο σε συνδεσμολογία μη αναστρέφων ενισχυτή μοναδιαίου κέρδους (Non-Inverting unity gain operation).

Για την τροφοδοσία του κυκλώματος απαιτείται συμμετρική τάση 16-30 Volt ενώ είναι ικανός να οδηγήσει επαγωγικά και χωρητικά φορτία με μέγιστο ρεύμα εξόδου 3Amp. Το κέρδος της ενίσχυσης στην παρούσα εφαρμογή ισούται με 1 ($A_{v(DC)}=1$), δηλαδή η τάση εξόδου ισούται με την τάση εισόδου ($V_{out}=V_{in}$) αρκεί η δεύτερη να μην ξεπερνάει την τάση τροφοδοσίας του ενισχυτή.

Ο συγκεκριμένος ενισχυτής διαθέτει προστασία της εξόδου του από τις αιχμές τάσης όταν οδηγεί επαγωγικά φορτία (πχ DC κινητήρας), και γι' αυτό δεν υπάρχει ανάγκη τοποθέτησης flyback διόδων μεταξύ τροφοδοσίας και εξόδου. Επίσης, ο LM675T διαθέτει προστασία από υπερθέρμανση, με αποτέλεσμα να διακόπτει άμεσα την λειτουργία του όταν η θερμοκρασία στο κέλυφος ξεπεράσει τους 170 °C.

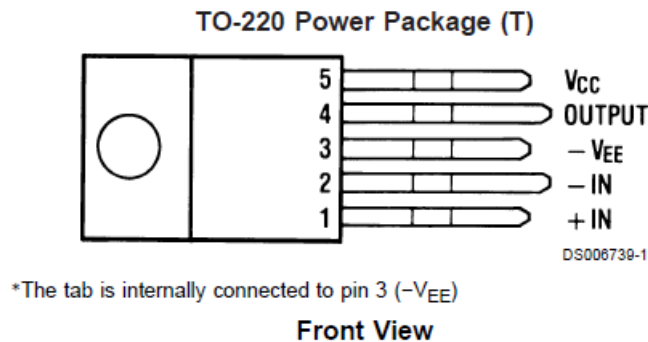
Η κατανάλωση ισχύος με τη μορφή θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{D(MAX)} = \frac{V_s^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot R_L} + P_Q \quad (4)$$

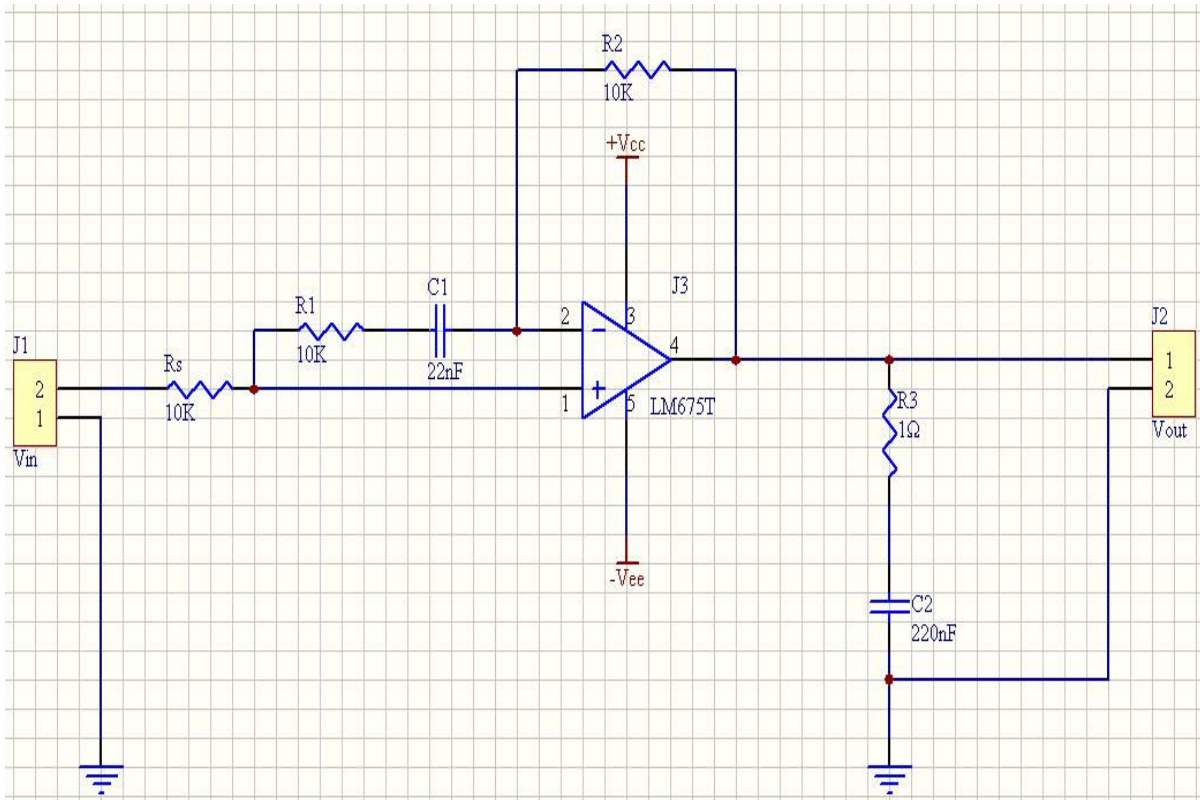
όπου V_s συνολική τάση τροφοδοσίας του LM675T, R_L η αντίσταση φορτίου και P_Q η κατανάλωση ισχύος χωρίς φορτίο.

Για τη σωστή ψύξη του ενισχυτή έχει τοποθετηθεί ψήκτρα αλουμινίου τύπου U η οποία έχει απομονωθεί ηλεκτρικά με το υπόλοιπο κύκλωμα τοποθετώντας ενδιάμεσα μονωτικό φύλλο (ωμικά) μαζί με θερμοαγώγιμη πάστα, ενώ για καλύτερη αποτελεσματικότητα ο

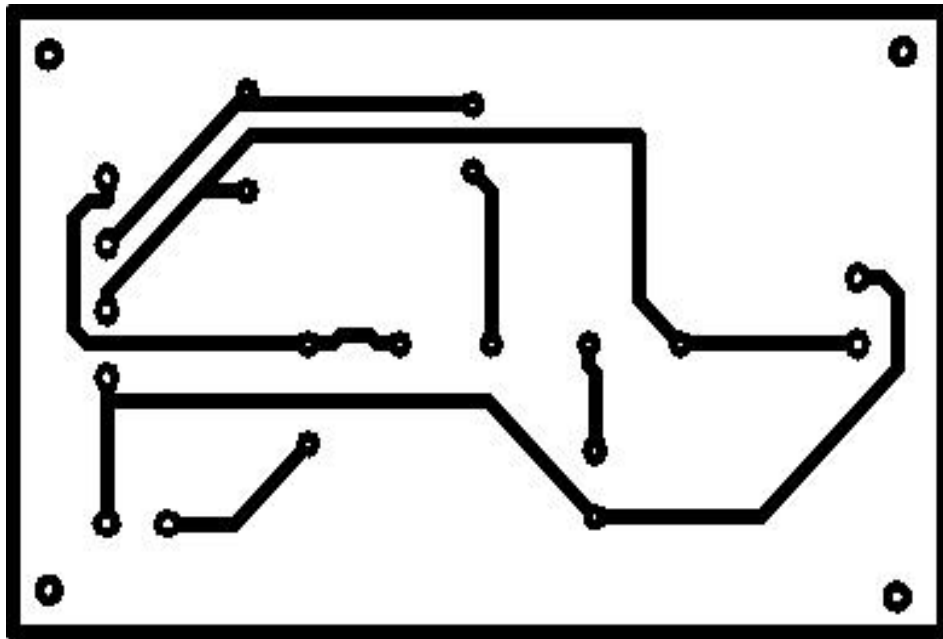
ενισχυτής μαζί με την ψήκτρα έχουν τοποθετηθεί εξωτερικά του κουτιού. Για τις ανάγκες του εργαστηρίου Ψηφιακών Συστημάτων Ελέγχου, κατασκευάστηκαν δυο όμοια κυκλώματα ενισχυτή, τα οποία τοποθετήθηκαν στο ίδιο κουτί με κοινή τροφοδοσία, και ανεξάρτητο διακόπτη on/off, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα για ταυτόχρονη οδήγηση δύο φορτίων. Στην συνέχεια ακολουθούν το διάγραμμα ακροδεκτών του LM675T (Σχήμα 2.10), το σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας του ενισχυτή (Σχήμα 2.11), καθώς και το PCB χωρίς εξαρτήματα (Σχήμα 2.12) και με τα εξαρτήματα (Σχήμα 2.13), [3].



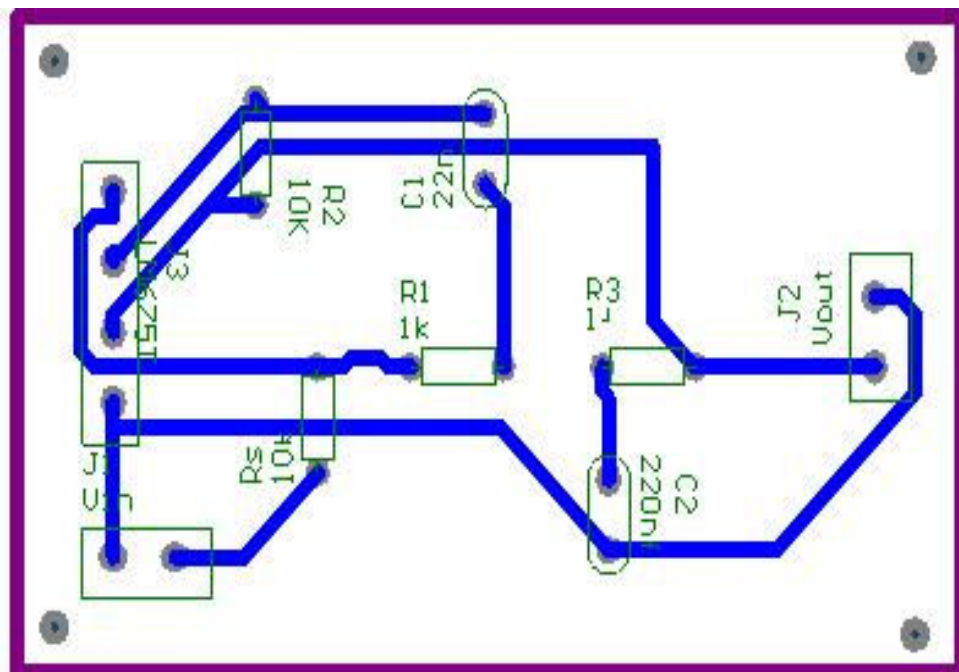
Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ακροδεκτών του ενισχυτή LM675T.



Σχήμα 2.11: Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ενισχυτή.



Σχήμα 2.12: Τυπωμένο πλακέτας ενισχυτή χωρίς εξαρτήματα.



Σχήμα 2.13: Τυπωμένο πλακέτας ενισχυτή με τα εξαρτήματα.

Στην εμπρός πλευρά του ενισχυτή (Εικόνα 2.14) έχουν τοποθετηθεί συνδέσεις σήματος εισόδου τύπου BNC (V_{in}) και μπόρνες εξόδου (OUTPUT) ανεξάρτητες για κάθε κύκλωμα καθώς και τα ενδεικτικά led (κόκκινο) για τη θετική και (πράσινο) για την αρνητική τάση τροφοδοσίας. Η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του κάθε ενισχυτή γίνεται με ένα διακόπτη 4 επαφών. Στην πίσω όψη (Εικόνα 2.15) διακρίνονται τα 2 ολοκληρωμένα κυκλώματα LM675T με τις ψήκτρες τους και τις μπόρνες τροφοδοσίας (συμμετρική τάση τροφοδοσίας ± 32 Volts DC).



Σχήμα 2.14: Εμπρός όψη του ενισχυτή.



Σχήμα 2.15: Πίσω όψη του ενισχυτή.

2.5. ΚΑΡΤΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DAQ CARD) [4]

Οι κάρτες συλλογής δεδομένων (Data Acquisition cards) είναι το μέσο διασύνδεσης αναλογικών συστημάτων με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Είναι διαμορφωμένες κατάλληλα ώστε να μπορούν να συνδεθούν είτε σε κάποια θύρα του Η/Υ (παράλληλη, σειριακή, USB, κ.α.), είτε σε κάποια υποδοχή της μητρικής κάρτας (PCI, ISA, PCI-E, S-100 bus κ.α.). Επειδή οι κάρτες αυτές συνήθως εμπεριέχουν αρκετά υποσυστήματα όπως πολυπλέκτες, μετατροπείς, χρονιστές, μνήμη κ.α., έχουν ενσωματωμένο έναν μικροελεγκτή, ο οποίος μέσω κατάλληλου λογισμικού, καθορίζει τη σειρά λειτουργίας κάθε μονάδας.

Η κάρτα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή αποτελεί τμήμα του ψηφιακού Σ.Ε.Κ.Β. που αναλαμβάνει να διακριτοποιεί (εφαρμόζοντας μια συχνότητα δειγματοληψίας) την αναλογική τάση του στροφόμετρου σε ψηφιακό σήμα, και στη συνέχεια, μετά τον υπολογισμό του σφάλματος και τη διόρθωσή του από τον ελεγκτή που υλοποιείται μέσω Simulink, επιστρέφει διορθωμένη τάση στην αναλογική της έξοδο, με την οποία μέσω του ενισχυτή οδηγείται ο κινητήρας.

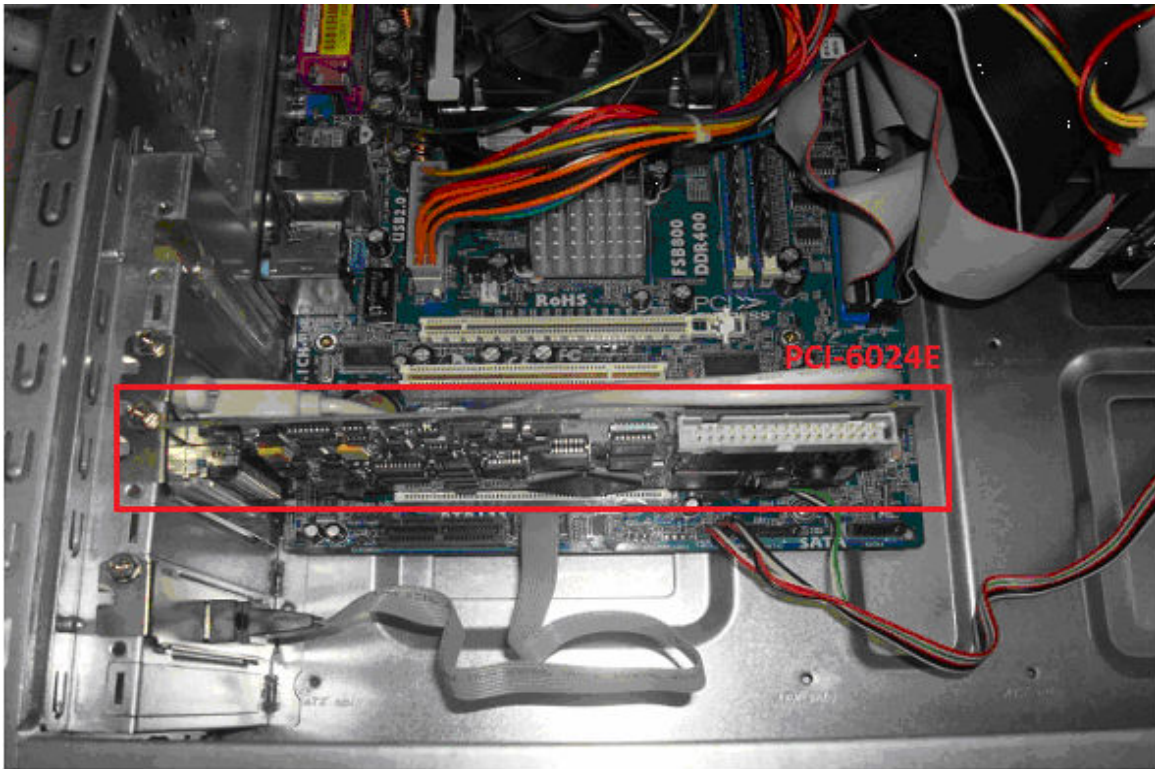
Το μοντέλο της κάρτας που χρησιμοποιήθηκε είναι η PCI-6024E της εταιρίας National Instruments. Η συγκεκριμένη κάρτα διαθέτει 16 αναλογικές εισόδους με ρυθμό δειγματοληψίας 200 kS/s ανάλυσης 12 bit, 2 αναλογικές εξόδους των 12 bit, 8 ψηφιακές I/O και 2 μετρητές των 24 bit. Πιο αναλυτικά, τα χαρακτηριστικά της κάρτας παρατίθενται στον Πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2.3: Βασικά χαρακτηριστικά της κάρτας National Instruments PCI-6024E. [5]

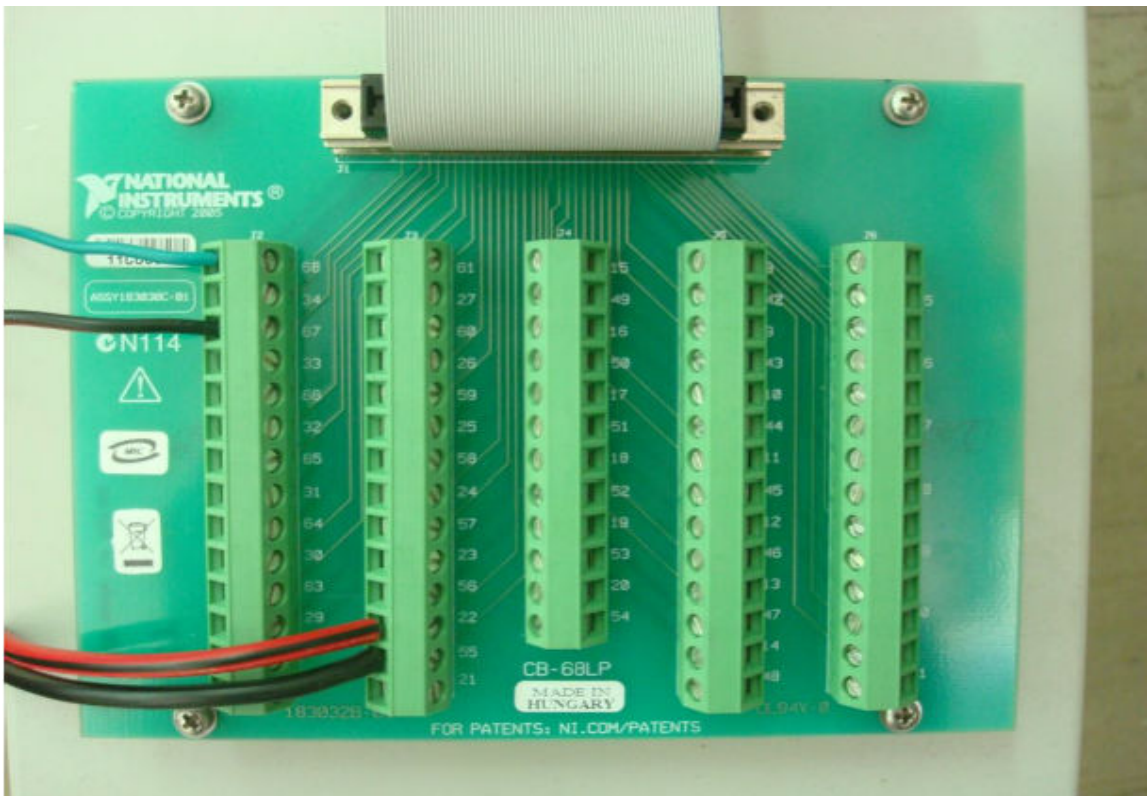
Family	NI 6024E
Bus	PCI, PCMCIA
Analog Inputs	16 SE/8 DI
Input Resolution	12 bits
Max Sampling Rate	200 kS/s
Input Range	± 0.05 to ± 10 V
Analog outputs	2
Output Resolution	12 bits
Output Rate	10 kS/s
Output Range	± 10 V
Digital I/O	8
Counter/Timers	2, 24-bit
Triggers	Digital

Η κάρτα είναι συμβατή με όλα τα γνωστά λειτουργικά συστήματα (Windows 2000/NT/XP, Linux®, Mac OS X), ενώ επικοινωνεί με διάφορα προγράμματα συλλογής και επεξεργασία δεδομένων όπως LabVIEW, MATLAB (Simulink), LabWindows/CVI, Measurement studio, VI Logger.

Η τοποθέτηση της κάρτας γίνεται σε μια ελεύθερη θύρα τύπου PCI του H/Y, ενώ το πακέτο περιλαμβάνει και την πλακέτα διασύνδεσης εισόδων εξόδων SCB-68, η οποία διευκολύνει τη σύνδεση των εισόδων/εξόδων του συστήματος. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η εγκατάσταση της κάρτας PCI-6024E στον H/Y (Σχήμα 2.16), η πλακέτα διασύνδεσης SCB-68 (Σχήμα 2.17), καθώς και ο πίνακας αντιστοίχισης των ακροδεκτών της (Σχήμα 2.18).



Σχήμα 2.16: Εγκατάσταση της κάρτας PCI-6024E στον Η/Υ.



Σχήμα 2.17: Η πλακέτα διασύνδεσης SCB-68.

6110E/6111E

ACH8	34	68	ACH0
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	32	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH3	30	64	AIGND
AIGND	29	63	ACH11
ACH4	28	62	AISENSE
AIGND	27	61	ACH12
ACH13	26	60	ACH5
ACH6	25	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH15	23	57	ACH7
DAC0OUT ²	22	56	AIGND
DAC1OUT ²	21	55	AOGND ²
EXTREF ²	20	54	AOGND ²
DIO4	19	53	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	51	DIO5
DIO6	16	50	DGND
DGND	15	49	DIO2
5 V	14	48	DIO7
DGND	13	47	DIO3
DGND	12	46	SCANCLK
PFI0/TRIG1	11	45	EXTSTROBE*
PFI1/TRIG2	10	44	DGND
DGND	9	43	PFI2/CONVERT*
5 V	8	42	PFI3/GPCTR1_SOURCE
DGND	7	41	PFI4/GPCTR1_GATE
PFI5/UPDATE*	6	40	GPCTR1_OUT
PFI6/WFTRIG	5	39	DGND
DGND	4	38	PFI7/STARTSCAN
PFI9/GPCTR0_GATE	3	37	PFI8/GPCTR0_SOURCE
GPCTR0_OUT	2	36	DGND
FREQ_OUT	1	35	DGND

† No Connect on Devices without Analog Output

**68-Pin E Series
16 AI Channels**

Σχήμα 2.18: Αντιστοίχιση ακροδεκτών εισόδου/εξόδου της κάρτας συλλογής δεδομένων.

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το Analog Input Chanel 0 (ACH0) ως είσοδος για την καταγραφή της τάσης του στροφόμετρου που αντιστοιχεί στους ακροδέκτες 68⁺/67⁻ της πλακέτας διασύνδεσης, ενώ η έξοδος παρέχεται από το Analog Output Chanel 0 (DAC0OUT) και τους ακροδέκτες 22⁺/55⁻, η οποία στη συνέχεια οδηγείται στον ενισχυτή.

Η επικοινωνία της κάρτας συλλογής δεδομένων με τον υπολογιστή γίνεται με το λογισμικό MATLAB και πιο συγκεκριμένα με το πακέτο Simulink. Πρόκειται για πρόγραμμα εξομοίωσης δυναμικών συστημάτων στο οποίο υπάρχουν έτοιμα εγκατεστημένα δομικά στοιχεία που επικοινωνούν άμεσα με τις εισόδους/εξόδους της κάρτας συλλογής δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

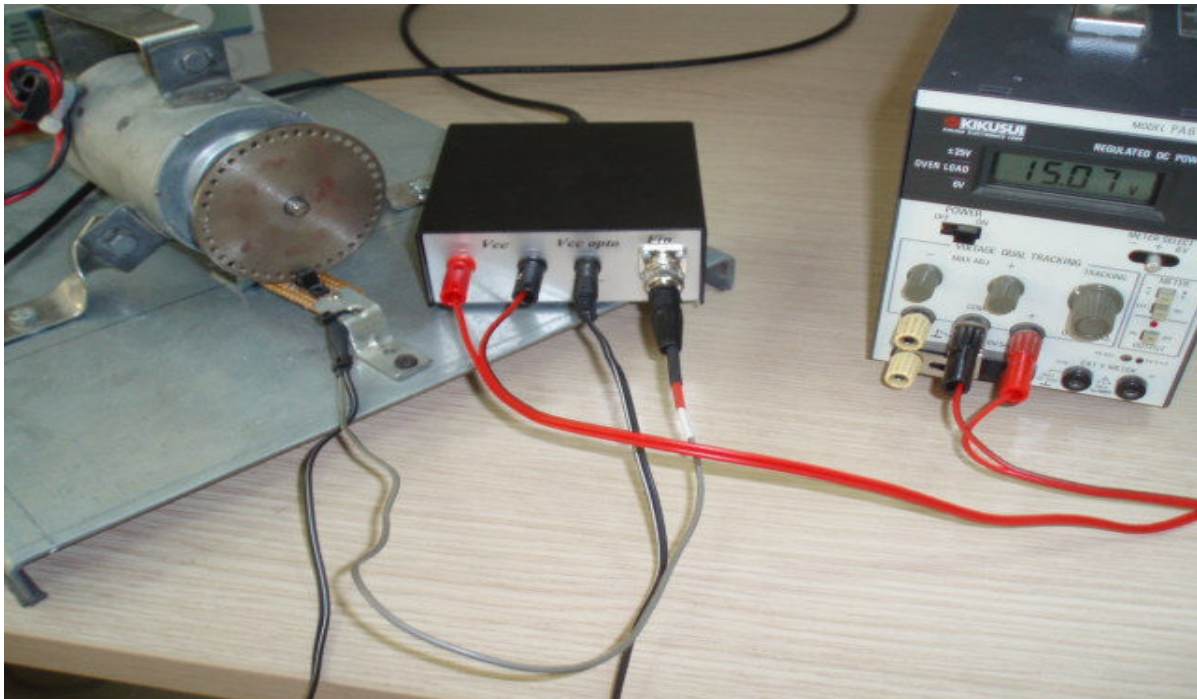
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται λεπτομερώς ο θεωρητικός σχεδιασμός του ψηφιακού συστήματος ελέγχου παράλληλα με την πρακτική υλοποίησή του, εφαρμόζοντας διαφορετικές εισόδους αναφοράς, μελετώντας κάθε φορά την αντίστοιχη απόκριση του κινητήρα.

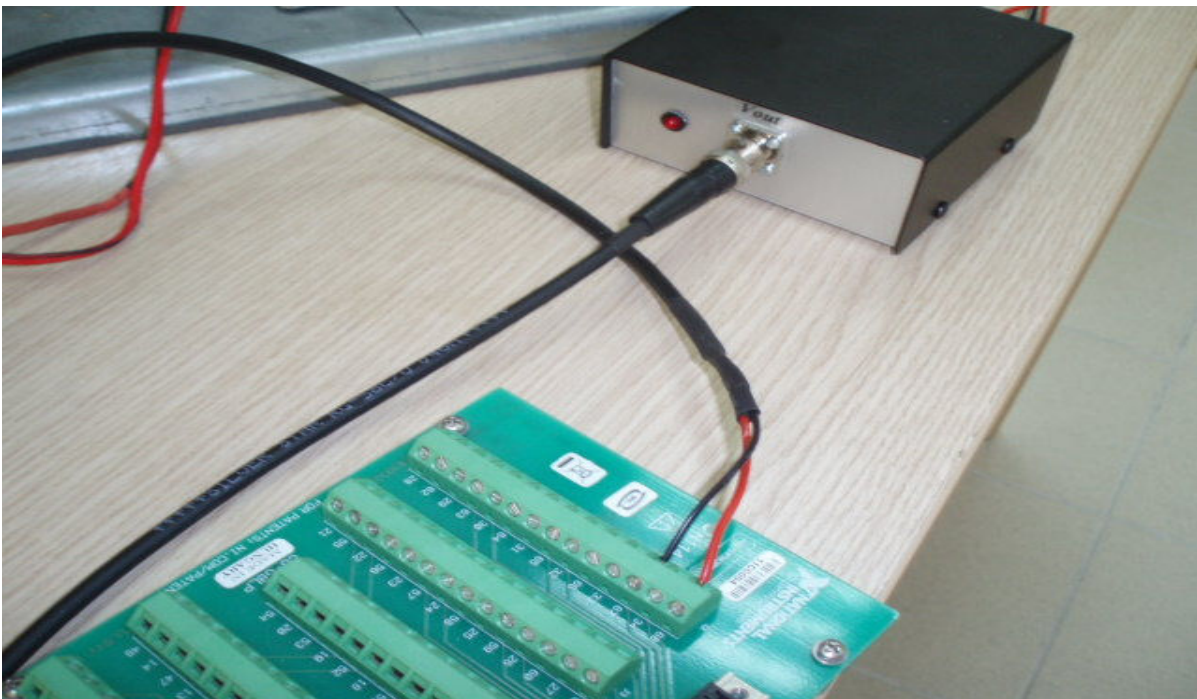
3.2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Με βάση τις πληροφορίες για τα ηλεκτρικά και μηχανικά στοιχεία του κινητήρα, η συνάρτηση μεταφοράς του υπολογίζεται με εμπειρικό τρόπο. Με τη χρήση του Matlab και του Simulink, καταγράφεται η απόκριση (γωνιακή ταχύτητα) του κινητήρα όταν στην είσοδο του εφαρμόζεται μια σταθερή DC τάση. Στη συνέχεια, με βάση το διάγραμμα γωνιακής ταχύτητας υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- 1) Εκτελούνται οι απαραίτητες συνδέσεις, ήτοι: τροφοδοσία DC 14-18 Volts στους ακροδέκτες τροφοδοσίας V_{cc} του στροφόμετρου, η έξοδος του οπτοζεύκτη στο F_{in} του στροφόμετρου, η έξοδος του στροφόμετρου στο ACH0 της κάρτας συλλογής δεδομένων (ακροδέκτες 67⁻-AIGND, ακροδέκτης 68⁺-ACH0), Σχήματα 3.1 και 3.2.

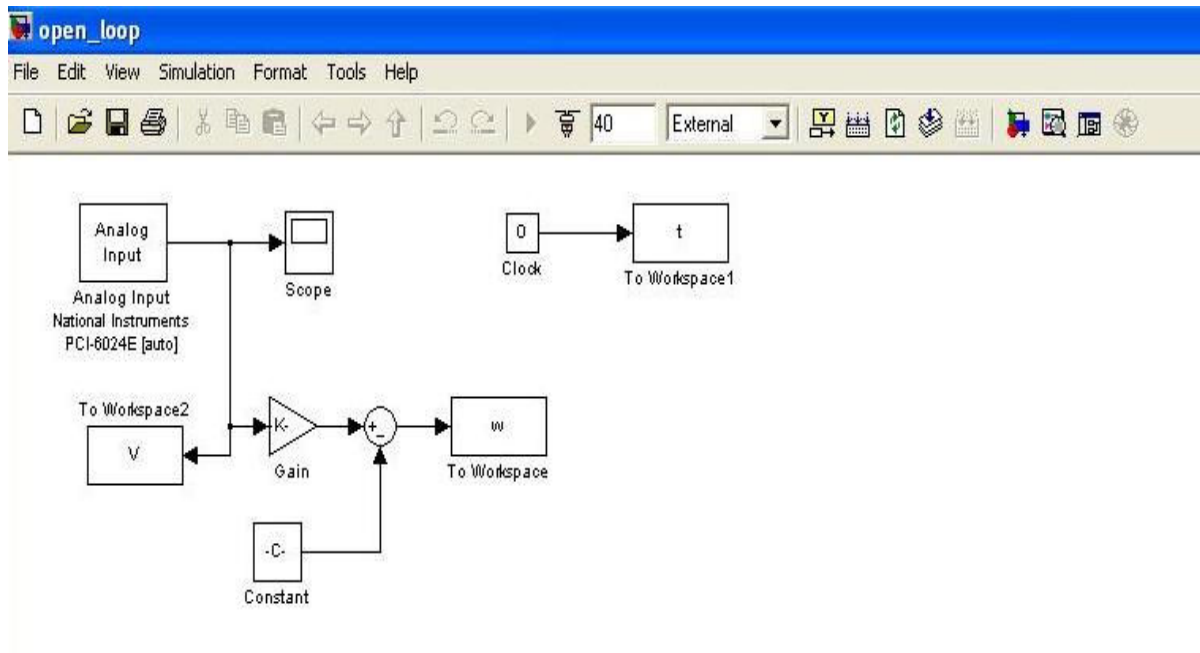


Σχήμα 3.1: Σύνδεση του στροφόμετρου με τον κινητήρα και την τροφοδοσία.



Σχήμα 3.2: Σύνδεση του στροφόμετρου με την κάρτα συλλογής δεδομένων.

- 2) Στον Η/Υ με το πρόγραμμα Matlab επιλέγεται το εικονίδιο Simulink και στη συνέχεια από το File -> Open επιλέγεται το αρχείο “*open_loop.mdl*” (πρόκειται για κατάλληλα ανεπτυγμένο μοντέλο καταγραφής της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα).



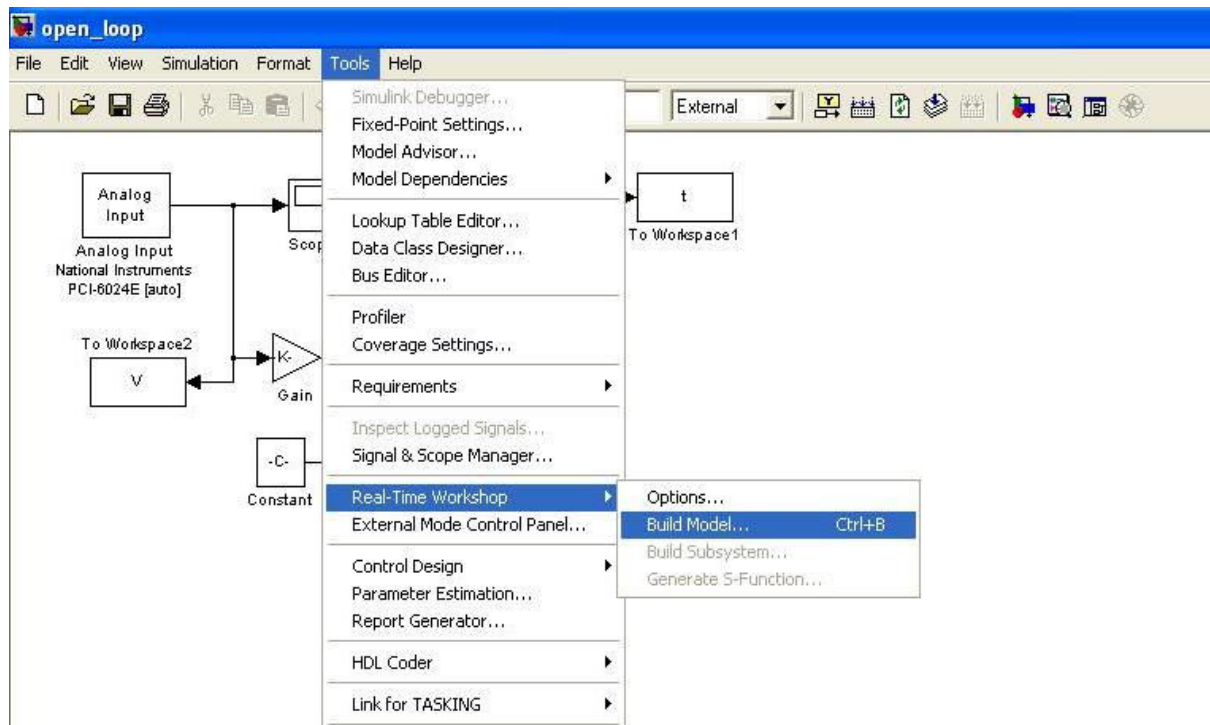
Στο μοντέλο που παρουσιάζεται, το “Analog input” αντιστοιχεί στην αναλογική είσοδο (Channel 0) της κάρτας στην οποία καταγράφεται η τάση εξόδου του στροφομέτρου, που μετατρέπεται σε γωνιακή ταχύτητα σύμφωνα με τη σχέση:

$$\omega = 64.5650 \cdot V - 2.5924$$

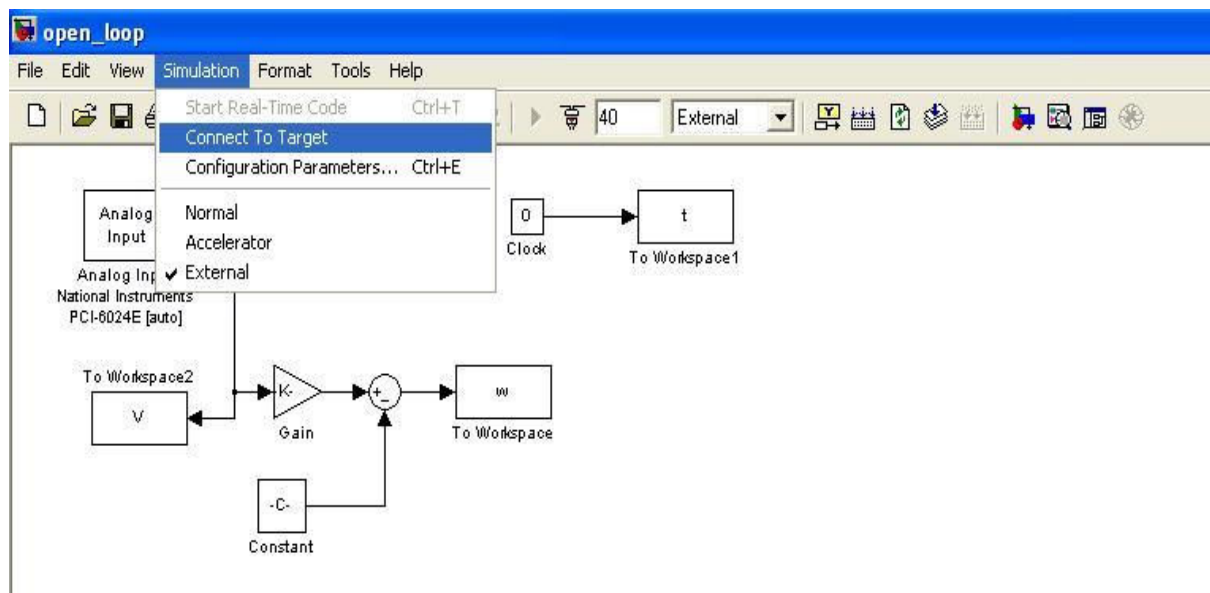
όπως αυτή υπολογίστηκε στην Παράγραφο 2.3.3. Συνεπώς:

$$K (\text{gain}) = 64.5650 \quad C (\text{constant}) = 2.5924$$

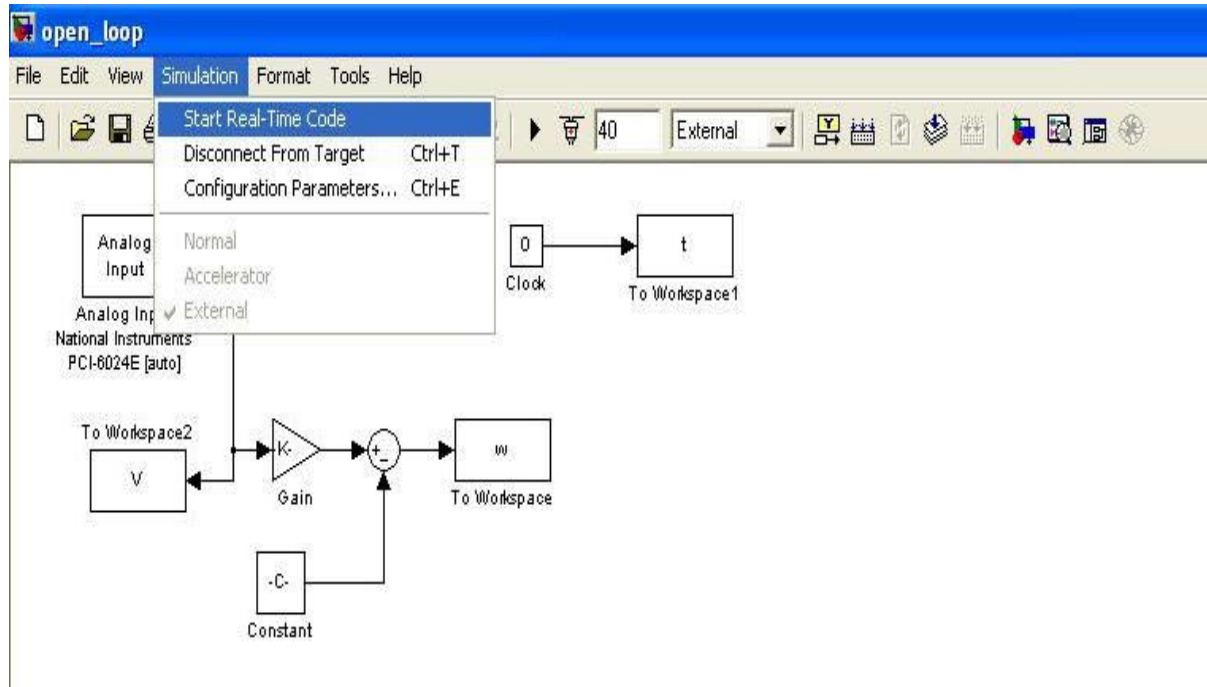
Στη συνέχεια επιλέγεται (από το menu) “*Tools -> Realtime Workshop -> Build model*” ώστε να υλοποιηθεί το μοντέλο στην κάρτα συλλογής δεδομένων.

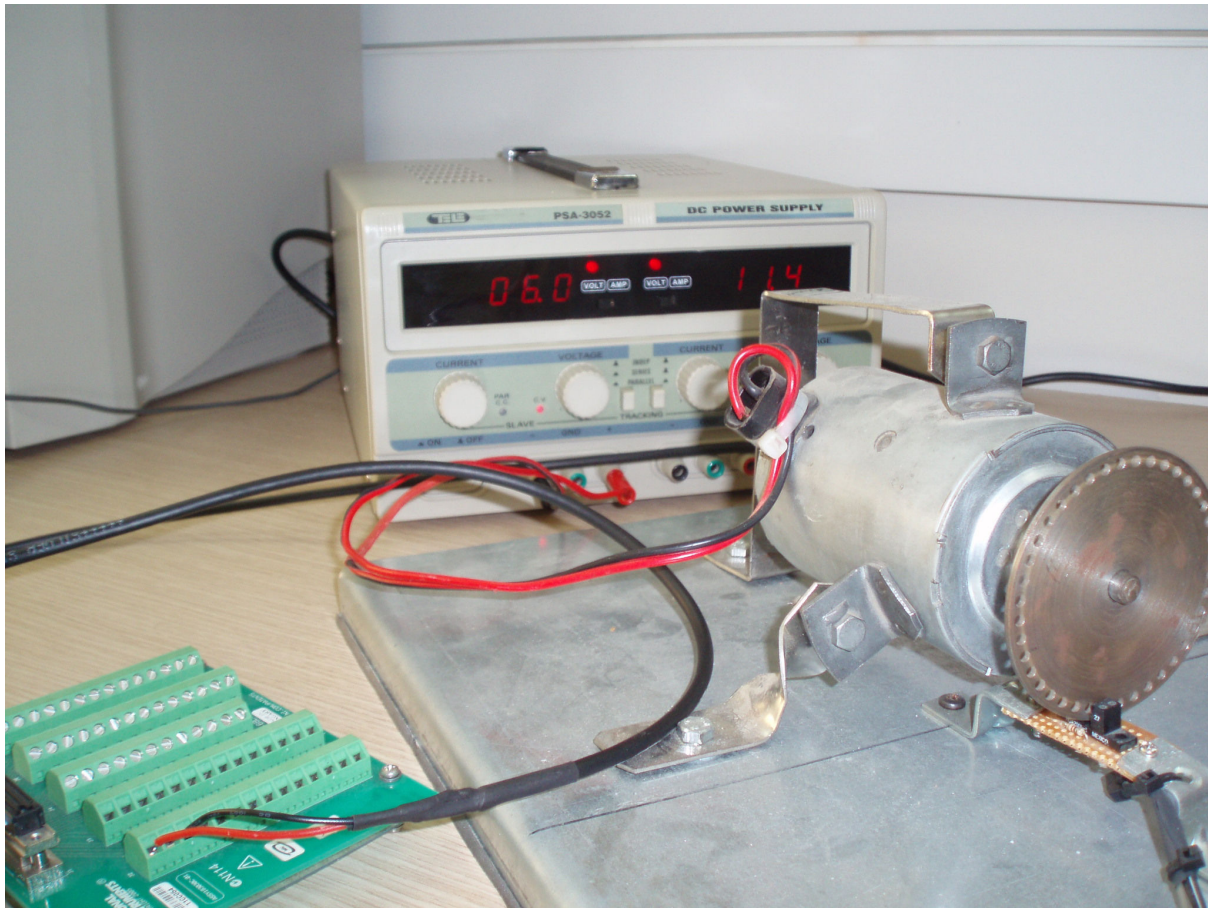


Τέλος, επιλέγεται (από το menu): “*Simulation -> Connect to target*” για την επίτευξη της επικοινωνίας του προγράμματος με την κάρτα συλλογής δεδομένων.



- 3) Ενεργοποιείται το τροφοδοτικό **χωρίς** να υπάρχει σύνδεση με τον κινητήρα και ρυθμίζεται η έξοδος στα 6 Volst DC. Στο μοντέλο simulink επιλέγεται: “*simulation - > start real -> time code*”, ώστε να εκκινήσει η καταγραφή και συνδέεται ο κινητήρας στο τροφοδοτικό (Σχήμα 3.3).



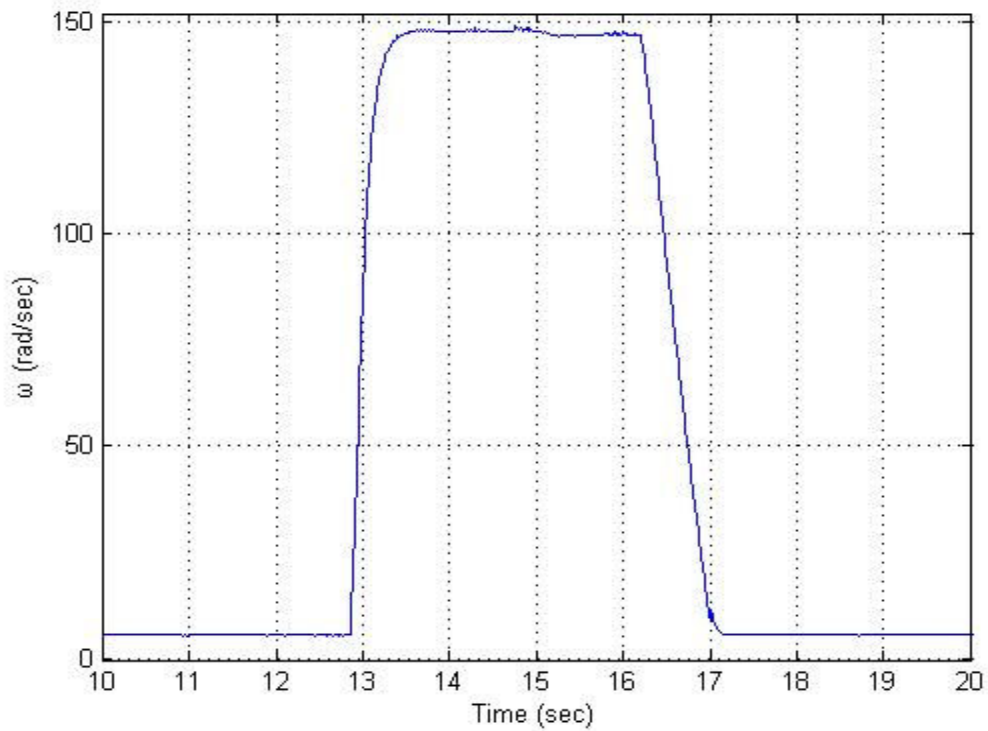


Σχήμα 3.3 : Σύνδεση του κινητήρα με την τροφοδοσία.

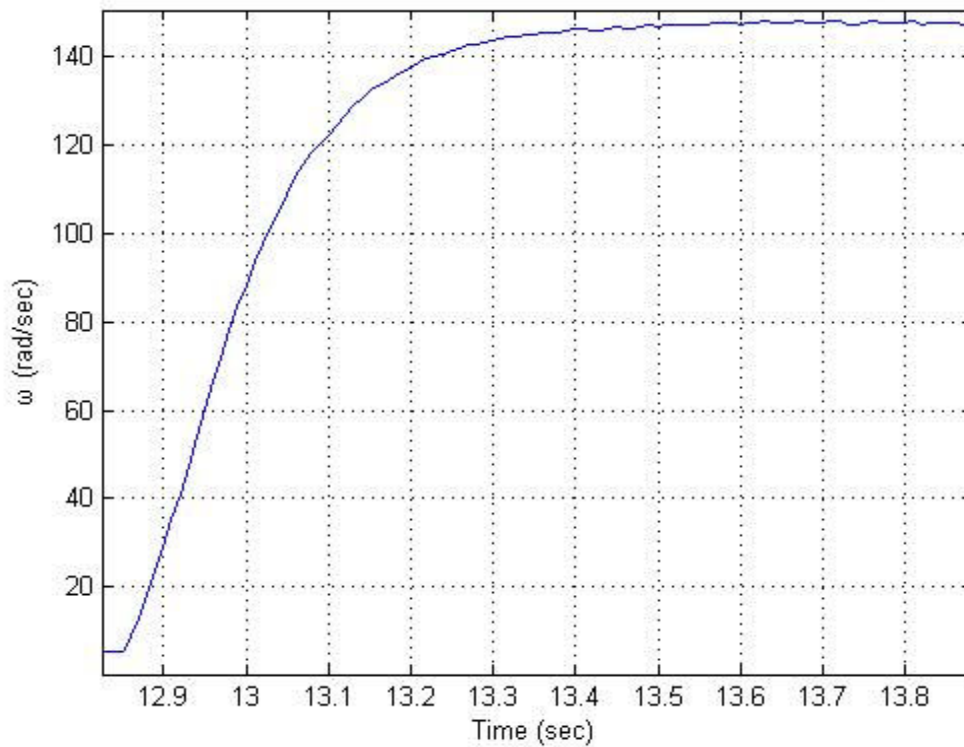
Αφού εκτελεστεί το πρόγραμμα για μερικά δευτερόλεπτα, **αποσυνδέεται** ο κινητήρας από την τροφοδοσία, και επιλέγεται “*simulation -> stop real ->time code*”. Στο παράθυρο εντολών (command window) του Matlab εισάγεται:

```
>>plot(t,w), zoom, grid
```

και εμφανίζεται το διάγραμμα απόκρισης της γωνιακής ταχύτητας (rad/sec) του κινητήρα σε συνάρτηση με το χρόνο (sec), Σχήματα 3.4, 3.5:



Σχήμα 3.4: Απόκριση κινητήρα σε είσοδο βαθμίδα μέτρου 6 Volts.



Σχήμα 3.5: Απόκριση κινητήρα σε είσοδο βαθμίδα μέτρου 6 Volts.

Από την μορφή της απόκρισης του κινητήρα σε είσοδο βαθμίδα μέτρου 6 Volts (Σχήμα 3.5), προκύπτει ότι η συνάρτηση μεταφοράς της γωνιακής ταχύτητας (έξοδος) ως προς την τάση εισόδου (είσοδος), μπορεί να προσεγγιστεί (με αποδεκτή ακρίβεια), ως σύστημα δεύτερης τάξης:

$$G_p(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_{ss} \cdot a \cdot b}{(s+a) \cdot (s+b)} = \frac{K_{ss} \cdot a \cdot b}{s^2 + (a+b) \cdot s + a \cdot b} \quad (5)$$

Για το σύστημα της εξίσωσης (7) έχουν υποθεθεί δύο πραγματικοί πόλοι, καθώς αυτό δεν εμφανίζει ταλαντωτική συμπεριφορά στην απόκρισή του (Σχήμα 3.5). Από τον ορισμό της συνάρτησης μεταφοράς προκύπτει:

$$G_p(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} \Rightarrow \Omega(s) = G_p(s) \cdot V(s) = \frac{K_{ss} \cdot a \cdot b}{(s+a) \cdot (s+b)} \cdot \frac{6}{s} \quad (6)$$

Όπου η είσοδος (βαθμίδα μέτρου 6 Volts) έχει αντικατασταθεί από το ισοδύναμό της στο πεδίο Laplace. Η απόκριση του κινητήρα στο πεδίο του χρόνου, προκύπτει από την εξίσωση (6) εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace, ήτοι [6, σελ.459]:

$$\omega(t) = \frac{6 \cdot K_{ss} \cdot a \cdot b}{a \cdot b} \left[1 + \frac{b}{a-b} e^{-at} - \frac{a}{a-b} e^{-bt} \right] \quad (7)$$

Στη μόνιμη κατάσταση ($t=\infty$) η εξίσωση (7) δίνει:

$$\omega(\infty) = 6 \cdot K_{ss} \Rightarrow K_{ss} = \frac{\omega(\infty)}{6} = \frac{145.6}{6} = 24.2667 \text{ rad/sec} \quad (8)$$

όπου η τελική τιμή της απόκρισης $\omega(\infty) = 145.6000 \text{ rad/sec}$ προκύπτει από το Σχήμα 3.5.

Οι παράμετροι a, b της εξίσωσης (7) μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά εύκολα, επιλύοντας την εξίσωση (7) 2 φορές (ως σύστημα εξισώσεων) χρησιμοποιώντας δεδομένα της απόκρισης για 2 διαφορετικές χρονικές στιγμές. Πράγματι, από το Σχήμα 3.5 προκύπτει:

$$\begin{aligned} t1 &= 0.1000 \text{ sec} & y1 &= 39.8400 \text{ rad/sec} \\ t2 &= 0.4000 \text{ sec} & y2 &= 135.4000 \text{ rad/sec} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια δημιουργείται το παρακάτω m-file:

```
function [F]=get_DC_motor_TF(x)
F=[145.6*(1+x(2))*exp(-x(1)*0.1)/(x(1)-x(2))-x(1)*exp(-x(2)*0.1)/(x(1)-x(2)))-39.84
145.6*(1+x(2))*exp(-x(1)*0.4)/(x(1)-x(2))-x(1)*exp(-x(2)*0.4)/(x(1)-x(2))-135.40];
```

και πληκτρολογώντας στο Matlab command window:

```
>> [x]=fsolve(@get_DC_motor_TF, [5 15])
```

προκύπτει η λύση:

$$a=10.4371 \quad b=10.4358$$

γεγονός που υποδεικνύει ότι πιθανότατα το σύστημα έχει ένα διπλό πραγματικό πόλο. Στην περίπτωση αυτή, η απόκριση της εξίσωσης (7) μετασχηματίζεται στην παρακάτω απόκριση, [6, σελ.461]:

$$\omega(t) = \frac{6 \cdot K_{ss} \cdot a^2}{a^2} [1 - e^{-at} - ate^{-at}] \quad (9)$$

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, η παράμετρος a μπορεί να υπολογιστεί επιλύοντας την εξίσωση (9). Πράγματι, για το ζεύγος τιμών (t_2, y_2) , δημιουργείται το m-file:

```
function [F]=get_DC_motor_TF(x)
F=[145.6*(1-exp(-x(1)*0.4)-x(1)*0.4*exp(-x(1)*0.4))-135.4];
```

και πληκτρολογώντας στο Matlab command window:

```
>> [x]=fsolve(@get_DC_motor_TF, [10])
```

προκύπτει η λύση:

$$a=10.8306$$

οπότε η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα είναι:

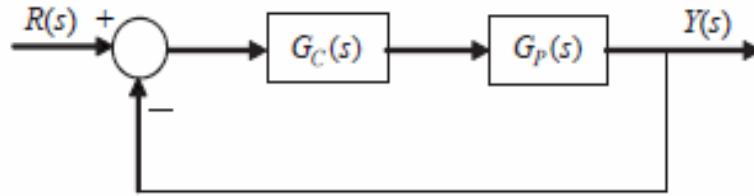
$$G_p(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{2846.5299}{s^2 + 21.6612s + 117.3019} \quad (10)$$

3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ [1]

Αφού υπολογίστηκε η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα, τώρα θα παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς του ψηφιακού κατευθυντή $G_C(z)$ του συστήματος.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του ψηφιακού Σ.Ε.Κ.Β ονομάζεται μέθοδος τοποθέτησης των πόλων, ο σχεδιαστής δηλαδή καθορίζει τους πόλους του συνολικού Σ.Ε.Κ.Β και στη συνέχεια υπολογίζεται κατευθυντής που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Έστω σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου με τον κατευθυντή σε σειρά με την εγκατάσταση στον άνω κλάδο και μοναδιαία αρνητική ανάδραση (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 : Κλασσικό Σ.Ε.Κ.Β με τον κατευθυντή στον άνω κλάδο και σε σειρά με την εγκατάσταση (πρόσω αντιστάθμιση).

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του Σ.Ε.Κ.Β του Σχήματος 3.9 είναι:

$$H(s) = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + C_c(s) \cdot G_p(s)} \Rightarrow H(z) = \frac{G_c(z) \cdot G_p(z)}{1 + C_c(z) \cdot G_p(z)} \quad (11)$$

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς $G_c(z)$ προκύπτει:

$$[1 + G_c(z) \cdot G_p(z)] \cdot H(z) = G_c(z) \cdot G_p(z) \Rightarrow G_c(z) = \frac{H(z)}{G_p(z) - G_p(z) \cdot H(z)} \quad (12)$$

Έστω η συμβολική αναπαράσταση:

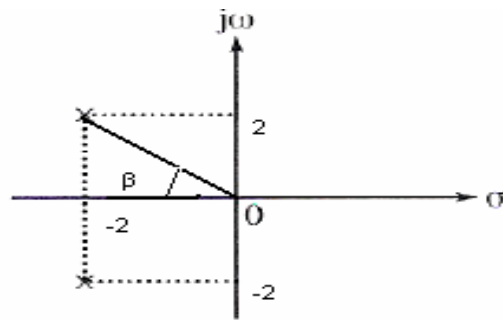
$$G_p(z) = \frac{nP^z}{dP^z} \quad H(z) = \frac{nH^z}{dH^z}$$

Αντικαθιστώντας τις ποσότητες αυτές στο αριστερό μέλος της συνάρτησης μεταφοράς της εξίσωσης (12), προκύπτει:

$$G_c(z) = \frac{nH \cdot dP}{nP \cdot (dH - nH)} \quad (13)$$

Αρχικά, ο σχεδιασμός υλοποιείται στο συνεχή χρόνο. Υποθέτοντας Σ.Ε.Κ.Β. δεύτερης τάξης, σχετικά γρήγορο, ευσταθές και με λίγη υπερύψωση, από τη θεωρία είναι γνωστό ότι αυτό πρέπει να έχει 2 συζυγείς μιγαδικούς πόλους με αρνητικό πραγματικό μέρος, δηλαδή να βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο.

Επιλέγονται ως πόλοι οι $p_1 = -2+2j$ και $p_2 = -2-2j$ που όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10 βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο και χαρακτηρίζονται από λόγο απόσβεσης $\zeta = \cos(\beta) = \cos(45^\circ) = 0.707$.



Σχήμα 3.10 : Τοποθέτηση των πόλων του Σ.Ε.Κ.Β. στο μιγαδικό επίπεδο.

Στο Command Window του Matlab εισάγονται:

```
>> p1=-2+2*j
>> p2= conj(p1)
>> poly([p1 p2])
```

Το αποτέλεσμα είναι **ans=[1 4 8]**, οπότε ο παρανομοστής του χαρακτηριστικού πολυωνύμου είναι:

$$s^2 + 4 \cdot s + 8$$

Προκειμένου το Σ.Ε.Κ.Β συνεχούς χρόνου να είναι τύπου 1, δηλαδή να μπορεί να ακολουθήσει - με πεπερασμένο σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση - και είσοδο αναφοράς αναρρίχηση, πρέπει το κέρδος μόνιμης κατάστασης K_{ss} να ισούται με 1, συνεπώς ο αριθμητής πρέπει να ισούται με τον σταθερό όρο του παρανομαστή:

$$H(s) = \frac{b}{s^2 + a \cdot s + b} \quad K_{ss} = \frac{b}{b} = 1 .$$

Συνεπώς, η συνάρτηση μεταφοράς του ισοδύναμου Σ.Ε.Κ.Β συνεχούς χρόνου είναι:

$$H(s) = \frac{8}{s^2 + 4 \cdot s + 8} \quad (14)$$

Για τη διακριτοποίηση του Σ.Ε.Κ.Β. απαιτείται η επιλογή κατάλληλης περιόδου δειγματοληψίας T_s . Η χρονική σταθερά του συστήματος ισούται με:

$$\tau = \frac{1}{|\text{real}(p_i)|} = \frac{1}{2} = 0.5 \text{ (sec)}$$

Η περίοδος δειγματοληψίας επιλέγεται ως εξής:

$$T_s \in [0.1 \cdot \tau \quad 0.5 \cdot \tau] \Rightarrow T_s \in [0.05 \quad 0.25]$$

και τελικά επιλέγεται ως περίοδος δειγματοληψίας η τιμή:

$$T_s = 0.005 \text{ (sec)}$$

Στο command window του Matlab εισάγονται:

```
>> H=tf(8,[1 4 8])
```

```
>> Hz=c2d(H,0.005)
```

και η διακριτή συνάρτηση μεταφοράς του ψηφιακού Σ.Ε.Κ.Β. είναι

$$H(z) = \frac{0.9933 \cdot 10^{-4} \cdot z + 0.9867 \cdot 10^{-4}}{z^2 - 1.9800 \cdot z + 0.9802} \quad (15)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του διακριτού κατευθυντή $G_c(z)$ υπολογίζεται από την εξίσωση (10). Για το λόγο αυτό, στο command window του Matlab εισάγονται:

```
>> Gps=tf(2846.5299,[1 21.6612 117.3019])
```

```
>> Gpz=c2d(Gps,0.005)
```

Η διακριτοποιημένη συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα $G_p(z)$ που προκύπτει είναι:

$$G_p(z) = \frac{0.0343 \cdot z + 0.0331}{z^2 - 1.8946 \cdot z + 0.8974} \quad (16)$$

```
>> [nP,dP]=tfdata(Gpz,'v');
```

```
>> [nH,dH]=tfdata(Hz,'v');
```

```
>> format long;
```

```
>> Gcz=tf(conv(nH,dP),conv(nP,(dH-nH)),0.005)
```

και ο διακριτός κατευθυντής που θα χρησιμοποιηθεί έχει συνάρτηση μεταφοράς:

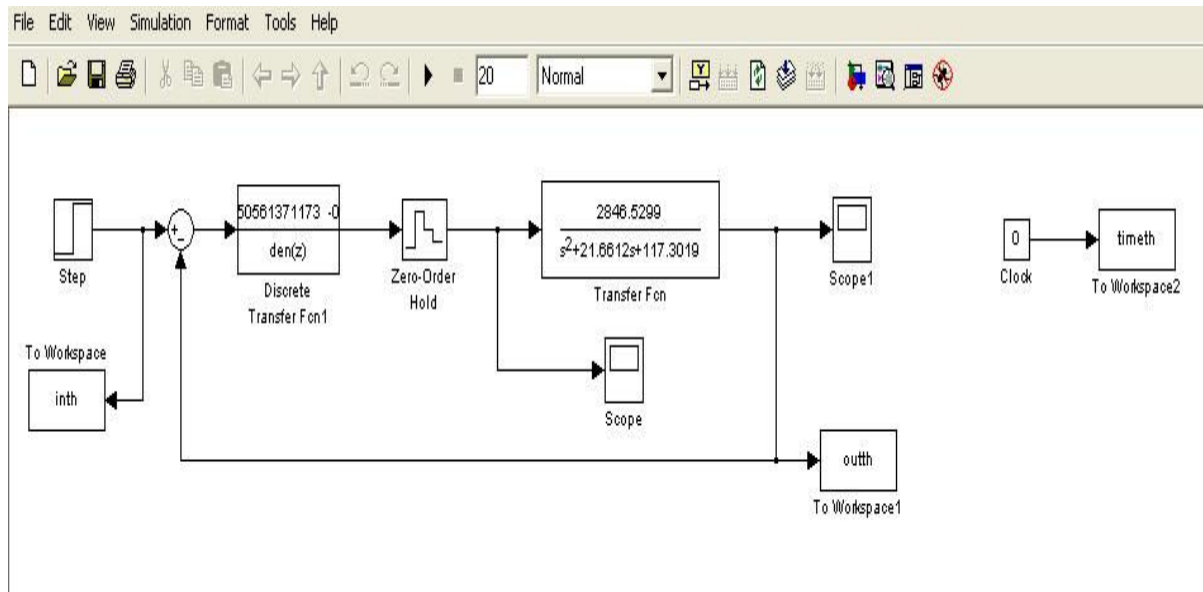
$$G_C(z) = 1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{z^4 + 0.9933 \cdot z^3 - 0.8952 \cdot z^2 - 0.9780 \cdot z + 0.8854}{z^4 + 0.0343 \cdot z^3 - 0.0348 \cdot z^2 - 0.0319 \cdot z + 0.0324} \quad (17)$$

3.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΙΣΟΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΒΑΘΜΙΑΔΑ

Αφού έχει υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς του αναγκάιου κατευθυντή, μπορεί πλέον να υλοποιηθεί το Ψηφιακό Σ.Ε.Κ.Β. Στην αρχή σχεδιάζεται και *προσομοιώνεται* το

Ψηφιακό Σ.Ε.Κ.Β. στο Simulink του MATLAB, ενώ στη συνέχεια υλοποιείται το *πραγματικό* Ψηφιακό Σ.Ε.Κ.Β. σύστημα συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα και της κάρτας συλλογής δεδομένων (DAQ).

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται το ψηφιακό σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου με είσοδο μοναδιαία βαθμίδα το οποίο έχει αναπτυχθεί κατάλληλα για προσομοίωση στο simulink του MATLAB.



Σχήμα 3.11 : Μοντέλο εξομοίωσης του Ψηφιακού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου με είσοδο αναφοράς βαθμίδα (step).

Το δομικό στοιχείο “Discrete transfer Fcn1”, συνιστά τη συνάρτηση μεταφοράς του διακριτού κατευθυντή $G_c(z)$ που υπολογίστηκε προηγούμενα. Στις παραμέτρους του δομικού στοιχείου εισάγονται οι συντελεστές των πολυωνύμων της συνάρτησης μεταφοράς:

Numerator coefficient: 1.0e-004 · [0.9933 -0.9140 -0.9788 0.9032]

Denominator coefficient: [0.0233 -0.0235 -0.0220 0.0222]

Sample time: 0.005

Το δομικό στοιχείο “Transfer Fcn” αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση μεταφοράς συνεχούς χρόνου του κινητήρα:

$$G_p(s) = \frac{2846.5299}{s^2 + 21.6612 \cdot s + 117.3019} \quad (18)$$

συνεπώς, στις παραμέτρους του εισάγονται:

Numerator coefficient: 2846.5299
Denominator coefficient: [1 21.6612 117.3019]

Το “zero-Order Hold” συνιστά τον μετατροπέα από διακριτό σήμα σε σήμα συνεχούς χρόνου (DAC) και μετατρέπει την έξοδο του διακριτού κατευθυντή σε σήμα συνεχούς χρόνου που “οδηγεί” τον κινητήρα. Στην παράμετρο ‘sample time’ του block εισάγεται η τιμή 0.005, που αντιπροσωπεύει την περίοδο δειγματοληψίας.

Το “Step” συνιστά την είσοδο αναφοράς βαθμίδα προς το Σ.Ε.Κ.Β. και στις παραμέτρους εισάγονται:

step time:0
Initial value:0
Final value: 170
Sample time: 0.005

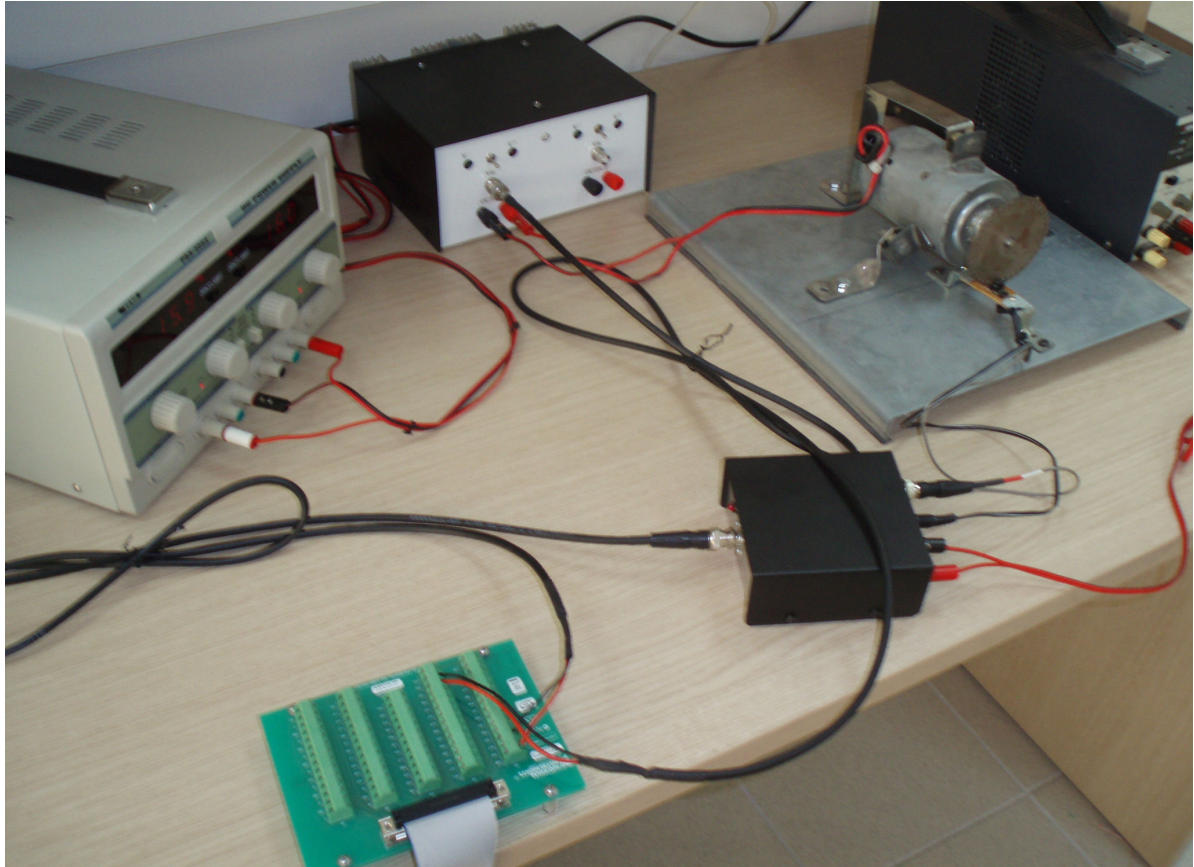
ρυθμίζονται οι παράμετροι στο πεδίο:

Simulation- Configuration Parameters –Simulation time->
Start time:0
Stop time:20
Sample time:0.005

και πατώντας το “Start simulation” ξεκινάει η προσομοίωση.

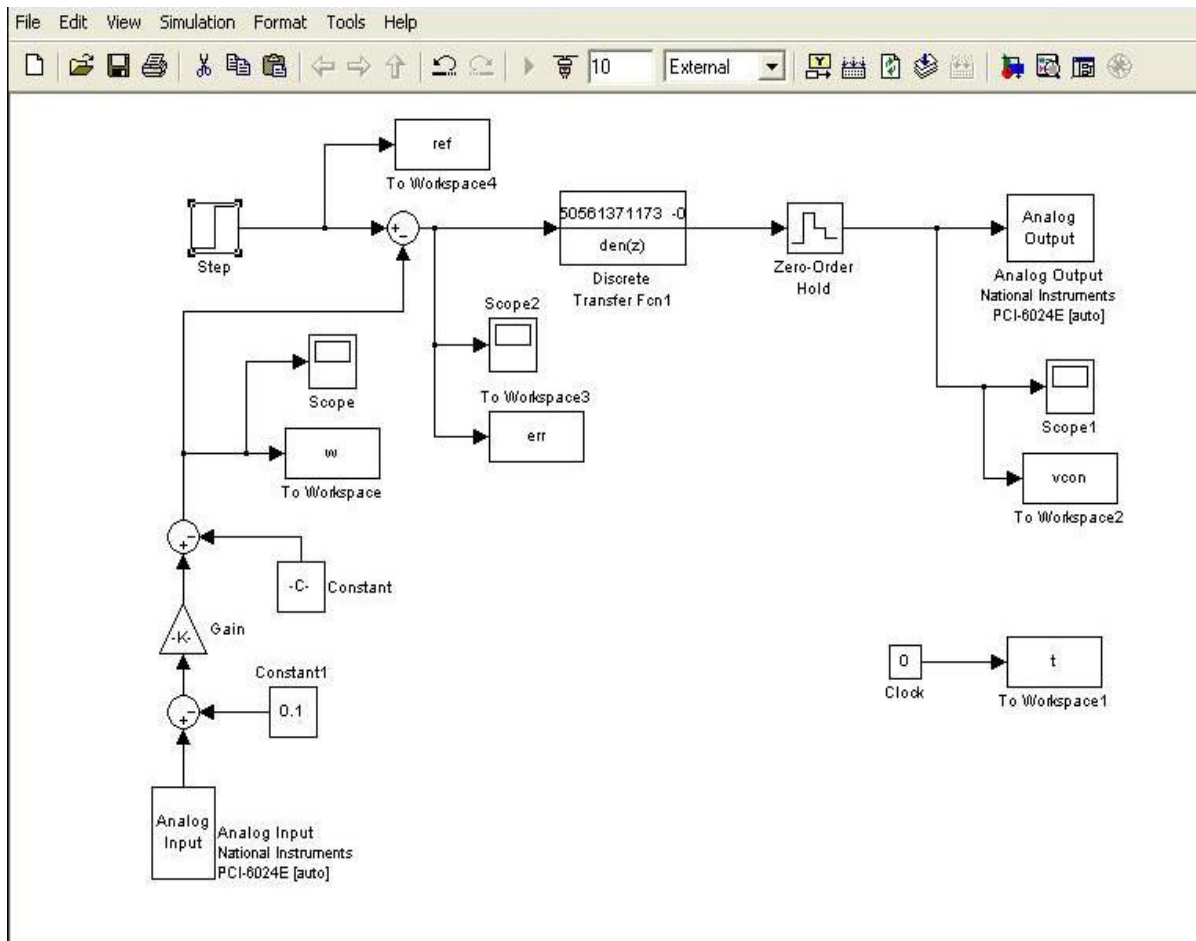
Στη συνέχεια υλοποιείται το πραγματικό σύστημα. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη συνδεσμολογία του Ψηφιακού Σ.Ε.Κ.Β. Η έξοδος και η τροφοδοσία του αισθητηρίου μέτρησης γωνιακής ταχύτητας συνδέονται στην είσοδο F_{in} και $V_{cc-opto}$ αντίστοιχα του μετατροπέα συχνότητας σε τάση. Στην συνέχεια, η έξοδος V_{out} του μετατροπέα οδηγείται στην είσοδο Analog Input Channel 0 της κάρτας συλλογής δεδομένων DAQ στα pin 68⁺/67⁻ της πλακέτας διασύνδεσης εισόδων εξόδων SCB-68. Η έξοδος Analog Output Channel 0 (pin 22⁺ /55⁻) της κάρτας DAQ οδηγείται στην είσοδο V_{in} του ενισχυτή και τέλος ο βρόγχος του συστήματος ολοκληρώνεται με τη σύνδεση της τροφοδοσίας του κινητήρα στην έξοδο OUTPUT του ενισχυτή. Στον ενισχυτή εφαρμόζεται συμμετρική τάση

± 16 Volts DC ενώ στον μετατροπέα συχνότητας σε τάση εφαρμόζεται τροφοδοσία 15 Volts DC.



Σχήμα 3.13: Συνδεσμολογία του Ψηφιακού Σ.Ε.Κ.Β.

Μετά την ολοκλήρωση της συνδεσμολογίας όλων των μερών του συστήματος εισάγεται διακριτός κατευθυντής μέσω του Simulink. Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται το μοντέλο που έχει κατασκευαστεί. Στα βασικά του στοιχεία υπάρχει η συνάρτηση μεταφοράς του διακριτού κατευθυντή που υπολογίστηκε προηγούμενα, ενώ πλέον υφίστανται τα δύο δομικά στοιχεία εισόδου/εξόδου τα οποία συνδέουν το μοντέλο με τις φυσικές εισόδους/εξόδους της κάρτας συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 3.14: Μοντέλο υλοποίησης Ψηφιακού ελέγχου σε είσοδο αναφοράς βαθμίδα μέτρου 170 rad/sec

Στο δομικό στοιχείο Analog Input το οποίο συνδέεται με την αναλογική είσοδο (ACH0) της κάρτας DAQ, λαμβάνεται η τάση εξόδου του μετατροπέα συχνότητας σε τάση, η οποία μετατρέπεται σε γωνιακή ταχύτητα σύμφωνα με τη σχέση:

$$\omega = 64.5650 \cdot V - 2.5923$$

που υπολογίστηκε στη παράγραφο 2.3.3. Οπότε:

K(Gain):[Gain:64.565031,sampletime:0.005]

C(Constant):[Constant Value:2.592383,sample time:0.005]

Λόγω του ότι στην έξοδο του μετατροπέα υπάρχει μια offset τάση 0.1 Volts ακόμα και όταν ο κινητήρας δεν περιστρέφεται, αυτή η τάση αφαιρείται εισάγοντας στο σύστημα το δομικό στοιχείο 'Constant1' στο οποίο εισάγεται η τιμή 0.1. Στη συνέχεια, η μετρούμενη

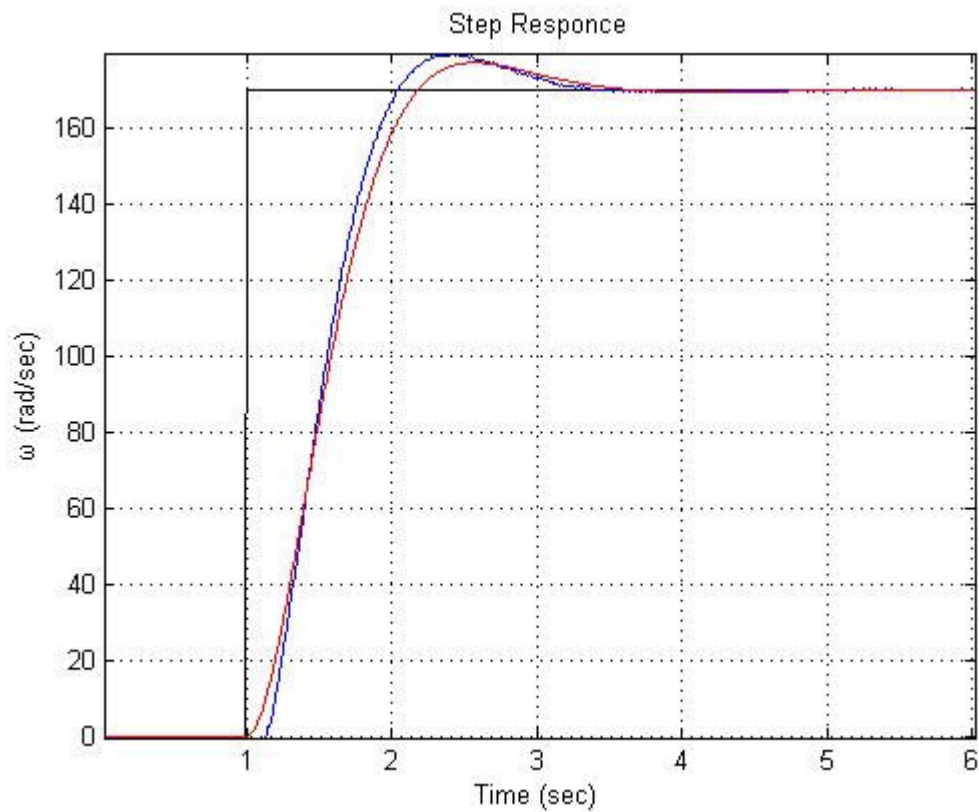
γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα συγκρίνεται με τη γωνιακή ταχύτητα που δίνεται στην είσοδο αναφοράς και το σφάλμα που προκύπτει οδηγείται στο διακριτό κατευθυντή 'Discrete Transfer Fcn1', και αφού το "διορθώσει", το οδηγεί στο δομικό στοιχείο 'zero order holder' που το μετατρέπει ξανά σε αναλογικό σήμα. Τέλος, μέσω του δομικού στοιχείου 'Analog Output' που συνδέεται με την αναλογική έξοδο (DAC00OUT) της κάρτας DAQ, η έξοδος του κατευθυντή οδηγείται στην είσοδο V_{in} του τελικού στοιχείου ελέγχου (ενισχυτής), το οποίο αναλαμβάνει την ενίσχυση ώστε να επιτευχθεί η "οδήγηση" του κινητήρα.

Με ενεργοποιημένα τον ενισχυτή και το στροφόμετρο επιλέγεται (από το menu): "*Tools-> Realtime Workshop -> Build model*" ώστε να υλοποιηθεί το μοντέλο στην κάρτα συλλογής δεδομένων. Στη συνέχεια "*Simulation-> Connect to target*" για την επίτευξη της επικοινωνίας του προγράμματος με την κάρτα συλλογής δεδομένων και τέλος από το menu επιλέγεται "*Simulation -> Start Real-Time Code*" για να ξεκινήσει να εκτελείται το πρόγραμμα και η καταγραφή της απόκρισης του κινητήρα και της εισόδου αναφοράς.

Τέλος, συγκρίνεται η θεωρητική απόκριση του Σ.Ε.Κ.Β. σε σχέση με την πραγματική απόκριση και την είσοδο αναφοράς. Στο παράθυρο εντολών (command window) του matlab εισάγεται:

```
>> plot(timeth, inth, 'k', timeth, outth, 'r', t, w, 'b'), zoom, grid
```

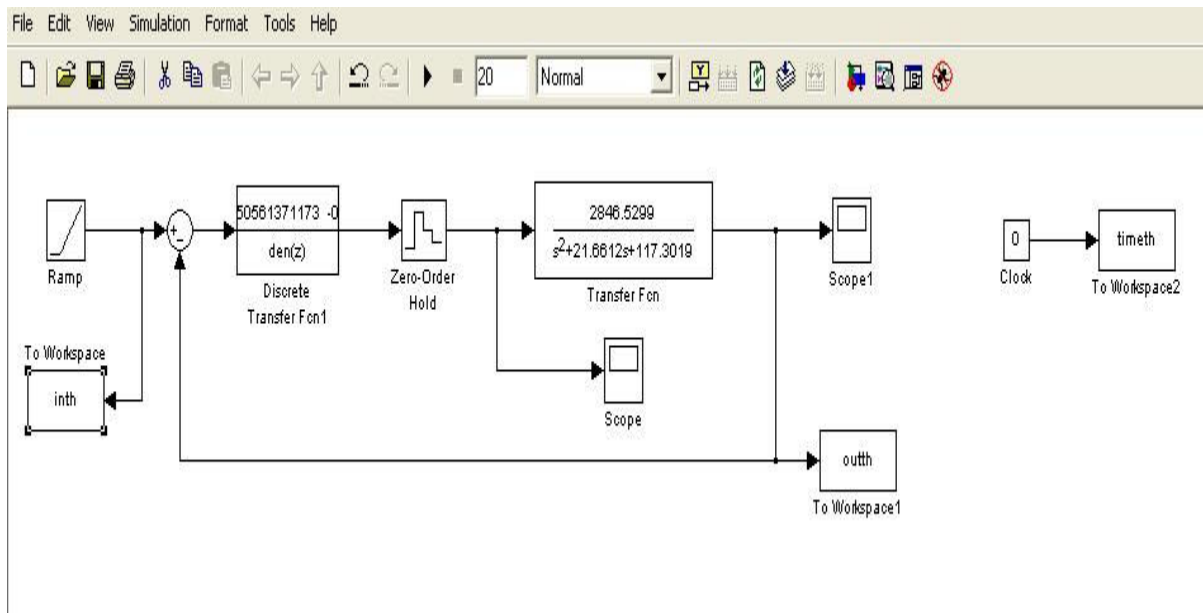
και προκύπτει το Σχήμα 3.15 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.15: Απόκριση θεωρητικού και πραγματικού συστήματος ελέγχου: — εισόδος αναφοράς, — απόκριση θεωρητικού συστήματος, — απόκριση πραγματικού Ψ.Σ.Ε.Κ.Β.

3.5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΙΣΟΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗ

Στη συνέχεια υλοποιείται το Ψηφιακό Σ.Ε.Κ.Β. με είσοδο αναφοράς αναρρίχηση (ramp). Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης που (χρησιμοποιήθηκε προηγούμενα) αλλάζοντας την είσοδο αναφοράς βαθμίδας (step) σε αναρρίχηση (ramp).



Σχήμα 3.16 Μοντέλο εξομοίωσης του Ψηφιακού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου με είσοδο αναφοράς αναρρίχηση (ramp).

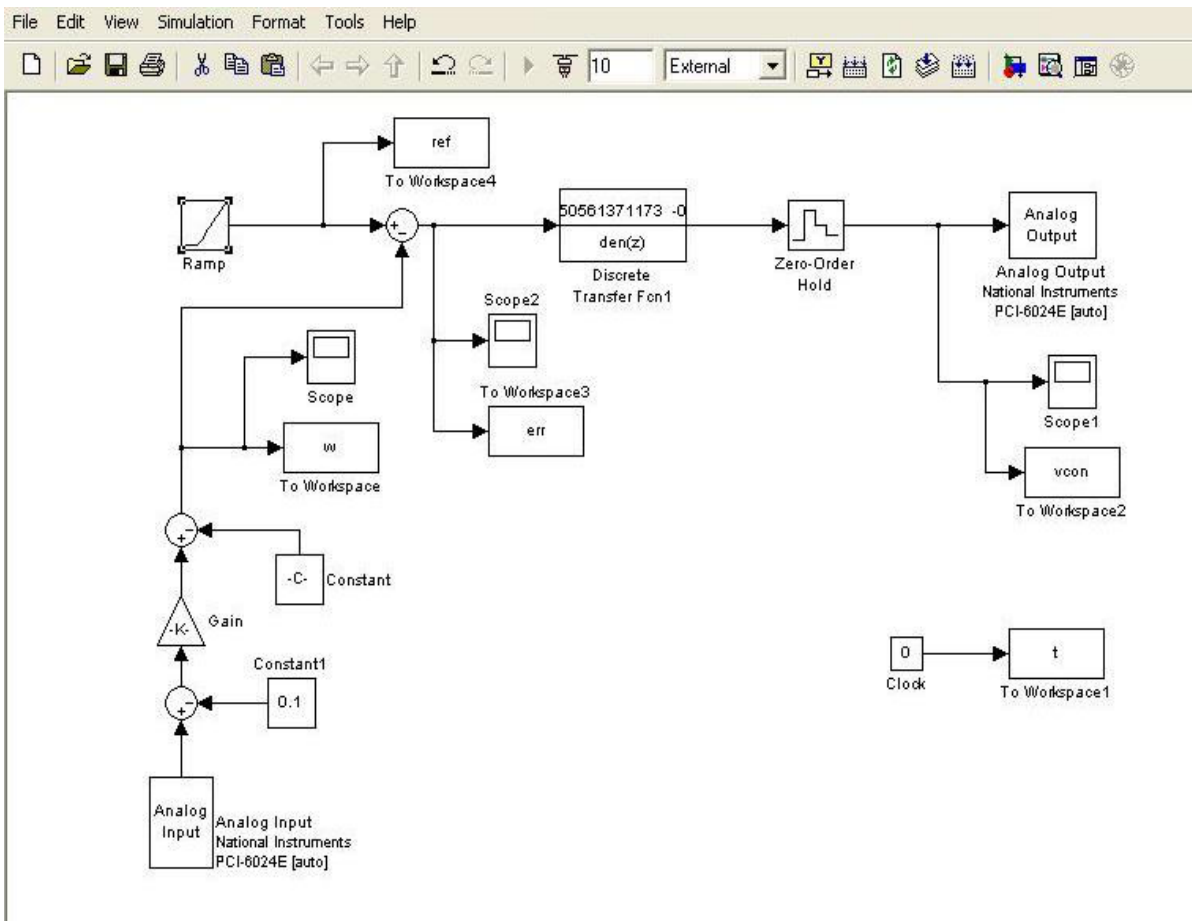
Για την επίτευξη γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα στην τιμή 170 rad/sec σε χρόνο 10 sec γραμμικά, στις παραμέτρους του δομικού στοιχείου ‘Ramp’ εισάγονται:

Slope:17
Start time:1
Initial output:0

Ρυθμίζονται οι παράμετροι στο πεδίο:

Simulation- Configuration Parameters -Simulation time->
Start time:0 , Stop time:10 ,Sample time:0.005

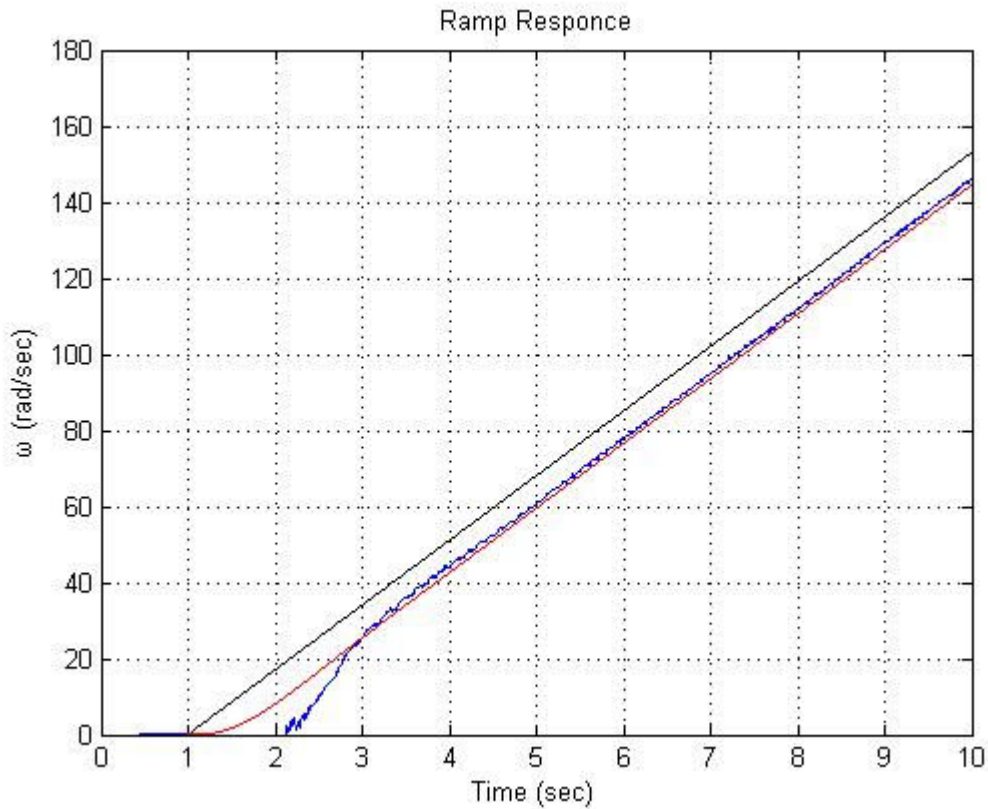
και πατώντας το “Start simulation” ξεκινάει η προσομοίωση. Στη συνέχεια υλοποιείται το πραγματικό σύστημα. Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται το μοντέλο με είσοδο αναφοράς τύπου αναρρίχηση.



Σχήμα 3.17: Μοντέλο υλοποίησης Ψηφιακού ελέγχου σε είσοδο αναφοράς αναρρίχησης κλήσης 17.

Όλα τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία παραμένουν τα ίδια με της προηγούμενης υλοποίησης (είσοδος αναφοράς βαθμίδα). Με ενεργοποιημένα τον ενισχυτή και το στροφόμετρο επιλέγεται (από το menu): “*Tools-> Realtime Workshop -> Build model*” ώστε να υλοποιηθεί το μοντέλο στην κάρτα συλλογής δεδομένων στη συνέχεια “*Simulation-> Connect to target*” για την επίτευξη της επικοινωνίας του προγράμματος με την κάρτα συλλογής δεδομένων και τέλος από το menu ξανά “*Simulation -> Start Real-Time Code*” για να ξεκινήσει να εκτελείται το πρόγραμμα και η καταγραφή της απόκρισης του κινητήρα και της εισόδου αναφοράς. Για τη σύγκριση θεωρητικής και πραγματικής απόκρισης, στο παράθυρο εντολών (command window) του matlab εισάγεται:

```
>> plot(timeth, inth, 'k', timeth, outth, 'r', t, w, 'b'), zoom, grid
και προκύπτει το Σχήμα 3.18.
```



Σχήμα 3.18: Απόκριση θεωρητικού και πραγματικού συστήματος ελέγχου: — εισόδος αναφοράς , — απόκριση θεωρητικού συστήματος, — απόκριση πραγματικού Ψ.Σ.Ε.Κ.Β.

3.6 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΥΘΑΙΡΕΤΗ ΕΙΣΟΔΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του θεωρητικού Σ.Ε.Κ.Β. και της απόκρισης του πραγματικού Ψηφιακού Σ.Ε.Κ.Β. σε εναλλακτική είσοδο που περιέχει τμήματα βαθμίδας, αναρρίχησης, και η ημιτονοειδούς εισόδου. Αρχικά δημιουργούνται στο Matlab το διάγραμμα χρόνου-εισόδου με τις παρακάτω εντολές:

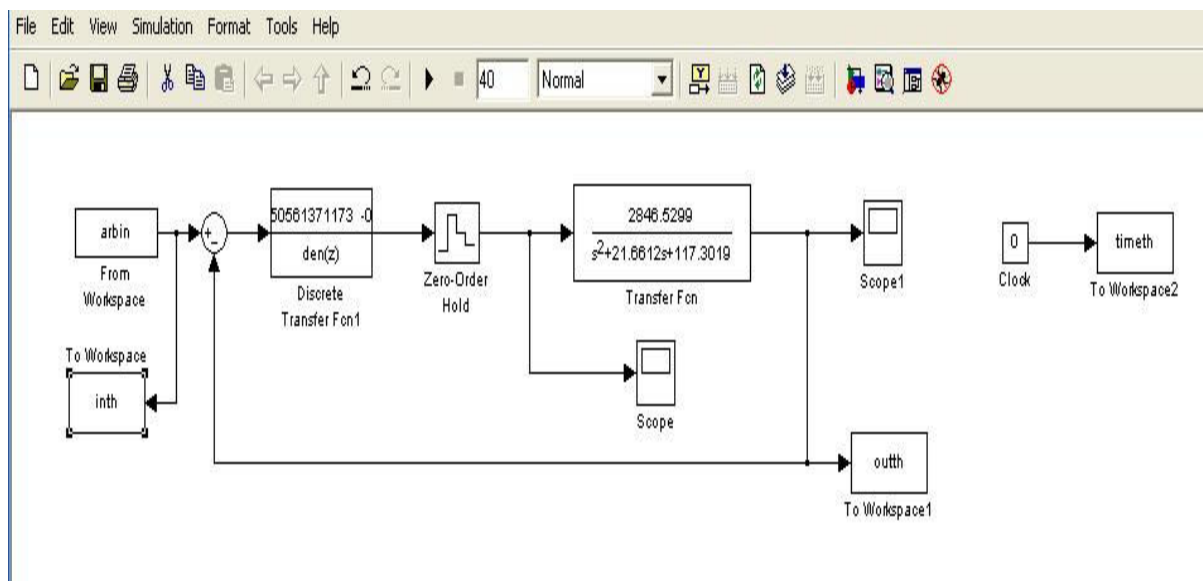
```
>> x1=zeros(1000,1);
>> x2=170*ones(1000,1);
>> x3=linspace(170,50,1000)';
>> x4=linspace(50,170,1000)';
```

```

>> x5=170+50*sin(2*linspace(0,5,2000))';
>> x6=linspace(x5(end),0,2000)';
>> t=linspace(0,40,8000)';
>> inp=[x1; x2; x3; x4; x5; x6;];
>> arbin=[t inp];

```

Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του Σ.Ε.Κ.Β. με την είσοδο αναφοράς "arbin".



Σχήμα 3.19: Μοντέλο εξομοίωσης του Ψηφιακού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου με εναλλακτική είσοδο αναφοράς .

Στο δομικό στοιχείο “arbin” εισάγονται οι παράμετροι στα πεδία:

Data: arbin

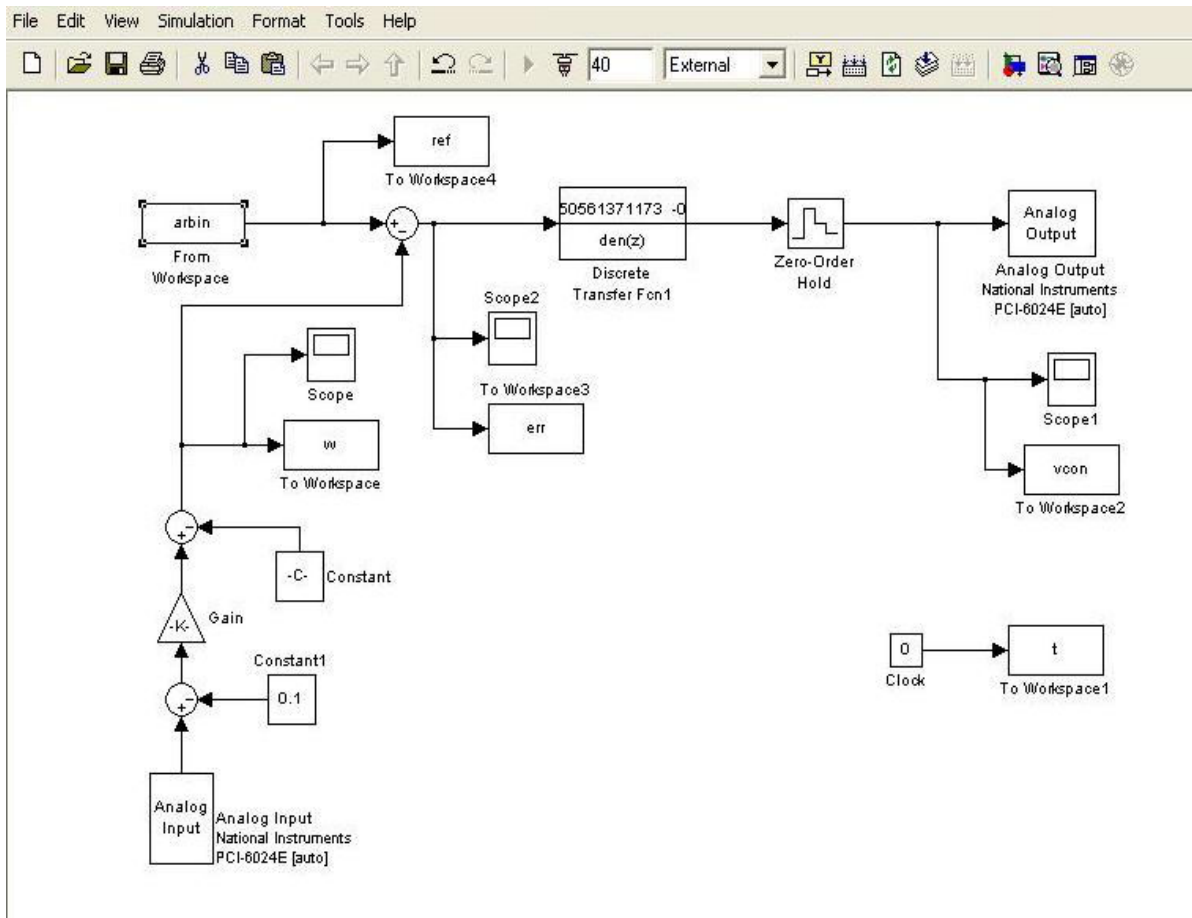
Sample time: 0.005

ρυθμίζονται οι παράμετροι στο πεδίο:

Simulation- Configuration Parameters –Simulation time->

Start time:0 , Stop time:40 ,Sample time:0.005

και πατώντας το “Start simulation” ξεκινάει η προσομοίωση. Στη συνέχεια υλοποιείται το πραγματικό σύστημα. Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται το μοντέλο με την “αυθαίρετη” (arbitrary) είσοδο αναφοράς που έχει κατασκευαστεί.

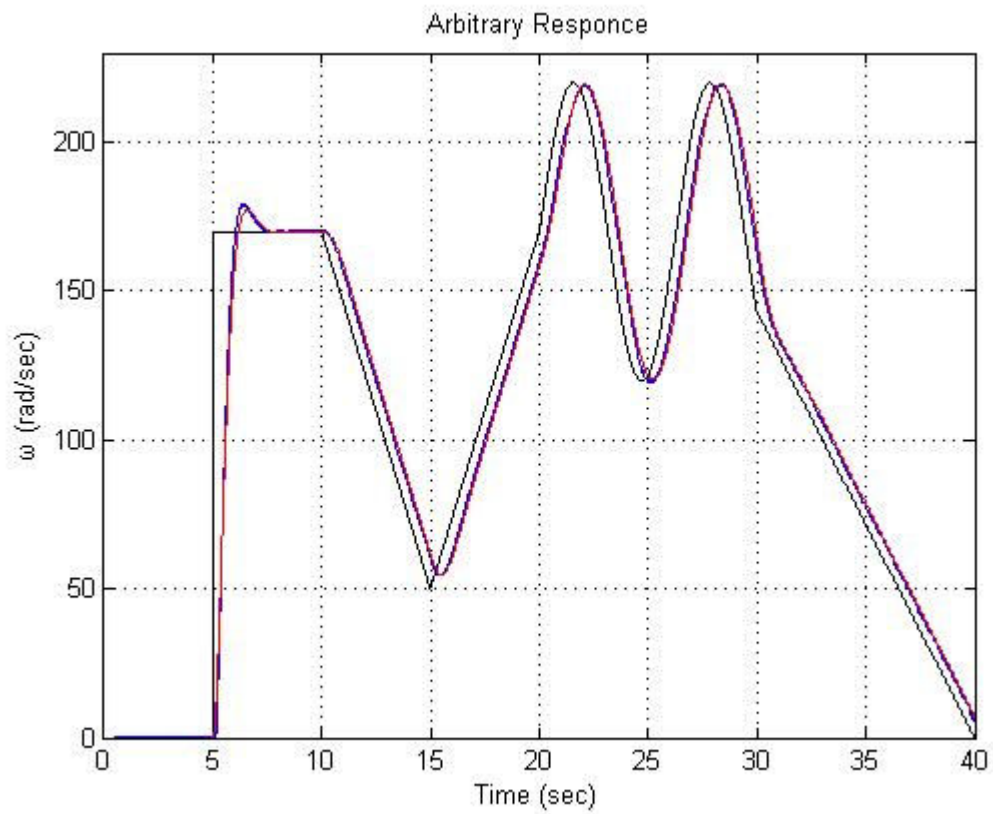


Σχήμα 3.20: Μοντέλο υλοποίησης Ψηφιακού ελέγχου σε εναλλακτική είσοδο αναφοράς.

Με ενεργοποιημένα τον ενισχυτή και το στροφόμετρο επιλέγεται (από το menu): “*Tools-> Realtime Workshop -> Build model*” ώστε να υλοποιηθεί το μοντέλο στην κάρτα συλλογής δεδομένων στη συνέχεια “*Simulation-> Connect to target*” για την επίτευξη της επικοινωνίας του προγράμματος με την κάρτα συλλογής δεδομένων και τέλος από το menu ξανά “*Simulation -> Start Real-Time Code*” για να ξεκινήσει να εκτελείται το πρόγραμμα και η καταγραφή της απόκρισης του κινητήρα και της εισόδου αναφοράς. Για τη σύγκριση θεωρητικής και πραγματικής απόκρισης στο παράθυρο εντολών (command window) του matlab εισάγεται:

```
>>plot(timeth,inth,'k',timeth,outth,'r',t,w,'b',),zoom,grid
```

και προκύπτει το Σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21: Απόκριση θεωρητικού και πραγματικού συστήματος ελέγχου: — εισόδος αναφοράς , — απόκριση θεωρητικού συστήματος, — απόκριση πραγματικού Ψ.Σ.Ε.Κ.Β.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ψηφιακό σύστημα ελέγχου για την ρύθμιση της γωνιακής ταχύτητας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος (D.C.) με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στα πλαίσια της εργασίας, αρχικά έγινε ο σχεδιασμός και η κατασκευή των διαφόρων βαθμίδων από τις οποίες αποτελείται το σύστημα, ήτοι κινητήρας, στρόφομετρο, ενισχυτής και στη συνέχεια η σύνδεση του συστήματος με την κάρτα συλλογής δεδομένων καθώς και ο προγραμματισμός αυτής με χρήση του λογισμικού Matlab.

Το σύστημα λειτούργησε χωρίς προβλήματα επιτυγχάνοντας σε μεγάλο βαθμό τον στόχο που τέθηκε στη φάση του σχεδιασμού. Έγιναν 3 διαφορετικές υλοποιήσεις του συστήματος με διαφορετική είσοδο αναφοράς κάθε φορά, αφού πρώτα πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του αντίστοιχου Σ.Ε.Κ.Β. στο Matlab. Πραγματοποιήθηκε η καταγραφή τόσο της θεωρητικής όσο και της πραγματικής απόκρισης σε σχέση με την εκάστοτε είσοδο αναφοράς σε ένα κοινό γράφημα. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη των αποκρίσεων του Ψηφιακού Σ.Ε.Κ.Β, είναι ότι αυτό ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις σχεδιασμού, καθώς η πραγματική απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος, ακολουθεί σε κάθε περίπτωση την είσοδο αναφοράς με αρκετά μικρό σφάλμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Δρ. Γεωργίου Ν. Φουσκιτάκη, “Σημειώσεις στο μάθημα: Ψηφιακά Συστήματα Ελέγχου”, Τ.Ε.Ι. Κρήτης Παράρτημα Χανίων τμήμα Ηλεκτρονικής, 2004.

[2] HOA 2001
(url: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/142924/HONEYWELL/HOA2001.html>)

[3] LM675
(url: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm675.pdf>)

[4] A. Remenčius , A. Žilinskas , “Project Report for DIGITAL CONTROL SYSTEMS”, Τ.Ε.Ι. Κρήτης Τμήμα Ηλεκτρονικής, 2009.

[5] National Instruments PCI-6024E
(url: http://www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc202-204_ETC_212-213.pdf)

[6] "The Transforms and Applications Handbook" Second Edition, Edited by A.D. Poularikas, CRC Press, Florida 2000.