



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Έλεγχος Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με χρήση
Αναλογικο–Διαφορικο–Ολοκληρωτικού Ελεγκτή
(PID) για την αντιστάθμιση εξωτερικών διαταραχών.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταματάκης Μιχαήλ

A.M: 03109212

Επιβλέπων : Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Έλεγχος Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με χρήση
Αναλογικο–Διαφορικο–Ολοκληρωτικού Ελεγκτή
(PID) για την αντιστάθμιση εξωτερικών διαταραχών.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων : Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .

.....
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

.....
Σταματάκης Μιχαήλ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Σταματάκης Μιχαήλ, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην εφαρμογή τεχνικών αντιστάθμισης αυτομάτου ελέγχου με χρήση Αναλογικών – Διαφορικών – Ολοκληρωτικών (PID) ελεγκτών σε κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (Σ.Ρ.). Οι κινητήρες Σ.Ρ. βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή τόσο σε οικιακές, βιοτεχνικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις λόγω της απλότητας και αποδοτικής λειτουργίας τους. Η λειτουργία του κινητήρα Σ.Ρ. εμφανίζει όμως και μη γραμμικές συμπεριφορές οι οποίες θα πρέπει να επισημανθούν και να εξαλειφθούν (αντισταθμιστούν) εφόσον αυτό είναι δυνατόν με την εκλογή ελεγκτών κατάλληλων χαρακτηριστικών. Οι ελεγκτές PID αποτελούν στοιχεία εφαρμογής κλασσικού ελέγχου, τα οποία είναι ευρύτατα διαδεδομένα δίνοντας γρήγορες, αξιόπιστες και εύκολα προσαρμοζόμενες λύσεις σε μία μεγάλη ομάδα διατάξεων που χρήζουν ελέγχου.

Στα πλαίσια αυτά και για την ακρίβεια εφαρμογής των μεθόδων αντιστάθμισης, αναπτύχθηκε μοντέλο περιγραφής του κινητήρα Σ.Ρ. στην μαθηματική γλώσσα περιγραφής Matlab Script Language. Το μοντέλο ενσωματώνει μέσω του συστήματος των εξισώσεων περιγραφής, τόσο τα γραμμικά όσο και τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Ο ελεγκτής και οι προτεινόμενες λύσεις θα εφαρμοστούν λοιπόν, επί του ακριβούς μη γραμμικού μοντέλου, δίνοντας την δυνατότητα πληρέστερου και πιο αξιόπιστου ελέγχου εφόσον δεν χρησιμοποιούν μια πιο απλουστευμένη (γραμμικοποιημένη) προσέγγιση του κινητήρα, η οποία συνήθως εφαρμόζεται για να απλοποιήσει το πρόβλημα. Οι τεχνικές ελέγχου εφαρμόζονται τόσο στην επίτευξη χαρακτηριστικών θέσης (οδήγηση σε επιθυμητή θέση – γωνία του κινητήρα), όσο και για την επίτευξη σταθερής γωνιακής ταχύτητας περιστροφής με βάση σταθερό ή ακόμα και μεταβαλλόμενο φορτίο για τον άξονα του κινητήρα.

Επιπλέον το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης δίνει την δυνατότητα επιβολής ειδικών συνθηκών για την λειτουργία του κινητήρα με την επίτρεψη καθορισμένων τιμών (περιορισμών) για την γωνιακή επιτάχυνση, το ρεύμα τυμπάνου και την μαγνητική ροή του στο κύκλωμα πεδίου. Οι περιορισμοί αυτοί συντελούν έτσι ώστε το αναπτυγμένο περιβάλλον προσομοίωσης μέσω του μοντέλου περιγραφής σε Matlab, να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό και αξιόπιστο σε σχέση με την πραγματική λειτουργία ενός κινητήρα. Επιτρέπουν επίσης την επίλυση του προβλήματος αντιστάθμισης μέσω συνθηκών-περιορισμών βελτιστοποίησης.

Τέλος, η διπλωματική κλείνει με βάση τα συμπεράσματα από την επιβολή του ελεγκτή αντιστάθμισης επί μεταβαλλόμενων (δυναμικών) φορτίων που επιδρούν ως διαταραχές στο σημείο λειτουργίας του κινητήρα.

Λέξεις κλειδιά

Κινητήρας Σ.Ρ., ελεγκτές PID, τεχνικές αντιστάθμισης, περιβάλλον προσομοίωσης Matlab, κύκλωμα τυμπάνου, κύκλωμα πεδίου, περιορισμοί λειτουργίας, σημείο λειτουργίας κινητήρα, ευσταθής λειτουργία κινητήρα.

Abstract

Purpose of this diploma thesis is the deployment of control techniques using Proportional – Derivative and Integral (PID) Controllers over DC motors. DC motors are well deployed for domestic, practical and industrial environments due to their simplicity and efficiency on handling loads. Operation of dc motors induces also non-linear characteristics, which have to be investigated and furtherly adjusted if possible, selecting controllers with advanced characteristics. PID controllers define classical control elements which are very-well deployed through time permitting fast, reliable and easily adapted solutions over a wide variety of systems.

Under this perspective and for the accurate application of control techniques, a descriptive mathematical model for the dc motor has been developed, using Matlab Script Language. The dc motor model embodies a system of linear and non-linear mathematical equations. The applied controller as well as consequent proposed solutions shall be applied over the accurate – nonlinear model, allowing advanced accuracy over the model compared with the simplified linear estimation on equations usually used instead, targeting to simplify the problem. Control techniques usually focus onto driving of dc motor to specified position (driving problem) as well as also to angular rotation adjustments (velocity adjustment problem). Control techniques achieve both these characteristics also for varying load induced over dc motor.

Furtherly, simulation model permits induction of special type of regulations for the motor, related with angular acceleration, range of drum current and magnetic flux over field circuit. These regulations enhance model operation, compared with accurate real environment of operation of the dc motor. Additionally, they permit an advanced environment for applying adjustments on dc motor operation taking into consideration actual operational characteristics.

Finally, thesis concludes on achieved results through use of PID controllers upon time-variant type of loads, modeled as perturbations over operation of the dc motor.

Key words

DC Motors, PID Controllers, control adjustment techniques, Matlab Simulation ENvironment, Motor drum circuit, Motor field circuit, operational regulations and dominant values, point of operation of dc motor, stable dc motor operation.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτριά μου Κα. Ιωαννίδου Μαρία-Παρασκευή τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα κοντινά μου πρόσωπα, που με την αμέριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθόλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου συνέβαλλαν αποφασιστικά στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη 5

Abstract 6

Ευχαριστίες

Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων

Κατάλογος πινάκων

1	Εισαγωγή.....	16 -
1.1	Περί Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος (Σ.Ρ.)	16 -
1.2	Εφαρμογές Κινητήρων Σ.Ρ.	24 -
1.3	Το πρόβλημα του Ελέγχου του Κινητήρα.....	25 -
1.4	Σύγχρονες Τεχνικές Ελέγχου.....	27 -
2	Περιγραφή Λειτουργίας Κινητήρα Σ.Ρ.....	29 -
2.1	Παράμετροι Λειτουργίας Κινητήρα Σ.Ρ.	29 -
2.2	Εξισώσεις Κινητήρα Σ.Ρ.	30 -
2.3	Ανοικτός Βρόχος Κινητήρα Σ.Ρ.....	33 -
2.4	Μοντέλων Κινητήρα Σ.Ρ. και Έλεγχος στη Μόνιμη Κατάσταση	34 -
3	Αναλογικοί – Ολοκληρωτικοί -Διαφορικοί (PID) Ελεγκτές.....	37 -
3.1	Ιστορική Διαδρομή	37 -
3.2	Περιγραφή Διατάξεων με Ελεγκτές - Γενικά.....	38 -
3.2.1	Σφάλματα και Περιγραφές Ελεγκτών	40 -
3.2.2	Ποιοτικά χαρακτηριστικά Λειτουργίας των PID-Ελεγκτών	42 -
3.2.3	Περιγραφή των PID-Ελεγκτών στο πεδίο της συχνότητας.....	43 -
3.2.4	Χρονικές Αποκρίσεις Συστημάτων και PID-Ελεγκτές	44 -
3.3	Προσδιορισμός των παραμέτρων των PID-ελεγκτών	46 -
3.3.1	Μέθοδος Ziegler-Nichols.....	47 -
3.4	Άλλοι τύποι ελεγκτών. Ελεγκτές IMC	51 -
3.4.1	Μέθοδος προσδιορισμού των παραμέτρων του ελεγκτή IMC.....	52 -
3.5	Πειραματικός Προσδιορισμός παραμέτρων PID-ελεγκτή με χρήση μοντέλου του συστήματος και εφαρμογή προσομοιώσεων	52 -
4	Μοντέλο Matlab του κινητήρα Σ.Ρ.....	54 -
4.1	Εισαγωγή – Δομική Οργάνωση του Μοντέλου	54 -
4.2	Αναλυτική Περιγραφή των Δομικών Στοιχείων.....	58 -
4.2.1	Συνάρτηση Φορτίου Tload_func().....	58 -
4.2.2	Συνάρτηση Ρεύματος Τυμπάνου Ia_func()	60 -
4.2.3	Συνάρτηση Μαγνητικής Ροής Κυκλώματος πεδίου fd_func()	61 -
4.2.4	Συνάρτηση Γωνιακής Θέσης theta_func()	63 -
4.2.5	Συνάρτηση Γωνιακής Ταχύτητας.....	64 -
4.3	Κώδικας Επιβολής Περιορισμών των Παραμέτρων Λειτουργίας του μοντέλου	65 -
4.3.1	Περιορισμός Γωνιακής Επιτάχυνσης.....	69 -
4.3.2	Περιορισμός Ρεύματος/Τάσεως Τυμπάνου	69 -
4.3.3	Περιορισμός Μαγνητικής Ροής στο κύκλωμα πεδίου.....	69 -
4.4	Γραφικές Αναπαραστάσεις των μεγεθών του μοντέλου κινητήρα	69 -
4.5	Αρχικές Μεταβλητές του Σώματος Κώδικα	73 -
4.6	Καθορισμός Μεταβλητών και Διαδικασία Προσομοιώσεων	74 -
5	Προσομοίωση του Μαθηματικού Μοντέλου του κινητήρα Σ.Ρ.	75 -

5.1	Προσομοίωση Ανοικτού Βρόχου	- 75 -
5.1.1	Ανοικτό Μοντέλο χωρίς Έλεγχο	- 76 -
5.1.1.1	Σενάριο Προσομοίωσης σταθερού φορτίου	- 78 -
5.1.1.2	Σενάριο Προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή ταχύτητα	- 80 -
5.1.1.3	Σενάριο Προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση ...	- 82 -
5.1.2	Έλεγχος μέσω κυκλώματος τυμπάνου	- 84 -
5.1.3	Έλεγχος μέσω κυκλώματος πεδίου.....	- 87 -
5.2	Προσομοίωση Κλειστού Βρόχου.....	- 90 -
5.2.1	Έλεγχος μέσω κυκλώματος τυμπάνου	- 90 -
5.2.1.1	Έλεγχος γωνιακής θέσης.....	- 91 -
5.2.1.2	Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας	- 98 -
5.2.2	Έλεγχος μέσω κυκλώματος πεδίου.....	- 105 -
5.2.2.1	Έλεγχος γωνιακής θέσης.....	- 105 -
5.2.2.2	Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας.....	- 112 -
5.2.3	Εφαρμογή Περιορισμών	- 119 -
5.2.3.1	Περιορισμός Γωνιακής Επιτάχυνσης.....	- 120 -
5.2.3.2	Περιορισμός Τάσεως/Ρεύματος Τυμπάνου.....	- 123 -
5.2.3.3	Περιορισμός Μαγνητικής Ροής.....	- 126 -
5.2.4	Σήμα Ελέγχου και Σφάλμα στο κλειστό σύστημα	- 130 -
5.3	Συμπεράσματα από την Εφαρμογή Προσομοιώσεων στο Σύστημα Κινητήρα Σ.Ρ.	- 132 -
6	Συμπεράσματα από την Εφαρμογή Προσομοιώσεων	- 133 -
6.1	Συνολική Εικόνα των Σεναρίων Προσομοίωσης	- 133 -
6.2	Συγκριτικά αποτελέσματα από την χρήση των PID-ελεγκτών στα κυκλώματα ελέγχου. Γενικά συμπεράσματα	- 136 -
	Παράρτημα.....	- 139 -
	Παράρτημα Α – Μοντέλο Ανοικτού Βρόχου.....	- 139 -
	Α-1 Συναρτήσεις.....	- 139 -
	Α-2 Κορμός Μοντέλου.....	- 140 -
	Παράρτημα Β – Μοντέλο Κλειστού Βρόχου.....	- 147 -
	Β-1 Συναρτήσεις.....	- 147 -
	Β-2 Κορμός Μοντέλου.....	- 148 -
	Βιβλιογραφία.....	- 165 -

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο κύκλωμα περιγραφής του κινητήρα Σ.Ρ. και απλουστευμένο διάγραμμα

Σχήμα 1.2: Καμπύλη μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του ρεύματος διεγέρσεως πεδίου

Σχήμα 1.3: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. ανεξάρτητης διέγερσης

Σχήμα 1.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσεως

Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης

Σχήμα 1.6: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. με διέγερση σειράς

Σχήμα 1.7: Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα Σ.Ρ. με διέγερση σειράς

Σχήμα 1.8: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. σύνθετης διέγερσης

Σχήμα 1.9: Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα Σ.Ρ. και κύκλωμα εκίνησης

Σχήμα 1.10: Έλεγχος ταχύτητας κινητήρα Σ.Ρ. για διαφορετικές φάσεις του φορτίου

Σχήμα 1.11: Έλεγχος ταχύτητας κινητήρα Σ.Ρ. μέσω τάσης οπλισμού

Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο κύκλωμα περιγραφής κινητήρα Σ.Ρ.

Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα διέγερσης και τυμπάνου κινητήρα Σ.Ρ.

Σχήμα 3.1: Σχηματική περιγραφή ανοικτού συστήματος σε μορφή block διαγράμματος

Σχήμα 3.2: Σχηματική περιγραφή κλειστού συστήματος με χρήση ελεγκτή σε μορφή block

Σχήμα 3.3: Σχηματική περιγραφή ενός ελεγκτή (controller) και ενός συστήματος υπό έλεγχο (system) για την δημιουργία ενός κλειστού βρόχου

Σχήμα 3.4: Σχηματική περιγραφή ενός PID-ελεγκτή στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας με χρήση block διαγραμμάτων

Σχήμα 3.5: Μορφολογικά χαρακτηριστικά αποκρίσεων συστημάτων δεύτερης και ανώτερης τάξης

Σχήμα 3.6: Ποιοτική μορφή της εξόδου ενός κλειστού συστήματος με χρήσης P, PI, PID-ελεγκτή

Σχήμα 3.7: Ρύθμιση των παραμέτρων PID-ελεγκτή με την μέθοδο των Ziegler-Nichols σε συνδεομολογία μοναδιαίου κλάδου ανατροφοδότησης

Σχήμα 3.8: Παράσταση των διεργασιών για την παραγωγή εξόδου με την μέθοδο 1 συστήματος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων με την μέθοδο Ziegler-Nichols

Σχήμα 3.9: Παράσταση των διεργασιών για την παραγωγή εξόδου με την μέθοδο 2, συστήματος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων με την μέθοδο Ziegler-Nichols

Σχήμα 3.10: Διαγραμματική αναπαράσταση ελεγκτή τύπου IMC με χρήση μοντέλου περιγραφής για το σύστημα

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης φορτίου Tload_func()

Πίνακας 4.2: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης ρεύματος τυμπάνου

Πίνακας 4.3: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης μαγνητικής ροής fd_func()

Πίνακας 4.4: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης γωνιακής θέσης theta_func()

Πίνακας 4.5: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας omega_func()

Πίνακας 4.6: Μεταβλητές των μοντέλων προσομοίωσης του μοντέλου κινητήρα Σ.Ρ. ανοικτού/κλειστού βρόχου που απεικονίζονται γραφικά

Πίνακας 5.1: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου

Πίνακας 5.2: Σταθερές παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου σταθερού φορτίου

Πίνακας 5.4: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση σταθερού φορτίου

Πίνακας 5.5: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.6: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.7: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή ταχύτητα χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.8: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή ταχύτητα χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.9: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.10: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.11: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή θέση χωρίς έλεγχο

Πίνακας 5.12: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Πίνακας 5.13: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση με έλεγχο τυμπάνου

Πίνακας 5.14: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή θέση με έλεγχο τυμπάνου

Πίνακας 5.15: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Πίνακας 5.16: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση με μεταβολή στο κύκλωμα πεδίου

Πίνακας 5.39: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Πίνακας 5.40: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Πίνακας 5.41: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Πίνακας 5.42: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Πίνακας 5.43: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Πίνακας 5.44: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή ταχύτητα με έλεγχο κυκλώματος πεδίου και περιορισμό γωνιακής επιταχύνσεως

Πίνακας 5.45: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Πίνακας 5.46: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου και περιορισμό ρεύματος τυμπάνου

Πίνακας 5.47: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Πίνακας 5.48: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου και περιορισμό στην μαγνητική ροή

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τα σενάρια προσομοίωσης με χρήση PID-ελεγκτών στα κυκλώματα τυμπάνου και πεδίου του κινητήρα Σ.Ρ.

1 Εισαγωγή

1.1 Περί Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος (Σ.Ρ.)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ονομάζονται έτσι επειδή τροφοδοτούνται από κάποια πηγή συνεχούς τάσης για την παροχή της ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία τους. Από κατασκευαστικής απόψεως, δεν παρουσιάζουν καμία διαφορά σε σχέση με τις γεννήτριες παραγωγής συνεχούς ρεύματος. Βασικό πλεονέκτημα τους αποτελεί η ευκολία ελέγχου της ροπής και της ταχύτητάς τους σε ένα μεγάλο εύρος τιμών για τις ονομαστικές τάσεις λειτουργίας του καθώς και των φορτίων που μπορούν να επιβληθούν σε αυτές.

Ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών κινητήρων Σ.Ρ. είναι η διακύμανση ταχύτητας, η οποία ορίζεται από τη σχέση $SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_{fl}}{\omega_{fl}} \times 100\%$ με

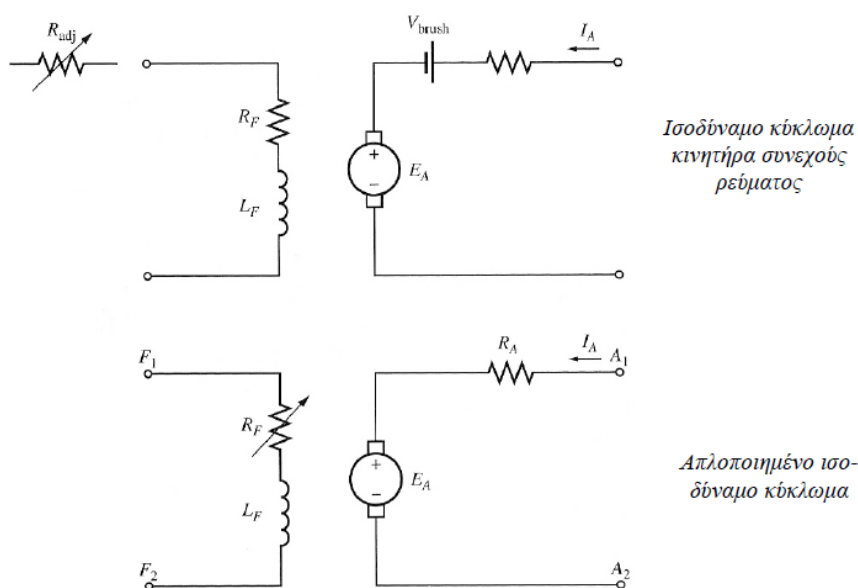
τους δείκτες n_l και f_l να υποδεικνύουν, αντίστοιχα, λειτουργία υπό μηδενικό και υπό πλήρες φορτίο για τον κινητήρα. Θετική τιμή της SR σημαίνει μείωση της ταχύτητας του κινητήρα κατά την αύξηση του φορτίου, ενώ αρνητική τιμή της SR υποδεικνύει αύξηση της ταχύτητας κατά την αύξηση του φορτίου. Το μέγεθος αυτό εκφράζει προφανώς την ικανότητα ενός κινητήρα να διατηρεί την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του άξονα του σταθερή, όταν μεταβάλλεται το εφαρμοζόμενο σε αυτόν φορτίο (μικρότερη απόλυτη τιμή της SR υποδηλώνει μεγαλύτερη σταθερότητα και κατά συνέπεια μικρότερη ανάγκη αντιστάθμισης για τον έλεγχο του κινητήρα στην φάση λειτουργίας του).

Ένας ηλεκτρικός κινητήρας παρέχει μηχανική ισχύ σε μια μηχανή η οποία αποτελεί το 'φορτίο' του. Η λειτουργία του κινητήρα καθώς και οι εφαρμογές του μπορεί να είναι ποικίλες και να αναφέρονται σε ανυψώσεις, μετατοπίσεις φορτίων, ταινιογραμμές μεταφοράς προϊόντων στην φάση παραγωγής, σερβομηχανισμούς τοποθέτησης αντικειμένων για ακριβείς διεργασίες συναρμολόγησης, κλπ. Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται χωρίς να υπάρχει κάποιο φορτίο συνδεδεμένο τότε η λειτουργία του χαρακτηρίζεται 'εν

κενώ. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ανάλογα με τον τρόπο διασύνδεσης τους και τροφοδοσίας τους, χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Ανεξάρτητης Διέγερσης
- Παραλληλης διεγερσης
- Διέγερσης σειράς
- Συνθετης διεγερσης

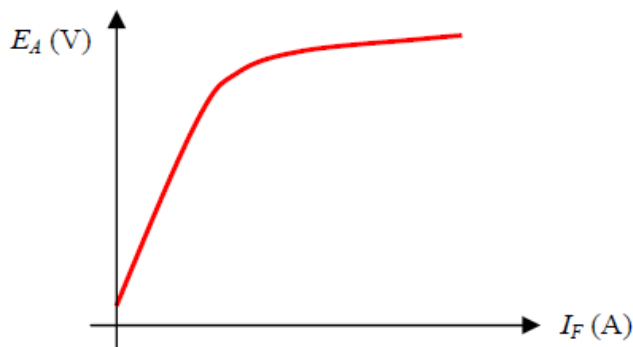
Για την ηλεκτρική περιγραφή μίας μονάδας ενός κινητήρα Σ.Ρ. χρησιμοποιούμε ένα κυκλωματικό 'ισοδύναμο' το οποίο προσομοιάζει την λειτουργία του παρέχοντας τις εξισώσεις και ταυτόχρονα ικανοποιώντας τις φυσικές απαιτήσεις λειτουργίας για το μοντέλο περιγραφής. Τα ισοδύναμα κυκλώματα για τους κινητήρες Σ.Ρ. διακρίνουν ένα κύκλωμα διεγέρσεως που απασχολείται με το μοντέλο για την διέγερση και περιστροφή του άξονα του καθώς και ενός επιμέρους κυκλώματος το οποίο ασχολείται και αναφέρεται στην μαγνητική πεδιακή λειτουργία που απαιτείται να συναρμολογηθεί για να περιστραφεί ο άξονας του κινητήρα. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα Σ.Ρ., είναι παρόμοιο με εκείνο των γεννητριών Σ.Ρ. με βασική διαφορά ότι η κατεύθυνση του ρεύματος του οπλισμού του είναι πλέον η αντίστροφη σε σχέση με ένα κύκλωμα παραγωγής. Επιπλέον, η πηγή που αναπαριστά την πτώση τάσης στις ψύκτρες έχει αντίθετη πολικότητα, αφού πρέπει να αντιτίθεται στο ρεύμα του δρομέα.



Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο κύκλωμα περιγραφής του κινητήρα Σ.Ρ. και απλουστευμένο διάγραμμα του

Η στατική χαρακτηριστική ή αλλιώς καμπύλη μαγνήτισης ενός κινητήρα παριστάνει την μεταβολή της τάσης ως προς το ρεύμα διέγερσης σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής. Αυτή προκύπτει από τις σχέσεις $E_A = K\Phi\omega$ και $F = N_F I_F$ δεδομένου ότι η γραφική παράσταση της $\Phi = f(F)$ είναι η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού. Η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι συνήθως ισχυρά μη γραμμική και για τον λόγο αυτό, όπως θα δούμε και στην συνέχεια που θα δοθεί η αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων λειτουργίας του μοντέλου του κινητήρα, συνιστά ένα σημαντικό θέμα στην περιγραφή των εξισώσεων εφόσον εξαναγκάζει για απλότητα στην περιγραφή σε γραμμικοποιήσεις που συντελούν

σε θέματα ακρίβειας των περιγραφών. Για την παραγωγή όσο το δυνατό μεγαλύτερης ισχύος, οι κινητήρες συνήθως λειτουργούν κοντά στον κορεσμό δηλ. στο μέγιστο ρεύμα που μπορούν να απορροφήσουν από το κύκλωμα διεγέρσεως παρέχοντας μέγιστη ροπή προς το φορτίο. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται μία τυπική καμπύλη κορεσμού όπου στον οριζόντιο άξονα έχουμε την ονομαστική τιμή του ρεύματος πεδίου I_F .



Καμπύλη μαγνήτισης κινητήρα ΣΡ

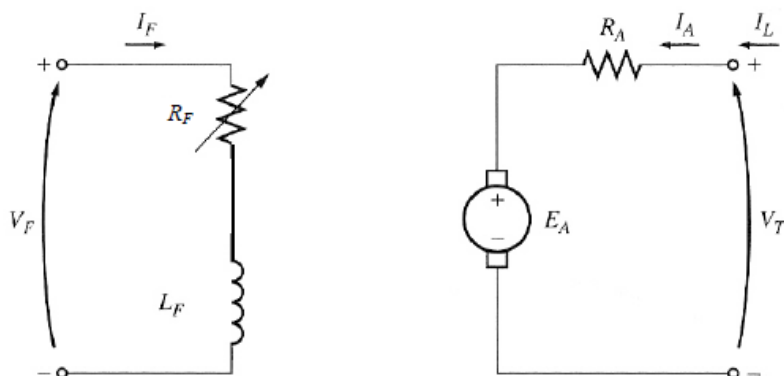
Σχήμα 1.2: Καμπύλη μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του ρεύματος διεγέρσεως πεδίου

Κινητήρας Ανεξάρτητης (Ξένης) Διέγερσης

Εδώ το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης και οι εξισώσεις που προκύπτουν από το κυκλωματικό ισοδύναμο είναι:

$$I_F = \frac{V_F}{R_F}, \quad V_T = E_A + I_A R_A \quad \text{και} \quad I_L = I_A.$$

και η αντι-ηεδ (ηλεκτρεγερτική δύναμη – ηεδ) που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του οπλισμού είναι πάντα μικρότερη από την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου. Λόγω των κοινών χαρακτηριστικών στοιχείων με τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης, αφού και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα διέγερσης είναι σταθερό, η χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα ξένης διέγερσης θα εξεταστεί παρακάτω.



Ισοδύναμο κύκλωμα

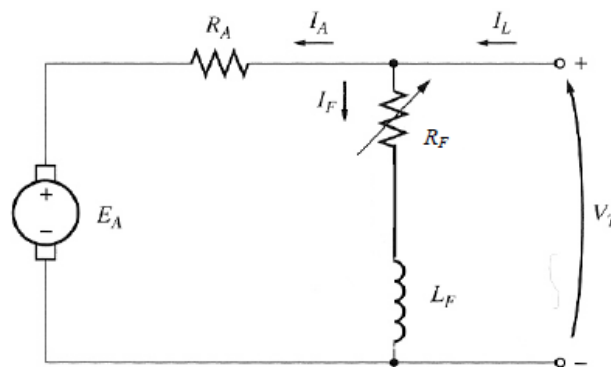
Σχήμα 1.3: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. ανεξάρτητης διέγερσης

Κινητήρας παράλληλης διέγερσης

Το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα οπλισμού του κινητήρα, με τις αντίστοιχες εξισώσεις να έχουν την παρακάτω μορφή:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}, \quad V_T = E_A + I_A R_A, \quad I_L = I_A + I_F$$

Έτσι λοιπόν αν θεωρήσουμε σταθερή την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, η ανάλυση που ακολουθεί θα είναι παρόμοια με την ανάλυση ενός κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης.



Ισοδύναμο κύκλωμα

Σχήμα 1.4: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης

Χαρακτηριστική φορτίου

Η χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα είναι το διάγραμμα της ροπής εξόδου ως προς την ταχύτητα του. Η απόκριση ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης μπορεί να υπολογισθεί ακολουθώντας τα εξής βήματα:

Θεωρώντας ότι αυξάνει η ροπή του φορτίου, αυτή τελικά θα ξεπεράσει τη ροπή της μηχανής, αφού σε σταθερή ταχύτητα οι δυο ροπές είναι ίσες, αμελώντας τις τριβές, με αποτέλεσμα να αρχίσει να μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής. Αυτό σημαίνει πως μειώνεται η εσωτερική τάση του κινητήρα οπότε αυξάνεται το ρεύμα του οπλισμού, οδηγώντας στην παραγωγή μεγαλύτερης ροπής από τον κινητήρα. Τελικώς, η ροπή του κινητήρα θα εξισωθεί με την ροπή του φορτίου και η περιστροφή θα πραγματοποιείται σε μια σταθερή ταχύτητα μικρότερη από την αρχική. Για να υπολογίσουμε την μαθηματική έκφραση της χαρακτηριστικής φόρτισης πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:

$$E_A = K\Phi\omega \text{ και } \tau_{ind} = K\Phi I_A \Rightarrow I_A = \frac{\tau_{ind}}{K\Phi}.$$

και

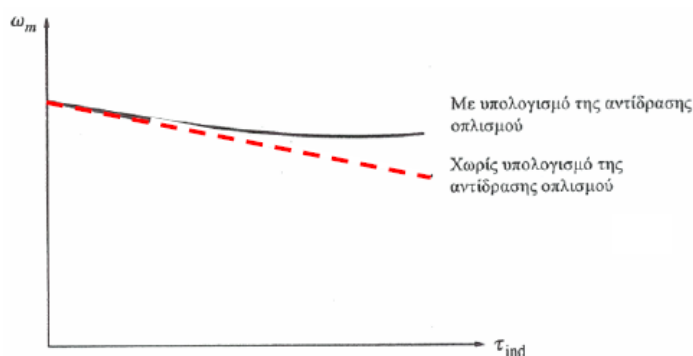
$$V_T = E_A + I_A R_A$$

οι σχέσεις αυτές οδηγούν την εξίσωση στη μορφή

$$V_T = K\Phi\omega + \frac{\tau_{ind}}{K\Phi} R_A \Rightarrow \omega = -\frac{R_A}{(K\Phi)^2} \tau_{ind} + \frac{V_T}{K\Phi}$$

η οποία παριστάνει ευθεία με αρνητική κλίση. Παρατηρούμε πως η απόλυτη τιμή της κλίσης αυτής είναι σχετικά μικρή, οπότε οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική σταθερότητα της ταχύτητας περιστροφής για μεγάλο εύρος φορτίων. Αν η ροπή είναι πάρα πολύ μεγάλη η γραφική παράσταση τέμνει τον οριζόντιο άξονα σε σημείο που η ταχύτητα μηδενίζεται. Παρόλα αυτά, το σημείο εκείνο δεν αντιστοιχεί σε επιτρεπτή λειτουργία διότι συνεπάγεται απαγορευτικά μεγάλη τιμή του ρεύματος.

Για τον λόγο αυτό, η χαρακτηριστική παριστάνεται με ευθεία γραμμή μόνο αν η τάση τροφοδοσίας και η μαγνητική ροή έχουν σταθερές τιμές. Αν ο κινητήρας δεν διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης, τότε η αντίδραση του οπλισμού επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης ροπής-ταχύτητας. Δηλ. τα φαινόμενα εξασθένισης της ροής στο εσωτερικό του κινητήρα προκαλούν την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.



Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα ΣΡ παράλληλης διέγερσης

Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης

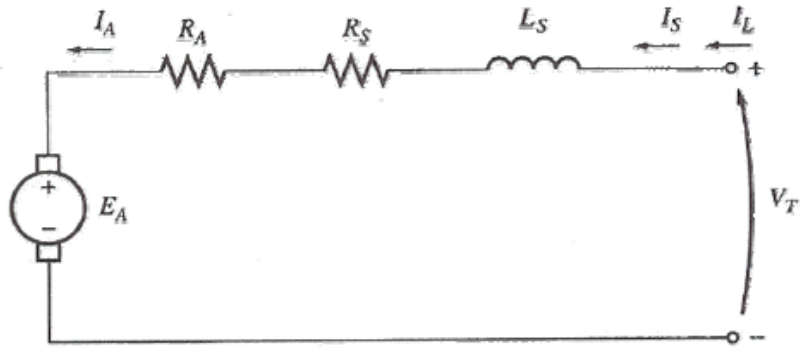
Κινητήρας με διέγερση σειράς

Τα τυλίγματα διέγερσης των κινητήρων αυτής της κατηγορίας διαθέτουν σχετικά λίγες σπείρες και είναι συνδεδεμένα σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού. συνεπώς, τα ρεύματα οπλισμού, διέγερσης και εισόδου σε έναν τέτοιο κινητήρα έχουν την ίδια τιμή.

Οπότε από το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύουν τα ακόλουθα:

$$-I_A = I_s = I_L \text{ και } V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$$

Χαρακτηριστική ιδιότητα των κινητήρων με διέγερση σειράς είναι η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής μεταξύ εξαιρετικά διαφορετικών τιμών, κατά τη μεταβολή του φορτίου. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για τον κινητήρα με διέγερση σειράς παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Ισοδύναμο κύκλωμα

Σχήμα 1.6: Ισοδύναμο κύκλωμα ινητήρα Σ.Ρ. με διέγερση σειράς

Επαγόμενη ροπή στον άξονα

Πριν την εμφάνιση κορεσμού, όταν δηλαδή το σημείο λειτουργίας του κινητήρα βρίσκεται στη γραμμική περιοχή δηλ. για μικρά φορτία, η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του κινητήρα είναι ανάλογη του ρεύματος οπλισμού. Άρα το ρεύμα αυξάνει αντίστοιχα τη ροή, οδηγώντας στη μείωση της ταχύτητας περιστροφής, με συνέπεια η καμπύλη ροπής ταχύτητας να έχει απότομη κλίση. Επομένως, ισχύει:

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A \text{ και } \Phi = cI_A,$$

οπότε:

$$\tau_{ind} = KcI_A^2.$$

απο την παραπάνω σχέση φαίνεται πως ο κινητήρας διέγερσης σειράς εξασφαλίζει μεγάλη ροπή ανά μονάδα ρεύματος, και μάλιστα μεγαλύτερη από οποιονδήποτε άλλο κινητήρα.

Χαρακτηριστική φορτίου

Για απλότητα στις περιγραφές υποθέτουμε πως η καμπυλη μαγνήτισης είναι γραμμική, δηλαδή τότε για την τάση ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} V_T &= E_A + I_A(R_A + R_S) \\ I_A &= \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} \\ E_A &= K\Phi\omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_T = K\Phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_S).$$

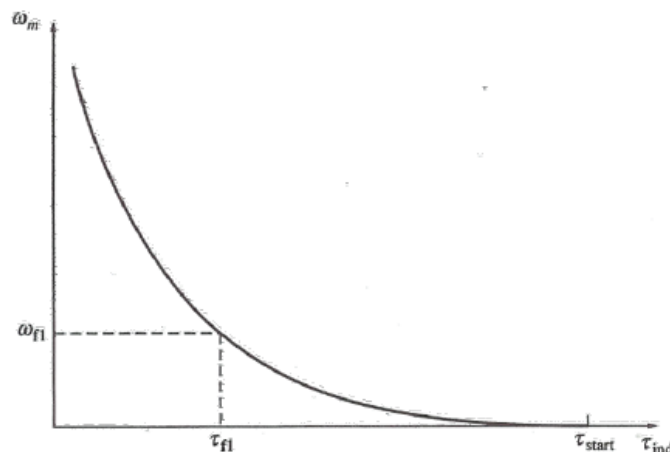
Αντικαθιστώντας την έκφραση της μαγνητικής ροής ως :

$$\tau_{ind} = KcI_A^2 = Kc \left(\frac{\Phi}{c} \right)^2 \Rightarrow \Phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{ind}}$$

Έχουμε

$$\begin{aligned} V_T &= K\Phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_s) \\ &= K\sqrt{\frac{c}{K}}\sqrt{\tau_{ind}}\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_s) \Rightarrow \\ \sqrt{Kc}\sqrt{\tau_{ind}}\omega &= V_T - \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}(R_A + R_s) \Rightarrow \\ \omega &= \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_s}{Kc} \end{aligned}$$

από την τελευταία εξίσωση προκύπτει το διάγραμμα (χαρακτηριστική) του φορτίου για τον εν λόγω τύπο του κινητήρα, όπως στο σχήμα που ακολουθεί:



Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα ΣΡ διέγερσης σειράς

Σχήμα 1.7: Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα Σ.Ρ. με διέγερση σειράς

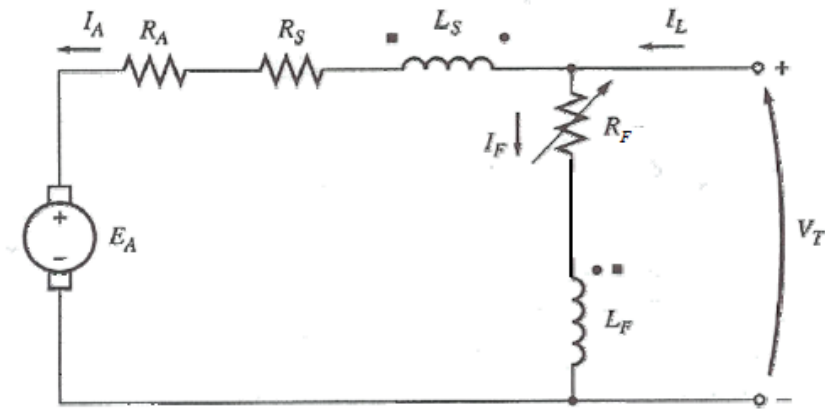
Κινητήρας σύνθετης διέγερσης

Οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιούν ένα τύλιγμα σειράς και ένα παράλληλο τύλιγμα. Στο σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα στην περίπτωση της μεταπαράλληλης συνδεσμολογίας, όπου από το νόμο των τάσεων προκύπτει:

$$v_t = e_a + i_a(r_a + r_s)$$

ενώ στο εσωτερικό του κινητήρα τα ρεύματα ικανοποιούν τις σχέσεις

$$I_A = I_L - I_F \text{ και } I_F = V_T / R_F.$$



Ισοδύναμο κύκλωμα

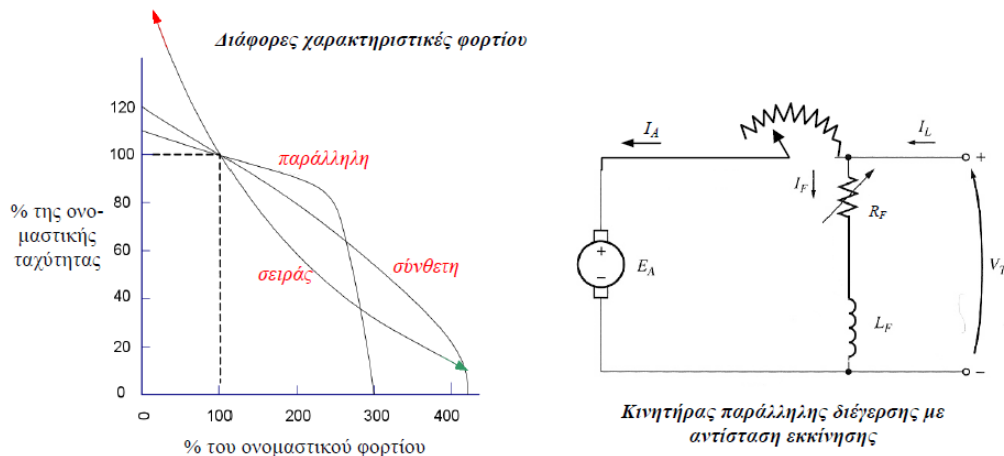
Σχήμα 1.8: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. σύνθετης διέγερσης

Εκκίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Τη στιγμή που ένας κινητήρας Σ.Ρ. (π.χ. παράλληλης διέγερσης) αρχίζει να περιστρέφεται, επειδή η ταχύτητα περιστροφής αρχικά είναι μηδενική, αντίστοιχα μηδενική είναι και η τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ($E_A=0$). Συνεπώς, τότε το ρεύμα του οπλισμού παίρνει πολύ μεγάλη τιμή, δεδομένου ότι η αντίσταση του οπλισμού είναι αρκετά μικρή. Συγκεκριμένα, το ρεύμα μπορεί να πάρει τιμές που υπερβαίνουν μέχρι και 20 φορές την τιμή του ρεύματος υπό πλήρη φόρτιση, με συνέπεια την αυξημένη πιθανότητα βλάβης του κινητήρα, ακόμη και αν αυτό το εξαιρετικά μεγάλο ρεύμα εμφανιστεί για μικρό χρονικό διάστημα. Η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η εισαγωγή μιας **αντίστασης εκκίνησης** σε σειρά με το τύλιγμα οπλισμού. Αν, για παράδειγμα, θεωρηθεί πως η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του ρεύματος δεν μπορεί να ξεπερνά το 50% του ονομαστικού, η τιμή της αντίστασης εκκίνησης θα πρέπει να είναι ίση με

$$R_{\text{εκκ}} = \frac{V_T}{1.5I_{ov}} - R_A.$$

Η αντίσταση εκκίνησης δεν παραμένει μόνιμα στον κινητήρα για δύο λόγους: τόσο λόγω απωλειών, όσο και λόγω της επίδρασης της στη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας και απομακρύνεται, όταν ο κινητήρας αποκτήσει ικανοποιητική ταχύτητα. Στην πράξη, η αντίσταση εκκίνησης είναι μεταβλητή και μειώνεται σταδιακά, έτσι ώστε να επιτευχθεί σταθερό ρεύμα και, συνεπώς, σταθερή ροπή κατά την εκκίνηση, περιορίζοντας τη συνολική διάρκεια της διαδικασίας.



Σχήμα 1.9: Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα Σ.Ρ. και κύκλωμα εκίνησης

1.2 Εφαρμογές Κινητήρων Σ.Ρ.

Κινητήρες με διέγερση σειράς

Στους κινητήρες Σ.Ρ. και πιο συγκεκριμένα σε αυτούς με διέγερση σειράς, αν υποθέσουμε ότι η ροπή του κινητήρα μηδενιστεί, η ταχύτητα του θα γίνει άπειρη. όμως στην πράξη, αν δε συνδεθεί κάποιο φορτίο στον κινητήρα, η ταχύτητα του θα γίνει γρήγορα πολύ μεγάλη, όχι όμως άπειρη, γιατί υπάρχουν τριβές. Γι' αυτό τον λόγο ένας κινητήρας αυτού του τύπου δεν πρέπει να μένει σε καμία χρονική φάση χωρίς φορτίο, ούτε να συνδέεται στο φορτίο του μέσω κάποιου υμάντα, ο οποίος είναι πιθανό να σπάσει και να αφήσει αφόρτιστο τον κινητήρα. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως ο κινητήρας διέγερσης σειράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη μεγάλη ροπή σε χαμηλή περιστροφική ταχύτητα τέτοια παραδείγματα είναι οι **ανελκυστήρες** και οι **γερανοί** κάθε τύπου.

Κινητήρες συνθετικής διέγερσης

Ο κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα των κινητήρων διέγερσης σειράς και των κινητήρων παράλληλης διέγερσης. Στο εσωτερικό του η μαγνητική ροή αποτελείται από ένα σταθερό τμήμα και από ένα τμήμα ανάλογο του ρεύματος οπλισμού. Διαθέτει υψηλή ροπή εκκίνησης (διέγερση σειράς) και δεν επιταχύνεται ασταμάτητα κατά την αφόρτιση λειτουργία (παράλληλη διέγερση). Αν το φορτίο είναι μικρό, τότε το τυλίγμα διέγερσης σειράς δεν παίζει σημαντικό ρόλο και ο κινητήρας συμπεριφέρεται ως παράλληλης διέγερσης. Αντίθετα, σε μεγάλη αύξηση του φορτίου η μαγνητική ροή του τυλίγματος διέγερσης σειράς γίνεται σημαντική και η καμπύλη ροπής ταχύτητας μοιάζει με αυτή ενός κινητήρα διέγερσης σειράς. Από την άλλη πλευρά, κινητήρες διαφορικής σύνθετης **διέγερσης δε χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές**, αφού η λειτουργία τους είναι **ασταθής** και οδηγούνται σε **μεγάλες τιμές της ταχύτητας περιστροφής**.

1.3 Το πρόβλημα του Ελέγχου του Κινητήρα

Το πρόβλημα ελέγχου ενός κινητήρα Σ.Ρ. αναφέρεται κυρίως στις απαιτούμενες διατάξεις που χρειάζονται συμπληρωματικά των βασικών κυκλωμάτων του κινητήρα, για να ελεγχθούν παράμετροι που επηρεάζουν ή επηρεάζονται από την λειτουργία του. Τέτοιες παράμετροι είναι η ταχύτητα, η γωνιακή επιτάχυνση ή και η στατική θέση που είναι επιθυμητή για το τμήμα περιστροφής του, κλπ. Η εφαρμογή των διατάξεων ελέγχου μπορεί επίσης να συμπεριλαμβάνει την ελαχιστοποίηση μεταβατικών φαινομένων τα οποία μπορεί να προκαλέσουν φθορά ή να δημιουργήσουν επισφαλείς συνθήκες λειτουργίας σε μακροπρόθεσμο επίπεδο λειτουργίας (π.χ. περιορισμός των απαιτούμενων ρευμάτων εκκινήσεως, αερισμός των τμημάτων του ηλεκτρικού κινητήρα για τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών από την λειτουργία του με χρήση διατάξεων ψύξης - ανεμιστήρων, κλπ).

Στην συνέχεια της παρούσας παραγράφου θα παρουσιαστούν τεχνικές που αναφέρονται στον έλεγχο κινητήρων Σ.Ρ. για την ποικιλία των διαφορετικών τύπων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, επικεντρώνοντας κυρίως στο βασικότερο από τα παραπάνω θέματα που εισήχθησαν και είναι η διασφάλιση του ελέγχου της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής.

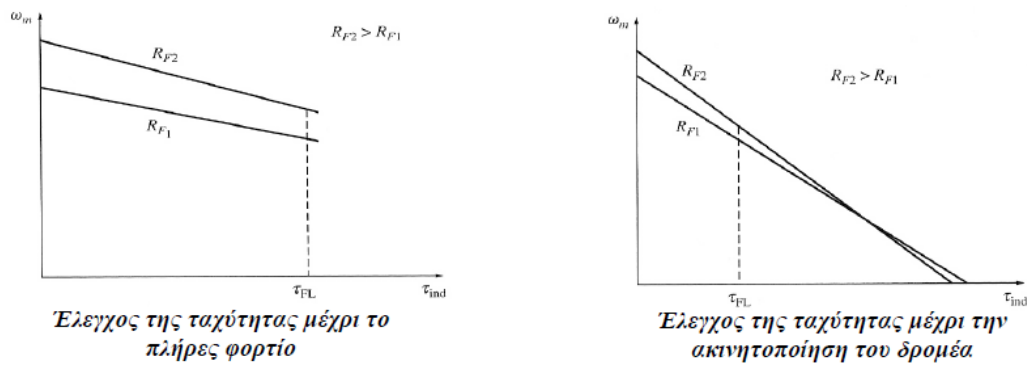
Έλεγχος ταχύτητας στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης

Η ταχύτητα περιστροφής ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης μπορεί να ελεγχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

α) Μεταβάλλοντας την αντίσταση διέγερσης :

Αυξάνοντας την αντίσταση διέγερσης ελαττώνεται το ρεύμα διέγερσης ,συνεπώς και η μαγνητική ροή. έτσι μειώνεται η E_a , έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος στον οπλισμό .επειδή η συγκεκριμένη αύξηση του ρεύματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της μαγνητικής ροής, τελικά η επαγόμενη ροπή συνολικά αυξάνεται. τότε έχουμε $\tau_{ind} > \tau_{load}$, οπότε ο κινητήρας περιστρέφεται πιο γρήγορα απο πριν, γεγονός που σημαίνει οτι μεγαλώνει η τάση E_a , οπότε μειώνεται το ρεύμα στον οπλισμό και μαζί του η ροπή, μέχρι να γίνει πάλι $\tau_{ind} = \tau_{load}$ σε μια ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερη από πριν. Στη θεωρητική περίπτωση όπου $r_f \rightarrow \infty$, οπότε ουσιαστικά το κύκλωμα διέγερσης διακόπτεται κατά τη λειτουργία της μηχανής, το ρεύμα του οπλισμού παίρνει πολύ μεγάλες τιμές αφού η E_a οφείλεται μόνο στην παραμένουσα ροή και η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να γίνει πολλαπλάσια της ονομαστικής.

Επειδή η ελάττωση του ρεύματος διέγερσης συνοδεύεται απο αύξηση της ταχύτητας, η τεχνική αυτή αξιοποιείται για την επίτευξη ταχύτητων μεγαλύτερων και όχι μικρότερων από τη βασική ω ,η οποία επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα διέγερσης παίρνει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του. Περαιτέρω αύξηση του i_f θα προκαλέσει προβλήματα υπερθέρμανσης και πιθανή καταστροφή του τυλίγματος διέγερσης.

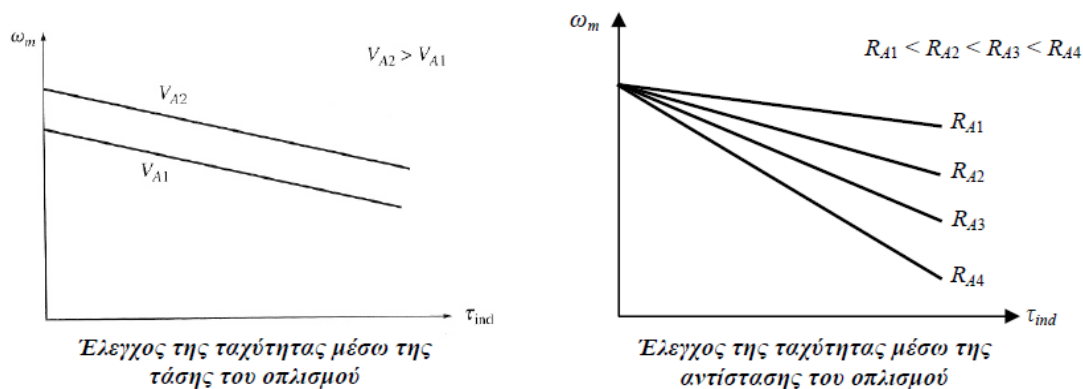


Σχήμα 1.10: Έλεγχος ταχύτητας κινητήρα Σ.Ρ. για διαφορετικές φάσεις του φορτίου

β) Με μεταβολή της τάσης στον οπλισμό:

Στην τεχνική αυτή μεταβάλλεται η τάση v_a στα άκρα του οπλισμού, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλεται η τάση στα άκρα του κυκλώματος διέγερσης (αυτό μπορεί να γίνει μέσω ενός ελεγκτή μεταβλητής τάσης). Αυξάνοντας μόνο την τάση v_a ενισχύεται το ρεύμα στον οπλισμό ($i_a = (v_a - e_a) / r_a$), προκαλώντας αύξηση της ροπής. Έτσι, προκύπτει $\tau_{ind} > \tau_{load}$, οπότε ο κινητήρας επιταχύνεται, με συνέπεια την αύξηση της τάσης E_a . Το γεγονός αυτό μειώνει το ρεύμα i_a , με συνέπεια τον περιορισμό της ροπής μέχρι το σημείο όπου $\tau_{ind} = \tau_{load}$, σε ταχύτητα μεγαλύτερη της αρχικής.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, η κλίση των καμπυλών ροπής-ταχύτητας δε μεταβάλλεται. Επειδή η ταχύτητα αυξάνεται μαζί με την τάση του οπλισμού, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνάει μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή, η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για έλεγχο της περιστροφής σε τιμές μικρότερες της βασικής ταχύτητας.



Σχήμα 1.11: Έλεγχος ταχύτητας κινητήρα Σ.Ρ. μέσω τάσης οπλισμού

γ) Με τη σύνδεση μιας αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού:

Με την τεχνική αυτή η κλίση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας μπορεί να μεταβληθεί. Αυτό προκύπτει εύκολα από την αντίστοιχη μαθηματική διατύπωση. Εφαρμόζεται ωστόσο σπάνια, διότι συνεπάγεται μεγάλες απώλειες, εξαιτίας της σημαντικής τιμής του ρεύματος του οπλισμού.

Έλεγχος ταχύτητας στους κινητήρες με διέγερσης σειράς

Η πιο αποδοτική μέθοδος σε αυτήν τη κατηγορία των κινητήρων είναι η ρύθμιση της τάσης εισόδου, με την αύξηση της να συνεπάγεται γρηγορότερη περιστροφή για δεδομένη ροπή. Άλλη, πιο δαπανηρή όμως μέθοδος, περιλαμβάνει την εισαγωγή αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα του κινητήρα.

1.4 Σύγχρονες Τεχνικές Ελέγχου

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν εισαγωγικά μερικές θεμελιώδεις τεχνικές που αφορούσαν για τους διαφορετικούς τύπους κινητήρων Σ.Ρ. που παρουσιάστηκαν, κατά κύριο λόγο με στόχο τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Το πρόβλημα ελέγχου όμως ενός κινητήρα είναι γενικότερο, και μπορεί να αφορά σε μία πληθώρα παραμέτρων και συνθηκών που το συνολικό σύστημα επιθυμεί να ελέγξει. Οι συνηθέστερες από αυτές τις παραμέτρους είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και η ενδεχόμενη αντιστάθμιση της σε σκόπιμες ή τυχαίες μεταβολές του φορτίου. Επίσης σημαντική εφαρμογή στα θέματα λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. βρίσκει και ο έλεγχος θέσης του κινητήρα ειδικότερα όταν η λειτουργία κινητήρων Σ.Ρ. σχετίζεται με εφαρμογές που αποτελούν σερβομηχανισμούς ακριβείας, για την τοποθέτηση και μετακίνηση φορτίων με ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης τους. Ειδικότερα τέτοιου τύπου έλεγχοι σχετίζονται επίσης και με μηχανισμούς που επιβάλλουν σχετικές τοποθετήσεις φορτίων που ελέγχονται από ηλεκτροκινητήρες. Σημαντικός ακόμα παραγοντας στον έλεγχο της λειτουργίας, μπορεί να προκύψει από την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής στην περίπτωση που επιθυμούμε να παραμένει εντός κατάλληλων επιπέδων χωρίς από την διάταξη αντιστάθμισης της λειτουργίας να επιβάλλονται ακραίες τιμές επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων για την διασφάλιση των επιπέδων.

Οι διατάξεις ελέγχου επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον περιορισμό συνθηκών οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν επισφαλή λειτουργία του συστήματος κινητήρα – περιβάλλοντος. Τέτοιες παράμετροι αναφέρονται στο ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα, στον περιορισμό της μαγνητικής ροής στο κύκλωμα πεδίου, στην αποφυγή υπερθέρμανσης, στην ανάγκη ενεργοποίησης κυκλωμάτων ψύξης, κλπ.

Ο έλεγχος ενός κινητήρα Σ.Ρ. μπορεί να γίνει με χρήση γραμμικών ηλεκτρικών στοιχείων τα οποία συνδέονται εν είδει ελεγκτών δημιουργώντας 'μονοπάτια ανάδρασης' για τον έλεγχο του. Η λειτουργία αυτού του τύπου αντιστάθμισης, συνίσταται στον χειρισμό του κινητήρα μέσω μέρους του σήματος εξόδου που αφορά στην επιθυμητή μεταβλητή ελέγχου (π.χ. ταχύτητα) αφού πρώτα ο ελεγκτής μεταφράσει την παράμετρο σε κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα το οποίο θα συνδυαστεί για την λήψη απόφασης περιορισμού της τάσεως διεγέρσεως του ή του μαγνητικού πεδίου, περιορίζοντας ή αυξάνοντας ανάλογα την ταχύτητα περιστροφής. Ένα απλούστατο παράδειγμα ενός τέτοιου στοιχείου για τον περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης, που είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους αναφέρεται στην χρήση μεταβλητής αντίστασης για τον περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης. Επειδή όμως το πρόβλημα είναι πολύπλοκο λόγω των παραμέτρων που υπεισέρχονται για προσδιορισμό, ο έλεγχος του κινητήρα μπορεί να γίνει στην περίπτωση αυτή με την χρήση κλασσικών διατάξεων αυτομάτου ελέγχου οι οποίες με χρήση κλειστών βρόχων μπορούν να δημιουργήσουν κατάλληλα

μονοπάτια ελέγχου για τις επιθυμητές παραμέτρους. Η ενεργοποίηση των συγκεκριμένων στοιχείων είναι διασυνεχής και δεν υπεισέρχεται ή απομακρύνεται δυναμικά από το σύστημα ελέγχου του κινητήρα διασφαλίζοντας συνεχή προστασία και έλεγχο για τις δεδομένες παραμέτρους χωρίς την ανάγκη επέμβαση ανθρώπινου παράγοντα λήψης απόφασης. Οι τεχνικές και τα μοντέλα χειρισμού αυτών των συνθηκών προέρχονται από την τεχνογνωσία που έχει αναπτυχθεί από τις εφαρμογές συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (Σ.Α.Ε.) για τον έλεγχο και την επίτευξη ειδικών χαρακτηριστικών υποσυστημάτων.

Η διαδικασία αυτή καλείται αντιστάθμιση και στοχεύει στην βέλτιστη λειτουργία του κινητήρα ως προς την διασφάλιση μιας επιθυμητής ονομαστικής τιμής για κάθε μεταβλητή του που τελεί υπό έλεγχο. Τέτοιες διατάξεις είναι και οι κλασσικοί ρυθμιστές που βασίζουν την λειτουργία τους σε αναλογικούς, διαφορικούς και ολοκληρωτικούς ελεγκτές (PID). Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η χρήση ελεγκτών για την διασφάλιση της λειτουργίας ενός κινητήρα σε επιθυμητά επίπεδα θα πρέπει να μπορεί να αντιμετωπίσει και μη γραμμικότητες οι οποίες είναι εγγενείς και οφείλονται στις αρχές λειτουργίας του κινητήρα ή στα δομικά υποσυστήματα που συνθέτουν αυτόν (π.χ. κύκλωμα μαγνητικής ροής και υλικά μαγνήτισης).

Η χρήση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων για τον έλεγχο των κινητήρων μπορεί να συνδυαστεί και με πιο προχωρημένες και σύγχρονες τεχνικές οι οποίες κάνουν χρήση συστημάτων Η/Υ και ψηφιακών υποσυστημάτων και ελεγκτών (PLCs) που δίνουν την δυνατότητα άμεσου και ικανοποιητικού ελέγχου. Οι τεχνικές αυτές δίνουν την δυνατότητα επιβολής άμεσου και ακριβούς ελέγχου παρέχοντας επιπλέον την δυνατότητα της αυτοματοποίησης των δράσεων μέσω της χρήσης των Η/Υ και κατάλληλου λογισμικού. Παράλληλα, διασφαλίζουν την δυνατότητα καταγραφής των ονομαστικών τιμών των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα επιτρέποντας την δυνατότητα της περαιτέρω επεξεργασίας και της ανάλυσης των συνθηκών λειτουργίας των κινητήρων. Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων είναι σαφώς πιο εξειδικευμένη και έχει νόημα λόγω του επαγόμενου κόστους όταν οι εφαρμογές από την λειτουργία του κινητήρα απαιτούν εξαιρετική ακρίβεια και έλεγχο και συνήθως αφορούν σε συστήματα πιο μεγάλης κλίμακας. Αυτό δεν περιορίζει την χρήση των αναλογικών ελεγκτών και των διεργασιών αναλογικής μορφής για τον έλεγχο του κινητήρα, δεδομένου ότι διασφαλίζουν ταχύτητα, αμεσότητα και χαμηλό κόστος για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι αρχές λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. με έμφαση στο μαθηματικό μοντέλο περιγραφής το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και στα πλαίσια της διπλωματικής για την εφαρμογή τεχνικών αντιστάθμισης.

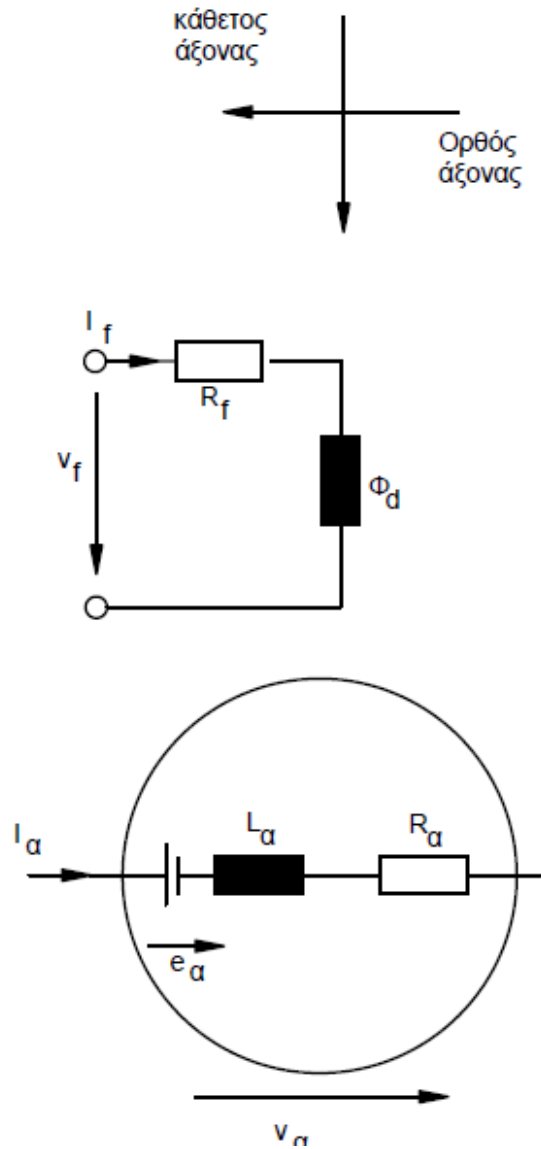
2

Περιγραφή Λειτουργίας Κινητήρα Σ.Ρ.

2.1 Παράμετροι Λειτουργίας Κινητήρα Σ.Ρ.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι μέχρι σήμερα η πιο συνηθισμένη επιλογή για συστήματα κινήσεως που λειτουργούν σε ευρεία περιοχή ταχυτήτων, επειδή έχουν καλές χαρακτηριστικές οι οποίες προσφέρονται για απλή εφαρμογή του ελέγχου. Βασικό τους μειονέκτημα όμως είναι ότι έχουν μηχανικό συλλέκτη, ο οποίος περιορίζει την ισχύ και την ταχύτητα του κινητήρα, αυξάνει την αδράνεια και το αξονικό μήκος της μηχανής και επιπλέον χρειάζεται τακτική συντήρηση.

Η αρχή λειτουργίας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) θεωρείται ότι είναι γνωστή και δεν αποτελεί εκτενές αντικείμενο παρουσίασης του κεφαλαίου αυτού. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα του κινητήρα Σ.Ρ. Οι συνισταμένες μαγνητικές ροές είναι συγκεντρωμένες σε δύο πηνία τα οποία βρίσκονται το ένα παράλληλα και το άλλο κάθετα στον άξονα της κύριας μαγνητικής ροής. Η συνολική τάση ακροδεκτών v_a αποτελείται από την Η.Ε.Δ. e_a η οποία παράγεται λόγω περιστροφικής κίνησης, από την τάση που επάγεται λόγω της αυτεπαγωγής $L_a di_a / dt$ και από την πτώση τάσεως στην ωμική αντίσταση $R_a i_a$. Τα στοιχεία L_a και $R_a i_a$ είναι η ισοδύναμη αυτεπαγωγή και ισοδύναμη ωμική αντίσταση, αντίστοιχα, των κυκλωμάτων του τυμπάνου του κινητήρα Σ.Ρ. Για μεγάλες μηχανές ισχύει ότι $R_a i_a \ll v_a$. Η ισχύς διεργέσεως είναι της τάξης των μερικών ποσοστών της συνολικής μηχανικής ισχύος της μηχανής.



Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο κυκλώμα περιγραφής κινητήρα Σ.Ρ.

2.2 Εξισώσεις Κινητήρα Σ.Ρ.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Οι διαφορικές εξισώσεις του συστήματος είναι:

Η εξίσωση τάσεων στο κύκλωμα του τυμπάνου

$$R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a = v_a \quad (2.1)$$

Η Η.Ε.Δ. η οποία επάγεται από την περιστροφική κίνηση

$$e_a = K_1 \Phi_d \omega \quad (2.2)$$

Ο Νόμος του Newton για το σύστημα έχοντας ροπή αδράνειας J

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_L \quad (2.3)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροή T η οποία αναπτύσσεται από τον κινητήρα

$$T = K_1 \Phi_d i_a \quad (2.4)$$

Η εξίσωση τάσεων στο κύκλωμα διέγερσης

$$R_f i_f + N_f \frac{d\Phi_f}{dt} = v_f \quad (2.5)$$

Η καμπύλη μαγνητίσεως

$$\Phi_d = f(i_f) \quad (2.6)$$

Η γωνιακή ταχύτητα ω και η γωνία περιστροφής θ του δρομέα

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.7)$$

Από τις σχέσεις (2.2) και (2.4) βρίσκουμε ότι:

$$e_a i_a = T\omega \quad (2.8)$$

Η σχέση (2.8) εκφράζει το γεγονός ότι η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς $e_a i_a$ μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ $T\omega$. Με την αντικατάσταση της εξ. (2.6) στην (2.5) προκύπτει η εξ. (2.9). Μετά οι εξ. (2.4) και (2.6) αντικαθίσταται στην εξ. (2.3) με αποτέλεσμα την εξ. (2.10):

$$R_f i_f + N_f \frac{d}{dt} f(i_f) = v_f \quad (2.9)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_1 i_a f(i_f) - T_L \quad (2.10)$$

Στη συνέχεια οι εξ. (2.1), (2.7) και (2.10) ικανοποιούνται με τη βοήθεια των ακόλουθων μεγεθών αναφοράς:

ω_0 = ονομαστική ταχύτητα κενού φορτίου

Φ_{d0} = ονομαστική μαγνητική ροή

v_{a0} = ονομαστική τάση τυμπάνου

v_{f0} = ονομαστική τάση διεργέσεως

Τα επόμενα μεγέθη αναφοράς προκύπτουν από τα προηγούμενα:

$$e_0 = v_{a0} = K_1 \Phi_{d0} \omega_0 \quad (2.11)$$

$$i_{a0} = \frac{v_{a0}}{R_a} \quad (2.12)$$

$$T_0 = K_1 \Phi_{d0} i_{a0} \quad (2.13)$$

$$i_{f0} = \frac{v_{f0}}{R_f} \quad (2.14)$$

Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$T_a \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_{a0} \end{pmatrix} = \frac{v_a}{v_{a0}} \frac{i_a}{i_{a0}} - \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \quad (2.15)$$

$$T_{f0} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_d \\ \Phi_{d0} \end{pmatrix} = \frac{v_f}{v_{f0}} - f_f \left(\frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \right) \quad (2.16)$$

$$T_m \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) = \frac{i_a}{i_{a0}} \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} - \frac{T_L}{T_0} \quad (2.17)$$

$$T_\theta \frac{d}{dt} \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right) = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2.18)$$

όπου

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.19)$$

$$T_{f0} = \frac{N_f \Phi_{d0}}{V_{f0}} \quad (2.20)$$

$$T_m = \frac{j\omega_0}{T_0} \quad (2.21)$$

$$T_\theta = \frac{\theta_0}{\omega_0} \quad (2.22)$$

$$f_f \left(\frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \right) = f^1 \left(\frac{i_f}{i_{f0}} \right) \quad (2.23)$$

θ_0 είναι η αρχική τιμή της γωνίας θ και T_L είναι η ροπή του φορτίου.

Το ανωτέρω σύστημα μαθηματικής περιγραφής της λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης θα αποτελέσει την βάση για την ανάπτυξη του μοντέλου σε περιγραφή συμβολικής γλώσσας Matlab (script language). Το εν λόγω μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί τόσο σε επίδειξη προσομοίωσης της λειτουργίας όταν τελεί σε συνδεσμολογία ανοικτού βρόχου δηλ. χωρίς την προσθήκη επιπλέον μοντέλων ελεγκτή, καθώς επίσης και σε κλειστό βρόχο όταν δηλ. το συνολικό μαθηματικό μοντέλο του κινητήρα Σ.Ρ. συνδυάζεται με PID ελεγκτή στην δημιουργία βρόχου ελέγχου.

2.3 Ανοικτός Βρόχος Κινητήρα Σ.Ρ.

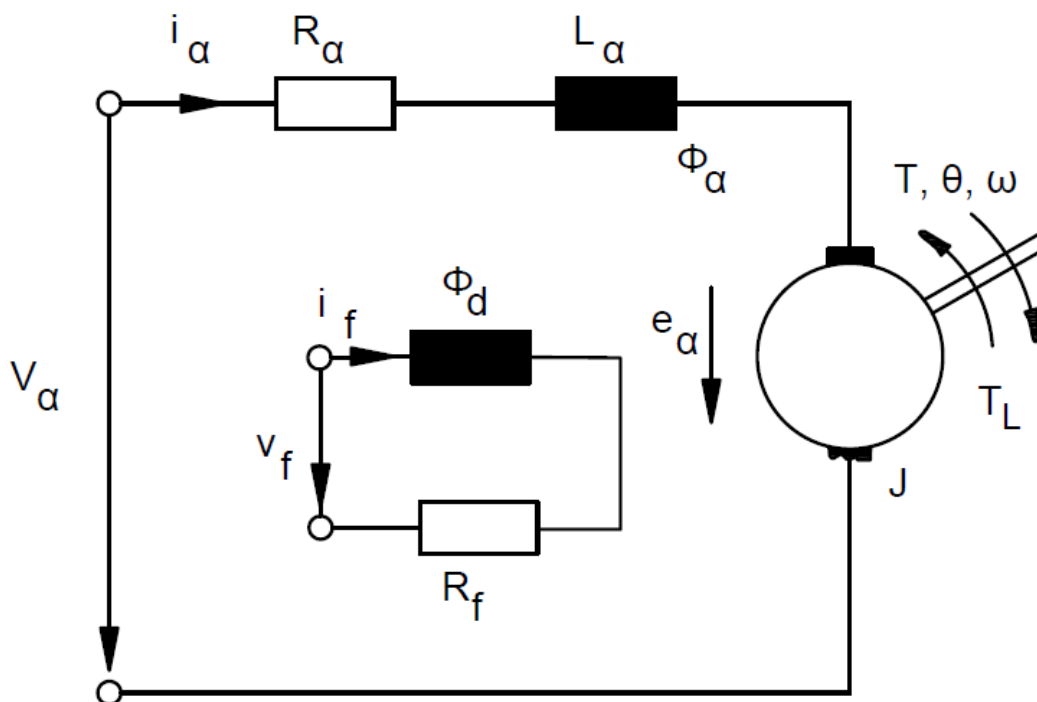
Το σύστημα κινήσεως το οποίο παρουσιάσαμε με τις διαφορικές εξισώσεις (2.15) – (2.18) και το οποίο κινεί το φορτίο με αναλυτική εξίσωση (2.24), περιγράφεται τώρα από το δομικό διάγραμμα του Σχήματος 2.2 .

Οι δύο τάσεις v_a και v_f είναι ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου του συστήματος. Η ροπή του φορτίου T_L θεωρείται ότι αποτελείται από μια πρώτη σταθερή συνιστώσα T_{L1} , μια δεύτερη συνιστώσα T_{L2} η οποία είναι συνάρτηση της ταχύτητας και μια τρίτη συνιστώσα T_{L3} η οποία είναι συνάρτηση της γωνίας θέσεως:

$$\frac{T_L}{T_0} = \frac{T_{L1}}{T_0} + T_{L2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) + T_{L3} \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right) \quad (2.24)$$

Για κάθε εφαρμογή η αντίστοιχη συμάρτηση της ροπής του φορτίου προσδιορίζεται από τους συντελεστές T_{L1} , T_{L2} και T_{L3} . Εάν δεν υπάρχουν και οι τρεις συνιστώσες, τότε οι συντελεστές και οι αντίστοιχες βαθμίδες προσδιορισμού του φορτίου μηδενίζονται.

Η συνάρτηση f_f είναι η κανονικοποιημένη αντιστροφη καμπύλη μαγνητίσεως.



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κυκλώμα διέγερσης και τυμπάνου κινητήρα Σ.Ρ.

Στο ίδιο διάγραμμα υπάρχουν τέσσερα γραμμικά στοιχεία ολοκλήρωσης με σταθερές χρόνου T_a , T_{f0} , T_m και T_θ . Οι σταθερές του χρόνου T_a και T_{f0} αντιστοιχούν στα δύο ηλεκτρικά κυκλώματα του οπλισμού και του πεδίου, ενώ οι T_m και T_θ αντιστοιχούν στο μηχανικό μέρος του συστήματος. Επομένως, το πλήρες διάγραμμα του συστήματος κινήσεως του κινητήρα Σ.Ρ. περιλαμβάνει

γραμμικά στοιχεία ολοκλήρωσης με τις αντίστοιχες σταθερές χρόνου όπως: ένα μη γραμμικό στοιχείο (με διπλές γραμμές στο σχ. 2.3) και δύο πολλαπλασιασμοί :

$$\frac{i_a}{i_{a0}} \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \text{ και } \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \text{ οι οποίοι έχουν μη γραμμική επίδραση στο όλο σύστημα.}$$

2.4 Μοντέλων Κινητήρα Σ.Ρ. και Έλεγχος στη Μόνιμη Κατάσταση

Οι εξισώσεις μόνιμης κατάστασης προκύπτουν από τις εξ. (2.15) – (2.17) στις οποίες μηδενίζονται οι παράγωγοι:

$$\frac{v_a}{v_{a0}} - \frac{i_a}{i_{a0}} - \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{v_f}{v_{f0}} - f_f \left(\frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \right) = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{i_a}{i_{a0}} \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} - \frac{T_L}{T_0} = 0 \quad (2.27)$$

Εαν ορίσουμε τον συντελεστή του πεδίου b ως:

$$b = \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \leq 1 \quad (2.28)$$

οι εξ. (2.25) και (2.27) γράφονται:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{b} \frac{v_a}{v_{a0}} - \frac{1}{b^2} \frac{T_L}{T_0} \quad (2.29)$$

$$\frac{i_a}{i_{a0}} = \frac{1}{b} \frac{T_L}{T_0} \quad (2.30)$$

Οι εξισώσεις (2.29) - (2.30) είναι γραμμικές και συσχετίζουν την ταχύτητα περιστροφής και το ρεύμα του τυμπάνου για την μόνιμη κατάσταση.

Έλεγχος από το τύμπανο

Για την περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι το πεδίο διεγέρσεως έχει την ονομαστική τιμή Φ_{d0} . Επομένως :

$$b = 1 \quad (2.31)$$

Ως συνέπεια η μη γραμμική επίδραση των δύο πολλαπλασιασμών του σχ. 2.3 ακυρώνεται. Τότε οι εξ. (2.29) – (2.30) γίνονται:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{v_a}{v_{a0}} - \frac{T_L}{T_0} \quad (2.32)$$

$$\frac{i_a}{i_{a0}} = \frac{T_L}{T_0} \quad (2.33)$$

Οι τελευταίες δύο εξισώσεις είναι γραμμικές απλής μορφής και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κινητήρα Σ.Ρ. από την τάση τυμπάνου. Γραφικές παραστάσεις της ροπής συναρτήσει της ταχύτητας, καθώς και της ροπής συναρτήσει του ρεύματος τυμπάνου παρουσιάζονται στα σχ. 2.4(β), αντίστοιχα. Η τάση τυμπάνου είναι παράμετρος και μεταβάλλεται από μηδέν μέχρι την ονομαστική τάση, δηλαδή:

$$-1 \leq \frac{v_a}{v_{a0}} \leq 1 \quad (2.34)$$

Το ρεύμα τυμπάνου είναι ανάλογο με τη ροπή φορτίου ανεξαρτήτως της τάσης ακροδεκτών και της ταχύτητας περιστροφής. Επειδή η τιμή του i_{a0} είναι πολύ μεγάλη, 8 – 10 φορές μεγαλύτερη του ονομαστικού ρεύματος εξ. (2.12) η περιοχή ρυθμίσεως του ρεύματος είναι:

$$-0.2 \leq \frac{T_L}{T_0} = \frac{i_a}{i_{a0}} \leq 0.2 \quad (2.35)$$

και σημειώνεται με διακεκομμένες γραμμές στα σχ. 2.4(α) και 2.4(β). Συνεπώς στα συστήματα κινήσεως Σ.Ρ. ο έλεγχος της ροπής στην μόνιμη κατάσταση γίνεται μέσω του ελέγχου του ρεύματος τυμπάνου.

Έλεγχος από το πεδίο

Ο Έλεγχος από το πεδίο του κινητήρα Σ.Ρ. είναι η δεύτερη εναλλακτική δυνατότητα. Λόγω του κορεσμού η μαγνητική ροή Φ_d δεν μπορεί να αυξηθεί πολύ περισσότερο από την Φ_{d0} . Έτσι η μοναδική δυνατότητα ρύθμισης του κινητήρα είναι μέσω εξασθένησης του μαγνητικού πεδίου:

$$-1 \leq b = \frac{\Phi_d}{\Phi_{d0}} \leq 1 \quad (2.36)$$

Ο σκοπός της μεθόδου εξασθένησης του πεδίου (field weakening method) είναι η αύξηση της ταχύτητας για χαμηλά φορτία εξ. (2.29), με όλο που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος εξ. (2.30). Συνεπώς η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο όταν οι δυνατότητες ελέγχου από την τάση του τυμπάνου έχουν εξαντληθεί. Η τάση του τυμπάνου παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του ελέγχου από το πεδίο:

$$\frac{v_a}{v_{a0}} = \pm 1 \quad (2.37)$$

Για την περίπτωση αυτή, οι εξ. (2.29) – (2.30) γίνονται:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{b} - \frac{1}{b^2} \frac{T_L}{T_0} \quad (2.38)$$

$$\frac{i_a}{i_{a0}} = \frac{1}{b} \frac{T_L}{T_0} \quad (2.39)$$

Οι εξισώσεις (2.38) – (2.39) είναι γραμμικές με ε παράμετρο την b.

Οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές της ταχύτητας και του ρεύματος συναρτήσεις της ροπής για $v_a = v_{a0}$ είναι ευθείες με αυξημένη κλίση και παρουσιάζονται στα σχ. 2.5(α) και 2.5(β), αντίστοιχα. Οι τομές με τους άξονες της χαρακτηριστικής ροής ταχύτητας βρίσκονται παρακάτω:

- Για την λειτουργία κενού φορτίου

$$T_L = 0 \rightarrow \frac{\omega_{κφ}}{\omega_0} = \frac{1}{b}$$

- Για την εκκίνηση του κινητήρα

$$\omega = 0 \rightarrow \frac{T_{εκ}}{T_0} = b$$

Συνεπώς, η εξασθένηση του πεδίου, b φορές αυξάνει την ταχύτητα κενού φορτίου $\omega_{κφ}$ b φορές, ενώ η ροπή εκκινήσεως $T_{εκ}$ μειώνεται b φορές, το ρεύμα τυμπάνου αυξάνεται b φορές και επομένως και οι ωμικές απώλειες αυξάνονται b^2 φορές εφόσον ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή ροπή φορτίου.

Επομένως, η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη μόνο όταν το επιθυμητό σημείο λειτουργίας στο επίπεδο ροπής- ταχύτητας δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω του ελέγχου από το τύμπανο, ή όταν η τάση τυμπάνου είναι σταθερή.

Παρατηρούμε ότι η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων για απλούστευση των μηχανισμών ελέγχου αναφέρονται στην μόνιμη κατάσταση, έτσι ώστε να «εκφυλίσουν» το αρχικό σύστημα των διαφορικών εξισώσεων σε ένα σύνολο αλγεβρικών. Κατά συνέπεια γίνεται άμεσα εμφανές ότι ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που ανακύπτει σε λεπτομερή εφαρμογή των συνθηκών και των τύπων των υποσυστημάτων που περιγράφουν την δομή του κινητήρα Σ.Ρ. επιβάλλουν αριθμητική επίλυση τους, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς και λεπτομερούς αναπράστασης τόσο των μεταβατικών όσο και των μόνιμων καταστάσεων του συστήματος, ειδικότερα κατά τη χρήση των συστημάτων ελέγχου επί των βαθμίδων του κινητήρα.

3

Αναλογικοί – Ολοκληρωτικοί -Διαφορικοί (PID)

Ελεγκτές

3.1 Ιστορική Διαδρομή

Η χρήση των PID-ελεγκτών με στόχο τον έλεγχο της λειτουργίας ενός συστήματος, φθάνει μέχρι πίσω στα 1890. Το όνομα τους προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Proportional-Integral-Derivative που συνιστούν τα τρία δομικά στοιχεία που συνθέτουν τον ελεγκτή ως μαθηματικές διεργασίες επί του σφάλματος της διάταξης ελέγχου. Αρχικά οι PID-ελεγκτές χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της κατεύθυνσης ενός караβιού μέσω του κλειστού συστήματος του ελεγκτή και του πηδαλίου. Η πρώτη θεωρητική ανάλυση βασισμένη στην μαθηματική περιγραφή των PID-ελεγκτών έγινε από τον Ρωσο-αμερικανό μηχανικό N. Minorsky το 1922. Ο Minorsky σχεδίαζε συστήματα αυτόματης πλοήγησης караβιών για το αμερικανικό Ναυτικό και βάσισε την ανάλυση του στις παρατηρήσεις πλοηγών που πιλόταραν τους ελιγμούς των караβιών. Ο Minorsky παρατήρησε ότι οι πλοηγοί των караβιών ρύθμιζαν την πορεία αυτών, όχι μόνο προσαρμόζοντας την εκτροπή που είχαν υποστεί από την καθορισμένη πορεία τους λόγω εξωτερικών επιδράσεων (π.χ. ανέμου, θαλασσιών ρευμάτων, κακοκαιρίας, κλπ), αλλά οι νέες ρυθμίσεις γίνονταν βασισμένες επίσης στο σφάλμα πορείας που συνέβη στο πρόσφατο παρελθόν αλλά και στον τρέχοντα

ρυθμό με τον οποίο εκτιμούσαν ότι θα άλλαζαν οι συνθήκες πλοήγησης. Αυτές οι παρατηρήσεις προτυποποιήθηκαν και παραστάθηκαν μαθηματικά από τον Minorsky με στόχο την περιγραφή ενός ελεγκτή που θα διέθετε τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Το αμερικανικό Ναυτικό τελικά δεν υιοθέτησε το προτεινόμενο σύστημα από τον Minorsky, εξαιτίας της μη αποδοχής αυτού από τα πληρώματα πλοήγησης.

Στην συνέχεια τα συστήματα που σχεδιάστηκαν από τον Minorsky χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές για τον έλεγχο της λειτουργίας και της αποδοτικότητας τους. Επί του карабиού USS - New Mexico, με τον ελεγκτή να ελέγχει την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πηδαλίου του карабиού. Ο PI-ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε κατάφερε να αντισταθμίσει ένα γωνιακό σφάλμα $\pm 2^\circ$ με ανοχή της τάξης του $\pm 1/6^\circ$, το οποίο ήταν καταφανώς καλύτερο από το αντίστοιχο σφάλμα γωνιακής απόκλισης που μπορούσε να επιτευχθεί από κάθε πλοηγό.

Έκτοτε οι ελεγκτές για συστήματα συνεχούς χρόνου έχουν βρει μία εκτεταμένη εφαρμογή στην βιοτεχνία και βιομηχανία για τον έλεγχο της παραγωγής και την αυτοματοποίηση των διεργασιών. Οι ελεγκτές συνέχισαν να χρησιμοποιούνται καθ'όλη την διάρκεια των δεκαετιών από το 1920 και μετά από μηχανικούς εφαρμογών αυτομάτου ελέγχου παρέχοντας πολύ καλά αποτελέσματα ρυθμίσεων και αντισταθμίσεων σε ηλεκτρομηχανολογικές αλλά και υδροπνευματικές διατάξεις. Πέραν αυτών των χρήσεων, οι ελεγκτές κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου χρησιμοποιήθηκαν για στρατιωτικές εφαρμογές στην πλοήγηση ιπτάμενων συσκευών και βαλλιστικών πυραύλων (έλεγχος γυροσκοπίου και πλοήγησης). Στην συνέχεια η πρόδος της ηλεκτρονικής συνέβαλε στην περαιτέρω εξάπλωση τους ενοποιώντας τα πεδία εφαρμογών από την κοινή χρήση μετρητικών διατάξεων και συσκευών που βασιζόνταν σε ακριβή αναλογικά ηλεκτρονικά υποσυστήματα. Η εφαρμογή των συγκεκριμένων ελεγκτών είναι τόσο εκτεταμένη σε ορισμένους τομείς της παραγωγικής βιομηχανίας των χημικών διεργασιών, όπου ακόμα και σήμερα πολύ δύσκολα εκτοπίζονται από την χρήση πιο εξειδικευμένων και αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου που κάνουν χρήση H/Y (ψηφιακά συστήματα ελέγχου με χρήση διατάξεων PLC – Programmable Logic Controller).

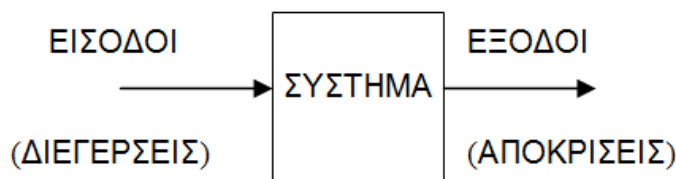
3.2 Περιγραφή Διατάξεων με Ελεγκτές - Γενικά

Οι ελεγκτές αποτελούν διατάξεις που μπορεί να συνδιάσουν ηλεκτρικά, μηχανολογικά, πνευματικά ή υδροπνευματικά τμήματα ανάλογα με την μορφή και δομή του συστήματος προς έλεγχο, και έχουν ως στόχο την αντιστάθμιση της λειτουργίας των συστημάτων για τα οποία προορίζονται. Ως αντιστάθμιση νοείται οποιαδήποτε μεταβολή των χαρακτηριστικών λειτουργίας ή των διεγέρσεων ενός συστήματος που έχει ως καταληκτικό στόχο την επίτευξη καθορισμένων χαρακτηριστικών των σημάτων εξόδου που παράγει το εν λόγω κλειστό σύστημα. Τα σήματα εξόδου που παράγονται αποτελούν εξαρχής και τον λόγο σχεδιασμού και κατασκευής ενός συστήματος.

Ένα σύστημα όταν λειτουργεί χωρίς την χρήση εξωτερικού ή συνοδευτικού ελεγκτή και δεν λαμβάνει πρόνοια αντιστάθμισης των χαρακτηριστικών του εγγενώς, ονομάζεται ανοικτό σύστημα και διαφοροποιείται από το σύστημα που προκύπτει με χρήση του συνοδού ελεγκτή. Ο συνοδός ελεγκτής δεν αποτελεί δομικό υπο-στοιχείο του κυρίως συστήματος και για τον λόγο αυτό χρειάζεται να

μπορεί να αποφασίσει για την επιβαλλόμενη διαδικασία αντιστάθμισης, βασισμένος μόνο στα εξωτερικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του κυρίως συστήματος, δηλ. επηρεάζοντας τα σήματα εισόδου (διέγερσης) του κυρίως συστήματος μετρώντας και εκτιμώντας ανάλογα τα επίπεδα στα οποία βρίσκονται οι έξοδοι του κυρίως συστήματος. Ο λόγος γενικότερα της ανάγκης αντιστάθμισης πέραν από το γεγονός ότι μπορεί να απαιτείται σε μία διάταξη λόγω της επίδρασης σε αυτήν εξωτερικών σημάτων (διαταραχών), μπορεί επιπλέον να απαιτείται και για να διασφαλίσει ότι η μεταβολή των λειτουργικών χαρακτηριστικών της ίδιας της διάταξης ή ενός υπο-συστήματος της δεν θα μεταβάλλει εγγενώς τα χαρακτηριστικά των σημάτων εξόδου της εξαιτίας φαινομένων δυσλειτουργίας από ονομαστικές συνθήκες (π.χ. αναγκαίες τάσης/ρεύματα πολώσης) ή γήρανσης των υλικών και των στοιχείων που την αποτελούν.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχηματική περιγραφή ενός ανοικτού συστήματος, η οποία βασίζεται στην παραδοχή δομικής περιγραφής με χρήση μπλοκ (block) διαγραμμάτων, δηλ. δομές οι οποίες διεγείρονται στο αριστερά τους τμήμα με σήματα εισόδου (διεγέρσεις), ενώ στο δεξιό σχηματικό τμήμα της περιγραφής παράγουν τα εξερχόμενα από αυτά σήματα που καλούνται έξοδοι του συστήματος (αποκρίσεις).

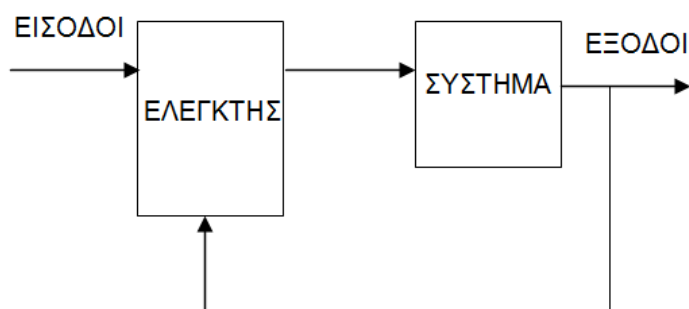


Σχήμα 3.1: Σχηματική περιγραφή ανοικτού συστήματος σε μορφή block διαγράμματος

Η χρήση των block διαγραμμάτων διευκολύνει την εποπτική περιγραφή για την περιγραφή συνθετότερων συστημάτων. Κάθε τμήμα – block μιας διάταξης συνήθως οργανώνει την αυτόνομη λειτουργία μίας συνάρτησης ή διεργασίας εντός του block, χωρίζοντας την νοητικά από το ευρύτερο σύστημα. Επιπλέον τα block διαγράμματα διευκολύνουν την ανάλυση των συνθετότερων διατάξεων εφόσον αναφέρονται σε γραμμικά και χρονικά μη μεταβαλλόμενα υποσυστήματα, η ανάλυση των οποίων μπορεί να γίνει στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας με χρήση του μετασχηματισμού συνεχούς χρόνου Laplace.

Ένα κλειστό σύστημα συνίσταται από τον συνδυασμό του κυρίως συστήματος και άλλων συνοδευτικών υποσυστημάτων του συνθέτουν τον ελεγκτή. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ως ελεγκτής νοείται οποιαδήποτε μορφή διάταξης έχει ως στόχο την προσαρμογή και την ομοιογένεια των σημάτων που ανταλλάσσονται με το σύστημα και το περιβάλλον, στοχεύοντας να αντισταθμίσει την συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά των σημάτων εξόδου που προκύπτουν από το τελικό κλειστό σύστημα. Ο χαρακτηρισμός «κλειστό σύστημα» συνοδεύει έναν συνδυασμό υπο-συστημάτων που ανατροφοδοτούν μέρος του παραγόμενου σήματος από την έξοδο του συστήματος στην είσοδο. Το προκύπτον σήμα από την διαδικασία ανατροφοδότησης διέρχεται από τον ελεγκτή ο οποίος εκτιμά ποσοτικά το επίπεδο αντιστάθμισης που χρειάζεται να επιβληθεί στο διεγερόμενο σύστημα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών εξόδου. Ο ελεγκτής (controller), στην κλασική του μορφή επιτυγχάνει την ανωτέρω συμπεριφορά αξιοποιώντας την

πληροφορία που μπορεί να λάβει από τα σήματα εξόδου του συστήματος, προσαρμόζοντας κατά επιθυμητό τρόπο τις διεγέρσεις που επιβάλλει στις εισόδους του κυρίως συστήματος. Η όλη δομή συνιστά έναν κλειστό βρόχο λειτουργίας, όπως αυτός που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.2: Σχηματική περιγραφή κλειστού συστήματος με χρήση ελεγκτή σε μορφή block διαγράμματος

Η επιλογή της μορφής και εσωτερικής δομής ενός ελεγκτή που προορίζεται για την αντιστάθμιση ενός αναλογικού συστήματος, δηλ. ενός συστήματος που χειρίζεται σήματα αναλογικής υφής στην περιγραφή πλάτους και χρόνου, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σχεδιασμού που αναφέρεται στις διεργασίες του αυτομάτου ελέγχου. Τα αναλογικά συστήματα, ιστορικά αποτελούν διατάξεις πιο κόντα στις φυσικές διεργασίες λόγω της υφής των σημάτων τους και για τον λόγο αυτό έχουν μελετηθεί εκτενώς. Ένα σύνολο τεχνικών αντιστάθμισης και επιλογής ελεγκτών προερχόμενοι από την ιστορία των προβλημάτων ελέγχου, έρχονται από μία εκτενέστατη βιβλιογραφία η οποία περιγράφει τρόπους σχεδιασμού, επιλογής παραμέτρων και χαρακτηριστικών αυτών, ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που ζητείται να αποδοθούν στα κλειστά συστήματα (προδιαγραφές σχεδιασμού).

3.2.1 Σφάλματα και Περιγραφές Ελεγκτών

Πρωταρχικό στοιχείο για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της λειτουργίας και στην συνέχεια της απόδοσης ενός ελεγκτή είναι η έννοια του σφάλματος. Δεδομένου ενός σήματος $x(t)$ το οποίο αποτιμάται από μία διαδικασία ή συγκρίνεται με ένα επιθυμητό επίπεδο $\hat{x}(t)$, ως σφάλμα ορίζεται η ποσότητα $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$.

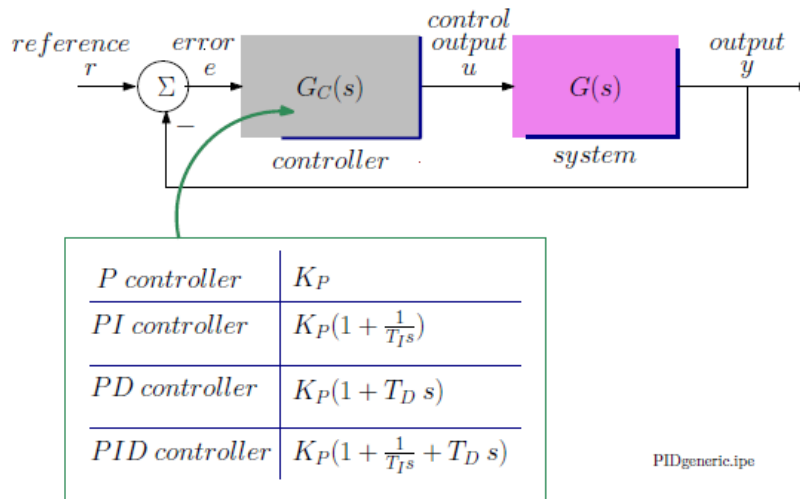
Ένας κλασσικός PID-ελεγκτής συνεχών σημάτων στο πεδίο του χρόνου, κάνει χρήση τόσο του σφάλματος εξόδου (αναλογικός – proportional ελεγκτής), του διαφορικού του σφάλματος $\frac{de(t)}{dt}$ (διαφορικός – derivative ελεγκτής) ή του ολοκληρώματος του σφάλματος $\int e(t)dt$ (ολοκληρωτικός – integral ελεγκτής). Ένας κλασσικός ελεγκτής συνδυάζει σε κατάλληλα ποσοστά, τα 3 αυτά επιμέρους δομικά στοιχεία για την δημιουργία ενός πιο σύνθετου ελεγκτή ο οποίος μπορεί να εξομαλύνει τα σύνθετα χαρακτηριστικά ενός σήματος εξόδου από το συνολικό κλειστό σύστημα.

Η συνολική περιγραφή ενός αναλογικού – ολοκληρωτικού – Διαφορικού Ελεγκτή (Proportional – Integral – Derivative Controller), περιλαμβάνει ποσοτώσεις των συνεισφορών των αντιστοιχών τμημάτων των προηγούμενων ελεγκτών κάνοντας χρήση συντελεστών κέρδους, για τον κάθε παράγοντα. Έτσι η γενική μορφή ενός PID ελεγκτή παρουσιάζει την ακόλουθη περιγραφή στο πεδίο του χρόνου:

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

όπου οι παράμετροι K_p , K_i , K_d , καλούνται παράμετροι ενίσχυσης του αναλογικού, ολοκληρωτικού και διαφορικού όρου ή κέρδη του ελεγκτή αντιστοίχα.

Ο ρόλος των ανωτέρω παραμέτρων στον ελεγκτή αντισταθμίζει διαφορετικά φαινόμενα στην λειτουργία του συνολικού – κλειστού συστήματος. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας αναλογικής ενίσχυσης ρυθμίζει την ένταση της επίδρασης του αναλογικού ελεγκτή κατά την στιγμιαία εμφάνιση σφάλματος στο σύστημα. Ο παράγοντας ολοκληρωτικής ενίσχυσης προσαρμόζει την επίδραση του ελεγκτή στην παρουσία συσσωρευμένου σφάλματος όπως αυτό παρουσιάζεται στο συνολικό χρονικό πλαίσιο λειτουργίας συστήματος – ελεγκτή ενώ τέλος ο διαφορικός παράγοντας ενίσχυσης καθορίζει την ένταση αντίδρασης του ελεγκτή στα επίπεδα μεταβολής του σφάλματος δηλ. στην ταχύτητα μεταβολής που εμφανίζει το σφάλμα στο σύστημα υπό έλεγχο. Προφανώς ο ρόλος των ανωτέρω παραμέτρων είναι καθοριστικός στην ποιοτική και ποσοτική επίδραση που αυτοί εμφανίζουν στην αντιστάθμιση της λειτουργίας ενός συστήματος καθώς και στην ευσταθή λειτουργία του συνολικού κλειστού συστήματος. Ως ευσταθή συμπεριφορά για την λειτουργία ενός συστήματος η οποία γίνεται εκτεταμένα αποδεκτή από μηχανιστικής πλευράς λειτουργίας, είναι η φραγμένη απόκριση ενός συστήματος στο πεδίο του χρόνου, δεδομένου ότι αυτό διεγείρεται από φραγμένα κατά πλάτος σήματα εισόδου (Bounded Input Bounded Output – BIBO ευστάθεια). Συνδιασμοί υποσυστημάτων και ελεγκτές ειδικού τύπου που βασίζονται σε αυτά τα δομικά στοιχεία P-I-D, είναι οι απλοί αναλογικοί ελεγκτές (Proportional – P controllers), αναλογικο-ολοκληρωτικοί ελεγκτές (Proportional Integral – PI Controllers), αναλογικο-διαφορικοί ελεγκτές (Proportional Derivative – PD Controllers) ή αναλογικο-ολοκληρωτικό-διαφορικοί ελεγκτές (Proportional Integral Derivative – PID Controllers).



Σχήμα 3.3: Σχηματική περιγραφή ενός ελεγκτή (controller) και ενός συστήματος υπό έλεγχο (system) για την δημιουργία ενός συστήματος κλειστού βρόχου

3.2.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά Λειτουργίας των PID-Ελεγκτών

Ο λόγος που κυρίως αφορά στην εμφάνιση αυτού του συνδυασμού ελεγκτών για την αντιστάθμιση των συστημάτων, αναφέρεται κυρίως σε ποιοτικά χαρακτηριστικά που αυτοί εμφανίζουν κατά την επίδραση τους σε συστήματα προς έλεγχο. Συγκεκριμένα οι P-ελεγκτές μπορούν να προσαρμόσουν και να μειώσουν ένα σφάλμα στην τελική θέση ενός συστήματος αλλά δεν μπορούν να εξαλείψουν (μηδενίσουν) αυτό τόσο σε δυναμική φάση παρακολούθησης όσο και σε μόνιμη κατάσταση. Οι PD-ελεγκτές προσαρμόζουν την λειτουργία του ελεγκτή σε ταχύτητα μεταβολής των θέσεων ενός συστήματος μειώνοντας την αντίδραση παρακολούθησης που εμφανίζει ο ελεγκτής στην λειτουργία και την μεταβολή των χαρακτηριστικών εξόδου του συστήματος. Οι PI-ελεγκτές εξομαλύνουν την παρακολούθηση της τελικής θέσης ενός συστήματος μηδενίζοντας το τελικό σφάλμα παρακολούθησης ενός συστήματος εισάγοντας βέβαια το τίμημα της εμφάνισης ταλαντωτικής συμπεριφοράς στην έξοδο του συστήματος. Τέλος η από χρόνια εφαρμογή για έλεγχο και αντιστάθμιση της λειτουργίας συστημάτων με χρήση των PID-ελεγκτών έχει αποδείξει ότι αυτοί αποτελούν την καλύτερη δυνατή συναρμογή των ανωτέρω δομικών στοιχείων, εμφανίζοντας ρυθμιζόμενα χαρακτηριστικά μέσω των 3 βαθμών ελευθερίας προς καθορισμό (κατάλληλη χρήση των συντελεστών κέρδους - ενίσχυσης, που παρουσιάζουν). Στην περίπτωση της χρήσης των PID-ελεγκτών η ευσταθή λειτουργία του κλειστού συστήματος δεν είναι πάντοτε διασφαλισμένη, γεγονός που σημαίνει ότι στην φάση σχεδιασμού του ελεγκτή θα πρέπει να διασφαλιστεί με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων ενίσχυσης που ο ελεγκτής διαθέτει. Τα συστήματα με χρήση αυτών των ελεγκτών εμφανίζουν πάρα πολύ καλή συμπεριφορά όσον αφορά την αντιστάθμιση τους, γεγονός που δικαιολογεί την εξαπλωμένη και πολυετή χρήση τους ως συστήματα ελέγχου συνεχούς χρόνου.

3.2.3 Περιγραφή των PID-Ελεγκτών στο πεδίο της συχνότητας

Εναλλακτικά, η περιγραφή της δομής και της λειτουργίας των ελεγκτών καθώς και των συστημάτων υπό έλεγχο όπως γνωρίζουμε από την θεωρία μελέτης και μοντελοποίησης των συστημάτων συνεχούς χρόνου μπορεί να γίνει με χρήση του μονόπλευρου μετασχηματισμού Laplace, δηλ. με χρήση της γενικευμένης γωνιακής συχνότητας s . Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση μεταφοράς ενός ελεγκτή έρχεται στην μορφή:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} = \frac{K_d \left[s^2 + \frac{K_p}{K_d} s + \frac{K_i}{K_d} \right]}{s}$$

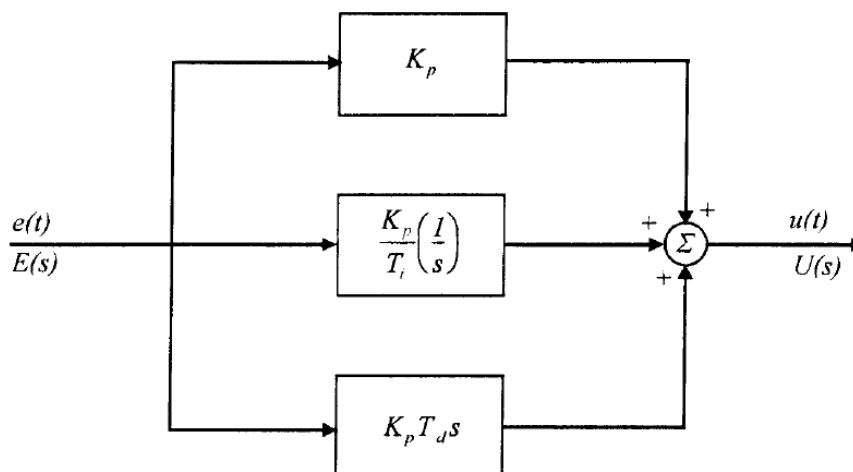
ο οποίος μπορεί να καταλήξει στην μορφή που κυρίως χρησιμοποιείται σε πιο πρακτικές εφαρμογές στην λειτουργία των ελεγκτών:

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right],$$

με παραμέτρους $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ και $T_d = \frac{K_d}{K_p}$ να ορίζουν τις αντίστοιχες σταθερές χρόνου

του ολοκληρώτη και του διαφοριστή.

Μία συνολική δομική περιγραφή ενός PID-ελεγκτή στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

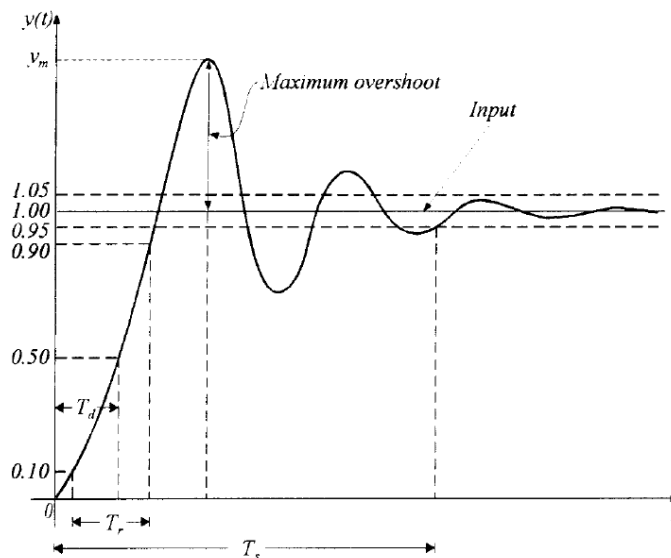


Σχήμα 3.4: Σχηματική περιγραφή ενός PID-ελεγκτή στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας με χρήση block διαγραμμάτων

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε μεθόδους προσδιορισμού των σταθερών κέρδους των επιμέρους βαθμίδων κάθε ελεγκτή με χρήση πειραματικών διεργασιών επί του συστήματος.

3.2.4 Χρονικές Αποκρίσεις Συστημάτων και PID-Ελεγκτές

Χρήσιμα μορφολογικά χαρακτηριστικά ευσταθών αποκρίσεων ενός συστήματος ανώτερης τάξης (δηλ. με εμφάνιση παραπάνω τους ενός πόλου στην περιγραφή της συνάρτησης μεταφοράς του), με αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.5: Μορφολογικά χαρακτηριστικά αποκρίσεων συστημάτων δεύτερης και ανώτερης τάξης

Τα χρήσιμα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κυματομορφής αφορούν στις παραμέτρους:

Από το σχήμα της περιγραφής της χρονικής μεταβολής της κυματομορφής εξόδου ενός τέτοιου συστήματος, παρατηρούμε την ύπαρξη αποσβενόμενης ταλαντωτικής συμπεριφοράς και επικάθιση του σήματος εξόδου στην μόνιμη τιμή μετά την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος. Από την γενικότερη μορφή αυτής της κυματομορφής μπορούν να ορισθούν ορισμένα χρήσιμα χαρακτηριστικά της ποιότητας του σήματος:

t_r : Χρόνος Ανόδου (rise time). Ο χρόνος που απαιτείται μέχρι μία κυματομορφή να μεταβληθεί από το 10% στο 90% της μόνιμης τιμής της. Το χαρακτηριστικό αυτό δεικνύει κατά πόσον ένα σύστημα μεταβάλλει γρήγορα την έξοδο του για να παρακολουθήσει μία διεργασία.

t_d : Χρόνος καθυστέρησης (delay time). Ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε μία κυματομορφή να περιέλθει από το 0% στο 50% της μόνιμης τιμής της.

t_s : Χρόνος αποκατάστασης (settle time). Ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε μία κυματομορφή να «εγκατασταθεί» στην ποσοστιαία ταλαντωτική ζώνη απόκλισης του ($\pm 2\%$) ή ($\pm 5\%$) της τελικής τιμής που αυτή θα λάβει αφήνοντας την αποκατάσταση του συστήματος ικανοποιητικό χρονικό διάστημα (μόνιμη κατάσταση). Η συγκεκριμένη παράμετρος αποτελεί ένα μέτρο απόρριψης μέσω αποσβέσεων των ανεπιθύμητων ταλαντωτικών φαινομένων που συνήθως εμφανίζονται στα συστήματα στην ταχύτητα προσέγγισης μίας επιθυμητής τιμής.

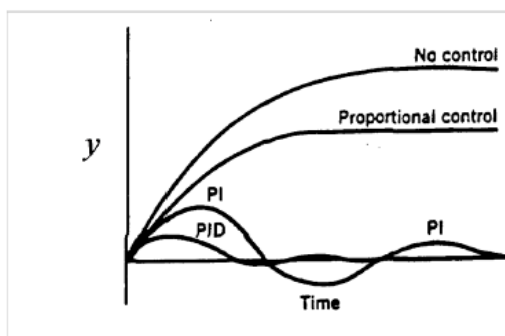
y_{max} : Μέγιστη υπερύψωση ή υπερακόντιση του συστήματος (overshoot). Η συγκεκριμένη τιμή δηλώνει την μέγιστη τιμή την οποία θα λάβει η έξοδος ενός συστήματος. Η παράμετρος είναι εξαιρετικά σημαντική διότι ακόμη και στην

περίπτωση όπου η τελική τιμή ενός συστήματος είναι εντός προδιαγραφών λειτουργίας, η εν λόγω τιμή μπορεί να κρίνεται υπερβολική και να συνιστά μία παράμετρο η οποία θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή (π.χ. μέγιστο ρεύμα κορυφής – current peak κατά την εκκίνηση της λειτουργίας ενός κνητήρα). Είναι σημαντικό η εν λόγω παράμετρος να κρατείται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα συγκρίσιμα στο 25 – 30% της τελικής επιθυμητής τιμής του μεγέθους.

γ_{min} : Ελάχιστη βύθιση (undershoot) του συστήματος. Η παράμετρος αποτελεί ένα μέτρο απόσβεσης της ταλαντωτικής συμπεριφοράς της κυματομορφής της εξόδου. Δεδομένου ότι η τιμή που λαμβάνεται στην θέση αυτήν δεν ξεπερνά την τελική τιμή της εξόδου δεν συνιστά σχεδιαστικό πρόβλημα ή παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή. Εντούτοις στο ενδεχόμενο αναστροφής φοράς ή πολικότητας ενός μεγέθους (δηλ. αρνητικές τιμές της εξόδου), θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη γιατί στην περίπτωση αυτήν μπορεί να προκαλέσει μη αποδεκτές αναστρέφουσες τιμές λειτουργίας του συστήματος οι οποίες ενδεχόμενα θα πρέπει να μπορούν να γίνουν ανεκτές από το κύριο σύστημα.

Οι ορισμοί για τα μεγέθη υπερακόντισης και βύθισης μπορούν να δοθούν και ποσοστιαία (%) συγκρινόμενες με τα επίπεδα τελικής επιθυμητής τιμής.

Οι χρονικές μορφές των αποκρίσεων συστημάτων που συνδιάζουν PID-ελεγκτές προσαρμόζουν τα σήματα εξόδου στα χαρακτηριστικά που αυτοί προσδίδουν στο υπό έλεγχο σύστημα. Τα χαρακτηριστικά των σημάτων εξόδου με χρήση των αντίστοιχων ελεγκτών παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.6: Ποιοτική μορφή της εξόδου ενός κλειστού συστήματος με χρήσης P, PI, PID-ελεγκτή

Στο παραπάνω διάγραμμα της ποιοτικής αναπαράστασης της εξόδου του συστήματος, η επιθυμητή θέση στην οποία θέλουμε να καταλήξει το σύστημα στην μόνιμη κατάσταση παριστάνεται με τον οριζόντιο άξονα. Από την μορφή των αποκρίσεων παρατηρούμε ότι η χρήση απλών P-ελεγκτών αφήνει μόνιμο σφάλμα στην έξοδο του συστήματος. Ο PI-ελεγκτής εμφανίζει μία αποσβενομενη ταλαντωτική συμπεριφορά η οποία τείνει να καταλήξει μετά από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα στην επιθυμητή τιμή, ενώ ο PID-ελεγκτής εμφανίζει ανάλογη ταλαντωτική συμπεριφορά αλλά με πιο γρήγορα χαρακτηριστικά απόσβεσης και προσαρμογή όσον αφορά στην μόνιμη κατάσταση. Έτσι ακόμα και από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά για την χρονική συμπεριφορά ενός κλειστού συστήματος, γίνεται εμφανές το πλεονέκτημα από την χρήση PID-ελεγκτών για την γρήγορη και αποτελεσματική αντιστάθμιση των χαρακτηριστικών των σημάτων εξόδου ενός συστήματος.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραπάνω κυματομορφών διατηρούνται για όλη την οικογένεια ελεγκτών ενός τύπου (με βάση τον εμπλεκόμενο αριθμό

των παραμέτρων ενίσχυσης – κέρδους της οικογένειας) αλλά επηρεάζονται σημαντικά από τις αριθμητικές τιμές των κερδών που ρυθμίζουν την ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τμήματος του ελεγκτή στην διαμόρφωση της εξόδου. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε πρακτικές μεθόδους καθορισμού των τιμών για τα αναφερόμενα κέρδη, έτσι ώστε να ρυθμίσουμε αποτελεσματικά τα χαρακτηριστικά της εξόδου ενός σήματος εξόδου με χρήση PID-ελεγκτών.

3.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων των PID-ελεγκτών

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων ενός PID-ελεγκτή αποτελεί ένα πρόβλημα προς επίλυση το οποίο βρίσκει σημαντικότερες εφαρμογές στην πράξη. Οι παράμετροι ενίσχυσης ενός PID-ελεγκτή επιδρούν καθοριστικά στην μορφή των κυματομορφών των σημάτων εξόδου ενός κλειστού συστήματος, επηρεάζοντας ακόμη και την συνολική ευσταθή λειτουργία της διάταξης. Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων ενός PID-ελεγκτή μπορεί να γίνουν με διάφορους τρόπους, μερικοί από τους σημαντικότερους είναι:

- **Απευθείας σύνθεση (Direct Synthesis - DS).** Η μέθοδος υπολογίζει τις ζητούμενες παραμέτρους λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμητές προδιαγραφές του συνολικού συστήματος (ελεγκτή – κυρίου συστήματος υπό έλεγχο).
- **Μέθοδος Internal Model Control (PID_IMC) για ελεγκτές PI, PID.** Οι μέθοδοι βασίζονται στην πρωταρχική εκτίμηση ενός μοντέλου για την περιγραφή του υπό έλεγχο συστήματος και στην συνέχεια κατασκευάζουν τον ζητούμενο ελεγκτή σε συνδιασμό με το μοντέλο αυτό.
- **Πειραματικές μέθοδοι με ρύθμιση των παραμέτρων in-site μετά την εγκατάσταση του ελεγκτή στο σύστημα.** Οι μέθοδοι αυτές επιχειρούν την ρύθμιση των χαρακτηριστικών του ελεγκτή in-site επί της εκτελούμενης διεργασίας. Σε αυτές τις μεθόδους συγκαταλέγονται οι μέθοδοι των Ziegler-Nichols (Z-N), Cohen-Coon (C-C) καθώς και η auto-relay.
- **Μέθοδοι απόκρισης συχνότητας (frequency response).** Οι συγκεκριμένες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη τους προδιαγραφές συστημάτων εκπεφρασμένες στο πεδίο της συχνότητας. Σε αυτές συγκαταλέγονται οι προδιαγραφές περιθωρίων κέρδους, φάσης, αντιστάθμισης πόλων – μηδενικών, κλπ.
- **Ρύθμιση σε πραγματικό χρόνο μετά την εγκατάσταση του ρυθμιστή – ελεγκτή και κατά την λειτουργία του συνολικού συστήματος (self-tuning/adaptive control).** Μέθοδοι οι οποίες αναφέρονται σε ελεγκτές προσαρμοζόμενης συμπεριφοράς οι οποίοι συνδιάζονται με εκτίμηση του υπό έλεγχο συστήματος. Οι μέθοδοι αυτές εμφανίζονται επεκτεινόμενες με την χρήση ψηφιακών συστημάτων ελέγχου και H/Y.
- **Καθορισμός των παραμέτρων ενίσχυσης μετά από προσομοίωση του συνολικού μοντέλου κλειστού βρόχου (ελεγκτή – συστήματος υπό έλεγχο).** Στις μεθόδους αυτές γίνεται εκτίμηση του απαιτούμενου ελεγκτή κάνοντας χρήση ενός μοντέλου περιγραφής για το σύστημα υπό έλεγχο. Όσο πιο ακριβές το παρεχόμενο μοντέλο περιγραφής του συστήματος, τόσο το δυνατόν ακριβέστερη η τήρηση των προδιαγραφών και

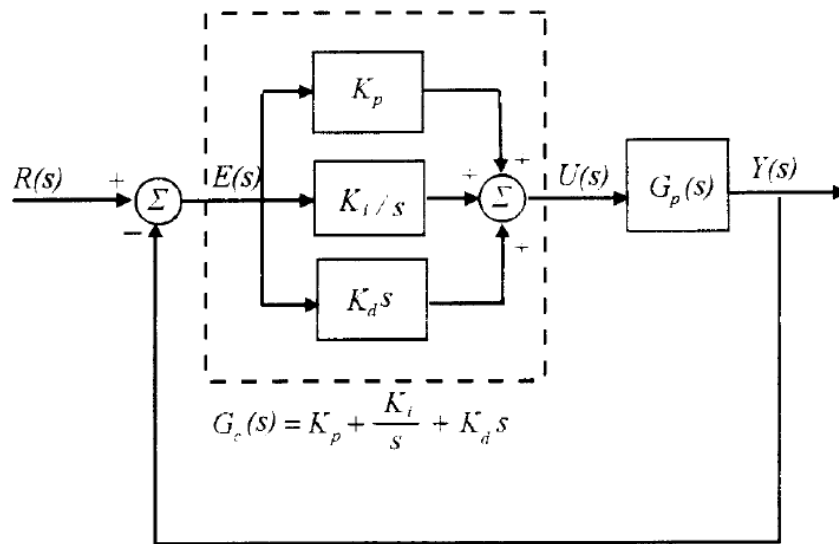
η λεπτομερής σχεδίαση του ελεγκτή καθορίζοντας επακριβώς τις απαιτούμενες τιμές ενίσχυσης για την επίτευξη των ζητούμενων χαρακτηριστικών.

Η πειραματική διεργασία καθορισμού των παραμέτρων του PID-ελεγκτή μετά από προσομοίωση, προϋποθέτει την δημιουργία μοντέλων περιγραφής τόσο του συστήματος υπό έλεγχο όσο και του ελεγκτή και την εφαρμογή προσομοιώσεων με χρήση H/Y. Η εν λόγω διαδικασία είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του PID-ελεγκτή που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του κινητήρα Σ.Ρ. Ένας σημαντικός λόγος για την εφαρμογή της είναι ότι διαθέτουμε κλειστές και ακριβείς περιγραφές (μοντέλο) τόσο των εξισώσεων του συστήματος όσο και του ελεγκτή. Επιπλέον, η μέθοδος της προσομοίωσης παρέχει την δυνατότητα για την εφαρμογή της χωρίς την χρήση του πραγματικού συστήματος, διασφαλίζοντας και ελαχιστοποιώντας τυχόν αβλεψίες και σφάλματα κατά την εγκατάσταση και λειτουργία του ελεγκτή. Ο πλέον όμως, σημαντικός λόγος για την εφαρμογή της δεδομένης μεθόδου είναι ότι η ακρίβεια των μοντέλων που διαθέτουμε για την περιγραφή τόσο του συστήματος υπό έλεγχο, όσο και του συνολικού συστήματος, στην διεργασία της προσομοίωσης δεν περιορίζεται στην χρήση γραμμικών ή γραμμικοποιημένων μοντέλων. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα εφόσον η όλη διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων περιγραφής των μεγεθών αλλά και ο υπολογισμός των απαιτούμενων τιμών τους γίνεται αριθμητικά και με την χρήση H/Y. Η τελευταία παρατήρηση, δηλ. της αυτόνομης δυνατότητας προσομοίωσης ενός συνολικού συστήματος είναι και το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που υπειέρχεται ως καθοριστική παράμετρος για την εφαρμογή μεθοδολογιών σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου υποβοηθούμενες από την χρήση ψηφιακών υπολογιστών.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μία ευρύτατα διαδεδομένη τεχνική πειραματική μέθοδος ρύθμισης των παραμέτρων ενίσχυσης ενός PID-ελεγκτή αποτελεί η μέθοδος Ziegler-Nichols, την οποία θα παρουσιάσουμε στην επόμενη ενότητα.

3.3.1 Μέθοδος Ziegler-Nichols

Η μέθοδος καθορισμού των παραμέτρων PID-ελεγκτή των Ziegler-Nichols είναι πολύ απλή αλλά συνάμα και πολύ επιτυχημένη δεδομένου ότι δεν χρειάζεται έναν υπερβολικό αριθμό μετρήσεων επί του συστήματος (1942). Δεν προϋποθέτει καμία γνώση του μαθηματικού μοντέλου περιγραφής του συστήματος υπό έλεγχο και για τον λόγο αυτό μπορεί να επεκταθεί στην χρήση της τόσο σε γραμμικά όσο και σε μη γραμμικά συστήματα με/χωρίς παράγοντες καθυστέρησης στην δημιουργία του σήματος εξόδου. Για την εφαρμογή της μεθόδου, θεωρούμε ένα σύστημα κλειστού βρόχου με μοναδιαία ανατροφοδότηση και εγκατάσταση του ελεγκτή στον κύριο κλάδο, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.7: Ρύθμιση των παραμέτρων PID-ελεγκτή με την μέθοδο των Ziegler-Nichols σε συνδεσμολογία μοναδιαίου κλάδου ανατροφοδότησης

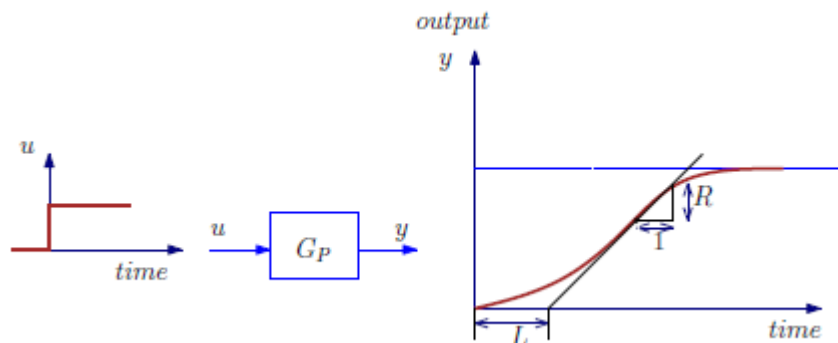
Η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή (PID-ελεγκτή) δίνεται από την σχέση:

$$G_c(s) = K_C \left(1 + T_D s + \frac{1}{T_I s} \right)$$

ο προσδιορισμός των παραμέτρων του PID-ελεγκτή συνίστανται στον προσδιορισμό τιμών για τις ποσότητες K_c , T_D και T_I . Υπάρχουν δύο μέθοδοι προσδιορισμού των παραμέτρων του PID-ελεγκτή (α) για συστήματα με νωθρή απόκριση (Μέθοδος 1) και (β) για συστήματα που εμφανίζουν φαινόμενα συντονισμού (Μέθοδος 2).

Μέθοδος 1: Η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη σε νωθρή απόκριση και συνδεσμολογία συστήματος ανοικτού βρόχου και μέγιστη υπερακόντιση $< 25\%$. Ένα σύστημα θεωρείται ότι εμφανίζει νωθρή απόκριση όταν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της κυματομορφής του σήματος εξόδου του εμφανίζουν μονοτονική συμπεριφορά χωρίς ταλαντωτικές επιδράσεις.

- Απομονώνουμε την εγκατάσταση και θέτουμε είσοδο σε αυτήν την μοναδιαία βηματικής συνάρτηση (βηματική διέγερση).
- Καταγράφουμε την κυματομορφή απόκρισης της εξόδου
- Η δυναμική κατάσταση της εξόδου περιγράφεται από τις παραμέτρους L και R όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Η παράμετρος R συμβολίζει την μέγιστη κλίση της εφαπτομένης της εξόδου, ενώ η παράμετρος L προσδιορίζει τον χρόνο που προκύπτει από την τομή της εφαπτομένης με τον άξονα του χρόνου στο διάγραμμα. Οι παράμετροι παρουσιάζονται στην ποιοτική μορφή της εξόδου του συστήματος όπως ακολουθεί:



Σχήμα 3.8: Παράσταση των διεργασιών για την παραγωγή εξόδου με την μέθοδο 1 ουστήματος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων με την μέθοδο Ziegler-Nichols

Οι Ziegler και Nichols προτείνουν την ακόλουθη εκλογή τιμών ενίσχυσεων για τους ελεγκτές P, PI, PID που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του κλειστού βρόχου:

Για P-έλεγχο:

$$K_c = \frac{1}{RL}$$

Για PI-έλεγχο:

$$K_c = \frac{0.9}{RL} \text{ και } T_i = 3.3L$$

Για PID-έλεγχο:

$$K_c = \frac{1.2}{RL} \quad T_i = 2L \text{ και } T_D = 0.5L$$

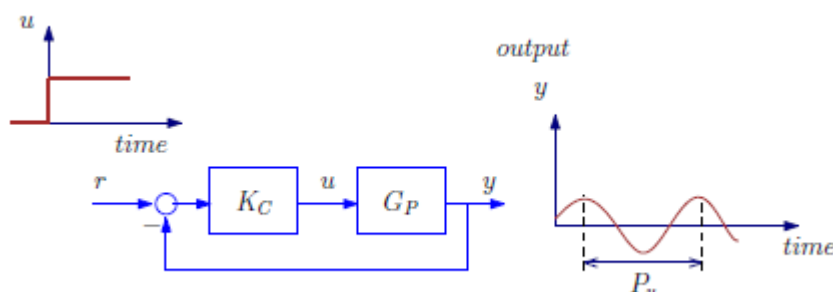
δηλ. γίνεται εμφανές ότι για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενίσχυσης των ελεγκτών με την συγκεκριμένη μέθοδο που χαρακτηρίζει συστήματα με νωθή απόκριση (μονοτονικής μη ταλαντωτικής φύσης) χρειάζεται η καταγραφή της εξόδου και των ανωτέρω δύο χαρακτηριστικών. Εφόσον οι παράμετροι του ελεγκτή προσδιορισθούν με τον συγκεκριμένο τρόπο η μέθοδος εγγυάται μία σχετικά βέλτιστη ευσταθή συμπεριφορά για το κλειστό σύστημα που συνδυάζεται με τον εν λόγω ελεγκτή. Πλεονέκτημα για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ότι οι μετρήσεις της επιβάλλονται επί του αρχικού (ανοικτού) συστήματος.

Μέθοδος 2: Η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη σε συστήματα που η έξοδος τους εμφανίζει ταλαντωτική συμπεριφορά η οποία μπορεί να οδηγήσει σε συντονισμό (μόνιμη ή συντηρούμενη ταλάντωση)

- Καταστρώνουμε έναν κλειστό βρόχο για τον έλεγχο του συστήματος, ο οποίος αποτελείται στον κύριο κλάδο του, από έναν αναλογικό ελεγκτή τύπου P με παράμετρο ενίσχυσης K_c , το σύστημα υπό έλεγχο και μοναδιαία ανατροφοδότηση (η διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί).
- Στο κλειστό σύστημα εφαρμόζουμε μοναδιαία βηματική διέγερση, αυξάνοντας προοδευτικά το κέρδος του αναλογικού ελεγκτή K_c , μέχρις

όπου στην έξοδο του συστήματος να εμφανιστεί μόνιμη ταλάντωση σταθερής περιόδου (συντηρούμενη μη αποσβεννόμενη ταλάντωση σταθερού πλάτους).

- Καταγράφουμε την τιμή του κέρδους $K_c=K_u$ για την οποία εμφανίζεται η ταλαντωτή (σύστημα στο όριο ευσταθούς λειτουργίας). Προσμετράμε την περίοδο της ταλάντωσης P_u .



Σχήμα 3.9: Παράσταση των διεργασιών για την παραγωγή εξόδου με την μέθοδο 2, συστήματος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων με την μέθοδο Ziegler-Nichols

Με χρήση των ανωτέρω μετρήσεων οι τιμές ενίσχυσης για ελεγκτές τύπου P, PI και PID, προσδιορίζονται ως ακολούθως:

Για P-έλεγχο:

$$K_c = 0.5K_u$$

Για PI-έλεγχο:

$$K_c = 0.45K_u \text{ και } T_i = 0.83P_u$$

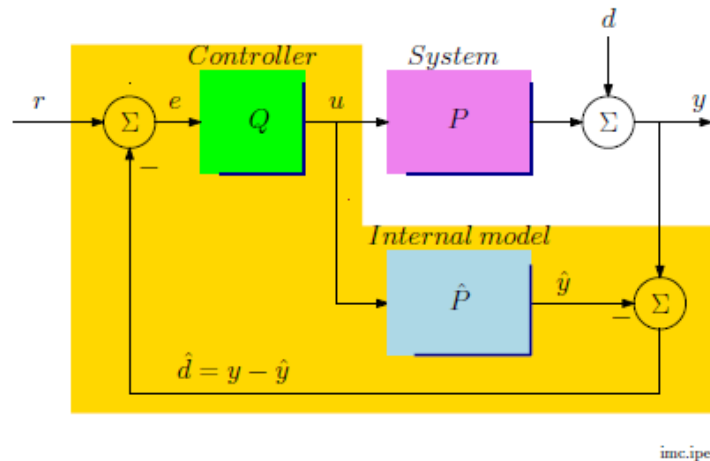
Για PID-έλεγχο:

$$K_c = 0.6K_u \quad T_i = 0.5P_u \text{ και } T_D = 0.125P_u$$

δηλ. με την συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται εμφανές ότι για τον καθορισμό των παραμέτρων ενίσχυσης των ελεγκτών χρειάζεται να επιβάλλουμε μετρήσεις στην έξοδο του συστήματος σε συνδεσμολογία κλειστού βρόχου μοναδιαίας ανατροφοδότησης. Αφού προσδιοριστούν οι τιμές ενίσχυσης του αναλογικού ελεγκτή που διαμορφώνει την ταλάντωση της εξόδου καθώς και η περίοδος αυτής, είναι σχετικά βέλτιστος ο καθορισμός των παραμέτρων ενίσχυσης για κάθε τύπο από τους προαναφερόμενους ελεγκτές διασφαλίζοντας ευσταθή λειτουργία για το κλειστό σύστημα. Η συνδεσμολογία του κλειστού συστήματος συνίσταται από την χρήση του ελεγκτή στον κύριο κλάδο και μοναδιαία ανατροφοδότηση για τον κλάδο ανάδρασης.

3.4 Άλλοι τύποι ελεγκτών. Ελεγκτές IMC

Η μέθοδος Internal Model Control (IMC), αναπτύχθηκε από τους Morari, Garcia και Rivera (1982, 1986). Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η ύπαρξη μοντέλου περιγραφής για το σύστημα υπό έλεγχο, με χρήση του οποίου μπορεί να γίνουν αναλυτικοί υπολογισμοί για τον ελεγκτή. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η συμπίληψη της αβεβαιότητας του μοντέλου, με συστηματικό τρόπο στην παραγωγή της εξόδου. Το δομικό διάγραμμα με βρόχο ελέγχου για ελεγκτή τύπου IMC παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.10: Διαγραμματική αναπαράσταση ελεγκτή τύπου IMC με χρήση μοντέλου περιγραφής για το σύστημα

Ως P ορίζεται η ακριβής συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, \hat{P} το μοντέλο της περιγραφής του συστήματος, d η διαταραχή που εμφανίζεται στην έξοδο y του συστήματος. Ο ελεγκτής Q προσδιορίζει την μεταβλητή ελέγχου $u(t)$ του συστήματος. Στόχος του ελεγκτή είναι η όσον το δυνατόν ακριβέστερη παρακολούθηση (tracking) του σήματος αναφοράς $r(t)$ που επιβάλλεται στην είσοδο του κλειστού συστήματος (reference point).

Θεωρούμε ότι η έξοδος του συστήματος είναι προσδιορίσιμη με ακρίβεια δηλ. δεν υπάρχει θόρυβος στην εφαρμοζόμενη μετρητική διάταξη για τον προσδιορισμό του σήματος εξόδου πέρα από την διαταραχή. Γίνεται χρήση του μοντέλου του συστήματος \hat{P} και της εξόδου $u(t)$ του ελεγκτή για να υπολογισθεί η απόκριση του μοντέλου \hat{y} . Το σήμα ανατροφοδότησης είναι:

$$\hat{d} = y - \hat{y} = (P - \hat{P})u + d$$

Στην περίπτωση όπου $P = \hat{P}$ δηλ. δεν υπάρχει αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του μοντέλου περιγραφής του συστήματος σε σχέση με την ακριβή περιγραφή του συστήματος τότε η διαφορά $P - \hat{P}$ γίνεται μηδέν οπότε και ο συγκεκριμένος παράγοντας δεν διαταράσσει την προσδιοριζόμενη έξοδο του συνολικού συστήματος και η μόνη επίδραση είναι η επίδραση της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής d .

3.4.1 Μέθοδος προσδιορισμού των παραμέτρων του ελεγκτή IMC

Για τον σχεδιασμό του ελεγκτή IMC, εφαρμόζουμε την μεθοδολογία σε δύο βήματα:

Βήμα 1:

- Το μοντέλο της εγκατάστασης P^{\wedge} αναλύεται σε δύο συνιστώσες P^{+} και P^{-} .
- Όπου ο παράγοντας P^{+} περιλαμβάνει καθυστερήσεις της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος της μορφής $\exp(-\theta s)$ και παράγοντες μηδενισμού που βρίσκονται στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο (παράγοντες μη ελάχιστης φάσης).
- Ο παράγοντας P^{-} περιλαμβάνει τα τμήματα της συνάρτησης μεταφοράς που μπορούν να αντιστραφούν δηλ. εμφανίζουν ευσταθή συμπεριφορά.
- Στο βήμα αυτό επιτυγχάνεται η αποδόμηση του συστήματος με βάση το Κανονικό Μοντέλο (Nominal Performance).

Βήμα 2:

- Υλοποιείται ο ελεγκτής $Q(s)$ μέσω της σχέσης $Q(s)=f(s)/P^{-}(s)$, όπου η συνάρτηση $f(s)$ παριστάνει ένα βαθυπερατό φίλτρο (low pass filter).
- Το επιλεγόμενο βαθυπερατό φίλτρο έχει την μορφή: $f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n}$.
- Στο βήμα αυτό επιτυγχάνεται με τον παραπάνω καθορισμό, η επίδοση και η ευστάθεια του μοντέλου που περιέχει αβεβαιότητα στον καθορισμό του (Robust Performance, Robust Stability).
- Η επιλογή της παραμέτρου λ για το φίλτρο είναι πολύ σημαντική. Γενικά αυξάνοντας την τιμή του λ ισοδυναμεί με την εφαρμογή «συντηρητικότερου» ελεγκτή για το σύστημα αφού αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του παράγοντα K_c και την μείωση της σταθεράς χρόνου T_i του ολοκληρωτή. Στόχος του βαθυπερατού φίλτρου είναι να επιβάλλει ένα σημαντικό παράγοντα επι κυρίαρχων πόλων στην λειτουργία του κλειστού συστήματος οι οποίοι και θα ρυθμίσουν την συνολική συμπεριφορά της εξόδου καθώς και τα θέματα της μεταβατικής απόκρισης αυτής.

3.5 Πειραματικός Προσδιορισμός παραμέτρων PID-ελεγκτή με χρήση μοντέλου του συστήματος και εφαρμογή προσομοιώσεων

Η ύπαρξη ενός ακριβούς μοντέλου για την μαθηματική περιγραφή ενός συστήματος συμβάλλει καθοριστικά στην επίτευξη και τον σχεδιασμό ελεγκτών οποιουδήποτε τύπου και ειδικής μορφής τα αποτελέσματα των οποίων είναι άμεσα αναπαραστάσιμα χωρίς την εφαρμογή περιραματικών διεργασιών επί του πραγματικού συστήματος. Για τον λόγο αυτό η χρήση αναλυτικών μαθηματικών περιγραφών μοντέλου σε συνδιασμό με την χρήση αναλυτικών συναρτήσεων περιγραφής ελεγκτών, δίνει την δυνατότητα εφαρμογής προσομοιώσεων για οποιαδήποτε μορφή εισόδου και σήματος αναφοράς. Επιπλέον ακόμη και για απλές μορφές ελεγκτών η διαδικασία προσδιορισμού παραμέτρων ενίσχυσης με την εφαρμογή διαδικασιών προσομοίωσης συμβάλλει στον ακριβέστερο έλεγχο και

ρύθμιση (tuning) των επιθυμητών χαρακτηριστικών της εξόδου (π.χ. μέγιστη υπερακόντιση, χρόνος αποκατάστασης, κλπ). Η θεωρητική επίδραση στην λειτουργία του συστήματος συμβάλλει στην μεταβολή των παραμέτρων ενίσχυσης για την επίτευξη αυτών των αποτελεσμάτων αλλά η ακρίβεια στην προσαρμογή των χρονικών χαρακτηριστικών της εξόδου καθώς και ο «μικροσυντονισμός» αυτών μπορεί να γίνει εύκολα και με ακρίβεια.

Την παραπάνω τεχνική θα χρησιμοποιήσουμε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενίσχυσης των PID-ελεγκτών όπου αυτοί θα χρησιμοποιηθούν στην ευσταθή λειτουργία κλειστών μοντέλων, κάνοντας χρήση των γραφικών αποτελεσμάτων για τις χρονικές περιγραφές των εξόδων του συστήματος. Μικρές αλλαγές καθώς και περαιτέρω έλεγχος και επίδραση των μεταβολών στις παραμέτρους αυτές είναι εύκολα να αναλυθούν δεδομένου ότι τα προκύπτοντα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους είναι άμεσα ορατά μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης.

Το μοντέλο του συστήματος που πρέπει να ελεγχθεί εξαλείφει την ανάγκη για άμεση εφαρμογή και ρύθμιση του ελεγκτή επί πραγματικού περιβάλλοντος, εξαλείφοντας τον κίνδυνο από εγκατάσταση και τυχόν άλλες αβλεψίες ή οφέλη. Επιπλέον είναι δυνατόν να προβλεφθούν επακριβώς μεταβατικά φαινόμενα ακόμα και για μη γραμμικά συστήματα, τα οποία υπό άλλες συνθήκες θα ήταν αδύνατο να προβλεφθούν παρά μόνο να μετρηθούν επί της πραγματικής διάταξης. Τυχόν μη γραμμικότητες ή επιπλέον μοντέλα επίδρασης διαταραχών σε διαφορετικά σημεία της διάταξης δύναται να επιβληθούν χωρίς κίνδυνο για την λειτουργία του πραγματικού περιβάλλοντος. Ειδικότερα αναφερόμενοι στην χρήση ελεγκτών για τον έλεγχο και την αντιστάθμιση κινητήρων Σ.Ρ. αυτός μπορεί να συμβάλλει στον καθορισμό ρευμάτων και τάσεων κορυφής, μεγέθη τα οποία ξεπερνούν τις ονομαστικές τιμές λειτουργίας, προβλέποντας, απαιτούμενες διατάξεις τροφοδοσίας και κυκλωμάτων ασφαλείας για την εκκίνηση και τον τερματισμό λειτουργίας. Επιπλέον, το συνολικό μοντέλο ενός τετοιου συστήματος δίνει την δυνατότητα για την επιβολή οποιουδήποτε τύπου φορτίου που σε πειραματικές συνθήκες είναι δύσκολο να καθορισθούν και να επιβληθούν στο περιβάλλον ενός πραγματικού κινητήρα.

4 Μοντέλο Matlab του κινητήρα Σ.Ρ.

4.1 Εισαγωγή – Δομική Οργάνωση του Μοντέλου

Για την ανάπτυξη του μοντέλου περιγραφής του κινητήρα Σ.Ρ. χρησιμοποιήθηκε όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγική περιγραφή της παρούσας διπλωματικής η γλώσσα περιγραφής Matlab Script Language (Matlab-SL). Η συγκεκριμένη περιγραφική γλώσσα έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Mathworks® για την υποβοήθηση στην ανάπτυξη αλγορίθμων, μοντέλων και προτύπων αναφοράς συστημάτων. Η συγκεκριμένη περιγραφική γλώσσα δίνει την ευελιξία περιγραφής ενός μοντέλου για ένα σύστημα, διευκολύνοντας παράλληλα τον χρήστη διότι παρέχει την δυνατότητα της χρησιμοποίησης παράλληλα και άλλων έτοιμων συναρτήσεων (functions), οι οποίες είναι αυτόνομα οργανωμένες σε εργαλειοθήκες – βιβλιοθήκες (toolboxes). Αυτή η δυνατότητα διευκολύνει ως προς την ιεραρχική καταχώρηση και αναζήτηση των ανωτέρω συναρτήσεων από τον χρήστη (π.χ. toolbox αυτόματου ελέγχου, toolbox μαθηματικών βασικών συναρτήσεων, toolbox συναρτήσεων πιθανοτήτων – στατιστικής, κλπ). Επιπλέον η συγκεκριμένη γλώσσα επιτρέπει την συνεργασία του περιβάλλοντος προσομοίωσης Matlab® και με το περιβάλλον προσομοίωσης Simulink® το οποίο περιλαμβάνει ένα γραφικό περιβάλλον για την σύνδεση και συνεργασία δομικών οντοτήτων τόσο συνεχούς, όσο και διακριτού χρόνου με την μορφή αυτόνομων οντοτήτων (boxes). Οι εν λόγω οντότητες μπορούν να συνδεθούν λογικά μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (editor) και με τον τρόπο αυτό, να κατασκευάσουν ευρύτερες οντότητες που μπορούν να περιγράψουν σύνθετες διεργασίες ή μοντέλα συστημάτων μεγαλύτερης κλίμακας.

Η υποστηριζόμενη script language παρέχει εκτός από την βασική λογική/μαθηματική δομή και συνέπεια μίας γλώσσας προγραμματισμού (υποστήριξη λογικών δομών, δομές αποφάσεων, επανάληψης, βρόχων, κλήσεως συναρτήσεων, οργάνωσης δεδομένων, κλπ) την αντιστοιχηση των ανταλλασσόμενων πληροφοριών αλλά και την οργάνωση τους σε διανύσματα

(vectors). Τα περιεχόμενα που ανταλλάσσονται ή χρησιμοποιούνται μέσω αυτών των μεταβλητών έχουν την δυνατότητα να αποθηκευτούν ή να ανακληθούν προς και από αρχεία μορφής κειμένου (.txt – text files) ή μορφής δυαδικών αριθμών (.bin – binary files). Επιπλέον το περιβάλλον της συγκεκριμένης γλώσσας υποστηρίζεται από ένα συνοδό περιβάλλον μεταγλώττισης (compilation) το οποίο εκτελεί τον κώδικα που περιλαμβάνεται σε αυτά τα αρχεία. Η μετάφραση – μεταγλώττιση του κώδικα μέσω του περιβάλλοντος του interpreter συνοδευτικά υποστηρίζει και όλες τις διεργασίες αποσφαλμάτωσης ενός περιβάλλοντος ανάπτυξης κώδικα (debugging, εισαγωγή breakpoints, πάγωμα εκτέλεσης, έλεγχος στοιβάδας μεταβλητών, κλπ), διευκολύνοντας τον χρήστη/προγραμματιστή στον έλεγχο της λειτουργίας και στην τελική αποσφαλμάτωση του αναπτυσσόμενου προγράμματος. Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του κώδικα περιγραφής παρουσιάζονται είτε ως εκτυπωμένες στην οθόνη του Η/Υ πληροφορίες, οι οποίες κατευθύνονται στο παράθυρο εκτέλεσης (execution pane window) του περιβάλλοντος, είτε παρέχεται η δυνατότητα της γραφικής απεικόνισης αυτών σε ανεξάρτητα παράθυρα που δημιουργούνται δυναμικά από το περιβάλλον Matlab® με την χρήση προκαθορισμένων εντολών. Τα γραφικά αποτελέσματα δίνουν καλύτερη εποπτεία και παρουσίαση της πληροφορίας και μπορούν να οργανωθούν σε απεικονίσεις που περιλαμβάνουν περισσότερες από μία γραφικές αναπαραστάσεις επί του ίδιου παραθύρου είτε ανεξάρτητα με χρήση ενός παραθύρου ανά κυματομορφή. Οι απεικονίσεις μπορεί να είναι διδιάστατες ή τριδιάστατες ανάλογα με το πλήθος μεταβλητών και παραμέτρων της παράστασης προς απεικόνιση. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα στατιστικής επεξεργασίας των παραγόμενων αποτελεσμάτων καθώς και η χρήση ραβδογραμμάτων για την απεικόνιση τους.

Γενικότερα χαρακτηρίζοντας την λειτουργία του ολοκληρωμένου περιβάλλοντος που παρέχεται από την Mathworks® αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί από μεγάλο βαθμό πληρότητας και δυνατοτήτων, μετριάζοντας την απαιτούμενη προγραμματιστική αυστηρότητα, η οποία συνήθως δυσκολεύει και απωθεί τους χρήστες όταν χρειάζεται ειδικότερα να αναπτύξουν πολύπλοκα υπολογιστικά μοντέλα. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε η εν λόγω πλατφόρμα για την ανάπτυξη του συνολικού κώδικα περιγραφής του μοντέλου προσομοίωσης για τον κινητήρα Σ.Ρ. Ο συγκεκριμένος κώδικας στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε με βασικές οργανωτικές ιεραρχήσεις (functional decomposition) για την κατασκευή ενός συμπαγούς και ολοκληρωμένου μοντέλου με στόχο να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή προσομοιώσεων σε κλειστό βρόχο, ο οποίος επιπλέον του μοντέλου του κινητήρα Σ.Ρ. περιλαμβάνει και την χρήση PID-ελεγκτή για την ευσταθή και αντισταθμισμένη λειτουργία του συνολικού συστήματος, σε λειτουργία εντός καθορισμένων σημείων λειτουργίας και ειδικότερων προδιαγραφών.

Ο κώδικας περιγραφής του μοντέλου για τον κινητήρα Σ.Ρ. οργανώνει αρχικά ένα μοντέλο το οποίο καλούμε μοντέλο ανοιχτού βρόχου. Το μοντέλο ανοιχτού βρόχου επικοινωνεί με οργανωτικές δομές υπολογισμού που υλοποιούνται μέσω αυτόνομων συναρτήσεων. Έτσι το ανοιχτό μοντέλο του κινητήρα Σ.Ρ. αποτελεί έναν δομικό κορμό ο οποίος επικοινωνεί και ανταλλάσσει πληροφορίες με χρήση συναρτήσεων στο περιβάλλον Matlab®. Η επικοινωνία με τις απαιτούμενες συναρτήσεις γίνεται μέσω κλήσεων (calls) και οι συναρτήσεις επιστρέφουν τα αποτελέσματα εκτέλεσης στον κύριο κορμό του κώδικα από τον οποίο κλήθηκαν (διαδικασία return της συνάρτησης). Ο συγκεκριμένος τρόπος της επικοινωνίας διασφαλίζει την ιεραρχική δομή και οργάνωση του κώδικα υλοποίησης του συνολικού μοντέλου, ενώ επιτρέπει σημαντική εποπτεία στην

φάση ανάπτυξης, συντήρησης και εξέλιξης του. Αναλυτικότερα τα μοντέλα ανοικτού και κλειστού βρόχου αποτελούνται από τα ακόλουθα δομικά στοιχεία:

- **Συνάρτηση υπολογισμού του ρεύματος τυμπάνου Ia_func()**. Η συνάρτηση υπολογισμού του ρεύματος τυμπάνου Ia, υπολογίζει το αναπτυσσόμενο ρεύμα που διέρχεται από τον κινητήρα στο κύκλωμα τυμπάνου, επιλύοντας αριθμητικά την διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης. Η αριθμητική επίλυση βασίζεται στην προσέγγιση της παραγώγου της άγνωστης προς επίλυση συνάρτησης, από μία διαφορά σε γειτονικές χρονικές στιγμές (μέθοδος Euler), κατασκευάζοντας με τον τρόπο αυτό μια αναδρομική σχέση υπολογισμού πρώτης τάξης της ζητούμενης ποσότητας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η συνάρτηση καλείται με συγκεκριμένα ορίσματα εισόδου και επιστρέφει μέσω του διακριτοποιημένου μοντέλου το υπολογισμένο ρεύμα τυμπάνου Ia.
- **Συνάρτηση επιβολής φορτίου επί του άξονα του κινητήρα Tload_func()**. Η συνάρτηση επιβολής φορτίου στον άξονα του κινητήρα Σ.Ρ. επιβάλλει φορτίο στο σύστημα, βασισμένο στην παραδοχή που αναπτύσσεται στο σύγραμμα [1] (Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών – της καθ. Μ. Ιωαννίδου), δηλ. η συνάρτηση του επιβαλλόμενου φορτίου είναι χωρισμένη σε 3 παράγοντες T11, T12 και T13. Ο παράγοντας T11 αντιστοιχεί σε σταθερό παράγοντα στην επιβολή φορτίου, ο παράγοντας T12 εκφράζει το κανονικοποιημένο φορτίο που εξαρτάται γραμμικά από την τρέχουσα τιμή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του άξονα του κινητήρα Σ.Ρ. και τέλος ο παράγοντας T13, εκφράζει την κανονικοποιημένη εξάρτηση ποσοστού φορτίου που επιβάλλεται στον άξονα και εξαρτάται από την τρέχουσα γωνιακή θέση (μετατόπιση) του κινητήρα Σ.Ρ. Η παραπάνω αποδόμηση της συνάρτησης φορτίου, επιτρέπει την επιβολή πολύ σύνθετων τύπων φορτίου, που εξαρτάται από τις τρέχουσες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα δηλ. από την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής καθώς και την συνολική ή υπόλοιπο $2\pi \pmod{2\pi}$ περιστροφή θέσης του κινητήρα. Η εκτίμηση του φορτίου γίνεται με κλήση της εν λόγω συνάρτησης σε καθορισμένες χρονικές στιγμές της φάσης της προσομοίωσης, ενώ ως αποτέλεσμα η συνάρτηση επιστρέφει την τρέχουσα τιμή του φορτίου που επιβάλλεται εκείνη τη χρονική στιγμή στον άξονα, για να χρησιμοποιηθεί στους περαιτέρω υπολογισμούς του μοντέλου του συστήματος.
- **Συνάρτηση υπολογισμού της μαγνητικής ροής του τυμπάνου fd_func()**. Η συγκεκριμένη συνάρτηση αποτελεί την συνάρτηση κανονικοποιημένης μαγνητικής ροής στο ανεξάρτητο κύκλωμα παραγωγής μαγνητικού πεδίου που είναι υπεύθυνο για την περιστροφή αλλά και τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα. Η συνάρτηση υλοποιείται μέσω ενός διακριτοποιημένου μοντέλου εξισώσεων διαφορών πρώτης τάξης δίνοντας λύση στην μη γραμμική εξίσωση περιγραφής της μαγνητικής ροής, η οποία διαφορετικά θα ήταν δύσκολα να επιλυθεί. Αυτός κυρίως είναι και ο λόγος όπου η μη χρήση H/Y που συμβάλλει μέγιστα στην αναλυτική επίλυση, οδηγεί υποχρεωτικά στην χρήση γραμμικοποιημένων μοντέλων γύρω από συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας όταν η επίλυση προσπαθεί να γίνει σε κλειστή μαθηματική μορφή με αναλυτική εξίσωση. Η συνάρτηση μαγνητικής ροής που χρησιμοποιήθηκε στον ορισμό του μοντέλου, μπορεί να αλλάξει δυναμικά από προσομοίωση σε προσομοίωση, συνδιάζοντας μία πληθώρα μη γραμμικών συναρτήσεων για το μοντέλο του

κυκλώματος ελέγχου πεδίου. Η συνάρτηση μετά την κλήση της επιστρέφει την τρέχουσα μαγνητική ροή για περαιτέρω υπολογισμούς του μοντέλου.

- **Συνάρτηση υπολογισμού της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα `omega_func()`.** Η συνάρτηση υλοποιείται από ένα διακριτοποιημένο μοντέλο για τον υπολογισμό της αναλυτικής εκτίμησης της τρέχουσας γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.
- **Συνάρτηση υπολογισμού της γωνιακής θέσης του κινητήρα `theta_func()`.** Η συνάρτηση υπολογίζει αριθμητικά το ολοκλήρωμα για τον υπολογισμό της τρέχουσας θέσης από την περιστροφή του κινητήρα, γνωρίζοντας την αναπτυσσόμενη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής από την προηγούμενη συνάρτηση.
- **Κύριο σώμα κώδικα για την οργάνωση του λειτουργιών του μοντέλου κινητήρα Σ.Ρ. ανοικτού βρόχου `dc_mot_model`.** Το κύριο σώμα κώδικα υλοποιεί την οργανωτική συνένωση των δομικών στοιχείων του μοντέλου, οργανώνοντας τις προηγούμενες συναρτήσεις για την χρονική εκτέλεση λειτουργιών του κινητήρα στα σεναρία προσομοίωσης. Ο κώδικας θέτει τις παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. εκτελεί τους απαιτούμενους αριθμητικούς υπολογισμούς για το χρονικό διάστημα προσομοίωσης, αποθηκεύει τα αποτελέσματα και τις ανταλλασσόμενες μεταβλητές σε διανύσματα, ανταλλάσσει αυτά μέσω των κλήσεων των συναρτήσεων και τέλος απεικονίζει γραφικά ή στο παράθυρο εκτέλεσης τα αποτελέσματα από την προσομοίωση. Έτσι μετά την εκτέλεση η παραγόμενη πληροφορία συγκροτείται σε διαγράμματα τα οποία είναι χρονικά εξελισσόμενα και δίνουν πλήρη εποπτεία από την λειτουργία του συνολικού μοντέλου του συστήματος του κινητήρα. Επιπλέον ο κώδικας για την υλοποίηση του μοντέλου ανοικτού βρόχου, συμπεριλαμβάνει ένα σημαντικό τμήμα για την υλοποίηση υπολογισμών σε παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα όπως το ρεύμα τυμπάνου, η μαγνητική ροή τυμπάνου, η επιτάχυνση περιστροφής του ρότορα του κινητήρα, κλπ.
- **Συνάρτηση υλοποίησης του κινητήρα Σ.Ρ. `dc_mot_func()`.** Η συγκεκριμένη συνάρτηση ενσωματώνει τον προηγούμενο κώδικα που περιγράφεται στο αρχείο `dc_mot_model` σε μία συνάρτηση, δίνοντας έτσι την ευελιξία για την υλοποίηση του μοντέλου κλειστού βρόχου. Η οργάνωση του κινητήρα σε μία συνάρτηση δίνει δομική ευελιξία και οργάνωση των εκτελούμενων διαδικασιών στον κώδικα του κλειστού βρόχου δεδομένου ότι αυτός υλοποιείται με την προσθήκη του PID-ελεγκτή στον κύριο κλάδο ελέγχου και παροχή του σήματος εξόδου στην είσοδο μέσω μοναδιαίας ανατροφοδότησης.
- **Κύριο σώμα κώδικα για την οργάνωση του λειτουργιών του μοντέλου κινητήρα Σ.Ρ. κλειστού βρόχου `dc_mot_closed`.** Το κύριο σώμα κώδικα κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί την προηγούμενη συνάρτηση ορισμού των λειτουργιών του κινητήρα Σ.Ρ. σε ανοικτό βρόχο, για να υλοποιήσει το συνολικό κλειστό μοντέλο που περιλαμβάνει τον κινητήρα Σ.Ρ. και τον PID-ελεγκτή σε κλειστή συνδεσμολογία. Στόχος του κώδικα είναι η υλοποίηση του συνολικού περιβάλλοντος προσομοίωσης των διεργασιών κλειστού βρόχου, παρέχοντας πρόσβαση για τον έλεγχο του κινητήρα και από το κύκλωμα ελέγχου τάσης τυμπάνου αλλά και από το κύκλωμα ελέγχου της μαγνητικής ροής. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει την δυνατότητα επιβολής όλων των προβλεπόμενων μορφών ελέγχου που περιγράφονται στην βιβλιογραφία για τον έλεγχο ενός κινητήρα Σ.Ρ. Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο υλοποιούνται και οι παραμετρικοί

καθορισμοί για διαφορετικούς τύπους PID-ελεγκτών με καθορισμό διαφορετικών τιμών κερδών – ενίσχυσης των υποτημημάτων του ελεγκτή. Επιπλέον ένα σημαντικό τμήμα του κώδικα ασχολείται με την επιβολή και τον έλεγχο για την εφαρμογή περιορισμών σε μεγέθη που αναφέρονται στον κινητήρα Σ.Ρ. Τέτοια μεγέθη είναι η επιτρεπόμενη μαγνητική ροή, το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας κυκλώματος τυπάνου, μέγιστη επιτρεπτή τιμή επιτάχυνσης στην περιστροφή του κινητήρα, κλπ. Επιπλέον ο κώδικας υλοποιεί γραφήματα και απεικονίσεις για το σύνολο σχεδόν των παραμέτρων που αφορούν στον έλεγχο και την λειτουργία του κινητήρα.

Τα μοντέλα ανοικτού και κλειστού βρόχου τα οποία συνίστανται με την περιγραφόμενη συναρτησιακή αποδόμηση (functional decomposition), επιτρέπουν μία ιεραρχική παρουσίαση του συνολικού συστήματος, δίνοντας την δυνατότητα σε έναν χρήστη να αποδομήσει και νοητικά τις διεργασίες που συντελούνται στην λειτουργία και τον έλεγχο ενός κινητήρα Σ.Ρ. Επιπλέον η ιεραρχική αποδόμηση επιτρέπει καλύτερο έλεγχο και εποπτεία του συνολικού κώδικα από την πλευρά της προγραμματιστικής εργασίας και ταυτόχρονα παρέχει την δυνατότητα εντοπισμού και μεταβολών στοιχείων σε συγκεκριμένα δομικά τμήματα της λειτουργίας χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία και η περιγραφή των υπολοίπων. Από υπολογιστικής πλευράς, η αποδόμηση του κώδικα και η επικοινωνία μέσω block συναρτήσεων και ανταλλαγή κλήσεων μεταξύ τους, διευκολύνει την βέλτιστη εκτέλεση των τμημάτων του κώδικα, επιτρέποντας ευελιξία και ταχύτητα στην εκτέλεση του. Το συγκεκριμένο πρότυπο οργάνωσης του κώδικα δίνει την δυνατότητα επιβολής πολύπλοκων και χρονικά μακροσκελών σεναρίων χωρίς να παρουσιάζονται προβλήματα μνήμης ή ευσταθούς λειτουργίας του προγράμματος κατά την εκτέλεση του σε συμβατικά περιβάλλοντα Η/Υ.

4.2 Αναλυτική Περιγραφή των Δομικών Στοιχείων

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα δομικά στοιχεία και τα τμήματα των κυρίων σωμάτων του κώδικα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του ανοκτού και κλειστού βρόχου, δίνοντας έμφαση στις εσωτερικές διεργασίες και στις μεταβλητές που ανταλλάσσονται σε λειτουργία.

4.2.1 Συνάρτηση Φορτίου Tload_func()

Η συνάρτηση Tload_func() υλοποιεί την επιβολή καθορισμένου φορτίου επί του άξονα του κινητήρα Σ.Ρ. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο σύντομης περιγραφής, η συνάρτηση υλοποιεί το συνολικό φορτίο με χρήση ποσοτώσεων κανονικοποιημένου φορτίου τριών τύπων, όπως περιγράφεται στο [1]. Ο παράγοντας T11 υλοποιεί την κανονικοποιημένη ποσόστωση σταθερού φορτίου, ο παράγοντας T12 την συνεισφορά του εξαρτημένου παράγοντα φορτίου από την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και τέλος ο παράγοντας T13 αναφέρεται στην συνεισφορά ποσοστού φορτίου που εξαρτάται από την γωνιακή θέση του άξονα του κινητήρα. Ο ορισμός φορτίου μέσω του συγκεκριμένου μοντέλου δίνει την δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων

τύπων φορτίου που μπορούν να επιβληθούν σε μεταβαλλόμενες χρονικές στιγμές εξετάζοντας με τον τρόπο αυτόν την επίδραση στην λειτουργία του κινητήρα. Στην συνέχεια στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εσωτερικές (local) και εξωτερικές (global) μεταβλητές της συνάρτησης:

Όνομα Μεταβλητής	Τύπος Μεταβλητής	Παρατηρήσεις
Tl1	Όριομα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει τον συντελεστή κανονικοποιημένης ποσόστωσης σταθερού παράγοντα φορτίου.
Tl2	Όριομα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει τον συντελεστή κανονικοποιημένης ποσόστωσης παράγοντα φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω .
Tl3	Όριομα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει τον συντελεστή κανονικοποιημένης ποσόστωσης παράγοντα φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή θέση περιστροφής θ .
Ton	Όριομα Εισόδου	Όνομαστική τιμή ροπής φορτίου για την κανονικοποίηση των μεταβλητών.
omega_o	Όριομα Εισόδου	Όνομαστική τιμή μέγιστης γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα (σε κενό φορτίου).
theta_o	Όριομα Εισόδου	Όνομαστική τιμή αρχικής γωνιακής θέσης περιστροφής κινητήρα.
omega	Όριομα Εισόδου	Τρέχουσα τιμή γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα.
Theta	Όριομα Εισόδου	Τρέχουσα τιμή γωνιακής θέσης περιστροφής κινητήρα.
Tload	Όριομα Εξόδου	Τρέχουσα υπολογισμένη τιμή φορτίου (αποτέλεσμα επιστροφής της συνάρτησης).

Πίνακας 4.1: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης φορτίου Tload_func()

Ο κώδικας για την υλοποίηση της παραπάνω περιγραφόμενης συνάρτησης δίνεται παρακάτω:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               Tload Function
%                               %%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis
%                               %%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes
%                               %%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014    Initial version
%                               %%%%%%%%%

```

```
function y=Tload_func(Tl1, Tl2, Tl3, Ton, omega_o, theta_o, omega, theta)
```

```
y=Tl1+Ton*(Tl2*(omega/omega_o)+Tl3*(theta/theta_o));
```

4.2.2 Συνάρτηση Ρεύματος Τυμπάνου Ia_func()

Η συνάρτηση ρεύματος τυμπάνου Ia_func() υπολογίζει κατά την χρονική στιγμή κλήσης της, την τρέχουσα τιμή του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα τυμπάνου του κινητήρα. Ο υπολογισμός του ρεύματος γίνεται με την χρήση ενός μοντέλου διακριτοποίησης διαφορικής συνεχούς χρόνου πρώτης τάξης (μέθοδος Euler), το οποίο υπολογίζει την τρέχουσα τιμή του ρεύματος βασισμένο σε μία εξίσωση διαφορών που χρησιμοποιεί την προηγούμενη τιμή για τον υπολογισμό της επόμενης. Οι δύο τιμές υπολογισμού βασίζονται στο χρονικό βήμα που έχει τεθεί αρχικά κατά την εφαρμογή της διαδικασίας προσομοίωσης και το οποίο κατά τον τρόπο αυτόν κανονίζει το πλήθος των απαιτούμενων συνολικών υπολογισμών για την χρονική κάλυψη του διαστήματος προσομοίωσης. Η συνάρτηση για την εκτέλεση του υπολογισμού χρειάζεται ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων όπως ορίζεται στην διαφορική εξίσωση υπολογισμού της. Το σύνολο των ορισμάτων καθώς και των εσωτερικών μεταβλητών που απαιτούνται για την κλήση της συνάρτησης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Όνομα Μεταβλητής	Τύπος Μεταβλητής	Παρατηρήσεις
t_step	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει το βήμα προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό υπολογισμό τιμών στην διακριτοποίηση των συνήθων διαφορικών εξισώσεων του συστήματος. Μικρή τιμή για την δεδομένη παράμετρο συνεπάγεται μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών αλλά συνεπάγεται επίσης και μεγαλύτερο αριθμό πράξεων για την σάρωση των χρονικών διαστημάτων.
Ta	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την σταθερά χρόνου του κυκλώματος τυμπάνου. Η τιμή της έχει υπολογισθεί με βάση τις οριζόμενες τιμές στο συνολικό μοντέλο προσομοίωσης της αντίστασης τυμπάνου Ra και της αυτεπαγωγής του La αντίστοιχα.
Vao	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την μέγιστη τιμή της ονομαστικής τάσης τυμπάνου με την οποία λειτουργεί το μοντέλο του κινητήρα Σ.Ρ.
Va	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα τιμή της τάσης τυμπάνου Va, Η μεταβλητή αποτελεί την διέγερση λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. διότι ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα για δεδομένο φορτίο.
Iao	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την ονομαστική τιμή του ρεύματος τυμπάνου. Η συγκεκριμένη τιμή ρυθμίζεται έτσι ώστε ο κινητήρας να μην ξεπεράσει καθορισμένα επίπεδα ρεύματος λειτουργίας.
Ia	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τιμή του ρεύματος τυμπάνου στο προηγούμενο βήμα προσομοίωσης. Θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της τρέχουσας τιμής ρεύματος με βάση το διακριτοποιημένο μοντέλο πρώτης τάξης.

omega	Όρισμα Εισόδου	Τρέχουσα τιμή γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα.
omega_o	Όρισμα Εισόδου	Ονομαστική τιμή μέγιστης γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα (σε κενό φορτίου).
Fd_o	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την μέγιστη ονομαστική τιμή μαγνητικής ροής τυμπάνου.
Fd	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα μαγνητική ροή του κυκλώματος πεδίου. Η εν λόγω μεταβλητή θα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση ελέγχου του κινητήρα από το κύκλωμα μαγνητικού πεδίου.
Ia	Όρισμα Εξόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα τιμή που υπολογίζεται στην έξοδο του κυκλώματος τυμπάνου του κινητήρα (τιμή επιστροφής της συνάρτησης).

Πίνακας 4.2: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης ρεύματος τυμπάνου Ia_func()

Ο κώδικας για την υλοποίηση της παραπάνω περιγραφόμενης συνάρτησης δίνεται παρακάτω:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Ia Function
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                     M. Stamatakis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                     Date           Notes
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                         13/06/2014    Initial version
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function y=Ia_Func(t_step, Ta, Vao, Iao, omega_o, Fdo, Va, Ia, omega, Fd)

```

$$y=Ia+t_step*(Iao/Ta)*((Va/Vao)-(Ia/Iao)-(omega/omega_o)*(Fd/Fdo));$$

4.2.3 Συνάρτηση Μαγνητικής Ροής Κυκλώματος πεδίου fd_func()

Η συνάρτηση μαγνητικής ροής κυκλώματος πεδίου fd_func() υπολογίζει κατά την χρονική στιγμή κλήσης της, την μαγνητική ροή που διαρρέει το κύκλωμα τυμπάνου του κινητήρα. Ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής γίνεται με την χρήση ενός μοντέλου διακριτοποίησης της διαφορικής εξίσωσης συνεχούς χρόνου πρώτης τάξης, το οποίο υπολογίζει την τρέχουσα τιμή βασισμένο σε μία εξίσωση διαφορών που χρησιμοποιεί την προηγούμενη της τιμή (μέθοδος Euler). Οι δύο τιμές υπολογισμού βασίζονται στο χρονικό βήμα που έχει τεθεί αρχικά κατά την εφαρμογή της διαδικασίας προσομοίωσης και το οποίο κατά τον τρόπο αυτόν κανονίζει το πλήθος των απαιτούμενων συνολικών υπολογισμών. Η συνάρτηση για την εκτέλεση του υπολογισμού χρειάζεται ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων όπως ορίζεται στην διαφορική εξίσωση υπολογισμού της. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη εξίσωση είναι μη γραμμική λόγω της μορφής που έχει η καμπύλη μαγνητίσεως του υλικού και για τον λόγο αυτό, αναλυτική της επίλυση χωρίς γραμμικοποίηση σε κλειστή μορφή δεν θα ήταν δυνατή. Εντούτοις επειδή το μοντέλο που χρησιμοποιείται κάνει αναλυτική αριθμητική

επίλυση αυτής μπορεί να την υπολογίσει προσδίδοντας την μέγιστη ακρίβεια στους εκτελούμενους υπολογισμούς, σε σχέση με γραμμικοποιημένα μοντέλα προσέγγισης της. Επιλογή οποιουδήποτε τύπου μη γραμμικής μορφής μπορεί να καθορισθεί για το αναλυτικό μοντέλο επίλυσης κατά την επιλογή του χρήστη χωρίς να επηρεάσει την οργάνωση και την λειτουργία των υπολοίπων διεργασιών του μοντέλου του συστήματος. Το σύνολο των ορισμάτων καθώς και των εσωτερικών μεταβλητών που απαιτούνται για την κλήση της συνάρτησης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Όνομα Μεταβλητής	Τύπος Μεταβλητής	Παρατηρήσεις
t_step	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει το βήμα προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό υπολογισμό τιμών στην διακριτοποίηση των συνήθων διαφορικών εξισώσεων του συστήματος.
Tfo	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την σταθερά χρόνου του κυκλώματος πεδίου.
Vfo	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την μέγιστη τιμή της ονομαστικής τάσης κυκλώματος πεδίου με την οποία λειτουργεί το μοντέλο του κινητήρα Σ.Ρ.
Vf	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα τιμή της τάσης κυκλώματος πεδίου Vf, Η μεταβλητή αποτελεί την διέγερση λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. διότι ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα για δεδομένο φορτίο.
Fd_o	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την μέγιστη ονομαστική τιμή μαγνητικής ροής τυμπάνου.
Fd	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα μαγνητική ροή του κυκλώματος πεδίου. Η εν λόγω μεταβλητή θα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση ελέγχου του κινητήρα από το κύκλωμα πεδίου.
fd	Όρισμα Εξόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα τιμή της μαγνητικής ροής του κυκλώματος πεδίου του κινητήρα (τιμή επιστροφής της συνάρτησης).

Πίνακας 4.3: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης μαγνητικής ροής fd_func()

Ο κώδικας για την υλοποίηση της παραπάνω περιγραφόμενης συνάρτησης δίνεται παρακάτω:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               Ia Function
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014    Initial version
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

function y=Fd_Func(t_step, Vfo, Fdo, Tfo, Vf, Fd)

y=Fd+t_step*(Fdo/Tfo)*((Vf/Vfo)-(Fd/Fdo)^3);

4.2.4 Συνάρτηση Γωνιακής Θέσης theta_func()

Η συνάρτηση γωνιακής θέσης κινητήρα theta_func() υπολογίζει κατά την χρονική στιγμή κλήσης της την τρέχουσα γωνιακή θέση του ρότορα του κινητήρα. Ο υπολογισμός της τρέχουσας θέσης γίνεται με την χρήση ενός μοντέλου διακριτοποίησης της διαφορικής εξίσωσης συνεχούς χρόνου πρώτης τάξης, το οποίο υπολογίζει την τρέχουσα τιμή βασισμένο σε μία εξίσωση διαφορών που χρησιμοποιεί την προηγούμενη της τιμή. Οι δύο τιμές υπολογισμού βασίζονται στο χρονικό βήμα που έχει τεθεί αρχικά κατά την εφαρμογή της διαδικασίας προσομοίωσης και το οποίο κατά τον τρόπο αυτόν κανονίζει το πλήθος των απαιτούμενων συνολικών πράξεων. Η συνάρτηση για την εκτέλεση του υπολογισμού χρειάζεται ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων όπως ορίζεται στην διαφορική εξίσωση υπολογισμού της. Το σύνολο των ορισμάτων καθώς και των εσωτερικών μεταβλητών που απαιτούνται για την κλήση της συνάρτησης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Όνομα Μεταβλητής	Τύπος Μεταβλητής	Παρατηρήσεις
t_step	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει το βήμα προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό υπολογισμό τιμών στην διακριτοποίηση των συνήθων διαφορικών εξισώσεων του συστήματος.
T_theta	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την σταθερά χρόνου της γωνιακής θέσης και υπολογίζεται στο μοντέλο από τις τιμές της αρχικής γωνιακής θέσης του άξονα και την ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.
omega_o	Όρισμα Εισόδου	Ονομαστική τιμή μέγιστης γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα (σε κενό φορτίου).
theta_o	Όρισμα Εισόδου	Ονομαστική τιμή αρχικής γωνιακής θέσης περιστροφής κινητήρα.
omega	Όρισμα Εισόδου	Τρέχουσα τιμή γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα.
theta	Όρισμα Εισόδου	Τρέχουσα τιμή γωνιακής θέσης περιστροφής κινητήρα (τιμή επιστροφής της συνάρτησης).

Πίνακας 4.4: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης γωνιακής θέσης theta_func()

Ο κώδικας για την υλοποίηση της παραπάνω περιγραφόμενης συνάρτησης δίνεται παρακάτω:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Ia Function
```

```

% Author: M. Stamatakis
% Version Date Notes
% 1.0 13/06/2014 Initial version
f

```

```
function y=theta_Func(t_step, omega_o, theta_o, T_theta, omega, theta)
```

```
y=theta+t_step*(theta_o/T_theta)*(omega/omega_o);
```

4.2.5 Συνάρτηση Γωνιακής Ταχύτητας

Η συνάρτηση γωνιακής ταχύτητας κινητήρα omega_func() υπολογίζει κατά την χρονική στιγμή κλήσης της, την τρέχουσα γωνιακή ταχύτητα του ρότορα του κινητήρα. Ο υπολογισμός της τρέχουσας γωνιακής ταχύτητας γίνεται με την χρήση ενός μοντέλου διακριτοποίησης της διαφορικής εξίσωσης συνεχούς χρόνου πρώτης τάξης, το οποίο υπολογίζει την τρέχουσα τιμή βασισμένο σε μία εξίσωση διαφορών που χρησιμοποιεί την προηγούμενη της τιμή (μέθοδος Euler). Οι δύο τιμές υπολογισμού βασίζονται στο χρονικό βήμα που έχει τεθεί αρχικά κατά την εφαρμογή της διαδικασίας προσομοίωσης και το οποίο κατά τον τρόπο αυτόν κανονίζει το πλήθος των απαιτούμενων συνολικών πράξεων. Η συνάρτηση για την εκτέλεση του υπολογισμού χρειάζεται ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων όπως ορίζεται στην διαφορική εξίσωση υπολογισμού της. Το σύνολο των ορισμάτων καθώς και των εσωτερικών μεταβλητών που απαιτούνται για την κλήση της συνάρτησης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Όνομα Μεταβλητής	Τύπος Μεταβλητής	Παρατηρήσεις
t_step	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει το βήμα προσομοίωσης το οποίο χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό υπολογισμό τιμών στην διακριτοποίηση των συνήθων διαφορικών εξισώσεων του συστήματος.
Tm	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την σταθερά χρόνου της γωνιακής ταχύτητας και υπολογίζεται στο μοντέλο από τις τιμές της ροπής αδράνειας του άξονα (J), την ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (ω) και την ονομαστική ροπή φορτίου (To).
omega_o	Όρισμα Εισόδου	Ονομαστική τιμή μέγιστης γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα (σε κενό φορτίου).
Iao	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την ονομαστική τιμή του ρεύματος τυμπάνου. Η συγκεκριμένη τιμή ρυθμίζεται έτσι ώστε ο κινητήρας να μην ξεπεράσει καθορισμένα επίπεδα ρεύματος λειτουργίας.
Ia	Όρισμα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τιμή του ρεύματος τυμπάνου στο προηγούμενο βήμα προσομοίωσης.

Fd_o	Όριομα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την μέγιστη ονομαστική τιμή μαγνητικής ροής τυμπάνου στο προηγούμενο βήμα προσομοίωσης.
Fd	Όριομα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα μαγνητική ροή του κυκλώματος πεδίου στο προηγούμενο βήμα της προσομοίωσης.
Tl	Όριομα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την τρέχουσα επιβαλλόμενη ροπή φορτίου στον άξονα του κινητήρα, όπως υπολογίζεται από την συνάρτηση φορτίου Tload_func().
Tlo	Όριομα Εισόδου	Η μεταβλητή ορίζει την μέγιστη ονομαστική ροπή φορτίου που είναι αποδεκτή από τον κινητήρα Σ.Ρ.
omega	Όριομα Εξόδου	Τρέχουσα τιμή γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κινητήρα (τιμή επιστροφής της συνάρτησης).

Πίνακας 4.5: Περιγραφή ορισμάτων και μεταβλητών της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας omega_func()

Ο κώδικας για την υλοποίηση της παραπάνω περιγραφόμενης συνάρτησης δίνεται παρακάτω:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Ia Function
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date       Notes
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014  Initial version
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function y=omega_Func(t_step, Iao, Fdo, Ton, omega_o, Tm, Ia, Fd, Tl, omega)
```

```
y=omega+t_step*(omega_o/Tm)*((Ia/Iao)*(Fd/Fdo)-(Tl/Ton));
```

4.3 Κώδικας Επιβολής Περιορισμών των Παραμέτρων Λειτουργίας του μοντέλου

Οι περιορισμοί στην λειτουργία του μοντέλου αποτελούν ειδικά τμήματα κώδικα που έχουν προστεθεί συμπληρωματικά στο μοντέλο, έτσι ώστε (α) να ανιχνεύουν πρωτίστως συνθήκες όπου συγκεκριμένες μεταβλητές λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. τίθενται εκτός ονομαστικών ορίων και (β) να περιορίζουν αυτές μετά την ανίχνευση τέτοιων φαινομένων, εντός των ζωνών προδιαγραφών. Η παρουσία περιοριστικών σχέσεων καθιστά το μοντέλο ρεαλιστικότερο και δίνει την δυνατότητα περαιτέρω πρακτικής χρησιμότητας του, για την ανίχνευση και των χειρισμό ειδικών συνθηκών λειτουργίας. Η δυνατότητα ανίχνευσης και διόρθωσης των παραμέτρων λειτουργίας του μοντέλου εντός των προκαθορισμένων ονομαστικών ορίων τους, αφορά συνολικά όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας της προσομοίωσης. Στην εμφάνιση ενός τέτοιου φαινομένου, η εν λόγω μεταβλητή καθώς και η χρονική στιγμή στην οποία αναφέρεται η προσομοίωση που ανίχνευσε το γεγονός (event), τυπώνονται στο

παράθυρο εκτέλεσης του κώδικα Matlab, ειδοποιώντας τον χρήστη για την συνθήκη εμφάνισης (warning). Ο κώδικας που χειρίζεται την εμφάνιση συνθηκών εκτός ζώνης λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. αφορά στις μεταβλητές, Tload, Ia, Fd και omega, δηλ. για τις συναρτήσεις υπολογισμού της τιμής της επαγόμενης στον άξονα ροπής φορτίου, το ρεύμα κυκλώματος τυμπάνου, την μαγνητική ροή του κυκλώματος πεδίου καθώς και την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα του κινητήρα.

Ο κώδικας για τον έλεγχο και τον χειρισμό συνθηκών εκτός λειτουργίας για τις παραπάνω ονομαστικές μεταβλητές διαφοροποιείται στο ανοικτό και στο κλειστό μοντέλο περιγραφής του κινητήρα Σ.Ρ. Ειδικότερα στο μοντέλο κλειστού βρόχου του κινητήρα Σ.Ρ. κατά την εφαρμογή του, μετά την ανίχνευση του γεγονότος ότι μία ή περισσότερες μεταβλητές κατά την τρέχουσα χρονική στιγμή της προσομοίωσης του σεναρίου, είναι εκτός ορίων, πρωταρχικό μέλημα του κώδικα είναι να επιβάλλει την μέγιστη επιτρεπόμενη ονομαστική τιμή για το μέγεθος αυτό. Ο συγκεκριμένος χειρισμός είναι ισοδύναμος με τον χειρισμό που θα επέβαλε ένα πραγματικά υλοποιημένο σύστημα που μέσω κυκλωμάτων ή οργάνων παρακολούθησης θα ανίχνευε μία τέτοια συνθήκη να εμφανίζεται στην λειτουργία του κινητήρα Σ.Ρ. στην πράξη. Η επιβολή των περιοριστικών διεργασιών στις παραμέτρους λειτουργίας είναι περισσότερο επιβεβλημένη στην συνδεσμολογία κλειστού βρόχου απ'ότι στην συνδεσμολογία ανοικτού βρόχου του κινητήρα, επειδή η ύπαρξη του PID-ελεγκτή και ο έλεγχος που αυτός επιβάλλει στην συνολική λειτουργία του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή ακραίων συνθηκών στο σύστημα του κινητήρα, που ενδεχόμενα ίσως και να κινούνται εκτός ορίων. Όπως μπορούμε να αντιληφθούμε και θα δούμε και κατά τις φάσεις της προσομοίωσης, το γεγονός αυτό, οφείλεται στο ότι πρωταρχικός στόχος της λειτουργίας του PID-ελεγκτή στην συνολική λειτουργία ενός συστήματος υπό έλεγχο, είναι η εξασφάλιση μηδενικού σφάλματος σε όσο το δυνατόν συντομότερο χρονικό διάστημα από την χρονική στιγμή ανίχνευσης της συνθήκης σφάλματος, χωρίς να περιορίζει από μόνος του την δράση του στα ανεκτά όρια τιμών για την λειτουργία ενός συστήματος υπό έλεγχο.

Ανοικτό μοντέλο λειτουργίας κινητήρα Σ.Ρ.

Στο ανοικτό μοντέλο, ο κώδικας προσδιορίζει τις χρονικές στιγμές και τις τιμές των ελεγχόμενων μεγεθών εμφανίζοντας κατάλληλα μηνύματα (warnings) στο παράθυρο εκτέλεσης. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα με χρήση της κατάλληλης boolean μεταβλητής (suspend_warnings) να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει την εμφάνιση αυτών των μηνυμάτων στην φάση εκτέλεσης του σεναρίου. Ο κώδικας του μοντέλου δεν περιορίζει τις ανωτέρω τιμές ούτε λαμβάνει περαιτέρω πρόνοια για να τις επαναφέρει εντός των ζωνών προδιαγραφών για την λειτουργία (διαδικασία ανίχνευσης όχι διόρθωσης). Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει την δυνατότητα μελέτης των χαρακτηριστικών προσομοίωσης του κινητήρα Σ.Ρ. χωρίς αυτός να περιορίζεται καθ'οποιονδήποτε τρόπο σε ονομαστικές τιμές. Η συγκεκριμένη δυνατότητα περιορισμού έχει σαφώς μεγαλύτερη σημασία στην εφαρμογή της στα πλαίσια λειτουργίας ενός κλειστού συστήματος που περιλαμβάνει το μοντέλο της λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. και τον PID-ελεγκτή, προσδίδοντας μεγαλύτερη ελεγκσιμότητα στο συνολικό σύστημα. Επιπλέον δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα όμοια με ανάλογη χρήση συστημάτων, οργάνων και κυκλωμάτων προστασίας για τα οποία όμως δεν χρειάζεται να αναπτυχθούν περαιτέρω μοντέλα για την εφαρμογή τους στο κλειστό σύστημα. Το συμπέρασμα από την εφαρμογή του κώδικα για τον έλεγχο των περιοχών λειτουργίας των παραμέτρων του κινητήρα είναι ότι παρέχει την δυνατότητα

παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο των συνθηκών και των μεγεθών που αναφέρονται διασυνεχώς στην λειτουργία του κινητήρα Σ.Ρ.

Το δείγμα του κώδικα που είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή των μηχανισμών περιορισμού στο μοντέλο παρουσιάζεται στις ακόλουθες γραμμές:

```
if (suspend_warnings=='n')

    if ((Tload(i)>To) | (Tload(i)<-To))
        disp('Tload out of bounds!');
        disp('Value');
        disp(Tload(i));
        disp('Time');
        disp(t_start+(i-1)*t_step);
    end;

    if ((Ia(i)>Iao) | (Ia(i)<-Iao))
        disp('Ia out of bounds!');
        disp('Value');
        disp(Ia(i));
        disp('Time');
        disp(t_start+(i-1)*t_step);
    end;

    if ((Fd(i)>Fdo) | (Fd(i)<-Fdo))
        disp('Fd out of bounds!');
        disp('Value');
        disp(Fd(i));
        disp('Time');
        disp(t_start+(i-1)*t_step);
    end;

    if ((omega(i)>omega_o) | (omega(i)<-omega_o))
        disp('Omega out of bounds!');
        disp('Value');
        disp(omega(i));
        disp('Time');
        disp(t_start+(i-1)*t_step);
    end;

end;
```

Κλειστό μοντέλο λειτουργίας κινητήρα Σ.Ρ.

Στο κλειστό μοντέλο λειτουργίας του κινητήρα το οποίο συμπεριλαμβάνει σε συνδεσμολογία κλειστού βρόχου και τον PID-ελεγκτή, μαζί με το μοντέλο του κινητήρα Σ.Ρ. όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η λειτουργία μηχανισμών περιορισμού αφορά στις μεταβλητές Ia, Fd, και acc_limit, δηλ. τις μεταβλητές του ρεύματος τυμπάνου, της μαγνητικής ροής του κυκλώματος πεδίου και επιπλέον της μέγιστης επιτρεπόμενης περιστροφικής επιτάχυνσης του συστήματος. Στις συγκεκριμένες μεταβλητές επιβάλλονται περιορισμοί στην περίπτωση που αυτές βρίσκονται εκτός ορίων, αποκαθιστώντας αυτές στα κανονικά όρια επιτρεπτών ονομαστικών τιμών που έχουν προκαθορισθεί στο μοντέλο από τον χρήστη. Στην φάση δηλ. του μοντέλου κλειστού βρόχου ο κώδικας περιορισμών εκτελεί παράλληλα και την διαγνωστική φάση ανίχνευσης αλλά και την επιβολή διορθώσεων στις τιμές των μεταβλητών όπως έχουν προκαθορισθεί στα όρια λειτουργίας από τον χρήστη.

Το δείγμα του κώδικα που είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή των μηχανισμών ανίχνευσης και περιορισμού στο μοντέλο παρουσιάζεται στις ακόλουθες γραμμές:

```
%-----
% Calculation of Acceleration levels
%-----

acc_level(i)=(omega(i)-omega(i-1))/t_step;

if (enable_acc_limit=='y')
    if (acc_level(i)>acc_limit)
        omega(i)=omega(i-1)+acc_limit*t_step;
        acc_level(i)=acc_limit;
    elseif (acc_level(i)<-acc_limit)
        omega(i)=omega(i-1)-acc_limit*t_step;
        acc_level(i)=-acc_limit;
    end;
    theta(i)=theta(i-1)+omega(i)*t_step;
end;
%-----

%-----
% Calculation of Ia levels
%-----

if (enable_Ia_limit=='y')
    if (Ia(i)>Ia_limit)
        Ia(i)=Ia_limit;
    elseif (Ia(i)<-Ia_limit)
        Ia(i)=-Ia_limit;
    end;
end;
%-----

%-----
% Calculation of Fd levels
%-----

if (enable_Fd_limit=='y')
    if (Fd(i)>Fd_limit)
        Fd(i)=Fd_limit;
    elseif (Fd(i)<-Fd_limit)
        Fd(i)=-Fd_limit;
    end;
end;
%-----
```

Στην συνέχεια του παρόντος τμήματος θα παρουσιαστούν οι ειδικές ενέργειες που εκτελούνται από τον κώδικα κατά την ανίχνευση συνθηκών περιορισμού.

4.3.1 Περιορισμός Γωνιακής Επιτάχυνσης

Ο περιορισμός της γωνιακής περιστροφικής επιτάχυνσης του ρότορα του κινητήρα επιβάλλεται όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μόνο στο συνολικό κλειστό μοντέλο περιγραφής. Ο περιορισμός έχει ως στόχο να συγκρατήσει την γωνιακή επιτάχυνση χαμηλότερα από μία μέγιστη τιμή. Η διαδικασία ενεργοποιείται όταν η boolean μεταβλητή `enable_ac_limit='y'`. Η μέγιστη τιμή για την περιστροφική επιτάχυνση τίθεται στην μεταβλητή `acc_limit=max_value`. Οι ανωτέρω μεταβλητές ορίζονται στο κύριο σώμα του κώδικα περιγραφής του κλειστού μοντέλου.

4.3.2 Περιορισμός Ρεύματος/Τάσεως Τυμπάνου

Ο περιορισμός του ρεύματος και της τάσης τυμπάνου του κινητήρα επιβάλλεται όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μόνο στο συνολικό κλειστό μοντέλο περιγραφής. Ο περιορισμός έχει ως στόχο να συγκρατήσει την τάση και το ρεύμα του κυκλώματος τυμπάνου χαμηλότερα από μία μέγιστη τιμή. Η διαδικασία ενεργοποιείται όταν η Boolean μεταβλητή `enable_Ia_limit='y'`. Η μέγιστη τιμή για το ρεύμα τυμπάνου τίθεται στην μεταβλητή `Ia_limit=max_value`. Η τιμή της τάσης τυμπάνου διασφαλίζεται από την απευθείας ανάθεση τιμής στην μεταβλητή `Va=value` η οποία και αποτελεί μεταβλητή ελέγχου για τον έλεγχο και την λειτουργία του κινητήρα Σ.Ρ. Οι ανωτέρω μεταβλητές ορίζονται στο κύριο σώμα του κώδικα περιγραφής του κλειστού μοντέλου.

4.3.3 Περιορισμός Μαγνητικής Ροής στο κύκλωμα πεδίου

Ο περιορισμός της μαγνητικής ροής του κυκλώματος πεδίου του κινητήρα επιβάλλεται όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μόνο στο συνολικό κλειστό μοντέλο περιγραφής. Ο περιορισμός έχει ως στόχο να συγκρατήσει την μαγνητική ροή χαμηλότερα από την μέγιστη επιτρεπτή τιμή της. Η διαδικασία ενεργοποιείται όταν η Boolean μεταβλητή `enable_Fd_limit='y'`. Η μέγιστη τιμή για την μαγνητική ροή τίθεται στην μεταβλητή `Fd_limit=max_value`. Οι ανωτέρω μεταβλητές ορίζονται στο κύριο σώμα του κώδικα περιγραφής του κλειστού μοντέλου.

4.4 Γραφικές Αναπαραστάσεις των μεγεθών του μοντέλου κινητήρα

Το μοντέλο προσομοίωσης τόσο του ανοικτού όσο και του κλειστού βρόχου απεικονίζει κάποιες από τις σημαντικές μεταβλητές λειτουργίας του συνολικού συστήματος γραφικά όπως αυτές μεταβάλλονται στο χρόνο. Η γραφική αναπαράσταση εντοπίζεται σε ανεξάρτητα παράθυρα απεικόνισης, τα οποία συγκεντρώνουν τα αριθμητικά δεδομένα για όλη την χρονική διάρκεια

προσομοίωσης του μοντέλου. Αναλυτικά οι μεταβλητές του συστήματος που αναφέρονται στην γραφική αναπαράσταση είναι οι ακόλουθες:

Όνομα Μεταβλητής που απεικονίζεται γραφικά	Παρατηρήσεις
Tload/To	Γραφική απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου του κινητήρα Σ.Ρ.
Ia/Iao	Γραφική απεικόνιση του κανονικοποιημένου ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα Σ.Ρ.
Fd/Fdo	Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης μαγνητικής ροής του κυκλώματος πεδίου του κινητήρα Σ.Ρ.
omega/omega_o	Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης γωνιακής συχνότητας περιστροφής του ρότορα του κινητήρα Σ.Ρ.
Theta/Theta_o	Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης γωνιακής θέσης του ρότορα του κινητήρα Σ.Ρ.
Va/Vao	Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης τάσης λειτουργίας κυκλώματος τυμπάνου για τον κινητήρα Σ.Ρ.
Vf/Vfo	Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης τάσης λειτουργίας κυκλώματος πεδίου του κινητήρα Σ.Ρ.
acc_level	Γραφική παράσταση των επιπέδων περιστροφικής επιτάχυνσης του ρότορα του κινητήρα Σ.Ρ.
err	Γραφική παράσταση του προκύπτοντος χρονικά μεταβαλλόμενου σφάλματος του PID-ελεγκτή.

Πίνακας 4.6: Μεταβλητές των μοντέλων προσομοίωσης του μοντέλου κινητήρα Σ.Ρ. ανοικτού/κλειστού βρόχου που απεικονίζονται γραφικά

Οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις μπορούν να ενεργοποιηθούν από το μοντέλο περιγραφής του συστήματος, με την χρήση αντίστοιχων σε όνομα Boolean μεταβλητών. Το τμήμα του κώδικα που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή των γραφικών παραστάσεων στο μοντέλο λειτουργίας κλειστού βρόχου του κινητήρα Σ.Ρ. παρουσιάζεται τις παρακάτω γραμμές:

```

if (plot_Tload=='y')

figure(1);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Tload(i)/To)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized load TI/To ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Load ');

end;

if (plot_Ia=='y')

figure(2);
gcf;
shg;

```

```

i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Ia(i)/Iao)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum Current Ia/Iao ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Drum Current ');

end;

if (plot_Fd=='y')

figure(3);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Fd(i)/Fdo)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum magnetic flow ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Drum Magnetic Flow ');

end;

if (plot_omega=='y')

figure(4);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,omega(i)/omega_o)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized angular velocity ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Angular Velocity ');

end;

if (plot_theta=='y')

figure(5);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,theta(i)/theta_o)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized angular position ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Angular Position ');

end;

if (plot_Va=='y')

figure(6);

```

```

gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Va(i)/Vao)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum Voltage Va/Vao ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Drum Voltage ');

end;

if (plot_Vf=='y')

figure(7);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Vf(i)/Vfo)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized field Voltage Vf/Vfo ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Field Voltage ');

end;

if (plot_acc=='y')

figure(8);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,acc_level(i))
box on;
grid;
title(' Graphical overview of DC Motor Acceleration Levels ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Acceleration Levels (rad/sec^2) ');

end;

if (plot_err=='y')

figure(9);
gcf;
shg;
i=1:1:pts-1;
plot(t_start+(i-1)*t_step,err(i))
box on;
grid;
title(' Graphical overview of PID Controller Error ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' PID Controller Error ');

end;

```

4.5 Αρχικές Μεταβλητές του Σώματος Κώδικα

Στο αρχικό σώμα του κώδικα ορίζεται ένα σύνολο μεταβλητών και για το μοντέλο ανοικτού αλλά και για το μοντέλο κλειστού βρόχου που καθορίζουν τις εκτελούμενες διεργασίες από το μοντέλο. Αναλυτικά οι παράμετροι αυτοί για το μοντέλο κλειστού βρόχου, είναι:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Παράμετροι Μοντέλου Κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
_step=0.01;           % Βήμα προσομοίωσης (sec)
t_start=0;           % Χρονική στιγμή έναρξης προσομοίωσης (sec)
t_stop=1000;         % Χρονική στιγμή λήξης προσομοίωσης (sec)
t_load_start=200;    % Χρονική στιγμή εισαγωγής φορτίου στον κινητήρα (sec)

Tl1=50;              % Σταθερή Συνιστώσα φορτίου
Tl2=0.1;             % Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3=0.00001;        % Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης

plot_Tload='y';      % Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia='y';         % Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd='y';         % Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής
                    % τυμπάνου
plot_omega='y';      % Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής
                    % ταχύτητας
plot_theta='y';      % Γραφική παράσταση της συνάρτησης τάσης τυμπάνου
plot_Va='y';         % Γραφική παράσταση της συνάρτησης τάσης τυμπάνου
plot_Vf='y';         % Γραφική παράσταση της συνάρτησης τάσης πεδίου
plot_acc='y';        % Γραφική παράσταση της γωνιακής επιτάχυνσης
plot_err='y';        % Γραφική παράσταση του σφάλματος του PID-ελεγκτή

suspend_warnings='y'; % Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίου για τις
                    % παραμέτρους
%-----
%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Παράμετροι και Προδιαγραφές Λειτουργίας PID Ελεγκτή
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
control_of_Va='n';   % Ενεργοποίηση ελέγχου κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf='y';   % Ενεργοποίηση ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option=0;    % Τύπος Ελέγχου 0=θέση 1=Ταχύτητα

enable_acc_limit='n'; % Ενεργοποίηση των ορίων γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit=1;         % Μέγιστη Επιτάχυνση Αναφοράς (-
acc_limit<=acc<=acc_limit)

enable_Ia_limit='n'; % Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit=50;         % Μέγιστη Απόλυτη τιμή του Ia (-Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)

enable_Fd_limit='n'; % Ενεργοποίηση του ορίου Μαγνητικής Ροής Πεδίου
Fd_limit=5;         % Μέγιστη Απόλυτη τιμή του Fd (-Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)

theta_ref=50;       % Γωνιακή Θέση Αναφοράς
omega_ref=0.65;     % Γωνιακή Ταχύτητα Αναφοράς

Kpva=1.1;           % Παράμετρος Αναλογικής Ενίσχυσης
```

```

Kdva=0.01;          % Παράμετρος Διαφορικής Ενίσχυσης
Kiva=0.5;           % Παράμετρος Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης

Kpvf=1.0;           % ΔάñÛäïíðáð ÁíáëïãéêÐð Áίβó÷ðóçð
Kdvf=5.0;           % ΔάñÛäïíðáð ÁέαöïñέêÐð Áίβó÷ðóçð
Kivf=0.0;           % ΔάñÛäïíðáð ÌëïêεçñùðέêÐð Áίβó÷ðóçð

%-----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                Παράμετροι του dc_mot_func
%    Εάν αλλαχθούν αυτές οι παραμέτροι θα πρέπει να αλλαχθούν και στην
dc_mot_func!!!
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Vao=200;             % Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών κινητήρα Σ.Ρ. (V)
omega_o=50;         % Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ.
(rad/sec)
Fdo=10;              % Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo=100;             % Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J=10;                % Ροπή Αδράνειας Άξονα (Kgrxm^2)
Ra=1.0;              % Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La=2.0;              % Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου (H)
Rf=0.8;              % Αντίσταση Κυκλώματος Πεδίου (Ohm)
Nf=100;              % Αριθμός Σπειρών Κυκλώματος Διέγερσης
theta_o=pi;          % Αρχική γωνία κινητήρα (rad)

%-----

```

Ο καθορισμός των ανωτέρω παραμέτρων γίνεται στην φάση πριν την διαδικασία εκτέλεσης της προσομοίωσης, ενώ επιπλέον οι παράμετροι αυτές μπορούν να αλλαχθούν κάνοντας διαφορετικό το χειρισμό των διεργασιών του μοντέλου του κινητήρα από σενάριο προσομοίωσης σε άλλο σενάριο προσομοίωσης. Επιπλέον η ύπαρξη των παραμέτρων αυτών καθιστούν το μοντέλο πολυπαραμετρικό και δυναμικό δίνοντας ευελιξία στις επιλογές του χρήστη.

4.6 Καθορισμός Μεταβλητών και Διαδικασία Προσομοιώσεων

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί την παρουσίαση του μοντέλου κινητήρα Σ.Ρ. ανοικτού και κλειστού βρόχου, θα ακολουθήσει η διαδικασία προσομοίωσης. Η διαδικασία της προσομοίωσης θα κάνει χρήση ειδικών περιπτώσεων και τιμών για τις παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. διασφαλίζοντας μία ποικιλία σεναρίων και καταστάσεων, για να εξετασθεί διεξοδικά η συμπεριφορά του μοντέλου, του PID-ελεγκτή αλλά το σημαντικότερο είναι η μελέτη της δυναμικής και μεταβατικής συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος του κινητήρα.

Επιπλέον στόχος της εφαρμογής του ελεγκτή είναι η επίτευξη συνθηκών ελέγχου για το σύστημα του κινήρα Σ.Ρ.

5

Προσομοίωση του Μαθηματικού Μοντέλου του κινητήρα Σ.Ρ.

5.1 Προσομοίωση Ανοικτού Βρόχου

Κατά την φάση προσομοίωσης της λειτουργίας του ανοικτού μοντέλου του κινητήρα, θα θεωρήσουμε μία ομάδα σεναρίων, η οποία δεν κάνει χρήση καμίας τεχνικής αντιστάθμισης από τα κυκλώματα του τυμπάνου ή του ελέγχου του μαγνητικού πεδίου. Σε αυτήν την περίπτωση και τα δύο κυκλώματα ελέγχου, έχουν τεθεί σε προκαθορισμένες και σταθερές τιμές που έχουν επιλεγεί στα πλαίσια των σεναρίων με βάση τις επιτρεπτές ονομαστικές τιμές, και οι οποίες δεν δύναται να μεταβληθούν κατά την διάρκεια εκτέλεσης του σεναρίου. Επιπλέον το σενάριο προϋποθέτει αρχικά μία φάση εκκίνησης για τον κινητήρα χωρίς την επιβολή φορτίου (IDLE φάση κινητήρα – φάση κενού φορτίου), έτσι ώστε να αποκατασταθεί η λειτουργία του ρότορα αυτού στο προκαθορισμένο επίπεδο περιστροφής και στην συνέχεια επιβάλλεται σε προκαθορισμένη χρονική στιγμή από τον χρήστη, το φορτίο στον άξονα του κινητήρα. Το φορτίο του κινητήρα όπως παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελείται από τρεις ποσοτώσεις όπου η κάθε μία αναφέρεται στον σταθερό, τον εξαρτώμενο από την γωνιακή ταχύτητα, και τέλος τον εξαρτώμενο παράγοντα από την γωνιακή θέση του ρότορα. Αυτό δίνει επίσης την δυνατότητα για την επιβολή σύνθετων τύπων φορτίων τα οποία και θα χρησιμοποιήσουμε στα σενάρια προσομοιώσεων που θα εκτελεστούν.

Οι παράμετροι του κυρίως σώματος του κώδικα ανοικτού μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step		Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start		Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop		Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start		Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
control_of_Va		Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf		Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
Vao		Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o		Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo		Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo		Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J		Ροπή Αδράνειας Άξονα ($Kgrxm^2$)
Ra		Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La		Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf		Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf		Αριθμός σπειρών κυκλώματος διεγερσης
theta_o		Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)
Tl1		Σταθερή συνιστώσα φορτίου
Tl2		Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3		Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
plot_Tload		Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia		Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd		Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega		Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας
plot_theta		Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
suspend_warnings		Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους

Πίνακας 5.1: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου

Ο παραπάνω πίνακας συνοψίζει το σύνολο των παραμέτρων προς καθορισμό στα σενάρια προσομοίωσης για το σύστημα ανοικτού βρόχου που θα ακολουθήσουν.

5.1.1 Ανοικτό Μοντέλο χωρίς Έλεγχο

Τα σενάρια που θα χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή προσομοιώσεων αφορούν σε 3 κατηγορίες φορτίων (α) σταθερού φορτίου (β) φορτίου με σταθερή ποσόστωση και επιπλέον εξάρτησε από την γωνιακή ταχύτητα και τέλος (γ) φορτίου με εξάρτηση από όλες τις ποσοτώσεις δηλ. και σταθερή και συνιστώσα

εξαρτώμενη από την γωνιακή ταχύτητα και την γωνιακή θέση του κινητήρα. Έτσι το κάθε σενάριο προσομοίωσης επιβαρύνει επιπλέον σε φορτίο την λειτουργία του κινητήρα προσθέτοντας και μία ακόμα συνιστώσα. Για όλα τα σενάρια προσομοίωσης ανοικτού βρόχου οι παρακάτω παράμετροι της λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. θα διατηρηθούν σταθερές:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step	0,01	Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start	0	Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop	600	Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start	100	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
control_of_Va	‘n’	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	‘n’	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
Vao	200	Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o	50	Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo	10	Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo	100	Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J	10	Ροπή Αδράνειας Άξονα ($Kgrxm^2$)
Ra	1.0	Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La	2.0	Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf	0.8	Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf	100	Αριθμός σπειρών κυκλώματος διέγερσης
theta_o	π	Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)
plot_Tload	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας
plot_theta	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
suspend_warnings	‘n’	Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους

Πίνακας 5.2: Σταθερές παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου χωρίς έλεγχο

5.1.1.1 Σενάριο Προσομοίωσης σταθερού φορτίου

Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	120	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης

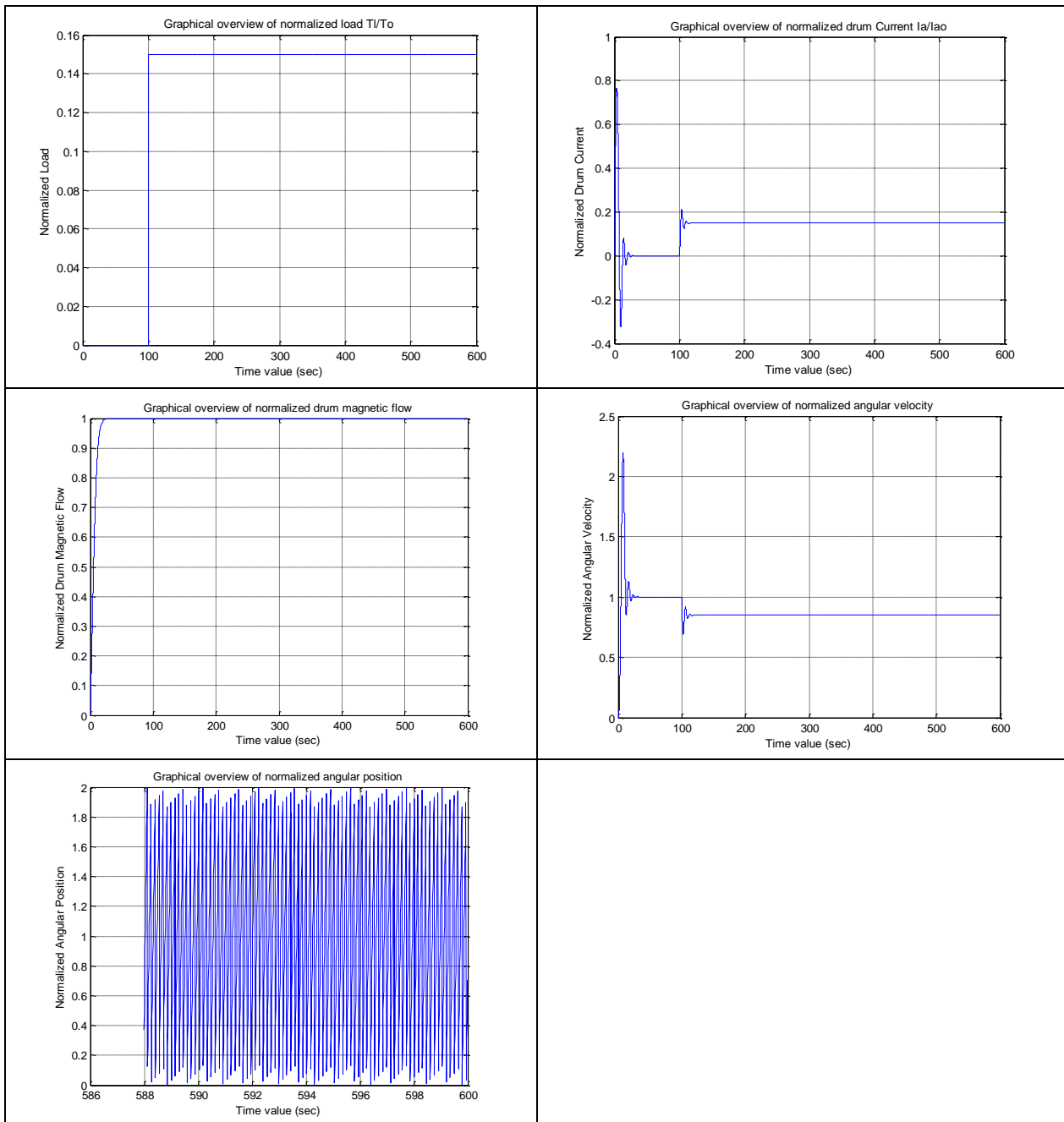
Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου σταθερού φορτίου

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του προηγούμενου σεναρίου, δίνουν τις παρακάτω τιμές:

DC Motor Parameters	
Maximum Drum Current (I_{ao}):	200
Time constant of Drum circuit (T_a):	2
Load Max Value (T_o):	800
Max Ifo Current (I_{fo}):	125
Magnetic Flow constant (T_{fo}):	10
Angular Velocity constant (T_m):	0.6250
Angular Position constant (T_{θ}):	0.0628
Motor Linearization Process	
b parameter:	1.0000
bmin parameter:	0.3000
Model Poles:	-0.2500 + 0.8588i -0.2500 - 0.8588i
omega_b parameter:	0.8944 - 0.0000i
Damp parameter:	0.2795

Πίνακας 5.4: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση σταθερού φορτίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:



Πίνακας 5.5: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου χωρίς έλεγχο

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι το φορτίο εισάγεται στον κινητήρα Σ.Ρ. την προβλεπόμενη χρονική στιγμή των 100 secs. Το φορτίο παραμένει σταθερό στην καθορισμένη τιμή ροπής των 120 Ntxm. Η μαγνητική ροή στο κύκλωμα πεδίου έχει αποκαταστήσει την μέγιστη τιμή της σε χρόνο μικρότερο από 25 secs. Ο κινητήρας κατά την φάση εκκίνησης έχει αποκαταστήσει τα επίπεδα γωνιακής ταχύτητας ω σε χρόνο λιγότερο από 25 secs. Με την εισαγωγή του φορτίου η λειτουργία περιστροφής όπως φαίνεται από το διάγραμμα διαταράσσεται και πέφτει στα επίπεδα του $0.85\omega_0$. Το γεγονός αυτό κάνει εμφανή την ανάγκη αντιστάθμισης για την διασφάλιση σταθερού σημείου λειτουργίας για το σύστημα. Επίσης το ρεύμα τυμπάνου I_a το οποίο σε φάση

κενού φορτίου είναι μηδενικό, μετά την εισαγωγή του φορτίου εγκαθίσταται μετά από σύντομη ταλαντωτική συμπεριφορά σε τιμή $0.15I_{ao}$.

5.1.1.2 Σενάριο Προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή ταχύτητα

Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	120	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.25	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης

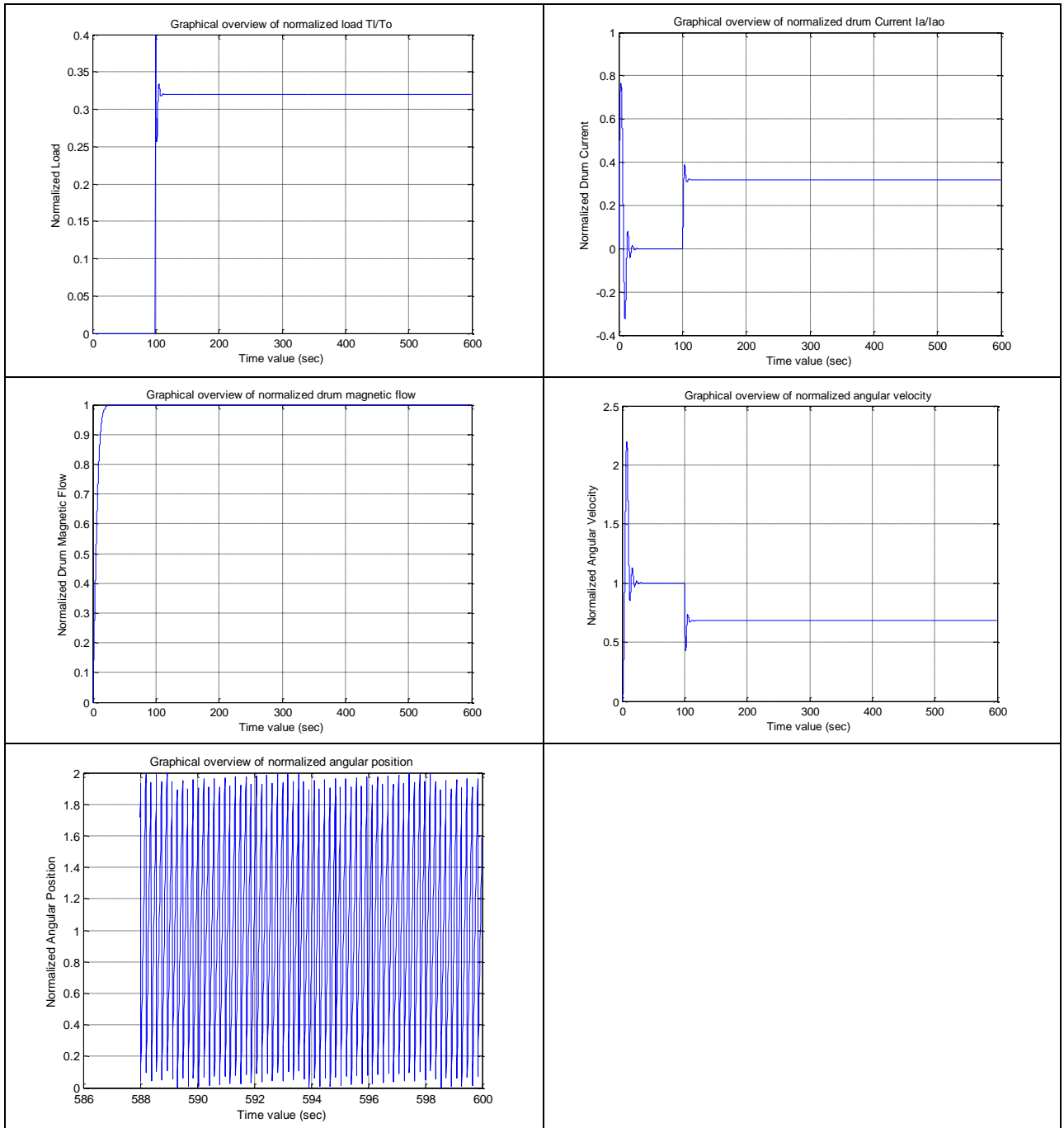
Πίνακας 5.6: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου χωρίς έλεγχο

Από τα χαρακτηριστικά του σεναρίου παρατηρούμε ότι επιπλέον του σταθερού ποσού φορτίου στον άξονα του κινητήρα έχει προστεθεί και ποσοστώς εξαρτώμενη από την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του προηγούμενου σεναρίου, δίνουν τις παρακάτω τιμές:

DC Motor Parameters	
Maximum Drum Current (I_{ao}):	200
Time constant of Drum circuit (T_a):	2
Load Max Value (T_o):	800
Max Ifo Current (I_{fo}):	125
Magnetic Flow constant (T_{fo}):	10
Angular Velocity constant (T_m):	0.6250
Angular Position constant (T_{θ}):	0.0628
Motor Linearization Process	
b parameter:	1.0000
bmin parameter:	0.6400
Model Poles:	-0.2500 + 0.8588i -0.2500 - 0.8588i
omega_b parameter:	0.8944 - 0.0000i
Damp parameter:	0.2795

Πίνακας 5.7: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή ταχύτητα χωρίς έλεγχο

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:



Πίνακας 5.8: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή ταχύτητα χωρίς έλεγχο

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι το φορτίο εισάγεται στον κινητήρα Σ.Ρ. την προβλεπόμενη χρονική στιγμή των 100 secs. Το φορτίο καταλήγει σταθερό στην καθορισμένη τιμή ροπής των $0,32T_o$ μετά από σύντομη μεταβαλλόμενη συμπεριφορά η οποία εξαρτάται από την γωνιακή συχνότητα. Η μαγνητική ροή στο κύκλωμα πεδίου έχει αποκαταστήσει την μέγιστη τιμή της σε χρόνο μικρότερο από 25 secs. Ο κινητήρας κατά την φάση εκκίνησης έχει αποκαταστήσει τα επίπεδα γωνιακής ταχύτητας ω σε χρόνο λιγότερο από 25 secs. Με την εισαγωγή του φορτίου, η λειτουργία περιστροφής όπως φαίνεται από το διάγραμμα διαταράσσεται και πέφτει στα επίπεδα του $0.68\omega_0$. Το γεγονός αυτό

κάνει εμφανή την ανάγκη αντιστάθμισης για την διασφάλιση σταθερού σημείου λειτουργίας για το σύστημα. Επίσης το ρεύμα τυμπάνου I_a το οποίο σε φάση κενού φορτίου είναι μηδενικό, μετά την εισαγωγή του φορτίου εγκαθίσταται μετά από σύντομη ταλαντωτική συμπεριφορά σε τιμή $0.32I_{a0}$.

5.1.1.3 Σενάριο Προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση

Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	120	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.25	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.005	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης

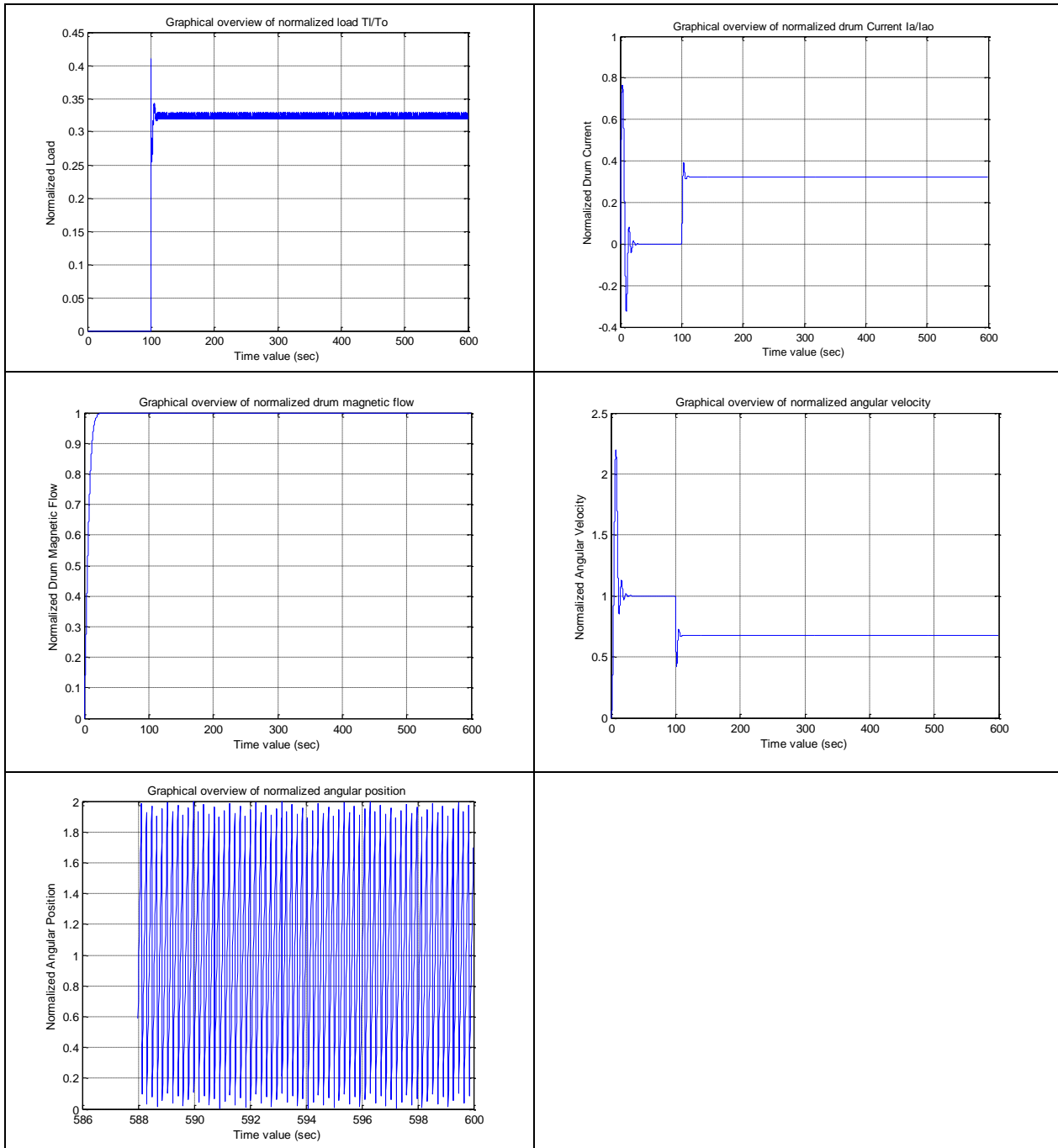
Πίνακας 5.9: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου χωρίς έλεγχο

Από τα χαρακτηριστικά του σεναρίου παρατηρούμε ότι επιπλέον του προηγούμενου φορτίου στον άξονα του κινητήρα έχει προστεθεί και ποσόστωση εξαρτώμενη από την γωνιακή θέση περιστροφής. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του προηγούμενου σεναρίου, δίνουν τις παρακάτω τιμές:

DC Motor Parameters	
Maximum Drum Current (I_{a0}):	200
Time constant of Drum circuit (T_a):	2
Load Max Value (T_o):	800
Max Ifo Current (I_{fo}):	125
Magnetic Flow constant (T_{fo}):	10
Angular Velocity constant (T_m):	0.6250
Angular Position constant (T_{θ}):	0.0628
Motor Linearization Process	
b parameter:	1.0000
bmin parameter:	0.6539
Model Poles:	-0.2500 + 0.8588i -0.2500 - 0.8588i
omega_b parameter:	0.8944 - 0.0000i
Damp parameter:	0.2795

Πίνακας 5.10: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση χωρίς έλεγχο

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:



Πίνακας 5.11: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή θέση χωρίς έλεγχο

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι το φορτίο εισάγεται στον κινητήρα Σ.Ρ. την προβλεπόμενη χρονική στιγμή των 100 secs. Το φορτίο καταλήγει ταλαντωτικό στην ζώνη ροπής των $0,325T_0 \pm 0,005T_0$ εξαιτίας της εξάρτησης του φορτίου από την γωνιακή θέση. Η μαγνητική ροή στο κύκλωμα πεδίου έχει αποκαταστήσει την μέγιστη τιμή της σε χρόνο μικρότερο από 25 secs. Ο κινητήρας κατά την φάση εκκίνησης έχει αποκαταστήσει τα επίπεδα γωνιακής ταχύτητας ω_0 σε χρόνο λιγότερο από 25 secs. Με την εισαγωγή του φορτίου η λειτουργία περιστροφής όπως φαίνεται από το διάγραμμα διαταράσσεται και πέφτει στα επίπεδα του $0.675\omega_0$ χωρίς ιδιαίτερη εμφάνιση ταλαντωτικής

συμπεριφοράς. Το γεγονός αυτό κάνει εμφανή την ανάγκη αντιστάθμισης για την διασφάλιση σταθερού σημείου λειτουργίας για το σύστημα. Επίσης το ρεύμα τυμπάνου I_a το οποίο σε φάση κενού φορτίου είναι μηδενικό, μετά την εισαγωγή του φορτίου εγκαθίσταται μετά από σύντομη ταλαντωτική συμπεριφορά σε τιμή $0.324I_{a0}$ χωρίς εμφάνιση ταλαντωτικής συμπεριφοράς.

5.1.2 Έλεγχος μέσω κυκλώματος τυμπάνου

Για την εφαρμογή του σεναρίου προσομοίωσης με έλεγχο μέσω του κυκλώματος τυμπάνου, θα χρησιμοποιήσουμε τα χαρακτηριστικά του τελευταίου σεναρίου προσομοίωσης που χρησιμοποιούσε φορτίο εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση. Στόχος δεν είναι η εισαγωγή κυκλώματος ελεγκτή υπό του κινητήρα, εφόσον συνεχίζουμε να αναφερόμαστε σε τοπολογία ανοικτού βρόχου. Στόχος του σεναρίου είναι η κατάδειξη της δυνατότητας αντιστάθμισης που εμφανίζει ο κινητήρας Σ.Ρ. ανατάσσοντας το σημείο λειτουργίας του με μεταβολή της τάσης V_a ελέγχου του κυκλώματος τυμπάνου. Αρχικά το κύκλωμα τυμπάνου τροφοδοτείται με 50V ενώ σε χρονική στιγμή μετά την εισαγωγή του φορτίου στον κινητήρα η τάση μεταβάλλεται σε 80V. Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step	0,01	Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start	0	Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop	600	Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start	100	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
control_of_Va	‘y’	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	‘n’	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
Vao	200	Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o	50	Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo	10	Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo	100	Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J	10	Ροπή Αδράνειας Άξονα ($Kgrxm^2$)
Ra	1.0	Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La	2.0	Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf	0.8	Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf	100	Αριθμός σπειρών κυκλώματος διεγερσης
theta_o	π	Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)
T11	120	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.25	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.005	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης

plot_Tload	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας
plot_theta	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
suspend_warnings	‘n’	Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους

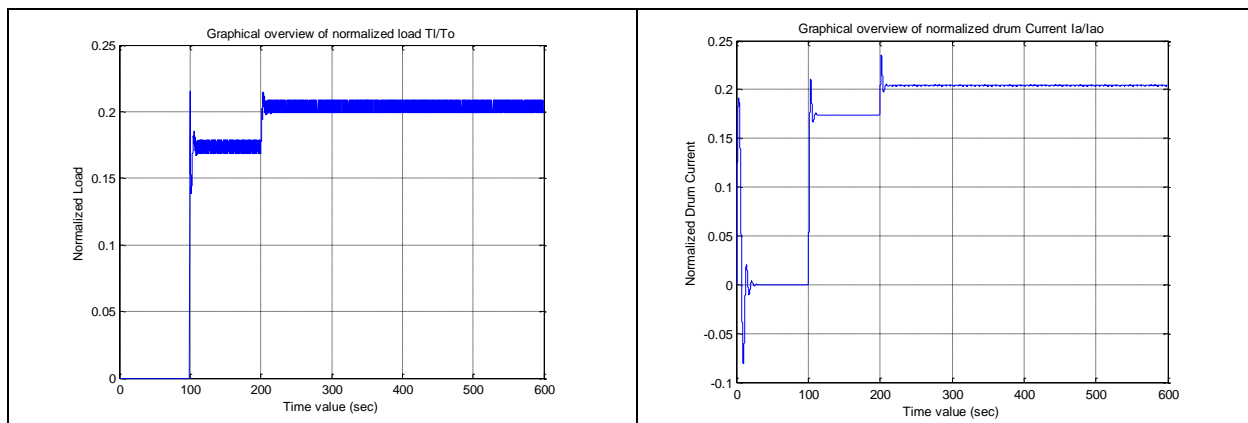
Πίνακας 5.12: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

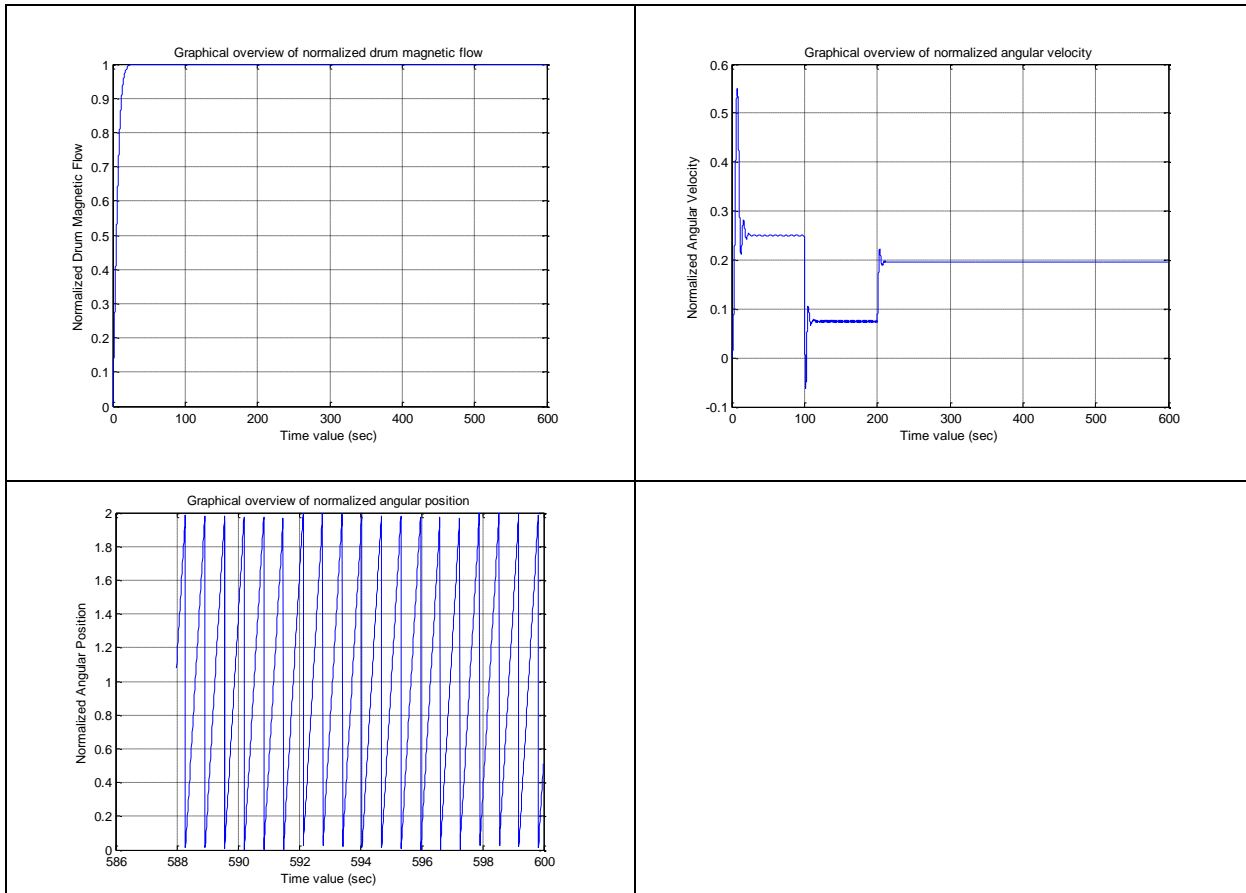
Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του προηγούμενου σεναρίου, δίνουν τις παρακάτω τιμές:

DC Motor Parameters	
Maximum Drum Current (Iao):	200
Time constant of Drum circuit (Ta):	2
Load Max Value (To):	800
Max Ifo Current (Ifo):	125
Magnetic Flow constant (Tfo):	10
Angular Velocity constant (Tm):	0.6250
Angular Position constant (T_theta):	0.0628
Motor Linearization Process	
b parameter:	1.0000
bmin parameter:	0.4028
Model Poles:	-0.2500 + 0.8588i -0.2500 - 0.8588i
omega_b parameter:	0.8944 - 0.0000i
Damp parameter:	0.2795

Πίνακας 5.13: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.14: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή θέση με έλεγχο τυμπάνου

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι το φορτίο εισάγεται στον κινητήρα Σ.Ρ. την προβλεπόμενη χρονική στιγμή των 100 secs. Το φορτίο καταλήγει ταλαντωτικό στην ζώνη ροπής των $0,175T_0 \pm 0,005T_0$ εξαιτίας της εξάρτησης του φορτίου από την γωνιακή θέση. Η τιμή του φορτίου αναπροσαρμόζεται σε $0,205T_0 \pm 0,005T_0$ εξαιτίας της υπεισερχόμενης μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας από την μεταβολή της τάσης του τυμπάνου στην χρονική στιγμή των 200 secs. Η μαγνητική ροή στο κύκλωμα πεδίου έχει αποκαταστήσει την μέγιστη τιμή της σε χρόνο μικρότερο από 25 secs. Ο κινητήρας κατά την φάση εκκίνησης έχει αποκαταστήσει τα επίπεδα γωνιακής ταχύτητας $0,25\omega_0$ σε χρόνο λιγότερο από 25 secs. Με την εισαγωγή του φορτίου η λειτουργία περιστροφής όπως φαίνεται από το διάγραμμα διαταράσσεται και πέφτει στα επίπεδα του $0,075\omega_0$ χωρίς έντονη εμφάνιση ταλαντωτικής συμπεριφοράς επανερχόμενη σε επίπεδο $0,195\omega_0$ μετά την αύξηση της τάσης τυμπάνου. Επίσης το ρεύμα τυμπάνου I_a το οποίο σε φάση κενού φορτίου είναι μηδενικό, μετά την εισαγωγή του φορτίου εγκαθίσταται μετά από σύντομη ταλαντωτική συμπεριφορά σε τιμή $0,175I_{a0}$ χωρίς έντονη εμφάνιση ταλαντωτικής συμπεριφοράς το οποίο μετά την μεταβολή της τάσης τυμπάνου καταλήγει σε $0,205I_{a0}$.

Από τις ανωτέρω παρατηρήσεις καθίσταται εμφανές ότι ο έλεγχος του κινητήρα Σ.Ρ. μπορεί να επιτευχθεί με χρήση του κυκλώματος τυμπάνου με ανάλογη μεταβολή της τάσης διέγερσης όπως περιγράφεται και στην βιβλιογραφία για την ανάλυση της λειτουργίας κινητήρα Σ.Ρ.

5.1.3 Έλεγχος μέσω κυκλώματος πεδίου

Για την εφαρμογή του σεναρίου προσομοίωσης με έλεγχο μέσω του κυκλώματος πεδίου, θα χρησιμοποιήσουμε τα χαρακτηριστικά του σεναρίου προσομοίωσης που χρησιμοποιούσε σταθερό φορτίο. Στόχος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν είναι η εισαγωγή κυκλώματος ελεγκτή εφόσον συνεχίζουμε να αναφερόμαστε σε τοπολογία ανοικτού βρόχου. Στόχος είναι η κατάδειξη της δυνατότητας αντιστάθμισης που εμφανίζει ο κινητήρας Σ.Ρ. ανατάσσοντας το σημείο λειτουργίας του με μεταβολή της τάσης V_f ελέγχου του κυκλώματος πεδίου. Αρχικά το κύκλωμα πεδίου τροφοδοτείται με 100V ενώ σε χρονική στιγμή μετά την εισαγωγή του φορτίου στον κινητήρα η τάση μεταβάλλεται σε 55V. Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοιώσεως παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step	0,01	Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start	0	Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop	600	Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start	100	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
control_of_Va	‘n’	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	‘y’	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
Vao	200	Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o	50	Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo	10	Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo	100	Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J	10	Ροπή Αδράνειας Άξονα ($Kgrxm^2$)
Ra	1.0	Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La	2.0	Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf	0.8	Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf	100	Αριθμός σπειρών κυκλώματος διέγερσης
theta_o	π	Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)
Tl1	120	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
Tl2	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
plot_Tload	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας

plot_theta	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
suspend_warnings	‘n’	Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους

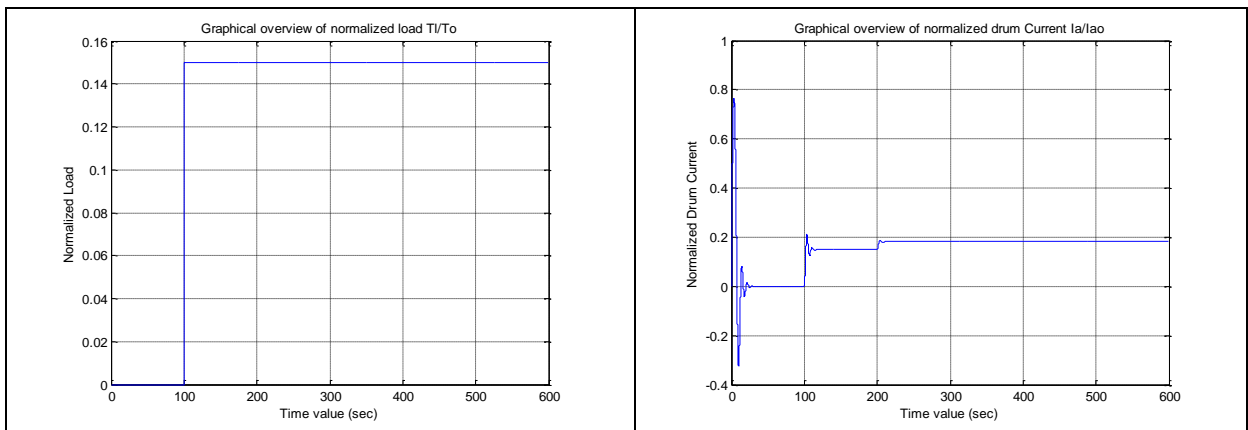
Πίνακας 5.15: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

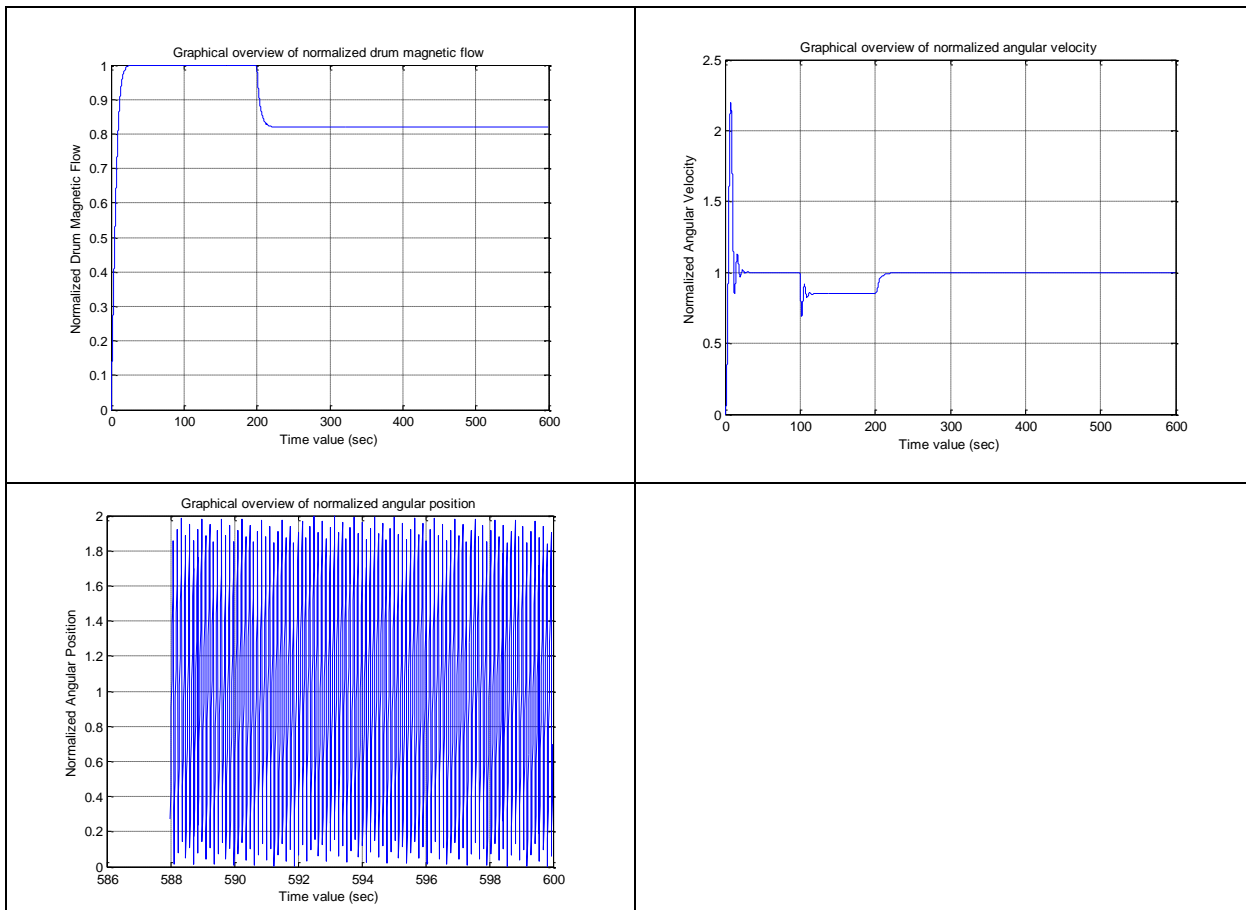
Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του προηγούμενου σεναρίου, δίνουν τις παρακάτω τιμές:

DC Motor Parameters	
Maximum Drum Current (I_{a0}):	200
Time constant of Drum circuit (T_a):	2
Load Max Value (T_0):	800
Max Ifo Current (I_{fo}):	125
Magnetic Flow constant (T_{fo}):	10
Angular Velocity constant (T_m):	0.6250
Angular Position constant (T_{θ}):	0.0628
Motor Linearization Process	
b parameter:	0.8193
bmin parameter:	0.3000
Model Poles:	-0.2500 + 0.6889i -0.2500 - 0.6889i
omega_b parameter:	0.7328 - 0.0000i
Damp parameter:	0.3411

Πίνακας 5.16: Αριθμητικές εκτιμήσεις του μοντέλου για προσομοίωση φορτίου εξαρτώμενο από την γωνιακή θέση με μεταβολή στο κύκλωμα πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.17: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου με έλεγχο πεδίου

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι το φορτίο εισάγεται στον κινητήρα Σ.Ρ. την προβλεπόμενη χρονική στιγμή των 100 secs. Το φορτίο παραμένει σταθερό σε τιμή $0,15T_o$. Η μαγνητική ροή στο κύκλωμα πεδίου έχει αποκαταστήσει την μέγιστη τιμή της σε χρόνο μικρότερο από 25 secs. Από την μεταβολή της τάσης του κυκλώματος πεδίου στην χρονική στιγμή των 200 secs η τιμή της μαγνητικής ροής μειώνεται σε 0,82. Ο κινητήρας κατά την φάση εκκίνησης έχει αποκαταστήσει τα επίπεδα γωνιακής ταχύτητας ω_o σε χρόνο λιγότερο από 25 secs. Με την εισαγωγή του φορτίου η λειτουργία περιστροφής όπως φαίνεται από το διάγραμμα διαταράσσεται και πέφτει στα επίπεδα του $0.85\omega_o$ επανερχόμενη σε επίπεδο ω_o μετά την μείωση της τάσης πεδίου. Επίσης το ρεύμα τυμπάνου I_a το οποίο σε φάση κενού φορτίου είναι μηδενικό, μετά την εισαγωγή του φορτίου εγκαθίσταται μετά από σύντομη ταλαντωτική συμπεριφορά σε τιμή $0.15I_{a0}$ το οποίο μετά την μεταβολή της τάσης πεδίου καταλήγει σε $0.185I_{a0}$.

Από τις ανωτέρω παρατηρήσεις καθίσταται εμφανές ότι ο έλεγχος του κινητήρα Σ.Ρ. μπορεί να επιτευχθεί με χρήση του κυκλώματος πεδίου με ανάλογη μεταβολή της τάσης διέγερσης όπως περιγράφεται και στην βιβλιογραφία για την λειτουργία του κινητήρα Σ.Ρ.

5.2 Προσομοίωση Κλειστού Βρόχου

Τα σενάρια που θα χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή προσομοιώσεων κλειστού βρόχου αφορούν σε 3 κατηγορίες φορτίων: (α) σταθερού φορτίου (β) φορτίου με σταθερή ποσόστωση και επιπλέον εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα και τέλος (γ) φορτίου με εξάρτηση από όλες τις ποσοτώσεις δηλ. και σταθερή και συνιστώσα εξαρτώμενη από την γωνιακή ταχύτητα αλλά και την γωνιακή θέση του κινητήρα. Το κλειστό σύστημα αποτελείται από το μοντέλο ανοικτού βρόχου του κινητήρα Σ.Ρ. τον ελεγκτή PID στον κύριο κλάδο και μοναδιαία ανατροφοδότηση για τον σχηματισμό του κλειστού βρόχου έλεγχου.

5.2.1 Έλεγχος μέσω κυκλώματος τυμπάνου

Ο έλεγχος στην συγκεκριμένη φάση της προσομοίωσης, θα κάνει χρήση του κλειστού συστήματος με τον PID-ελεγκτή, ο οποίος χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει σε κατάλληλα επίπεδα την τάση διεγέρσεως του κυκλώματος τυμπάνου, με στόχο την αντιστάθμιση της λειτουργίας του συστήματος για την επίτευξη (α) συγκεκριμένης γωνιακής θέσης (έλεγχος γωνιακής θέσης) και (β) συγκεκριμένης γωνιακής ταχύτητας η οποία θα πρέπει από το σύστημα να διατηρηθεί σταθερή στα επιθυμητά επίπεδα ανεξάρτητα όποιων εξωτερικών επιβαλλόμενων συνθηκών και διαταραχών του σημείου λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. Οι παράμετροι που θα διατηρηθούν σταθερές σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης κλειστού βρόχου με έλεγχο από το κύκλωμα τυμπάνου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step	0,01	Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start	0	Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop	1000	Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start	200	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
plot_Tload	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας
plot_theta	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
plot_acc	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής επιτάχυνσης
plot_err	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης σφάλματος του PID-ελεγκτή
suspend_warnings	‘n’	Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους

Vao	200	Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o	50	Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo	10	Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo	100	Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J	10	Ροπή Αδράνειας Άξονα (Kgrxm ²)
Ra	1.0	Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La	2.0	Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf	0.8	Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf	100	Αριθμός σπειρών κυκλώματος διέγερσης
theta_o	π	Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)

Πίνακας 5.18: Σταθερές παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

5.2.1.1 Έλεγχος γωνιακής θέσης

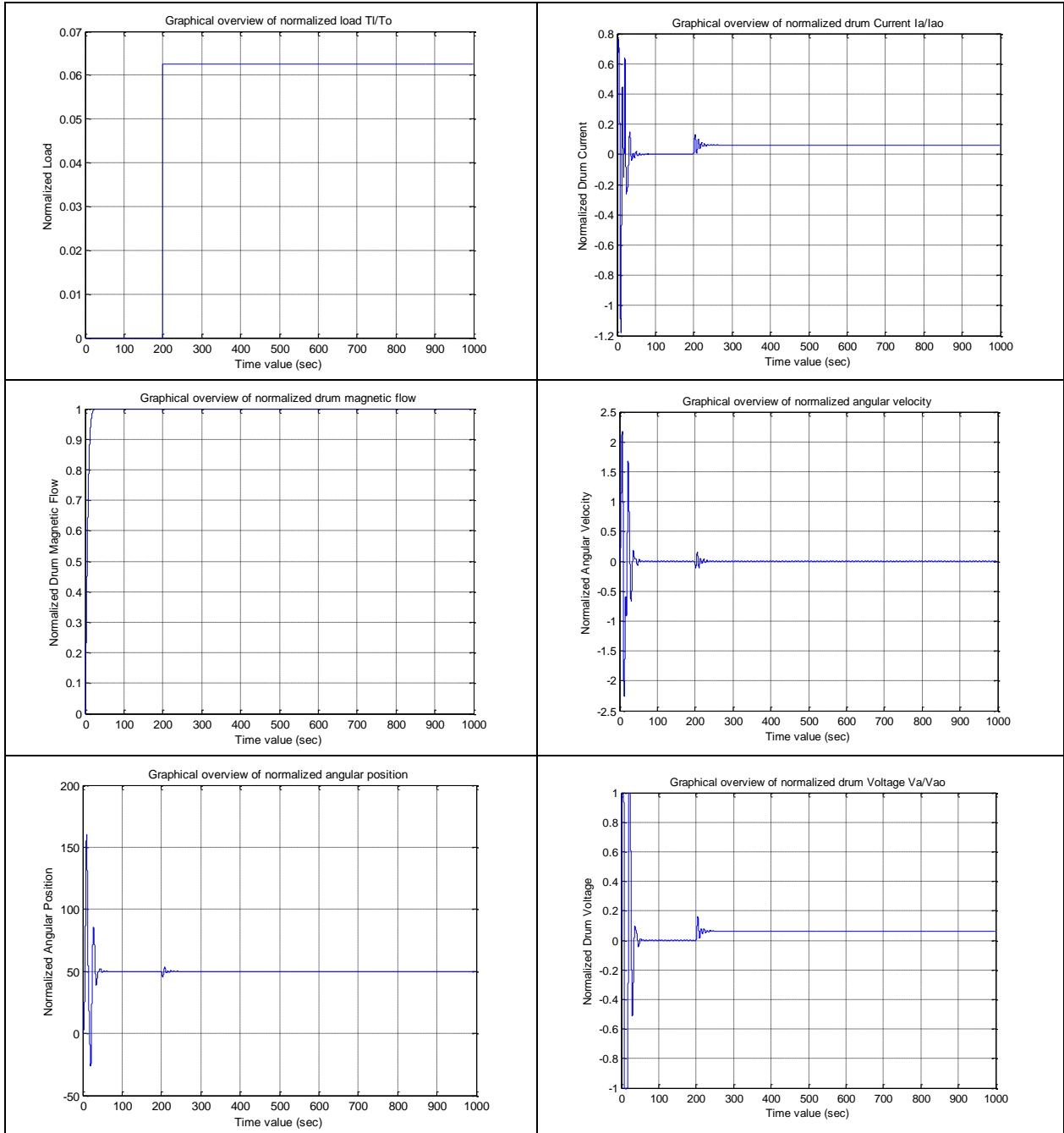
(α) Σταθερό φορτίο

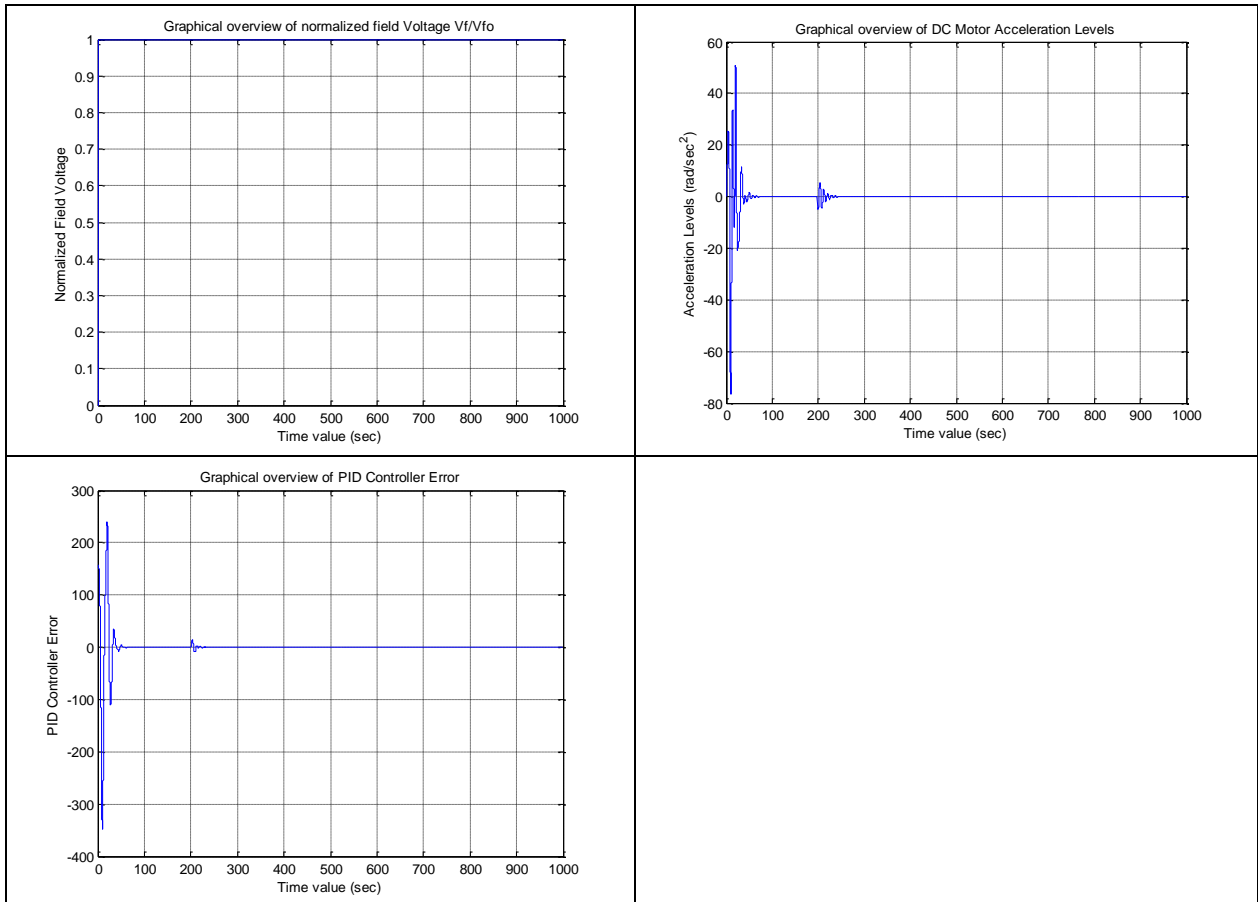
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Tl1	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
Tl2	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	0	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (-acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (-Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (-Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.19: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.20: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-λεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η θέση να προσαρμόζεται στην θέση αναφοράς των 50 rad. Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs αναγκάζει τον ελεγκτή να αυξήσει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου από 0 σε $0.06V_a$. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του για να αφήνει το φορτίο σταθερά στην θέση αναφοράς με επιτυχία.

(β) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα

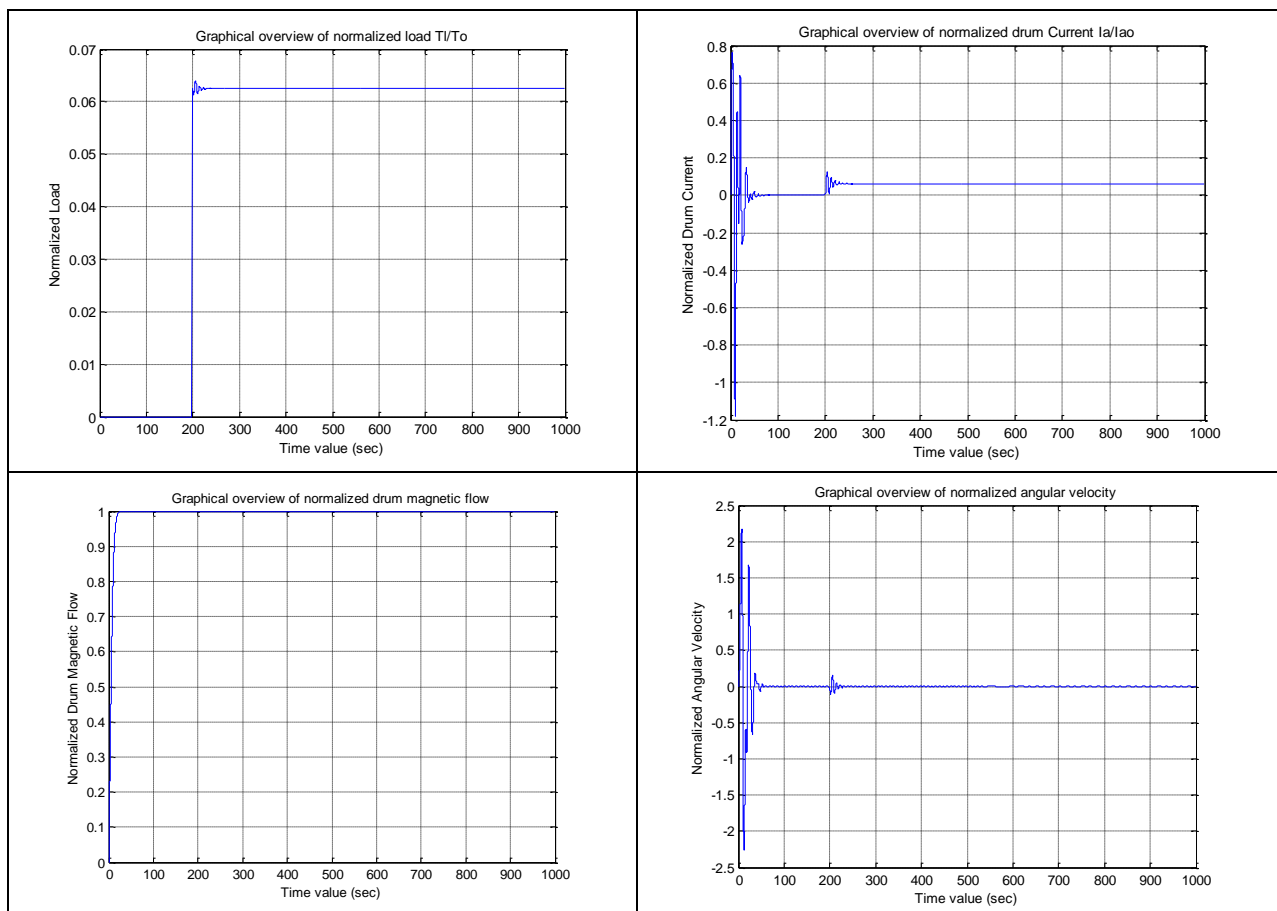
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

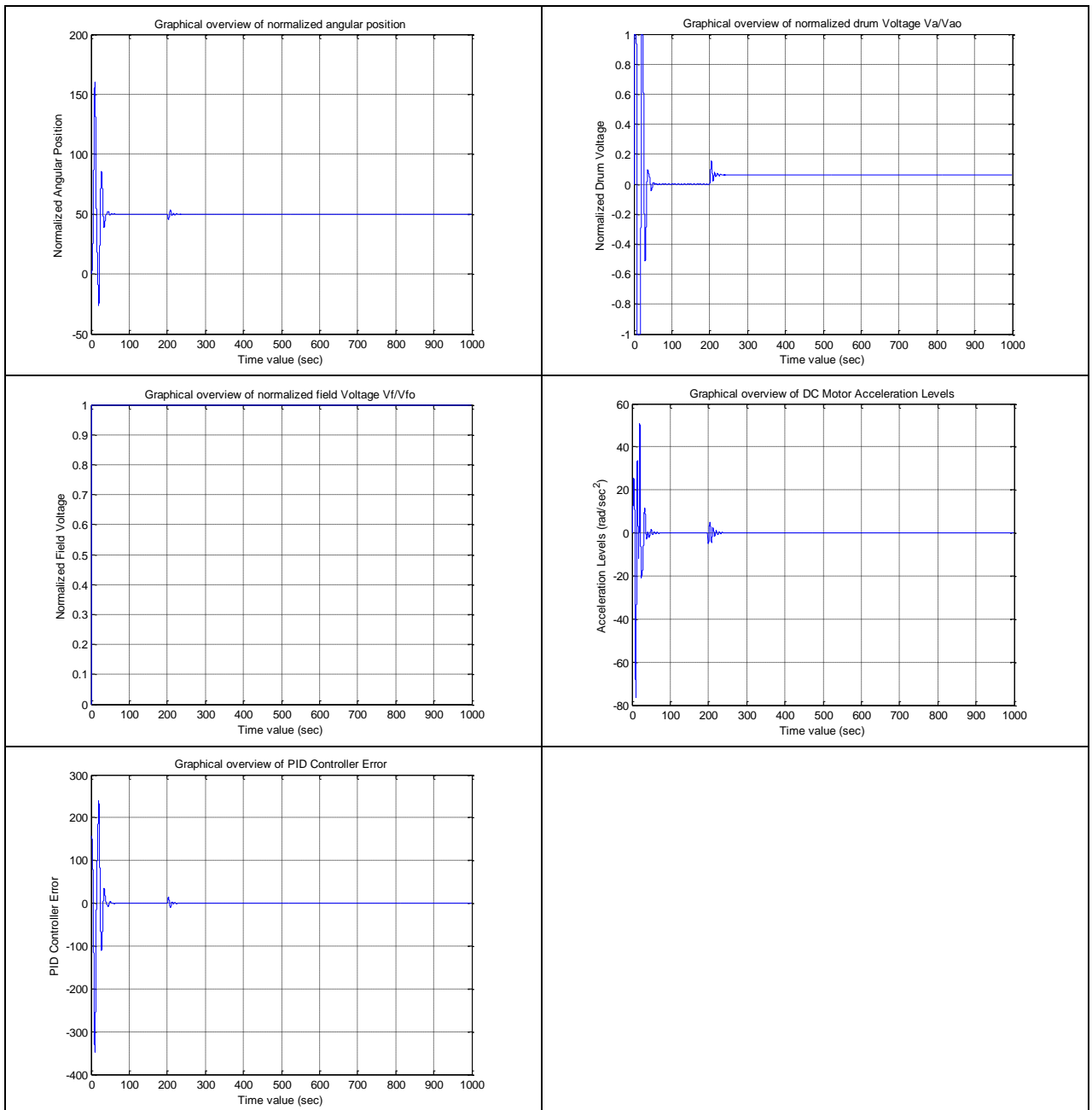
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	‘y’	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	‘n’	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου

control_option	0	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- $acc_limit \leq acc \leq acc_limit$)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- $Ia_limit \leq Ia \leq Ia_limit$)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- $Fd_limit \leq Fd \leq Fd_limit$)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.21: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του ανοικτού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.22: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένο από την γωνιακή ταχύτητα με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η θέση να προσαρμόζεται στην θέση αναφοράς των 50 rad. Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs αναγκάζει τον ελεγκτή να μεταβάλλει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του για να αφήνει το φορτίο σταθερά στην θέση αναφοράς με επιτυχία.

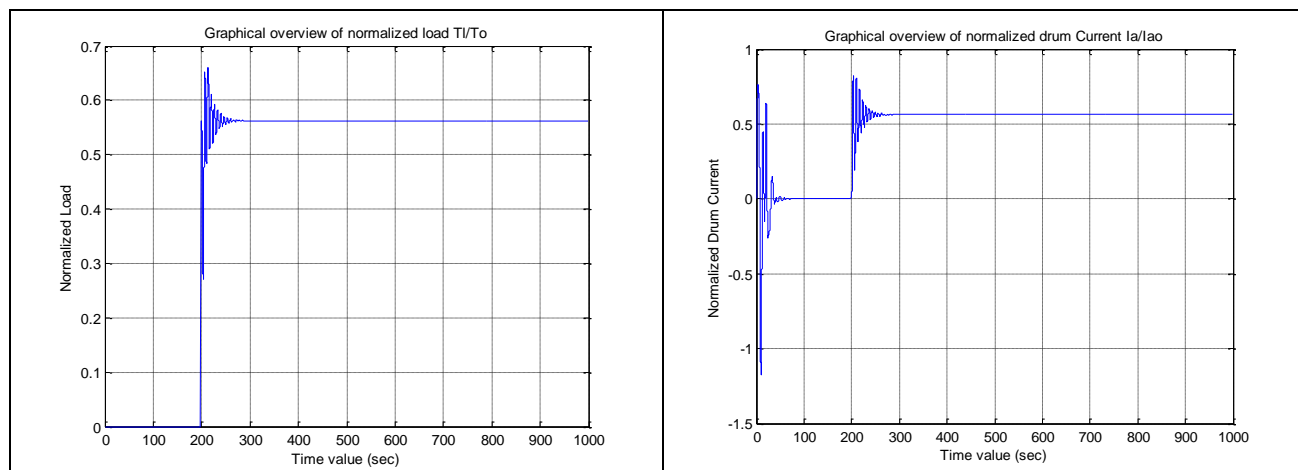
(γ) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή θέση

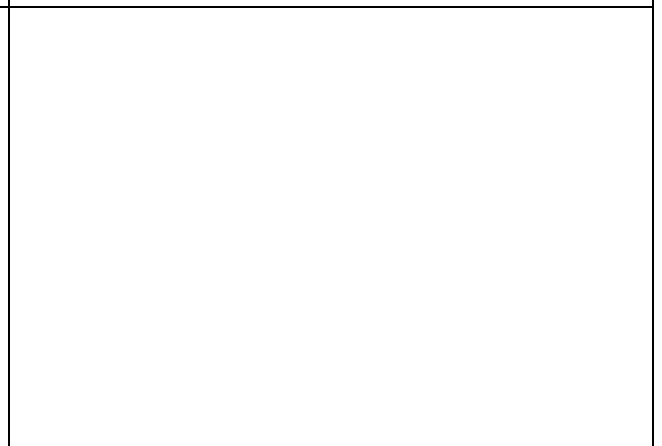
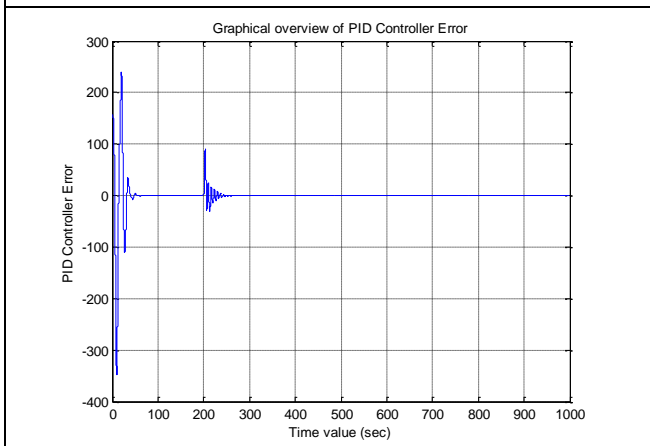
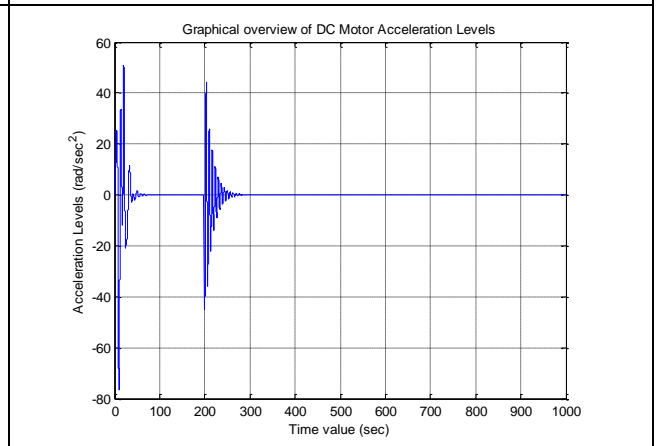
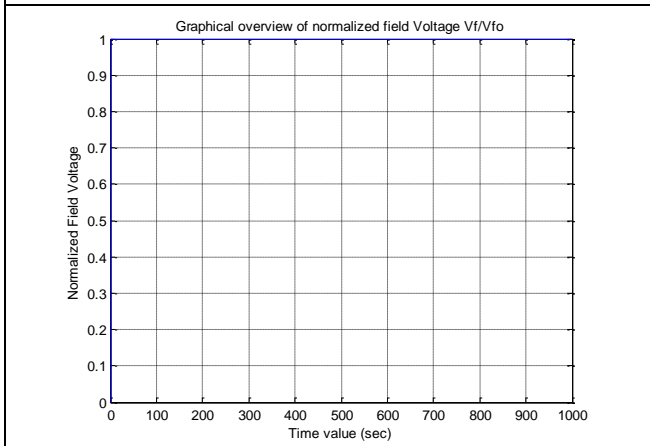
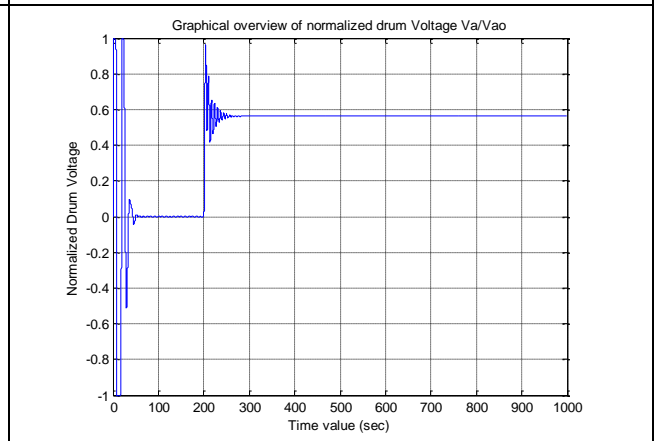
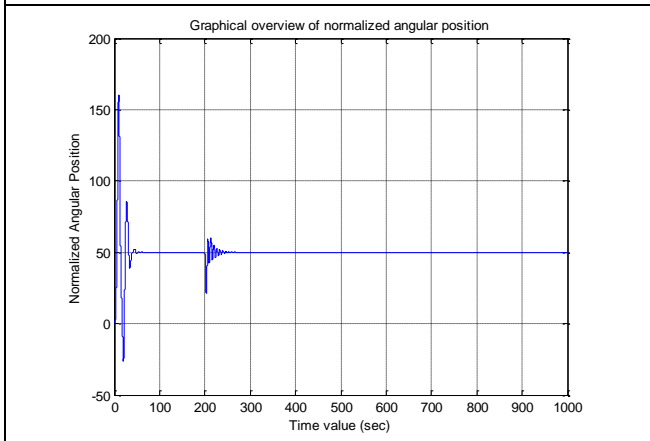
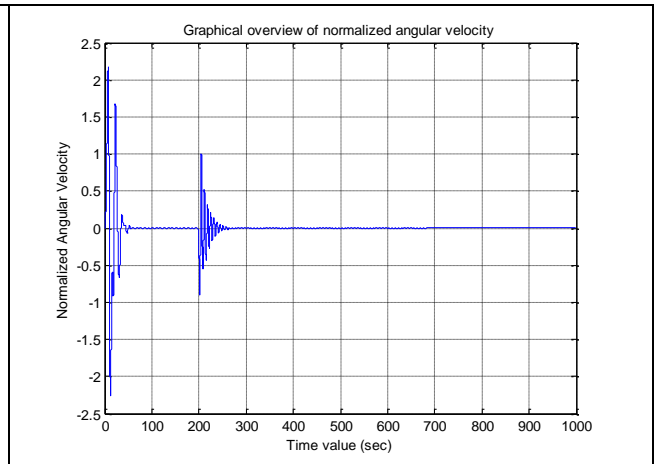
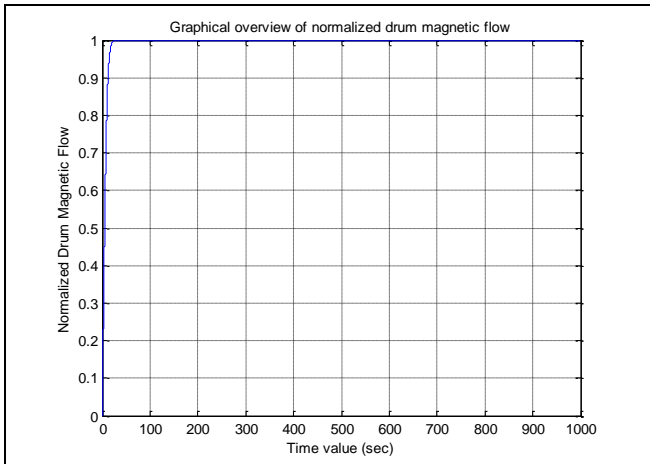
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Tl1	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
Tl2	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	0	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- $acc_limit \leq acc \leq acc_limit$)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- $Ia_limit \leq Ia \leq Ia_limit$)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- $Fd_limit \leq Fd \leq Fd_limit$)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.23: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.24: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-λεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η θέση να προσαρμόζεται στην θέση αναφοράς των 50 rad. Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs αναγκάζει τον ελεγκτή να μεταβάλλει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του για να αφήνει το φορτίο σταθερά στην θέση αναφοράς με επιτυχία. Η εμφάνιση ταλαντωτικών συμπεριφορών είναι πιο έντονη στα παραπάνω διαγράμματα δεδομένου ότι η εξάρτηση του φορτίου από την γωνιακή θέση είναι σημαντική λόγω του συντελεστή 0.01. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι μικρές μεταβολές της θέσης του κινητήρα, μεταβάλλουν κατά συνέπεια το φορτίο που επιβάλλεται στον άξονα του και έτσι αναγκάζουν τον ελεγκτή να αναπροσαρμόσει την τάση τυμπάνου για να ελέγξει την επιβαλλόμενη μεταβολή. Εντούτοις όμως το κλειστό σύστημα καταφέρνει να αντισταθμίσει επιτυχώς την ζητούμενη θέση αναφοράς.

5.2.1.2 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας

(α) Σταθερό φορτίο

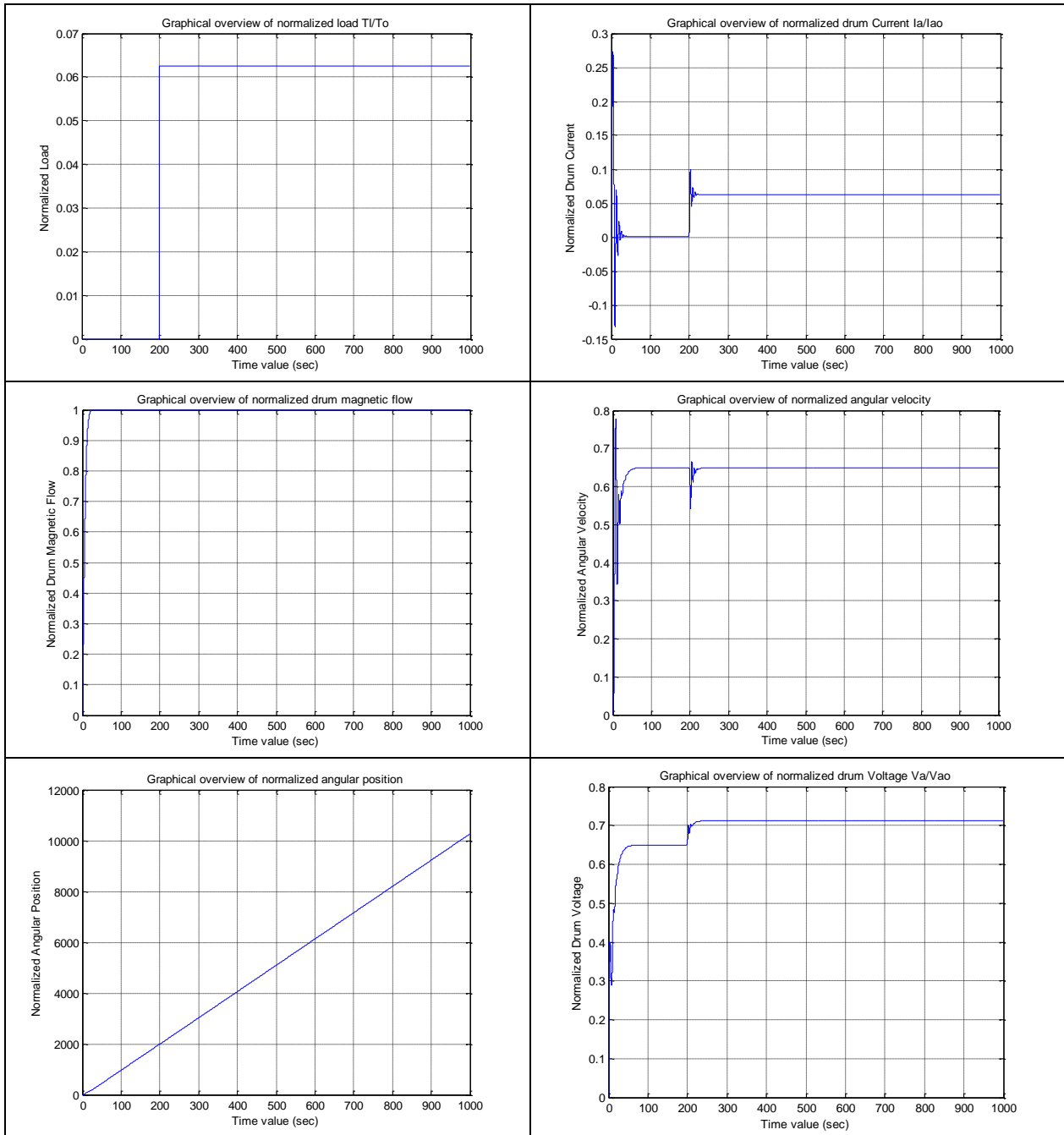
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

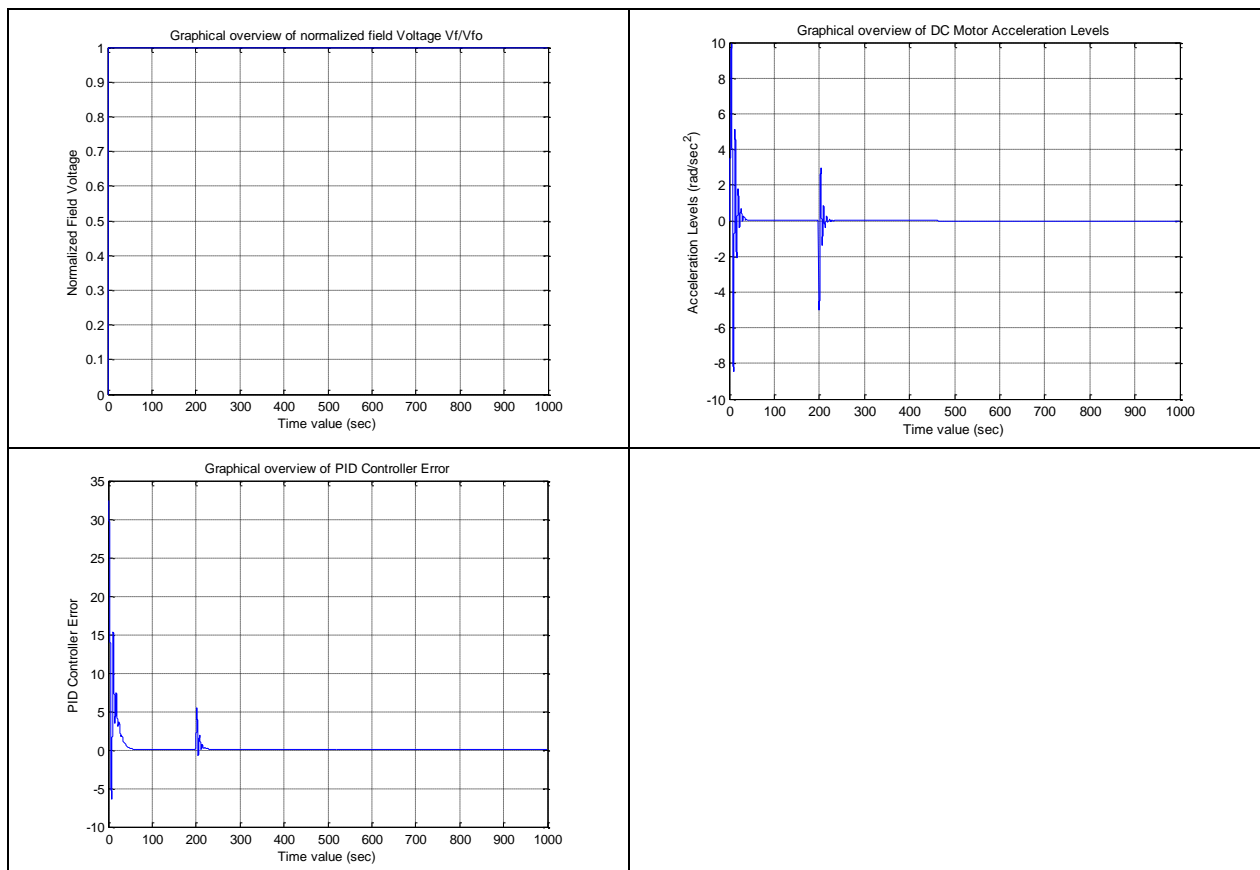
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va

K_{dva}	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_a
K_{iva}	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_a
K_{rvf}	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_f
K_{dvf}	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_f
K_{ivf}	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_f

Πίνακας 5.25: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.26: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή ταχύτητα να προσαρμόζεται στην κανονικοποιημένη τιμή του 0.65. Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs ανγκάζει τον ελεγκτή να αυξήσει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου από 0,65 σε 0.71V_{ao}. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του για να επιτυγχάνει σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα Σ.Ρ.

(β) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα

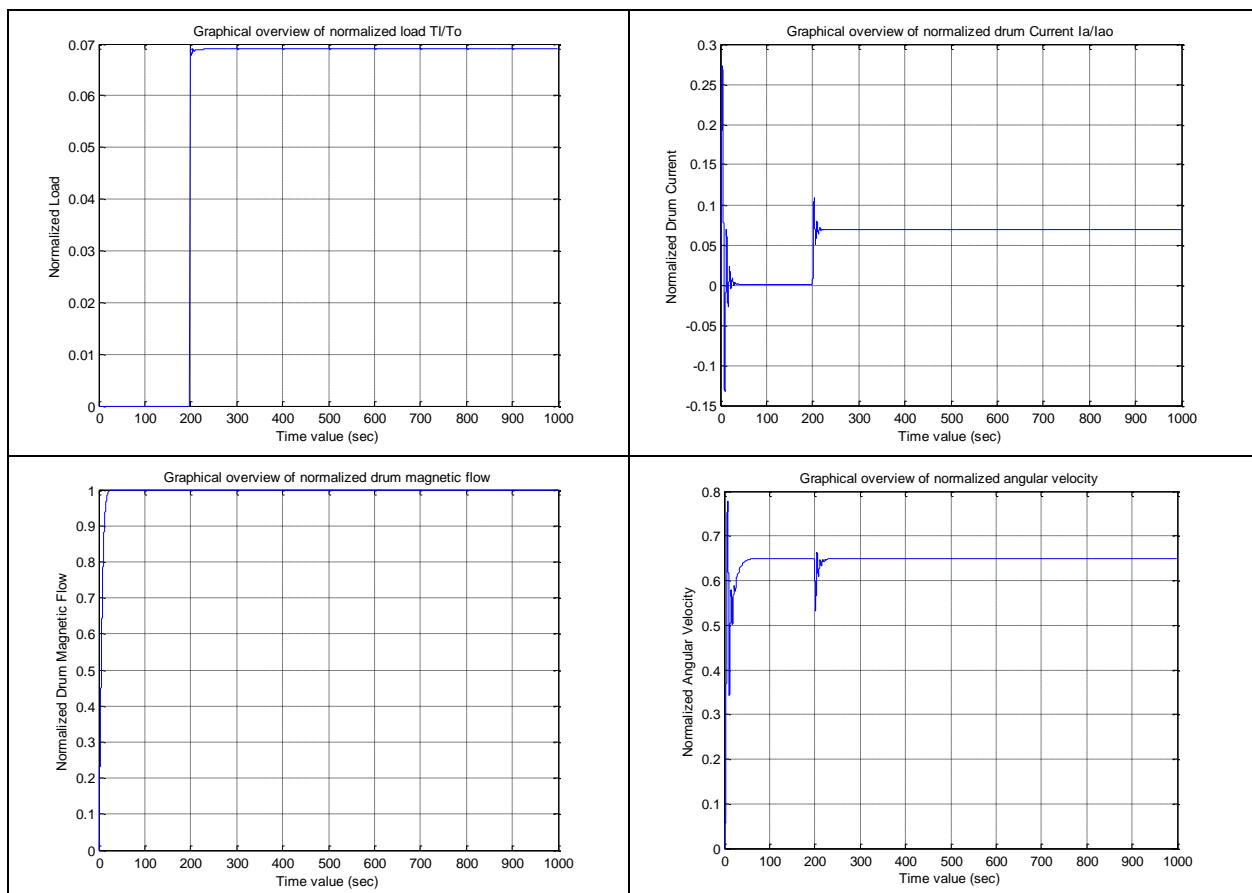
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

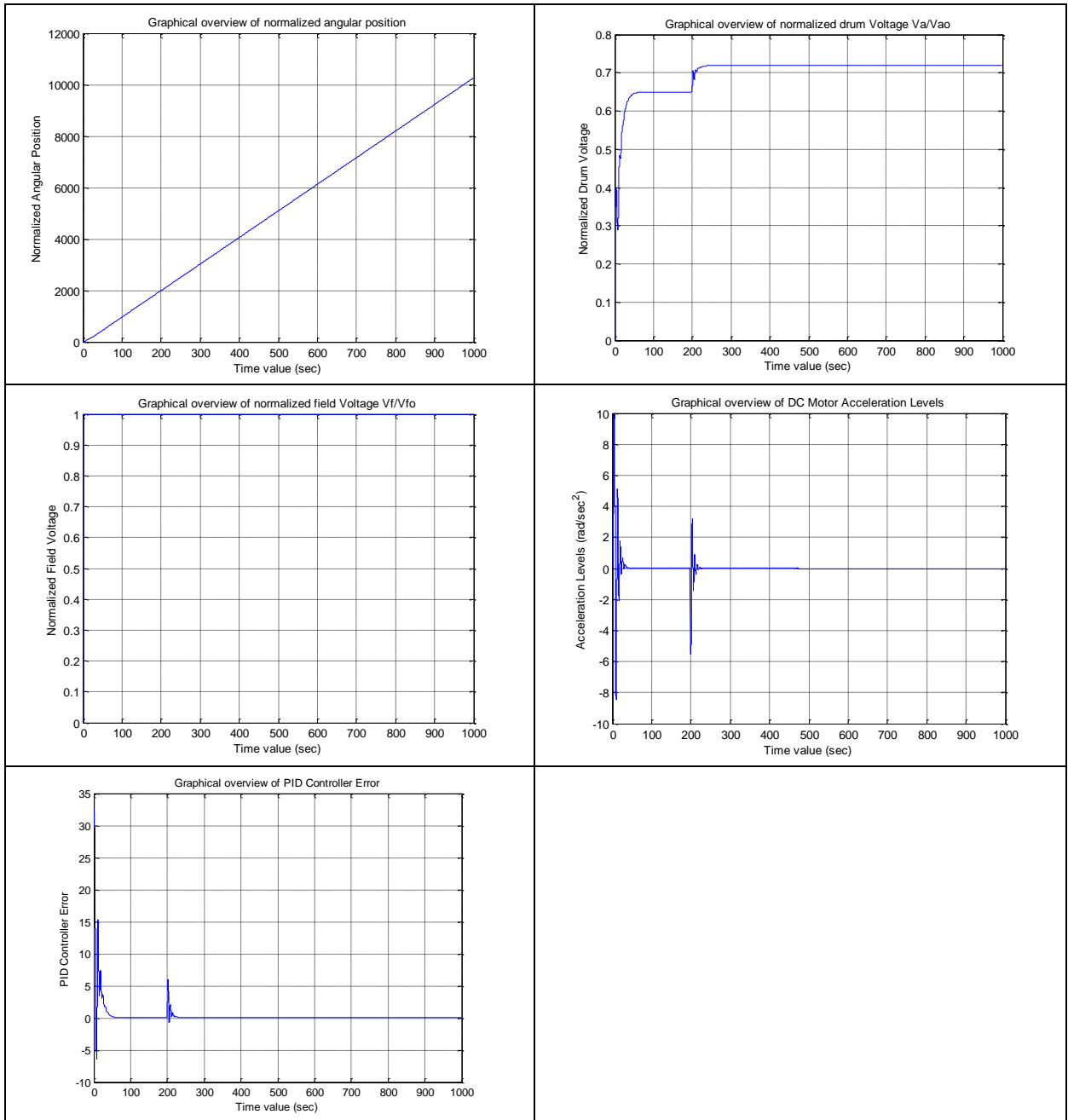
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	‘γ’	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	‘η’	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα

enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- $acc_limit \leq acc \leq acc_limit$)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του I_a (- $I_a_limit \leq I_a \leq I_a_limit$)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του F_d (- $F_d_limit \leq F_d \leq F_d_limit$)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_a
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_a
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_a
Kpvf	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_f
Kdvf	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_f
Kivf	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο V_f

Πίνακας 5.27: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.28: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή ταχύτητα με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή ταχύτητα να προσαρμόζεται στην τιμή αναφοράς των 0.65. Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs αναγκάζει τον ελεγκτή να μεταβάλλει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του για να αφήνει το φορτίο σταθερά στην θέση αναφοράς με επιτυχία.

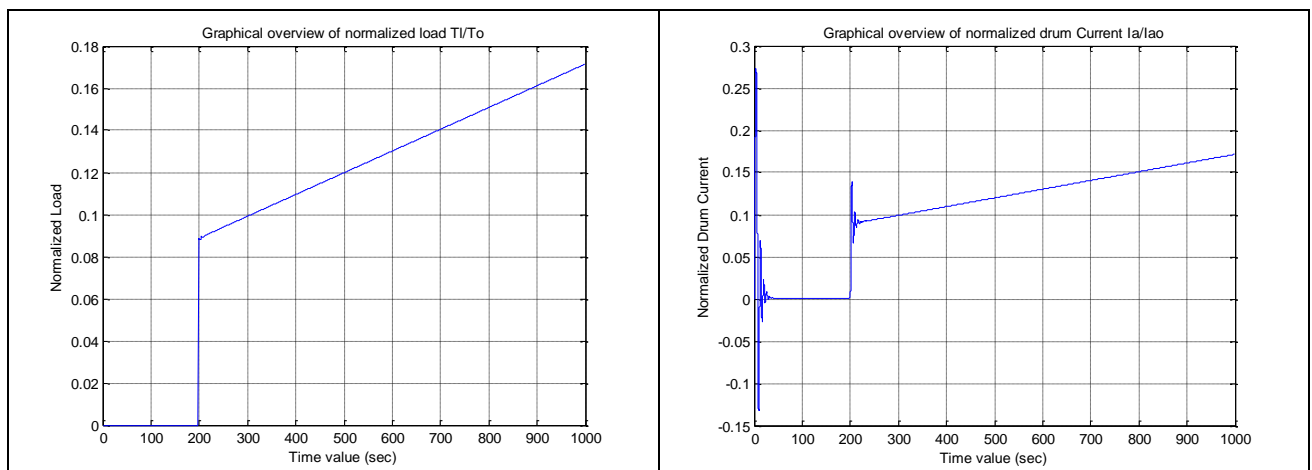
(γ) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή θέση

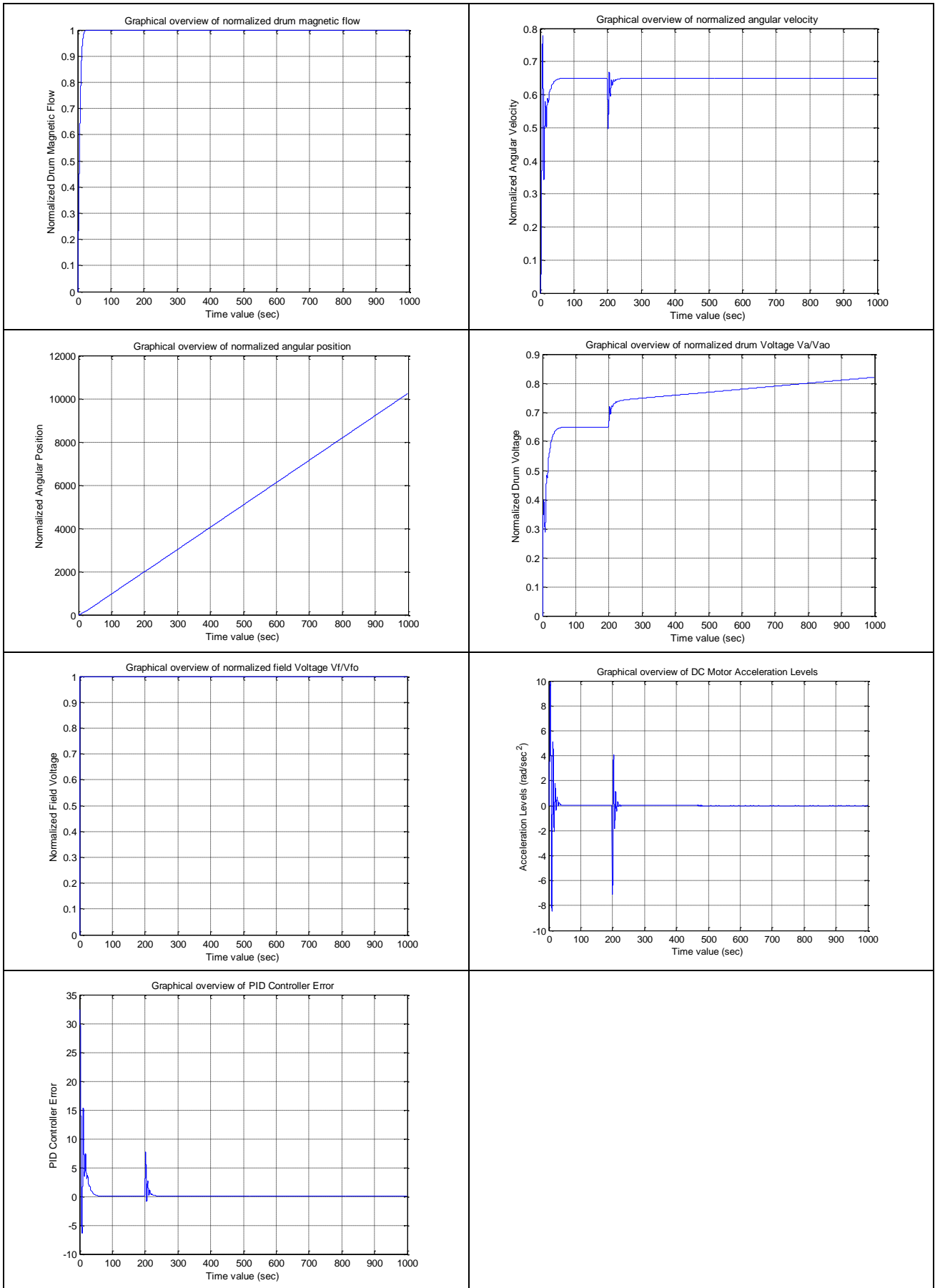
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Tl1	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
Tl2	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3	0.00001	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- $acc_limit \leq acc \leq acc_limit$)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- $Ia_limit \leq Ia \leq Ia_limit$)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- $Fd_limit \leq Fd \leq Fd_limit$)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.29: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.30: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής να διατηρείται σταθερή στα 0.65 Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs αναγκάζει τον ελεγκτή να μεταβάλλει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση όπου έχουμε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο φορτίο λόγω της θέσης του κινητήρα. Η εμφάνιση ταλαντωτικών συμπεριφορών είναι πιο έντονη στα παραπάνω διαγράμματα δεδομένου ότι η εξάρτηση του φορτίου από την γωνιακή θέση είναι σημαντική. Εντούτοις όμως το κλειστό σύστημα καταφέρνει να αντισταθμίσει επιτυχώς την ζητούμενη θέση αναφοράς.

5.2.2 Έλεγχος μέσω κυκλώματος πεδίου

Ο έλεγχος στην συγκεκριμένη φάση της προσομοίωσης θα κάνει χρήση του κλειστού συστήματος με τον PID-ελεγκτή, ο οποίος χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει σε κατάλληλα επίπεδα την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος πεδίου, με στόχο την αντιστάθμιση της λειτουργίας του συστήματος για την επίτευξη (α) συγκεκριμένης γωνιακής θέσης (έλεγχος γωνιακής θέσης) και (β) συγκεκριμένης γωνιακής ταχύτητας η οποία θα πρέπει από το σύστημα να διατηρηθεί σταθερή στα επιθυμητά επίπεδα ανεξάρτητα όποιων εξωτερικών επιβαλλόμενων συνθηκών και διαταραχών του σημείου λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ.

5.2.2.1 Έλεγχος γωνιακής θέσης

(α) Σταθερό φορτίο

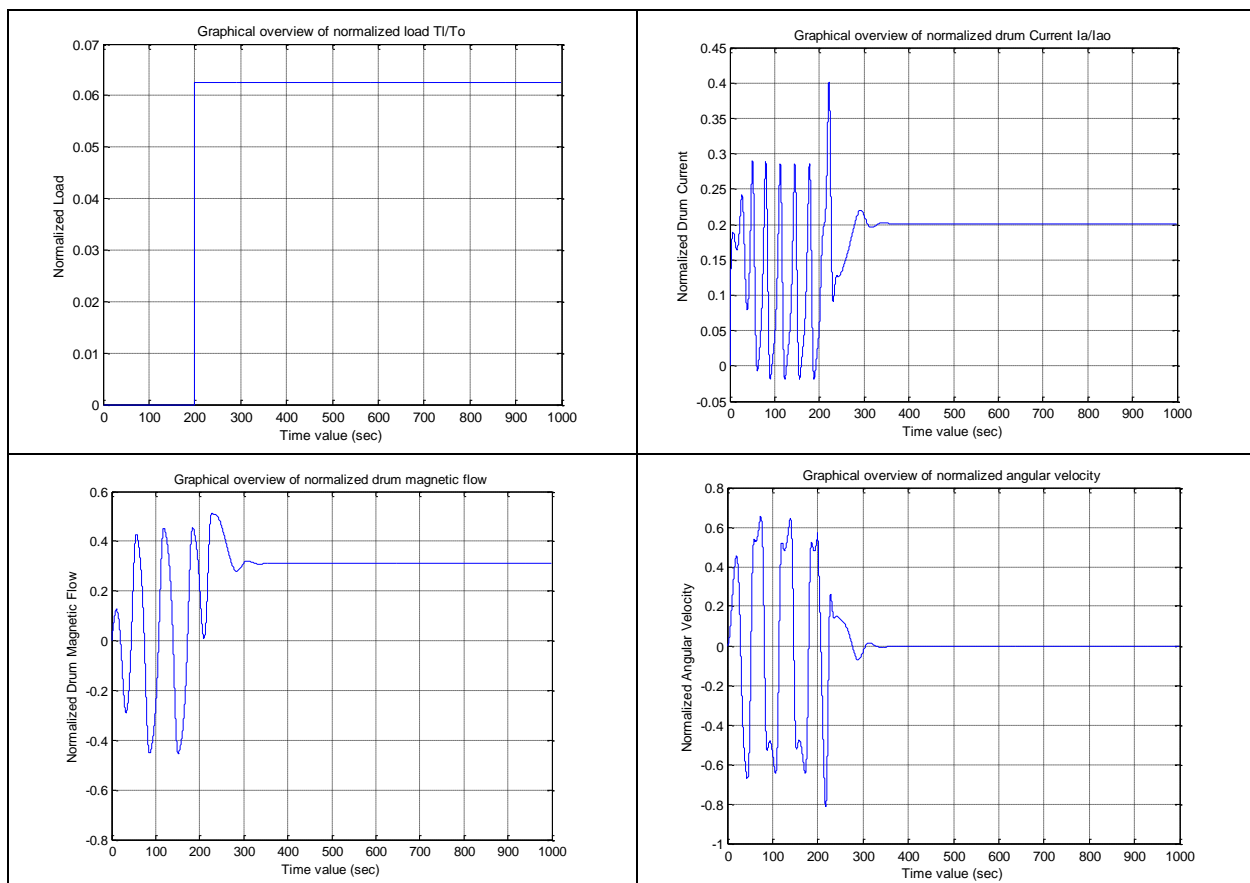
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

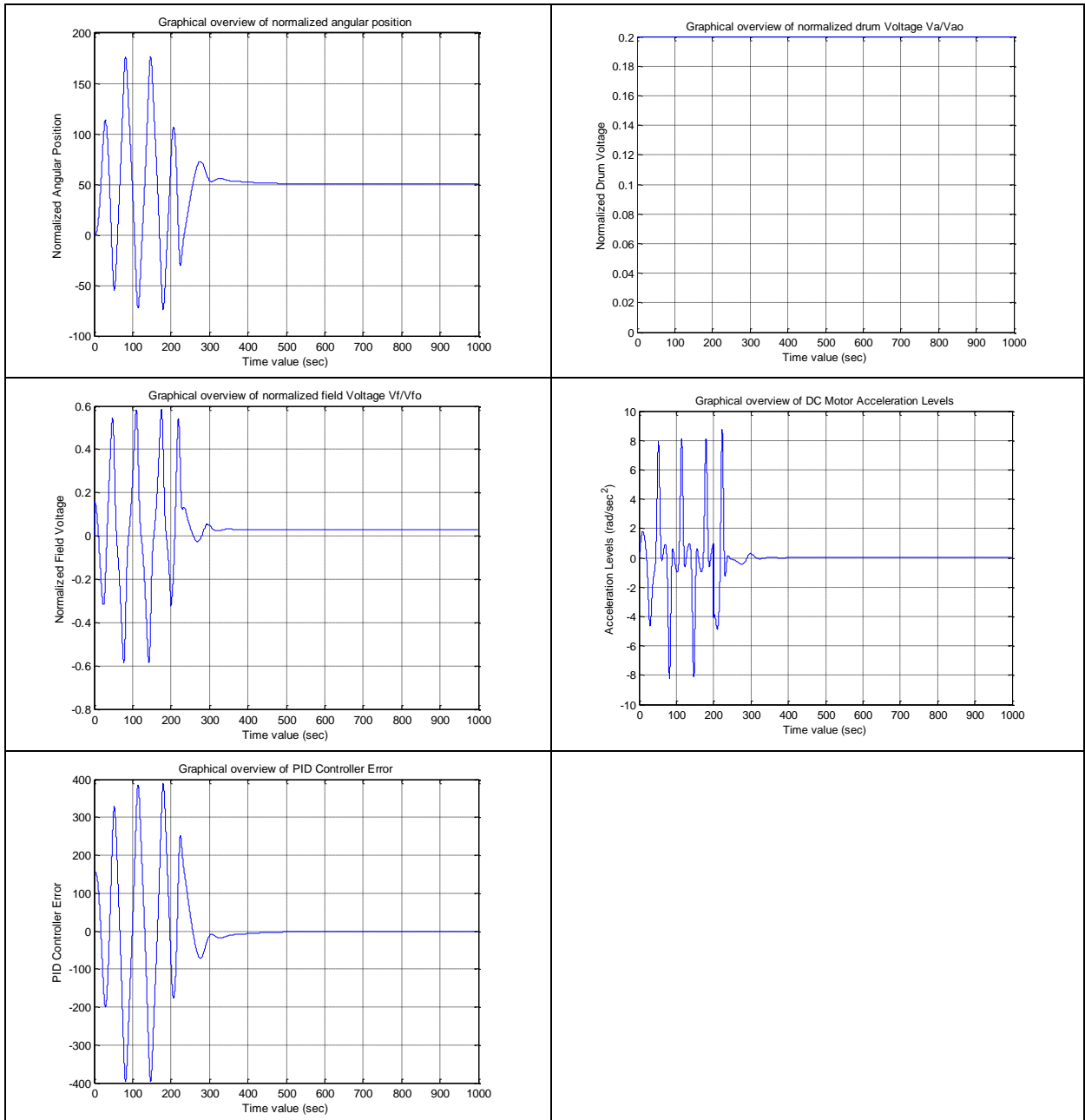
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	0	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (-)

		$acc_limit \leq acc \leq acc_limit$)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia ($Ia_limit \leq Ia \leq Ia_limit$)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd ($Fd_limit \leq Fd \leq Fd_limit$)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	0.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	1.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.001	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.31: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.32: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η θέση να προσαρμόζεται στην θέση αναφοράς των 50 rad. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο έλεγχος μέσω του κυκλώματος πεδίου καταφέρνει να αντισταθμίσει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος ασχέτως της επίδρασης του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs. Έντονα ταλαντωτικά φαινόμενα χαμηλών συχνοτήτων εμφανίζονται στα διαγράμματα ως αποτέλεσμα των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου με στόχο την αναστροφή της μαγνητικής ροής στο κύκλωμα και κατά συνέπεια την αντιστροφή της φοράς κινήσεως του κινητήρα. Το σύστημα εμφανίζει έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά η οποία προκαλείται από τον χειρισμό της τάσης του κυκλώματος πεδίου.

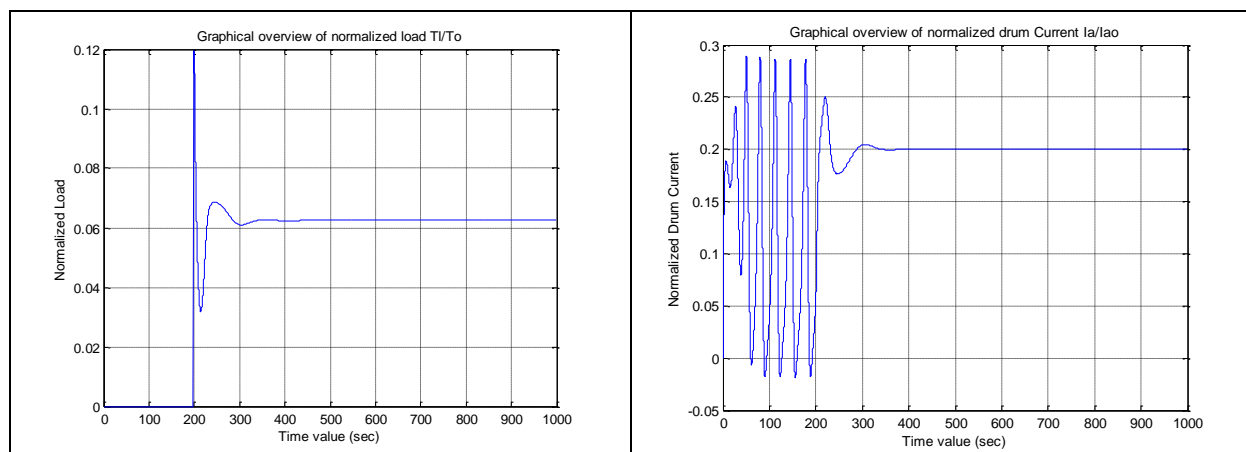
(β) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα

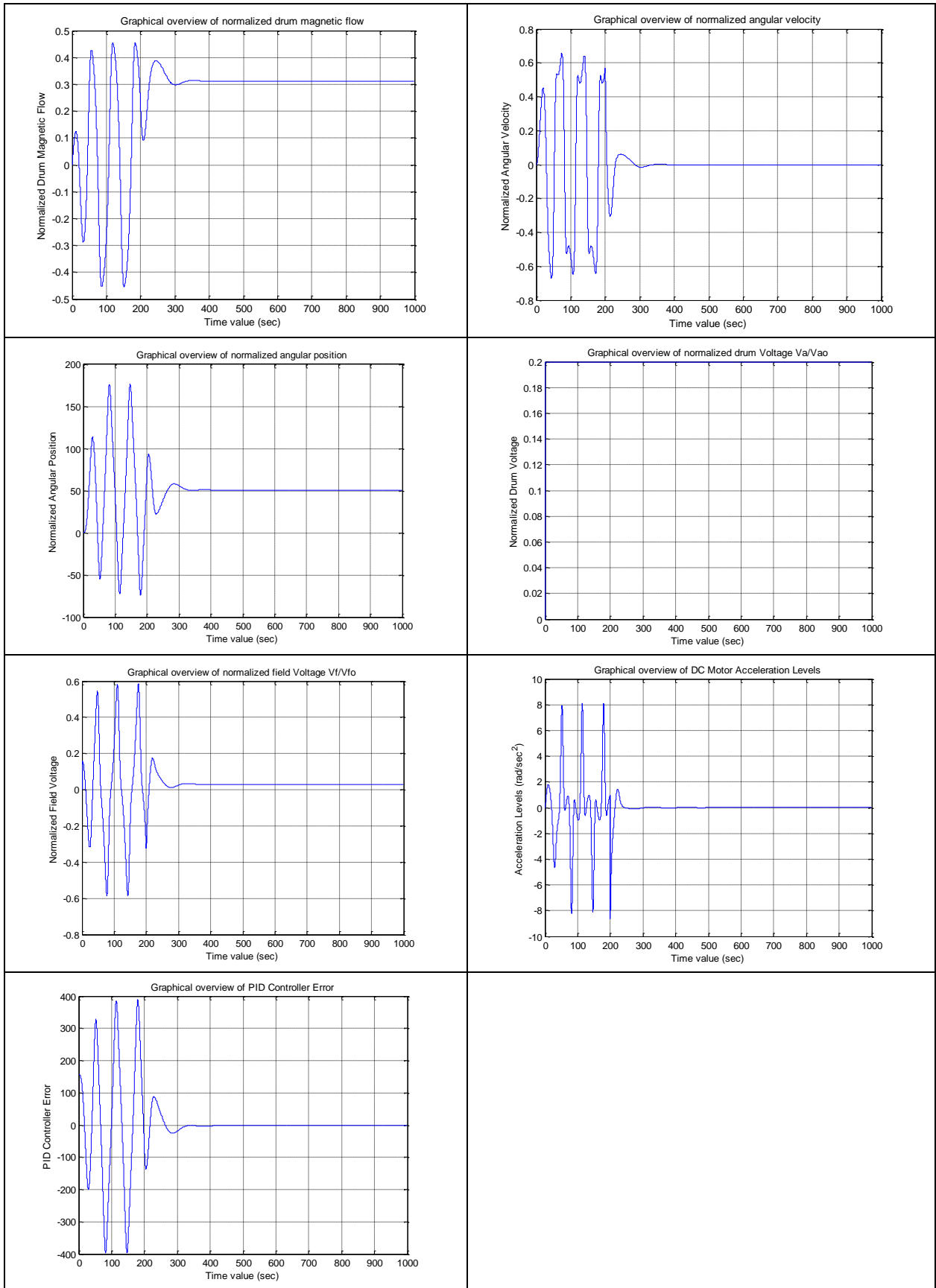
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.1	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	0	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- $acc_limit \leq acc \leq acc_limit$)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- $Ia_limit \leq Ia \leq Ia_limit$)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- $Fd_limit \leq Fd \leq Fd_limit$)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	0.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	1.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.001	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.33: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.34: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένο από την γωνιακή ταχύτητα με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-λεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η θέση να προσαρμόζεται στην θέση αναφοράς των 50 rad. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο έλεγχος μέσω του κυκλώματος πεδίου καταφέρνει να αντισταθμίσει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος ασχέτως της επίδρασης του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs. Το σύστημα εμφανίζει έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά η οποία προκαλείται από τον χειρισμό της τάσης του κυκλώματος πεδίου. Η τάση του κυκλώματος τυμπάνου παραμένει σταθερή σε όλη την διάρκεια της εφαρμογής του ελέγχου. Η ντιστάθμισει ανα και έντονα ταλαντωτική όπως και προηγουμένως καταλήγει να επιτύχει τον τελικό στόχο της.

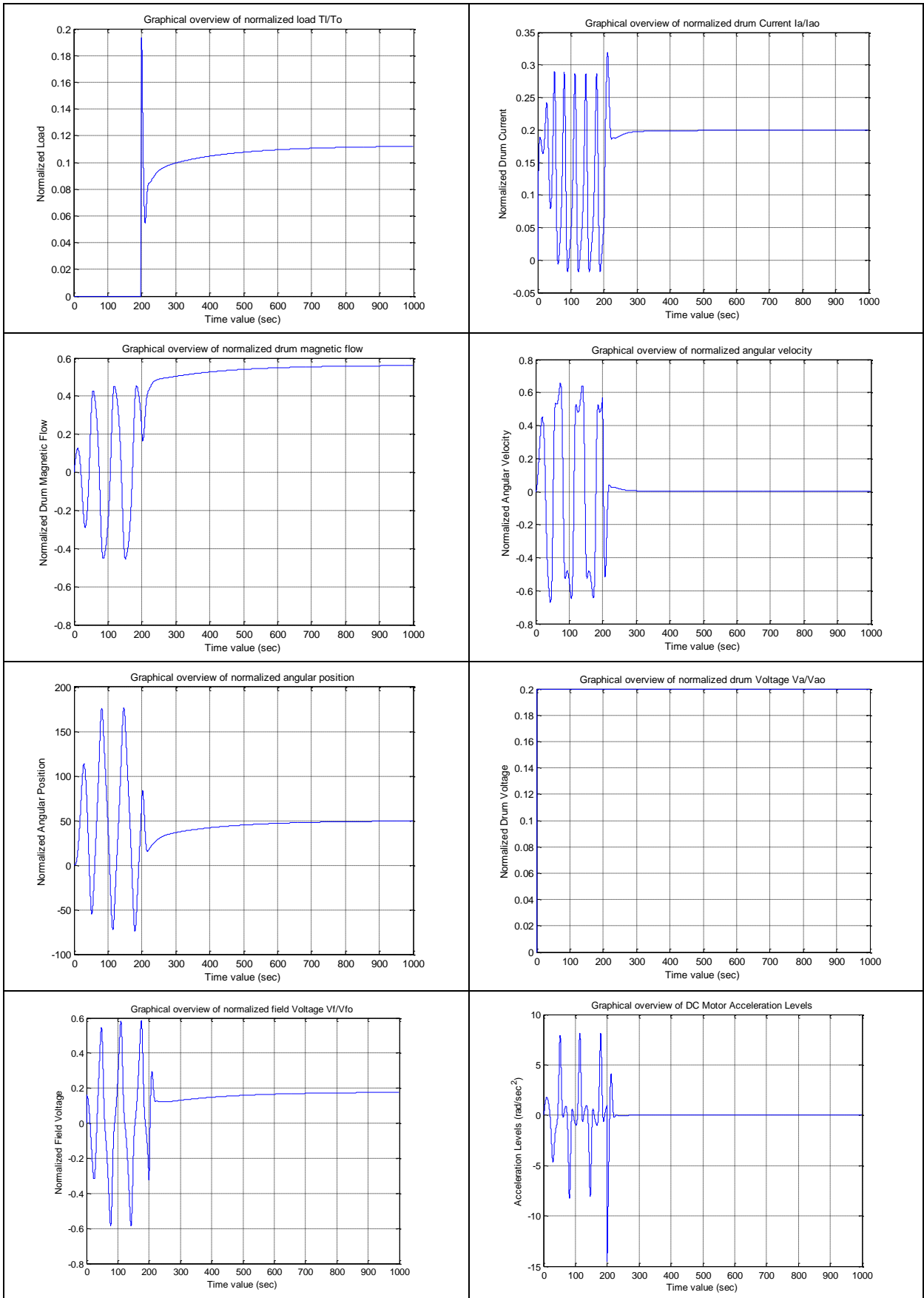
(γ) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή θέση

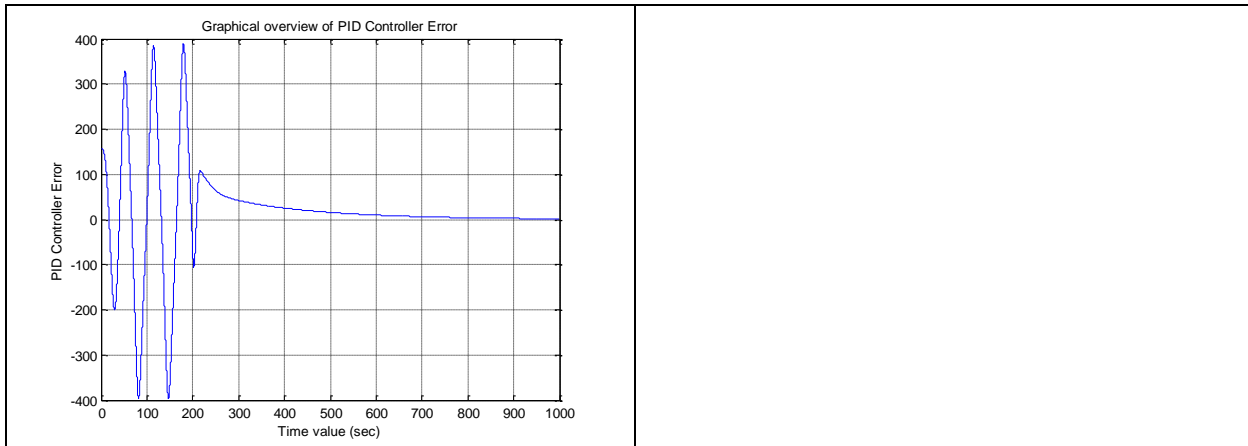
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.1	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.001	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	0	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (-acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (-Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (-Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	0.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	1.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.001	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.35: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.36: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένο από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η θέση να προσαρμόζεται στην θέση αναφοράς των 50 rad. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο έλεγχος μέσω του κυκλώματος πεδίου καταφέρνει να αντισταθμίσει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος ασχέτως της επίδρασης του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs. Στην περίπτωση αυτή το υπεισερχόμενο φορτίο έχει και την προσθήκη εξάρτησης από την θέση γεγονός που το κάνει επίσης κατά ενάν ακόμα παράγοντα μεταβλητό, δυσκολεύοντας την εφαρμογή του ελέγχου. Το σύστημα εμφανίζει έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά η οποία προκαλείται από τον χειρισμό της τάσης του κυκλώματος πεδίου. Η τάση του κυκλώματος τυμπάνου παραμένει σταθερή σε όλη την διάρκεια της εφαρμογής του ελέγχου. Το σύστημα αποκαθιστά και αντισταθμίζει την τελική θέση του κινητήρα ταλαντωτικά κατά το μεγαλύτερο μέρος αλλά ασυμπτωτικά και μονοτονικά στην τελευταία φάση της αντιστάθμισης.

5.2.2.2 Έλεγχος γωνιακής ταχύτητας

(α) Σταθερό φορτίο

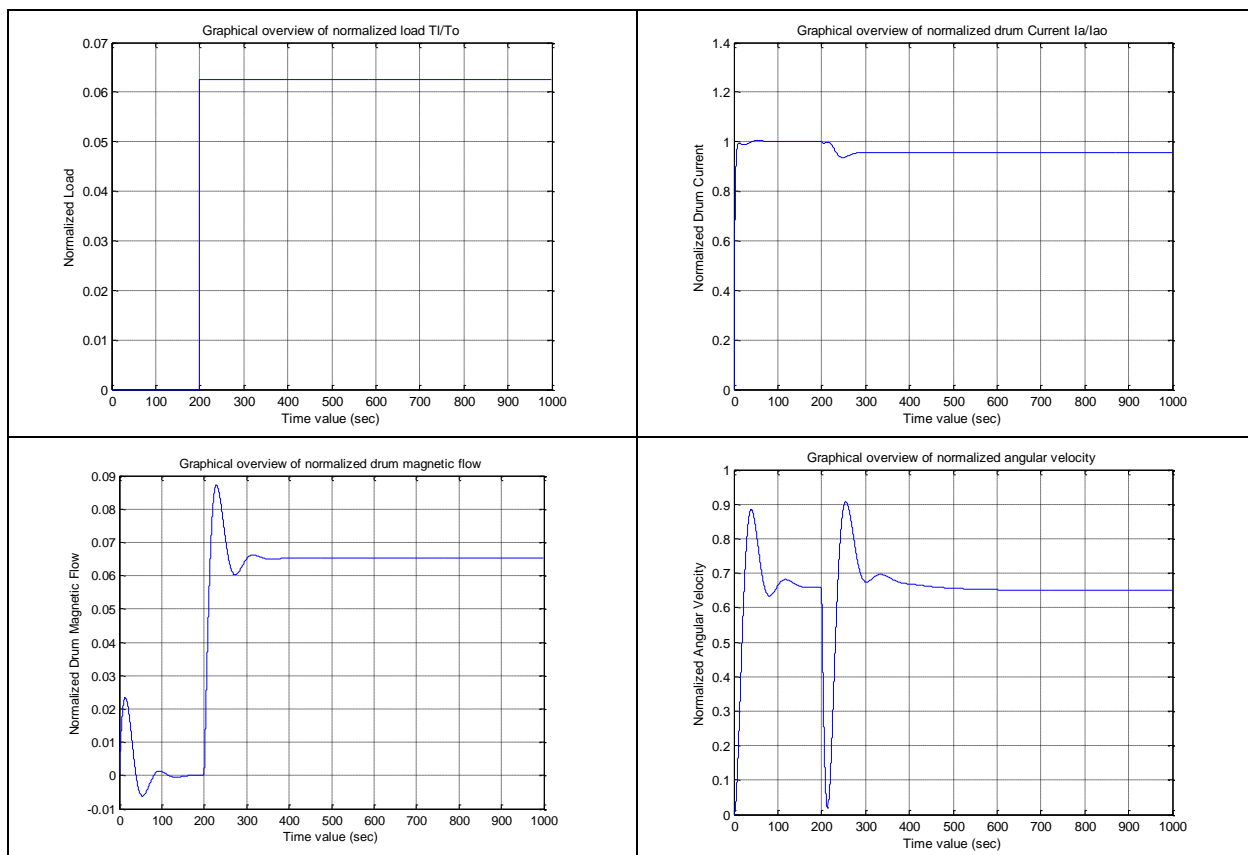
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

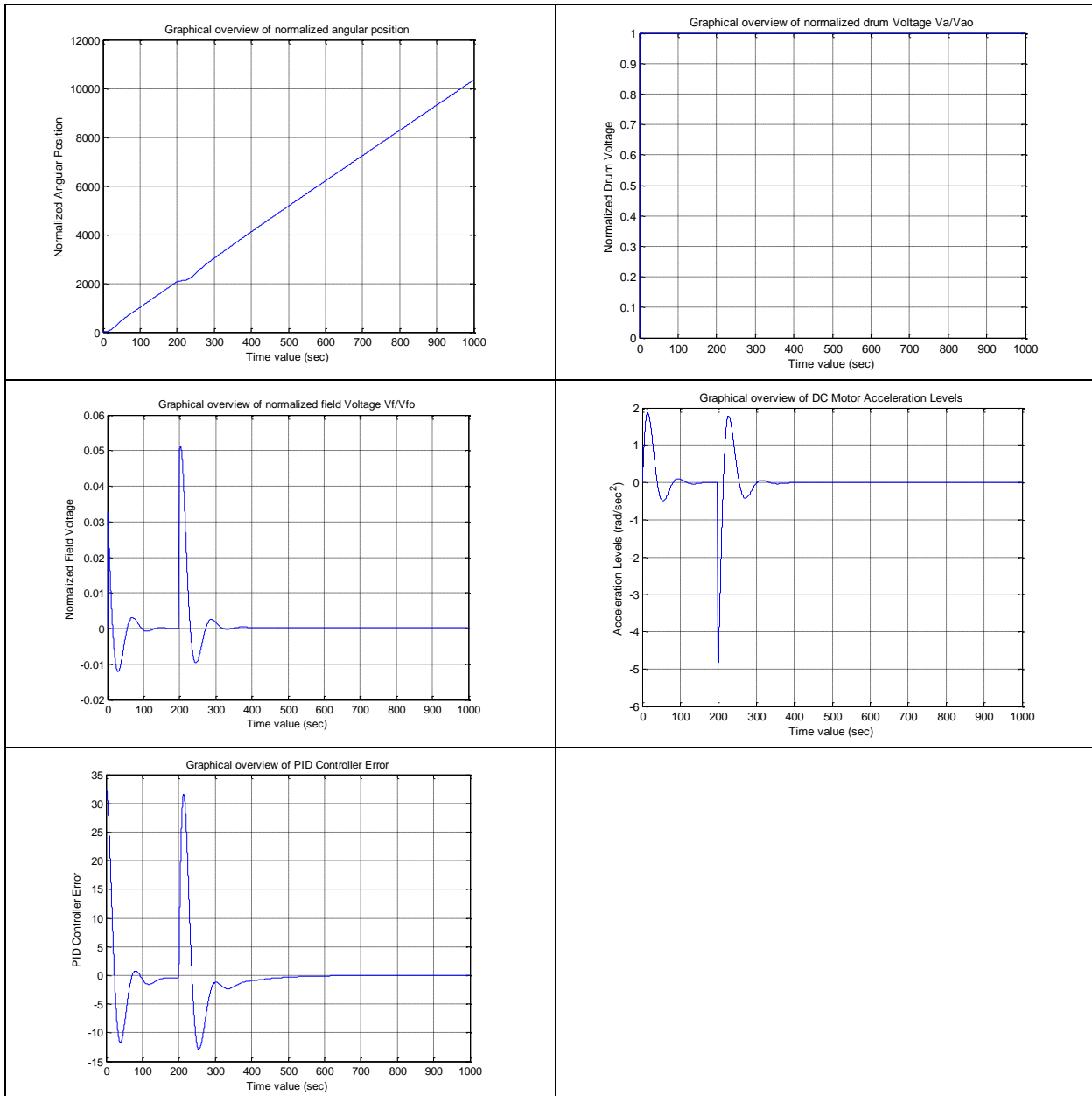
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	‘n’	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	‘y’	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα

enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- $acc_limit \leq acc \leq acc_limit$)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- $Ia_limit \leq Ia \leq Ia_limit$)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- $Fd_limit \leq Fd \leq Fd_limit$)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	0.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	1.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.001	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.37: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.38: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα Σ.Ρ. να παραμένει σταθερή στο επίπεδο των $0.65\omega_0$. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο έλεγχος μέσω του κυκλώματος πεδίου καταφέρνει να αντισταθμίσει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος ασχέτως της επίδρασης του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs. Το σύστημα εμφανίζει μικρή ταλαντωτική συμπεριφορά η οποία προκαλείται από τον χειρισμό της τάσης του κυκλώματος πεδίου. Η ταλαντωτική συμπεριφορά όμως υπεισέρχεται έντονα και στην γωνιακή ταχύτητα του συστήματος κάνοντας μεγάλες αυξομειώσεις μέχρι να την αποκαταστήσει στα επιθυμητά επίπεδα.

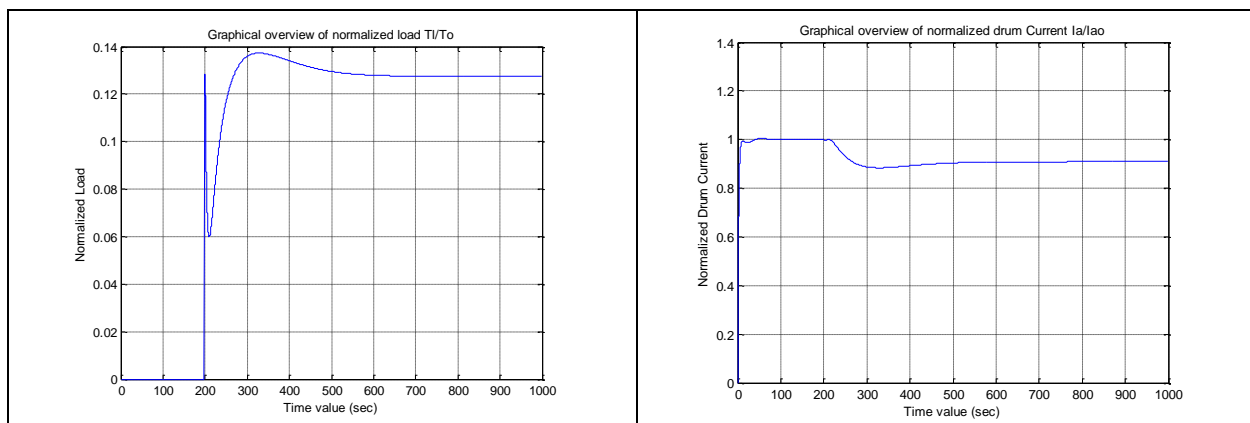
(β) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα

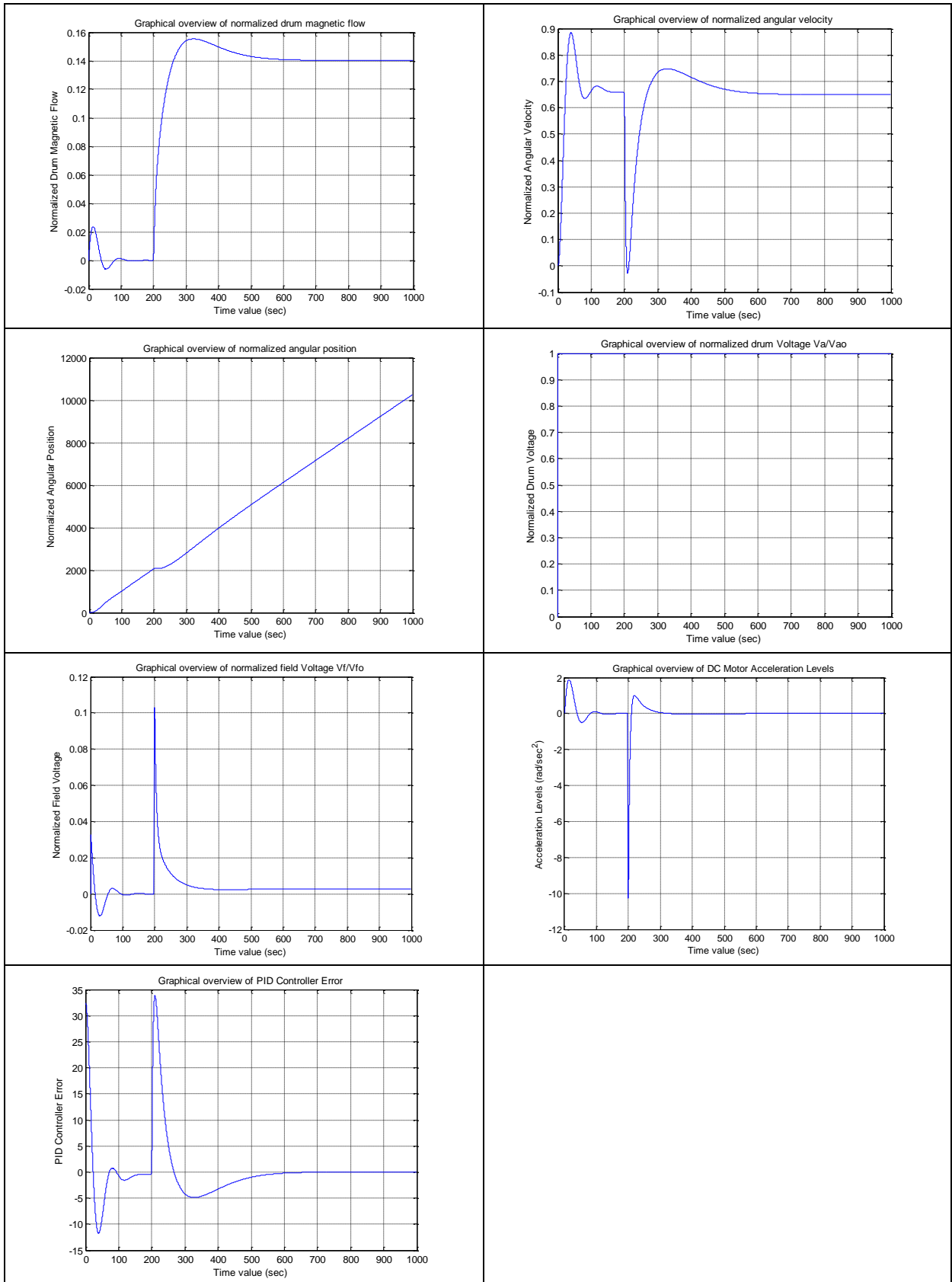
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
Tl1	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
Tl2	0.1	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	0.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	1.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.001	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.39: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.40: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης σταθερού φορτίου με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή

ταχύτητα του κινητήρα Σ.Ρ. να παραμένει σταθερή στο επίπεδο των 0.65ω_ο. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο έλεγχος μέσω του κυκλώματος πεδίου καταφέρνει να αντισταθμίσει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος ασχέτως της επίδρασης του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs. Τα φαινόμενα είναι ταλαντωτικά αλλά όχι ταχέως μεταβαλλόμενα. Από την άλλη πλευρά είναι έντονη η παρουσία μεταβολών στην γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα πριν αυτή αποκατασταθεί στα επιθυμητά επίπεδα.

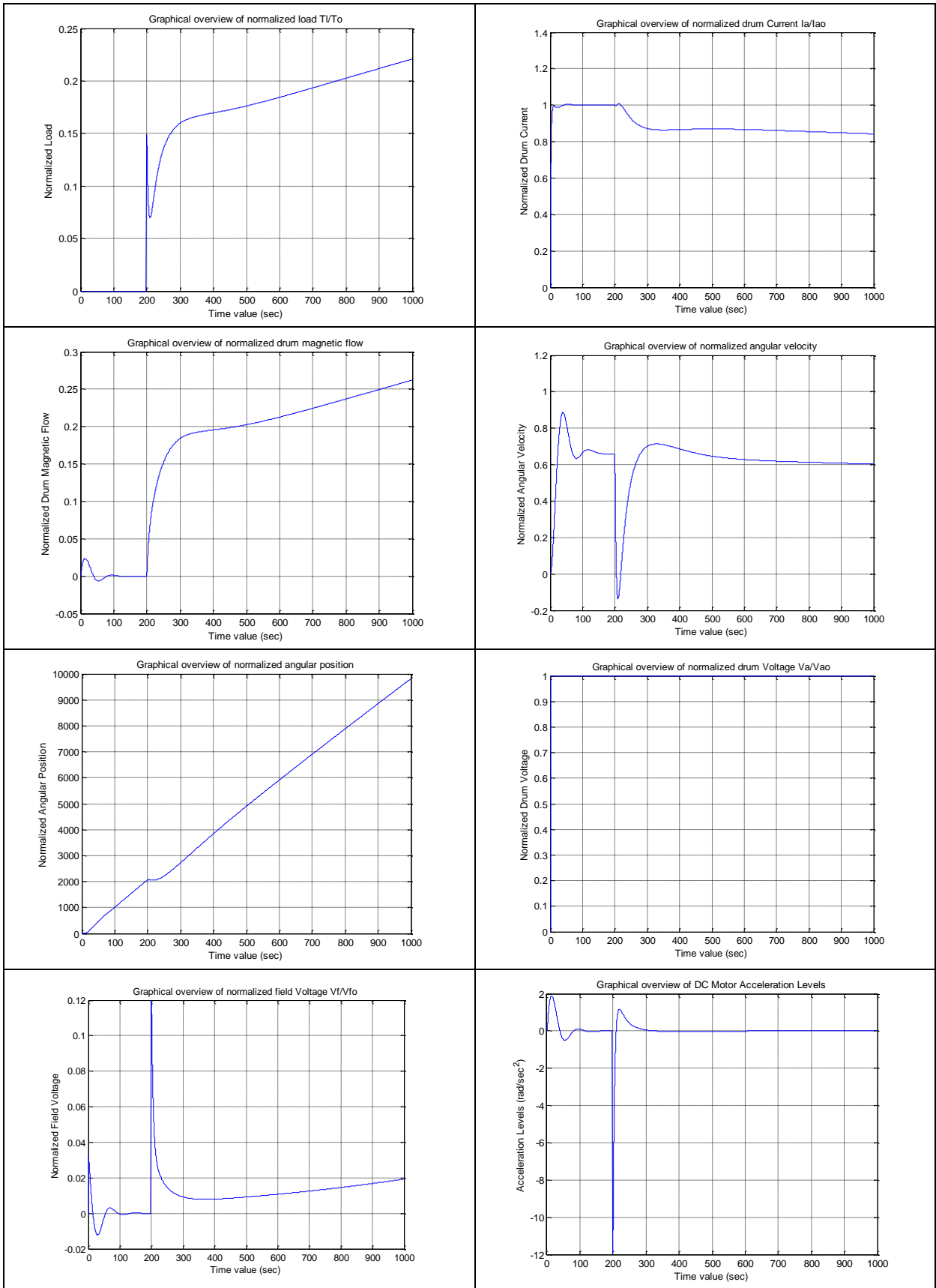
(γ) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή θέση

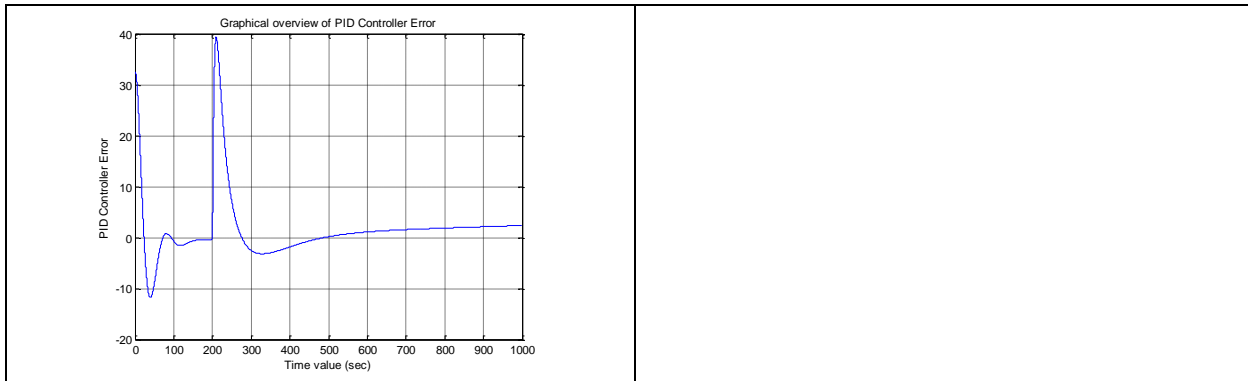
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.1	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.001	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
control_of_Va	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (-acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (-Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (-Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	0.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	1.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.001	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf

Πίνακας 5.41: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.42: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτώμενου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος πεδίου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα Σ.Ρ. να παραμένει σταθερή στο επίπεδο των $0.65\omega_0$. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο έλεγχος μέσω του κυκλώματος πεδίου καταφέρνει να αντισταθμίσει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος ασχέτως της επίδρασης του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs. Το εισερχόμενο φορτίο δεδομένου ότι εξαρτάται από την γωνιακή θέση του συστήματος είναι γενικότερα μεταβλητό καθ'όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, και αυτό κάνει ακόμα πιο σημαντικά τα αποτελέσματα για την λειτουργία του ελεγκτή. Σε αυτήν την φάση το σύστημα επιδεικνύει ταλαντωτική συμπεριφορά η οποία όμως είναι σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους φορτίων. Δηλ. το διαρκώς μεταβαλλόμενο φορτίο λόγω της γωνιακής θέσης του κινητήρα δρα θετικά στην από αδράνεια ικανότητα μεταβολής του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα παράγοντας ένα αποτέλεσμα αντιστάθμισης το οποίο είναι ικανοποιητικότερο των αντίστοιχων προηγούμενων.

5.2.3 Εφαρμογή Περιορισμών

Η ενεργοποίηση των περιορισμών στο μοντέλο προσομοίωσης του κλειστού βρόχου, όπως αναφέρθηκε και στις αρχικές φάσεις περιγραφής του μοντέλου, αναμένεται να προσδώσει ρεαλιστικότητα στα αποτελέσματα από την εφαρμογή των προσομοιώσεων. Επιπλέον η εφαρμογή των περιορισμών αναμένεται να επιδράσει σημαντικά στα παραγόμενα αποτελέσματα αντιστάθμισης όπως αυτά επιτυγχάνονται από την χρήση του PID-ελεγκτή, δεδομένου ότι στην προκειμένη περίπτωση ο ελεγκτής περιορίζεται στην εφαρμογή της δράσης του, εξαιτίας των ανωτέρω περιορισμών. Οι επιθυμητές τιμές που ο ελεγκτής θέλει να χρησιμοποιήσει για την επίτευξη της αντιστάθμισης περιρίζονται από μέγιστα επιβαλλόμενες τιμές και αυτό αναμένεται να επιδράσει στην γενικότερη εκτίμηση της «ταχύτητας αντιστάθμισης» του ελεγκτή. Για να καταδειχθεί η επίδραση των περιορισμών στο σύστημα, θα χρησιμοποιηθούν μερικά από τα προηγούμενα σενάρια με τις ανάλογες συνθήκες διευκολύνοντας την εξαγωγή συμπερασμάτων και επιπλέον διευκολύνοντας την εκτίμηση για την ταχύτητα

δράσης των μηχανισμών αντιστάθμισης σε σχέση με ένα σύστημα χωρίς περιορισμούς.

5.2.3.1 Περιορισμός Γωνιακής Επιτάχυνσης

Για την μελέτη της επίδρασης του περιορισμού στην μέγιστη γωνιακή επιτάχυνση του συστήματος κινητήρα Σ.Ρ. θα χρησιμοποιήσουμε το σενάριο με φορτίο σε εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα και έλεγχο από το κύκλωμα του πεδίου και στόχο την αντιστάθμιση γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, το οποίο προσομοιώσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην φάση αυτή θα επιβάλλουμε περιορισμό για την ελάχιστη/μέγιστη γωνιακή επιτάχυνση εντός του διαστήματος $-0.5 \text{ rad/sec}^2 \leq \text{acc} \leq +0.5 \text{ rad/sec}^2$.

(β) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα έλεγχο από το κύκλωμα πεδίου και αντιστάθμιση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Περιορισμός της γωνιακής επιτάχυνσης.

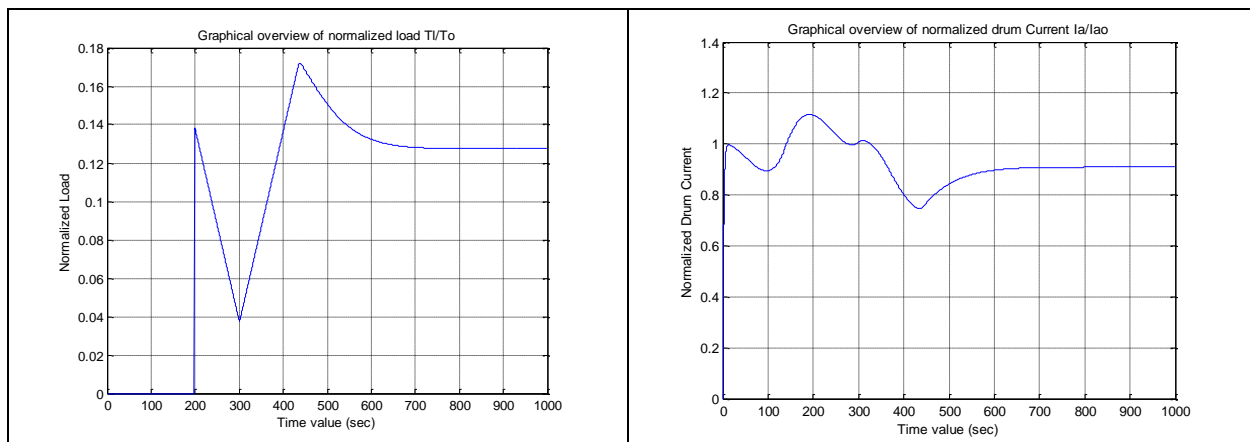
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

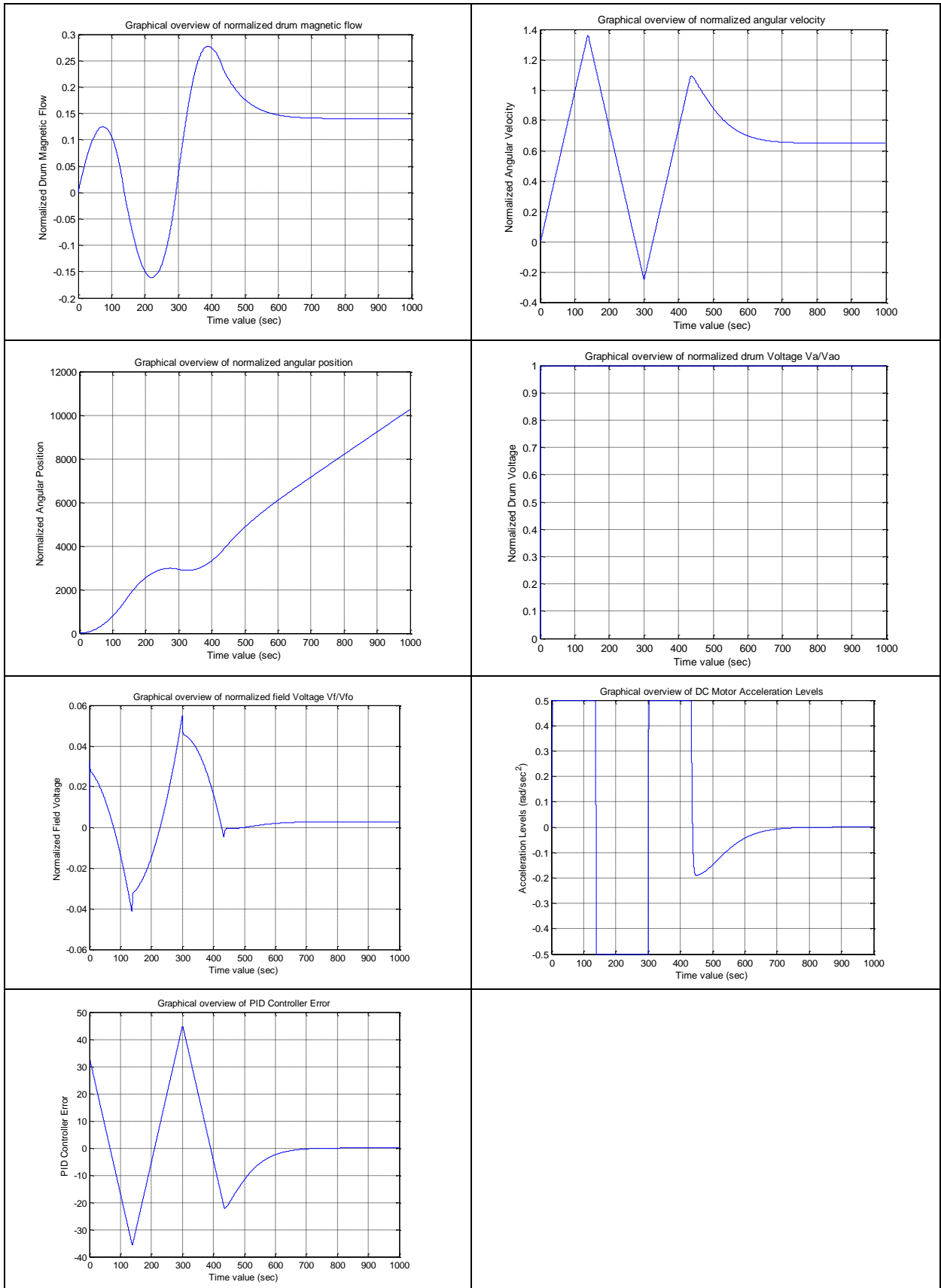
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step	0,01	Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start	0	Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop	1000	Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start	200	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.1	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
plot_Tload	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας
plot_theta	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
plot_acc	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής επιτάχυνσης
plot_err	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης σφάλματος του PID-ελεγκτή
suspend_warnings	‘n’	Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους
control_of_Va	‘n’	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	‘y’	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα

enable_acc_limit	'y'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	0.5	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (-acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (-Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (-Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	0.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	1.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.001	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Vao	200	Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o	50	Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo	10	Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo	100	Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J	10	Ροπή Αδράνειας Άξονα (Kgrxm ²)
Ra	1.0	Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La	2.0	Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf	0.8	Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf	100	Αριθμός σπειρών κυκλώματος διεγερσης
theta_o	π	Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)

Πίνακας 5.43: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο πεδίου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.44: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή ταχύτητα με έλεγχο κυκλώματος πεδίου και περιορισμό γωνιακής επιταχύνσεως

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα Σ.Ρ. να παραμένει σταθερή στο επίπεδο των $0.65\omega_0$. Λόγω της υπάρξεως του περιορισμού ο κινητήρας δεν επιταχύνει σε καμία φάση αντιστάθμισης με μεγαλύτερη επιτάχυνση από 0.5 rad/sec^2 , παρά το γεγονός ότι αυτό μπορεί να χρειάζεται για την γρήγορη αντιστάθμιση και την επίτευξη της επιθυμητής γωνιακής ταχύτητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καθυστερεί την επίτευξη της αντιστάθμισης από το κλειστό σύστημα. Επιπλέον το γεγονός ότι το φορτίο έχει συνιστώσα η οποία εξαρτάται από την γωνιακή ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η συνολική καμπύλη φορτίου όπως αυτή παρουσιάζεται στο διάγραμμα με βάση τον χρόνο. Γενικό συμπέρασμα από την εφαρμογή του περιορισμού είναι ότι αυτή επίσης περιορίζει την ταχύτητα αντιστάθμισης που επιδεικνύει το κλειστό σύστημα.

5.2.3.2 Περιορισμός Τάσεως/Ρεύματος Τυμπάνου

Για τον έλεγχο της επίδρασης του περιορισμού της τάσεως/ρεύματος τυμπάνου θα χρησιμοποιήσουμε ένα σενάριο προσομοίωσης για φορτίο εξαρτημένο από την γωνιακή ταχύτητα με έλεγχο από το κύκλωμα τυμπάνου. Ο περιορισμός αφορά στην μέγιστη ανάπτυξη ρεύματος 25 A στο κύκλωμα τυμπάνου του κινητήρα.

(γ) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή ταχύτητα και έλεγχο από το κύκλωμα τυμπάνου με στόχο την αντιστάθμιση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Περιορισμός ρεύματος τυμπάνου

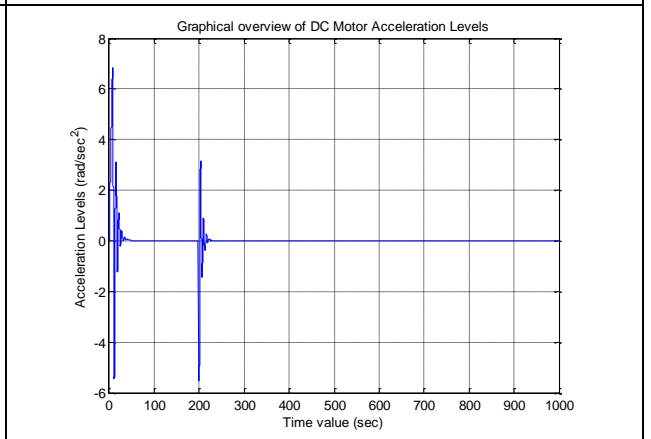
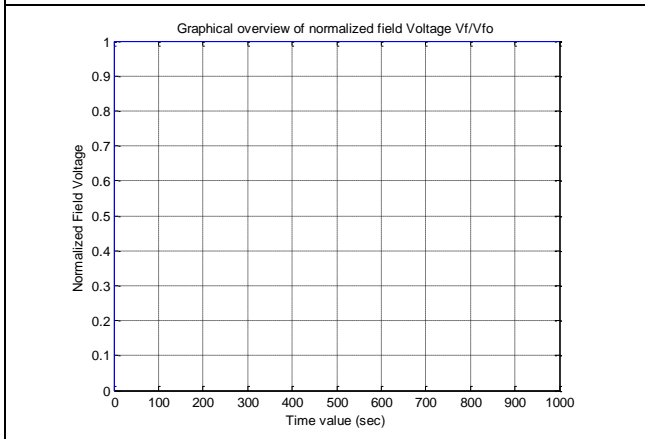
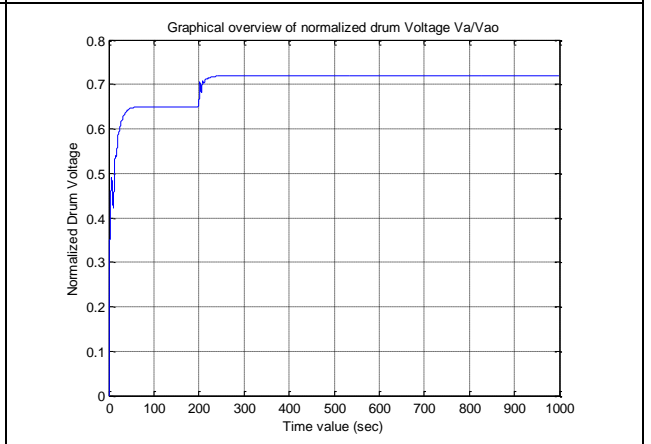
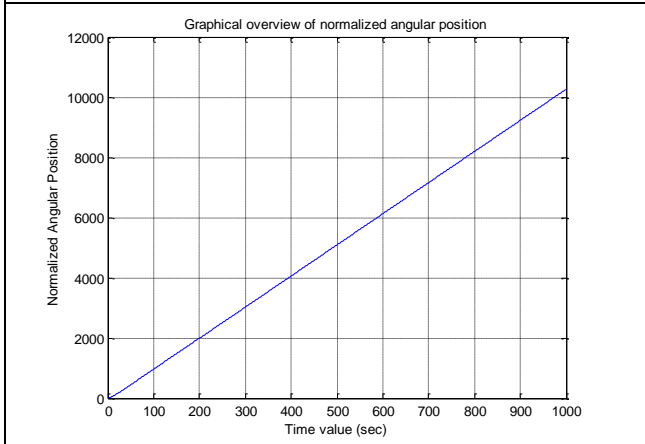
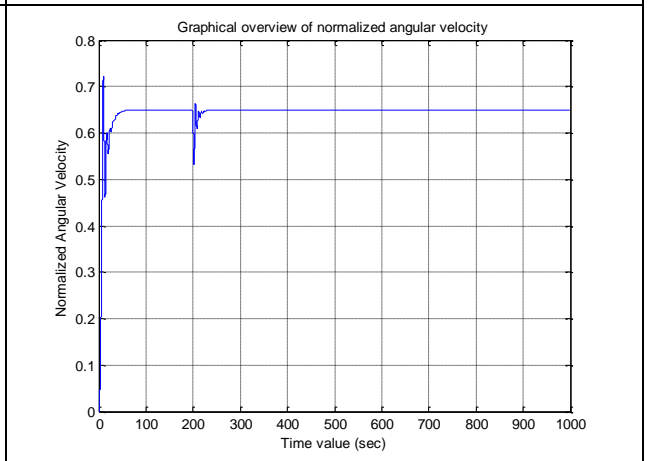
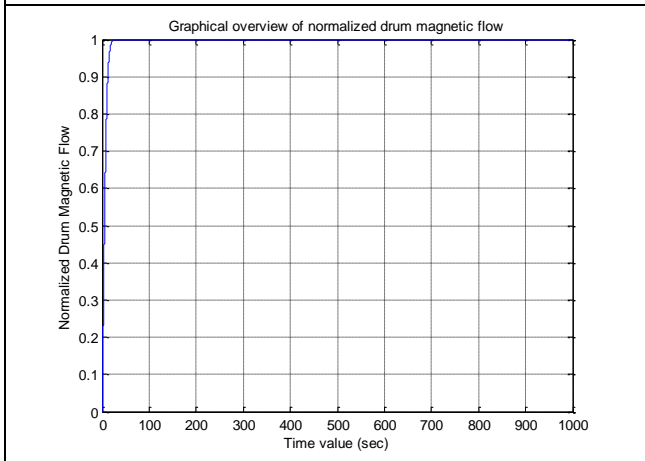
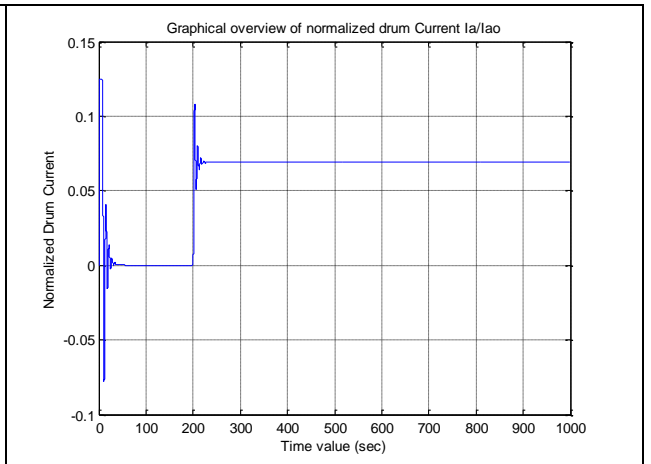
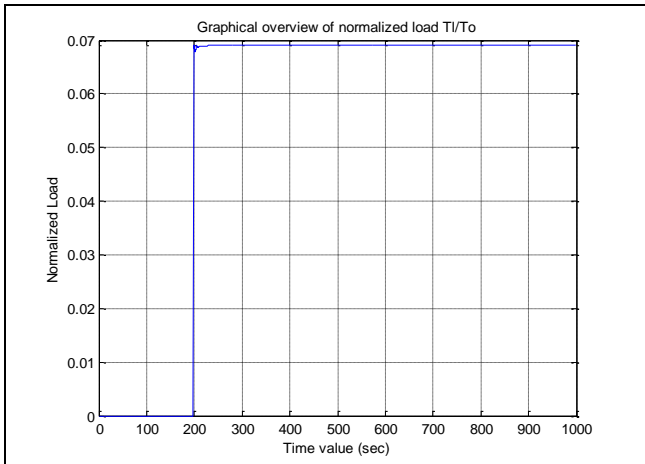
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

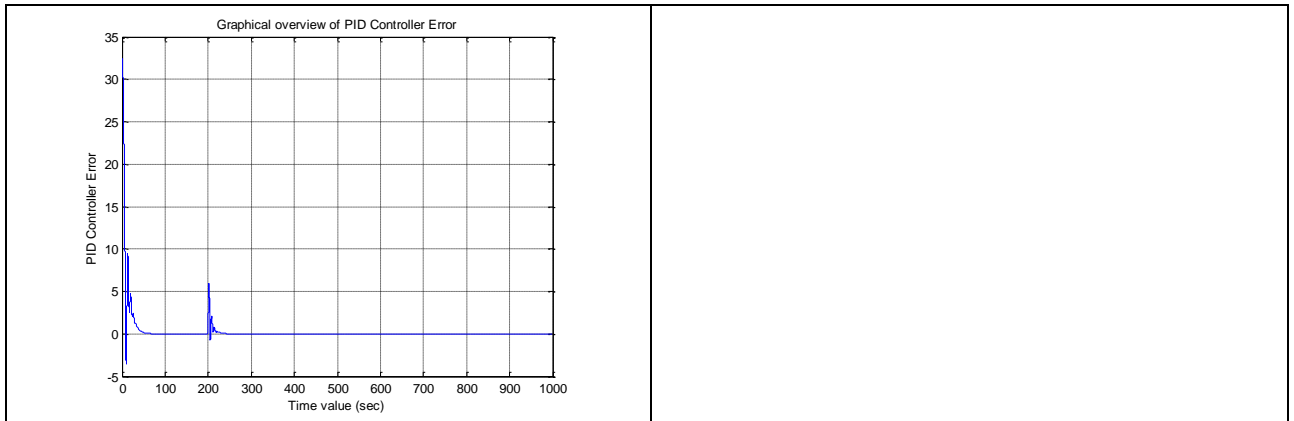
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step	0,01	Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start	0	Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop	1000	Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start	200	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.0	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
plot_Tload	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega	‘y’	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας

plot_theta	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
plot_acc	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής επιτάχυνσης
plot_err	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης σφάλματος του PID-ελεγκτή
suspend_warnings	'n'	Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους
control_of_Va	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	1	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (- acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'y'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (- Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (- Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Vao	200	Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o	50	Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo	10	Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo	100	Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J	10	Ροπή Αδράνειας Άξονα (Kgrxm ²)
Ra	1.0	Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La	2.0	Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf	0.8	Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf	100	Αριθμός σπειρών κυκλώματος διέγερσης
theta_o	π	Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)

Πίνακας 5.45: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.46: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου και περιορισμό ρεύματος τυμπάνου

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής να διατηρείται σταθερή στα 0.65. Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs αναγκάζει τον ελεγκτή να μεταβάλλει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση όπου έχουμε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο φορτίο. Παρά τον περιορισμό ρεύματος του κυκλώματος τυμπάνου, το κλειστό σύστημα καταφέρνει να αντισταθμίσει επιτυχώς την ζητούμενη θέση αναφοράς. Στην προκειμένη περίπτωση ο αντίστοιχος περιορισμός λειτουργίας για το ρεύμα τυμπάνου δεν εμφανίζεται να επιδρά στην προσομοίωση του συγκεκριμένου σεναρίου.

5.2.3.3 Περιορισμός Μαγνητικής Ροής

Για τον έλεγχο της επίδρασης του περιορισμού της μαγνητικής ροής στο κύκλωμα του πεδίου, όσον αφορά στην ικανότητα αντιστάθμισης του κλειστού βρόχου, χρησιμοποιούμε το σενάριο όπου το φορτίο έχει εξάρτηση από την θέση με έλεγχο από το κύκλωμα τυμπάνου. Στόχος είναι η αντιστάθμιση για τον έλεγχο της γωνιακής θέσης του κινητήρα Σ.Ρ. Στην εφαρμογή του περιορισμού η μαγνητική ροή έχει μέγιστη τιμή 5 Wb η οποία ισοδυναμεί ποσοστιαία σε 0.5 της μέγιστης τιμής που μπορεί να επιτευχθεί από το κύκλωμα πεδίου.

(γ) Φορτίο με εξάρτηση από την γωνιακή θέση με έλεγχο από το κύκλωμα τυμπάνου με στόχο την αντιστάθμιση της γωνιακής θέσης περιστροφής. Περιορισμός στην μαγνητική ροή από το κύκλωμα πεδίου.

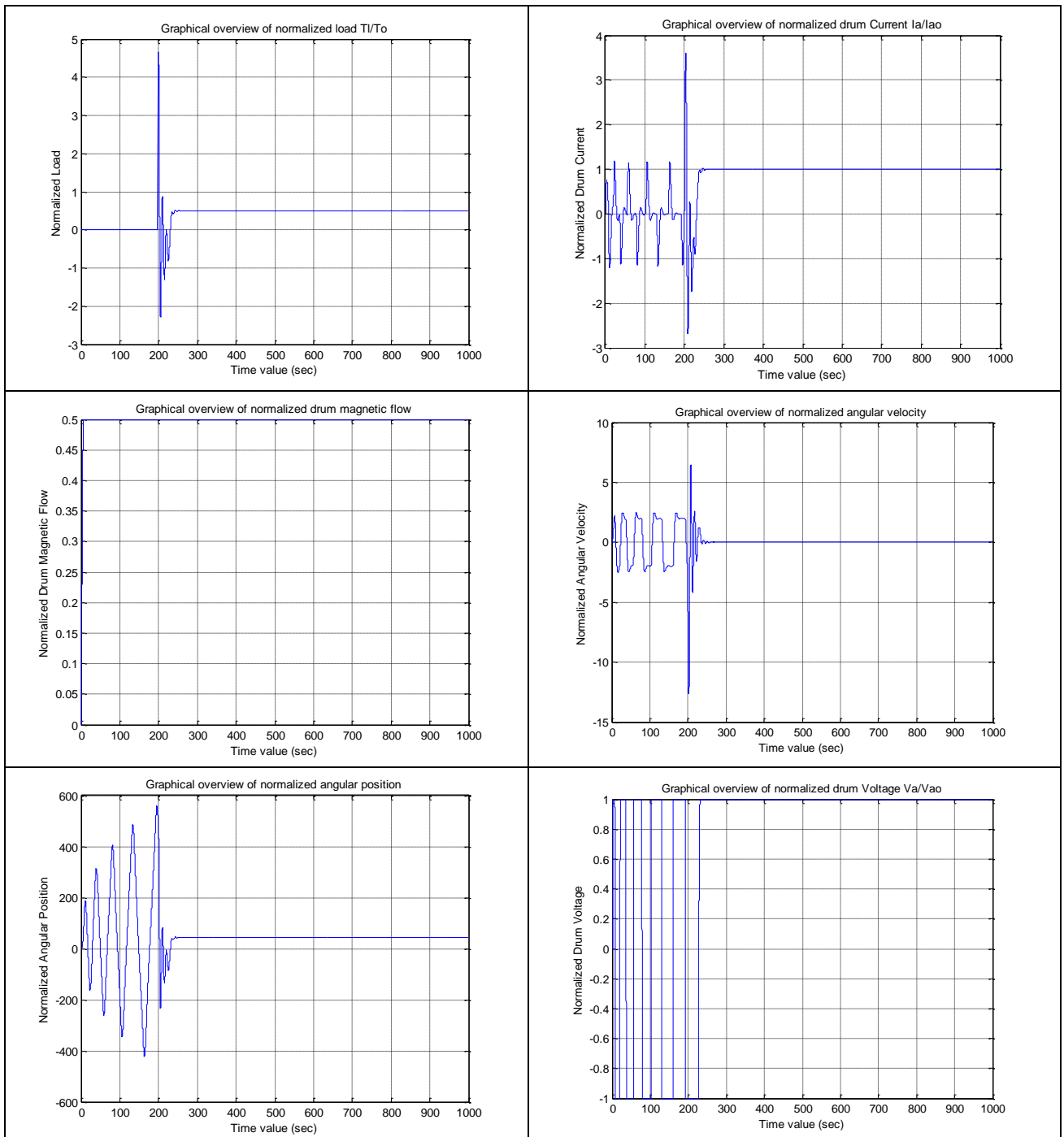
Τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

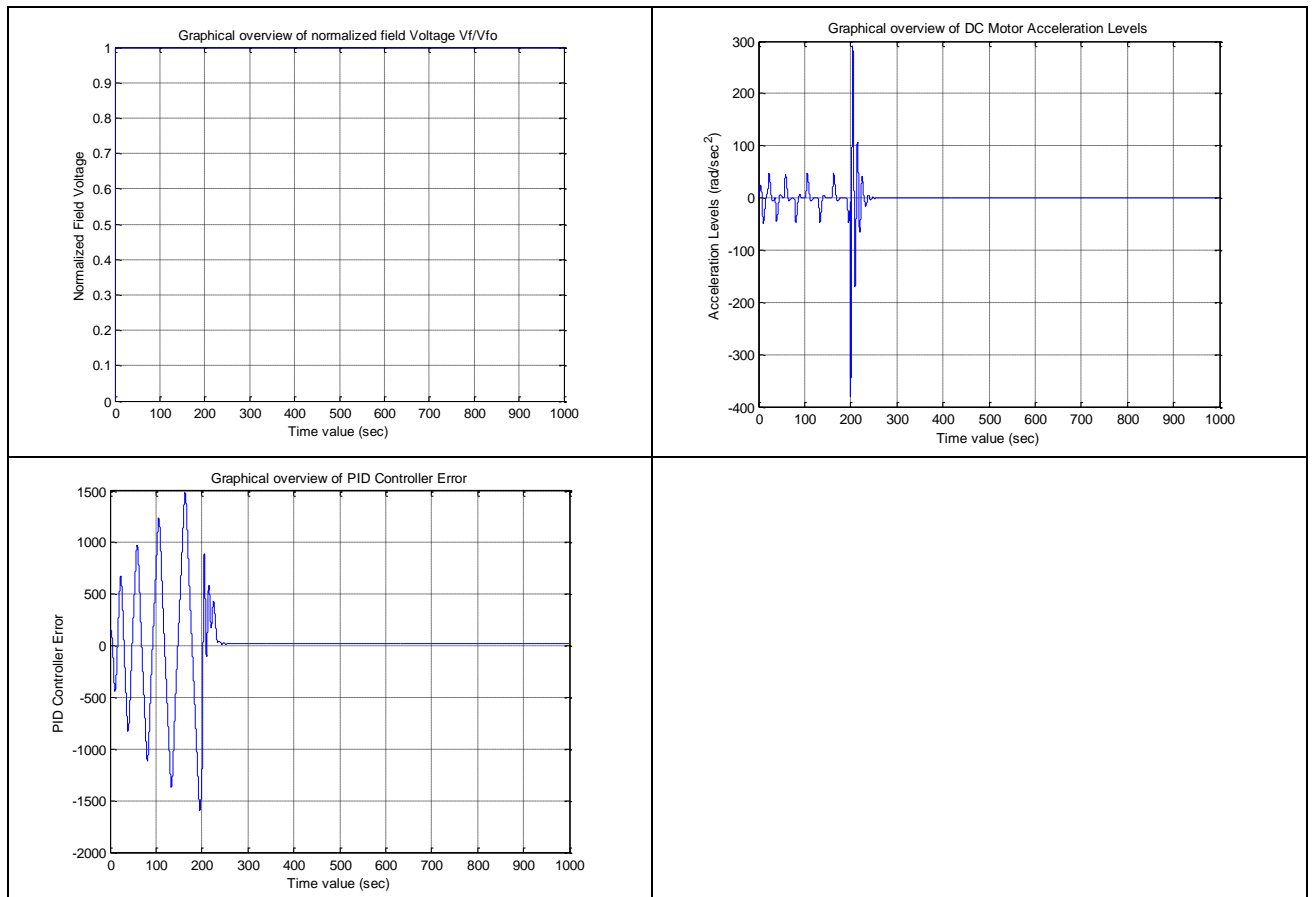
Μεταβλητή Κινητήρα Κυρίου Σώματος	Τιμή	Παρατηρήσεις
t_step	0,01	Βήμα Προσομοίωσης (sec)
t_start	0	Χρονική στιγμή Ένεργξης προσομοίωσης (sec)
t_stop	1000	Χρονική στιγμή Λήξης Προσομοίωσης (sec)
t_load_start	200	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου του κινητήρα (sec)
T11	50	Σταθερή συνιστώσα φορτίου
T12	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
T13	0.01	Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης
plot_Tload	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής τυμπάνου
plot_omega	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής ταχύτητας
plot_theta	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης
plot_acc	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής επιτάχυνσης
plot_err	'y'	Γραφική παράσταση της συνάρτησης σφάλματος του PID-ελεγκτή
suspend_warnings	'n'	Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις παραμέτρους
control_of_Va	'y'	Ενεργοποίηση Ελέγχου του κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf	'n'	Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option	0	Τύπος ελέγχου 0=θέση 1=ταχύτητα
enable_acc_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit	1	Μέγιστη επιτάχυνση αναφοράς (-acc_limit<=acc<=acc_limit)
enable_Ia_limit	'n'	Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit	50	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Ia (-Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)
enable_Fd_limit	'y'	Ενεργοποίηση του ορίου μαγνητικής ροής πεδίου
Fd_limit	5	Μέγιστη απόλυτη τιμή του Fd (-Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)
theta_ref	50	Γωνιακή θέση αναφοράς (για έλεγχο θέσης)
omega_ref	0.65	Γωνιακή ταχύτητα αναφοράς (για έλεγχο ταχύτητας)
Kpva	1.1	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kdva	0.01	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kiva	0.5	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Va
Kpvf	1.0	Παράγοντας Αναλογικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kdvf	5.0	Παράγοντας Διαφορικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Kivf	0.0	Παράγοντας Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης για έλεγχο Vf
Vao	200	Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών τυμπάνου Σ.Ρ. (V)
omega_o	50	Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ. (rad/sec)
Fdo	10	Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo	100	Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)

J	10	Ροπή Αδράνειας Άξονα ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$)
Ra	1.0	Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La	2.0	Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου ω
Rf	0.8	Αντίσταση Κυκλώματος πεδίου (Ohm)
Nf	100	Αριθμός σπειρών κυκλώματος διέγερσης
theta_o	π	Αρχική Γωνία Κινητήρα (rad)

Πίνακας 5.47: Παράμετροι προσομοίωσης σώματος κυρίως κώδικα για την προσομοίωση του κλειστού μοντέλου με έλεγχο τυμπάνου

Τα γραφικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης του σεναρίου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:





Πίνακας 5.48: Γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της λειτουργίας του κινητήρα για το σενάριο προσομοίωσης φορτίου εξαρτημένου από την γωνιακή θέση με έλεγχο κυκλώματος τυμπάνου και περιορισμό στην μαγνητική ροή

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο PID-ελεγκτής προσαρμόζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του κλειστού συστήματος, έτσι ώστε η θέση να προσαρμόζεται στην θέση αναφοράς των 50 rad. Η εισαγωγή του φορτίου στην χρονική στιγμή των 200 secs αναγκάζει τον ελεγκτή να μεταβάλλει την τάση του κυκλώματος τυμπάνου. Δεδομένου του περιορισμού στην μαγνητική ροή του κυκλώματος πεδίου, παρατηρούμε ότι οι μεταβολές της τάσεως στο κύκλωμα τυμπάνου που επιβάλλονται από τον ελεγκτή είναι πιο «απότομες» σε σχέση με τις αντίστοιχες όπου δεν επιβαλλόταν περιορισμός στην μαγνητική ροή. Το σύστημα βλέπουμε ότι αναπροσαρμόζει κατάλληλα την συμπεριφορά του για να αφήνει το φορτίο σταθερά στην θέση αναφοράς με επιτυχία. Η εμφάνιση ταλαντωτικών συμπεριφορών είναι πιο έντονη στα παραπάνω διαγράμματα δεδομένου ότι η εξάρτηση του φορτίου από την γωνιακή θέση είναι σημαντική λόγω του συντελεστή 0.01. Εντούτοις όμως το κλειστό σύστημα καταφέρνει να αντισταθμίσει επιτυχώς την ζητούμενη θέση αναφοράς. Ο περιορισμός εισάγει ταλαντωτικά φαινόμενα στην διαδικασία της αντιστάθμισης, συγκρίνοντας με το αντίστοιχο σενάριο χωρίς περιορισμό.

5.2.4 Σήμα Ελέγχου και Σφάλμα στο κλειστό σύστημα

Το σήμα ελέγχου που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της λειτουργίας του συστήματος στον κλειστό βρόχο, αφορά στην τάση του κυκλώματος τυμπάνου και στην τάση διεγέρσεως του κυκλώματος πεδίου, όταν ο έλεγχος συντελείται από το κύκλωμα τυμπάνου ή το κύκλωμα πεδίου αντίστοιχα. Οι μαθηματικές φόρμουλες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ανωτέρω σημάτων δίνονται από τον PID-ελεγκτή ο οποίος χρησιμοποιεί ως είσοδο το σφάλμα $e(t)$ του μεγέθους που καλείται να αντισταθμίσει δηλ. της γωνιακής ταχύτητας ή της γωνιακής θέσης αντίστοιχα, ανάλογα με την επιλογή του χρήστη στο περιβάλλον προσομοίωσης.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγική περιγραφή των PID-ελεγκτών αλλά και στο τμήμα εφαρμογής των περιορισμών στην λειτουργία του μοντέλου, στόχος της λειτουργίας του ελεγκτή είναι η επίτευξη της αντιστάθμισης με βάση τα χαρακτηριστικά κερδών που έχουν προκαθοριστεί και τα οποία κανονίζουν την «αμεσότητα» επιβολής του ελέγχου επί του συστήματος υπό έλεγχο. Ο ελεγκτής λοιπόν ασχολείται κατά κύριο λόγο με την επιβολή του μηχανισμού ελέγχου αλλά όχι με τους εγγενείς περιορισμούς που αφορούν στο συνολικό σύστημα. Για να κάνουμε το μοντέλο ρεαλιστικότερο, εισαγάγαμε τους περιορισμούς σε βασικά μεγέθη που υπεισέρχονται στην λειτουργία του κλειστού συστήματος. Επιπλέον όμως στην φάση ελέγχου είτε από το κύκλωμα τυμπάνου είτε από το κύκλωμα πεδίου, οι περιορισμοί είναι εγγενείς στο μοντέλο δεδομένου ότι δεν θα είχε κανένα φυσικό νόημα να επιτραπούν κανονικοποιημένες τιμές για αυτά τα μεγέθη που ξεφεύγουν εκτός ορίων ± 1 .

Για την κατηγοριοποίηση της δράσης των τεχνικών ελέγχου επί του συστήματος του κινητήρα Σ.Ρ. εκτός από το γεγονός της επίτευξης της τελικής αντιστάθμισης στην μόνιμη κατάσταση, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον παράμετροι, όπως (α) η ταχύτητα συγκλισης της τεχνικής αντιστάθμισης στα επιθυμητά επίπεδα και (β) μετρικές που να λαμβάνουν υπόψη την συνάρτηση του σφάλματος στο σύστημα, καθώς αυτό παράγεται και μετριέται διασυνεχώς επί του κλειστού συστήματος από το περιβάλλον προσομοίωσης. Για το πρώτο ποσοτικό κριτήριο της ταχύτητας αντιστάθμισης, αυτό μπορεί να γίνει εμφανές και ποσοτικά μετρήσιμο με χρήση των γραφικών παραστάσεων που παράγει το μοντέλο του συστήματος στην εφαρμογή των σεναρίων προσομοίωσης. Για το δεύτερο ποσοτικό κριτήριο κατάταξης των παραγόμενων αποτελεσμάτων με βάση μετρικές που μπορούν να παραχθούν από την συνάρτηση του σφάλματος $e(t)$, υπάρχει εκτενέστατη βιβλιογραφία για τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, η οποία εισάγει και χρησιμοποιεί τους παρακάτω ποσοτικούς δείκτες:

- Συνάρτηση ολοκληρώματος τετραγώνου του σφάλματος - Integral of Square Error (ISE)
- Συνάρτηση ολοκληρώματος Απόλυτου σφάλματος – Integral of Absolute Error (IAE)
- Συνάρτηση του ολοκληρώματος του χρόνου επί του απόλυτου σφάλματος – Integral of time weighted absolute error (ITAE)

Αναλυτικά οι φόρμουλες ορισμού για τους παραπάνω ποσοτικούς ενδείκτες σφάλματος είναι:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt$$

Η επιλογή του κατάλληλου κριτηρίου που θα χρησιμοποιηθεί ως μετρική για τον έλεγχο της απόδοσης ενός συστήματος, αποτελεί συνάρτηση της λειτουργίας και της μορφής των σφαλμάτων που η τεχνική αυτομάτου ελέγχου προσπαθεί να εξαλείψει. Πιο συγκεκριμένα όταν θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε την παρουσία μεγάλων σφαλμάτων το κριτήριο ISE είναι το καταλληλότερο δεδομένου ότι μεγενθύνει τα σφάλματα λόγω του παράγοντα του τετραγώνου που χρησιμοποιεί για τον ορισμό του. Στην περίπτωση μικρών σφαλμάτων, τότε το κριτήριο IAE κρίνεται καταλληλότερο δεδομένου ότι με την χρήση της απόλυτης τιμής δεν μεγενθύνει το επίπεδο των παρουσιαζόμενων σφαλμάτων διατηρώντας έτσι κοινό επίπεδο αναφοράς για όλα τα σφάλματα που παρουσιάζονται στο σύστημα. Τέλος όταν επιπλέον των σφαλμάτων σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η χρονική στιγμή όπου αυτά εμφανίστηκαν, τότε το κριτήριο ITAE, είναι το καταλληλότερο επειδή χρησιμοποιεί ως συνάρτηση βάρους για την μεγέθυνση της επίδρασης του κάθε παράγοντα σφάλματος, την χρονική στιγμή όπου αυτό εμφανίζεται στο σύστημα.

Για την κατηγοριοποίηση της απόδοσης των μηχανισμών ελέγχου, όπως τα επίπεδα αντιστάθμισης μετρήθηκαν από το περιβάλλον του μοντέλου που αναπτύχθηκε, θα χρησιμοποιήσουμε το (α) κριτήριο δηλ. την ταχύτητα αντιστάθμισης όπου εμφάνισε το σύστημα για τον μηδενισμό του σφάλματος. Ο λόγος για την ανωτέρω επιλογή είναι ότι δεν έχουμε επιπλέον κριτήρια λειτουργίας του συστήματος που να περιορίζουν την ενεργειακή κατανάλωση ή να επιβάλλουν μέγιστα επίπεδα ισχύος στο σύστημα. Σε καμία περίπτωση όμως αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και τα άλλα ποσοτικά κριτήρια στην περίπτωση όπου προδιαγραφές λειτουργίας έθεταν τέτοιους περιορισμούς (π.χ. ανάπτυξη σερβομηχανισμού – ελέγχου θέσης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης εξωτερικά παρεχόμενης ενέργειας στο σύστημα).

5.3 Συμπεράσματα από την Εφαρμογή Προσομοιώσεων στο Σύστημα Κινητήρα Σ.Ρ.

Τα συμπεράσματα από την απόδοση των τεχνικών αλλά και των ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του κλειστού συστήματος, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο θα χρησιμοποιήσουν την ταχύτητα σύγκλισης του συνολικού συστήματος. Για να μπορούν να συγκριθούν τα παραγόμενα αποτελέσματα από την εφαρμογή των ελεγκτών στα δύο διαφορετικά σημεία ελέγχου (κύκλωμα τυμπάνου – κύκλωμα πεδίου), έχουμε φροντίσει έτσι ώστε οι PID-ελεγκτές που χρησιμοποιήθηκαν στα σενάρια προσομοίωσης να διατηρούν τις ίδιες τιμές. Στόχος είναι η επίτευξη μίας γενικότερα βέλτιστης λειτουργίας για ένα κλειστό σύστημα όχι με εξειδικευμένη απλά εφαρμογή αλλά για μία ευρεία γκάμα συνθηκών διεγέρσεων και ελέγχου. Δηλ. στόχος δεν ήταν να αναπτυχθεί ένα εξειδικευμένο κλειστό σύστημα το οποίο να αφορά αποκλειστικά και μόνο στην βέλτιστη αντιστάθμιση θέσης από ένα δεδομένο τύπο φορτίου, αλλά μία γενικότερη εφαρμογή η οποία να είναι ικανή να αντισταθμίσει ένα σύνολο συνθηκών καταλήγοντας έστω και υποβέλτιστα στην τελική αντιστάθμιση της λειτουργίας και την τελική επίτευξη των χαρακτηριστικών λειτουργίας που απαιτούνται για κάθε τύπο και είδος συνθηκών και φορτίου.

Μία πρώτη εποπτική ένδειξη από τα σενάρια προσομοίωσης δείχνει ότι το κλειστό σύστημα λειτουργεί αποδοτικά και με την χρήση των δύο τεχνικών ελέγχου, επιτυγχάνοντας τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για μία πληθώρα συνθηκών διεγέρσεων και φορτίου αντισταθμίζοντας τόσο την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, όσο και την γωνιακή θέση του κλειστού συστήματος. Τα συμπεράσματα από τα σενάρια προσομοιώσεως παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

6 Συμπεράσματα από την Εφαρμογή Προσομοιώσεων

6.1 *Συνολική Εικόνα των Σεναρίων Προσομοίωσης*

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο στην παράγραφο εξαγωγής σύντομων συμπερασμάτων από την εφαρμογή των προσομοιώσεων στο κεφάλαιο 5, η λειτουργία και η αποδοτικότητα των PID-ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν στον κλειστό βρόχο, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ποιοτικά και ποσοτικά. Για την ποιοτική παρουσίαση και σύγκριση των επιδόσεων των ελεγκτών είναι αρκετές οι αποκομιζόμενες πληροφορίες από τις γραφικές παραστάσεις των κρίσιμων μεγεθών του κινητήρα Σ.Ρ. οι οποίες δίνουν ένα ποιοτικό μέτρο της συμπεριφοράς, δίνοντας έτσι την δυνατότητα για κατάταξη και κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων. Για τον προσδιορισμό ποσοτικών ενδεικτών (μετρικών) απόδοσης μπορούμε να βασιστούμε στα ποσοτικά αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, π.χ. επιβολή μετρήσεων στους χρόνους αποκατάστασης και στην ταχύτητα αντιστάθμισης για τα μεγέθη προς έλεγχο. Επιπλέον όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μία πληθώρα μετρικών επίδοσης η οποία βασίζεται στην ανάλυση των παραγόμενων συναρτήσεων σφάλματος, έχουν καθιερωθεί και χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση των επιδόσεων συστημάτων ελέγχου π.χ. συναρτήσεις ISE, IAE, ITAE κλπ.

Βασιμένοι στο γεγονός ότι για τον έλεγχο της επίδοσης των συστημάτων ελέγχου του κινητήρα Σ.Ρ. δεν έχουν τεθεί εξαρχής κριτήρια κόστους που να αφορούν σε καταναλώσεις ή συνολικά χειριζόμενα επίπεδα ενέργειας που διατίθενται στο σύστημα θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε απλουστευμένα κριτήρια κατάταξης των επιδόσεων, όπως ο χρόνος αποκατάστασης και η

ταχύτητα σύγκλισης των ελεγκτών αντιστάθμισης. Για τον λόγο αυτό και βασισμένοι σε αυτό το ποιοτικό και ποσοτικό κριτήριο θα συγκεντρώσουμε τα αποτελέσματα από τα σενάρια προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στον πίνακα που ακολουθεί:

Τύπος Ελέγχου (Θέση - Ταχύτητα) Μορφή Φορτίου	Μέθοδος Ελέγχου (Τύμπανο - Πεδίο)	Παράμετροι PID - Ελεγκτή			Χρόνος Αντ/μησης ($t_{\text{τελ-ταρχ}}$) (sec)	Παρατηρήσεις
		Kp	Kd	Ki		
Θέση T11=50 T12=0.0 T13=0.0	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	225-200 = 25	Πολύ μικρές ταλαντώσεις γρηγορα αποσβενόμενες.
Θέση T11=50 T12=0.01 T13=0.0	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	220-200 = 20	Μονοτονική συμπεριφορά.
Θέση T11=50 T12=0.01 T13=0.01	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	230-200 = 30	Γρήγορα αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης = 15 μονάδες θέσης.
Ταχύτητα T11=50 T12=0.0 T13=0.0	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	225-200 = 25	Πολύ μικρές ταλαντώσεις γρηγορα αποσβενόμενες. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεων 0.05 μονάδες γωνιακής ταχύτητας
Ταχύτητα T11=50 T12=0.01 T13=0.0	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	220-200 = 20	Πολύ μικρές ταλαντώσεις γρηγορα αποσβενόμενες. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεων 0.05 μονάδες γωνιακής ταχύτητας
Ταχύτητα T11=50 T12=0.01 T13=0.0000 1	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	230-200 = 30	Γρήγορα αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης = 0,06 μονάδες φορτίου.
Θέση T11=50 T12=0.0 T13=0.0	Πεδίου	0,1	1,0	0,00 1	350-200 = 150	Έντονη και αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεως 75 μονάδες θέσης
Θέση T11=50 T12=0.1 T13=0.0	Πεδίου	0,1	1,0	0,00 1	310-200 = 110	Έντονη και αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεως 125 μονάδες θέσης
Θέση T11=50 T12=0.1 T13=0.001	Πεδίου	0,1	1,0	0,00 1	600-200 = 400	Έντονη και αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεως 25 μονάδες θέσης
Ταχύτητα T11=50 T12=0.0	Πεδίου	0,1	1,0	0,00 1	400-200 = 200	Έντονη και αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεως

Tl3=0.0						0,6 μονάδες γωνιακής ταχύτητας
Ταχύτητα Tl1=50 Tl2=0.1 Tl3=0.0	Πεδίου	0,1	1,0	0,00 1	550-200 = 350	Έντονη και αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεως 0,68 μονάδες γωνιακής ταχύτητας
Ταχύτητα Tl1=50 Tl2=0.1 Tl3=0.001	Πεδίου	0,1	1,0	0,00 1	550-200 = 350	Έντονη και αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεως 0,68 μονάδες γωνιακής ταχύτητας. Πτώση κάτω από την επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα στην μόνιμη κατάσταση.
Ταχύτητα Tl1=50 Tl2=0.1 Tl3=0.0	Πεδίου	0,1	1,0	0,00 1	700-200 = 500	Περιορισμός Επιτάχυνσης Αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική γραμμική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεως 0,85 μονάδες γωνιακής ταχύτητας
Ταχύτητα Tl1=50 Tl2=0.01 Tl3=0.0	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	220-200 = 20	Περιορισμός Ρεύματος Τυμπάνου Πολύ μικρές ταλαντώσεις γρηγορά αποσβενόμενες. Μέγιστο πλάτος ταλαντώσεων 0.10 μονάδες γωνιακής ταχύτητας
Θέση Tl1=50 Tl2=0.01 Tl3=0.01	Τυμπάνου	1,1	0,01	0,5	230-200 = 30	Περιορισμός Μαγνητικής Ροής Αργά αποσβενόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης = 470 μονάδες θέσης.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τα σενάρια προσομοίωσης με χρήση PID-ελεγκτών στα κυκλώματα τυμπάνου και πεδίου του κινητήρα Σ.Ρ.

Ο ανωτέρω πίνακας συγκεντρώνει τα ποσοτικά αλλά και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προκυπτουσών αντισταθμίσεων με χρήση PID-ελεγκτών, τόσο για έλεγχο από το κύκλωμα τυμπάνου όσο και από το κύκλωμα πεδίου. Βασική μετρική σύγκριση της απόδοσης των ελεγκτών σε συνδυασμό με την μέθοδο ελέγχου, όπως αναφέραμε και προηγουμένως θα αποτελέσει ο χρόνος αντιστάθμισης, ο οποίος συμβάλλει στην εικόνα της ταχύτητας αντιστάθμισης για το συνολικό σύστημα. Για τον υπολογισμό του συνολικά απαιτούμενου χρόνου για την αντιστάθμιση του μεγέθους που απαιτείται σε κάθε φάση της προσομοίωσης, χρησιμοποιούνται τα γραφικά αποτελέσματα από την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Η αρχική χρονική στιγμή για την εκτίμηση του χρόνου αντιστάθμισης είναι τα 200 secs διότι αποτελούν την βάση επιβολής του φορτίου στο σύστημα για όλα τα επιβαλλόμενα σενάρια προσομοίωσης. Για τον εντοπισμό της τελικής τιμής χρόνου στην οποία το φαινόμενο θεωρείται ως αντισταθμισμένο επιλέγεται ο χρόνος όπου η θέση αναφοράς για το σύστημα του κινητήρα είναι 50

rad όταν πρόκειται για αντιστάθμιση θέσης, ή 0.65 κανονικοποιημένης γωνιακής συχνότητας όταν πρόκειται για αντιστάθμιση γωνιακής ταχύτητας. Οι παραπάνω τιμές αναφοράς έχουν διατηρηθεί και αφορούν στο σύνολο των προσομοιώσεων για την θέση και την γωνιακή ταχύτητα.

6.2 Συγκριτικά αποτελέσματα από την χρήση των PID-ελεγκτών στα κυκλώματα ελέγχου. Γενικά συμπεράσματα.

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε συμπεράσματα από την εφαρμογή της διαδικασίας των προσομοιώσεων στο κλειστό σύστημα του κινητήρα Σ.Ρ. έχουμε προσπαθήσει να διατηρήσουμε τις συνθήκες επιβολής φορτίου αλλά και τα αντισταθμιζόμενα μεγέθη (μεγέθη αναφοράς θέσης – ταχύτητας) ίδια σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης. Επιπλέον οι τιμές για τα κέρδη των PID-ελεγκτών έχουν διατηρηθεί ίδιες για το κύκλωμα τυμπάνου καθώς και για το κύκλωμα πεδίου. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, οι τιμές ενίσχυσης διαφέρουν για τους PID-ελεγκτές που αναφέρονται σε κύκλωμα ελέγχου τυμπάνου σε σχέση με το κύκλωμα ελέγχου πεδίου. Ο λόγος για αυτήν την διαφορά είναι τα τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά αυτών των κυκλωμάτων που οι ελεγκτές απευθύνονται. Το κύκλωμα διέγερσης τυμπάνου έχει σαφώς πιο «γραμμική συμπεριφορά» σε σχέση με το κύκλωμα διέγερσης και ελέγχου του πεδίου. Το τελευταίο εμφανίζει πολύ έντονα μη γραμμικά χαρακτηριστικά εξαιτίας των μη γραμμικών στοιχείων και των υλικών που αυτό περιλαμβάνει για την δημιουργία του πεδίου. Επιπλέον, εμφανίζει εξαιρετικά έντονα χαρακτηριστικά «υστέρησης» λόγω αφενός των μη γραμμικών στοιχείων του και αφετέρου λόγω της ενταμιευμένης μαγνητικής ενέργειας που αυτά επιφέρουν και η οποία είναι δύσκολα να ελεγχθεί, ειδικότερα με την ταχύτητα αντίδρασης που απαιτεί ο αντισταθμιστής. Στόχος και στις δύο βέβαια περιπτώσεις με τους PID-ελεγκτές είναι ο συνολικός έλεγχος του συστήματος. Οι τιμές των διαφορετικών ενισχύσεων των ελεγκτών για το κύκλωμα τυμπάνου και πεδίου οφείλονται αμιγώς σε αυτά τα «εσωτερικά χαρακτηριστικά». Έτσι η προσομοίωση έδειξε ότι οι ελεγκτές που απευθύνονται στο κύκλωμα τυμπάνου είναι αποδοτικότεροι όταν συνίστανται περισσότερο από αναλογικά-ολοκληρωτικά και λιγότερο διαφορικά τμήματα, ενώ για τους αντίστοιχους ελεγκτές που απευθύνονται στον έλεγχο του κυκλώματος πεδίου, έδειξε ότι αυτοί συμπεριφέρονται συνολικά καλύτερα στο σύστημα, όταν συνίστανται από διαφορικά και λιγότερο από αναλογικά και ολοκληρωτικά τμήματα. Η συγκεκριμένη παρατήρηση μπορεί να εξηγηθεί περαιτέρω ερμηνευοντας το γεγονός ότι ο έλεγχος του μαγνητικού πεδίου δεν χρειάζεται ένταση στον χειρισμό όπως επιβάλλει ένας αναλογικός ελεγκτής ούτε επιπλέον συσσώρευση σφαλματικής συμπεριφοράς όπως επιφέρει ένας ολοκληρωτικός παράγοντας, αλλά ταχύτητα αντίδρασης και άφεση χρόνου για την επίτευξη της αντιστάθμισης.

Επιπλέον όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο της προσομοίωσης, στόχος της διπλωματικής δεν ήταν να πιστοποιήσει ή να σχεδιάσει τον βέλτιστο ελεγκτή για έναν δεδομένο τύπο φορτίου και συνθηκών, αλλά περισσότερο στο να συμβάλλει στην κατευθυντήρια γραμμή και γενικότερη δημιουργία ενός ευρύτερου ελεγκτή ο οποίος να είναι ικανός να αντισταθμίσει, έστω και υποβέλτιστα μία μεγαλύτερη

γκάμα συνθηκών, φορτίων και διαταραχών. Για τον λόγο αυτό οι παράμετροι ενίσχυσης των PID-ελεγκτών δεν βελτιστοποιούνται ούτε και αναπροσαρμόζονται λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως αυτό θα ήταν απαίτηση στον σχεδιασμό ενός ελεγκτή ειδικού τύπου.

Παρατηρώντας τις ταχύτητες αντιστάθμισης που επιτυγχάνονται για τους δύο τύπους ελέγχου, παρατηρούμε όπως ήταν και θεωρητικά αναμενόμενο, ότι το κύκλωμα ελέγχου του τυμπάνου δίνει σαφώς την αμεσότερη χρονικά αλλά και μορφολογικά καταλληλότερη τεχνική ελέγχου για τον κινητήρα Σ.Ρ. Αυτό αναμενόταν και από την θεωρητική περιγραφή στην βιβλιογραφία των κινητήρων Σ.Ρ. λόγω επιπλέον των μη γραμμικών χαρακτηριστικών που καθιστούν δύσκολο τον χειρισμό του μαγνητικού πεδίου μέσω του κυκλώματος πεδίου για την αντιστάθμιση της συμπεριφοράς του κινητήρα. Συγκρίνοντας τις ταχύτητες αντιστάθμισης για ελεγκτές που απευθύνονται σε κύκλωμα τυμπάνου και πεδίου παρατηρούμε ότι οι προκύπτουσες τιμές διαφέρουν σχεδόν κατά μία τάξη. Άρα ο έλεγχος από το κύκλωμα τυμπάνου είναι πλεονεκτικότερος και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να καταφεύγουμε σε έλεγχο μέσω της μαγνητικής ροής όταν περαιτέρω αντιστάθμιση από το κύκλωμα τυμπάνου δεν είναι δυνατή. Από την προσομοίωση του μοντέλου κλειστού βρόχου καταδεικνύουμε ότι και ο μη γραμμικός έλεγχος μέσω του μαγνητικού πεδίου είναι δυνατός και εφόσον ένα σύστημα έχει την δυνατότητα να αποδεχθεί τα αργά και έντονα μεταβατικά φαινόμενα που ανακύπτουν από την εφαρμογή αυτού του τύπου ελέγχου θα μπορούσε να αποτελεί μία ακόμη τεχνική ελέγχου.

Συγκρίνοντας τα προκύπτοντα μεταβατικά φαινόμενα από τις δύο μορφές ελέγχου παρατηρούμε ότι αυτά που αναφέρονται σε έλεγχο από το κύκλωμα τυμπάνου είναι ταχύτερα αποσβενόμενα με γρήγορες ιδιοσυχνότητες σε αντίθεση με τα φαινόμενα που αναφέρονται στο κύκλωμα ελέγχου του μαγνητικού πεδίου. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από χαμηλές ιδιοσυχνότητες και αργή ταχύτητα μεταβολής λόγω της αντιδραστικής συμπεριφοράς του μαγνητικού πεδίου σε γρήγορα επιφερόμενες μεταβολές. Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί ότι λόγω της «αδρανειακής» συμπεριφοράς του μαγνητικού κυκλώματος, γρήγορες μεταβολές φορτίου οι οποίες ενδεχόμενα εξαρτώνται από την γωνιακή θέση και ταχύτητα του συστήματος του κινητήρα, μπορεί να καταλήξουν ως μη αναγνωρίσιμες από τον ελεγκτή που σε αρκετές φορές μπορεί να καταλήξει σε καλύτερη συμπεριφορά για αυτού του τύπου τα φορτία σε σχέση με φορτία που περιλαμβάνουν μόνο σταθερές συνιστώσες οι οποίες δεν εξαρτώνται από την γωνιακή ταχύτητα ή θέση. Περαιτέρω μείωση των έντονων μεταβατικών φαινομένων θα μπορούσε να επιτευχθεί με μικρότερες τιμές τάσεων διέγερσης για το κύκλωμα τυμπάνου και πεδίου, βέβαια μειώνοντας την δυνατότητα για την εκκίνηση μεγαλύτερων φορτίων.

Η γρήγορα αποσβενόμενη και μικρή ταλαντωτική συμπεριφορά καθιστά τους PID-ελεγκτές που απευθύνονται στο κύκλωμα τυμπάνου ιδανικούς για τον σχεδιασμό αυτοματισμών και συστημάτων ελέγχου που απευθύνονται σε σερβομηχανισμούς ή συστήματος παρακολούθησης της γωνιακής ταχύτητας για ευαίσθητους τύπους φορτίων.

Η εφαρμογή περιορισμών στην λειτουργία του κλειστού συστήματος, όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα κεφάλαια καθιστά την συνολική λειτουργία του συστήματος ρεαλιστικότερη προσδίδοντας ακρίβεια στα παρατηρούμενα φαινόμενα. Η εφαρμογή περιορισμών ισοδυναμεί με την προσθήκη στο

περιβάλλον προσομοίωσης υποσυστημάτων που είναι υπεύθυνα με την ασφάλεια της λειτουργίας της διάταξης προστατεύοντας την από υπερ-ρεύματα και τάσεις που ενδεχόμενα θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στο σύστημα χωρίς αυτούς τους μηχανισμούς με άσχημα αποτελέσματα για την διάταξη. Από τα γενικότερα αποτελέσματα της επιβολής περιορισμών επί του συνολικού κλειστού συστήματος, όπως είναι αναμενόμενο αυτές δυσχεραίνουν περαιτέρω την εφαρμογή των διαδικασιών αντιστάθμισης αναγκάζοντας τον ελεγκτή σε επίπεδα δράσης που είναι αποδεκτά και αυξάνοντας έτσι τον χρόνο που απαιτείται για την συνολική αντιστάθμιση των φαινομένων. Είναι επίσης δυνατόν η εφαρμογή έντονων περιορισμών να καταλήξει και σε μη δυνατότητα κανονικοποίησης των απαιτούμενων χαρακτηριστικών αντιστάθμισης.

Κλείνοντας την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής είναι εμφανές ότι η δημιουργία ενός περιβάλλοντος προσομοίωσης δίνει την δυνατότητα αξιοποίησης των Η/Υ για την εξαγωγή συμπερασμάτων επί του μοντέλου ενός συστήματος, κερδίζοντας την δυνατότητα εξαγωγής φαινομένων και μετρήσεων χωρίς την πραγματική επιβολή συνθηκών και καταστάσεων επί πραγματικών διατάξεων και κυκλωμάτων. Η συγκεκριμένη απόπειρα υλοποίησης του περιβάλλοντος προσομοίωσης αίρει επίσης δεσμεύσεις οι οποίες επιβάλλονται από την αναγκαιότητα εφαρμογής γραμμικών μοντέλων. Ο λόγος είναι ότι το περιβάλλον προσομοίωσης που υλοποιήθηκε κάνει χρήση των ακριβώς περιγραφόμενων μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, επιλύει αριθμητικά αυτές προσδίδοντας την μέγιστη δυνατή ακρίβεια στα παραγόμενα αποτελέσματα. Επίσης με την δομική ανεξαρτησία που αυτό διαθέτει δίνει την δυνατότητα της επεκτασιμότητας και της προσθήκης διαφορετικών χαρακτηριστικών των υποσυστημάτων βασισμένα σε εξελίξεις ή άλλες τάσεις που θα ανακύψουν στο άμεσο μέλλον για την χρήση και τις εφαρμογές των κινητήρων Σ.Ρ.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α – Μοντέλο Ανοικτού Βρόχου

A-1 Συναρτήσεις

Συνάρτηση Tload_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%                               Tload Function                               %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Author:                      M. Stamatakis                          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Version                      Date           Notes                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

function y=Tload_func(Tl1, Tl2, Tl3, Ton, omega_o, theta_o, omega, theta)

y=Tl1+Ton*(Tl2*(omega/omega_o)+Tl3*(theta/theta_o));

Συνάρτηση Ia_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%                               Tload Function                               %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Author:                      M. Stamatakis                          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Version                      Date           Notes                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

function y=Ia_Func(t_step, Ta, Vao, Iao, omega_o, Fdo, Va, Ia, omega, Fd)

y=Ia+t_step*(Iao/Ta)*((Va/Vao)-(Ia/Iao)-(omega/omega_o)*(Fd/Fdo));

Συνάρτηση Fd_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%                               Tload Function                               %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Author:                      M. Stamatakis                          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Version                      Date           Notes                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function y=Fd_Func(t_step, Vfo, Fdo, Tfo, Vf, Fd)

%y=Fd+t_step*(Fdo/Tfo)*((Vf/Vfo)-(Fd/Fdo))-0.1*(Fd/Fdo)^3);
y=Fd+t_step*(Fdo/Tfo)*((Vf/Vfo)-(Fd/Fdo)^3);
```

Συνάρτηση omega_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Tload Function                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function y=omega_Func(t_step, Iao, Fdo, Ton, omega_o, Tm, Ia, Fd, Tl, omega)

y=omega+t_step*(omega_o/Tm)*((Ia/Iao)*(Fd/Fdo)-(Tl/Ton));
```

Συνάρτηση theta_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Tload Function                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function y=theta_Func(t_step, omega_o, theta_o, T_theta, omega, theta)

y=theta+t_step*(theta_o/T_theta)*(omega/omega_o);
```

A-2 Κορμός Μοντέλου

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               DC Motor Model                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %
%   1.1                          14/06/2014    Addition of calculations for parametres for linear
model
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```



```

clear;
clc;

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                Παράμετροι Μοντέλου Κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
t_step=0.01;           % Βήμα προσομοίωσης (sec);
t_start=0;            % Χρονική στιγμή έναρξης προσομοίωσης (sec)
t_stop=600;          % Χρονική στιγμή Λήξης προσομοίωσης (sec)
t_load_start=100;    % Χρονική στιγμή εισαγωγής φορτίου στον κινητήρα

control_of_Va='n';    % Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf='y';    % Ενεργοποίηση Ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου

Vao=200;              % Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών κινητήρα Σ.Ρ. (V)
omega_o=50;          % Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ.
(rad/sec)
Fdo=10;              % Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo=100;             % Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J=10;               % Ροπή Αδράνειας Άξονα (Kgrxm^2)
Ra=1.0;             % Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La=2.0;             % Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου (H)
Rf=0.8;            % Αντίσταση Κυκλώματος Πεδίου (Ohm)
Nf=100;            % Αριθμός Σπειρών Κυκλώματος Διέγερσης
theta_o=pi;        % Αρχική γωνία κινητήρα (rad)

Tl1=120;            % Σταθερή Συνιστώσα φορτίου
Tl2=0.0;           % Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3=0.0;           % Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης

plot_Tload='y';     % Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia='y';        % Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd='y';        % Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής
τυμπάνου
plot_omega='y';     % Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής
ταχύτητας
plot_theta='n';     % Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής θέσης

suspend_warnings='y'; % Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίων για τις
παραμέτρους
%-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                Υπολογισμοί Μόνιμης Κατάστασης κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Iao=Vao/Ra;         % Μέγιστο ρεύμα τυμπάνου
Ta=La/Ra;          % Σταθερά χρόνου κυκλώματος τυμπάνου
K1=Vao/(Fdo*omega_o); % Σταθερά ΗΕΔ τυμπάνου
To=K1*Fdo*Iao;    % Μέγιστη ροπή φορτίου
Ifo=Vfo/Rf;        % Μέγιστο ρεύμα κυκλώματος πεδίου
Tfo=Nf*Fdo/Vfo;   % Σταθερά μαγνητικής ροής

```

```
Tm=J*omega_o/To;          % Σταθερά γωνιακής περιστροφής
T_theta=theta_o/omega_o; % Σταθερά γωνιακής θέσης
```

```
disp('*****');
disp('          DC Motor Parameters          ');
disp('*****');
disp('Maximum Drum Current (Iao):');
disp(Iao);
disp('Time constant of Drum circuit (Ta):');
disp(Ta);
disp('Load Max Value (To):');
disp(To);
disp('Max Ifo Current (Ifo):');
disp(Ifo);
disp('Magnetic Flow constant (Tfo):');
disp(Tfo);
disp('Angular Velocity constant (Tm)');
disp(Tm);
disp('Angular Position constant (T_theta):');
disp(T_theta);
disp('*****');
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Καθορισμός των Va και Vf διεγέρσεων του κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
pts=floor((t_stop-t_start)/t_step);
```

```
for i=1:1:pts
    if (control_of_Va=='y')
        if (i<floor(2*pts/6))
            Va(i)=50;
        else
            Va(i)=80;
        end;
    else
        Va(i)=200;
    end;
end;
```

```
for i=1:1:pts
    if (control_of_Vf=='y')
        if (i<floor(2*pts/6))
            Vf(i)=100;
        else
            Vf(i)=55;
        end;
    else
        Vf(i)=100;
    end;
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Εισαγωγή φορτίου στον κινητήρα Σ.Ρ. σε καθορισμένη χρονική στιγμή
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

load_pts=floor((t_load_start-t_start)/t_step)+1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Αριθμητικοί υπολογισμοί για τον κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Tload(1)=0;
Ia(1)=0;
Fd(1)=0;
omega(1)=0;
theta(1)=0;

for i=2:1:pts

    if (i<load_pts)
        Tload(i)=0;
    else
        Tload(i)=Tload_func(Tl1, Tl2, Tl3, To, omega_o, theta_o, omega(i-1), theta(i-1));
    end;

    Ia(i)=Ia_func(t_step, Ta, Vao, Iao, omega_o, Fdo, Va(i-1), Ia(i-1), omega(i-1), Fd(i-1));
    Fd(i)=Fd_func(t_step, Vfo, Fdo, Tfo, Vf(i-1), Fd(i-1));
    omega(i)=omega_func(t_step, Iao, Fdo, To, omega_o, Tm, Ia(i-1), Fd(i-1), Tload(i-1),
omega(i-1));
    theta(i)=mod(theta_func(t_step, omega_o, theta_o, T_theta, omega(i-1), theta(i-1)),2*pi);

    if (suspend_warnings=='n')

        if ((Tload(i)>To) | (Tload(i)<-To))
            disp('Tload out of bounds!');
            disp('Value');
            disp(Tload(i));
            disp('Time');
            disp(t_start+(i-1)*t_step);
        end;

        if ((Ia(i)>Iao) | (Ia(i)<-Iao))
            disp('Ia out of bounds!');
            disp('Value');
            disp(Ia(i));
            disp('Time');
            disp(t_start+(i-1)*t_step);
        end;

        if ((Fd(i)>Fdo) | (Fd(i)<-Fdo))
            disp('Fd out of bounds!');
            disp('Value');
            disp(Fd(i));
            disp('Time');
            disp(t_start+(i-1)*t_step);
        end;

        if ((omega(i)>omega_o) | (omega(i)<-omega_o))
            disp('Omega out of bounds!');

```

```

disp('Value');
disp(omega(i));
disp('Time');
disp(t_start+(i-1)*t_step);
end;

end;

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Γραφικές παραστάσεις μεγεθών του κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (plot_Tload=='y')

figure(1);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Tload(i)/To)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized load Tl/To ');
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Load ');

end;

if (plot_Ia=='y')

figure(2);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Ia(i)/Iao)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum Current Ia/Iao ');
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Drum Current ');

end;

if (plot_Fd=='y')

figure(3);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Fd(i)/Fdo)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum magnetic flow ')
xlabel(' Time value (sec) ');

```

```

ylabel(' Normalized Drum Magnetic Flow ');

end;

if (plot_omega=='y')

figure(4);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,omega(i)/omega_o)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized angular velocity ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Angular Velocity ');

end;

if (plot_theta=='y')

figure(5);
gcf;
shg;
i=0.98*pts:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,theta(i)/theta_o)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized angular position ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Angular Position ');

end;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                Υπολογισμών παραμέτρων γραμμικοποιημένου μοντέλου του κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

bmin=2*(Tload(pts)/To);
b=Fd(pts)/Fdo;
p1=(-Tm+(Tm^2-4*Tm*Ta*b^2)^0.5)/(2*Ta*Tm);
p2=(-Tm-(Tm^2-4*Tm*Ta*b^2)^0.5)/(2*Ta*Tm);
omega_b=(p1*p2)^0.5;
D=-real(p1)/abs(p1);

disp('*****');
disp('DC Motor Linearization Process ');
disp('*****');
disp('b parameter:');
disp(b);
disp('bmin parameter:');
disp(bmin);
disp('Model Poles:');
disp(p1);

```

```
disp(p2);
disp('omega_b parameter:');
disp(omega_b);
disp('Damp parameter:');
disp(D);
disp('*****');
```

Παράρτημα Β – Μοντέλο Κλειστού Βρόχου

B-1 Συναρτήσεις

Συνάρτηση Tload_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%                               Tload Function                               %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Author:                      M. Stamatakis                          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Version                      Date           Notes                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   1.0                          13/06/2014   Initial version              %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

function y=Tload_func(Tl1, Tl2, Tl3, Ton, omega_o, theta_o, omega, theta)

y=Tl1+Ton*(Tl2*(omega/omega_o)+Tl3*(theta/theta_o));

Συνάρτηση Ia_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%                               Tload Function                               %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Author:                      M. Stamatakis                          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Version                      Date           Notes                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   1.0                          13/06/2014   Initial version              %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

function y=Ia_Func(t_step, Ta, Vao, Iao, omega_o, Fdo, Va, Ia, omega, Fd)

y=Ia+t_step*(Iao/Ta)*((Va/Vao)-(Ia/Iao)-(omega/omega_o)*(Fd/Fdo));

Συνάρτηση Fd_func()

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%                               Tload Function                               %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Author:                      M. Stamatakis                          %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   Version                      Date           Notes                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%   1.0                          13/06/2014   Initial version              %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

function y=Fd_Func(t_step, Vfo, Fdo, Tfo, Vf, Fd)

%y=Fd+t_step*(Fdo/Tfo)*((Vf/Vfo)-(Fd/Fdo)-0.1*(Fd/Fdo)^3);

```
y=Fd+t_step*(Fdo/Tfo)*((Vf/Vfo)-(Fd/Fdo)^3);
```

Συνάρτηση omega_func()

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Tload Function                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function y=omega_Func(t_step, Iao, Fdo, Ton, omega_o, Tm, Ia, Fd, Tl, omega)
```

```
y=omega+t_step*(omega_o/Tm)*((Ia/Iao)*(Fd/Fdo)-(Tl/Ton));
```

Συνάρτηση theta_func()

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Tload Function                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          13/06/2014    Initial version          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function y=theta_Func(t_step, omega_o, theta_o, T_theta, omega, theta)
```

```
y=theta+t_step*(theta_o/T_theta)*(omega/omega_o);
```

B-2 Κορμός Μοντέλου

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               DC Motor Closed Loop                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Author:                      M. Stamatakis                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Version                      Date           Notes                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   1.0                          14/06/2014    Initial version          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
clear;
clc;
```



```

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                Παράμετροι Μοντέλου Κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
t_step=0.01;           % Βήμα προσομοίωσης (sec)
t_start=0;             % Χρονική στιγμή έναρξης προσομοίωσης (sec)
t_stop=1000;          % Χρονική στιγμή λήξης προσομοίωσης (sec)
t_load_start=200;     % Χρονική στιγμή εισαγωγής φορτίου στον κινητήρα (sec)

Tl1=50;                % Σταθερή Συνιστώσα φορτίου
Tl2=0.1;               % Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής ταχύτητας
Tl3=0.00001;          % Συνιστώσα φορτίου συναρτήσει γωνιακής θέσης

plot_Tload='y';        % Γραφική παράσταση της συνάρτησης του φορτίου
plot_Ia='y';           % Γραφική παράσταση της συνάρτησης του ρεύματος τυμπάνου
plot_Fd='y';           % Γραφική παράσταση της συνάρτησης μαγνητικής ροής
                        % τυμπάνου
plot_omega='y';        % Γραφική παράσταση της συνάρτησης γωνιακής
                        % ταχύτητας
plot_theta='y';        % Γραφική παράσταση της συνάρτησης τάσης τυμπάνου
plot_Va='y';           % Γραφική παράσταση της συνάρτησης τάσης τυμπάνου
plot_Vf='y';           % Γραφική παράσταση της συνάρτησης τάσης πεδίου
plot_acc='y';          % Γραφική παράσταση της γωνιακής επιτάχυνσης
plot_err='y';          % Γραφική παράσταση του σφάλματος του PID-ελεγκτή

suspend_warnings='y';  % Ενεργοποιεί τα warnings τιμών εκτός ορίου για τις
                        % παραμέτρους
%-----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                Παράμετροι και Προδιαγραφές Λειτουργίας PID Ελεγκτή
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
control_of_Va='n';     % Ενεργοποίηση ελέγχου κινητήρα μέσω τυμπάνου
control_of_Vf='y';     % Ενεργοποίηση ελέγχου κινητήρα μέσω πεδίου
control_option=0;      % Τύπος Ελέγχου 0=Θέση 1=Ταχύτητα

enable_acc_limit='n';  % Ενεργοποίηση των ορίων γωνιακής επιτάχυνσης
acc_limit=1;           % Μέγιστη Επιτάχυνση Αναφοράς (-
acc_limit<=acc<=acc_limit)

enable_Ia_limit='n';   % Ενεργοποίηση του ορίου ρεύματος τυμπάνου
Ia_limit=50;           % Μέγιστη Απόλυτη τιμή του Ia (-Ia_limit<=Ia<=Ia_limit)

enable_Fd_limit='n';   % Ενεργοποίηση του ορίου Μαγνητικής Ροής Πεδίου
Fd_limit=5;           % Μέγιστη Απόλυτη τιμή του Fd (-Fd_limit<=Fd<=Fd_limit)

theta_ref=50;         % Γωνιακή Θέση Αναφοράς
omega_ref=0.65;       % Γωνιακή Ταχύτητα Αναφοράς

Kpva=1.1;             % Παράμετρος Αναλογικής Ενίσχυσης
Kdva=0.01;            % Παράμετρος Διαφορικής Ενίσχυσης
Kiva=0.5;             % Παράμετρος Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης

```

```

Kpvf=1.0; % Παράμετρος Αναλογικής Ενίσχυσης
Kdvf=5.0; % Παράμετρος Διαφορικής Ενίσχυσης
Kivf=0.0; % Παράμετρος Ολοκληρωτικής Ενίσχυσης

%-----

%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Παράμετροι του dc_mot_func
% Εάν αλλαχθούν αυτές οι παραμέτροι θα πρέπει να αλλαχθούν και στην
dc_mot_func!!!
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Vao=200; % Μέγιστη Ονομαστική Τάση ακροδεκτών κινητήρα Σ.Ρ. (V)
omega_o=50; % Μέγιστη Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ.
(rad/sec)
Fdo=10; % Ονομαστική Μαγνητική Ροή (Wb)
Vfo=100; % Ονομαστική Τάση διεγέρσεως (V)
J=10; % Ροπή αδράνειας Άξονα (Kgrxm^2)
Ra=1.0; % Αντίσταση Κυκλώματος Τυμπάνου (Ohm)
La=2.0; % Αυτεπαγωγή Κυκλώματος Τυμπάνου (H)
Rf=0.8; % Αντίσταση Κυκλώματος Πεδίου (Ohm)
Nf=100; % Αριθμός Σπειρών Κυκλώματος Διέγερσης
theta_o=pi; % Αρχική γωνία κινητήρα (rad)

%-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Υπολογισμοί Μόνιμης Κατάστασης κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Iao=Vao/Ra; % Μέγιστο ρεύμα τυμπάνου
Ta=La/Ra; % Σταθερά χρόνου κυκλώματος τυμπάνου
K1=Vao/(Fdo*omega_o); % Σταθερά ΗΕΔ τυμπάνου
To=K1*Fdo*Iao; % Μέγιστη ροπή φορτίου
Ifo=Vfo/Rf; % Μέγιστο ρεύμα κυκλώματος πεδίου
Tfo=Nf*Fdo/Vfo; % Σταθερά μαγνητικής ροής
Tm=J*omega_o/To; % Σταθερά γωνιακής περιστροφής
T_theta=theta_o/omega_o; % Σταθερά γωνιακής θέσης

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Αριθμητικοί υπολογισμοί για τον κινητήρα Σ.Ρ.
%
% Εφαρμογή PID Ελεγκτή
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

pts=floor((t_stop-t_start)/t_step);
load_pts=floor((t_load_start-t_start)/t_step)+1;

Tload(1)=0;
Ia(1)=0;
Fd(1)=0;
omega(1)=0;
theta(1)=0;
acc_level(1)=0;

```

```

Va(1)=0;
Vf(1)=0;
dif_err=0;
sum_err=0;

for i=2:1:pts

    if (i<load_pts)
        Tload(i)=0;
    else
        Tload(i)=Tload_func(Tl1, Tl2, Tl3, To, omega_o, theta_o, omega(i-1), theta(i-1));
    end;

    [Ia(i), Fd(i), omega(i), theta(i)]=dc_mot_func(t_step, Tload(i-1), Va(i-1), Ia(i-1), Vf(i-1),
Fd(i-1), omega(i-1), theta(i-1));

    %-----
    % Calculation of Acceleration levels
    %-----

    acc_level(i)=(omega(i)-omega(i-1))/t_step;

    if (enable_acc_limit=='y')
        if (acc_level(i)>acc_limit)
            omega(i)=omega(i-1)+acc_limit*t_step;
            acc_level(i)=acc_limit;
        elseif (acc_level(i)<-acc_limit)
            omega(i)=omega(i-1)-acc_limit*t_step;
            acc_level(i)=-acc_limit;
        end;
        theta(i)=theta(i-1)+omega(i)*t_step;
    end;

    %-----

    %-----
    % Calculation of Ia levels
    %-----

    if (enable_Ia_limit=='y')
        if (Ia(i)>Ia_limit)
            Ia(i)=Ia_limit;
        elseif (Ia(i)<-Ia_limit)
            Ia(i)=-Ia_limit;
        end;
    end;

    %-----

    %-----
    % Calculation of Fd levels
    %-----

    if (enable_Fd_limit=='y')
        if (Fd(i)>Fd_limit)
            Fd(i)=Fd_limit;

```

```

elseif (Fd(i)<-Fd_limit)
    Fd(i)=-Fd_limit;
end;
end;
%-----

%-----
% Calculation of Errors for PID Controller
%-----

if (control_option==0)
    err(i-1)=theta_ref*theta_o-theta(i-1);
else
    err(i-1)=omega_ref*omega_o-omega(i-1);
end;

if ((i==2) | (i==3))
    dif_err=0;
else
    dif_err=(err(i-1)-err(i-2))/t_step;
end;

sum_err=sum_err+err(i-1);
%-----

%-----
% Va/Vf commands for DC motor through
%     PID Controller
%-----

if (control_of_Va=='y')
    Vf(i)=Vfo;
    Va(i)=Kpva*err(i-1)+Kdva*dif_err+Kiva*sum_err*t_step;
    if (Va(i)>Vao)
        Va(i)=Vao;
    elseif (Va(i)<-Vao)
        Va(i)=-Vao;
    end;
else
    if (control_of_Vf=='y')
        if (control_option==0)
            Va(i)=Vao/50;
        else
            Va(i)=Vao;
        end;
        Vf(i)=Kpvf*err(i-1)+Kdvf*dif_err+Kivf*sum_err*t_step;
        if (Vf(i)>Vfo)
            Vf(i)=Vfo;
        elseif (Vf(i)<-Vfo)
            Vf(i)=-Vfo;
        end;
    else
        Va(i)=Vao;
        Vf(i)=Vfo;
    end;
end;

```

```

end;
%-----

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           Γραφικές παραστάσεις μεγεθών του κινητήρα Σ.Ρ.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (plot_Tload=='y')

figure(1);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Tload(i)/To)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized load TI/To ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Load ');

end;

if (plot_Ia=='y')

figure(2);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Ia(i)/Iao)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum Current Ia/Iao ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Drum Current ');

end;

if (plot_Fd=='y')

figure(3);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Fd(i)/Fdo)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum magnetic flow ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Drum Magnetic Flow ');

end;

if (plot_omega=='y')

```

```

figure(4);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,omega(i)/omega_o)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized angular velocity ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Angular Velocity ');

end;

if (plot_theta=='y')

figure(5);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,theta(i)/theta_o)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized angular position ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Angular Position ');

end;

if (plot_Va=='y')

figure(6);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Va(i)/Vao)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized drum Voltage Va/Vao ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Normalized Drum Voltage ');

end;

if (plot_Vf=='y')

figure(7);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,Vf(i)/Vfo)
box on;
grid;
title(' Graphical overview of normalized field Voltage Vf/Vfo ')
xlabel(' Time value (sec) ');

```

```

ylabel(' Normalized Field Voltage ');

end;

if (plot_acc=='y')

figure(8);
gcf;
shg;
i=1:1:pts;
plot(t_start+(i-1)*t_step,acc_level(i))
box on;
grid;
title(' Graphical overview of DC Motor Acceleration Levels ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' Acceleration Levels (rad/sec^2) ');

end;

if (plot_err=='y')

```

```

figure(9);
gcf;
shg;
i=1:1:pts-1;
plot(t_start+(i-1)*t_step,err(i))
box on;
grid;
title(' Graphical overview of PID Controller Error ')
xlabel(' Time value (sec) ');
ylabel(' PID Controller Error ');

end;

```

```

%%%%%%%%%%
%                               Warnings Filtering Process
%%%%%%%%%%

```

```

if (suspend_warnings=='n')

for i=1:1:pts

if ((Tload(i)>To) | (Tload(i)<-To))
disp('Tload out of bounds!');
disp('Value');
disp(Tload(i));
disp('Time');
disp(t_start+(i-1)*t_step);
end;

if ((Ia(i)>Iao) | (Ia(i)<-Iao))
disp('Ia out of bounds!');
disp('Value');
disp(Ia(i));
disp('Time');
end;
end;

```

```

    disp(t_start+(i-1)*t_step);
end;

if ((Fd(i)>Fdo) | (Fd(i)<-Fdo))
    disp('Fd out of bounds!');
    disp('Value');
    disp(Fd(i));
    disp('Time');
    disp(t_start+(i-1)*t_step);
end;

if ((omega(i)>omega_o) | (omega(i)<-omega_o))
    disp('Omega out of bounds!');
    disp('Value');
    disp(omega(i));
    disp('Time');
    disp(t_start+(i-1)*t_step);
end;

if ((acc_level(i)>acc_limit) | (acc_level(i)<-acc_limit))
    disp('Acceleration out of bounds!');
    disp('Value');
    disp(acc_level(i));
    disp('Time');
    disp(t_start+(i-1)*t_step);
end;

end;

end;

```


Συνοδευτικό Κείμενο
Σύντομης Περιγραφής
των εσωτερικών μεταβλητών
του DC_Motor_Model (έκδ. 1.0)

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή.....	- 159 -
2 Εσωτερικές μεταβλητές της ρουτίνας DC_Motor_Model v1.0.....	- 159 -
3 Γραφικές παραστάσεις της DC_Motor_Model v1.0.....	- 162 -

1 Εισαγωγή

Στο κείμενο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εσωτερικές μεταβλητές του μοντέλου DC Motor με στόχο την διευκόλυνση για την περαιτέρω αναπτυξη του ήδη υπάρχοντος κώδικα Matlab. Ως εσωτερικές μεταβλητές του κώδικα ορίζουμε τις μεταβλητές οι οποίες δημιουργούνται τοπικά και χρησιμοποιούνται βοηθητικά (εσωτερικά) από τις ρουτίνες που παράγουν τα αλγοριθμικά αποτελέσματα με βάση τις συνθήκες εισόδου (παράμετροι εισόδου) της ρουτίνας DC_Motor_Model v1.0.

Η ρουτίνα DC_Motor_Model v1_0 βασίζει την λειτουργία της σε δεδομένα τα οποία προέρχονται από παραμέτρους στο αρχικό τμήμα του αρχείου. Για την λειτουργία του κυρίως μοντέλου προσομοίωσης έχουν δημιουργηθεί οι ακόλουθες συναρτήσεις:

- Tload_func.m Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροπής του φορτίου που εξυπηρετείται από τον κινητήρα Σ.Ρ.
- Ia_func.m Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής του ρεύματος κυκλώματος τυμπάνου του κινητήρα Σ.Ρ.
- Fd_func.m Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροής του μαγνητικού πεδίου που παράγεται με την χρησιμοποίηση του κυκλώματος πεδίου του κινητήρα Σ.Ρ.
- omega_func.m Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας περιστοροφής του κινητήρα Σ.Ρ.
- theta_func.m Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνιακής θέσης περιστοροφής του κινητήρα Σ.Ρ.

Οι παραπάνω συναρτήσεις χρησιμοποιούν παραμέτρους που καθορίζονται στον κώδικα του DC_Motor_Model.m καθώς καλούνται για υπολογισμούς κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αρχείου αυτού.

2 Εσωτερικές μεταβλητές της ρουτίνας DC_Motor_Model v1.0

Οι εσωτερικές μεταβλητές του κώδικα Matlab για την ρουτίνα DC_Motor_Model v1.0 παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Παράμετρος	Αριθμός γραμμής που εμφανίζεται η μεταβλητή στην ρουτίνα DC_Motor_Model v1.0	Παρατηρήσεις
t_step	18	Χρονική παράμετρος βήματος προσομοίωσης. Όσο μικρότερη τιμή τόσο περισσότερα σημεία προσομοίωσης εντός του συνολικού διαστήματος.

T_start	19	Χρονική στιγμή εκκίνησης της προσομοίωσης
t_stop	20	Χρονική στιγμή λήξης της προσομοίωσης
t_load_start	21	Χρονική στιγμή εισαγωγής του φορτίου στον κινητήρα Σ.Ρ.
control_of_Va	23	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή ‘y’ ενεργοποιεί τον έλεγχο του ανοικτού βρόχου μέσω του κυκλώματος τυμπάνου. Στην περίπτωση αυτή η ρουτίνα αναπροσαρμόζει την επιβαλλόμενη τάση για το τύμαπανο εντός των επιτρεπτών ορίων.
Control_of_Vf	24	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή ‘y’ ενεργοποιεί τον έλεγχο του ανοικτού βρόχου μέσω του ελέγχου πεδίου. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα μειώνει την επιβαλλόμενη τάση Vf με στόχο την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του φορτίου.
Vao	26	Μέγιστη επιτρεπτή τάση τυμπάνου.
Omega_o	27	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής κινητήρα Σ.Ρ.
Fdo	28	Μέγιστη μαγνητική ροή του κυκλώματος πεδίου του κινητήρα Σ.Ρ.
Vfo	29	Μέγιστη επιτρεπτή τάση για τον έλεγχο του κυκλώματος πεδίου.
J	30	Ροπή αδράνειας του άξονα περιστροφής του κινητήρα Σ.Ρ.
Ra	31	Αντίσταση κυκλώματος τυμπάνου.
La	32	Αυτεπαγωγή κυκλώματος τυμπάνου.
Rf	33	Αντίσταση κυκλώματος πεδίου.
Nf	34	Σπείρες πηνίου κυκλώματος πεδίου.
Theta_o	35	Αρχική γωνία θέσεως του κινητήρα Σ.Ρ.
Tl1	37	Σταθερή συνιστώσα φορτίου.
Tl2	38	Συνιστώσα φορτίου που εξαρτάται από την γωνιακή ταχύτητα.
Tl3	39	Συνιστώσα φορτίου που εξαρτάται από την γωνιακή θέση.
Plot_Tload	41	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή ‘y’ επιτρέπει την εκτύπωση στην οθόνη της γραφικής παράστασης του μεγέθους Tload (φορτίο κινητήρα) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.
Plot_Ia	42	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή ‘y’ επιτρέπει την εκτύπωση στην οθόνη της γραφικής παράστασης του μεγέθους Ia (ρεύματος κυκλώματος τυμπάνου)

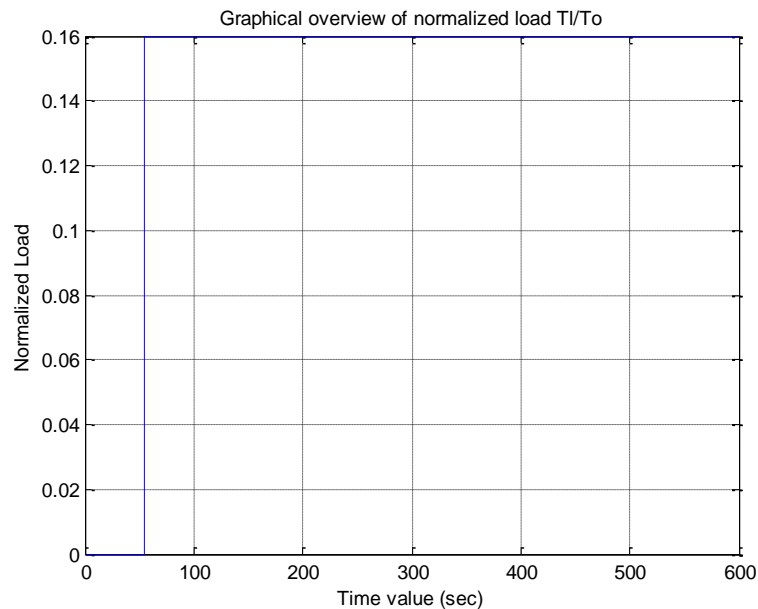
		συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.
Plot_Fd	43	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή 'y' επιτρέπει την εκτύπωση στην οθόνη της γραφικής παράστασης του μεγέθους Fd (Μαγνητική ροή κυκλώματος πεδίου) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.
Plot_omega	44	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή 'y' επιτρέπει την εκτύπωση στην οθόνη της γραφικής παράστασης του μεγέθους Omega (γωνιακή ταχύτητα κινητήρα) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.
Plot_theta	45	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή 'y' επιτρέπει την εκτύπωση στην οθόνη της γραφικής παράστασης του μεγέθους theta (γωνιακή θέση κινητήρα) συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης.
suspend_warnings	47	Boolean μεταβλητή η οποία με τιμή 'y' επιτρέπει την εμφάνιση warnings (ειδοποιήσεων) τυπώνοντας αντίστοιχα μηνύματα την οθόνη του Matlab. Τα μηνύματα αφορούν στις μεταβλητές Tload, Ia, Fd και omega.

Πίνακας 1: Εσωτερικές μεταβλητές της ρουτίνας DC_Motor_Model

3 Γραφικές παραστάσεις της DC_Motor_Model v1.0

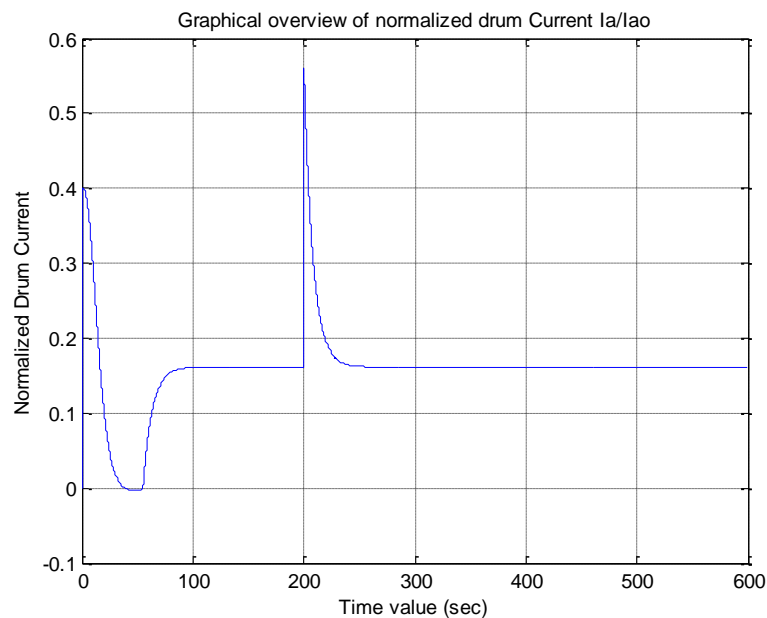
Η ρουτίνα παράγει ένα σύνολο γραφικών παραστάσεων που βοηθούν στην πληρέστερη κατανόηση των αποτελεσμάτων του προβλήματος που επιλύει.

Tload: Χρονικά μεταβαλλόμενη απεικόνιση της συνάρτησης φορτίου που επιβάλλεται στον κινητήρα Σ.Ρ.



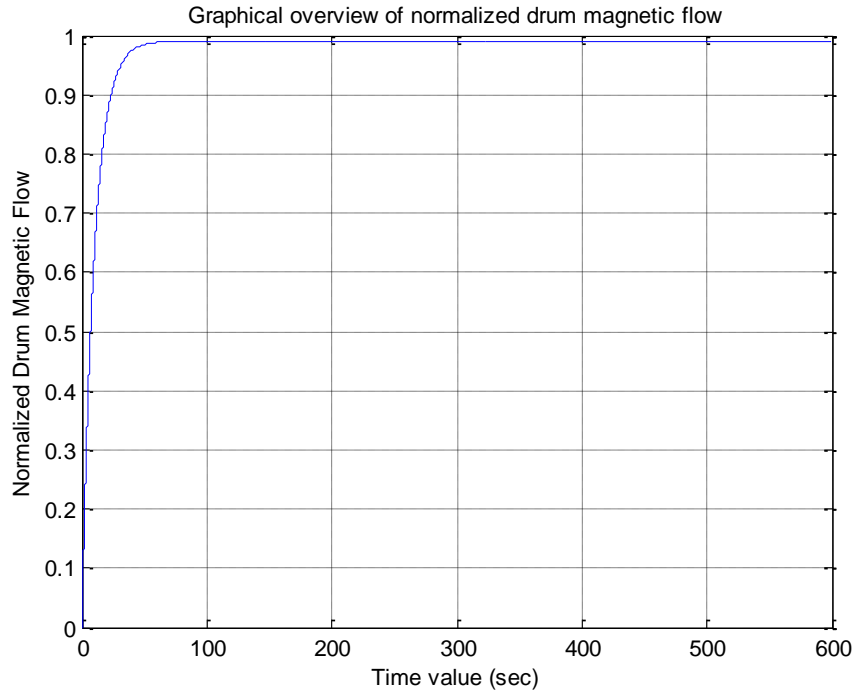
Σχήμα 1: Γραφική παράσταση του φορτίου του κινητήρα

Ia: Γραφική παράσταση του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα Σ.Ρ.



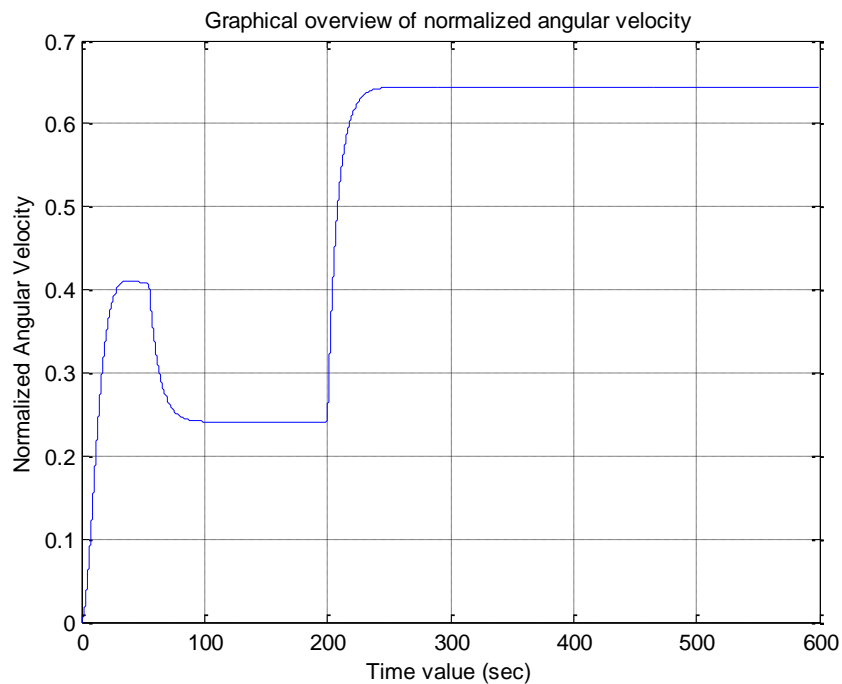
Σχήμα 2: Γραφική παράσταση του ρεύματος τυμπάνου

Fd: Μαγνητική ροή του κυκλώματος πεδίου του κινητήρα Σ.Ρ.



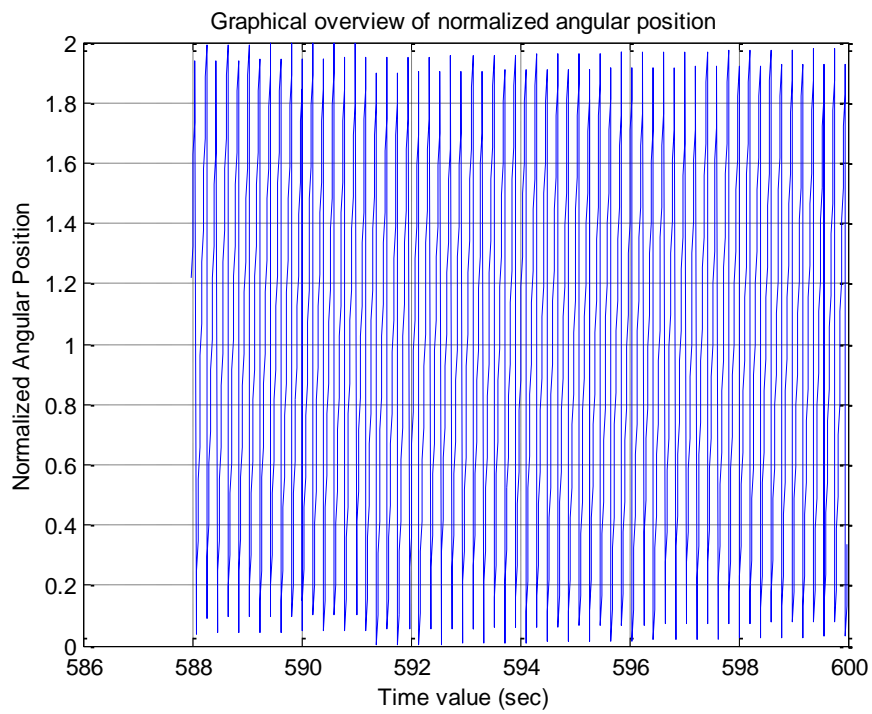
Σχήμα 3: Γραφική παράσταση της μαγνητικής ροής του κυκλώματος πεδίου

Omega: Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα Σ.Ρ.



Σχήμα 4: Γραφική παράσταση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα

Theta: Γωνιακή θέση περιστροφής του κινητήρα Σ.Ρ.



Σχήμα 5: Γραφική παράσταση της γωνιακής θέσης του κινητήρα

Βιβλιογραφία

Βιβλία

- [1] Μαρία Γ. Ιωαννίδου, 'Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών', ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [2] Π. Ν. Παρασκευόπουλος, 'Εισαγωγή στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου' Τόμος Α', Εκδόσεις Συμμετρία 1991
- [3] Π. Ν. Παρασκευόπουλος, 'Έλεγχος Συστημάτων με Υπολογιστές', Εκδόσεις Συμμετρία 1991
- [4] R.C. Dorf, R.H. Bishop, 'Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου', Εκδόσεις Τζιόλα 2004
- [5] A. Emadi, 'Energy-Efficient Electric Motors', Illinois Institute of Technology 2005
- [6] F.D. Petruzella, 'Electric Motors Control Systems', Mc Graw Hill 2010
- [7] R. Krishnan, 'Electric Motor Drives: Modeling – Analysis and Control', Prentice Hall 2001
- [8] S. Herman, 'Electric Motor Control', Delmar 2007
- [9] Ιωάννης Α. Τεγόπουλος, 'Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β', Εκδόσεις Συμμετρία 1991
- [10] Στέφανος Ν. Μανιάς, 'Ηλεκτρονικά Ισχύος', Εκδόσεις Συμμετρών 2000
- [11] J.Millman/X.Χαλκιάς, Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική, Εκδόσεις Συμμετρία, 1990
- [12] T. Kenjo, A. Sugawara, "Stepping Motors and their Microprocessor controls", Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford 1994
- [13] Stephen J. Chapman, 'Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC', Εκδόσεις Τζιόλα 2003
- [14] Sendra/Smith, Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα , 2004
- [15] Mathwors, Matlab & Simulink Online Tutorials

Ηλεκτρονικές Εκδόσεις – Υλικό

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [2] <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>
- [3] <http://www.mathworks.com/discovery/pid-control.html>
- [4] <http://www.ni.com/white-paper/3782/en/>
- [5] <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/econtrolhtml/pid/pid3.html>
- [6] <http://www.expertune.com/tutor.aspx>
- [7] <http://www.ecircuitcenter.com/Circuits/pid1/pid1.htm>
- [8] <http://www.ospid.com/blog/what-is-pid-control/>