



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ,
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Διπλωματική Εργασία του «Ρενάτο Τσαράι»

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΤΜΗΜΑΤΑ
ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ**

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

ΡΕΝΑΤΟ ΤΣΑΡΑΪ

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΤΜΗΜΑΤΑ
ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ**

Επιβλέπων

**Ιψάκης
Δημήτριος**

Επίκουρος Καθηγη-
τής

Μέλος 1

**Παπαευθυμίου Σπυ-
ρίδων**

Αναπληρωτής Καθη-
γητής

Μέλος 2

**Αραμπατζής
Γεώργιος**

Επίκουρος Καθηγη-
τής

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	3
1.1 Ιστορική Αναδρομή	3
1.2 Εισαγωγή στα ηλεκτρικά οχήματα	7
1.3 Τύποι Υβριδικών Οχημάτων.....	8
1.4 Βασικές αρχές υβριδικών οχημάτων.....	10
1.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	11
1.5.1 Πλεονεκτήματα	11
1.5.2 Μειονεκτήματα	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Συστήματα μετάδοσης υβριδικών οχημάτων και τα μέρη που τα απαρτίζουν	15
2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία	15
2.2 Ανάλυση συστημάτων ισχύος	15
2.2.1 Σειριακή σύνδεση	16
2.2.2 Παράλληλη σύνδεση	16
2.2.3 Ήπια παράλληλο υβριδικό	17
2.2.4 Σε σειρά παράλληλα	17
2.3 Ηλεκτρικός κινητήρας.....	18
2.3.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος <i>Brushless</i>	18
2.3.2 Ασύγχρονοι (ή Επαγωγικοί) κινητήρες.....	19
2.4 Συσσωρευτές.....	20
2.4.1 Μπαταρία μολύβδου-οξέος	21
2.4.2 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd).....	22
2.4.3 Μπαταρίες νικελίου-υβριδίου (Ni-MH)	22
2.4.4 Μπαταρίες ιόντων λιθίου.....	23
2.5 Μετατροπέας ισχύος	24
2.6.1 Παθητική ανάρτηση	26

2.6.2	Ημι-ενεργητική ανάρτηση	26
2.6.3	Ενεργητική ανάρτηση.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Γενικά χαρακτηριστικά και περιγραφή ελεγκτών PID.....		27
3.1	Εισαγωγικά Στοιχεία	27
3.2	Αλγόριθμος ελέγχου PID.....	27
3.2.1	Αναλογική δράση	29
3.2.2	Ολοκληρωτική δράση	30
3.2.3	Διαφορική δράση	31
3.3	Συντονισμός Παραμέτρων Ελεγκτή	32
3.3.1	Ημιεμπειρικές μέθοδοι συντονισμού παραμέτρων ελεγκτή	32
3.3.2	Συστηματικές μέθοδοι προσδιορισμού παραμέτρων ελεγκτή	35
3.4	Υπολογιστική Υλοποίηση Ελεγκτή PID	36
3.5	Βελτιώσεις Κύριου Αλγορίθμου PID.....	37
3.5.1	Χρήση βάρους στο σήμα αναφοράς	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Βέλτιστος σχεδιασμός ελεγκτή PID για έλεγχο ταχύτητας ενός DC κινητήρα.....		38
4.1	Εισαγωγικά Στοιχεία	38
4.2	Μαθηματικό μοντέλο ενός DC κινητήρα	39
4.3	Μέθοδος βελτιστοποίησης Cuckoo Search (CS).....	42
4.3.1	Μοντέλο κινητήρα	42
4.3.2	Έλεγχος ανατροφοδότησης και σχεδίαση βέλτιστου ελεγκτή	44
4.3.3	Αλγόριθμος Cuckoo Search (CS).....	45
4.3.4	Εφαρμογή της μεθόδου CS και Αποτελέσματα	46
4.3.5	Συμπεράσματα	49
4.4	Μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO)	49
4.4.1	Μαθηματικό μοντέλο κινητήρα.....	49
4.4.2	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO).....	50
4.4.3	Αναγνώριση (System Identification)	52
4.4.4	Tuning του ελεγκτή PID.....	54
4.4.5	Συμπεράσματα	57
4.5	Γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης (GA)	57
4.5.1	Μαθηματικό μοντέλο	58
4.5.2	Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm).....	58

4.5.3 Βέλτιστος ελεγκτής PID	59
4.5.4 Αποτελέσματα και σύγκριση αλγορίθμων	60
4.5.5 Συμπεράσματα	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Εφαρμογή συστημάτων ελέγχου στις αναρτήσεις ενός	63
5.1 Εισαγωγή	63
5.2 Νευρωνικά δίκτυα	63
5.2.1 Μαθηματικό μοντέλο ανάρτησης	64
5.3 Νευρωνικά δίκτυα	66
5.3.1 Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου	69
5.3.2 Συμπεράσματα	73
5.4 Μέθοδος σμήνους σωματιδίων PSO	74
5.4.1 Αποτελέσματα	75
5.4.2 Συμπεράσματα	76
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	77
ΑΝΑΦΟΡΕΣ / ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη υιοθέτησης βιώσιμων πηγών ενέργειας με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με τη συνεχή προσπάθεια για αυτοματισμό έχει ως αποτέλεσμα την ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων και των συστημάτων αυτοματισμού στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία. Απώτερος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ερευνητική εμβάθυνση στον τομέα της εφαρμογής συμβατικών (κατά κύριο λόγο) συστημάτων ελέγχου σε προκαθορισμένα τμήματα κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος: στον ηλεκτρικό κινητήρα και τις αναρτήσεις.

Με βάση τα παραπάνω, η διπλωματική εργασία ξεκινάει με μια ιστορική αναδρομή για την εμφάνιση των πρώτων οχημάτων, έως και την σημερινή εποχή που χαρακτηρίζεται από την ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη χρήσης υβριδικών/ηλεκτρικών οχημάτων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα μέρη κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος με έμφαση να δίνεται στον ηλεκτρικό κινητήρα, τα συστήματα ισχύος, τα είδη των συσσωρευτών, καθώς και τις αναρτήσεις. Έπειτα, παρουσιάζεται συνοπτικά η έννοια και η θεωρία του ελεγκτή PID που αποτελεί (αν και συμβατικό σύστημα ελέγχου) μια από τις βασικές επιλογές της ερευνητικής κοινότητας στην μελέτη κίνησης ενός οχήματος.

Ως επόμενο βήμα, παρουσιάζεται το βασικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Ειδικότερα ακόμα παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο του εκάστοτε τμήματος κίνησης ενός οχήματος (π.χ. κινητήρας και αναρτήσεις) και αναλύεται μια επιλεγμένη σειρά μελετών της βιβλιογραφίας στον τομέα εφαρμογής συστημάτων ελέγχου. Ειδικότερα, αναλύονται οι σύγχρονες μέθοδοι "tuning" ενός ελεγκτή PID με χρήση αλγορίθμου της Τεχνητής Νοημοσύνης (π.χ. Γενετικοί Αλγόριθμοι, Νευρωνικά δίκτυα) προσφέροντας έτσι στους μηχανικούς νέες μεθόδους αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων. Επιπλέον γίνεται η σύγκριση και η αξιολόγηση τους με συμβατικές μεθόδους ρύθμισης ελεγκτών PID όπως είναι για παράδειγμα η κλασική μέθοδος Ziegler-nichols.

ABSTRACT

The need to adopt sustainable energy sources in order to protect the environment in combination with the continuous effort for automation in modern times, has contributed in the rapid development of electric vehicles and automation systems in the modern automotive industry. The main goal of this thesis is to research the application of (mainly conventional) control systems in predetermined parts of an electric vehicle: the electric motor and the suspensions.

Based on the above, this thesis begins with a brief historical introduction on the origin of electrical vehicles, up to the present day which is characterized by a growing need of hybrid / electric vehicles. Followed by a summary of all the driving parts which consist an electric vehicle with emphasis given on the electric motor, power systems, battery types, and suspensions. Then, the concept and theory of the PID controller is briefly presented, which is (although a conventional control system) one of the most used controllers by the research community in the study of a vehicle's motion.

As a next step, the main part of this thesis is presented. In particular, the mathematical model of each part of a vehicle (eg engine and suspensions) is presented and a selected series of literature studies in the field of control systems application are analyzed. In particular, the modern methods of "tuning" a PID controller using Artificial Intelligence algorithms (eg Genetic Algorithms, Neural Networks) are analyzed, thus offering engineers new methods of dealing with such problems. In addition, they are compared and evaluated with conventional methods of setting PID controllers such as the classic Ziegler-Nichols method.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

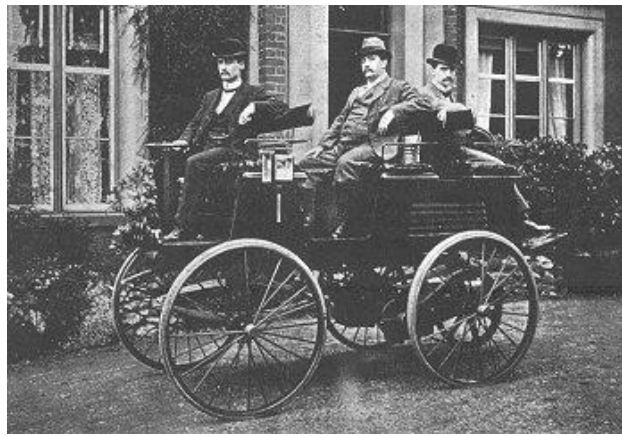
Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν αποτελούν σημείο των καιρών μας αλλά υπάρχουν εδώ και αρκετά χρόνια. Η ιστορία τους χρονολογείται στα μέσα του 19ου αιώνα παρότι τα τελευταία χρόνια αυτήν η «πράσινη» τεχνολογία βρίσκεται στο επίκεντρο ενδιαφέροντος της αυτοβιομηχανικής έρευνας. Την δεκαετία του 1830 πραγματοποιούνται οι πρώιμες προσπάθειες για τον σχεδιασμό ηλεκτροκίνητου οχήματος ως καθαρά πειραματικές κατασκευές, με την εφεύρεση τους να αποδίδεται σε διάφορους εφευρέτες από Αμερική και Ευρώπη. Συγκεκριμένα το 1828 ο Anyos Jedlik από τη Ουγγαρία, πρωτοπόρησε στην εφεύρεση ενός πρώτυπου ηλεκτρικού κινητήρα τον οποίο ύστερα τοποθέτησε σε ένα μοντέλο μικρού οχήματος. Μεγαλύτερη όμως επιτυχία και απείχηση είχαν τα οχήματα που κατασκευάστηκαν το 1834 από τον Αμερικανό Thomas Davenport και από τον σκωτσέζο Robert Davidson 1842. Όμως οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που παρέχουν ένα βιώσιμο τρόπο αποθήκευσης ενέργειας στο αυτοκίνητο δεν υπήρχαν μέχρι το 1840. Στη συνέχεια παρατηρείται σταδιακή βελτίωση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο Αμερικανός Moses Farmer το 1847 δημιούργησε και παρουσίασε στο κοινό ένα αυτοκίνητο όχημα με την ικανότητα να μεταφέρει έως και δύο επιβάτες, ο καθηγητής Charles Page κατασκεύασε ένα όχημα που αποτελούνταν από 100 συσσωρευτές και ένα κινητήρα με ισχύ 16 ίππων που μπορούσε να μεταφέρει 12 επιβάτες με ταχύτητα που έφτανε μέχρι και τα 19 μίλια/ώρα, ενώ οι Lilly και Colton παρουσίασαν ένα ηλεκτροκίνητο όχημα του οποίου η κίνηση εξαρτιόταν από ηλεκτροφόρες ράγες. Όμως όλες αυτές οι πρώιμες κατασκευές πλήττονταν από βασικά μειονεκτήματα των συσσωρευτών τους, όπως τον χαμηλό λόγο ενέργειας προς τον όγκο και το βάρος, με κύριο μειονέκτημα να αποτελεί η μη δυνατότητα επαναφόρτισης. Το 1859, ωστόσο, ο Γάλλος Gaston Plante ανακάλυψε για πρώτη φορά το στοιχείο Μολύβδου-Οξέως (Pb-Acid) που έχει δυνατότητα επαναφόρτισης, λύνοντας έτσι ένα από τα βασικά προβλήματα. Εφαρμόζοντας τους συσσωρευτές μολύβδου στην πράξη, το 1881 ο Camille Faure άνοιξε τον δρόμο στην επέκταση των ηλεκτρικών οχημάτων στη Ευρώπη με την Αγγλία και την Γαλλία να υποστηρίζουν την κατασκευή των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Το

1910 ο Thomas Edison κατασκεύασε έναν βελτιωμένο τύπο συσσωρευτή Νικελίου-Σιδήρου (Ni-Fe) που φυσικά ξεχώρισε. Ο συγκεκριμένος συσσωρευτής αποτελούσε το πιο προηγμένο τεχνολογικά στοιχείο εκείνης της εποχής και μάλιστα έγινε χρήση του σε νέο ηλεκτροκίνητο όχημα που κατασκεύασε ο ίδιος ο Edison.[1-3]



Εικόνα 1.1 « Ηλεκτρικό όχημα στην Γερμανία το 1904» [28]

Ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτροκίνητων οχημάτων παρατηρείται κατά την διάρκεια αυτών των δεκατιών τόσο στην Αμερική όσο και στην Ευρώπη, με τις τεχνικές επιδόσεις των ηλεκτρικών οχημάτων να είναι αρκετά αξιοσημείωτες. Ένα βασικό παράδειγμα αποτελεί το αυτοκίνητο *la jamais contente* του Βέλγου Camille Jenatzy ο οποίος την δεκαετία του 1920 παρουσίασε την ηλεκτροκίνητη «τορπίλη» του για να πιάσει την αστρονομική ταχύτητα των 100 χλμ./ώρα. Η δημοτικότητα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ευημερούσε έως το 1920 με τις πωλήσεις να κορυφώνονται στις αρχές της δεκαετίας. Πιο συγκεκριμένα, στοιχεία δείχνουν ότι στις Ηνωμένες πολιτείες ο αριθμός των αυτοκινήτων που πουλήθηκαν έφτασε περίπου τα 4200 με το 38% από αυτά να είναι ηλεκτροκίνητα. Η δεκαετία που ξεχώρισε και αξίζει να αναφερθεί είναι το 1912, όπου στους δρόμους των ΗΠΑ κυκλοφορούσαν περίπου 3400 ηλεκτρικά οχήματα, με αρκετά ικανοποιητικές επιδόσεις ταχύτητας για την εποχή εκείνη. [1-3]



Εικόνα 1.2 «Ηλεκτρικό όχημα που κατασκεύασε ο Thomas Parker (1895)» [28]

Παρά τη σχετικά χαμηλή ταχύτητά τους, τα ηλεκτρικά οχήματα είχαν σημαντικά πλεονεκτήματα σε αντίθεση με τα ατμοκίνητα και τα βενζινοκίνητα καθώς δεν παρήγαγαν δονήσεις και θόρυβο. Ήταν ιδιαίτερα εύκολα στην εκκίνηση, καθώς αρκούσε ένας διακόπτης για την εκκίνηση τους. Αντίθετα, τα βενζινοκίνητα ήταν ακόμη αρκετά περίπλοκα καθώς είχαν την απαίτηση χειροκίνητης χρήσης λάμψας για την εκκίνηση του κινητήρα και η αλλαγή ταχυτήτων κατά την οδήγηση ήταν ιδιαίτερα δύσκολη κάτι που δεν αποτελούσε πρόβλημα για τα ηλεκτροκίνητα καθώς δεν απαιτούσαν αλλαγές ταχυτήτων. Τα ηλεκτροκίνητα ήταν δημοφιλή στους εύπορους πελάτες που τα χρησιμοποίησαν αποκλειστικά στην κίνηση τους στην πόλη, επομένως το περιορισμένο εύρος τους δεν ήταν πρόβλημα Ένας άλλος παράγοντας υπέρ των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ήταν το οδικό δίκτυο διασύνδεσης των πόλεων καθώς ήταν ακατάλληλο για υπεραστικές μετακινήσεις. Αυτός λοιπόν ο περιορισμός για αστική χρήση και μόνο, έκανε τα ηλεκτροκίνητα οχήματα να επικρατήσουν μέχρι τη δεκαετία του 1920.

Παρά την επιτυχία τους στην αρχή του 20ου αιώνα, έγινε μεταστροφή της αγοράς στην Αμερική με τη μαζική παραγωγή του μοντέλου T και το χαμηλό κόστος καυσίμων να κάνει τα βενζινοκίνητα οχήματα οικονομικά-προσιτά και διαθέσιμα. Το 1912, τα βενζινοκίνητα κόστιζαν μόνο 650 δολάρια σε αντίθεση με 1750 δολάρια ενός ηλεκτροκίνητου[energy.gov]. Και την ίδια χρόνια, ο Charles Kettering εφηύρε τον ηλεκτρικό εκκινητή κάνοντας εύκολη την εκκίνηση των βενζινοκίνητων. Επιπλέον η δομή του οδικού δικτύου βελτιώθηκε αυξάνοντας έτσι την ανάγκη οχημάτων μεγάλης εμβέλειας. Στη συνέχεια οι αλλαγές αυτές εμφανίστηκαν και στην Ευρώπη με αποτέλεσμα την απόσυρση των ηλεκτρικών οχημάτων.[1-3]



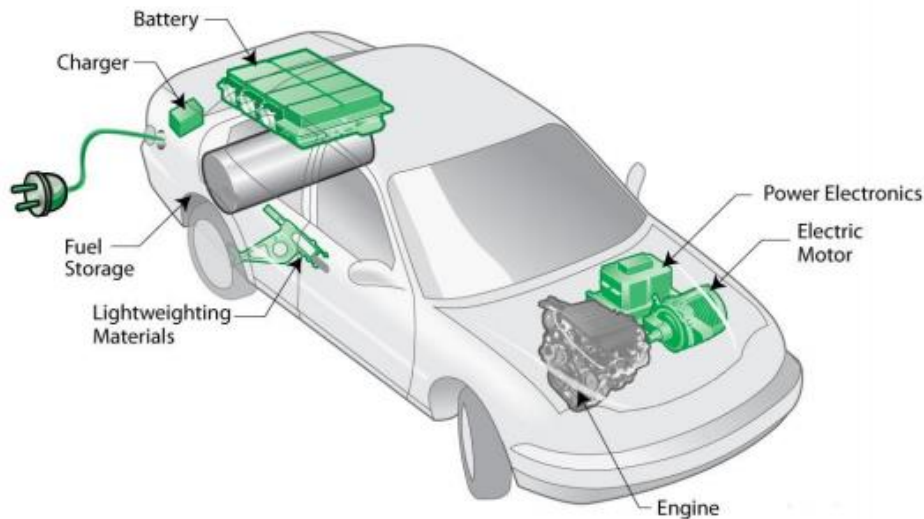
Εικόνα 1.3 «Στην εικόνα απεικονίζεται ο Thomas Edison με ένα ηλεκτρικό όχημα (1913)» [28]

Έως την δεκαετία του 1960 παρατηρούμε την ολοκληρωτική παρακμή στην χρήση και παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά τα επόμενα χρόνια το ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο μέσο μεταφοράς άρχισε να αναπτύσσεται. Οι κυριότεροι λόγοι που οδήγησαν και πάλι στην επιθυμία και αναγκαιότητα χρήσης ηλεκτροκίνητων ήταν αφενός, το τεράστιο πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που αντιμετώπιζαν τα αστικά κέντρα και αφετέρου η ανάγκη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για τους παραπάνω λόγους ποικίλες εταιρίες μεταξύ των οποίων η Ford, η General Motors, η Mercedes, η Toyota και άλλες δημοφιλείς εταιρίες αυτοκινήτων, κατασκεύασαν διάφορα ηλεκτροκίνητα μοντέλα. Συγχρόνως με την παραγωγή αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων, οι αυτοκινητοβιομηχανίες αυτές θεώρησαν απαραίτητη την κατασκευή και υβριδικών οχημάτων που συνδυάζαν βενζινοκινητήρες και ηλεκτροκινητήρες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός μεταξύ τους.

Λόγω όλων των παραπάνω καινοτομιών οδηγούμαστε στο σήμερα, όπου το ενδιαφέρον και η αναγκαιότητα χρήσης αυτών των οχημάτων έχει κλιμακωθεί, αρχικά λόγω της έλλειψης και αύξησης της τιμής των ορυκτών καυσίμων και κατά δεύτερον εξαιτίας των έντονων κλιματικών αλλαγών. Εν κατακλείδι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα ηλεκτροκίνητα αποτελούν το μέσον εξασφάλισης της βιώσιμης ποιότητας του περιβάλλοντος των αστικών κέντρων.[1-3]

1.2 Εισαγωγή στα ηλεκτρικά οχήματα

Τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν για την κίνηση τους έναν ηλεκτρικό κινητήρα ο οποίος αντλεί την απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία του από μία συστοιχία με μπαταρίες. Οι πιο συνηθισμένες μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα σημερινά ηλεκτρικά οχήματα είναι οι χημικές λιθίου. Το γεγονός ότι ηλεκτροκίνητα δεν χρησιμοποιούν κινητήρα εσωτερικής καύσης τα καθιστά κατάλληλα για χρήση καθώς αποτελούν μία πιο φιλική επιλογή προς περιβάλλον και τροφοδοτούνται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για την αύξηση της απόδοσης τους ένα κατάλληλο συστήματα ελέγχου ρυθμίζει την παροχή ενέργειας από τις μπαταρίες στον κινητήρα και επιπλέον χρησιμοποιούν αναγεννητική πέδηση επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας, η τεχνολογία αυτή θέτει τον ηλεκτρικό κινητήρα σε λειτουργία γεννήτριας επαναφορτίζοντας τον κατά έναν βαθμό, επίσης ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και σε κατηφόρα. Ένα επιπλέον βασικό χαρακτηριστικό των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το γεγονός ότι η συνδεσμολογία τους δεν απαιτεί την χρήση κλασσικού κιβώτιου ταχυτήτων αφού ο κινητήρας τους παρουσιάζει μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης και η συνήθης ύπαρξη πολλών ηλεκτροκινητήρων. Τα ηλεκτρικά οχήματα όμως αντιμετωπίζουν ένα πολύ βασικό μειονέκτημα, την μικρή αυτονομία τους. Τα υβριδικά οχήματα αποτελούν έναν τρόπο αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος. [5]



Εικόνα 1.4 « Ένα Plug-in υβριδικό όχημα» [5]

1.3 Τύποι Υβριδικών Οχημάτων

Για την αντιμετώπιση των περισσότερων μειονεκτημάτων που παρατηρούνται στα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα στις σύγχρονες αυτοκινητοβιομηχανίες γίνεται έρευνα και κατασκευή συνδυαστικών συστημάτων παροχής ενέργειας τα λεγόμενα υβριδικά οχήματα.

Βασικός στόχος στη δομή ενός κλασικού υβριδικού συστήματος είναι ο συνδυασμός ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης και ενός ηλεκτρικού μοτέρ και η αξιοποίηση των καλύτερων χαρακτηριστικών λειτουργίας τους. Επομένως ένα υβριδικό αυτοκίνητο συνδυάζει και αξιοποιεί δύο πηγές ενέργειας. Τη θερμοδυναμική ενέργεια που προέρχεται από την μηχανή εσωτερικής καύσης, και την ηλεκτρική που προέρχεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα.

Για να συνδυαστεί σωστά η λειτουργία αυτών των δύο πηγών ενέργειας είναι απαραίτητη η χρήση επιπλέον βοηθητικών εξαρτημάτων, όπως είναι οι μπαταρίες, η γεννήτρια και ο μετασχηματιστής. Ένα υβριδικό όχημα μπορεί να εναλλάσσει τρόπο κίνησης είτε με τον έναν από τους δύο κινητήρες, είτε με τον συνδυασμό τους.

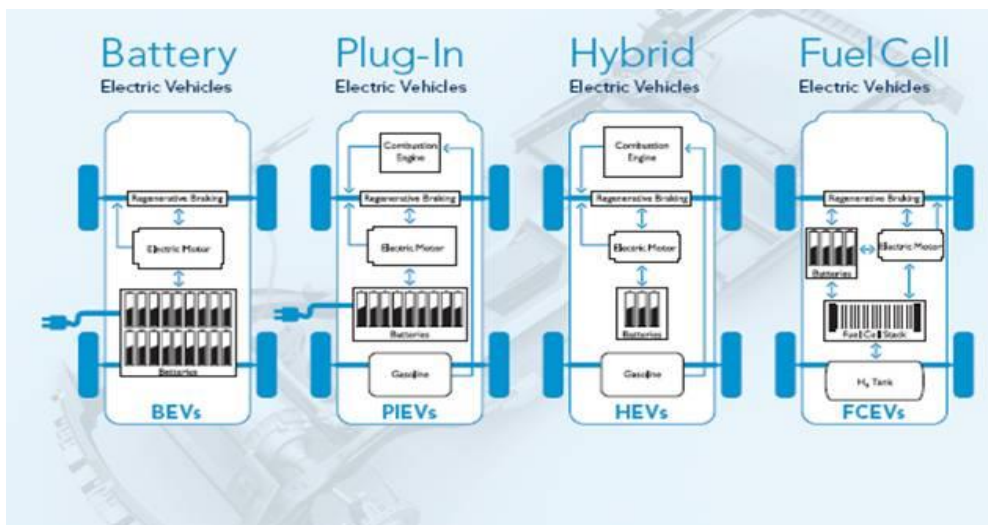
Για μικρές απαιτήσεις όπως στην εκκίνηση, στην κυκλοφορία μέσα στην πόλη και χαμηλή ταχύτητα χρησιμοποιείται ο ηλεκτροκινητήρας, ενώ σε μεγάλες απαιτήσεις όπως για ανοιχτό δρόμο και σε γρήγορη κίνηση χρησιμοποιείται ο βενζινοκινητήρας. Και για μέγιστες αποδόσεις, όπως για ένα προσπέρασμα ή σε μία ανηφόρα, χρησιμοποιείται η συνδυασμένη λειτουργία του θερμικού και του ηλεκτρικού κινητήρα.

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα τα οποία παρατηρούνται στον ηλεκτροκινητήρα είναι ότι από μόνοι τους δεν διαθέτουν αρκετά μεγάλη αυτονομία κίνησης. Η μικρή χωρητικότητα των μπαταριών τους καθιστούν ακατάλληλους για μακρινά ταξίδια. Τα υβριδικά αυτοκίνητα λύνουν αυτό το πρόβλημα φορτίζοντας την μπαταρία από μία γεννήτρια με τη βοήθεια του βενζινοκινητήρα. Συγκεκριμένα ο βενζινοκινητήρας μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε κινητική ενέργεια. Η κινητική ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται από τη γεννήτρια με κατάλληλο σύστημα σε ηλεκτρική. Τέλος η ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στον ηλεκτροκινητήρα ο οποίος τη μετατρέπει ξανά σε κινητική ενέργεια δίνοντας κίνηση στους τροχούς. Η περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες. Με αυτόν τον τρόπο τα υβριδικά οχήματα συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής κίνησης με τη μεγάλη αυτονομία της μηχανής εσωτερικής καύσης.[4]

Τα υβριδικά οχήματα ανάλογα με το σύστημα για τη μετάδοση ισχύος τους ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες (Ακριβής ανάλυση αυτών των συστημάτων θα γίνει στο κεφάλαιο 2) :

- **Σειριακά.** Στα οποία τη μετάδοση ισχύος την δίνει αποκλειστικά ένας ηλεκτροκινητήρας.
- **Παράλληλα.** Στα οποία η μετάδοση ισχύος δίνεται και από τον κινητήρα και από τον ηλεκτροκινητήρα.
- **Μεικτά.** Στα οποία η μετάδοση ισχύος είναι ουσιαστικά ο συνδυασμός σειριακού και παράλληλου.

Τα υβριδικά οχήματα ταξινομούνται επίσης και με τον τρόπο που αποκτούν την ενέργεια κίνησης. Σύμφωνα με αυτόν, διακρίνονται σε Ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες (Battery Electric Vehicle), σε Ηλεκτρικό-υβριδικό όχημα που τροφοδοτείται με σταθερή πηγή ρεύματος (Plug-In Electric Vehicle), σε Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (Hybrid Electric Vehicle) και Ηλεκτρικό όχημα με κυψέλες καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles). FCEVs (FuelCell Electric Vehicles): Ηλεκτρικό όχημα με κυψέλες καυσίμου.[4]



Εικόνα 1.5 «Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων» [29]

1.4 Βασικές αρχές υβριδικών οχημάτων

Εκτός όμως από τα ηλεκτρικά υβριδικά οχήματα υπάρχουν και άλλες κατηγορίες που ανάλογα με τη κατασκευή τους χρησιμοποιούν για την κίνηση τους, όχι μόνο ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και διάφορες άλλες πηγές ενέργειας και ταξινομούνται με βάση αυτά. Οι ταξινόμηση υβριδικών οχημάτων, σύμφωνα με τις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούν είναι:

- Οχήματα που συνδυάζουν ηλεκτροκινητήρα και βενζινοκινητήρα ή και άλλους τύπους κινητήρα.
- Οχήματα που χρησιμοποιούν έναν ηλεκτροκινητήρα και έναν πετρελαιοκινητήρα.
- Τα υδραυλικά υβριδικά .
- Τα πνευματικά υβριδικά.
- Τα υβριδικά που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου

Πιο αναλυτικά τα υβριδικά υδραυλικά οχήματα χρησιμοποιούν για συμπληρωματική μετάδοση ισχύος ένα υδραυλικό σύστημα για την ανάκτηση, την αποθήκευση και την επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας. Με τη χρήση μίας αντλίας μεταβλητής μετατόπισης αντικαθιστά τον κινητήρα-γεννήτρια και για την αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιείται ένας υδραυλικός συσσωρευτής. Τα υδραυλικά συστήματα ανακτούν ενέργεια στη μορφή πεπιεσμένου υδραυλικού ρευστού και δεν διαθέτουν συστήματα ανάκτησης ηλεκτρικής ισχύος ούτε συσσωρευτές . Το υδραυλικό σύστημα αξιοποιεί την υδραυλική ενέργεια κατά την επιτάχυνση, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων. Επίσης ο υδραυλικός συσσωρευτής κοστίζει λιγότερο και έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες που χρησιμοποιεί ένα κλασικό υβριδικό όχημα.

Στα υβριδικά πνευματικά οχήματα αέρας σε συμπιεσμένη μορφή χρησιμοποιείται σαν το μέσο για την προώθηση ενός υβριδικού οχήματος με συμπιεστή βενζίνης, για να παρέχει την ισχύ που απαιτείται για την κίνηση. Το σύστημα παραγωγής και μετάδοσης ισχύος είναι παρόμοιο με αυτό ενός υβριδικού-ηλεκτρικού οχήματος καθώς ενέργεια δεσμεύεται κατά την πέδηση και αποθηκεύεται για αξιοποίηση κατά την επιτάχυνση.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές κυψέλες που χρησιμοποιούν το οξυγόνο της ατμόσφαιρας ώστε να μετατρέψουν την χημική ενέργεια κατάλληλου καυσίμου σε ηλεκτρική. Τα καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές είναι συνήθως το

υδρογόνο, η μεθανόλη και ποιο σπάνια το μεθάνιο. Καθώς δεν μπορεί να γίνει άμεση χρήση των καυσίμων απαιτείται η μετατροπή τους σε υδρογόνο με μία χημική αντίδραση αναδημιουργίας αερίου. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά, είναι πολύ αποδοτικές και πολύ φιλικές προς το περιβάλλον καθώς παράγουν πολύ μικρό ποσοστό ρύπων. Επιπλέον η ιδιαίτερη σπονδυλωτή τους σχεδίαση επιτρέπει την χρήση τους σε μία μεγάλη κλίμακα ισχύος. Εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών και των τελευταίων εξελίξεων στον τομέα ανάπτυξης των κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, οι κατασκευαστές των αυτοκινήτων εικάζουν ότι οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν μία σοβαρή εναλλακτική επιλογή στον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Για τον λόγο αυτό οι μεγάλοι κατασκευαστές οχημάτων ασχολούνται με την έρευνα και την εξέλιξη τους.[4][9]

1.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Όπως και με κάθε άλλο τύπο οχήματος έτσι και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Παρακάτω παραθέτονται τα πιο σημαντικά από αυτά.[1][2][3][8]

1.5.1 Πλεονεκτήματα

- 1 Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του ηλεκτροκίνητου οχήματος είναι η μείωση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας καθώς εκπέμπουν την ελάχιστη δυνατή ρύπανση σε μακροχρόνια βάση σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.
- 2 Είναι πιο αθόρυβα από τα συμβατικά αυτοκίνητα, συντελώντας έτσι στην αντιμετώπιση του προβλήματος της ηχορύπανσης στις αστικές περιοχές.
- 3 Έχουν υψηλότερο συντελεστή ενεργειακής απόδοσης από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, με μερικά ηλεκτρικά οχήματα να έχουν απόδοση έως 3 φορές πάνω από τις Μ.Ε.Κ. Επιπλέον παρουσιάζουν σταθερή ροπή σε μεγάλο εύρος στροφών. Τα ηλεκτροκίνητα έχουν την δυνατότητα να παράγουν στον άξονα την ονομαστική ροπή σχεδόν από την στιγμή που ξεκινάνε έως το μέγιστο όριο στροφών λειτουργίας, σε αντίθεση με τα συμβατικά οχήματα στα οποία η ροπή είναι μέγιστη για ένα πολύ περιορισμένο εύρος στροφών.

- 4 Εξοικονόμηση ενέργειας καθώς δεν υπάρχει κατανάλωση όταν είναι στάσιμα καθώς και η δυνατότητα αξιοποίησης της αναγεννητική πέδησης.
- 5 Μικρότερο κόστος λειτουργίας σε ημερήσια βάση λόγω της μεγάλης απόδοσης σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος της kWh.
- 6 Μικρότερο κόστος λειτουργίας σε βάθος χρόνου λόγω του χαμηλότερου κόστους σέρβις και συντήρησης.
- 7 Η ηλεκτρική μηχανή έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με μια μηχανή εσωτερικής καύσης, μπορεί διαρκέσει πάνω από 1.000.000 μίλια σε αντίθεση με τα 100.000 μίλια ενός συμβατικού οχήματος.
- 8 Με την δόμηση κατάλληλου συστήματος τα ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούν να ανεφοδιάζονται σε κάθε σπίτι.
- 9 Είναι ποιο αξιόπιστα από τα συμβατικά οχήματα.
- 10 Η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων προσφέρει σύμφωνα με τη «Διακήρυξη Για το Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο» που υπεγράφει τον Μάρτιο του 2009, πολλά οφέλη για τη βιώσιμη κινητικότητα Ευρωπαϊκό επίπεδο:
- Προσφέρει ουσιαστική βοήθεια στην επίτευξη των κύριων στόχων της Ε.Ε. για ενέργεια και περιβάλλον: αντικαθιστώντας συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης με ηλεκτρικά αυτοκίνητα θα εξασφαλισθούν σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, ιδιαίτερα στις πόλεις. Ηλεκτροδοτώντας τις οδικές μεταφορές θα ενισχυθεί η ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού της Ευρώπης, φρενάροντας την αυξανόμενη εξάρτηση από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων.
 - Η τεχνολογία ηλεκτρικού αυτοκινήτου προσφέρει μια ευκαιρία να προωθηθεί μια πράσινη οικονομία, η οποία θα ενισχύσει την ανταγωνιστικότητα της Ευρώπης: παρέχεται η δυνατότητα στην Ευρώπη να προηγηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων.
 - Η τεχνολογία ηλεκτρικού αυτοκινήτου προσφέρει μια ευκαιρία να προωθηθεί μια πράσινη οικονομία, η οποία θα ενισχύσει την ανταγωνιστικότητας της Ευρώπης: πα-

ρέχεται η δυνατότητα στην Ευρώπη να προηγηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων.

- Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι περισσότερο αποδοτικά από άλλα που χρησιμοποιούν εναλλακτικές τεχνολογίες. Λαμβάνοντας υπόψη τα υφιστάμενα επίπεδα τεχνολογίας και υποδομών, μπορεί να γίνουν πραγματικότητα οχήματα που θα συνδέονται με δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η προώθηση ηλεκτρικών οχημάτων σε ευρεία κλίμακα θα έχει περιορισμένη επίδραση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ θα ενθαρρύνει την ανάπτυξη «έξυπνων δικτύων».

1.5.2 Μειονεκτήματα

1. Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων οφείλονται κυρίως στις μπαταρίες. Ένα από αυτά τα μειονεκτήματα είναι η χαμηλή τιμή πυκνότητας ενέργειας των συσσωρευτών, γεγονός που αυξάνει τόσο το βάρος αλλά και τον όγκο του αυτοκινήτου.
2. Περιορισμένη απόσταση ταξιδιού ανά φόρτιση μπαταρίας. Στο παρελθόν κάθε 100 χιλιόμετρα χρειαζόνταν επαναφόρτιση. Ωστόσο, με τα πιο σύγχρονα μοντέλα επιτυγχάνονται αυτονομίες που κυμαίνονται από 100 έως 120 χιλιόμετρα στα αυτοκίνητα πόλης και φτάνουν στα 250 με 300 χιλιόμετρα ή και παραπάνω, σε αυτοκίνητα μεγάλης ισχύος. Ρεκόρ βέβαια σημείωσε το σπορ ηλεκτροκίνητο Tesla Roadster, που κατάφερε να διανύσει 504 χιλιόμετρα με μία μόνο φόρτιση, με μέση ταχύτητα 56 χιλιόμετρα/ώρα.
3. Μεγάλο χρόνο επαναφόρτισης. Για μία αργή πλήρη επαναφόρτιση απαιτούνται περίπου 6 ώρες. Ωστόσο, σύγχρονα μοντέλα μπορούν να φορτιστούν κατά 80% σε χρόνο λιγότερο από μία ώρα.
4. Περιορισμένη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών, συνήθως 4 με 5 χρόνια.
5. Μη ανεπτυγμένο δίκτυο φόρτισης. Καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα δεν έχουν ακόμη μεγάλη απήχηση σε παγκόσμιο επίπεδο, δεν έχουν αναπτυχθεί όσο θα έπρεπε και τα δίκτυα φόρτισης αυτών. Άμεσο αποτέλεσμα λοιπόν είναι η περιορισμένη δυνατότητα μετακίνησης, ειδικά σε χώρες που τα ΗΟ δεν έχουν διεισδύσει καθόλου στην αγορά. Στη προσπάθεια αντιμετώπισης του εν λόγω προβλήματος υπάρχουν πολλά κίνητρα και υψηλή

χρηματοδότηση για τη κατασκευή φορητών φορτιστών και σταθμών φόρτισης

6. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να επιβαρύνουν τελικά το περιβάλλον, περισσότερο από ότι τα συμβατικά αυτοκίνητα, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, εάν για τη φόρτιση τους χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από άνθρακα. Μια μελέτη του Αμερικανικού Συμβουλίου Αποδοτικής Ενεργειακής Οικονομίας (American Council for an Energy Efficient Economy - ACCEDE) προβλέπει ότι σε περιοχές όπου πάνω από το 80% της ενέργειας του δικτύου προέρχεται από τον άνθρακα, οι τοπικές εκπομπές CO₂ θα αυξηθούν με τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Αντίθετα, εάν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) τότε τα οφέλη όσον αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι τεράστια.

7. Υψηλές δαπάνες κατασκευής, με αποτέλεσμα να έχουν υψηλή τιμή πώλησης και να μην είναι οικονομικά ανταγωνιστικά

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Συστήματα μετάδοσης υβριδικών οχημάτων και τα μέρη που τα απαρτίζουν

2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Με τον όρο “υβριδικό όχημα” κατά κανόνα γίνεται αναφορά σε συστήματα που συνδυάζουν για την λειτουργία τους έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης με ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά μοτέρ. Ένα υβριδικό όχημα μπορεί να αξιοποιεί για την κίνηση του παραπάνω από μία πηγές ενέργειας. Η τροφοδοσία αυτών των πηγών γίνεται με διαφορετικές επιλογές αποθήκευσης. Στο παρόν κεφάλαιο για την καλύτερη κατανόηση των υβριδικών οχημάτων και κατ’έκταση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα γίνει περιγραφή των ηλεκτρομηχανολογικών τμημάτων και συστημάτων που τα διέπουν.

2.2 Ανάλυση συστημάτων ισχύος

Για την δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος μετάδοσης ισχύος απαιτείται ο συνδυασμός από ένα συμβατικό όχημα με έναν ηλεκτροκινητήρα, μία γεννήτρια, μετασχηματιστή τάσης και η χρήση συσσωρευτών. Ο συνδυασμός αυτός έχει ως σκοπό την αποσύνδεση της διαδικασίας μετατροπής ενέργειας από τον κύκλο με τον οποίο λειτουργεί το συμβατικό όχημα με αποτέλεσμα ο κινητήρας να λειτουργεί σε βέλτιστη απόδοση, σε μεγάλη έκταση της διάρκειας ζωής του και να καταπονείται από μικρότερες εξωτερικές επιδράσεις. Ένα παράδειγμα εξωτερικών επιδράσεων είναι οι συνθήκες του οδοστρώματος, μειώνοντας έτσι σημαντικά την κατανάλωση. Για την μεγιστοποίηση αυτών των οφελών απαιτείται κατάλληλος συντονισμός των στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα μετάδοσης ισχύος .

Ανάλογα με την συνδεσμολογία τους τα υβριδικά συστήματα κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριους τύπους, τα σειριακά, τα παράλληλα και τα μικτά.[4-8]

2.2.1 Σειριακή σύνδεση

Για την σειριακή διάταξη των υβριδικών εξαρτημάτων απαιτούνται ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης και δύο ηλεκτρικά μοτέρ . Το ένα μοτέρ χρησιμοποιείται για την κίνηση του οχήματος ενώ το άλλο είναι παραγωγικό. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης η δεν συνδέεται άμεσα με την κίνηση του οχήματος αλλά σκοπός του είναι να φορτίζει τις μπαταρίες με τη βοήθεια ενός εναλλακτή ή συνδέεται και παρέχει την ενέργεια που χρειάζεται το ηλεκτρικό μοτέρ. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ηλεκτρικό μοτέρ να μεταδίδει όλη την απαιτούμενη ισχύς για την περιστροφή του άξονα κίνησης δίνοντας έτσι την δυνατότητα χρήσης κινητήρα μικρότερου μεγέθους σε ένα σειριακό σειριακό σύστημα μετάδοσης αφού οδηγικές απαιτήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει είναι μικρές. Αποσυνδέοντας τον κινητήρα από το κιβώτιο ταχυτήτων δίνετε η δυνατότητα λειτουργείας σε βέλτιστες στροφές με αποτέλεσμα να αυξάνετε η απόδοση (μειώνοντας τη κατανάλωση καυσίμων) ή μπορεί να τεθεί ακόμη και εκτός λειτουργίας για εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό το σύστημα χρειάζεται μπαταρίες μεγάλης ισχύος ώστε να καλύπτονται οι οδηγικές ανάγκες.

2.2.2 Παράλληλη σύνδεση

Σε ένα υβριδικό με παράλληλη διάταξη γίνεται χρήση του κινητήρα εσωτερικής καύσης και του ηλεκτρικού μοτέρ με τέτοιον τρόπο ώστε να υπάρχει βέλτιστη απόδοση, η διάταξη δεν είναι διαχωρισμένη και οι κινητήρες μπορεί να λειτουργούν και ταυτόχρονα. Στη πιο συνηθισμένη μορφή ο κινητήρας και το ηλεκτρικό μοτέρ και το κιβώτιο ταχυτήτων συμπλέκονται με τη χρήση από κατάλληλους συμπλέκτες. Όταν το όχημα λειτουργεί με ηλεκτρική κίνηση ο συμπλέκτης ανάμεσα στον κινητήρα είναι μη συμπλεγμένος, ενώ αντίθετα ο συμπλέκτης προς το κιβώτιο ταχυτήτων είναι συμπλεγμένος. Επίσης όταν το όχημα λειτουργεί με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης, οι στροφές του κινητήρα και του μοτέρ είναι ίδιες.

Τοποθετείται ηλεκτρικός κινητήρας που έχει το ελάχιστο μέγεθος που απαιτείται για την κίνηση του αυτοκινήτου, με πολύ μικρή ταχύτητα μέσα στην πόλη. Ενώ ο εμβολοφόρος κινητήρας διαθέτει το ελάχιστο μέγεθος που απαιτείται ώστε να μπορεί να αποδώσει σε ποιο απαιτητικές καταστάσεις όταν το αυτοκίνητο χρειάζεται μέγιστη ισχύ για αύξηση της ταχύτητα; σε οριζόντιο επίπεδο. Επιπλέον κομμάτι της ισχύος της μηχανής εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται για την επαναφόρτιση των συσσωρευτών.

Η παραπάνω συνδεσμολογία μπορεί να εφαρμοστεί με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα ένας τρόπος είναι το ηλεκτρικό μοτέρ να συνδεθεί απευθείας με τη χρήση φλάντζας πάνω στον στροφαλοφόρο άξονα (στροφαλοφόρος – μίζα – εναλλακτήρας) ή να συνδεθεί στον κινητήρα εσωτερικής καύσης χρησιμοποιώντας έναν ιμάντα για την κίνηση. Βασικό χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι οι δύο τρόποι μετάδοσης κίνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα ή μεμονωμένα. Όμως καθώς το σύστημα διαθέτει μόνο ένα ηλεκτρικό μοτέρ, όσο φορτίζεται η μπαταρία το όχημα δεν μπορεί να κινηθεί ηλεκτρικά.

Τέλος ένας τρόπος για να αποφευχθούν οι απώλειες της αποδοτικότητας του κιβώτιου ταχυτήτων είναι η τοποθέτηση του ηλεκτρικού μοτέρ στην πλευρά που λαμβάνεται η κίνηση, δηλαδή πίσω από το κιβώτιο ταχυτήτων.

2.2.3 Ήπια παράλληλο υβριδικό

Σε αυτή τη διάταξη εφαρμόζεται ένα συμπαγές ηλεκτρικό μοτέρ με σκοπό την εξασφάλιση χαρακτηριστικών συστήματος αυτόματου σταματήματος και εκκίνησης, επιπλέον παρέχει βοηθητική ισχύ στην επιτάχυνση του οχήματος καθώς και αναγεννητική πέδηση για την φόρτιση των συσσωρευτών.

2.2.4 Σε σειρά παράλληλα

Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως «υβριδικό διαχωρισμού ισχύος» και συνδυάζει τις αρχές που αναφέρθηκαν παραπάνω με σκοπό να αξιοποιήσει τα θετικά που προσφέρουν και τα δύο συστήματα. Πρόκειται για μία περίπλοκη συνδεσμολογία υβριδικής μετάδοσης κίνησης. Σε αυτό το τύπο μετάδοσης κίνησης υπάρχουν δύο κινητήρες στο όχημα: ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης και ένα ηλεκτρικό μοτέρ. Με τη χρήση από ένα απλό σετ πλανητικών γραναζιών γίνεται διαχωρισμός της ισχύς που προσφέρουν οι δύο κινητήρες, για τη κίνηση των τροχών μέσω του διαχωριστή ισχύος. Το ποσοστό λειτουργίας των δύο κινητήρων μπορεί να ρυθμιστεί από 0% έως 100% ή και να λειτουργούν συμπληρωματικά όπως για παράδειγμα με 70% χρήση του κινητήρα καύσης και 30% χρήση του μοτέρ. Επίσης το ηλεκτρικό μοτέρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια για να φορτίσει τους συσσωρευτές. Για κίνηση σε ανοιχτό δρόμο πρωτεύουσα πηγή που δίνει ισχύ στο αυτοκίνητο είναι ο κινητήρας εσωτερικής καύσης. Ενώ σε απαιτητικές καταστάσεις και για

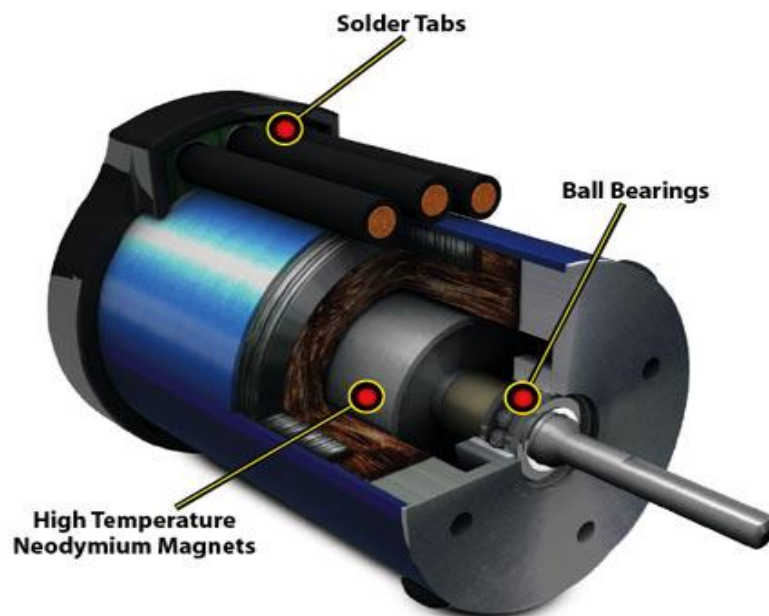
χρήση μέγιστης ισχύς, για παράδειγμα σε μία προσπάθεια, το ηλεκτρικό μοτέρ μεγιστοποιεί τη διαθέσιμη ισχύ για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Για να μειώσει τις εκπομπές των ρύπων ο κινητήρας σβήνει όταν το αυτοκίνητο είναι σταματημένο. Επομένως έχοντας αναλύσει τα συστήματα μετάδοσης ισχύος αναλύονται στη συνέχεια τα πιο βασικά επιμέρους τμήματα.

2.3 Ηλεκτρικός κινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί ίσως το πλέον σημαντικό τμήμα ενός ηλεκτρικού οχήματος. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα διάφορα οχήματα θα πρέπει να ικανοποιούν κάποιες απαιτήσεις ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες οδήγησης των καταναλωτών και ταυτόχρονα να είναι οικονομικά ανταγωνιστικά. Στην παρούσα διατριβή αλλά και γενικά στη βιομηχανία των ηλεκτροκίνητων οχημάτων δύο τύποι κινητήρων είναι αυτοί που είναι επικρατέστεροι τα τελευταία χρόνια, οι Συνεχούς Ρεύματος Brushless (ή μόνιμου μαγνήτη) και οι Ασύγχρονοι (ή Επαγωγικοί) Κινητήρες, με τον πρώτο να είναι δημοφιλέστερος.[3]

2.3.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος Brushless

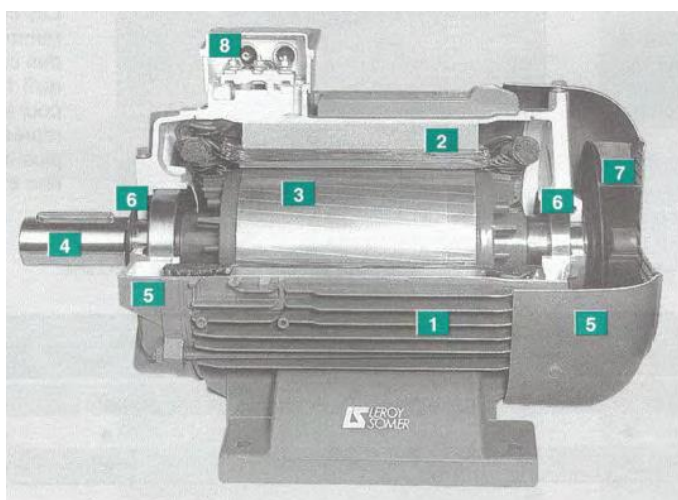
Ο ηλεκτρικοί κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες επίσης γνωστοί ως κινητήρες ηλεκτρονικής μετακίνησης ή σύγχρονοι κινητήρες DC, είναι σύγχρονοι κινητήρες οι οποίοι τροφοδοτούνται από ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς ρεύματος (DC) μέσω μετατροπέα ή τροφοδοσίας εναλλαγής που παράγει ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) για την κίνηση κάθε φάσης του κινητήρα μέσω ελεγκτή κλειστού βρόχου. Ο χαρακτηρισμός σύγχρονος κινητήρας αποδίδεται με την έννοια ότι ο δρομέας ο οποίος αποτελείται από δύο ή περισσότερους μαγνήτες περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με αυτή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του διακένου. Το κυριότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι DC Brushless κινητήρες είναι η δυνατότητα να λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Καταλήγοντας έτσι σε να βασικό πλεονέκτημα ότι το σημείο μέγιστης ενεργειακής απόδοσης για ένα DC Brushless κινητήρα θα είναι μερικές μονάδες επί τοις εκατό υψηλότερος από τον αντίστοιχο ενός επαγωγικού κινητήρα. Τέλος βασικό ελάττωμα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης.



Εικόνα 2.1 « Κινητήρας Brushless » [2]

2.3.2 Ασύγχρονοι (ή Επαγωγικοί) κινητήρες

Ένας επαγωγικός ή σύγχρονος κινητήρας είναι ένας ηλεκτρικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος στον οποίο το ηλεκτρικό ρεύμα στον ρότορα που απαιτείται για την παραγωγή ροπής λαμβάνεται με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή από το μαγνητικό πεδίο της περιέλιξης του στάτη. Επομένως οι κινητήρες αυτοί μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς ηλεκτρικές συνδέσεις με κάποια πηγή. Το στοιχείο που διαφοροποιεί τον επαγωγικό κινητήρα από τον σύγχρονο, δεν αποτελεί η δομή του στάτη αλλά η δομή του δρομέα. Χρησιμοποιούνται δύο τύποι δρομέων, οι δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού και οι δρομείς δακτυλιοφόρου δρομέα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ασύγχρονων κινητήρων είναι η αρχικά η απλούστερη κατασκευή τους και κατά δεύτερον το χαμηλό κόστος κατασκευής τους καθώς και η σχετικά ελάχιστη συντήρηση με συνέπεια να υπερτερούν σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 2.2 «Επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού σε τομή. Στη πιο πάνω εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε κατά σειρά: 1) Πτερύγια ψύξης του στάτη, 2) Ελάσματα και τύλιγμα στάτη, 3) Δρομέας, 4) Άξονας, 5) Κέλυφος, 6) Ρουλεμάν, 7) Ανεμιστήρας και 8) Κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης» [3]

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω αναλύσεις δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα ξεκάθαρο συμπέρασμα για το ποιος από τους δύο κινητήρες πλεονεκτεί. Ο καθηγητής Wally Rippe, πρώην επικεφαλής του τμήματος ηλεκτρονικών ισχύος της εταιρίας Tesla, εκτιμάει ότι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος DC θα εξακολουθούν να υπερτερούν στους τομείς των υβριδικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων, σε αντίθεση με τους ασύγχρονους κινητήρες που θα βρίσκουν καλύτερη εφαρμογή στα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα υψηλών επιδόσεων. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του κάθε κινητήρα επαφίεται ξεκάθαρα στις προτιμήσεις της κάθε κατασκευαστικής αυτοκινητοβιομηχανίας.

2.4 Συσσωρευτές

Μια μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος (EVB) (επίσης γνωστή ως μπαταρία έλξης) είναι μια μπαταρία που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών κινητήρων ενός ηλεκτρικού οχήματος μπαταρίας (BEV) ή ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος (HEV). Αυτές οι μπαταρίες είναι συνήθως επαναφορτιζόμενες (δευτερεύουσες) μπαταρίες και είναι συνήθως μπαταρίες ιόντων λιθίου. Αυτές οι μπαταρίες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για υψηλή χωρητικότητα αμπερ (ή κιλοβατώρες).

Οι μπαταρίες για ηλεκτρικά οχήματα χαρακτηρίζονται από τη σχετικά υψηλή

αναλογία ισχύος προς βάρος, την ειδική ενέργεια και την ενεργειακή πυκνότητα. Οι μικρότερες, ελαφρύτερες μπαταρίες είναι επιθυμητές επειδή μειώνουν το βάρος του οχήματος και συνεπώς βελτιώνουν την απόδοσή του. Σε σύγκριση με τα υγρά καύσιμα, οι περισσότερες τρέχουσες τεχνολογίες συσσωρευτών έχουν πολύ χαμηλότερη ειδική ενέργεια, και αυτό επηρεάζει συχνά τη μέγιστη ηλεκτρική γκάμα των οχημάτων.

Στα συμβατικά οχήματα χρησιμοποιούνται κυρίως συσσωρευτές μολύβδου-οξέος ενώ στα υβριδικά οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από νικέλιο-καδίμιο (Ni-Cd) είτε από νικέλιο-υβρίδιο (Ni-MH).[4][9]

2.4.1 Μπαταρία μολύβδου-οξέος

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος εφευρέθηκε το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Plante και αποτελεί τον πρώτο τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Παρά το γεγονός ότι έχει πολύ χαμηλή αναλογία ενέργειας προς βάρος και χαμηλή αναλογία ενέργειας προς όγκο, η ικανότητα του να παρέχει ρεύματα υψηλού κύματος σημαίνει ότι τα κύτταρα έχουν σχετικά μεγάλο λόγο ισχύος προς βάρους. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος τους, τα καθιστούν ελκυστικά για χρήση σε συμβατικά οχήματα για να παρέχουν το υψηλό ποσοστό ρεύματος που απαιτείται από τους κινητήρες εκκίνησης. Καθώς είναι πιο οικονομικές σε σύγκριση με συσσωρευτές νεότερων τεχνολογιών, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμη και όταν το ρεύμα



Εικόνα 2.3 «Μπαταρία μολύβδου-οξέος» [2]

2.4.2 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) σε σύγκριση με άλλους τύπους επαναφορτιζόμενων μπαταριών προσφέρουν καλή διάρκεια ζωής διαθέτουν υψηλούς ρυθμούς αυτοεκφόρτισης, επαναφορτίζονται εύκολα και προσφέρουν επιθυμητή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες με δίκαιη χωρητικότητα. Επίσης η διάρκεια φόρτισης τους είναι αρκετά μικρή αλλά το σημαντικότερο τους πλεονέκτημα είναι η ικανότητα τους σε περίπτωση που μείνουν αρκετό χρόνο αφόρτιστες, να ανακτούν πλήρως την χωρητικότητά τους. Ωστόσο, αυτοί οι τύποι συσσωρευτών παρουσιάζουν και μειονεκτήματα με κυριότερα να είναι το ακριβό κόστος τους και η αδυναμία περισυλλογής του τοξικού μετάλλου καδμίου μετά το πέρας της ζωής τους. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα την μόλυνση του περιβάλλοντος.



Εικόνα 2.4 «Μπαταρία νικελίου-καδμίου (Ni-CD)» [2]

2.4.3 Μπαταρίες νικελίου-υβριδίου (Ni-MH)

Οι μπαταρίες νικελίου-υβριδίου μετάλλου (Ni-MH) αποτελούν και αυτές έναν τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας παρόμοιο με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου αλλά η δομή τους αλλάζει ως εξής. Στην άνοδο γίνεται χρήση κράματος απορροφητικού σε υδρογόνο σε αντίθεση με τις νικελίου-καδμίου που χρησιμοποιούν κάδμιο ενώ στην κάθοδο γίνεται χρήση μιας ένωσης από νικέλιο.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτών των συσσωρευτών είναι το χαμηλό κόστος τους σε αντίθεση με άλλες μπαταρίες καθώς και η εκτεταμένη διάρκεια ζωής τους. Ενώ το σημαντικότερο μειονέκτημα τους είναι η αδυναμία απόδοσης σε υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 2.5 «Μπαταρία νικελίου-υβριδίου (Ni-MH)» [6]

2.4.4 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν έναν τύπο επαφορτιζόμενης μπαταρίας όπου τα ιόντα λιθίου μεταφέρονται από το αρνητικό προς το θετικό ηλεκτρόδιο κατά την εκφόρτιση ή την φόρτιση και αποτελούν την βέλτιστη επιλογή για ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους είναι η χωρητικότητα τους και η ασφάλεια τους καθώς περιέχουν θερμοπροστασία ή προστασία σε περίπτωση κάποιου ατυχήματος. Παρόλα αυτά το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό.

2.4.5 Συμπεράσματα

Βασική προϋπόθεση για την επιτυχία των ηλεκτροκίνητων και υβριδικών οχημάτων αποτελεί η χωρητικότητα των ηλεκτρικών μπαταριών καθώς με αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία κίνησης τους και δεν θα απαιτείται η επαναφόρτιση τους σε μικρά χρονικά διαστήματα. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι μπαταρίες λιθίου

είναι η βέλτιστη επιλογή για τα αυτοκίνητα του μέλλοντος καθώς έχουν την μεγαλύτερη χωρητικότητα και η διάρκεια ζωής τους είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την διάρκεια ζωής άλλων μπαταριών. Για τους παραπάνω λόγους οι αυτοκινητοβιομηχανίες σκοπεύουν πρωτίστως στην διασφάλιση της ασφάλειας των μπαταριών και στην σταδιακή μείωση του κόστους.

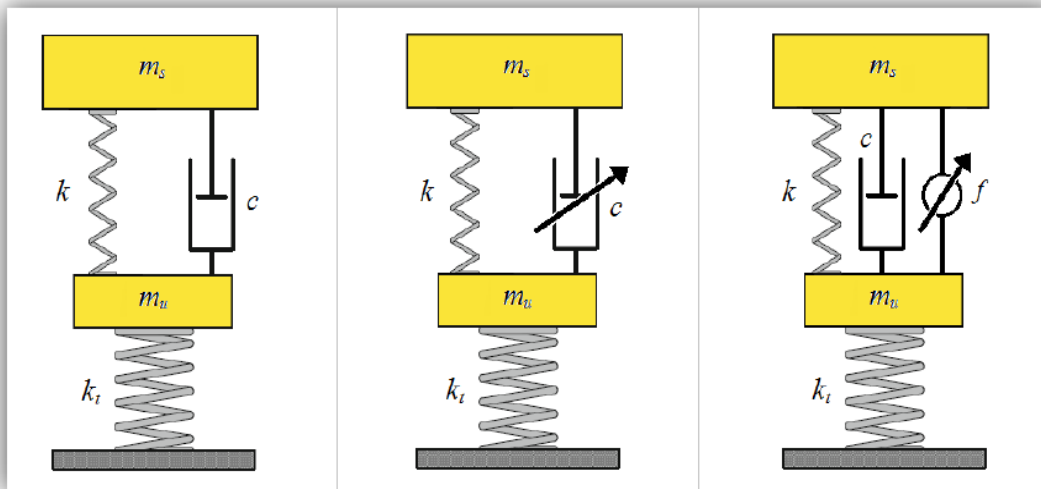
2.5 Μετατροπéας ισχύος

Ένα επιπλέον στοιχείο στην συνδεσμολογία του ηλεκτρικού οχήματος αποτελεί ο ηλεκτρικός μετατροπέας ισχύος, με κύρια λειτουργία αυτού του συστήματος να είναι μετατροπή της συνεχής τάσης των συσσωρευτών στη κατάλληλη μορφή που χρειάζεται ο κινητήρας. Επιπρόσθετα ο μετατροπέας προσφέρει τα κατάλληλα εργαλεία για τον έλεγχο της ροπής και των στροφών του κινητήρα. Ο ηλεκτρικός μετατροπέας που χρησιμοποιείται σε κάθε ηλεκτροκίνητο όχημα συνδέεται άμεσα με τον τύπο του κινητήρα όποτε και εξαρτάται από αυτόν. Οπότε ένα όχημα με κινητήρα συνεχούς ρεύματος χρειάζεται μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC-DC converter). Ένα κλασσικό παράδειγμα DC-DC converter είναι ο μετατροπέας τύπου chopper ο οποίος χρησιμοποιεί το thyristor ως διακοπτικό στοιχείο, το οποίο έχει σχετικά χαμηλή συχνότητα λειτουργίας και ταυτόχρονα διαθέτει βοηθητικό κύκλωμα για τη σβέση του. Κύριο πλεονέκτημα του chopper είναι η ικανότητα του να ελέγχει μεγάλα επίπεδα ισχύος όμως είναι αρκετά ποιο πολύπλοκος. Ενώ ένα όχημα με κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος χρειάζεται μετατροπέα συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τύπου αντιστροφέα (inverter). Οι μετατροπείς αυτοί ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους κλασσικούς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (P.W.M) και τους αντιστροφείς συντονισμού (Resonant). Η επιλογή ενός P.W.M εξαρτάται από την συνδεσμολογία του κυκλώματος, δηλαδή αν χρησιμοποιούνται ως αντιστροφείς τάσης ή για έλεγχο ρεύματος και από την επιθυμητή απόδοση τους, το γενικό σύστημα τους είναι αρκετά περίπλοκο. Τέλος οι αντιστροφείς συντονισμού ενώ έχουν μικρές απώλειες και μεγάλη πυκνότητα ισχύος δεν είναι αρκετά διαδεδομένοι λόγω του μεγάλου κόστους τους και της δυσκολίας ελέγχου της διάταξης τους.[2]

2.6 Αναρτήσεις

Ένα σύστημα ανάρτησης αυτοκινήτων είναι ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα σε ένα όχημα. Σε γενικές γραμμές ένα σύστημα ανάρτησης αποτελείται από τέσσερις αναρτήσεις, όπου μια ανάρτηση είναι εξοπλισμένη σε κάθε τροχή. Οι στόχοι μιας ανάρτησης οχήματος είναι η απομόνωση του οχήματος από εξωτερικές διαταραχές οι οποίες προέρχονται από ανωμαλίες του οδοστρώματος καθώς και η απομόνωση από εσωτερικές διαταραχές που δημιουργούνται από στροφές, επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πιο άνετη οδήγηση και καλύτερος έλεγχος του οχήματος. Επιπλέον να μπορεί να ανταπεξέλθει στο βάρος του αυτοκινήτου καθώς και να αντιδρά σε αλλαγές του φορτίου που δημιουργούνται από αλλαγές στον αριθμό των επιβατών και αποσκευών. Τέλος να μπορεί να διατηρήσει μια σταθερή επαφή με τον δρόμο για να είναι πιο ασφαλής η οδήγηση.[10][11]

Παρακάτω περιγράφονται οι βασικοί τύποι αναρτήσεων ενός αυτοκινήτου, των αναρτήσεων, οι παθητικοί, οι ημι-ενεργοί και οι ενεργοί.



Εικόνα 2.6 « Παθητική, ημι-ενεργή, ενεργή ανάρτηση» [10]

2.6.1 Παθητική ανάρτηση

Η παθητική ανάρτηση αποτελεί ένα συμβατικό σύστημα που εφαρμόζετε ένα όχημα, και αποτελείται από το μη ελεγχόμενο ελατήριο και το αμορτισέρ του αποσβεστήρα. Ο αποσβεστήρας ταλαντώσεων είναι μη ελεγχόμενος και το σύστημα παρουσιάζει προκαθορισμένη συμπεριφορά λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια της κίνησης ο αποσβεστήρας ασκεί δυνάμεις συγκεκριμένου μέτρου που εξαρτώνται αποκλειστικά από την ταχύτητα του. Επίσης ο αποσβεστήρας παρουσιάζει μη γραμμική σχέση χαρακτηριστικής δύναμης-ταχύτητας με τον συντελεστή απόσβεσης να αλλάζει τιμή σε σχέση με αυτή τη χαρακτηριστική.

2.6.2 Ημι-ενεργητική ανάρτηση

Η μηχανική διάταξη μιας ημι-ενεργής ανάρτησης είναι ίδια μ' αυτήν της παθητικής. Ωστόσο ο μερικώς έλεγχος του συντελεστή απόσβεσης επιτυγχάνεται με εναλλαγή των χαρακτηριστικών του αποσβεστήρα ασκώντας έτσι διαφορετικές δυνάμεις στο αμάξωμα επομένως η συμπεριφορά του δεν είναι προκαθορισμένη. Η μετατόπιση που δέχονται οι τροχοί ρυθμίζεται και βελτιώνεται με την λειτουργία ελέγχου του αποσβεστήρα ώστε να παρέχει μεγαλύτερη άνεση και ευστάθεια στο όχημα.

2.6.3 Ενεργητική ανάρτηση

Μια ενεργή ανάρτηση είναι αυτή που περιλαμβάνει έναν ενεργοποιητή με την ικανότητα να παράγει ενεργή δύναμη η οποία ρυθμίζεται από έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τα απαραίτητα δεδομένα από διάφορους αισθητήρες που υπάρχουν στο όχημα. Ο ελεγκτής ρυθμίζεται από κατάλληλο σύστημα ελέγχου ώστε να προσαρμόζεται στις αναγκαίες απαιτήσεις Παράλληλα, προσφέροντας ενεργό έλεγχο, οι ενεργές αναρτήσεις παρέχουν την δυνατότητα να επιτευχθούν πλήρως οι στόχοι των αυτόματων αναρτήσεων. Τέλος, άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι οι ενεργές αναρτήσεις οι οποίες τοποθετούνται σε αυτοκίνητα στην σήμερον ημέρα, βασίζονται σε υδραυλικούς ενεργοποιητές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Γενικά χαρακτηριστικά και περιγραφή ελεγκτών PID

3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Εκτός όμως από τα συστήματα κίνησης και παροχής ενέργειας όλα τα οχήματα διαθέτουν μικρές ή και μεγάλες ηλεκτρομηχανολογικές διατάξεις, όπως σύστημα αντιμπλοκαρίσματος τροχών, σύστημα ελέγχου ευστάθειας και πλοήγησης καθώς και συστήματα ελέγχου ανακραδασμών που σκοπό έχουν την παροχή ασφάλειας και την βελτίωση της οδηγικής εμπειρίας για κάθε οδηγό. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε ένα συστατικό στοιχείο όλων αυτών των μηχανισμών του ελεγκτή PID, οπότε στόχος είναι η ανάλυση και περιγραφή της θεωρίας συστημάτων αυτοματισμού για έλεγχο αναλογικής-ολοκληρωτικής-διαφορικής δράσης γνωστός ως PID έλεγχος (proportional-integral-derivative control). Ένας ελεγκτής που παρά τα εκτεταμένα χρόνια ύπαρξης του ακόμη βρίσκει μεγάλη εφαρμογή λόγω της αξιοπιστίας, της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας του. Κύρια πλεονεκτήματα του είναι η απλότητα στη δομή του, η ευκολία στην κατανόηση, και η μεγάλη του ευελιξία στην υλοποίηση και την εφαρμογή του.

Τα κύρια μέρη που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο είναι[12]:

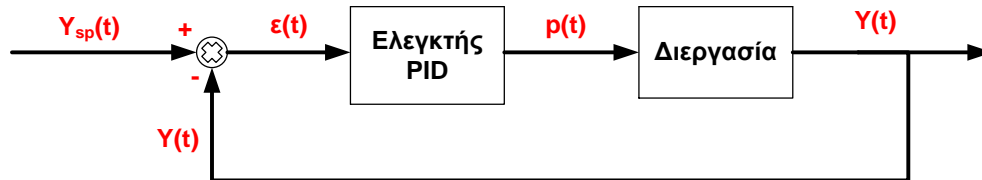
- *Περιγραφή του βασικού αλγορίθμου ελέγχου και ιδιότητες αυτού σε κλειστό βρόχο.*
- *Ανάλυση τεχνικών προσδιορισμού παραμέτρων ελεγκτή (controller tuning).*
- *Υπολογιστική υλοποίηση ελεγκτών PID σε διακριτή μορφή.*
- *Βελτίωση κύριου αλγορίθμου με διάφορες τεχνικές (χρήση φίλτρου, περιορισμών, κ.α.)*

3.2 Αλγόριθμος ελέγχου PID

Σκοπός του ελέγχου είναι η ανάλυση των αρχών σχεδιασμού κατάλληλων μηχανισμών που να επιτρέπουν την αλλαγή και τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς μίας διεργασίας, εξασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια και αποδοτικότητα της συμπεριφοράς της. Ο στόχος ενός

ελεγκτή είναι: α) Η εγγύηση της ευστάθειας ενός συστήματος, β) Η απόσβεση των διαταραχών και ομαλή επαναφορά, γ) παρακολούθηση δυναμικών αλλαγών.

Θεωρώντας αμελητέα δυναμική η ανάδραση των PID ελεγκτών βασίζεται στο σφάλμα(απόκλιση) της ελεγχόμενης μεταβλητής εξόδου, $Y(t)$, από μια επιθυμητή τιμή αναφοράς ($Y_{sp}(t)$, *set-point*) μετά από σύγκριση (εικόνα 3.1) και είσοδο στον ελεγκτή.



Εικόνα 3.1 « Συμβατική ρύθμιση τύπου PID»

Μετρώντας το σφάλμα, $\varepsilon(t)$, ο ελεγκτής δίνει σήμα ενεργοποίησης κάποιας μεταβλητής (π.χ. άνοιγμα ή κλείσιμο βάνας) σύμφωνα με τον εκάστοτε αλγόριθμο ελέγχου, ώστε να μηδενισθεί το σφάλμα και η ελεγχόμενη μεταβλητή να εξισωθεί με το σήμα αναφοράς.

$$\varepsilon(t) = Y_{sp}(t) - Y(t) \quad (3.1)$$

όπου $\varepsilon(t)$ δηλώνεται το σφάλμα εισόδου στον ελεγκτή, $Y(t)$ η μεταβλητή εξόδου (ελεγχόμενη μεταβλητή), $Y_{sp}(t)$ το σταθερό ή χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα αναφοράς.

Η σχέση που συνδέει το σήμα εισόδου στον ελεγκτή τύπου PID 3.1 με το σήμα εξόδου του δίνεται από την παρακάτω σχέση:

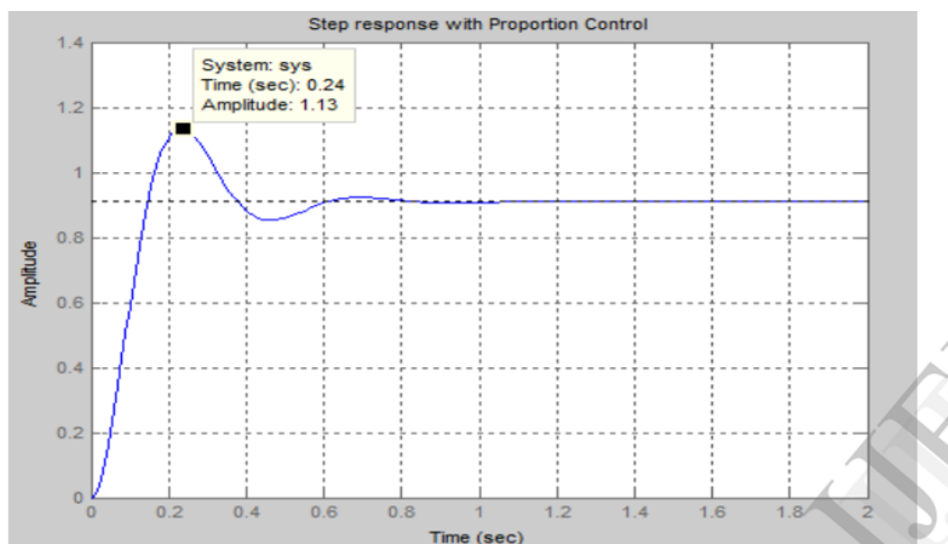
$$p(t) = p_s + K_c \cdot \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int \varepsilon(t) dt + \tau_D \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] \quad (3.2)$$

όπου $p(t)$ το σήμα εξόδου του ελεγκτή, p_s το σήμα εξόδου του ελεγκτή στην αρχική μόνιμη κατάσταση (*bias*) για $\varepsilon(t)=0$, K_c η αναλογική ενίσχυση, τ_I η ολοκληρωτική χρονική σταθερά και τ_D ο χρόνος διαφορικής δράσης.[12]

Με βάση την σχέση 3.2 προκύπτει ότι το σήμα εξόδου του ελεγκτή ή αλλιώς σήμα ελέγχου (στην πράξη πρόκειται για την μεταβλητή χειραγώγησης), αποτελείται από τρεις διακριτούς όρους. Τον αναλογικό όρο P που επιδρά στην τρέχουσα τιμή σφάλματος και είναι ανάλογος του σφάλματος, τον ολοκληρωτικό όρο I που αφορά μία μέση τιμή σφαλμάτων στο παρελθόν και είναι ανάλογος του ολοκληρώματος του σφάλματος και τον διαφορικό όρο D που αποτελεί την πρόβλεψη μελλοντικών σφαλμάτων με αποτέλεσμα να είναι ανάλογος της παραγώγου του σφάλματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις όροι και οι ιδιότητες τους.

3.2.1 Αναλογική δράση

Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η απόκριση της ταχύτητας ενός DC κινητήρα σε μία βηματική μεταβολή με βάση τον αναλογικό έλεγχο σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Παρατηρείται ότι η ελεγχόμενη μεταβλητή αποκλίνει σταθερά από το σήμα αναφοράς το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα της αναλογικής δράσης. Με την αύξηση της τιμής της αναλογικής ενίσχυσης K_c , η απόκλιση θα ξεκινήσει να μικραίνει, και το σύστημα ενώ θα έχει πιο γρήγορη απόκριση, διακινδυνεύεται η μεγάλη συνεισφορά της χειραγωγούμενης μεταβλητής, προκαλώντας πιθανά προβλήματα κορεσμού και η πιθανή εμφάνιση ταλαντώσεων στο σύστημα.[12]



Εικόνα 3.2 «Αναλογικός έλεγχος σε DC κινητήρα» [26]

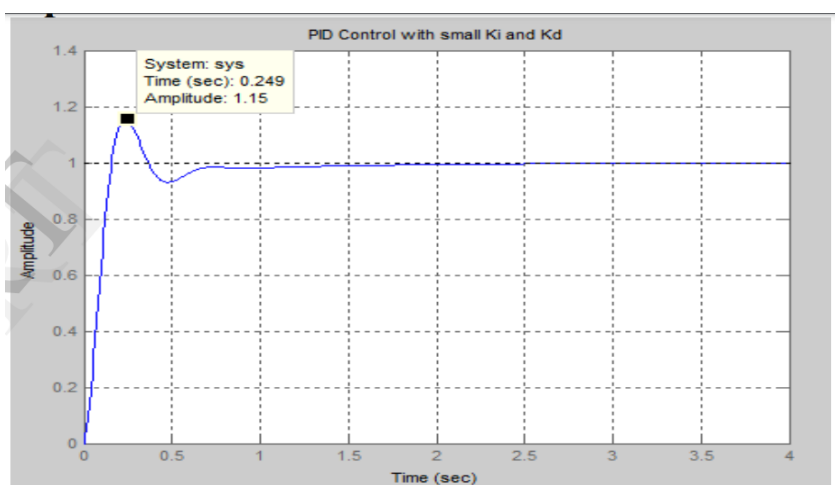
Η αναλογική ενίσχυση του ελεγκτή PID ορίζεται ως το ποσοστό του σήματος εξόδου που μπορεί να ρυθμιστεί ως προς το ποσοστό ρύθμισης από το σήμα εισόδου και είναι συνήθως ένα αδιάστατο μέγεθος.

Στην περίπτωση που ο αναλογικός ελεγκτής είναι αντίστροφης δράσης, δηλαδή η αύξηση του σφάλματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του σήματος ελέγχου τότε ακολουθεί ποσοτικά (με το ίδιο πρόσημο) τις αλλαγές του σφάλματος και άμεσης δράσης όταν μεταβάλλεται με διαφορετικό πρόσημο.

3.2.2 Ολοκληρωτική δράση

Η ολοκληρωτική δράση μηδενίζει πλήρως το σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση. Ο τρόπος λειτουργίας της δράσης αυτής είναι ο εξής: τα παρελθοντικά σφάλματα αθροίζονται μέχρι η ελεγχόμενη μεταβλητή να γίνει ίση με την τιμή του σήματος αναφοράς. Ένας από τους κύριους στόχους είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής t_i , με αποτέλεσμα το ολοκληρωτικό τμήμα να αυξηθεί όσο δυνατόν περισσότερο συμπεριλαμβανομένου και του ολοκληρώματος του σφάλματος. Από εμπειρικές εφαρμογές σε χημικές διεργασίες είναι γνωστό ότι, μικρές τιμές του ολοκληρωτικού όρου να μην δημιουργούν πιο γρήγορες δράσεις αλλά επίσης προκαλούν και ταλαντώσεις στην συμπεριφορά

Στην εικόνα 3.3 απεικονίζεται η απόκριση ταχύτητας ενός DC κινητήρα όταν εφαρμοστεί σε αυτόν αναλογικός-ολοκληρωτικός έλεγχος. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το σφάλμα έχει μηδενιστεί πλήρως όμως ταυτόχρονα υπάρχει μία υπέρβαση πριν την μόνιμη κατάσταση.[12]

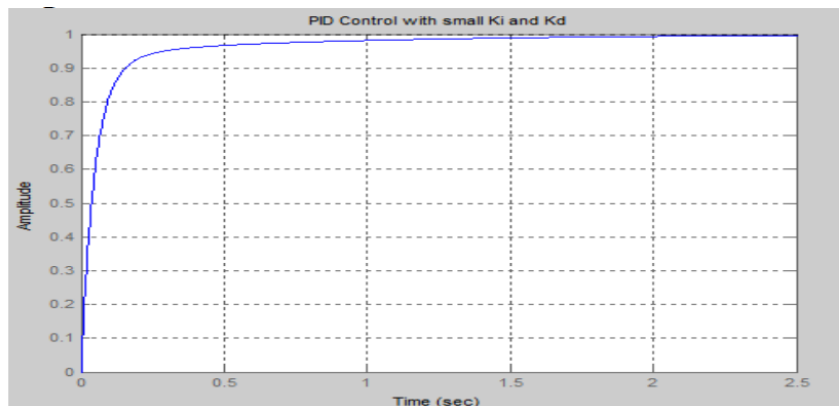


Εικόνα 3.3 « Αναλογικός-Ολοκληρωτικός έλεγχος σε DC κινητήρα» [26]

Ένας συνήθης ορισμός της ολοκληρωτικής χρονικής συμπεριφοράς τι είναι ως χρόνος επαναφοράς, ενώ η αντίστροφη τιμή της ονομάζεται και ταχύτητα επαναφοράς ή επαναλήψεις ανά λεπτό. Σε γενικές γραμμές ισχύει ότι μειώνοντας την ολοκληρωτική σταθερά ή/και αυξάνοντας την αναλογική ενίσχυση δημιουργούνται πιο γρήγορες αποκρίσεις, όμως υπάρχει κίνδυνος το σύστημα να γίνει ασταθές και να δημιουργηθούν συνεχείς ταλαντώσεις. Γι'αυτό ο σωστός προσδιορισμός των παραμέτρων του ελεγκτή είναι πολύ σημαντικός. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η ολοκληρωτική δράση εφαρμόζεται πάντα σε συνδυασμό με την αναλογική δράση καθώς από μόνη της αποδίδει πολύ αργές αποκρίσεις και επίσης αυξάνει την τάξη του συστήματος στο οποίο εφαρμόζεται. [12].

3.2.3 Διαφορική δράση

Η διαφορική ή αλλιώς παραγωγική δράση έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σε σημαντικό βαθμό την ευστάθεια του συστήματος, καθώς ξαφνικές αλλαγές στο σφάλμα γίνονται άμεσα αντιληπτές με αποτέλεσμα να επιδρούν στην χειραγωγούμενη μεταβλητή. Από τη σχέση 3.2 προκύπτει ότι το σήμα ελέγχου είναι ανάλογο της πρόβλεψης του σφάλματος, με ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της διαφορικής δράσης να είναι η ικανότητα της να μειώνει ή και σε μερικές περιπτώσεις να εξαλείφει τυχόν ταλαντώσεις στη συμπεριφορά. Ένα μειονέκτημα όμως της συγκεκριμένης δράσης είναι το γεγονός ότι ο διαφορικός όρος είναι πολύ πιο ευαίσθητος σε τυχόν θορύβους του σήματος αναφοράς ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχουν σφάλματα, ενώ όταν το σφάλμα είναι σταθερό δεν υπάρχει καμία δράση αυτού του όρου. Στην εικόνα 3.4 φαίνεται η απόκριση ενός DC κινητήρα όταν εφαρμοστεί σε αυτόν αναλογική-ολοκληρωτική-διαφορική δράση.[12]



Εικόνα 3.4 « Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός έλεγχος σε DC κινητήρα» [26]

Κύριο πλεονέκτημα της διαφορικής δράσης αποτελεί η ευκολία στην μεταβολή της αναλογικής ενίσχυσης, όπου λόγο του διαφορικού όρου η αύξηση της δεν οδηγεί σε αστάθεια, ενώ θα έχει και ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας απόκρισης. Και αυτή η δράση εφαρμόζεται πάντα σε συνδυασμό με την αναλογική.

3.3 Συντονισμός Παραμέτρων Ελεγκτή

Οπότε για να παρέχει μία ελεγχόμενη ανάρτηση τα επιθυμητά αποτελέσματα απόσβεσης των διαταραχών και ένα σύστημα ελέγχου ευστάθειας να βοηθάει στην διατήρηση της πορείας του αυτοκινήτου κάτω από αντίξοες συνθήκες θα πρέπει ο ελεγκτής PID να έχει βέλτιστη δράση και οι παράμετροι του να λάβουν τις κατάλληλες τιμές. Ο στόχος λοιπόν της διαδικασίας του συντονισμού ή εκτίμησης παραμέτρων ελεγκτή είναι πρώτον να υπάρχουν γρήγορες αποκρίσεις και δεύτερον να υπάρχει ευστάθεια στο σύστημα. Όμως αυτοί οι δύο στόχοι είναι μεταξύ τους ανταγωνιστικοί και έτσι επιζητείται μία μέση λύση.[12].

Στη συνέχεια περιγράφονται τρεις γενικές μεθοδολογίες υπολογισμού των παραμέτρων ενός ελεγκτή. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται α) μέθοδοι που αξιοποιούν την δοκιμή και σφάλμα στις παραμέτρους του ελεγκτή, β) ημιεμπειρικοί μέθοδοι που βασίζονται σε επιτυχημένη πρακτική αλλά με θεωρητική δικαιολόγηση και γ) συστηματικές μέθοδοι που βασίζονται στην ικανοποίηση σχεδιαστικών κριτηρίων. Με τις ποιο διαδεδομένες μεθόδους να είναι η Ziegler-Nichols, η Tyreus-Luyben και η μέθοδος Cohen-Coon [1]. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν την ικανότητα εφαρμογής σε μαθηματικά μοντέλα αλλά και απευθείας σε μία διεργασία.

3.3.1 Ημιεμπειρικές μέθοδοι συντονισμού παραμέτρων ελεγκτή

Οι Ziegler και Nichols στις αρχές του 1940 δημιούργησαν δύο τεχνικές για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός ελεγκτή PID εφαρμόζοντας ένα πολύ απλό δυναμικό πείραμα και στην συνέχεια καταγράφοντας ορισμένα χαρακτηριστικά του συστήματος βάση της απόκρισης του σε μία βηματική μεταβολή [1-3]. Ξεκινώντας με την πρώτη τεχνική, ο ολοκληρωτικός και διαφορικός όρος ορίζονται ως μηδέν και με σταδιακή αύξηση του αναλογικού όρου έως το σύστημα παρουσιάσει ταλαντώσεις σταθερού εύρους με περίοδο T_{cu}

(κρίσιμη ενίσχυση K_{cu}). Χρησιμοποιώντας τις τιμές T_{cu} και K_{cu} προκύπτουν οι τρεις παράμετροι ενός PID ελεγκτή, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα για τρεις περιπτώσεις ελεγκτή.[12]

Ελεγκτής	K	τ_i	τ_D
P	$0.5 \cdot K_c$	-	-
PI	$0.45 \cdot K_c$	$0.85 \cdot P_c$	-
PID/PD	$0.65 \cdot K_c$	$0.5 \cdot P_c$	$0.12 \cdot P_c$

Πίνακας 3.1 «Τιμές παραμέτρων ελεγκτή με βάση την μέθοδο Ziegler Nichols»

Παρατηρώντας τον πίνακα 3.1 γίνεται αντιληπτό ότι οι συντελεστές του ελεγκτή είναι διαφορετικοί στην περίπτωση που εφαρμοστεί έλεγχος P, διαφορετικοί όταν εφαρμοστεί έλεγχος PI και διαφορετικοί όταν εφαρμοστεί έλεγχος PID. Ποιο συγκεκριμένα όταν χρησιμοποιείται PI έλεγχος, η αναλογική σταθερά έχει μικρότερη τιμή από ότι στην περίπτωση της μόνης αναλογικής δράσης, καθώς η ολοκληρωτική δράση εισάγει καθυστέρηση φάσης σε όλες τις συχνότητες. Ομοίως, η παρουσία διαφορικής δράσης εισάγει προπορεία φάσεως με ισχυρά σταθεροποιητική επίδραση στην απόκριση του κλειστού κυκλώματος και έτσι η αναλογική ενίσχυση μπορεί να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές χωρίς κίνδυνο αστάθειας.

Η μέθοδος Tyreus-Luyben δεν διαφέρει πολύ από την μέθοδο Ziegler Nichols με μόνη διαφορά τον διαφορετικό τρόπο προσέγγισης των συντελεστών. Η τιμές αυτής της μεθόδου είναι πιο συντηρητικές και επιλέγονται έτσι ώστε οι αποκρίσεις να ταλαντώνονται λιγότερο και μην είναι ευαίσθητες σε δυναμικές αλλαγές (πίνακας 3.2).[12]

Ελεγκτής	K_c	τ_i	τ_D
PI	$0.31 \cdot K_c$	$2.2 \cdot P_c$	-
PID/PD	$0.45 \cdot K_c$	$2.2 \cdot P_c$	$P_c/6.3$

Πίνακας 3.2 «Τιμές παραμέτρων ελεγκτή με βάση την μέθοδο Tyreus-Lyuben»

Η μέθοδος Cohen-Coon αποτελεί μία γραφική μέθοδο, έχει μικρή ακρίβεια και μεγάλο κίνδυνο σφαλμάτων. Στο σύστημα ανοικτού βρόχου επιβάλλεται μία βηματική διαταραχή μεγέθους A και καταγράφεται η απόκριση του που είναι συνήθως σιγμοειδής. Η απόκριση αυτή μπορεί να μοντελοποιηθεί από σύστημα πρώτης τάξης με νεκρό χρόνο από την εξίσωση:

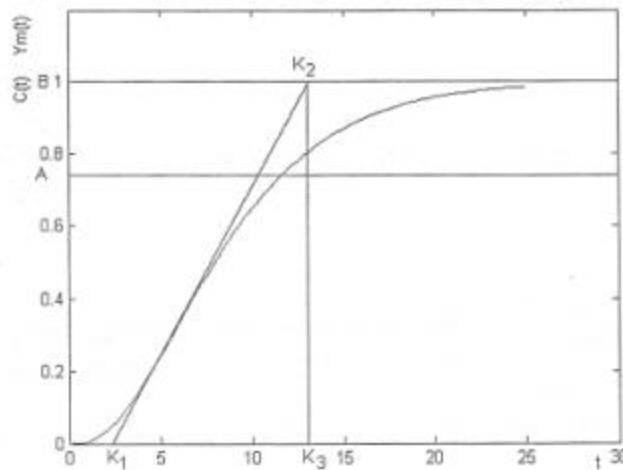
$$P(s) = \frac{K}{1+sT} e^{-s\theta} \quad (3.3)$$

Οι υπολογισμοί των παραμέτρων γίνονται με την εξής διαδικασία: Αρχικά εντοπίζεται το σημείο καμπής της σιγμοειδούς απόκρισης και φέρνοντας εφαπτομένη στο σημείο αυτό υπολογίζεται το σημείο τομής με τον άξονα του χρόνου. Από την τετμημένη του σημείου γίνεται υπολογισμός του νεκρού χρόνου θ . Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την παράλληλη ασύμπτωτη της καμπύλης αντίδρασης όταν ο χρόνος τείνει στο άπειρο, προκύπτει η σταθερά $K=B/A$. Και όπου T προκύπτει από την βάση του ορθογώνιου τριγώνου. Ένα γραφικό παράδειγμα της μεθόδου παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5.

Έχοντας υπολογίσει αυτές τις παραμέτρους και με τη χρήση του πίνακα 3.3 γίνεται προσδιορισμός συντελεστών του ελεγκτή PID .

Ελεγκτής	K_c	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \frac{T}{\theta} [1 + \frac{\theta}{3T}]$	-	-
PI	$\frac{1}{K} \frac{T}{\theta} [0.9 + \frac{\theta}{12T}]$	$\frac{\theta [30 + \frac{3\theta}{T}]}{[9 + \frac{20\theta}{T}]}$	-
PID	$\frac{1}{K} \frac{T}{\theta} [\frac{16T + 3\theta}{12T}]$	$\frac{\theta [32 + \frac{6\theta}{T}]}{[13 + \frac{8\theta}{T}]}$	$\frac{4\theta}{[11 + \frac{2\theta}{T}]}$

Πίνακας 3.3 « Τιμές παραμέτρων ελεγκτή με βάση την μέθοδο Cohen-Coon»



Εικόνα 3.5 «Γραφική και εμπειρική μέθοδος *Cohen-Coon*»

3.3.2 Συστηματικές μέθοδοι προσδιορισμού παραμέτρων ελεγκτή

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν για τον συντονισμό ενός ελεγκτή PID στην προηγούμενη υποενότητα είναι ημι-εμπειρικού χαρακτήρα. Όμως για να επιτευχθεί βέλτιστος σχεδιασμός συνήθως εφαρμόζεται μία διαδικασία δοκιμής και σφάλματος στους επιθυμητούς συντελεστές του ελεγκτή που έχουν είδη προσδιοριστεί με μία από τις προηγούμενες μεθόδους με σκοπό το σύστημα να παρουσιάζει κάποια επιθυμητά κριτήρια.

Τα σχεδιαστικά δυναμικά κριτήρια αφορούν το σύνολο της αποκρίσεις και ονομάζονται ολοκληρωτικά κριτήρια σφάλματος και είναι τα εξής. [12]

Ολοκλήρωμα του τετράγωνου του σφάλματος (Integral of Square Error, ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \quad (3.4)$$

Το παραπάνω ολοκλήρωμα είναι ένα από τα ποιο διαδεδομένα στο χώρο του ελέγχου καθώς οδηγεί σε άμεση επιθετική δράση. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η δράση του σε πολύ μεγάλα σφάλματα όμως δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που υπάρχει μόνιμη απόκλιση.

Ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σφάλματος (Integral of Absolute Error, IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) \vee dt \quad (3.5)$$

Το συγκεκριμένο ολοκλήρωμα τιμωρεί εξίσου μικρά και μεγάλα σφάλματα.

Ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του γινομένου χρόνου-σφάλματος (Integral of Time-Weighted Absolute Error, ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \vee \varepsilon(t) \vee dt \quad (3.6)$$

Σκοπός αυτού του ολοκληρώματος είναι να εξαλείφει σφάλματα τα που επιμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Ο κάθε εμπορικός ελεγκτής διαθέτει πάνω του επιλογή για *on-off* έλεγχο με σκοπό τη διακύμανση της χειριζόμενης μεταβλητής έως το σύστημα να παρουσιάσει σταθερές ταλαντώσεις και να γίνει καταγραφή των κρίσιμων τιμών τους.

3.4 Υπολογιστική Υλοποίηση Ελεγκτή PID

Καθώς οι περισσότεροι ελεγκτές υλοποιούνται σε υπολογιστικά συστήματα, στο παρόν παράρτημα εξετάζεται και αυτή η μέθοδος. Αρχικά γίνονται οι μετρήσεις οι οποίες έχουν αναλογική μορφή και μετά από κατάλληλη μετατροπή σε διακριτή μορφή (δυαδικό, δεκαδικό) στέλνονται σε κάποιον υπολογιστή, εκεί μεταφράζονται από έναν αλγόριθμο ελέγχου στο επιθυμητό σήμα ελέγχου για την μεταβλητή χειραγώγησης. αντίθετα τα διακριτά σήματα του υπολογιστή μεταφράζονται υπό αναλογική μορφή στα αντίστοιχα στοιχεία (π.χ. βάνες, ροόμετρα) για να εκτελεστεί η εντολή ελέγχου. Τονίζεται ότι ο χρόνος δειγματοληψίας θα πρέπει να έχει μικρότερη τιμή από οποιαδήποτε χρονική σταθερά κάθε εργασίας.

Σε διακριτή μορφή ένας ελεγκτής PID περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις.[12]

Positional Form

$$p(t) = p_s + K_c \cdot [\varepsilon(t) + \frac{T_s}{\tau_I} \sum_{i=0}^t \varepsilon(i) + \tau_D \cdot \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1)}{T_s}] \quad (3.7)$$

Velocity Form

$$p(t) = p(t-1) + K_c \cdot [\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1)] + \frac{K_c T_s}{\tau_I} \varepsilon(t) + \frac{K_c T_d}{T_s} [\varepsilon(t) - 2\varepsilon(t-1) + \varepsilon(t-2)] \quad (3.8)$$

όπου T_s ο χρόνος δειγματοληψίας σε sec.

Από μία τιμή αναφοράς η εξίσωση 3.7 υπολογίζει το σήμα ελέγχου, ενώ η εξίσωση 3.8 με χρήση της προηγούμενης τιμής υπολογίζει το αντίστοιχο σήμα.

3.5 Βελτιώσεις Κύριου Αλγορίθμου PID

Ένα βασικό πρόβλημα στη διαφορική δράση είναι ότι σήματα σε πολύ υψηλές συχνότητες αναγκάζουν την παράμετρο τ_A να λάβει πολύ υψηλές τιμές.

. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις από θόρυβο με υψηλές συχνότητες να προκαλούν μεγάλες παρεκκλίσεις στο σήμα ελέγχου. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα ο διαφορικός όρος συνήθως μεταβάλλεται με χρήση ενός φίλτρου t_F πρώτης τάξης. Αυτή η χρονική σταθερά έχει ως στόχο την σταθεροποίηση του συστήματος ελέγχου. Τα φίλτρα βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στον γραμμικό έλεγχο.

$$p(s) = K_c \cdot [\varepsilon(s) + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \cdot \frac{1}{t_F s + 1}] \quad (3.9)$$

3.5.1 Χρήση βάρους στο σήμα αναφοράς

Σε πολλά πρακτικά προβλήματα κατά την προσομοίωση, παρατηρείται μία πολύ μεγάλη κορυφή στο σήμα ελέγχου εξαιτίας της παραγώγου του σφάλματος. Οπότε η σχέση 3.2 γίνεται:

$$p(t) = K_c (\beta \cdot y_{sp}(t) - y(t)) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^{\infty} (y_{sp}(t) - y(t)) dt + K_c \cdot \tau_D (\gamma \frac{dy_{sp}(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt}) \quad (3.10)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Βέλτιστος σχεδιασμός ελεγκτή PID για έλεγχο ταχύτητας ενός DC κινητήρα

4.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

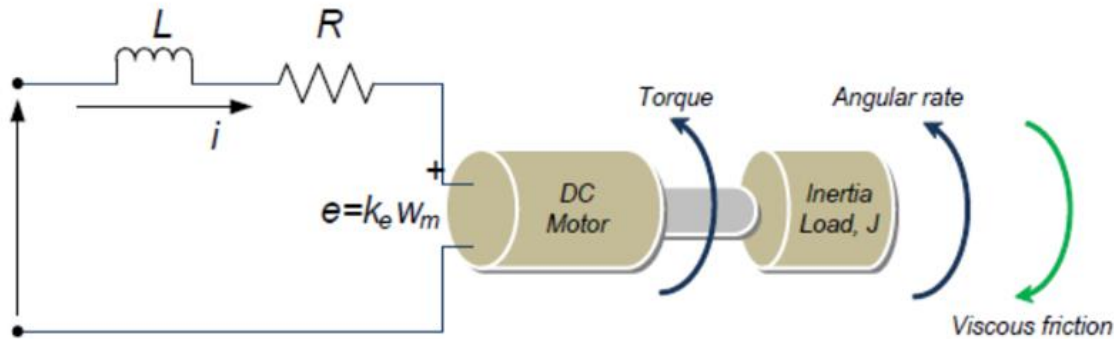
Στη σημερινή εποχή οι σύγχρονες αυτοκινητοβιομηχανίες προσπαθούν με κάθε τρόπο να αυτοματοποιήσουν τόσο την διαδικασία παραγωγής τους όσο και της συσκευές στις οποίες αυτό είναι εφικτό καθώς έτσι επιτυγχάνουν την βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων τους, γίνονται πιο παραγωγικές και μειώνουν το κόστος των παραγωγής. Επιπροσθέτως στην σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία μία από τις ποιο διαδεδομένες εφαρμογές αυτοματισμού υλοποιείται στους *ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors)*. Οι κινητήρες αυτοί λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας τους και της αποδοτικότητας τους βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς.

Οι συμβατικές μέθοδοι για tuning των ελεγκτών PID που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 δεν δίνονται να ανταποκρίνονται σε πολύπλοκα μοντέλα και συστήματα, για τον λόγο αυτό στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εξέταση σύγχρονων μεθόδων tuning βασισμένες στον κλάδο της Τεχνητής Νοημοσύνης, παρουσιάζοντας έτσι επιπλέον εργαλεία και επιλογές αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων. Οπότε στη συνέχεια αυτής της ενότητας θα γίνει παρουσίαση και μαθηματική ανάλυση ενός DC κινητήρα με απώτερο σκοπό την εφαρμογή αυτών των μεθόδων για την ρύθμιση της ταχύτητας του. Ονομαστικά οι μέθοδοι αυτοί είναι:

- Αλγόριθμος αναζήτησης Κούκου (Cuckoo Search Algorithm)
- Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)
- Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm)

4.2 Μαθηματικό μοντέλο ενός DC κινητήρα

Ένας τυπικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος μπορεί να περιγράψει με το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 «Ηλεκτρικό κύκλωμα DC κινητήρα» [17]

Το παραπάνω κύκλωμα είναι απλό τόσο στη δομή όσο και στην ανάλυση του. Τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία που το διέπουν είναι μία τάση εισόδου V_a , ϵ =ένα πηνίο αυτεπαγωγής L_a που προσομοιάζει την σπειρωτή διάταξη του οπλισμού, σε σειρά με μία αντίσταση R_a και σε σειρά με μία τάση V_c (συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα e και αναφέρεται ως back emf). Η τάση V_c παράγεται λόγω της περιστροφής του οπλισμού γύρο από το μαγνητικό πεδίο και είναι αντίθετη της τάσης περιστροφής του κινητήρα.[27]

Με την χρήση του νόμου τάσεων του Kirchhoff που δηλώνει ότι το άθροισμα των τάσεων σε έναν κλειστό βρόγχο πρέπει να ισούται με μηδέν γίνεται η μαθηματική περιγραφή του κυκλώματος.

$$V_a - V_{Ra} - V_c = 0 \quad (4.1)$$

Από τον νόμο του Ohm η τάση γύρο από την αντίσταση είναι:

$$V_{Ra} = i_a \cdot R_a \quad (4.2)$$

όπου i_a το ρεύμα στον οπλισμό και η τάση στο πηνίο είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος στον χρόνο. Για αυτεπαγωγή L_a :

$$V_{La} = L_a \frac{di_a}{dt} \quad (4.3)$$

Τέλος η τάση back emf δίνεται από τον εξής τύπο:

$$V_c = k_v \cdot \omega_a \quad (4.4)$$

Όπου k_v μία σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα και ω_a η περιστροφική ταχύτητα του οπλισμού. Αντικαθιστώντας τις 4.2, 4.3 και 4.4 στη 4.1 προκύπτει:

$$V_a - i_a \cdot R_a - L_a \frac{di_a}{dt} - k_v \cdot \omega_a = 0 \quad (4.5)$$

Το άθροισμα των ροπών του κινητήρα πρέπει να ίσο με μηδέν, επομένως.

$$T_e - T_{\omega'} - T_{\omega} - T_L = 0 \quad (4.6)$$

Όπου T_e η ηλεκτρομαγνητική ροπή, $T_{\omega'}$ η ροπή λόγω της περιστροφικής επιτάχυνσης του κινητήρα, T_{ω} η ροπή που παράγεται από την ταχύτητα του κινητήρα, και T_L η ροπή του μηχανικού φορτίου. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει τον οπλισμό και μπορεί να γραφτεί:

$$T_e = k_t \cdot i_a \quad (4.7)$$

Όπου k_t είναι μία σταθερά ροπής και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα. Το $T_{\omega'}$ μπορεί να γραφτεί στην μορφή:

$$T_{\omega'} = J \frac{d\omega_a}{dt} \quad (4.8)$$

Με J συμβολίζεται ο συντελεστής ροπής αδράνειας του κινητήρα και το αντίστοιχο μηχανικό φορτίο. Η ροπή που εξαρτάται από την ταχύτητα είναι:

$$T_{\omega} = B \cdot \omega_a \quad (4.9)$$

Όπου B ο συντελεστής απόσβεσης του περιστροφικού συστήματος της μηχανής. Αντικαθιστώντας τις (4.7), (4.8) και (4.9) στη (4.6) προκύπτει:

$$k_t \cdot i_a - J \frac{d\omega_a}{dt} - B \cdot \omega_a - T_L = 0 \quad (4.10)$$

Οι διαφορικές εξισώσεις 4.5 και 4.10 μπορούν να γραφούν στη μορφή:

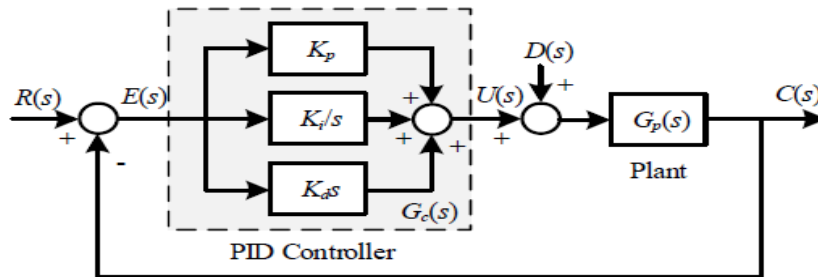
$$\frac{di_a}{dt} = \frac{-R_a}{L_a} \cdot i_a - \frac{k_v}{L_a} \cdot \omega_a - \frac{V_a}{L_a} \quad (4.11)$$

$$\frac{d\omega_a}{dt} = \frac{k_t}{J} \cdot i_a - \frac{B}{J} \cdot \omega_a - \frac{T_L}{J} \quad (4.12)$$

Και περιγράφουν το σύστημα του DC κινητήρα. Τέλος εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace στις εξισώσεις 4.11 και 4.12 θεωρώντας το ρεύμα στο πεδίο σταθερό, και το φορτίο $T_L=0$ προκύπτει η εξής συνάρτηση μεταφοράς εισόδου V εξόδου W .

$$\frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{JL_a s^2 + (BL_a + JR_a)s + (BR_a + K_t K_v)} \quad (4.13)$$

Η παραπάνω συνάρτηση αποτελεί την μορφή της συνάρτησης μεταφοράς της διεργασίας που θα αναλυθεί στην συνέχεια υπό μορφή ελεγκτών. Ένα γενικό δομικό διάγραμμα που περιγράφει τον έλεγχο ανατροφοδότησης με ελεγκτή PID $G_c(s)$, διαταραχή $D(s)$ συνάρτηση μεταφοράς (σχέση 4.13) $G(s)$ που θα χρησιμοποιηθεί εκτενώς στις εφαρμογές εικόνα 4.2.



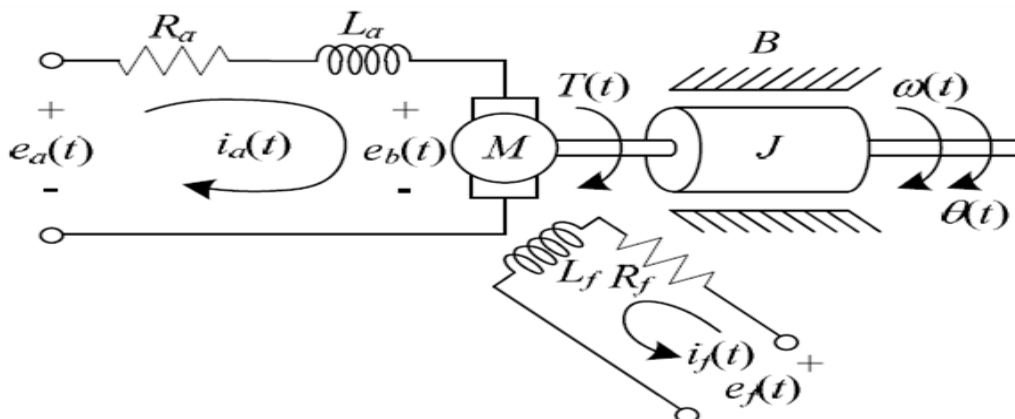
Εικόνα 4.2 «Δομικό διάγραμμα ελέγχου ανατροφοδότησης» [13]

4.3 Μέθοδος βελτιστοποίησης Cuckoo Search (CS)

Σύμφωνα με την αναφορά [13] έγινε εξέταση και σύγκριση μίας από τις πιο αποδοτικές μεθευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης, την Cuckoo Search (CS), με σκοπό την βέλτιστη σχεδίαση ενός PID ελεγκτή για τον έλεγχο ταχύτητας ενός κινητήρα DC. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε έναν κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη ενός ενισχυτή ρεύματος και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με μία δεύτερη μέθοδο, την Ziegler-Nichols (Z-N). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο κινητήρας, το μαθηματικό πρόβλημα, λίγα λόγια για την μέθοδο CS, τα αποτελέσματα και η σύγκριση τους [13].

4.3.1 Μοντέλο κινητήρα

Όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης, μία συσκευή που οι μηχανικοί έχουν αναλύσει πλήρως. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα για την μοντελοποίηση του παρουσιάζεται στην εικόνα .



Εικόνα 4.3 «Ηλεκτρικό κύκλωμα DC κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης [13]

Όπου $e_a(t)$ και $e_f(t)$ η τάση του οπλισμού και η τάση του πεδίου αντίστοιχα, R_a η αντίσταση του οπλισμού, R_f η αντίσταση του πεδίου, L_a η αυτεπαγωγή του οπλισμού, L_f η αντίσταση του πεδίου, $i_a(t)$ το ρεύμα στον οπλισμό και $i_f(t)$ το ρεύμα στο πεδίο, $e_b(t)$ η back-emf τάση, $T(t)$ η ροπή, J η ροπή αδράνειας, B ο συντελεστής απόσβεσης, $\omega(t)$ η γωνιακή ταχύτητα, Και $\theta(t)$ η θέση του κινητήρα.

Μοντέλο όμοιο με αυτό που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2 Άρα ο μετασχηματισμός laplace θα είναι αντίστοιχα:

$$\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{JL_a s^2 + (BL_a + JR_a)s + (BR_a + K_t K_b)} \quad (4.13)$$

Για την καλύτερη προσομοίωση του μοντέλου σε πραγματικές εφαρμογές προστέθηκε ένας ενισχυτής ισχύος με τη μορφή φίλτρου πρώτης τάξης:

$$\frac{E_a}{V_{in}(s)} = \frac{K_A}{(\tau_A s + 1)} \quad (4.14)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος πλέον περιγράφεται από την:

$$\frac{\Omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_A K_t}{(\tau_A s + 1) \cdot [JL_a s^2 + (BL_a + JR_a)s + (BR_a + K_t K_b)]} \quad (4.15)$$

Τέλος τα χαρακτηριστικά του DC κινητήρα (τύπου LEYBOLD-DIDACTIC GMBH, Type 731-91, 0.3 kW, 220 V, 2.2 A, 2000 rpm) για λειτουργία στα 1000 rpm παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.15 προκύπτει η 4.16.

Παράμετροι	Τιμές
R _a (Ω)	54.7280
L _a (H)	1.5104
J (kgm ²)	36.4277
B(Nms/rad)	0.0988
K _t (Nm/A)	2.7761
K _b (V/rpm)	1.046
K _A	3.4449
τ _A (sec)	0.3350

Πίνακας 4.1 «Χαρακτηριστικά του DC κινητήρα» [13]

$$G_p = \frac{9.563}{18.43s^3 + 722.9s^2 + 1997s + 9.862} \quad (4.16)$$

4.3.2 Έλεγχος ανατροφοδότησης και σχεδίαση βέλτιστου ελεγκτή

Στη εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα για το σύστημα ελέγχου του κινητήρα με ανατροφοδότηση. Όπου $G_p(s)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας και $G_c(s)$ ο ελεγκτής PID. Ο ελεγκτής λαμβάνει το σφάλμα $E(s)$ και παράγει σήμα ελέγχου $U(s)$ με σκοπό τον έλεγχο της εξόδου $C(s)$ και την εξάλειψη της διαταραχής $D(s)$. Η συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού βρόγχου παραθέτεται στην εξίσωση 4.17.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)} \quad (4.17)$$

Στόχος λοιπόν όπως σε κάθε πρόβλημα ελέγχου με PID ελεγκτή είναι ο υπολογισμός του αναλογικού κέρδους K_p , του ολοκληρωτικού κέρδους K_i και του διαφορικού κέρδους K_d του ελεγκτή ώστε να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα, η διόρθωση του σφάλματος μεταξύ της εξόδου και του επιθυμητού σημείου λειτουργίας και η αντιμετώπιση των διαταραχών. Δομίζοντας το σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης με κατάλληλους περιορισμούς έγινε χρήση του αλγόριθμου Cuckoo Search.

$$\text{Min}_{f_{obj}}(K_p, K_i, K_d) = \sum_{i=1}^N [r(i) - c(i)]^2 \quad (4.18)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} t_r &\leq 0.2 \text{sec} \\ M_p &\leq 10\% \\ t_s &\leq 0.5\% \\ e_{ss} &\leq 0.1\% \\ t_{reg} &\leq 0.5 \text{sec} \\ M_{p-reg} &\leq 20\% \\ 0 &\leq K_p \leq 10, \\ 0 &\leq K_i \leq 0.1 \\ 0 &\leq K_d \leq 4.0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Επομένως σκοπός πλέον είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης f_{obj} , που δηλώνει το αθροιστικό-τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στην είσοδο $R(s)$ και την έξοδο $C(s)$,

υπό τους περιορισμούς (4.19). Οι περιορισμοί ορίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν και τους δύο στόχους ενός ελεγκτή. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος ανύψωσης (t_r), η μέγιστη ποσοστιαία υπερύψωση (M_p), ο χρόνος αποκατάστασης (t_s) και το σφάλμα σταθερής κατάστασης εξασφαλίζουν τον έλεγχο της εξόδου(tracking). Ενώ ο χρόνος (t_{reg}) και η μέγιστη ποσοστιαία υπερύψωση του (M_{p-reg}) εξασφαλίζουν την απόσβεση των διαταραχών. Η αντικειμενική συνάρτηση τροφοδοτείται συνεχώς στον κώδικα CS έως ότου να ελαχιστοποιηθεί και να υπολογιστούν οι παράμετροι του ελεγκτή PID.[13]

4.3.3 Αλγόριθμος Cuckoo Search (CS)

Το 2009, οι Yang και Deb πρότειναν την μέθοδο Cuckoo Search (CS) ως μία από της ποιο αποδοτικές πληθυσμιακές μεθευρετικές τεχνικές βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος είναι εμπνευσμένος από την παρασιτική συμπεριφορά που εμφανίζεται στην διαδικασία αναπαραγωγής ορισμένων ειδών κούκου τα οποία τοποθετούν τα αυγά τους σε φωλιές άλλων πουλιών. Κάθε κούκος τοποθετεί ένα αυγό την φορά σε μία τυχαία φωλιά. Οι φωλιές με τα καλύτερα αυγά(λύσεις) θα μεταφερθούν στην επόμενη γενιά. Ο διαθέσιμος αριθμός φωλιών είναι προκαθορισμένος και ο ξενιστής μπορεί να ανακαλύψει το αυγό με πιθανότητα $p_a \in [0, 1]$. Νέες λύσεις $x^{(i+1)}$ για έναν κούκο i παράγονται από την παρακάτω εξίσωση[13-15].

$$x_i^{(i+1)} = x_i^{(i)} + \alpha \oplus Levy(\lambda) \quad (1 < \lambda \leq 3) \quad (4.20)$$

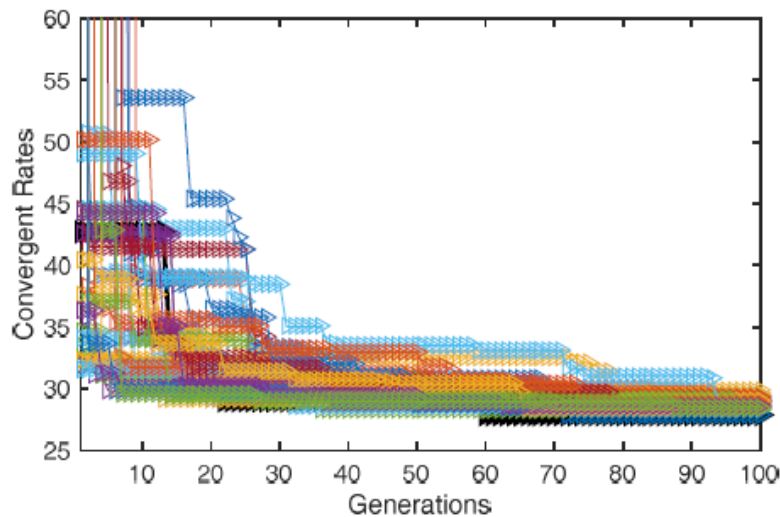
Η (4.20) είναι μία στοχαστική εξίσωση για τυχαίο περίπατο στην οποία το μήκος ενός βήματος προκύπτει από την κατανομή Levy και όπου α μία σταθερά. Από την έρευνα τους οι Yang και Deb πρότειναν για τους χρήστες τις εξής παραμέτρους αναζήτησης για τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης. Αριθμός φωλιών $n=15$ έως 50, $\alpha=1.0$ και πιθανότητα $p_a=0.25$ έως 0.5. Τα βήματα του αλγόριθμου είναι:

1. Ορισμός της αντικειμενικής f_{obj} (4.18) υπό τους περιορισμούς (4.19) με οριοθέτηση των συντελεστών K_p , K_i και K_d και των παραμέτρων Max_Gen , Gen και αριθμός φωλιών n . Οι αρχικές τιμές των συντελεστών του ελεγκτή επιλέγονται τυχαία μέσα στα επιτρεπτά όρια.
2. Αν $Gen \leq Max_Gen$, n αριθμός κούκων βρίσκουν τυχαία μία φωλιά και αφήνουν ένα αυγό. Αλλιώς, εκτυπώνετε η βέλτιστη λύση x .

3. Αν m ($m \leq n$) αυγά ανακαλυφθούν από τους ξενιστές. Το πλήθος m των κούκων πρέπει να βρουν τυχαία μια νέα φωλιά.
4. Νέες λύσεις υπολογίζονται σύμφωνα με την (4.20) και αξιολογούνται από την αντικειμενική συνάρτηση (4.18) και τους περιορισμούς (4.19).
5. Αν η αντικειμενική συνάρτηση με τις νέες λύσεις είναι μικρότερη από την αντικειμενική συνάρτηση με τις παλιές λύσεις οι συντελεστές λαμβάνουν τις νέες τιμές αλλιώς οι συντελεστές παραμένουν ίδιοι.
6. $Gen = Gen + 1$ και επανέλαβε από βήμα 2.

4.3.4 Εφαρμογή της μεθόδου CS και Αποτελέσματα

Ο αλγόριθμος CS εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό βέλτιστου ελεγκτή PID για την ταχύτητα ενός DC κινητήρα σε περιβάλλον MATLAB. Οι παράμετροι ορίστηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες ως, $n=20$, $\alpha=1.0$, $p_a=0.3$ και $Max_Gen=100$. Από 100 δοκιμές με διαφορετικές αρχικές λύσεις επιλέγονται οι βέλτιστες (K_p , K_i , K_d). Ο ρυθμός σύγκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης και ο βέλτιστος ελεγκτής που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.



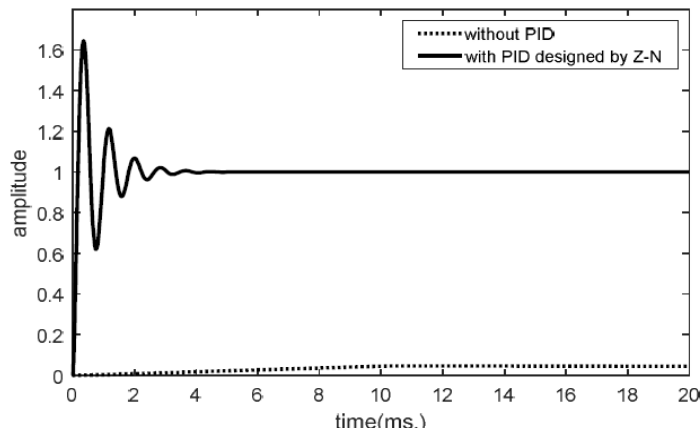
Εικόνα 4.4 «Ρυθμός σύγκλισης αντικειμενικής συνάρτησης» [13]

$$G_c(s)_{CS} = 3.25 + \frac{0.03}{s} + 2.6s \quad (4.21)$$

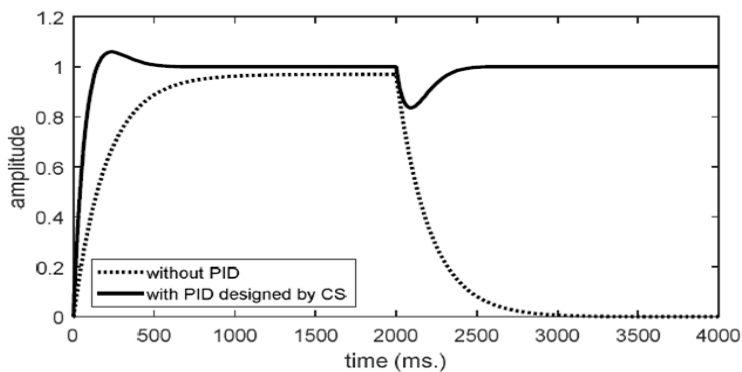
Αυτό το αποτέλεσμα συγκρίθηκε με μία άλλη μέθοδο, την Ziegler-Nichols (Z-N) η οποία μετά την εφαρμογή της καταλήγει στον εξής ελεγκτή PID.

$$G_c(s)_{ZN} = 4,914.53 + \frac{16,284.08}{s} + 371.05s \quad (4.22)$$

Στη συνέχεια με την βοήθεια του λογισμικού της MATLAB έγινε προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος. Τα αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους παρουσιάζονται στις εικόνες 4.5 και 4.6 .



Εικόνα 4.5«Η απόκριση της ταχύτητας με και χωρίς ελεγκτή PID με την μέθοδο Ziegler-Nichols»[13]



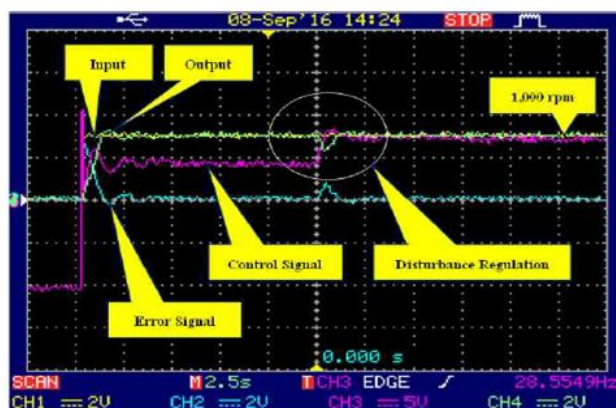
Εικόνα 4.6«Η απόκριση της ταχύτητας με και χωρίς ελεγκτή PID με την μέθοδο CS» [13]

Από το γράφημα της εικόνας 4.5 γίνεται αντιληπτό ότι ο ελεγκτής PID που σχεδιάστηκε από την μέθοδο Z-N έχει πολύ γρήγορο χρόνο ανύψωσης $t_r=0.17$ msec και αποκατάστασης

$t_s=2.88\text{msec}$, μηδενικό σφάλμα σταθερής κατάστασης $e_{ss}=0.00\%$ όμως έχει μεγάλη ποσοστιαία υπερύψωση ($M_p=64.48\%$).

Οι συντελεστές όμως K_p , K_i και K_d στην εξίσωση 4.22 έχουν πάρα πολύ μεγάλες τιμές με αποτέλεσμα να μην είναι πραγματοποιήσιμη σε κανένα Hardware. Αυτό καθιστά τον ελεγκτή της μεθόδου Z-N μη-πρακτικό. Εξετάζοντας και την εικόνα 4.6 παρατηρείται ότι ο ελεγκτής που σχεδιάστηκε από την μέθοδο CS παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα που είναι μέσα στα όρια των περιορισμών 4.19. Ο χρόνος ανύψωσης υπολογίστηκε $t_r=0.15\text{ msec}$, ο χρόνος αποκατάστασης $t_s=0.42\text{ sec}$, η μέγιστη ποσοστιαία υπερύψωση $M_p=5.58\%$ και το σφάλμα σταθερής κατάστασης $e_{ss}=0.00\%$ και επιπλέον $M_{p-reg}=16.47\%$ και $t_{reg}=2.36\text{ sec}$. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου CS έναντι της μεθόδου Z-N. Επιπλέον λαμβάνοντας υπόψη ότι συντελεστές K_p , K_i και K_d είναι υλοποιήσιμη βγήκε το συμπέρασμα ότι ο ελεγκτής είναι πιο πρακτικός.

Τέλος ο ελεγκτής της μεθόδου CS εξετάστηκε πειραματικά για να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στη MATLAB. Σύμφωνα με το πείραμα ο χρόνος ανύψωσης βγήκε $t_r=1.25\text{ sec}$, ο χρόνος αποκατάστασης $t_s=2.60\text{ sec}$, η μέγιστη ποσοστιαία υπερύψωση $M_p=6.50\%$ και $M_p=18.50\%$, $t_{reg}=2.225\text{ sec}$ και το σφάλμα σταθερής κατάστασης $e_{ss}=0.00\%$. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με αυτά του πειράματος προκύπτει ότι οι χρόνοι απόκρισης στο πείραμα είναι μικρότεροι. Αυτό οφείλεται στην συνδεσμολογία και τα χαρακτηριστικά του συστήματος.[13]



Εικόνα 4.7 «Η απόκριση του συστήματος σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα»[13]

4.3.5 Συμπεράσματα

Η σχεδίαση του βέλτιστου ελεγκτή PID με σκοπό τον έλεγχο της ταχύτητας ενός DC κινητήρα και την εξάλειψη των διαταραχών έγινε με την μέθοδο Cuckoo Search. Το πρόβλημα δομήθηκε σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης με μία συνάρτηση μεταφοράς και με κατάλληλους περιορισμούς ώστε ο ελεγκτής να παρέχει τον κατάλληλο έλεγχο της εξόδου και την αντιμετώπιση των διαταραχών. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με μία δεύτερη μέθοδο την Zeigler-Nichols και εξετάστηκαν πειραματικά:

- Τα πειραματικά δεδομένα είχαν μικρή απόκλιση από αυτά της προσομοίωσης.
- Τέλος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο ελεγκτής PID που προέκυψε από την μέθοδο CS μπορούσε να ανταποκριθεί και στον έλεγχο και στην αντιμετώπιση των διαταραχών.

4.4 Μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO)

Σύμφωνα με την [18] εφαρμόστηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle swarm-PSO) με σκοπό την δημιουργία ενός ελεγκτή PID για τον έλεγχο της ταχύτητας DC κινητήρα. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία ενός κλασικού off-line ελεγκτή PID και ενός on-line ελεγκτή PID, αναλύοντας τα στάδια της αναγνώρισης και αυτό της σχεδίασης. Στο τέλος έγινε σύγκριση των δύο ελεγκτών με έναν τρίτο από την μέθοδο Ziegler-Nichols.

4.4.1 Μαθηματικό μοντέλο κινητήρα

Και σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης όμοιος με αυτόν που αναλύθηκε στη παράγραφο 4.2 όπου μετά τον μετασχηματισμό Laplace η συνάρτηση μεταφοράς της εισόδου V_a , στην έξοδο W είναι:[18]

$$\frac{W(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{JL_a s^2 + (fL_a + JR_a)s + (fR_a + k_t k_b)} \quad (4.23)$$

και θέτοντας $K = \frac{k_t}{JL_a}$, $\alpha = \frac{JR_a + L_a f}{JL_a}$, και $b = \frac{R_a f + k_t k_b}{JL_a}$ καταλήγει:

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + \alpha \cdot s + b} \quad (4.24)$$

Η συνάρτηση 4.24 είναι η συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάξης του DC κινητήρα. Αν ένα μοντέλο ορίζεται από αυτές τις παραμέτρους είναι αρκετά περίπλοκο και χρονοβόρο στην ανάλυση. Για παράδειγμα οι εξισώσεις 4.23 και 4.24 αποτελούνται από δύο πόλους και ένα κέρδος K. Σκοπός λοιπόν της αναγνώρισης (identification) είναι ο καθορισμός των συντελεστών α , b , K μέσα από πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας την μέθοδο PSO.

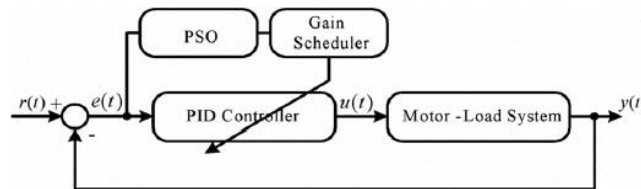
Ένας επιπλέον παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη είναι ο νεκρός χρόνος καθώς παρατηρείται συχνά σε πολλά συστήματα. Ο νεκρός χρόνος μπορεί να γραφτεί ως $e^{-T \cdot s}$ η οποία είναι μια μη-γραμμική συνάρτηση. Όμως μπορεί να γίνει προσέγγιση της χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Pade. Η προσέγγιση Pade δευτέρου βαθμού της εκθετικής είναι [18]

$$e^{-T \cdot s} = \frac{1 - Ts/2 + T^2s^2/12}{1 + Ts/2 + T^2s^2/12} \quad (4.25)$$

Και η συνάρτηση μεταφοράς του DC κινητήρα με νεκρό χρόνο γράφεται:

$$G(s) = \frac{K_t}{JL_a s^2 + (fL_a + JR_a)s + (fR_a + k_t k_b)} e^{-T \cdot s} \quad (4.26)$$

Το δομικό διάγραμμα ανατροφοδότησης με τον προσαρμοστικό PID είναι:



Εικόνα 4.8 «Δομικό διάγραμμα ανατροφοδότησης με on-line PID» [18]

4.4.2 Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO)

Η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization- PSO) είναι ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς πληθυσμιακούς αλγόριθμους. Αναπτύχθηκε από τους Kennedy και Eberhart (1995) και βασίζεται στη νοημοσύνη σμήνους (swarm intelligence)

δηλαδή στη συλλογική συμπεριφορά αυτο-οργανωμένων συστημάτων που συναντώνται στη φύση όπως σμήνη πτηνών, εντόμων και κοπάδια ψαριών. Τα μέλη αυτών των συστημάτων φαίνεται να ανταλλάζουν πληροφορίες αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της ομάδας. Στον αλγόριθμο PSO, ένα πλήθος οντοτήτων που ονομάζονται σωματίδια ή πράκτορες, τοποθετούνται για αναζήτηση της βέλτιστης λύσης, κάθε πράκτορας φτάνει σε βέλτιστη λύση σύμφωνα με την τρέχουσα τοποθεσία του, την καλύτερη τοποθεσία στην οποία έχει βρεθεί, την ταχύτητα του και την καλύτερη τοποθεσία που είχαν οι γειτονικοί πράκτορες.

Αν x και v είναι η θέση και η ταχύτητα κάθε πράκτορα. Τότε ο i -πράκτορας μπορεί να περιγράψει από την $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{id})$ στον d -διάστατο χώρο. Η καλύτερη προηγούμενη θέση περιγράφεται από την $pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{id})$. Ο δείκτης του καλύτερου πράκτορα ορίζεται ως $gbest_d$. Η ταχύτητα του i -πράκτορα είναι $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{id})$. Και η τροποποιημένη θέση και ταχύτητα του κάθε πράκτορα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις [18][15][19]:

$$v_{id}^{t+1} = w \cdot v_{id}^t + c_1 * rand() * (pbest_{id} - x_{id}^t) + c_2 * rand() * (gbest_d - x_{id}^t) \quad t=1,2,\dots,n, \\ d=1,2,\dots,m \quad (7)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}, \quad t=1,2,\dots,n, \quad d=1,2,\dots,m \quad (4.27)$$

Όπου t ο αριθμός των επαναλήψεων, w ένας συντελεστής αδράνειας, c_1 και c_2 δύο σταθερές επιτάχυνσης, όπου $rand()$ τυχαίοι αριθμοί στο $[0,1]$ που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή, v_i^t η ταχύτητα του i -πράκτορα στην επανάληψη t , η οποία περιορίζεται γύρω από κάποια όρια ώστε να μην υπάρξει αστάθεια $V_d^{min} \leq v_{id}^t \leq V_i^{max}$ και x_i^t η τρέχουσα θέση.

Η παράμετρος V^{max} ορίζει την σχολαστικότητα με την οποία ελέγχετε μία περιοχή και συνήθως περιορίζεται στο 10-20% του δυναμικού εύρους των συντεταγμένων θέσης. Ενώ οι σταθερές επιτάχυνσης μπορούν να εκληφθούν ως παράγοντες εμπιστοσύνης που έχει κάθε σωματίδιο στον εαυτό του (c_1) και στο υπόλοιπο σμήνος (c_2) και ορίζονται συνήθως 2.0. Τέλος ο συντελεστής αδράνειας μπορεί να οριστεί ως σταθερός αλλά καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με γραμμική μείωση από περίπου 0.9 έως 0.4. Η γραμμική εξίσωση που υπολογίζει την τιμή του w είναι :

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (4.28)$$

όπου $iter_{max}$ ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και $iter$ η τρέχουσα επανάληψη.

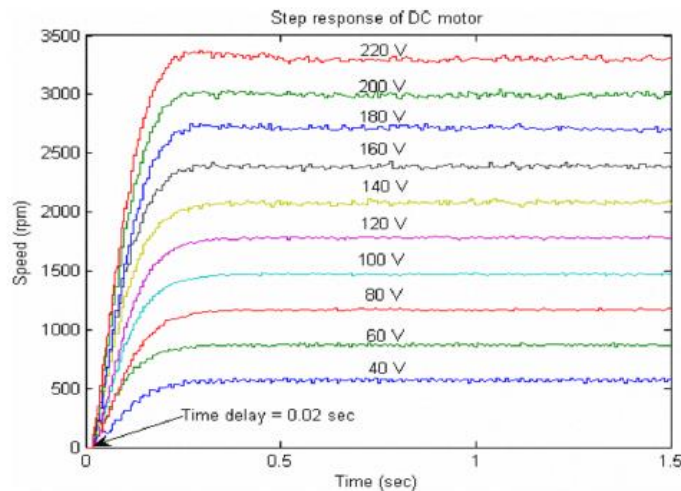
4.4.3 Αναγνώριση (System Identification)

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας DC κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης. Εφαρμόζοντας τάση από 40V έως 220V στον DC κινητήρα γίνεται μέτρηση της απόκρισης της ταχύτητας.

Η απόκριση της ταχύτητας για διάφορες τιμές τάσης από 40 έως 220 volt μετά από μείωση του θορύβου μέσω του μετασχηματισμού wavelet παρουσιάζονται στην εικόνα 4.9. Στόχος της αναγνώρισης (Identification) είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων a , b και K της συνάρτησης μεταφοράς 4.24 του κινητήρα. Ο δείκτης απόδοσης είναι το integral absolute error (IAE) ανάμεσα στο πείραμα και την προσομοίωση και ορίζεται ως:[18]

$$IAE = \int_0^t |f_{ex}(t) - f_s(t)| dt \quad (4.29)$$

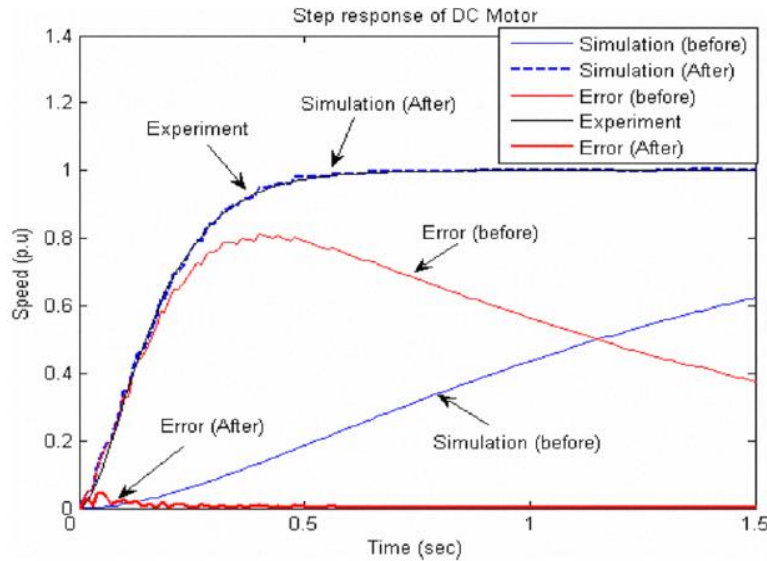
όπου $f_{ex}(t)$ είναι ο χρόνος απόκρισης του πειράματος και $f_s(t)$ ο χρόνος απόκρισης της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.9 «Πειραματικά δεδομένα του DC κινητήρα»[18]

Με τη χρήση του PSO για την αναγνώριση (identification) υπολογίστηκαν οι συντελεστές

α, b και K της 4.24 ώστε η απόκριση της προσομοίωσης να γίνει περίπου ίδια με την απόκριση του πειράματος και το σφάλμα ελαχιστοποιήθηκε. Το αποτέλεσμα για τάση 120V είναι:



Εικόνα 4.10 «Απόκλιση της απόκρισης της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα»[18]

με συνάρτηση μεταφοράς στα 120V :

$$G(s) = \frac{6314.37}{s^2 + 46.0s + 440.64} \quad (4.30)$$

Η ίδια διαδικασία έγινε συνολικά 10 φορές μία για κάθε τάση της εικόνας 4.9 και υπολογίστηκαν συνολικά 10 συναρτήσεις μεταφοράς οι συντελεστές α , b και K οριοθετήθηκαν από την μικρότερη έως την μεγαλύτερη τιμή των πειραματικών δεδομένων με $\alpha=[40.6, 46.0]$, $b=[398.64, 440.64]$, $K=[5632.78, 6314.37]$. Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς 4.32 υπολογίστηκε από τον μέσο όρο των και ο νεκρός χρόνος 4.31 υπολογίστηκε στα 0.02 sec.

$$G(s) = \frac{5950.58}{s^2 + 43.85s + 416.77} \cdot e^{-0.02 \cdot s} \quad (4.31)$$

$$G(s) = \frac{2.3802s^2 - 714.0696s + 71406.96}{0.0004s^4 + 0.1375s^3 + 17.4287s^2 + 576.2124s + 5001.24} \quad (4.32)$$

4.4.4 Tuning του ελεγκτή PID.

Στόχος είναι ο προσδιορισμός του αναλογικού κέρδους K_p , του ολοκληρωτικού κέρδους K_i και του διαφορικού κέρδους K_d , βάση κάποιων κριτηρίων. Τα κριτήρια αυτά είναι τέσσερις δείκτες απόδοσης του PID ελεγκτή σύμφωνα με τη συνάρτηση:

$$F = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt + O_s + t_s + t_r \quad (4.33)$$

Ο πρώτος όρος είναι το μέσο απόλυτο σφάλμα (ITAE), ο δεύτερος όρος είναι η μέγιστη υπερύψωση (O_s), ο τρίτος όρος είναι ο χρόνος αποκατάστασης(t_s) και ο τελευταίος όρος είναι ο χρόνος ανύψωσης(t_r).

ω_n	T_L	K_p	K_i	K_D	ω_n	T_L	K_p	K_i	K_D
	0.0	0.1877	1.8388	0.0040		0.0	0.1616	1.8647	0.0030
0.1	0.2	0.1790	1.8349	0.0040	0.6	0.2	0.1718	2.0370	0.0030
(p.u)	0.4	0.1827	1.8781	0.0040	(p.u)	0.4	0.1590	1.8333	0.0031
	0.6	0.1810	1.8495	0.0040		0.6	0.1547	1.8385	0.0031
	0.8	0.1832	1.8920	0.0040		0.8	0.1675	1.9186	0.0030
	1.0	0.1820	1.8498	0.0040		1.0	0.1530	1.7593	0.0031

Πίνακας 4.2 «Οι συντελεστές του off-line PID μεταβάλλοντας τις στροφές και το φορτίο » [18]

Στη συνέχεια μεταβάλλοντας τις στροφές και το φορτίο η μέθοδος PSO μετά από αριθμητική ανάλυση καταλήγει σε κάποιους συντελεστές κέρδους K_p , K_i και K_d . Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα στον πίνακα 4.2. Και ο σχεδιασμός on-line ελεγκτή PID χρησιμοποιώντας την μέθοδο PSO και τα αποτελέσματα του πίνακα 4.2 για on-line έλεγχο έγινε με τα εξής βήματα:

1. Ορίζεται μία μεταβλητή εξίσωση για τα κέρδη του ελεγκτή PID που θα πρέπει να αντιστοιχεί στα δεδομένα του πίνακα 4.2. Οι μεταβλητές συναρτήσεις από τα κέρδη είναι οι εξισώσεις 4.34, 4.35 και 4.36/
2. Προσδιορίζονται οι συντελεστές p_n , q_n και r_n ($n=1, 2, 3$) από τον αλγόριθμο PSO τέτοιοι ώστε να βελτιστοποιούν την συνάρτηση 4.37.

$$K_p = p_1\omega_m + q_1T_L + r_1 \quad (4.34)$$

$$K_i = p_2\omega_m + q_2T_L + r_2 \quad (4.35)$$

$$K_d = p_3\omega_m + q_3T_L - r_3 \quad (4.36)$$

$$SAE = \sum |f_{tunepso} - f_{simpso}| \quad (4.37)$$

Όπου SAE είναι το απόλυτο σφάλμα, $f_{tunepso}$ τα αποτελέσματα του πίνακα 4.2 και f_{simpso} τα ενδεικτικά αποτελέσματα του πίνακα 4.3 για τις ίδιες τιμές ταχύτητας και φορτίου. Συνεπώς από την 4.37 οι 4.34, 4.35 και 4.36 γίνονται:

$$K_p = 0.0007\omega_m + 0.240T_L + 0.1463 \quad (4.38)$$

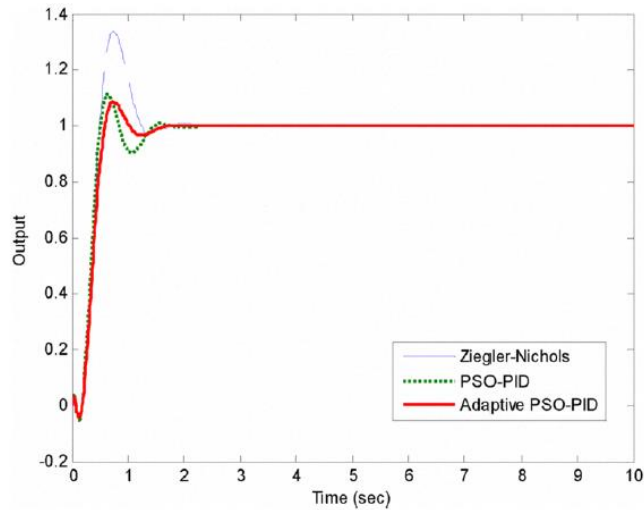
$$K_p = 0.0026\omega_m + 0.6349T_L + 1.8015 \quad (4.39)$$

$$K_p = 0.0001\omega_m + 0.0018T_L + 0.0031 \quad (4.40)$$

ω_n	T_L	K_p	K_I	K_D	ω_n	T_L	K_p	K_I	K_D
	0.0	0.1762	1.8488			0.0	0.1573	1.8238	0.0029
0.1	0.2	0.1763	1.8490		0.6	0.2	0.1574	1.8240	0.0030
(p.u)	0.4	0.1764	1.8492		(p.u)	0.4	0.1575	1.8242	0.0031
	0.6	0.1765	1.8493			0.6	0.1576	1.8243	0.0032
	0.8	0.1765	1.8495			0.8	0.1576	1.8245	0.0033
	1.0	0.1766	1.8497			1.0	0.1577	1.8247	0.0034

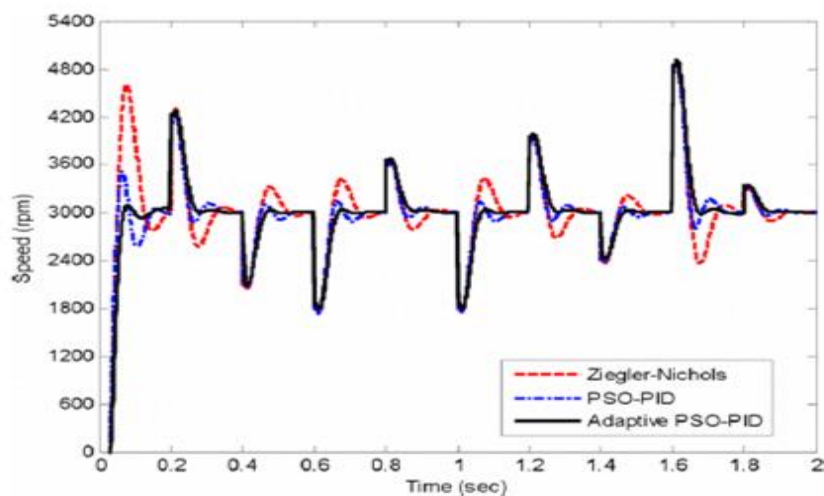
Πίνακας 4.3 «Οι συντελεστές του on-line PID μεταβάλλοντας τις στροφές και το φορτίο για» [18]

Η απόκριση του συστήματος εξετάζοντας τρεις ελεγκτές PID, από την μέθοδο Ziegler-Nichols, από τη μέθοδο PSO και adaptive PSO παρουσιάζονται στο γράφημα της εικόνας 4.11. Ο ελεγκτής της μεθόδου adaptive PSO έχει καλύτερη απόδοση από τους άλλους δύο.

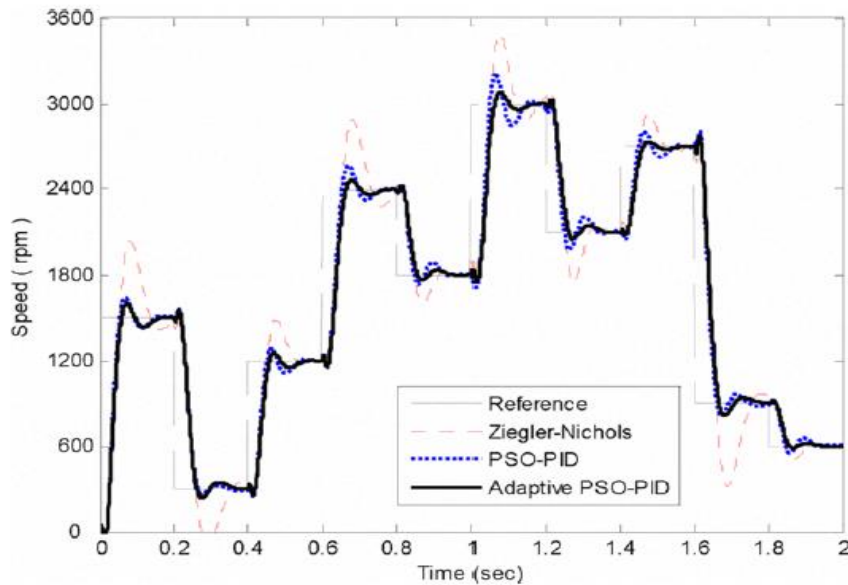


Εικόνα 4.11 «Απόκριση του συστήματος με ελεγκτή ρυθμισμένο από μέθοδο Z-N, PSO on-line, PSO offline»[18]

Για περαιτέρω έλεγχο της απόδοσης του ελεγκτή on-line ελεγκτή με PSO δοκιμάστηκε σε τυχαίο φορτίο ώστε να εξεταστεί η απόκριση του, εικόνα 4.12 και συγκρίθηκε με τους Z-N και PSO για τον έλεγχο της ταχύτητας εξόδου εικόνα 4.13 . Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο dual-line ελεγκτής είναι πιο αποτελεσματικός και στον έλεγχο της ταχύτητας εξόδου και στην αντιμετώπιση των φορτίων.



Εικόνα 4.12 «Απόκριση συστήματος σε τυχαία φορτία»[18]



Εικόνα 4.13 «Έλεγχος εξόδου» [18]

4.4.5 Συμπεράσματα

Καθώς ένας κλασικός ελεγκτής δεν μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική συμπεριφορά σε ένα μεγάλο εύρος από διεργασίες, παρουσιάστηκε ένας on-line ελεγκτής και τα στάδια της αναγνώρισης και της σχεδίασης του με τη μέθοδο PSO. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Η μέθοδος PSO ήταν σε θέση να υπολογίσει την συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας μέσω της αναγνώρισης.
- Ο on-line ελεγκτής με την μέθοδο PSO παρουσίαζε μεγαλύτερη σταθερότητα και απόδοση.

4.5 Γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης (GA)

Στην [20] γίνεται εφαρμογή στον γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης με σκοπό τον υπολογισμό των βέλτιστων παραμέτρων ενός PID ελεγκτή μικρού DC κινητήρα. Αυτό το παράδειγμα λαμβάνεται ως ενδεικτικό για την ρύθμιση ενός κινητήρα αυτοκινήτου και η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε όχημα με τον ίδιο τρόπο. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά του αλγόριθμου βελτιστοποίησης Ενεργού Συνόλου (Active Set).

4.5.1 Μαθηματικό μοντέλο

Ομοίως με τις άλλες δύο μεθόδους που αναλύθηκαν εξετάζετε ένας DC κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης με συνάρτηση μεταφοράς:[20]

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{k_t}{(js+B)(R_a+L_a s)+k_t k_b s} \quad (4.41)$$

Με στόχο την ρύθμιση των παραμέτρων ενός PID επιτυγχάνοντας, σφάλμα σταθερής κατάστασης $e_{ss} \leq 1\%$, χρόνο αποκατάστασης $t_r \leq 2sec$ και μέγιστη ποσοστιαία υπερύψωση $M_p \leq 5\%$.

Όπου K_p το αναλογικό κέρδος, K_i το ολοκληρωτικό κέρδος και K_d το διαφορικό κέρδος. Και τα χαρακτηριστικά του DC κινητήρα (Dc Motor Pittman Model 9234S004) είναι στον πίνακα 4.4.

Παράμετροι	Τιμές
R_a (Ω)	0.83
L_a (mH)	0.63
J (kgm^2/rad)	4.2e-6
B (Nms)	2.6e-6
K_t (Nm/A)	1.82e-2
K_b (V/rad/s)	1.82e-2

Πίνακας 4.4 «Χαρακτηριστικά DC κινητήρα » [20]

4.5.2 Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm)

Πηγή έμπνευσης του αλγόριθμου είναι η θεωρία εξέλιξης των ειδών. Το στοιχειώδες χαρακτηριστικό σε έναν γενετικό αλγόριθμο είναι ένας πληθυσμός δυαδικών συμβολοσειρών που παίζουν το ρόλο χρωμοσωμάτων. Κάθε συμβολοσειρά είναι μία κωδικοποιημένη μορφή μιας λύσης σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Με τη χρήση γενετικών τελεστών (επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη) στα άτομα του τρέχοντος πληθυσμού, ο αλγόριθμος δημιουργεί την επόμενη γενιά (νέες πιθανές λύσεις). Στους εξελικτικούς αλγόριθμους, γενιά (generation) ονομάζεται μία επανάληψη στην οποία δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός. Ο

κύκλος γενεών επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού. Ένας απλός γενετικός αλγόριθμος αποτελείται από τα εξής στοιχεία[15][20][21]

- έναν πληθυσμό δυαδικών συμβολοσειρών.
- Ένα μηχανισμό κωδικοποίησης των λύσεων.
- Παραμέτρους ελέγχου.
- Μια συνάρτηση καταλληλότητας
- ένα μηχανισμό επιλογής

Ο ρόλος του μηχανισμού επιλογής είναι να χρησιμοποιεί μια τιμή καταλληλότητας με σκοπό την αξιολόγηση μίας λύση. Με βάση την τιμή καταλληλότητας οι καλύτερες λύσεις επιβιώνουν και οι πιο αδύναμες αφανίζονται. Επιπλέον στον Γενετικό Αλγόριθμο όσο πιο κατάλληλη είναι μια συμβολοσειρά τόσο πιο πολλούς απογόνους έχει. Μία από τις πιο βασικές μεθόδους επιλογής είναι η μέθοδος της ρουλέτας. Μετά την επιλογή, τα χρωμοσώματα αναπαράγονται με τη λειτουργία της διασταύρωσης. Ζευγάρια χρωμοσωμάτων λαμβάνονται τυχαία από τον πληθυσμό και διασταυρώνονται. Για παράδειγμα ο απλός GA χρησιμοποιεί διασταύρωση ενός σημείου (one point crossover). Τέλος όταν ολοκληρωθεί η διασταύρωση, τα χρωμοσώματα υποβάλλονται σε μετάλλαξη. Η διαδικασία της μετάλλαξης περιλαμβάνει τη μεταβολή ενός bit μιας συμβολοσειράς από 0 σε 1 με πιθανότητα M_p .

4.5.3 Βέλτιστος ελεγκτής PID

Σύμφωνα με τα παραπάνω, κάθε άτομο ενός πληθυσμού αποτελεί μία πιθανή λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης του ελεγκτή PID και κάθε νέα γενιά υποτίθεται δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Άρα βασική λεπτομέρεια για την λύση είναι ο προσδιορισμός κατάλληλης συνάρτησης κόστους ώστε η έξοδος να ακολουθεί μια επιθυμητή τροχιά. Επομένως ως αντικειμενική συνάρτηση ορίζετε το σφάλμα που ελαχιστοποιεί την απόκλιση από αυτή την τροχιά.

$$J = \frac{\sum_{n=1}^M \sqrt{(r_n - y_n)^2}}{M} \quad (4.42)$$

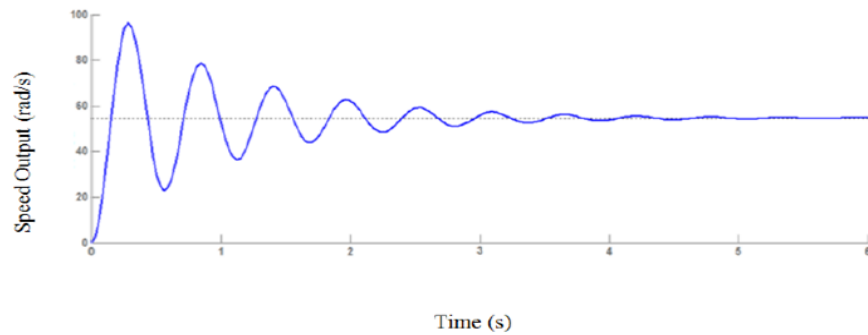
Όπου J η συνάρτηση κόστους, n η τάξη των δεδομένων, M ο συνολικός αριθμός

δεδομένων, r η επιθυμητή ταχύτητα του DC κινητήρα και y η ταχύτητα εξόδου.

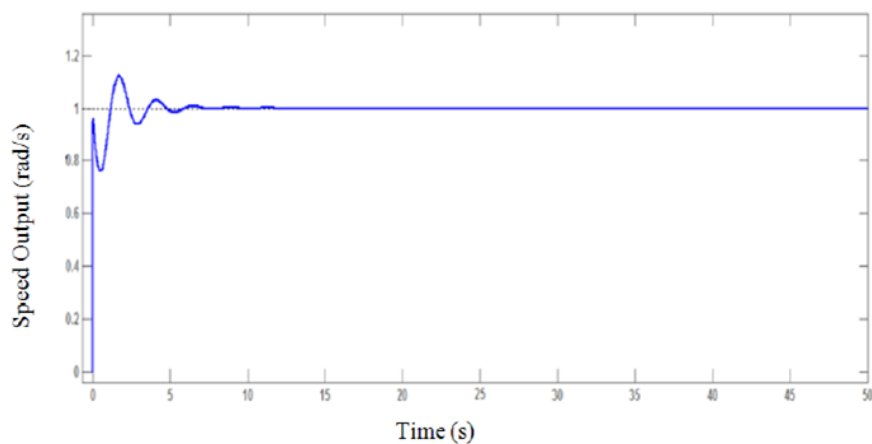
Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του PID ελεγκτή διατυπώνεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης.

4.5.4 Αποτελέσματα και σύγκριση αλγορίθμων

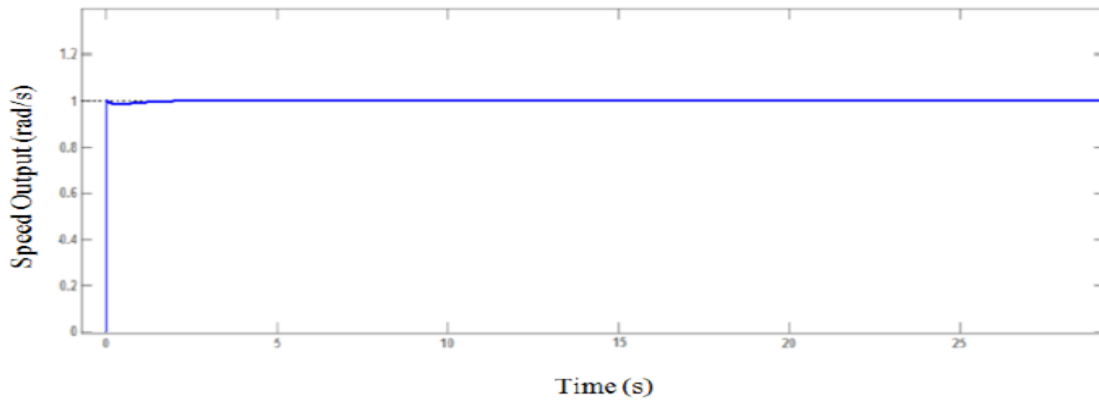
Γίνεται προσομοίωση της συνάρτησης μεταφοράς (4.41) με τη βοήθεια του MATLAB για έναν έλεγχο ανατροφοδότησης χωρίς ελεγκτή, για έναν με ελεγκτή σχεδιασμένο από την μέθοδο του Ενεργού Συνόλου και τέλος για έναν ελεγκτή σχεδιασμένο με τον Γενετικό Αλγόριθμο και τα αποτελέσματα παραθέτονται στα γραφήματα των εικόνων 4.14, 4.15 και 4.16



Εικόνα 4.14 «Απόκριση της ταχύτητας χωρίς ελεγκτή » [20].



Εικόνα 4.15 «Απόκριση της ταχύτητας με ελεγκτή της μεθόδου Ενεργού Συνόλου » [20]



Εικόνα 4.16 «Απόκριση της ταχύτητας με ελεγκτή της μεθόδου Γενετικού Αλγορίθμου » [20]

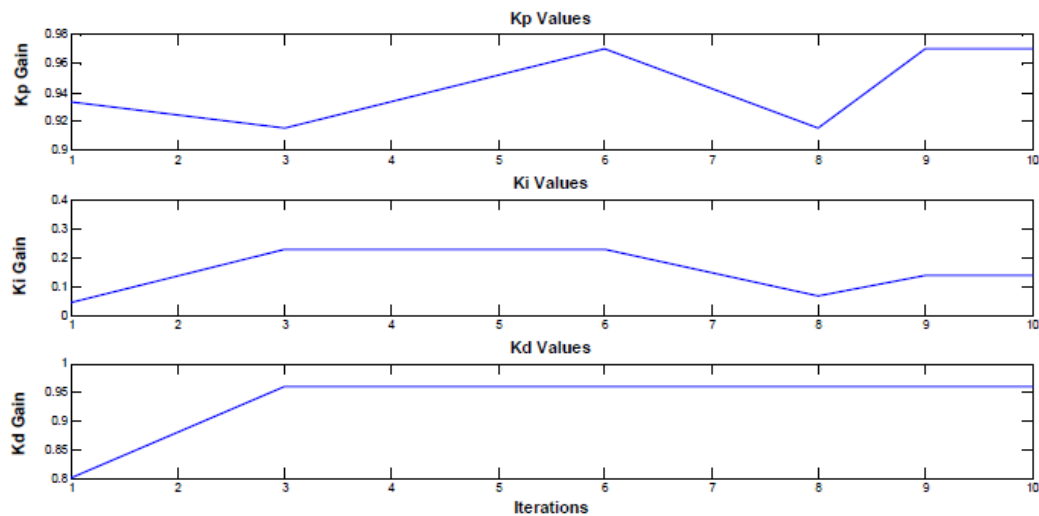
Οι παράμετροι που ορίστηκαν στον Γενετικό Αλγόριθμο είναι: Αριθμός πληθυσμού 100, πιθανότητα διασταύρωσης 0.9 και πιθανότητα μετάλλαξης 0.08. Και οι ελεγκτές είναι:

$$G_{GA-PID}(s) = 0.9681 + 0.9966/s + 0.0484s \quad (4.43)$$

$$G_{PID-ASO}(s) = 0.00528620 + 0.14430414055/s + 0.019767s \quad (4.44)$$

	ASO PID	GA-PID
Μέγιστη ποσοστιαία υπερύψωση (%)	50.4866	3.7579
Χρόνος ανύψωσης (sec)	39.4117	0.0058
Χρόνος αποκατάστασης (sec)	0.74498	0.0393

Πίνακας 4.5 «Αποτελέσματα μεθόδου ASO και GA » [20]



Εικόνα 4.17 «Η μεταβολή των παραμέτρων PID ανά επανάληψη» [20]

4.5.5 Συμπεράσματα

Σε αυτή την αναφορά έγινε βελτιστοποίηση ενός ελεγκτή PID για τον έλεγχο ταχύτητας μικρού DC κινητήρα με την χρήση του Γενετικού Αλγόριθμου βελτιστοποίηση. Η μέθοδος θα μπορούσε να εφαρμοστεί με το ίδιο τρόπο και σε κινητήρα οχήματος. Η απόκριση του συστήματος συγκρίθηκε με έναν δεύτερο ελεγκτή που σχεδιάστηκε με την μέθοδο Ενεργού Συνόλου και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι :

- Ο ελεγκτής του GA ικανοποιούσε τις παραμέτρους μεταβατικής απόκρισης.
- Ο αλγόριθμος GA ήταν πιο γρήγορος και εύκολος στην εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Εφαρμογή συστημάτων ελέγχου στις αναρτήσεις ενός

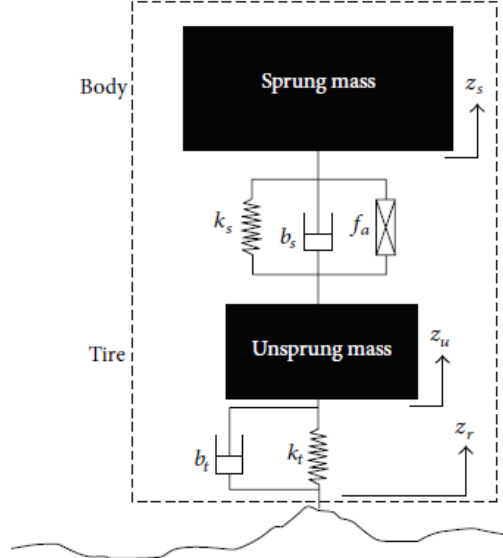
5.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ανάρτησης συστήματα ανάρτησης αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μέρη ενός οχήματος. Ο βέλτιστος προσδιορισμός της δομής και της γεωμετρίας μιας ανάρτησης όπως και η επιλογή κατάλληλων σχεδιαστικών παραμέτρων , επηρεάζουν άμεσα την απόκριση του συστήματος του αυτοκινήτου σε διαταραχές. Στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία γίνεται συνεχώς έρευνα και προσπάθεια βελτίωσης των αναρτήσεων ε τις ποιο σύγχρονες να διαθέτουν ειδικά συστήματα, από υδραυλικά, πνευματικά έως και ηλεκτρομηχανολογικά για τον έλεγχο της ανάρτησης με σκοπό την ταυτόχρονη ελάττωση των κραδασμών και τον καλύτερο έλεγχο του οχήματος. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται έλεγχος ενός συστήματος ενεργητικής ανάρτησης με έναν ελεγκτή PID και η προσπάθεια ρύθμισης των παραμέτρων του με Νευρωνικά Δίκτυα και τον αλγόριθμο PSO.

5.2 Νευρωνικά δίκτυα.

Σύμφωνα με την αναφορά [22] έγινε χρήση ενός Νευρωνικού Δικτύου με ανάστροφη μετάδοση λάθους για τον σχεδιασμό ενός ελεγκτή PID για σύστημα ανάρτησης ενός οχήματος. Το σύστημα της ανάρτησης απλοποιήθηκε και μοντελοποιήθηκε μαθηματικά με σκοπό τον υπολογισμό των παραμέτρων του ελεγκτή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το νευρωνικό Δίκτυο μπορεί να παράγει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου, αναφέρετε ο τρόπος λειτουργίας ενός Νευρωνικού δικτύου, η εφαρμογή και τα αποτελέσματα.

5.2.1 Μαθηματικό μοντέλο ανάρτησης



Εικόνα 5.1 «Μοντέλο ενεργητικής ανάρτησης οχήματος» [22]

όπου m_s η μάζα που ταλαντεύετε (σασί), m_u η μάζα που έχει το σταθερό τμήμα (σύστημα τροχών), k_s η σταθερά παθητικού ελατηρίου και b_s η σταθερά του αποσβεστήρα, τα οποία τοποθετούνται ανάμεσα στο ταλαντευόμενο και σταθερό τμήμα και k_t η συμπίεστικότητα των ελαστικών. Με z_s συμβολίζεται η κάθετη μετατόπιση του αυτοκινήτου,, z_u η κάθετη μετατόπιση των τροχών και z_r η διαταραχή λόγω της μορφής του οδοστρώματος. Η δύναμη f_a αποτελεί το ενεργητικό τμήμα του συστήματος ανάρτησης και εφαρμόζεται μεταξύ του ταλαντευόμενου και σταθερού τμήματος και υπολογίζεται από το σύστημα ελέγχου που εφαρμόζεται. [22]

Από το δεύτερο νόμο του Newton προκύπτει:

$$m_s \ddot{z}_s = -b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_s(z_s - z_u) + f_a \quad (5.1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s(z_s - z_u) + b_t(\dot{z}_r - \dot{z}_u) + k_t(z_r - z_u) - f_a \quad (5.2)$$

$$f_a = P_L A_p \quad (5.3)$$

Όπου P_L η πίεση και A_p η επιφάνεια.

Τονίζεται ότι:

1. Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν γραμμικοποιηθεί στο σημείο ισορροπίας και η ταχύτητα του οχήματος είναι σταθερή.
2. Οι μεταβλητές z_s , z_u και z_r υπολογίζονται από σταθερό σημείο ισορροπίας.
3. Οι γραμμική συμπεριφορά του συστήματος που αναλύθηκε έχει νόημα μόνο όταν οι τροχοί είναι σε επαφή με το οδόστρωμα.
4. Η δύναμη που ασκείται στο τροχό θεωρείται σαν μία διαταραχή στο σύστημα.

Άρα:

$$f_{dis} = b_t(\dot{z}_r - \dot{z}_u) + k_t(z_r - z_u) \quad (5.4)$$

όπου f_{dis} η δύναμη που ασκείται από το οδόστρωμα στο τροχό, οπότε η (5.2) γίνεται:

$$m_u \ddot{z}_u = b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s(z_s - z_u) + f_{dis} - f_a \quad (5.5)$$

Θεωρώντας ότι οι αρχικές συνθήκες είναι μηδέν και εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace, η συνάρτηση μεταφοράς λαμβάνοντας υπόψη μόνο το z_r και μηδενίζοντας το f_a είναι:

$$G_1(s) = \frac{z_s(s) - z_u(s)}{z_r(s)} = \frac{-m_s b_t s^3 - m_u k_t s^2}{\Delta} \quad (5.6)$$

$$\Delta = \det \begin{bmatrix} m_s s^2 + b_s s + k_s & -(b_s s + k_s) \\ -(b_s s + k_s) & (m_u s^2 + (b_s + b_t)s + (k_s + k_t)) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Ενώ για z_r ίσο με μηδέν.

$$G_2(s) = \frac{z_s(s) - z_u(s)}{f_a(s)} = \frac{(m_s + m_u)s^2 + b_t s + k_t}{\Delta} \quad (5.8)$$

Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι η διαταραχή περιγράφεται από μία ημιτονοειδή εξίσωση:

$$z_r(t) = (0.01m)\sin(\omega_b t) \quad (5.9)$$

$$\omega_b = 0.2909\nu \quad (5.10)$$

όπου ν η ταχύτητα του οχήματος σε km/h, ω_b σε rad/sec, και το m η μάζα της ανάρτησης.

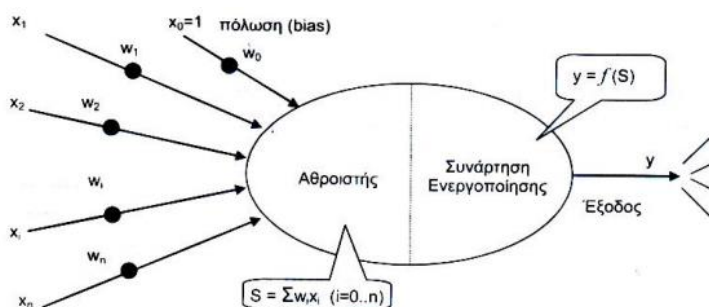
Μονάδες	Τιμές
$m_s(\text{kg})$	243
$m_u(\text{kg})$	40
$b_s(\text{Ns/m})$	370
$b_t(\text{Ns/m})$	414
$k_s(\text{N.m})$	14671
$k_t(\text{N/m})$	124660
$A_p(\text{m}^2)$	$3.35 \cdot 10^{-4}$
$P_L(\text{Pa})$	10342500

Πίνακας 5.1 «Χαρακτηριστικά συστήματος ανάρτησης » [22]

5.3 Νευρωνικά δίκτυα

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα βασίζουν τη δομή τους στο κεντρικό νευρικό σύστημα του ανθρώπου. Είναι διασυνδεδεμένα υπολογιστικά σύνολα νευρωνικών δικτύων, με κάθε στοιχείο να έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται σε ερεθίσματα (είσοδος στο νευρώνα) και να προσαρμόζεται κατάλληλα. Κατά βάση αποτελούν μοντέλα αρκετά ποιο απλά από αυτά των νευρώνων ώστε να προσομοιάζουν πολύ βασικές λειτουργίες νευρολογιών μοντέλων.

Πιο συγκεκριμένα ένας νευρώνας αποτελεί ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο δέχεται κάποια σήματα εισόδου $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ τα οποία έχουν από μία τιμή βάρους w_i , η οποία παίζει το ρόλο της σύναψης. Η τιμή του βάρους λαμβάνει και θετικές και αρνητικές τιμές. Ένα μοντέλο τεχνητού νευρώνα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.[22][23]



Εικόνα 5.2 «Μοντέλο τεχνητού Νευρώνα» [23]

Ο νευρώνας απαρτίζεται από δύο διαφορετικά μέρη, τον αθροιστή, ο οποίος αθροίζει το γινόμενο κάθε σήματος επί το αντίστοιχο βάρος του και δίνει ως αποτέλεσμα την ποσότητα S , και από τη *συνάρτηση ενεργοποίησης* που λειτουργεί σαν φίλτρο και διαμορφώνει την τελική τιμή του σήματος εξόδου, σε συνάρτηση με την ποσότητα S και το κατώφλι της συνάρτησης ενεργοποίησης. Τονίζετε ότι ένας νευρώνας μπορεί να έχει πολλές εξόδους στο δεξιό μέρος αλλά όλες έχουν την ίδια τιμή και κάθε έξοδος συνήθως κανονικοποιείται σε ένα διάστημα τιμών $[0, 1]$ ή $[-1, 1]$. Επιπλέον περιλαμβάνεται στο μοντέλο μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη πόλωση, η b_k που έχει ως αποτέλεσμα την αυξομείωση της δικτυακής διέγερσης της συνάρτησης ενεργοποίησης. Τα παραπάνω παραγράφονται μαθηματικά ως εξής:[22][23]

$$net_i = \sum_{j=0}^m x_j \cdot w_{ji} \quad (5.11)$$

$$y_i = f(u_{net_i}) \quad (5.12)$$

$$net_k = \sum y_i \cdot w_{ik} \quad (5.13)$$

$$o_k = f(u_{net_k}) \quad (5.14)$$

Όπου net_i ο αθροιστής, y_i η έξοδος ενός νευρώνα, f η συνάρτηση ενεργοποίησης και o_k το τελικό αποτέλεσμα. Με τις πιο συνηθισμένες συναρτήσεις να είναι:

$$\text{Η βηματική } 0/1(\text{step function}): a(n) = \begin{cases} 1, & \text{αν } n \geq 0 \\ 0, & \text{αν } n < 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

$$\text{Η βηματική } -1/1(\text{step function}): a(n) = \begin{cases} 1, & \text{αν } n \geq 0 \\ -1, & \text{αν } n < 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

$$\text{Η γραμμική συνάρτηση: } a(n) = b \cdot n \quad (5.17)$$

$$\text{Η tansig: } a(n) = \frac{1 - e^{-net_i}}{1 + e^{-net_i}} \quad (5.18)$$

$$\text{Η σιγμοειδής συνάρτηση (logsig): } a(n) = \frac{1}{1 + e^{-bn}} \quad (5.19)$$

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι η αρχιτεκτονική του, που δηλώνει τη μέθοδο εκπαίδευσης τους. Από την αρχιτεκτονική ορίζεται η διάταξη, ο αριθμός και ο τύπος των νευρώνων. Οι νευρώνες δομούνται σε μορφή επιπέδων και η δομή τους εξαρτάτε από τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες αρχιτεκτονικής, *δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (feedforward)*, *Πολυεπίπεδα δίκτυα πρόσθια τροφοδότησης* και *Αναδρομικά δίκτυα*, στην συνέχεια χρησιμοποιούνται μόνο τα *πολυεπίπεδα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης* οπότε και αυτά θα αναπτυχθούν.

Στα *πολυεπίπεδα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης* υπάρχουν οι αρχικές εισοδοι, ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα (κρυφοί νευρώνες). Βασικό χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι κάθε επίπεδο με νευρώνες δέχονται τις εξόδους από το προηγούμενο τους επίπεδο, δηλαδή το σήμα ρέει από επίπεδο σε επίπεδο με τους νευρώνες εισόδου να μην πραγματοποιούν καμία αλλαγή με συνάρτηση ενεργοποίησης σε αντίθεση με όλα τα άλλα επίπεδα.[22][23]

Τέλος μία βασική έννοια στα νευρωνικά είναι οι διαδικασίες εκμάθησης με την ποιο διαδεδομένη μέθοδο να είναι η *μάθηση με επίβλεψη (supervised learning)*. Σε αυτή τη μέθοδο δίνονται ζευγάρια εισόδου-εξόδου στο νευρωνικό, με τη επιθυμητή έξοδο να είναι γνωστή από τον εκπαιδευτή. Η διαφορά της επιθυμητής εξόδου από την πραγματική έξοδο του νευρωνικού αποτελεί το σήμα σφάλματος. Στη συνέχεια με βάση το σφάλμα και το αλγόριθμο εκπαίδευσης, σε αυτό το παράδειγμα γίνεται χρήση του αλγορίθμου της ανάστροφης μετάδοσης λάθους (backpropagation ή BPN), πραγματοποιείται ο επαναπροσδιορισμός των βαρών. Τα σφάλματα είναι :

$$e_k = (t_k - o_k)o_k(1 - o_k) \quad (5.20)$$

$$e_i = y_i(1 - y_i)\sum e_k w_{ij} \quad (5.21)$$

Με t_k το αναμενόμενο αποτέλεσμα από το εξωτερικό layer, e_k το σφάλμα που προέκυψε στο εξωτερικό και e_i το σφάλμα που προέκυψε στο κρυφό layer. Και τα βάρη αλλάζουν βάση των εξίσωση:

$$w_{jk} = w_{jk} + \alpha e_k y_i + \beta \Delta w_{jk} \quad (5.22)$$

$$w_{ij} = w_{ij} + \alpha e_i x_i + \beta \Delta w_{ij} \quad (5.23)$$

Όπου w_{ij} το βάρος στο εξωτερικό layer, Δw_{jk} και Δw_{ij} διορθώσεις που έγιναν στην προηγούμενη επανάληψη, α μια σταθερά εκμάθησης και β μια σταθερά, οι σταθερές ορίστηκαν $\alpha=0.65$ και $\beta=0.9$.

$$e = \sum 0.5 |t_k - o_k|^2 \quad (5.24)$$

$$R.E = \frac{100(t_k - o_k)}{t_k} \quad (5.25)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (100 \frac{(t_k - o_k)}{t_k}) \quad (5.26)$$

5.3.1 Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου

Τα δεδομένα εισόδου είναι, η ταχύτητα του οχήματος που λαμβάνει τιμές στο πεδίο [10 , 55] m/s. Και γίνεται η υπόθεση ότι η υπερύψωση, ο χρόνος αποκατάστασης και το σφάλμα σταθερής κατάστασης κυμαίνονται από 1% με 10%, 0.3 sec με 1.5 sec, και 0% με 2% αντίστοιχα. Τέλος τα δεδομένα εξόδου είναι οι παράμετροι του PID ελεγκτή.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου περιλαμβάνει 4 νευρώνες εισόδου έναν για κάθε είσοδο που ορίστηκε παραπάνω και 3 νευρώνες εξόδου έναν για κάθε παράμετρο του ελεγκτή. Δεν υπάρχει κάποιος βασικός κανόνας για τον προσδιορισμό των κρυφών επιπέδων και των αριθμό των νευρώνων σε κάθε έναν από αυτά. Πολλά κρυφά επίπεδα μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα overfeed ενώ λίγα επίπεδα μπορεί να μην δίνουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η καλύτερη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει 4 νευρώνες στο επίπεδο εισόδου 10 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο και 3 νευρώνες στο επίπεδο εξόδου με τις συναρτήσεις ενεργοποίησης στο κρυφό επίπεδο να είναι σιγμοειδής και γραμμική στο επίπεδο εξόδου.[22]

Οι τιμές εξόδου παίρνουν τιμές μεταξύ 0 και 1 ενώ οι τιμές εισόδου κανονικοποιούνται σύμφωνα με:

$$x_{norm} = 2 \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} - 1 \quad (5.27)$$

Για τη εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με τη βοήθεια του MATLAB Neural Network Toolbox χρησιμοποιώντας τις έτοιμες συναρτήσεις *newelm*, *newff* και *newcd* και εξετάζοντας τους αλγόριθμους του πίνακα (). Αρχικά οι τιμές από τα βάρη ορίζονται τυχαία. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης με τα πειραματικά δεδομένα τα βάρη προσαρμόζονται με σκοπό τη ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους του νευρωνικού, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Τέλος οι συναρτήσεις ενεργοποίησης στο κρυφό επίπεδο είναι σειγμοειδής και στο επίπεδο εξόδου γραμμικές.. Το μεγάλο πλεονέκτημα του Νευρωνικού Δικτύου με ανάστροφη μετάδοση σφάλματος (BPNN) είναι η ικανότητα εκμάθησης από παραδείγματα χωρίς να υπάρχει αναλυτική γνώση του προβλήματος. Επιπλέον είναι πολύ αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση μεγάλου όγκου δεδομένων. Τέλος τα κριτήρια τερματισμού είναι: Το μέσο τετραγωνικό πρέπει να έχει τιμή μικρότερη του 10^{-5} και ο αριθμός των επαναλήψεων (epochs) πρέπει να είναι κάτω από 5000. Οι δοκιμές και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.[22]

Acronym	Description
LM	levenberg-Marquardt
BFG	BFGS quasinewton
RP	Resilient back propagation
SCG	Scaled conjugate gradient
CGB	Conjugate gradient with Powell/Beale restarts
CGF	Fletcher-Powell conjugate gradient
CGP	Polak-Ribiere conjugate gradient
OSS	One-step secant
GDX	Variable learning rate back propagation

Πίνακας 5.2 «Αλγόριθμοι εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου » [22]

Το σύστημα δέχεται ημιτονοειδή διαταραχή σύμφωνα με την εξίσωση (5.8). Σε αυτή την έρευνα έγινε εκπαίδευση από ένα Νευρωνικό Δίκτυο με ανάστροφη μετάδοση. Στο κρυφό επίπεδο γίνεται δοκιμή από 7 έως 29 νευρώνες. Υπήρχαν 100 τιμές για το αναλογικό κέρδος K_p , το ολοκληρωτικό κέρδος K_I και το διαφορικό κέρδος K_d , από αυτές οι 80 χρησιμοποιήθηκαν για εκπαίδευση και οι υπόλοιπες 20 για έλεγχο. Οι τιμές παλινδρόμησης

(R^2) για τις τιμές ελέγχου στο επίπεδο εξόδου συνάρτηση των αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο για κάθε αλγόριθμο εκπαίδευσης παρουσιάζεται στο πίνακα 5.3. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η αυτή η τιμή τόσο καλύτερη η πρόβλεψη. Η καλύτερη τιμή του (R^2) είναι 0.9999, και προκύπτει από τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (LM) με 10 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο.[22]

Neurons	LM	BFG	RP	SCG	CGB	CGF	CGP	OSS	GDX
7	0.997	0.9888	0.9819	0.9957	0.9738	0.9918	0.9905	0.9913	0.9891
8	0.9981	0.9676	0.992	0.9909	0.9942	0.9864	0.9846	0.9969	0.9916
10	0.9999	0.9981	0.9942	0.9578	0.9986	0.9978	0.9681	0.9963	0.9945
15	0.9985	0.9998	0.9967	0.9996	0.9996	0.9995	0.9595	0.9890	0.9856
18	0.9967	0.9928	0.9994	0.9998	0.9998	0.9698	0.9898	0.9898	0.9881
20	0.9998	0.9499	0.999	0.9699	0.9997	0.9698	0.9699	0.9797	0.9950
25	0.9996	0.9699	0.9994	0.9699	0.9699	0.9599	0.9899	0.9479	0.9983
26	0.9944	0.9916	0.9996	0.9797	0.9694	0.9792	0.9799	0.9688	0.9782
27	0.9989	0.9599	0.9995	0.9899	0.9899	0.9899	0.9799	0.988	0.9870
28	0.9998	0.9939	0.9994	0.9799	0.9999	0.9599	0.9799	0.9889	0.9984
29	0.9997	0.9419	0.9997	0.9799	0.9599	0.9699	0.9799	0.9889	0.9985

Πίνακας 5.3 «Η παλινδρόμηση για διαφορετικό αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο» [22]

Οπότε χρησιμοποιώντας την συνάρτηση newelm της Matlab για 10 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο, συναρτήσεις ενεργοποίησης logsig-purlin και τους αλγόριθμους του πίνακα 5.3 γίνεται η εκπαίδευση του νευρωνικού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις συναρτήσεις newff και newcf της Matlab με τον αλγόριθμο LM να παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση. Τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν με την συνάρτηση newelm, η οποία πετυχαίνει τον στόχο ελαχιστοποίησης του σφάλματος και ταυτόχρονα έχει υποδιπλάσιο χρόνο εκπαίδευσης, τα αποτελέσματα της newelm παρουσιάζονται στη συνέχεια στον πίνακα 5.4.

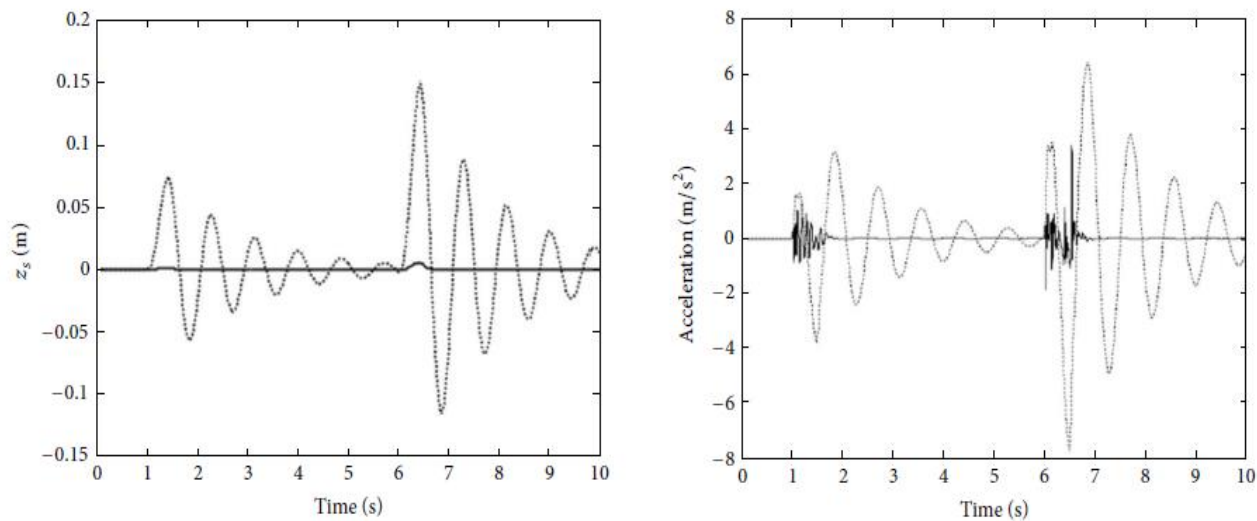
Acronym	Epoch in goal	Error goal	Train time (s)	Test time(s)
LM	153	met	28.724082	0.05452
BFG	1528	met	77.482451	0.046583
RP	3000	Not met	67.677318	0.046466
SCG	3000	Not met	101.328176	0.044047
CGB	2932	Not met	118.102075	0.052230
CGF	2125	Not met	88.894782	0.046125
CGP	2302	Not met	94.665335	0.046852
OSS	3000	Not met	112.071065	0.046677
GDX	3000	Not met	61.243551	0.046046

Πίνακας 5.4 «Αποτελέσματα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου » [22]

Στη συνέχεια μερικές ενδεικτικές συγκρίσεις ανάμεσα στις προβλέψεις του νευρωνικού δικτύου με τη μέθοδο LM για τις τιμές των παραμέτρων του PID ελεγκτή και τις πραγματικές τιμές του ελεγκτή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5. Οι πραγματικές τιμές υπολογίστηκαν με κώδικα στο Matlab.

	Actual	Predicted	Percentage error
$K_p(1)$	12614.31	13017.95	3.25
$K_I(1)$	16743.32	16949.26	1.23
$K_d(1)$	28345.2	30091.26	6.16
$K_p(2)$	14590.41	15830.59	8.5
$K_I(2)$	15234.9	16011.87	5.1
$K_d(2)$	27670.82	28365.35	2.51

Πίνακας 5.5 «Προβλέψεις του BPNN για τους συντελεστές του ελεγκτή και οι πραγματικές τιμές » [22]



Εικόνα 5.3 «Στο αριστερό διάγραμμα απεικονίζεται η απόκριση της θέσης του οχήματος και στο δεξιό η απόκριση της επιτάχυνσης» [20]

Και τέλος στην εικόνα 5.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα μετατόπισης του σώματος στα αριστερά και το διάγραμμα της επιτάχυνσης του σώματος στα δεξιά. Με διακεκομμένη γραμμή το σύστημα δεν έχει έλεγχο και με συνεχή όταν εφαρμόζουμε εφαρμόζετε έλεγχο. Από την εικόνα 5.3 παρατηρείται πολύ μεγάλη βελτίωση των ταλαντώσεων του συστήματος.[20]

5.3.2 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη αναφορά εξετάστηκε η ρύθμιση ενός ελεγκτή PID αναρτήσεων χρησιμοποιώντας ένα Backpropagation Neural Network με τα αποτελέσματα να έχουν επιτύχει :[20]

- σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος μειώνοντας τις ταλαντώσεις.
- Η μέθοδος BNP παρουσίασε παλινδρόμηση $R^2=0.9999$ και μέσο σχετικό σφάλμα για όλα τα δεδομένα 4.2% χρησιμοποιώντας την συνάρτηση newff της Matlab με μέθοδο εκπαίδευσης Lovenberg-Marquardt.
- Τέλος η εφαρμογή αυτής της μεθόδου ήταν γρήγορη, απλή και είναι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άτομα που δεν διαθέτουν τεχνικές γνώσεις.

5.4 Μέθοδος σμήνους σωματιδίων PSO

Σύμφωνα με την αναφορά [25] παρουσιάζεται η ρύθμιση ενός ελεγκτή PID για σύστημα ανάρτησης ενός οχήματος. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή του προβλήματος, η εφαρμογή του αλγορίθμου και τα αποτελέσματα.

Σε αυτή τη μέθοδο εξετάζεται η βέλτιστη ρύθμιση ενός ελεγκτή PID για ενεργή ανάρτηση με την μέθοδο PSO που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4. Το μαθηματικό μοντέλο είναι όμοιο με αυτό της ενότητας με διαφορά ότι b_i είναι ίσο με μηδέν δηλαδή:

$$M_{SM}Z_{SM}'' + K_S(Z_{SM} - Z_{UM}) + C_a(\dot{Z}_{SM} - \dot{Z}_{UM}) - F_a = 0 \quad (5.26)$$

$$M_{UM}Z_{UM}'' + K_S(Z_{UM} - Z_{SM}) + C_a(\dot{Z}_{UM} - \dot{Z}_{SM}) + K_t(Z_{UM} - Z_r) + F_a = 0 \quad (5.27)$$

Και η δράση του ενεργητικού τμήματος της ανάρτησης F_a ορίζεται ίση με τη δράση ενός ελεγκτή PID.

$$F_a = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d(e(t))}{dt} \quad (5.28)$$

Στόχος είναι το σασί του αυτοκινήτου (M_{sm}) να επιταχύνεται όσο το δυνατόν λιγότερο. Δηλαδή σκοπός είναι ο έλεγχος της επιτάχυνσης του M_{sm} άρα το σφάλμα ανατροφοδότησης ορίζεται:

$$e(t) = R_{ref} - Z_{SM}'' \quad (5.29)$$

Όπου R_{ref} η είσοδος (input) και $Z_r=R_d$ οι διαταραχές.

Επομένως ο αλγόριθμος PSO πρέπει να υπολογίσει τους συντελεστές του PID ελεγκτή ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εξίσωση:

$$J = \sum_0^t (Z_{SM}''(t))^2 dt \quad (5.30)$$

και ως τιμή καταλληλότητας του αλγορίθμου ορίζεται η παρακάτω εξίσωση 5.31:

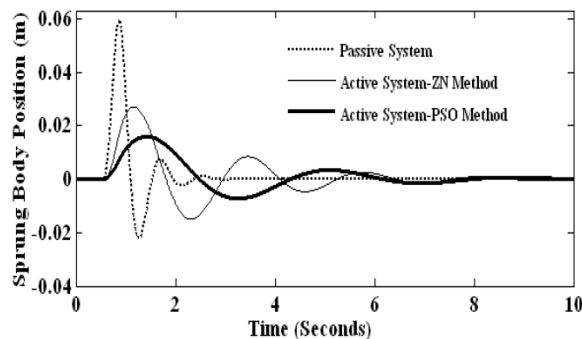
$$J_F = \frac{100}{1+100J} \quad (5.31)$$

5.4.1 Αποτελέσματα

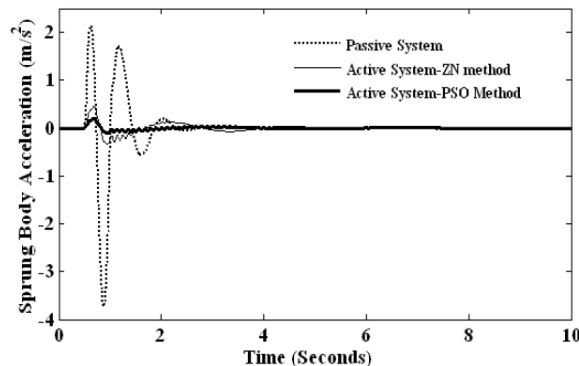
Για την βελτιστοποίηση της δυναμικής απόδοσης ενός συστήματος ανάρτησης οχήματος ρυθμίστηκε ένας ελεγκτής PID με τη μέθοδο PSO. Οι συντελεστές υπολογίστηκαν με σκοπό την ελαχιστοποίηση της εξίσωσης 5.30. Έγινε μοντελοποίηση του προβλήματος στο Matlab με τη χρήση δύο διαταραχών για τον έλεγχο της απόδοσης του ελεγκτή και σύγκριση τους με έναν ελεγκτή ρυθμισμένο από την μέθοδο Ziegler-Nichols. Τα αποτελέσματα παραθέτονται στη συνέχεια:[25]

$$K_p = 4912.38, K_i = 2935.90, K_d = 22.61$$

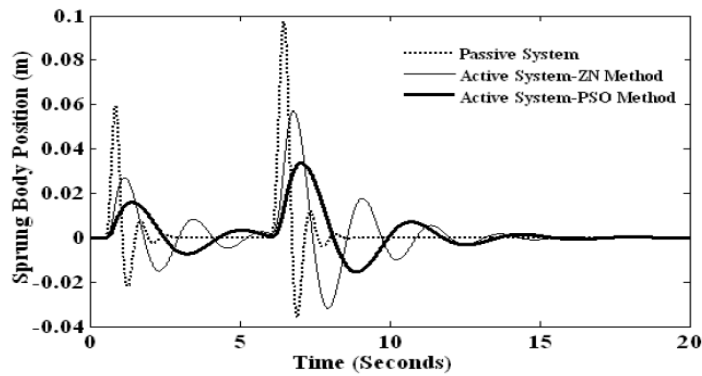
Στις εικόνες 5.4 και 5.5 παρουσιάζεται η δυναμική απόκριση του συστήματος, στην περίπτωση παθητικής ανάρτησης, ενεργητικής ανάρτησης με ελεγκτή από τη μέθοδο Ziegler-Nichols και ενεργή ανάρτηση με ελεγκτή από τη μέθοδο PSO, για μία διαταραχή. Στα σχήματα είναι φανερό ότι η μέθοδος απόδοση του ελεγκτή PID με τη μέθοδο PSO είναι μεγαλύτερη από τη σημαντική μέθοδο Ziegler-Nichols.



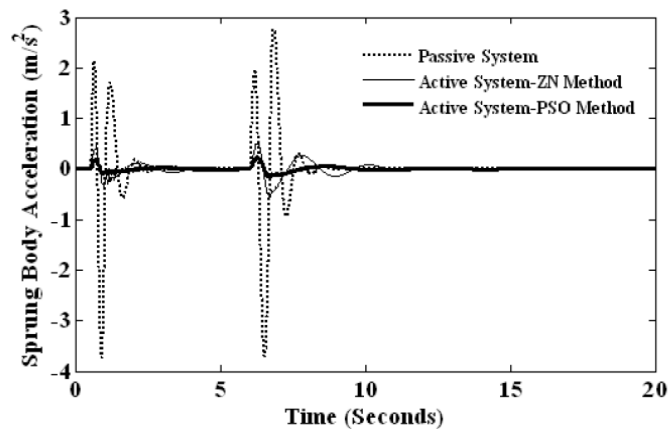
Εικόνα 5.4 «Η απόκριση της θέσης του οχήματος για προσομοίωση μιας διαταραχής» [25]



Εικόνα 5.5 «Η απόκριση της επιτάχυνσης του οχήματος για προσομοίωση μιας διαταραχής»[25]



Εικόνα 5.6 «Η απόκριση της θέσης του οχήματος για προσομοίωση δύο διαταραχών»[25]



Εικόνα 5.7 «Η απόκριση της επιτάχυνσης του οχήματος για προσομοίωση δύο διαταραχών»

Στις εικόνες 5.6 και 5.7 παρουσιάζεται η δυναμική απόκριση του συστήματος, στην περίπτωση παθητικής ανάρτησης, ενεργητικής ανάρτησης με ελεγκτή από τη μέθοδο Ziegler-Nichols και ενεργή ανάρτηση με ελεγκτή από τη μέθοδο PSO, για προσομοίωση με δύο διαταραχές. Στα σχήματα είναι φανερό ότι η μέθοδος απόδοση του ελεγκτή PID με τη μέθοδο PSO είναι μεγαλύτερη από τη σημαντική μέθοδο Ziegler-Nichols.[25]

5.4.2 Συμπεράσματα

Σε αυτή την αναφορά παρουσιάστηκε η ρύθμιση ελεγκτή PID με τη μέθοδο PSO. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά της μεθόδου Ziegler-Nichols και έδειξαν:

- ότι η μέθοδος PSO παρέχει καλύτερη δυναμική απόκριση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ

ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

. Απώτερος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ερευνητική εμβάθυνση στον τομέα της εφαρμογής συμβατικών (κατά κύριο λόγο) συστημάτων ελέγχου σε προκαθορισμένα τμήματα κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος: στον ηλεκτρικό κινητήρα και τις αναρτήσεις.

Με βάση τα παραπάνω, η διπλωματική εργασία ξεκινάει με μια ιστορική αναδρομή για την εμφάνιση των πρώτων οχημάτων, έως και την σημερινή εποχή που χαρακτηρίζεται από την ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη χρήσης υβριδικών/ηλεκτρικών οχημάτων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα μέρη κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος με έμφαση να δίνεται στον ηλεκτρικό κινητήρα, τα συστήματα ισχύος, τα είδη των συσσωρευτών, καθώς και τις αναρτήσεις. Έπειτα, παρουσιάζεται συνοπτικά η έννοια και η θεωρία του ελεγκτή PID που αποτελεί (αν και συμβατικό σύστημα ελέγχου) μια από τις βασικές επιλογές της ερευνητικής κοινότητας στην μελέτη κίνησης ενός οχήματος.

Ως επόμενο βήμα, παρουσιάζεται το βασικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Ειδικότερα ακόμα παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο του εκάστοτε τμήματος κίνησης ενός οχήματος (π.χ. κινητήρας και αναρτήσεις) και αναλύεται μια επιλεγμένη σειρά μελετών της βιβλιογραφίας στον τομέα εφαρμογής συστημάτων ελέγχου. Ειδικότερα, αναλύονται οι σύγχρονες μέθοδοι "tuning" ενός ελεγκτή PID με χρήση αλγορίθμου της Τεχνητής Νοημοσύνης (π.χ. Γενετικοί Αλγόριθμοι, Νευρωνικά δίκτυα) προσφέροντας έτσι στους μηχανικούς νέες μεθόδους αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων. Επιπλέον γίνεται η σύγκριση και η αξιολόγηση τους με συμβατικές μεθόδους ρύθμισης ελεγκτών PID όπως είναι για παράδειγμα η κλασική μέθοδος Ziegler-nichols. Μελλοντική επέκταση αυτής της διπλωματικής θα μπορούσε να είναι.

- Ο πειραματικός έλεγχος και η επαλήθευση αυτών των μεθόδων.
- Η εφαρμογή μοντέρνων συστημάτων ελέγχου.
- Η εφαρμογή σε πραγματικά οχήματα.
- Η περεταίρω εμβάθυνση στις μεθόδους που αναλύθηκαν.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ / ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ευφροσύνη Ζώτου, «Μεταπτυχιακή εργασία: ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ», Ε.Μ.Π Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ».
2. Παναγιώτης Βουγιουκλάκης, Μιχαήλ Κοντογιώργος «ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : Ηλεκτρικό όχημα», ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ.
3. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ ΦΡΑΓΚΑΚΗ «ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ», ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ.
4. Ιωάννης Κακεπάκης, « ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ», Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΩΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
5. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΛΕΙΔΑΡΑΣ, «ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Αξιολόγηση Επενδυτικού Πλάνου Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων», Α.Π.Θ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ.
6. Γεώργιος Καπετανάκης, Πέτρος Καραμπίλας, «e-book: Υβριδική τεχνολογία αυτοκινήτων».
7. Ευστάθιος Πατσιάς, «Διπλωματική εργασία: Μελέτη και κατασκευή ηλεκτροκινητήριου συστήματος υβριδικού οχήματος- Σχεδιασμός και κατασκευή ηλεκτρονικού κυκλώματος ελέγχου της υβριδικής κατάστασης».
8. Αναστασία Ντεμίρη, «Πτυχιακή εργασία: Συγκριτική μελέτη μεταξύ συμβατικού, ηλεκτρικού και υβριδικού οχήματος», ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.
9. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ Ι. ΙΩΑΝΝΗΣ, «ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Η τεχνολογία των

- υβριδικών οχημάτων. Σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις με επίκεντρο την προστασία του περιβάλλοντος και των συμβατικών ενεργειακών πόρων». Α.Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ.»
10. Ευάγγελος Χατζητζάνος, «ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Έλεγχος συστήματος ενεργητικής ανάρτησης σε περιβάλλον *veDYNA* και *Simulink*», ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
 11. X.D. Xue, K.W.E. Cheng, Y.J. Bao «Study of art of automotive active suspensions».
 12. Έλεγχος διεργασιών, Νταουτίδης, Π., Μαστρογεωργόπουλος Σπ, Παπαδοπούλου Σημ., Έκδοση: 1^η Έκδοση/2012, ISBN: 978-960-418-390-6, Διαθέτης (Εκδότης): ΕΚΔΟΣΕΙΣ Α. ΤΖΙΟΛΑ & ΥΙΟΙ Α.Ε»
 13. Deacha Puangdownreong, «Optimal PID Controller Design for DC Motor Speed Control System with Tracking and Regulating Constrained Optimization via Cuckoo Search»
 14. Xin-She Yang, Suash Deb, «Cuckoo Search via Levy Flights».
 15. Δημήτριος Γονιδάκης, «Μεταπτυχιακή Διατριβή», Πανεπιστήμιο Πειραιώς Τμήμα Πληροφορικής.
 16. Ελένη Γ. Μπίκου, «ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Ευρετικοί αλγόριθμοι τύπου σμήνους & αποικίας μυρμηγκιών», Α.Π.Θ. ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ.
 17. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΑΚΑΛΗΣ, «ΔΙΠΛΩΜΑΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΟΣ BLDC ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΣΗΣ», Α.Π.Θ Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
 18. Poomyos Payakkawan, Kitdakorn Klomkarn and Pitikhate Sooraksa, «Dual-line Pid Controller based on PSO for Speed Control of DC motors», Department of Information Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
 19. J,G Ziegler and Nichols, «Optimum settling for automatic controllers»,1942.
 20. Ali Takieldeem and Ahmed Mahmoud, «Optimal PID Tuning for DC Motor Speed Controller Based on Genetic Algorithm».
 21. Raghu Chandra Garimella, «Modeling and PID control of the brushless DC motor

- with the help of Genetic Algorithm».
22. Mohammad heidari, «Design a PID Controller for Suspension System by Back Propagation Neural Network».
23. ΘΕΟΔΟΣΗ-ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΛΑΟΥΡΑ, « Διπλωματική εργασία: Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και εφαρμογές στα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου», ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ».
24. ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΠΑΡΛΑΣ, «Μεταπτυχιακή εργασία: ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ», Ε.Μ.Π. Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ».
25. Srinivasa Rao Gampa, «OPTIMUM CONTROLLER DESIGN USING PSO FOR VEHICLE ACTIVE SUSPENSION SYSTEM CONSIDERING MATLAB SIMULINK MODELING BASED ROAD PROFILES».
26. V M Venkateswara Rao, «Performance Analysis of Speed Control of DC Motor Using P, PI, PD and PID Controllers».
27. Suha Salah Eldin Awad, « Using ant coly optimization algorithm for direct current motor speed controller».
28. <https://www.wikipedia.org/>.
29. www.dolcera.com.