



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΟΥ
ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ
ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΔΙΑΓΝΩΣΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Κ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων-Μεταλλουργού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Δ. Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΟΥ
ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ
ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΔΙΑΓΝΩΣΗ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Κ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων-Μεταλλουργού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Δ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Ε. ΚΑΚΑΡΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Κ. ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Δ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Ε. ΚΑΚΑΡΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Κ. ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Κ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Η. ΥΦΑΝΤΗΣ, Καθ. Σ.Ν.Δ.
6. Ε. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Ν. ΑΡΕΤΑΚΗΣ, Λεκτ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2013

Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από την
Ανωτατη Σχολή Μηχανολόγων του Ε. Μ.
Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων
του συγγραφέα (Ν 5343/1932, Άρθρο 202)

Αφιερώνεται στους γονείς μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η πραγματοποίηση έρευνας σχετικά με την διάγνωση της λειτουργικής κατάστασης και τον προσδιορισμό βλαβών κινητήρων Diesel με ιδιαίτερη έμφαση στην μέτρηση και την επεξεργασία λειτουργικών μεγεθών. Η διατριβή εκπονήθηκε το χρονικό διάστημα Μάιος 2007 – Μάρτιος 2012, στον Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Δ. Θ. Χουντάλα.

Η αμέριστη συμπαράσταση του επιβλέποντα Καθηγητή κ. Δ. Θ. Χουντάλα καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής υπήρξε καθοριστικός παράγοντας για την πραγματοποίηση και επιτυχή έκβαση αυτής της ερευνητικής προσπάθειας. Του οφείλονται ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση, την συμβολή, την υποστήριξη και τις ευκαιρίες που μου προσέφερε.

Θα ήθελα, παράλληλα, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τα άλλα δυο μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Ε. Κακαρά και τον Καθηγητή κ. Κ. Μαθιουδάκη για την αμέριστη ενθάρρυνση και τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσαν.

Ευχαριστίες οφείλονται στον Διευθυντή του Εργαστηρίου Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, Καθηγητή κ. Κ.Δ. Ρακόπουλο, ο οποίος μου έδωσε πρόσβαση στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου, όπου πραγματοποιήθηκαν αρκετές από τις πειραματικές διερευνήσεις, καθώς στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ε. Γιακουμή για τη βοήθεια που μου προσέφερε σχετικά με αυτές.

Επιθυμώ, επίσης, να εκφράσω ευχαριστίες στις Ναυτιλιακές εταιρείες TCM SA, Anangel Maritime Services Inc και Minerva Marine Inc καθώς και στην Διεύθυνση Νήσων της ΔΕΗ ΑΕ που μου προσέφεραν την δυνατότητα πραγματοποίησης πειραματικών διερευνήσεων στις εγκαταστάσεις τους και σε ναυπηγεία με τα οποία συνεργάζονται αλλά και την πρακτική εμπειρία σχετικά με την λειτουργία και τις ανάγκες διάγνωσης στους κινητήρες που διαθέτουν.

Σημαντική υπήρξε η συμβολή του τεχνικού προσωπικού του Εργαστηρίου Μ.Ε.Κ. και συγκεκριμένα των κ.κ Χ. Φλώρου, Α. Κανταρτζή, Δ. Αγγελίδη, Γ. Νέζη, Ν. Ρούμβου και Ε. Κανταρτζή στην εκτέλεση των πειραματικών διερευνήσεων και της κ. Φ. Κανακάκη που μου προσέφερε διοικητική υποστήριξη.

Κλείνοντας, εκφράζω την αγάπη και την ευγνωμοσύνη μου, πρωτίστως στους γονείς μου, Κίμωνα και Μίνα, οι οποίοι δημιούργησαν τις συνθήκες και στάθηκαν αρωγοί στην πρόοδό μου, καθώς και στον αδερφό μου Γιάννη και την σύντροφό μου Αθηνά για την συνεχή στήριξη και συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια.

Αντώνης Κ. Αντωνόπουλος

Αθήνα, Αυγουστος 2013

ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	.....	i
Συνοπτικά Περιεχόμενα	.....	iii
Περιεχόμενα	.....	iv
Περίληψη	.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή	.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Καταγραφή μεγεθών σχετιζομένων με την διαγνωστική των κινητήρων Diesel – Ανάπτυξη μετρητικού εξοπλισμού	.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων μεγεθών που αφορούν στη διάγνωση	.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Περιγραφή λογισμικών μέτρησης και διάγνωσης	.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ανάπτυξη, κατασκευή και εφαρμογή πρωτότυπης συσκευής για την καταγραφή της στιγμιαίας και μέσης στρεπτικής ροπής	.....	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Η διακύμανση στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής σαν πηγή σφαλμάτων στα αποτελέσματα της διάγνωσης	.....	179
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Ανάλυση της επίδρασης της διακύμανσης φορτίου κατά την μέτρηση στα αποτελέσματα της διάγνωσης	.....	249
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Εφαρμογή και Αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθόδου σε κινητήρες μεγάλου μεγέθους	.....	277
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Σύνοψη και Συμπεράσματα – Στοιχεία Πρωτοτυπίας – Προτάσεις για Μελλοντική εργασία	.....	303
Παράρτημα Α Υπολογισμός της ροπής συναρτήσει της ορθής ανηγμένης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του άξονα	.....	321
Παράρτημα Β Περιγραφή της ηλεκτρονικής συσκευής που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της στιγμιαίας και μέσης ροπής	.....	327
Παράρτημα Γ Κώδικας μικροελεγκτή της συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ροπής	.....	345

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Προλογος	i
Συνοπτικά Περιεχομενα	iii
Περιεχόμενα	iv
Περίληψη	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Η θέση του μεγάλου κινητήρα Diesel σήμερα	9
1.2 Αναγκαιότητα μεθόδων επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel καθώς και απαιτήσεις από αυτές.	10
1.2.1 Ανάγκες που επιβάλλουν την χρήση μεθόδων επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel.	10
1.2.2 Βασικές αρχές μεθόδων επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel.....	10
1.2.3 Απαιτήσεις από τις μεθόδους επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel.....	11
1.3 Επισκόπηση Διαγνωστικών Τεχνικών Κινητήρων Diesel.....	13
1.3.1 Διαγνωστικές Τεχνικές Επεξεργασίας Λειτουργικών Δεδομένων με μεθόδους στατιστικής, νευρωνικών δικτύων ή γενετικών αλγόριθμων.....	13
1.3.2 Διαγνωστικές Τεχνικές με Βάση την Ανάλυση Κραδασμών και Στρεπτικών Ταλαντώσεων	14
1.3.3 Διαγνωστικές Τεχνικές Ανάλυσης Ακουστικών Σημάτων	15
1.3.4 Διαγνωστικές Τεχνικές με Προσομοίωση της Λειτουργίας του Κινητήρα.....	15
1.4 Η λογική και τα πλεονεκτήματα της υπο μελέτης διαγνωστικής τεχνικής.	17
1.5 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας	18
1.5.1 Αντιμέτωπιση περιορισμών των υφιστάμενων διατάξεων και λογισμικών για την μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων και της πίεσης σάρωσης.	19

1.5.2	Συστηματικοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας του σήματος της πίεσης κυλίνδρου και διερεύνηση της επίδρασης της επεξεργασίας στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της διάγνωσης.....	20
1.5.3	Ανάπτυξη συσκευής μέτρησης της μέσης και στιγμιαίας στρεπτικής ροπής του κινητήρα.....	22
1.5.4	Ανάλυση της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου στα αποτελέσματα της διάγνωσης.....	24
1.5.5	Ανάλυση της επίδρασης της διακύμανσης του φορτίου στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων στα αποτελέσματα της διάγνωσης.....	26
1.5.6	Αξιολόγηση της διαγνωστικής τεχνικής.....	27
1.6	Βιβλιογραφία.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Καταγραφή μεγεθών σχετιζομένων με την διαγνωστική των κινητήρων Diesel – Ανάπτυξη μετρητικού εξοπλισμού.....		
2.1	Μέτρηση Πίεσης Θαλάμου Καύσης.....	35
2.1.1	Εισαγωγή.....	35
2.1.2	Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας – μεταλλάκτης.....	37
2.1.3	Μονάδα διασύνδεσης του αισθητήρα.....	42
2.1.4	Αξιολόγηση της μετρητικής διάταξης.....	48
2.2	Μέτρηση Πίεσης Σάρωσης.....	53
2.2.1	Εισαγωγή.....	53
2.2.2	Αισθητήρας Πίεσης Σάρωσης.....	53
2.2.3	Μονάδα Διεπαφής αισθητήρα.....	55
2.3	Μονάδα ψηφιοποίησης του σήματος.....	56
2.4	Περιγραφή Ολοκληρωμένης Συσκευής Λήψης Μετρήσεων Πίεσης Καύσης για Βιομηχανική Εφαρμογή.....	57
2.5	Ορολογία.....	59
2.6	Αναφορές.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων μεγεθών που αφορούν στη διάγνωση	63
3.1 Ρύθμιση παραμέτρων ψηφιοποίησης	63
3.2 Προσδιορισμός του άνω νεκρού σημείου	64
3.2.1 Χρήση αισθητήρα που παρέχει τετραγωνικό παλμό.....	65
3.2.2 Χρήση αισθητήρα που παρέχει σημείο τομής με τον οριζόντιο άξονα.....	68
3.2.3 Υπολογιστική μέθοδος	71
3.3 Αφαίρεση θορύβου	73
3.4 Αντιστοίχιση μετρημένων τιμών πίεσης στη γωνία στροφάλου.....	78
3.5 Διόρθωση Θερμικού Ρεύματος Αισθητήρα.....	80
3.6 Μετατροπή μετρημένων τιμών τάσης σε τιμές πίεσης.....	84
3.7 Υπολογισμός μέσου κύκλου και αναφορά του σε γωνία στροφάλου.....	85
3.8 Πρωτότυπη διαδικασία εξομάλυνσης με εφαρμογή στην στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής και τη πίεση καύσης.....	85
3.9 Ορολογία.....	88
3.10 Αναφορές	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Περιγραφή λογισμικών μέτρησης και διάγνωσης	91
4.1 Εισαγωγή.....	91
4.2 Συνοπτική περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης του κινητήρα	91
4.2.1 Προσομοίωση των διεργασιών εντός του κυλίνδρου.....	92
4.2.1.1 Μοντέλο απωλειών θερμότητας.	92
4.2.1.2 Διαρροές Αερίου από τον Κύλινδρο	92
4.2.1.3 Μοντέλο ανάπτυξη δέσμης καυσίμου.....	93
4.2.1.4 Μοντέλο διείσδυσης αέρα στη δέσμη	94
4.2.1.5 Περιγραφή της καύσης.....	94
4.2.2 Προσομοίωση συστήματος έγχυσης καυσίμου.....	95

4.2.3	Προσομοίωση των οχετών εισαγωγής και εξαγωγής	97
4.2.4	Προσομοίωση της απόπλυσης	97
4.2.5	Προσομοίωση του υπερπληρωτή.....	98
4.2.6	Προσομοίωση του ψυγείου αέρα	99
4.3	Σταθερές του μοντέλου προσομοίωσης.....	100
4.3.1	Σταθερές που αφορούν τις διεργασίες εντός του θαλάμου καύσης	100
4.3.2	Σταθερές που αφορούν στο σύστημα έγχυσης καυσίμου.....	101
4.3.3	Σταθερές που αφορούν στους υπερπληρωτές.....	101
4.3.4	Σταθερές που αφορούν στο ψυγείο αέρα	101
4.3.5	Σταθερές που αφορούν στον οχετό απαγωγής καυσαερίων και το φίλτρο αέρα	102
4.4	Περιγραφή της μεθοδολογίας διάγνωσης.....	102
4.4.1	Διαδικασία αρχικής βαθμονόμησης του μοντέλου	104
4.4.1.1	Γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά	104
4.4.1.2	Συνθήκες λειτουργίας αναφοράς	105
4.4.2	Δεδομένα εισόδου για την διάγνωση.....	106
4.4.3	Μεθοδολογία Υπολογισμού των Σταθερών του Μοντέλου	108
4.4.3.1	Περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού των σταθερών	108
4.4.3.2	Μέθοδος εκτίμηση των σταθερών του μοντέλου.....	109
4.5	Κριτήριο βλάβης και αποτελέσματα διάγνωσης	110
4.5.1	Εκτιμήσεις μεγεθών από το δυναμοδεικτικό διάγραμμα πίεσης.....	112
4.5.1.1	Ισχύς.....	112
4.5.1.2	Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης	112
4.5.1.3	Γωνία ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής.....	112

4.5.2	Εκτιμήσεις μεγεθών βασιζόμενες στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας	113
4.5.2.1	Γωνία έναυσης	114
4.5.2.2	Κατανάλωση Καυσίμου	114
4.5.3	Αξιολόγηση υποσυστημάτων – δείκτες κατάστασης	115
4.6	Περιγραφή του διαγνωστικού λογισμικού	116
4.6.1	Διαδικασία Διάγνωσης	118
4.6.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων διάγνωσης.....	119
4.6.2.1	Συνολική απεικόνιση αποτελεσμάτων	119
4.6.2.2	Προτεινόμενες Ρυθμίσεις.....	119
4.6.2.3	Ραβδογράμματα.....	120
4.6.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων διάγνωσης με αντίστοιχα δεδομένα δοκιμών παραλαβής (Compare to Shop and Sea Trials).....	120
4.6.2.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων διάγνωσης με αποτελέσματα προσομοίωσης «νέου κινητήρα» στις ίδιες συνθήκες	122
4.6.2.6	Σχετικά αποτελέσματα	123
4.6.2.7	Ιστορικό αποτελεσμάτων.....	123
4.6.3	Διαγράμματα Κυλίνδρων (Diagnosis Diagrams).....	124
4.6.4	Προσομοιωτής	125
4.7	Περιγραφή του μετρητικού λογισμικού	126
4.7.1	Ρυθμίσεις λογισμικού	128
4.7.2	Βασικές λειτουργίες.....	130
4.7.2.1	Ανίχνευση συσκευών.....	130
4.7.2.2	Μετρούμενα μεγέθη	131
4.7.2.3	Καθορισμός παραμέτρων ψηφιοποίησης	131
4.7.2.4	Εσωτερική διερεύνηση σφάλματος υλικού.....	132

4.7.2.5	Εμφάνιση δυο καναλιών στο ίδιο γράφημα.....	132
4.8	Ορολογία- Συμβολισμοί.....	132
4.9	Βιβλιογραφία.....	135
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ανάπτυξη, κατασκευή και εφαρμογή πρωτότυπης συσκευής για την καταγραφή της στιγμιαίας και μέσης στρεπτικής ροπής 139		
5.1	Εισαγωγή	139
5.2	Μέτρηση της ροπής με την χρήση μηκυνσιομέτρων.....	142
5.2.1	Η μέτρηση της τροπής στην επιφάνεια του άξονα με χρήση μηκυνσιομέτρων	142
5.2.1.1	Κριτήρια επιλογής μηκυνσιομέτρων.....	143
5.2.1.2	Αρχή λειτουργίας	145
5.2.1.3	Ο υπολογισμός της τροπής με την γέφυρα Wheatstone	146
5.2.2	Υπολογισμός της ροπής από το σήμα εξόδου της διάταξης των μηκυνσιομέτρων	148
5.2.3	Βαθμονόμηση.....	149
5.3	Ανάπτυξη συσκευής μέτρησης και ασύρματης μετάδοσης των σημάτων των μηκυνσιομέτρων.....	150
5.3.1	Μονάδα μέτρησης και μετάδοσης.....	151
5.3.1.1	Τμήμα Διαμόρφωσης και Ψηφιοποίησης	154
5.3.1.2	Τμήμα Λειτουργίας.....	155
5.3.1.3	Κώδικας Μικροελεγκτή.....	155
5.3.2	Μονάδα λήψης μετρήσεων	155
5.3.3	Υπολογισμός αναγκαίων πομποδεκτών	159
5.3.4	Λογισμικό Οδήγησης και Λήψης Μετρήσεων από την Διάταξη Μέτρησης της Στιγμιαίας Ροπής.....	160
5.4	Αξιολόγηση Διάταξης με Εργαστηριακά Όργανα.	161
5.5	Εφαρμογή της Διάταξης Μέτρησης Ροπής	162

5.5.1	Εφαρμογή της διάταξης μέτρησης της ροπής στο εργαστήριο.....	162
5.5.2	Εφαρμογή της διάταξης μέτρησης της ροπής σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής.....	167
5.5.2.1	Συνοπτική περιγραφή του κινητήρα	167
5.5.2.2	Προετοιμασία της μέτρησης.....	169
5.5.2.3	Μετρητική διαδικασία και βαθμονόμηση.....	170
5.5.2.4	Εκτίμηση της μέσης ροπής	171
5.5.2.5	Εκτίμηση Στιγμιαίας Ροπής	172
5.6	Ορολογία και Συμβολισμοί	175
5.7	Βιβλιογραφία.....	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Η διακύμανση στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής σαν πηγή σφαλμάτων στα αποτελέσματα της διάγνωσης		
6.1	Αρχές, μέθοδοι και εξοπλισμός μέτρησης γωνιακής ταχύτητας.....	180
6.1.1	Βασικές αρχές της μέτρησης της στιγμιαίας γωνιακής ταχύτητας.....	180
6.1.2	Μέθοδοι βασισμένες σε ρολόι/ μετρητή.....	181
6.1.2.1	Μέτρηση χρόνου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς παλμούς.....	181
6.1.2.2	Μέτρηση παλμών σε προκαθορισμένο χρόνο	182
6.1.2.3	Συνδυασμένη μέθοδος.....	182
6.1.3	Μέθοδοι βασισμένες σε αναλογοψηφιακή μετατροπή.....	183
6.1.4	Αμιγώς υπολογιστικές μέθοδοι	183
6.2	Προτεινόμενη Μέθοδος- Συσκευή Μέτρηση Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής	183
6.2.1	Ανάπτυξη Συσκευής	185
6.2.2	Αισθητήρες Θέσης Γωνίας Στροφάλου- Ο οπτικός κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου Kistler Type 2613B.....	186
6.2.3	Ανάπτυξη Κώδικα Μέτρησης Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής	189

6.2.3.1	Εκκίνηση ροής κώδικα.....	191
6.2.3.2	Ρουτίνα διακοπής χρονισμένη από την υπερχείλιση του μετρητή C1.....	193
6.2.3.3	Ρουτίνα διακοπής που οδηγείται από την ανίχνευση αύξουσας ακμής.....	193
6.2.4	Αξιολόγηση και Βαθμονόμηση Συσκευής Μέτρησης Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής.....	194
6.2.5	Λογισμικό Οδήγησης και Λήψης Μετρήσεων από την Διάταξη Μέτρησης της Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής.....	195
6.3	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	195
6.3.1	Περιγραφή της Πειραματικής Κλίνης κινητήρα Ricardo / Hydra.....	196
6.3.1.1	Περιγραφή κινητήρα.....	196
6.3.1.2	Πέδη.....	197
6.3.1.3	Πίνακας ελέγχου.....	197
6.3.2	Διάταξη ταυτόχρονης μέτρησης πίεσης καύσης με δυο μεθόδους δειγματοληψίας και στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής.....	198
6.3.3	Ληφθείσες μετρήσεις και επεξεργασία.....	200
6.4	Μεθοδολογία προσομοίωσης μέτρησης χρονικής δειγματοληψίας από μέτρηση γωνιακής δειγματοληψία και αντίστροφα.....	201
6.4.1	Μέθοδος προσομοίωση της μέτρησης με χρονική δειγματοληψία.....	202
6.4.2	Μέθοδος προσομοίωσης της μέτρησης με γωνιακής δειγματοληψίας.....	203
6.4.3	Αξιολόγηση μεθοδολογίας προσομοίωσης μέτρησης με διαφορετική δειγματοληψία.....	204
6.5	Παρουσίαση του σφάλματος.....	205
6.5.1	Ταχύτητα περιστροφής.....	206
6.5.2	Πραγματικό και Θεωρούμενο Βήμα Μέτρησης.....	208
6.5.3	Μέθοδος ανίχνευσης σφάλματος με συμβατικές μετρήσεις.....	210

6.5.4	Χάρτες σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου για τον υπό μελέτη κινητήρα	211
6.6	Η επίδραση του σφάλματος στην μετρημένη πίεση καύσης	213
6.6.1	Περίπτωση (Α) – Ενιαίο βήμα μέτρησης στις δυο περιστροφές.....	213
6.6.2	Περίπτωση (Β) – Διαφορετικό βήμα μέτρησης ανά περιστροφή.....	215
6.7	Η επίδραση του σφάλματος σε εκτιμήσεις λειτουργικών μεγεθών του κινητήρα.....	218
6.7.1	Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος	219
6.7.2	Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση της θέσης έναυσης.....	221
6.7.3	Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση του ρυθμού καύσης.....	222
6.7.4	Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης μέσης πίεσης	224
6.8	Πρόταση νέων εμπειρικών μεθόδων για την διόρθωση του σφάλματος λόγω διακύμανσης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής.....	225
6.8.1	Μέθοδος “Α”	225
6.8.2	Μέθοδος “Β”	227
6.8.3	Μέθοδος “Γ”	230
6.8.4	Αξιολόγηση μεθόδων διόρθωσης του σφάλματος.....	232
6.8.4.1	Ικανότητα Διόρθωσης στην Πίεση Θαλάμου Καύσης	232
6.8.4.2	Ικανότητα Διόρθωσης Σφάλματος στην Εκτίμηση της Θέσης Έναυσης.....	234
6.9	Συσχέτιση του σφάλματος εκτίμησης ισχύος με την ταχύτητα περιστροφής και την ισχύ μεγάλων κινητήρων πρόωσης πλοών και ηλεκτροπαραγωγής	238
6.10	Ορολογία και Συμβολισμοί	244
6.11	Αναφορές	245

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Ανάλυση της επίδρασης της διακύμανσης φορτίου κατά την μέτρηση στα αποτελέσματα της διάγνωσης	249
7.1 Μεθοδολογία εκτίμησης της διακύμανσης φορτίου και διόρθωσης της ισχύος με χρήση μέτρησης πίεσης κυλίνδρου αναφοράς.....	251
7.2 Μεθοδολογία εκτίμησης της διακύμανσης φορτίου και διόρθωσης της ισχύος από την πίεση σάρωσης.....	253
7.3 Μεθοδολογία διόρθωσης βασικών μεγεθών του κινητήρα με την διακύμανση του φορτίου.....	255
7.4 Περιγραφή της μετρητικής διάταξης για την πειραματική διερεύνηση.....	256
7.5 Συγκριτική αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων- Εφαρμογή σε δίχρονο κινητήρα.....	258
7.5.1 Σκοπός και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	258
7.5.2 Η επίδραση της διακύμανσης φορτίου στην πίεση των κυλίνδρων.....	260
7.5.3 Η επίδραση της διακύμανσης φορτίου στην ισχύ των κυλίνδρων.....	262
7.5.4 Αξιολόγηση των μεθόδων για την διόρθωση της εκτιμούμενης ισχύος κυλίνδρων.....	263
7.6 Η επίδραση της εφαρμογής ρυθμίσεων βασισμένες σε λανθασμένες εκτιμήσεις λόγω διακύμανση του φορτίου. - Εφαρμογή σε τετράχρονο κινητήρα.....	265
7.6.1 Σκοπός και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	265
7.6.2 Επίδραση της διακύμανσης φορτίου στην πίεση των κυλίνδρων- εντοπισμός του προβλήματος.....	267
7.6.3 Η επίδραση της διακύμανσης του φορτίου στην εκτίμηση της ισχύος των κυλίνδρων.....	268
7.6.4 Εφαρμογή διόρθωση της ισχύος.....	269
7.6.5 Εφαρμογή Διόρθωσης στην κατανάλωση καυσίμου.....	272
7.6.6 Ρύθμιση του κινητήρα για την εξομάλυνση της ισχύος των κυλίνδρων στη περίπτωση διακύμανσης φορτίου στη διάρκεια της μέτρησης.....	273
7.7 Ορολογία και Συμβολισμοί.....	275

7.8	Αναφορές	276
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Εφαρμογή και Αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθόδου σε κινητήρες μεγάλου μεγέθους.....		
277		
8.1	Αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθόδου σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής	278
8.1.1	Συνοπτική περιγραφή του κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής 9K60MC-S	278
8.1.2	Διαδικασία μέτρησης της πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου.....	278
8.1.3	Διαδικασία μέτρησης της πραγματικής ισχύος.....	282
8.1.4	Μετρητική διαδικασία.....	282
8.1.5	Ανίχνευση θέσης έναυσης και η λειτουργία του συστήματος μεταβλητού χρόνου έγχυσης.....	283
8.1.6	Η επίδραση της μεταβολής της προπορείας στην πίεση καύσης του κυλίνδρου.....	286
8.1.7	Αποτελέσματα αξιολόγησης της εκτίμησης της ισχύος από την διαγνωστική μέθοδο	287
8.1.8	Αποτελέσματα αξιολόγησης της εκτίμησης της κατανάλωσης από την διαγνωστική μέθοδο	289
8.2	Αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθόδου σε ναυτικό κινητήρα σε πέδη. 291	
8.2.1	Ακρίβεια εκτίμησης της ισχύος.....	292
8.2.2	Εκτίμηση κατανάλωσης καυσίμου.....	294
8.2.3	Εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.....	294
8.3	Εφαρμογή της διαγνωστικής μεθόδου για τον περιορισμό της κατανάλωσης ναυτικού κινητήρα σε ποντοπόρο πλοίο.....	295
8.3.1	Επίδραση της μεταβολής προπορείας στα διαγράμματα της πίεσης.....	297
8.3.2	Επίδραση της μεταβολής της προπορείας έγχυσης στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας.....	298
8.3.3	Επίδραση της μεταβολής της προπορείας έγχυσης στην κατανάλωση καυσίμου.....	299

8.4	Ορολογία.....	300
8.5	Βιβλιογραφία.....	300
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Σύνοψη και Συμπεράσματα – Στοιχεία Πρωτοτυπίας – Προτάσεις για Μελλοντική εργασία.....		
303		
9.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα Διατριβής.....	303
9.2	Στοιχεία Πρωτοτυπίας	315
9.3	Προτάσεις για μελλοντική εργασία	318
9.4	Δημοσιεύσεις.....	319
Παράρτημα Α Υπολογισμός της ροπής συναρτήσει της ορθής ανηγμένης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του άξονα.....		
321		
A.1	Ανάλυση της ροπής σε διατμητικές τάσεις.....	321
A.2	Προσδιορισμός της διατμητικής ανηγμένης παραμόρφωσης	322
A.3	Προσδιορισμός διατμητικών τάσεων	323
A.4	Προσδιορισμός ορθών τάσεων	324
A.5	Υπολογισμός ορθών τάσεων από τις μετρήσιμες τροπές.....	325
A.6	Ορολογία και Συμβολισμοί.....	326
A.7	Βιβλιογραφία.....	326
Παράρτημα Β Περιγραφή της ηλεκτρονικής συσκευής που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της στιγμιαίας και μέσης ροπής.....		
327		
B.1	Μονάδα μέτρησης και μετάδοσης.....	327
B.2	Μονάδα λήψης μετρήσεων.....	338
B.3	Ορολογία και Συμβολισμοί.....	342
B.4	Βιβλιογραφία.....	344
Παράρτημα Γ Κώδικας μικροελεγκτή της συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ροπής.....		
345		
Γ.1	Δηλώσεις καταχωρητών (μεταβλητών).....	345
Γ.2	Εκκίνηση κώδικα	345
Γ.3	Ενεργοποίηση ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας	345

Γ.4	Καθορισμός λειτουργίας θυρών	346
Γ.5	Ενεργοποίηση ρολογιού αναφοράς κατάστασης και η υπηρεσία διακοπής	346
Γ.6	Έλεγχος στάθμης του συσσωρευτή.	348
Γ.7	Κατάσταση αναμονής	348
Γ.8	Έλεγχος ποιότητας επικοινωνίας	349
Γ.9	Λήψη και εφαρμογή ρυθμίσεων τμήματος διαμόρφωσης.....	349
Γ.10	Λήψη ρυθμίσεων συχνότητας δειγματοληψίας και διάρκειας μέτρησης.....	350
Γ.11	Λήψη ρυθμίσεων μέσω της μεταβλητής “status”	351
Γ.12	Ρουτίνα δειγματοληψίας και αποστολής μετρήσεων.....	352
Γ.13	Ρουτίνα εφαρμογής συχνότητας δειγματοληψίας.....	354
Γ.14	Ρουτίνα σειριακής αποστολής δεδομένων.....	355
Γ.15	Ορολογία και Συμβολισμοί	357
Γ.16	Βιβλιογραφία.....	357

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εντάσσεται στο γενικότερο πεδίο της διαγνωστικής των εμβολοφόρων κινητήρων Diesel. Το ζητούμενο από την εφαρμογή διαγνωστικών μεθόδων στους κινητήρες Diesel, είναι ο προσδιορισμός της λειτουργικής τους κατάστασης και η κατά το δυνατόν μονοσήμαντη διάγνωση βλαβών. Χρησιμοποιήθηκε και επεκτάθηκε η υφιστάμενη διαγνωστική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Δρ. Δ. Χουντάλα και η οποία βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση μοντέλου προσομοίωσης και μετρήσεων από μη-παρεμβατικές μεθόδους. Όπως έχει αποδειχθεί, υψίστης σημασίας για την διάγνωση είναι η μέτρηση των λειτουργικών μεγεθών του κινητήρα με αξιόπιστο τρόπο και η εν συνεχεία ορθή επεξεργασία τους. Όμως, η μέτρηση λειτουργικών μεγεθών, ιδιαίτερα σε μεγάλο μέγεθος κινητήρες στο πεδίο εφαρμογής, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και περιορισμούς. Παρόμοια δυσκολία παρουσιάζει η επεξεργασία και διαχείριση των λαμβανόμενων μετρήσεων. Σε αυτές τις δυο περιοχές επικεντρώνεται, κυρίως, η παρούσα διδακτορική διατριβή.

Με βάση τα ανωτέρω, σημεία εστίασης της παρούσας διατριβής αποτελούν η ανάπτυξη νέων και η εξέλιξη υφισταμένων τεχνικών μέτρησης και μεθοδολογιών επεξεργασίας μετρήσεων με σκοπό την γενικευμένη εφαρμογή σε κινητήρες Diesel μεγάλου μεγέθους που χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία και την ηλεκτροπαραγωγή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αξιολόγηση της διαγνωστικής τεχνικής μέσω της εκτέλεσης μετρήσεων σε ελεγχόμενο περιβάλλον και εν πλώ, χρησιμοποιώντας μετρητικό εξοπλισμό με την απαιτούμενη ακρίβεια για την μέτρηση των λειτουργικών μεγεθών (ισχύς, κατανάλωση καυσίμου, κλπ) που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση. Αυτό κατέστη εφικτό για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσας διατριβής λόγω των τεχνικών δυσκολιών που πηγάζουν από το μέγεθος των κινητήρων και των δυσκολιών εκτέλεσης δοκιμών (π.χ. εν πλώ). Ιδιαίτερα σημαντικό ήταν και το γεγονός ότι, για πρώτη φορά, έγινε λήψη μετρήσεων από δίχρονο κινητήρα μεγάλου μεγέθους, στην διάρκεια των εργοστασιακών δοκιμών σε πέδη.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ηλεκτρονικές διατάξεις για την καταγραφή του δυναμοδεικτικού διαγράμματος πίεσης, της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου και της στιγμιαίας ροπής. Στις δυο τελευταίες χρησιμοποιήθηκαν μικροελεγκτές για τους οποίους αναπτύχθηκαν εξειδικευμένοι κώδικες assembly. Συνδυάζοντας τις νέες διατάξεις με υφιστάμενες, αναπτύχθηκαν σύνθετες μετρητικές διατάξεις που κατέστησαν

δυνατή την πολύπλευρη μελέτη αντικειμένων, όπως είναι η επίδραση της διακύμανσης της στιγμιαίας ταχύτητας στη διάρκεια του κύκλου σε μετρήσεις σταθερού βήματος χρόνου και η επίδραση της διακύμανσης του φορτίου στη διάρκεια της μέτρησης. Για την οδήγηση των ανωτέρω διατάξεων αναπτύχθηκαν, εκτός του γενικής χρήσης μετρητικού λογισμικού, εξειδικευμένα λογισμικά σε περιβάλλον LabView. Παράλληλα αναπτύχθηκαν κώδικες επεξεργασίας μετρήσεων και εκτίμησης λειτουργικών μεγεθών του κινητήρα στο περιβάλλον Matlab και στη γλώσσα Fortran. Για τους σκοπούς της διατριβής πραγματοποιήθηκε πληθώρα πειραματικών διερευνήσεων στο εργαστήριο MEK, σε σταθμούς παραγωγής της ΔΕΗ, σε ναυτικούς κινητήρες εν πλω σε συνεργασία με Ναυτιλιακές εταιρείες και στα ναυπηγεία DAEWOO της Κορέας και SWS της Κίνας.

Στο 1ο Κεφάλαιο γίνεται συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση για την διάγνωση βλαβών σε κινητήρες diesel με έμφαση στα αντικείμενα μέτρησης και επεξεργασίας της μέτρησης. Αρχικά γίνεται εισαγωγή στο αντικείμενο και τις μεθόδους της διαγνωστικής κινητήρων diesel, μέσω της παράθεσης διαφορετικών προσεγγίσεων και της σύγκρισής τους. Επιπλέον δίνεται συνοπτική περιγραφή της βασικής φιλοσοφίας της υφιστάμενης διαγνωστικής τεχνικής ενώ αναφέρονται και τα συγκριτικά πλεονεκτήματά της σε σχέση με τις υπάρχουσες. Στη συνέχεια διεξάγεται μια εστιασμένη ανασκόπηση της ερευνητικής δραστηριότητας στα επιμέρους αντικείμενα που εξετάζονται στην διατριβή, προσδιορίζοντας την θέση της στο ερευνητικό πεδίο. Παράλληλα ορίζεται ο σκοπός και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Στο 2ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της πίεσης καύσης και, δευτερευόντως, της πίεσης σάρωσης. Παρουσιάζονται οι αισθητήρες με έμφαση στις δυνατότητες και τις αδυναμίες τους. Παρουσιάζεται και αξιολογείται η νέα μετρητική διάταξη που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Η νέα διάταξη αντιμετωπίζει έναν αριθμό προβλημάτων που παρουσιάζουν οι εμπορικές λύσεις κατά την εφαρμογή σε κινητήρες που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες και υπερνικά την ανάγκη χρήσης πολλών επιμέρους συσκευών / εξαρτημάτων για την μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων και της πίεσης σάρωσης. Περιγράφεται ο σχεδιασμός των τυπωμένων κυκλωμάτων που αναπτύχθηκαν και η επιλογή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται. Τέλος περιγράφεται η συνολική πρωτότυπη προτεινόμενη λύση για την διενέργεια μετρήσεων σε κινητήρες πρόωσης πλοίων και ηλεκτροπαραγωγής.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται συστηματοποίηση, ανάπτυξη και αξιολόγηση μεθόδων επεξεργασίας των πρωτογενών μετρήσεων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής (πχ. χαμηλή ταχύτητα περιστροφής). Συγκεκριμένα γίνεται αποτύπωση, σε μορφή εξισώσεων, όλων των προτεινόμενων βημάτων επεξεργασίας του πρωτογενούς σήματος της πίεσης (ηλεκτρική τάση) ως τον υπολογισμό του μέσου κύκλου. Οι διαδικασίες επεξεργασίας αξιοποιούνται στη συνέχεια της διατριβής. Γίνεται αξιολόγηση, απόλυτη και συγκριτική, με μεθόδους που αναφέρονται στην βιβλιογραφία μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που αφορούν στο ρυθμό καύσης και την ενδεικνύμενη ισχύ. Τέλος παρουσιάζεται μια νέα πρωτότυπη μέθοδος διβάθμιας πολυωνυμικής προσαρμογής για το «φιλτράρισμα» σημάτων, που αναπτύχθηκε για εφαρμογή στο σήμα της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η υφιστάμενη διαγνωστική τεχνική που εφαρμόστηκε, αξιολογήθηκε αλλά και βελτιώθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ενώ περιγράφονται τα λογισμικά μέτρησης και απεικόνισης που αναπτύχθηκαν. Στην αρχή γίνεται συνοπτική περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης του κινητήρα και περιγραφή των σταθερών που αντικατοπτρίζουν την λειτουργική του κατάσταση. Περιγράφεται η μεθοδολογία διάγνωσης, που συνίσταται στον υπολογισμό των σταθερών του μοντέλου στη κατάσταση αναφοράς και την τρέχουσα κατάσταση και την εν συνεχεία σύγκρισή τους. Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται το διαγνωστικό λογισμικό, που αποτελεί την γραφική διεπαφή διενέργειας μέτρησης, διάγνωσης και προβολής των αποτελεσμάτων. Περιγράφεται το περιβάλλον και η λειτουργία με ιδιαίτερη έμφαση στις νέες «οθόνες» απεικόνισης αποτελεσμάτων. Τέλος περιγράφεται το νέο μετρητικό λογισμικό που αναπτύχθηκε, το οποίο ενσωματώνει ειδικά χαρακτηριστικά για εφαρμογή στο εργαστήριο και σε πραγματικές συνθήκες στο πεδίο δοκιμών.

Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η ανάπτυξη πρωτότυπης συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ροπής, η αξιολόγησή της και οι δοκιμαστικές εφαρμογές. Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στην «κλασσική» μέτρηση της παραμόρφωσης της επιφάνειας του άξονα με την χρήση μηκυνσιομέτρων. Η διαφοροποίηση της νέας συσκευής σε σχέση με υφιστάμενες έγκειται στην μέθοδο ψηφιοποίησης των μετρήσεων, που γίνεται κοντά στα μηκυνσιόμετρα αποφεύγοντας παραμόρφωση του σήματος και θόρυβο και στον τρόπο μεταφοράς του ψηφιοποιημένου σήματος που γίνεται με ψηφιακό οπτικό σήμα.

Περιγράφεται η λειτουργία των μηκυνσιομέτρων, τα κριτήρια επιλογής τους, οι πιθανές πηγές σφαλμάτων και η διαδικασία εφαρμογής στον άξονα

μετάδοσης κίνησης. Ακολουθεί η περιγραφή της νέας «καινοτόμου» συσκευής η οποία αποτελείται από μια διάταξη τοποθετημένη πάνω στον περιστρεφόμενο άξονα και μια δεύτερη σταθερή διάταξη λήψης των μετρήσεων που συνδέεται με τον υπολογιστή. Η διάταξη μέτρησης και μετάδοσης, που είναι τοποθετημένη πάνω στον περιστρεφόμενο άξονα, διεγείρει την διάταξη των μηκυνσιομέτρων, ενισχύει και κανονικοποιεί το σήμα εξόδου τους και στη συνέχεια το ψηφιοποιεί. Ένας ειδικός κώδικας γραμμένος σε συμβολική γλώσσα (assembly) και προγραμματισμένος σε μικροελεγκτή επιτελεί τον χειρισμό της ψηφιοποίησης και την αποστολή των ψηφιοποιημένων δεδομένων. Η αποστολή των δεδομένων γίνεται οπτικά μέσω ψηφιακού κωδικοποιημένου σήματος. Επιπλέον ο μικροελεγκτής ελέγχει τον ενισχυτή, παρέχοντας διαφορετικά επίπεδα απολαβής ανάλογα με το πλάτος του μετρούμενου σήματος. Το τμήμα λήψης των μετρήσεων, λαμβάνει το οπτικό σήμα μέσω μιας συστοιχίας πομποδεκτών. Μετά την ανασύνθεση και αποκωδικοποίηση, αυτό προωθείται στον υπολογιστή για αποθήκευση και επεξεργασία. Επιπλέον, το τμήμα λήψης παράγει ένα σήμα συγχρονισμού για την στοίχιση στον άξονα του χρόνου των μετρήσεων της ροπής με πιθανές ταυτόχρονες μετρήσεις (πχ δυναμοδεικτικό διάγραμμα).

Αρχικά παρουσιάζεται εφαρμογή της τεχνικής στον μονοκύλινδρο πρότυπο κινητήρα Ricardo Hydra με σκοπό την αξιολόγηση σε εργαστηριακό περιβάλλον για την εκτίμηση της ακρίβειας των μετρήσεων. Στην συνέχεια παρουσιάζεται εφαρμογή αξιολόγησης της διάταξης σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής.

Στο 6ο Κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζεται η νέα συσκευή μέτρησης της στιγμιαίας (εντός του κύκλου) ταχύτητας περιστροφής που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή της με σκοπό τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση της επίδρασης της στιγμιαίας διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στα αποτελέσματα της διάγνωσης, όταν γίνεται χρήση διατάξεων μέτρησης σταθερού χρονικού βήματος για τη καταγραφή του διαγράμματος πιέσεων. Δίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση της ερευνητικής δραστηριότητας που αφορά στη μέτρηση της στιγμιαίας γωνιακής ταχύτητας από την οποία προκύπτει η πρωτοτυπία της αναπτυχθείσας συσκευής. Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές αρχές μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας και οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται. Για την περιγραφή της συσκευής, παρατίθενται και ερμηνεύονται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος και ο κώδικας γραμμένος σε συμβολική γλώσσα. Στην συνέχεια γίνεται εργαστηριακή αξιολόγηση της λειτουργίας και της ακρίβειας μέτρησης της συσκευής.

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου, που αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα σε τυπικές

διατάξεις μέτρησης του δυναμοδεικτικού διαγράμματος πίεσης, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση. Αυτή έγινε, αρχικά, στον μονοκύλινδρο κινητήρα Ricardo-Hydra του εργαστηρίου ΜΕΚ και στην συνέχεια σε τέσσερις μεγάλους βραδύστροφους κινητήρες, τρεις ναυτικούς και έναν ηλεκτροπαραγωγής.

Το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου οφείλεται στη γραμμική μετατροπή του χρόνου σε γωνία στροφάλου σε μετρήσεις με σταθερό βήμα χρόνου, σε συνδυασμό με την εμφάνιση διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου. Στη περίπτωση αυτή, οι τιμές γωνίας στροφάλου που αποδίδονται στις τιμές της πίεσης κυλίνδρου εμπεριέχουν το εν λόγω σφάλμα.

Αρχικά παρουσιάζεται η διάταξη ταυτόχρονης καταγραφής των ακόλουθων τριών μετρήσεων: της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής, της πίεσης καύσης με χρήση χρονικής δειγματοληψίας και της πίεσης καύσης με χρήση γωνιακής δειγματοληψίας. Στην συνέχεια παρουσιάζεται μεθοδολογία που χρησιμοποιώντας δύο από τις παραπάνω μετρήσεις προσομοιώνει τη τρίτη. Αυτή η μεθοδολογία προσομοίωσης χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη διερεύνηση της φύσης του σφάλματος και τη διόρθωση. Διερευνάται η επίδραση του σφάλματος λόγω διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στην εκτίμηση του ρυθμού καύσης, της ενδεικνύμενης ισχύος και της ενδεικνύμενης μέσης ενεργού πίεσης, με χρήση μετρήσεων από τον μονοκύλινδρο κινητήρα. Σαν ειδικές περιπτώσεις εξετάζονται τα σφάλματα που προκύπτουν από τη χρήση διαφορετικών μεθόδων στη διαδικασία υπολογισμού του μέσου κύκλου. Με βάση την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, προτείνονται και αξιολογούνται τρεις νέες εμπειρικές μέθοδοι διόρθωσης του σφάλματος που οφείλεται στην διακύμανση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής σε μετρήσεις σταθερού χρονικού βήματος, οι οποίες οδηγούν σε δραστική βελτίωση των αποτελεσμάτων στον μονοκύλινδρο κινητήρα.

Τέλος γίνεται συσχέτιση του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου με το σημείο λειτουργίας του κινητήρα χρησιμοποιώντας μετρήσεις από κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής και πρόωσης πλοίων και προτείνεται μια νέα μέθοδος διόρθωσης, η οποία παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα.

Στο 7^ο Κεφάλαιο διερευνάται η επίδραση της διακύμανσης φορτίου στη διάρκεια μέτρησης των κυλίνδρων στα αποτελέσματα της διάγνωσης και προτείνονται μέθοδοι αντιμετώπισης. Η διακύμανση του φορτίου στη διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων της πίεσης των κυλίνδρων είναι αρκετά συχνή σε κινητήρες που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα

εσφαλμένη εκτίμηση για τη φόρτιση των κυλίνδρων και μπορεί στη συνέχεια να οδηγήσει σε σφαλμένη ρύθμιση του κινητήρα.

Στο κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζονται δυο νέες πρωτότυπες μέθοδοι για την εκτίμηση και τον συνυπολογισμό της διακύμανσης του φορτίου στη διάρκεια της διαγνωστικής διαδικασίας. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί έναν δεύτερο αισθητήρα πίεσης που μετρά πάντα, παράλληλα με τις συνήθεις διαδοχικές μετρήσεις των κυλίνδρων, τη πίεση ενός συγκεκριμένου κυλίνδρου (αναφοράς) από την διακύμανση ισχύος του οποίου, εκτιμάται η συνολική διακύμανση φορτίου του κινητήρα. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί ακριβείς στιγμιαίες μετρήσεις της πίεσης σάρωσης παράλληλα με τις μετρήσεις των διαδοχικών κυλίνδρων. Από τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής του κινητήρα προσδιορίζεται η συσχέτιση της μεταβολής της πίεσης σάρωσης με το φορτίο του κινητήρα. Από την μετρούμενη πίεση σάρωσης και τη συσχέτιση αυτή εκτιμάται η διακύμανση ισχύος στη διάρκεια της μέτρησης του κάθε κυλίνδρου.

Στα πλαίσια της διερεύνησης αυτής πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση σε δυο μεγάλους κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής ένα δίχρονο και ένα τετράχρονο διάταξης V. Από την διερεύνηση στον δίχρονο κινητήρα αξιολογείται η επίδραση της διακύμανσης ισχύος στην εκτιμούμενη ισχύ των κυλίνδρων και στην κατανάλωση καυσίμου τους. Επιπλέον αξιολογούνται συγκριτικά οι δυο μέθοδοι διόρθωσης του προβλήματος που έχουν αναπτυχθεί. Η σύγκριση της σχετικής φόρτισης των κυλίνδρων σε διαφορετικά φορτία χρησιμοποιείται ως μέτρο αξιολόγησης των μεθόδων διότι αυτή πρέπει να είναι πρακτικά ίδια σε ένα κινητήρα που λειτουργεί ομαλά.

Στη περίπτωση του τετράχρονου κινητήρα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στη φόρτιση των κυλίνδρων (μετά από ρύθμιση παροχής καυσίμου) εάν γίνει χρήση των πρωτογενών αποτελεσμάτων και των διορθωμένων έχοντας λάβει υπόψη της διακύμανση της ισχύος. Όπως προκύπτει, η εφαρμογή ρυθμίσεων χρησιμοποιώντας τις πρωτογενώς μετρούμενες τιμές, χωρίς διόρθωση, μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις οδηγώντας σε απορύθμιση του κινητήρα. Αντίθετα, μετά την εφαρμογή των μεθόδων ανίχνευσης και συνυπολογισμού της διακύμανσης φορτίου εξασφαλίζεται η ορθή ρύθμιση των κυλίνδρων.

Στο 8^ο Κεφάλαιο γίνεται εκτεταμένη εφαρμογή και αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθοδολογίας σε τρεις μεγάλους δίχρονους κινητήρες:

- ◆ Σε κινητήρα σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, σε Ελληνικό Νησί.
- ◆ Σε ναυτικό κινητήρα προσαρμοσμένο σε πέδη, στη διάρκεια των εργοστασιακών δοκιμών.
- ◆ Εν πλω, στη διάρκεια των δοκιμών θαλάσσης σε ναυπηγείο στη Κορέα.

Για την πρώτη διερεύνηση, στην οποία συμμετείχε ως παρατηρητής αντιπρόσωπος του οίκου «Germanischer Lloyd» στα πλαίσια πιστοποίησης της μεθοδολογίας εκτίμησης της ισχύος και κατανάλωσης καυσίμου, έγινε ειδική προετοιμασία για να διασφαλισθεί η ακριβής καταγραφή των μεγεθών αυτών. Διενεργήθηκαν μετρήσεις σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα και σε διαφορετικές προπορείες έγχυσης. Στη διάρκεια των δοκιμών πέραν των ανωτέρω δυο μεγεθών (κατανάλωση καυσίμου και ισχύς) εξετάσθηκε και πιστοποιήθηκε η ακρίβεια προσδιορισμού της προπορείας έγχυσης του καυσίμου.

Στην δεύτερη διερεύνηση γίνεται σύγκριση των λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα με τις μετρούμενες τιμές στη διάρκεια των εργοστασιακών δοκιμών. Μετρήσεις με τον κινητήρα συνδεδεμένο σε πέδη προσφέρουν υψηλή ακρίβεια αλλά δεν είναι «εύκολο» να πραγματοποιηθούν σε κινητήρες αυτού του μεγέθους. Αυτό, σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής, κατέστη εφικτό για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Σκοπός της τρίτης διερεύνησης ήταν η εξέταση της δυνατότητας χρήσης της διαγνωστικής τεχνικής για την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος ρύθμισης της προπορείας έγχυσης (VIT) και της χρήσης του για τη βελτίωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Η διερεύνηση περιλαμβάνει, διαδοχικά:

1. Την εκτίμηση της τρέχουσας τιμής της προπορείας έγχυσης και της μεταβολής της, συναρτήσει της θέσης του κανόνα του συστήματος μεταβλητού χρονισμού (VIT).
2. Τη ρύθμιση της προπορείας έγχυσης του κινητήρα σε νέα τιμή με βάση την προηγούμενη συσχέτιση (προπορεία έγχυσης – θέση κανόνα συστήματος μεταβλητού χρονισμού).
3. Το προσδιορισμό της προπορείας έγχυσης και της μεταβολής της κατανάλωσης καυσίμου μετά τη ρύθμιση.

Η μείωση στην κατανάλωση καυσίμου στη συγκεκριμένη εφαρμογή αντιστοιχούσε σε μείωση κατά έναν τόνο ημερησίως (στο φορτίο συνήθους λειτουργίας).

Η παρούσα εργασία ολοκληρώνεται με το **Κεφάλαιο 9** στο οποίο συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα της διατριβής. Επιπλέον, γίνεται αναφορά των στοιχείων πρωτοτυπίας της παρούσας εργασίας, προτάσεων για μελλοντική ερευνητική ενασχόληση και τέλος των σχετικών δημοσιεύσεων πουπραγματοποιήθηκαν σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια με πρακτικά και κρίση στο πλήρες κείμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η θέση του μεγάλου κινητήρα Diesel σήμερα

Ένα από τα σημαντικά επιτεύγματα της τεχνολογίας, όπως ραγδαία εξελίχθηκε τους τελευταίους δυο αιώνες είναι ο εμβολοφόρος κινητήρας. Πρόκειται για θερμική μηχανή που αξιοποιεί την χημική ενέργεια του καυσίμου για την παραγωγή μηχανικού έργου, χρησιμοποιώντας τα προϊόντα της καύσης σαν εργαζόμενο μέσο.

Ο κινητήρας έναυσης με συμπίεση, όπου κυρίως βρίσκει εφαρμογή η παρούσα εργασία, παρουσιάστηκε το 1826 από τον μηχανικό R. Diesel. Έκτοτε, διάφορες εξελίξεις έχουν προσδώσει στην συγκεκριμένη μηχανή χαρακτηριστικά που καθιστούν την εφαρμογή της ιδιαίτερα ελκυστική. Ιδιαίτερα για τους αργόστροφους μεγάλου μεγέθους κινητήρες, πολύ ευνοϊκό χαρακτηριστικό είναι η σημαντική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, σε τιμές ακόμη και άνω του 50%, γεγονός που αποδίδεται στις ακόλουθες εξελίξεις [1.1, 1.2, 1.3]:

- ◆ *Αύξηση του λόγου διαδρομής/ διαμέτρου εμβόλου.*
- ◆ *Αύξηση της μέγιστης πίεσης καύσης.*
- ◆ *Βελτίωση της σχεδίασης του θαλάμου καύσης.*
- ◆ *Βελτίωση του βαθμού απόδοσης του υπερπληρωτή.*
- ◆ *Κατασκευή και χρήση συστημάτων έγχυσης καυσίμου υψηλής πίεσης έγχυσης.*
- ◆ *Αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος.*
- ◆ *Βελτίωση του μηχανισμού της καύσης.*

Πέραν του βαθμού απόδοσης, άλλα ευνοϊκά χαρακτηριστικά τα οποία προκύπτουν από σύγκριση με άλλες θερμικές μηχανές, είναι [1.4]

- ◆ *Αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία.*
- ◆ *Λειτουργία με πολύ ευρύ φάσμα καυσίμων.*
- ◆ *Υψηλή συγκέντρωση ισχύος.*

Τα παραπάνω, έχουν οδηγήσει στην αξιοποίηση του μεγάλου μεγέθους κινητήρα Diesel στη ναυτιλία, με διείσδυση μεγαλύτερη του 95% [1.1, 1.2] και σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές όπου υπάρχει ανάγκη ελαστικότητας στην παραγωγή ισχύος [1.3, 1.5].

1.2 Αναγκαιότητα μεθόδων επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel καθώς και απαιτήσεις από αυτές.

1.2.1 Ανάγκες που επιβάλλουν την χρήση μεθόδων επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel.

Ο συνδυασμός των αναγκών για οικονομική λειτουργία, φιλικότητα προς το περιβάλλον και ασφάλεια του προσωπικού υπαγορεύουν τις ακόλουθες απαιτήσεις από τον κινητήρα [1.1, 1.6]:

- ◆ Αξιόπιστη λειτουργία.
- ◆ Αδιάλειπτη λειτουργία, πρόβλεψη - πρόληψη βλαβών.
- ◆ Αποδοτική λειτουργία- ελάχιστη δυνατή κατανάλωση καυσίμου, μέγιστη δυνατή παραγωγή ισχύος, σε όλο το εύρος λειτουργίας.
- ◆ Ελαχιστοποίηση διαστημάτων εκτός λειτουργίας λόγω συντήρησης.
- ◆ Γρήγορη αποκατάσταση βλαβών.
- ◆ Ελαχιστοποίηση άμεσου κόστους συντήρησης (κόστος ανταλλακτικών, κόστος υπηρεσιών συντήρησης).
- ◆ Αύξηση ωφέλιμης ζωής κινητήρα.
- ◆ Περιορισμός εκπομπών ρύπων.

1.2.2 Βασικές αρχές μεθόδων επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel.

Για την ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων, παράλληλα με την εξέλιξη των κινητήρων Diesel, λαμβάνει χώρα και η ανάπτυξη, εξέλιξη και εφαρμογή μεθόδων και τεχνικών με σκοπό:

1. την παρακολούθηση της λειτουργίας (*health monitoring*) ή την παρακολούθηση κατάστασης (*condition monitoring*), και
2. τον προσδιορισμό της λειτουργικής κατάστασης (*engine condition estimation*), τον εντοπισμό και τη διάγνωση μιας ενδεχόμενης βλάβης (*fault diagnosis*).

Τα δυο παραπάνω σημεία, συνθέτουν την διαγνωστική διαδικασία στους κινητήρες Diesel [1.6].

Η παρακολούθηση λειτουργίας είναι το 1ο στάδιο της διαγνωστικής διαδικασίας όπου γίνεται καταγραφή μεγεθών που προσφέρουν ένδειξη, άμεση ή έμμεση, της λειτουργικής συμπεριφορά του κινητήρα. Στα μεγέθη αυτά περιλαμβάνονται:

- ◆ η παραγόμενη ισχύς
- ◆ η κατανάλωση καυσίμου
- ◆ η πίεση και θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής
- ◆ η θερμοκρασία των καυσαερίων

- ◆ η πίεση και θερμοκρασία του καυσαερίου πριν το στρόβιλο
- ◆ η θερμοκρασία του αέρα πριν και μετά το ψυγείο αέρα
- ◆ η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής
- ◆ η στρεπτική ροπή

Εκτός από την πρωτογενή πληροφορία, μετά από επεξεργασία προκύπτουν πρόσθετες πληροφορίες για τη λειτουργική κατάσταση του κινητήρα όπως π.χ. η παραγόμενη ισχύς ανά κύλινδρο, η μέση πραγματική πίεση και η πίεση συμπίεσης. Ακόμα είναι δυνατόν να ανιχνεύονται συμβάντα όπως η έλλειψη έναυσης (misfire detection) ή η αύξηση των κραδασμών.

Κατά την παρακολούθηση λειτουργίας είναι δυνατό να εντοπιστεί μια δυσλειτουργία ή βλάβη, όμως κατά πάσα πιθανότητα δεν είναι εφικτό να προσδιορισθεί το ακριβές αίτιο το οποίο την προκαλεί. Σε αυτό εμπλέκεται το 2^ο στάδιο της διαγνωστικής διαδικασίας που αφορά στον προσδιορισμό της λειτουργικής κατάστασης και της διάγνωσης βλαβών. Η «διαγνωστική πληροφορία» [1.7] προκύπτει μετά από επεξεργασία και αξιολόγηση μεγεθών που περιέχουν πληροφορία για τη λειτουργική συμπεριφορά του κινητήρα, και μπορεί να παρέχονται από το 1^ο στάδιο ή να συλλέγονται αυτόνομα.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται σαν είσοδος και η μέθοδος επεξεργασίας για την εξαγωγή της διαγνωστικής πληροφορίας, διαφοροποιεί τις διαγνωστικές μεθόδους, όπως κατηγοριοποιούνται σε επόμενη παράγραφο. Πολλές φορές δεν είναι σαφής η διάκριση στο πρώτο και δεύτερο στάδιο της διαγνωστικής διαδικασίας. Όμως το κοινό βασικό ζητούμενο είναι η ανίχνευση της δυσλειτουργίας και η πρόταση των απαραίτητων ρυθμίσεων, επεμβάσεων, ή τροποποιήσεων για την αποκατάσταση της βλάβης και την επαναφορά του κινητήρα στη φυσιολογική του συμπεριφορά.

1.2.3 Απαιτήσεις από τις μεθόδους επιτήρησης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel.

Η δυνατότητα εφαρμογής μιας διαγνωστικής μεθόδου σε κινητήρες κανονικής λειτουργίας υπαγορεύει τις ακόλουθες απαιτήσεις [1.3]:

1. Να παρέχει, σε γενικές γραμμές, αξιόπιστα αποτελέσματα.
2. Να είναι γενικής εφαρμογής, δηλαδή να μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιονδήποτε τύπο κινητήρα Diesel, ανεξάρτητα από το είδος του (2-Χ ή 4-Χ), το μέγεθος, τις συνθήκες λειτουργίας, την παραγόμενη ισχύ και την εφαρμογή (πχ. ναυτικός, ηλεκτροπαραγωγής κλπ).
3. Να βασίζεται σε τεχνικές μέτρησης, οι οποίες δεν είναι χρονοβόρες, δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες λειτουργίας και δεν διαταράσσουν τη λειτουργία του κινητήρα (μη παρεμβατικές).
4. Τα αποτελέσματα της διάγνωσης να μην εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας (πχ στροφές, φορτίο, κτλ.) στη διάρκεια λήψης της μέτρησης.

5. Να παρέχει αποτελέσματα σε μικρό (εύλογο) χρονικό διάστημα, ώστε οι πληροφορίες για την κατάσταση του κινητήρα να μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα.
6. Εκτός από τη λειτουργική κατάσταση, να παρέχει ενδείξεις και για τις ρυθμίσεις του κινητήρα (χρονισμός έγχυσης, χρονισμός βαλβίδων, κτλ.).
7. Να είναι εφικτός, σε περίπτωση εμφάνισης δυσλειτουργίας ή βλάβης, ο εντοπισμός του ακριβούς αιτίου που την προκαλεί.
8. Να παρέχει αποτελέσματα όχι μόνο για την κατάσταση του κινητήρα αλλά και για τα υποσυστήματα αυτού, όπως είναι το σύστημα έγχυσης καυσίμου ή ο υπερπληρωτής.

Εκτός από τις ανωτέρω απαιτήσεις, ένα πρόσθετο ζητούμενο από τις διαγνωστικές τεχνικές είναι η χρήση τους σαν εργαλεία για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την δυνατότητα πρότασης απαιτούμενων ρυθμίσεων και με τη δυνατότητα πρόβλεψης της επίδρασης κάποιας ρύθμισης που θα αποφασισθεί.

Η αύξηση της τιμής του καυσίμου, που δεν προβλέπεται να μεταβληθεί σημαντικά το άμεσο μέλλον, έχει καταστήσει ακόμη πιο επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης διαγνωστικών τεχνικών. Επιπλέον, η μείωση των ναύλων και η μείωση της ζήτησης διακίνησης εμπορευμάτων καθιστά επιβεβλημένη την πλεύση σε χαμηλή ταχύτητα (slow steaming), πρακτική που προσπαθούν να υιοθετήσουν κατά κόρον οι ναυτιλιακές εταιρείες. Όμως, οι μεγάλοι ναυτικοί κινητήρες, όπως προκύπτει από τον σχεδιασμό τους, δεν ενδείκνυνται για λειτουργία σε χαμηλό φορτίο. Στη περίπτωση αυτή οι διαγνωστικές τεχνικές μπορούν να χρησιμεύσουν σαν εργαλεία διερεύνησης και για την παρακολούθηση του κινητήρα. Η χρήση των διαγνωστικών συστημάτων μπορεί να συμβάλει στον προσδιορισμό των ρυθμίσεων ή των τεχνικών εκείνων που θα επιτρέψουν την λειτουργία του κινητήρα σε αυτές τις συνθήκες (πχ χρήση ενός εκ των δύο υπερπληρωτών, μετατροπή της έλικας με σκοπό την αλλαγή της φόρτισης, κ.α.). Παράλληλα θα συμβάλουν στην ανίχνευση κάποιου προβλήματος ή δυσλειτουργίας πριν αυτό έχει αρνητικές συνέπειες για τον κινητήρα.

Η πολυπλοκότητα των κινητήρων σήμερα επιβάλλει την χρήση τέτοιων μεθόδων σαν εργαλεία στα χέρια των μηχανικών. Για παράδειγμα, η συσχέτιση της θέσης του κανόνα του συστήματος μεταβλητού χρονισμού έγχυσης (VIT) με την προπορεία, η οποία συνήθως δεν δίνεται από τις κατασκευάστριες εταιρείες, είναι πολύ χρήσιμη πληροφορία. Άλλο παράδειγμα εφαρμογής των διαγνωστικών μεθόδων στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης της λειτουργίας του κινητήρα, είναι η ρύθμιση της προπορείας με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου με ταυτόχρονη διατήρηση των NOx και της μέγιστης πίεσης καύσης εντός συγκεκριμένων ορίων. Ειδικά στους σύγχρονους κινητήρες ηλεκτρονικής ρύθμισης, που ο μηχανικός ελέγχει απόλυτα τον κινητήρα και

είναι δυνατόν να επιβάλει εύκολα διάφορες ρυθμίσεις, ένα εργαλείο βελτιστοποίησης μπορεί να βρει μεγάλη εφαρμογή.

1.3 Επισκόπηση Διαγνωστικών Τεχνικών Κινητήρων Diesel

1.3.1 Διαγνωστικές Τεχνικές Επεξεργασίας Λειτουργικών Δεδομένων με μεθόδους στατιστικής, νευρωνικών δικτύων ή γενετικών αλγόριθμων

Αυτή η οικογένεια τεχνικών βασίζεται στην σύγκριση της εκάστοτε λειτουργικής κατάστασης με μια κατάσταση αναφοράς, μέσω σύγκρισης λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Με βάση τα αποτελέσματα της σύγκρισης προσδιορίζεται η απόκλιση της κατάστασης του κινητήρα από την κατάσταση αναφοράς και με αυτόν τον τρόπο επιχειρείται να ανιχνευτεί η ύπαρξη μιας δυσλειτουργίας ή βλάβης [1.6, 1.8].

Το βασικό πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι η κατάσταση αναφοράς δεν αποκλίνει από την τρέχουσα μόνο ως προς την λειτουργική κατάσταση. Άλλοι παράγοντες απόκλισης είναι το σημείο λειτουργίας, η μεταβολή των ρυθμίσεων, το διαφορετικό καύσιμο, κ.α. Επιπλέον, αν ανιχνευτεί μια δυσλειτουργία, η μέθοδος εμφανίζει αδυναμία στην διάγνωση της αιτίας, καθώς είναι πιθανό διάφορες αιτίες να παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μία τιμή μεγίστης πίεσης καύσης μικρότερη της κανονικής μπορεί να οφείλεται σε διάφορα αίτια όπως είναι [1.3]:

- ◆ κακή ποιότητα ψεκασμού του καυσίμου,
- ◆ δυσλειτουργία της αντλίας αντλία καυσίμου,
- ◆ δυσλειτουργία εγχυτήρα,
- ◆ διαρροές αερίου από τα ελατήρια,
- ◆ διαρροές αερίου από τις βαλβίδες,
- ◆ εσφαλμένο χρονισμό έγχυσης καυσίμου,
- ◆ εσφαλμένο χρονισμό βαλβίδων, κλπ.

Μια βελτιωμένη προσέγγιση, που προσφέρει κάποια λύση στις παραπάνω αδυναμίες, είναι ο συνδυασμός της μεθόδου με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης που όμως τροφοδοτούνται με μεγάλο όγκο δεδομένων. Δημιουργείται δηλαδή μια βάση με δεδομένα από τη λειτουργία του κινητήρα. Με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου πραγματοποιείται η στατιστική επεξεργασία των στοιχείων που είναι αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων [1.3]. Έτσι, χρησιμοποιώντας ως «είσοδο» στο μοντέλο το σύμπτωμα το οποίο παρουσιάζει ο κινητήρας κατά τη λειτουργία του, πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση και προσδιορίζεται το πιο πιθανό αίτιο στο οποίο μπορεί να οφείλεται η βλάβη, με βάση τις βλάβες που έχουν ανιχνευθεί στο παρελθόν [1.6, 1.8, 1.9]. Όμως σε

αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί τεράστιο όγκο δεδομένων λειτουργίας, που δεν είναι διαθέσιμα για μεγάλου μεγέθους κινητήρες, και έναν γρήγορο και ισχυρό επεξεργαστή για τη διαχείρισή του. Το σημαντικότερο όμως μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν έχει γενικότητα εφαρμογής. Δηλαδή δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κινητήρα για τον οποίο δεν υπάρχουν στοιχεία στη βάση δεδομένων και παράλληλα δεν μπορεί να ανιχνευθεί μια δυσλειτουργία, η οποία δεν έχει εμφανισθεί στο παρελθόν (καθώς δεν υπάρχουν τα σχετικά λειτουργικά δεδομένα και συμπτώματα στη βάση δεδομένων). Επιπροσθέτως, η δημιουργία βάσης δεδομένων για βλάβες σε μεγάλου μεγέθους κινητήρες είναι πρακτικά αδύνατη και συνεπάγεται πολύ υψηλό κόστος [1.3].

Μια άλλη προσέγγιση είναι η αξιοποίηση των δεδομένων για την «εκπαίδευση» νευρωνικού δικτύου [1.10, 1.11, 1.12] ή γενετικού αλγορίθμου [1.13, 1.14, 1.15] , με σκοπό την ανίχνευση ανάμεσα στο μεγάλο πλήθος των περιπτώσεων που είναι διαθέσιμες στη βάση δεδομένων, της περίπτωσης εκείνης που παρουσιάζει την καλύτερη ταύτιση με την εκάστοτε εφαρμογή και τα συμπτώματα που παρουσιάζει ο κινητήρας. Έτσι, θεωρητικά είναι δυνατό όχι μόνο να ανιχνευθεί μια δυσλειτουργία του κινητήρα αλλά και να προσδιορισθεί το αίτιο που την προκαλεί.

1.3.2 Διαγνωστικές Τεχνικές με Βάση την Ανάλυση Κραδασμών και Στρεπτικών Ταλαντώσεων

Η διάκριση αρμονικών στις ταλαντώσεις του κινητήρα είναι η αρχή λειτουργίας διάγνωσης με βάση την ανάλυση κραδασμών [1.16]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μετρήσεις κραδασμών που λαμβάνονται από διάφορα σημεία του κινητήρα και συνήθως από το στροφαλοφόρο άξονα [1.17]. Μέσω της φασματικής ανάλυσης (μετασχηματισμός Fourier) των μετρούμενων κραδασμών, είναι θεωρητικά δυνατή η ανίχνευση και ταυτοποίηση δυσλειτουργίας ή βλάβης. Αυτό μπορεί να γίνει είτε μέσω σύγκρισης με την υγιή κατάσταση [1.18, 1.19] , είτε με την χρήση ορίου της έντασης κάποιων αρμονικών [1.20].

Η μέθοδος έχει τύχει εφαρμογής σε μεγάλης κλίμακας κινητήρες Diesel όπως πχ. ναυτικούς ή ηλεκτροπαραγωγής, με εκτίμηση των στρεπτικών ταλαντώσεων στο στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα από μετρήσεις στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ίδιοι οι κατασκευαστές προεγκαθιστούν τέτοια συστήματα κυρίως όμως για την επιτήρηση της λειτουργίας και λιγότερο για την διάγνωση βλαβών.

Μέσω των στρεπτικών ταλαντώσεων είναι δυνατή η διάκριση σε κάποιο βαθμό της συνεισφοράς του κάθε κυλίνδρου [1.21]. Επίσης, στην περίπτωση

διαθεσιμότητας μετρήσεων πίεσης κυλίνδρου πραγματικού χρόνου είναι δυνατός ο προσδιορισμός του «υγιούς» φάσματος προσδίδοντας μεγαλύτερη αξιοπιστία στην μέθοδο [1.20, 1.22, 1.23].

Παρόλο που η μέθοδος είναι πρακτικά γενικής εφαρμογής, δηλαδή δεν απαιτεί μεγάλο αριθμό ιστορικών δεδομένων και εφαρμόζεται ανεξάρτητα του σημείου λειτουργίας στο οποίο λαμβάνεται η μέτρηση, εμφανίζει περιορισμούς στην δυνατότητα εντοπισμού της βλάβης, διότι το φάσμα συχνοτήτων επηρεάζεται από το σύνολο των υποσυστημάτων του κινητήρα με πολύ δύσκολη την διάκριση της συνεισφορά κάθε εξαρτήματος ή υποσυστήματος [1.20, 1.18, 1.24]. Επιπλέον υπάρχουν και εξωτερικής προέλευσης ταλαντώσεις από βοηθητικά συστήματα που επηρεάζουν τόσο τη μέτρηση όσο και την ανάλυση [1.3].

1.3.3 Διαγνωστικές Τεχνικές Ανάλυσης Ακουστικών Σημάτων

Η διαγνωστική τεχνική ανάλυσης ακουστικών σημάτων βασίζεται στην ανάλυση του φάσματος του ήχου στο περιβάλλον του μηχανοστασίου για την διάκριση γεγονότων εντός του κύκλου.

Πρόκειται για σχετική νέα μέθοδο που ευνοείται από το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού. Χρησιμοποιούνται μικρόφωνα περιβάλλοντος ή επαφής, τα οποία καταγράφουν ήχους, κυρίως υψίσυχνους έως και υπέρηχους. Τα μικρόφωνα επαφής τοποθετούνται κοντά σε κρίσιμα εξαρτήματα, όπως βαλβίδες ή περιστρεφόμενα εξαρτήματα, ενώ τα μικρόφωνα περιβάλλοντος τοποθετούνται έτσι ώστε να καταγράφουν τον ήχο που παράγεται από την απότομη αύξηση της πίεσης κατά το πρώτο στάδιο της καύσης [1.25]. Από την ανάλυση του ήχου στο πεδίο των συχνοτήτων είναι θεωρητικά δυνατό να διαγνωστεί η κατάσταση των εξαρτημάτων και υποσυστημάτων ή η συνολική κατάσταση του κινητήρα [1.25, 1.26, 1.27, 1.28].

Η τεχνική παρουσιάζει αυξημένες δυνατότητες καθώς παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού πρόσθετων λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα, όπως είναι η θέση της μέγιστης πίεσης καύσης, η έναρξη της καύσης, ο ρυθμός αύξησης της πίεσης εντός του θαλάμου καύσης, ο χρονισμός των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής, κ.ά [1.26, 1.25, 1.27]. Η μέθοδος είναι γενικής εφαρμογής και παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περιπτώσεις που έχει εφαρμοσθεί και δοκιμαστεί.

1.3.4 Διαγνωστικές Τεχνικές με Προσομοίωση της Λειτουργίας του Κινητήρα

Στις διαγνωστικές τεχνικές που βασίζονται στην προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα, τα συμπεράσματα για την κατάσταση και τις πιθανές

βλάβες προκύπτουν από την σύγκριση μετρημένων τιμών βασικών λειτουργικών μεγεθών με τις τιμές που προκύπτουν από ένα μοντέλο προσομοίωσης. Αυτές οι τεχνικές επικεντρώνονται στην λειτουργία του κινητήρα και τους φυσικούς νόμους της θερμοδυναμικής και της ρευστομηχανικής [1.3] σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους που παρουσιάστηκαν, στις οποίες, σε γενικές γραμμές, δεν λαμβάνεται υπόψη η «φυσική». Για την προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα στην διαγνωστική, αρκεί η χρήση σχετικά απλοϊκών φαινομενολογικών μοντέλων κυρίως μονοζωνικών ή διζωνικών [1.29, 1.30], ενώ τα πολυζωνικά χρησιμοποιούνται κυρίως όταν ενδιαφέρει επιπλέον η παραγωγή και εκπομπή ρύπων [1.31].

Με την εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης [1.32, 1.33, 1.34] είναι δυνατός ο προσδιορισμός λειτουργικών παραμέτρων (ρυθμός καύσης, παροχές μάζας, λόγος αέρα καύσης, κλπ.) του κινητήρα, μερικές εκ των οποίων δεν είναι δυνατό να μετρηθούν με τα συμβατικά αισθητήρια που είναι εγκατεστημένα στον κινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο αποκτάται μια λεπτομερής εικόνα για την κατάσταση του κινητήρα αλλά και των υποσυστημάτων του (π.χ. υπερπληρωτής, σύστημα έγχυσης, κλπ.). Επιπλέον, στην περίπτωση που είναι γνωστή η λειτουργική κατάσταση του κινητήρα σε μια κατάσταση «αναφοράς» (πχ. στις δοκιμές παραλαβής), είναι δυνατό να εντοπιστεί και το ακριβές αίτιο το οποίο προκαλεί μια δυσλειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σύγκρισης της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα στην παρούσα κατάσταση με την «αναφορά», από όπου προκύπτει η παράμετρος εκείνη, η οποία αποκλίνει από τη φυσιολογική της τιμή και το αίτιο το οποίο προκαλεί την απόκλιση αυτή [1.3].

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρέχουν οι διαγνωστικές τεχνικές με προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα είναι ότι παρέχουν λεπτομερή και ολοκληρωμένη εικόνα για την λειτουργική κατάσταση του κινητήρα, των ρυθμίσεών του και των υποσυστημάτων του. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο εντοπισμός μιας υποκείμενης δυσλειτουργίας, που θα ήταν αδύνατο να εντοπιστεί με την άμεση ανάγνωση των λειτουργικών μεγεθών. Επιπλέον, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ακριβούς αιτίου που προκαλεί μια βλάβη.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η πολυπλοκότητα της εφαρμογής του μοντέλου προσομοίωσης και η χρήση μετρήσεων πίεσης καύσης που παρουσιάζουν κάποιες τεχνικές δυσκολίες στην λήψη τους στο πεδίο της λειτουργίας.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στην εφαρμογή διαγνωστικής τεχνικής που βασίζεται στην προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα.

1.4 Η λογική και τα πλεονεκτήματα της υπο μελέτης διαγνωστικής τεχνικής.

Στην παρούσα διατριβή τίθεται στο επίκεντρο της μελέτης η διαγνωστική τεχνική που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία 20 έτη υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Δρ. Δ. Χουντάλα και συνίσταται στην:

- ♦ επεξεργασία μετρήσεων που λαμβάνονται με χρήση μη παρεμβατικών μεθόδων, κυρίως της πίεσης καύσης,
- ♦ την εκτίμηση λειτουργικών δεδομένων και παραμέτρων για τη λειτουργία του κινητήρα
- ♦ την εκτίμηση ρυθμίσεων λειτουργίας (προπορεία κλπ)
- ♦ τη σύγκριση των εξαγόμενων λειτουργικών παραμέτρων και μεγεθών με τις προβλέψεις μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του κινητήρα στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.

Το μοντέλο προσομοίωσης βασίζεται σε διζωνικό μοντέλο καύσης πλαισιωμένο από υπομοντέλα για την περιγραφή των περιφερειακών διεργασιών όπως η έγχυση, η εναλλαγή των αερίων, η υπερπλήρωση, κλπ. Ο τρόπος ανάπτυξης του μοντέλου είναι κατάλληλος για γενική χρήση, βρίσκοντας εφαρμογή σε διάφορα είδη κινητήρων. Έχει εφαρμοστεί σε πλήθος περιπτώσεων (τύπους κινητήρων, συνθήκες λειτουργίας, κλπ.) και έχει επιβεβαιωθεί εργαστηριακά η δυνατότητά του να προβλέπει με πολύ καλή ακρίβεια τα λειτουργικά μεγέθη του κινητήρα [1.30, 1.35].

Η προσαρμογή του μοντέλου στον κινητήρα γίνεται με χρήση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και δεδομένα αναφοράς, τα οποία προέρχονται από τις δοκιμές παραλαβής και τις αντίστοιχες θαλάσσιες δοκιμές, αν πρόκειται για ναυτικό κινητήρα. Τελικά, η βαθμονόμηση συνίσταται σε ένα σύνολο σταθερών, οι οποίες έχουν φυσικό νόημα (είτε εξαρτώνται από γεωμετρικά χαρακτηριστικά, είτε περιγράφουν μια διεργασία).

Το βασικό μετρούμενο μέγεθος για την διάγνωση είναι η πίεση των κυλίνδρων. Με μια επαναληπτική διαδικασία προσδιορίζεται ένα νέο σύνολο σταθερών, τέτοιο ώστε το προσομοιωμένο διάγραμμα πίεσης για κάθε κύλινδρο να ταυτίζεται με το μετρούμενο. Από την σύγκριση των σταθερών αυτών (παρούσα κατάσταση) με τις σταθερές αναφοράς προσδιορίζεται η λειτουργική κατάσταση του κινητήρα εκφραζόμενη μέσα από δείκτες λειτουργικής κατάστασης καθώς και η πηγή δυσλειτουργίας εφόσον υπάρχει. Επειδή οι σταθερές έχουν φυσικό νόημα μπορούν να αξιοποιηθούν ακόμα και αυτόνομα.

Με βάση την σύντομη περιγραφή της διαγνωστικής τεχνικής που προηγήθηκε διαφαίνονται ορισμένα από τα πλεονεκτήματά της σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, τα οποία συνοψίζονται στα ακόλουθα [1.3]:

1. Η τεχνική στηρίζεται σε ένα μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας με βάση τη θερμοδυναμική. Το χαρακτηριστικό αυτό εξασφαλίζει τη γενικότητα εφαρμογής, δεδομένου ότι με τη θερμοδυναμική προσέγγιση είναι δυνατό να περιγραφεί οποιοσδήποτε τύπος κινητήρα ανεξαρτήτως χαρακτηριστικών λειτουργίας, διαστάσεων, συνθηκών λειτουργίας, κλπ.
2. Για την εφαρμογή της τεχνικής δεν είναι απαραίτητος μεγάλος όγκος λειτουργικών δεδομένων του κινητήρα, τα οποία να έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια της ζωής του, σε φυσιολογική λειτουργία ή λειτουργία υπό βλάβη, όπως για παράδειγμα απαιτείται για την εφαρμογή των διαγνωστικών τεχνικών που χρησιμοποιούν μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή της τεχνικής αφορούν μόνο σε μια κατάσταση «αναφοράς» (πχ. δοκιμές παραλαβής του κινητήρα).
3. Παρέχει αποτελέσματα για την κατάσταση του κινητήρα αλλά και για τα υποσυστήματα αυτού, όπως για παράδειγμα το σύστημα έγχυσης καυσίμου και τον υπερπληρωτή.
4. Παρέχει ενδείξεις για τη ρύθμιση του κινητήρα (πχ. χρονισμός έγχυσης, χρονισμός βαλβίδων, κλπ.), το οποίο δεν είναι εφικτό όταν χρησιμοποιούνται μέθοδοι διάγνωσης όπως η ανάλυση ταλαντώσεων.
5. Με την παρούσα μεθοδολογία (δηλ. μοντέλο προσομοίωσης), εκτός από τον εντοπισμό μιας βλάβης μπορεί να προσδιορισθεί και το αίτιο που την προκαλεί.

1.5 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η αντιμετώπιση προβλημάτων, δυσκολιών και προκλήσεων σχετιζόμενων με την εφαρμογή διαγνωστικών τεχνικών σε ένα ευρύ φάσμα κινητήρων με έμφαση τους μεγάλους κινητήρες Diesel που χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία και την ηλεκτροπαραγωγή. Στη διατριβή γίνεται χρήση υφιστάμενης διαγνωστικής τεχνικής μέσω ειδικού διαγνωστικού λογισμικού. Όπως έχει αποδειχθεί από την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, υψίστης σημασίας για την διάγνωση είναι η μέτρηση και η επεξεργασία λειτουργικών μεγεθών των κινητήρων με αξιόπιστο τρόπο. Όμως η μέτρηση λειτουργικών μεγεθών σε μεγάλου μεγέθους κινητήρες στο πεδίο εφαρμογής παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και περιορισμούς.

Η παρούσα διατριβή εστιάζεται στην ανάπτυξη νέων και την εξέλιξη υφισταμένων τεχνικών μέτρησης με σκοπό την όσο το δυνατόν ευρεία εφαρμογή σε κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία και την ηλεκτροπαραγωγή. Επιπροσθέτως εστιάζεται και στην εξέλιξη και ανάπτυξη μεθοδολογιών επεξεργασίας των μετρήσεων οι οποίες αξιοποιούνται από το προαναφερθέν διαγνωστικό λογισμικό.

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής αναλύεται συνοπτικά στους εξής άξονες:

1. Την ανάπτυξη και αξιολόγηση νέου υλικού μέτρησης με ιδιαίτερα μικρό μέγεθος και ειδικά χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την πρακτική εφαρμογή.
2. Την ανάπτυξη λογισμικού μέτρησης και επεξεργασίας κατάλληλο ταυτόχρονα για εργαστηριακή χρήση αλλά και χρήση στο πεδίο εφαρμογής των κινητήρων.
3. Αναγνώριση σφαλμάτων που σχετίζονται με την λήψη και επεξεργασία μετρήσεων και αξιολόγηση, θεωρητική και εργαστηριακή, της επίδρασής τους στην διάγνωση και τα αποτελέσματά της.
4. Πρόταση μεθόδων και τεχνικών αντιμετώπισης των ανωτέρω σφαλμάτων.
5. Διερεύνηση της δυνατότητας διεύρυνσης της διαγνωστικής μεθόδου, μέσω της εισαγωγής και αξιοποίησης νέων μη παρεμβατικών μετρήσεων.
6. Την εκτενή αξιολόγηση για πρώτη φορά της διαγνωστικής τεχνικής στο πεδίο εφαρμογής, εν πλω και σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται σύντομη επισκόπηση στα αντικείμενα που εξετάζονται .

1.5.1 Αντιμετώπιση περιορισμών των υφιστάμενων διατάξεων και λογισμικών για την μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων και της πίεσης σάρωσης.

Οι κατασκευαστές μετρητικού εξοπλισμού παρέχουν πληθώρα λύσεων για κάθε μετρητική εφαρμογή, οι οποίες όμως προορίζονται είτε για εργαστηριακή χρήση είτε για μόνιμη εγκατάσταση σε βιομηχανικό περιβάλλον. Για να είναι δυνατή η γενικευμένη εφαρμογή σε κινητήρες που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες είναι απαραίτητη η αντιμετώπιση των περιορισμών που παρουσιάζουν οι διαθέσιμες λύσεις. Σε αυτούς περιλαμβάνονται:

- ◆ Ο αυξημένος αριθμός των αναγκαίων συσκευών, ο όγκος και το βάρος είναι παράγοντες που μειώνουν την φορητότητα και συνεπώς καθιστούν μια πιθανή λύση μη εφαρμόσιμη στο περιβάλλον π.χ. του μηχανοστασίου ενός πλοίου.
- ◆ Η ηλεκτρική διασύνδεση των επιμέρους συσκευών που συχνά προκαλεί δυσλειτουργίες και ηλεκτρικό θόρυβο.
- ◆ Θέματα ασφάλειας που σχετίζονται με την παροχή ρεύματος στο εξοπλισμό εντός του μηχανοστασίου.
- ◆ Η πολυπλοκότητα των συσκευών (λόγω των αιτούμενων δυνατοτήτων) και η ανάγκη επιβολής ρυθμίσεων σε αυτές αποτελούν παράγοντες αστοχίας στο περιβάλλον του μηχανοστασίου, όπου οι συνθήκες είναι ακραίες.

- ♦ Η λήψη μέτρων μείωσης του ηλεκτρικού θορύβου, μέσω της εφαρμογής κατάλληλων γειώσεων και εξάλειψης των ανεπιθύμητων βρόγχων ρεύματος ώστε να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη ποιότητα μέτρησης. Τα μετρά δεν είναι καθολικά και χρίζουν εξειδικευμένης μελέτης εφαρμογής.

Για την αντιμετώπιση των ανωτέρω προβλημάτων κρίνεται αναγκαία η μελέτη και κατασκευή εξειδικευμένης συσκευής που να συνδυάζει όλα τα απαραίτητα επί μέρους συστήματα για την τροφοδότηση των αισθητήρων, την διαμόρφωση του σήματος σε μορφή αναγνώσιμη από τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα, τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα και όλες τις απαραίτητες διασυνδέσεις.

Επιπλέον τίθεται η ανάγκη ανάπτυξης λογισμικού οδήγησης τέτοιων διατάξεων που να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- ♦ Ευελιξία και παραμετροποίηση στα μετρούμενα «κανάλια».
- ♦ Δυνατότητα μέτρησης σε κάθε τύπο κινητήρα, δίχρονο ή τετράχρονο, οποιασδήποτε διάταξης και αριθμού κυλίνδρων.
- ♦ Αυτόματη προσαρμογή της οθόνης και του πρωτόκολλου μέτρησης στο τύπο του κινητήρα και στην διάταξη- αριθμό των κυλίνδρων.
- ♦ Δυνατότητα οδήγησης μεγάλου εύρους αναλογοψηφιακών μετατροπέων.
- ♦ Αυτόματη αναγνώριση του αναλογοψηφιακού μετατροπέα και διάγνωση της κατάστασης του (π.χ. βλάβη)
- ♦ Προστασία από την μεταβολή των ρυθμίσεων δειγματοληψίας στη διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων των κυλίνδρων.
- ♦ Δυνατότητα ρύθμισης των παραμέτρων του λογισμικού από την οθόνη ή από αρχεία δεδομένων, κατ' επιλογή. Στην δεύτερη περίπτωση ρύθμισης, όπου η παραμετροποίηση και η ρύθμιση γίνεται αυτοματοποιημένα στο παρασκήνιο, η οθόνη πρέπει να είναι απολύτως απλή για εφαρμογές σε κινητήρες που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες.

1.5.2 Συστηματοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας του σήματος της πίεσης κυλίνδρου και διερεύνηση της επίδρασης της επεξεργασίας στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της διάγνωσης

Παρά το γεγονός ότι η μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου είναι στο επίκεντρο της έρευνας από τις απαρχές της μελέτης των εμβολοφόρων κινητήρων [1.36], παραμένουν πολλά ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Από αυτά τα σημαντικότερα είναι:

- ♦ η αναφορά της πίεσης σε απόλυτη τιμή [1.37],

- ♦ η αναφορά σε γωνιακή θέση [1.38, 1.39],
- ♦ η μελέτη διαφόρων πηγών σφαλμάτων που επηρεάζουν την ποιότητα του πρωτογενούς σήματος και κατ' επέκταση των παράγωγων εκτιμήσεων [1.40, 1.41],
- ♦ οι διακυμάνσεις από κύκλο σε κύκλο που παρατηρούνται ακόμα και σε σταθερή λειτουργία (όχι μεταβατική) [1.42, 1.43].

Άλλα τυπικά προβλήματα σχετίζονται με την ανακριβή βαθμονόμηση του μετρητικού συστήματος, την αντιμετώπιση του θερμικού ρεύματος, τον ηλεκτρικό θόρυβο και τον θόρυβο που οφείλεται σε ταλαντώσεις και άλλα.

Η σημασία της κάθε πηγής σφάλματος εξαρτάται από την ανάλυση που πρόκειται να πραγματοποιηθεί. Για παράδειγμα η εκτίμηση της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης είναι πολύ ευαίσθητη στην αναφορά γωνίας στροφάλου ενώ δεν είναι το ίδιο ευαίσθητη στον θόρυβο και στην εσφαλμένη αναφορά της απόλυτης πίεσης. Αντίθετα ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος τόσο στον θόρυβο όσο και στην απόλυτη τιμή της πίεσης καύσης. Συνεπώς οι ανάγκες για επεξεργασία υπαγορεύονται από την εφαρμογή.

Επιπλέον, πολλές προτεινόμενες τεχνικές που θεωρούνται τυπικά αναγκαίες για την διασφάλιση της ποιότητας των αποτελεσμάτων δεν είναι εφαρμόσιμες σε αρκετές περιπτώσεις. Για παράδειγμα, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για διάφορους υπολογισμούς όπως η εκτίμηση του ρυθμού καύσης απαιτούνται τυπικά 50 - 500 κύκλοι λειτουργίας [1.44, 1.45, 1.46, 1.47, 1.48]. Στους βραδύστροφους ναυτικούς κινητήρες η καταγραφή αυτού του αριθμού κύκλων, λόγω του μεγάλου χρόνου μέτρησης, συνεπάγεται σημαντική πιθανότητα μεταβολής των συνθηκών λειτουργίας (η λήψη μόνο 50 κύκλων σε κινητήρα με εύρος στροφών 20 - 120 στροφές ανά λεπτό, τυπικό εύρος για ναυτικό κινητήρα, διαρκεί από 150 sec έως 25 sec).

Για την μελέτη και αντιμετώπιση τέτοιων θεμάτων γίνεται συστηματικοποίηση των διαδικασιών επεξεργασίας της μέτρησης έχοντας ως γνώμονα τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Επιπροσθέτως γίνεται αποτύπωση σε μορφή εξισώσεων της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας επεξεργασίας του σήματος της πίεσης με απώτερο σκοπό την διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης συμβατικών μικροελεγκτών για την επεξεργασία του σήματος ώστε να είναι εφικτή η ανάπτυξη αυτόνομου φορητού συστήματος λήψης μετρήσεων και απεικόνισης των βασικών μεγεθών. Παράλληλα επιδιώκεται ο προσδιορισμός των περιορισμών που τίθενται στην εφαρμογή αυτής της διαδικασίας.

1.5.3 Ανάπτυξη συσκευής μέτρησης της μέσης και στιγμιαίας στρεπτικής ροπής του κινητήρα.

Στην κατεύθυνση της δυνατότητας επέκτασης της διαγνωστικής τεχνικής με χρήση εναλλακτικών μη παρεμβατικών μετρήσεων, αναπτύχθηκε συσκευή μέτρησης της ροπής. Ο συσκευή αναπτύχθηκε εξ' ολοκλήρου στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Αρχικά εφαρμόστηκε στο εργαστήριο σε μονοκύλινδρο κινητήρα και στην συνέχεια εγκαταστάθηκε σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής παρέχοντας ακριβείς μετρήσεις της στιγμιαίας και μέσης ροπής του κινητήρα. Η ανάλυση των μετρήσεων φανερώνει ότι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την παρούσα διαγνωστική τεχνική (μέση ροπή) αλλά και από νέες τεχνικές (στιγμιαία ροπή).

Στην διαγνωστική διαδικασία η γνώση της ισχύος του κινητήρα είναι σημαντική γιατί αποτελεί την βάση για σύγκριση μεγεθών ή την αναγωγή μεγεθών όταν οι συνθήκες της δοκιμής διαφέρουν. Τα περιφερειακά δεδομένα του κινητήρα (από τα αναλογικά όργανα) σε συνδυασμό με την ισχύ του κινητήρα αποκτούν με τον τρόπο αυτό υψηλή διαγνωστική αξία.

Στην διαγνωστική μέθοδο που χρησιμοποιείται στη παρούσα διατριβή, η ισχύς του κινητήρα θεωρείται άγνωστος προς προσδιορισμό. Αν όμως υπήρχε η δυνατότητα παροχής της ισχύος ως σήμα εισόδου θα ήταν δυνατή η παραλλαγή της μεθόδου ώστε η επίλυση του προβλήματος να ακολουθεί άλλη κατεύθυνση, υπολογίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια τις υφιστάμενους παραμέτρους ή υπολογίζοντας νέες παραμέτρους. Συγκεκριμένα από την ισχύ και τα πρωτογενή διαγράμματα πίεσης μπορεί να καθοριστεί η θέση του άνω νεκρού σημείου, η οποία στην παρούσα μορφή της μεθόδου θεωρείται άγνωστος περιορίζοντας έτσι την δυνατότητα υπολογισμού άλλων αγνώστων. Επιπλέον από την γνώση της ισχύος μπορεί να εκτιμηθεί και να διορθωθεί η διακύμανση του φορτίου στη διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων της πίεσης του κυλίνδρου (το θέμα αυτό προσεγγίζεται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο).

Συνεπώς η εκτίμηση της ισχύος από την μέτρηση με αισθητήρα ροπής (και την μέση ταχύτητα περιστροφής) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την διαγνωστική τεχνική.

Λόγω της κυκλικής φύσης της πίεσης αερίου και των παλινδρομούντων αδρανειακών δυνάμεων η στιγμιαία ροπή του κινητήρα παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις στη διάρκεια του κύκλου. Αντίθετα, η ροπή αντίστασης (φορτίο) παραμένει πρακτικά σταθερή στη διάρκεια του κύκλου. Η αδρανειακή μάζα του σφονδύλου εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής που οφείλονται σε αυτές τις διαφορές.

Η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής θεωρείται ευκολότερη στην μέτρηση από την ροπή, χρησιμοποιώντας κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου ή αισθητήρα hall που ανιχνεύει σημάδια στον σφόνδυλο. Όμως για κινητήρα που λειτουργεί

στο πεδίο δοκιμών είναι πρακτικά πολύ δύσκολη μια τέτοια εφαρμογή. Αντίθετα η τοποθέτηση διάταξης για την μέτρηση της ροπής στον άξονα, είναι πιο ευέλικτη, ειδικά σε ναυτικούς κινητήρες με έλικα σταθερού βήματος, που ο άξονας είναι «διαθέσιμος» για αρκετά μέτρα μέχρι το τελευταίο έδρανο πριν την έλικα. Επιπλέον ο αισθητήρας ροπής εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι μετράει σε υψηλότερο επίπεδο παραγωγής [1.49], σε αντίθεση με τις μετρήσεις ταχύτητας περιστροφής όπου μειώνεται σημαντικά ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) λόγω παραγωγής. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες εφαρμογές της στιγμιαίας ροπής και ταχύτητας περιστροφής στον έλεγχο [1.50] και την διαγνωστική κινητήρων. Παραδείγματα που αφορούν την διαγνωστική περιλαμβάνουν την ανίχνευση έλλειψης έναυσης, [1.51, 1.52] μερικής καύσης [1.53], την κατανομή παραγωγής ισχύος στους κυλίνδρους [1.54, 1.55, 1.56] ή ακόμα και την ανίχνευση δυσλειτουργιών στους κυλίνδρους [1.57, 1.58].

Η στιγμιαία ροπή μπορεί είτε να εκτιμηθεί είτε να μετρηθεί. Αρκετές εργασίες αναφέρονται στην εκτίμηση της ροπής του κινητήρα από την διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία του άξονα [1.59, 1.60]. Το γινόμενο της γωνιακής επιτάχυνσης επί την συνολική ροπή αδρανείας του συστήματος ισούται με την συνισταμένη ροπή, η οποία συνίσταται στην ροπή που οφείλεται στην δύναμη που ασκούν τα αέρια στο έμβολο, στην ροπή λόγω τριβών και βοηθητικών συστημάτων, στην ροπή που οφείλεται στις μαζικές δυνάμεις και στην ροπή αντίστασης (φορτίο). Πάνω σε αυτήν την βασική λογική υπολογισμού της ροπής έχουν παρουσιαστεί διάφορες παραλλαγές [1.61, 1.62, 1.63, 1.64, 1.65, 1.66]

Για την μέτρηση της ροπής έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις. Σε κάθε περίπτωση μετράται η παραμόρφωση στον άξονα ή σε πρόσθετο εξάρτημα. Η περίπτωση του πρόσθετου εξαρτήματος απαιτεί σοβαρή μετατροπή που δεν είναι πρακτικά εφικτή σε κινητήρες που λειτουργούν στο πεδίο εφαρμογής. Για την μέτρηση της παραμόρφωσης του άξονα έχει προταθεί η χρήση μαγνητοσυστολικών υλικών [1.67], τα οποία εμφανίζουν μεταβολή στις μαγνητικές τους ιδιότητες που συσχετίζεται με την παραμόρφωση που υφίστανται. Η μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων γίνεται χωρίς επαφή (με απομακρυσμένα πηνία), οπότε δεν υπάρχει ανάγκη διασύνδεσης, πέρα της μαγνητικής, με τον περιστρεφόμενο άξονα για την διενέργεια μέτρησης με αυτήν την μέθοδο. Μια τέτοια λύση δεν προτιμάται στην παρούσα εργασία, διότι η μη άμεση μέτρηση εισαγάγει πρόσθετη αβεβαιότητα η οποία στα πρώτα στάδια μιας διερεύνησης δεν είναι διαχειρίσιμη. Άλλη λύση, πιο διαδεδομένη, για την μέτρηση της παραμόρφωσης του άξονα είναι η εφαρμογή μυκηνσιομέτρων [1.68]. Σε αυτήν την περίπτωση είναι αναγκαία η εύρεση λύσης για την μετάδοση των δεδομένων από τον περιστρεφόμενο άξονα στην στατική βάση. Τίθεται όμως το ερώτημα της παραμόρφωσης δεδομένων κατά την μετατροπή αυτή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αισθητήρας ροπής [1.69, 1.70] που έχει εγκατασταθεί σε εξακύλινδρο κινητήρα Diesel στο Chalmers University of Technology έχει παράσχει σημαντικό υλικό (μετρήσεις) που αποτέλεσε βάση για πληθώρα ερευνητικών εργασιών [1.71, 1.72, 1.73, 1.74, 1.75].

Για τους παραπάνω λόγους μελετάται αναλυτικά και προτείνεται νέα συσκευή για την μέτρηση της ροπής.

1.5.4 Ανάλυση της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου στα αποτελέσματα της διάγνωσης.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορα θέματα που σχετίζονται με την ακρίβεια της μέτρησης της πίεσης καύσης. Η αντιστοίχιση των μετρημένων τιμών πίεσης στη γωνία στροφάλου (αναφορά της μέτρησης σε γωνία στροφάλου) έχει συγκεντρώσει αρκετό ερευνητικό ενδιαφέρον κυρίως σχετικά με τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του άνω νεκρού σημείου.

Ερευνες υποδεικνύουν ότι σφάλμα 1^ο γωνίας στροφάλου στην τοποθέτηση του ΑΝΣ μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση μέχρι και 10% στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης πίεσης και 25% στην εκτίμηση εκλυόμενης θερμότητας από την καυση [1.39]. Συνεπώς απαιτείται προσδιορισμός του ΑΝΣ με σφάλμα μικρότερο της 0.1^ο γωνίας στροφάλου [1.78].

Για το προσδιορισμό του άνω νεκρού σημείου υπάρχει η μετρητική και η υπολογιστική προσέγγιση. Για το μετρητικό προσδιορισμό χρησιμοποιείται αισθητήρας που ανιχνεύει σημάδια στον σφόνδυλο, που αντιστοιχούν σε μια γνωστή γωνία στροφάλου. Για την υπολογιστική προσέγγιση έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι [1.79, 1.80, 1.81, 1.39], συμπεριλαμβανομένης αυτής που υιοθετείται στην παρούσα διαγνωστική τεχνική [1.83, 1.84].

Επιπλέον, στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι είναι σημαντικό οι μετρήσεις να γίνονται με δειγματοληψία σταθερού βήματος γωνίας στροφάλου [1.85]. Αυτό είναι απολύτως λογικό, διότι οι θερμοδυναμικοί υπολογισμοί γίνονται με βάση τη γωνία στροφάλου του κινητήρα, απ' όπου υπολογίζεται ο όγκος του κυλίνδρου. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου ώστε να διασφαλίζεται η μέτρηση σε συγκεκριμένα διαστήματα γωνίας στροφάλου.

Όμως σε κινητήρες που λειτουργούν στο πεδίο δεν είναι συνήθως δυνατή η εφαρμογή κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου και συνεπώς είναι διαδεδομένη η μέτρηση με δειγματοληψία σταθερού βήματος χρόνου. Για την αναφορά της μέτρησης σε γωνία στροφάλου, κατά την εξεργασία της μέτρησης, γίνεται γραμμική αναγωγή του χρόνου σε γωνία στροφάλου. Όμως στην περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται στη διάρκεια του κύκλου, τότε η γραμμική αναγωγή προκαλεί την εισαγωγή σφάλματος στην μέτρηση.

Παρά το γεγονός ότι είναι γνωστή η αναγκαιότητα ψηφιοποίησης με σταθερό βήμα γωνίας [1.85] αλλά και η δυσκολία αυτής της μέτρησης σε εφαρμογές στο πεδίο κανονική λειτουργίας των κινητήρων, υπάρχει περιορισμένη πληροφορία στην βιβλιογραφία για τα σφάλματα που προκύπτουν στην καταγραφή της πίεσης κυλίνδρου και τα παράγωγα μεγέθη από την δειγματοληψία σταθερού βήματος χρόνου και σχετικά με τις μεθόδους αντιμετώπισης του προβλήματος. Για τους παραπάνω λόγους γίνεται εκτεταμένη διερεύνηση στα πλαίσια της παρούσας διατριβής στο εργαστήριο αλλά και στο πεδίο λειτουργίας.

Αναπτύχθηκε νέα πρωτότυπη μεθοδολογία και συσκευή για την καταγραφή με ακρίβεια της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου, χρησιμοποιώντας το σήμα κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου. Η συσκευή αυτή συνδυάζεται με δύο συστήματα δειγματοληψίας, ενός σταθερού βήματος χρόνου και ενός σταθερού βήματος γωνίας στροφάλου, σε μια σύνθετη μετρητική διάταξη που εφαρμόζεται σε πειραματικό μονοκύλινδρο κινητήρα. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας περιστροφής στην αντιστοίχιση γωνίας στροφάλου στα δείγματα μετρήσεων με δειγματοληψία σταθερού χρονικού βήματος. Έτσι καταγράφεται και ποσοτικοποιείται το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου χρησιμοποιώντας μετρήσεις με σταθερό βήμα χρόνου, οδηγώντας στην κατασκευή χαρτών σφάλματος για τον συγκεκριμένο κινητήρα.

Επιπλέον διερευνάται η επίδραση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στην εκτίμηση μεγεθών που έχουν διαγνωστική αξία χρησιμοποιώντας μετρήσεις πίεσης κυλίνδρου που έχουν ληφθεί με δειγματοληψία σταθερού χρονικού βήματος. Αξιολογείται η επίδραση του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος, της θέσης έναυσης, του ρυθμού καύσης και στην σωρευτική έκλυση θερμότητας, που είναι τα μεγέθη που επηρεάζονται περισσότερο.

Για την διερεύνηση του μηχανισμού εισαγωγής του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου και την πρόταση και αξιολόγηση εμπειρικών μεθόδων ανίχνευσης και διόρθωσης του σφάλματος αυτού, αναπτύσσεται μεθοδολογία συσχετισμού των μετρήσεων πίεσης με σταθερό βήμα χρόνου, πίεσης με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου και ταχύτητας περιστροφής.

Προτείνεται μέθοδος αξιολόγησης της έντασης της διακύμανσης από την ίδια την μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου με σταθερό βήμα χρόνου, χωρίς δηλαδή την ανάγκη επιπλέον μέτρησης. Από την ένταση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής καθίσταται σαφές αν υπάρχει ανάγκη διόρθωσης. Επιπλέον προτείνονται τρεις εμπειρικές μέθοδοι διόρθωσης για τρία διαφορετικά σενάρια διαθέσιμων δεδομένων εισόδου. Τέλος εξετάζεται η επάρκεια των τριών μεθόδων για την διόρθωση του σφάλματος σε μεγέθη με διαγνωστική αξία.

Για την διερεύνηση της ύπαρξης και έντασης του σφάλματος σε μεγάλους κινητήρες που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες, πραγματοποιούνται μετρήσεις σε τέσσερις μεγάλους πολυκύλινδρους κινητήρες Diesel, τρεις ναυτικούς με ισχύ 18MW, 16MW και 68MW και έναν ηλεκτροπαραγωγής με ισχύ 15MW για τους οποίους υπήρχαν αξιόπιστες διατάξεις καταγραφής της ισχύος. Από τις μετρήσεις της πίεσης κυλίνδρου με σταθερό βήμα χρόνου εκτιμάται η πραγματική ισχύς σε κάθε μέτρησης. Με αναφορά την μετρημένη ισχύ από τα εγκατεστημένα όργανα εκτιμάται το σφάλμα εκτίμησης της ισχύος, που αποδίδεται στην διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής εντός του κύκλου για κάθε κινητήρα συναρτήσει του φορτίου. Τέλος προτείνεται και παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος διόρθωσης του σφάλματος εκτίμησης της ισχύος που οφείλεται στην διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια της μέτρησης.

1.5.5 Ανάλυση της επίδρασης της διακύμανσης του φορτίου στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων στα αποτελέσματα της διάγνωσης

Από διαδοχικές μετρήσεις της πίεσης των διαδοχικών κυλίνδρων εξάγονται συγκριτικά συμπεράσματα για την λειτουργία τους όπως η παραγόμενη ισχύς και η κατανάλωση καυσίμου.

Αν όμως στη διάρκεια των διαδοχικών μετρήσεων υπάρχει διακύμανση της ισχύος του κινητήρα, εξάγονται λανθασμένα συγκριτικά συμπεράσματα. Για την διερεύνηση και επίλυση του θέματος προτείνονται δυο μεθοδολογίες για την καταγραφή της διακύμανσης της ισχύος. Στη πρώτη μεθοδολογία μετράται διαδοχικά η πίεση του κάθε κυλίνδρου ενώ παράλληλα μετράται και η πίεση ενός κυλίνδρου (π.χ. Νο. 1) που είναι ο κύλινδρος αναφοράς και του οποίου εκτιμάται διαρκώς η ισχύς. Από την διακύμανση της ισχύος του κυλίνδρου αναφοράς εκτιμάται η συνολική διακύμανση της ισχύος του κινητήρα. Στη δεύτερη μεθοδολογία καταγράφεται ταυτόχρονα με την πίεση των διαδοχικών κυλίνδρων η πίεση σάρωσης, χρησιμοποιώντας κατάλληλο αισθητήρα. Αξιοποιώντας τη συσχέτιση της πίεσης σάρωσης με το φορτίο του κινητήρα από τις μετρήσεις των δοκιμών παραλαβής, εκτιμάται η διακύμανση του φορτίου του κινητήρα. Για την διερεύνηση του θέματος αναπτύχθηκε διάταξη για την ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης δύο κυλίνδρων και της πίεσης σάρωσης με ακρίβεια και υψηλή ανάλυση. Ελήφθησαν μετρήσεις από δυο κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής, έναν δίχρονο κινητήρα 11.2MW με επτά κυλίνδρους σε σειρά και έναν τετράχρονο κινητήρα 10.4MW με δώδεκα κυλίνδρους σε διάταξη V.

Αξιολογήθηκε η επίδραση της διακύμανσης ισχύος στη διάρκεια της μέτρησης στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση

της χρήσης των αποτελεσμάτων της διάγνωσης για τη ρύθμιση της ισχύος των κυλίνδρων στη περίπτωση της διακύμανσης φορτίου.

1.5.6 Αξιολόγηση της διαγνωστικής τεχνικής.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε εκτενής διερεύνηση για την αξιολόγηση της υφιστάμενης διαγνωστικής μεθοδολογίας αλλά και των νέων λύσεων που αναπτύχθηκαν, σε ναυτικούς κινητήρες και κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής.

Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά ακριβείς μετρήσεις πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου και παραγόμενης ισχύος του κινητήρα στο πεδίο εφαρμογής οι οποίες στην συνέχεια συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της διάγνωσης. Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν σε διάφορα φορτία και ταχύτητες περιστροφής και σε διάφορες προπορείες έγχυσης εν πλω και σε σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Η διενέργεια δοκιμών ισοδύναμων με εργαστηριακές σε κινητήρες πραγματικής λειτουργίας παρουσιάζει ιδιαίτερη πρόκληση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η λειτουργία των κινητήρων στο πεδίο εφαρμογής δεν είναι απολύτως ελέγξιμη λόγω περιορισμών της εγκατάστασης αλλά και λόγω του μεγάλου τους μεγέθους. Επιπροσθέτως, επειδή πρόκειται για μονάδες κανονικής λειτουργίας, δεν είναι δυνατόν να υπάρξει παρέμβαση ή να επηρεαστεί η απρόσκοπτη λειτουργία τους. Τονίζεται ότι η διερεύνηση αυτή με σκοπό την εκτεταμένη αξιολόγηση μιας διαγνωστικής τεχνικής στο πεδίο δοκιμών πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά με αυτή την ένταση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

1.6 Βιβλιογραφία

- [1.1] Ishii Y., "A half century with marine diesel engines", Trans IMarE, Vol.109 (1), pp.33-45, 1997.
- [1.2] Κυρτάτος Ν.Π., "Σημαντικά Θέματα Έρευνας και Εξέλιξης στους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel", Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- [1.3] Λάμαρης Β.Θ., Προσδιορισμός της Λειτουργικής Κατάστασης και των Εκπομπών Ρύπων Κινητήρων Ντήζελ με συνδυασμένη χρήση μοντέλου προσομοίωσης και μη-καταστροφικών μεθόδων μέτρησης, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- [1.4] Ζάννης Θ.Κ., Θερμοδυναμική Ανάλυση και Πειραματική Διερεύνηση της Επίδρασης των Υγρών Καυσίμων σε Κινητήρες Ντήζελ, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- [1.5] MAN Diesel, "Low Speed Engines in Stationary Diesel Power Plants", MAN Diesel SE, Augsburg, Germany, 2007.
- [1.6] Jones N.B., Yu-Hua Li, "A Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Diesel Engines", Tribotest International Journal, Vol.6 (3), pp.267-291, 2000.

- [1.7] Τσαλαβούτας Α.Δ., Ανάπτυξη Συστημάτων Παρακολούθησης Λειτουργίας Βιομηχανικών Αεριοστροβίλων, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- [1.8] Carlton J.S., Holland, C.G., Newbury, M.J., Rhoden, D. and Triner, D.A., "Recent operational experience and research relating to marine machinery condition monitoring", Trans. - IMarE, Vol.109 (1), pp.33-45, 1997.
- [1.9] Antory D., Kruger, U., Irwin, G. and McCullough, G., "Fault diagnosis in internal combustion engines using non-linear multivariate statistics", Proceedings of the IMechE, Part I: J. of Systems and Control Engineering, Vol.219 (4), pp.243-258, 2005.
- [1.10] Sharkey A.J.C., Chandroth, G.O, and Sharkey, N.E, "A Multi-Net System for the Fault Diagnosis of a Diesel Engine", Neural Computing and Applications, Vol.2 (152-160), 2000.
- [1.11] Chandroth G.O., Sharkey, A.J.C. and Sharkey, N.E., "Artificial neural nets and cylinder pressures in diesel engine fault diagnosis", Proceedings of INMARCO98 Shipping Trends for the Next Millennium, Vol.1, pp.9.1-9.2, 1998.
- [1.12] Mesbahi E., Arriagada, J. and Ghorban, H., "Diesel engine fault diagnosis by means of ANNs: A comparison of two methods", Proceedings of IMarEST – Part B – J. of Marine Design and Operations, Vol.2004 (6), pp.25-33, 2004.
- [1.13] Chen P., Taniguchi, M., Toyota, T. and He, Z.J., "Fault diagnosis method for machinery in unsteady operating condition by instantaneous power spectrum and genetic programming", Mech. Systems and Signal Processing, Vol.19, pp.175-194, 2005.
- [1.14] Sun R., Tsung, F. and Qu, L., "Combining bootstrap and genetic programming for feature discovery in diesel engine diagnosis", Int. J. of Industrial Engineering, Vol.11 (3), pp.273-281, 2004
- [1.15] Wen-Xian Y., "Establishment of the mathematical model for diagnosing the engine valve faults by genetic programming", J. of Sound and Vibration, Vol.293 (1-2), pp.213-226, 2006.
- [1.16] Nestorides E.J., A Handbook on Torsional Vibration, British Internal Combustion Engine Research Association, 1958.
- [1.17] Ρακόπουλος Κ.Δ., Μ.Ε.Κ. Π -Εμβάθυνση στην Κατασκευή και Λειτουργία, Εκδόσεις "Γρ. Φούντας", Αθήνα, 2000.
- [1.18] deBotton G., Ben-Ari, J. and Sher., E., "Vibration monitoring as a predictive maintenance tool for reciprocating engines", Proceedings of the IMechE, Part D: J. of Automobile Engineering, Vol.214 (8), pp.895-903, 2000.
- [1.19] Ftoutou E., Chouchane, M., Besbes, N., Ouali, R., "Injection fault detection of a diesel engine by vibration analysis", ICAMEM'06, Tunisie, 2006.
- [1.20] Margaronis I.E., "The torsional vibrations of marine Diesel engines under fault operation of its cylinders", ForschungimIngenieurwesen - Engineering Research, Vol.58 (1/2), pp.13-25, 1992.
- [1.21] Ren Y., Tianyou H., Ping Y., Xin L., "Approach to Diesel Engine Fault Diagnosis Based on Crankshaft Angular Acceleration Measurement and its Realization", International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada, July, 2005.
- [1.22] Lamarinis V., Karangelos E., Hountalas D., "A Torsional Vibration Analysis Methodology for Large-Scale Two-Stroke Diesel Engines used for Power

- Generation", 25th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Vienna, Austria, 21-24 May, 2007.
- [1.23] Charlesa P., Sinhaa, J., Gub, F., Lidstonea, L. and Ball, A.D., "Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel engines for combustion related diagnosis", *J. of Sound and Vibration*, Vol.321 (3-5), pp.1171-1185, 2008.
- [1.24] Shiyuan L., Fengshou, G., Ball, A., "Detection of engine valve faults by vibration signals measured on the cylinder head", *Proceedings of the IMechE, Part D: J. of Automobile Engineering*, Vol.220 (3), pp.379-386, 2006.
- [1.25] Cavina N., Sgatti, S., Cavanna, F., Bisanti, G., "Combustion Monitoring based on Engine Acoustic Emission Signal Processing", *SAE Paper No.2009-01-1024*.
- [1.26] Steel J.A., Reuben, R. L., "Recent developments in monitoring of engines using acoustic emission", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol.40 (1), pp.45-57, 2005.
- [1.27] El-Ghamry M., Steel J.A., Reuben R.L., Fog T.L., "Indirect measurement of cylinder pressure from diesel engines using acoustic emission", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.19 (2005), pp.751-765, 2004.
- [1.28] [49] Sharkey A.J.C., Chandroth, G.O., Sharkey, N.E., "Acoustic Emission, Cylinder Pressure and Vibration: A Multisensor Approach to Robust Fault Diagnosis", *IJCNN 2000, Italy, July 24-27, 2000*.
- [1.29] Kouremenos D.A., Hountalas, D.T., "Diagnosis and Condition Monitoring of Medium Speed Marine Diesel Engines", *Tribotest Int. J.*, Vol.4 (1), pp.63-91, 1997.
- [1.30] Lamarinis V.T., Hountalas, D.T., "Possibility to Determine Diesel Engine Condition and Tuning from the Application of a Diagnostic Technique at a Single Operating Point", *SAE International Journal of Engines*, Vol.2, pp.585-605, 2009.
- [1.31] C.D Rakopoulos, D.C Rakopoulos, E.G Giakoumis, D.C Kyritsis, Validation and sensitivity analysis of a two zone Diesel engine model for combustion and emissions prediction, *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issues 9-10, June 2004, Pages 1471-1495
- [1.32] Challen B., Baranescu, R., *Diesel Engine Reference book*, SAE International, Warrendale, USA, 1999.
- [1.33] Nyberg M., *Model Based Fault Diagnosis: Methods, Theory, and Automotive Engine Applications*, PhD Thesis, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, 1999.
- [1.34] Kouremenos D.A., Hountalas D.T. and Kotsiopoulos P.N., "Development of a Thermodynamic Method for Diagnosis and Tuning of Diesel Engines and Its Application on Marine Engines.", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal for Power and Energy*, Vol.209, pp.125-139, 1995.
- [1.35] Lamarinis, V., Antonopoulos, A., and Hountalas, D., "Evaluation of an Advanced Diagnostic Technique for the Determination of Diesel Engine Condition and Tuning Based on Laboratory Measurements," *SAE Technical Paper 2010-01-0154*, 2010
- [1.36] M.A. Browne, Diesel engine instrumentation, *Journal of Microcomputer Applications*, Volume 5, Issue 4, October 1982, Pages 265-285, ISSN 0745-7138, [http://dx.doi.org/10.1016/0745-7138\(82\)90017-3](http://dx.doi.org/10.1016/0745-7138(82)90017-3).
- [1.37] Kangyoon Lee, Maru Yoon, Myoungho Sunwoo, A study on pegging methods for noisy cylinder pressure signal, *Control Engineering Practice*, Volume 16, Issue 8, August 2008, Pages 922-929, ISSN 0967-0661, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.10.007>.

- [1.38] H. Chang, Y. Zhang, L. Chen, An applied thermodynamic method for correction of TDC in the indicator diagram and its experimental confirmation, *Appl. Therm. Eng.* 25 (2005).
- [1.39] E. Pipitone, A. Beccari, Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach, *Appl. Therm. Eng.* 30 (2010) 1914e1926.
- [1.40] D.T. Hountalas, A. Anestis, Effect of pressure transducer position on measured cylinder pressure diagram of high speed diesel engines, *Energy Conv. Manag.* 39 (1998) 589e607.
- [1.41] R.S. Davis, G.J. Paterson, Cylinder pressure data quality checks and procedures to maximize data accuracy, *SAE Paper 2006-01-1346*, 2006.
- [1.42] F. Payri, J.M. Luján, C. Guardiola, G. Rizzoni, Injection diagnosis through common-rail pressure measurement, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D-J. Automob. Eng.* 220 (2006) 347e357.
- [1.43] J.M. Luján, J. Galindo, J.R. Serrano, B. Pla, A methodology to identify the intake charge cylinder-to-cylinder distribution in turbocharged direct injection diesel engines, *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008) 065401.
- [1.44] M. Akif Ceviz, Bülent Çavuşoğlu, Ferhat Kaya, İ. Volkan Öner, Determination of cycle number for real in-cylinder pressure cycle analysis in internal combustion engines, *Energy*, Volume 36, Issue 5, May 2011, Pages 2465-2472, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.038>.
- [1.45] Assanis DN, Filipi ZS, Fiveland SB, Syrimis M. A methodology for cycle-by-cycle transient heat release analysis in a turbocharged direct injection diesel engine. *SAE Paper No.: 2000-01-11*, 2000.
- [1.46] Brunt MFJ, Pond RC, Biundo J. Gasoline engine knock analysis using cylinder pressure data. *SAE Paper No.: 980896*, 1998.
- [1.47] Brunt MFJ, Emtage AL. Evaluation of imep routines and analysis errors. *SAE Paper No.: 960609*, 1996.
- [1.48] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Giakoumis EG, Papagiannakis RG, Kyritsis DC. Experimental-stochastic investigation of the combustion cyclic variability in HSDI diesel engine using ethanodiesel fuel blends. *Fuel* 2008;87:1478e91.
- [1.49] Taraza, D., Henein, N., and Bryzik, W., "Determination of the Gas-Pressure Torque of a Multicylinder Engine from Measurements of the Crankshaft's Speed Variation," *SAE Technical Paper 980164*, 1998, doi:10.4271/980164. [1.49]
- [1.50] Javier Franco, Matthew A. Franchek, Karolos Grigoriadis, Real-time brake torque estimation for internal combustion engines, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 22, Issue 2, February 2008, Pages 338-361 [1.50]
- [1.51] Wu, Z. and Lee, A., "Misfire Detection Using a Dynamic Neural Network with Output Feedback," *SAE Technical Paper 980515*, 1998 [1.51]
- [1.52] Cavina, N., Corti, E., Minelli, G., and Serra, G., "Misfire Detection Based on Engine Speed Time-Frequency Analysis," *SAE Technical Paper 2002-01-0480*, 2002, doi:10.4271/2002-01-0480.
- [1.53] Cavina, N., Poggio, L., and Sartoni, G., "Misfire and Partial Burn Detection based on Ion Current Measurement," *SAE Int. J. Engines* 4(2):2451-2460, 2011, doi:10.4271/2011-24-0142.

- [1.54] Williams, J. and Witter, M., "Individual Cylinder IMEP Estimation Using Crankshaft Angular Velocity Measurements," SAE Technical Paper 2001-01-0990, 2001, doi:10.4271/2001-01-0990.
- [1.55] Gyan, P., Ginoux, S., Champoussin, J., and Guezennec, Y., "Crankangle Based Torque Estimation: Mechanistic / Stochastic," SAE Technical Paper 2000-01-0559, 2000.
- [1.56] Guezennec, Y. and Gyan, P., "A Novel Approach to Real-Time Estimation of the Individual Cylinder Combustion Pressure for S.I. Engine Control," SAE Technical Paper 1999-01-0209, 1999, doi:10.4271/1999-01-0209
- [1.57] Taraza, D., Henein, N., and Bryzik, W., "Diesel Engine Diagnosis Based on Analysis of the Crankshaft's Speed Variation," SAE Technical Paper 982540, 1998, doi:10.4271/982540
- [1.58] M. Desbazeille, R.B. Randall, F. Guillet, M. El Badaoui, C. Hoisnard, Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 24, Issue 5, July 2010, Pages 1529-1541, ISSN 0888-3270
- [1.59] E.G. Giakoumis, C.D. Rakopoulos and A.M. Dimaratos, "Study of crankshaft torsional deformation under steady-state and transient operation of turbocharged diesel engines", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt. K, Journal of Multi-body Dynamics*, Vol. 222, pp. 17-30, 2008.
- [1.60] E.G. Giakoumis and A.M. Dimaratos, "The effect of various parameters on the crankshaft torsional deformation of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions", *20th International ECOS Conference, Padova, Italy, June 25-28, 2007*
- [1.61] I. Haskara, L. Mianzo, Real-time cylinder pressure and indicated torque estimation via second order sliding modes, in: *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 5, pp. 3324-3328, 2001.
- [1.62] Y.-Y. Wang, V. Krishnaswani, G. Rizzoni, Even-based estimation of indicated torque for IC engines using sliding-mode observers, *Control Engineering Practice* 5 (8) (1997) 1123–1129.
- [1.63] J. Chauvin, G. Corde, P. Moulin, M. Castagne, N. Petit, P. Rouchon. Real-time combustion torque estimation on a diesel engine test bench using time-varying Kalman filtering, in: *43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, December 2004*.
- [1.64] J. Deur, D. Pavkovic, D. Hrovart, Estimation of SI engine load torque: adaptive Kalman filter vs. Luenberger estimator, in: *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, CA, November 2004*.
- [1.65] I. Haskara, L. Mianzo, Real-time cylinder pressure and indicated torque estimation via second order sliding modes, in: *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 5, pp. 3324-3328, 2001
- [1.66] G. Rizzoni, S. Drakunov, Y.-Y. Wang, On-line estimation of indicated torque in IC engine via sliding mode observers. in: *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 3, pp 2123–2127, June 1995.
- [1.67] Utsui, Y., Satoh, H., and Makigawa, Y., "Magnetostrictive Type Torque Sensor," SAE Technical Paper 910003, 1991, doi:10.4271/910003.
- [1.68] Perronne, J., Renner, M., and Gissingner, G., "On Line Measurement of Braking Torque Using a Strain Sensor," SAE Technical Paper 940333, 1994

- [1.69] Wallin, C., Gustavsson, L., and Donovan, M., "Engine Monitoring of a Formula 1 Racing Car Based on Direct Torque Measurement," SAE Technical Paper 2002-01-0196, 2002, doi:10.4271/2002-01-0196.
- [1.70] Wallin, C. and Rapson, G., "Condition Based Maintenance of a Formula 1 Racing Car based on Direct Torque Measurement," SAE Technical Paper 2009-01-0643, 2009, doi:10.4271/2009-01-0643.
- [1.71] Andersson, I., McKelvey, T., and Thor, M., "Evaluation of a Closed Loop Spark Advance Controller Based on a Torque Sensor," SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. 1(1):365-371, 2009, doi:10.4271/2008-01-0987.
- [1.72] Thor, M., Egardt, B., McKelvey, T., and Andersson, I., "Parameterized Diesel Engine Combustion Modeling for Torque Based Combustion Property Estimation," SAE Technical Paper 2012-01-0907, 2012, doi:10.4271/2012-01-0907.
- [1.73] Thor, M., Andersson, I., and McKelvey, T., "Modeling, Identification, and Separation of Crankshaft Dynamics in a Light-Duty Diesel Engine," SAE Technical Paper 2009-01-1798, 2009, doi:10.4271/2009-01-1798.
- [1.74] Larsson, S. and Andersson, I., "An Experimental Evaluation of Torque Sensor Based Feedback Control of Combustion Phasing in an SI-engine," SAE Technical Paper 2005-01-0060, 2005, doi:10.4271/2005-01-0060
- [1.75] Larsson, S. and Schagerberg, S., "SI-Engine Cylinder Pressure Estimation using Torque Sensors," SAE Technical Paper 2004-01-1369, 2004, doi:10.4271/2004-01-1369.
- [1.76] Andersson, I., Thor, M., McKelvey, T., The torque ratio concept for combustion monitoring of internal combustion engines, (2012) Control Engineering Practice, 20 (6), pp. 561-568.
- [1.77] Hanbao Chang, Yusheng Zhang, Lingen Chen, An applied thermodynamic method for correction of TDC in the indicator diagram and its experimental confirmation, Applied Thermal Engineering, Volume 25, Issues 5–6, April 2005, Pages 759-768
- [1.78] Xi-Bo Wang, Kang-Yao Deng, Fang-Zheng He, Zhen-Hua Zhou, A thermodynamics model for the compression and expansion process during the engine's motoring and a new method for the determination of TDC with simulation technique, Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issues 11–12, August 2007, Pages 2003-2010
- [1.79] M. J. Stas, An universally applicable thermodynamic method for TDC determination, SAE Paper 2000-01-0561, 2000.
- [1.80] M. Morishita, T. Kushiyama, An improved method for determining the TDC position in a pV - diagram, SAE Paper 980625, 1998.
- [1.81] M. Tazerout, O. Le Corre and S. Rouseau, TDC Determination in IC Engines Based on the Thermodynamic Analysis of the emperature-Entropy Diagram, SAE paper 1999-01-1489; 1999.
- [1.82] Emiliano Pipitone, Alberto Beccari, Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach, APPL THERM ENG 2010; 30(14):1914-26
- [1.83] D. T. Hountalas, A. D. Kouremenos, Development and application of a fully automatic troubleshooting method for large marine diesel engines, Applied Thermal Engineering, 19(3), Pages 299-324; 1999
- [1.84] D.T. Hountalas and A.K. Antonopoulos , Comparative Evaluation of available TDC estimation techniques, ECOS 2011

- [1.85] F. Payri, J.M. Luján, J. Martín, A. Abbad, Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 24, Issue 6, August 2010, Pages 1767-1784, ISSN 0888-3270, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.12.011>.
- [1.86] G. Rizzoni, S. Drakunov, Y.-Y. Wang, On-line estimation of indicated torque in IC engine via sliding mode observers.in: *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 3, pp 2123–2127, June 1995.
- [1.87] S. Gineoux, J.C. Champoussin. Engine torque determination by crankangle measurements: state of the art, future prospects, SAE Technical Paper 970532, 1997.
- [1.88] X.D. Chen, M. Roskilly, A crank angular velocity based method for engine IMEP measurement for idle quality investigation and adaptive ignition time trimming to improve quality, SAE Technical Paper 1999-01-0855, 1999.
- [1.89] Hashimoto, S., Kanda, Y., and Onishi, K., "Development of a Torque Measurement Method on a Rotating Shaft Using a Battery-Less Sensor," SAE Technical Paper 2012-01-0909, 2012, doi:10.4271/2012-01-0909.
- [1.90] Wurst, R., "Engine Torque Measurement Using Telemetry," SAE Technical Paper 2004-01-2679, 2004, doi:10.4271/2004-01-2679.
- [1.91] P.M. Azzoni, G. Serra, R. Flora, G. Minelli, D. Moro, Indicated and load torque estimation using crankshaft angular velocity measurements, SAE Technical Paper 1999-01-0543, 1999.
- [1.92] Y. Shimasaki, M. Kobayashi, H. Sakamoto, M. Ueno, M. Hasegawa, S. Yamaguchi, T. Suzuki, Study on engine management system using chamber pressure sensor integrated with spark plug, SAE Paper 2004-01-0519, 2004.
- [1.93] M.T. Wlodarczyk, High accuracy glow plug- integrated cylinder pressure sensor for closed loop engine control, SAE Paper 2006-01-0184, 2006.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

2.1 Μέτρηση Πίεσης Θαλάμου Καύσης

2.1.1 Εισαγωγή

Η πίεση εντός του κυλίνδρου είναι μια πολύτιμη πηγή πληροφοριών για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον θάλαμο καύσης. Η επεξεργασία της μετρημένης πίεσης μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες όπως [2.1]:

- ◆ μέγιστη πίεση,
- ◆ ενδεικνύμενη ισχύς,
- ◆ ενδεικνύμενη μέση πίεση, κλπ.

Με εφαρμογή πολυπλοκότερων υπολογισμών μπορεί να εκτιμηθεί

- ◆ η ροή μάζας αέρα [2.2],
- ◆ ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας [2.3],
- ◆ η γωνία έναυσης,
- ◆ η διάρκεια καύσης,
- ◆ η ποιότητα συμπίεσης [2.4], κλπ.

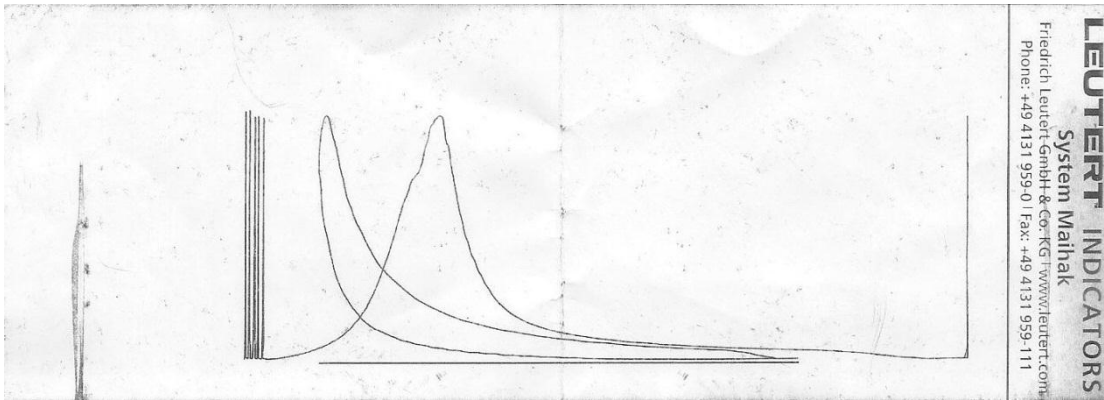
Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή της πίεσης καύσης σε τεχνικές Παρακολούθησης Λειτουργίας και Διάγνωσης Βλαβών (Condition Monitoring and Fault Diagnosis) μεσαίων [2.5] και μεγάλων [2.6] κινητήρων Diesel, που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή και την ναυτιλία [2.7].

Η ακρίβεια στην μέτρηση της πίεσης καύσης είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που παρέχουν αυτές οι τεχνικές. Όμως η μέτρησή της, παρόλο που είναι ευρέως διαδεδομένη, παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες και πιθανές αιτίες σφαλμάτων.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έγινε μια προσπάθεια να αναπτυχθεί ένα πλήρες ευέλικτο σύστημα για την μέτρηση της πίεσης καύσης σε ένα ευρύ φάσμα κινητήρων, με έμφαση στους μεγάλου μεγέθους κινητήρες Diesel. Τα κυριότερα υφιστάμενα προβλήματα που επιδιώχθηκε να επιλύσει η παρούσα προσέγγιση είναι:

1. Φορητότητα, μικρός όγκος και βάρος.
2. Μείωση ηλεκτρικού θορύβου, σε συνδυασμό με τις κατάλληλες γειώσεις μέσω του κινητήρα.
3. Απαλλαγή από την εξωτερική ηλεκτρική τροφοδοσία.
4. Απλότητα στην λειτουργία, μηδενική ανάγκη ρύθμισης.
5. Ασφάλεια των επιμέρους εξαρτημάτων από ηλεκτρικά σοκ.

Για αυτόν το λόγο αρχικά επιλέχθηκε με θεωρητική προσέγγιση ο κατάλληλος αισθητήρας και αξιολογήθηκε συγκριτικά με πρότυπο αισθητήρα για να εντοπιστούν πιθανά προβλήματα. Στην συνέχεια αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε το ηλεκτρονικό κύκλωμα διασύνδεσης που λειτουργεί σαν ενδιάμεσο πριν τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα. Ακολουθώς επιλέχτηκε ο κατάλληλος αναλογοψηφιακός μετατροπέας. Διερευνήθηκε η επίδραση της καλωδίωσης με σκοπό την επιλογή της καταλληλότερης. Τέλος δοκιμάστηκε η πλήρης μετρητική αλυσίδα στο εργαστήριο, σε αντιπαραβολή με αντίστοιχη πρότυπη και στο πεδίο εφαρμογής (Κεφάλαιο 8).



Εικόνα 2-1 Διαγράμματα πίεσης- γωνίας στροφάλου και πίεσης- όγκου, μετρημένα με μηχανικό δυναμοδείκτη

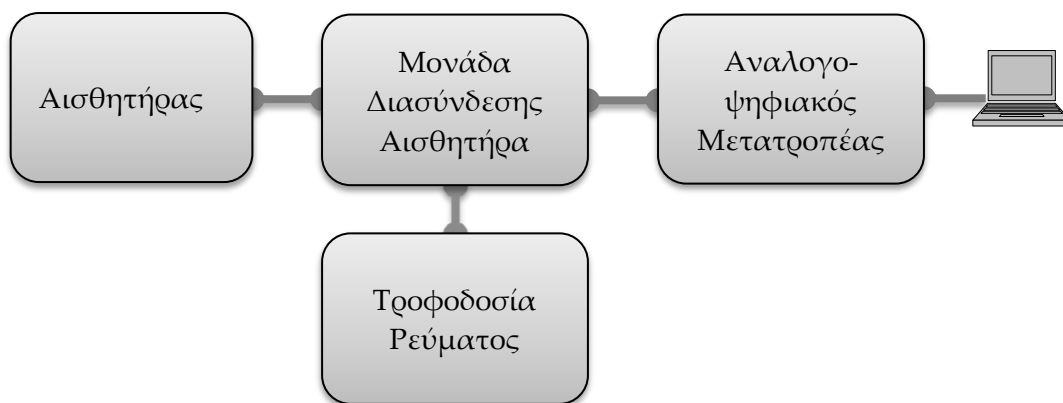


Εικόνα 2-2 Μηχανικός δυναμοδείκτης προσαρμοσμένος στον κρουνό. Διακρίνεται το ίχνος του διαγράμματος πίεσης-όγκου

2.1.2 Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας – μεταλλάκτης

Αρχικά, οι μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου πραγματοποιούνταν με μηχανικό τρόπο, παρέχοντας μια γραφική απεικόνιση του κύκλου σε μορφή πίεσης – όγκου και πίεσης – γωνίας στροφάλου (Εικόνες 2-1 & 2-2). Η καταγραφή βασίζεται σε πρωτογενείς μηχανισμούς και ως εκ τούτου είναι σχετικά ακριβής. Όμως, οι δυνατότητες αξιοποίησης αυτών των διαγραμμάτων είναι περιορισμένες. Λόγω της αξιοπιστίας της, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται και σήμερα, ιδιαίτερα στις δοκιμές παραλαβής βραδύστροφων κινητήρων, απ' όπου αποκομίστηκε το πρωτότυπο της Εικόνας 2-1 και ελήφθη η Εικόνα 2-2. Στη συνέχεια, μια σειρά από μεθόδους έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί [2.8], όπως μηχανικοί ενδείκτες μέσης και μέγιστης πίεσης, συστήματα οπτικής μετατροπής της μηχανικής ένδειξης, ηλεκτρομηχανικές διατάξεις όπως ενδείκτες εξισορροπημένου διαφράγματος, κ.α. Σήμερα τα σύγχρονα συστήματα λήψης μετρήσεων βασίζονται στην χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων και οπτικών αισθητήρων [2.9].

Η μέτρηση της πίεσης καύσης γίνεται με την χρήση του αισθητήρα που μετατρέπει την πίεση ενδιάμεσο μέγεθος το οποίο μεταλλάσσεται σε ένα μετρήσιμο, συνήθως διαφορά δυναμικού. Η τάση αυτή ψηφιοποιείται και παρέχεται στον υπολογιστή. Η επεξεργασία της μετρημένης αλληλουχίας τιμών τάσης έτσι ώστε να προκύψει μια αλληλουχία τιμών πίεσης με σωστή αναφορά γωνίας στροφάλου είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα, το οποίο προσεγγίζεται στο Κεφάλαιο 1. Εξίσου κρίσιμη είναι και η μετρητική διάταξη, που περιλαμβάνει όλες τις συνδέσεις και τα εξαρτήματα ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση της μέτρησης. Στο Σχήμ.2-1 απεικονίζεται μια τυπική διάταξη για την μέτρηση της πίεσης καύσης. Τα επιμέρους στοιχεία, δηλαδή ο αισθητήρας, η μονάδα τροφοδοσίας, η μονάδα διασύνδεσης και ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας, εξετάζονται στην παρούσα και τις επόμενες παραγράφους.



Σχήμ.2-1 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης για την μέτρηση της πίεσης καύσης

Η σχεδόν αποκλειστική χρήση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για την μέτρηση της πίεσης καύσης είναι απόρροια της υπεροχής τους έναντι άλλων αισθητήρων σε τεχνικά χαρακτηριστικά. Η μελέτη στην παρούσα εργασία περιορίστηκε σε αυτούς τους αισθητήρες, λόγω της ευρείας αποδοχής τους από την επιστημονική κοινότητα [2.10].

Παρόλο που το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι γνωστό από το 1880 (Pierre Curie), οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες τέθηκαν σε βιομηχανική εφαρμογή το 1950. Το 1967 κατατέθηκε πατέντα από τον Walter Kistler [2.17] που περιγράφει τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα πίεσης στην μορφή που τον χρησιμοποιούμε και σήμερα. Από τότε έχουν ακολουθήσει και άλλες πατέντες που προτείνουν βελτιώσεις.

Πιεζοηλεκτρισμός είναι το ηλεκτρικό φορτίο που αναπτύσσεται υπό την επιβολή μηχανικής τάσης σε ορισμένα στερεά υλικά (κυρίως σε κρυσταλλικά, σε αρκετά κεραμικά αλλά και σε μερικά βιολογικά υλικά όπως κόκκαλα, το DNA, ορισμένες πρωτεΐνες) [2.13]. Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι το άμεσο αποτέλεσμα του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, το οποίο είναι η γραμμική [2.14] ηλεκτρομηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ της μηχανικής και ηλεκτρικής κατάστασης ενός κρυσταλλικού υλικού [2.15].

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες παρουσιάζουν πολύ καλή ακρίβεια, μεγάλο μετρητικό εύρος, καλά θερμοικά χαρακτηριστικά, ανθεκτικότητα και μικρό μέγεθος [2.11]. Επιπλέον συνδυάζουν υψηλή ευαισθησία, λόγω του μεγάλου εύρους σήματος εξόδου (ηλεκτρική τάση ή φορτίο, ανάλογα την διάταξη) ως προς την κλίμακα μέτρησης. Το μέτρο ελαστικότητας των αισθητικών στοιχείων είναι πολύ υψηλό με αποτέλεσμα την μηδαμινή παραμόρφωση υπό την επίδραση πίεσης. Κατά συνέπεια οι αισθητήρες είναι πολύ στιβαροί, παρουσιάζουν πολύ υψηλή φυσική συχνότητα και ιδιαίτερα καλή γραμμικότητα σε μεγάλο εύρος λειτουργίας. Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ακτινοβολία. Σημαντικό πλεονέκτημα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων έναντι των αισθητήρων αντίστασης- των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται συναρτήσει της πίεσης (piezoresistive sensors), είναι το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, το οποίο για τους πρώτους φτάνει μέχρι τους 367°C ενώ για τους δεύτερους τους 157°C. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες υπερτερούν έναντι των οπτικών, λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας.

Το βασικό μειονέκτημα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων είναι η αδυναμία τους για απόλυτη μέτρηση της πίεσης που δημιουργεί την ανάγκη αναφοράς της πίεσης σε μια γνωστή τιμή. Το αντικείμενο περιγράφεται στην παράγραφο 3.6. Παράλληλα ένα δεύτερο πρόβλημα είναι η θερμική μετακίνηση (pressure thermal drift) το οποίο εμφανίζεται στη διάρκεια της μέτρησης και οφείλεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας του αισθητήρα. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται κατά την επεξεργασία του μετρομένου σήματος (§3.5).

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης δευτέρου βαθμού που περιγράφει την συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων είναι:

$$\frac{\alpha_0}{\alpha_b} \cong \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{1}{Q^2}\right)\left(\frac{f}{f_n}\right)^2}} \quad (2-1)$$

Όπου f_n : Φυσική Συχνότητα Αισθητικού Στοιχείου (Hz)

f : Συχνότητα (Hz)

α_0 : Έξοδος αισθητήρα

α_b : Έξοδος Αναφοράς σε συχνότητα συντονισμού (για $f = f_n$)

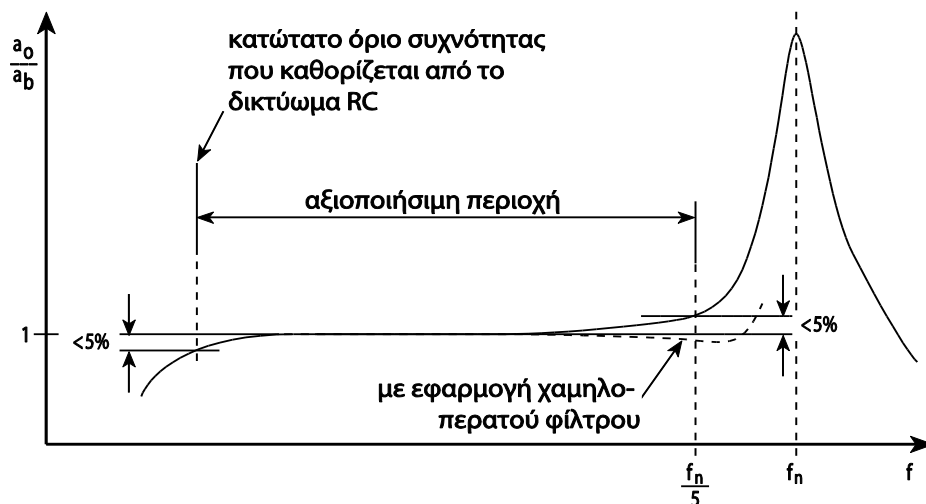
Q : Συντελεστής αύξησης πλάτους στην συχνότητα συντονισμού(10~40)

Στο Σχήμ. 2-2 φαίνεται η γραφική απεικόνιση της εξίσωσης (2-1) που αποτελεί την καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων, δηλαδή τον λόγο μηχανικής τάσης προς τάση εξόδου ως προς την συχνότητα. Η αξιοποιήσιμη περιοχή είναι αυτή στην οποία η μηχανική τάση είναι ανάλογη της τάσης εξόδου.

Η παρέκκλιση σε χαμηλότερες συχνότητες υποδεικνύει την αδυναμία των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για στατικές ή «αργές» μετρήσεις. Η αιτία αυτού του φαινομένου είναι ότι στο πέρασμα του χρόνου, το φορτίο βρίσκει διεξόδους παρόλη την υψηλή αντίσταση, και έτσι μειώνεται η πόλωση και συνεπώς η ανάγνωση της ασκούμενης τάσης. Χαρακτηριστικό μέγεθος για τον προσδιορισμό της ικανότητας του αισθητήρα (σε συνδυασμό με τα ηλεκτρονικά του) να αποδώσει αξιόπιστα μια σταθερή πίεση είναι η σταθερά χρόνου, η οποία είναι εκφρασμένη σε δευτερόλεπτα. Σε αυτό το διάστημα το σήμα εξόδου θα μειωθεί κατά 37%, παρόλο που στον αισθητήρα επιβάλλεται σταθερή πίεση. Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται και αντιμετωπίζεται ταυτόχρονα από το κύκλωμα διασύνδεσης.

Από το Σχήμ. 2-2 φαίνεται ότι η συχνότητα μέχρι την οποία είναι αξιόπιστη η μέτρηση, αντιστοιχεί στο 1/5 της ιδιοσυχνότητας του αισθητήρα, με την εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου.

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες παρουσιάζουν πολύ υψηλή αντίσταση εξόδου. Μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν μια πηγή τάσης και ένα φίλτρο (δικτύωμα RC). Η τάση στην πηγή είναι ευθέως ανάλογη της πίεσης που εφαρμόζεται, ενώ η τάση εξόδου του αισθητήρα είναι διαφοροποιημένη, έχοντας περάσει από το ισοδύναμο κύκλωμα. Οι τιμές της χωρητικότητας, επαγωγής και αντίστασης του δικτύωματος εξαρτώνται από την εγγενή χωρητικότητα, την ελαστικότητα, την σεισμική μάζα και άλλα μηχανικά και ηλεκτρικά μεγέθη. Στην αξιοποιήσιμη περιοχή λειτουργίας, ο αισθητήρας μπορεί να προσομοιωθεί είτε με κύκλωμα πηγής τάσης σε σειρά με πυκνωτή, είτε με κύκλωμα πηγής φορτίου παράλληλα με πυκνωτή, ανάλογα την εφαρμογή.



Σχήμ. 2-2 Καμπύλη τυπικής απόκρισης πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι αισθητήρων σε διάφορες διατάξεις. Στον Πίνακ. 2-1 συνοψίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων αυτών. Οι δυο πρώτοι αισθητήρες, Kistler Type 7613C και 6613CP είναι βιομηχανικής εφαρμογής ενώ ο τρίτος, Kistler Type 6125C, εργαστηριακός. Οι 7613C και 6613CP έχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά (κύκλωμα διασύνδεσης) ενώ ο 6125C συνδέεται σε εξωτερικό ενισχυτή φορτίου. Το κύκλωμα διασύνδεσης για τους δυο πρώτους αισθητήρες περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.3 .

Πίνακ. 2-1. Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

		7613C	6613CP	6125C
Εύρος	bar	0 ... 250	0 ... 250	0 ... 300
Ευαισθησία		-20 mV/bar	-20 mV/bar	-36 pC/bar
Φυσική συχνότητα	kHz	≈70	≈90	>70
Σταθερά Χρόνου(20 °C)	s	1 800	800	
Γραμμικότητα	%FSO	≤±0,5	≤±1	≤±0,4
Ευαισθησία σε επιτάχυνση	bar/g			
Αξονική		<0,002	<0,002	<0,003
Εγκάρσια		<0,001	<0,001	<0,0005
Θερμ. εύρος λειτουργίας ¹	°C	-50 ... 350	-50 ... 350	-20 ... 350
Θερμοκρασ. Μετατόπιση ²	%	≤±3	≤±2	<±1
Θερμικός Κλονισμός ³	bar	≤±0,3	≤±0,5	≤±0,3
Ρεύμα Τροφοδοσίας	mA	4	4	
Τάση Πόλωσης	VDC	9 ... 14	9 ... 14	
Εμπέδιση Εξόδου	Ω	<100	<100	

(¹): μπροστά μέρος αισθητήρα(²): 200 ... ±150 °C (³): Στις 1 500 rpm, IMEP = 9 bar

Το εύρος λειτουργίας και των τριών αισθητήρων είναι παρόμοιο και αρκετό για την μέτρηση της πίεσης καύσης που, στους κινητήρες που εξετάζονται, δεν υπερβαίνει τα 200bar. Η ευαισθησία αποτελεί κριτήριο επιλογής του κυκλώματος διασύνδεσης και του αναλογοψηφιακού μετατροπέα, ώστε οι ψηφιοποιημένες τιμές να έχουν ικανοποιητική ανάλυση. Η διαφορά στις μονάδες ευαισθησίας ανάμεσα στους δυο πρώτους και τον τρίτο αισθητήρα του Πίνακ. 2-1 οφείλεται στο ότι οι δυο βιομηχανικοί αισθητήρες έχουν ενσωματωμένο ενισχυτή φορτίου, ενώ ο εργαστηριακός συνδέεται σε εξωτερικό.



Εικόνα 2-3. Αισθητήρας Kistler type 6613CP, προσαρμοσμένος σε προσαρμογέα τύπου Tompson

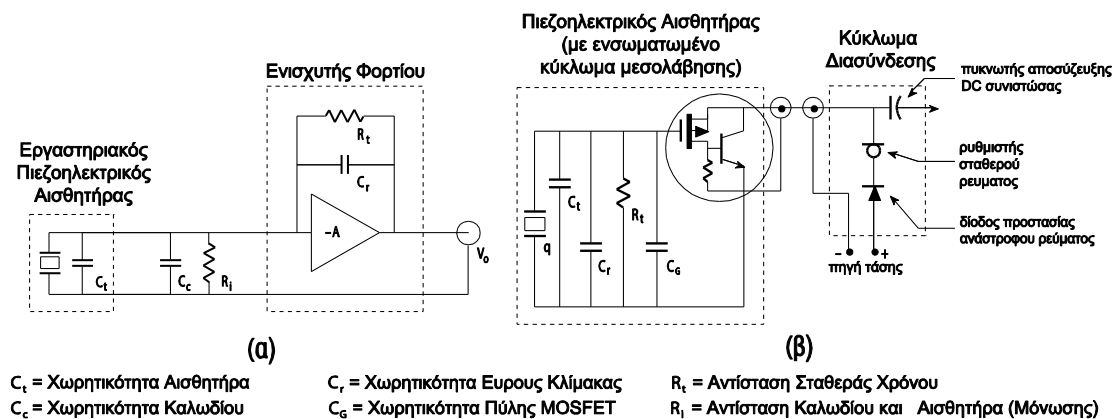
Η φυσική συχνότητα στον αισθητήρα 6613CP είναι μεγαλύτερη από αυτήν των άλλων δυο κατά 30%. Το εύρος συχνοτήτων που δύναται να μετρήσει ο αισθητήρας φτάνει μέχρι το 1/5 της φυσικής του συχνότητας. Για τις τιμές φυσικής συχνότητας 70 και 90kHz, το όριο είναι 14 και 18kHz αντίστοιχα. Τα όρια αυτά αντιστοιχούν σε αρμονική του προς μέτρηση σήματος με διάρκεια περιόδου εκφρασμένη σε γωνία στροφάλου $4.3 \cdot 10^{-4}$ N και $3.3 \cdot 10^{-4}$ N όπου N η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Για τις 2000rpm το όριο αυτό είναι 0.86° και 0.66° γωνίας στροφάλου. Μια τέτοια συνιστώσα του σήματος δεν είναι δυνατό να μετρηθεί με την συνήθη [2.18] συχνότητα δειγματοληψίας της μισής μοίρας, βάση του θεωρήματος δειγματοληψίας (Nyquist- Shannon sampling theorem) [2.19]. Εξάλλου στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το «απαραίτητο» φιλτράρισμα του σήματος της πίεσης κυλίνδρου για κάποιους υπολογισμούς θερμοδυναμικής όπως ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, γίνεται με χαμηλοπερατό φίλτρο το κατώφλι του οποίου ρυθμίζεται 70 φορές μικρότερο από την συχνότητα δειγματοληψίας [2.20]. Συνεπώς φαίνεται ότι η φυσική συχνότητα και των τριών αισθητήρων είναι ικανή ώστε το μετρημένο σήμα να παρέχει μια ακριβή απεικόνιση της πίεσης θαλάμου καύσης.

Όσον αφορά στην απόκριση των αισθητήρων σε χαμηλές συχνότητες, η σταθερά χρόνου που αντιστοιχεί στο διάστημα στο οποίο η ένδειξη της πίεσης αποκλίνει κατά 37% από την πραγματική σταθερή τιμή της, φαίνεται να είναι αρκετή. Οι φάσεις έντονων μεταβολών της πίεσης κυλίνδρου είναι η συμπίεση και η εκτόνωση. Σε έναν τετράχρονο κινητήρα, στις 1000rpm, οι φάσεις εναλλαγής αερίων διαρκούν συνολικά 1/60 sec, διάστημα πέντε με έξι τάξεις μεγέθους μικρότερο των σταθερών χρόνου των δύο αισθητήρων βιομηχανικής χρήσης. Για τον εργαστηριακό αισθητήρα η σταθερά χρόνου εξαρτάται από τον ενισχυτή φορτίου.

2.1.3 Μονάδα διασύνδεσης του αισθητήρα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε, αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε μονάδα διεπαφής για πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες με ενσωματωμένο μεσολαβητή.

Η υψηλή αντίσταση που παρουσιάζει ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας, ειδικά για τις συχνότητες που ενδιαφέρουν τη παρούσα εφαρμογή, είναι δυσμενής παράγοντας για την μεταφορά του σήματος, κυρίως λόγω απωλειών στους αγωγούς και της εισαγωγής θορύβου. Γι αυτόν το λόγο οι περισσότεροι κατασκευαστές τοποθετούν, στους βιομηχανικής εφαρμογής αισθητήρες, έναν μεσολαβητή (buffer) πολύ κοντά ή μέσα στην θήκη του αισθητήρα. Επίσης για την μείωση της καλωδίωσης, επιλέγεται η μεταφορά του σήματος και της τροφοδοσίας από το ίδιο ζεύγος αγωγών.



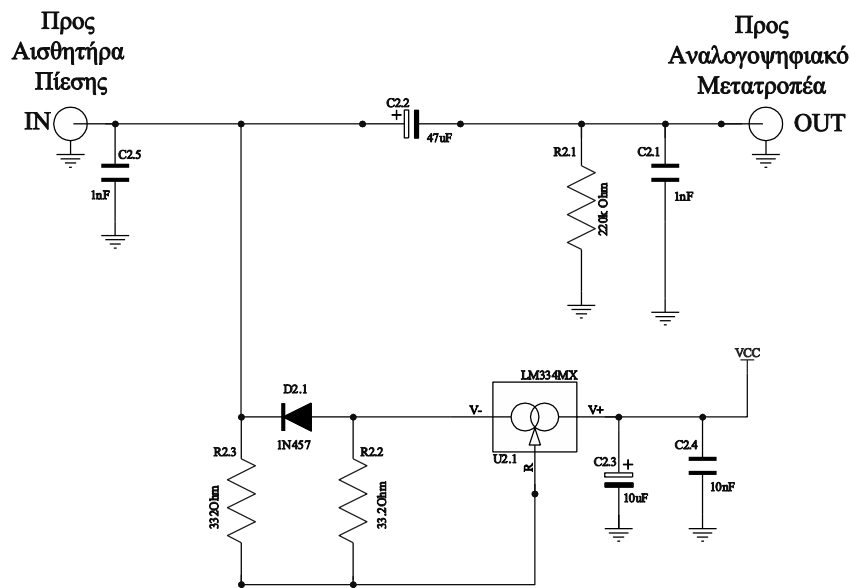
Σχήμ. 2-3 Κύκλωμα μέτρησης πίεσης καύσης με χρήση: (α) πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και ενισχυτή φορτίου, (β) πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα με ενσωματωμένο μεσολαβητή (μεταλλάκτη πίεσης) και κύκλωμα διεπαφής

Στο Σχήμ. 2-3(β) φαίνεται το απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης και του απαραίτητου κυκλώματος για την μετατροπή της πίεσης σε μετρήσιμη ηλεκτρική τάση. Όταν ο αισθητήριος κρύσταλλος διεγείρεται, παράγει ένα φορτίο ανάλογης έντασης με την πίεση

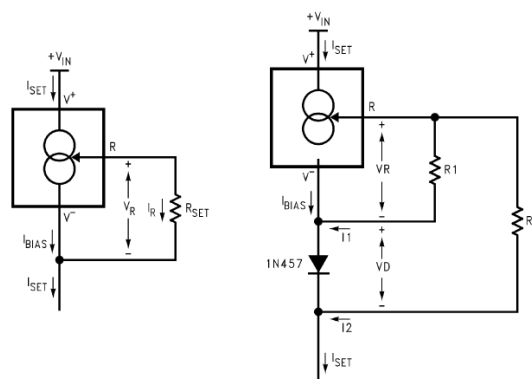
που το προκάλεσε. Ένας μεσολαβητής τοποθετημένος στο εσωτερικό του αισθητήρα μετατρέπει το φορτίο αυτό σε τάση.

Στο Σχήμ. 2-4 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος διασύνδεσης που, σε συνδυασμό με το κύκλωμα τροφοδοσίας που περιγράφεται παρακάτω, αποτελεί την μονάδα διασύνδεσης. Οι λειτουργίες του κυκλώματος διασύνδεσης είναι:

- ◆ Παροχή τροφοδοσίας σταθερού ρεύματος στον αισθητήρα με την χρήση πηγής ρεύματος
- ◆ Φιλτράρισμα της συνιστώσας συνεχούς ρεύματος στην έξοδο του κυκλώματος με την χρήση πυκνωτή
- ◆ Προστασία των εισόδων και της εξόδου από υπερφόρτωση με χρήση πυκνωτών ειδικών προδιαγραφών.



Σχήμ. 2-4 Σχηματικό διάγραμμα αναπτυχθέντος κυκλώματος διασύνδεσης



Σχήμ. 2-5 Ολοκληρωμένο κύκλωμα ρυθμιζόμενης πηγής ρεύματος τριών ακροδεκτών LM334 (α) σε βασική διάταξη και (β) σε διάταξη μηδενισμού συντελεστή θερμοκρασίας [2.25].

Η παροχή τροφοδοσίας σταθερού ρεύματος επιτυγχάνεται με την χρήση του ολοκληρωμένου κυκλώματος ρυθμιζόμενης πηγής ρεύματος τριών ακροδεκτών με κωδικό LM334 [2.25]. Το πρόβλημα του συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι ότι παρουσιάζει εξάρτηση από την θερμοκρασία. Στο Σχήμ. 2-5 φαίνεται η συνδεσμολογία του ρυθμιστή ρεύματος σε βασική διάταξη και σε διάταξη μηδενισμού συντελεστή θερμοκρασίας

Η τάση V_R (Σχήμ. 2-5) είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας και δίνεται από την εξίσωση:

$$V_R = 214\mu V / ^\circ K \quad (2-2)$$

Το συνολικό ρεύμα I_{SET} που διέρχεται από το LM334 (Σχήμ. 2-5) είναι το άθροισμα του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_{SET} και του ρεύματος πόλωσης του LM334 (I_{BIAS}):

$$I_{SET} = I_R + I_{BIAS} \quad (2-3)$$

Το ρεύμα πόλωσης, I_{BIAS} , δίνεται από τον κατασκευαστή σαν συνάρτηση του ρεύματος I_{SET} . Για την περιοχή των 4mA που εξετάζεται ισχύει:

$$I_{BIAS} = I_{SET}/14 \quad (2-4)$$

Από τον συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής του V_T και τις εξισώσεις (2-3), (2-4) προκύπτει:

$$I_{SET} = \frac{230 \mu V / ^\circ K \cdot T}{R_{SET}} \quad (2-5)$$

όπου T , η θερμοκρασία εκφρασμένη σε $^\circ K$.

Για την αντιμετώπιση της εξάρτησης του παραγόμενου ρεύματος I_{SET} από την θερμοκρασία ($\sim 3500 \text{ ppm}/^\circ C$ για $I_{SET}=4 \text{ mA}$), προστίθεται στο κύκλωμα μια δίοδος με αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή και μια αντίσταση για την ρύθμιση του ρεύματος που θα διαρρέει την δίοδο, Σχήμ. 2-5(β). Συγκεκριμένα επιλέγεται η δίοδος 1N457, με θερμοκρασιακό συντελεστή $-2,5 \text{ mV}/^\circ C$. Έτσι με τον κατάλληλο υπολογισμό των αντιστάσεων R_1 και R_2 , ο οποίος περιγράφεται ακολούθως, αντισταθμίζεται ο θερμοκρασιακός συντελεστής του LM334, η τιμή του οποίου είναι $214\mu V/^\circ C$.

Το ρεύμα εξόδου του κυκλώματος στο Σχήμ. 2-5, I'_{SET} , ισούται με:

$$I'_{SET} = I'_1 + I'_2 + I'_{BIAS}, \quad (2-6)$$

όπου $I'_1 = \frac{V_R}{R_1}$, $I'_2 = \frac{V_R + V_D}{R_2}$ και $I'_{BIAS} = I'_1/13$

Η εξίσωση (2-6) λύνεται για μηδενικό θερμοκρασιακό συντελεστή δηλαδή:

$$\frac{dI'_{SET}}{dT} = 0 \Leftrightarrow \quad (2-7)$$

$$\frac{14 \cdot 214 \frac{\mu V}{^\circ K}}{13 \cdot R_1} + \frac{214 \frac{\mu V}{^\circ K} - 2.5 \frac{mV}{^\circ K}}{R_2} = 0 \Leftrightarrow \quad (2-8)$$

$$\frac{R_2}{R_1} \cong 9.92 \quad (2-9)$$

Η αντίσταση R_1 υπολογίζεται ίση με $R_1=33,96\Omega$ από την επίλυση της εξίσωσης (2-6) για το επιθυμητό ρεύμα εξόδου, $I_{SET}=4 \text{ mA}$. Η διαφορά δυναμικού V_T της ρυθμιζόμενης πηγής ρεύματος LM334, υπολογίζεται από την εξίσωση (2-2) ίση με $V_T=0.064V$ για θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ C$. Η τάση πόλωσης της διόδου 1N457 δίνεται από τον κατασκευαστή για ίδια θερμοκρασία ($25^\circ C$), ίση με $V_d=0.6V$. Η τιμή της R_2 υπολογίζεται από την εξίσωση (2-9) ίση με $R_2=336.88\Omega$. Οι πλησιέστερες στις υπολογισμένες τιμές αντιστάσεων του εμπορίου είναι $R_1=33.2\Omega$ και $R_2=332\Omega$. Με την εφαρμογή αυτών των τιμών στην εξίσωση (2-6), προκύπτει ρύθμιση της έντασης του ρεύματος $I'_{SET}=4.09mA$, και αμελητέος συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής, οπότε αυτές οι τιμές αντίστασης κρίνονται ικανοποιητικές.

Όπως αναφέρεται στην αρχή της παραγράφου 2.1.3 και φαίνεται στο Σχήμ. 2-4, ένα ζεύγος αγωγών χρησιμοποιείται για την σύνδεση του αισθητήρα με το κύκλωμα διασύνδεσης και συνεπώς για την μεταφορά του ρεύματος τροφοδοσίας και του σήματος της πίεσης. Για την απόζευξη της σχεδόν σταθερής τάσης τροφοδοσίας από το γρήγορα μεταβαλλόμενο σήμα της πίεσης χρησιμοποιείται δικτύωμα RC σαν υψηλοπερατό φίλτρο ($R_{2.1}$ και $C_{2.2}$, Σχήμ. 2-4). Οι τιμές της αντίστασης και του πυκνωτή δίνονται από τον κατασκευαστή, $R_{2.1}=220k\Omega$ και $C_{2.2}=47\mu F$ αντίστοιχα. Το δικτύωμα που προκύπτει έχει χρόνο απόσβεσης $23sec$ και συχνότητα αποκοπής $0.015Hz$. Επιλέγεται πυκνωτής στερεού τανταλίου λόγω της υψηλής του αντίστασης σε διαρροή, που του επιτρέπει να διατηρεί επί μακρόν το φορτίο του σταθερό. Επιπλέον αυτοί οι πυκνωτές είναι ιδιαίτερα σταθεροί και αξιόπιστοι σε σχέση με τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές αλουμινίου.

Στην είσοδο και την έξοδο της μονάδας διεπαφής καθώς και στην τροφοδοσία ρεύματος, συνδέονται πυκνωτές για την μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και την προστασία του κυκλώματος από υπερτάσεις. Χρησιμοποιούνται πυκνωτές τανταλίου ειδικών προδιαγραφών. Η επιλογή του τανταλίου γίνεται λόγω της αξιοπιστίας που παρέχουν οι πυκνωτές αυτού του τύπου. Οι ειδικές προδιαγραφές $X1$ και $Y2$ αφορούν την ανθεκτικότητά τους σε απότομες μεταβολές και υπερτάσεις. Συγκεκριμένα οι πυκνωτές κλάσης $X1$ και $Y2$ είναι σχεδιασμένοι να αντέχουν στιγμιαία τάση

μέχρι 4kV. Η διαφορά μεταξύ των κλάσεων X1 και Υ2 είναι ότι η πρώτη είναι σχεδιασμένη για προστασία από υπέρταση σε συνδεσμολογία σειράς (line to line) ενώ η δεύτερη για συνδεσμολογία παράλληλα (line to ground) [2.21].

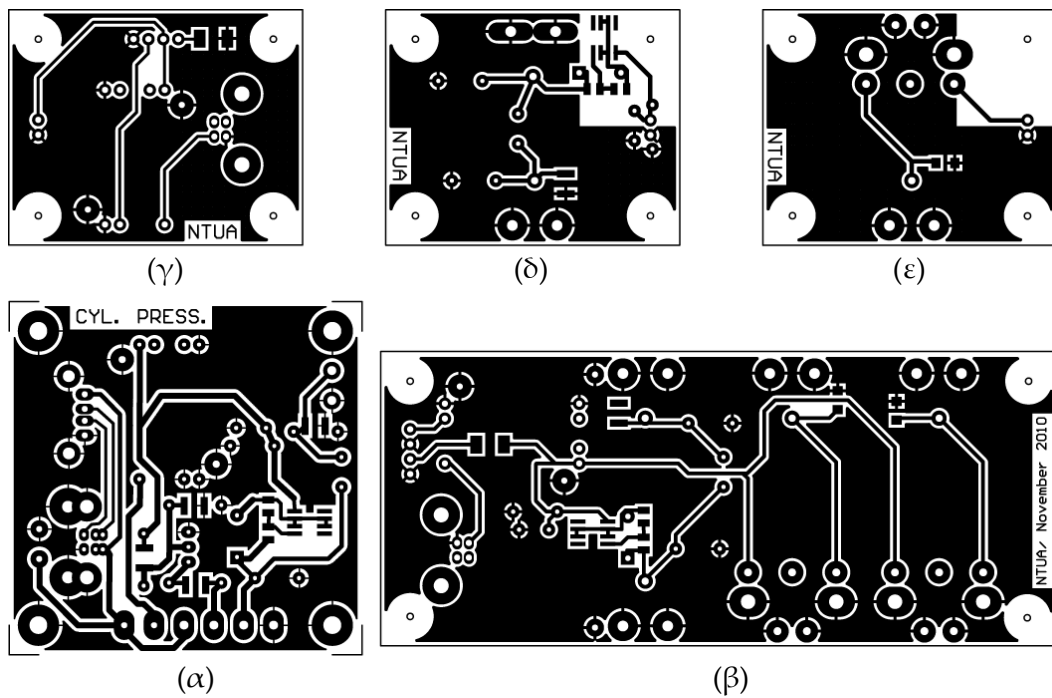
Για την τροφοδοσία του αισθητήρα, μέσω του κυκλώματος διασύνδεσης, χρησιμοποιήθηκε η τάση 5V της θύρας USB του υπολογιστή [2.22], η οποία είναι αναγκαία για την λειτουργία του αναλογοψηφιακού μετατροπέα. Έτσι εξαλείφεται η ανάγκη για επιπλέον πηγή τροφοδοσίας. Το κύκλωμα διασύνδεσης απαιτεί τάση μεγαλύτερη των 18V. Η μετατροπή από 5V γίνεται με την χρήση του ολοκληρωμένου μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση, της TDK Lamda Americas Inc. με κωδικό CC3-2405SF-E, ο οποίος ρυθμίστηκε να παρέχει στην έξοδο 24V. Η ισχύς που αποδίδει για την τροφοδοσία του αισθητήρα με 4mA είναι $P_{out}=V I_{sensor}=96mW$. Η ισχύς ενός τρανζίστορ που χρησιμοποιείται για την οδήγηση ενός ενδεικτικού λαμπτήρα είναι αμελητέα. Η απόδοση του μετατροπέα είναι 81% συνεπώς η ισχύς που απορροφά είναι $P_{in}=118mW$. Σε αυτή την ισχύ προστίθεται και η ισχύς ενός ενδεικτικού λαμπτήρα LED με $P_{LED}=VI=5V 20mA=100mW$. Συνεπώς το ρεύμα που άγει η διάταξη από την θύρα USB είναι $I=P/V=(118+100)mW/5V=43mA$ το οποίο θεωρείται πάρα πολύ μικρό [2.22], και είναι εντός του περιθωρίου ασφαλείας της κατανάλωσης του αναλογοψηφιακού μετατροπέα. Στην Εικόνα 2-4 φαίνεται το αυτόνομο πρωτότυπο που αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε για την τροφοδοσία του αισθητήρα μέσω του κυκλώματος διασύνδεσης από την θύρα USB.



Εικόνα 2-4 Κατασκευή που αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε για την τροφοδοσία του αισθητήρα από θύρα USB υπολογιστή.

Στο Σχήμ. 2-6 παρουσιάζονται διάφορα τυπωμένα κυκλώματα που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν κατά την φάση ανάπτυξης της μετρητικής

διάταξης. Το τυπωμένο κύκλωμα του σχήματος (α) είναι η τελική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις στην συνέχεια της διατριβής.



Σχήμ. 2-6 Τυπωμένα κυκλώματα που κατασκευάστηκαν: (α) κύκλωμα τροφοδοσίας και διασύνδεσης ενός αισθητήρα, (β) κύκλωμα τροφοδοσίας και διασύνδεσης τριών αισθητήρων, ενός με ενσωματωμένο μεσολαβητή και δύο τύπου 4-20mA, (γ) κύκλωμα τροφοδοσίας, (δ) κύκλωμα διασύνδεσης αισθητήρα με ενσωματωμένο μεσολαβητή, (ε) κύκλωμα διασύνδεσης αισθητήρα τύπου 4-20mA.

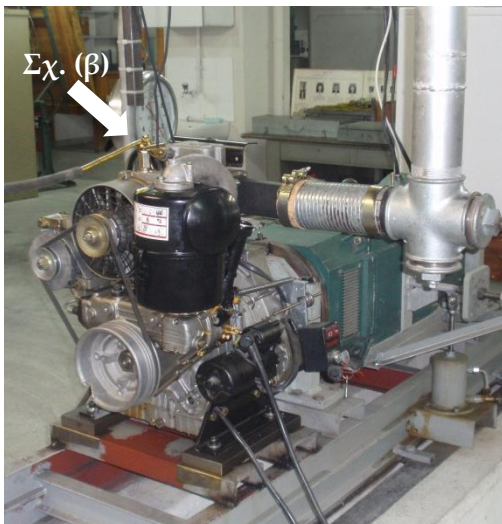


Εικόνα 2-5 Φωτογραφικές απόψεις ολοκληρωμένης διάταξης- κύκλωμα διασύνδεσης και τροφοδοσία, με χρήση των τυπωμένων που φαίνονται στο Σχήμ. 2-6 (c) και (d)

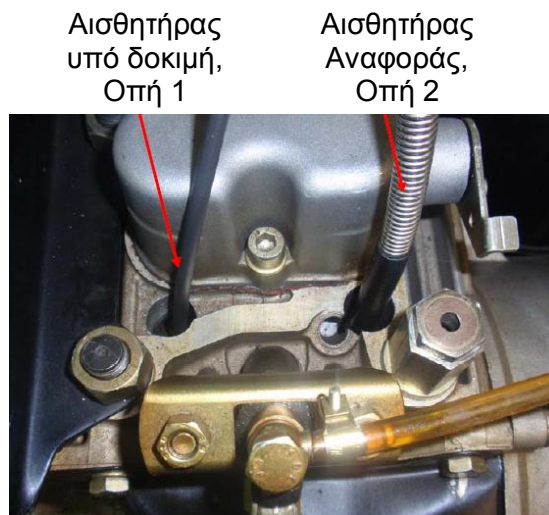
Η συναρμολογημένη μορφή φαίνεται στην Εικόνα 2-11 (σελίδα 58). Στην Εικόνα 2-5 απεικονίζεται η πρώτη ολοκληρωμένη διάταξη που αναπτύχθηκε και απαρτίζεται από τα κυκλώματα διασύνδεσης και τροφοδοσία (δ) και (γ) αντίστοιχα. Το τυπωμένο του (β) είναι αυτό που χρησιμοποιείται στην εργαστηριακή αξιολόγηση (Εικόνα 2-7 (γ) και (δ)).

2.1.4 Αξιολόγηση της μετρητικής διάταξης

Για την αξιολόγηση της μετρητικής διάταξης πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές μετρήσεις στον μονοκύλινδρο κινητήρα Ruggerini, ο οποίος φέρει δυο οπές για τη προσαρμογή αισθητήρα πίεσης καύσης στη κεφαλή του, Εικόνα 2-6. Έτσι έγινε δυνατή η λήψη ταυτόχρονης μέτρησης με την νέα μετρητική αλυσίδα και με διάταξη που βασίζεται σε εργαστηριακά όργανα και εξαρτήματα με επιβεβαιωμένα καλή λειτουργία. Έγιναν διάφορες μετρήσεις, όπως για παράδειγμα με διάφορους συνδυασμούς συνδεδεμένων αισθητήρων με σταματημένο και εν λειτουργία κινητήρα για την διαπίστωση της εμφάνισης θορύβου. Για την παρουσίαση της διερεύνησης στο παρόν κεφάλαιο λαμβάνονται υπόψη τα έξι σύνολα μετρήσεων του Πίνακ. 2-1. Κάθε σύνολο μέτρησης αποτελείται από μετρήσεις σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής σε άφορτη λειτουργία του κινητήρα με διάφορες συνδεσμολογίες για την διερεύνηση πιθανού θορύβου.



(α)



(β)

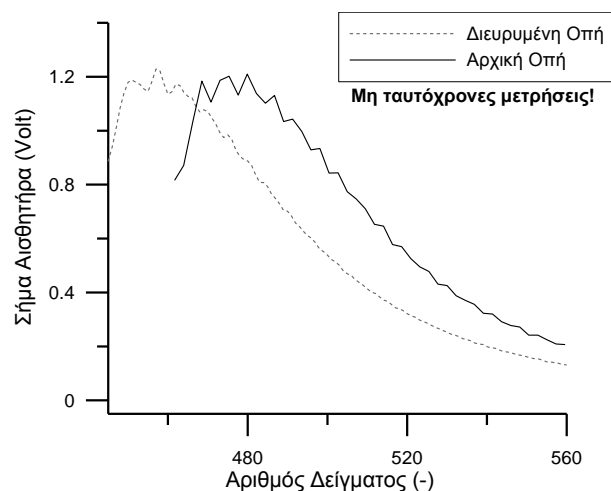
Εικόνα 2-6(α). Φωτογραφική άποψη του κινητήρα Ruggerini που είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΜΕΚ. (β) Λεπτομέρεια από την κεφαλή του κινητήρα, όπου φαίνονται οι δυο αισθητήρες κατά το 3^ο σύνολο μετρήσεων: δεξιά, στην πλευρά του ελεύθερου άκρου του κινητήρα είναι ο αισθητήρας αναφοράς και αριστερά είναι ο αισθητήρας υπό δοκιμή.

Στις πρώτες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν (1^ο σύνολο μετρήσεων) παρουσιάστηκε μια ταλάντωση που υπέρκειται στην μετρομένη πίεση του θαλάμου καύσης, όπως φαίνεται στο Σχήμ. 2-7 με την συνεχή μαύρη γραμμή. Το γεγονός ότι η ταλάντωση δεν παρουσιάζεται στην συμπίεση ούτε στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για δυναμικό φαινόμενο που επηρεάζει την πίεση στο διάφραγμα του αισθητήρα, το οποίο στον συγκεκριμένο κινητήρα δεν ήταν τοποθετημένο μετωπικά με το τοίχωμα της κεφαλής. Σαν μέτρο αντιμετώπισης, διευρύνθηκε η οπή του ενδιάμεσου προσαρμογέα μεταξύ του αισθητήρα και θαλάμου καύσης από διάμετρο 3 mm σε 5 mm. Αυτή η επέμβαση μείωσε σαφώς την ταλάντωση (2^ο σύνολο μετρήσεων, διακεκομμένη γραμμή Σχήμ. 2-7).

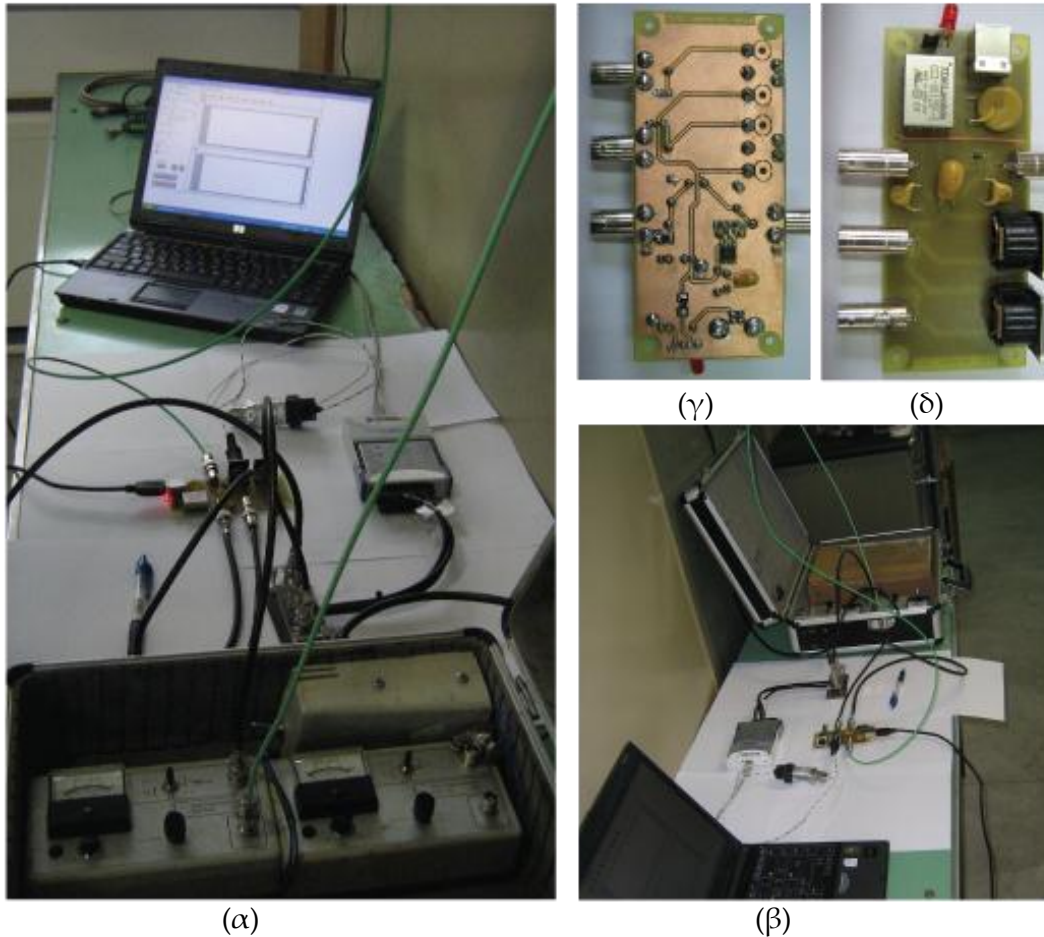
Πίνακ. 2-2. Μετρήσεις αξιολόγησης

Α/Α	Οπή 2 / Κανάλι ΑΙ0		Οπή 1 / Κανάλι ΑΙ1	
	Αισθητήρας	Διεπαφή	Αισθητήρας	Διεπαφή
1	7063C ¹	“πρότυπη”(5108)	-	-
2	7063C ²	“πρότυπη”(5108)	-	-
“	7063C ²	“πρότυπη”(5108)	6613CP	“πρότυπη”(5108)
4	7613C ²	“πρότυπη”(5108)	7613C	“πρότυπη”(5108)
5	7063C ²	“πρότυπη”(5108)	6613CP	Νέα Διεπαφή και νέο τροφοδοτικό
6	7063C ²	“πρότυπη”(5108)	6613CP	Νέα Διεπαφή και τροφοδοτ. Agilent

¹: Αρχική Οπή ²: Διευρυμένη Οπή

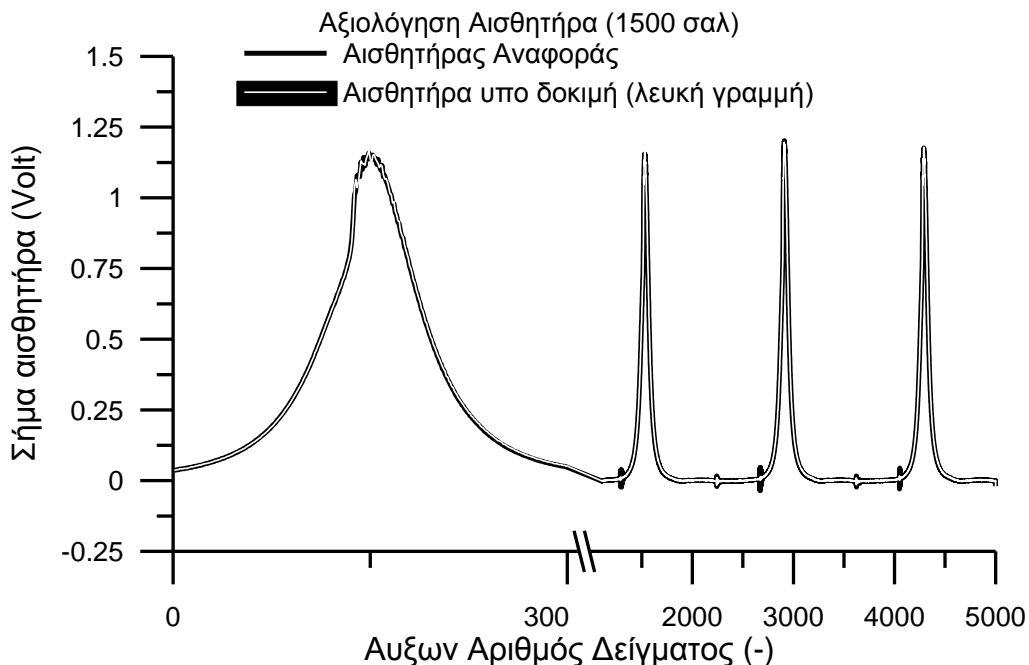


Σχήμ. 2-7 Επίδραση της διαμέτρου της οπής που συνδέει το διάφραγμα του αισθητήρα με τον θάλαμο καύσης, στην πίεση. Στην περίπτωση μικρής διαμέτρου επηρεάζεται το σήμα από δυναμικά φαινόμενα.

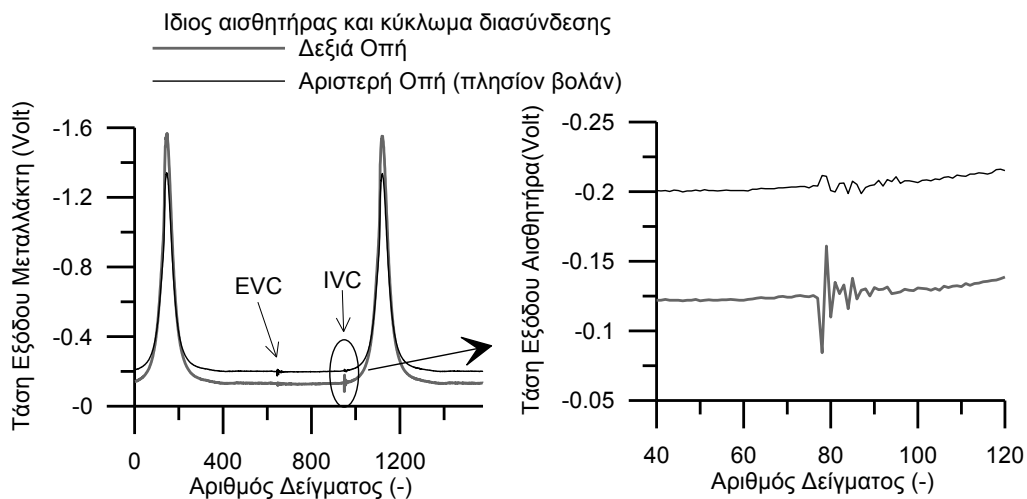


Εικόνα 2-7 (α) και (β) Οπτικές απόψεις της μετρητικής διάταξης για την ταυτόχρονη μέτρηση με δυο αισθητήρες και διασυνδέτες. Στο κάτω μέρος της (α) φαίνονται οι δύο «πρότυποι» διασυνδέτες εργαστηριακού τύπου. (γ) και (δ) το κύκλωμα διασύνδεσης που δοκιμάστηκε (από το τυπωμένο Σχήμ. 2-6 (β))

Στο Σχήμ. 2-8 φαίνεται η πίεση καύσης μετρούμενη ταυτόχρονα με τον αισθητήρα αναφοράς και τον αισθητήρα υπό δοκιμή (3^ο σύνολο μετρήσεων). Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για αναφορά είναι ο 7063C ενώ ο αισθητήρας υπό δοκιμή είναι ο 6613CP. Για την διασύνδεση των δυο αισθητήρων χρησιμοποιήθηκαν όμοιες διατάξεις διασύνδεσης (τα δυο άσπρα όργανα που φαίνονται στο κάτω μέρος στην Εικόνα 2-7α), συνεπώς η όποια διαφορά στα σήματα οφείλεται μόνο στον αισθητήρα. Τα δύο σήματα μετά από λεπτομερή εξέταση κρίθηκαν όμοια. Εξαίρεση αποτελεί η ταλάντωση που εντοπίζεται στις θέσεις κλεισίματος των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής, η οποία είναι εντονότερη στον αισθητήρα αναφοράς.



Σχήμ. 2-8 Η πίεση καύσης μετρημένη ταυτόχρονα με τον αισθητήρα αναφοράς και τον υπό δοκιμή αισθητήρα. Τα κυκλώματα διασύνδεσης των αισθητήρων είναι ίδια μεταξύ τους (εργαστηριακά).

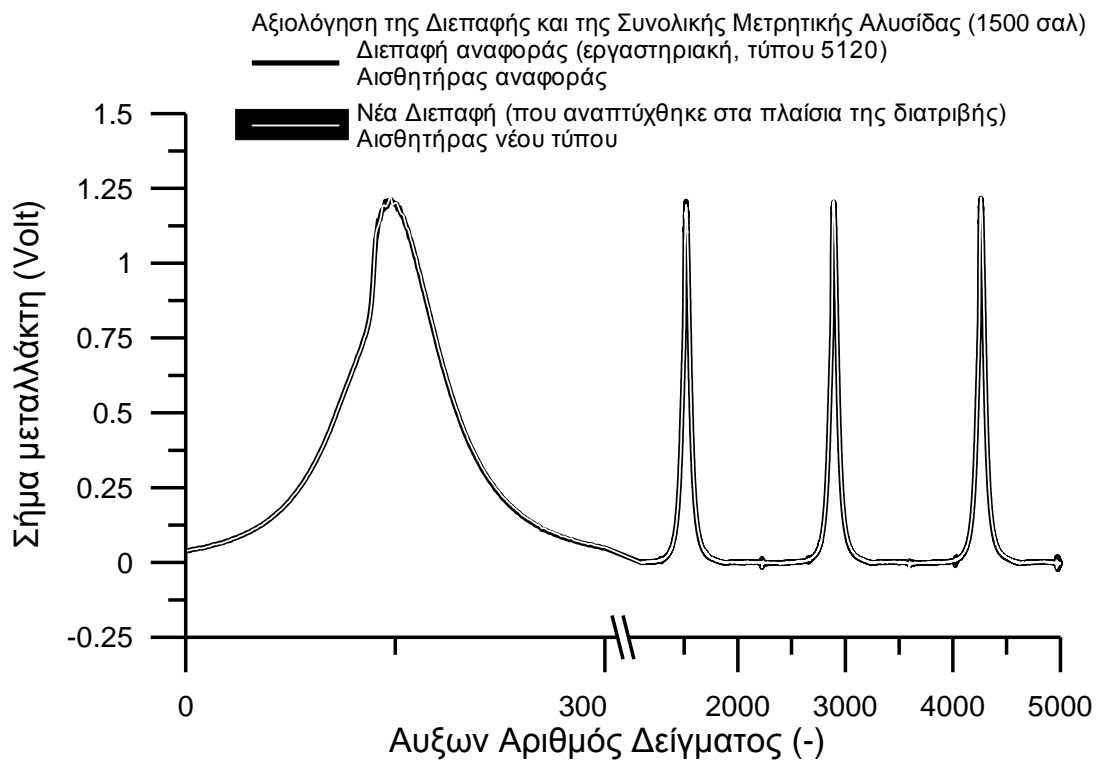


Σχήμ. 2-9. Ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης από τις δυο οπές της κεφαλής με όμοιες μετρητικές διατάξεις. Η ταλάντωση στις θέσεις κλεισίματος των βαλβίδων, εξαρτάται από την θέση του αισθητήρα και όχι από τον αισθητήρα.

Για την αξιολόγηση αυτής της διαφοράς έγινε νέα μέτρηση με δυο όμοιες μετρητικές διατάξεις- αισθητήρας και κύκλωμα διασύνδεσης (4^ο σύνολο μετρήσεων). Όπως φαίνεται στο Σχήμ. 2-9 ο αισθητήρας που είναι τοποθετημένος στην δεξιά οπή (οπή 2, Εικόνα 2-6(β)), παρουσιάζει την ταλάντωση πολύ πιο έντονα από τον αισθητήρα που είναι τοποθετημένος στην αριστερή οπή παρόλο που οι αισθητήρες είναι όμοιοι. Έτσι συμπεραίνεται ότι η

ταλάντωση που αποτελεί την μόνη διαφορά των αισθητήρων που συγκρίνονται στο Σχήμ. 2-8 (3^ο σύνολο μετρήσεων) είναι χαρακτηριστικό της θέσης (πλησιέστερα στην βαλβίδα εξαγωγής οπότε πιάνει το κλείσιμο) και όχι του αισθητήρα. Συνεπώς ο νέου τύπου αισθητήρας που δοκιμάζεται δεν παρουσιάζει κάποια αξιολογήσιμη διαφορά στο σήμα του από τον αισθητήρα αναφοράς.

Στην συνέχεια δοκιμάστηκε η πλήρης μετρητική διάταξη (αισθητήρας, καλώδια, κύκλωμα διασύνδεσης και τροφοδοτικό) και συγκρίθηκε με την “πρότυπη” (5^ο σύνολο μετρήσεων). Η σύγκριση που φαίνεται στο Σχήμ. 2-10, και η λεπτομερής επεξεργασία της, δεν αποκάλυψε κάποια διαφορά.



Σχήμ. 2-10 Η πίεση καύσης μετρημένη ταυτόχρονα με την νέα μετρητική διάταξη και την “πρότυπη”.

Για την αξιολόγηση της λύσης που επιλέχθηκε για την τροφοδοσία, έγινε συγκριτική αξιολόγηση με το τροφοδοτικό της Agilent E3520A (σύγκριση μετρήσεων από 5^ο και 6^ο σύνολο μετρήσεων). Διαπιστώθηκε ότι η λύση ανύψωσης της τάσης της θύρας USB με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι απολύτως ικανοποιητική.

2.2 Μέτρηση Πίεσης Σάρωσης

2.2.1 Εισαγωγή

Η μέτρηση της πίεσης σάρωσης έχει πολλές εφαρμογές στην διάγνωση. Μεταξύ άλλων χρησιμοποιείται και για την εκτίμηση της παγιδευμένης στον κύλινδρο μάζας αέρα που θα χρησιμοποιηθεί στην καύση. Επίσης είναι απαραίτητη, μαζί με την ταχύτητα περιστροφής, για την διάγνωση της λειτουργίας του ζεύγους υπερπλήρωσης. Στην παρούσα εργασία η μέτρηση της πίεσης σάρωσης χρησιμοποιείται και ως αναφορά για το δυναμοδεικτικό διάγραμμα πίεσης (απόλυτες τιμές πίεσης) αλλά και για την ανίχνευση της διακύμανσης του φορτίου του κινητήρα στη διάρκεια μετρήσεων όπως έχει αναφερθεί στη εισαγωγή και αναφέρεται εκτενώς στην συνέχεια (Κεφάλαιο 7).

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 2.1.2, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην μέτρηση της πίεσης θαλάμου καύσης, έχουν πολύ καλή ακρίβεια στην μέτρηση μεταβολών πίεσης. Αντίθετα δεν παρέχουν την ίδια ακρίβεια στην μέτρηση της απόλυτης τιμής της πίεσης [2.23]. Για αυτόν το λόγο εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι για την μέτρηση ή την εκτίμηση της πίεσης σε κάποια γωνία στροφάλου έτσι ώστε με αυτήν την αναφορά οι τιμές της πίεσης στο μετρημένο διάγραμμα να αντιστοιχούν στις απόλυτες [2.24]. Η μέτρηση της πίεσης σάρωσης δίνει αυτήν την δυνατότητα, καθώς μπορούμε να εξισώσουμε με αυτήν τις τιμές του δυναμοδεικτικού διαγράμματος σε συγκεκριμένα διαστήματα της εναλλαγής των αερίων (στη διάρκεια της απόπλυσης).

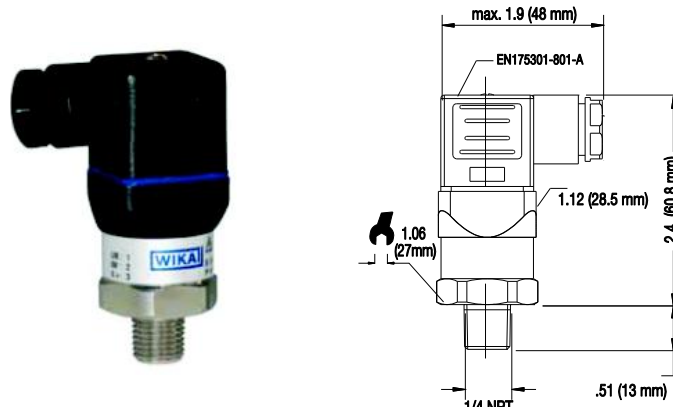
Η συσχέτιση της πίεσης σάρωσης με την διακύμανση του φορτίου του κινητήρα, μέσω της μεταβολής του σημείου λειτουργίας του υπερπληρωτή κάνει εφικτή την ανίχνευση και μέτρηση της μεταβολής του φορτίου κατά τις διαδοχικές μετρήσεις δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων των διαφορετικών κυλίνδρων. Το αντικείμενο αυτό προσεγγίζεται στο κεφάλαιο

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφής η χρησιμότητα της μέτρησης της πίεσης σάρωσης για την διαγνωστική μέθοδο. Για την ενσωμάτωση της δυνατότητας μέτρησης της πίεσης σάρωσης με την διάταξη που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της πίεσης καύσης, κατασκευάστηκε διάταξη για την διασύνδεση του κατάλληλου αισθητήρα. Έτσι είναι δυνατή η πραγματοποίηση αξιόπιστης μέτρησης χωρίς επιπλέον εξοπλισμό.

2.2.2 Αισθητήρας Πίεσης Σάρωσης

Για τις εφαρμογές στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας πίεσης σάρωσης A-10 της εταιρίας Wika (Εικόνα 2-8). Ο Πίνακ. 2-3 παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα [2.26]. Η αρχή

λειτουργίας του βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού με τη μεταβολή του μήκους του όταν σε αυτό εφαρμοστεί κάποια μηχανική τάση (piezoresistive effect).



Εικόνα 2-8. Ο αισθητήρας πίεσης σάρωσης Wika A10 [2.26]

Πίνακ. 2-3. Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα πίεσης Wika A10

Χαρακτηριστικό	Μέγεθος	Τιμή
Εύρος μέτρησης	bar	0 ... 4
Εύρος ρεύματος εξόδου	mA	4 ... 20
Εύρος τάσης τροφοδοσίας	V	8 ... 30
Θερμ. εύρος λειτουργίας	°C	0 ... 80
Ακρίβεια	%	≤±1
Μη- γραμμικότητα	% FSO	0.6

Η μετρούμενη πίεση δρα επάνω σε ένα διάφραγμα, το οποίο διαμορφώνεται στο εξωτερικό περίβλημα του αισθητήρα και μεταφέρεται στο αισθητήριο στοιχείο μέσω κάποιου μέσου μετάδοσης. Η εφαρμογή της πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της αντίστασης του αισθητήριου στοιχείου. Για την ακριβέστερη μέτρηση της αντίστασης, χρησιμοποιείται γέφυρα Wheatstone, οι τέσσερις αντιστάσεις της οποίας είναι αισθητήρια στοιχεία. Η γέφυρα διεγείρεται από την τάση τροφοδοσίας και η μέτρηση της τάσης στα δύο άλλα άκρα της γέφυρας είναι ανάλογη της προς μέτρηση πίεσης.

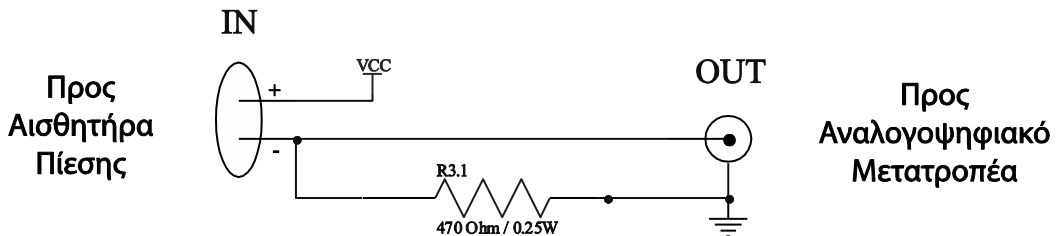
Όμως η μέτρηση της τάσης, χρησιμοποιώντας αγωγούς για την μεταφορά της γίνεται ανακριβής, λόγω πτώσης τάσης στους αγωγούς. Γι αυτόν τον λόγο ο αισθητήρας έχει ενσωματωμένο κύκλωμα διαμόρφωσης της τάσης εξόδου της γέφυρας σε ηλεκτρικό ρεύμα εύρους 4...20 mA που συσχετίζεται γραμμικά με την μετρούμενη πίεση εύρους 0...4 bar.

2.2.3 Μονάδα Διεπαφής αισθητήρα

Για την μέτρηση της έντασης του ρεύματος 0...4bar που παράγει ο αισθητήρας ανάλογα με την πίεση που του εφαρμόζεται, χρησιμοποιείται αντίσταση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η διάταξη όπως φαίνεται στο Σχήμ. 2-11. Η πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης είναι σύμφωνα με το νόμο του Ohm ανάλογη του ρεύματος που διαρρέεται με συντελεστή αναλογίας την τιμή της αντίστασης. Για την βέλτιστη ανάλυση του ψηφιοποιημένου σήματος επιλέγεται αντίσταση τέτοια ώστε στα 20 mA να εκμεταλλευόμαστε την πλήρη κλίμακα του αναλογοψηφιακού μετατροπέα (10V):

$$R = \frac{V}{I} \Leftrightarrow R = \frac{10}{20 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow R = 500\Omega \quad (2-10)$$

Για να διασφαλιστεί ότι η μετρούμενη τάση δεν θα φτάσει τα 10V που είναι το όριο του εύρους μέτρησης του αναλογοψηφιακού μετατροπέα, επιλέγεται η αμέσως μικρότερη εμπορικά διαθέσιμη τιμή αντίστασης, 470 Ω. Επίσης, κριτήρια επιλογής της αντίστασης είναι η μεγάλη ακρίβεια (0.1%) και ο μικρός θερμοκρασιακός συντελεστής (± 25 ppm / °C).



Σχήμ. 2-11. Κύκλωμα μέτρησης της πίεσης σάρωσης.

Ο υπολογισμός της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ της μετρούμενης τάσης και της αντίστοιχης πίεσης γίνεται από την επίλυση του συστήματος για τις ακραίες τιμές του εύρους μέτρησης (0-4bar) και τις αντίστοιχες τιμές ρεύματος εξόδου του αισθητήρα (4-20mA) σε συνδυασμό με την αντίσταση 470Ω, ως εξής:

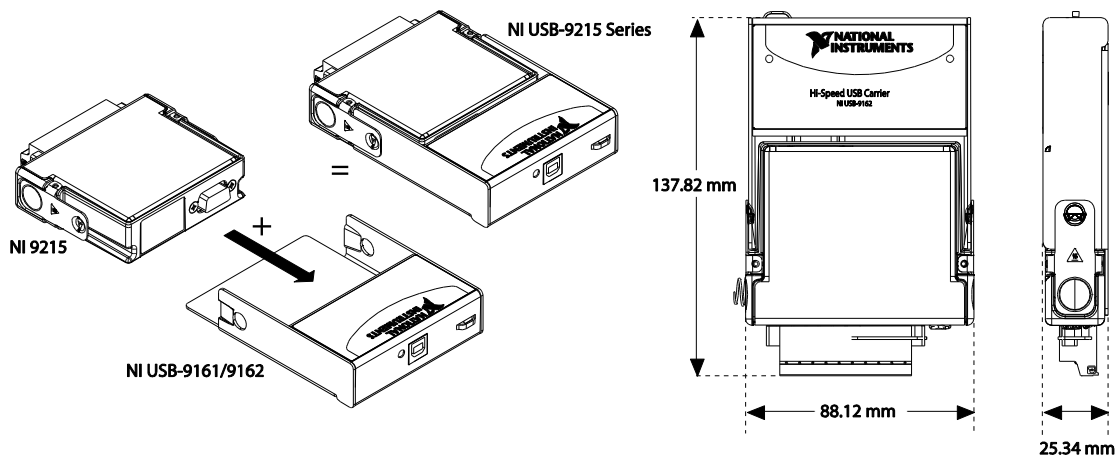
$$\begin{cases} P = 0, V = 470\Omega \cdot 0,004A \\ P = 4bar, V = 470\Omega \cdot 0,02A \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 = 1,88 \cdot \alpha + \beta \\ 4 = 9,4 \cdot \alpha + \beta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 0,532 \\ \beta = -1 \end{cases} \quad (2-11)$$

Έτσι ο υπολογισμός της πίεσης σάρωσης συναρτήσει της μετρημένης τάσης στα άκρα της αντίστασης γίνεται από τον τύπο:

$$P_{meas} = 0,532 \cdot V_{meas} - 1 \quad (2-12)$$

Στο Σχήμ. 2-6 (ε) φαίνεται το τυπωμένο κύκλωμα της μονάδας διεπαφής του αισθητήρα.

2.3 Μονάδα ψηφιοποίησης του σήματος



Σχήμ. 2-12 Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας USB-9215 [2.27]

Για την ψηφιοποίηση των σημάτων της πίεσης καύσης και πίεσης σάρωσης χρησιμοποιήθηκε ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας USB-9215 της National Instruments. Ο μετατροπέας αποτελείται από δυο διακριτές μονάδες (Σχήμ. 2-12): την μονάδα μετατροπής (NI-9215) και την μονάδα χρονισμού, διαμεσολάβησης και επικοινωνίας με τον υπολογιστή (USB-9261). Η πρώτη κάνει την μετατροπή του μετρούμενου σήματος σε ψηφιακό, ενώ η δεύτερη παρέχει τον χρονισμό, την ενδιάμεση αποθήκευση των δεδομένων και την μεταφορά τους στον υπολογιστή μέσω του πρωτοκόλλου USB.

Πίνακ. 2-4. Χαρακτηριστικά αναλογοψηφιακών μετατροπέων

Χαρακτηριστικό	Μονάδα	NI-9215	6024E
Ανάλυση	bit	12	12
Μέγιστος Χρόνος Μετατροπής	μs	10	5
Μέγιστη Τάση Εισόδου ¹	V	±10.2	±10
Απόλυτη ακρίβεια (πλήρους κλίμακας)	mV		16
Σταθερότητα	μV/°C	60	100
	Ppm/°C	10	
Λόγος Απόρριψης Κοινού Ρυθμού (CMR)	dB	-73 (@ 60Hz)	-85 (@ 60Hz)
Αντίσταση Εισόδου	GΩ	1	100
Χωρητικότητα Εισόδου	pF	25	100

¹ με κοινή αναφορά ανάμεσα στα κανάλια

Η μονάδα μετατροπής διαθέτει τέσσερις απομονωμένους αναλογοψηφιακούς μετατροπείς, αποφεύγοντας την πολυπλεξία (multiplexing) και συνεπώς το φαινόμενο της διαφωνίας (cross-talking) ανάμεσα στα τέσσερα κανάλια. Ο Πίνακ. 2-4 παρουσιάζει τα γενικά χαρακτηριστικά της μονάδας μετατροπής.

Ο μετατροπέας δίνει την δυνατότητα μέτρησης είτε διαφορικών σημάτων είτε σημάτων με αναφορά. Σε όλες τις περιπτώσεις συνδέονται οι δύο ακροδέκτες που φέρουν την προς μέτρηση διαφορά δυναμικού στους αντίστοιχους ακροδέκτες του μετατροπέα, με σωστή πολικότητα σε κάποιο από τα τέσσερα κανάλια. Για τα σήματα με αναφορά, συνδέεται επιπλέον ο ακροδέκτης που φέρει την αναφορά (γείωση) στην κοινή γείωση του μετατροπέα. Για τα διαφορικά σήματα συνδέεται μια αντίσταση $1\text{M}\Omega$ ανάμεσα στον αρνητικό ακροδέκτη και την κοινή γείωση του μετατροπέα, έτσι ώστε η τάση κοινού ρυθμού του μετατροπέα να ακολουθεί αυτή του σήματος.



Εικόνα 2-9 Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας National Instruments DAQCard-6024E

Επιπλέον, σε μια κατηγορία μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας National Instruments DAQCard-6024E (Εικόνα 2-9), ο οποίος μπορεί να χρονιστεί από εξωτερική πηγή χρησιμοποιώντας ψηφιακή είσοδο με δυνατότητα ανίχνευσης ακμών. Αυτή η δυνατότητα χρησιμοποιήθηκε για την λήψη μετρήσεων χρονισμένων από κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου. Σημειώνεται ότι η συνήθης περίπτωση δειγματοληψίας, είναι η χρήση του εσωτερικού ρολογιού, που συνεπάγεται μέτρηση με σταθερό βήμα χρόνου.

2.4 Περιγραφή Ολοκληρωμένης Συσκευής Λήψης Μετρήσεων Πίεσης Καύσης για Βιομηχανική Εφαρμογή

Για την πραγματοποίηση κάποιας διερεύνησης είτε σε εργαστηριακό είτε σε βιομηχανικό περιβάλλον, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη της κατάλληλης

μετρητικής αλυσίδας, η οποία αποτελείται από τους αισθητήρες, τις αντίστοιχες μονάδες διασύνδεσης, τις μονάδες τροφοδοσίας, τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα και τον υπολογιστή για την λήψη, επεξεργασία και αποθήκευση των μετρήσεων.



Εικόνα 2-10 Το ολοκληρωμένο σύστημα λήψης μετρήσεων που αποτελείται από την μονάδα λήψης μετρήσεων, τον υπολογιστή, τον αισθητήρα και τα καλώδια (σε αντίστοιχο αποθηκευτικό χώρο)

Βασικά απαιτούμενα για εφαρμογή στο περιβάλλον των μεγάλης κλίμακας κινητήρων που χρησιμοποιούνται στην Ναυτιλία και στην Ηλεκτροπαραγωγή, πέρα από την αξιοπιστία, είναι η φορητότητα, η ευχρηστία και η στιβαρότητα.

Η ανάγκη για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε τέτοια περιβάλλοντα σε συνδυασμό με τους πολλούς περιορισμούς που δυσχέραιναν την εύρεση εμπορική υπάρχουσας λύσης, οδήγησε στην μελέτη και κατασκευή πρότυπης συσκευής που ενσωματώνει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα της μετρητικής αλυσίδας για την πραγματοποίηση μετρήσεων πίεσης καύσης.



Εικόνα 2-11 Η μονάδα λήψης μετρήσεων που αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε.

Στην Εικόνα 2-10 φαίνεται το ολοκληρωμένο σύστημα λήψης μετρήσεων που αποτελείται από την μονάδα λήψης μετρήσεων, τον υπολογιστή, τον αισθητήρα και τα καλώδια (σε αντίστοιχο αποθηκευτικό χώρο).

Στην Εικόνα 2-11 φαίνονται ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας και το κύκλωμα διασύνδεσης και τροφοδοσίας (τυπωμένο κύκλωμα Σχήμ. 2-6 (α)) τοποθετημένο πάνω σε κατάλληλα διαμορφωμένο φύλλο από αεροπορικό κράμα αλουμινίου. Αυτή η διάταξη συνιστά την μονάδα λήψης μετρήσεων, η οποία, μαζί με τον αισθητήρα και το καλώδιο σύνδεσης, αρκεί για την πραγματοποίηση μετρήσεων.

Μια αντίστοιχη ισοδύναμη εμπορική διάταξη θα απαρτιζόνταν από πολλά, ογκωδέστερα εξαρτήματα (τάξεων μεγέθους) και θα απαιτούσε ηλεκτρική τροφοδοσία από εξωτερική πηγή.

2.5 Ορολογία

Λατινικά

C	Πυκνωτής (F, farad)
f	Συχνότητα (Hz)
I	Ηλεκτρικό ρεύμα (A, amperes)
P	Ισχύς (W, watts)
Q	Συντελεστής αύξησης πλάτους σήματος
R	Αντίσταση (Ω , Ohm)
V	Ηλεκτρική τάση (V, volts)
N	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (rpm)

Δείκτες

0	Αρχική τιμή, τιμή ισορροπίας
BIAS	Τιμή πόλωσης
d	Δίοδος
n	Φυσική
r	Αντιστάτης
SET	Τιμή ρύθμισης

Συντομεύσεις

CMR	Common Mode Rejection, λόγος απόρριψη τάσης κοινού ρυθμού
FSO	Full Scale Output, μέγιστη τιμή εξόδου πλήρους κλίμακας
LED	Light-Emitting Diode, φωτοεκπέμπουσα δίοδος
ppm	Parts Per Million, περιεκτικότητα εκφρασμένη σε μέρη στο εκατομμύριο

RC	Δικτύωμα αντίστασης - πυκνωτή
rpm	Revolutions Per Minute, στροφές ανά λεπτό
USB	Universal Serial Bus, Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος

2.6 Αναφορές

- [2.1] Combustion in Compression Ignition Engines. In: J.B.Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw - Hill Book Company. 1998. p. 491-558
- [2.2] J.M. Desantes, J.Galindo, C.Guardiola, V.Dolz, Air mass flow estimation in turbocharged diesel engines from in-cylinder pressure measurement, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010) 37–47.
- [2.3] D.T. Hountalas, The effect of operating parameters on the net and gross heat release rates of a direct injection diesel engine. *Proc 2nd Biennial ASME-ESDA 1994, Design of Energy Systems, London* 64(3): 27-34
- [2.4] D.T. Hountalas, G.C. Mavropoulos, G. Kourbetis, Experimental investigation to develop a methodology for estimating the compression condition of DI Diesel engines. *Energy Conversion and Management* 2006; 47(1): 1-18
- [2.5] D.A. Kouremenos and D.T. Hountalas, Diagnosis and condition monitoring of medium speed marine diesel engines. *TribotestInt J* 1997; 4 (1): 63–91
- [2.6] D.T. Hountalas, D.A. Kouremenos and M. Sideris, A diagnostic method for heavy-duty diesel engines used in stationary applications, *J Eng Gas Turbines Power* 2004;126 (4): 886–899.
- [2.7] V.T. Lamarinis, D.T. Hountalas, A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines – Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel, *Energy Conversion and Management* 2010; 51(4): 740-753
- [2.8] Y. Shimasaki, M. Kobayashi, H. Sakamoto, M. Ueno, M. Hasegawa, S. Yamaguchi, T. Suzuki, Study on engine management system using chamber pressure sensor integrated with spark plug, *SAE Paper 2004-01-0519*, 2004.
- [2.9] M.T. Wlodarczyk, High accuracy glow plug- integrated cylinder pressure sensor for closed loop engine control, *SAE Paper 2006-01-0184*, 2006.
- [2.10] F. Payri, J.M. Lujan, J. Martin, A. Abbad Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines, *Mechanical Systems and Signal Processing* 2010; 24(6): 1767-1784.
- [2.11] M.F. Brunt, C.R. Pond. Evaluation of techniques for absolute cylinder pressure correction. *SAE 970036*.
- [2.12] E. Rosseel, R. Sierens, Evaluating piezo-electric transducer response to thermal shock from in-cylinder pressure data ,*SAE Paper 1999-01-0935*, 1999
- [2.13] Holler, F. James; Skoog, Douglas A; Crouch, Stanley R (2007). "Chapter 1". *Principles of Instrumental Analysis* (6th ed.). Cengage Learning. p. 9
- [2.14] H. Kusakabe, T. Okauchi, M. Takigawa, A Cylinder Pressure Sensor for Internal Combustion Engine, *SAE Paper 920701*, 1992.
- [2.15] Gautschi, G (2002). *Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*. Springer.

- [2.16] Y. Shimasaki, M. Kobayashi, H. Sakamoto, M. Ueno, M. Hasegawa, S. Yamaguchi, T. Suzuki, Study on Engine Management System Using In-cylinder Pressure Sensor Integrated with Spark Plug, SAE Paper 2004-01-0519, 2004.
- [2.17] Walter Kistler. "Piezoelectric Pressure Transducer" Patent 3,349,259. Oct. 1967.
- [2.18] Brunt, M. and Lucas, G., "The Effect of Crank Angle Resolution on Cylinder Pressure Analysis," SAE Technical Paper 910041, 1991
- [2.19] Steven W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, 1997
- [2.20] F. Payri, P. Olmeda, C. Guardiola, J. Martín, Adaptive determination of cut-off frequencies for filtering the in-cylinder pressure in diesel engines combustion analysis, Applied Thermal Engineering 2011;31(14): 2869-2876
- [2.21] Διεθνές Πρότυπο IEC 60384-14-1, "Fixed capacitors for use in electronic equipment", International Electrotechnical Commission 2005
- [2.22] Bob Dunstan, USB Power Delivery Specification Revision 1.0, Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, LSI Corporation, Microsoft Corporation, Renesas, ST-Ericsson, and Texas Instruments, 2010
- [2.23] M.F. Brunt, C.R. Pond. Evaluation of techniques for absolute cylinder pressure correction. SAE 970036.
- [2.24] Kangyoon Lee, MaruYoonb, MyounghoSunwoo, A study on pegging methods for noisy cylinder pressure signal, 2007, Control Engineering Practice 16 (2008) 922–929
- [2.25] LM134/LM234/LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources, Texas Instruments, Texas, USA, 2010
- [2.26] Wika A-10 Pressure Transmitter, Operating Instructions, WIKA Alexander Wiegand GmbH & Co. KG, Klingenberg, Germany, 2008.
- [2.27] NI USB-9215 Series -USER GUIDE AND SPECIFICATIONS, National Instruments, Texas – USA, 2007
- [2.28] Operating Instructions, Quartz Miniature Pressure Probes, Type 6051/53, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗ ΔΙΑΓΝΩΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται συστηματοποίηση και ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων μετρήσεων με σκοπό την έκφρασή τους στην μονάδα του μετρούμενου μεγέθους συναρτήσει της γωνίας στροφάλου.

Η διαδικασία που περιγράφεται αφορά στη μέτρηση της πίεσης καύσης, αλλά βρίσκει εφαρμογή στη μέτρηση και άλλων μεγεθών όπως στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής, πίεση έγχυσης, πίεση σάρωσης, θερμοκρασίες και κάθε μεγέθους που η μέτρηση της διακύμανσής του μέσα στον κύκλο έχει νόημα. Με βάση την διαδικασία που παρουσιάζεται αναπτύχθηκαν ρουτίνες στο Matlab και στο LabView που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διερευνήσεις που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια.

3.1 Ρύθμιση παραμέτρων ψηφιοποίησης

Η συνηθέστερη μέθοδος μέτρησης της πίεσης καύσης βασίζεται στην ψηφιοποίηση του σήματος του αισθητήρα από έναν αναλογοψηφιακό μετατροπέα, ο οποίος χρονίζεται από ένα εσωτερικό μετρητή. Στις πρακτικές εφαρμογές χωρίς κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου γίνεται χρήση σταθερής χρονικά συχνότητα δειγματοληψίας, f_s ,

$$f_s = \frac{360 \cdot N}{60 \cdot \Delta\theta} = \frac{6 \cdot N}{\Delta\theta} \quad (3-1)$$

όπου N είναι η αναμενόμενη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (rpm) και $\Delta\theta$ το επιθυμητό ισοδύναμο ισοδιάστημα μέτρησης σε μοίρες γωνίας στροφάλου. Η συχνότητα δειγματοληψίας, f_s , είναι σε Hz.

Για συστήματα δειγματοληψίας που λειτουργούν με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου χρησιμοποιώντας για οδήγηση το σήμα κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου, η συχνότητα δειγματοληψίας εκφράζεται σε μοίρες γωνίας στροφάλου και καθορίζεται από το σήμα του κωδικοποιητή γωνίας.

Και στις δύο περιπτώσεις, δειγματοληψία με σταθερό βήμα χρόνου ή γωνίας, ο καθορισμός του αριθμού των δειγμάτων υπολογίζεται συναρτήσει του επιθυμητού αριθμού κύκλων προς καταγραφή από την ακόλουθη σχέση:

$$S = \frac{360 \cdot K}{\Delta\theta} \cdot M \quad (3-2)$$

Όπου:

S: Ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων που θα ψηφιοποιηθούν

K: K=1 ή K=2 για δίχρονο ή τετράχρονο κινητήρα, αντίστοιχα

M: Ο αριθμός κύκλων λειτουργίας

Ο αναγκαίος αριθμός των κύκλων εξαρτάται από την εφαρμογή [3.1, 3.2]. Στη συνέχεια μετά τη καταγραφή ενός αριθμού κύκλων εκτιμάται ένας μέσος κύκλος από αυτούς τους διαδοχικούς κύκλους. Η χρήση του μέσου κύκλου περιορίζει την διακύμανση που οφείλεται σε θόρυβο ή σε σφάλμα δειγματοληψίας [3.3]. Ο αριθμός των κύκλων για ικανοποιητικό αποτέλεσμα ποικίλει ανάλογα την εφαρμογή και αποτελεί αντικείμενο με εκτενή βιβλιογραφική αναφορά [3.7]. Σημειώνεται ότι η χρήση του μέσου κύκλου δεν αφαιρεί συστηματικά σφάλματα. Από τα μεγέθη που αφορούν στην λειτουργική συμπεριφορά του κινητήρα η εκτίμηση του ρυθμού καύσης είναι από τις πλέον απαιτητικές από άποψη ποιότητας σήματος και απαιτεί την λήψη πολλών κύκλων με σχετικά μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας. Όμως κατάλληλη επεξεργασία του σήματος περιορίζει σημαντικά τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων λειτουργίας.

Στη περίπτωση που ο κινητήρας δεν λειτουργεί σε απόλυτα σταθερές συνθήκες, η λήψη πολλών κύκλων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Ειδικά στους αργόστροφους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες, που στις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας ο κύκλος διαρκεί από 0.5 έως 2sec, η λήψη μεγάλου αριθμού κύκλων έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη διάρκεια μέτρησης και αύξηση της πιθανότητας μεταβολών της ισχύος στη διάρκεια του μετρούμενου διαστήματος.

Στη παρούσα εργασία κατά τις μετρήσεις στους κινητήρες αυτούς (2-X), λαμβάνονται 20 διαδοχικοί κύκλοι εκτός και αν λόγω των συνθηκών υπάρχει διαφορετική απαίτηση.

Με την ρύθμιση του συστήματος δειγματοληψίας όπως περιγράφεται παραπάνω, προκύπτει μια σειρά ζευγών τάσης - χρόνου, "V - t". Οι μετρημένες τιμές τάσης απέχουν μεταξύ τους χρόνο Δt , ίσο με:

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (3-3)$$

3.2 Προσδιορισμός του άνω νεκρού σημείου

Η αναφορά των μετρούμενων σημείων συναρτήσει της γωνίας στροφάλου είναι από τις κρισιμότερες διαδικασίες, καθώς μικρά σφάλματα δίνουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις στην εκτίμηση διαφόρων μεγεθών όπως είναι η ενδεικνύμενη ισχύς κλπ.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι προσδιορισμού του άνω νεκρού σημείου, δυο μετρητικές και μια

υπολογιστική. Η διαδικασία επεξεργασίας της μέτρησης διαφοροποιείται ανάλογα με την μέθοδο. Το ζητούμενο από αυτό το βήμα της επεξεργασίας της μέτρησης, είναι η παραγωγή μιας σειράς τιμών θέσης (αύξων αριθμός ψηφιοποιημένου δείγματος) που αντιστοιχεί στις διελεύσεις του εμβόλου από το ΑΝΣ. Επειδή η ακρίβεια της δειγματοληψίας (συνήθως 0.5° γωνίας στροφάλου) είναι μεγαλύτερη ως προς την απαιτούμενη ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης του ΑΝΣ, η θέση προσδιορίζεται σαν φυσικός αριθμός. Κατά συνέπεια το ΑΝΣ τοποθετείται ανάμεσα σε δυο ψηφιοποιημένα δείγματα.

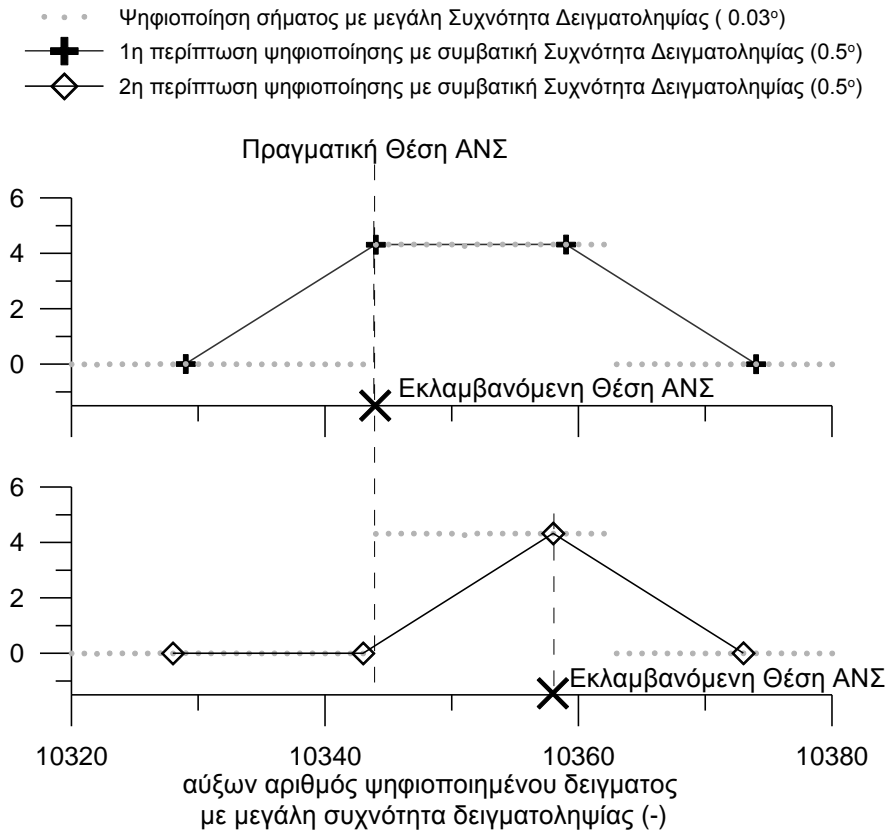
Στις επόμενες τρεις παραγράφους περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής της σειράς τιμών θέσης ΑΝΣ ("TDC") ανάλογα με την μέθοδο αναφοράς που χρησιμοποιείται. Οι περιγραφές της διαδικασίας προσδιορισμού του ΑΝΣ από τις δυο μετρητικές μεθόδους, καλύπτουν το σύνολο των αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτήν την χρήση.

3.2.1 Χρήση αισθητήρα που παρέχει τετραγωνικό παλμό

Στη πρώτη μέθοδο αντιστοίχισης των μετρημένων σημείων σε γωνία στροφάλου, χρησιμοποιήθηκε ο κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου Kistler Type 2613B. Η εγκατάσταση και λειτουργία του περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.2. Το σήμα που παράγει για την αναφορά ΑΝΣ έχει τετραγωνική μορφή. Η αύξουσα ακμή του σήματος σηματοδοτεί την διέλευση του εμβόλου από το ΑΝΣ. Παρόμοιο σήμα παράγουν και οι επαγωγικοί αισθητήρες εγγύτητας.

Στο Σχήμ. 3-1, με τα γκρι σημεία φαίνεται το μετρημένο τετραγωνικό σήμα του ΑΝΣ, ψηφιοποιημένο με μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας, ισοδύναμη με 0.03° γωνίας στροφάλου. Επίσης απεικονίζονται δυο περιπτώσεις ψηφιοποίησης με συμβατική συχνότητα δειγματοληψίας ισοδύναμη με 0.5° γωνίας στροφάλου. Οι δύο περιπτώσεις είναι οι ακραίες. Στην πρώτη περίπτωση, η θέση του πρώτου μη μηδενικού δείγματος ταυτίζεται ακριβώς με την αύξουσα ακμή, δηλαδή με το ΑΝΣ. Στην δεύτερη περίπτωση, η τελευταία μηδενική τιμή βρίσκεται ακριβώς πριν την αύξουσα ακμή και συνεπώς η πρώτη μη μηδενική τιμή βρίσκεται ελάχιστα λιγότερο από 0.5° μετά το ΑΝΣ.

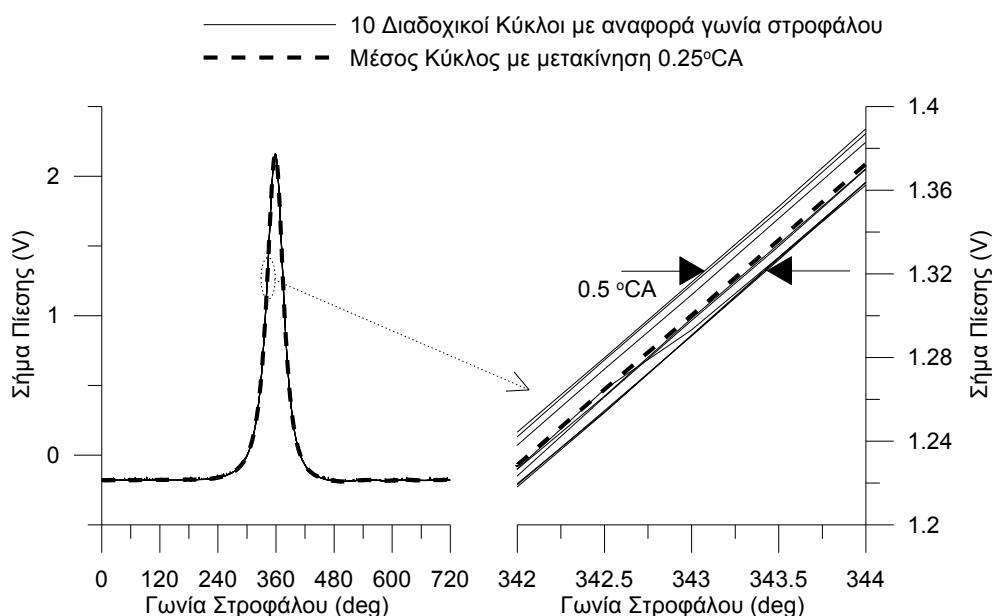
Η εκλαμβανόμενη θέση του ΑΝΣ σε κάθε κύκλο είναι τυχαία μέσα στο διάστημα $0 \dots \Delta\theta$ μετά το ΑΝΣ, όπου $\Delta\theta$ το βήμα δειγματοληψίας που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 0.5° . Αυτό είναι ορατό στο Σχήμ. 3-2 όπου φαίνονται δέκα διαδοχικοί κύκλοι, οι οποίοι μετά την αναφορά τους σε γωνία στροφάλου δεν ταυτίζονται ακριβώς.



Σχήμ. 3-1 Το τετραγωνικό σήμα αναφοράς του ANΣ ψηφιοποιημένο με μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας και δυο περιπτώσεις ψηφιοποίησης με συμβατική συχνότητα δειγματοληψίας

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος υπάρχουν δυο προσεγγίσεις. Στη πρώτη, που είναι και η απλούστερη, όταν υπολογιστεί ο μέσος κύκλος χρησιμοποιώντας τις θέσεις ANΣ από τα πρώτα μη μηδενικά δείγματα, οι αντίστοιχες τιμές γωνίας στροφάλου πρέπει να μετακινηθούν κατά $\Delta\theta/2$ δεξιά, δηλαδή να προστεθεί η τιμή $\Delta\theta/2$ (στην συγκεκριμένη περίπτωση 0.25°).

Στο Σχήμ. 3-2 με την διακεκομμένη γραμμή φαίνεται ο μέσος κύκλος μετακινημένος κατά « $\Delta\theta$ » προς τα δεξιά. Σε αντίθετη περίπτωση θα υπήρχε σφάλμα στην αναφορά της μέτρησης σε γωνίες στροφάλου, ίσο με το μισό του βήματος δειγματοληψίας. Αυτή η απλή προσέγγιση παρουσιάζει μειονεκτήματα. Με την λήψη μεγάλου αριθμού κύκλων, η κατανομή του σφάλματος θα είναι γύρω από το $\Delta\theta$. Για μικρό αριθμό κύκλων όμως αυτό μπορεί να μην συμβαίνει αλλά σε κάθε περίπτωση το σφάλμα θα είναι πολύ μικρό. Επιπλέον η λήψη μέσων όρων από κύκλους που δεν ταυτίζονται μπορεί να οδηγήσει σε «παραμορφωμένο» μέσο κύκλο. Αυτό το πρόβλημα εντείνεται σε κινητήρες που η πίεση του θαλάμου καύσης δεν είναι επαναλήψιμη από κύκλο σε κύκλο (π.χ. διακύμανση φορτίου).



Σχήμ. 3-2 Δέκα διαδοχικοί κύκλοι με αναφορά γωνίας στροφάλου, όπου είναι ορατή η διακύμανση εντός του βήματος δειγματοληψίας και οφείλεται στην διακριτή ψηφιοποίηση του σήματος του ενδείκτη ANΣ

Η δεύτερη προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος είναι η «μετακίνηση» του κάθε κύκλου ώστε να συμπέσει με ένα κύκλο αναφοράς (πχ τον πρώτο). Υπολογίζεται δηλαδή η αναγκαία μετακίνηση για τον κάθε κύκλο σε όρους κλάσματος του αριθμού δείγματος (πραγματικός αριθμός) ώστε να συμπέσει με το κύκλο αναφοράς. Αν ο κύκλος αναφοράς έχει σωστή αναφορά του ANΣ, οι αναγκαίες μετακινήσεις θα κυμαίνονται σε θέση δείγματος από 0 έως 1. Όμως κατά πάσα πιθανότητα ο τυχαίος κύκλος δεν έχει ακριβή αναφορά ANΣ, οπότε οι αναγκαίες μετακινήσεις κυμαίνονται στο διάστημα -1 έως 1 , με διασπορά 1 θέση δείγματος. Από τις ακραίες τιμές αναγκαίας μετακίνησης υπολογίζεται η πραγματική θέση του ANΣ του κύκλου αναφοράς και συνεπώς η πραγματική θέση του ANΣ σε κάθε κύκλο.

Από συγκριτική αξιολόγηση των δύο προσεγγίσεων σε μετρήσεις από τον μονοκύλινδρο κινητήρα Ricardo Hydra του Εργαστηρίου MEK, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή της πρώτης προσέγγισης με λήψη 20 κύκλων είχε ισοδύναμα αποτελέσματα με την εφαρμογή της δεύτερης προσέγγισης.

Για την κατάρτιση της σειράς θέσης ANΣ, που ονομάζεται "TDC", ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Ορίζεται ένα κατώφλι, $V_{TDC,R}$, για τον εντοπισμό των μη μηδενικών τιμών του σήματος του αισθητήρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτό τίθεται στα 2.5V.
2. Εντοπίζονται οι θέσεις του σήματος με τιμή μεγαλύτερη από το κατώφλι αυτό. Διατηρούνται μόνο οι πρώτες θέσεις, αν εντοπιστούν διαδοχικά δείγματα με τιμές μεγαλύτερες από το κατώφλι.

3. Για την διόρθωση του σφάλματος διακριτής ψηφιοποίησης που αναφέρεται προηγουμένως ανάλογα με την μέθοδο αντιμετώπισης προστίθεται σε κάθε θέση που ανιχνεύτηκε είτε η τιμή 0.5 (που ισοδυναμεί με το μισό του βήματος δειγματοληψίας) είτε η πραγματική αναγκαία μετακίνηση. Έτσι προκύπτει η ακόλουθη σειρά με τις θέσεις του ΑΝΣ:

$$TDC[j] = i + Cor[j] \text{ όπου } i : V_{TDC}[i] > V_{TDC,R} \wedge V_{TDC}[i - 1] < V_{TDC,R} \quad (3-4)$$

Όπου:

j: Ο αύξων αριθμός του ΑΝΣ που ανιχνεύτηκε.

Cor: Η αναγκαία διόρθωση. Για την πρώτη προσέγγιση Cor=0.5

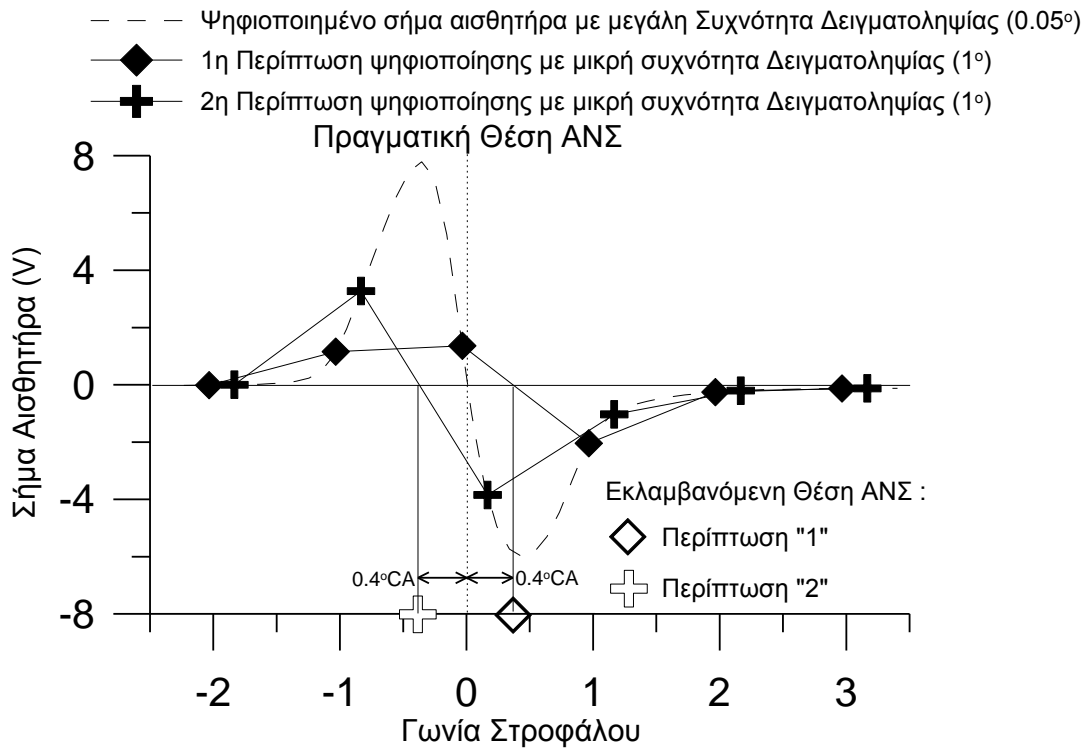
$V_{TDC,R}$ Το κατώφλι για τον εντοπισμό των μη μηδενικών τιμών του σήματος του αισθητήρα.

3.2.2 Χρήση αισθητήρα που παρέχει σημείο τομής με τον οριζόντιο άξονα

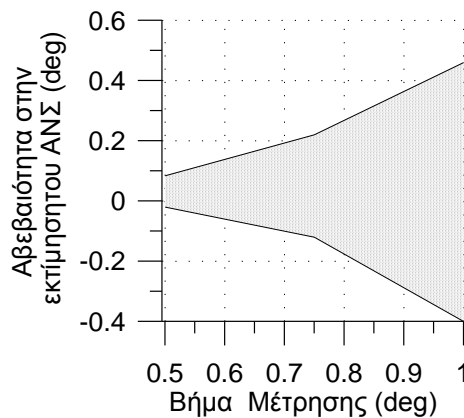
Για την μέθοδο αναφοράς γωνίας στροφάλου με χρήση αισθητήρα που η θέση του ΑΝΣ καθορίζεται από το σημείο τομής του σήματος του αισθητήρα με τον οριζόντιο άξονα (μηδέν), χρησιμοποιήθηκε ο επαγωγικός λήπτης που φαίνεται στην Εικόνα 3-1 (α).



Εικόνα 3-1 (α) Επαγωγικός λήπτης εγκατεστημένος στον κινητήρα Ricardo Hydra του Εργαστηρίου ΜΕΚ. (β) Επαγωγικός λήπτης εγκατεστημένος σε μεγάλο κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής



Σχήμ. 3-3 Το σήμα αναφοράς του ΑΝΣ από επαγωγικό αισθητήρα εγγύτητας ψηφιοποιημένο με μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας και δυο περιπτώσεις ψηφιοποίησης με χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας



Σχήμ. 3-4 Αβεβαιότητα στην εκτίμηση του ΑΝΣ συναρτήσει του βήματος δειγματοληψίας

Το σήμα που παράγει, φαίνεται στο Σχήμ. 3-3. Το πλάτος του σήματος μεγαλώνει όσο αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής. Οι επαγωγικοί λήπτες που δεν έχουν κάποιο κύκλωμα διασύνδεσης (παρέχουν το πρωτογενές σήμα) παράγουν παρόμοιο σήμα με αυτό του Σχήμ. 3-3. Οι μικρές διαφοροποιήσεις στο πλάτος και την διάρκεια οφείλονται στην ευαισθησία τους, στην απόσταση σάρωσης και στο λειτουργικό εύρος επιτροχίας ταχύτητας. Διαφοροποίηση του σήματος του

αισθητήρα προκαλείται και από τη γεωμετρία της οπής ή της προεξοχής που ο αισθητήρας ανιχνεύει.

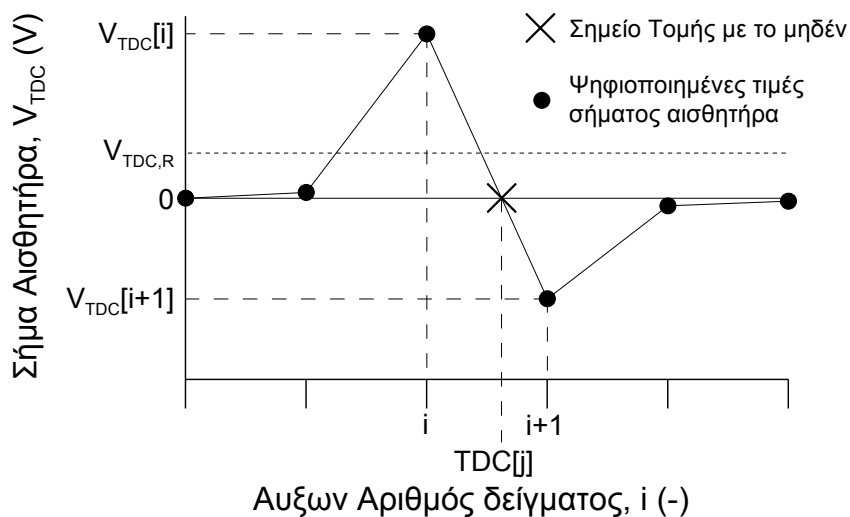
Η θέση του άνω νεκρού σημείου καθορίζεται από το σημείο διέλευσης του σήματος από τα θετικά στα αρνητικά. Η ανίχνευση αυτού του σημείου επηρεάζεται από την συχνότητα δειγματοληψίας. Στις δυο ακραίες περιπτώσεις που παρουσιάζονται ως παράδειγμα στο Σχήμ. 3-3, το σφάλμα στην εκτίμηση του συγκεκριμένου σημείου λόγω ψηφιοποίησης διακριτών σημείων είναι $\pm 0.4^\circ$. Το βήμα δειγματοληψίας σε αυτήν την περίπτωση είναι ισοδύναμο με 1° γωνίας στροφάλου. Στο Σχήμ. 3-4 δίνεται το μέγιστο σφάλμα συναρτήσει του βήματος δειγματοληψίας.

Για τον υπολογισμό της σειράς "TDC" με τις θέσεις του ΑΝΣ ακολουθείται η ακόλουθη διαδικασία:

1. Αφαιρείται η μετακίνηση (offset) του σήματος αν αυτό υπάρχει.
2. Ορίζεται ένα κατώφλι για τον εντοπισμό της θέσης που το σήμα του αισθητήρα παρουσιάζει αύξηση, $V_{TDC,R}$ στο Σχήμ. 3-5
3. Εντοπίζονται οι θέσεις του σήματος με τιμή μεγαλύτερη από το ορισμένο κατώφλι. Αυτό γίνεται για να μην εκληφθεί μια τυχαία τομή με το μηδέν ως θέση ΑΝΣ.
4. Αναζητούνται οι θέσεις, i , του σήματος πριν την τομή με το μηδέν και υπολογίζονται οι ακριβείς θέσεις τομής του σήματος με το μηδέν, ως ακολούθως:

$$TDC[j] = i + \frac{V_{TDC}[i]}{V_{TDC}[i] - V_{TDC}[i+1]}, \text{ όπου } i: V_{TDC}[i] > 0 \wedge V_{TDC}[i+1] < 0 \quad (3-5)$$

Η σειρά "TDC" περιέχει τις θέσεις τομής με τον οριζόντιο άξονα (μηδέν) που ισοδυναμούν με τις θέσεις του ΑΝΣ. Οι τιμές αυτές δεν είναι φυσικοί αριθμοί αλλά πραγματικοί, φανερώνοντας ότι το ΑΝΣ είναι τοποθετημένο κάπου ανάμεσα σε δυο διαδοχικά ψηφιοποιημένα δείγματα.



Σχήμ. 3-5 Διαδικασία υπολογισμού του σημείου τομής με το μηδέν

3.2.3 Υπολογιστική μέθοδος

Η πλήρης υπολογιστική μέθοδος περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 και πραγματοποιεί πολλά βήματα της επεξεργασίας της μέτρησης ταυτόχρονα επιλύοντας ένα σύστημα εξισώσεων. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ανεξάρτητα ο εντοπισμός των θέσεων ΑΝΣ, συγκρίνοντας τη συμπίεση των διαδοχικών κύκλων της μέτρησης με μια προσομοιωμένη καμπύλη συμπίεσης του κινητήρα στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, ως μια αυτόνομη μέθοδος.

Για να γίνει ακριβής εντοπισμός των θέσεων ΑΝΣ, πρέπει η μέτρηση να έχει διορθωθεί για θόρυβο και θερμοκή μετατόπιση (thermal drift), να έχει μετατραπεί από μετρούμενη τάση σε πίεση και να είναι γνωστό το πλήθος των σημείων ανά κύκλο. Αυτές οι ενέργειες, που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους, προϋποθέτουν την αναφορά της μέτρησης σε μοίρες γωνίας στροφάλου. Κατά συνέπεια, αρχικά γίνεται μια αρχική εκτίμηση των θέσεων ΑΝΣ «πρώτου σταδίου», με βάση την οποία πραγματοποιούνται τα επόμενα βήματα της επεξεργασίας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τα επόμενα βήματα της επεξεργασίας, γίνεται η ακριβής αναγνώριση των θέσεων ΑΝΣ («δεύτερο στάδιο»). Με τις νέες θέσεις ΑΝΣ, επαναλαμβάνονται τα επόμενα βήματα της επεξεργασίας.

Πριν τη εφαρμογή της χονδροειδούς αναγνώρισης θέσεων ΑΝΣ, «πρώτου σταδίου» ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. *Ανιχνεύεται με εμπειρικό τρόπο το μέσο πλήθος των σημείων της μέτρησης ανά κύκλο και γίνεται γραμμική αναγωγή της προσομοιωμένης καμπύλης συμπίεσης ώστε ο προσομοιωμένος κύκλος να αποτελείται από το ίδιο πλήθος σημείων. Φυσικά η καμπύλη συμπίεσης έχει λιγότερα σημεία από τον πλήρη κύκλο. Αναγνώριση του μέσου πλήθους των σημείων ανά κύκλο μπορεί να γίνει εντοπίζοντας τα τοπικά μέγιστα.*
2. *Το σήμα της πίεσης μετατρέπεται από τάση σε πίεση χρησιμοποιώντας τον συντελεστή του αισθητήρα. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των χαμηλότερων τιμών πίεσης με πλήθος αντίστοιχο του ποσοστού του χρόνου που είναι ανοιχτές οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής. Από τον μέσο όρο εξαιρούνται τα σημεία πριν το πρώτο και μετά το τελευταίο τοπικό μέγιστο (έτσι ώστε ο μέσος όρος να ληφθεί από ακέραιο αριθμό κύκλων). Από την διαφορά του μέσου όρου και χρησιμοποιώντας τις τιμές της προσομοιωμένης καμπύλης συμπίεσης πριν το κλείσιμο των βαλβίδων εισαγωγής, υπολογίζεται η αναγκαία κατακόρυφη μετακίνηση του δυναμοδεικτικού διαγράμματος πίεσης.*

Τα υπόλοιπα βήματα επεξεργασίας ταυτίζονται για το πρώτο και δεύτερο στάδιο, και είναι τα ακόλουθα:

1. *Με βάση τον αριθμό των σημείων ανά περιστροφή του σήματος της πίεσης, γίνεται γραμμική παρεμβολή της προσομοιωμένης καμπύλης συμπίεσης ώστε να προκύψει μια νέα καμπύλη P_s με βήμα, $\Delta\theta$, ίδιο με αυτό της μέτρησης. Επιλέγεται η γραμμική παρεμβολή της προσομοιωμένης*

καμπύλης, διότι, καθώς είναι αποτέλεσμα προσομοίωσης, είναι πολύ ομαλή και το σφάλμα που θα προκύψει από την παρεμβολή αμελητέο. Αντίθετα η παρεμβολή της ίδιας της μέτρησης είναι πιθανό να δημιουργήσει παραμόρφωση του μετρημένου σήματος.

2. Λαμβάνονται τμήματα της μέτρησης ίδιου πλήθους σημείων με αυτό της καμπύλης συμπίεσης και υπολογίζεται το τετράγωνο της διαφοράς των σημείων με ίδια θέση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ξεκινώντας από το πρώτο δείγμα της μέτρησης μέχρι το τελευταίο που θα επιτρέψει το τμήμα της μέτρησης που θα ληφθεί να είναι ίσο σε δείγματα με της καμπύλης συμπίεσης. Με την καμπύλη συμπίεσης P_s να έχει m σημεία και την μετρημένη πίεσης P να έχει S σημεία, έχουμε:

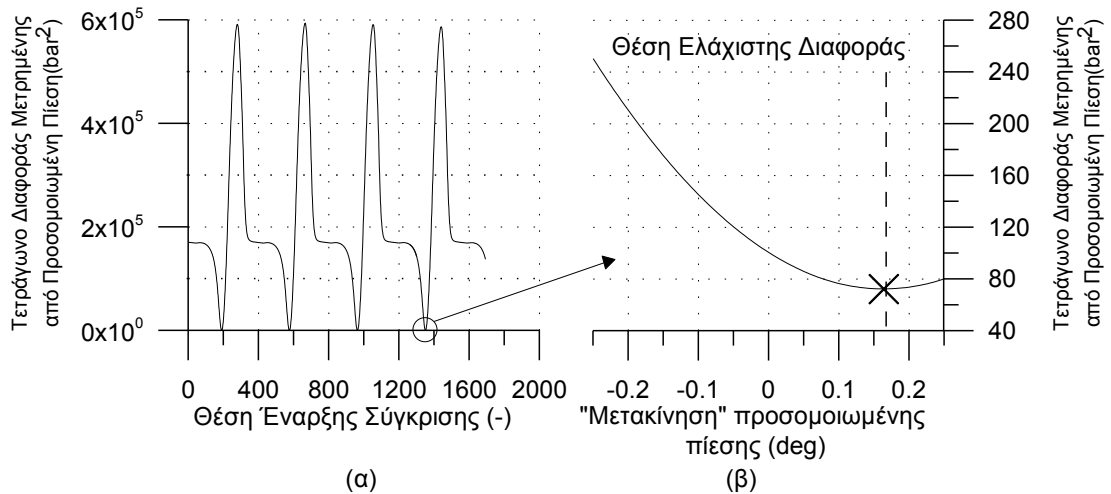
$$R[i] = \sum_{i=1}^m (P[i] - P_s[i])^2, \text{ με } 1 \leq i \leq S - m \quad (3-6)$$

Η σειρά R απεικονίζεται στο Σχήμ. 3-6 (α).

3. Ανιχνεύονται οι θέσεις των τοπικών ελαχίστων της σειράς R .
4. Λεπτομερής υπολογισμός της θέσης του ANΣ για κάθε θέση τοπικού ελαχίστου της σειράς R , έστω $R[i]$.
 - a) Λαμβάνεται το τμήμα της μέτρησης ξεκινώντας από την θέση $R[i]+1$ έως την θέση $R[i] + S - m - 1$. Τα ακραία σημεία παραλείπονται επειδή παραλείπονται αναγκαστικά και από την καμπύλη συμπίεσης έτσι ώστε να είναι δυνατή η γραμμική παρεμβολή, ως ακολούθως.
Η καμπύλη συμπίεσης έχει γνωστή αναφορά γωνίας στροφάλου. Με γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται από την καμπύλη συμπίεσης ($P_s - \theta_s$) μια νέα ($P'_s - \theta_s + d\theta$). Αν το βήμα της καμπύλης συμπίεσης είναι $\Delta\theta$, τότε το $d\theta$ λαμβάνεται από $-\Delta\theta/2$ έως $\Delta\theta/2$ με βήμα ανάλογο της επιθυμητής ακρίβειας, συνήθως 0.01° .
 - b) Υπολογίζεται το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών του τμήματος της μέτρησης από τις νέες μετακινημένες καμπύλες συμπίεσης. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμ. 3-6(β).
 - c) Αν το ελάχιστο άθροισμα τετραγώνων παρατηρείται για μετακίνηση $d\theta$, τότε η γωνία στροφάλου που αντιστοιχεί στην θέση $R[i]$ είναι $\theta_s[1] + d\theta$. Έτσι το ANΣ αντιστοιχεί στην θέση:

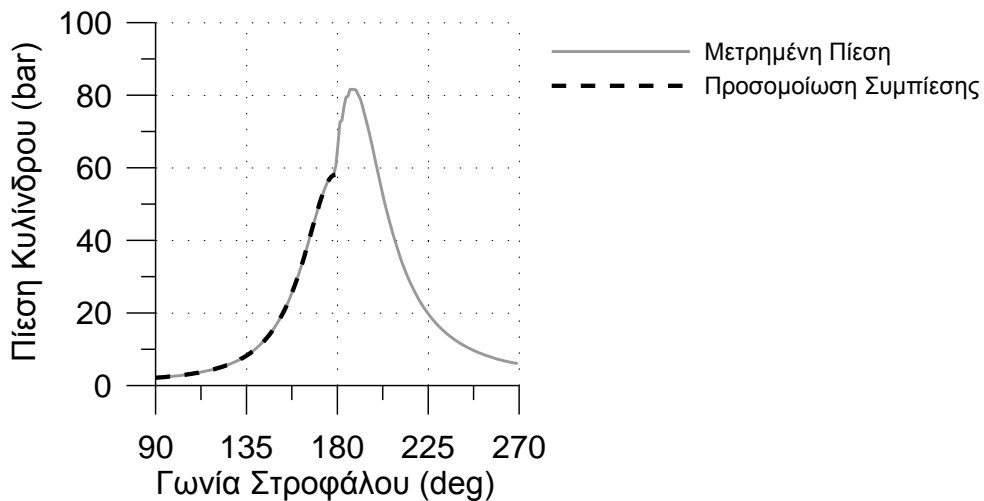
$$TDC[j] = i + \frac{180 - \theta_s[1] + d\theta}{\Delta\theta} \quad (3-7)$$

για «j» όσα και τα τοπικά ελάχιστα της σειράς R , δηλαδή όσα τα ANΣ που ανιχνεύτηκαν.



Σχήμ. 3-6 Απεικόνιση των διαγραμμάτων εύρεσης του ANΣ με την υπολογιστική μέθοδο.

Στο Σχήμ. 3-7 φαίνεται η καμπύλη συμπίεσης και η μετρημένη πίεση στην βέλτιστη σχετική θέση, από την οποία καταγράφηκε η θέση του ANΣ.



Σχήμ. 3-7 Μετρημένο διάγραμμα πίεσης και προσομοιωμένη καμπύλη συμπίεσης στην βέλτιστη σχετική θέση

3.3 Αφαίρεση θορύβου

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η τεχνική που αναπτύχθηκε για την αφαίρεση του ηλεκτρικού θορύβου από το σήμα της πίεσης. Η τεχνική βασίζεται στην ανάλυση του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων, με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier διακριτών σημείων. Στο φάσμα των συχνοτήτων του σήματος, εντοπίζονται οι συχνότητες που αντιστοιχούν σε ηλεκτρικό θόρυβο, μειώνεται το πλάτος τους και στη συνέχεια το σήμα μετατρέπεται, με αντίστροφο μετασχηματισμό, στο πεδίο του χρόνου. Η τεχνική αξιολογείται

συγκριτικά με συμβατικές μεθόδους εξομάλυνσης στην εκτίμηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

Σε μετρήσεις στο πεδίο εφαρμογής υπάρχουν πολλές πιθανές πηγές παρασιτικού θορύβου, κυρίως ηλεκτρικού. Ο κατάλληλος σχεδιασμός της μετρητικής διάταξης με την ορθή εφαρμογή γειώσεων, περιορίζει σημαντικά τον παρασιτικό θόρυβο, όμως δεν είναι δυνατή η πλήρης απομάκρυνση του χωρίς την εφαρμογή φίλτρων. Η εφαρμογή φίλτρων μπορεί να γίνει είτε ψηφιακά, δηλαδή με την κατάλληλη επεξεργασία της μέτρησης στον υπολογιστή, είτε αναλογικά με την επεξεργασία του αναλογικού σήματος πριν την ψηφιοποίησή του. Τα ψηφιακά φίλτρα υπερτερούν έναντι των αναλογικών διότι είναι πιο ευέλικτα από άποψη ρύθμισης, πιο αξιόπιστα επειδή δεν βασίζονται σε εξαρτήματα που φθείρονται και φυσικά δεν προσθέτουν κανένα πρόσθετο κόστος.

Η συνήθης πηγή θορύβου στην μέτρηση της πίεσης θαλάμου καύσης είναι ηλεκτρικής φύσης και προέρχεται από την διαφορά δυναμικού σε διαφορετικά σημεία που θεωρούνται γειωμένα (ground loop) και συγκεκριμένα από την διαφορά του δυναμικού της γείωσης της τροφοδοσίας της μετρητικής διάταξης από το δυναμικό των μεταλλικών τμημάτων του κινητήρα. Στην περίπτωση που ο υπολογιστής λειτουργεί με συσσωρευτή ο θόρυβος είναι πολύ μικρότερος και οφείλεται στην διακύμανση της τάσης αναφοράς (γείωση) κατά την διαφορική μέτρηση. Ο κατάλληλος σχεδιασμός της μετρητικής διάταξης και συγκεκριμένα του κυκλώματος τροφοδοσίας του αισθητήρα, μπορεί να τον εκμηδενίσει. Πηγή θορύβου εκτός της στάθμης της γείωσης μπορεί να είναι η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από κάποια πηγή κοντά στην μετρητική διάταξη (ηλεκτρικός κινητήρας, μετασχηματιστής).

Εκτός από τον αμιγώς ηλεκτρικό θόρυβο, άλλες πηγές ανωμαλίας του σήματος της πίεσης, περιλαμβάνουν τα σφάλματα ψηφιοποίησης [3.4] και τα δυναμικά φαινόμενα κοντά στην θέση του αισθητήρα [3.5].

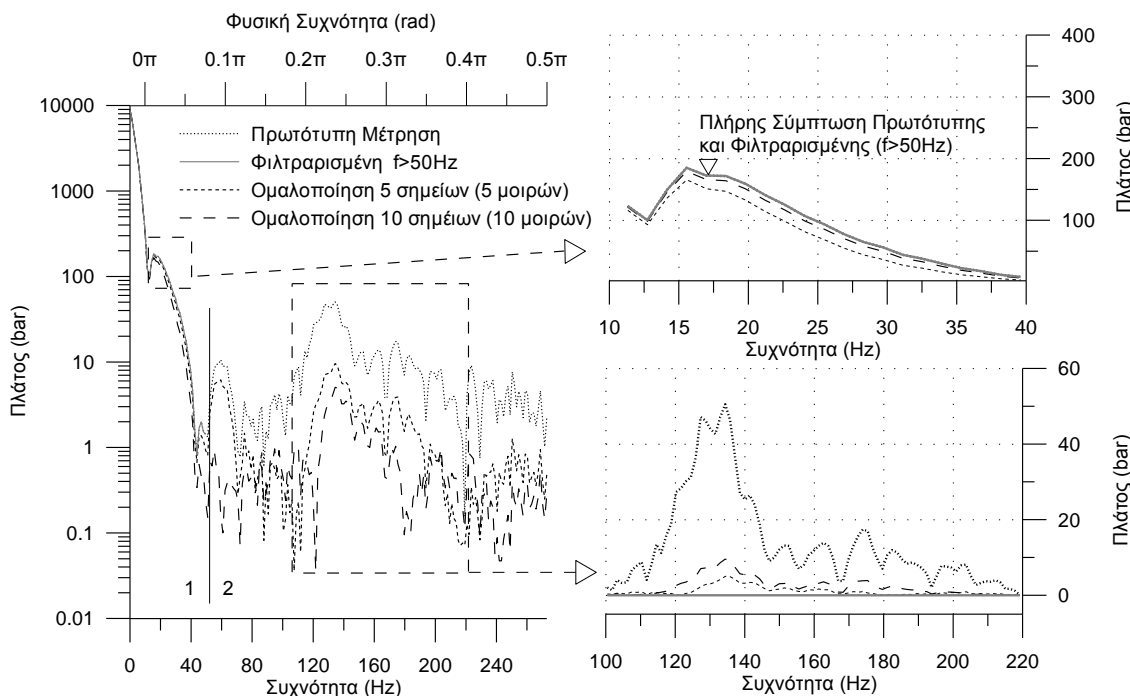
Η ύπαρξη θορύβου επηρεάζει σημαντικά κυρίως την εκτίμηση του καθαρού φαινομενικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας dQ_n ο οποίος προσδιορίζεται από τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο ως εξής:

$$dQ_n = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp}{dt} \quad (3-8)$$

Όπου p η πίεση και V ο στιγμιαίος όγκος του κυλίνδρου και γ ο λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων.

Στην εξίσωση (3-8) φαίνεται ότι το βασικό μέγεθος εισόδου για την ανάλυση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι η πίεση και η παράγωγός της. Έτσι η ακρίβεια εκτίμησης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας βασίζεται σε αυτό το μέγεθος.

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την εξομάλυνση του σήματος της πίεσης καύσης. Η χρήση του μέσου κύκλου όπως ήδη έχει αναφερθεί περιορίζει την διακύμανση από σημείο σε σημείο. Πρόκειται για έναν εύκολο αλλά όμως μη επαρκή τρόπο για την εξομάλυνση του σήματος. Άλλη επιλογή είναι η εφαρμογή φίλτρου που λαμβάνει το κυλιόμενο μέσο όρο (running average). Η επάρκεια αυτής της μεθόδου εξαρτάται από την πυκνότητα της δειγματοληψίας [3.7]. Σε κάθε περίπτωση έντονες μεταβολές της πίεσης κατά την προαναμεμειγμένη καύση παραμορφώνονται. Η εφαρμογή μεθόδων ελαχίστων τετραγώνων, όπως η μέθοδος φιλτραρίσματος Savitzky-Golay [3.8], είναι πιο σύνθετες αλλά και πιο αποτελεσματικές. Η εφαρμογή χαμηλοπερατών ψηφιακών φίλτρων, φαίνεται να υπερτερεί έναντι των προηγούμενων μεθόδων [3.9]. Το σημαντικότερο θέμα στην εφαρμογή των χαμηλοπερατών φίλτρων είναι ο καθορισμός της συχνότητας αποκοπής. Η συχνότητα αποκοπής καθορίζεται είτε με χρήση κανόνων είτε με την εφαρμογή προσαρμοστικών φίλτρων [3.10]. Ένα επιπλέον θέμα κατά την εφαρμογή ορθογώνιου παράθυρου, είναι το φαινόμενο Gibbs [3.6, 3.7], που σχετίζεται με την ταλαντωτική συμπεριφορά γύρω από την συχνότητα αποκοπής. Αυτό αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή άλλων παραθύρων, όπως του Hanning.

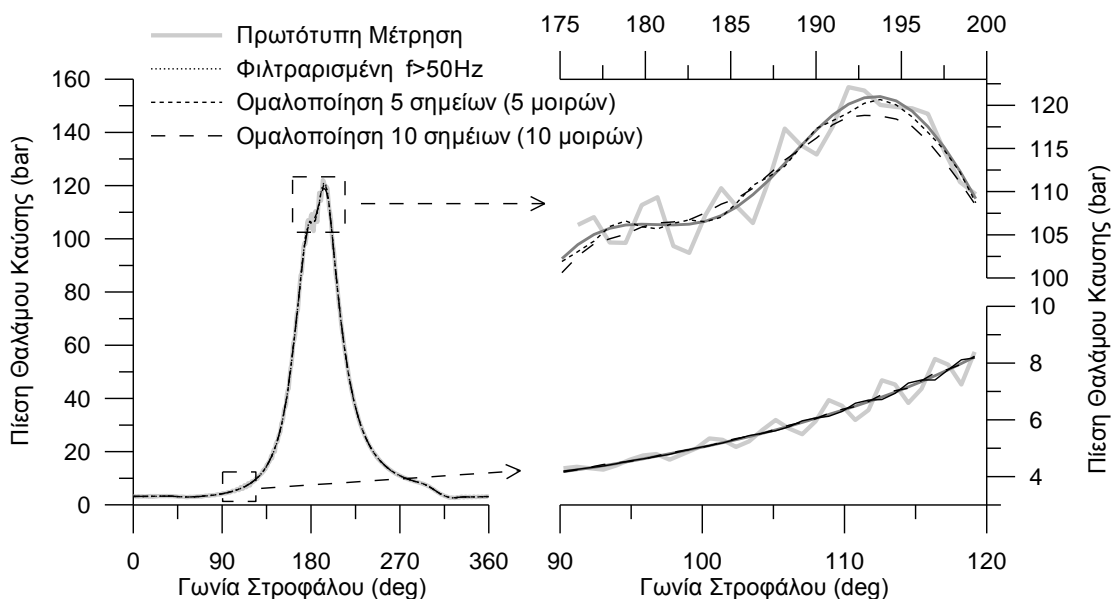


Σχήμ. 3-8. Ανάλυση φάσματος συχνοτήτων πρωτογενών και επεξεργασμένων μετρήσεων.

Στο αριστερό σχήμα, στην περιοχή 1 υπάρχει πλήρης σύμπτωση της πρωτότυπης και φιλτραρισμένης ($f > 50\text{Hz}$), ενώ στην περιοχή 2 το πλάτος της φιλτραρισμένης είναι μηδέν και συνεπώς μη ορατό στον λογαριθμικό άξονα.

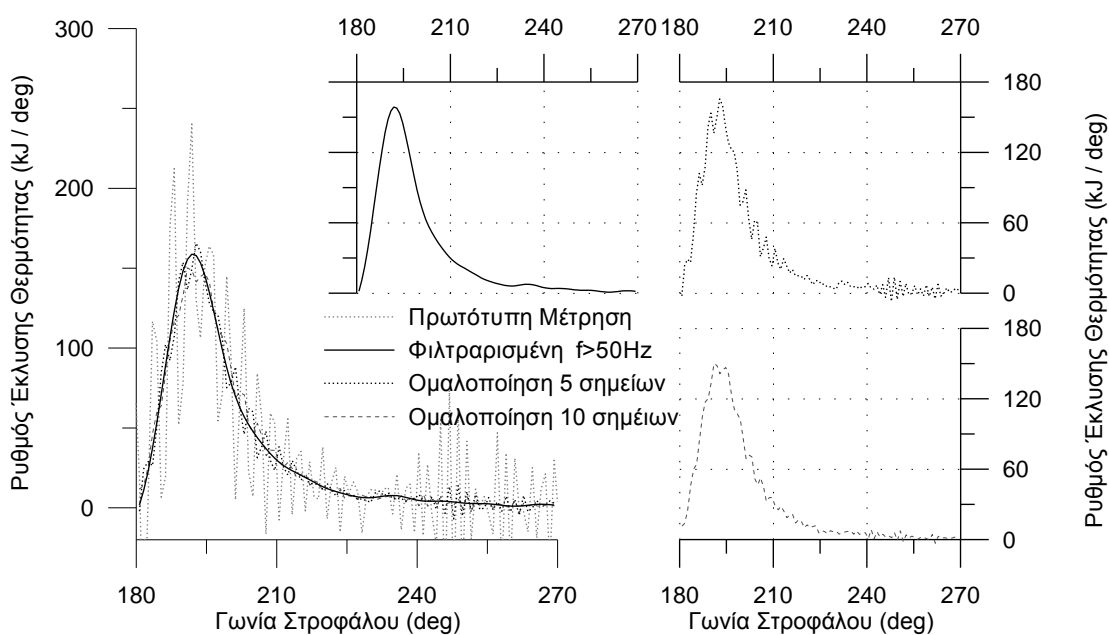
Στην ανάλυση κατά Fourier το σήμα αναλύεται σε σειρά ημιτόνων και συνημιτόνων. Με τους συντελεστές των συνημιτόνων να αποτελούν το πραγματικό μέρος και τους συντελεστές των ημιτόνων να αποτελούν το φανταστικό μέρος, οι μιγαδικοί αριθμοί που προκύπτουν περιγράφουν πλήρως το αρχικό σήμα. Στο Σχήμ. 3-8 φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων μέτρησης από ναυτικό δίχρονο κινητήρα που περιέχει ηλεκτρικό θόρυβο. Η δειγματοληψία έγινε ανά 0.93° μοίρες γωνίας στροφάλου στα 546kHz ενώ η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ήταν 85 rpm. Στον άξονα των τετμημένων δίνεται το μέτρο των μιγαδικών τιμών. Οι τεταγμένες του μέτρου των μιγαδικών τιμών δίνεται σε απόλυτες συχνότητες (κάτω άξονας) και σε φυσικές συχνότητες (πάνω άξονας).

Στο Σχήμ. 3-9 το μαύρο ίχνος είναι το μετρημένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα. Το μετρημένο αυτό σήμα, είναι το άθροισμα δύο σημάτων: του ηλεκτρικού θορύβου και της πραγματικής πίεσης [3.6]. Αυτή η γραμμική συμπεριφορά απλοποιεί την διαδικασία αφαίρεσης. Η μέτρηση της πίεσης καύσης γίνεται, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και την επιθυμητή γωνία στροφάλου, σε συχνότητες από 100Hz έως 10kHz. Σύμφωνα με το θεώρημα ψηφιοποίησης (Nyquist-Shannon sampling theorem), αν ο θόρυβος έχει συχνότητα μεγαλύτερη από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας, τότε δεν καθορίζεται επαρκώς από τα διακριτά μετρημένα σημεία. Σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται ως τυχαίος. Στην γενική περίπτωση του θορύβου που εξετάζεται, ο θόρυβος είναι καθορισμένος και στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει συχνότητα 130Hz (Σχήμ. 3-8). Επιπλέον εμφανίζονται και κάποιες αρμονικές του.



Σχήμ. 3-9 Εφαρμογή αποκοπής συχνοτήτων και κυλιόμενων μέσων όρων για την ομαλοποίηση του δυναμοδεικτικού διαγράμματος που περιέχει θόρυβο.

Στο Σχήμ. 3-9, οι μη συνεχείς γραμμές, η στικτή και η διακεκομμένη, αντιστοιχούν στα ομαλοποιημένα διαγράμματα με την χρήση κυλιόμενου μέσου όρου 5 και 10 σημείων, αντίστοιχα. Η συνεχής λεπτή γραμμή απεικονίζει το φιλτραρισμένο σήμα με την χρήση της προτεινόμενης τεχνικής. Η εφαρμογή κυλιόμενου μέσου όρου εξομαλύνει σημαντικά το δυναμοδεικτικό διάγραμμα. Όμως στην περιοχή του άνω νεκρού σημείου και της μεγίστης καύσης, φαίνεται ότι παραμορφώνει το διάγραμμα. Η παραμόρφωση είναι ορατή και στο πεδίο των συχνοτήτων και συγκεκριμένα στην περιοχή των 10 - 40Hz, η οποία περιέχει πληροφορίες για το μηχανισμό της καύσης. Αντίθετα, η εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής εξομαλύνει επιτυχώς και δεν παραμορφώνει το διάγραμμα, γεγονός ορατό και στο πεδίο του χρόνου (Σχήμ. 3-9) αλλά και στο πεδίο των συχνοτήτων (Σχήμ. 3-8).



Σχήμ. 3-10 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συγκριτικά για την πρωτογενή μέτρηση και τις τρεις επεξεργασμένες. Η εφαρμογή φίλτρων αποκοπής συχνοτήτων παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Στο Σχήμ. 3-10 δίνεται η εκτίμηση για τον ρυθμό καύσης, χρησιμοποιώντας την πρωτογενή μέτρηση, την επεξεργασμένη με τον συμβατικό τρόπο κυλιόμενου μέσου όρου (με δυο τιμές πλήθους σημείων εξαγωγής μέσου όρου, 5 και 10) και με την προτεινόμενη μέθοδο. Τα φιλτραρισμένα διαγράμματα πίεσης με την συμβατική μέθοδο, φαίνεται ότι διαστρεβλώνουν τον ρυθμό καύσης και επιπλέον ο θόρυβος φαίνεται να μην έχει εξαλειφθεί πλήρως. Αντίθετα ο ρυθμός καύσης που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το σήμα της πίεσης που φιλτραρίστηκε με την προτεινόμενη

μέθοδο, είναι απολύτως ομαλός ενώ δεν υπάρχουν ενδείξεις οποιαδήποτε στρέβλωσης που μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια πληροφοριών.

Όσον αφορά στην εκτιμώμενη ενδεικνύμενη ισχύ, τα αποτελέσματα από την χρήση των τεσσάρων δυναμοδεικτικών, έχουν μεταξύ τους αμελητέα διαφορά (0, 1rpm, -0.04%, -0.12%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα του θορύβου προστέθηκε συμμετρικά πάνω στο δυναμοδεικτικό διάγραμμα και συνεπώς τα εμβαδά «PdV» που προστέθηκαν είναι ίσα με τα εμβαδά που αφαιρέθηκαν. Ίδια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και για την μέση ενεργό πίεση.

Η διαδικασία φιλτραρίσματος με την προτεινόμενη μέθοδο, μπορεί να γίνει είτε ανά περίοδο είτε στο σύνολο της μέτρησης, με την πρώτη περίπτωση να είναι πιο εύκολη σχετικά με τον χειρισμό της φάσης, δηλαδή τις γωνίες των διανυσμάτων στα οποία εκφράζονται οι μιγαδικές τιμές.

3.4 Αντιστοίχιση μετρημένων τιμών πίεσης στη γωνία στροφάλου.

Χρησιμοποιώντας τις θέσεις ANΣ που έχουν υπολογιστεί, γίνεται αναφορά του κάθε δείγματος σε μια γωνία στροφάλου. Γι αυτό το σκοπό ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα:

1. Απομόνωση αξιοποιήσιμου τμήματος της μέτρησης: Σε αυτό το βήμα αφαιρούνται το αρχικό και το τελικό τμήμα της μέτρησης ώστε να απομονωθούν ακέραιοι κύκλοι. Τα αξιοποιήσιμα δείγματα της μέτρησης είναι τα ακόλουθα:

$$V_p[i], \text{ όπου } TDC[a] \leq i \leq (TDC[b] - 1) \quad (3-9)$$

Στη περίπτωση του δίχρονου κινητήρα ισχύει: $a=1$ ενώ b είναι η τελευταία τιμή της σειράς TDC. Για τον τετράχρονο κινητήρα το « a » αντιστοιχεί στην πρώτη τιμή της σειράς TDC που ταυτίζεται με το άνω νεκρό σημείο εναλλαγής αερίων ($a=1$ ή $a=2$) και το « b » στο τελευταίο.

2. Ανάπτυξη της χρονοσειράς του μετρούμενου μεγέθους:

$$(V_p[i], t[i]) \text{ όπου } t[i] = (i - TDC[a]) \Delta t \quad (3-10)$$

όπου

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (3-11)$$

με f_s όπως ορίζεται από την Εξίσωση (3-1)

3. Εκτίμηση της μέση ταχύτητας περιστροφής ανά περιστροφή:
Χρησιμοποιώντας την σειρά "TDC", υπολογίζεται ο αριθμός των δειγμάτων ανά

περιστροφή δηλαδή ο χρόνος της περιστροφής και τελικά η μέση ταχύτητα περιστροφής ανά περιστροφή, $\bar{\omega}[j]$, εκφρασμένη σε μοίρες γωνίας στροφάλου ανά δευτερόλεπτο. Η μέση ταχύτητα περιστροφής ανά περιστροφή (deg/sec) δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\omega}[j] = \frac{360 \cdot f_s}{TDC[j+1] - TDC[j]}, \text{ για } j = a \dots (b-1) \quad (3-12)$$

Η μέση ταχύτητα περιστροφής ανά περιστροφή μπορεί να εκφραστεί και σε σαλ (rpm):

$$\bar{N} = \frac{\bar{\omega} \cdot 60}{360} = \frac{\bar{\omega}}{6} \quad (3-13)$$

4. Γραμμική αναγωγή του χρόνου σε γωνία στροφάλου:

Η γωνία στροφάλου που αντιστοιχεί στο δείγμα i το οποίο ανήκει στο διάστημα $[TDC[j], TDC[j+1])$, δίνεται από την σχέση:

$$\theta[i] = \theta[i-1] + (t[i+1] - t[i]) \cdot \omega[j] \quad (3-14)$$

Η γωνία στροφάλου του τυχαίου δείγματος k , της περιστροφής j , δίνεται από τη σχέση:

$$\theta[k] = \theta[TDC[j] - 1] + \sum_{i=TDC[j]}^k (t[i+1] - t[i]) \cdot \omega[j] \quad (3-15)$$

Η γωνία στροφάλου του τελευταίου δείγματος, $TDC[j+1]-1$, της περιστροφής j , δίνεται από τη σχέση:

$$\theta[TDC[j+1] - 1] = \theta[TDC[j] - 1] + \sum_{i=TDC[j]}^{TDC[j+1]-1} (t[i+1] - t[i]) \cdot \omega[j] \quad (3-16)$$

Συνεπώς η γωνία στροφάλου του τυχαίου δείγματος k της περιστροφής j δίνεται από την σχέση:

$$\theta[k] = \sum_{p=a}^{j-1} \left(\sum_{i=TDC[p]}^{TDC[p+1]-1} (t[i+1] - t[i]) \cdot \omega[p] \right) + \sum_{i=TDC[j]}^k (t[i+1] - t[i]) \cdot \omega[j] \quad (3-17)$$

Στο βήμα 4, πολλαπλασιάζεται ο χρόνος με μια μέση τιμή ταχύτητας περιστροφής ανά περιστροφή. Στη περίπτωση που υπάρχει διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου, προκαλείται σφάλμα στην αναφορά γωνίας στροφάλου. Το σφάλμα αυτό συζητείται στο Κεφάλαιο 6.

Στην περίπτωση της υπολογιστικής εκτίμηση του ANΣ σε τετράχρονο κινητήρα, οι θέσεις άνω νεκρού σημείου είναι ανά δύο περιστροφές και συνεπώς στην εξίσωση (3-12) το 360 πρέπει να αντικατασταθεί από το 720. Σε επόμενο

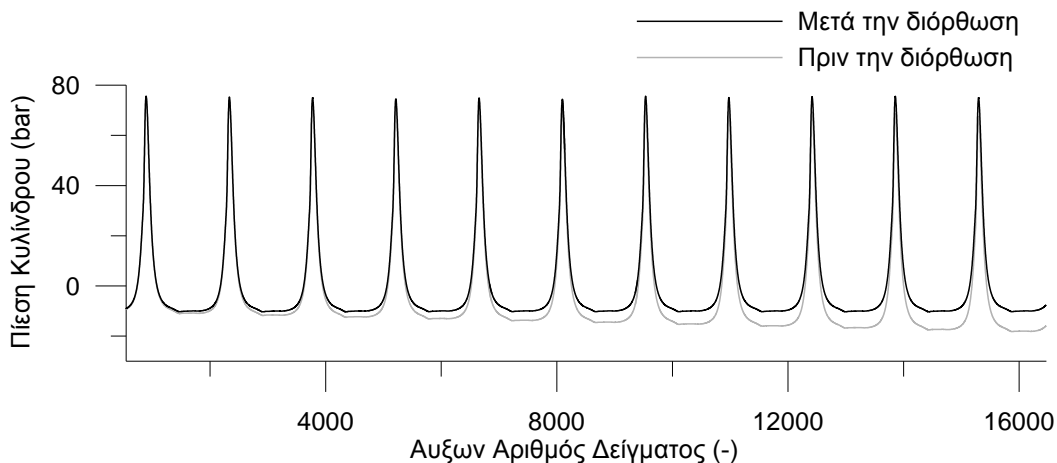
κεφάλαιο θα δειχθεί ότι αν το σημείο αναφοράς στον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας δεν είναι το ΑΝΣ της καύσης, είναι δυνατόν να προκύψουν σημαντικά σφάλματα στην αναφορά της πίεσης σε γωνίες στροφάλου.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που είναι γνωστή η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής, τότε αυτή χρησιμοποιείται αντί για την μέση στο βήμα 4. Στο Κεφάλαιο 6 προσεγγίζεται διεξοδικά το θέμα της διόρθωσης μετρήσεων που ελήφθησαν με χρονική δειγματοληψία.

3.5 Διόρθωση Θερμικού Ρεύματος Αισθητήρα

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ανταποκρίνονται άριστα σε ταχείες μεταβολές της πίεσης. Το σήμα που παράγουν εμπεριέχει μια σταθερή συνιστώσα (DC), η οποία δεν αντιστοιχεί στην μετρούμενη πίεση, δηλαδή παρουσιάζουν αδυναμία στην μέτρηση της απόλυτης τιμής της πίεσης, η οποία πρέπει να αναφερθεί με άλλον τρόπο [3.11]

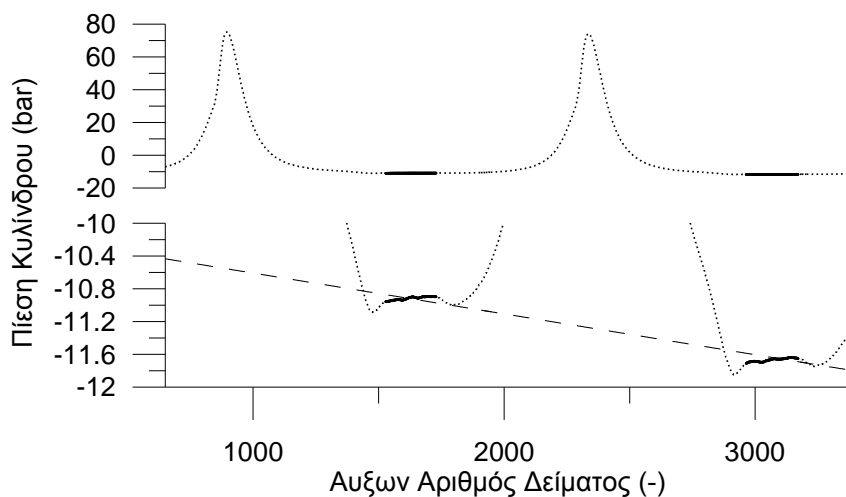
Η σταθερή συνιστώσα όμως, μεταβάλλεται στην διάρκεια της μέτρησης σαν αποτέλεσμα της θερμοκρασίας του αισθητήρα και ηλεκτρικών φαινομένων (πχ. επίπεδα φόρτισης πυκνωτών της διασύνδεσης του αισθητήρα). Η μετακίνηση αυτή, όπως προσδιορίστηκε από 20 μετρήσεις και 5 αισθητήρες, κυμαίνεται από -0.02 έως -0.6 bar/sec και εξαρτάται από τον χρόνο κατά τον οποίο είναι προσαρμοσμένος ο αισθητήρας στο εξαεριστικό. Το φαινόμενο αυτό, που κυρίως οφείλεται στην θέρμανση του αισθητήρα ονομάζεται θερμική μετακίνηση (thermal drift) [3.13].



Σχήμ. 3-11 Δυναμοδεικτικό διάγραμμα πιέσεων πριν και μετά τη διόρθωση λόγω θερμική μετατόπισης (η οποία με επεξεργασία έχει ενισχυθεί για λόγους απεικόνισης).

Στο Σχήμ. 3-11 απεικονίζεται το δυναμοδεικτικό διάγραμμα πριν και μετά την διόρθωση της θερμικής μετακίνησης. Οι μετρημένες τιμές τάσης έχουν μετατραπεί σε τιμές πίεσης, χρησιμοποιώντας τον συντελεστή μετατροπής του αισθητήρα, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Ο συντελεστής αυτός

είναι αρνητικός, οπότε η θερμική μετακίνηση σε όρους μετρούμενης τάσης είναι αυξητική με τον χρόνο, ενώ στο σχήμα φαίνεται ως πτωτική. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο διάγραμμα έχει υποστεί επεξεργασία για να φαίνεται εντονότερα η θερμική μετακίνηση και έχει χρησιμοποιηθεί μόνο για λόγους απεικόνισης στα Σχήμ. 3-11 και Σχήμ. 3-12.



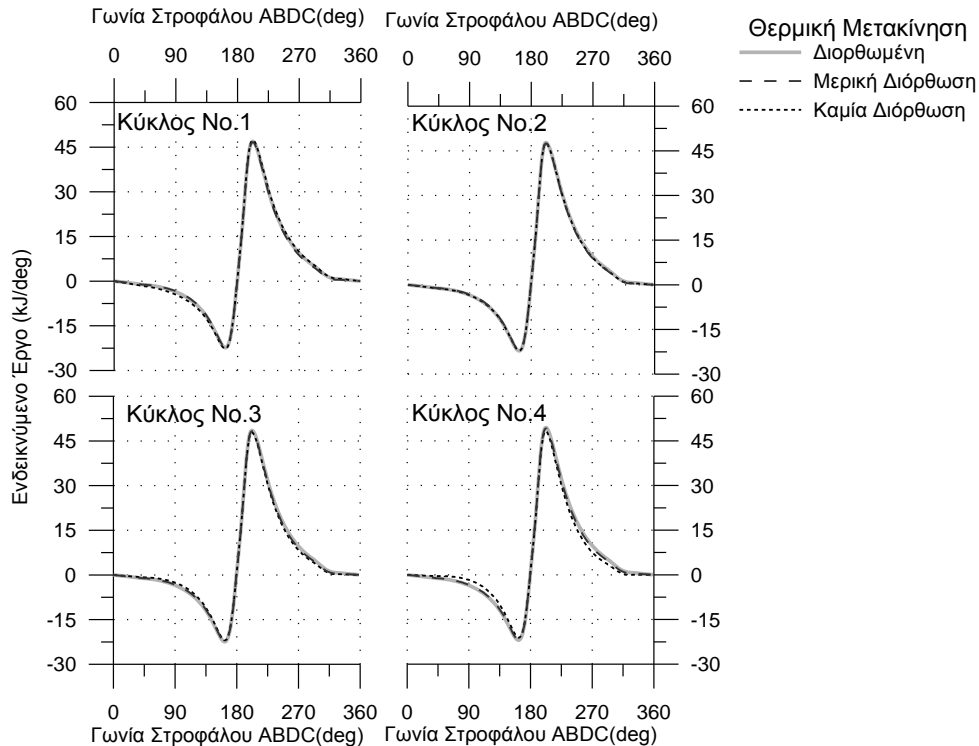
Σχήμ. 3-12 Μεθοδολογία διόρθωσης της θερμικής μετακίνησης που βασίζεται στον υπολογισμό κλίσης ευθείας που διέρχεται από σημεία του δυναμοδεικτικού

Στο Σχήμ. 3-12 απεικονίζεται η αρχή της μεθοδολογίας διόρθωσης της θερμικής μετατόπισης. Για την εφαρμογή της πρέπει να απομονωθούν οι θέσεις του δυναμοδεικτικού διαγράμματος στις οποίες είναι ανοικτές οι βαλβίδες (ή θυρίδες) εισαγωγής και εξαγωγής (Σχήμ. 3-12) δηλαδή η περίοδος της απόπλυσης. Αυτό γίνεται εύκολα, γνωρίζοντας τον χρονισμό των βαλβίδων-θυρίδων και έχοντας μια «χονδροειδή» εκτίμηση της γωνίας στροφάλου στη διάρκεια της μέτρησης. Από τα ζεύγη τιμών θέσης και πίεσης διέρχεται ευθεία της οποίας η εξίσωση προσδιορίζεται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Από τον συντελεστή διεύθυνσης της ευθείας, a (κλίση), υπολογίζεται η κατακόρυφη διόρθωση κάθε μετρημένης τιμής V . Η διορθωμένη σειρά V' συναρτήσει της θέσης της i είναι:

$$V'[i]=V[i]-a \cdot i \quad (3-18)$$

Για την διερεύνηση της επίδρασης της μη διόρθωσης ή πλημμελούς διόρθωσης της θερμικής μετακίνησης, έγινε συγκριτική αξιολόγηση της εκτιμώμενης ενδεικνύμενης ισχύος και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν το ενδεικνύμενο έργο, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και η ανηγμένη σωρευτική έκλυση θερμότητας για τέσσερις διαδοχικούς κύκλους, χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές σειρές πίεσης. Η πρώτη έχει υποστεί πλήρη διόρθωση από θερμική μετακίνηση. Στη δεύτερη, που

αναφέρεται ως μερικώς διορθωμένη, κάθε κύκλος έχει μετακινηθεί κατακόρυφα ώστε κάθε περίοδος να έχει σωστή αναφορά πίεσης στο διάστημα 0...30 μοίρες μετά το ΚΝΣ, αλλά δεν έχει αντιμετωπισθεί η μετατόπιση στη διάρκεια του κύκλου. Η τρίτη σειρά πίεσης δεν έχει υποστεί καμία επεξεργασία, είναι δηλαδή η πρωτογενής μέτρηση της πίεσης.

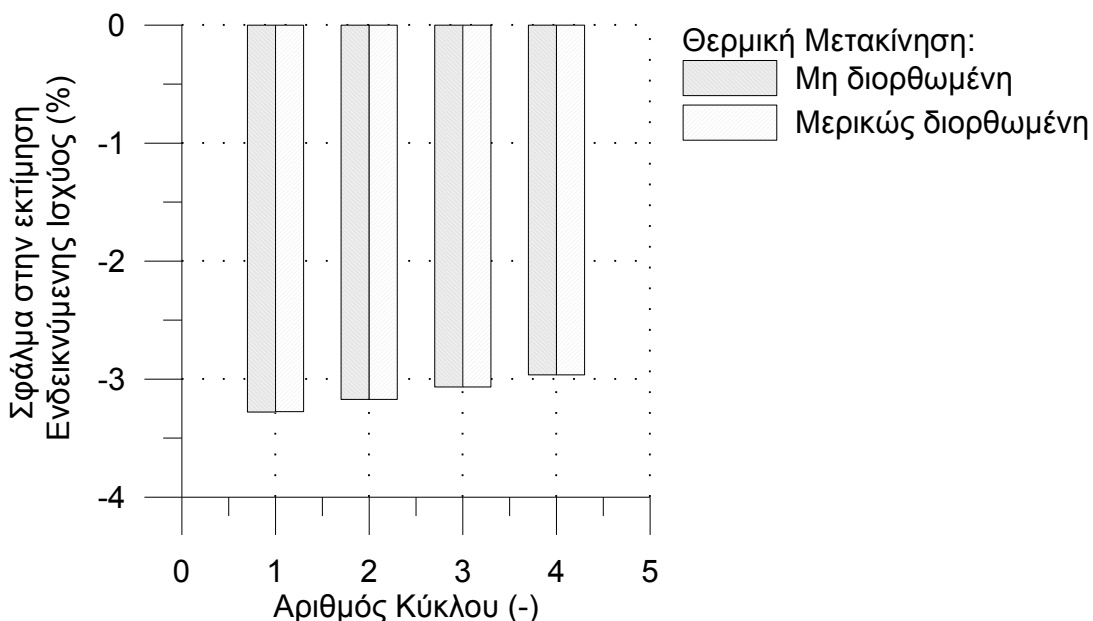


Σχήμ. 3-13 Ενδεικνύμενο έργο υπολογισμένο σε τέσσερις διαδοχικούς κύκλους χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές σειρές τιμών πίεσης που διαφοροποιούνται σχετικά με την διόρθωση της θερμικής μετακίνησης.

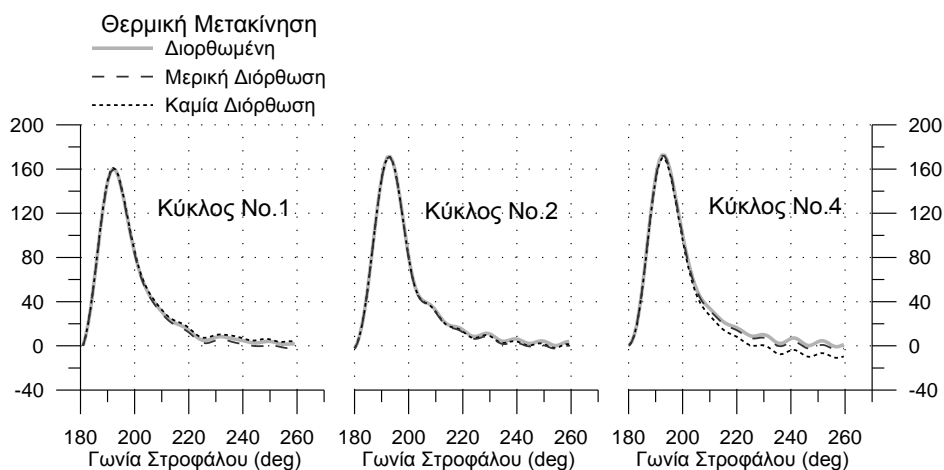
Στο Σχήμ. 3-13 αποτυπώνεται το ενδεικνύμενο έργο/μοίρα συναρτήσει της γωνίας στροφάλου. Όπως είναι αναμενόμενο, δεδομένης της πτωτικής συνεχούς συνιστώσας της πίεσης λόγω θερμικής μετακίνησης, κατά την άνοδο του εμβόλου παρατηρείται υπερεκτίμηση του ενδεικνύμενου έργου και κατά την κάθοδο του εμβόλου υποεκτίμηση. Δηλαδή το καταναλισκόμενο έργο φαίνεται μικρότερο ενώ το παραγόμενο μεγαλύτερο. Η συμπεριφορά αυτή είναι ίδια στους τέσσερις διαδοχικούς κύκλους. Το ενδεικνύμενο έργο υπολογισμένο από την πίεση με μη διορθωμένη θερμική μετατόπιση μεταβάλλεται από κύκλο σε κύκλο, αλλά παραμένει σχεδόν συμμετρικό γύρω από το ενδεικνύμενο έργο αναφοράς (γκρι γραμμή). Αυτό συμβαίνει διότι προφανώς το έργο παρακολουθεί τη μεταβολή της πίεσης.

Τελικά, στο Σχήμ. 3-14 φαίνεται ότι το σφάλμα εκτίμησης της ενδεικνύμενης ισχύος χρησιμοποιώντας την μερικώς διορθωμένη και την μη διορθωμένη πίεση, είναι πρακτικά ίδιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η

εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος έχει μικρή εξάρτηση από την απόλυτη πίεση, καθώς η κατακόρυφη μετακίνηση του δυναμοδεικτικού προσθέτει ίσα εμβαδά κατά την άνοδο και την κάθοδο του εμβόλου. Αντίθετα η καθοδική συνεχής συνιστώσα της πίεσης προκαλεί την υποεκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος καθώς δεν είναι συμμετρική στη διάρκεια του κύκλου.



Σχήμ. 3-14 Σφάλμα στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος υπολογισμένη από σειρές τιμών πίεσης μερικώς ή καθόλου διορθωμένες ως προς την θερμική μετακίνηση.

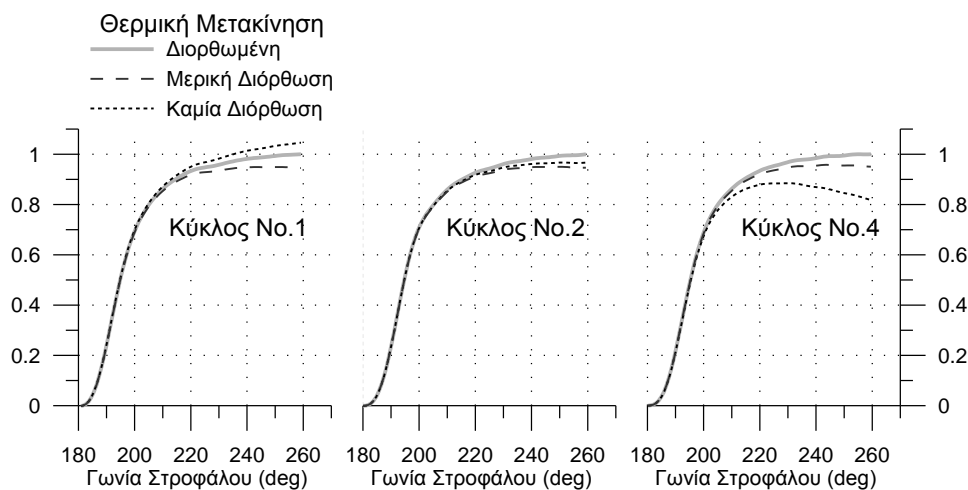


Σχήμ. 3-15 Σύγκριση ρυθμού έκλυσης θερμότητας για διαφορετικές περιπτώσεις μεθόδου διόρθωσης της θερμικής μετακίνησης σε τέσσερις διαδοχικούς κύκλους.

Στο Σχήμ. 3-15 φαίνεται ο καθαρός ρυθμός έκλυσης θερμότητας υπολογισμένος από τις τρεις σειρές σήματος πίεσης. Η κάθε καμπύλη έχει μετατοπιστεί κατακόρυφα ώστε στο σημείο έναυσης ο ρυθμός έκλυσης να είναι μηδενικός. Συνεπώς στα πρώτα στάδια της καύσης τα τρία διαγράμματα του

ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι όμοια. Με την μερικώς διορθωμένη πίεση, παρουσιάζεται πτωτική τάση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, που συνεπάγεται τελικώς την εσφαλμένη αντίληψη μικρότερης συνολικής εκλυόμενης ενέργειας και μικρότερη διάρκεια καύσης. Με τον υπολογισμό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας από την μη διορθωμένη πίεση, στον πρώτο κύκλο εμφανίζεται εσφαλμένη αντίληψη μεγαλύτερης συνολικής εκλυόμενης ενέργειας και μεγαλύτερης διάρκειας καύσης ενώ στους επόμενους κύκλους η εικόνα αυτή αντιστρέφεται σημαντικά.

Στο Σχήμ. 3-16 φαίνεται ότι η χρήση του μερικώς διορθωμένου σήματος συνεπάγεται μικρότερη διάρκεια καύσης και μικρότερη τιμή συνολικά εκλυόμενης ενέργειας. Το μη διορθωμένο σήμα ξεκινάει, για τον πρώτο κύκλο, με υπερεκτίμηση του ρυθμού και συνεχίζει με σημαντική υποεκτίμηση.



Σχήμ. 3-16 Σύγκριση της ανηγμένης σωρευτικής έκλυση θερμότητας για διαφορετικές περιπτώσεις μεθόδου διόρθωσης της θερμικής μετακίνησης σε τέσσερις διαδοχικούς κύκλους.

3.6 Μετατροπή μετρομένων τιμών τάσης σε τιμές πίεσης.

Οι μετρομένες τιμές τάσης πρέπει να μετατραπούν σε τιμές πίεσης. Οι αισθητήρες συνοδεύονται από πιστοποιητικό βαθμονόμησης στο οποίο αναφέρεται ο συντελεστής μετατροπής της μετρομένης τάσης σε τιμές πίεσης. Όμως μετά τη μετατροπή η απόλυτη τιμή των πιέσεων πρέπει να αναφερθεί σε μια γνωστή τιμή αναφοράς.

Η αναφορά αυτή αφορά στην κατακόρυφη μετακίνηση του δυναμοδεικτικού διαγράμματος και αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως “pegging”. Μια απλοϊκή και ακριβής προσέγγιση είναι η μετακίνηση του δυναμοδεικτικού ώστε η μετρομένη τιμή της πίεσης σάρωσης, ή η ατμοσφαιρική πίεση στην περίπτωση κινητήρα φυσικής αναπνοής, να ταυτίζεται με την τιμή

της πίεσης του δυναμοδεικτικού στις φάσεις που είναι ταυτόχρονα ανοιχτές οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής (απόπλυση) [3.12]. Διάφορες μέθοδοι αναφοράς έχουν προταθεί και αξιολογηθεί [3.1]. Κάποιες απαιτούν απόλυτη αναφορά πίεσης ενώ άλλες χρησιμοποιούν την καμπύλη πολυτροπικής συμπίεσης. Στην παρούσα διαγνωστικής τεχνικής η αναφορά γίνεται είτε με την καταγραφή της τιμής πίεσης σάρωσης είτε με την εκτίμησή της, σαν ένας άγνωστος προς προσδιορισμό (Παράγραφος 4.4.3).

Τελικά, η πίεση P του τυχαίου δείγματος i , δίνεται από την σχέση:

$$P_i = C \cdot V_i - (C \cdot V_{peg} - P_{peg}), \quad (3-19)$$

όπου C είναι η σταθερά του αισθητήρα για μετατροπή της τάσης σε πίεση, $V_{P,peg}$ ο μέσος όρος της ψηφιοποιημένης τάσης στα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την αναφορά και P_{peg} η πίεση αναφοράς που αντιστοιχεί στα προηγούμενα σημεία.

3.7 Υπολογισμός μέσου κύκλου και αναφορά του σε γωνία στροφάλου.

Για τον περιορισμό των μην ντετερμινιστικών συνιστωσών της μετρημένης πίεσης συνηθίζεται η εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας τον μέσο κύκλο [3.14]. Έχοντας αντιστοιχίσει τιμές γωνίας στροφάλου στις τιμές της πίεσης, αυτό γίνεται εύκολα ως ακολούθως:

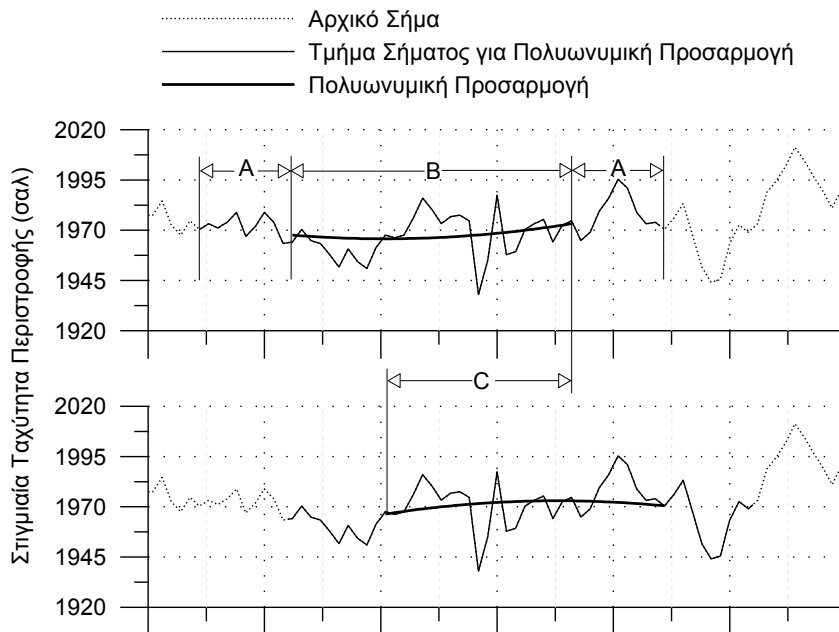
1. Ανάπτυξη σειράς “P – θ” με σταθερό βήμα $\Delta\theta$ γωνίας στροφάλου: Με γραμμική παρεμβολή κατασκευάζεται από την σειρά “P – θ” νέα σειρά “P’ –θ” με θ' πολλαπλάσια του $\Delta\theta$.

2. Υπολογισμός μέσου κύκλου: Ο μέσος κύκλος υπολογίζεται σε μορφή σειράς τιμών πίεσης, \overline{P}_θ , που αντιστοιχούν σε τιμές γωνίας στροφάλου θ , από 0 έως $360-\Delta\theta$ για δίχρονους κινητήρες και από 0 έως $720-\Delta\theta$ για τετράχρονους. Το βήμα σε κάθε περίπτωση είναι το βήμα γραμμικής παρεμβολής, δηλαδή $\Delta\theta$. Τα \overline{P}_θ είναι ο μέσος όρος των τιμών της πίεσης για ίδια γωνία στροφάλου ($360j+\theta$, $720j+\theta$ δίχρονοι και τετράχρονο κινητήρα αντίστοιχα).

3.8 Πρωτότυπη διαδικασία εξομάλυνσης με εφαρμογή στην στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής και τη πίεση καύσης

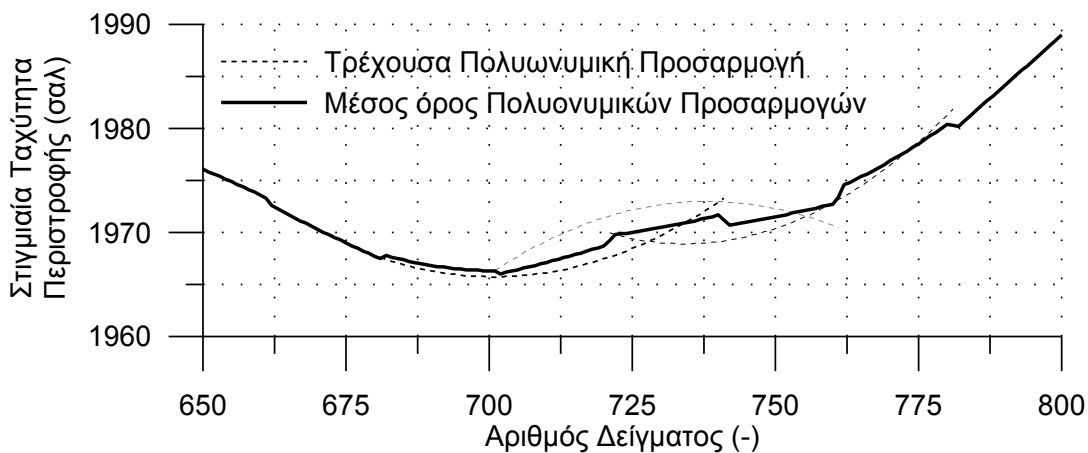
Για την εξομάλυνση του σήματος της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής, αναπτύχθηκε μέθοδος που βασίζεται σε κατά τμήματα πολυωνυμική προσαρμογή (splines) δύο σταδίων. Ο λόγος που αναπτύχθηκε το φίλτρο και δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο υφιστάμενο από τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες, είναι ότι

τα διαθέσιμα φίλτρα δεν παρείχαν αποτέλεσμα που να ικανοποιεί την φυσική αίσθηση. Με κριτήριο την φυσική αίσθηση αναπτύχθηκε το φίλτρο που περιγράφεται στη συνέχεια [3.15].



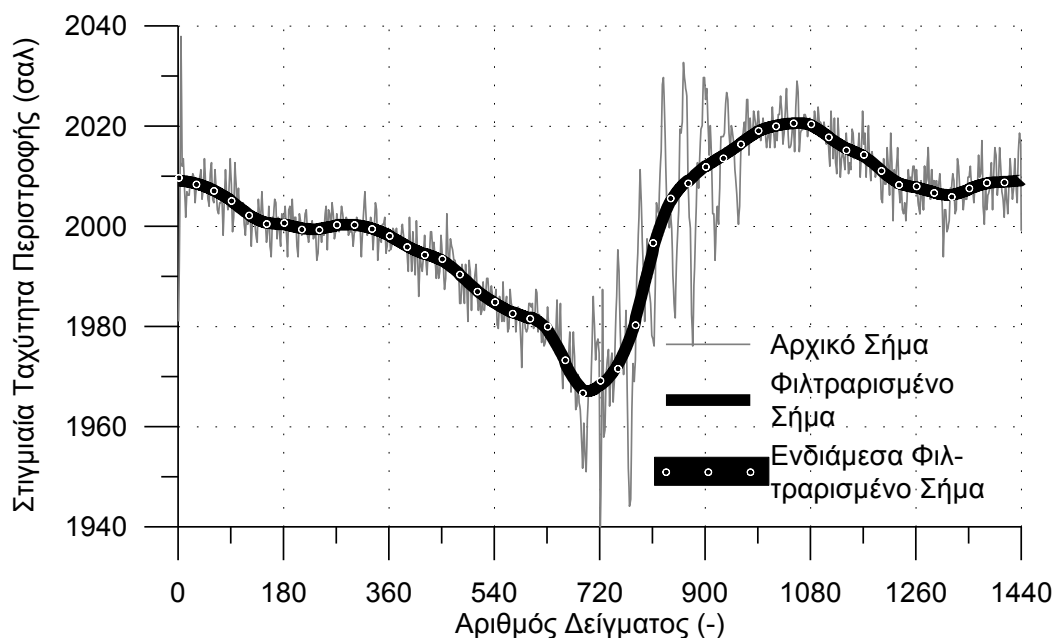
Σχήμ. 3-17 Πρώτο στάδιο της κατά τμήματα πολυωνυμικής προσαρμογής

Στο Σχήμ. 3-17 με την διακεκομμένη γραμμή φαίνεται το αρχικό σήμα. Από τμήμα του σήματος που αποτελείται από A+B+A δείγματα, υπολογίζεται πολώννυμο δευτέρου βαθμού που παρουσιάζει το ελάχιστο άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς με το αρχικό σήμα. Από το πολώννυμο αυτό υπολογίζονται τα σημεία για το τμήμα B. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δείγματα του αρχικού σήματος, λαμβάνοντας τμήματα με αλληλοεπικάλυψη C.



Σχήμ. 3-18 Ενδιάμεσο εξομαλυνόμενο σήμα υπολογισμένο από τις κατά τμήματα πολυωνυμικές προσαρμογές.

Από τον μέσο όρο όλων των δειγμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε θέση, υπολογίστηκε η καμπύλη που φαίνεται στο Σχήμ. 3-18. Στην καμπύλη αυτή παρουσιάζονται ανωμαλίες που οφείλονται στα άκρα των επί μέρους πολυωνύμων. Η εφαρμογή μεγαλύτερης αλληλεπικάλυψης C, θα μπορούσε να μειώσει αυτές τις ασυνέχειες, αλλά ως βέλτιστη λύση επιλέχθηκε η εφαρμογή της ίδιας μεθόδου σε δεύτερο στάδιο χρησιμοποιώντας σαν είσοδο τα πολυώνυμα που υπολογίστηκαν στο πρώτο στάδιο.



Σχήμ. 3-19 Το αρχικό, το ενδιάμεσο και το εξομαλυμένο σήμα στιγμιαίας ταχύτητας

Στο Σχήμ. 3-19 φαίνεται το αρχικό, το ενδιάμεσο και το τελικό σήμα. Σημειώνεται ότι το ενδιάμεσο σήμα δεν χρησιμοποιείται σε κανένα στάδιο της επεξεργασίας και παραβάλλεται μόνο για την επεξήγηση της μεθόδου. Με την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων A, B και C, η τεχνική παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα. Οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εξομάλυνση του σήματος της ταχύτητας φαίνονται στον Πίνακ. 3-1.

Πίνακ. 3-1 Οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εξομάλυνση των σημάτων της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής (αριθμός δειγμάτων)

	A	B	C
Στάδιο 1 ^ο :	20	60	20
Στάδιο 2 ^ο :	20	60	30

3.9 Ορολογία

Λατινικά Σύμβολα

P	Διακριτές τιμές πίεσης
C	Σταθερά βαθμονόμησης αισθητήρα πίεσης (V/bar)
f	Συχνότητα
m	Πλήθος σημείων
R	Τιμές ελαχίστων τετραγώνων διαφοράς
S	Αριθμός (πλήθος) δειγμάτων
t	Χρόνος
V	Όγκος
θ	Γωνία στροφάλου
K	Πλήθος εμβολισμών του κινητήρα ανά κύκλο.
M	Πλήθος κύκλων λειτουργίας
N	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (rpm)

Ελληνικά Σύμβολα

α	Κλίση ευθείας
γ	Λόγος ειδικών θερμοχωρητικότητας
ω	Στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής (deg/sec)

Δείκτες

i	Θέση δείγματος (Sample Number)
j	Αύξων αριθμός
R	Τιμή αναφοράς
s	Τιμές από προσομοίωση
S	Δειγματοληψία
TDC	Αναφορικά με τις θέσεις ANΣ

Συντομεύσεις

ANΣ	Ανω νεκρό σημείο
Cor	Τιμές διόρθωσης θέσης
CA	Γωνία Στροφάλου (Crank Angle)
ABDC	Μετά το κάτω νεκρό σημείο
ppm	Parts per million (μέρη στο εκατομμύριο)
rpm	Revolutions per minute

Τελεστές - Διακριτικά

- Λ Λογικό “ΚΑΙ” (“AND”)
- Μέση τιμή

3.10 Αναφορές

- [3.1] Richard Davis, Gary Patterson, Cylinder Pressure Data Quality Checks and Procedures to Maximize Data Accuracy, SAE Paper 2006-01-1346, 2006
- [3.2] M. Akif Ceviz, Bülent Çavusoglu, Ferhat Kaya, Volkan Öner, Determination of cycle number for real in-cylinder pressure cycle analysis in internal combustion engines, *Energy*, 36 (2011) 2465-2472
- [3.3] Q. Leclere, L. Pruvost, E. Parizet, Angular and temporal determinism of rotating machine signals: The diesel engine case, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 24, Issue 7, Special Issue: ISMA 2010, October 2010, Pages 2012-2020
- [3.4] R.S. Davis, G.J. Paterson, Cylinder pressure data quality checks and procedures to maximize data accuracy, SAE Paper 2006-01-1346, 2006.
- [3.5] D.T. Hountalas, A. Anestis, Effect of pressure transducer position on measured cylinder pressure diagram of high speed diesel engines, *Energy Conv. Manag.* 39 (1998) 589e607.
- [3.6] Steven W. Smith, *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, San diego California, 1997
- [3.7] S.X. Shi, H.Z. Sheng. Numerical simulation and digital signal processing in measurements of cylinder pressure of internal combustion engines. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers International Conference on Computers in Engine Technology (C345) C20/87 (1987) 211-218.*
- [3.8] A. Savitzky, M.J.E. Golay, Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Anal. Chem.* 36 (1964) 1627-1639.
- [3.9] F. Payri, F.M. Luján, J. Martín, A. Abbad, Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 24, Issue 6, August 2010, Pages 1767-1784, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.12.011>.
- [3.10] G. Giakas, V. Baltzopoulos, Optimal digital filtering requires a different cut-off frequency strategy for the determination of higher derivatives, *J. Biomech.* 30(1997) 851-855.
- [3.11] Kangyoon Lee, Maru Yoon, Myoung-ho Sunwoo, A study on pegging methods for noisy cylinder pressure signal, *Control Engineering Practice*, 2008, 16(8): 922-929
- [3.12] Hsu B.D., *Practical Diesel-Engine Combustion Analysis*, SAE International, Warrendale, PA 15096-0001 USA, 2002
- [3.13] H. J. Schafer, O. Krull, B. Maege, Thermal Stress on piezoelectric Pressure Transducer in the Combustion Chamber of an SI-Engine, SAE Paper 850375, 1985
- [3.14] Q. Leclere, L. Pruvost, E. Parizet, Angular and temporal determinism of rotating machine signals: The diesel engine case, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 24, Issue 7, Special Issue: ISMA 2010, October 2010, Pages 2012-2020

- [3.15] Stoer; Bulirsch. Introduction to Numerical Analysis, Springer Science Business Media, pp. 93–106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η διαγνωστική τεχνική που εφαρμόστηκε, αξιολογήθηκε και βελτιώθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Επίσης γίνεται περιγραφή των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και αυτών που αναπτύχθηκαν.

Η διαγνωστική τεχνική βασίζεται στην σύγκριση της τωρινή κατάσταση του κινητήρα με μια κατάσταση αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας σταθερές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο προσομοίωσης που είναι ενσωματωμένο στο διαγνωστικό λογισμικό. Αρχικά δίνεται μια συνοπτική περιγραφή του θερμοδυναμικού αυτού μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του κινητήρα, που αποτελεί τον πυρήνα της διαγνωστικής τεχνικής.

Στην συνέχεια του Κεφαλαίου παρατίθενται και επεξηγείται το φυσικό νόημα των σταθερών του μοντέλου. Κατόπιν περιγράφεται η διαδικασία της διάγνωσης που περιλαμβάνει την αρχική βαθμονόμηση του μοντέλου, την καταγραφή των δεδομένων που αντικατοπτρίζουν την τωρινή κατάσταση του κινητήρα και τέλος την επίλυση προς υπολογισμό των αποτελεσμάτων, δηλαδή των δεικτών λειτουργικής κατάστασης και των λειτουργικών μεγεθών. Τέλος παρατίθεται και επεξηγούνται τα μεγέθη και οι δείκτες που συνιστούν το αποτέλεσμα της διάγνωσης.

Τέλος περιγράφεται συνοπτικά το νέο περιβάλλον χειρισμού του διαγνωστικού κώδικα και το νέο μετρητικό λογισμικό που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής.

4.2 Συνοπτική περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης του κινητήρα

Το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στην διαγνωστική τεχνική αποτελείται από ένα διζωνικό μοντέλο καύσης πλαισιωμένο από υπομοντέλα για την περιγραφή των περιφερειακών διεργασιών όπως η έγχυση, η εναλλαγή των αερίων, η υπερπλήρωση κλπ. Στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα μοντέλα προσομοίωσης, με πρόσφατη την υιοθέτηση πολυζωνικού μοντέλου καύσης με το οποίο είναι δυνατή η καλύτερη περιγραφή της ανάμειξης αέρα καυσίμου και η εκτίμηση εκπομπών ρύπων. Όμως για τα αντικείμενα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε επαρκής η εφαρμογή διζωνικού μοντέλου.

Το μοντέλο προσομοίωσης είναι γενικής εφαρμογής με δυνατότητα χρήσης σε διάφορα είδη κινητήρων. Έχει εφαρμοστεί σε πλήθος περιπτώσεων (τύπους κινητήρων, συνθήκες λειτουργίας κλπ.) και έχει επιβεβαιωθεί εργαστηριακά η δυνατότητά του να προβλέπει με πολύ καλή ακρίβεια τα λειτουργικά μεγέθη του κινητήρα [4.1, 4.2]. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, με αναφορά στα διάφορα υποσυστήματα του κινητήρα.

4.2.1 Προσομοίωση των διεργασιών εντός του κυλίνδρου

4.2.1.1 Μοντέλο απωλειών θερμότητας.

Η εκτίμηση του ρυθμού απώλειας θερμότητας του εργαζόμενου μέσου μέσα από τα τοιχώματα του κυλίνδρου, γίνεται με την χρήση αδιάστατου μοντέλου τυρβώδους κινητικής ενέργειας [4.3]. Ο συντελεστής συναλλαγής θερμότητας, h , δίνεται από τη σχέση [4.4]:

$$h = c_h Re^{0.8} Pr^{0.33} \frac{\lambda}{l_{car}} \quad (4-1)$$

Στην ανωτέρω έκφραση, το χαρακτηριστικό μήκος l_{car} θεωρείται ίσο με τη στιγμιαία τιμή του ύψους του θαλάμου καύσης (απόσταση εμβόλου-κεφαλής). Η σχέση έχει δοκιμαστεί επιτυχώς σε μεγάλο πλήθος κινητήρων δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα [4.5]. Ο συνολικός ρυθμός απωλειών θερμότητας προς τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης προκύπτει από το γινόμενο της επιφάνειας των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης A , με την στιγμιαία ροή θερμότητας [4.6]:

$$\dot{Q} = A[h_c(T_g - T_w) + c_r(T_g^4 - T_w^4)] \quad (4-2)$$

4.2.1.2 Διαρροές Αερίου από τον Κύλινδρο

Οι συνολικές διαρροές αερίου από τον κύλινδρο (cylinder blow-by) αποδίδονται κυρίως στα διάκενα μεταξύ ελατηρίων-χιτωνίου και σε επικαθίσεις ή φθορές στις βαλβίδες. Αποτελούν σημαντική παράμετρο εμπλεκόμενη στην διάγνωση. Ένδειξη διαρροών αποτελεί η ελάττωση της μέγιστης πίεσης συμπίεσης (σε σχέση πάντα με τη τιμή της πίεσης σάρωσης) η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Η αξιολόγηση της έντασης του φαινομένου είναι κρίσιμη στην διάγνωση. Στο παρελθόν έχει προταθεί η εφαρμογή λεπτομερών μοντέλων έκφρασης των διαρροών του αερίου συναρτήσει των διακένων ελατηρίου-χιτωνίου [4.7]. Η χρήση τέτοιων μοντέλων σε εφαρμογές πεδίου έχει εγκαταλειφτεί διότι συνήθως δεν είναι διαθέσιμα τα απαιτούμενα γεωμετρικά δεδομένα για τον κινητήρα. Επιπλέον η απλή

περιγραφή των διαρροών εκφρασμένη συναρτήσει μιας ισοδύναμης μέσης επιφάνειας διαρροής έχει αποδειχτεί επαρκής [4.8]. Η παροχή μάζας της διαρροής διαμέσου της επιφάνειας, A , υπολογίζεται από τις σχέσεις της ισεντροπικής συμπιεστής ροής.

Η ισοδύναμη επιφάνεια A , δίνεται από την σχέση:

$$A = \pi D \delta r \quad (4-3)$$

Όπου δr είναι το ισοδύναμο διάκενο ελατηρίου- χιτωνίου και αποτελεί σταθερά του μοντέλου. Επειδή η περιγραφή των διαρροών δεν γίνεται με ανάλυση του ακριβούς μηχανισμού, η σταθερά δr περιγράφει συνολικά τις διαρροές από όποια αιτία και αν προέρχονται, περιλαμβανομένων και των διαρροών από τις βαλβίδες.

4.2.1.3 Μοντέλο ανάπτυξη δέσμης καυσίμου

Θεωρείται ότι το εγχεόμενο καύσιμο σχηματίζει δέσμη κωνικού σχήματος στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Το μήκος διάσπασης και η ταχύτητα διεύδυσης εντός του κυλίνδρου υπολογίζεται από εμπειρικές συσχετίσεις [4.9] που παρέχουν την ταχύτητα κατά μήκος του άξονα της δέσμης:

$$u = u_{inj} = C_d \left(\frac{2\Delta P}{\rho_l} \right)^{0.5} \quad \text{for } x < L$$

$$u = u_{inj} \left(\frac{L}{x} \right)^n \quad \text{for } x \geq L$$
(4-4)

Στην ανωτέρω σχέση ο εκθέτης “ n ” χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη επιβράδυνση της δέσμης λόγω της τριβής με τον περιβάλλοντα αέρα. Με την χρήση του εκθέτη “ n ” καθίστανται εφικτή η «ρύθμιση» του ρυθμού εισόδου αέρα στο εσωτερικό της δέσμης (Σχέση 4-7) καθώς επηρεάζει τον ρυθμό μεταβολής του όγκου της .

Το μήκος διάσπασης της δέσμης L , δίνεται από την ακόλουθη σχέση [4.9, 4.10]:

$$L = u_{inj} t_{break} \cong c_1 \left(\frac{\rho_l}{\rho_a} \right)^{0.5} d_{inj} \quad (4-5)$$

Όπου c_1 είναι σταθερά και ρ_a , ρ_l οι πυκνότητες του αέρα και του καυσίμου, αντίστοιχα.

Η γωνία της δέσμης υπολογίζεται από την σχέση [4.9, 4.10]

$$\alpha = 0.05 \left(\frac{d_{inj}^2 \rho_a \Delta P}{\mu_a^2} \right)^{0.25} \quad (4-6)$$

Υπολογίζοντας τις τοπικές συνιστώσες της ταχύτητας του αέρα στην αξονική και την ακτινική διεύθυνση και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της συστροφής του αέρα στην γεωμετρία της δέσμης. Η αξονική διείσδυση της δέσμης στη περίπτωση της συστροφής μειώνεται οδηγώντας σε ταχεία επιβράδυνση και αύξηση του ρυθμού διείσδυσης του αέρα.

Μετά την πρόσκρουση στα τοιχώματα του κυλίνδρου, η δέσμη καυσίμου περιγράφεται ακολουθώντας την θεωρία της δέσμης τοιχώματος του Glauert [4.11].

4.2.1.4 Μοντέλο διείσδυσης αέρα στη δέσμη

Η εκτίμηση του ρυθμού διείσδυσης του αέρα στο εσωτερικό της ζώνης καθορίζεται από τον ρυθμό μεταβολής του όγκου της δέσμης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dm_{in}}{dt} = \rho \frac{dV_j}{dt} \quad (4-7)$$

4.2.1.5 Περιγραφή της καύσης

Το εγχέομενο καύσιμο θεωρείται ότι διασπάται σε σταγονίδια ενώ για τους υπολογισμούς της ατμοποίησης χρησιμοποιείται η μέση διάμετρος σταγονιδίου που έχει ίδιο λόγο όγκου / επιφάνειας (Sauter Mean Diameter) [4.12] με το σύνολο των σταγονιδίων. Η μέση αυτή διάμετρος δίνεται από συσχετίσεις που βασίζονται στην ανάλυση πειραματικών δεδομένων [4.13].

Για την ατμοποίηση υιοθετείται το μοντέλο των Borman και Johnson. Κατά την ατμοποίηση μίας σταγόνας απορροφάται θερμότητα, η οποία κατά ένα μέρος συνεισφέρει στην αύξηση της θερμοκρασίας της (αισθητή θέρμανση) και το υπόλοιπο μέρος για την αλλαγή της φάσης (λανθάνουσα θέρμανση-ατμοποίηση). Η εφαρμογή του μοντέλου περιγράφεται εκτενώς στην [4.3].

Για την δημιουργία καυσίμου μείγματος το ατμοποιημένο καύσιμο αναμειγνύεται με τον αέρα που έχει διεισδύσει. Ο ρυθμός ανάμειξης καθορίζεται από τυρβώδη διάχυση θεωρούμενη μικροσκοπικά και μακροσκοπικά. Οι αντίστοιχοι ρυθμοί δίνονται από τις σχέσεις:

$$\dot{m}_{fmic} = D_t(u)(m_{fmac} - m_{fmic}) \quad (4-8)$$

$$\dot{m}_{amic} = D_t(u)(m_{amac} - m_{amic}) \quad (4-9)$$

$$D_t(u) = a_{mix}u \quad (4-10)$$

Όπου a_{mix} είναι σταθερά και u η σχετική ταχύτητα της κορυφής της δέσμης ως προς τον περιβάλλοντα αέρα. Η καθυστέρηση ανάφλεξης του καυσίμου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [4.14]:

$$S_{pr} = \int_0^t \frac{1}{a_{del} P_g^{-2.5} \Phi_{eq}^{-1.04} \exp(5000/T_g)} dt = 1 \quad (4-11)$$

Όπου Φ_{eq} είναι ο τοπικός λόγος καυσίμου-αέρα εντός της δέσμης και T_g , P_g η θερμοκρασία και πίεση αντίστοιχα στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Ο συντελεστής a_{del} είναι μία σταθερά που χαρακτηρίζει την ικανότητα έναυσης του καυσίμου και προσδιορίζεται από την ανάλυση πειραματικών δεδομένων.

Ο ρυθμός καύσης εκτιμάται εφαρμόζοντας μια ημιεμπειρική σχέση τύπου Arrhenius [4.3, 4.15, 4.16]:

$$m_{fb} = \begin{cases} K_b \frac{m_{fmic} - m_{fb}}{T^{0.5}} e^{-E_c/T} P_{O_2} \end{cases}, \text{if } (AFR) > (AFR)_{st} \quad (4-12)$$

$$m_{fb} = \begin{cases} K_b \frac{m_{fmic} - m_{fb}}{(AFR)_{st} T^{0.5}} e^{-E_c/T} P_{O_2} \end{cases}, \text{if } (AFR) \leq (AFR)_{st}$$

Ο συντελεστής αναλογίας K_b είναι σταθερά του μοντέλου και προσδιορίζεται κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Οι εκθέτες a_f , a_o λαμβάνουν τιμές 1.0 και 1.5 αντίστοιχα. Μέσω των μεταβλητών C_f και C_o , οι οποίες αντιστοιχούν στο κλάσμα μάζας καυσίμου και οξυγόνου αντίστοιχα, λαμβάνεται υπόψη η διαθέσιμη ποσότητα ατμοποιημένου καυσίμου και οξυγόνου. E_c είναι η ενέργεια ενεργοποίησης και T η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό της δέσμης.

4.2.2 Προσομοίωση συστήματος έγχυσης καυσίμου

Σε αντίθεση με παλαιότερες προσεγγίσεις της ερευνητικής ομάδας που πρότειναν την εφαρμογή λεπτομερούς μοντελοποίησης του συστήματος έγχυσης [4.17], στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο [4.18]. Το κριτήριο επιλογής ήταν το γεγονός ότι για πραγματικές εφαρμογές στο πεδίο δεν είναι διαθέσιμα τα γεωμετρικά δεδομένα που απαιτούνται για το σύστημα έγχυσης.

Στο σύστημα έγχυσης θεωρούνται οι εισερχόμενες και εξερχόμενες παροχές καυσίμου καθώς και η συμπίεστικότητα σε τέσσερις διακριτούς όγκους ελέγχου:

- (1) θάλαμος υψηλής πίεσης της αντλίας,
- (2) θάλαμος αντεπιστροφής βαλβίδας
- (3) αγωγός κατάθλιψης από την αντλία στον εγχυτήρα και
- (4) εγχυτήρας.

Ο συντελεστής συμπίεστικότητας καυσίμου, K_f , δίνεται από την σχέση:

$$K_f = -\frac{dP}{dV}V, \quad (4-13)$$

όπου V είναι η στιγμιαία τιμή του όγκου ελέγχου, dV/dt ο ρυθμός μεταβολής του και \dot{Q}_{ij} η συνολική ογκομετρική παροχή καυσίμου προς αυτόν. Από την εφαρμογή της, στην συνέχεια προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση για την στιγμιαία πίεση του όγκου ελέγχου \dot{V}_i :

$$\frac{dP_j}{dt} = \frac{K_f}{V_j} \left(\frac{dV_j}{dt} - \dot{Q}_{ij} \right) \quad (4-14)$$

Ο ρυθμός μεταβολής του όγκου του θαλάμου της αντλίας καυσίμου προκύπτει από την κίνηση του εμβόλου, το οποίο λαμβάνει κίνηση από το έκκεντρο του συστήματος έγχυσης. Η αντεπίστροφη βαλβίδα, όταν αυτή υπάρχει, περιγράφεται απλοϊκά, αγνοώντας την λεπτομερή λειτουργία της (μετακίνηση όγκων, ύπαρξη ελατηρίου, κτλ) και θεωρώντας ότι επιτρέπει τη ροή καυσίμου μόνο από το θάλαμο της αντλίας προς τον αγωγό καυσίμου. Η προσέγγιση αυτή παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα [4.19]. Ο εγχυτήρας περιγράφεται με παρόμοιο τρόπο θεωρώντας ότι υπάρχει ροή καυσίμου προς το θάλαμο καύσης μόνο όταν η πίεση υπερβαίνει την πίεση ανοίγματος του εγχυτήρα. Ο αγωγός κατάθλιψης θεωρείται ότι παραμορφώνεται από την πίεση του καυσίμου και η ροή στο εσωτερικό του που είναι μη μόνιμη επιλύεται με την χρήση της μεθόδου των χαρακτηριστικών [4.18].

Όσον αφορά στην αντλία καυσίμου, επειδή δεν είναι γενικά εφικτή η καταγραφή της πίεσης του καυσίμου, χρησιμοποιείται η θέση του κανόνα καυσίμου για τον προσδιορισμό της γενικής της κατάστασης. Η παροχή μάζας καυσίμου εκφράζεται συναρτήσει της πυκνότητας του καυσίμου, ρ_f , και της θέσης του κανόνα, y_p , ως ακολούθως [4.19].

$$\dot{m}_f = c_p \rho_f y_p \quad (4-15)$$

Για την έκφραση της συνολικής απόδοσης της αντλίας καυσίμου χρησιμοποιείται η σταθερά «c_p» η οποία συσχετίζει την θέση του κανόνα καυσίμου με την παροχή καυσίμου της αντλίας.

4.2.3 Προσομοίωση των οχετών εισαγωγής και εξαγωγής

Για την προσομοίωση της διαδικασίας εναλλαγής των αερίων χρησιμοποιείται η συμβατική μέθοδος πλήρωσης – κένωσης (filling-emptying method) [4.20, 4.21, 4.22]. Η μέθοδος εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της μεταβολής της πίεσης και της θερμοκρασίας στους οχετούς εισαγωγής και εξαγωγής και για το ρυθμό συναλλαγής μάζας με τους κυλίνδρους. Σύμφωνα με τη μέθοδο πλήρωσης – κένωσης στη διάρκεια της εναλλαγής των αερίων θεωρούνται 3 διακριτοί όγκοι ελέγχου οι οποίοι είναι: ο οχετός εισαγωγής, ο οχετός εξαγωγής και ο θάλαμος καύσης. Κάθε ένας από τους όγκους ελέγχου λογίζεται ως ένα ανοικτό θερμοδυναμική σύστημα, στο οποίο η κατάσταση του αερίου θεωρείται ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο ελέγχου, ενώ μεταβάλλεται μόνο με το χρόνο. Οι διακριτοί όγκοι ελέγχου συναλλάσσουν μεταξύ τους μάζα και ενέργεια. Για τον προσδιορισμό της κατάστασης του αερίου σε κάθε όγκο ελέγχου χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας. Η περιγραφή αυτή είναι απόλυτα ικανοποιητική για εφαρμογή σε συστήματα υπερπλήρωσης σταθερής πίεσης που είναι και τα πλέον διαδεδομένα σε κινητήρες του τύπου που εξετάστηκαν. Αντίθετα σε κινητήρες με συστήματα παλμών η μέθοδος δεν είναι απόλυτα ικανοποιητική όσον αφορά στη προσομοίωση της λειτουργίας αλλά για τις εφαρμογές διάγνωσης και πάλι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

4.2.4 Προσομοίωση της απόπλυσης

Η ακριβής μοντελοποίηση της απόπλυσης, έναντι της εφαρμογής απλοϊκών μοντέλων (συσχετίσεων), έχει σημαντική επίδραση στην ακρίβεια της προσομοίωσης αλλά και στη διαγνωστική διαδικασία καθώς επηρεάζει στη συνέχεια το μηχανισμό της καύσης και τη θερμοκρασία του καυσαερίου. Γι αυτόν τον λόγο εφαρμόζεται ένα διζωνικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο τα περιεχόμενα του κυλίνδρου στην διάρκεια της εναλλαγής των αερίων χωρίζονται αρχικά σε δυο ζώνες: (1) στα προϊόντα της καύσης του προηγούμενου κύκλου και (2) στον νεοεισαχθέντα αέρα.

Από την ποσότητα αέρα $dm_{a,inl}$, που εισάγεται στον θάλαμο σε ένα χρονικό διάστημα, ένα ποσό $dm_{a,exh}$ διαφεύγει απευθείας στον οχετό εξαγωγής (μειώνοντας σημαντικά την θερμοκρασία των καυσαερίων) ενώ το υπόλοιπο προστίθεται στις ζώνες νεοεισαχθέντος αέρα και των προϊόντων της καύσης. Το ποσό της μάζας καυσαερίου που συναλλάσσεται με την κάθε ζώνη δίνεται από τις σχέσεις:

$$dm_{a,fz} = (dm_{a,inl} - dm_{a,exh})(1 - C_{1scav}) \quad (4-16)$$

$$dm_{a,cz} = (dm_{a,inl} - dm_{a,exh})C_{1scav} \quad (4-17)$$

Το μείγμα, ποσότητας $dm_{g,exh}$, που τελικά διοχετεύεται στον οχετό εξαγωγής αποτελείται κατά ένα μέρος από φρέσκο αέρα $dm_{g,fz}$ και κατά ένα δεύτερο μέρος από προϊόντα καύσης $dm_{g,cz}$. Συνεπώς οι ποσότητες που συναλλάσσονται είναι:

$$dm_{g,fz} = (dm_{g,exh} - dm_{a,exh})C_{2scav} \quad (4-18)$$

$$dm_{g,cz} = (dm_{g,ex} - dm_{a,exh})(1 - C_{2scav}) \quad (4-19)$$

Οι συντελεστές C_{1scav} και C_{2scav} είναι σταθερές του μοντέλου απόπλυσης και προσδιορίζονται κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για κάθε κινητήρα ώστε οι προβλεπόμενες τιμές θερμοκρασίας καυσαερίου και παροχής αέρα, η οποία δίνεται στο φάκελο των NOx, να ταυτίζονται με τις μετρομημένες.

Στο τέλος της εναλλαγής των αερίων, θεωρείται ότι δημιουργείται ένα ομοιογενές μείγμα προϊόντων καύσης του προηγούμενου κύκλου και φρέσκου αέρα.

4.2.5 Προσομοίωση του υπερπληρωτή

Η λειτουργία του υπερπληρωτή σε όλο το εύρος λειτουργίας του περιγράφεται από τους χάρτες με τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του συμπιεστή και του στροβίλου. Επειδή όμως χάρτες για τις δυο στροβιλομηχανές δεν είναι γενικά διαθέσιμοι (σχεδόν ποτέ) δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης εναλλακτικών μεθόδων προσομοίωσης της λειτουργίας τους. Στη παρούσα εργασία γίνεται χρήση της μεθόδου της λειτουργικής ομοιότητας [4.1, 4.23] που βασίζεται στην ανάλυση διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων από τις δοκιμές παραλαβής. Η μέθοδος της λειτουργικής ομοιότητας είναι αποδοτική για φορτία του κινητήρα μεγαλύτερα από 40%. Συμφώνα με την μέθοδο αυτή, οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης στροβίλου ($\eta_{is,T}$) και συμπιεστή ($\eta_{is,C}$) καθώς και η ανηγμένη ενθαλπική πτώση του στροβίλου ($\Delta h_{is}/U^2$), μπορούν να εκφραστούν σαν πολυώνυμα δευτέρου βαθμού του συντελεστή παροχής μάζας $\phi = m/(\rho AU)$. Οι συντελεστές των τριών συναρτήσεων f_1, f_2, f_3 :

$$\eta_{is,C} = f_1(\phi) \quad (4-20)$$

$$\eta_{isr} = f_2(\phi) \quad (4-21)$$

$$k_{is} = f_3(\phi) = \Delta h_{is}/U^2 \quad (4-22)$$

υπολογίζονται με προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων.

Τα απαιτούμενα δεδομένα για τον υπολογισμό των χαρτών στην παραπάνω μορφή είναι οι πιέσεις και θερμοκρασίες πριν και μετά το στρόβιλο, πριν και μετά το συμπιεστή, η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή και η παροχή μάζας συμπιεστή και στροβίλου. Η τελευταία προκύπτει από την προσομοίωση του κινητήρα χρησιμοποιώντας τα υπόλοιπα πειραματικά δεδομένα των δοκιμών παραλαβής.

Η παροχή μάζας καυσαερίου δια μέσω του στροβίλου υπολογίζεται θεωρώντας τον ως ακροφύσιο και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις της ισεντροπικής συμπιεστής ροής και μια ισοδύναμη επιφάνεια ροής (A_{eff}) που επηρεάζεται κυρίως από τη κατάσταση της σταθερής πτερύγωσης και τα διάκενα. Η ισοδύναμη επιφάνεια A_{eff} αποτελεί «σταθερά» του μοντέλου προσομοίωσης και εκτιμάται ώστε η μέση πίεση στον οχετό εξαγωγής να συμφωνεί με την μετρημένη τιμή. Με τη μέθοδο αυτή προκύπτει η παροχή μάζας καυσαερίου από το στρόβιλο. Στη συνέχεια από την παροχή μάζας του καυσαερίου αφαιρείται η παροχή του καυσίμου και έτσι προκύπτει η παροχή μάζας αέρα από το συμπιεστή.

4.2.6 Προσομοίωση του ψυγείου αέρα

Η λειτουργική συμπεριφορά του ψυγείου αέρα περιγράφεται μέσω της πτώσης πίεσης και του βαθμού εκμετάλλευσης, μεγέθη που εξαρτώνται κυρίως από την παροχή μάζας του αέρα.

Ο βαθμός εκμετάλλευσης του ψυγείου, ε , είναι ουσιαστικά ο λόγος της πραγματικής θερμοκρασιακής μεταβολής του εργαζόμενου μέσου προς την διαθέσιμη θερμοκρασιακή διαφορά στην είσοδο του ψυγείου αέρα:

$$\varepsilon = \frac{T_{a,in} - T_{a,out}}{T_{a,in} - T_{c,in}} \quad (4-23)$$

όπου οι δείκτες a, c αντιστοιχούν στον αέρα και το ψυκτικό μέσο αντίστοιχα. Η συσχέτιση του βαθμού εκμετάλλευσης με την παροχή μάζας αέρας γίνεται μέσω της σταθεράς b από την ακόλουθη σχέση:

$$\varepsilon = 1 - b\dot{m}^2 \quad (4-24)$$

Η πτώση πίεσης στο ψυγείο είναι ανάλογη του τετραγώνου της παροχής μάζας με συντελεστή αναλογίας την σταθερά a_{ac} :

$$\Delta P_{ac} = a_{ac} \dot{m}^2 \quad (4-25)$$

4.3 Σταθερές του μοντέλου προσομοίωσης

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται σύνοψη των σταθερών του μοντέλου προσομοίωσης (Πίνακ. 4-1) που παρουσιάζεται στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον γίνεται αναφορά στην επίδραση των σταθερών [4.1] του μοντέλου σε λειτουργικές παραμέτρους του κινητήρα, ώστε αυτές να συσχετισθούν τελικώς με την κατάσταση των υποσυστημάτων του.

Πίνακ. 4-1 Σύνοψη των σταθερών του μοντέλου προσομοίωσης.

Διεργασίες εντός του Θαλάμου Καύσης- Συμπύεση		
Συντελεστής αναλογίας στη σχέση μετάδοσης θερμότητας	c	(4-1)
Μέση θερμοκρασία τοιχωμάτων θαλάμου καύσης	T_w	(4-2)
Ισοδύναμη επιφάνεια διακένου ελατηρίων- χιτωνίου	δr	(4-3)
Αρχική πίεση στην έναρξη της συμπύεσης	P_{in}	-
Ενεργός βαθμός συμπύεσης	CR	-
Διεργασίες εντός του Θαλάμου Καύσης- Καύση, Εκτόνωση		
Συντελεστής ρυθμού ανάμιξης καυσίμου (ποιότητα εγχυτήρα)	α_{mix}	(4-10)
Συντελεστής καθυστέρησης ανάφλεξης	α_{del}	(4-11)
Συντελεστής ρυθμού καύσης	K_b	(4-12)
Σύστημα Έγχυσης		
Συνολική απόδοση αντλίας καυσίμου	c_p	§4.2.2
Διάκενο εμβόλου- χιτωνίου στην αντλία υψηλής	δr	
Υπερπληρωτής		
Συντελεστές συναρτήσεων f_1, f_2, f_3	(-)	§4.2.5
Ισοδύναμη επιφάνεια εκροής του στροβίλου	A_{eff}	
Ψυγείο αέρα		
Συντελεστής βαθμού απόδοσης ψυγείου	b	(4-24)
Συντελεστής πτώσης πίεσης	a_{ac}	(4-25)
Οχετός Απαγωγής Καυσαερίων		
Συντελεστής πτώσης πίεσης οχετού απαγωγής καυσαερίων	c_e	§4.2.3

4.3.1 Σταθερές που αφορούν τις διεργασίες εντός του θαλάμου καύσης

Ο βαθμός συμπύεσης (CR) επηρεάζει ολόκληρο το διάγραμμα πίεσης. Η ισοδύναμη επιφάνεια διακένου ελατηρίων- χιτωνίου (δr) είναι ενδεικτική της φθοράς των ελατηρίων. Επηρεάζει κυρίως το τμήμα του δυναμοδεικτικού

διαγράμματος γύρω από το άνω νεκρό σημείο και κατά την εκτόνωση. Προκαλεί μετατόπιση της θέσης της μέγιστης πίεσης συμπίεσης προς τα αριστερά σχετικά με την θέση ΑΝΣ.

Η μέση θερμοκρασία τοιχωμάτων θαλάμου καύσης (T_w) επιδρά κύρια στην περιοχή του άνω νεκρού σημείου.

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας “ c ” θεωρείται χαρακτηριστικός του κινητήρα και αφού υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής (4.4.1) διατηρείται σταθερός.

Η σταθερά a_{del} σχετίζεται με την καθυστέρηση έναυσης και επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου (αριθμός κετανίου). Η σταθερά a_{mix} σχετίζεται με την μέγιστη πίεση καύσης και συνδέεται με την κατάσταση του εγχυτήρα (διασκορπισμός).

Τέλος η σταθερά K_b σχετίζεται με τον ρυθμό αύξησης της πίεσης στα πρώτα στάδια της καύσης.

4.3.2 Σταθερές που αφορούν στο σύστημα έγχυσης καυσίμου

Το διάκενο εμβόλου- χιτωνίου της αντλίας καυσίμου, dr_p , εκφράζει την κατάσταση της αντλίας και σχετίζεται με τον ρυθμό αύξησης της πίεσης ακριβώς πριν την έναρξη της έγχυσης. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται μόνο στη περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμη μέτρηση της πίεσης έγχυσης του καυσίμου.

Σε αντίθετη περίπτωση ενσωματώνεται στον συνολικό συντελεστή απόδοσης της αντλίας καυσίμου, c_p , που συσχετίζει τη παροχή του καυσίμου με την θέση του κανόνα. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι παρέχει μόνο γενική ένδειξη για την ορθή λειτουργία της αντλίας χωρίς να εντοπίζεται σε κάποια συγκεκριμένη δυσλειτουργία.

Τέλος ο συντελεστής a_{mix} , που έχει ήδη αναφερθεί, συνδέεται με την ολική κατάσταση του εγχυτήρα.

4.3.3 Σταθερές που αφορούν στους υπερπληρωτές

Οι συντελεστές των συναρτήσεων λειτουργικής ομοιότητας (§4.2.5) σχετίζονται με την συνολική κατάσταση του στροβιλοσυμπιεστή.

Ο συντελεστής ισοδύναμης επιφάνειας ροής του στρόβιλου, A_{eff} , σχετίζεται με την μέση πίεση πριν τον στρόβιλο και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ρύπανσης του ακροφυσίου εισαγωγής.

4.3.4 Σταθερές που αφορούν στο ψυγείο αέρα

Ο συντελεστής πτώσης πίεσης του ψυγείου, α_{ac} , καθορίζει το βαθμό ρύπανσής του:

$$\Delta P_{ac} = \alpha_{ac} \dot{m}^2 \quad (4-26)$$

Ο συντελεστής b , σχετίζεται με το βαθμό εκμετάλλευσης του ψυγείου του αέρα:

$$\varepsilon = 1 - b \dot{m}^2 \quad (4-27)$$

4.3.5 Σταθερές που αφορούν στον οχετό απαγωγής καυσαερίων και το φίλτρο αέρα

Οι συντελεστές πτώσης πίεσης στον οχετό απαγωγής καυσαερίων, c_e , και στο φίλτρο αέρα, c_f , χρησιμοποιούνται σαν δείκτες ρύπανσης, σε εκφράσεις παρόμοιας μορφής με της (4-26).

4.4 Περιγραφή της μεθοδολογίας διάγνωσης

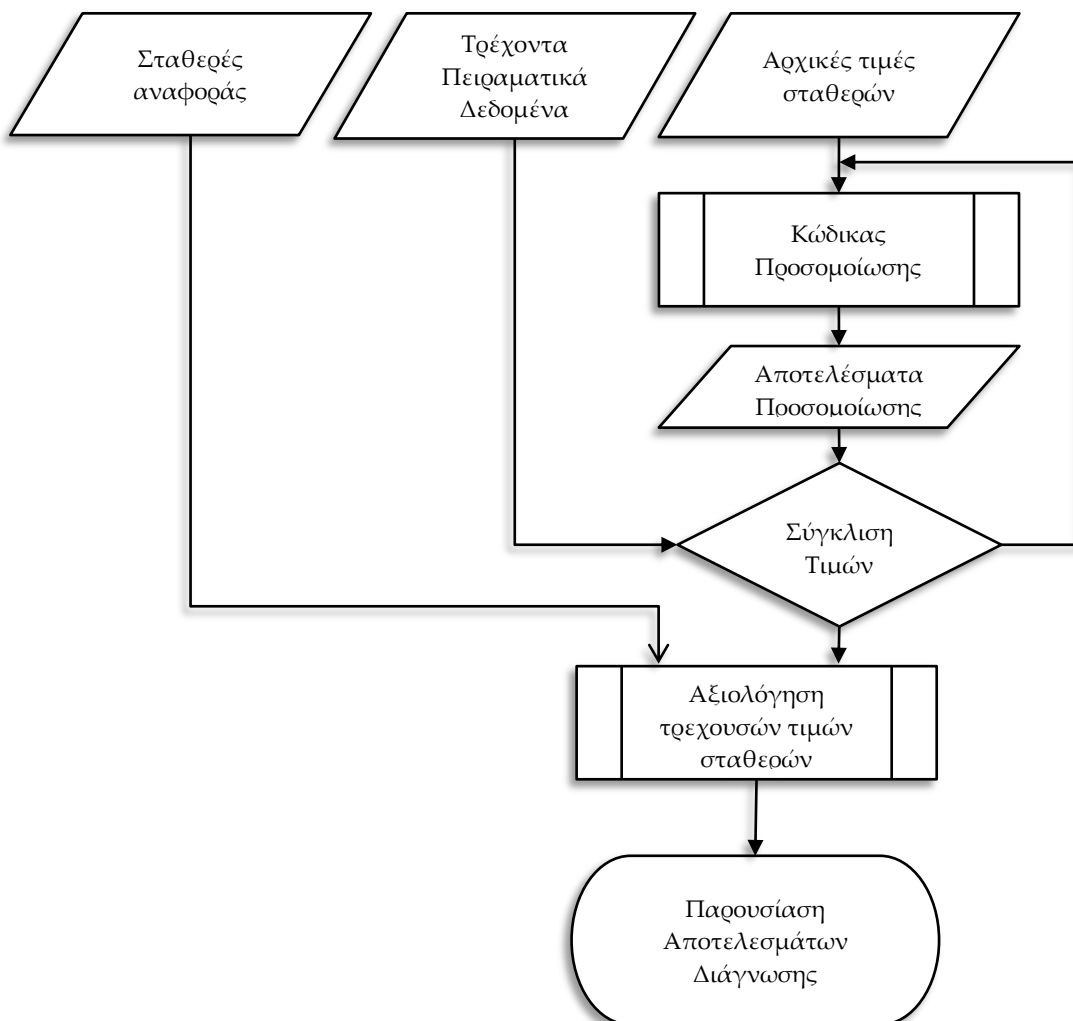
Η λειτουργία του κάθε υποσυστήματος του κινητήρα έχει σημαντική επίδραση στην συνολική του λειτουργία. Συνεπώς είναι πολύ δύσκολη η άμεση διάκριση της πραγματικής αιτίας μιας δυσλειτουργίας χωρίς ειδική επεξεργασία των μετρήσεων ακόμα και αν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις. Για παράδειγμα μια χαμηλή μέγιστη πίεση καύσης μπορεί να αποδίδεται σε χαμηλή παροχή καυσίμου, σε δυσλειτουργία του εγχυτήρα, σε κακό χρονισμό έγχυσης, χαμηλή πίεσης σάρωσης, αυξημένες διαρροές κλπ. Σκοπός της διαγνωστική τεχνικής είναι η ανίχνευση μιας δυσλειτουργίας αλλά και της πραγματικής αιτίας που την προκαλεί.

Το μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του κινητήρα που έχει περιγραφεί βασίζεται κύρια στη φυσική. Ιδιαίτερη μέριμνα έχει δοθεί ώστε οι σταθερές που χρησιμοποιεί να αντικατοπτρίζουν χαρακτηριστικά του κινητήρα (και των υποσυστημάτων) που παραμένουν σταθερά σε όλο το εύρος της λειτουργίας του, όπως για παράδειγμα τα γεωμετρικά. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών είναι ότι δεν εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας, αλλά από τον τύπο και την κατάσταση του κινητήρα και των υποσυστημάτων του.

Η λογική αυτού του τρόπου ανάπτυξης του μοντέλου είναι ότι μια ενδεχόμενη φθορά σε κάποιο υποσύστημα του κινητήρα θα έχει επίδραση στην αντίστοιχη σταθερά που χρησιμοποιείται στην περιγραφή του φυσικού μηχανισμού. Συνεπώς η λειτουργική κατάσταση του υποσυστήματος θα αντικατοπτρίζεται από την τιμή της αντίστοιχης σταθεράς.

Η μεθοδολογία διάγνωσης βασίζεται στον προσδιορισμό αυτών των σταθερών στην τρέχουσα κατάσταση του κινητήρα και την σύγκρισή τους με τις

αντίστοιχες νέου κινητήρα. Αντίθετα οι ρυθμίσεις του κινητήρα (προπορεία, παροχή καυσίμου κλπ) προσδιορίζονται άμεσα μέσω της επεξεργασίας των μετρούμενων τιμών.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας διάγνωσης

Οποιαδήποτε απόκλιση στην τιμή μιας σταθεράς από εκείνη της αναφοράς αποτελεί «ένδειξη» για ενδεχόμενη φθορά, εσφαλμένη ρύθμιση ή μειωμένη απόδοση, δηλ. γενικότερα για μια δυσλειτουργία ή βλάβη. Επειδή κάθε σταθερά του μοντέλου εμπλέκεται σε συγκεκριμένα υποσυστήματα είναι δυνατή η άμεση αναγνώριση του κάθε προβλήματος.

Για τον προσδιορισμό των σταθερών που περιγράφουν τον νέο κινητήρα (“Σταθερές Αναφοράς” στο Σχήμα 4.1) χρησιμοποιούνται διαθέσιμα δεδομένα από τις δοκιμές παραλαβής του κινητήρα ή τις θαλάσσιες δοκιμές εφόσον πρόκειται για ναυτικό κινητήρα. Στην παράγραφο 4.4.1, περιγράφεται η διαδικασία αρχικής βαθμονόμησης του μοντέλου που συνίσταται (1) στην εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και (2) στον

υπολογισμό των σταθερών αναφοράς με βάσει τις μετρήσεις των δοκιμών παραλαβής.

Για την εκτέλεση της διάγνωσης είναι απαραίτητα πειραματικά δεδομένα που αντικατοπτρίζουν την τρέχουσα κατάσταση του κινητήρα (“Τρέχοντα Πειραματικά Δεδομένα” στο Σχήμα 4.1). Το σημαντικότερο μέγεθος για τη διάγνωση είναι το διάγραμμα πίεσης του θαλάμου καύσης. Στην παράγραφο 4.4.2 περιγράφονται τα απολύτως απαραίτητα καθώς και τα προαιρετικά δεδομένα εισόδου για την διάγνωση.

Όπως έχει αναφερθεί η διαγνωστική μέθοδος βασίζεται στην σύγκριση των σταθερών του μοντέλου για τη τρέχουσα κατάσταση με τις αντίστοιχες της αναφοράς. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, ο προσδιορισμός των σταθερών για την τρέχουσα κατάσταση του κινητήρα γίνεται με κριτήριο την σύγκλιση των προβλεπόμενων τιμών του μοντέλου για διάφορες λειτουργικές παραμέτρους με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας.

Για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης κατά τον υπολογισμό των σταθερών, ακολουθείται μια στρατηγική σταδιακής εκτίμησης των σταθερών. Αρχικά εκτιμούνται οι σταθερές που σχετίζονται με τις πλέον θεμελιώδεις διεργασίες και στην συνέχεια σταδιακά προσδιορίζονται οι υπόλοιπες. Η μεθοδολογία περιγράφεται στην παράγραφο 4.4.3.1. Στην παράγραφο 4.4.3.2 περιγράφεται η λογική εκτίμησης των αρχικών τιμών απ’ όπου θα ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία. Η μέθοδος επίλυσης του συστήματος για το προσδιορισμό των τιμών των σταθερών περιγράφεται στην παράγραφο 4.4.3.2.

4.4.1 Διαδικασία αρχικής βαθμονόμησης του μοντέλου

4.4.1.1 Γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Στην αρχική βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται η εισαγωγή των γεωμετρικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και των υποσυστημάτων του. Παραδείγματα κατασκευαστικών χαρακτηριστικών είναι ο αριθμός των κυλίνδρων και των υπερπληρωτών, η ύπαρξη συστήματος μεταβλητού χρονισμού έγχυσης (VIT), κ.α. Τα γεωμετρικά δεδομένα που αφορούν τον κινητήρα είναι :

- ◆ η διάμετρος εμβόλου,
- ◆ η διαδρομή εμβόλου,
- ◆ το μήκος διωστήρα,
- ◆ ο γεωμετρικός βαθμός συμπίεσης,
- ◆ ο χρονισμός των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής κ.α.

Στα γεωμετρικά και κατασκευαστικά δεδομένα των περιφερειακών συστημάτων συγκαταλέγονται η γεωμετρία των βαλβίδων, των θυρίδων και των

οχετών, τα χαρακτηριστικά του εγχυτήρα (ο αριθμός και η διάμετρος των οπών, η πίεση ανοίγματος), κλπ.

4.4.1.2 Συνθήκες λειτουργίας αναφοράς

Η μεθοδολογία της διάγνωσης βασίζεται στην σύγκριση της τρέχουσας κατάστασης του κινητήρα με την κατάσταση αναφοράς, μέσω της σύγκρισης των σταθερών του μοντέλου προσομοίωσης που έχουν προσδιορισθεί. Ο υπολογισμός των σταθερών για την κατάσταση αναφοράς γίνεται με διαδικασία ίδια λογικής με αυτήν που περιγράφεται στην παράγραφο 4.4.3 χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις δοκιμές παραλαβής και συγκεκριμένα από όλα τα διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων (για διαφορετικά σημεία λειτουργίας του κινητήρα). Τα δεδομένα αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα με τις διαδικασίες του κατασκευαστή και είναι σχετικά ακριβή καθώς βασίζονται σε επίσημες μετρήσεις πιστοποίησης της απόδοσης του κινητήρα που διενεργούνται από τον κατασκευαστή παρουσία του πλοιοκτήτη.

Τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής δεν περιλαμβάνουν συνήθως διαγράμματα πίεσης αλλά μόνο τη μέγιστη πίεση συμπίεσης και καύσης. Η βαθμονόμηση χωρίς την χρήση ολόκληρου του δυναμοδεικτικού διαγράμματος πιέσεων (χρήση μόνο μέγιστης πίεση συμπίεσης και μέγιστης πίεση καύσης) είναι εφικτή διότι δεν υπάρχει ανάγκη εκτίμησης του ΑΝΣ (στο οποίο γίνεται χρήση όλου του μετρημένου διαγράμματος πίεσης καύσης) ενώ οι διαρροές αερίου από τους κυλίνδρους είναι σχετικά περιορισμένες.

Στο στιγμιότυπο της Εικόνας 4-1 φαίνονται τα αντίστοιχα δεδομένα μετά την καταχώρησή τους στο γραφικό περιβάλλον του διαγνωστικού λογισμικού.

ENGINE TEST DATA												
General Information												
Company:				Station:				Unit:			Shop Test	
General Operation Data												
Date	10-10-05			Speed (rpm)	142.9			Load (%)	75.0		Fuel (kg/h)	1918.0
Ind. Power (kW)	12072.0			Brake Power (kW)	11069.0			Amb. Temperature (C)	21.6		Amb. Pressure (mbar)	1020.0
Fuel Density (kg/m ³)	911.0			H. Value (kcal/kg)	10170.0							
Cylinder Data												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mean		
Max. Pressure (bar)	126.0	126.0	126.0	127.0	128.0	126.0	126.0	126.0	125.0	126.2		
Compr. Pressure (bar)	101.0	101.0	100.0	99.0	100.0	100.0	101.0	101.0	100.0	100.3		
Cyl. Temp. (C)	240.0	245.0	263.0	250.0	258.0	265.0	270.0	289.0	279.0	262.1		
Fuel Pump Index (-)	63.0	63.0	64.0	64.0	64.0	63.0	62.0	62.0	63.0	63.1		
VIT Index (-)	3.7	3.3	3.4	3.3	3.6	3.3	3.2	3.3	3.1	3.4		
Gas Exchange System												
Turbocharger Data					Air Cooler Data							
	1											
Speed (rpm)	8695.0					Air Temperature Before Cooler (C)	122.0					
Scav. Pressure-Gauge (bar)	1.91					Scavenging Air Temperature (C)	30.5					
Exh. Man. Pressure-Gauge (bar)	1.67					Water Temperature In (C)	21.0					
Exh. Back Pressure (mmW)	0.0					Water Temperature Out (C)	49.0					
Turbine Inlet Temp. (C)	302.0					Pressure Drop (mmW)	0.0					
Turbine Outlet Temp. (C)	187.0					Air Filter Pressure Drop (mmW)	0.0					

Εικόνα 4-1 Οθόνη με δεδομένα δοκιμών παραλαβής κινητήρα, για χρήση στον υπολογισμό των σταθερών στην κατάσταση αναφοράς.

Στην Εικόνα 4-2 φαίνεται απόσπασμα από τις εργοστασιακές δοκιμές του κινητήρα για το 75% του πλήρους φορτίου που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των σταθερών του μοντέλου για την κατάσταση αναφοράς.

DOOSAN				Engine type	9K60MC-S	Project	HIOS0001	Engine No.	ML-1737	Test Bed							
Layout Kw	14840	RPM	142.9	Client				PJT.									
Turbo-Maker	MHI	1	Cyl. constant (kW, bar)				0.7776	Brand & type									
Charg-Type	MET83SE	2	Water brake				FUCHINO CFR-26	Cylinder oil				SK SUPERMAR CYL70					
Nmax	11,000	RPM	3	Governor				Woodward EGB300P	Circulation oil				SK SUPERMAR AS				
Tmax	580	°C	4	TC specification				DS3F43DD 65L	Turbo oil				SK SUPERMAR AS				
Fuel oil viscosity	7.9 cSt at 40°C			Specific gravity				Atomizer specification				12-016251-1					
Oil brand	BUNKER-A			Heat value(kcal/kg)				10100	Emission(ppm)								
Density at 15°C	0.8828	Sulphur %	0.18				Water ppm	400	Nox	Sox	CO	HC	PM(mg/Nm ²)				
Date	2005.10.10			Meas. time				12:45									
Load %	Engine RPM	Weight on brake	Power Ton	Pi bar			Pmax. bar			Pcomp. bar			Fuel Pump index				
75(1)	142.9	105.3	11069	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Gov. index	Pmax control	Barometer mbar	IHP kW	12.19	12.22	12.05	126	126	126	101	101	100	63	63	64		
5.6	2.3	1020	12072	11.92	12.08	12.12	127	128	126	99	100	100	64	64	63		
Shop temp.	21.6	Eff.mech	91.7%	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9		
SFOC g/kW.h	Measured		173.09	12.15	11.94	11.97	126	126	125	101	101	101	62	62	63		
	Ref.Condition		172.43	10	11	12	10	11	12	10	11	12	10	11	12		
	Site Condition		181.32														
Humidity(%)	59.5	Average				12.07	Average			126.2	Average			100.4	Average		63.1
Pmax adjustment index	Exhaust gas						TC	Scavenge air									
	Temperature °C			Pressure				dP		Recei- ver	Temperature °C						
	Exhaust valve			Turbine		Receiver	TC out	RPM	mmWC	Filter	Cooler	bar	Inlet blower	Before cooler	After cooler		
	1	2	3	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
4.0	3.5	4.0	265	265	270	330	215		150	8501	31	135		24.0	133	43	
4	5	6	4	5	6	2	2	TC inlet	2	2	2	2		2	2	2	
3.8	4.0	3.5	260	270	280			bar					°C				
7	8	9	7	8	9	3	3	1.47	3	3	3	3		28	3	3	
3.6	3.5	3.5	285	275	285								Blower				
10	11	12	10	11	12	4	4		4	4	4	4	Outlet	4	4	4	
													1.67				
Average	3.71	Average			272.8	330.0	215.0		150	8501	31.0	135.0	Average	24.0	133.0	43.0	
MAN/ABB TC	Cooling Water						Lubrication Oil						Fuel				
P at spiral housing outer Diam. mmHg	dP inner & outer Diam. mmWC	Air cooler			Main engine			Pressure		Temperature °C					Oil Press.		
		2.0	kg/cm ²		3.7 kg/cm ²			kg/cm ²									
		Temperature °C			70			TC	System oil	Inlet engine	Outlet pistons			Turbocharger			
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Outlet cylinders	Outlet	2.25	39		Inlet	1	2	3	Inlet	Outlet	
											Act.L.O	47	47	47	blower	turb.	
		22.5	30.0	77	75	76		Cooling oil				47	47	47	1	1	
		2	2	2	4	5	6	2	2.02			4	5	6	2	2	
				77	77	76		Exh.V/V Act. oil				47	47	47			
		3	3	3	3	7	8	9	3				7	8	9	3	3
				76	77	76						45	47	47			
		4	4	4	4	10	11	12	4	Turbocharger	Thrust pad		10	11	12	4	4
									1.25								
Average	22.5	30.0	Average			76.3						Average	47.0			62.0	

Εικόνα 4-2 Απόσπασμα από την αναφορά των δοκιμών παραλαβής κινητήρα, όπου φαίνονται τα δεδομένα δοκιμής, στο 75% του πλήρους φορτίου. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των σταθερών για την κατάσταση αναφοράς.

4.4.2 Δεδομένα εισόδου για την διάγνωση

Για την πραγματοποίηση διάγνωσης έχει αναπτυχθεί νέα τεχνική στην οποία αρκεί μόνο η μέτρηση και χρήση του δυναμοδεικτικού διαγράμματος

πίεσης. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνικής ήταν αναγκαία για να αντιμετωπίσει περιπτώσεις όπου έλλειπαν πρόσθετα λειτουργικά δεδομένα όπως είναι η πίεση και θερμοκρασία σάρωσης ή αυτά δεν είχαν καταγραφεί με την απαιτούμενη ακρίβεια.

Η καταγραφή και χρήση της πίεσης και θερμοκρασίας του αέρα σάρωσης αυξάνει την ακρίβεια της μεθοδολογίας καθώς διευκολύνει τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών στην έναρξη της συμπίεσης. Η διαθεσιμότητα πρόσθετων μεγεθών που αναφέρονται στο σύστημα έγχυσης και στο σύστημα εναλλαγής αερίων καθιστά εφικτή τη διάγνωση της κατάστασης και αυτών των υποσυστημάτων.

Στην Εικόνα 4-3 και Εικόνα 4-4 φαίνονται οι οθόνες του διαγνωστικού λογισμικού για την καταχώρηση των δεδομένων εισόδου σε μορφή πίνακα και σχηματικά, αντίστοιχα.

The screenshot displays the 'ENGINE OPERATING DATA' software interface. It is divided into several sections for data entry and monitoring:

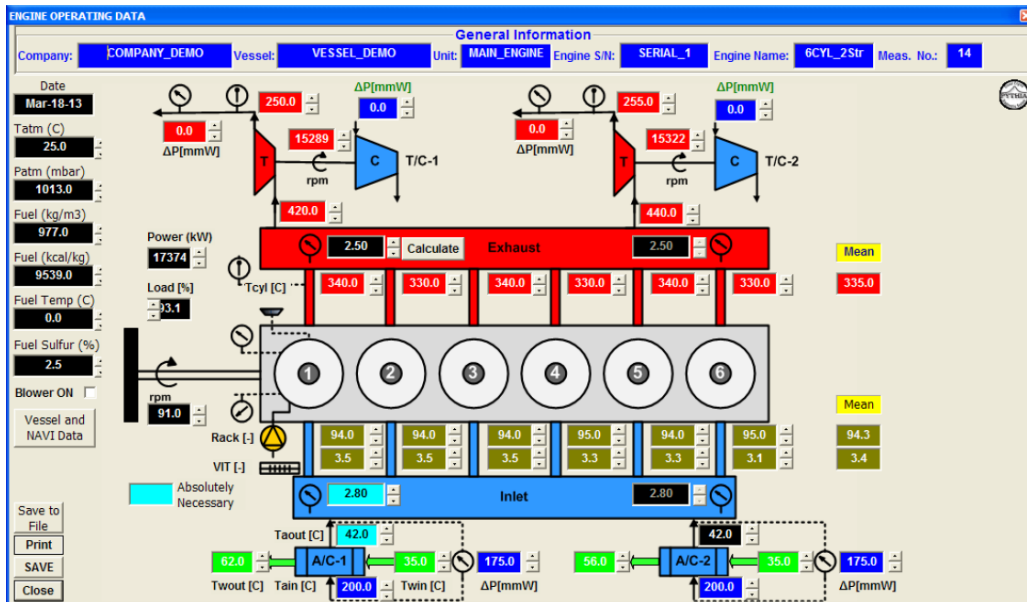
- General Information:** Includes fields for Company (COMPANY_DEMO), Vessel (VESSEL_DEMO), Unit (MAIN_ENGINE), Engine S/N (SERIAL_1), Engine Name (7CYL_2St), and Meas. No. (7).
- General Operation Data:** A grid of input fields for parameters such as Date (Jun-23-11), Speed (rpm: 84.2), E/R Temperature (C: 40.0), Log Speed (knots: 0.0), Brake Power (kW: 13800.0), Load (%: 0.0), E/R Pressure (mbar: 1013.0), Slip (Prop-Log/Log: 0.0), Fuel Density (kg/m3: 989.6), Fuel Temp. (C: 0.0), Loaded/Ballast (Ballast), Sea Current (Knots: 0.0), H. Value (kcal/kg: 9650.0), Fuel Sulfur (%: 0.0), Mean Draft (m: 0.0), and Sea Condition (Normal).
- Cylinder Data:** A table with 6 columns for cylinders and a 'Mean' column. Parameters include Cyl. Temp. (C), Fuel Pump Index (-), and VIT Index (-).
- Gas Exchange System:** Contains sub-sections for Turbocharger Data and Air Cooler Data. Turbocharger data includes Speed (rpm), Scav. Air Pressure-Gauge (bar), Exh. Man. Pressure-Gauge (bar), Exh. Back Pressure (mmW), Turbine Inlet Temp. (C), and Turbine Outlet Temp. (C). Air Cooler data includes Air Temperature Before Cooler (C), Scavenging Air Temperature (C), Water Temperature In (C), Water Temperature Out (C), Pressure Drop (mmW), and Air Filter Pressure Drop (mmW).
- Buttons and Notes:** Includes 'Calculate', 'SAVE', 'Close', 'Print', and 'Save to File' buttons. A note at the bottom states: 'If Exh. pressure is not measured enter Scav. Pressure and click "Calculate".' and 'N/A: Not Available (Not provided yet by user)'.

Εικόνα 4-3 Οθόνη συμπλήρωσης, προβολής ή διόρθωσης των περιφερειακών δεδομένων της μέτρησης.

Ανάλογα με την εφαρμογή τα κάτωθι μεγέθη καταγράφονται και εισάγονται σαν δεδομένα εισόδου:

- ◆ Πίεση και θερμοκρασία στο μηχανοστάσιο.
- ◆ Θερμογόνος δύναμη και πυκνότητα του καυσίμου.
- ◆ Θέση κανόνα του καυσίμου
- ◆ Θέση κανόνα μεταβλητού χρονισμού έγχυσης (VIT)
- ◆ Πίεση και θερμοκρασία του αέρα στον οχετό εισαγωγής του κινητήρα
- ◆ Θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο των κυλίνδρων
- ◆ Θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του καυσαερίου από το στρόβιλο
- ◆ Πίεση στον οχετό εξαγωγής

- ◆ Ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή
- ◆ Θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του αέρα από το συμπιεστή
- ◆ Θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του αέρα από το ψυγείο αέρα
- ◆ Θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού από το ψυγείο του αέρα.
- ◆ Πτώση πίεσης του αέρα στο ψυγείο αέρα
- ◆ Πίεση αντίθλιψης στον οχετό εξαγωγής
- ◆ Πτώση πίεσης στα φίλτρα του αέρα.



Εικόνα 4-4 Οθόνη με σχηματικό περιβάλλον συμπλήρωσης, προβολής ή διόρθωσης των περιφερειακών δεδομένων της μέτρησης

4.4.3 Μεθοδολογία Υπολογισμού των Σταθερών του Μοντέλου

4.4.3.1 Περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού των σταθερών

Η διαδικασία προσδιορισμού των σταθερών ολοκληρώνεται με την σύγκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα τρέχοντα πειραματικά δεδομένα που αφορούν σε βασικές λειτουργικές παραμέτρους του κινητήρα.

Αρχικά γίνεται η επεξεργασία της μετρημένης πίεσης που έχει την μορφή τάσης στην έξοδο του κυκλώματος διασύνδεσης του αισθητήρα. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, είναι μια σειρά ζευγών γωνίας στροφάλου – τιμή πίεσης. Αν δεν έχει γίνει χρήση αισθητήρα Άνω Νεκρού Σημείου, τότε γίνεται θερμοδυναμική εκτίμηση μέσω της σύγκρισης της μετρημένης καμπύλης συμπίεσης με την εκτιμώμενη (στο διαγνωστικό λογισμικό υπάρχει δυνατότητα χρήσης πρόσθετου αισθητηρίου ΑΝΣ) . Η αναγκαία μετατόπιση του μετρημένου δυναμοδεικτικού στον άξονα των «Χ» (δηλαδή γωνία στροφάλου) ώστε αυτό να συμπέσει με την προσομοιωμένη

καμπύλη συμπίεσης, θεωρείται μια επιπλέον σταθερά προς εκτίμηση, στην διαδικασία εκτίμησης των σταθερών του μοντέλου [4.24].

Η διαδικασία προσδιορισμού των σταθερών γίνεται τμηματικά ξεκινώντας από την φάση της συμπίεσης. Αρχικά καθορίζεται το σημείο έναυσης από το μετρημένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα. Έχοντας απομονώσει το τμήμα της συμπίεσης, καθορίζονται οι σχετιζόμενες σταθερές ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση της μετρημένης και της προσομοιωμένης συμπίεσης. Σε αυτές περιλαμβάνεται και η αναγκαία μετατόπιση του δυναμοδεικτικού για την εκτίμηση της θέσης του άνω νεκρού σημείου.

Στην συνέχεια γίνεται εκτίμηση της καθυστέρησης ανάφλεξης, μέσω της σταθεράς a_{del} . Στη συνέχεια εκτιμάται ο ρυθμός παροχής μάζας καυσίμου και οι σταθερές K_b , a_{mix} ώστε να υπάρξει σύγκλιση του ρυθμού αύξησης της πίεσης, της μέγιστης πίεσης καύσης και του ολικού ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

Όταν ολοκληρωθεί αυτό το στάδιο γίνεται προσομοίωση ολόκληρου του ανοικτού κύκλου για να εκτιμηθεί η σταθερά A_{eff} ώστε η εκτιμώμενη μέση πίεση του οχετού να ταυτίζεται με την μετρημένη.

Με την ολοκλήρωση και αυτού του σταδίου επαναλαμβάνεται η όλη διαδικασία με τις νέες αρχικές τιμές μέχρι την τελική σύγκλιση.

Τέλος εκτιμούνται οι σταθερές που περιγράφουν την λειτουργία του υπερπληρωτή και του ψυγείου αέρα.

4.4.3.2 Μέθοδος εκτίμησης των σταθερών του μοντέλου

Έστω ότι ο αριθμός των σταθερών που πρέπει να υπολογιστούν είναι “j”, και ο αριθμός των παραμέτρων λειτουργίας που είναι διαθέσιμες από μετρήσεις είναι “i”. Η μεθοδολογία βασίζεται στην εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού των τιμών των σταθερών (δηλ. $\beta_{1,2,...,j}$) για τις οποίες η συνάρτηση «απόκλισης», f_{err} , αποκτά ελάχιστη τιμή:

$$f_{err}(\beta_{1,2,...,j}) = \sum_i (Y_{exp,i} - Y_{cal,i})^2 \quad (4-28)$$

Όταν αυτό επιτευχθεί οι πειραματικές τιμές $Y_{exp,i}$ είναι κοντά στις υπολογισμένες από τον κώδικα τιμές $Y_{cal,i}$. Η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγώνου των διαφορών γίνεται με τον υπολογισμό των σταθερών $\beta_{1,2,...,j}$ από τον ακόλουθο αλγόριθμο:

$$\beta^{k+1} = \beta^k + Z^k X^{T(k)} (Y_{exp} - Y_{cal}^{(k)}) \quad \text{όπου} \quad (4-29)$$

$$Z^{-1(k)} \equiv X^{T(k)} W X^{(k)}$$

Όπου ο δείκτης k αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού. Ο πίνακας X είναι ο πίνακας ευαισθησίας που

συσχετίζει τις σταθερές με τις λειτουργικές παραμέτρους (μετρούμενα και υπολογισμένα μεγέθη) του κινητήρα και προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdot & X_{1j} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{i1} & \cdot & X_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{1,cal}}{\partial \beta_1} & \cdot & \frac{\partial X_{1,cal}}{\partial \beta_j} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial X_{i,cal}}{\partial \beta_1} & \cdot & \frac{\partial X_{i,cal}}{\partial \beta_j} \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

Ο πίνακας W είναι ένας πίνακας βαρύτητας, ορισμένος με τρόπο τέτοιο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η βαρύτητα της κάθε παραμέτρου περιλαμβάνοντας ή παραλείποντάς την από το τρέχον βήμα επεξεργασίας.

4.5 Κριτήριο βλάβης και αποτελέσματα διάγνωσης

Τα αποτελέσματα της διάγνωσης είναι πληροφορίες που σχετίζονται με τη λειτουργική συμπεριφορά του κινητήρα, τις ρυθμίσεις του και παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση των υποσυστημάτων του.

Η εκτίμηση των δεικτών που δίνουν πληροφορίες για την κατάσταση των συστημάτων του κινητήρα βασίζεται στη σύγκριση των τιμών τους που προκύπτουν στην παρούσα κατάσταση (β_j) και στην κατάσταση αναφοράς ($\beta_{ref,j}$). Η μεταβολή της τιμής μιας σταθεράς από την τιμή αναφοράς υποδηλώνει μεταβολή στο συγκεκριμένο μηχανισμό και άρα στο υποσύστημα με το οποίο αυτή σχετίζεται. Με το τρόπο αυτό η ανίχνευση μιας δυσλειτουργίας ή βλάβης βασίζεται στην ποσοστιαία μεταβολή της αντίστοιχης σταθεράς - δείκτη ως ακολούθως:

$$\left| \frac{\beta_j - \beta_{ref,j}}{\beta_{ref,j}} \right| 100\% > \text{Κατώφλι Ανίχνευσης Δυσλειτουργίας} \quad (4-31)$$

Το κατώφλι ανίχνευσης δυσλειτουργίας καθορίζεται ανάλογα με την εφαρμογή και ευρίσκεται συνήθως στο 3%. Το όριο αυτό τίθεται για να ληφθούν υπόψη πιθανά σφάλματα στην μέτρηση και την επεξεργασία.

Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων γίνεται με τις εξής μορφές:

- ◆ τιμές λειτουργικών μεγεθών,
- ◆ δείκτες κατάστασης υποσυστημάτων,
- ◆ διακύμανση λειτουργικών μεγεθών και δεικτών ανά κύλινδρο,
- ◆ αντιπαραβολή τιμών λειτουργικών μεγεθών με αντίστοιχες προσομοιωμένες για νέο κινητήρα,
- ◆ χρονική μεταβολή λειτουργικών μεγεθών και δεικτών κατάστασης υποσυστημάτων (τάσεις),

- ♦ προτεινόμενες ρυθμίσεις.

Στον Πίνακ. 4-2 γίνεται αναφορά στα πρωτογενή αποτελέσματα που προκύπτουν από την διαγνωστική τεχνική. Στην συνέχεια του κεφαλαίου δίνονται επεξηγήσεις όπου απαιτείται.

Πίνακ. 4-2 Αποτελέσματα διάγνωσης

Εκτιμήσεις Μεγεθών από το Δυναμοδεικτικό Διάγραμμα Πίεσης	
Πραγματική Ισχύς	kW
Μέση πραγματική πίεση (bmerp)	bar
Μέγιστη πίεση καύσης	bar
Μέγιστη πίεση συμπίεσης	bar
Λόγος πίεσης καύσης προς πίεση συμπίεσης	-
Γωνία ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής	deg
Εκτιμήσεις Μεγεθών από το Ρυθμό Εκλυσης Θερμότητας	
Παροχή καυσίμου ¹	kg/h
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (bsfc) ¹	g/kWh
Γωνία έναυσης	deg
Κατάσταση Υποσυστημάτων – Κύλινδρος , καύση	
Καθυστέρηση έναυσης	deg
Ποιότητα συμπίεσης	%
Κατάσταση Υποσυστημάτων – Σύστημα Έγχυσης Καυσίμου	
Χρονισμός έγχυσης	deg
Κατάσταση εγχυτήρα	%
Κατάσταση αντλίας καυσίμου ²	%
Κατάσταση συστήματος μεταβλητού χρονισμού (VIT) ³	
Κατάσταση Υποσυστημάτων – Σύστημα σάρωσης και απαγωγής καυσαερίων	
Κατάσταση (απόδοση) στροβίλου ⁴	%
Κατάσταση ακροφύσιου εισαγωγής στροβίλου ^{4,5}	%
Κατάσταση (απόδοση) συμπιεστή ⁶	%
Κατάσταση ψυγείου αέρα ⁷	%
Ρύπανση (πτώση πίεσης) ψυγείου αέρα ⁸	%
Ρύπανση (πτώση πίεσης) φίλτρου αέρα ⁸	%
Ρύπανση (πτώση πίεσης) οχετού απαγωγής καυσαερίων ⁹	%

¹ Η τιμή εξαρτάται από την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου

² Απαιτείται καταγραφή της θέσης του κανόνα καυσίμου κατά την μέτρηση

³ Απαιτείται καταγραφή της θέσης του κανόνα VIT κατά την μέτρηση

⁴ Απαιτείται καταγραφή θερμοκρασίας και πίεσης εισαγωγής-και εξαγωγής καυσαερίων στον στρόβιλο.

⁵ Τιμές μεγαλύτερες του 100% υποδηλώνουν ρύπανση ενώ τιμές μικρότερες του 100% υποδηλώνουν αύξηση της διατομής

⁶ Απαιτείται καταγραφή θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου στο συμπιεστή και πίεση σάρωσης

⁷ Απαιτείται καταγραφή θερμοκρασίας ρευμάτων εισόδου και εξόδου από το ψυγείο.

⁸ Απαιτείται καταγραφή πτώσης πίεσης στο ψυγείο

⁹ Απαιτείται καταγραφή της πίεσης αντίθλιψης

4.5.1 Εκτιμήσεις μεγεθών από το δυναμοδεικτικό διάγραμμα πίεσης

4.5.1.1 Ισχύς

Η αποδιδόμενη ισχύς ανά κύλινδρο εκτιμάται από το μετρούμενο διάγραμμα γωνίας στροφάλου – πίεσης θαλάμου καύσης, P-θ , αφού πρώτα μετατραπεί σε διάγραμμα όγκου – πίεση θαλάμου καύσης, P-V. Με ολοκλήρωση του διαγράμματος P – V προκύπτει το ενδεικνύμενο έργο ανά κύκλο λειτουργίας και ανά κύλινδρο. Από την ταχύτητα περιστροφής υπολογίζεται η χρονική διάρκεια ενός κύκλου και συνεπώς το έργο μετατρέπεται σε ενδεικνύμενη ισχύ.

Για τον υπολογισμό του πραγματικού έργου και ισχύος χρησιμοποιείται ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα, ο οποίος προκύπτει από τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής (από την ενδεικνύμενη και τη πραγματική ισχύ). Σημειώνεται ότι για να είναι εφικτή η ακριβής εκτίμηση της ισχύος είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης του άνω νεκρού σημείου. Οι μέθοδοι προσδιορισμού της θέσης του ΑΝΣ στο δυναμοδεικτικό διάγραμμα έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 3.2.

4.5.1.2 Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης

Η μέγιστη πίεση συμπίεσης είναι βασικό μέγεθος για τον προσδιορισμό της κατάστασης του κινητήρα. Συμβατικά η εκτίμηση της τιμής της γίνεται με την χρήση μηχανικού δυναμοδείκτη ή αισθητήρα πίεσης. Στην περίπτωση που η έναυση γίνεται μετά το άνω νεκρό σημείο, η εκτίμηση δεν παρουσιάζει κάποια δυσκολία πέρα από την ίδια την μέτρηση. Στην περίπτωση όμως που η έναυση γίνεται πριν το άνω νεκρό σημείο, για την εκτίμηση της μέγιστης πίεσης συμπίεσης απαιτείται η διακοπή έγχυσης καυσίμου και στη συνέχεια η μέτρηση της πίεσης του θαλάμου καύσης. Όμως η διακοπή της παραγωγής έργου από τον κύλινδρο μπορεί να μεταβάλλει την συνολική λειτουργία του κινητήρα (π.χ. στροφές συμπίεστη) με αποτέλεσμα η μέτρηση να μην είναι απόλυτα ορθή ενώ η ίδια η διακοπή της παροχής καυσίμου παρουσιάζει προφανώς τεχνικές δυσκολίες.

Η εκτίμηση της πραγματικής μέγιστης πίεσης συμπίεσης στη περίπτωση αυτή γίνεται από το διαγνωστικό λογισμικό μέσω της προσομοίωσης της καμπύλης συμπίεσης με την χρήση των σταθερών που υπολογίστηκαν. Συνεπώς δεν υπάρχει περιορισμός στην εφαρμογή αυτής της τεχνικής.

4.5.1.3 Γωνία ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής

Μετά το άνοιγμα των βαλβίδων εξαγωγής η πίεση εντός του θαλάμου καύσης φθίνει προς την τιμή της πίεσης στο οχετό εξαγωγής. Συνεπώς τη χρονική στιγμή αυτή παρατηρείται απόκλιση της μετρούμενης πίεσης σε σχέση

με αυτή που εκτιμάται από το λογισμικό θεωρώντας ότι η εκτόνωση συνεχίζεται κανονικά χωρίς να έχει ανοίξει ακόμη η βαλβίδα εξαγωγής. Το σημείο της απόκλισης διακρίνεται σαφώς.

4.5.2 Εκτιμήσεις μεγεθών βασιζόμενες στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι πολύ χρήσιμο δεδομένο για την λειτουργία του κινητήρα διότι περιγράφει το ρυθμό καύσης εντός του κυλίνδρου. Από το ρυθμό έκλυσης θερμότητας προσδιορίζονται διάφορες λειτουργικές παράμετροι του κινητήρα όπως:

- η γωνία έναυσης
- η διάρκεια της καύσης
- η κατανάλωση καυσίμου κλπ.

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας προσδιορίζεται από το μετρούμενο δυναμοδεικτικό διάγραμμα πίεσης και η διαδικασία υπολογισμού έχει ως ακολούθως:

Με βάση τον 1ο θερμοδυναμικό νόμο υπολογίζεται ο καθαρός ρυθμός έκλυσης θερμότητας, από την ακόλουθη έκφραση:

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (4-32)$$

Ο ρυθμός συναλλαγής θερμότητας με τα τοιχώματα του κυλίνδρου υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{dQ_{hl}}{d\theta} = h_c (T_g - T_w) A \frac{1}{6N} \quad (4-33)$$

Όπου h_c είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Θεωρείται ως μία από τις σταθερές του μοντέλου και υπολογίζεται στη διαδικασία προσδιορισμού των σταθερών.

T_g είναι η στιγμιαία μέση τιμή της θερμοκρασίας του αερίου εντός του κυλίνδρου που υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση τελείων αερίων, ως ακολούθως:

$$T_g = \frac{P_{exp} V}{mR} \quad (4-34)$$

Η τιμή της πίεσης P_{exp} προκύπτει από το μετρούμενο διάγραμμα πίεσης και η τιμή της μάζας (m) που παγιδεύεται εντός του κυλίνδρου προσδιορίζεται από το μοντέλο προσομοίωσης από τη προσομοίωση του ανοικτού κύκλου λειτουργίας. Με βάση τις σχέσεις (4-32) και (4-33) υπολογίζεται ο ολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας εντός του κυλίνδρου σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dQ_{gross}}{d\theta} = \frac{dQ_{net}}{d\theta} + \frac{dQ_{ht}}{d\theta} \quad (4-35)$$

4.5.2.1 Γωνία έναυσης

Η γωνία στροφάλου στην οποία ξεκινά η καύση εντός του κυλίνδρου, μπορεί να ανιχνευθεί από το σημείο που αλλάζει η κλίση της πίεσης του κυλίνδρου (μέγιστο 1^{ης} παραγώγου ή μηδενισμός 2^{ης} παραγώγου). Στην παρούσα διαγνωστική τεχνική η ανίχνευση της γωνίας έναυσης γίνεται από τον εκτιμώμενο ρυθμό έκλυσης θερμότητας και συγκεκριμένα από την γωνία στη οποία ξεκινάει η έκλυση θερμότητας. Η αρχική τιμή της γωνίας έναυσης ώστε να εκτιμηθεί το διάστημα της συμπίεσης γίνεται με βάση την παράγωγο της πίεσης καθώς δεν είναι ακόμη γνωστός ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας.

4.5.2.2 Κατανάλωση Καυσίμου

Η κατανάλωση καυσίμου για το σύνολο του κινητήρα αλλά και για τον κάθε κύλινδρο ξεχωριστά, είναι μια πολύ σημαντική πληροφορία που παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία στην μέτρηση. Σε πρακτικές εφαρμογές η εκτίμηση της τιμής για κάθε κύλινδρο είναι πρακτικά αδύνατη με τη χρήση συμβατικού εξοπλισμού.

Η μέτρηση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου του κινητήρα σε εγκαταστάσεις πραγματικής λειτουργίας με την χρήση εγκατεστημένων ροόμετρων δεν προσφέρεται για την εκτίμηση της στιγμιαίας κατανάλωσης. Με τα ροόμετρα, όταν αυτά υπάρχουν, είναι δυνατή μόνο η μέτρηση της μέσης κατανάλωσης σε διάρκεια τουλάχιστον μισής ώρας (για την επίτευξη ακρίβειας στην μέτρηση). Το ροόμετρο συνήθως είναι εγκατεστημένο αρκετά πριν την είσοδο του καυσίμου στον κινητήρα, καθώς παρεμβάλλονται διάφορα στάδια επεξεργασίας. Η «απόσταση» του ροόμετρου από την είσοδο του καυσίμου στο κινητήρα και οι μη μετρήσιμες επιστροφές αποτελούν τα κύρια σημεία ανασφάλειας της μέτρησης πέραν της ίδιας της ακρίβειας του οργάνου. Στην περίπτωση που υπάρχουν ενδιάμεσες δεξαμενές ανάμεσα στο ροόμετρο και τον κινητήρα ή στην περίπτωση που από το κεντρικό ροόμετρο τροφοδοτούνται και άλλες εγκαταστάσεις η μέτρηση της κατανάλωσης είναι ανέφικτη.

Μια μέθοδος εκτίμησης της ανά κύλινδρο στιγμιαίας κατανάλωσης καυσίμου που αναπτύχθηκε βασίζεται στην μέτρηση της πίεσης του σωλήνα κατάθλιψης της αντλίας καυσίμου (μέτρηση πίεσης έγχυσης). Στην συνέχεια, από τον ρυθμό έγχυσης μπορεί να υπολογιστεί η παροχή [4.24]. Όμως η εφαρμογή της τεχνικής αυτής στο πεδίο δοκιμών εμπεριέχει πολλές πρακτικές δυσκολίες με αποτέλεσμα να είναι πρακτικά ανεφάρμοστη.

Η προσέγγιση της διαγνωστικής μεθόδου βασίζεται στην εκτίμηση της κατανάλωσης με βάση τον υπολογισμένο ολικό ρυθμό έκλυσης θερμότητας, το ολοκλήρωμα του οποίου δίνει την ολική εκλυόμενη θερμότητα. Ο υπολογισμός αυτός προϋποθέτει τη γνώση της ολικά συναλλασσόμενης θερμότητας με τα τοιχώματα στην διάρκεια της έκλυσης θερμότητας.

Τελικά, η εκτίμηση της ποσότητας του καυσίμου που εγχέεται σε κάθε κύλινδρο ανά κύκλο, m_{finj} , προκύπτει από την ακολουθη σχέση:

$$m_{finj} = \frac{Q_{g,cum}}{H_{calor}} \quad (4-36)$$

όπου H_{calor} είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου που και $Q_{g,cum}$ είναι ο σωρευτικός ολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας που υπολογίζεται από την ανάλυση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και τις απώλειες θερμότητας που εκτιμώνται από τον συντελεστή συναλλαγής θερμότητας και τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων που έχουν εκτιμηθεί στο στάδιο της συμπίεσης. Η θερμοκρασία του αερίου προκύπτει από την εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης του τελείου αερίου χρησιμοποιώντας την μετρομημένη τιμή της πίεσης του κυλίνδρου.

4.5.3 Αξιολόγηση υποσυστημάτων – δείκτες κατάστασης

Με βάση το κριτήριο ανίχνευσης πιθανής βλάβης, σχέση (4-31), η αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης των υποσυστημάτων του κινητήρα γίνεται με την χρήση του δείκτη, η_j :

$$\eta_j = \frac{\beta_j}{\beta_{ref,j}} 100\%, \quad (4-37)$$

όπου η β_j αντιστοιχεί στην τρέχουσα τιμή της σταθεράς ή της παραμέτρου "j", και η $\beta_{ref,j}$ στην τιμή αναφοράς. Η σταθερά/παραμέτρος που χρησιμοποιείται στο δείκτη κατάστασης του κάθε υποσυστήματος δίνεται στον Πίνακ. 4-3.

Πίνακ. 4-3 Σταθερές ελέγχου των δεικτών κατάστασης.

Δείκτης	Σταθερά ελέγχου	
Κατάστασης συμπίεσης	P_{comp}	§4.5.1.2
Κατάστασης εγχυτήρα	a_{mix}	(4-10)
Κατάστασης αντλίας καυσίμου	c_p	(4-15)
Κατάστασης συμπιεστή	$\eta_{is,C}$	(4-20), ¹
Κατάστασης στροβίλου	$\eta_{is,T}$	(4-21), ¹
Κατάστασης ψυγείου αέρα	ε	(4-23)
Ρύπανσης οχετού απαγωγής καυσαερίων	$1/c_e$	§4.3.5
Ρύπανσης ψυγείου αέρα	$1/a_{ac}$	(4-26)
Ρύπανσης φίλτρου αέρα	$1/c_f$	§4.3.5

¹ Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στη παρούσα κατάσταση εκτιμάται χρησιμοποιώντας τις μετρομημένες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας στην είσοδο και στην έξοδο, συμπιεστή και στροβίλου.

4.6 Περιγραφή του διαγνωστικού λογισμικού

Στην συνέχεια γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις βασικές λειτουργίες του διαγνωστικού λογισμικού, που αποτελεί τη γραφική διεπαφή του διαγνωστικού κώδικα, του μετρητικού λογισμικού, του προσομοιωτή και του συστήματος διαχείρισης των μετρήσεων με τον χρήστη. Οι επιλογές του βασικού μενού αναφέρονται περιληπτικά στον Πίνακ. 4-4. Στην Εικόνα 4-5 φαίνεται η αρχική οθόνη του διαγνωστικού λογισμικού.

Πίνακ. 4-4α Βασικό μενού επιλογών του διαγνωστικού λογισμικού (συνεχίζεται)

Engines	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Επιλογή κινητήρα για λήψη μέτρησης ή προβολή και επεξεργασία αποθηκευμένης μέτρησης. ◆ Λειτουργίες διαχείρισης της βάσης δεδομένων (επαναφορά αρχείων κινητήρα ή δημιουργία αντίγραφου ασφαλείας)
Measurements	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Επιλογή μέτρησης από τη βάση δεδομένων για προβολή της μέτρησης και των αποτελεσμάτων της διάγνωσης η/και για εκ νέου επεξεργασία. ◆ Επιλογές διαχείρισης της βάσης δεδομένων (διαγραφή- εξαγωγή- εισαγωγή μέτρησης, έλεγχος και επιδιόρθωση βάσης δεδομένων).
Measurement-Data	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Απεικόνιση και επεξεργασία των τιμών παραμέτρων που αναφέρονται στο κινητήρα και στα περιφερειακά συστήματα του κινητήρα και έχουν ληφθεί με συμβατικά όργανα. ◆ Απεικόνιση πρωτογενούς μέτρησης πίεσης ◆ Επιλογή για εξομάλυνση (φιλτραρίσματος) μέτρησης (από ηλεκτρικό θόρυβο)
Take-Measurement	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Εκκίνηση διαδικασίας λήψης μέτρησης (εκκίνηση λογισμικού λήψης μετρήσεων)
Diagnosis_Execute	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Επεξεργασία πρωτογενούς μέτρησης ◆ Διενέργεια απλής ή εκτενούς διάγνωσης ◆ Αποκλεισμός κυλίνδρου από την διάγνωση ◆ Ενεργοποίηση της δυνατότητας εκτίμησης της πίεσης σάρωσης και αντιμετώπισης προβλημάτων από την διακύμανση του φορτίου.
Diagnosis_Results	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Προβολή αποτελεσμάτων διάγνωσης

Πίνακ. 4-3β Βασικό μενού επιλογών του διαγνωστικού λογισμικού (συνέχεια)

Diagnosis_Diagrams	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Προβολή γραφημάτων πίεσης κυλίνδρου, ρυθμού καύσης, πίεσης έγχυσης (αν είναι διαθέσιμη). ◆ Σύγκριση των διαγραμμάτων με διαθέσιμα διαγράμματα αναφοράς.
Engine_Trials	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Προβολή των δεδομένων των δοκιμών παραλαβής και των θαλάσσιων δοκιμών (για ναυτικούς κινητήρες) ◆ Εκτίμηση μεγεθών από τα δεδομένα των δοκιμών με χρήση παρεμβολής.
Simulator	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Προσομοίωση του κινητήρα με προκαθορισμένα δεδομένα εισόδου (ταχύτητα, ισχύ, προπορεία, κτλ). ◆ Δυνατότητα προσομοίωσης θεωρώντας δυσλειτουργία υποσυστήματος ή εξαρτήματος
Fuel	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καθορισμός των ιδιοτήτων του καυσίμου
Setup	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καθορισμός των παραμέτρων διάγνωσης ◆ Καθορισμός των ορίων για την αξιολόγηση των δεδομένων λειτουργίας του κινητήρα . ◆ Βασικές λειτουργίες διαχείρισης του λογισμικού (εγκατάσταση υποπρογραμμάτων, δημιουργία αντίγραφου ασφαλείας, καθορισμός αισθητήρων και αντίστοιχων σταθερών βαθμονόμησης, κτλ)
Print	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Εκτύπωση της τρέχουσας οθόνης σε αρχείο εικόνας
Help	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Παροχής βοήθειας για την λειτουργία του λογισμικού
Clear_Screen	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καθαρισμός Οθόνης
Abort	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Τερματισμός διαδικασίας διάγνωσης πριν την ολοκλήρωση
Exit	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Τερματισμός λειτουργίας λογισμικού.



Εικόνα 4-5 Αρχική οθόνη του διαγνωστικού λογισμικού

4.6.1 Διαδικασία Διάγνωσης

Για την πραγματοποίηση διάγνωσης προαπαιτείται η λήψη και επεξεργασία της μέτρησης και η συμπλήρωση των περιφερειακών δεδομένων είτε σε μορφή πίνακα (Εικόνα 4-3 – σελίδα 107) είτε σχηματικά (Εικόνα 4-4 – σελίδα 107). Ανάλογα την διαθεσιμότητα περιφερειακών δεδομένων δίνεται η δυνατότητα για απλή ή λεπτομερή διάγνωση. Στην απλή διάγνωση χρησιμοποιούνται το δυναμοδεικτικό διάγραμμα και η πίεση και θερμοκρασία σάρωσης, για τον υπολογισμό βασικής διαγνωστικής πληροφορίας. Στην λεπτομερή χρησιμοποιούνται όλα τα διαθέσιμα περιφερειακά δεδομένα και γίνεται διάγνωση που περιλαμβάνει την κατάσταση του συστήματος έγχυσης και υποσυστημάτων όπως το ψυγείο αέρα και ο υπερπληρωτή με την προϋπόθεση ότι έχουν καταγραφεί από τα εγκατεστημένα όργανα της μηχανής τα αντίστοιχα αναγκαία θερμοδυναμικά μεγέθη (δηλ. θερμοκρασίες και πιέσεις).

Επιπλέον επιλογές της διάγνωσης περιλαμβάνουν την ενεργοποίηση της δυνατότητας εκτίμησης της πίεσης σάρωσης για περιπτώσεις όπου αυτή:

- ◆ δεν είναι γνωστή,
- ◆ η παρεχόμενη τιμή της δεν είναι αξιόπιστη,
- ◆ υπάρχει υποψία διακύμανσης της ισχύος του κινητήρα στην διάρκεια της μέτρησης,

Ακόμα υπάρχει η επιλογή αποκλεισμού κυλίνδρου από την διάγνωση, στην περίπτωση που η μέτρηση του δυναμοδεικτικού δεν είναι αξιόπιστη, όπως για παράδειγμα όταν υπάρχει διαφυγή αερίου από τον κρουνό με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μικρότερη πίεση.

4.6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων διάγνωσης

Για επιλεγμένη μέτρηση για την οποία έχει πραγματοποιηθεί διάγνωση, από το μενού “Results” γίνεται η εμφάνιση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στον Πίνακ. 4-2(σελίδα 111) σε απόλυτες ή σχετικές τιμές, σε μορφή πινάκων ή γραφημάτων. Συγκεκριμένα έχουν αναπτυχθεί επιλογές απεικόνισης αποτελεσμάτων που περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους

4.6.2.1 Συνολική απεικόνιση αποτελεσμάτων

Πρόκειται για πίνακα, Εικόνα 4-6, στον οποίο εμφανίζεται η τιμή του κάθε αποτελέσματος για κάθε κύλινδρο ή υποσύστημα, καθώς και η μέση και η αθροιστική τιμή (π.χ. μέση και συνολική παροχή καυσίμου).

Η Εικόνα 4-6παρουσιάζει αποτελέσματα της «λεπτομερούς διάγνωσης». Στην περίπτωση «απλής διάγνωσης» δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με την κατάσταση των:

- ◆ συμπιεστή,
- ◆ αντλίας καυσίμου,
- ◆ ψυγείο αέρα,
- ◆ στροβίλου,
- ◆ εγχυτήρα,
- ◆ οχετός απαγωγής καυσαερίων

OVERALL RESULTS- DETAILED DIAGNOSIS									
CYLINDER PERFORMANCE									
Cylinder No.	I1	I2	I3	I4	I5	I6	lean	Total	Load ^d
Brake Power (kW)	2296	2093	2134	2229	2247	2057	2176	13059	70.0
bmpc (bar)	15.2	13.8	14.1	14.8	14.9	13.6	14.4		
Fuel Flow Rate (kg/h)	444	403	406	424	432	399	418	2512.0	
bsfc (g/kWh)	193.6	192.8	190.5	190.3	192.6	194.3	192.4		
Ignition Angle (deg)	3.1	3.4	2.9	3.2	3.0	3.3			
Ignition Delay (deg)	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6			
Firing Pressure (bar)	110.5	109.2	111.7	111.3	113.5	109.9	111.0		
Pfire/Pcomp (-)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2			
Compression (%)	96.6	96.2	96.2	96.4	96.6	98.2			
Comp. Pressure (bar)	92.9	92.4	92.2	92.1	92.3	94.1	92.7		
Exh. Valve Open(deg)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			
INJECTION SYSTEM PERFORMANCE									
Ini. Timing (deg-ATDC)	2.4	2.7	2.2	2.6	2.3	2.7			
Injector Condition (%)	90.1	100.0	95.1	100.0	94.1	100.0			
Pump Condition (%)	87.9	87.3	85.3	87.7	88.1	87.9			
EXHAUST AND INLET SYSTEM									
Turbine Condition (%)	I1: 90.7	I2: 90.7	A/C Condition-Eff. (%)		I1: 94.3	I2: 94.3			
Turbine Nozzle Area (%)	80.6	80.6	A/C Condition-DP. (%)		100.0	100.0			
Compressor Condition (%)	99.7	99.7	Exh. Pipe Condition (%)		100.0	100.0			
Air Flow Rate (kg/h)	0.00		Exhaust Flow Rate (kg/h)		0.00				
User:	COMPANY_DEMO			Meas.:	7				
Vessel:	VESSEL_DEMO			Unit:	MAIN_ENGINE				
Engine:	7CYL_2Str								
Engine S/N:	SERIAL_1								
Save to File									
Print									
Close									

Εικόνα 4-6 Απεικόνιση οθόνης συνοπτικών αποτελεσμάτων για λεπτομερή διάγνωση.

4.6.2.2 Προτεινόμενες Ρυθμίσεις

Πρόκειται για πίνακα που παρέχει πληροφορία για την λειτουργική κατάσταση του κινητήρα, σε ποιοτική μορφή άμεσα κατανοητή από τον χρήστη (πχ “OK”, “LOW”, “HIGH”). Στον πίνακα αυτόν προτείνονται και ρυθμίσεις (πχ ρύθμιση

1.4°C) ή άλλες πρόσθετες ενέργειες (πχ "CHECK") αν απαιτούνται. Η αντίστοιχη οθόνη για την περίπτωση της «λεπτομερούς» διάγνωσης φαίνεται στην Εικόνα 4-7.

QUALITATIVE RESULTS & PROPOSED ADJUSTMENTS- DETAILED DIAGNOSTICS						
CYLINDER PERFORMANCE DATA						
Cylinder No.	1	2	3	4	5	6
Power Output	HIGH	LOW	OK	OK	HIGH	LOW
Deviation (%)	5.5	-3.8	-1.9	2.4	3.3	-5.5
Fuelling Rate	HIGH	LOW	OK	OK	HIGH	LOW
Adjustment (%)	-5.2	4.0	2.0	-2.4	-3.2	5.8
Firing Pressure	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Deviation (%)	-0.5	-1.6	0.6	0.3	2.2	-1.0
Compression Pressure	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Reduction (%)	-3.4	-3.8	-3.8	-3.6	-3.4	-1.8
Exhaust Valve Opening	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Adjustment (deg)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
FUEL INJECTION SYSTEM						
Inj. Timing	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Adjustment (deg)	1.4	1.7	1.2	1.6	1.3	1.7
Injector	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Fuel Pump	CHECK	CHECK	CHECK	CHECK	CHECK	CHECK
EXHAUST - INLET SYSTEM						
	No:1	No:2		No:1	No:2	
Turbine Condition	OK	OK	Air Cooler Condition-Eff.	OK	OK	
Turbine Nozzle Condition	CHECK	CHECK	Air Cooler Condition-DP.	OK	OK	
Compressor Condition	OK	OK	Exhaust Pipe Condition	OK	OK	

User:	COMPANY_DEMO	Unit:	MAIN_ENGINE
Vessel:	VESSEL_DEMO	Meas.No:	7
Engine Name:	7CYL_2Str		
Engine S/N:	SERIAL_1		

Save to File
Print
Close

N/A: Not Available

Εικόνα 4-7 Απεικόνιση αποτελεσμάτων "ποιοτικά" και προτεινόμενες ρυθμίσεις

4.6.2.3 Ραβδογράμματα

Πρόκειται για ζεύγη ραβδογραμμάτων όπου απεικονίζεται η τιμή και η διακύμανση από τη μέση τιμή για κάθε ένα από τα ακόλουθα λειτουργικά μεγέθη του κινητήρα:

- ◆ Μέγιστη Πίεση Καύσης
- ◆ Μέγιστη Πίεση Συμπίεσης
- ◆ Ποιότητα Συμπίεσης
- ◆ Πραγματική Ισχύς
- ◆ Παροχή Κανσίμου
- ◆ Κατάσταση Εγχυτήρα
- ◆ Κατάσταση αντλίας κανσίμου

4.6.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων διάγνωσης με αντίστοιχα δεδομένα δοκιμών παραλαβής (Compare to Shop and Sea Trials)

Στην επιλογή αυτή απεικονίζεται σε μορφή διαγράμματος πίνακα η παρούσα κατάσταση του κινητήρα σε σχέση με τις δοκιμές παραλαβής.

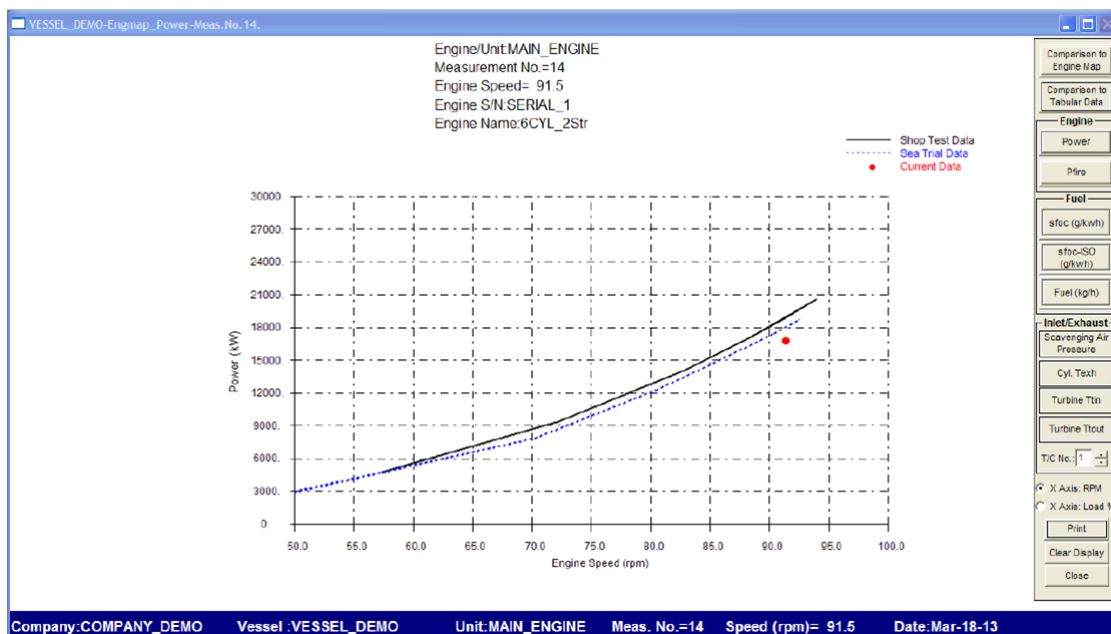
Στην περίπτωση του γραφήματος, Εικόνα 4-8, στον άξονα των τετμημένων μπορούμε να έχουμε :

- ◆ τη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, ή

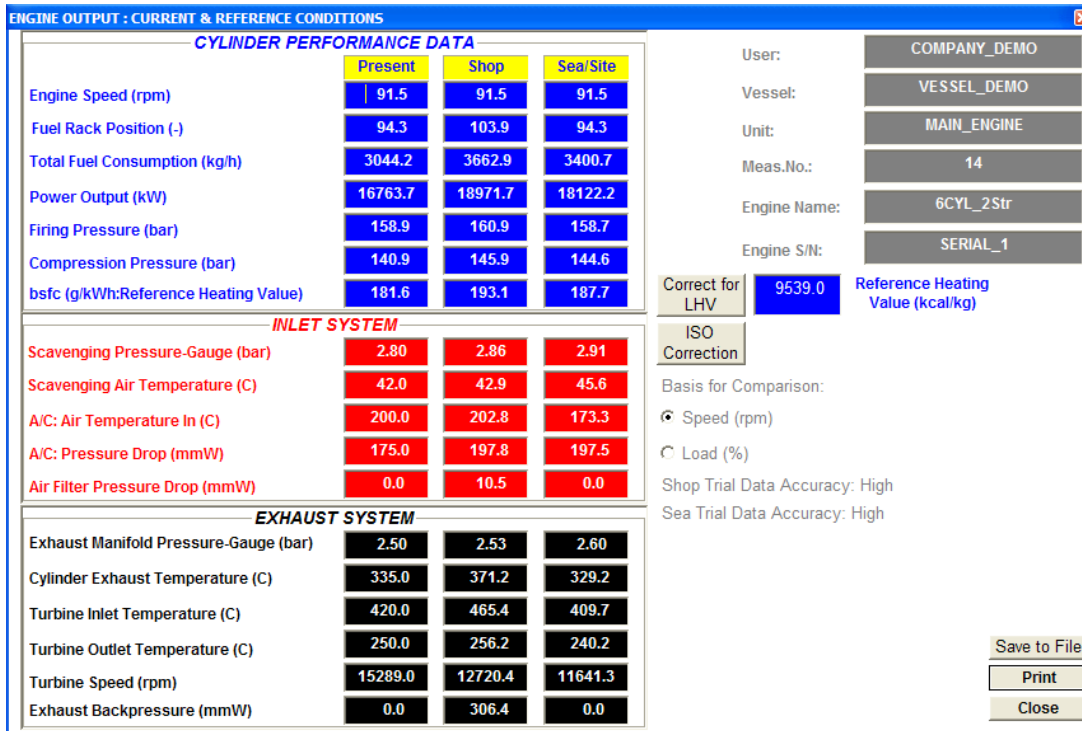
- ◆ το φορτίο.
Στον άξονα των τεταγμένων είναι διαθέσιμα τα ακόλουθα μεγέθη:
- ◆ ισχύς,
- ◆ πίεση καύσης,
- ◆ ειδική κατανάλωση καυσίμου,
- ◆ διορθωμένη κατά ISO ειδική κατανάλωση καυσίμου,
- ◆ ολική παροχή καυσίμου,
- ◆ πίεση σάρωσης,
- ◆ θερμοκρασία καυσαερίων κυλίνδρων,
- ◆ θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου καυσαερίων από τον στρόβιλο.

Στην περίπτωση απεικόνισης των δεδομένων σε μορφή πίνακα, Εικόνα 4-9, γίνεται σύγκριση της παρούσας κατάστασης για διάφορα μεγέθη με τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής και των θαλάσσιων δοκιμών χρησιμοποιώντας παρεμβολή με βάση σύγκρισης τη ταχύτητα περιστροφής ή το φορτίο.

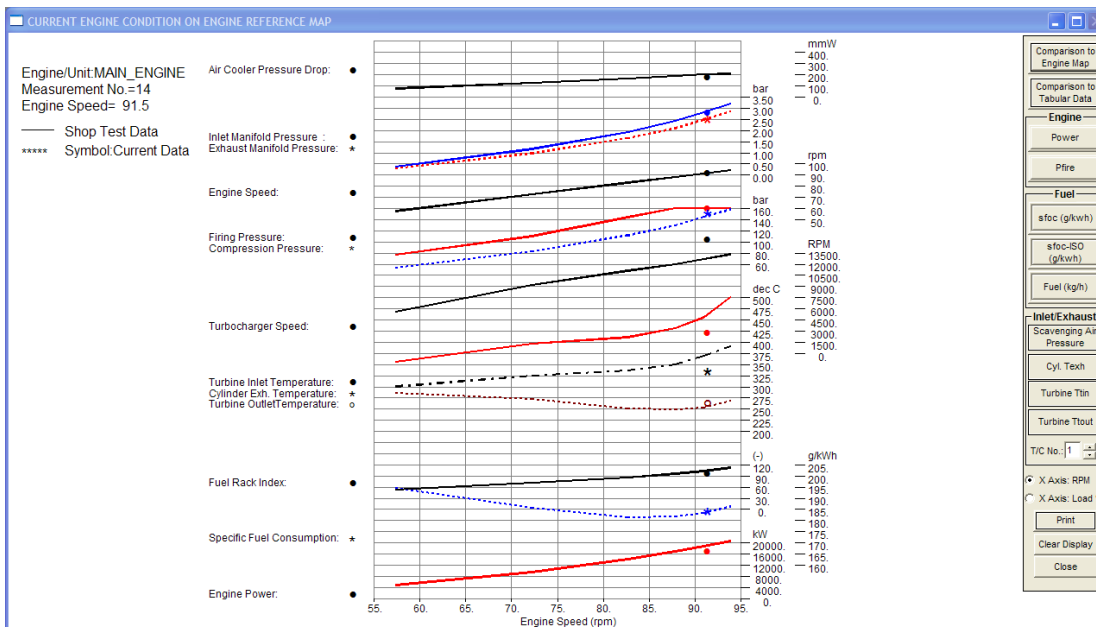
Επίσης δίνεται η δυνατότητα προβολής του πλήρους «χάρτη του κινητήρα» με το τρέχον σημείο για κάθε λειτουργική παράμετρο (Εικόνα 4-10).



Εικόνα 4-8 Η ισχύς του κινητήρα συναρτήσεται της ταχύτητας περιστροφής από τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής και το σημείο που αντιστοιχεί στην τρέχουσα μέτρηση.



Εικόνα 4-9 Σύγκριση αποτελεσμάτων διάγνωσης με τα αντίστοιχα των δοκιμών παραλαβής.



Εικόνα 4-10 Τρέχον σημείο πάνω στον πλήρη χάρτη του κινητήρα.

4.6.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων διάγνωσης με αποτελέσματα προσομοίωσης «νέου κινητήρα» στις ίδιες συνθήκες

Η επιλογή αυτή καθιστά εφικτή την απευθείας σύγκριση λειτουργικών μεγεθών με τα αντίστοιχα των δοκιμών παραλαβής. Αυτό γίνεται

χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή του λογισμικού μέσω του οποίου εκτιμάται η λειτουργία νέου κινητήρα στις τωρινές συνθήκες.

Στο λογισμικό προσομοίωσης παρέχονται τα ακόλουθα μεγέθη που μετρώνται ή προκύπτουν από τη διάγνωση:

- ◆ Ταχύτητα περιστροφής.
- ◆ Παροχή καυσίμου.
- ◆ Συνθήκες περιβάλλοντος.
- ◆ Θερμοκρασία εσόδου του νερού στο ψυγείο αέρα.

Εκτελείται στη συνέχεια προσομοίωση με τις σταθερές αναφοράς (για «νέο κινητήρα») και εν συνεχεία γίνεται σύγκριση της αναμενόμενης συμπεριφοράς «νέου κινητήρα» με την τρέχουσα όπως προκύπτει από τη διάγνωση.

4.6.2.6 Σχετικά αποτελέσματα

Με την ενεργοποίηση της επιλογής σχετικών αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα που έχουν περιγραφεί στις προηγούμενες παραγράφους εκφράζονται ποσοστιαία ως προς την μεγαλύτερη τιμή, δηλαδή συγκρινόμενα με την υψηλότερη τιμή κάθε μεγέθους το οποίο λαμβάνει την τιμή 100%. Αυτό επιτρέπει την σχετική αξιολόγηση σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα αναφοράς για βαθμονόμηση.

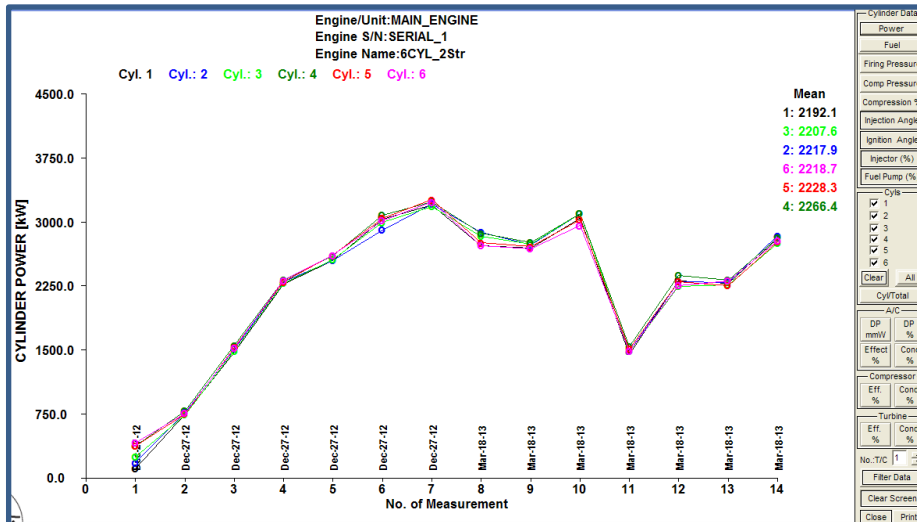
Για την γωνία έναυσης και την προπορεία οι σχετικές τιμές είναι εκφρασμένες ως απόκλιση σε μοίρες από αυτήν του κυλίνδρου που έχει την μεγαλύτερη προπορεία έγχυσης (πριν το ANΣ).

4.6.2.7 Ιστορικό αποτελεσμάτων

Η επιλογή χρησιμοποιείται για την απεικόνιση διαφόρων παραμέτρων του κινητήρα (όλων των διαθέσιμων) από διαδοχικές προηγούμενες μετρήσεις (δηλαδή συναρτήσει του χρόνου, όχι όμως γραμμικά). Παρέχει δηλαδή το ιστορικό λειτουργίας του κινητήρα και των υποσυστημάτων του.

Η απεικόνιση μπορεί να γίνει και σε σχετικές τιμές οπότε η μέγιστη τιμή του κατακόρυφου άξονα είναι το 100%. Επίσης δίνεται η δυνατότητα ορισμού φίλτρων για τις εμφανιζόμενες μετρήσεις με βάση το χρόνο λήψης της μέτρησης ή τις συνθήκες λειτουργίας (φορτίο, στροφές κλπ).

Με αυτήν την απεικόνιση γίνεται άμεσα αντιληπτή η διαφοροποίηση της κατάστασης κάποιου κυλίνδρου σε σχέση με τους υπόλοιπους. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 4-11 παρατηρείται ο κύλινδρος Νο. 5 παρουσιάζει πάντα την μεγαλύτερη μέγιστη πίεση καύσης.



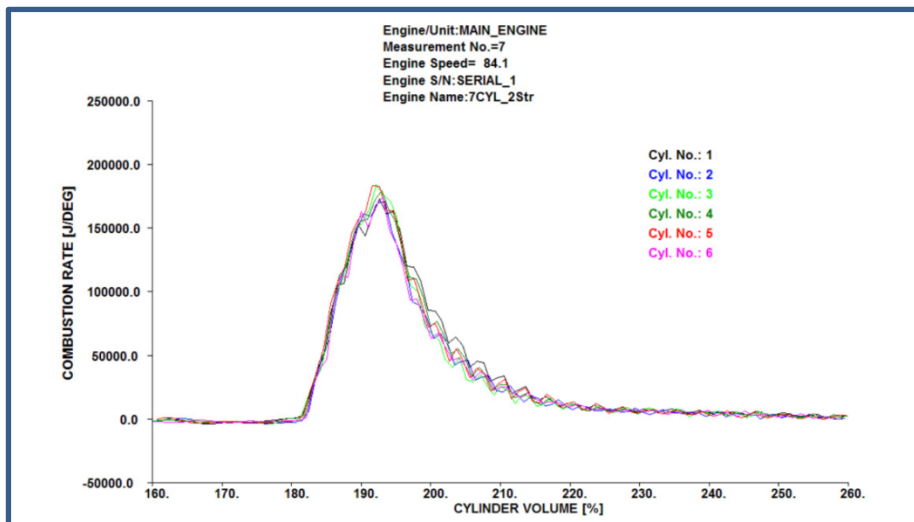
Εικόνα 4-11 Ιστορικό της πίεση καύσης των κυλίνδρων.

4.6.3 Διαγράμματα Κυλίνδρων (Diagnosis Diagrams)

Στην επιλογή “Diagrams” δίνεται η δυνατότητα προβολής των ακόλουθων διαγραμμάτων των κυλίνδρων:

- ◆ πίεσης – γωνίας στροφάλου,
- ◆ πίεσης- όγκου κυλίνδρου ,
- ◆ ρυθμού καύσης – γωνίας στροφάλου και
- ◆ σωρευτικού ρυθμού καύσης – γωνίας στροφάλου.

Δίνεται η δυνατότητα εμφάνισης και απόκρυψης κυλίνδρων και ορισμού διαγράμματος αναφοράς για σύγκριση. Στην Εικόνα 4-12 δίνεται η περίπτωση απεικόνισης των διαγραμμάτων του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.



Εικόνα 4-12 Διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας όλων των κυλίνδρων.

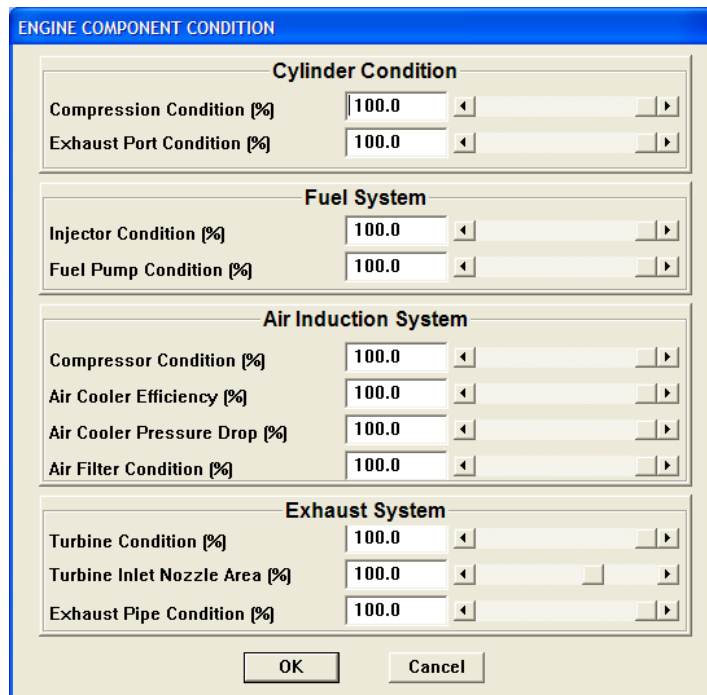
4.6.4 Προσομοιωτής

Στο μενού “Simulator” δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας του κινητήρα χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο λογισμικό μετά τη βαθμονόμησή του.

Παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης του κινητήρα μετά την επιλογή των συνθηκών λειτουργίας και των ρυθμίσεων (Εικόνα 4-13). Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα και της προσομοίωσης «βλαβών»(Εικόνα 4-14). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι μειώνεται σημαντικά ο απαιτούμενος χρόνος διερεύνησης στη περίπτωση υποψίας βλάβης ή στη περίπτωση που είναι επιθυμητή η εφαρμογή κάποιας ρύθμισης. Σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν πρακτικά αδύνατο να γίνει το ίδιο με τη διαδικασία δοκιμής-αξιολόγησης καθώς σε μεγάλου μεγέθους κινητήρες υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί κόστους και κυρίως χρόνου. Η προσομοίωση παρέχει τιμές για όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη σε μορφή πίνακα.

Στην επιλογή υπάρχει επίσης ένα απλοϊκό εργαλείο για τον υπολογισμό της ισχύος από την ταχύτητα περιστροφής (μέσω του νόμου της έλικας) και την κατανάλωση καυσίμου από την θέση του κανόνα καυσίμου, με προϋπάρχοντα δεδομένα ή μετά από νέα βαθμονόμηση.

Εικόνα 4-13 Εισαγωγή των συνθηκών λειτουργίας και των ρυθμίσεων του κινητήρα για την προσομοίωση.



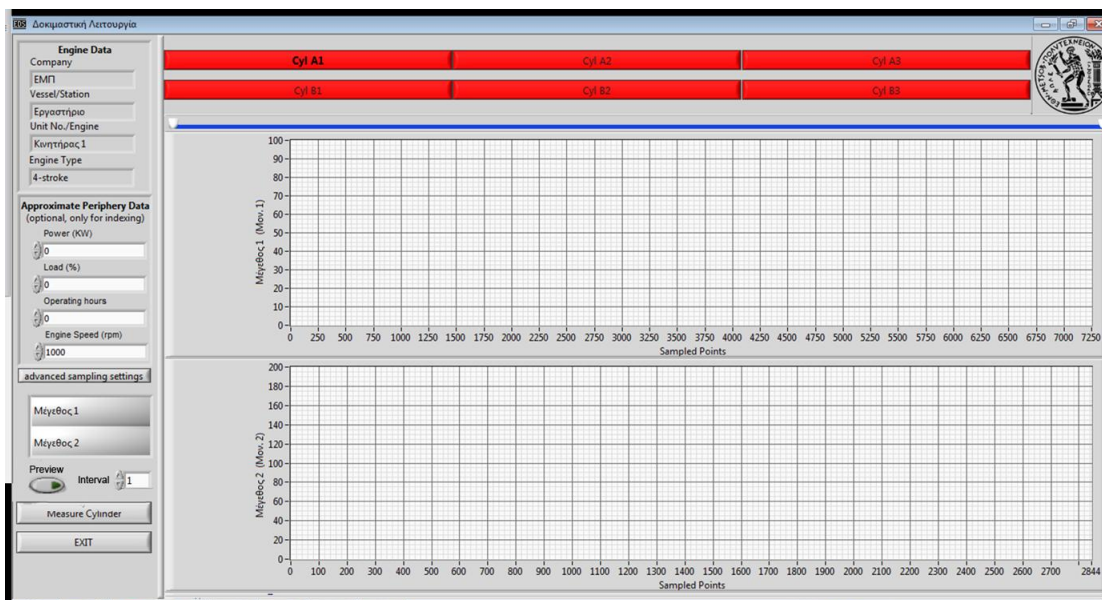
Εικόνα 4-14 Καθορισμός της κατάστασης των υποσυστημάτων για την προσομοίωση (προσομοίωση βλάβης)

4.7 Περιγραφή του μετρητικού λογισμικού

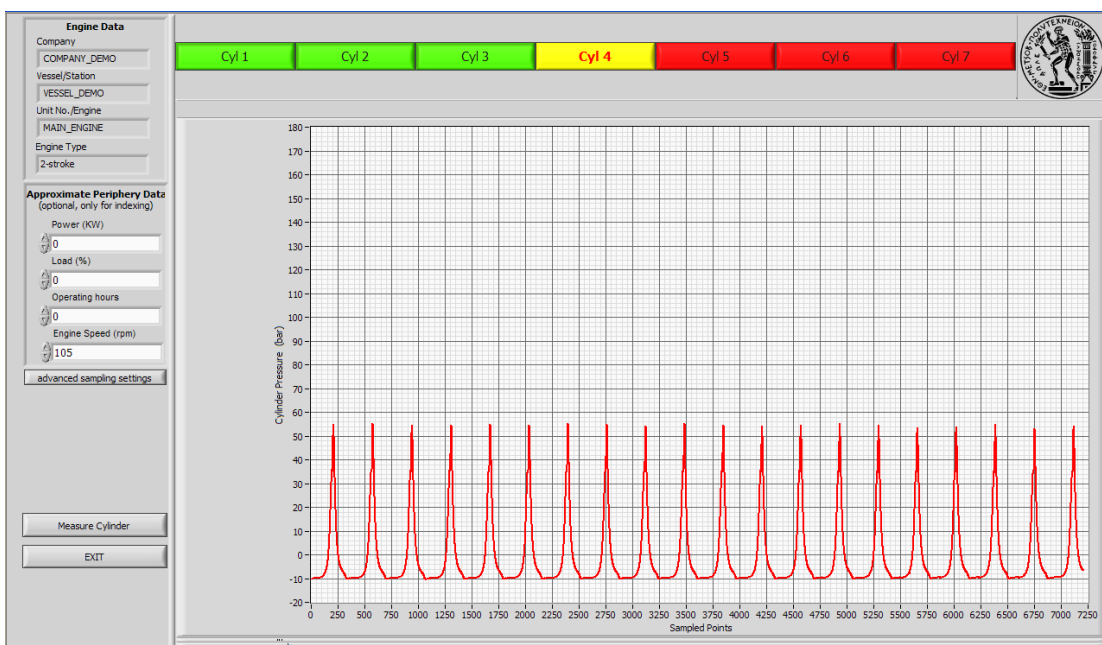
Στην Εικόνα 4-15 φαίνεται στιγμιότυπο οθόνης του λογισμικού λήψης και αποθήκευσης μετρήσεων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια την διατριβής, στο περιβάλλον LabView.

Το νέο λογισμικό που αναπτύχθηκε, αντικατέστησε παλαιότερη λύση προσθέτοντας επιπλέον χαρακτηριστικά όπως:

- ◆ Ευελιξία και παραμετροποίηση στα μετρούμενα κανάλια
- ◆ Δυνατότητα μέτρησης σε κάθε τύπο κινητήρα, δίχρονο ή τετράχρονο, οποιασδήποτε διάταξης και αριθμού κυλίνδρων με αυτόματη προσαρμογή της οθόνης και του πρωτόκολλου μέτρησης στο τύπο του κινητήρα και στην διάταξη- αριθμό των κυλίνδρων.
- ◆ Δυνατότητα οδήγησης μεγάλου εύρους αναλογοψηφιακών μετατροπέων και αυτόματη αναγνώριση του εκάστοτε αναλογοψηφιακού μετατροπέα.
- ◆ Διάγνωση βλαβών του συστήματος λήψης μετρήσεων.
- ◆ Προστασία από την μεταβολή των ρυθμίσεων δειγματοληψίας στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων των κυλίνδρων.
- ◆ Αυξημένες δυνατότητες διαχείρισης των μετρήσεων για εργαστηριακή χρήση.
- ◆ Δυνατότητα προεπισκόπησης της μέτρησης (χρήση ως παλμογράφος)
- ◆ Μηδενική ανάγκη ρύθμισης για εφαρμογές πεδίου



Εικόνα 4-15 Στιγμιότυπο οθόνης του λογισμικού λήψης μετρήσεων, με ενεργοποιημένο το σύνολο των δυνατοτήτων.



Εικόνα 4-16 Στιγμιότυπο οθόνης πριν την μέτρηση του τέταρτου κυλίνδρου από το λογισμικό λήψης μετρήσεων ρυθμισμένο στην «βασική λειτουργία»

Η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργεί είτε αυτόνομα είτε σε συνεργασία με το διαγνωστικό λογισμικό. Στην πρώτη περίπτωση παρουσιάζει πολλές δυνατότητες παραμετροποίησης της λειτουργίας του ενώ στην δεύτερη όλες οι παράμετροι ορίζονται από το διαγνωστικό λογισμικό μέσω αρχείων και παραμέτρων της γραμμής εντολής (command line parameters) ώστε το πρόγραμμα να παρέχει την «βασική

λειτουργία» (Εικόνα 4-16). Η «αυτόνομη» εκδοχή προορίζεται την εκτέλεση κάποιου ιδιαίτερου μετρητικού καθήκοντος, προσφέροντας υψηλή παραμετροποίηση. Από την άλλη, η λειτουργία σε συνεργασία με το διαγνωστικό λογισμικό διακρίνεται για την απλότητα και την ευκολία χρήσης.

Στις επόμενες υποπαραγράφους περιγράφονται οι ρυθμίσεις που δίνονται σαν είσοδοι του προγράμματος και οι αντίστοιχες βασικές λειτουργίες.

4.7.1 Ρυθμίσεις λογισμικού

Στην Εικόνα 4-17(α) φαίνονται οι ρυθμίσεις των καναλιών, οι οποίες είναι:

1. *Ενεργοποίηση καναλιού*
2. *Όνομα μετρούμενου μεγέθους,*
3. *Μονάδα μετρούμενου μεγέθους,*
4. *Όρια άξονα γραφήματος*
5. *Προεπιλογή μέτρησης του καναλιού,*
6. *Σταθερά βαθμονόμησης του αισθητήρα στην μορφή κλίσης και μετατόπισης.*

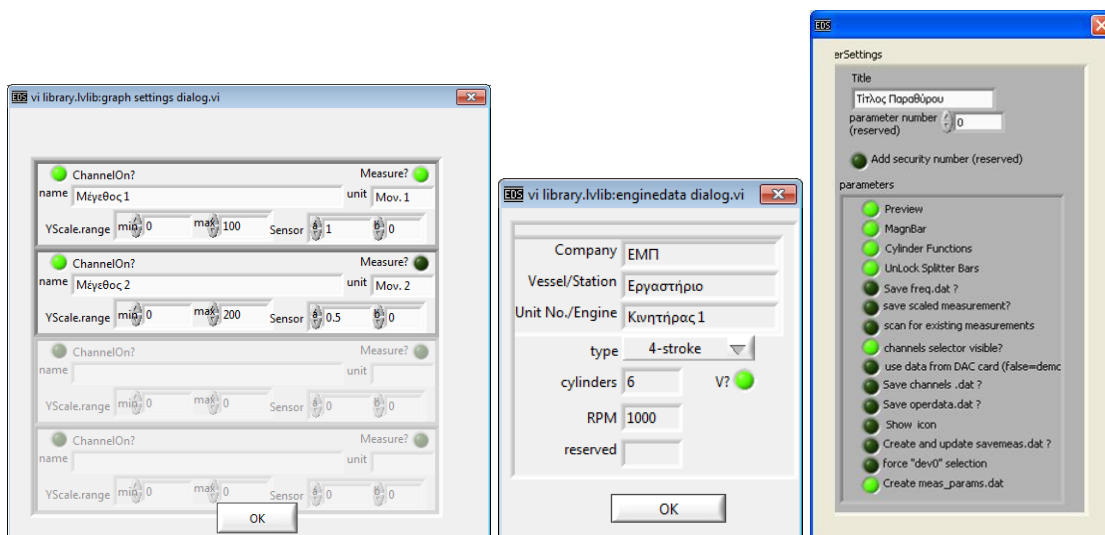
Από τον αριθμό των καναλιών που είναι ενεργοποιημένα, ορίζεται ο αριθμός των γραφημάτων που εμφανίζονται στην οθόνη. Από το όνομα και την αντίστοιχη μονάδα καθορίζεται ο τίτλος του κάθε γραφήματος. Η σταθερά βαθμονόμησης του αισθητήρα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πίεσης που παρουσιάζεται στο γράφημα και για την αποθήκευση της μέτρησης σε αρχείο (αν έχει οριστεί στις γενικές παραμέτρους προγράμματος).

Στην Εικόνα 4-17(β) φαίνονται οι ρυθμίσεις σχετικά με τον κινητήρα, οι οποίες είναι:

- ◆ *όνομα του κινητήρα,*
- ◆ *τύπος (τετράχρονος, δίχρονος),*
- ◆ *αριθμός κυλίνδρων ,*
- ◆ *διάταξη V ή σε σειρά,*
- ◆ *μέγιστος ταχύτητα περιστροφής.*

Ο αριθμός των κυλίνδρων και η διάταξη των κυλίνδρων (V ή σε σειρά) χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για την μορφοποίηση των πλήκτρων που αντιστοιχούν στους κυλίνδρους, στο άνω μέρος της οθόνης. Ο τύπος του κινητήρα και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της εκάστοτε συχνότητας δειγματοληψίας.

Στην Εικόνα 4-17(γ) απεικονίζονται οι ρυθμίσεις των γενικών παραμέτρων του λογισμικού. Αρχικά ορίζεται ο τίτλος της οθόνης και στη συνέχεια γίνεται η ενεργοποίηση των διαθέσιμων λειτουργιών:



(α) (β) (γ)
Εικόνα 4-17 (α) Οθόνη ορισμού παραμέτρων μετρούμενων μεγεθών, (β) οθόνη ορισμού παραμέτρων κινητήρα, (γ) Οθόνη ορισμού γενικών παραμέτρων λογισμικού

Πίνακας 4-1 (α) Οι γενικές ρυθμίσεις λογισμικού λήψης μετρήσεων (Εικόνα 4-17 (γ))- (Συνεχίζεται)

Προεπισκόπηση μέτρησης (Preview)	Δυνατότητα συνεχούς λήψης και προβολής μετρήσεων (όμοια με παλμογράφο). Με την ενεργοποίηση της δυνατότητας, εμφανίζεται στην οθόνη το κομβίον για έναρξη και τερματισμό καθώς και το επιθυμητό διάστημα ανάμεσα στις μετρήσεις.
Εστιασμένη προβολή (MagnBar)	Δυνατότητα για μεγέθυνση και σμίκρυνση στον άξονα των τετμημένων των γραφημάτων που προβάλλονται με την χρήση των δυο χειριστηρίων στον μπλε άξονα στο πάνω μέρος της οθόνης.
Λειτουργίες Μετρήσεων (Cylinder Function)	Δυνατότητα επιλογής ενεργειών από μενού (που εμφανίζεται με δεξί click) για τις μετρήσεις των κυλίνδρων και περιλαμβάνει την φόρτωση μέτρησης από αρχείο, αποθήκευση μέτρησης σε αρχείο, την διαγραφή μέτρησης, την φόρτωση της μέτρησης στην μνήμη για επικόλληση σε άλλη εφαρμογή όπως το excel, κα.
Διάταξη οθόνης (Unlock Splitter Bars)	Περιλαμβάνει τη δυνατότητα μεταβολής των διαστάσεων των επιμέρους τμημάτων της οθόνης.
Αποθήκευση ρυθμίσεων δειγματοληψίας (Save freq.dat)	Χρησιμοποιείται για να προσδιορισθεί αν θα αποθηκεύεται αρχείο με τις ρυθμίσεις ψηφιοποίησης.
Αποθήκευση πρωτογενών μετρήσεων (Save scaled measurement)	Αποθήκευσης της μέτρησης σε φυσικές μονάδες.

**Πίνακας 4-1 (β) Οι γενικές ρυθμίσεις λογισμικού λήψης μετρήσεων (Εικόνα 4 17 (γ))-
(Συνέχεια)**

Έλεγχος αρχείου μετρήσεων (Scan for existing Measurements)	Με την ενεργοποίηση, αναζητούνται μετρήσεις αποθηκευμένες στον προσωρινό φάκελο αποθήκευσης και εμφανίζονται σαν ληφθείσες.
Ενεργοποίηση ρυθμίσεων συνδεσμολογίας (Channel Selector Visible)	Με την ενεργοποίηση εμφανίζονται κουμπιά (στο αριστερό τμήμα της οθόνης πάνω από το κουμπί "Preview") από τα οποία είναι δυνατή η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ενός καναλιού.
Αποθήκευση ρυθμίσεων συνδεσμολογίας (Save Channels.Dat)	Ενεργοποιείται η αποθήκευση αρχείου με πληροφορίες για τα κανάλια που μετρήθηκαν
Αποθήκευση λειτουργικών παραμέτρων κινητήρα (Saveoperdat)	Ενεργοποιείται η αποθήκευση αρχείου με πληροφορίες σχετικά με παραμέτρους του κινητήρα στην διάρκεια της μέτρησης.
Create and update savemeas.dat	Ενεργοποιείται η αποθήκευση αρχείου με γενικές πληροφορίες για τη μέτρηση
Προεπιλογή αναλογοψηφιακού μετατροπέα (Force "dev0" selection)	Η ενεργοποίηση σημαίνει την από προεπιλογή αναζήτηση συγκεκριμένη συσκευής ψηφιοποίησης.
Αποθήκευση καθολικού αρχείου ρυθμίσεων (measparams.dat)	Ενεργοποιεί την αποθήκευση αρχείου με όλες τις πληροφορίες για την μέτρηση.

4.7.2 Βασικές λειτουργίες

4.7.2.1 Ανίχνευση συσκευών

Κατά την έναρξη του προγράμματος γίνεται ανίχνευση του υλικού που είναι συνδεδεμένο στον υπολογιστή με σκοπό να εντοπιστεί συμβατή συσκευή λήψης μετρήσεων (αναλογοψηφιακός μετατροπέας). Εάν δεν εντοπιστεί συσκευή, κατά την λειτουργία του προγράμματος δεν δίνεται η δυνατότητα λήψης μέτρησης. Αν εντοπιστεί συσκευή, τότε αυτή χρησιμοποιείται για την λήψη μετρήσεων. Αν εντοπιστούν περισσότερες από μια συσκευές, τότε δίνονται δυο δυνατότητες:

1. Επιλογή μιας συσκευής για την λήψη μετρήσεων.
2. Επιλογή δυο συσκευών για την λήψη μετρήσεων (Εικόνα 4-18). Σε αυτήν την επιλογή ακολουθείται ένας οδηγός για την ταυτοποίηση των μετρούμενων καναλιών.

Η δυνατότητα αυτή αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε μετρήσεις εν πλω για την ταυτόχρονη μέτρηση δυο κυλίνδρων με δυο διαφορετικά συστήματα. Στη συνέχεια υιοθετήθηκε διότι έτσι είναι δυνατή η μέτρηση περισσότερων καναλιών από τα τέσσερα που διαθέτουν οι αναλογοψηφιακοί μετατροπέες που συνήθως χρησιμοποιούνται (USB-9215).



Εικόνα 4-18 Δυο συστήματα λήψης μετρήσεων τα οποία είναι συνδεδεμένα στον ίδιο υπολογιστή, με σκοπό την ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων από τα δυο διαφορετικά συστήματα, ταυτόχρονα.

4.7.2.2 Μετρούμενα μεγέθη

Με το συγκεκριμένο λογισμικό δεν υπάρχει περιορισμός στο μετρούμενο μέγεθος λόγω της μεγάλης δυνατότητας παραμετροποίησης και της δυνατότητας να συνδέεται με διάφορους τύπους αναλογιοψηφιακών μετατροπέων, απ' όπου προκύπτει ο περιορισμός στην μέτρηση μεγεθών. Τα μεγέθη που μπορεί να μετρηθούν με την χρήση κατάλληλου αισθητήρα περιλαμβάνουν τη πίεση κυλίνδρου, τη πίεση και θερμοκρασία σάρωσης, τη πίεση έγχυσης, το σήμα θέσης ΑΝΣ, τη ροπή στρέψης, τη ταχύτητα περιστροφής, την θέση κανόνα καυσίμου, θερμοκρασίες με χρήση θερμοστοιχείων, κ.α.

4.7.2.3 Καθορισμός παραμέτρων ψηφιοποίησης

Η συχνότητα δειγματοληψίας f_{SR} (σε αριθμό δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο, Hz) και ο αριθμός των δειγμάτων, S , είναι οι βασικές παράμετροι ψηφιοποίησης. Για τον υπολογισμό τους, που περιγράφεται στην παράγραφο 3.1, χρησιμοποιούνται:

- ◆ η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα,
- ◆ ο τύπος του κινητήρα (δίχρονος/ τετράχρονος),
- ◆ το επιθυμητό βήμα δειγματοληψίας σε όρους γωνίας στροφάλου, και
- ◆ ο επιθυμητός αριθμός κύκλων καταγραφής.

Η καταχώρηση αυτών των μεγεθών γίνεται από πεδία που εμφανίζονται μετά το πάτημα του πλήκτρου “advanced samplings settings”.

Στην εκδοχή που το μετρητικό λογισμικό οδηγείται από το διαγνωστικό λογισμικό, δεν απαιτείται καμία ρύθμιση από τον χρήστη, εκτός από την

ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, για την οποία δίνεται από το διαγνωστικό λογισμικό η μέγιστη δυνατή τιμή. Αν ο χρήστης δεν καταχωρήσει την πραγματική, τότε προκύπτει μέτρηση με μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας (μικρότερο βήμα ψηφιοποίησης) αλλά μικρότερος αριθμός πραγματικών κύκλων. Γι αυτόν τον λόγο ορίζονται από προεπιλογή περισσότεροι κύκλοι από το αναγκαίο ώστε με τη χρήση της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής αυτοί να επαρκούν.

Κατά την διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων δεν δίνεται η δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων ψηφιοποίησης, διότι διαφορετικά θα προκύψουν αρχεία μετρήσεων με διαφορετικές ρυθμίσεις.

4.7.2.4 Εσωτερική διερεύνηση σφάλματος υλικού.

Με βάση την εμπειρία που προέκυψε κατά την εφαρμογή σε πλήθος περιπτώσεων ενσωματώθηκε στο λογισμικό διαδικασία εντοπισμού σφαλμάτων υλικού. Με το λογισμικό εξετάζεται και γίνεται ενημέρωση για την κατάσταση του αναλογοψηφιακού μετατροπέα. Τα συνηθέστερα σφάλματα που εντοπίζονται είναι η αποσύνδεση του βύσματος USB, η αποσυναρμολόγηση του αναλογοψηφιακού μετατροπέα στα δυο τμήματα από τα οποία συντίθεται (παράγραφος 2.3) και η ανάγκη για επαναφορά μέσω αποσύνδεσης\ επανασύνδεσης (hard reset).

4.7.2.5 Εμφάνιση δυο καναλιών στο ίδιο γράφημα.

Για τις περιπτώσεις που τα τέσσερα γραφήματα δεν αρκούν για την απεικόνιση των σημάτων ή όταν είναι θεμιτό να εμφανίζονται δυο σήματα στο ίδιο γράφημα (κατ' αντιπαράθεση) υπάρχει η δυνατότητα τέτοιας ρύθμισης. Αρχικά η δυνατότητα υλοποιήθηκε για τις μετρήσεις διακύμανσης φορτίου που περιγράφονται στο κεφάλαιο 7.

4.8 Ορολογία- Συμβολισμοί

Λατινικά Σύμβολα

A	Επιφάνεια (m ²)
a _{ac}	Σταθερά για την κατάσταση του ψυγείου αέρα (-)
c	Συντελεστής για τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (-)
b	Σταθερά για την απόδοση του ψυγείου αέρα (-)
c ₁	Σταθερά για το μήκος διάσπασης (-)
C _{1,scav}	Σταθερά του μοντέλου απόπλυσης (-)
C _{2,scav}	Σταθερά του μοντέλου απόπλυσης (-)

c_a	Σταθερά για τη διεύθυνση του αέρα στη δέσμη (-)
C_d	Συντελεστής εκροής (-)
c_e	Συντελεστής για την πτώση πίεσης στον οχετό εξαγωγής (-)
c_h	Σταθερά για τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή (-)
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεσης (J/kgK)
c_v	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο (J/kgK)
D	Διάμετρος αγωγού κατάθλιψης (m)
D	Διάμετρος εμβόλου (m)
$D_{af}, D_{a,int}$	Συντελεστής διάχυσης μεταξύ αέρα και καυσίμου (m ² /s)
d_{ho}, d_{inj}	Διάμετρος οπής ακροφυσίου εγχυτήρα (m)
D_{SM}	Μέση διάμετρος Σταγονιδίου (m)
h	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής (W/m ² K)
h	Ειδική ενθαλπία (J/kg)
h_m	Ειδική μοριακή ενθαλπία (J/kmol)
H	Ενθαλπία (J)
K_f	Συντελεστής συμπίεστικότητας του καυσίμου (N/m ²)
K_b	Σταθερά ταχύτητας καύσης (-)
L	Μήκος (m)
l	Μήκος (m)
m	Μάζα (kg)
P, p	Πίεση (N/m ²)
P	Βαθμός απόδοσης
Q	Θερμότητα (J)
r	Ακτινική απόσταση ή ακτίνα σταγόνας (m)
R	Ακτίνα (m)
S_{pr}	Ολοκλήρωμα για την καθυστέρηση ανάφλεξης (-)
t	Χρονική συντεταγμένη ή χρόνος (s)
T	Θερμοκρασία (K)
u	Ταχύτητα ζώνης ή ταχύτητα ροής υγρού καυσίμου (m/s)
U	Εσωτερική ενέργεια (J)
V	Όγκος (m ³)
x	Χωρική συντεταγμένη (m)

Ελληνικά Σύμβολα

α	Ταχύτητα ήχου (m/s)
α_{del}	Σταθερά για την καθυστέρηση ανάφλεξης (-)
γ	Λόγος της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση προς την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο (-)
δ	Πάχος δέσμης στα τοιχώματα (m)
δ	Δείκτης κατάστασης (%)

δr	Ισοδύναμο διάκενο μεταξύ ελατηρίων-χιτωνίου (m)
Δh_{is}	Ισενθαλπική πτώση (J/kg)
ΔP	Διαφορά πίεσης (Pa)
ε	Βαθμός εκμετάλλευσης ψυγείου αέρα (-)
η_{is}	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης (-)
η_z	Αριθμός οπών εγχυτήρα (-)
λ	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)
μ	Δυναμική συνεκτικότητα (kg/ms)
ρ	Πυκνότητα (kg/m ³)
σ	Σταθερά Stefan-Boltzmann (5.67x10 ⁻⁸) (Wm ⁻² K ⁻⁴)
ϕ	Γωνία στροφάλου
ϕ	Συντελεστής παροχής (-)
ϕ	Σύσταση του μίγματος (-)
Φ_{eq}	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (-)

Δείκτες

a, α	Αέρας
ac	Ψυγείο αέρα
b	Καμένη ποσότητα καυσίμου
bl	Διαρροές αερίου από τον κύλινδρο (blow-by)
break	Διάσπαση της δέσμης σε σταγονίδια
c	Ψυκτικό μέσο
C	Συμπιεστή
car	Χαρακτηριστικό μήκος ή χαρακτηριστική ταχύτητα
cor	Διόρθωση
cur	Τρέχουσας κατάστασης
cyl	Τοιχώματα του κυλίνδρου ή κύλινδρος
cz	Ζώνη μίγματος αέρα-καυσαερίου (μοντέλο απόπλυσης)
eff	Ενεργός
eq	Ισοδύναμο μέγεθος
ev	Ατμοποιημένο καύσιμο
evapor	Ατμοποίησης
exh	Εξαγωγή
f	Καύσιμο
hit	Πρόσκρουση
fz	Ζώνη του αέρα (μοντέλο απόπλυσης)
g	Αέρια φάση
j	Δείκτης ή συστατικό
in	Είσοδος
inj	Έγχυση

inl	Εισαγωγή
is	Ισεντροπικός
l,L	Υγρό
m	Μέση τιμή
out	Έξοδος
p	Διείσδυση καυσίμου
p	Αντλία καυσίμου
ref	Αναφοράς
s	Κορεσμός (ή επιφάνεια υγρής σταγόνας)
scav	Απόπλυση
sens	Αισθητή θερμότητα
T	Στρόβιλος
T,t	Τυρβώδης
t	Συνολικός
tot	Ολικός
v	Ατμώδης φάση
valv	Αντεπίστροφη βαλβίδα
w	Τοίχωμα
x,y	Συντεταγμένες

Αδιάστατοι Αριθμοί

Nu	Αριθμός Nusselt
Pr	Αριθμός Prandtl
Re	Αριθμός Reynolds
Sc	Αριθμός Schmidt
Sh	Αριθμός Sherwood
We	Αριθμός Weber

4.9 Βιβλιογραφία

- [4.1] Kouremenos D.A., Hountalas, D.T., "Diagnosis and Condition Monitoring of Medium Speed Marine Diesel Engines", *Tribotest Int. J.*, Vol.4 (1), pp.63-91, 1997
- [4.2] Kouremenos D.A., Hountalas D.T. and Kotsiopoulos P.N., "Development of a Thermodynamic Method for Diagnosis and Tuning of Diesel Engines and Its Application on Marine Engines.", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal for Power and Energy*, Vol.209, pp.125-139, 1995.
- [4.3] Kouremenos DA, Rakopoulos CD, Hountalas DT. Thermodynamic Analysis of Indirect Injection Diesel Engines by Two-Zone Modeling of Combustion. *Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1990; 112:138-149.

- [4.4] Assanis DN, Heywood JB. Development and Use of a Computer Simulation of the Turbocompounded Diesel System for Engine Performance and Component Heat Transfer Studies. SAE Paper No.860329; 1986.
- [4.5] Hountalas, D.T., The effect of operating parameters on the net and gross heat release rates of a direct injection diesel engine, Proc. 2nd Biennial ASME-ESDA Intern. Conf., Design of Energy Systems, London, July 3-7, Vol.64-3, pp.27-34., 1994
- [4.6] Annand W.J.D., "Heat Transfer in the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines", Proc. Instn Mech. Engrs, Vol.177, pp.973-990, 1963.
- [4.7] Kouremenos, D.A., Rakopoulos, C.D, Kotsos, K.G. and Houtalas, D.T., 1987, "Modeling the Blowby Rate in a Reciprocating Internal Combustion Engine", Proc. 16th IASTED IMS Int. Conf., Paris, pp. 465-468
- [4.8] Kouremenos, D.A., Hountalas, D.T. and Kotsiopoulos, P.N.. Computer simulation of turbocharged marine diesel engines and its application for engine and turbocharger diagnosis. 5th International Conference on Turbocharging and Turbochargers. Institution of Mechanical Engineers, Paper C484/008/94, pp.13-20, London, 1994
- [4.9] Jung D, Assanis DN. Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model for Cycle Simulation Studies of Engine Performance and Emissions. SAE Paper No. 2001-01-1246; 2001.
- [4.10] Ramos, J.I., 1989, Internal Combustion Engine Modeling, Hemishpere Publishing Corp.
- [4.11] Glauert, M.B., 1956, "The Wall Jet", J. Fluid. Mech, 1, pp.625-643
- [4.12] Sauter J. "Die Grössenbestimmung der in Gemischnebeln von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen" VDI-Forschungsheft Nr. 279 (1926) und Nr. 312 (1928)
- [4.13] Hiroyasu H., Yoshimatsu A., Arai M., "Mathematical Model for Predicting the Rate of Heat Release and Exhaust Emissions in IDI Diesel Engines", in Diesel engines for passenger cars and light duty vehicles, Instn. Mech. Engrs, Vol.paper C102/82, pp.207- 213, 1982
- [4.14] Kadota T., Hiroyasu, H., Oya, H., "Spontaneous Ignition Delay of A Fuel Droplet In High Pressure And High Temperature Gaseous Environments", Bulletin JSME, Vol.19, 1976
- [4.15] Heywood JB. Internal Combustion Engine Fundamentals, New York: McGraw-Hill Book Co; 1988.
- [4.16] Benson RS and Whitehouse ND. Internal Combustion Engines. Oxford: Pergamon Press; 1979.
- [4.17] Kouremenos, D.A., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T. and Kotsiopoulos, P.N., 1991, "A Simulation Technique for the Fuel Injection System of Diesel Engines", ASME-WA Meeting, Atlanta GA., Dec. 1-6, Proc. AES, 24, pp.91-102.
- [4.18] Hountalas, D.T. and Kouremenos, A.D., 1998, "Development of a Fast and Simple Simulation Model for the Fuel Injection System of Diesel Engines", Advances in Engng Software, Elsevier Science Ltd., 29, pp.13-28.
- [4.19] Hountalas D.T., Kouremenos, D.A., Sideris, M.,, "A Diagnostic Method for Heavy-Duty Diesel Engines Used in Stationary Applications", J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.126 (4), pp.886-899, 2004

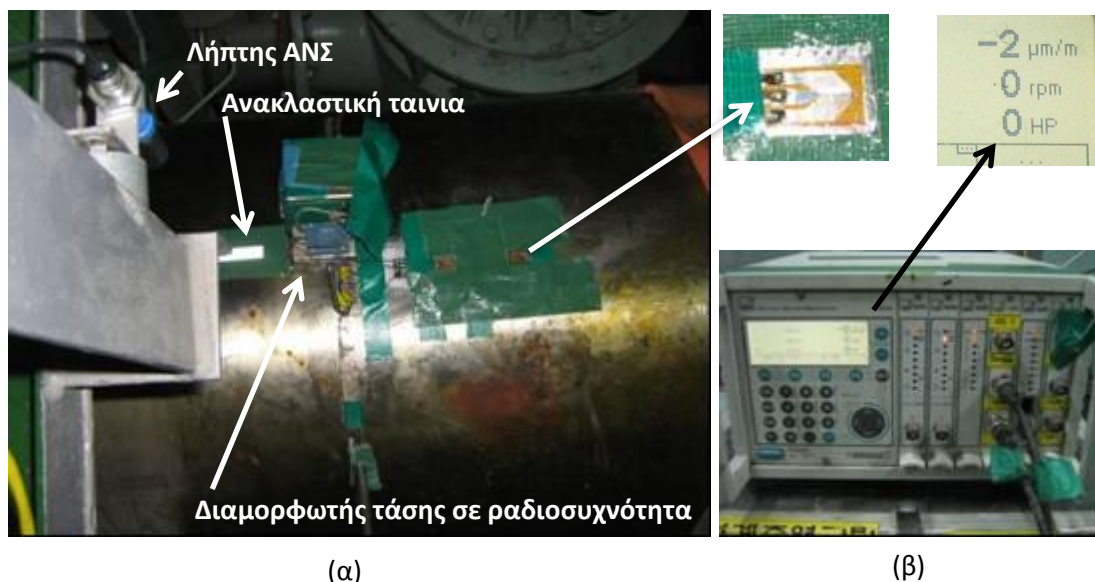
- [4.20] Watson, N. and Janota, M.S., 1982, Turbocharging the Internal Combustion Engine. MacMillan Press, London.
- [4.21] Zinner K., Supercharging of Internal Combustion Engines, Springer, Berlin, 1978.
- [4.22] Marzouk M., 1976, "Simulation of Turbocharged Diesel Engines Under Transient Conditions", Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.
- [4.23] Vavra, M.H., 1974, Aero-Thermodynamics and Flow in Turbomachines, Robert E. Krieger Publ. Co., New York.
- [4.24] Λάμαρης Β.Θ., Προσδιορισμός της Λειτουργικής Κατάστασης και των Εκπομπών Ρύπων Κινητήρων Ντίζελ με συνδυασμένη χρήση μοντέλου προσομοίωσης και μη-καταστροφικών μεθόδων μέτρησης, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- [4.25] D.T. Hountalas and A.K. Antonopoulos , Comparative Evaluation of available TDC estimation techniques, ECOS 2011

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΠΤΥΞΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΣΗΣ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Η παραγόμενη ισχύς ενός κινητήρα μπορεί να εκφραστεί σαν το γινόμενο της ροπής επί την ταχύτητα περιστροφής του. Συνεπώς η εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος γίνεται πρακτικά μέσω της μέτρησης της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής.

Η παραγόμενη από τον κινητήρα ισχύς είναι ένα παρα πολύ σημαντικό μέγεθος με αξία τόσο στην διαχείριση της λειτουργίας του κινητήρα όσο και στην διάγνωση. Η ισχύς του κινητήρα σε συνδιασμό με την κατανάλωση καυσίμου είναι το σημαντικότερο δεδομένο που περιγράφει την λειτουργία του. Γι αυτόν τον λόγο κατά τις δοκιμές παραλαβής ναυτικών κινητήρων και κινητήρων ηλεκτροπαραγωγής δίδεται ειδική μέριμνα στην καταγραφή της ισχύος του κινητήρα μέσω της εγκατάσταση ειδικής διάταξης (Εικόνα 5-1).



Εικόνα 5-1 Διάταξη μέτρησης της ροπής και ταχύτητας περιστροφής από τον άξονα σε δοκιμές παραλαβής πλοίου από το ναυπηγείο DSME στην Κορέα (α) διακρίνονται ο λήπτης ΑΝΣ που διεγείρεται από ανακλαστική ταινία, η διάταξη των μηχανομετρώων, η διάταξη που μετατρέπει τη μέση μετρούμενη ροπή σε ανάλογη ραδιοσυχνότητα, η μπαταρία. (β) Το τερματικό που είναι τοποθετημένο στην αίθουσα ελέγχου του κινητήρα και υπολογίζει από τα μετρούμενα σήματα παραμόρφωση άξονα, ταχύτητα περιστροφής και ισχύ στον άξονα.



Εικόνα 5-2 Μηκυσιόμετρο για τη μέτρηση της ροπής στη διάρκεια των δοκιμών θαλάσσης.

Όσον αφορά στη διαγνωστική τεχνική στην οποία αναφέρεται η παρούσα διατριβή, η γνώση της ισχύος θα απάλαιφε έναν βασικό άγνωστο και με αυτόν τον τρόπο θα ήταν δυνατή η διαφορετική επίλυση για τον υπολογισμό των σταθερών του μοντέλου, με όφελος στην ταχύτητα υπολογισμού ή/και στην ακρίβεια των υπολογιζόμενων μεγεθών.

Επιπλέον θα ήταν γνωστή η διακύμανση της ισχύος στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων των κυλίνδρων (θέμα που εξετάζεται στο Κεφάλαιο 7). Τέλος με την γνώση της ισχύος και ταχύτητας περιστροφής και των περιφερειακών μετρήσεων από τα αναλογικά όργανα του κινητήρα, με την βοήθεια μόνο του προσομοιωτή που θα έχει βαθμονομηθεί από τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής, θα ήταν σε σημαντικό βαθμό δυνατός ο έλεγχος και η διάγνωση συγκεκριμένων υποσυστήματα χωρίς την χρήση μετρήσεων πίεσης καύσης.

Επιπλέον, η στιγμιαία ροπή του κινητήρα, ως διανυσματικό μέγεθος, αποτελείται από συνιστώσες, μια εκ των οποίων σχετίζεται άμεσα με την πίεση των αερίων που ασκείται στο έμβολο. Η απομόνωση αυτής της συνιστώσας από την μετρημένη στιγμιαία ροπή μπορεί θεωρητικά να χρησιμοποιηθεί στην ανασύνθεση της πίεσης του θαλάμου καύσης, η οποία είναι η βασικότερη πηγή πληροφοριών στην διάγνωση καθώς περιγράφει τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στον θάλαμο καύσης και συνεπώς περιγράφει πλήρως την λειτουργία του κινητήρα. Λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες της μέτρησης της πίεσης θαλάμου καύσης σε μόνιμη βάση (που σχετίζονται κυρίως με την διάρκεια ζωής και το κόστος των αισθητήρων πίεσης), η μέτρηση της στιγμιαίας ροπής παρουσιάζει μια ιδιαίτερη δυναμική.

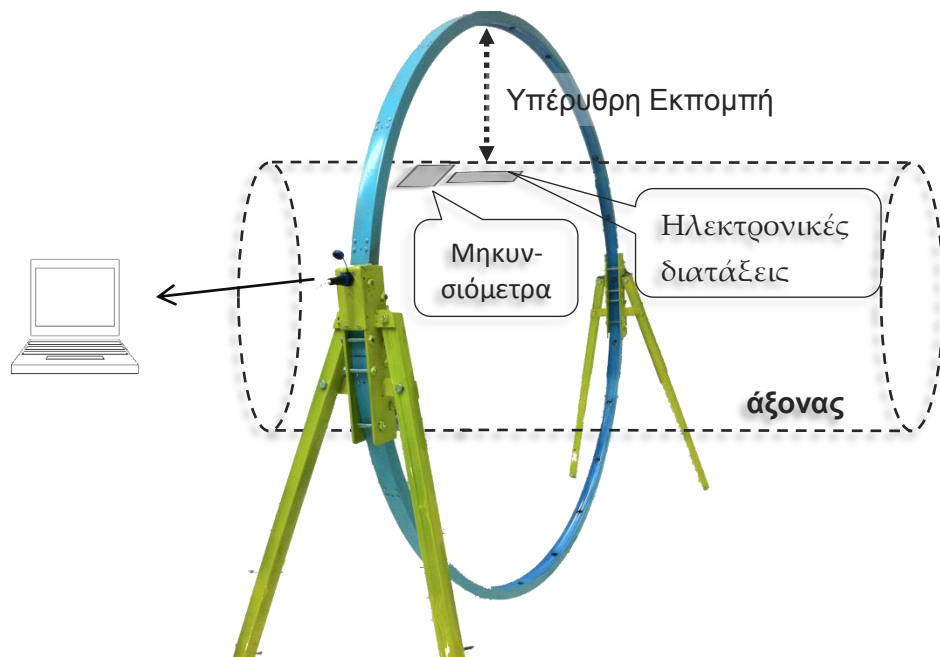
Από τα παραπάνω είναι φανερό η αξία μέτρησης της μέσης και στιγμιαίας ροπής για σκοπούς διάγνωσης και επιτήρησης σε εφαρμογές ναυτιλίας και ηλεκτροπαραγωγής.

Όμως τα διαθέσιμα εμπορικά συστήματα για την μέτρηση της ροπής απαιτούν σημαντικές μετατροπές στον κινητήρα που είναι δύσκολα ανεκτές για κινητήρες πραγματικής λειτουργίας (μετατροπή του άξονα, κλπ). Επιπλέον, τα

υπάρχοντα συστήματα που μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς την λύση της συνέχειας του άξονα, δεν παρέχουν την στιγμιαία τιμή της ροπής με την απαιτούμενη ανάλυση και ακρίβεια.

Γι αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκε, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε συσκευή εξειδικευμένη στην μέτρηση της ροπής του άξονα για εφαρμογή σε εμβολοφόρους κινητήρες.

Βασική διαφορά από υπάρχουσες συσκευές είναι ότι η ψηφιοποίηση της μέτρησης γίνεται στο σημείο της μέτρησης. Το σήμα που μεταφέρεται από τον περιστρεφόμενο άξονα στην στατική βάση είναι ήδη ψηφιακό. Μια άλλη πρωτοτυπία της συσκευής που αναπτύχθηκε είναι το γεγονός ότι η μεταφορά των δεδομένων από τον άξονα στην βάση γίνεται με οπτικό τρόπο. Έτσι δεν είναι δυνατή η ηλεκτρομαγνητική επιρροή από κοντινές πηγές (πχ γεννήτρια ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους).



Σχήμ. 5-1 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης μέτρησης της ροπής που αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε

Στο Σχήμ. 5-1 απεικονίζεται σχηματικά η διάταξη μέτρησης της ροπής. Πάνω στο άξονα εφαρμόζονται μηκυσιόμετρα, τα οποία διασυνδέονται μεταξύ τους σε γέφυρα Wheatstone και με την μονάδα μέτρησης και μετάδοσης (§5.3.1). Η εφαρμογή ροπής στον άξονα προκαλεί αντίστοιχη παραμόρφωση στον άξονα και τα μηκυσιόμετρα με αποτέλεσμα την μεταβολή της αντίστασης τους και κατά συνέπεια την εκτροπή της γέφυρας Wheatstone η οποία άλλως θα ήταν σε ισορροπία. Η εκτροπή δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού που τελικά είναι ανάλογη της ροπής. Η **μονάδα μέτρησης και μετάδοσης** είναι τοποθετημένη πάνω στο άξονα και πρόκειται για ένα τυπωμένο κύκλωμα με τα κατάλληλα

ηλεκτρονικά εξαρτήματα για την μέτρηση της εκτροπής της γέφυρας Wheatstone, τροφοδοτούμενο από μπαταρία. Το σήμα ψηφιοποιείται με ρυθμιζόμενη συχνότητα δειγματοληψίας και αποστέλλεται με υπέρυθρες ακτίνες κάθετα από την επιφάνεια του άξονα. Περιμετρικά από τον άξονα και σε απόσταση έως και 1 μέτρο, είναι τοποθετημένοι υπέρυθροι πομποδέκτες σε συστοιχία, οι οποίοι λαμβάνουν το υπέρυθρο σήμα. Η συστοιχία των πομποδεκτών μαζί με τια τμήματα διασύνδεσης και συγχρονισμού αποτελούν την **μονάδα λήψης μετρήσεων**. Το τμήμα διασύνδεσης ανασυνθέτει το υπέρυθρο σήμα σε ηλεκτρικό σειριακό σήμα και το προωθεί στον υπολογιστή για αποθήκευση και επεξεργασία. Το τμήμα συγχρονισμού παράγει ένα σήμα χρονικής αναφοράς για τον συγχρονισμό της συσκευής με άλλο σύστημα ψηφιοποίησης.

5.2 Μέτρηση της ροπής με την χρήση μηκυνσιομέτρων.

Με τον όρο ροπή χαρακτηρίζεται η τάση μιας δύναμης να περιστρέψει ένα αντικείμενο περί κάποιον άξονα περιστροφής [5.1]. Στρέψη είναι το αποτέλεσμα εφαρμογής ζεύγους ροπών σε άξονα. Η προκαλούμενη παραμόρφωση μπορεί να μετρηθεί με την χρήση μηκυνσιομέτρων στην επιφάνεια του άξονα. Στο Παράρτημα Α γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας συσχέτισμού της μετρήσιμης ορθής ανηγμένης παραμόρφωσης (τροπή) στην επιφάνεια του άξονα με την εφαρμοζόμενη ροπή που την προκαλεί.

5.2.1 Η μέτρηση της τροπής στην επιφάνεια του άξονα με χρήση μηκυνσιομέτρων

Τα μηκυνσιόμετρα (strain gauges ή stain gages), Εικόνα 5-3, είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ορθής ανηγμένης παραμόρφωσης (τροπή, strain) με σκοπό την εκτίμηση των τάσεων. Ο συνηθέστερος τύπος σήμερα, αποτελείται από έναν συνθετικό φορέα ο οποίος υποστηρίζει μια μεταλλική διάταξη. Τα μηκυνσιόμετρα προσκολλούνται πάνω σε επιφάνεια. Η παραμόρφωση της επιφάνειας συνεπάγεται ίδια παραμόρφωση του φορέα και της μεταλλικής διάταξης του μηκυνσιομέτρου. Η παραμόρφωση της μεταλλικής διάταξης έχει σαν αποτέλεσμα μεταβολή της αντίστασης, ανάλογη της παραμόρφωσης. Η μεταβολή της αντίστασης μετράται με χρήση γέφυρας Wheatstone, και συσχετίζεται με την τροπή με έναν συντελεστή αναλογίας, χαρακτηριστικό του μηκυνσιόμετρου.

Το 1678 παρουσιάστηκε η ανακάλυψη του φυσικού Robert Hooke για την αναλογική σχέση τάσης- παραμόρφωσης [5.2]. Η παραμόρφωση είναι μετρήσιμη στην επιφάνεια των υπό τάση αντικειμένων. Ο θεμέλιος λίθος στην λογική λειτουργίας των μηκυνσιομέτρων, είναι η ανακάλυψη του William Thomson [5.3],

ότι η αντίσταση ηλεκτρικών αγωγών αλλάζει υπό την επίδραση μηχανικής τάσης.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν μηκυνσιόμετρα για την μέτρηση της στιγμιαίας ροπής στρέψης άξονα.

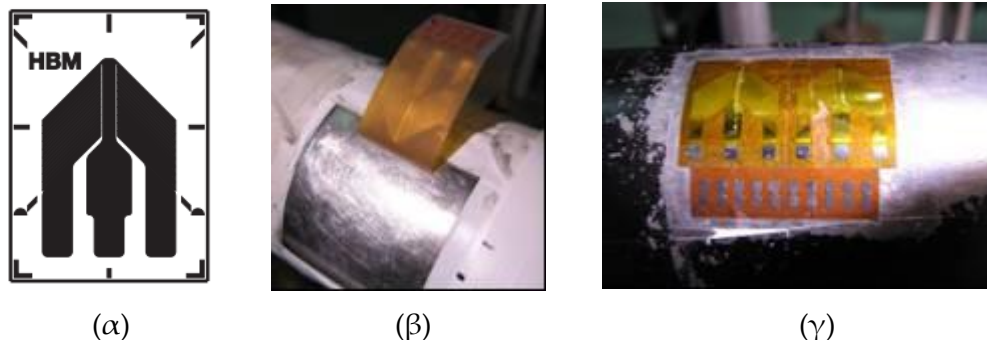
5.2.1.1 Κριτήρια επιλογής μηκυνσιόμετρων

Η επιλογή των μηκυνσιόμετρων είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία καθώς εμπλέκονται αρκετές παράμετροι, όπως [5.4]:

1. Η φύση της εφαρμογής (συμβιβασμός ακρίβειας- εύκολης χρήσης)
2. Μηχανικές συνθήκες στο σημείο της μέτρησης
 - a. Είδος φόρτισης (ομοαξονική, διαξονική, γνώση κύριας διεύθυνσης)
 - b. Ομογενής / ετερογενής φόρτιση
 - c. Στατική/ δυναμική φόρτιση
3. Περιβαλλοντικές συνθήκες
 - a. Προσδοκώμενη διάρκεια ζωής μηκυνσιόμετρου
 - b. Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, ρυθμός μεταβολών θερμοκρασίας
 - c. Παρουσία υγρασίας, νερού, ατμού, πάγου
 - d. Παρουσία ελαίων
 - e. Παρουσία χημικών
 - f. Πίεση
 - g. Ηλεκτρικά, μαγνητικά πεδία
 - h. Εξωτερικές δυνάμεις
4. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά
 - a. Τοπολογία μέτρησης
 - b. Τύπος τροφοδοσίας διέγερσης
 - c. Χαρακτηριστικά καλωδίων μεταφοράς διέγερσης και μέτρησης
5. Συνθήκες εφαρμογής
 - a. Υλικό εφαρμογής
 - b. Πρόσβαση στο σημείο εφαρμογής
 - c. Δρομολόγηση καλωδίων

Με βάση τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής μέτρησης στιγμιαίας ροπής από περιστρεφόμενο άξονα και λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους, έγινε διερεύνηση για την εξεύρεση του κατάλληλου υλικού. Επιλέχθηκε το μηκυνσιόμετρο από ενισχυμένο συνθετικό πολυμερές (glass fiber reinforced phenolic resin) με κωδικό 1-XG21-6/350 [5.5] της εταιρείας HBM, το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 5-3. Το κόστος ανά τεμάχιο μηκυνσιόμετρου ανήλθε περίπου στα 35 ευρώ. Ο Πίνακ. 5-1 συνοψίζει τα βασικά του

χαρακτηριστικά. Σαν υλικό συγκόλλησης επιλέχθηκε το Z70 της ίδιας εταιρείας [5.6].



Εικόνα 5-3. Το μηκυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της στιγμιαίας ροπής στρέψης: (α) Σχηματική απεικόνιση [5.5]. (β) Στιγμιότυπο πριν την τοποθέτηση στον άξονα του κινητήρα Ricardo Hydra και (γ) μετά την τοποθέτηση των δύο μηκυνσιομέτρων που σχηματίζουν του τέσσερις κλάδους της γέφυρας.

Πίνακ. 5-1. Χαρακτηριστικά επιλεχθέντος μηκυνσιόμετρου, HBM 1-XG21-6/350

Χαρακτηριστικό	Μονάδα	Τιμή
Υλικό μετρητικού πλέγματος		Χρόμα Χαλκού Νικελίου
Πάχος μετρητικού πλέγματος	μm	5
Υλικό φορέα και επικάλυψης		Ενισχυμένο Συνθετικό Πολυμερές
Πάχος φορέα	μm	35±10
Πάχος επικάλυψης	μm	25±8
Ακροδέκτες σύνδεσης		Επινικελωμένες επαφές χαλκού
Ονομαστική αντίσταση	Ω	350
Ανοχή αντίστασης	%	±35
Συντελεστής k	-	2
Θερμοκρ. εξάρτηση συντελεστή k		1/K
Θερμοκρ. εύρος λειτουργίας	°C	-70 ... +200
Συντελεστής θερμικής διαστολής	1/K	16·10 ⁻⁶ (ωστενιτικού χάλυβα)
Μέγιστη επιτρεπτή επιμήκυνση	μm/m	20000
Ελάχιστη ακτίνα στροφής	mm	3

Πρόκειται για μηκυνσιόμετρο με δύο μετρητικά πλέγματα, τοποθετημένα σε μεταξύ τους γωνία 45 μοιρών, εξασφαλίζοντας σωστή τοποθέτηση, καθώς μια απόκλιση στην μεταξύ τους γωνία θα προκαλούσε σφάλμα στην εκτίμηση της στρεπτικής ροπής.

Επιπλέον επιλέχτηκε μεγάλη τιμή αντίστασης, 350 Ω, αντί για την συνηθισμένη των 120 Ω, για την μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης, καθώς η μετρητική διάταξη τροφοδοτείται από μπαταρία. Το μειονέκτημα της μεγάλης τιμή αντίστασης, που είναι η ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, επιλέχτηκε να αντιμετωπιστεί με τον χωρικό περιορισμό της αναλογικής

μονάδας της μετρητικής διάταξης, μέτρο που εκ του αποτελέσματος κρίνεται ως ικανοποιητικό.

Όσον αφορά στο μέγεθος του μηκυνσιόμετρου, επιλέχτηκε ένα σχετικά μεγάλο για να μειωθεί η πιθανότητα εσφαλμένης μέτρησης λόγω κάποιας ανομοιογένειας στην επιφάνεια του άξονα.

5.2.1.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας του μηκυνσιόμετρου μετάλλου, βασίζεται στην σχέση τροπής – αντίστασης των ηλεκτρικών αγωγών που ανακαλύφθηκε από τον Wheatstone το 1843 και τεκμηριώθηκε το 1856 από τον Thompson.

Οι ηλεκτρικοί αγωγοί αλλάζουν αντίσταση υπό την επιβολή μηχανικής τάσης. Αυτό οφείλεται (α) στην παραμόρφωση του αγωγού και (β) στην αλλαγή της ειδικής αντίστασης, ρ , του υλικού σαν αποτέλεσμα μικροδομικών αλλαγών. Η διεργασία περιγράφεται από την σχέση:

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon \cdot (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5-1)$$

Όπου:

- R: Ηλεκτρική αντίσταση
- ε : Τροπή
- ν : Αναλογία Poisson
- ρ : Ειδική αντίσταση

Η παράσταση στο δεξιό μέλος της σχέσης (5-1) αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά στην αλλαγή της γεωμετρίας και το δεύτερο στην αλλαγή της μικροδομής.

Η πρόοδος της τεχνολογίας, έχει οδηγήσει στην χρήση υλικών για τα οποία η επίδραση του μέλους της μικροδομής (Εξ.(5-1)) είναι αμελητέα. Έτσι η σχέση μεταβολής αντίστασης- τροπής γίνεται γραμμική. Στα χαρακτηριστικά των μηκυνσιομέτρων του εμπορίου, δίνεται ο συντελεστής για τον υπολογισμό της τροπής από την μεταβολή της αντίστασης, ο οποίο συνήθως αποκαλείται συντελεστής k και ορίζεται ως ακολούθως:

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \quad (5-2)$$

Όπου:

- ΔR : Μεταβολή αντίστασης
- R_0 : Αρχική αντίσταση
- Δl : Μεταβολή μήκους

l_0 : Αρχικό μήκος

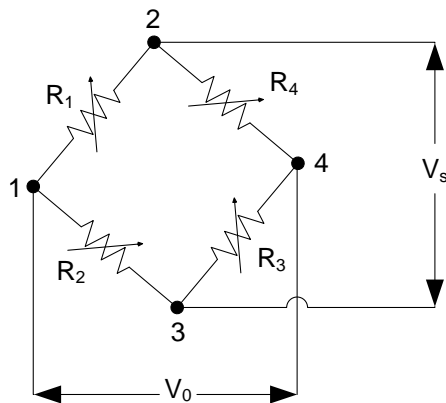
Ο παρανομαστής εκφράζει την τροπή, ε , που στην τεχνολογία των μηκυσιόμετρων, ορίζεται ως η μεταβολή του μήκους ως προς το αρχικό μήκος:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5-3)$$

Στην περίπτωση της επιμήκυνσης προκύπτει θετικό πρόσημο τροπή. Η τροπή από τον ορισμό της εμφανίζεται ως αδιάστατο μέγεθος. Παρόλα αυτά, δεδομένου ότι οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές, η τροπή συνήθως εκφράζεται σε $\mu\text{m}/\text{m}$.

5.2.1.3 Ο υπολογισμός της τροπής με την γέφυρα Wheatstone

Στο Σχήμ. 5-2 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της γέφυρας Wheatstone [5.9]. Οι τέσσερις βραχίονες της κυκλώματος της γέφυρας αποτελούνται από τις αντιστάσεις R_1 έως R_4 . Στα σημεία 2 και 3 εφαρμόζεται τάση, V_s . Στα σημεία 1 και 4 μετριέται η τάση εξόδου της γέφυρας.



Σχήμ. 5-2 Σχηματικό διάγραμμα γέφυρας Wheatstone

Η τάση V_0 , υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (5-4)$$

Στην περίπτωση που ισχύει:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (5-5)$$

τότε η γέφυρα ισορροπεί και η τάση V_0 , είναι ίση με μηδέν. Μια μικρή μεταβολή στην τιμή της αντίστασης κάποιου από τους αντιστάτες διαταράσσει την ισορροπία της γέφυρας δημιουργώντας τάση V_0 .

Η εφαρμογή της γέφυρας για την μέτρηση τροπής με την χρήση μηκυνσιόμετρων, γίνεται τοποθετώντας μηκυνσιόμετρα σε έναν, δύο ή όλους του βραχίονες αντί αντιστάσεων. Οι τοπολογίες ονομάζονται τέταρτου της γέφυρας, μισής γέφυρα ή διαγώνιας γέφυρα και πλήρους γέφυρα αντίστοιχα (quarter bridge, half bridge/ diagonal bridge, full bridge). Με αυξανόμενο αριθμό μηκυνσιόμετρων, η γέφυρα γίνεται πιο ευαίσθητη σε μεταβολές. Επιπλέον, η εφαρμογή μισής γέφυρας και πλήρους γέφυρα, εξαλείφει σφάλματα που σχετίζονται με την θερμοκρασιακή εξάρτηση της αντίστασης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά τοπολογία πλήρους γέφυρας για την μέτρηση της ροπής. Επίσης όλα τα μηκυνσιόμετρα είχαν την ίδια ονομαστικής αρχική αντίσταση η οποία ήταν ίση με 350 Ω.

Έτσι, για ίσες ονομαστικές τιμές αντίστασης στους τέσσερις βραχίονες της γέφυρας Wheatstone, η εξ. (5-4) μπορεί να γραφεί:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R + \Delta R_1}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2} + \frac{R + \Delta R_4}{2R + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) \quad (5-6)$$

Όπου:

ΔR_n : Η μεταβολή της αντίστασης n

R: Ονομαστική αρχική αντίσταση, ίδια για όλους τους κλάδους

Κάνοντας ομώνυμα τα δυο κλάσματα της παραπάνω παράστασης, προκύπτουν όροι των μορφών $4 \cdot R^2$, $2 \cdot R \cdot \Delta R_n$ και $\Delta R_{n1} \cdot \Delta R_{n2}$. Για αντίσταση 350 Ω και την μέγιστη επιτρεπόμενη τροπή του μηκυνσιόμετρου, η πρώτη μορφή ($4 \cdot R^2$) είναι κατά πέντε τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την δεύτερη μορφή ($2 \cdot R \cdot \Delta R_n$) και ακόμα μεγαλύτερη από την τρίτη μορφή ($\Delta R_{n1} \cdot \Delta R_{n2}$). Συνεπώς μπορεί να γίνει απλοποίηση του παρονομαστή σε $4 \cdot R^2$. Όμοια απλοποιείται και ο αριθμητής σε $R(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)$. Έτσι η εξίσωση (5-6) γίνεται:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) \quad (5-7)$$

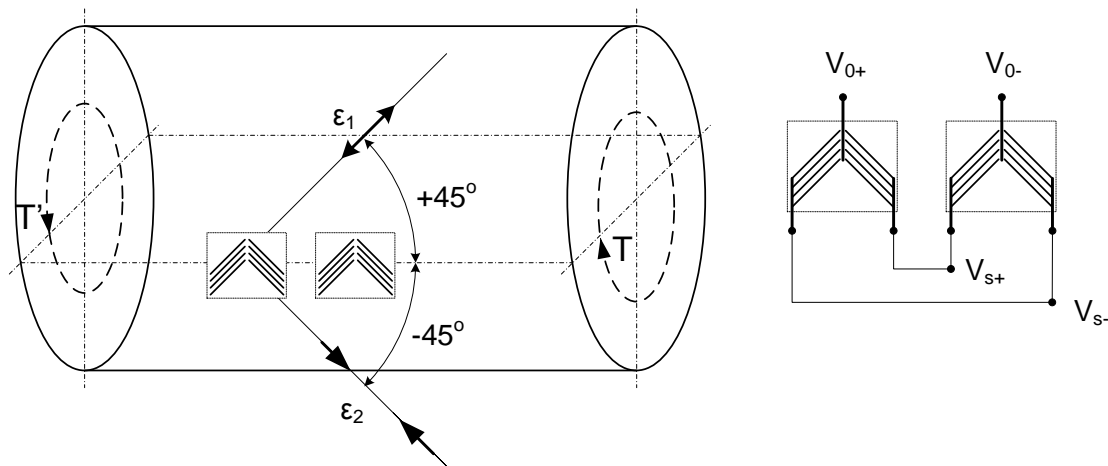
Αντικαθιστώντας από τις Εξ. (5-2) και (5-3) προκύπτει τελικά:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5-8)$$

Η μεθοδολογία συσχέτισης της ροπής με τις τροπές της Εξ. (5-8), παρατίθεται στο Παράρτημα .

5.2.2 Υπολογισμός της ροπής από το σήμα εξόδου της διάταξης των μηκυνσιόμετρων

Για την μέτρηση της ροπής στην επιφάνεια του άξονα χρησιμοποιήθηκαν μηκυνσιόμετρα σε διάταξη πλήρους γέφυρας. Στην συνέχεια περιγράφεται ο υπολογισμός της ροπής από την τάση στην έξοδο της διάταξης των μηκυνσιομέτρων.



Σχήμ. 5-3. Εφαρμογή μηκυνσιομέτρων σε άξονα για την μέτρηση των τροπών ϵ_1 και ϵ_2 που προκαλούνται από εφαρμογή ζεύγους ροπής.

Τα μηκυνσιόμετρα προσκολλήθηκαν στην επιφάνεια του άξονα με κατάλληλο προσανατολισμό ώστε τα τέσσερα μετρητικά πλέγματα να μετρούν τις τροπές ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 και ϵ_4 για τις οποίες ισχύει $\epsilon_1 = \epsilon_3$ και $\epsilon_2 = \epsilon_4$ (Σχήμ. 5-3). Επιπλέον ισχύει $\epsilon_1 = -\epsilon_2$ (Εξ. (9-15)) με την ϵ_1 να προκαλείται από εφελκυστική τάση. Συνεπώς η Εξ (5-8) γίνεται:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{k} \cdot \frac{V_0}{V_S} \quad (5-9)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξ. (9-13) από την (9-15), έχουμε:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1+\nu} \epsilon_1, \quad (5-10)$$

όπου σ η ορθή τάση.

Από τις Εξ. (9-12), (5-9) και (5-10), προκύπτει:

$$T = \frac{\sigma \cdot J}{c} \stackrel{(510)}{\implies} T = \frac{J}{c} \cdot \frac{E}{1+\nu} \epsilon_1 \stackrel{(59)}{\implies} T = \frac{J}{c} \cdot \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{V_0}{V_S} \quad (5-11)$$

Όπου: $J = \frac{1}{2} \pi \cdot (c^4 - c_0^4)$ με c και c_0 την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του άξονα.

Η τελευταία εξίσωση εκφράζει ροπή σαν συνάρτηση του σήματος εξόδου της διάταξης των μηκυνσιόμετρων.

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για χάλυβες, το συνηθέστερο υλικό κατασκευής αξόνων [5.7], κυμαίνεται από 200Μpa, για τον κοινό δομικό χάλυβα A36 και έως 205Μpa για τον υψηλής ποιότητας χάλυβα, τύπου C35 [5.8]. Οι τιμές του λόγου Poisson για τους χάλυβες κυμαίνεται από 0.26 έως 0.30 [5.10].

5.2.3 Βαθμονόμηση

Η διαδικασία της βαθμονόμησης μιας μετρητικής διάταξης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες ενέργειες για την επίτευξη ακριβούς μέτρησης. Η βαθμονόμηση ουσιαστικά συνίσταται στον καθορισμό της κλίμακας του οργάνου με βάσει τις τιμές του μετρούμενου μεγέθους [5.11].

Η βαθμονόμηση μέσω παραλληλισμού (shunt calibration) είναι μία μέθοδος που προτείνεται στην βιβλιογραφία [5.4] και χρησιμοποιείται στην πράξη για την βαθμονόμηση της μετρητικής αλυσίδας. Τοποθετείται μια αντίσταση παράλληλα σε κάποιον κλάδο της γέφυρα Wheatstone ώστε να προκαλέσει εκτροπή της γέφυρας. Από την τιμή της αντίστασης μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή της αντίστασης του κλάδου και συνεπώς η τροπή που θα προκαλούσε την ίδια μεταβολή. Συγκρίνοντας την ανάγνωση της τροπής από την μετρητική αλυσίδα με την γνωστή ισοδύναμη τροπή, λόγω της αντίστασης που τοποθετήθηκε, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση.

Όμως αυτή η μέθοδος συνιστά «μερική» βαθμονόμηση καθώς δεν συσχετίζει άμεσα το προς μέτρηση μέγεθος (ροπή) με την ένδειξη της μετρητικής αλυσίδας αλλά κάποιο ενδιάμεσο (τροπή). Στις συνήθεις εφαρμογές, η ροπή υπολογίζεται από την τροπή με βάση τις ιδιότητες του υλικού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η βαθμονόμηση έγινε με βάση γνωστές τιμές της ροπής στον άξονα, T σε Nm , υπολογισμένες από την ισχύ, P σε W, και την ταχύτητα περιστροφής, N σε σ.α.λ.:

$$T = \frac{60 \cdot P}{2\pi \cdot N} \quad (5-12)$$

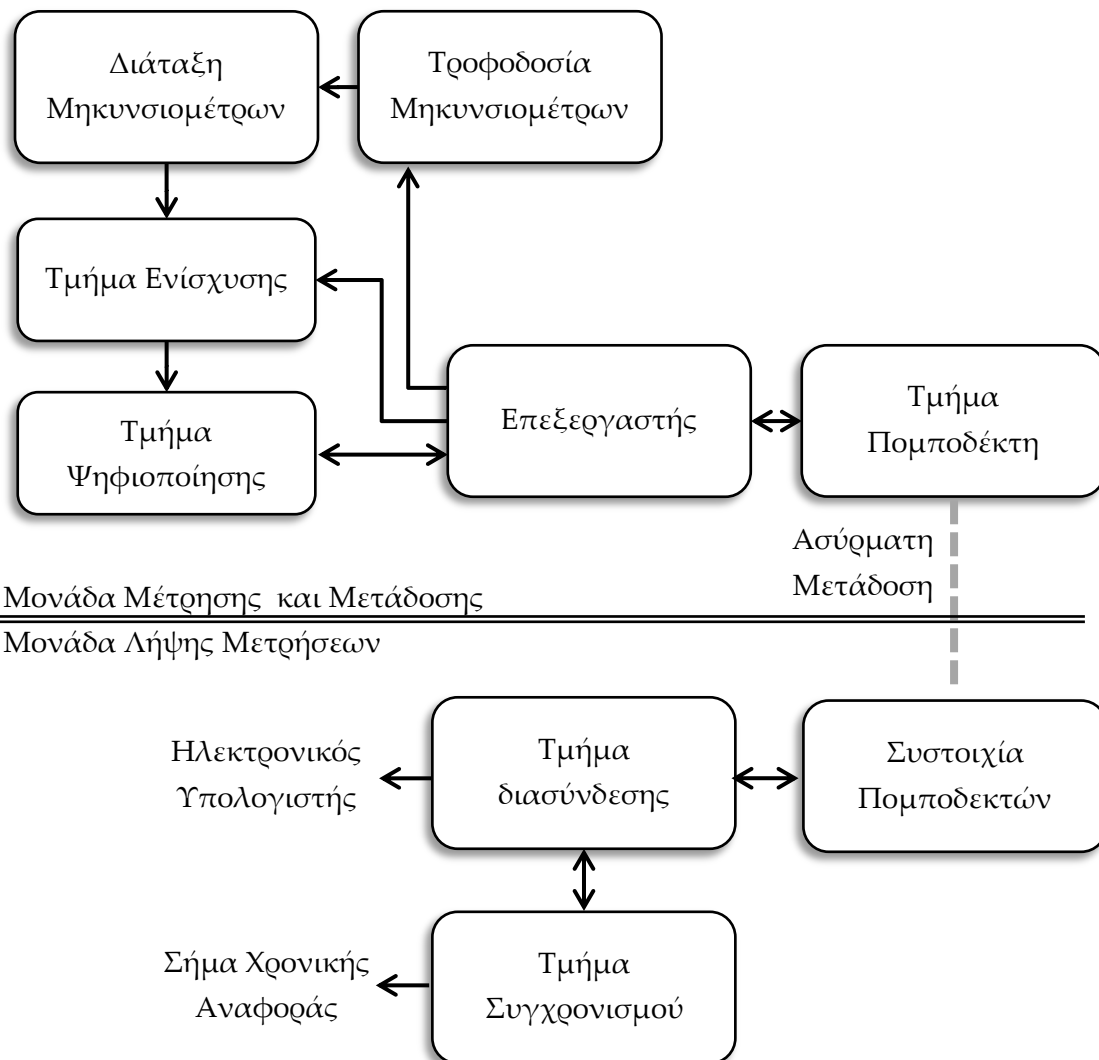
Λύνοντας ένα σύστημα δύο εξισώσεων της μορφής:

$$T = c_1 V_s + c_2, \quad (5-13)$$

προκύπτουν δυο συντελεστές c_1 και c_2 μέσω των οποίων εκφράζεται η ροπή συναρτήσει της μετρούμενης τάσης στην έξοδο των μηκυνσιόμετρων V_s .

5.3 Ανάπτυξη συσκευής μέτρησης και ασύρματης μετάδοσης των σημάτων των μηκυνσιομέτρων.

Η παρούσα παράγραφος αναφέρεται στην συσκευή που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της στιγμιαίας ροπής. Η συσκευή αποτελείται από την **μονάδα μέτρησης και μετάδοσης**, η οποία είναι στερεωμένη στο περιστρεφόμενο άξονα και από τη **μονάδα λήψης μετρήσεων**, η οποία είναι μια στατική στεφάνη τοποθετημένη ομόκεντρα με τον άξονα. Σχηματική απεικόνιση της δομής της συσκευής δίνεται στο Σχήμ. 5-4.



Σχήμ. 5-4 Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της μονάδας μέτρησης και μετάδοσης (άνω) και της μονάδας λήψης μετρήσεων

Η ανάπτυξη έγινε από ηλεκτρονικά εξαρτήματα (σχεδίαση σε «χαμηλό» επίπεδο), χωρίς την χρήση έτοιμων λύσεων λόγω της φύσης της εφαρμογής που παρουσιάζει πολλούς περιορισμούς. Λόγω αυτού η περιγραφή της συσκευής που

αναπτύχθηκε παρουσιάζει ιδιαίτερη εξειδίκευση και για αυτόν τον λόγο παρατίθεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια περιγραμματική περιγραφή της συσκευής.

Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται σε μικροελεγκτή ο οποίος προγραμματίστηκε με κώδικα γραμμένο σε συμβολική γλώσσα (Assembly). Τα κρίσιμα τμήματα του κώδικα παρατίθενται και περιγράφονται στο Παράρτημα Γ.

5.3.1 Μονάδα μέτρησης και μετάδοσης

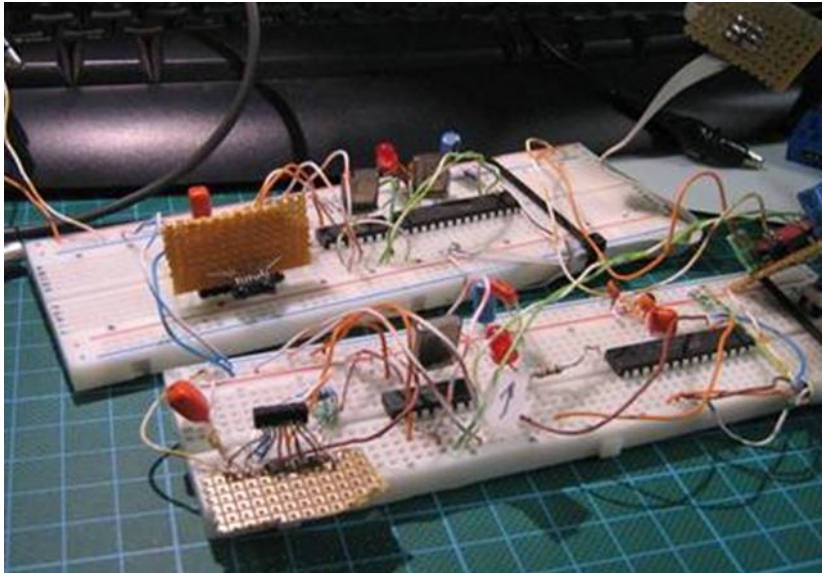
Η μονάδα μέτρησης και μετάδοσης είναι τοποθετημένη πάνω στο περιστρεφόμενο άξονα. Την λειτουργία της ελέγχει μικροελεγκτής προγραμματισμένος με τον αντίστοιχο κώδικα. Στο άνω μέρος του Σχήμ. 5-4 φαίνεται απλοποιημένα η δομή της μονάδας.

Η ανάπτυξη της μονάδας μέτρησης και μετάδοσης έγινε σε τέσσερις φάσεις:

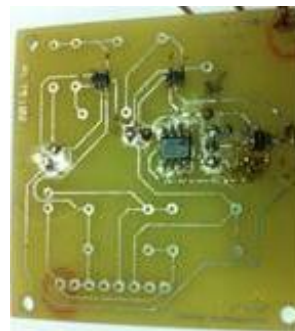
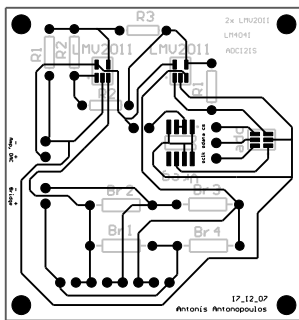
1. Διάφορες δοκιμές σε αυτοσχέδιες πλακέτες:
 - a. ενίσχυση - ψηφιοποίηση σήματος
 - b. ασύρματη μετάδοση δεδομένων (με διάφορα πρωτόκολλα ραδιοκυμάτων και υπέρυθρες), Εικόνα 5-4
2. Τυπωμένο κύκλωμα με δυο τελεστικούς rail to rail ενισχυτές (με κωδικό LMV2011) και ψηφιοποιητή διαδοχικής προσέγγισης 12 bit 200 ksps ADC121S021, Εικόνα 5-5.
3. Τυπωμένο κύκλωμα με διάταξη ενισχυτών και ψηφιοποιητή ίδια με το προηγούμενο και επιπλέον όλα τα απαραίτητα συστήματα για πλήρη λειτουργία (Σχήμ. 5-5 και Εικόνα 5-6).
4. Τυπωμένο κύκλωμα βασισμένο στο προηγούμενο (Σχήμ. 5-6 και Εικόνα 5-6), με τις ακόλουθες διορθώσεις:
 - a. το κύκλωμα ενίσχυσης το οποίο αντικαταστάθηκε από ολοκληρωμένο ψηφιακά προγραμματιζόμενο ενισχυτή αισθητήρων μηδενικής ολίσθησης και
 - b. το κύκλωμα τροφοδοσίας των αναλογικών κυκλωμάτων

Στην Εικόνα 5-6 (γ) και (δ) γίνεται αντιπαραβολή των τυπωμένων κυκλωμάτων της τρίτης και τέταρτης φάσης ανάπτυξης στο περιβάλλον που σχεδιάστηκαν, το Protel DXP2004. Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται το προϊόν της τελευταίας φάσης ανάπτυξης.

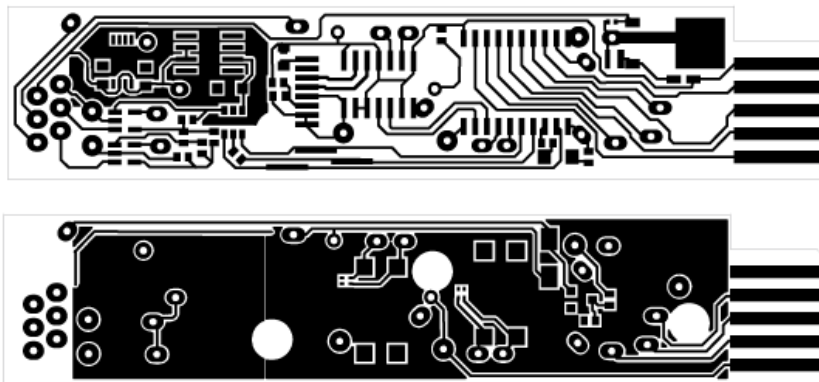
Εκτός από την ανάπτυξη του υλικού πραγματοποιήθηκε και η ανάπτυξη και βελτίωση του κώδικα που εκτελεί ο μικροεπεξεργαστής. Όσον αφορά στο κώδικα του μικροεπεξεργαστή και στο λογισμικό οδήγησης για υπολογιστή, παρουσιάζονται μόνο οι τελικές εκδόσεις (Παράρτημα Γ και §5.3.4, αντίστοιχα).



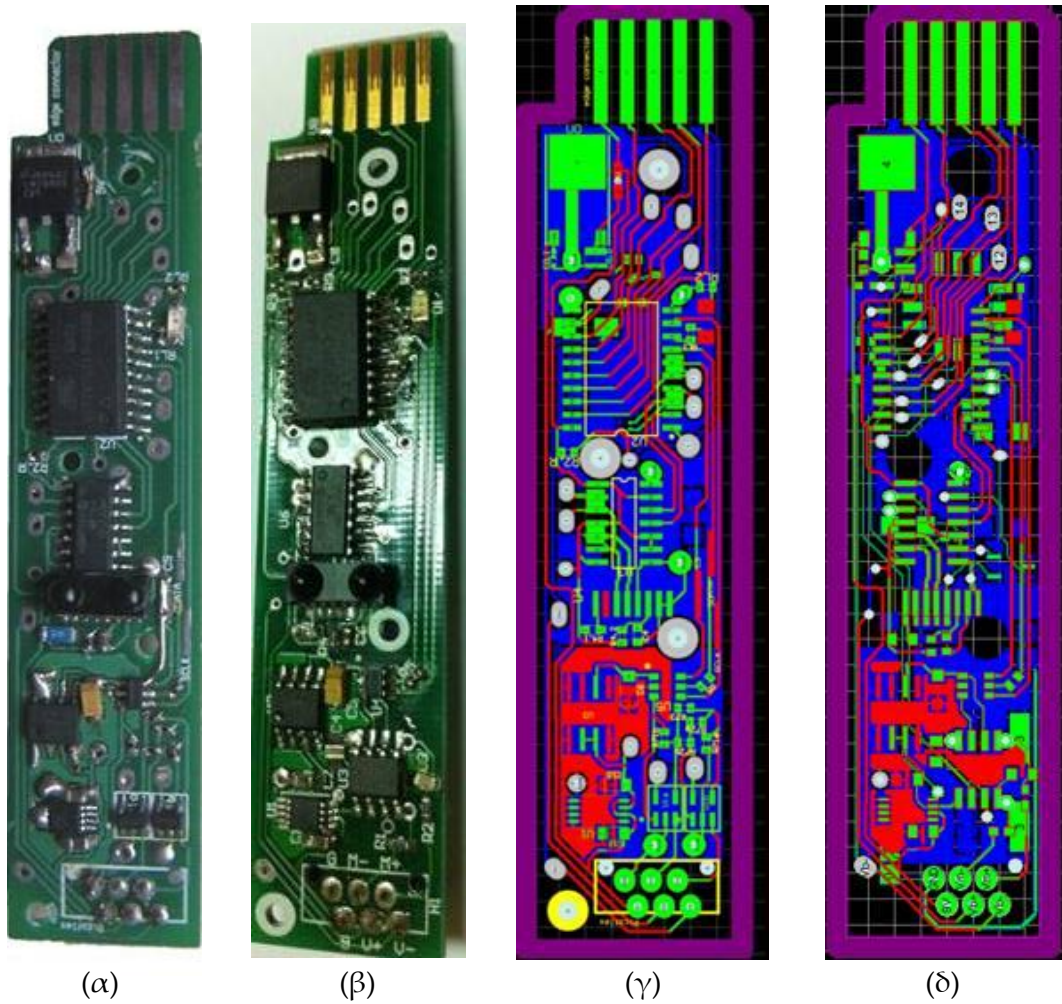
Εικόνα 5-4 Πρώτη φάση ανάπτυξης: Δοκιμές διατάξεων ασύρματης μετάδοσης δεδομένων με υπέρυθρες ακτίνες σε breadboard



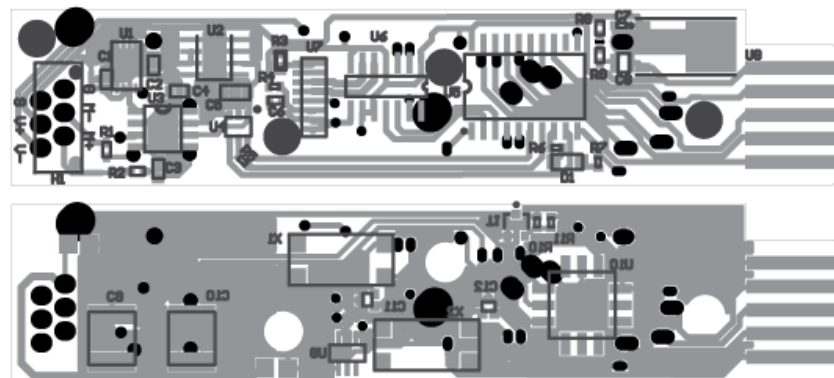
Εικόνα 5-5 Δεύτερη φάση ανάπτυξης: κατασκευή τυπωμένου κυκλώματος για ενίσχυση και ψηφιοποίηση σήματος.



Σχήμ. 5-5 Τρίτη φάση ανάπτυξης: οι δύο όψεις του τυπωμένου κυκλώματος σε φυσικό μέγεθος



Εικόνα 5-6 (α) και (β) Φωτογραφική άποψη των συναρμολογημένων τυπωμένων κυκλωμάτων της τρίτης και τέταρτης φάσης, αντίστοιχα. (γ) και (δ) Τα τυπωμένα κυκλώματα της τρίτης και τέταρτης φάσης ανάπτυξης (αντίστοιχα) στο περιβάλλον σχεδίασης, Protel DXP2004.



Σχήμ. 5-6 Τέταρτη φάση ανάπτυξης: οι δύο όψεις του τυπωμένου κυκλώματος σε φυσικό μέγεθος. Με ανοικτό γκρι απεικονίζονται οι επιφάνειες χαλκού, ενώ με μαύρο οι οπές και το τοπογραφικό σχεδιάγραμμα.

5.3.1.1 Τμήμα Διαμόρφωσης και Ψηφιοποίησης

Το τμήμα διαμόρφωσης και ψηφιοποίησης της μονάδας λήψης και μετάδοσης μετρήσεων «παραλαμβάνει» το αναλογικό σήμα στην έξοδο των μηκυνσιομέτρων και το «παραδίδει» ψηφιοποιημένο στον μικροεπεξεργαστή.

Η ζεύξη αναλογικών σημάτων με ψηφιακά συστήματα γίνεται σε δύο διακριτά στάδια, την διαμόρφωση σήματος και την ψηφιοποίηση [5.12].

Το πρώτο στάδιο επιτυγχάνει την αλλαγή μερικών χαρακτηριστικών του σήματος, όπως επιλογή συχνοτήτων, αλλαγή εμπέδισης και ενίσχυση. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή το στάδιο της διαμόρφωσης αποτελείται από χαμηλοπερατό φίλτρο και προγραμματιζόμενο ενισχυτή. Ο προγραμματισμός αφορά στην ρύθμιση της απολαβής και αντιστάθμισης και γίνεται από τον μικροελεγκτή.

Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από δυο υποστάδια: την λειτουργία δειγματοληψίας και διατήρησης (sample and hold) και την λειτουργία ψηφιοποίησης. Κατά το πρώτο υποστάδιο λαμβάνεται ένα δείγμα του σήματος εισόδου, το οποίο τροφοδοτεί το δεύτερο υποστάδιο στο οποίο δημιουργείται ένας ψηφιακός κώδικας ισοδύναμος με το δείγμα που κρατήθηκε [5.12]. Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας λαμβάνει τάση αναφοράς από εξειδικευμένη πηγή.

Το τμήμα διαθέτει ανεξάρτητο τροφοδοτικό κύκλωμα για την απομόνωση από «ψηφιακό θόρυβο» που οφείλεται στις αλλαγές κατάστασης των κυκλωμάτων του μικροελεγκτή και των υπόλοιπων ψηφιακών εξαρτημάτων.

Ο σχεδιασμός και η χωροθέτηση του τμήματος, το οποίο περιλαμβάνει το αναλογικό μέρος του κυκλώματος, είναι κρίσιμα για την σωστή λειτουργία καθώς εξωγενείς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές θα ήταν ικανές να παραμορφώσουν την μέτρηση στο διάστημα που αυτή είναι αναλογική, δηλαδή μέχρι την έξοδό της από τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα [5.13]. Για αυτό τον λόγο τηρήθηκαν όλοι οι κανόνες για μείωση ηλεκτρομαγνητική παρεμβολής, που περιλαμβάνουν την ορθή χρήση επιπέδων γείωσης, την απομόνωση «θορυβωδών» σημάτων, την παράλληλη δρομολόγηση σημάτων με γείωση, κ.α. [5.14, 5.15].

Το τμήμα διαμόρφωσης και ψηφιοποίησης αποτελείται από τα εξής κυκλώματα:

- ◆ Κύκλωμα τροφοδοσίας
- ◆ Κύκλωμα διαμόρφωσης σήματος
- ◆ Κύκλωμα τάσης αναφοράς ψηφιοποίησης
- ◆ Κύκλωμα ψηφιοποίησης

5.3.1.2 Τμήμα Λειτουργίας

Το τμήμα λειτουργίας της μονάδας μέτρησης και ψηφιοποίησης βασίζεται σε μικροελεγκτή, προγραμματισμένο με κατάλληλο κώδικα ώστε να εκτελεί τις ακόλουθες εργασίες:

- ◆ Έλεγχος τροφοδοσίας των μηχανοσυστημάτων και των αναλογικών κυκλωμάτων,
- ◆ Χρονισμός αναλογοψηφιακού μετατροπέα και λήψη ψηφιοποιημένου σήματος,
- ◆ Προγραμματισμός του ενισχυτή στο επιθυμητό επίπεδο ενίσχυσης (*gain*) και αντιστάθμισης (*offset*),
- ◆ Μετάδοση των ψηφιοποιημένων σημάτων σειριακά (UART) στο «κύκλωμα διαμόρφωσης στο πρότυπο υπέρυθρης μετάδοσης» και κατόπιν στον πομποδέκτη για αποστολή,
- ◆ Αμφίδρομη επικοινωνία μέσω του τμήματος πομποδέκτη και με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή λαμβάνοντας εντολές και αποστέλλοντας στοιχεία κατάστασης.

Το Τμήμα λειτουργίας αποτελείται από τα εξής κυκλώματα:

- ◆ Κύκλωμα τροφοδοσίας
- ◆ Κύκλωμα διαμόρφωσης στο πρότυπο υπέρυθρης μετάδοσης
- ◆ Κύκλωμα πομποδέκτη υπερέυθρων
- ◆ Κύκλωμα ελέγχου διάταξης μηχανοσυστημάτων
- ◆ Μικροελεγκτή και περιφερειακά βοηθητικά κυκλώματα

5.3.1.3 Κώδικας Μικροελεγκτή

Ο κώδικας του μικροελεγκτή είναι γραμμένος στην συμβολική γλώσσα (*assembly*) [5.16]. Η έκτασή του ξεπερνάει τις 1200 γραμμές, ενώ ο «πυρήνας» του φτάνει τις 500 γραμμές. Στο Παράρτημα Γ παρατίθενται και περιγράφονται τα κρίσιμα τμήματα του κώδικα.

5.3.2 Μονάδα λήψης μετρήσεων

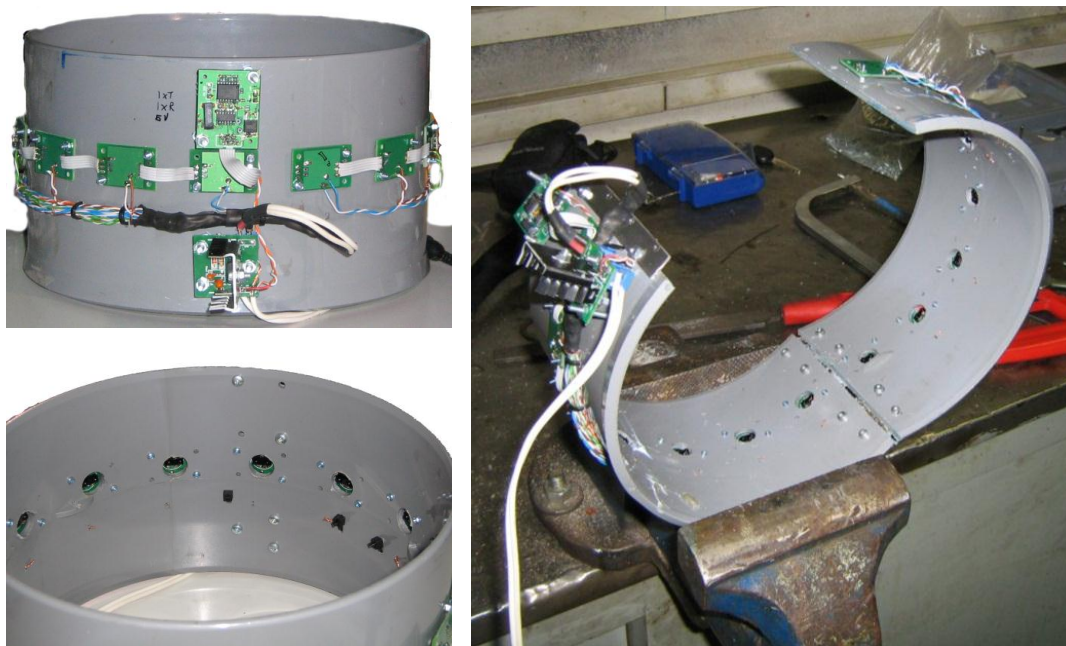
Η μονάδα λήψης μετρήσεων λειτουργεί σαν ενδιάμεσο για την μεταφορά των δεδομένων από την υπέρυθη μορφή ως τον υπολογιστή. Η υπέρυθη ακτίνα λαμβάνεται τμηματικά από διαφορετικούς πομποδέκτες. Τα ληφθέντα οπτικά σήματα ανασυνθέτονται σε σειριακό σήμα στο πρότυπο υπερέυθρων [5.17]. Στην συνέχεια αυτό μετατρέπεται διαδοχικά σε ασύγχρονο σειριακό στάθμης TTL και στην συνέχεια στο πρότυπο RS-232, το οποίο αποστέλλεται στον υπολογιστή. Αυτή η λειτουργία δεν απαιτεί χρήση μικροελεγκτή. Αντίθετα απαιτείται μικροελεγκτής για την λειτουργία του τμήματος συγχρονισμού για

την ανίχνευση έναρξης και λήξης μέτρησης και την παραγωγή ενός αναλογικού σήματος που μπορεί να μετρηθεί από αναλογοψηφιακό μετατροπέα και χρησιμεύει σαν χρονική αναφορά για τον παραλληλισμό μετρήσεων (π.χ παραλληλισμός της μέτρησης της ροπής με την μέτρηση της πίεσης) ώστε να προκύπτουν πρακτικά ταυτόχρονες μετρήσεις.

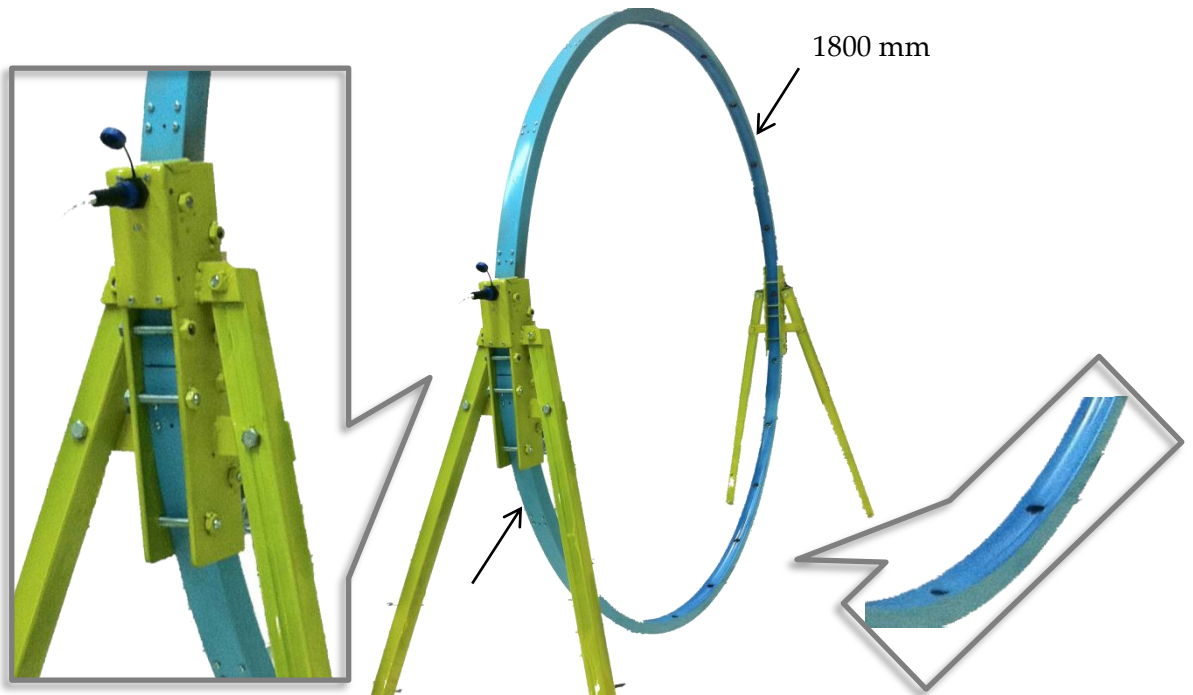
Η μονάδα αρχικά αναπτύχθηκε με περιορισμένη λειτουργικότητα. Στη συνέχεια έγιναν διαδοχικές προσθήκες και βελτιώσεις. Η μορφή του πρωτοτύπου με όλες τις βελτιώσεις και προσθήκες φαίνεται στη Εικόνα 5-7. Με βάση τη τελική μορφή της διάταξης αναπτύχθηκε βελτιωμένη έκδοση γενικής χρήσης που χρησιμοποιήθηκε στην διάρκεια των μετρήσεων (Εικόνα 5-8, Εικόνα 5-9).

Η μονάδα αποτελείται από τα εξής τμήματα:

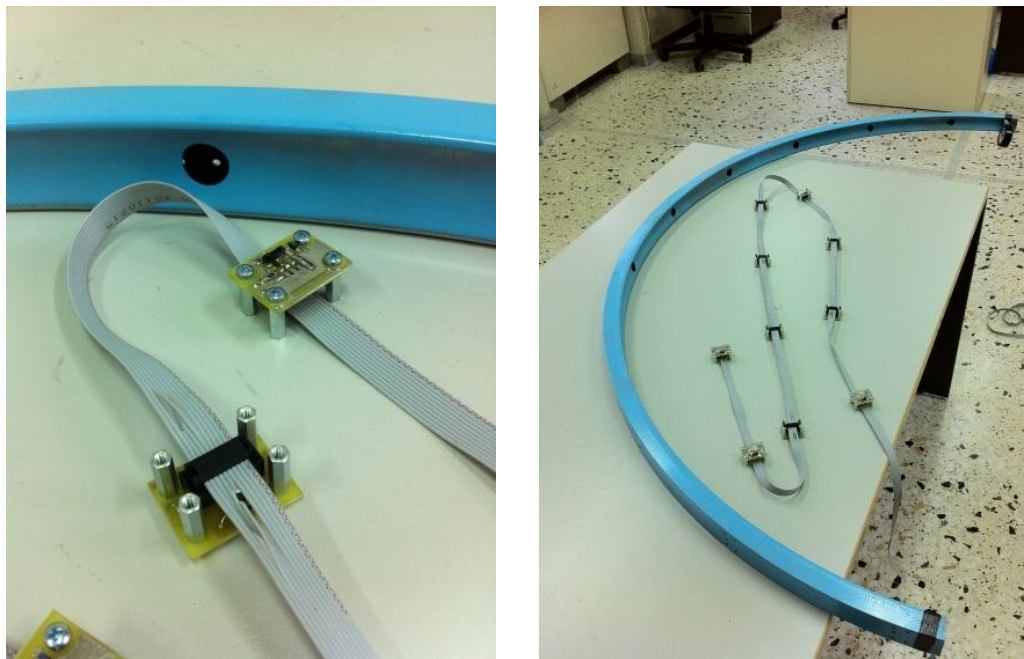
- ♦ **Τμήμα τροφοδοσίας**
- ♦ **Τμήμα Πομποδέκτη:** Πολλά τμήματα πομποδεκτών αποτελούν μια συστοιχία πομποδεκτών, έτσι ώστε να σαρώνεται η περιφέρεια του άξονα.
- ♦ **Τμήμα διασύνδεσης:** Ανασυνθέτει ένα ενιαίο σήμα από τα σήματα των επιμέρους πομποδεκτών της συστοιχίας και στην συνέχεια το μετατρέπει σε σειριακό σήμα RS232, συμβατό με υπολογιστή.
- ♦ **Τμήμα συγχρονισμού:** Παράγει σήμα που χρησιμεύει ως χρονική αναφορά για τον παραλληλισμό της μέτρησης με μετρήσεις από άλλες πηγές του υπολογιστή.



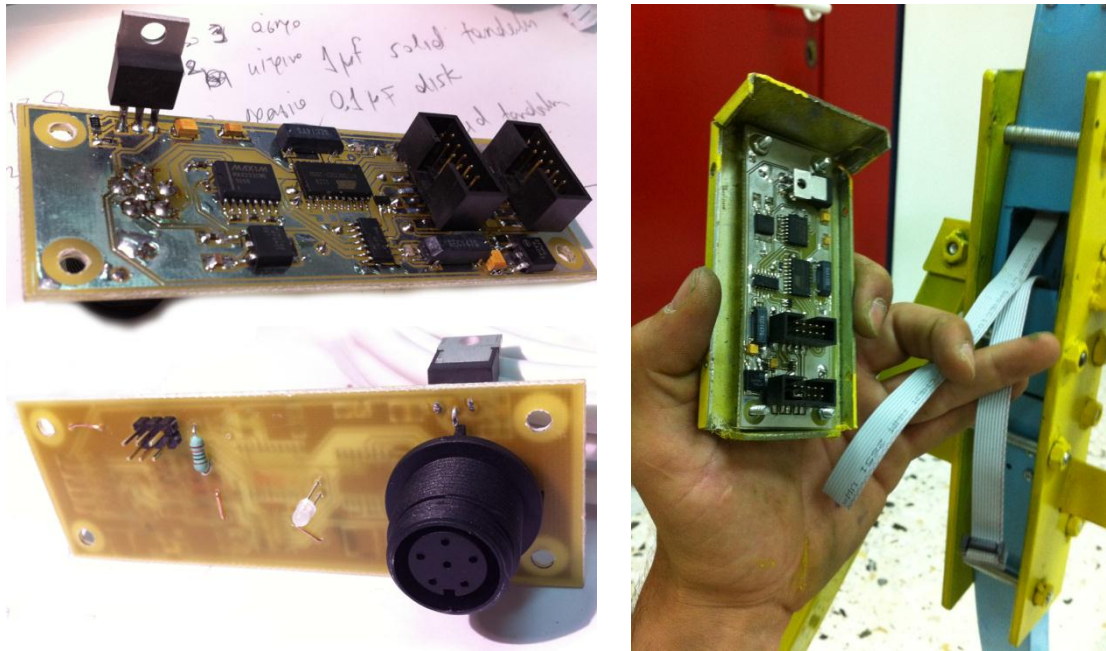
Εικόνα 5-7 Λειτουργικό πρωτότυπο της μονάδας λήψης μετρήσεων και στιγμιότυπο από την κατασκευή. Διακρίνονται τα τμήματα πομποδεκτών συνδεδεμένα σε συστοιχία με καλωδιωταινία, το τμήμα διασύνδεσης και το τμήμα τροφοδοσίας.



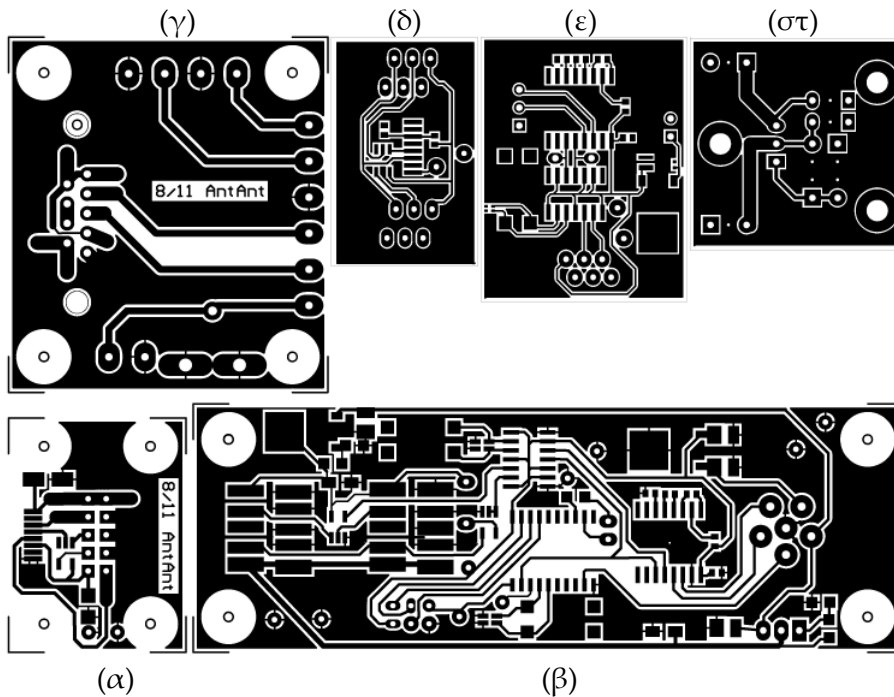
Εικόνα 5-8 Η τελική κατασκευή της μονάδας λήψης μετρήσεων από γαλβανισμένο προφίλ χάλυβα διαμορφωμένο σε κύλινδρο μηχανουργείου. Το σημείο ένωσης των δυο ημικυκλίων φαίνεται στην λεπτομέρεια αριστερά. Επίσης διακρίνεται η θέση που έχουν τοποθετηθεί τα τμήματα διασύνδεσης και συγχρονισμού με τερματικό σύνδεσης καλωδίου και ενδεικτική φωτοδίοδο. Μέσα στο προφίλ τοποθετήθηκαν τα τμήματα πομποδεκτών. Διακρίνονται οι οπές για την διέλευση των υπέρυθρων ακτίνων.



Εικόνα 5-9 Μονάδες πομποδεκτών συνδεδεμένες σε συστοιχία με καλωδιοταινία μέσω ακροδέκτη πριν την τοποθέτηση εντός του προφίλ.



Εικόνα 5-10 Φωτογραφικές απόψεις του τυπωμένου κυκλώματος των τμημάτων διασύνδεσης, τροφοδοσίας και συγχρονισμού και ο τρόπος στερέωσης και σύνδεσης στην υπόλοιπη κατασκευή.



Σχήμ. 5-7 Τυπωμένα κυκλώματα που κατασκευάστηκαν: (α) και (δ) τμήμα πομποδέκτη τελευταίας και παλαιότερης έκδοσης, αντίστοιχα, (β) τμήμα τροφοδοσίας, διασύνδεσης και συγχρονισμού τελευταίας έκδοσης (ε) παλαιότερο τμήμα διασύνδεσης και (στ) παλαιότερο τμήμα τροφοδοσίας.

5.3.3 Υπολογισμός αναγκαίων πομποδεκτών

Η δέσμη που εκπέμπει τις μετρήσεις από την μονάδα μετρήσεων που είναι στερεωμένη στον περιστρεφόμενο άξονα λαμβάνεται από τους πομποδέκτες που βρίσκονται στην σταθερή στεφάνη τοποθετημένη ομόκεντρα με τον άξονα. Στην παρούσα παράγραφο υπολογίζεται ο αναγκαίος αριθμός πομποδεκτών ώστε να είναι εφικτή η λήψη. Ο υπολογισμός γίνεται συναρτήσει της ακτίνας του άξονα και της ακτίνας της σταθερής στεφάνης, με δεδομένη την γωνία της εκπεμπόμενης δέσμης.

Πάνω στην περιφέρεια του άξονα με ακτίνα ΟΚ (Σχήμ. 5-8), στο σημείο Κ είναι στερεωμένη η μονάδα μέτρησης και μετάδοσης. Από εκεί εκπέμπει ο πομποδέκτης μια υπέρυθρη δέσμη. Σε γωνία $\pm 24^\circ$ από την κάθετη στην επιφάνεια του πομποδέκτη διεύθυνση (προέκταση της ΟΚ), η ισχύς της δέσμης μειώνεται στο μισό. Θεωρείται ότι αυτή η γωνία είναι η μέγιστη που επιτρέπει την ασφαλή μετάδοση των δεδομένων.

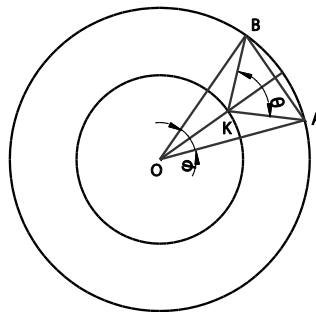
Εστω ότι η γωνία είναι $\theta=48^\circ$, στο διάστημα ΑΒ πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας δέκτης για να λαμβάνει τα δεδομένα από τον πομπό στο σημείο Κ. Για να εκτιμηθεί ο αναγκαίος αριθμός πομποδεκτών πάνω στην περίμετρο του κύκλου με ακτίνα ΟΑ που διέρχεται από το Α αρκεί να είναι γνωστή η γωνία ϕ :

$$\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{AB}{2OA} \quad (5-14)$$

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{AB}{2KA} \quad (5-15)$$

Συνεπώς:

$$\phi = 2 \operatorname{asin}\left(\frac{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) KA}{OA}\right) \quad (5-16)$$



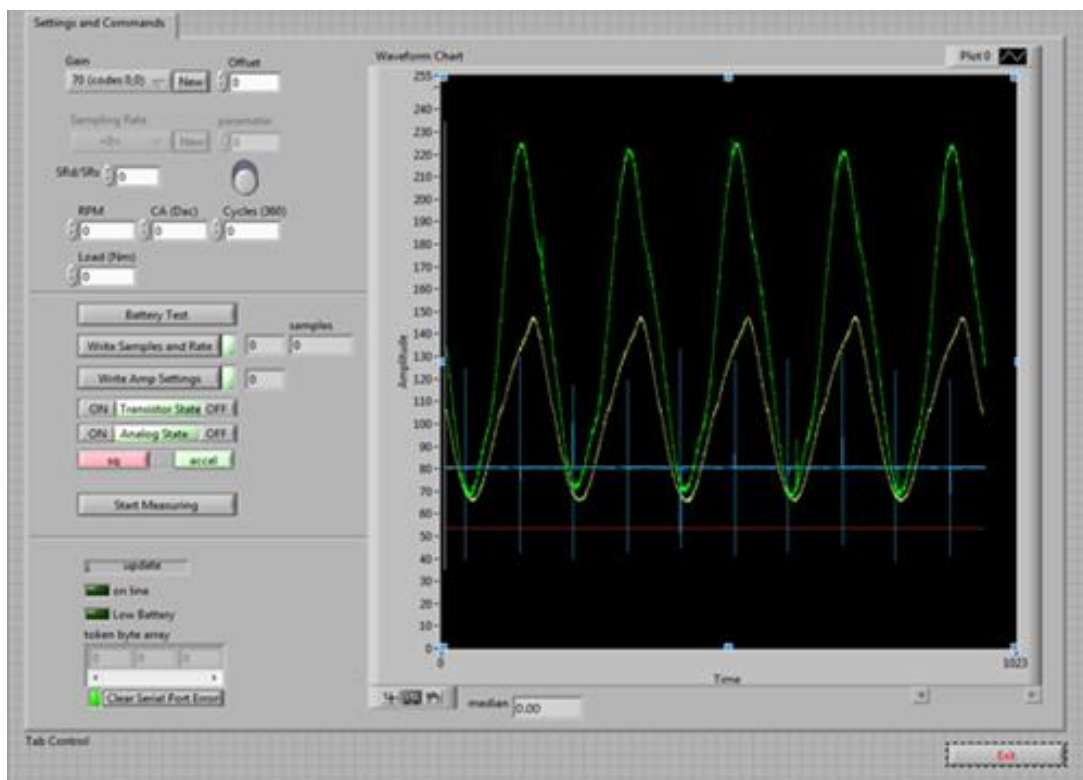
Σχήμ. 5-8 Υπολογισμός του αναγκαίου αριθμού πομποδεκτών για την λήψη του σήματος συναρτήσει της διαμέτρου του άξονα και της απόστασης τοποθέτησης.

5.3.4 Λογισμικό Οδήγησης και Λήψης Μετρήσεων από την Διάταξη Μέτρησης της Στιγμιαίας Ροπής

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.1.3, ο μικροελεγκτής που βρίσκεται στην μονάδα μέτρησης και μετάδοσης εκτελεί ένα κώδικα που περιγράφει την επιθυμητή λειτουργία του. Ο κώδικας αυτός παρέχει διάφορες δυνατότητες όπως:

1. προγραμματισμός ενισχυτή,
2. ενεργοποίηση/ απενεργοποίηση τροφοδοσίας κυκλωμάτων για εξοικονόμηση ενέργειας,
3. λήψη μετρήσεων με καθορισμένο αριθμό δειγμάτων και συχνότητα δειγματοληψίας,
4. έλεγχος στάθμης μπαταρίας και
5. έλεγχος επικοινωνίας.

Η εντολή για την εκτέλεση κάποιων από τις ανωτέρω ενέργειες, ο ορισμός των παραμέτρων και η λήψη των μετρήσεων γίνεται από λογισμικό που είναι εγκατεστημένο στον υπολογιστή. Ουσιαστικά πρόκειται για τον οδηγό (driver) της συσκευής. Η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον LabView.

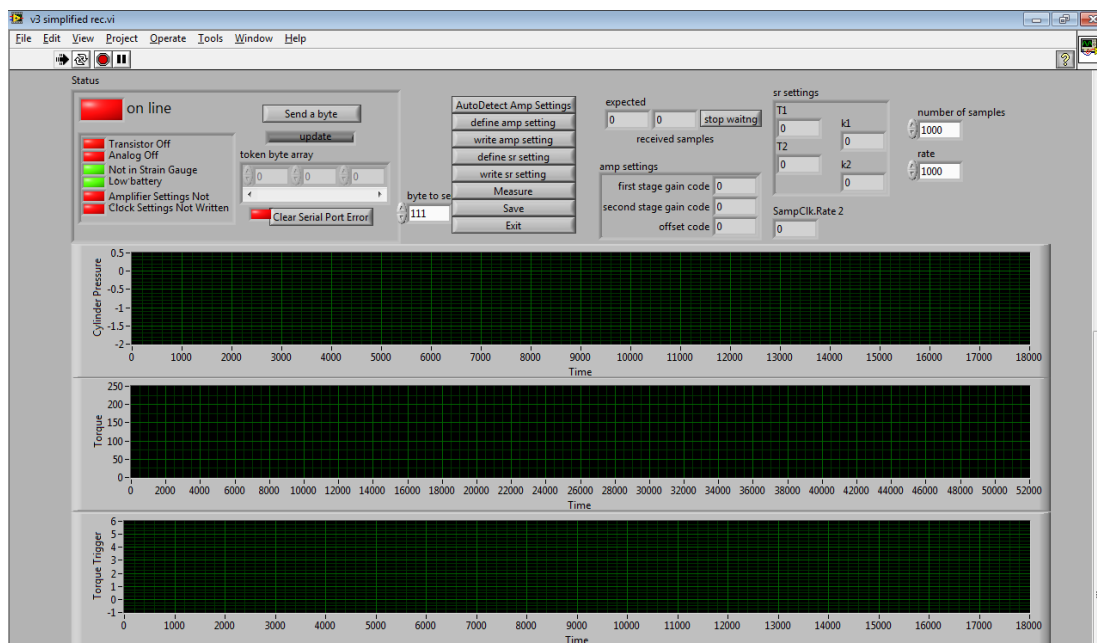


Εικόνα 5-11 Αρχική μορφή του λογισμικού οδήγησης της συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ροπής.

Το ανωτέρω λογισμικό αναπτύσσεται κατ' αντιστοιχία με τον κώδικα που εκτελεί ο μικροελεγκτής. Στην Εικόνα 5-11 δίνεται η αρχική του κορφή.

Κομβικό σημείο στην ανάπτυξη θεωρείται η εισαγωγή της μεταβλητής status και η περιοδική αποστολής της από τον μικροελεγκτή στον υπολογιστή. Μέσω της μεταβλητής γίνεται ενημέρωση του υπολογιστή για την κατάσταση της συσκευής. Η περιγραφή της μεταβλητής και του κώδικα δίνεται στη §Γ.7.

Σημαντική βελτίωση αποτελούν οι ρουτίνες αυτόματοποίησης της λειτουργίας της συσκευής, όπως είναι ρουτίνες υπολογισμού των ρυθμίσεων του ενισχυτή και της δειγματοληψίας, που εκτελούνται όταν απαιτείται στο παρασκήνιο αποφορτίζοντας τον χρήστη. Όταν δηλαδή, για παράδειγμα, ανιχνευτεί ότι απαιτείται αλλαγή της κλίμακας, αυτή γίνεται αυτόματα. Η τελική μορφή του λογισμικού δίνεται στην Εικόνα 5-12.



Εικόνα 5-12 Μεταγενέστερη μορφή του λογισμικού οδήγησης της συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ροπής.

5.4 Αξιολόγηση Διάταξης με Εργαστηριακά Όργανα.

Για την διασφάλιση της αξιοπιστίας των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές μετρήσεις για την αξιολόγηση της λειτουργίας του τμήματος διαμόρφωση και ψηφιοποίησης (§5.3.1.1, §B.1.1) και της διαδικασίας καθορισμού συχνότητας δειγματοληψίας (§Γ.12)

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του τμήματος διαμόρφωση και ψηφιοποίησης έγιναν δύο δοκιμές. Στη πρώτη δοκιμή δημιουργήθηκε γέφυρα Wheatstone με αντιστάσεις μεταβλητής τιμής. Μετρούνταν η τάση στην έξοδο της γέφυρας, η τάση στην έξοδο του τμήματος διαμόρφωσης σήματος (πριν τον

ψηφιοποιητή) και η ψηφιοποιημένη τιμή από τον υπολογιστή. Η μέτρηση των αναλογικών τάσεων έγινε με το βολτόμετρο Agilent U1252A. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε για 20 τιμές εισόδου και 5 συνδυασμούς ρύθμισης απολαβής και μετακίνησης σε κάθε τιμή εισόδου. Τα σφάλματα κυμαίνονται στην ακρίβεια του οργάνου και συνεπώς δεν είναι αξιολογήσιμα.

Για την δεύτερη δοκιμή αξιολόγησης της λειτουργίας του τμήματος διαμόρφωσης και ψηφιοποίησης δημιουργήθηκε γέφυρα Wheatstone με σταθερές τιμές αντίστασης και σταθερή εκτροπή. Η τροφοδοσία της γέφυρας έγινε από την γεννήτρια συχνοτήτων Metex MXG-9802, η οποία παρήγαγε τετραγωνικό παλμό. Σκοπός της μέτρησης ήταν η αξιολόγηση του υπολογισμού της τάσης στην είσοδο του τμήματος διαμόρφωσης συναρτήσει των δοσμένων τιμών απολαβής και μετακίνησης και η επιβεβαίωση της γραμμικότητας του ενισχυτή και ψηφιοποιητή. Έτσι για διάφορους συνδυασμούς τιμών απολαβής και μετακίνησης στο ίδιο σήμα εισόδου συγκρίθηκε η τιμή χαμηλής και υψηλής στάθμης του τετραγωνικού παλμού της γεννήτριας συχνοτήτων. Και σε αυτήν την μέτρηση τα αποτελέσματα ήταν στα όρια της ακρίβειας (LSB).

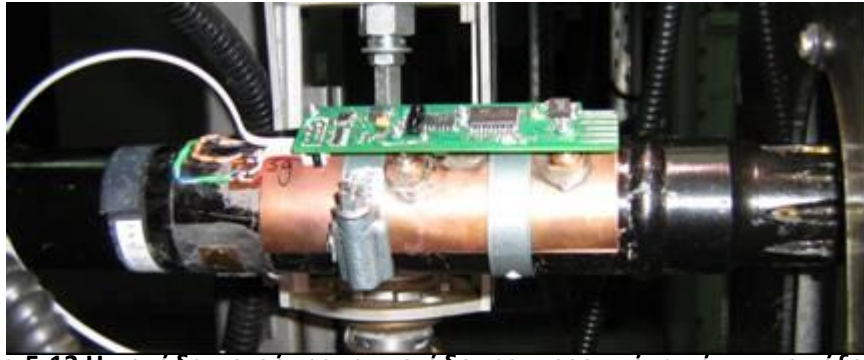
Για την δοκιμή της διαδικασίας καθορισμού της συχνότητας δειγματοληψίας, ρυθμίστηκε μια έξοδος του μικροελεγκτή ώστε να αλλάζει την στάθμη της σε κάθε περίοδο μέτρησης. Με το πολύμετρο Agilent U1252A μετρήθηκε η συχνότητα στην έξοδο για διάφορες τιμές συχνότητας δειγματοληψία σε όλο της το φάσμα. Και σε αυτήν την δοκιμή τα αποτελέσματα ήταν στην ακρίβεια του μετρητικού οργάνου και δεν αποτελούν ευρήματα.

5.5 Εφαρμογή της Διάταξης Μέτρησης Ροπής

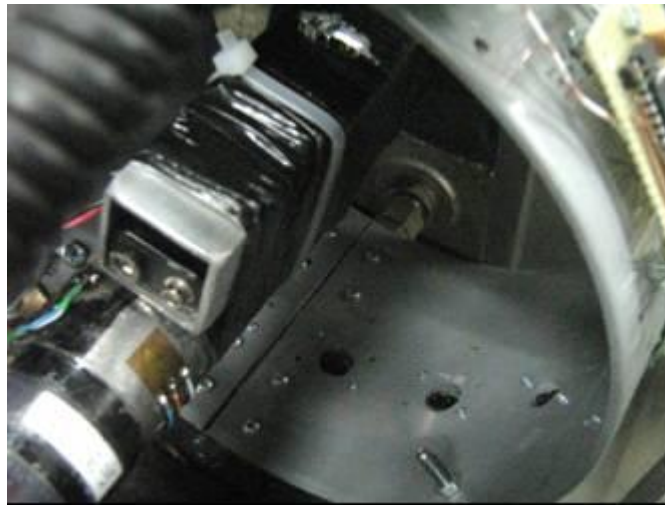
5.5.1 Εφαρμογή της διάταξης μέτρησης της ροπής στο εργαστήριο

Η συσκευή για την μέτρηση της στιγμιαίας και μέσης ροπής εγκαταστάθηκε στον τετράχρονο μονοκύλινδρο πρότυπο κινητήρα Diesel άμεσης έγχυσης φυσικής αναπνοής Ricardo Hydra που είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο MEK. Η περιγραφή του κινητήρα δίνεται στην παράγραφο 6.3.1. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε τρεις φάσεις.

Στην πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκε η τρίτη εξέλιξη (βλέπε σ. 151) της μονάδας μέτρησης και μετάδοσης, η οποία διέθετε δυο τελεστικούς rail to rail ενισχυτές και όχι τον προγραμματιζόμενο ενισχυτή. Η λήψη των μετρήσεων γινόταν με το πρωτότυπο της μονάδας λήψης. Πραγματοποιήθηκαν μόνο μετρήσεις ροπής. Ο σκοπός των μετρήσεων ήταν η αρχική διερεύνηση της ικανότητας μέτρησης της ροπής από την συσκευή που αναπτύχθηκε και ο εντοπισμός προβλημάτων και περιορισμών.



Εικόνα 5-13 Η μονάδα μετρήσης και μετάδοσης στερεωμένη πάνω στον άξονα και συνδεδεμένη με τον συρρωρευτή και την διάταξη των μκηνσιομέτρων (πρώτη φάση μετρήσεων)



Εικόνα 5-14 Η μονάδα μετρήσης και μετάδοσης στερεωμένη πάνω στον άξονα και συνδεδεμένη με τον συρρωρευτή και την διάταξη των μκηνσιομέτρων (δευτερη φάση μετρήσεων). Επίσης διακρίνεται η μονάδα λήψης μετρήσεων.



Εικόνα 5-15 Τα μκηνσιόμετρα εγκατεστημένα πάνω στον άξονα

Στην δεύτερη φάση χρησιμοποιήθηκε η τελική εκδοχή της μονάδας μέτρησης και μετάδοσης και το πρωτότυπο της μονάδας λήψης. Πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονες μετρήσεις της ροπής, της πίεσης του θαλάμου καύσης, του σήματος θέσης άνω νεκρού σημείου και του σήματος της ροπής που παράγει η δυναμοκυψέλη που είναι εγκαταστημένη στον βραχίονα της πέδης .

Πίνακ. 5-2 Το πρωτόκολλο των μετρήσεων και σύνοψη των αποτελεσμάτων

A/A	Στροφές Κινητήρα [σαλ]	Ονομαστική Ροπή ¹ [Nm]	Μετρούμενη Τάση ² [V]	Υπολογισμένη Ροπή ³ [Nm]	Απόκλιση ⁴ [%]	
1	004	800	-9.10	6.92E-04	-9.12	-0.18
2	006	1000	-9.64	6.99E-04	-9.57	0.73
3	010	1400	-9.68	6.99E-04	-9.62	0.60
4	012	1600	-10.05	7.06E-04	-10.05	0.00
5	015	1000	2.96	5.06E-04	2.91	1.69
6	016	1000	4.82	4.76E-04	4.88	-1.17
7	017	1000	4.78	4.78E-04	4.75	0.62
8	018	1000	6.65	4.51E-04	6.54	1.70
9	019	1000	6.65	4.50E-04	6.60	0.67
10	020	1000	3.03	5.03E-04	3.13	-3.08
11	021	800	8.90	4.10E-04	9.14	-2.59
12	022	800	9.27	4.09E-04	9.22	0.55
13	024	1000	9.10	4.12E-04	9.02	0.90
14	025	1000	9.04	4.13E-04	8.98	0.60
15	026	1200	9.27	4.10E-04	9.18	0.93
16	027	1200	9.12	4.12E-04	9.02	1.18
17	028	1400	9.01	4.12E-04	9.05	-0.42
18	029	1400	9.07	4.14E-04	8.94	1.47
19	031	1600	9.04	4.13E-04	8.97	0.77
20	032	1600	9.26	4.09E-04	9.26	0.00
21	033	1800	9.08	4.11E-04	9.11	-0.26
22	034	1800	9.03	4.10E-04	9.15	-1.24

¹ Η ροπή του κινητήρα υπολογισμένη από το σήμα της δυναμοκυψέλης που είναι εγκατεστημένη στο βραχίονα της πέδης

² Η τάση στην έξοδο της διάταξης των μηκυνσιόμετρων όπως μετρήθηκε από την συσκευή που προτείνεται

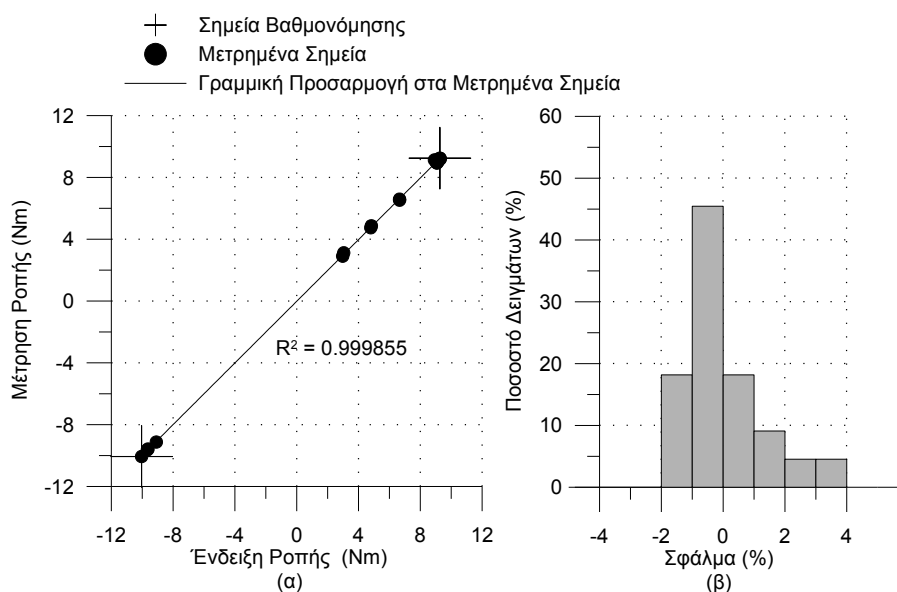
³ Η ροπή του κινητήρα υπολογισμένη από την μετρούμενη τάση μέσω των συντελεστών βαθμονόμησης.

⁴ Η απόκλιση της ροπής από την ροπή που υποδεικνύει η δυναμοκυψέλη.

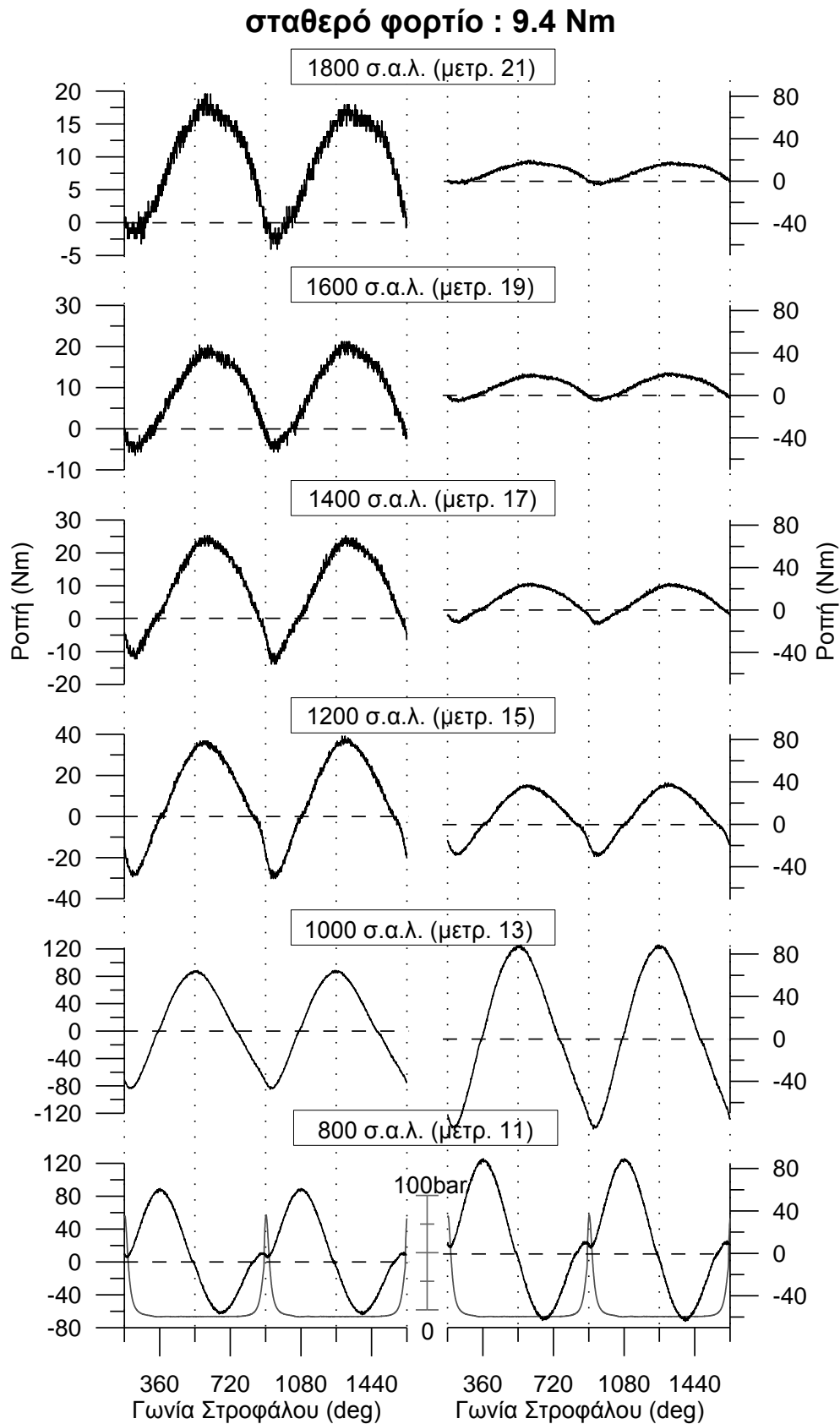
Στην τρίτη φάση χρησιμοποιήθηκε διάταξη ίδια με την προηγούμενη, αλλά δοκιμάστηκε διαφορετική διάταξη μηκυσιόμετρων. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκε η εφαρμογή δυο ζευγών μηκυσιόμετρων σε αντιδιαμετρικές θέσεις, με σκοπό να εξασφαλιστεί ότι δεν υφίσταται κάμψη του άξονα. Η δοκιμή αυτή δεν προσέφερε κάποιο αξιόλογο νέο εύρημα (το σήμα της στιγμιαίας ροπής είναι ίδιο με τις δυο διατάξεις μηκυσιομέτρων).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μετρήσεις της τρίτη φάσης μετρήσεων. Συνολικά ελήφθησαν 22 μετρήσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακ. 5-2. Στην τρίτη στήλη του πίνακα δίνεται η ροπή του κινητήρα όπως υπολογίστηκε από το σήμα ροπής που παρέχεται από τον πίνακα έλεγχου το οποίο προέρχεται από δυναμοκυψέλη εγκατεστημένη στον βραχίονα της πέδης. Από το ίδιο σήμα υπολογίζεται και η ένδειξη της ροπής στον πίνακα ελέγχου του κινητήρα. Όμως διαπιστώθηκε σημαντική απόκλιση των καταγεγραμμένων τιμών της ένδειξης του πίνακα ελέγχου από αυτές που υπολογίζονται από το πρωτογενές σήμα. Η απόκλιση έχει μέση τιμή -3% με μέγιστη -10%. Η απόκλιση μπορεί να οφείλεται είτε σε σφάλματα στην καταγραφή της ένδειξης είτε στον τρόπο υπολογισμού της, ο οποίος δεν είναι γνωστός, από τον πίνακα ελέγχου. Πάντως γενικά η ψηφιακή ένδειξη παρέχει μια υπερεκτίμηση.

Στην τέταρτη στήλη του πίνακα δίνεται η τάση στην έξοδο της διάταξης των μηκυσιόμετρων. Η τάση αυτή ενισχύθηκε, ψηφιοποιήθηκε, μεταδόθηκε ασύρματα, επανασυντέθηκε και εισήλθε στον υπολογιστή σε ψηφιακή μορφή μέσω της συσκευής που προτείνεται. Στην συνέχεια από τις παραμέτρους ενίσχυσης και ψηφιοποίησης υπολογίστηκε η αρχική τιμή τάσης.



Σχήμ. 5-9 (α) Σύγκριση μετρημένης ροπής με την ένδειξη της πέδης. (β) Κατανομή των σφαλμάτων μέτρησης.



Σχήμ. 5-10 Μετρημένο σήμα ροπής από την προτεινόμενη συσκευή, σε έξι ταχύτητες περιστροφής, σε σταθερό φορτίο. Οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν σε θέσεις ΑΝΣ. Στα δεξιά σχήματα η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων αλλάζει ενώ στην αριστερή παραμένει σταθερή.

Από τις τιμές των μετρήσεων 4 και 20, του Πίνακ. 5-2, υπολογίστηκαν οι συντελεστές βαθμονόμησης της εξίσωσης (5-13). Με βάση αυτούς τους συντελεστές υπολογίστηκε η ροπή των υπόλοιπων σημείων, στην πέμπτη στήλη του Πίνακ. 5-2. Ως προς την ονομαστική ροπή υπολογίστηκε το σφάλμα σε κάθε μέτρηση.

Στο Σχήμ. 5-9 (α) φαίνονται τα δύο σημεία βαθμονόμησης και τα υπόλοιπα μετρούμενα σημεία. Είναι φανερό ότι υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση της ροπής που εκτιμάται από την διάταξη που διαθέτει η πέδη και από την προτεινόμενη συσκευή. Στο Σχήμ. 5-9 (β) φαίνεται ότι το 63% των μετρούμενων δειγμάτων εμφανίζει σφάλμα μικρότερο από 1% (από -1% έως 1%). Το μέγιστο σφάλμα δεν ξεπερνάει το 3.1%.

Στα Σχήμ. 5-10 φαίνεται η στιγμιαία ροπή όπως μετρήθηκε από την προτεινόμενη συσκευή για σταθερό μέσο φορτίο. Αρχικά παρατηρούμε ότι η μορφή της ροπής είναι όμοια για όλες τις ταχύτητες περιστροφής εκτός από το σήμα στις πολύ χαμηλές στροφές στο οποίο υπάρχει μια μετατόπιση. Γενικά υπάρχει πτωτική τάση της ροπής μέχρι την έναυση. Εκεί η ροπή αρχίζει να αυξάνει μέχρι και λίγο μετά το επόμενο άνω νεκρό σημείο, όπου ξεκινάει πάλι η πτωτική της τάση. Στην πολύ χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, εκτός από την μετατόπιση παρατηρείται μια παύση της αυξητικής τάσης στα τελευταία στάδια της συμπίεσης, γεγονός που θεωρείται απολύτως λογικό.

Όσον αφορά στη σχέση της στιγμιαίας ροπής με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα παρατηρούμε ότι με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μειώνεται δραστικά η διακύμανση της ροπής στη διάρκεια του κύκλου. Στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, η ροπή έχει τέτοια διακύμανση, που, στο μισό περίπου κύκλο ο κινητήρας ακολουθεί την πέδη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο κινητήρας επιβραδύνει σημαντικά κατά τη διάρκεια της συμπίεσης λόγω του μονοκύλινδρου χαρακτήρα του κινητήρα. Έτσι, η πέδη που περιστρέφεται πιο γρήγορα επιβραδύνεται από τον κινητήρα με αποτέλεσμα την αρνητική ροπή. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής τόσο μειώνεται η διακύμανση της τιμής της ροπής.

5.5.2 Εφαρμογή της διάταξης μέτρησης της ροπής σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής

5.5.2.1 Συνοπτική περιγραφή του κινητήρα

Για την διερεύνηση της ικανότητας της συσκευής που αναπτύχθηκε να μετράει την στιγμιαία και μέση ροπή σε περιβάλλον κανονικής λειτουργίας κινητήρα μεγάλης κλίμακας, διενεργήθηκαν δοκιμές σε μονάδα

ηλεκτροπαραγωγής σε Ελληνικό νησί σε κινητήρα τύπου 9RTAF58 ονομαστικής ισχύος συνεχούς λειτουργίας 11MW.



Εικόνα 5-16 Κινητήρας 9RTAF58 ονομαστικής ισχύος 11MW, όπου εγκαταστάθηκε η συσκευή μέτρησης της ροπής.

Ο κινητήρας (Εικόνα 5-16) έχει 9 κυλίνδρους, ανήκει στην οικογένεια RTA, λειτουργεί σε σταθερές στροφές (χαρακτηριστικό F) και έχει διάμετρο εμβόλου 580mm. Είναι κατασκευής του 1988 της εταιρίας Cegielski βασιζόμενος σε τεχνολογία της εταιρίας Sulzer. Οι 9 κύλινδροι είναι διατεταγμένοι σε σειρά, με σύστημα ροής κατά μία διεύθυνση (διαμήκους αποπλύσεως), με βαλβίδα στην κεφαλή και με υπερπληρωτές που λειτουργούν με σύστημα σταθερής πίεσης. Ο αέρας σάρωσης ψύχεται με χρήση νερού θαλάσσης (μέσω εναλλάκτη γλυκού νερού) και εισέρχεται στους κυλίνδρους μέσω ανεπίστροφων βαλβίδων, όταν το έμβολο βρίσκεται κοντά στο ΚΝΣ. Στα χαμηλά φορτία τον αέρα συμπληρώνουν βοηθητικοί ηλεκτροκίνητοι φυσητήρες ανεξάρτητης κίνησης. Οι βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν υδραυλικά και οι κύλινδροι συνδέονται με τη βάση της μηχανής με εντατήρες κοχλίες. Οι κεφαλές, τα χιτώνια και τα έμβολα ψύχονται με γλυκό νερό. Οι αντλίες λαδιού και νερού είναι ανεξάρτητης κίνησης ενώ ο εκκεντροφόρος κινείται από τον στροφαλοφόρο. Ο κινητήρας ξεκινάει με αέρα πίεσεως, που ανοίγει τις βαλβίδες αέρα των κυλίνδρων, μέσω διανομέα.

Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα 9RTAF58 είναι η μέγιστη ισχύς του που ανέρχεται στα 12700 KW, η (σταθερή) ταχύτητα

περιστροφής του των 125 RPM και ο γεωμετρικός βαθμός συμπίεσεως που ισούται με $C.R.=19$. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (bsfc) στο πλήρες φορτίο ανέρχεται στα 182 g/kWh περίπου. Η μέση ενδεικνύμενη πίεση (bmep) έχει τιμή ~15.1 bar, ενώ η μέγιστη πίεση καύσεως στον κύλινδρο ανέρχεται στα 135 bar.

5.5.2.2 Προετοιμασία της μέτρησης

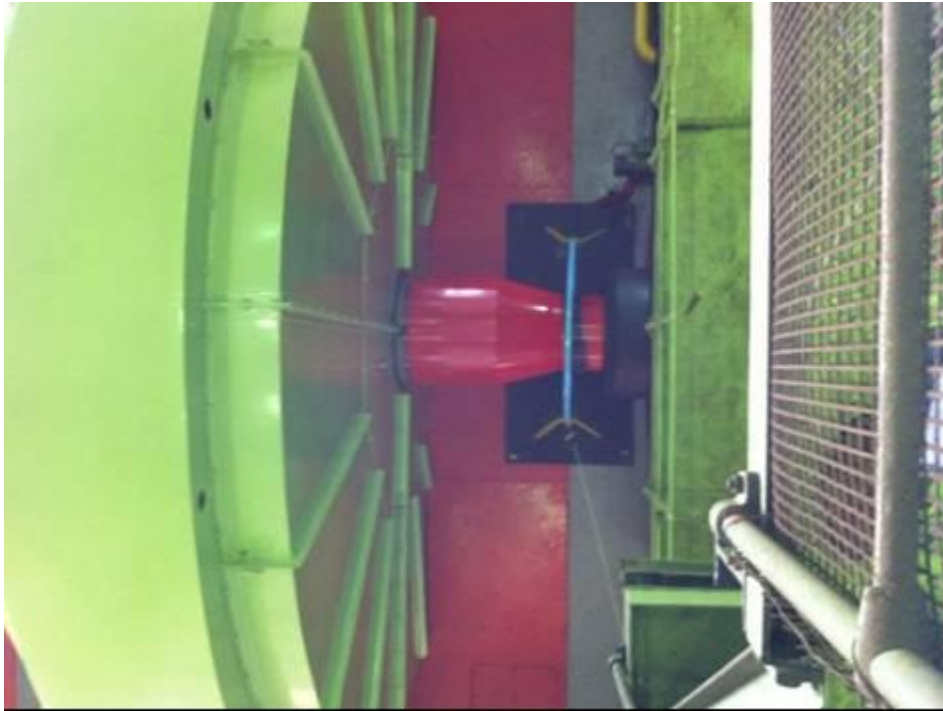
Για την δοκιμή της συσκευής, προσαρμόστηκαν μηκυνσιόμετρα στον άξονα σύνδεσης του κινητήρα με την γεννήτρια μετά από ειδική προεργασία της επιφάνειας [5.18]. Στη συνέχεια συνδέθηκαν μεταξύ τους και με την μονάδα μέτρησης και μετάδοσης η οποία στερεώθηκε στον άξονα με ταινία πρόσδεσης. Η εγκατάσταση έγινε ώστε να είναι δυνατή η εύκολη απεγκατάσταση μετά το πέρας των δοκιμών. Στην Εικόνα 5-17 διακρίνονται τα μηκυνσιόμετρα και η μονάδα μέτρησης και μετάδοσης επάνω στον άξονα.



Εικόνα 5-17 Ο άξονας του κινητήρα στον οποίο εγκαταστάθηκε η διάταξη μέτρησης της ροπής. Επίσης διακρίνονται η μονάδα μέτρησης και μετάδοσης, στερεωμένη με υφασμάτινη ταινία και μέρος της στεφάνης (γαλάζιο) της μονάδας λήψης μετρήσεων. Στην λεπτομέρεια δεξιά διακρίνεται η διάταξη των μηκυνσιόμετρων.

Στην συνέχεια τοποθετήθηκε η στεφάνη με τους πομποδέκτες και τις υπόλοιπες ηλεκτρονικές διατάξεις. Στην Εικόνα 5-18 διακρίνεται ο άξονας που συνδέει τον κινητήρα (δεξιά) με την πέδη (αριστερά) και η στεφάνη. Τα καλώδια οδηγήθηκαν στον χώρο μπροστά από τις κυλινδροκεφαλές. Ο κινητήρας τέθηκε σε λειτουργία 4 ώρες μετά την προσαρμογή των μηκυνσιόμετρων και οι μετρήσεις ελήφθησαν 14 ώρες αργότερα. Από τις προδιαγραφές του υλικού συγκόλλησης προβλέπεται πολύ μικρότερος χρόνος συγκόλλησης. Για εφαρμογή σε χάλυβα με θερμοκρασία 20° C και υγρασία περιβάλλοντος μέχρι 65% ο χρόνος

σκλήρυνσης είναι 120 sec ενώ μετά από πρόσθετο διάστημα 10 λεπτών μπορούν να ληφθούν μετρήσεις [5.6].



Εικόνα 5-18 Η συσκευή μέτρησης της ροπής εγκατεστημένη ανάμεσα στον κινητήρα και την γεννήτρια (δεξιά και αριστερά, αντίστοιχα).

5.5.2.3 Μετρητική διαδικασία και βαθμονόμηση

Ελήφθησαν δυο μεμονωμένες μετρήσεις για τους σκοπούς της βαθμονόμησης. Ενώ λαμβανόταν μέτρηση της ροπής διάρκειας δυο λεπτών, καταγράφηκε από την αίθουσα ελέγχου η ηλεκτρική ισχύς. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε σε δυο φορτία, 3.1MW και 7.4MW. Από την ηλεκτρική ισχύ, μέσω του βαθμού απόδοσης της γεννήτριας, υπολογίστηκε η ισχύς του κινητήρα και τελικά η μέση ροπή στρέψης (Εξ.(5-12)). Στην συνέχεια, από τον μέσο όρο της ηλεκτρικής τάσης των μηκυνσιομέτρων και την ροπή, για τα δύο φορτία, υπολογίστηκαν οι συντελεστές βαθμονόμησης της εξίσωσης (5-13).

Επιπλέον ελήφθησαν σύνολα των 8 μετρήσεων, σε χαμηλό φορτίο περίπου 4MW και σε υψηλό φορτίο, περίπου 9MW. Κάθε ένα σύνολο αποτελείται από:

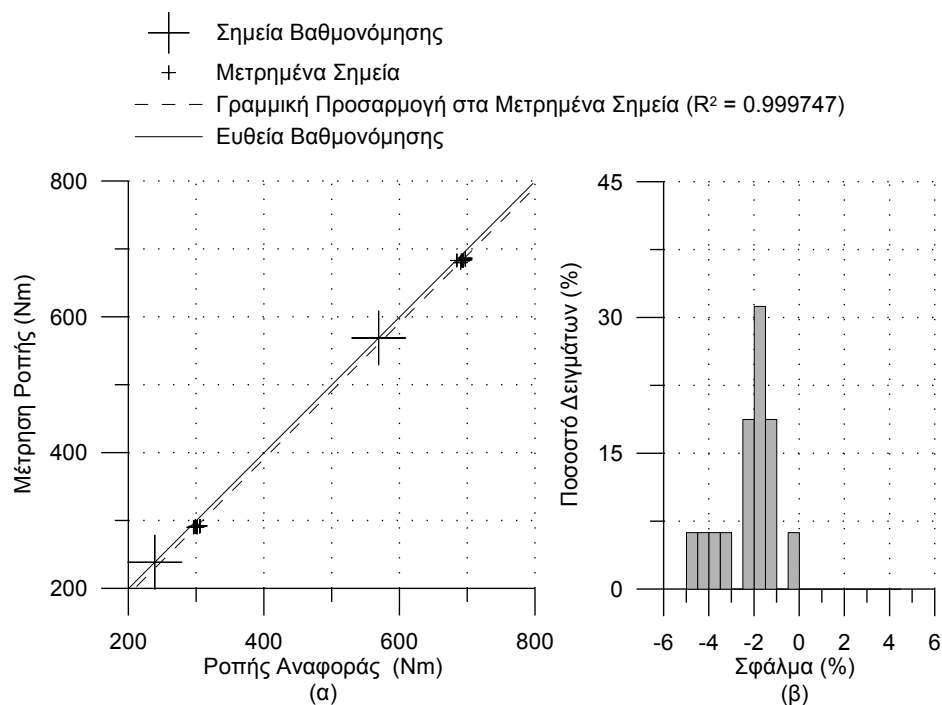
1. την μέτρηση της ροπής που έγινε με την συσκευή μέτρησης της ροπής και
2. μέτρηση με αναλογοψηφιακό μετατροπέα όπου μετρήθηκαν:
 - i. η πίεση του κυλίνδρου No. 1
 - ii. διαδοχικά, η πίεση των κυλίνδρων 2 έως 9.
 - iii. Σήμα για τον συγχρονισμό με τις μετρήσεις της ροπής.

Το ωφέλιμο τμήμα κάθε μέτρησης (ταυτόχρονο από τις δυο πηγές) περιελάμβανε 9 ακέραιους κύκλους λειτουργίας. Η δειγματοληψία ήταν 0.25 μοίρες γωνίας στροφάλου για τα διαγράμματα της πίεσης και 0.5 μοίρες για την ροπή στρέψης.

5.5.2.4 Εκτίμηση της μέσης ροπής

Εφαρμόζοντας τους συντελεστές βαθμονόμησης μέσω της εξίσωσης (5-13), υπολογίστηκε η στιγμιαία ροπή από το πρωτογενές σήμα της μέτρησης, που είναι η τάση στην έξοδο της διάταξης των μηχανομετρών, για κάθε μια από τις 8 μετρήσεις του κάθε ενός συνόλου. Από την στιγμιαία ροπή υπολογίστηκε η μέση τιμή της για κάθε μέτρηση. Επιπλέον από τις μετρήσεις της πίεσης του κυλίνδρου Νο.1 εκτιμήθηκε η ισχύς και η μέση ροπή.

Στο Σχήμ. 5-11(α) φαίνεται η μετρομημένη τιμή της μέσης ροπής και η αντίστοιχη τιμή που εκτιμήθηκε από τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα για τις 16 μετρήσεις.



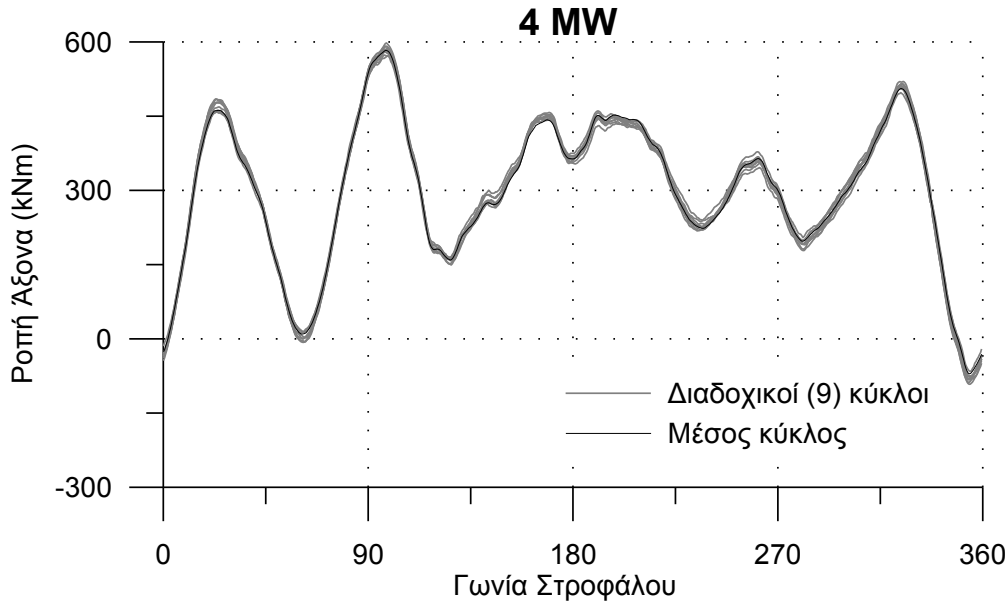
Σχήμ. 5-11 (α) Σύγκριση μετρομημένης ροπής με την αντίστοιχη που προκύπτει από τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα (ροπή αναφοράς). (β) Τα σφάλματα των μετρήσεων.

Παρατηρείται μια μικρή απόκλιση της ευθείας της βαθμονόμησης από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων των μετρομημένων σημείων. Όμως η κλίση των δυο ευθειών είναι ίδια. Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι υπάρχει μια μετατόπιση που είναι δυνατόν να οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο εκτίμησης της ισχύος στη διάρκεια της βαθμονόμησης.

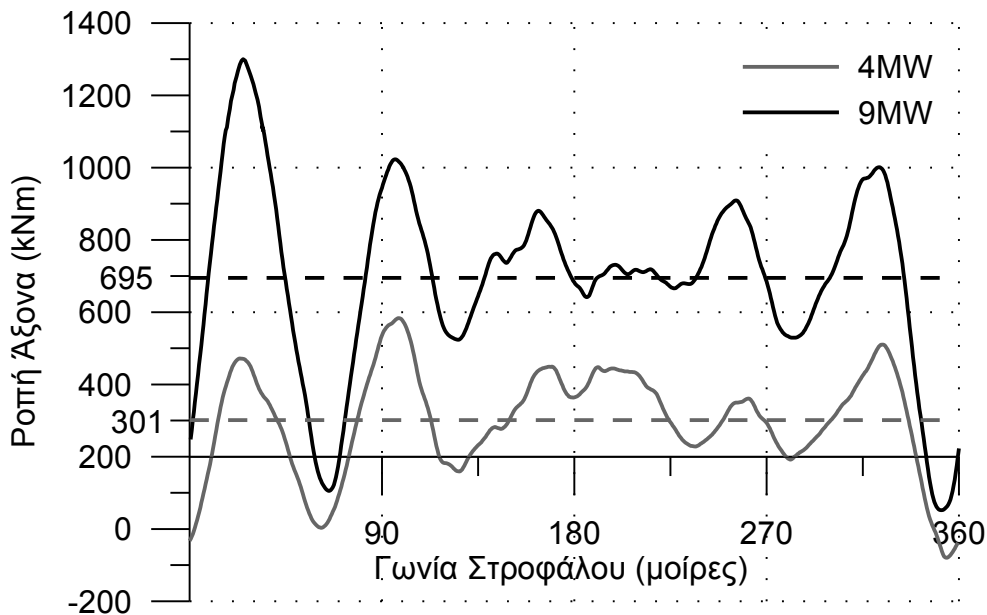
Το σφάλμα κυμαίνεται από -4.5% έως -0.2%. Από το Σχήμ. 5-11(β) προκύπτει ότι το 70% των μετρήσεων εμφανίζει σφάλμα από -2.5% έως -1.5%.

Το σφάλμα κατανέμεται γύρω από την τιμή -2.5% και όχι γύρω από το 0% που φανερώνει την ύπαρξη σταθερής μετατόπισης.

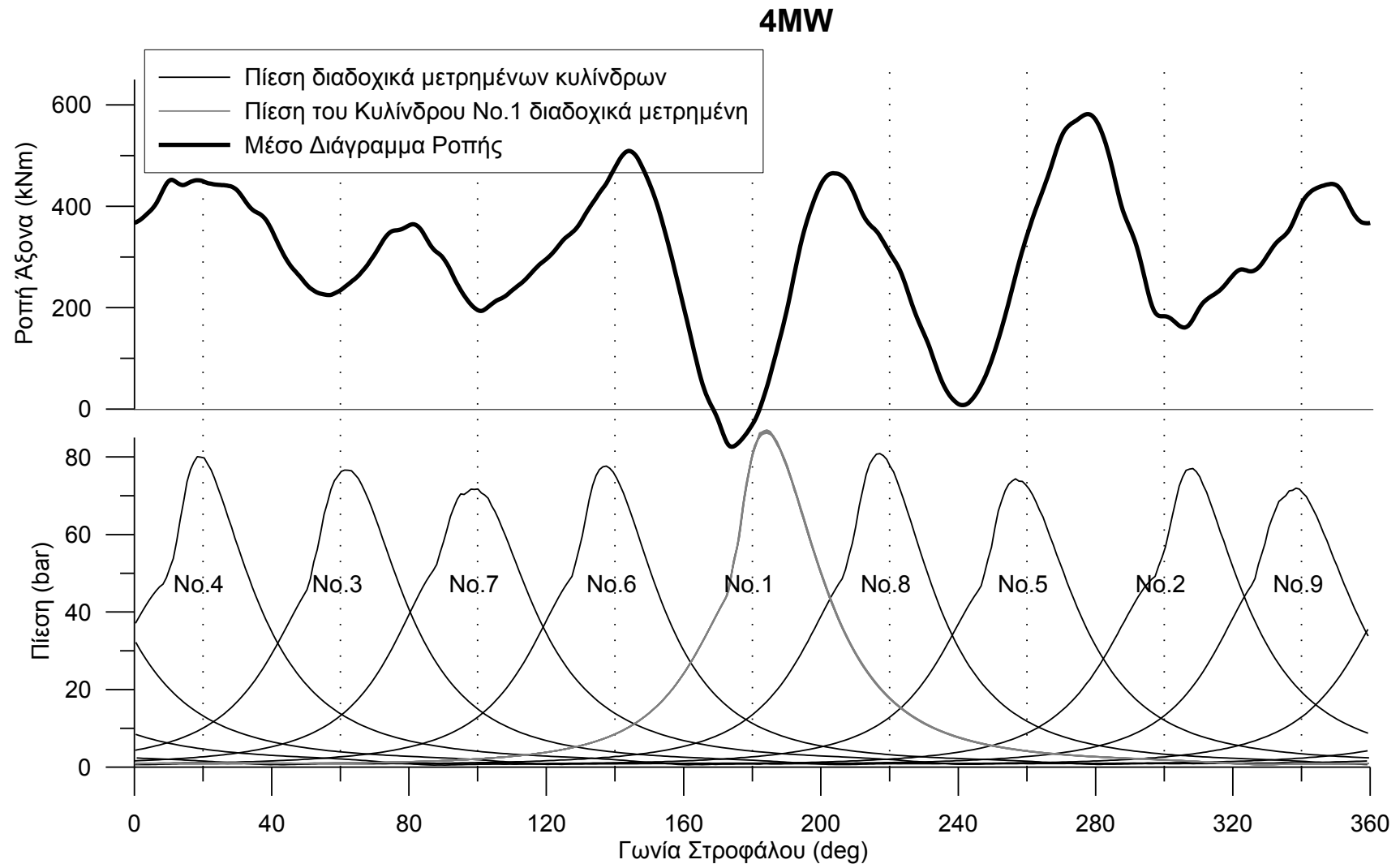
5.5.2.5 Εκτίμηση Στιγμαίας Ροπής



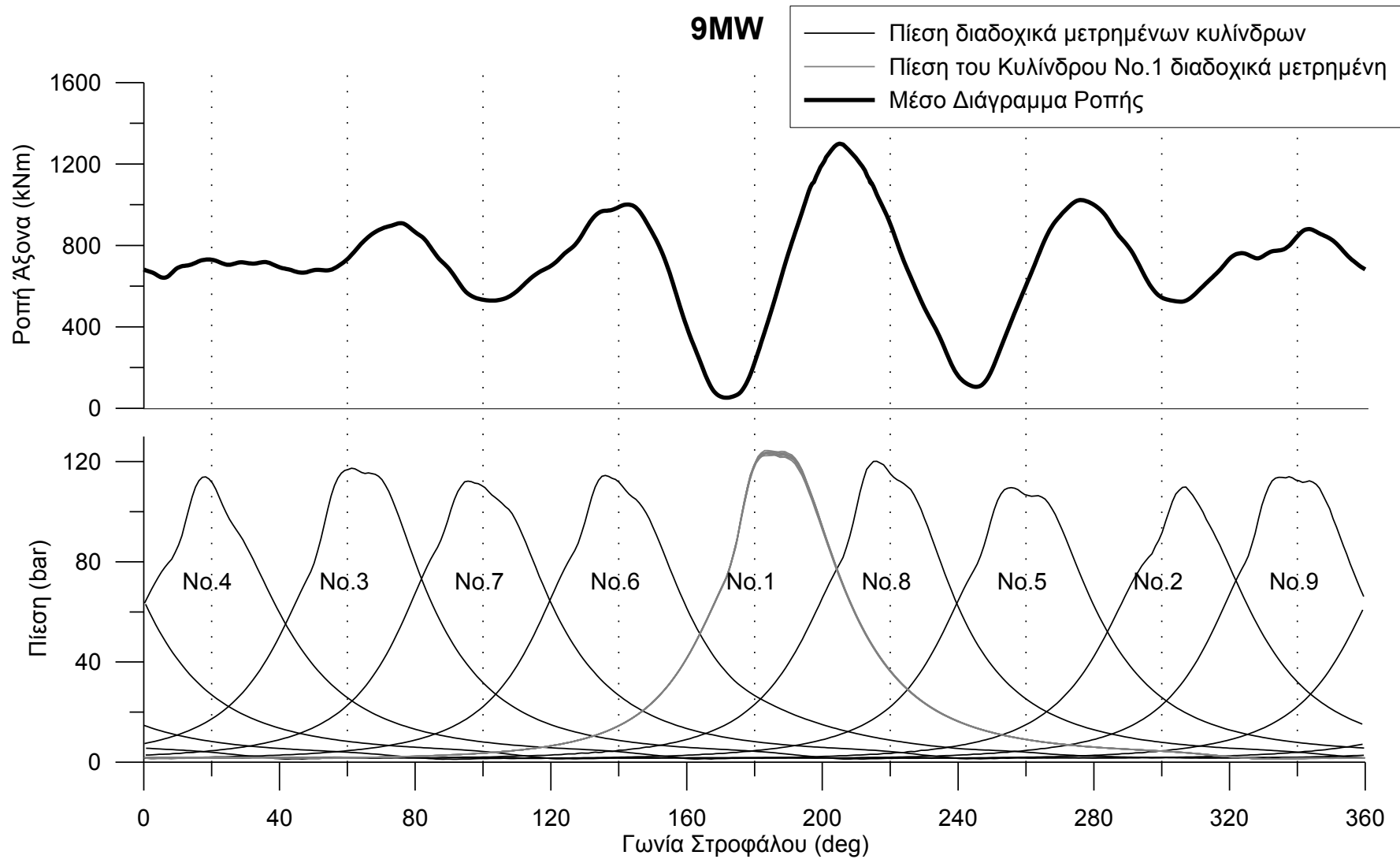
Σχήμ. 5-12 Μέση στιγμιαία ροπή, εννέα διαδοχικών κύκλων. Παρατηρείται πολύ καλή επαναληψιμότητα από κύκλο σε κύκλο.



Σχήμ. 5-13 Μέση στιγμιαία ροπή (στην διάρκεια του κύκλου) στα δυο φορτία που εξετάστηκαν, 4MW και 9MW.



Σχήμ. 5-14 Ροπή του άξονα και τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα των κυλίνδρων σε κοινή αναφορά γωνίας στροφάλου (φορτίο των 4MW)



Σχήμ. 5-15 Ροπή του άξονα και τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα των κυλίνδρων σε κοινή αναφορά γωνίας στροφάλου (φορτίο των 9MW)

Στο Σχήμ. 5-12 με τις γκρι γραμμές απεικονίζονται 9 διαδοχικοί κύκλοι μετρημένης ροπής στο φορτίο των 4MW. Με την μαύρη γραμμή δίνεται ο μέσος κύκλος. Παρατηρείται πολύ καλή επαναληψιμότητα από κύκλο σε κύκλο.

Στο Σχήμ. 5-13 αντιπαραβάλλονται τα διαγράμματα της ροπής στα δύο φορτία που εξετάστηκαν. Παρατηρείται ότι εκτός από την ένταση, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του σήματος δεν μεταβάλλονται σημαντικά.

Στα Σχήμ. 5-14 και Σχήμ. 5-15 παρουσιάζονται σε κοινό άξονα τετμημένων η ροπή στρέψης και οι πιέσεις των κυλίνδρων. Για την στοίχιση των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων των κυλίνδρων χρησιμοποιήθηκε ως κοινή αναφορά το διάγραμμα του κυλίνδρου Νο. 1 το οποίο μετρούνταν ταυτόχρονα με κάθε έναν από τους υπόλοιπους κυλίνδρους. Η απόλυτη σύμπτωση των 8 μετρήσεων του ίδιου κυλίνδρου (Νο1 - γκρι γραμμές), αποτελεί ένδειξη ότι η εκτίμηση του ΑΝΣ είναι ακριβής και για τις 8 μετρήσεις και συνεπώς οι σχετικές θέσεις των υπόλοιπων κυλίνδρων είναι επίσης ακριβείς. Οι αποκλίσεις των υπόλοιπων κυλίνδρων από το ΑΝΣ οφείλονται σε μόνιμη στρέβλωση που έχει υποστεί ο στροφαλοφόρος άξονας η οποία προκλήθηκε από βλάβη του κινητήρα. Στον Πίνακ. 5-3 δίνονται οι αντίστοιχες τιμές απόκλισης του κάθε κυλίνδρου από το ΑΝΣ.

Πίνακ. 5-3 Θέσεις ΑΝΣ των κυλίνδρων, και οι αποστάσεις διαδοχικών θέσεων ΑΝΣ

Αριθμός Κυλίνδρου	Θέση ΑΝΣ (deg)	Απόσταση από ΑΝΣ προηγούμενου κυλίνδρου (deg)
4	11.3	40.2
3	56.4	45.1
7	91.4	35.0
8	131.7	40.3
1	180.0	48.3
8	210.8	30.8
5	251.5	40.7
2	299.4	47.9
9	331.1	31.7

5.6 Ορολογία και Συμβολισμοί

Λατινικά Σύμβολα

c	Σταθερές βαθμονόμησης (-)
d	Μεταβολή μεγέθους
E	Μέτρο ελαστικότητας (N/m ²)

J	Ροπή αδράνειας (kg/m^2)
k	Συντελεστής αναλογίας μηκυνσιομέτρων (-)
l	Μήκος (m)
N	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)
P	Ισχύς (W)
R	Ηλεκτρική αντίσταση (Ω)
T	Ροπή (Nm)
V	Ηλεκτρική τάση (V)

Ελληνικά Σύμβολα

ε	Ορθή ανηγμένη παραμόρφωση (τροπή, strain) (χωρίς μονάδα ή $\mu\text{m/m}$)
ν	Λόγος Poisson (-)
ρ	Ειδική αντίσταση (Ωm)
σ	Ορθή τάση (N/m^2)

Δείκτες

0	Αρχική τιμή
s	Μετρήσιμο σήμα

Συντομεύσεις

bme _p	Brake mean effective pressure
bsfc	Brake specific fuel consumption
CR	Compression ratio
LSB	Least significant bit
rpm	Στροφές ανα λεπτό (revolutions per minute)
TTL	Transistor–transistor logic
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
ΑΝΣ	Άνω νεκρό σημείο
ΚΝΣ	Κάτω Νεκρό Σημείο

5.7 Βιβλιογραφία

- [5.1] Serway, R. A. and Jewett, Jr. J. W. (2003). Physics for Scientists and Engineers. 6th Ed. Brooks Cole
- [5.2] Hooke, Robert: De potentia restitutiva. London 1678.
- [5.3] W. Tomson, On the electrodynamic qualities of metals, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1856
- [5.4] An Introduction to Measurements using Strain Gages, Karl Hoffman, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt 1989
- [5.5] Y series strain gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt 2006

- [5.6] Z70: Instructions for use, Datasheet, HMB, Darmstadt, Germany, 2009
- [5.7] Sirak, Ya. M. et al, Choice of the material for production of a ship propeller shaft, Materials Science, Springer New York, 1985, 20(6)
- [5.8] Elastic Properties and Young Modulus for some Materials". The Engineering ToolBox. Retrieved 2012-01-06.
- [5.9] Wheatstone, Charles: An Account of several new Instruments and Processes for determining the Constants of a Voltaic Circuit. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1843.
- [5.10] ASM Handbook Volume 01: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International Handbook Committee,ASM International, 2006
- [5.11] Σιμόπουλος Σ.Ε. Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών, Β' Έκδοση, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1989
- [5.12] Jerry Luecke, Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications, Newnes- Elsevier, Massachusetts, USA, 2005
- [5.13] The Art of Electronics, Paul Horowitz, Wienfield Hill, Cambridge University Press, 1989
- [5.14] Henry W. Ott, Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, Wiley & Sons, 1988
- [5.15] Henry W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, Wiley & Sons, 2009
- [5.16] 8-bit AVR Instructions Set, Rev. 0856I-AVR-07/10, Atmel Corporation, 2010
- [5.17] Knutson, C.D.,Brown, J.M., IrDA Principles and Protocols: The IrDA Library, MCL Press, 2004
- [5.18] Practical hints for installation of strain gages, Karl Hoffman, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt 1996

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Η ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΣΑΝ ΠΗΓΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ

Για τους σκοπούς της διάγνωσης είναι αναγκαίο να μετρηθούν κάποια μεγέθη κατά την λειτουργία του κινητήρα. Η διακύμανση μερικών εξ' αυτών μετράται και στη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας. Επειδή οι περισσότεροι υπολογισμοί που αφορούν στον κινητήρα γίνονται με αναφορά στην γωνία στροφάλου και όχι στον χρόνο, το κάθε μετρημένο σημείο πρέπει να έχει γνωστή αντιστοίχιση με τη γωνία στροφάλου. Για να συμβεί όμως αυτό πρέπει να υπάρχει αναφορά γωνίας στροφάλου (συνήθως αναφορά άνω νεκρού σημείου) και επιπλέον οι μετρήσεις να έχουν ληφθεί με γνωστό βήμα γωνίας στροφάλου. Αυτό προϋποθέτει την χρήση κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου, η τοποθέτηση του οποίου είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αν όχι αδύνατη σε κινητήρες πραγματικής λειτουργίας. Η πλέον διαδεδομένη λύση είναι η μέτρηση με χρονική δειγματοληψία και η μετέπειτα αναγωγή του χρόνου της σε γωνία στροφάλου. Αυτή η αναγωγή συνηθίζεται να γίνεται γραμμικά [6.1]. Όμως στην περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται στη διάρκεια του κύκλου η γραμμική αναγωγή προκαλεί την εισαγωγή σφάλματος στην εκτίμηση της πραγματικής γωνίας στροφάλου.

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται, πειραματικά και υπολογιστικά, το σφάλμα στην δειγματοληψία της πίεσης καύσης σαν αποτέλεσμα της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια μετρήσεων με σταθερό βήμα χρόνου.

Αρχικά παρουσιάζονται οι αρχές και οι υφιστάμενοι μέθοδοι για την μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής και προτείνεται νέα πρωτότυπη συσκευή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής.

Στην συνέχεια προτείνεται μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τον συσχετισμό των δυο τύπων μετρήσεων δηλαδή την μέτρηση με σταθερό βήμα χρόνου και την μέτρηση με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου, μέσω της ταχύτητας περιστροφής. Η μεθοδολογία αρχικά χρησιμοποιείται για την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση του πρωτογενούς σφάλματος. Επιπλέον, λόγω της διαθεσιμότητας και των δύο τύπων μετρήσεων καθίστανται δυνατή η επιβεβαίωση της ορθότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας συσχετισμού.

Ακολούθως διερευνάται και χαρτογραφείται το σφάλμα και η επίδραση του στη πίεση καύσης και τα παράγωγα μεγέθη (ενδεικνύμενη ισχύς, ενδεικνύμενη πίεση καύσης, ρυθμός καύσης) για μονοκύλινδρο κινητήρα ο οποίος παρουσιάζει αυξημένη διακύμανση ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου. Στην συνέχεια προτείνονται και αξιολογούνται τρεις ημι-εμπειρικές

μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για την διόρθωση του σφάλματος που προκύπτει από τη διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου.

Επίσης παρουσιάζεται συσχετισμός του σφάλματος εκτίμησης της ισχύος με το φορτίο και την ταχύτητα περιστροφής σε κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής και ναυτικούς κινητήρες. Όπως προκύπτει ο συσχετισμός είναι γραμμικός και φανερώνει ότι ένας συντελεστής διόρθωσης του σφάλματος, βαθμονομημένος σε δύο σημεία λειτουργίας, είναι ικανός να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια για διαγνωστικές εφαρμογές.

6.1 Αρχές, μέθοδοι και εξοπλισμός μέτρησης γωνιακής ταχύτητας

Η μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής είναι ένα γενικό θέμα με πληθώρα εφαρμογών στον κινητήρα Diesel σχετικά με τον έλεγχο [6.2], την επιτήρηση [6.3] και την διάγνωση [6.4].

Μετά από μια σύντομη περιγραφή των αρχών μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας, γίνεται μια ανασκόπηση των μεθόδων μέτρησης που προσδιορίζουν την θέση της μεθόδου που αναπτύχθηκε στη παρούσα διατριβή και παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

6.1.1 Βασικές αρχές της μέτρησης της στιγμιαίας γωνιακής ταχύτητας

Η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα ορίζεται ως η γωνία περιστροφής του άξονα, $\Delta\varphi$, που πραγματοποιήθηκε σε χρόνο, Δt , προς τον χρόνο αυτό:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (6-1)$$

Από την παραπάνω εξίσωση που περιγράφει την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής φαίνεται πως η βάση της μέτρησης μπορεί να είναι είτε ο χρόνος (μέτρηση γωνίας σε γνωστά διαστήματα χρόνου) είτε η γωνία περιστροφής (μέτρηση χρόνου που αντιστοιχεί σε γνωστή γωνία περιστροφής). Η μέτρηση που περιγράφεται στη παρούσα εργασία, έγινε με βάση αναφοράς την γωνία στροφάλου και όχι τον χρόνο.

Η μέτρηση της στιγμιαίας γωνιακής ταχύτητας γίνεται συνήθως με την χρήση συσκευής που παράγει παλμούς ανά τακτά και ίσα διαστήματα περιστροφής, όπως είναι ο οπτικός κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου ή μαγνητικός λήπτης (pick up). Για M ισαπέχοντα διαστήματα, η μονάδα περιστροφής, η διακριτική ικανότητα του αισθητήρα, είναι $\Delta\varphi=2\pi/M$ (rad). Η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται μετρώντας τον χρόνο Δt κάθε μονάδας περιστροφής. Αν χρησιμοποιηθεί ένας μικροελεγκτής για την μέτρηση

της διάρκειας Δt , τότε αυτή υπολογίζεται από την συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή f_c και τον αριθμό των κύκλων επεξεργασίας, n_c , που μεσολάβησαν από την αρχή ως το τέλος της μέτρησης (κάθε κύκλος επεξεργασίας διαρκεί $1/f_c$ sec). Τελικά η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής N , εκφρασμένη σε περιστροφές ανά λεπτό (rpm) είναι:

$$N = \frac{60 \cdot f_c}{n_c \cdot M} \quad (6-2)$$

Οι τεχνικές μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες: μέθοδοι βασισμένες σε ρολόι/ μετρητή και μέθοδοι βασισμένες σε αναλογιοψηφιακή μετατροπή. [6.5]. Οι πρώτες χειρίζονται το σήμα του κωδικοποιητή γωνίας σαν έναν συρμό παλμών που ενεργοποιεί τη δραστηριότητα του ρολογιού/μετρητή. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε αναλογιοψηφιακή μετατροπή, είναι αμιγώς υπολογιστικές και εξάγουν την ταχύτητα περιστροφής μέσω της επεξεργασίας του ψηφιοποιημένου σήματος.

6.1.2 Μέθοδοι βασισμένες σε ρολόι/ μετρητή

Η λογική μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας μπορεί να βασίζεται είτε στην μέτρηση παλμών σε ένα προδιαγεγραμμένο διάστημα χρόνου είτε στην μέτρηση της χρονικής διάρκειας των παλμών. Με βάση αυτές τις δυο βασικές λογικές έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

6.1.2.1 Μέτρηση χρόνου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς παλμούς.

Η μέτρηση του χρόνου ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς παλμούς μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας δυο βασικές λειτουργίες: μια υπηρεσία διακοπής (interrupt service) και ένα ρολόι [6.6]. Ο παλμός του κωδικοποιητή χρησιμοποιείται σαν σήμα διακοπής. Όταν συμβεί μια αύξουσα ακμή του σήματος, η υπηρεσία διακοπής ενεργοποιείται. Στην συνέχεια η λειτουργία μπορεί να διαφοροποιηθεί με δυο τρόπους:

Η **πρώτη παραλλαγή** είναι η χρήση της αύξουσας ακμής για την ανάγνωση της τιμής του ρολογιού και κατόπιν το μηδενισμό του. Η υπηρεσία διακοπής θα εκτελέσει διαδοχικά τις ακόλουθες ενέργειες:

- ◆ απενεργοποίηση υπηρεσιών διακοπής,
- ◆ απενεργοποίηση ρολογιού,
- ◆ ανάγνωση τιμής ρολογιού,
- ◆ εκ νέου ενεργοποίηση ρολογιού, και τέλος
- ◆ ενεργοποίηση υπηρεσίας διακοπής.

Στην **δεύτερη παραλλαγή** ακολουθείται η ίδια διαδικασία, με την διαφορά ότι δεν μηδενίζεται το ρολόι. Έτσι ο χρόνος του παλμού της ταχύτητας προκύπτει από την διαφορά της νέας από την προηγούμενη τιμή. Με αυτόν τον τρόπο απαιτούνται λιγότερες ενέργειες κατά την υπηρεσία διακοπής, αλλά είναι απαραίτητος ο έλεγχος για υπερχείλιση του ρολογιού. Η υπηρεσία διακοπής καθυστερεί για κάποιο χρόνο, ο οποίος μπορεί είτε να συνεκτιμηθεί είτε να αγνοηθεί αν θεωρηθεί μικρός [6.5]. Η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να μετρηθεί με αυτήν την μέθοδο εξαρτάται από την συχνότητα λειτουργίας του ρολογιού, f_c . Η ακρίβεια εξαρτάται από τον λόγο χρόνου καθυστέρησης της υπηρεσίας διακοπής προς το συνολικό χρόνο του παλμού και από το χρονικό βήμα του ρολογιού (που είναι αντίστροφο της συχνότητας). Η ελάχιστη ταχύτητα που μπορεί να μετρηθεί εξαρτάται από τον συνδυασμό της συχνότητας, f_c και της χωρητικότητας (σε bits) του ρολογιού.

6.1.2.2 Μέτρηση παλμών σε προκαθορισμένο χρόνο

Σε κάποια αύξουσα ακμή ενεργοποιείται ταυτόχρονα ένας μετρητής και ένα ρολόι. Ο μετρητής μετρά αύξουσες ακμές. Μια υπηρεσία διακοπής διακόπτει την μέτρηση του μετρητή όταν το ρολόι φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή. Η ταχύτητα του διαστήματος ισούται με το αριθμό των μετρημένων παλμών προς τον προδιαγεγραμμένο χρόνο. Στην επόμενη αύξουσα ακμή ενεργοποιούνται εκ νέου το ρολόι και ο μετρητής. Η μέθοδος αυτή παρέχει χαμηλή ακρίβεια καθώς μπορεί να χαθεί μέχρι και ένας παλμός στην περίπτωση που το ρολόι σταματήσει κατά ένα κύκλο λειτουργία νωρίτερα από μια αύξουσα ακμή.

6.1.2.3 Συνδυασμένη μέθοδος

Η συνδυασμένη μέθοδος [6.7, 6.8, 6.9] χρησιμοποιεί συνδυαστικά την μέτρηση του χρόνου που μεσολαβεί ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς παλμούς και την μέτρηση παλμών σε προδιαγεγραμμένο χρόνο. Συγκεκριμένα ένας μετρητής και ένα ρολόι ενεργοποιούνται ταυτόχρονα. Όταν το ρολόι φτάσει την προκαθορισμένη τιμή, αναμένεται μια αύξουσα ακμή. Όταν αυτή ανιχνευθεί χρησιμοποιείται ο αριθμός των παλμών που μεσολάβησαν και ο νέος χρόνος του ρολογιού. Η μέθοδος αυτή βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια της προηγούμενης. Το μειονέκτημα είναι ότι δεν παρέχει την απαιτούμενη ανάλυση στη διάρκεια του κύκλου, γιατί υπολογίζει μέσο όρο ταχύτητας περιστροφής από διαδοχικούς παλμούς, με αποτέλεσμα να χάνεται η πληροφορία των ενδιάμεσων παλμών. Έχουν προταθεί διάφορες βελτιστοποιήσεις αυτής της μεθόδου [6.10, 6.11, 6.12], αλλά το βασικό μειονέκτημα παραμένει.

6.1.3 Μέθοδοι βασισμένες σε αναλογοψηφιακή μετατροπή.

Αυτή η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα ελκυστική λόγω του μεγάλου όγκου αναγκαίων δεδομένων για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας και της σχετικά μικρής ανάλυσης που περιορίζεται από την συχνότητα δειγματοληψίας του αναλογοψηφιακού μετατροπέα. Για την επίτευξη ακρίβειας 1% πρέπει να ψηφιοποιηθούν 100 δείγματα. Στις 1000 rpm και με ανάλυση 0.5° γωνίας στροφάλου απαιτείται αναλογοψηφιακός μετατροπέας με συχνότητα δειγματοληψίας 1200 kHz. Τα πρωτογενή δεδομένα μιας περιστροφής αποθηκευμένα σε 8-bit μορφή απαιτούν 70.3 Kbytes ενώ σε ascii μορφή με δυο δεκαδικά ψηφία, 352 Kbyte. Επιπλέον η ανάγκη για ανάλυση των δεδομένων αποκλείει την αξιοποίηση της πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η μέτρηση είναι πολύ απλή. Το ψηφιοποιημένο σήμα, εισάγεται στον υπολογιστή και εκεί με επεξεργασία υπολογίζεται ο χρόνος του παλμού και συνεπώς η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα. Επιπλέον το σήμα δεν είναι ευαίσθητο στον θόρυβο και δεν απαιτεί εφαρμογή κάποιας μεθόδου κανονικοποίησης.

Μία άλλη μέθοδος μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας που βασίζεται στην ψηφιοποίηση είναι η χρήση μετατροπέα συχνότητας-τάσης και η ψηφιοποίηση της εξόδου του. Η μετατροπή βασίζεται σε τεχνικές που απαιτούν υπολογισμούς μέσου όρου [6.13] και συνεπώς παρέχουν πολύ αργή ταχύτητα απόκρισης. Γι αυτόν το λόγο η μέθοδος αυτή είναι ακατάλληλη για μέτρηση στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής.

6.1.4 Αμιγώς υπολογιστικές μέθοδοι.

Οι αμιγώς υπολογιστικές μέθοδοι αξιοποιούν τις ψηφιακές θύρες του υπολογιστή (συνήθως την παράλληλη θύρα) για την άμεση εισαγωγή του σήματος του κωδικοποιητή, με αναγκαία προϋπόθεση την μετατροπή του σήματος σε στάθμη TTL. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυνατότητα μέτρησης ταυτόχρονα 8 σημάτων από την θύρα των 8-bit. Μειονέκτημα είναι η εξάρτηση από το υλικό του υπολογιστή σε συνδυασμό τον απαραίτητο κώδικα (συνήθως σε assembly ή C).

6.2 Προτεινόμενη Μέθοδος- Συσκευή Μέτρηση Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής

Στην παρούσα εργασία η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής αξιοποιείται στην αξιολόγηση του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου από μετρήσεις χρονικής δειγματοληψίας.

Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί από ερευνητές στην ανάπτυξη εξειδικευμένων συστημάτων με μεγάλη ακρίβεια [6.14] και συστημάτων γενικής χρήσης με περιορισμένη ακρίβεια. Σημαντικό έργο επίσης παρουσιάζεται με επίκεντρο την μείωση του απαιτούμενου εξοπλισμού αλλά με παράλληλη αύξηση του λογισμικού (με αντίστοιχο υπολογιστικό κόστος). Αντίθετα άλλοι ερευνητές εστιάζουν σε εξειδικευμένες τεχνολογίες, περιορίζοντας την ευρύτητα της λύσης που προτείνουν [6.27].



Εικόνα 6-1 Φωτογραφική άποψη της συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μελετήθηκε και αναπτύχθηκε, σε επίπεδα υλικού και λογισμικού, συσκευή (Εικόνα 6-1) που μετρά την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής χρησιμοποιώντας τα σήματα του κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου. Η παρούσα προσέγγιση βασίζεται σε συμβατικής τεχνολογίας και ευρείας αποδοχής μικροεπεξεργαστές και παρέχει μετρήσεις πολύ μεγάλης ακρίβειας σε όλο το εύρος ταχυτήτων περιστροφής των κινητήρων Diesel. Επιπλέον παρέχει μηδενική υστέρηση και έχει βελτιστοποιηθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να παρέχει μετρήσεις με ακριβή αναφορά ως προς το άνω νεκρό σημείο.

Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στην συνδυασμένη χρήση των μεθόδων μέτρησης χρόνου ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς παλμούς και μέτρησης παλμών σε προκαθορισμένο διάστημα. Από την δεύτερη μέθοδο, εφαρμόζεται η “βασική αρχή” της, δηλαδή η αναμονή για προκαθορισμένο διάστημα. Η αναμονή αυτή αφορά σε διάστημα εντός του παλμού. Η διαφοροποίηση από υφιστάμενες μεθόδους έγκειται στον διαχωρισμό της προς μέτρηση διάρκειας σε ένα σταθερό προκαθορισμένο χρόνο και έναν μεταβλητό προς μέτρηση. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται πολύ υψηλή ακρίβεια στην μέτρηση.

Η μέτρηση του χρόνου από τους μικροελεγκτές, γίνεται αυξάνοντας την τιμή ενός καταχωρητή κατά μια μονάδα σε κάθε ένα προκαθορισμένο αριθμό κύκλων επεξεργασίας (βήμα) . Όταν τελειώσει η μέτρηση, πολλαπλασιάζοντας

την τιμή του καταχωρητή με το βήμα, προκύπτει ο συνολικός αριθμός κύκλων επεξεργασίας. Με γνωστή την συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή, προκύπτει ο χρόνος (η συχνότητα του μικροελεγκτή δείχνει τον αριθμό κύκλων επεξεργασίας ανά δευτερόλεπτο).

Η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα εντός του κύκλου παρουσιάζει όρια. Η λογική της μεθόδου είναι η χρήση πολύ μεγάλης συχνότητας μικροελεγκτή, που προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στην μέτρηση. Για να αποφευχθεί η υπερχείλιση των καταχωρητών, μετράται με μεγάλο βήμα (ανάλογα την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα) το διάστημα που αντιστοιχεί στην μέγιστη αναμενόμενη ταχύτητα περιστροφής. Το υπόλοιπο διάστημα μετράται με μοναδιαίο βήμα. Το άθροισμα των δυο διαστημάτων, του μετρημένου με μεγάλο βήμα και του λεπτομερώς μετρημένου, δίνει το χρονικό βήμα της μισής μοίρας περιστροφής του στροφαλοφόρου.

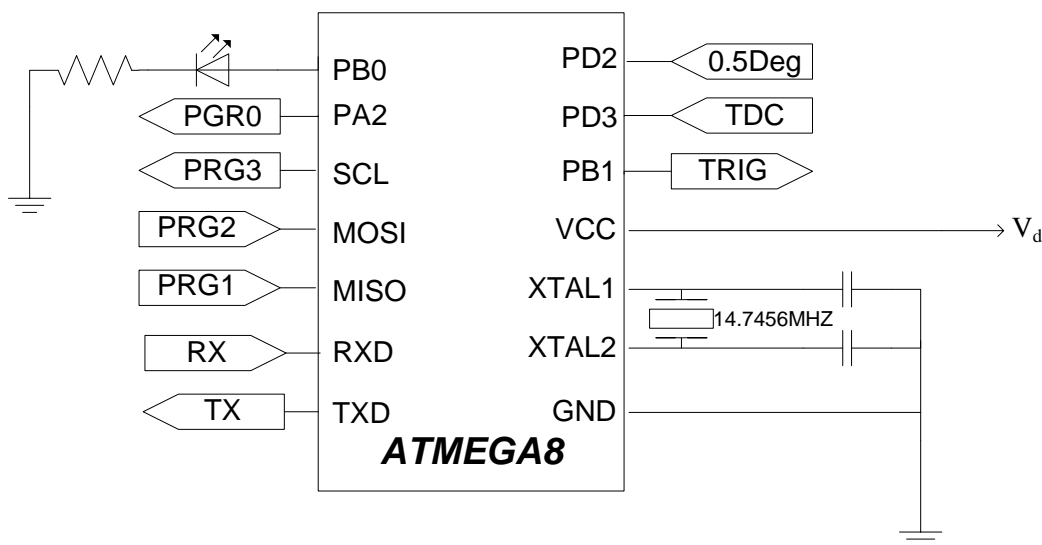
Στην συνέχεια περιγράφεται ο κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου, το σήμα του οποίου οδηγεί την συσκευή μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας. Περιγράφεται επίσης το ηλεκτρονικό κύκλωμα και ο κώδικας που εκτελεί ο μικροελεγκτής που αποτελεί τον πυρήνα της συσκευής μέτρησης. Τέλος παρατίθεται η αξιολόγηση της λειτουργίας της συσκευής.

6.2.1 Ανάπτυξη Συσκευής

Για την μέτρηση της χρονικής διάρκειας του παλμού του κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου που αντιστοιχεί στην περιστροφή του άξονα κατά 0.5°, χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής ATMEGA8 [6.19]. Η δομή και η λειτουργία του μικροελεγκτή είναι παρόμοια με του ATtiny2313 που περιγράφεται στην παράγραφο .

Στο Σχήμ. 6-1 απεικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της συσκευής. Από τον κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου, λαμβάνονται το σήμα συρμού παλμών μισής μοίρας περιστροφής (διασύνδεση "0.5 Deg") και το σήμα του άνω νεκρού σημείου (διασύνδεση "TDC"). Από το πρώτο, μετρώντας την χρονική διάρκεια των παλμών, υπολογίζεται η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα. Το δεύτερο χρησιμοποιείται για οδήγηση (χρονισμό) της έναρξης της μέτρησης. Μια φωτοδίοδος χρησιμοποιείται για την ένδειξη της κατάστασης της συσκευής (κατάσταση αναμονής ή κατάσταση μέτρησης). Η ψηφιακή έξοδος "TRIG" έχει υψηλή στάθμη (λογικό "1") στην διάρκεια της μέτρησης και συνδέεται στον αναλογοψηφιακό μετατροπέα σε περίπτωση που μετρώνται και άλλα μεγέθη με σκοπό την στοίχιση των μετρήσεων. Τέλος η συσκευή συνδέεται μέσω των διασυνδέσεων "RX" και "TX" με την σειριακή θύρα του υπολογιστή με σκοπό την λήψη των παραμέτρων λειτουργίας και την αποστολή των μετρήσεων.

Ο χρονισμός του μικροελεγκτή γίνεται από τον κρύσταλλο 147.4-S-7S-TR της εταιρείας ECS Inc. με συχνότητα 14.7456MHz. Η σταθερότητα της συχνότητας που παρέχει είναι ± 50 ppm ενώ η ανοχή βαθμονόμησης ± 30 ppm [6.20].



Σχήμ. 6-1 Σχηματικό διάγραμμα συσκευής μέτρησης γωνιακής ταχύτητας

6.2.2 Αισθητήρες Θέσης Γωνίας Στροφάλου- Ο οπτικός κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου Kistler Type 2613B

Η λειτουργία του αισθητήρα θέσης γωνίας στροφάλου είναι να παράγει σήμα που εκφράζει την σχέση ανάμεσα στην γωνιακή μετατόπιση και τον χρόνο. Τα κριτήρια επιλογής περιλαμβάνουν:

- ◆ την ανάλυση (*resolution*),
- ◆ την ακρίβεια,
- ◆ το κόστος,
- ◆ και την καταλληλότητα του περιβάλλοντος λειτουργίας.

Οι αισθητήρες γωνιακής ταχύτητας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την τεχνολογία που χρησιμοποιούν για να μετατρέψουν την γωνιακή θέση σε ηλεκτρικό σήμα, στις εξής κατηγορίες:

- ◆ οπτικοί κωδικοποιητές,
- ◆ μαγνητικοί λήπτες (*pickups*)
- ◆ αισθητήρες φαινομένου Hall [6.2],
- ◆ κωδικοποιητές ακτίνας μονοχρωματικής ακτινοβολίας [6.21],
- ◆ αισθητήρες ποτενσιόμετρον αντίστασης,
- ◆ πυκνωτικοί αισθητήρες [6.22],
- ◆ αισθητήρες περιστρεφόμενου πηνίου (*revolvers*) [6.23].

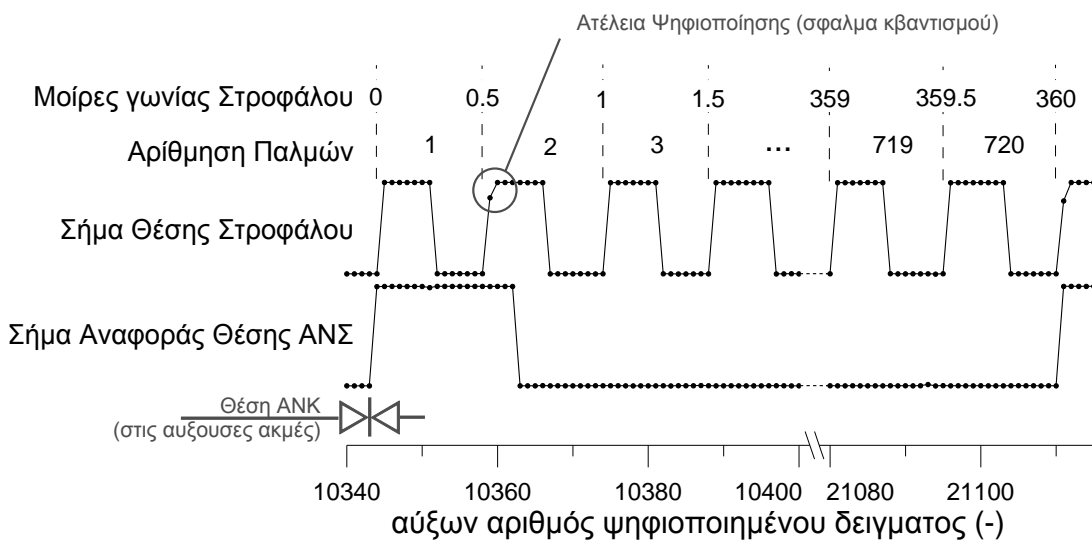
Οι τρεις πρώτοι τύποι, είναι οι πιο συνηθισμένοι. Σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού των αισθητήρων είναι η θέση προσάρτησης. Οι αισθητήρες που τοποθετούνται πάνω στον άξονα συνήθως παρέχουν καλύτερη ακρίβεια αλλά η τοποθέτηση είναι δύσκολη και κρίσιμη καθώς μη σωστή ευθυγράμμιση ή η μη ομόκεντρη τοποθέτηση μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα λανθασμένα δεδομένα ή και καταστροφή του οργάνου. Από την άλλη οι αισθητήρες που δεν είναι σε επαφή με τον άξονα, είναι πολύ εύκολοι στην χρήση και ανθεκτικοί στο βιομηχανικό περιβάλλον, αλλά υπάρχουν περιορισμοί ως προς την ακρίβειά τους.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο οπτικός κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου Kistler Type 2613B .

Ο κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου Kistler Type 2613B [], αποτελείται από το όργανο, τον κανονικοποιητή σήματος και το τερματικό σύνδεσης. Παράγει τρία σήματα μορφής τετραγωνικού παλμού και στάθμης TTL:

- ◆ ένα σήμα θέσης με ρυθμιζόμενη ανάλυση γωνίας στροφάλου από 0.1° έως 6° ,
- ◆ ένα σήμα με περίοδο μια περιστροφή (που χρησιμοποιείται για την αναφορά ως προς την θέση του άνω νεκρού σημείου)
- ◆ και ένα σήμα με σταθερή ανάλυση 1° γωνίας στροφάλου.

Τα δύο πρώτα σήματα φαίνονται στο Σχήμ. 6-2. Με διακόπτες τύπου DIL που βρίσκονται στο τερματικό σύνδεσης, ρυθμίστηκε η ανάλυση του σήματος εξόδου στις 0.5° γωνίας στροφάλου.



Σχήμ. 6-2 Τα σήματα που παράγονται από τον κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου Kistler 2613B

Εντός του οργάνου βρίσκεται ένας δίσκος με 360 «ίχνη» που σαρώνονται από φωτοηλεκτρικό αισθητήρα. Επιπλέον, υπάρχει ένα ανεξάρτητο ίχνος για

την δημιουργία του σήματος αναφοράς ανά περιστροφή (αναφορά άνω νεκρού σημείου). Ο διαμορφωτής σήματος ενισχύει το σήμα και το διαμορφώνει στην στάθμη TTL. Τα βασικά χαρακτηριστικά του οργάνου συνοψίζονται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακ. 6-1 Βασικά Χαρακτηριστικά κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου Kistler 2613B

Χαρακτηριστικό	Μονάδα	Τιμή
Ανάλυση	μοίρες	0.1 ... 6
Δυναμική Ακρίβεια (υστέρηση) ¹	μοίρες	+0.02
Ευρος στροφών	rpm	1 ... 20000

¹ Στις 1000 σαλ

Το όργανο τοποθετήθηκε προσεκτικά στην πίσω πλευρά του στροφαλοφόρου άξονα του κινητήρα Ricardo Hydra, μέσω φλάντζας που κατασκευάστηκε στον τόρνο του μηχανουργείου του Εργαστηρίου. Η ομόκεντρη και κάθετη τοποθέτηση επιτεύχθηκε και επιβεβαιώθηκε με χρήση ρολογιού γράφτου. Ο συνδετικός βραχίονας, που χρησιμοποιείται για να ακινητοποιεί το σώμα του οργάνου από περιστροφή, συνδέθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή σε ιδιοκατασκευή που προσαρμόστηκε στο σώμα του κινητήρα.



Εικόνα 6-2 Ο κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου Kistler Type 2613B εγκατεστημένος στον κινητήρα Ricardo Hydra του Εργαστηρίου MEK

Η τοποθέτηση έγινε με τρόπο τέτοιο, ώστε να ταιριάζει το σήμα αναφοράς του οργάνου με την θέση του άνω νεκρού σημείου. Στη συνέχεια έγινε λεπτομερής ρύθμιση του συνδετικού βραχίονα έως ότου η θέση άνω νεκρού σημείου να ταυτίζεται με το σήμα του οργάνου. Γι αυτόν τον λόγο ο στροφαλοφόρος περιστράφηκε έως ότου το έμβολο έλθει στην ανώτατη θέση του. Η υψηλότερη θέση του εμβόλου επιβεβαιώθηκε με την βοήθεια ρολογιού γράφτου που τοποθετήθηκε στην οπή του εγχυτήρα.

Σημειώνεται ότι η ακριβέστερη διαδικασία βαθμονόμησης για την σύμπτωση του άνω νεκρού σημείο με το παλμό του οργάνου, γίνεται με ετεροκίνηση της μηχανής και τοποθέτηση αισθητήρα θέσης (LVTD) από την οπή του εγχυτήρα. Άλλη μέθοδος βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται ευρέως και δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό είναι ο εντοπισμός του άνω νεκρού σημείου από την θέση της μέγιστης πίεσης συμπίεσης κατά την λειτουργία σε ετεροκίνηση. Όμως και αυτή η μέθοδος δεν παρέχει πολύ καλή ακρίβεια επειδή η μέγιστη πίεση εμφανίζεται πριν την θέση του μικρότερου όγκου του κυλίνδρου λόγω μεταφοράς θερμότητας και διαφυγές αερίων [6.16,6.17]. Η γωνία ανάμεσα στην μέγιστη πίεση και το ΑΝΣ ονομάζεται “γωνία απώλειας θερμότητας” [6.18].

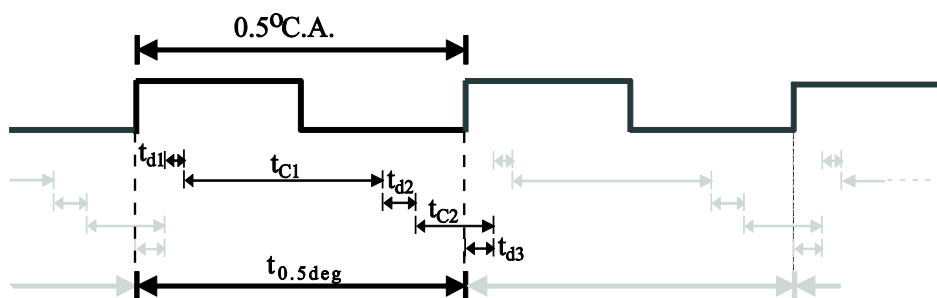
Στην παρούσα εργασία εξετάζονται μόνο συγκριτικά αποτελέσματα ως προς τον εντοπισμό του άνω νεκρού σημείου. Η ακρίβεια της μεθόδου βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε θεωρείται επαρκής.

6.2.3 Ανάπτυξη Κώδικα Μέτρησης Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής

Σκοπός του κώδικα είναι η μέτρηση του αριθμού των κύκλων επεξεργασίας που αντιστοιχούν σε ένα παλμό του σήματος του κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου. Έτσι από την Εξίσωση (6-2), μετρώντας με μικροελεγκτή που λειτουργεί σε συχνότητα f_c τον αριθμό των κύκλων επεξεργασίας n_c που αντιστοιχεί σε κάθε έναν από τους N παλμούς ανά περιστροφή του κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου, υπολογίζεται η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής N . Χάρην ευκολίας, η περιγραφή στην συνέχεια γίνεται χρησιμοποιώντας όρους χρόνου και όχι όρους κύκλων επεξεργασίας.

Η λογική του κώδικα που χρησιμοποιείται, απεικονίζεται στο Σχήμ. 6-3. Οι παράμετροι επεξηγούνται στον Πίνακ. 6-2.

Χρησιμοποιώντας την αναμενόμενη ταχύτητα περιστροφής, υπολογίζεται και στέλνεται από τον υπολογιστή στην συσκευή μια παράμετρος ανάλογη του διαστήματος t_{ci} . Όταν ληφθεί, η συσκευή βγαίνει από την κατάσταση αναμονής και περιμένει αύξουσα ακμή του σήματος άνω νεκρού σημείου “TDC”. Μόλις αυτό ανιχνευθεί, η έξοδος της διασύνδεσης “TRIG” παίρνει τιμή “1” και εκκινείται η διαδικασία μέτρησης.



Σχήμ. 6-3 Διάγραμμα χρόνων για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας

Πίνακ. 6-2 Υπόμνημα των χρονικών διαστημάτων που χρησιμοποιούνται στην εξήγηση της λειτουργίας του κώδικα της συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ταχύτητας

Διάστημα	Πηγή	Εξήγηση
t_{d1}	Γνωστή καθυστέρηση εξαιτίας εκτέλεσης κώδικα	Καθυστέρηση από την ανάγνωση της τιμής του μετρητή C2 έως την ενεργοποίηση του μετρητή C1
t_{c1}	Μετρητής C1	Καθυστέρηση ρυθμιζόμενη από τον υπολογιστή
t_{d2}	Γνωστή καθυστέρηση εξαιτίας εκτέλεσης κώδικα	Καθυστέρηση από την υπερχείλιση του μετρητή C1 έως την ενεργοποίηση του C2
t_{c2}	Μετρητής C2	Μέτρηση που σταματάει με την ανίχνευση αύξουσας ακμής
t_{d3}	Γνωστή καθυστέρηση εξαιτίας εκτέλεσης κώδικα	Καθυστέρηση από την ανίχνευση αύξουσας ακμής έως την ανάγνωση της τιμής του μετρητή C2.

Αναμένεται αύξουσα ακμή του σήματος μισής μοίρας "0.5DEG". Μετά από χρόνο t_{d3} από την ανίχνευση, εκκινεί ο εσωτερικός μετρητής C1. Από την ρύθμιση που στάλθηκε από τον επεξεργαστή καθορίζεται το διάστημα t_{c1} . Όταν αυτό μετρηθεί, μετά από μια καθυστέρηση t_{d2} ενεργοποιείται ο μετρητής C2. Η λειτουργία θα διακοπεί, με καθυστέρηση t_{d3} , όταν ανιχνευτεί νέα αύξουσα ακμή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ληφθεί από τον υπολογιστή εντολή διακοπής. Η κάθε μετρημένη τιμή αποστέλλεται στον υπολογιστή εντός του διαστήματος t_{c1} .

Οι καθυστερήσεις t_{a1} , t_{a2} , t_{a3} οφείλονται στην εκτέλεση του κώδικα. Η κάθε εντολή του ρεπερτορίου του μικροελεγκτή πραγματοποιείται σε καθορισμένο αριθμό κύκλων. Συνεπώς από την μέτρηση του αριθμού των εντολών και τον αντίστοιχο αριθμό κύκλων προκύπτει η καθυστέρηση. Έχει ληφθεί μέριμνα ώστε οι καθυστερήσεις να είναι ίδιες σε κάθε περίοδο μέτρησης και σε κάθε πιθανή ροή της εκτέλεσης του κώδικα. Το τελευταίο έχει εξασφαλιστεί με την προσθήκη εντολών “nop” (no operation).

Ο χρόνος της περιστροφής του στροφαλοφόρου κατά μισή μοίρα ισούται με:

$$t_{0.5} = t_{a1} + t_{c1} + t_{a2} + t_{c2} + t_{a3} \quad (6-3)$$

Η Εξίσωση (6-3) μπορεί να γραφεί σε όρους κύκλων επεξεργασίας, ως εξής:

$$t_{0.5} = \frac{8 \cdot Presc + TCNT0 + C}{f_c} \quad (6-4)$$

Όπου:

Presc: Η δοθείσα από τον υπολογιστή τιμή του μετρητή C1. Ο συντελεστής 8 αντιστοιχεί στο βήμα μέτρησης ανά οχτώ κύκλους επεξεργασίας

TCNT0: Η τιμή του μετρητή C2

C: Ο αριθμός των κύκλων επεξεργασίας που αποδίδονται στην εκτέλεση κώδικα

f_c : Συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή ($f_c=14745600\text{Hz}$)

Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφεται συνοπτικά ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί για το προγραμματισμό του μικροελεγκτή.

6.2.3.1 Εκκίνηση ροής κώδικα

Στην αρχή του κώδικα, Κώδικ. 6-1, δηλώνεται από εξωτερικό αρχείο ισοδυναμία λεκτικών σε φυσικές διευθύνσεις των καταχωρητών του μικροελεγκτή. Επιπλέον δηλώνονται λεκτικά που χρησιμοποιούνται σαν μεταβλητές σε ήδη δηλωμένα λεκτικά που αντιστοιχούν σε καταχωρητές γενικού σκοπού. Τέλος δηλώνονται διευθύνσεις μνήμης που αντιστοιχούν στην εκκίνηση του κώδικα και τις υπηρεσίες διακοπής.

Στην συνέχεια εκκινεί η κανονική ροή του προγράμματος, Κώδικ. 6-2. Ενεργοποιείται και ρυθμίζεται ο δείκτης στοιβάδας (stack pointer). Καλούνται οι ρουτίνες:

- ◆ ρύθμισης περιφερειακών,
- ◆ ρύθμισης των ιδιοτήτων των θυρών,
- ◆ ρύθμισης και εκκίνησης της σειριακής επικοινωνίας,

- ♦ ρύθμισης των υπηρεσιών διακοπής και ρύθμισης του ρολογιού.

Κώδικ. 6-1. Δηλώσεις

1	<code>.NOLIST</code>	7	<code>.def tr=r19</code>
2	<code>.INCLUDE "m8def_mod.inc"</code>	8	<code>.def counter=r22</code>
3	<code>.LIST</code>	9	<code>.def presc=r21</code>
4	<code>.DEF mp = R16</code>	10	<code>0x000 rjmp RESET ; Reset Handler</code>
5	<code>.def mp2=r17</code>	11	<code>0x001 rjmp int0v ; IRQ0 Handler</code>
6	<code>.def mode=r20</code>	12	<code>0x006 rjmp TIM1 COMPA ;</code>

Κώδικ. 6-2. Εκκίνηση του κώδικα

1	<code>reset:</code>	23	<code>clr mp2</code>
2	<code>init_stack :</code>	24	<code>clr mp</code>
3	<code>ldi mp, LOW (RAMEND); Init Stackpointer</code>	25	<code>clr counter</code>
4	<code>out SPL, mp</code>	26	<code>; anavei ta external interrupts kai perimenei</code>
5	<code>ldi mp, HIGH (RAMEND)</code>	27	<code>ldi mp, 0b01000000 ; External</code>
6	<code>out SPH, mp</code>	28	<code>; Interrupt Request 1 Enable</code>
7	<code>rcall port_config</code>	29	<code>out gicr, mp ; Gen. Interrupt Control Reg.</code>
8	<code>rcall init_UART</code>	30	<code>clr mp</code>
9	<code>rcall ext_interrupt_config</code>	31	<code>out OCR1AH, mp</code>
10	<code>rcall config_timers</code>	32	<code>out OCR1AL, presc</code>
11	<code>main :</code>	33	<code>ldi mp, 0b00010000</code>
12	<code>cli</code>	34	<code>out TIMSK, mp</code>
13	<code>cbi portb, 1</code>	35	<code>wait_trigger :</code>
14	<code>cbi portb, 0</code>	36	<code>sbis pind, 3</code>
15	<code>receive_presc :</code>	37	<code>rjmp wait_trigger</code>
16	<code>sbis uc_sra, rxc</code>	38	<code>sbi portb, 0</code>
17	<code>rjmp receive_presc</code>	39	<code>sei</code>
18	<code>in presc, udr</code>	40	<code>wait :</code>
19	<code>receive_mode :</code>	41	<code>; TWRA DOULEUOUN TA:</code>
20	<code>sbis uc_sra, rxc</code>	42	<code>; EXTERNAL INTERRUPT 0</code>
21	<code>rjmp receive_mode</code>	43	<code>; TIMER1 COMPARE</code>
22	<code>in mode, udr</code>	44	<code>rjmp wait</code>

Οι ρουτίνες ρύθμισης φαίνονται στον Κώδικ. 6-3. Σημειώνεται ότι το ρολόι 16-bit “timer/counter1” ρυθμίζεται να μετράει ανά 8 κύκλους εντολών του υπολογιστή (prescaled operation).

Μετά την αρχική ρύθμιση των περιφερειακών του μικροελεγκτή ακολουθεί η λήψη της παραμέτρου του μετρητή C2. Επίσης γίνεται η λήψη της τιμής “mode” η οποία καθορίζει παράληψη παλμών (πχ μέτρηση διάρκειας δύο παλμών). Σε όλες τις δόκιμες και μετρήσεις που αναφέρονται, η παράμετρος είχε την τιμή “0” που ισοδυναμεί με μέτρηση διάρκειας ίση με αυτή του κάθε παλμού. Μετά και από την ανίχνευση αύξουσας ακμής του σήματος του άνω νεκρού σημείου η εκτέλεση του κώδικα γίνεται από τις ρουτίνες διακοπής

Κώδικ. 6-3. Ρουτίνες ρύθμισης περιφερειακών

1	init_uart :	25	ext_interupt_config :
2	<i>in</i> mp, sreg	26	<i>in</i> mp, sreg
3	<i>push</i> mp	27	<i>push</i> mp
4	<i>ldi</i> mp2, 0b00000000	28	<i>ldi</i> mp, 0b00001111 ; <i>interrupts on rising edges</i>
5	<i>ldi</i> mp, 0b00000011	29	<i>out</i> mcucr, mp;
6	<i>out</i> UBRRH, mp2	30	<i>pop</i> mp
7	<i>out</i> UBRRL, mp ; <i>Enable receiver and transmitter</i>	31	<i>out</i> sreg, mp
8	<i>ldi</i> mp, (1<<RXEN) | (1<<TXEN)	32	<i>ret</i>
9	<i>out</i> UCSRB, mp	33	config_timers :
10	<i>ldi</i> mp, (1<<URSEL) | (1<<USBS) | (3<<UCSZ0)	34	<i>in</i> mp, SREG
11	<i>out</i> UCSRC, mp	35	<i>push</i> mp ; <i>16-bit Timer/Counter1</i>
12	<i>pop</i> mp	36	<i>clr</i> mp
13	<i>out</i> sreg, mp	37	<i>out</i> TCCR1A, mp
14	<i>ret</i>	38	<i>ldi</i> mp, 2 ; <i>clkI/O/8 (From prescaler)</i>
15	Port_config :	39	<i>out</i> TCCR1B, mp ; <i>8-bit Timer/Counter0</i>
16	<i>in</i> mp, sreg	40	<i>ldi</i> mp, 1 ; <i>clkI/O/(No prescaling)</i>
17	<i>push</i> mp	41	<i>out</i> tccr0, mp
18	; <i>kanei output ta led1(portb0)</i>	42	<i>pop</i> mp
19	<i>ldi</i> mp, 0b0000011	43	<i>out</i> SREG, mp
20	<i>out</i> ddrb, mp	44	<i>ret</i>
21	<i>clr</i> mp		
22	<i>pop</i> mp		
23	<i>out</i> sreg, mp		
24	<i>ret</i>		

6.2.3.2 Ρουτίνα διακοπής χρονισμένη από την υπερχείλιση του μετρητή C1.

Όταν ο μετρητής C1 (timer/counter1) φτάσει την προκαθορισμένη τιμή “presc”, εκτελείται η ρουτίνα διακοπής, Κώδικ. 6-4. Τότε μηδενίζεται και εκκινείται το ρολόι C2 (timer0).

Κώδικ. 6-4. Ρουτίνα διακοπής διαστήματος tc1

1	TIM1_COMPA : ; <i>Timer1 CompareA</i>	6	<i>clr</i> mp
2	; <i>Handler --> midenizei to Timer0 (TCNT0)</i>	7	<i>out</i> tcnt0, mp
3	<i>in</i> mp, SREG	8	<i>pop</i> mp
4	<i>push</i> mp	9	<i>out</i> SREG, mp
5	<i>cli</i>	10	<i>reti</i>

6.2.3.3 Ρουτίνα διακοπής που οδηγείται από την ανίχνευση αύξουσας ακμής

Όταν ανιχνευτεί αύξουσα ακμή του σήματος μισής μοίρας του κωδικοποιητή, εκτελείται η υπηρεσία διακοπής του Κώδικ. 6-5. Τότε διαβάζεται η τιμή του μετρητή C2 (timer0). Ελέγχεται αν έχει ληφθεί από τον υπολογιστή κάποια τιμή που θα σήμαινε τον τερματισμό της λειτουργίας. Αν όχι

αποστέλλεται στον υπολογιστή η τιμή του μετρητή C2. Η ροή του προγράμματος παραπέμπεται στην αναμονή άλλης υπηρεσίας διακοπής. Αν έχει ληφθεί κάποια τιμή από τον υπολογιστή, αποστέλλονται οι ρυθμίσεις (“mode” και “presc”) και η ροή του προγράμματος εκτρέπεται στην ετικέτα “reset”, στην εκκίνηση της ροής του κώδικα.

Κώδικ. 6-5. Ρουτίνα διακοπής ανίχνευσης ακμής

1	int0v : ;half degree signal interrupt	25	nop
2	in mp, SREG	26	tr_exit2 : ;stelnei to presc
3	push mp	27	sbis UCSRA, UDRE
4	cli	28	rjmp tr_exit2
5	clr mp	29	out UDR, presc
6	ldi mp2, 1	30	nop
7	in tr, tcnt0	31	pop mp
8	out sfior, mp2	32	out SREG, mp
9	out tcnt1l, mp	33	rjmp reset
10	out tcnt1h, mp	34	cont :
11	sbis ucsra, rxc	35	cp mode, counter
12	rjmp cont	36	brne not_now
	;exiting routine	37	send :
13	nop	38	sbis UCSRA, UDRE
14	in mp2, udr	39	rjmp send
15	cbi portb, 0	40	out UDR, tr
16	ldi mp, 0 ;stelnei anagnwristko 0	41	clr counter
17	nop	42	rjmp exit
18	tr_exit1 :	43	not_now :
19	sbis UCSRA, UDRE	44	inc counter
20	rjmp tr_exit1	45	exit :
21	out UDR, mode	46	pop mp
22	nop	47	out SREG, mp
23	nop	48	reti
24	nop		

6.2.4 Αξιολόγηση και Βαθμονόμηση Συσκευής Μέτρησης Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής

Το σφάλμα μέτρησης μπορεί να προέρχεται από δύο πηγές:

- ◆ κατασκευαστικές ατέλειες
- ◆ περιορισμούς της μετρητικής μεθόδου.

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας της συσκευής μέτρησης, αναπτύχθηκε κώδικας στο περιβάλλον LabView που οδηγεί ταυτόχρονα τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα DAQ-Card 6024E (περιγραφή του στην παράγραφο 2.3) και την συσκευή.

Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας ρυθμίστηκε ώστε να παράγει τετραγωνικό παλμό καθορισμένης συχνότητας στην έξοδο “CTR0”. Ρυθμίστηκε επίσης να παράγει στην αναλογική έξοδο “AO0” ένα παλμό που προσομοιώνει το σήμα του άνω νεκρού σημείου. Ταυτόχρονα λαμβάνονται μετρήσεις από την

συσκευή μέτρησης γωνιακής ταχύτητας. Έγιναν συνολικά 90 μετρήσεις σε τρεις συχνότητες σήματος, 50kHz, 40kHz, 33kHz και έξι ρυθμίσεις prescaling με 5 επαναλήψεις για κάθε μέτρηση. Οι συχνότητες δοκιμής αντιστοιχούν σε λειτουργία του κινητήρα στις 4160 rpm, 3333 rpm και 2778 rpm αντίστοιχα. Κάθε μέτρηση είχε διάρκεια 3000 παλμούς. Από την χρονική διάρκεια της κάθε δοκιμής και τον αριθμό των παλμών που ανιχνευτήκαν επιβεβαιώθηκε η συχνότητα της δοκιμής και η ακρίβεια.

Από τις μετρήσεις και με την μέθοδο ελαχιστοποίησης αθροίσματος τετραγώνου σφάλματος, καθορίστηκαν πειραματικά οι συντελεστές C' και f' όπου χρησιμοποιήθηκαν σε αντικατάσταση των C και f_c , αντίστοιχα, στην εξίσωση (6-4). Οι νέες τιμές είναι $C'=23$ και $f'=14752000$. Σημειώνεται ότι η αρχική τιμή C καθορίστηκε αρχικά στην τιμή $C=8$ από τον αριθμό των κύκλων επεξεργασίας του κώδικα σε συνδυασμό με τον χρόνο εκτέλεσης της κάθε εντολής από τον επεξεργαστή. Η απόκλιση της θεωρητικής από την μετρομένη τιμή αποδίδεται στην λειτουργία του ίδιου του επεξεργαστή. Σημειώνεται ότι στα τεχνικά φυλλάδια οδηγιών του κατασκευαστή, δεν γίνεται αναφορά στην πιθανή ύπαρξη αυτής της απόκλισης. Η αρχική τιμή $f=14745600$ ορίζεται από τον κατασκευαστή του κρυστάλλου ενώ η νέα τιμή είναι εντός της ανοχής που ορίζει. Το μέγιστο και μέσο σφάλμα που προκύπτει αν χρησιμοποιηθούν οι αρχικές τιμές είναι 4% και 1.6% αντίστοιχα. Με τις διορθωμένες τιμές τα σφάλματα περιορίζονται σε 0.045% και 0.044% για την μέγιστη και μέση τιμή σφάλματος, αντίστοιχα.

6.2.5 Λογισμικό Οδήγησης και Λήψης Μετρήσεων από την Διάταξη Μέτρησης της Στιγμιαίας Ταχύτητας Περιστροφής

Ο μικροελεγκτής που αποτελεί την καρδιά της συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής εκτελεί ένα κώδικα που περιγράφει την επιθυμητή λειτουργία του. Η εντολή για την έναρξη της λειτουργίας, ο ορισμός των παραμέτρων και η λήψη των μετρήσεων ελέγχεται μέσω σειριακής θύρας από πρόγραμμα γραμμένο στο περιβάλλον LabView. Ουσιαστικά πρόκειται για τον οδηγό (driver) της συσκευής. Οι ρουτίνες που εκτελούν τις αντίστοιχες εργασίες χρησιμοποιήθηκαν αυτόνομες για την λήψη μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής ή εντάχθηκαν σε ευρύτερο λογισμικό για την εκτέλεση πιο πολύπλοκης μετρητικής εργασίας, όπως περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο.

6.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για την διερεύνηση της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα στη διάρκεια του κύκλου στα αποτελέσματα της

διάγνωσης, μέσω της αλλοίωσης της μέτρησης της πίεσης καύσης, διενεργήθηκε εκτεταμένη διερεύνηση στον μονοκύλινδρο κινητήρα πειραματικών εφαρμογών Ricardo Hydra που είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο ΜΕΚ. Με γνώμονα την επάρκεια των δεδομένων και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε η ταυτόχρονη μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής και της πίεσης καύσης με δυο διαφορετικές μεθόδους δειγματοληψίας. Μετρήσεις διεξήχθησαν σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα με έμφαση στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, όπου τα δυναμικά φαινόμενα είναι εντονότερα.

6.3.1 Περιγραφή της Πειραματικής Κλίνης κινητήρα Ricardo / Hydra

6.3.1.1 Περιγραφή κινητήρα

Ο κινητήρας Ricardo/Cussons Hydra είναι πειραματικός μονοκύλινδρος τετράχρονος, υδρόψυκτος κινητήρας Diesel, φυσικής αναπνοής με έναν επικεφαλής εκκεντροφόρο, ο οποίος παρέχει κίνηση σε δυο βαλβίδες (μία εισαγωγής και μία εξαγωγής). Ο ψεκασμός του καυσίμου γίνεται απευθείας στον θάλαμο καύσης και η έναυση γίνεται με συμπίεση. Ως καύσιμο χρησιμοποιήθηκε diesel. Στην Εικόνα 6-3 δίνεται φωτογραφική άποψη της πειραματικής εγκατάστασης που περιλαμβάνει τον κινητήρα, την πέδη και τον πίνακα ελέγχου.



Εικόνα 6-3 Φωτογραφική άποψη της εγκατάστασης του πειραματικού κινητήρα Ricardo Hydra

Τα βασικά γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα φαίνονται στον Πίνακ. 6-3.

Πίνακ. 6-3 Βασικά γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα Ricardo Hydra

Μέγεθος	Μονάδα	Τιμή
Τύπος κινητήρα		άμεσου ψεκασμού ένανσης με συμπίεσης φυσικής αναπνοής
Διάμετρος εμβόλου	mm	80.26
Διαδρομή εμβόλου	mm	88.90
Μήκος διωστήρα	mm	160.0
Βαθμός συμπίεσης	-	19.81:1
Ανοιγμα Βαλβίδας Εισαγωγής (IVO)	deg	8° – Πριν το ΑΝΣ
Κλείσιμο Βαλβίδας Εισαγωγής - IVC	deg	42° – Μετά το ΚΝΣ
Ανοιγμα Βαλβίδας Εξαγωγής - EVO	deg	60° – Πριν το ΚΝΣ
Κλείσιμο Βαλβίδας Εξαγωγής - EVC	deg	12° – Μετά το ΑΝΣ
Εύρος Στροφών	σαλ	1000 – 4500
Μέγιστη Ισχύ κάτω από όριο καπνού	kW	8 kW @ 3750 σαλ
Μέγιστη Ροπή	Nm	24 Nm (2400 rpm)
Μέγιστη Πίεση Καύσης	bar	120

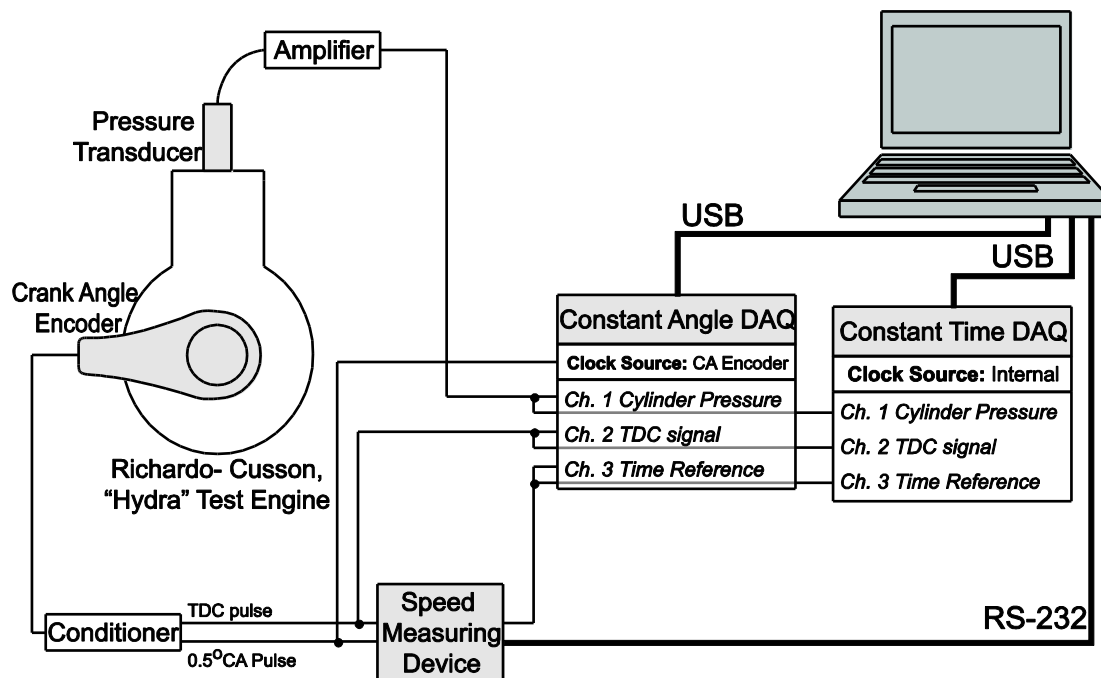
6.3.1.2 Πέδη

Η πέδη χρησιμοποιείται για τη φόρτιση του κινητήρα στο επιθυμητό φορτίο λειτουργίας ή για την ετεροκίνηση αυτού. Είναι μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος (DC) με μέγιστη τάση 400 V, ένταση ρεύματος 70 A και ισχύ 30 kW ή εναλλακτικά, 100 A και 37 kW. Η πέδη διαθέτει δυο μοχλοβραχίονες καθένας από τους οποίους φέρει ένα βάρος, το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί στην αντίστοιχη οπή τοποθέτησης για να επιτυγχάνεται στατική ισορροπία. Μια ταχογεννήτρια που είναι τοποθετημένη στον άξονα της πέδης παρέχει την ταχύτητα περιστροφής η οποία ρυθμίζεται από τον πίνακα ελέγχου.

6.3.1.3 Πίνακας ελέγχου

Ο πίνακας ελέγχου περιλαμβάνει τη μονάδα ελέγχου και τη μονάδα ρύθμισης των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα (πχ. την ταχύτητα περιστροφής, τον κανόνα του καυσίμου, τη στατική προπορεία έγχυσης κλπ.). Στη μονάδα ελέγχου περιλαμβάνονται όλες οι διατάξεις, οι λυχνίες και οι ενδείξεις με τις οποίες καταγράφονται τα λειτουργικά μεγέθη του κινητήρα και έτσι επιτυγχάνεται η παρακολούθηση και ο πλήρης έλεγχος της λειτουργίας της εγκατάστασης. Ο πίνακας ελέγχου παρέχει την κατάλληλη διασύνδεση για εξωτερική καταγραφή λειτουργικών παραμέτρων.

6.3.2 Διάταξη ταυτόχρονης μέτρησης πίεσης καύσης με δυο μεθόδους δειγματοληψίας και στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής



Σχήμ. 6-4 Σχηματικό διάγραμμα συνδέσεων για την μέτρηση της πίεσης θαλάμου καύσης με δυο μεθόδους δειγματοληψίας και ταυτόχρονης μέτρησης της στιγμιαίας ταχύτητας

Σκοπός της διάταξης είναι η μέτρηση της πίεσης θαλάμου καύσης ταυτόχρονα με δυο μεθόδους δειγματοληψίας και η παράλληλη μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής. Το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμ. 6-4.

Η πίεση του θαλάμου καύσης μετρήθηκε με τον πιεζοκρύσταλλο 6125b της εταιρείας Kistler που περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.2. Ο πιεζοκρύσταλλος έχει προσαρμοσθεί στην κεφαλή του κυλίνδρου του κινητήρα ώστε το παραμορφώσιμο διάφραγμα του να βρίσκεται μετωπικά με το εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Το σήμα του αισθητήρα οδηγήθηκε για διαμόρφωση στον ενισχυτή type-5008 της εταιρείας Kistler. Όπως περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.2, ο ενισχυτής φορτίου μετατρέπει το φορτίο σε τάση, την οποία ενισχύει και παρέχει στην έξοδο. Με βάση την ευαισθησία του κρυστάλλου (-16.3 pC/bar) επιλέχθηκε η ρύθμιση της ευαισθησίας του ενισχυτή στα 1.63 pC ανά μηχανική μονάδα, με κλίμακα 20 μηχανικές μονάδες ανά Volt και εύρος κλίμακας 10 έως 110.

Κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου παρείχε τετραγωνικά ψηφιακά σήματα στάθμης TTL για (α) την περιστροφή του κινητήρα κατά 0.5 μοίρες και (β) την θέση άνω νεκρού σημείου. Ο κωδικοποιητής εγκαταστάθηκε στον κινητήρα για την διενέργεια της παρούσας διερεύνησης. Τα χαρακτηριστικά του οργάνου και η διαδικασία τοποθέτησης και βαθμονόμησης περιγράφονται στην παράγραφο 6.2.2.

Για την λήψη μετρήσεων από τις παραπάνω πηγές συνδέθηκαν στον υπολογιστή:

- ◆ Η κάρτα USB-9215 για την ψηφιοποίηση μετρήσεων με σταθερό βήμα χρόνου (σύνδεση μέσω της θύρας USB)
- ◆ Η κάρτα PCMCIA DAQCard-6024E για την ψηφιοποίηση μετρήσεων με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου (σύνδεση στην θύρα PCMCIA)
- ◆ Η συσκευή μέτρησης της στιγμιαίας ταχύτητας (σύνδεση σε σειριακή θύρα COM)

Η λειτουργία των δυο αναλογοψηφιακών μετατροπέων περιγράφεται στην παράγραφο 0, ενώ η συσκευή μέτρησης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής στην παράγραφο 6.1.

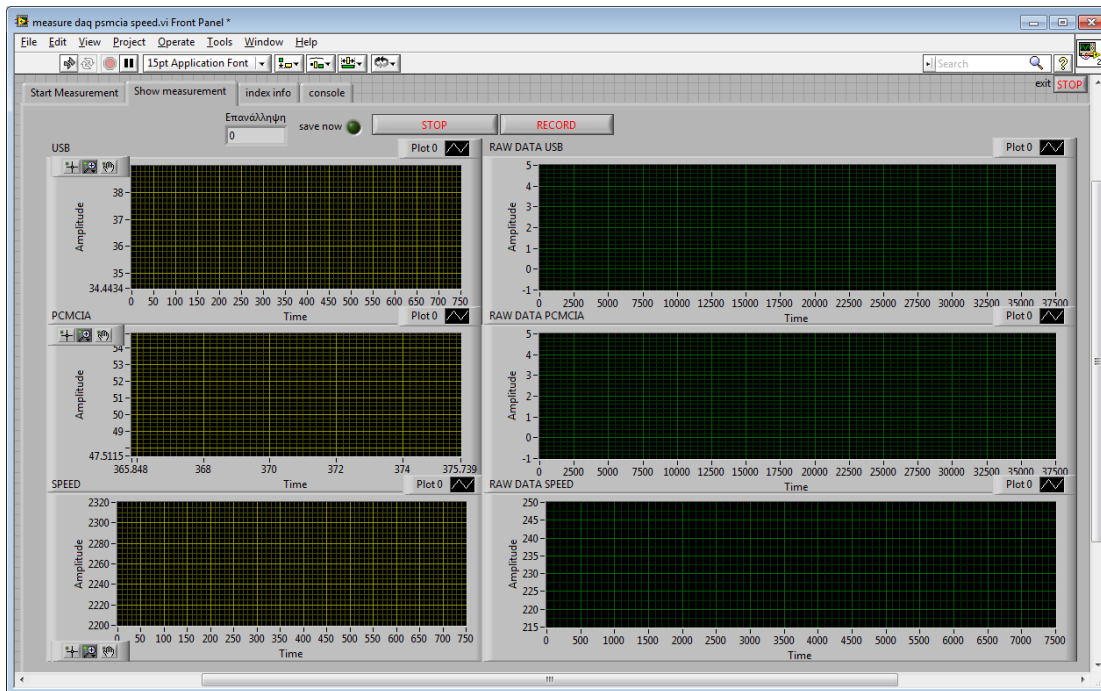
Στις δύο κάρτες ψηφιοποίησης οδηγήθηκαν τα σήματα:

- ◆ Πίεσης θαλάμου καύσης
- ◆ Σήμα θέσης άνω νεκρού σημείου
- ◆ Σήμα χρονικής αναφοράς που παράγεται από την συσκευή μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας και σηματοδοτεί τη χρονική στιγμή έναρξης και λήξης της μέτρησης.

Η κάρτα DAQCard-6024E που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση μετρήσεων με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου, χρησιμοποιεί σαν σήμα χρονισμού το σήμα περιστροφής του στροφαλοφόρου κατά 0.5 μοίρες. Με αυτόν τον τρόπο κάθε ψηφιοποιημένο δείγμα αντιστοιχεί σε γωνία στροφάλου πολλαπλάσια των 0.5 μοιρών. Η κάρτα USB-9215 που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση μετρήσεων με σταθερό βήμα χρόνου, χρονίζεται από το εσωτερικό της ρολόι. Η συχνότητα δειγματοληψίας ρυθμίστηκε ισοδύναμη με 0.5 μοίρες γωνίας στροφάλου, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.1.

Η συσκευή μέτρησης στιγμιαίας ταχύτητας χρησιμοποιεί σαν είσοδο τα σήματα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα που είναι ανά 0.5 μοίρες και της θέσης του άνω νεκρού σημείου. Η μετρούμενη στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής οδηγήθηκε στον υπολογιστή σαν σειριακή συμβολοσειρά, ενώ το παραγόμενο σήμα χρονικής αναφοράς μέτρησης οδηγήθηκε στους δυο αναλογοψηφιακούς μετατροπέεις.

Για την οδήγηση της συνολικής διάταξης και την λήψη των μετρήσεων, αναπτύχθηκε εξειδικευμένο λογισμικό στο περιβάλλον Labview (Εικόνα 6-4).

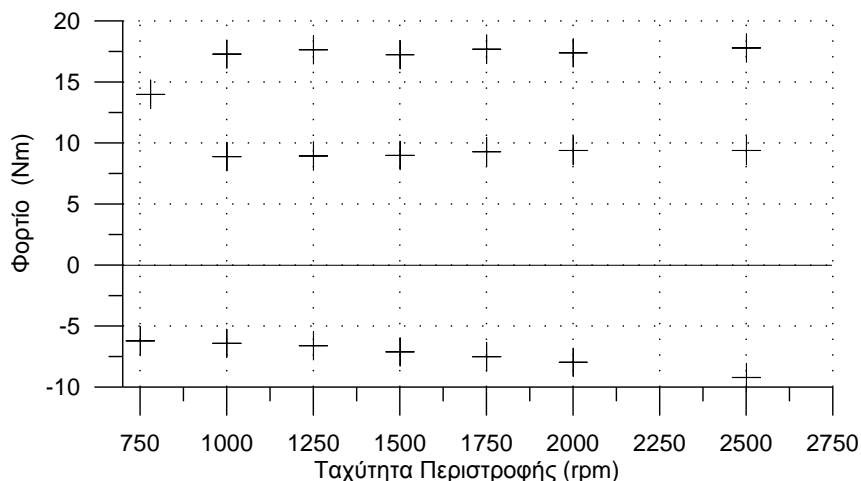


Εικόνα 6-4 Η έκδοση του λογισμικού μέτρησης οδήγησης και λήψης μετρήσεων, με την οποία ελήφθησαν οι τελικές μετρήσεις στον κινητήρα Ricardo Hydra του εργαστηρίου.

6.3.3 Ληφθείσες μετρήσεις και επεξεργασία.

Στο Σχήμ. 6-5 φαίνονται τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα στα οποία ελήφθησαν μετρήσεις. Η κάθε μέτρηση περιελάμβανε 10 ακέραιους κύκλους.

Από τις μετρήσεις χρονικής δειγματοληψίας και χρησιμοποιώντας την διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 1, υπολογίστηκε ο μέσος κύκλος της πίεσης με αρχή (0°), τέλος (719.5°) το άνω νεκρό σημείο της εναλλαγής των αερίων και βήμα 0.5° .



Σχήμ. 6-5 Ληφθείσες μετρήσεις

Οι μετρημένες με «γωνιακή δειγματοληψία» τιμές πίεσης και θέσης άνω νεκρού σημείου, αντιστοιχούν σε ακέραια πολλαπλάσια των 0.5° γωνίας στροφάλου. Οι μέσοι όροι των τιμών πίεσης και θέσης άνω νεκρού σημείου των οποίων το πηλίκο της θέσης τους (γωνία στροφάλου) με το 720 είναι ίσα, αποτελούν τον μέσο κύκλο. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 3.7.

6.4 Μεθοδολογία προσομοίωσης μέτρησης χρονικής δειγματοληψίας από μέτρηση γωνιακής δειγματοληψία και αντίστροφα.

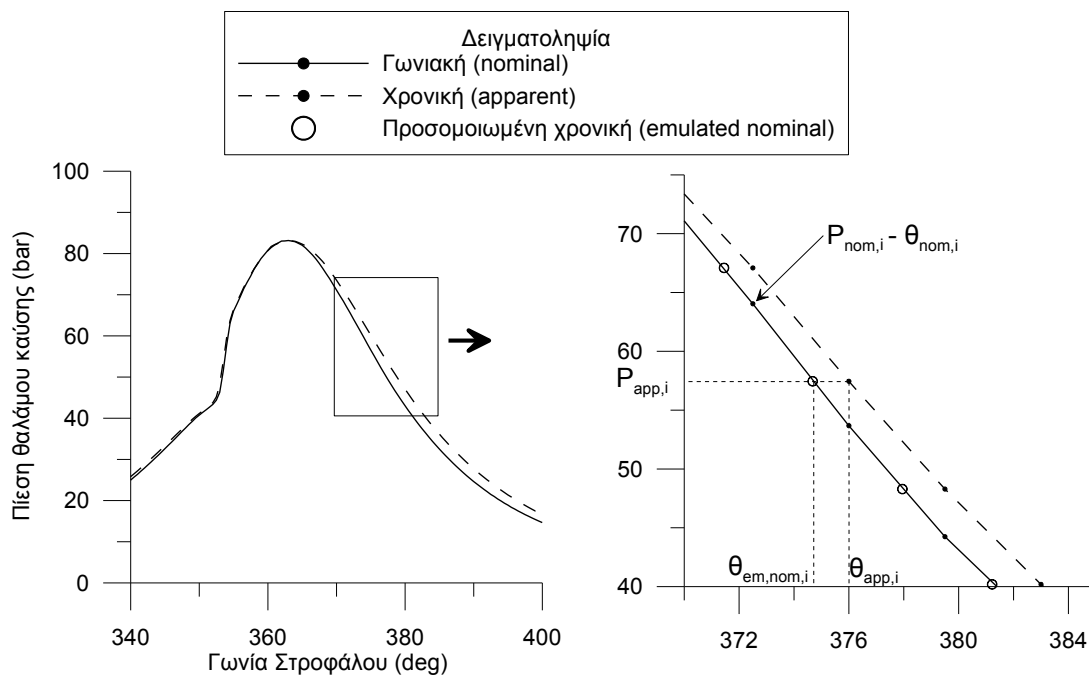
Αναπτύχθηκε μεθοδολογία προσομοίωσης της μεθόδου δειγματοληψίας σταθερού χρονικού βήματος από την μέθοδο δειγματοληψίας σταθερής γωνίας στροφάλου, και αντίστροφα. Για την προσομοίωση κάθε μεθόδου δειγματοληψίας, χρησιμοποιούνται οι τιμές που έχουν μετρηθεί με την άλλη, αντιστοιχισμένες σε κατασκευασμένες τιμές γωνίας στροφάλου. Δηλαδή χρησιμοποιείται η ίδια μέτρηση με δυο διαφορετικές αναφορές γωνίας στροφάλου: την πραγματική και αυτήν που προσομοιώνει την άλλη μέθοδο δειγματοληψίας. Η μεθοδολογία χρησιμοποιείται σαν εργαλείο για την διερεύνηση και διόρθωση του προβλήματός που περιγράφεται στην συνέχεια.

Στο αριστερό τμήμα του Σχήμ. 6-6 φαίνεται η πίεση του θαλάμου καύσης στις 1000 σαλ, 9Nm στον κινητήρα Ricardo Hydra. Οι δυο γραμμές, η συνεχής και η διακεκομμένη αποδίδουν την μέτρηση, ταυτόχρονα, με διαφορετική μέθοδο δειγματοληψίας, σταθερού γωνιακού βήματος και σταθερού χρονικού βήματος, αντίστοιχα. Οι τιμές της γωνίας στροφάλου για την δεύτερη μέθοδο εκτιμήθηκαν με τον συμβατικό τρόπο, όπως αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο. Είναι φανερό ότι οι δυο μετρήσεις δεν ταυτίζονται.

Στη συνέχεια τού κεφαλαίου μελετάται αυτή η ασυμφωνία μεταξύ των μετρήσεων, που αποδίδεται στην διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου σε συνδυασμό με την γραμμική αναγωγή του χρόνου σε γωνία στροφάλου.

Στο δεξί τμήμα του Σχήμ. 6-6 φαίνεται η λεπτομέρεια που επισημαίνεται με τετράγωνο πλαίσιο στο αριστερό μέρος του ίδιου σχήματος. Τα συμπαγή σύμβολα αντιστοιχούν σε μετρημένες τιμές πίεσης. Το σημείο « $P_{app,i} - \theta_{app,i}$ » ανήκει στην μέτρηση με σταθερό βήμα χρόνου ενώ το σημείο « $P_{nom,i} - \theta_{nom,i}$ » ανήκει στην μέτρηση με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου. Με την προτεινόμενη μεθοδολογία, που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο, υπολογίζονται οι τιμές $\theta_{em,nom,i}$ ώστε τα σημεία $P_{app,i} - \theta_{em,nom,i}$ (σχήμα με το σύμβολο μη συμπαγούς κύκλου) να σχηματίζουν μια γραμμή όμοια με της μέτρησης σταθερού βήματος

γωνίας στροφάλου. Έτσι προσομοιώνεται η μέτρηση σταθερού βήματος γωνίας στροφάλου από την μέτρηση σταθερού βήματος χρόνου.



Σχήμ. 6-6 Ο μηχανισμός εισαγωγής του σφάλματος λόγω διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στην μέτρηση της πίεσης καύσης

Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την διόρθωση της χρονικής μεθόδου δειγματοληψίας, που εμπεριέχει το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου. Επίσης χρησιμοποιείται για την διερεύνηση της επίδρασης του σφάλματος στα παράγωγα μεγέθη που εκτιμώνται από τη πίεση καύσης. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας ίδιες τιμές ψηφιοποιημένης πίεσης, εξαλείφεται το σφάλμα που οφείλεται στην χρήση διαφορετικών συστημάτων ψηφιοποίησης και οι διαφορές στα αποτελέσματα οφείλονται πλέον μόνο στο σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου.

6.4.1 Μέθοδος προσομοίωση της μέτρησης με χρονική δειγματοληψία.

Η μέτρηση με χρονική δειγματοληψία εμπεριέχει το υπό συζήτηση σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου. Χρησιμοποιώντας τις τιμές πίεσης από μέτρηση με γωνιακή δειγματοληψία και προσομοιώνοντας την μέτρηση με χρονική δειγματοληψία (υπολογίζοντας τις αντίστοιχες γωνίες στροφάλου), προκύπτει η «προβληματική» μέτρηση. Η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται μόνο για την διερεύνηση του προβλήματος.

Η κατασκευή τιμών γωνίας στροφάλου για την προσομοίωση της μέτρησης χρονικής δειγματοληψίας από μέτρηση γωνιακής δειγματοληψίας γίνεται ως ακολούθως:

1. Η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής: Η αρχική σειρά τιμών γωνίας στροφάλου αποτελείται από πολλαπλάσια του βήματος δειγματοληψίας (πχ 0, 0.5 , 1 ... 719.5 , 720). Σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί και μια τιμή στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής, ω . Αν αυτή δεν μετρήθηκε με την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας, τότε με γραμμική παρεμβολή δημιουργούνται νέες τιμές στιγμιαίας ταχύτητας που αντιστοιχούν στην αρχική σειρά τιμών γωνίας στροφάλου.

2. Δημιουργία σειράς με τιμές τον χρόνο δειγματοληψίας του κάθε δείγματος: Πολλαπλασιάζοντας την σειρά τιμών της ταχύτητας περιστροφής με το βήμα δειγματοληψίας, προκύπτει μια σειρά χρονικού βήματος δειγματοληψίας, το οποίο δεν είναι σταθερό. Από αυτήν την σειρά, κατασκευάζεται το σωρευτικό άθροισμα που δείχνει τον πραγματικό χρόνο δειγματοληψίας του κάθε δείγματος.

3. Δημιουργία σειράς με τιμές γωνία στροφάλου ανάλογη του χρόνου δειγματοληψίας του κάθε δείγματος. Πολλαπλασιάζοντας την κανονικοποιημένη ως προς την μονάδα σειρά χρόνου δειγματοληψίας με το διάστημα των 360° προκύπτει μια σειρά τιμών γωνίας στροφάλου που είναι ανάλογη με τον χρόνο δειγματοληψίας.

Τα ζεύγη τιμών που προκύπτουν από την μετρημένη πίεση (με γωνιακή δειγματοληψία) και την γωνία στροφάλου που υπολογίστηκε στα προηγούμενα βήματα, είναι ισοδύναμα με την μέτρηση χρησιμοποιώντας χρονική δειγματοληψία. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για να αναπαραχθεί η μέτρηση που περιέχει το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου. Η μέθοδος αυτή βρίσκεται εφαρμογή στην διερεύνηση του προβλήματος και χρησιμοποιείται στην συνέχεια.

6.4.2 Μέθοδος προσομοίωσης της μέτρησης με γωνιακής δειγματοληψίας

Η μέτρηση με γωνιακή δειγματοληψία δεν εμπεριέχει το υπό συζήτηση σφάλμα. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η μέθοδος διόρθωσης της μέτρησης με χρονική δειγματοληψία, χρησιμοποιώντας τιμές πίεσης μετρημένες με χρονική δειγματοληψία και διορθωμένες τιμές γωνίας στροφάλου, ώστε να προκύψει μέτρηση ισοδύναμη με την μέτρηση με γωνιακή δειγματοληψία.

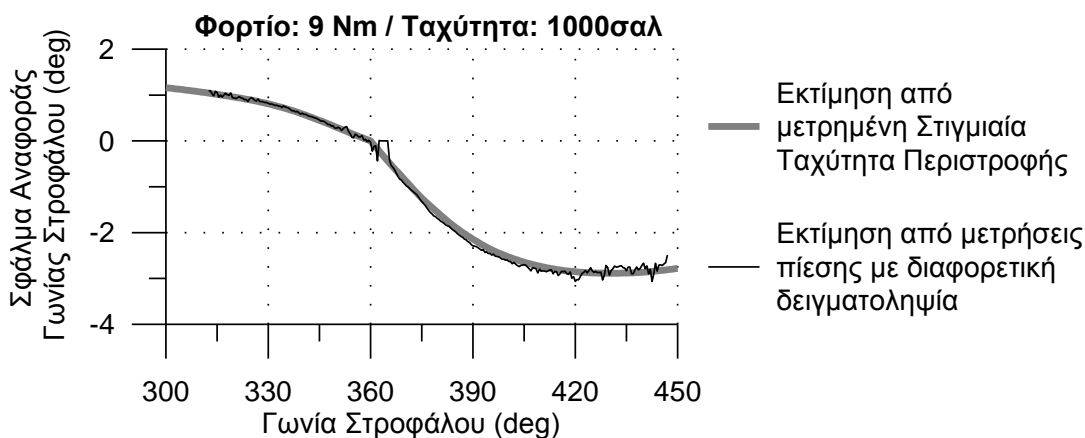
Η κατασκευή τιμών γωνίας στροφάλου για την προσομοίωση μέτρησης γωνιακής δειγματοληψίας από μέτρηση χρονικής δειγματοληψίας γίνεται με παρόμοια τεχνική με αυτή που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Συνοπτικά αυτή έχει ως εξής: χρησιμοποιώντας τις τιμές στιγμιαίας ταχύτητας

περιστροφής υπολογίζεται η γωνία περιστροφής που αντιστοιχεί σε κάθε χρονικό διάστημα δειγματοληψίας. Αυτή η σειρά τιμών, απεικονίζει την πραγματική γωνία δειγματοληψίας (θέση στροφάλου κατά την οποία έγινε δειγματοληψία). Το σωρευτικό άθροισμα αυτής της σειράς τιμών αποτελεί την διορθωμένη σειρά γωνίας στροφάλου. Τα ζεύγη τιμών της πίεσης με την διορθωμένη σειρά γωνίας στροφάλου ισοδυναμούν με την ακριβή μέτρηση χρησιμοποιώντας γωνιακή δειγματοληψία.

6.4.3 Αξιολόγηση μεθοδολογίας προσομοίωσης μέτρησης με διαφορετική δειγματοληψία

Για την επιβεβαίωση της ορθότητας των μετρήσεων και υπολογισμών, δεδομένης της επάρκειας των δεδομένων, γίνεται προσπάθεια υπολογισμού του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου με δυο διαφορετικά σύνολα δεδομένων εισόδου.

Στο Σχήμ. 6-7 με την παχιά γκρι γραμμή φαίνεται το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου υπολογισμένο με δεδομένο εισόδου την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής. Η μέτρηση της πίεσης του θαλάμου καύσης με χρήση σταθερού βήματος χρόνος είναι ισοδύναμη με τα ζεύγη τιμών της ανακατασκευασμένης σειράς γωνίας στροφάλου και της πίεσης μετροйμένης με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου. Αφαιρώντας την κατασκευασμένη σειρά τιμών γωνίας στροφάλου από την σειρά με τα πολλαπλάσια του πραγματικού βήματος δειγματοληψίας προκύπτει το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου, το οποίο φαίνεται στο Σχήμ. 6-7.



Σχήμ. 6-7 Αντιπαραβολή δυο διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου.

Η λεπτή μαύρη γραμμή του Σχήμ. 6-7, υπολογίστηκε άμεσα μετρώντας την διαφορά σε γωνία στροφάλου της ίδιας τιμής πίεσης από τις δυο

διαφορετικές μεθόδους δειγματοληψίας. Για να προκύψουν ίδιες τιμές πίεσης από τις δυο μετρήσεις, γίνεται γραμμική παρεμβολή σημείων σε μια εκ των δύο. Οι «ανωμαλίες» στην καμπύλη που έχει υπολογισθεί με την δεύτερη μέθοδο οφείλονται:

6. στην χρήση διαφορετικών συστημάτων δειγματοληψίας
7. στην αλλοίωση της μέτρησης λόγω γραμμικής παρεμβολής και
8. στην μικρή ευαισθησία της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε.

Από το σχήμα γίνεται φανερό ότι οι δύο υπολογισμοί χρησιμοποιώντας εντελώς διαφορετικά δεδομένα συμπίπτουν πλήρως. Αυτό αποτελεί σημαντική ένδειξη ότι και οι δύο είναι ακριβείς.

6.5 Παρουσίαση του σφάλματος

Στην παράγραφο 3.4 περιγράφεται η συνήθης διαδικασία αναγωγής της αναφοράς από τον χρόνο στην γωνία στροφάλου και στην 3.6 ο υπολογισμός του μέσου κύκλου, για μετρήσεις που ελήφθησαν με χρονική δειγματοληψία. Η διαδικασία αυτή εμπεριέχει σφάλμα στην αναφορά γωνίας στροφάλου διότι γίνεται αναγωγή του χρόνου σε γωνία στροφάλου, χρησιμοποιώντας την μέση ταχύτητα περιστροφής ανά περιστροφή.

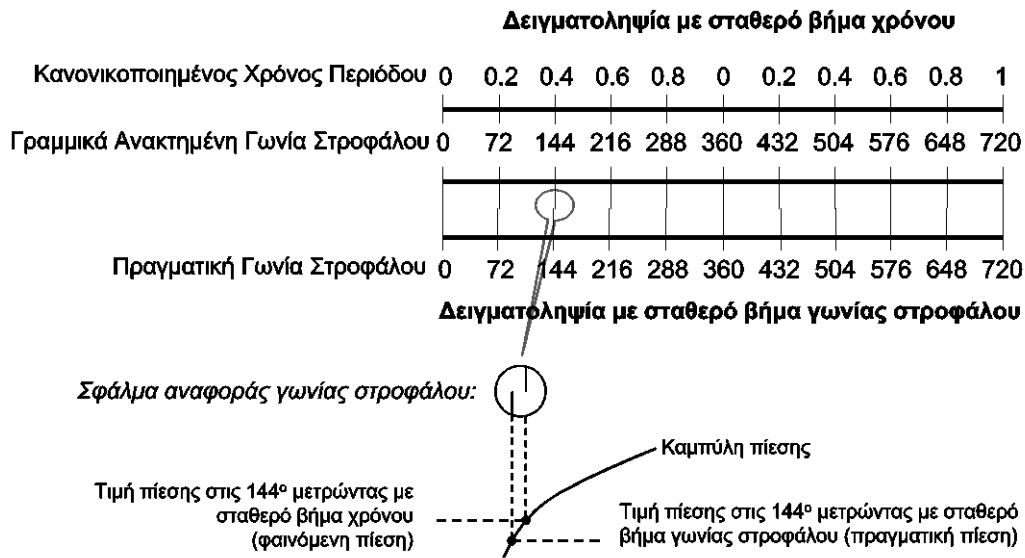
Στο Σχήμ. 6-8, παρουσιάζεται μια οπτικοποίηση του μηχανισμού εισαγωγής του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου. Τα δεδομένα προέρχονται από μετρήσεις της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής στον κινητήρα Ricardo Hydra, σε συνθήκες λειτουργίας 1000 rpm, 9 Nm.

Στον επάνω άξονα, με τίτλο “Κανονικοποιημένος χρόνος περιόδου”, τα διαστήματα μεταξύ των ετικετών είναι ίσα. Ο άξονας απεικονίζει τις 11 στιγμές δειγματοληψίας με σταθερό βήμα χρόνου, για δυο περιστροφές τετράχρονου κινητήρα. Για λόγους σαφήνειας του σχήματος, εμφανίζονται τα συμβάντα δειγματοληψίας ανά 72 μοίρες γωνίας στροφάλου.

Στο δεύτερο (ενδιάμεσο) άξονα, με τίτλο “Γραμμικά ανακτημένη γωνία στροφάλου”, φαίνονται οι τιμές γωνίας στροφάλου που θα αποδίδονταν στις μετρημένες τιμές της πίεσης, έχοντας υποθέσει σταθερή ταχύτητα περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου.

Στον τρίτο άξονα, με τίτλο “Πραγματική γωνία στροφάλου”, τα διαστήματα ανάμεσα στις ετικέτες δεν είναι ίσα. Από την μετρημένη στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής υπολογίστηκε η θέση των τιμών γωνίας στροφάλου ως προς τον χρόνο. Ο άξονας είναι χρονικά γραμμικός αλλά λόγω της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής, δεν είναι γραμμικός ως προς την γωνία στροφάλου. Η θέση των ετικετών δείχνει τα συμβάντα της δειγματοληψίας με την χρήση σταθερού βήματος γωνίας στροφάλου σε άξονα χρόνου.

Από την αναντιστοιχία των γραμμών των δυο μεθόδων δειγματοληψίας, οπτικοποιείται το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου.



Σχήμ. 6-8 Οπτικοποίηση του μηχανισμού εισαγωγής σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου.

6.5.1 Ταχύτητα περιστροφής

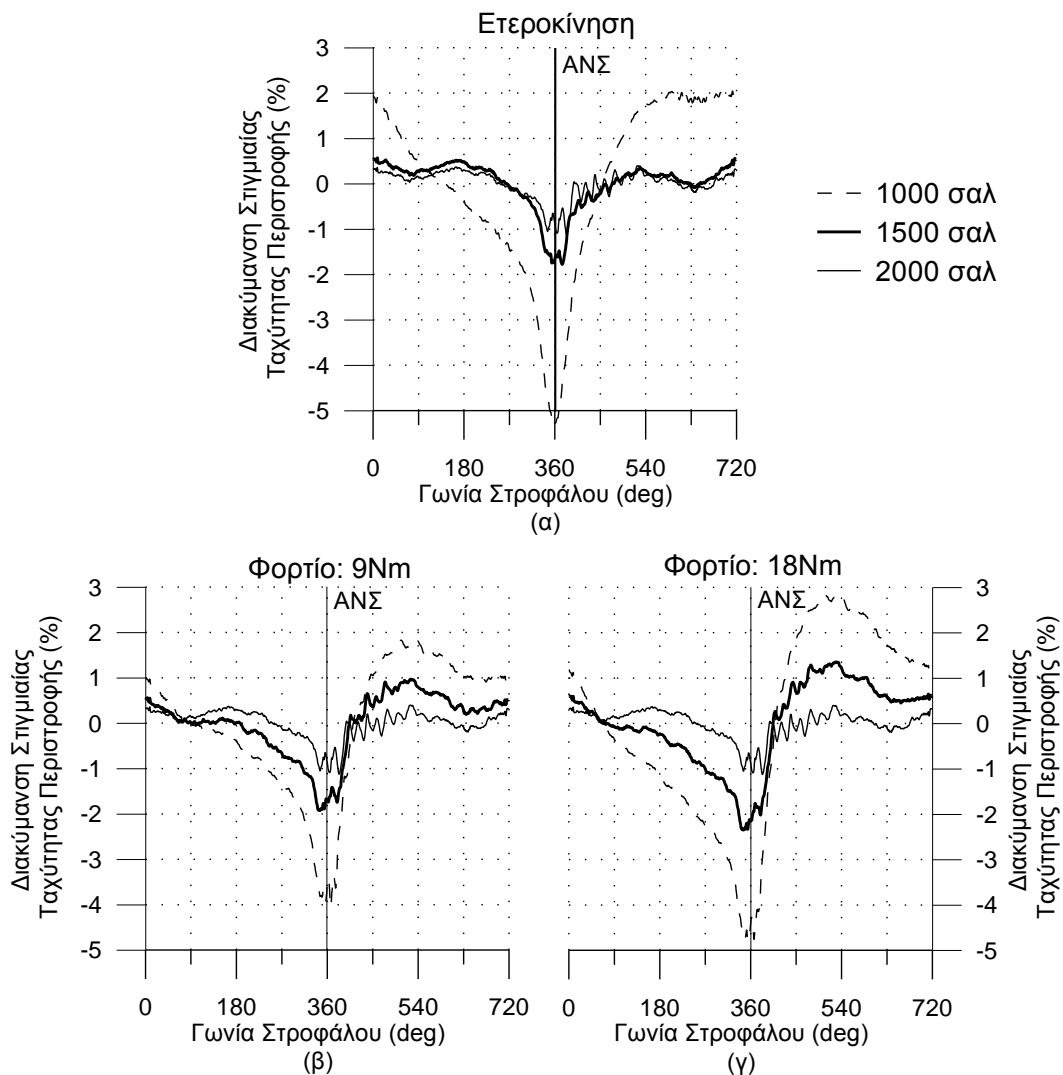
Το σήμα που λαμβάνεται από την συσκευή που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής είναι στην μορφή “ $t_{\Delta\theta} - \theta$ ”. Από το διάστημα $t_{\Delta\theta}$ υπολογίζεται η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής ω , που αντιστοιχεί στην γωνία στροφάλου θ , από την ακόλουθη σχέση:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{t_{\Delta\theta}} \quad (6-5)$$

Η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής εκφρασμένη σαν ποσοστό της μέσης ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ως προς την γωνία στροφάλου φαίνεται στο Σχήμ. 6-9 για τρεις ταχύτητες περιστροφής και τρία διαφορετικά φορτία

Παρατηρείται ότι και για τα εννέα σημεία λειτουργίας που εξετάστηκαν το ίχνος της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής ακολουθεί την ίδια τάση, με διαφορετική ένταση. Κατά την συμπίεση (0-180° ΓΣ) η ταχύτητα περιστροφής έχει τιμή χαμηλότερη από την μέση. Στα τελευταία στάδια στις συμπίεσης φθίνει απότομα για να φτάσει στο άνω νεκρό σημείο να έχει την χαμηλότερη τιμή. Κατά την καύση και εκτόνωση ο κινητήρας ως αναμένεται επιταχύνει για να φτάσει την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής πριν το κάτω νεκρό σημείο. Σημειώνεται ότι για κάποιο διάστημα μετά το ΑΝΣ στο τέλος της συμπίεσης, παρόλο που η ταχύτητα αυξάνεται έντονα, η τιμή της είναι χαμηλότερη από την μέση ταχύτητα περιστροφής. Μετά το κάτω νεκρό σημείο και κατά την διάρκεια

της εναλλαγής των αερίων (μέχρι την επόμενη συμπίεση) η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται.

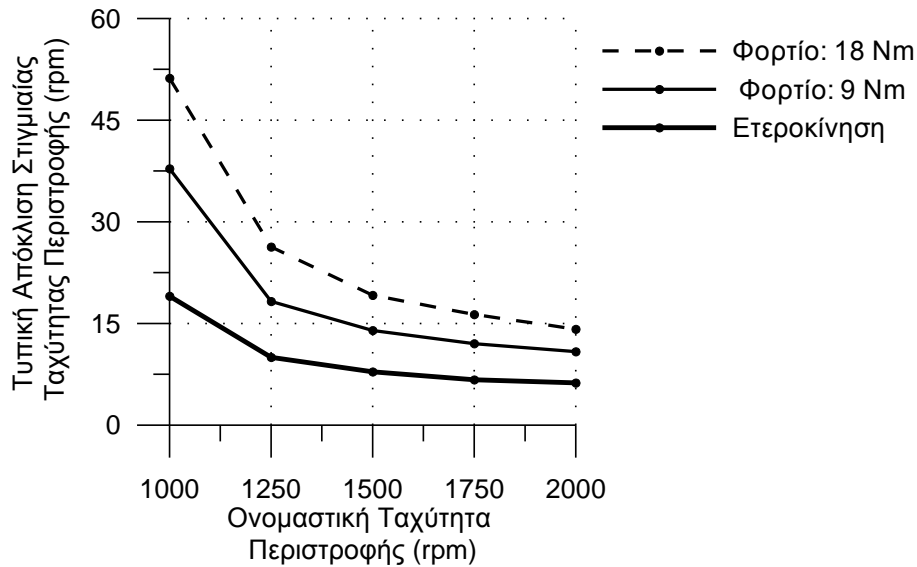


Σχήμ. 6-9 Διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τρεις μέσες ταχύτητες περιστροφής σε (α) ετεροκίνηση (β) χαμηλό φορτίο και (γ) υψηλό φορτίο

Όπως φαίνεται και στα τρία φορτία του σχήματος, η διακύμανση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής είναι εντονότερη στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα. Επίσης παρατηρείται ότι η αύξηση του φορτίου, αυξάνει την διακύμανση. Στην ετεροκίνηση (σχήμα α) η ακραία τιμή της διακύμανσης είναι μεγάλη όπως και στα υψηλά φορτία (σχήμα γ), αλλά η μορφή της, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, διαφέρει ελαφρώς από την διακύμανση κατά την εμφορτη λειτουργία (σχήματα β, γ) έχοντας πιο οξεία χαρακτηριστικά.

Στο Σχήμ. 6-10 δίνεται η τυπική απόκλιση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής για όλα τα σημεία λειτουργίας που μελετήθηκαν. Οι παρατηρήσεις για την τάση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής

συναρτήσει της μέσης ταχύτητας και του φορτίου επιβεβαιώνονται. Όσον αφορά στην ετεροκίνηση, φαίνεται τελικά ότι η διακύμανση παρά το γεγονός ότι παίρνει μεγάλες ακραίες τιμές γενικά δεν αποκλίνει περισσότερο από την διακύμανση κατά τη εμφορτη λειτουργία.



Σχήμ. 6-10 Τυπική απόκλιση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής συναρτήσει της μέσης ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για υψηλό, χαμηλό φορτίο και ετεροκίνηση.

6.5.2 Πραγματικό και Θεωρούμενο Βήμα Μέτρησης

Όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η συνήθης διαδικασία για την μέτρηση της πίεσης θαλάμου καύσης, είναι η χρήση ενός συστήματος ψηφιοποίησης που καταγράφει τις τιμές της πίεσης με χρονικά σταθερό βήμα. Τότε η συχνότητα δειγματοληψίας, f_s , καθορίζεται από την σχέση:

$$f_s = \frac{360 \cdot N}{60 \cdot \Delta\theta} = \frac{6 \cdot N}{\Delta\theta} \quad (6-6)$$

όπου N είναι η αναμενόμενη μέση ταχύτητα περιστροφής και $\Delta\theta$ το επιθυμητό βήμα της μέτρησης σε όρους γωνίας στροφάλου. Έτσι, από την μέτρηση προκύπτει σειρά τιμών "P - t" με σταθερό βήμα, Δt , μεταξύ των ψηφιοποιημένων δειγμάτων ίσο με:

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (6-7)$$

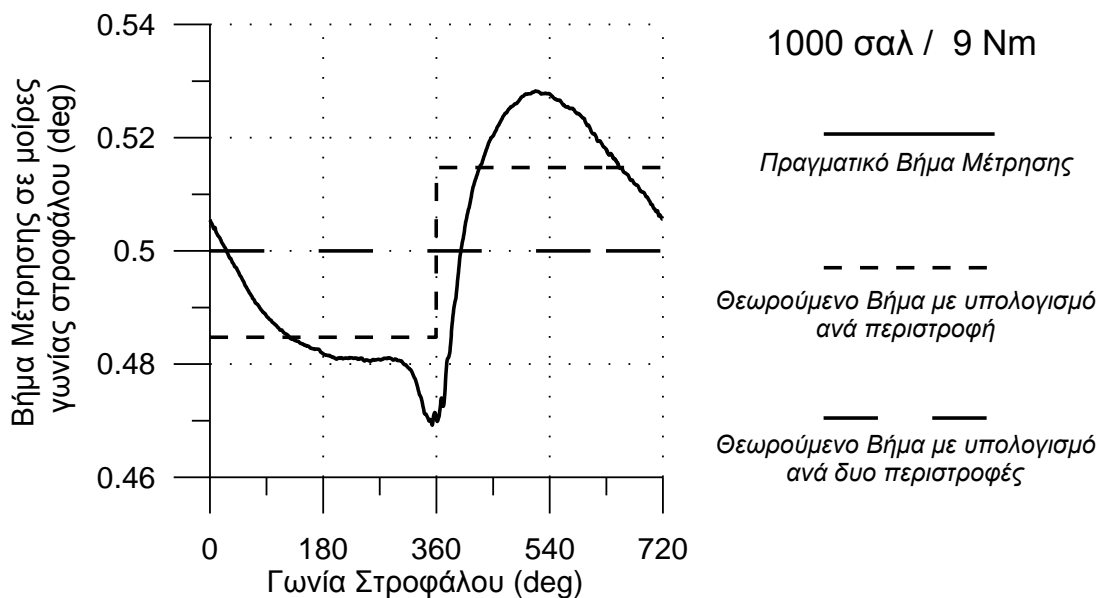
Κατά την συνήθη διαδικασία που εμπεριέχει το συζητούμενο σφάλμα, για την μετατροπή της σειράς χρόνου σε σειρά γωνίας στροφάλου, γίνεται η παραδοχή ότι σε κάθε βήμα χρόνου Δt , ο κινητήρας περιστρέφεται με σταθερή γωνία στροφάλου $\Delta\theta$ (το οποίο προϋποθέτει σταθερή ταχύτητα περιστροφής).

Στο Σχήμ. 6-11, η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στο πραγματικό βήμα μέτρησης, $\Delta\theta$, το οποίο είναι μεταβλητό. Αυτό υπολογίζεται από την μετρομένη στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής, ω , και το σταθερό βήμα χρόνο δειγματοληψίας, Δt , από την σχέση:

$$\Delta\theta = \omega \cdot \Delta t \quad (6-8)$$

Οι δυο διακεκομμένες γραμμές του Σχήμ. 6-11, αντιστοιχούν στο βήμα μέτρησης το οποίο χρησιμοποιείται "λανθασμένα" στις μετρήσεις χρονικής δειγματοληψίας και το οποίο στην συνέχεια αναφέρεται ως "θεωρούμενο βήμα μέτρησης". Το κάθε ένα προκύπτει από διαφορετική μέθοδο επεξεργασία της μέτρησης, όπως περιγράφεται ακολούθως.

Η πυκνά διακεκομμένη γραμμή δείχνει δυο διαφορετικά βήματα μέτρησης ανάμεσα στις διαδοχικές θέσεις ΑΝΣ. Τα δυο διαφορετικά βήματα (στα διαστήματα $0 - 360^\circ$ και $360^\circ - 720^\circ$) προκύπτουν όταν για την επεξεργασία της μέτρησης χρησιμοποιείται η θέση κάθε ΑΝΣ. Το βήμα της μέτρησης προκύπτει από την διαίρεση των 360° με το πλήθος των δειγμάτων ανάμεσα σε δυο διαδοχικές θέσεις ΑΝΣ. Στην συμπίεση, ο κινητήρας επιβραδύνει ενώ στην εκτόνωση επιταχύνει. Συνεπώς η συμπίεση διαρκεί χρονικά περισσότερο από την εκτόνωση. Έτσι τα δείγματα ανάμεσα σε δυο θέσεις του ΑΝΣ στην περιστροφή που περιλαμβάνει την συμπίεση είναι περισσότερα από τη περιστροφή που περιλαμβάνει την εκτόνωση.



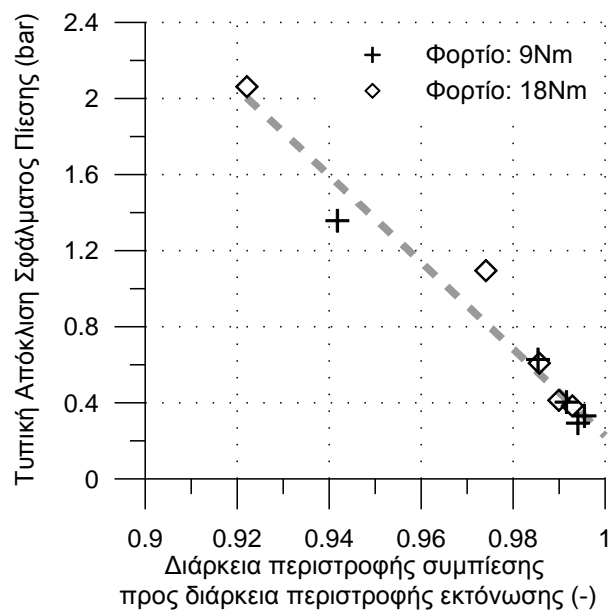
Σχήμ. 6-11 Το πραγματικό βήμα μέτρησης σε αντιπαραβολή με δυο περιπτώσεις λανθασμένου.

Η αραιά διακεκομμένη γραμμή δείχνει ένα ενιαίο βήμα μέτρησης για την συνολική διάρκεια των δυο περιστροφών (0-720°). Αυτό το βήμα μέτρησης προκύπτει όταν η επεξεργασία της γίνει ανά δυο περιστροφές, όπως στην περίπτωση της χρήσης θερμοδυναμικής μεθόδου εκτίμησης του ANΣ, όπου εντοπίζεται μόνο το ANΣ της συμπίεσης. Συνεπώς η εκτίμηση του βήματος γίνεται διαιρώντας τις 720° με τον αριθμό των δειγμάτων ανάμεσα σε δυο ANΣ συμπίεσης.

6.5.3 Μέθοδος ανίχνευσης σφάλματος με συμβατικές μετρήσεις

Η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής κατά την μέτρηση με χρονική δειγματοληψία είναι δυνατό να προκαλέσει σημαντικό σφάλμα στην εκτίμηση σημαντικών λειτουργικών μεγεθών, όπως φαίνεται στις επόμενες παραγράφους. Συνεπώς η ανίχνευση και μόνο της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής είναι σημαντική.

Η προτεινόμενη μέθοδος για την ανίχνευση της ύπαρξης σημαντικής διακύμανσης βασίζεται στο γεγονός ότι αν αυτή υπάρχει τότε οι δυο περιστροφές του 4-X κινητήρα θα διαφέρουν χρονικά. Αν η χρονική διαφορά (της διάρκειας των δυο περιστροφών) είναι μετρήσιμη με συμβατικές μετρήσεις, τότε και η διακύμανση είναι σημαντική. Ως συμβατικές νοούνται μετρήσεις με βήμα μέτρησης ισοδύναμο με 0.5°. Για την ανίχνευση της χρονικής διάρκειας της περιστροφής είναι αναγκαία η καταγραφή του σήματος του άνω νεκρού σημείου.



Σχήμ. 6-12 Συσχέτιση του σφάλματος που υπεισέρχεται στην επεξεργασμένη μέτρηση της πίεσης του θαλάμου καύσης συναρτήσει του λόγου ανισότητας περιστροφών.

Στο Σχήμ. 6-12 δίνεται η συσχέτιση του σφάλματος στην επεξεργασμένη μέτρηση της πίεσης του θαλάμου καύσης με τον λόγο της χρονικής διάρκειας της συμπίεσης ($0-360^\circ$) προς την χρονική διάρκεια της εκτόνωσης ($360^\circ-720^\circ$).

Το σφάλμα της επεξεργασμένης μέτρησης, στο οποίο αντιστοιχεί η τεταγμένη του σχήματος, ποσοτικοποιείται μέσω της τυπικής απόκλισης της διαφοράς τιμής της εσφαλμένη πίεσης από την πραγματική για το διάστημα των $300^\circ - 430^\circ$ γωνίας στροφάλου. Η εσφαλμένη πίεση είναι αυτή που προέκυψε λόγω της λανθασμένης αναφοράς γωνίας στροφάλου που αποδίδεται στην γραμμική μετατροπή του χρόνου σε γωνία στροφάλου σε συνδυασμό με την διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Ο λόγος ανισότητας περιστροφών είναι ο λόγος της διάρκειας της περιστροφής που περιλαμβάνει το στάδιο της συμπίεσης προς την διάρκεια της περιστροφής που περιλαμβάνει την εκτόνωση. Η διάρκεια, δηλαδή ο χρόνος, ισούται με τον αριθμό των δειγμάτων προς την συχνότητα δειγματοληψίας, συνεπώς ο λόγος ανισότητας περιστροφών ισούται με τον λόγο των δειγμάτων της περιστροφής συμπίεσης προς τα δείγματα της περιστροφής εκτόνωσης.

Η συχνότητα δειγματοληψίας καθορίζει την διακριτική ικανότητα της μεθόδου για την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του σφάλματος. Δηλαδή χρησιμοποιώντας μεγάλο ισοδύναμο βήμα δειγματοληψίας είναι πιθανό να μην είναι δυνατή η ανίχνευση διαφοράς στον αριθμό των δειγμάτων από περιστροφή σε περιστροφή. Η διακριτική ικανότητα (ανάλυση, resolution) σε λόγο διάρκειας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\delta \left(\frac{t_{comp}}{t_{exp}} \right) = 1 - \frac{360 + \Delta\theta}{360 - \Delta\theta} \quad (6-9)$$

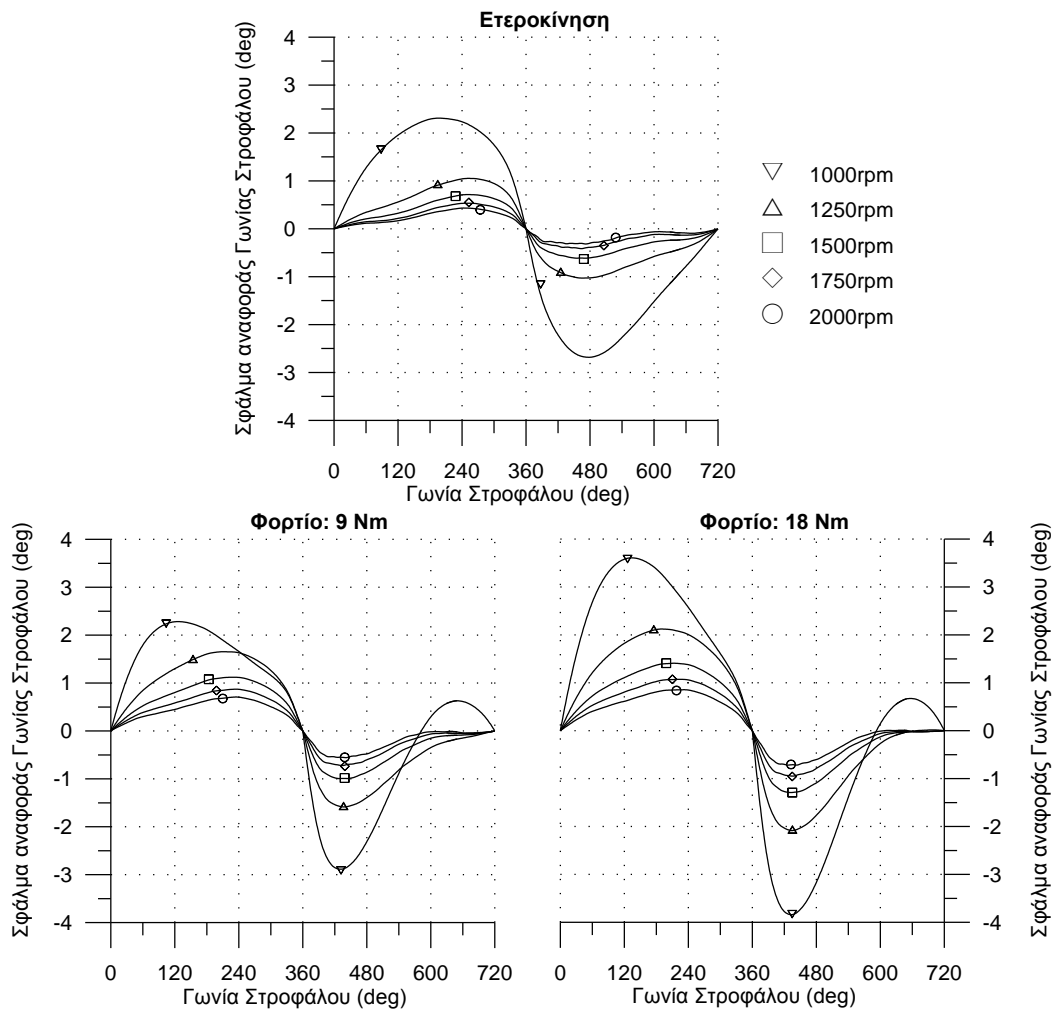
όπου $\Delta\theta$ είναι το ισοδύναμο βήμα μέτρησης εκφρασμένο σε γωνία στροφάλου. Η ανίχνευση της ανισότητας των περιστροφών για τα σημεία που απεικονίζονται στο σχήμα θα ήταν εφικτή με ισοδύναμο βήμα μέτρησης έως και 0.8° γωνίας στροφάλου. Στην παραγωγή του σχήματος με σκοπό την αύξηση της ανάλυσης (resolution) ο υπολογισμός της διάρκειας της κάθε περιστροφής έγινε χρησιμοποιώντας την μετρημένη στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι είναι δυνατό να υπάρχει διακύμανση στην ταχύτητα περιστροφής, αλλά η κατανομή της να είναι τέτοια που να μην προκαλεί διαφορά στην διάρκεια των περιστροφών συμπίεσης και εκτόνωσης. Αυτό όμως δεν ισχύει στην παρούσα περίπτωση.

6.5.4 Χάρτες σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου για τον υπό μελέτη κινητήρα

Η μέτρηση της πίεσης του θαλάμου καύσης με χρήση σταθερού βήματος χρόνου είναι ισοδύναμη με τα ζεύγη τιμών της σειράς γωνίας στροφάλου, που

κατασκευάζονται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.4, και της πίεσης που έχει μετρηθεί με σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου. Αφαιρώντας την κατασκευασμένη σειρά τιμών γωνίας στροφάλου από την σειρά με τα πολλαπλάσια του πραγματικού βήματος δειγματοληψίας προκύπτει το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου, το οποίο φαίνεται στο Σχήμ. 6-13 για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και για τα τρία φορτία που εξετάζονται. Τα σχήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αναφορά για την διόρθωση είτε ολόκληρου του διαγράμματος πίεσης είτε ενός μεμονωμένου συμβάντος πχ του χρονισμού έγχυσης, της θέσης μέγιστης πίεσης καύσης, την πραγματική θέση του αισθητήρα αναφοράς γωνίας στροφάλου (στην περίπτωση που δεν είναι τοποθετημένος στο ANΣ), κτλ.



Σχήμ. 6-13 Σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τον κινητήρα Ricardo Hydra για πέντε ταχύτητες περιστροφής σε δυο φορτία και ετεροκίνηση.

6.6 Η επίδραση του σφάλματος στην μετρομένη πίεση καύσης

Το σφάλμα που εξετάζεται είναι η λανθασμένη αναφορά γωνίας στροφάλου σε μετρήσεις με σταθερό βήμα χρόνου που συμβαίνει όταν υπάρχει διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής αλλά δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την μετατροπή του χρόνου σε γωνία στροφάλου. Στη παρούσα παράγραφο μελετάται η επίδραση που έχει το συγκεκριμένο σφάλμα στο διάγραμμα της πίεσης, μέσω της σύγκρισης της πραγματικής πίεσης με την μέτρηση που περιέχει το σφάλμα η οποία στην συνέχεια αναφέρεται ως «θεωρούμενη πίεση». Η «πραγματική» και η «θεωρούμενη» πίεση μετρήθηκαν ταυτόχρονα με την διάταξη που περιγράφεται στην παράγραφο 6.3.2.

Σαν «πραγματική» πίεση λαμβάνεται υπόψη η πίεση που μετρήθηκε με τη χρήση του κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου και έχει ακριβή αναφορά γωνίας στροφάλου. Συγκεκριμένα τα δείγματα της πίεσης ελήφθησαν σε ακριβείς θέσεις του στροφάλου, σε γνωστά πολλαπλάσια της μισής μοίρας. Η πραγματική πίεση φαίνεται στο Σχήμ. 6-14 με την συνεχή γραμμή.

Η «θεωρούμενη» πίεση είναι η πίεση που περιλαμβάνει το υπό μελέτη σφάλμα λανθασμένης αναφοράς γωνίας στροφάλου. Προκύπτει από την μέτρηση με σταθερό βήμα χρόνου και την συνεπακόλουθη επεξεργασία για την δημιουργία αναφοράς γωνίας στροφάλου. Η βασική παράμετρος της επεξεργασίας είναι το διάστημα για το οποίο υπολογίζεται το μέσο βήμα δειγματοληψίας. Στην διερεύνηση διακρίνονται δυο περιπτώσεις για το διάστημα λήψης μέσου βήματος:

1. ανά δυο περιστροφές
2. ανά μια περιστροφή.

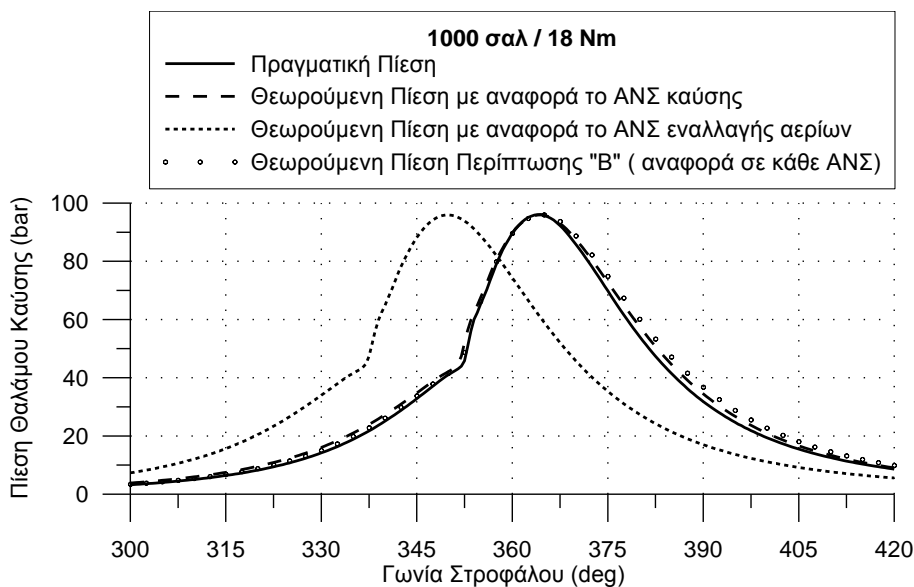
Στο Σχήμ. 6-11 φαίνεται το βήμα μέτρησης για δυο βασικές περιπτώσεις.

Η ακριβής διαδικασία επεξεργασίας της θεωρούμενης πίεσης (και για τις δυο περιπτώσεις) περιγράφεται στην παράγραφο 3.4. Στην παράγραφο 6.3.3 περιγράφεται γενικά η διαδικασία των μετρήσεων της παρούσας διερεύνησης.

6.6.1 Περίπτωση (Α) – Ενιαίο βήμα μέτρησης στις δυο περιστροφές.

Στο Σχήμ. 6-14 τα δυο διαγράμματα με τις διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις δυο ακραίες υποπεριπτώσεις της περίπτωσης (Α), ενώ με την συνεχή γραμμή φαίνεται η πραγματική πίεση.

Ο υπολογισμός της γωνίας στροφάλου έχει γίνει χρησιμοποιώντας μέσο βήμα (πχ 0.5° ΓΣ), κοινό και για τις δυο περιστροφές του 4-Χ κινητήρα. Η διαφοροποίηση των δυο υποπεριπτώσεων είναι η θέση που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά γνωστής θέσης γωνίας στροφάλου



Σχήμ. 6-14 Δυναμοδεικτικά διαγράμματα μετά από επεξεργασία της περίπτωσης της "Α" σε αντιπαραβολή με την πραγματική πίεση και δυναμοδεικτικό της περίπτωσης "B".

Στην περίπτωση με την πυκνά διακεκομμένη γραμμή, σαν αναφορά γνωστής θέσης γωνίας στροφάλου χρησιμοποιήθηκε το άνω νεκρό σημείο στη διάρκεια της εναλλαγής των αερίων. Εκεί τοποθετήθηκαν οι 0° και για κάθε επόμενο ψηφιοποιημένο δείγμα προστέθηκε το βήμα δειγματοληψίας (πχ 0.5° ΓΣ). Αυτή η υποπερίπτωση είναι η δυσμενέστερη και μη αποδεκτή. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό το σφάλμα καθώς στο υποτιθέμενο ΑΝΣ έχει ήδη μειωθεί η πίεση του θαλάμου καύσης κατά 20 bar .

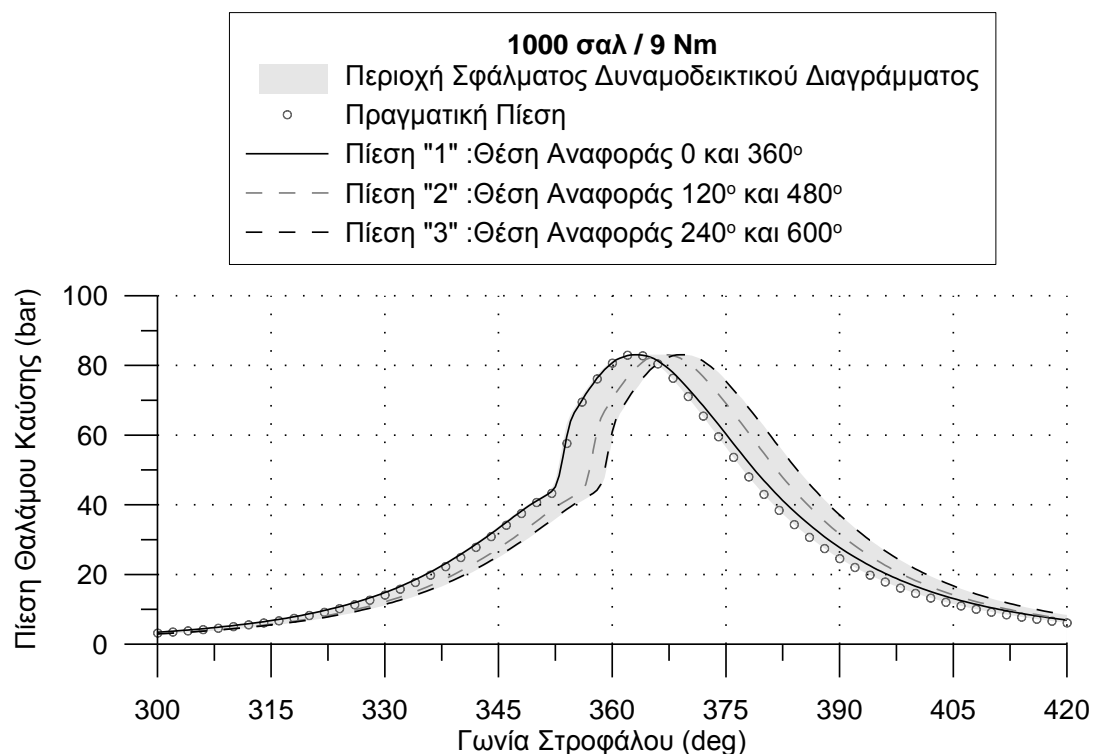
Η άλλη ακραία υποπερίπτωση, η καλύτερη δυνατή, είναι η χρήση του ΑΝΣ της καύσης σαν αναφορά γνωστής θέσης. Σε αυτήν την περίπτωση το μέγιστο σφάλμα παρατηρείται στο άνω νεκρό σημείο της εναλλαγής των αερίων. Το σφάλμα σε εκείνη την περιοχή δεν επηρεάζει την εκτίμηση βασικών μεγεθών όπως είναι η ισχύς και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Όμως μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται και σε περιοχές κοντά στο ΑΝΣ της καύσης. Συγκεκριμένα υπάρχει μια διαρκής υπερεκτίμηση της πίεσης. Αυτό αναμένεται να δημιουργήσει μικρά σφάλματα στο υπολογισμό εκτιμήσεων παράγωγων της πίεσης, όπως της ενδεικνύμενης ισχύος και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (καθώς επηρεάζει την παράγωγο της πίεσης καύσης). Είναι προφανές ότι ανάμεσα στις δυο ακραίες υποπεριπτώσεις που παρουσιάζονται, υπάρχουν και όλες οι ενδιάμεσες.

Η μέθοδος επεξεργασίας της περίπτωσης «Α» εφαρμόζεται σε συνδυασμό με υπολογιστικές μεθόδους αναφοράς γωνία στροφάλου όπως είναι οι υπολογιστικές μέθοδοι προσδιορισμού του ΑΝΣ, που παρέχουν την θέση μόνο του ΑΝΣ της καύσης.

6.6.2 Περίπτωση (B) – Διαφορετικό βήμα μέτρησης ανά περιστροφή.

Για την περίπτωση B, το βήμα γωνίας στροφάλου υπολογίζεται ανά περιστροφή. Έτσι, λαμβάνεται υπόψη η μέση ταχύτητα της περιστροφής με αποτέλεσμα να παρατηρούνται πολύ μικρότερα σφάλματα από την περίπτωση A.

Όμως, όπως φαίνεται στο Σχήμ. 6-15, οι αποκλίσεις στην πίεση είναι σημαντικές. Οι τρεις γραμμές του σχήματος (Πίεση 1, 2 και 3) διαφοροποιούνται στο σημείο που χρησιμοποιήθηκε σαν αναφορά. Για την "Πίεση 1", ήταν διαθέσιμες οι θέσεις δειγμάτων που αντιστοιχούν στις 0 και 360 μοίρες γωνίας στροφάλου. Έτσι υπολογίστηκε το μέσο βήμα για τα διαστήματα 0-360 και 360-720. Το κάθε ψηφιοποιημένο δείγμα της πίεσης αντιστοιχίστηκε σε πολλαπλάσια του μέσου βήματος που υπολογίστηκε για κάθε περιστροφή, ξεκινώντας από τις 0 και τις 360°.

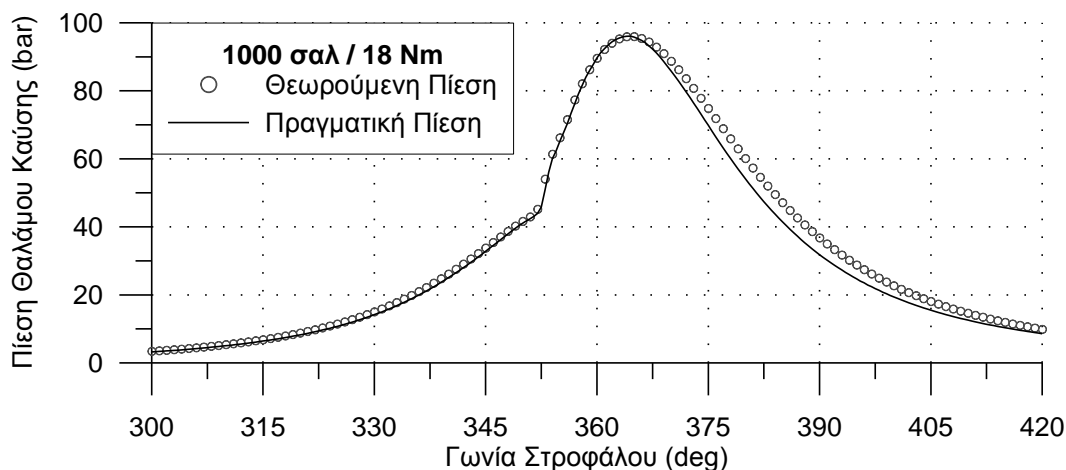


Σχήμ. 6-15 Υποπεριπτώσεις της μεθόδου "B" σε αντιπαραβολή με την πραγματική πίεση.

Στην συνέχεια της παραγράφου εξετάζεται η υποπερίπτωση που σαν θέση αναφοράς χρησιμοποιούνται τα δύο ANΣ (Πίεση "1"). Αυτή θεωρείται και ως η συνηθής περίπτωση σφάλματος διότι συνηθώς χρησιμοποιούνται αισθητήρες άνω νεκρού σημείου για την αναφορά της μέτρησης σε γωνία στροφάλου.

Στο Σχήμ. 6-16 αντιπαρατίθεται η πραγματική με την θεωρούμενη πίεση του θαλάμου καύσης στις 1000 σαλ – 18 Nm. Είναι φανερό ότι η θεωρούμενη πίεση διαφέρει σημαντικά από την πραγματική ιδιαίτερα στην περίοδο της εκτόνωσης. Σε ολόκληρο το διάστημα συμπίεσης – καύσης – εκτόνωσης, με εξαίρεση την περιοχή κοντά στην μέγιστη πίεσης και την περιοχή κοντά στο άνω νεκρό σημείο, υπάρχει υπερεκτίμηση της πίεσης.

Στο άνω νεκρό σημείο δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ πραγματικής και θεωρούμενης πίεσης, διότι κοινό σημείο της επεξεργασίας των δυο μετρήσεων είναι το ANΣ για την αναφορά των 0 και 360°, και όπως αναμένεται το σφάλμα της θεωρούμενης πίεσης μηδενίζεται. Επίσης, επειδή το σφάλμα οφείλεται σε λανθασμένη αναφορά γωνίας στροφάλου, η τιμή της μέγιστης πίεσης δεν επηρεάζεται, αντίθετα επηρεάζεται κύρια η θέση της. Όμως επειδή η θέση της μέγιστης πίεσης είναι κοντά στο ANΣ, όπου το σφάλμα αναφοράς μηδενίζεται, το σφάλμα στην θέση της μέγιστης πίεσης δεν είναι πολύ μεγάλο. Από τους χάρτες της §6.5.4, φαίνεται ότι στις 365° που παρουσιάζεται η μέγιστη πίεση καύσης το σφάλμα είναι περίπου -0.5°.

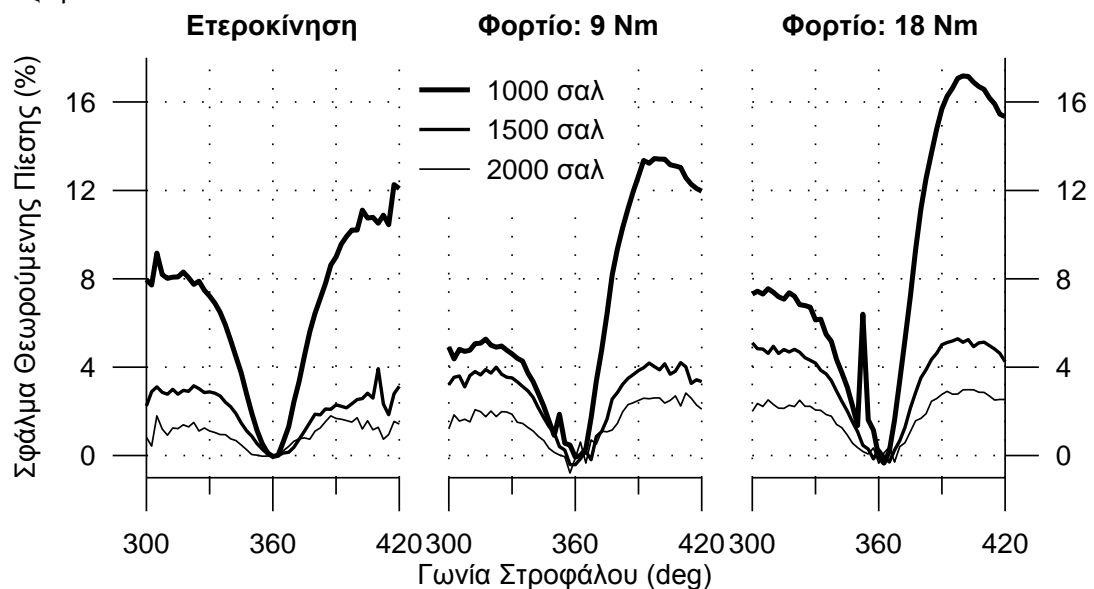


Σχήμ. 6-16 Πραγματική και Θεωρούμενη (που περιλαμβάνει το συζητούμενο σφάλμα) πίεση του θαλάμου καύσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για 1000 σαλ – 18Nm.

Η υπερεκτίμηση της πίεσης δεξιά και αριστερά από το ANΣ της καύσης, οφείλεται στο γεγονός ότι εκεί, η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής έχει τιμή μικρότερη από την μέση και συνεπώς το θεωρούμενο βήμα γωνίας στροφάλου είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό. Έτσι μια τιμή πίεσης μετά το ANΣ αναφέρεται σε γωνία στροφάλου μεγαλύτερη από την πραγματική και μια τιμή πίεσης πριν το ANΣ αναφέρεται σε γωνία μικρότερη από την πραγματική. Τελικά γύρω από το ANΣ της συμπίεσης το δυναμοδεικτικό είναι «απλωμένο» ενώ γύρω από το ANΣ της εναλλαγής αερίων το δυναμοδεικτικό διάγραμμα πιέσεων είναι «συμπιεσμένο».

Η διαφορά μεταξύ πραγματικής και θεωρούμενης πίεσης δίνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο Σχήμ. 6-17. Εκεί δίνεται η διαφορά της θεωρούμενης από την πραγματική πίεση εκφρασμένη ποσοστιαία, με βάση την (τρέχουσα, όχι μέγιστη) πραγματική πίεση, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για τρεις ταχύτητες περιστροφής σε δυο φορτία και για ετεροκίνηση. Το μέγιστο σφάλμα παρατηρείται 40° μετά το ΑΝΣ, στις 1000σαλ και στο υψηλό φορτίο ξεπερνάει το 16%. Από τις 1500 σαλ και πάνω, το σφάλμα περιορίζεται και δεν ξεπερνά το 6%.

Όπως είναι αναμενόμενο με βάση τα προηγούμενα, πλησιάζοντας στο άνω νεκρό σημείο το σφάλμα μηδενίζεται. Η αυξητική τάση του σφάλματος στις μικρές ταχύτητες και τα μεγάλα φορτία που παρατηρείται, συνάδει με τις όμοιες τάσεις διακύμανσης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής. Οι ταχύτητες περιστροφής που παρατηρούνται μακριά από το ΑΝΣ οφείλονται στα σφάλματα ψηφιοποίησης από τα δυο διαφορετικά συστήματα σε συνδυασμό με την μείωση της τιμής της πίεσης που αυξάνει σημαντικά τον λόγο σήματος προς θόρυβο.



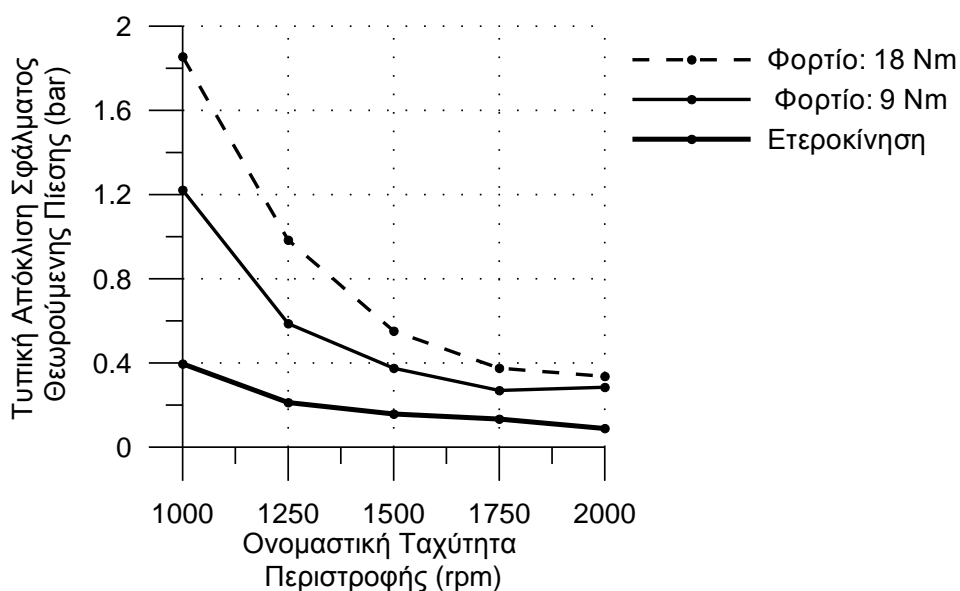
Σχήμ. 6-17 Ποσοστιαίο σφάλμα εκτίμησης της πίεσης καύσης εντός του κύκλου για τρία διαφορετικά φορτία και ταχύτητες περιστροφής.

Το τοπικό μέγιστο του σφάλματος που παρατηρείται πριν το ΑΝΣ στην λειτουργία με καύση, οφείλεται στην απότομη διαφορά της πίεσης κατά την έναυση. Όσο η έναυση πλησιάζει στο ΑΝΣ με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, το μέγιστο αυτό μειώνεται.

Αν το σφάλμα ήταν απόλυτα συμμετρικό ως προς το ΑΝΣ, θα αναμενόταν μικρή επίδρασή στην εκτίμηση της ισχύος. Στην ετεροκίνηση όπου το σφάλμα είναι περισσότερο συμμετρικό απ' ότι στην λειτουργία με καύση, αναμένεται μικρότερο σφάλμα στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος. Στις

λειτουργία με καύση το σφάλμα κατά την εκτόνωση είναι μεγαλύτερο απ' ότι στην συμπίεση οπότε αναμένεται υπερεκτίμηση της ισχύος.

Στο Σχήμ. 6-18 φαίνεται η τυπική απόκλιση της διαφοράς πίεσης στο διάστημα $300^{\circ} - 420^{\circ}$ γωνίας στροφάλου, συναρτήσει της μέσης ταχύτητας περιστροφής για δυο διαφορετικά φορτία και για ετεροκίνηση. Η μικρότερη τυπική απόκλιση διαπιστώνεται στην ετεροκίνηση, με μέγιστη τιμή που είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την ελάχιστη τιμή που παρατηρείται στην διάρκεια της καύσης. Οι δυο καμπύλες λειτουργίας με καύση φαίνεται να συγκλίνουν σε κάποια μη μηδενική τιμή. Πιο σημαντική εκτιμάται η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής και λιγότερο του φορτίου. Αυτό αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα για πραγματικές εφαρμογές.



Σχήμ. 6-18 Το σφάλμα στην μέτρηση της πίεσης καύσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για τα τρία φορτία που εξετάζονται

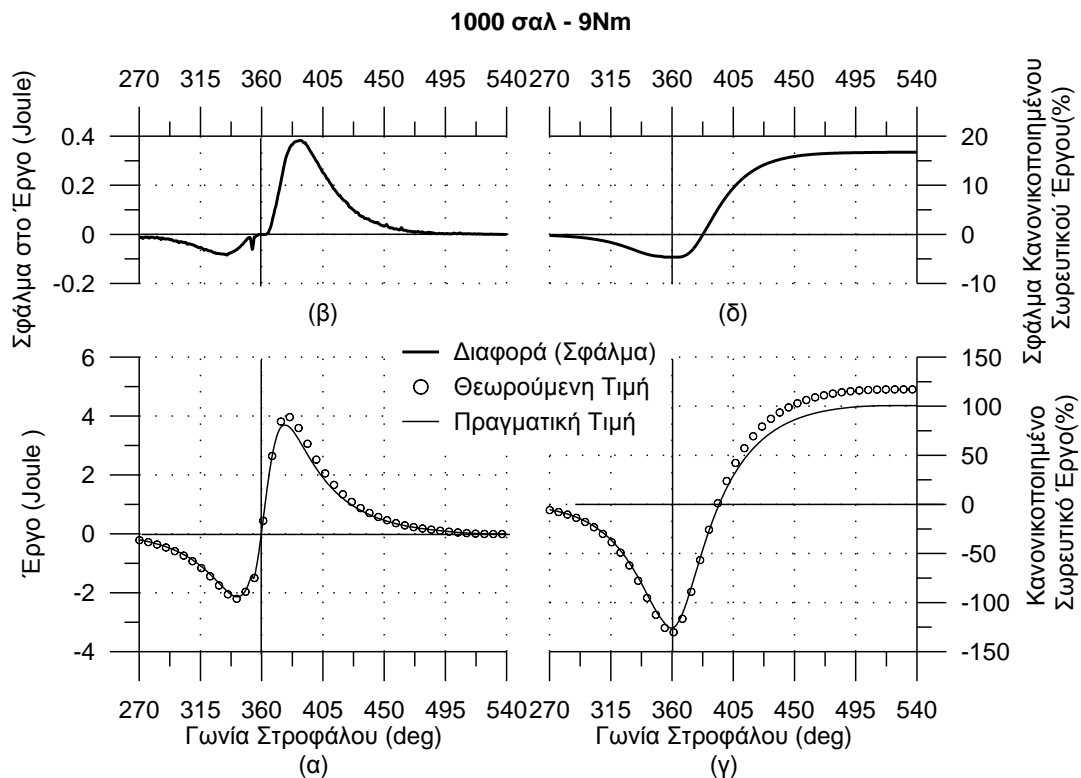
6.7 Η επίδραση του σφάλματος σε εκτιμήσεις λειτουργικών μεγεθών του κινητήρα

Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η επίδραση του σφάλματος εκτίμησης της πίεσης σε παράγωγα μεγέθη που είναι σημαντικά για την περιγραφή της λειτουργίας του κινητήρα. Σαν φαινόμενη πίεση θεωρείται η πίεση ψηφιοποιημένη με σταθερό βήμα χρόνου. Για την αναφορά των τιμών της πίεσης σε γωνία στροφάλου χρησιμοποιούνται όλες οι εντοπισμένες θέσεις ΑΝΣ μέσω αισθητήρα.

6.7.1 Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος

Στο Σχήμ. 6-19(α) φαίνεται το έργο συναρτήσεις της γωνίας στροφάλου υπολογισμένο από την πραγματική και την φαινόμενη πίεση για τις 1000 σαλ και 9 Nm. Στο Σχήμ. 6-19(β), φαίνεται η διαφορά των δυο εκτιμήσεων, δηλαδή το σφάλμα.

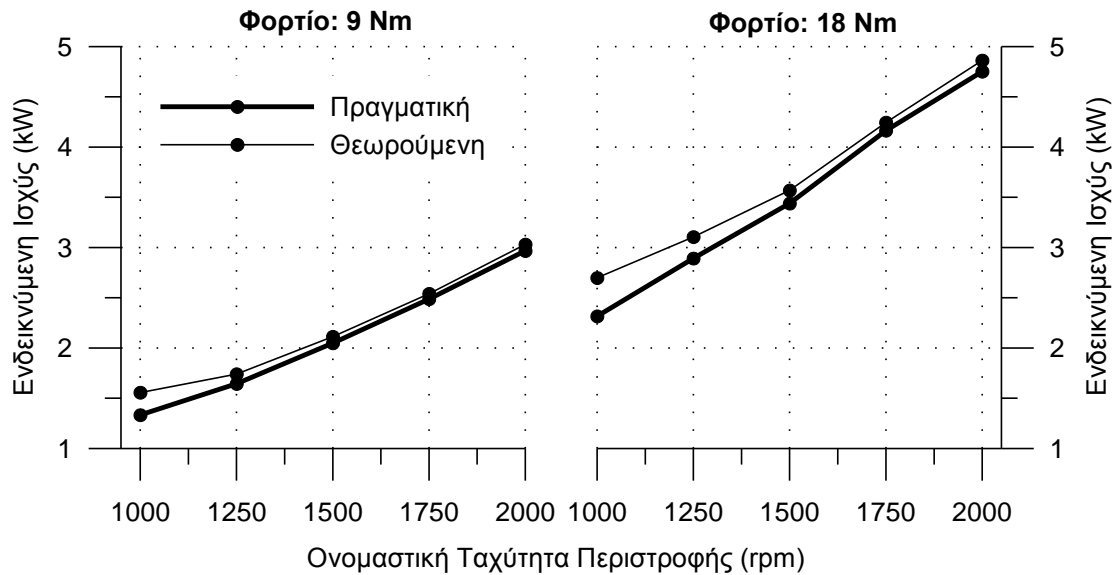
Η θεωρούμενη πίεση παρουσιάζει καθ' όλο το διάστημα τιμή μεγαλύτερη από την πραγματική. Οπότε κατά την συμπίεση αναμένεται υποεκτίμηση στο έργο, ενώ στην εκτόνωση υπερεκτίμηση. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνονται στο Σχήμ. 6-19(β). Η ύπαρξη διαφορετικού πρόσημου σφάλματος είναι παράγοντας που αναμένεται να μειώσει το τελικό σφάλμα στην εκτιμώμενη ισχύ. Στη περίπτωση αυτή όμως το θετικό σφάλμα επικρατεί, με αποτέλεσμα να υπάρχει υπερεκτίμηση της ισχύος κατά ~ 15%.



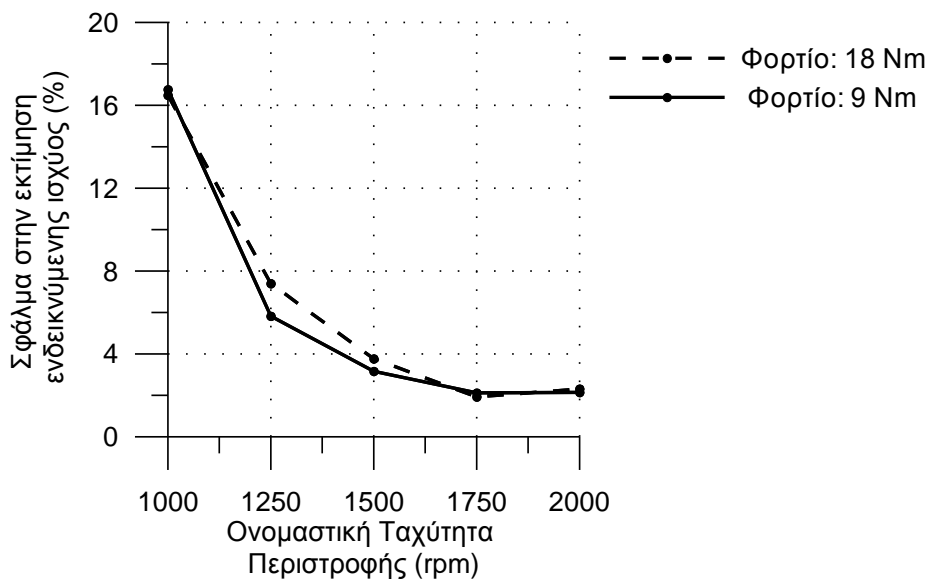
Σχήμ. 6-19 (α) Έργο συναρτήσει της γωνία στροφάλου από την πραγματική και την φαινόμενη πίεση και (β) διαφορά των δυο εκτιμήσεων. (γ) Εκτίμηση του κανονικοποιημένου σωρευτικού παραγόμενου έργου από την πραγματική και την φαινόμενη πίεση και (δ) διαφορά των δυο εκτιμήσεων.

Στο Σχήμ. 6-20 δίνεται η ενδεικνύμενη ισχύς υπολογισμένη από τα δυο σύνολα δεδομένων (πραγματική και φαινόμενη πίεση) συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για δυο φορτία ενώ στο Σχήμ. 6-21 φαίνεται το σφάλμα στην εκτίμηση της ισχύος (χρησιμοποιώντας την φαινόμενη πίεση) για όλα τα

σημεία λειτουργίας που εξετάστηκαν. Το σφάλμα στις 1000 σαλ είναι ~ 16%. Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μειώνεται σημαντικά, αλλά εξακολουθεί να παραμένει σε τιμές άνω του 2%. Παρατηρείται ότι παρά το γεγονός ότι η επίδραση του φορτίου στην διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής ήταν αρκετά έντονη αυτό δεν απεικονίζεται τελικά στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος. Το φορτίο δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα το σφάλμα στην εκτίμηση της ισχύος.



Σχήμ. 6-20 Ενδεικνύμενη ισχύς υπολογισμένη από τα δυο σύνολα δεδομένων (πραγματική και φαινόμενη πίεση) συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για δυο φορτία, 9Nm και 18Nm

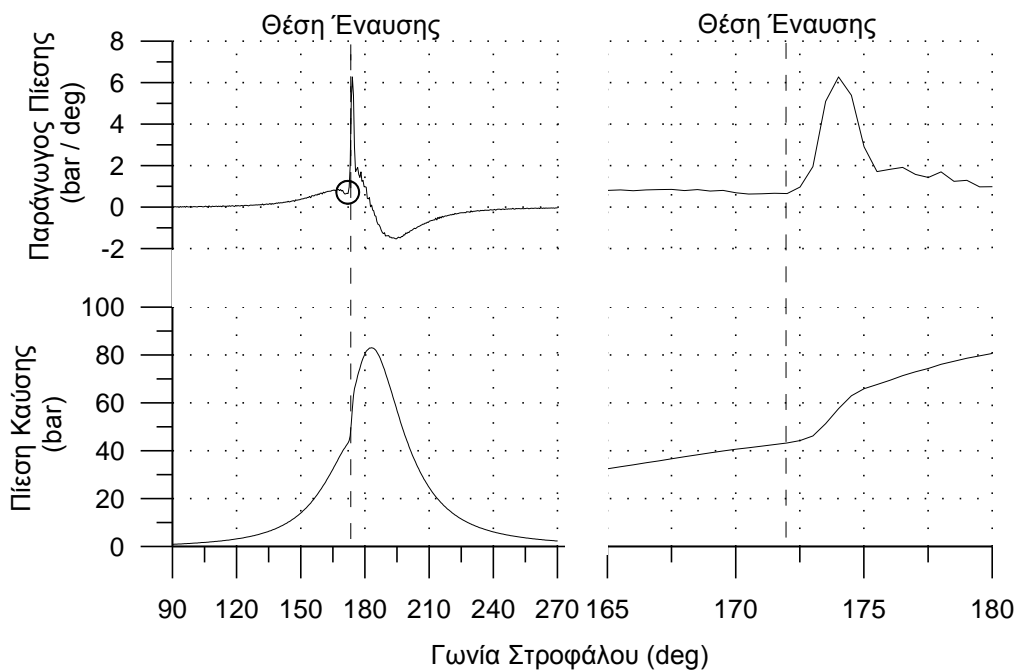


Σχήμ. 6-21 Σφάλμα εκτίμησης της ενδεικνύμενης ισχύος συναρτήσει της μέσης ταχύτητας περιστροφής για δυο φορτία.

6.7.2 Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση της θέσης έναυσης

Η γωνία έναυσης είναι μέγεθος με μεγάλη διαγνωστική αξία καθώς παρέχει πληροφορίες για το χρονισμό της έγχυσης ενώ μπορεί να συμβάλει στην αποκάλυψη βλαβών ή και δυσλειτουργιών του συστήματος έγχυσης (όταν πχ μεταβάλλεται η γωνία έναυσης συναρτήσει του καυσίμου που χρησιμοποιείται-Diesel ή heavy fuel oil σε μεγάλους ναυτικούς κινητήρες). Επίσης, η μέγιστη τιμή της πίεσης και η θέση που παρατηρείται δεν μπορεί να αξιολογηθεί σωστά χωρίς την γνώση της γωνίας έναυσης.

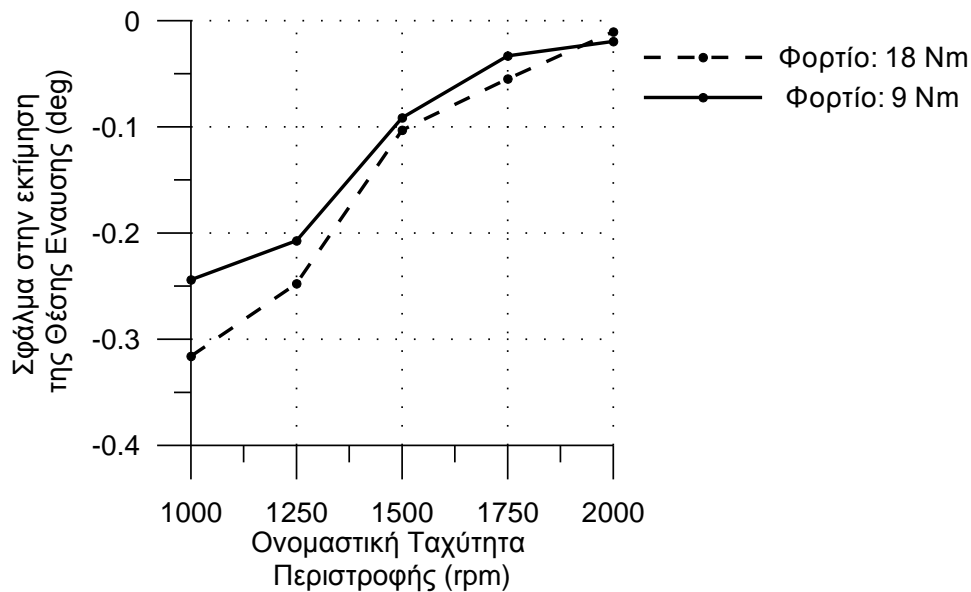
Η γωνία έναυσης εκτιμάται από το σημείο που αλλάζει καμπή η πίεση του θαλάμου καύσης. Εντοπίζεται ευκολότερα από την απότομη μεταβολή της πρώτης παραγώγου της πίεσης και ακόμη ευκολότερα από τη δεύτερη παράγωγο. Σημειώνεται ότι κάθε παραγωγή του σήματος της πίεσης αυξάνει τον λόγο σήματος προς θόρυβο κάνοντας πιο δυσδιάκριτο το σημείο. Από την άλλη, η μη ορθή χρήση φίλτρου εξομάλυνσης μπορεί να «εξαφανίσει» το σημείο απαλείφοντας τη πληροφορία. Στο Σχήμ. 6-22 απεικονίζεται σχηματικά ο τρόπος εκτίμησης της γωνίας έναυσης.



Σχήμ. 6-22 Η εκτίμηση της γωνίας έναυσης.

Στο Σχήμ. 6-23 φαίνεται το σφάλμα στην εκτίμηση της γωνίας έναυσης συναρτήσει της μέσης ταχύτητας περιστροφής για δύο διαφορετικά φορτία. Οι τιμές αυτές προέκυψαν με επεξεργασία της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής όπως περιγράφεται στην παράγραφο 6.5.4. Η μέγιστη τιμή σφάλματος, που αντιστοιχεί στην χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και στο μεγάλο φορτίο αγγίζει

τις 0.3° γωνίας στροφάλου. Πάντα παρατηρείται ανίχνευση της έναυσης νωρίτερα από την πραγματική θέση. Το σφάλμα δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο επειδή η θέση έναυσης είναι γενικά κοντά στο ΑΝΣ στο οποίο το σφάλμα γωνίας τείνει να μηδενισθεί.



Σχήμ. 6-23 Σφάλμα εκτίμησης της θέσης έναυσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για δυο φορτία.

6.7.3 Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση του ρυθμού καύσης

Είναι προφανές ότι με την παραδοχή σταθερής ταχύτητας περιστροφής έχει εισαχθεί στην μέτρηση της πίεσης του θαλάμου καύσης σφάλμα που προσεγγίζει το 16% στην τιμή της πίεσης ή μέγιστη μετατόπιση κατά ~ 4° γωνίας στροφάλου. Για την εκτίμηση της επίδρασης αυτού του σφάλματος στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας, υπολογίζεται η μεικτή του μορφή (net heat release rate) θεωρώντας την γόμωση του θαλάμου ομοιογενές μείγμα αέρα, καυσίμου και προϊόντων καύσης, με ενιαία θερμοκρασία και πίεση. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μοίρα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

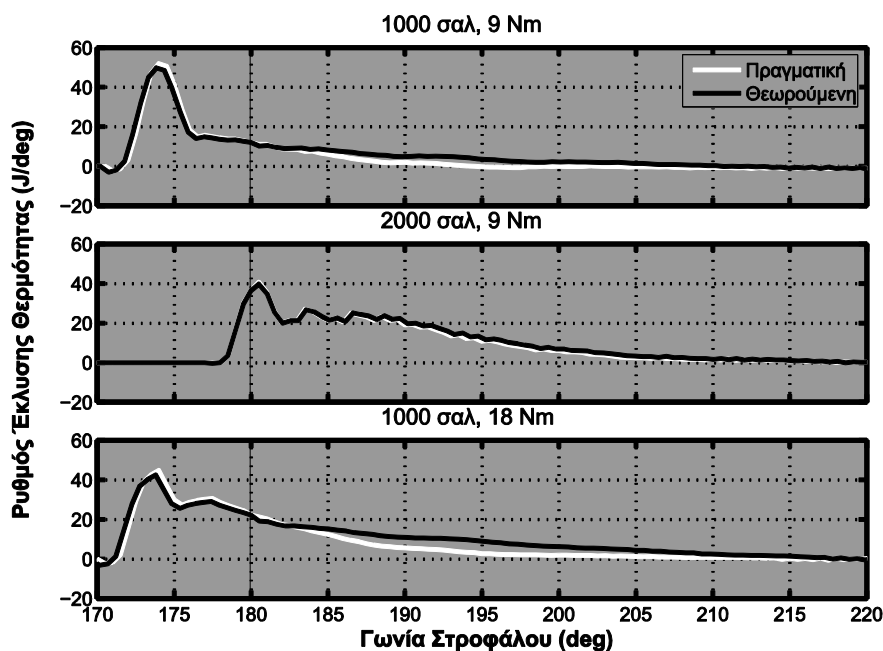
$$Q = \frac{\gamma}{\gamma - 1} (PdV) + \frac{1}{\gamma - 1} (VdP) \quad (6-10)$$

όπου Q είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, γ είναι ο λόγος των ειδικών θερμοχωρητικότητων που στην παρούσα διερεύνηση θεωρείται σταθερός και ίσος με 1.35, ενώ P και V είναι η πίεση και ο όγκος του θαλάμου καύσης αντίστοιχα. Οι παραδοχές που γίνονται είναι απλοϊκές και προφανώς επηρεάζουν τον εκτιμώμενο ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Όμως ο σκοπός της

διερεύνησης, που είναι η συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου, δεν επηρεάζεται.

Στο Σχήμ. 6-24 δίνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε τρία χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας, υπολογισμένος και με τα δυο σύνολα δεδομένων, την φαινόμενη και την πραγματική πίεση. Παρατηρείται ότι το σφάλμα δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο όπως στην περίπτωση της εκτίμησης της ενδεικνύμενης ισχύος κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η ανάλυση γίνεται σε μια περιορισμένη περιοχή γωνίας στροφάλου σε σχέση με την ενδεικνύμενη ισχύ όπου χρησιμοποιείται όλος ο κύκλος λειτουργίας. Παρατηρούνται τα ακόλουθα:

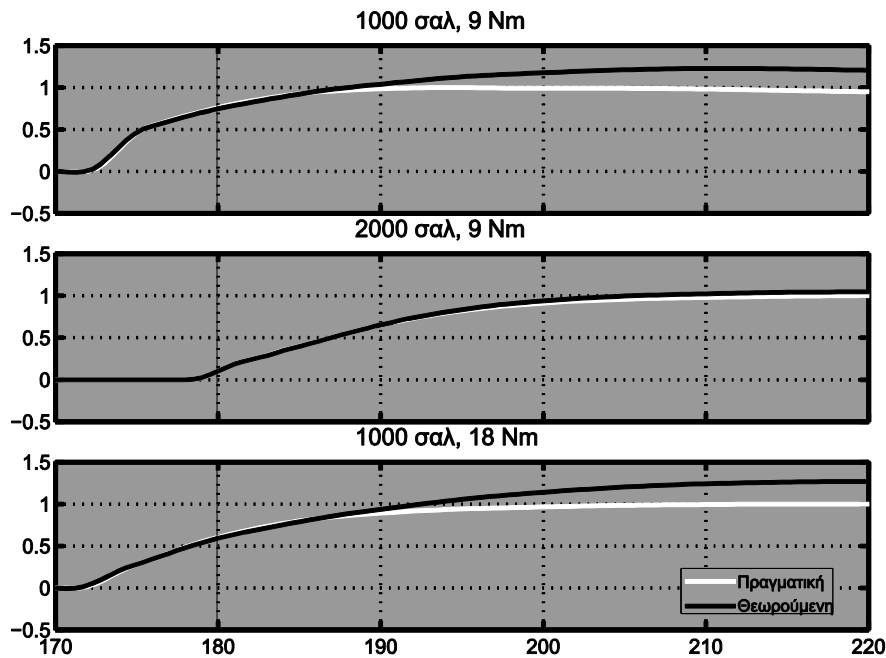
- ♦ Μικρές διαφορές στην θέση της έναυσης.
- ♦ Η προ-αναμεμειγμένη καύση φαίνεται να είναι ελαφρώς μικρότερης έντασης.
- ♦ Τα αρχικά στάδια της καύσης φαίνεται να υποεκτιμούνται σε αντίθεση με τα τελικά που υπερεκτιμούνται.



Σχήμ. 6-24 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας εκτιμημένος από την θεωρούμενη και την πραγματική πίεση, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τρία σημεία λειτουργίας.

Στο Σχήμ. 6-25 δίνεται ο κανονικοποιημένος ως προς την μονάδα σωρευτικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας. Εδώ φαίνεται ότι η χρήση της θεωρούμενης πίεσης στον υπολογισμό του σωρευτικού ρυθμού, δίνει την ψευδή εντύπωση ότι η καύση διαρκεί περισσότερο. Παράλληλα παρατηρείται ότι το σφάλμα έως και το 80% του ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι πολύ μικρό.

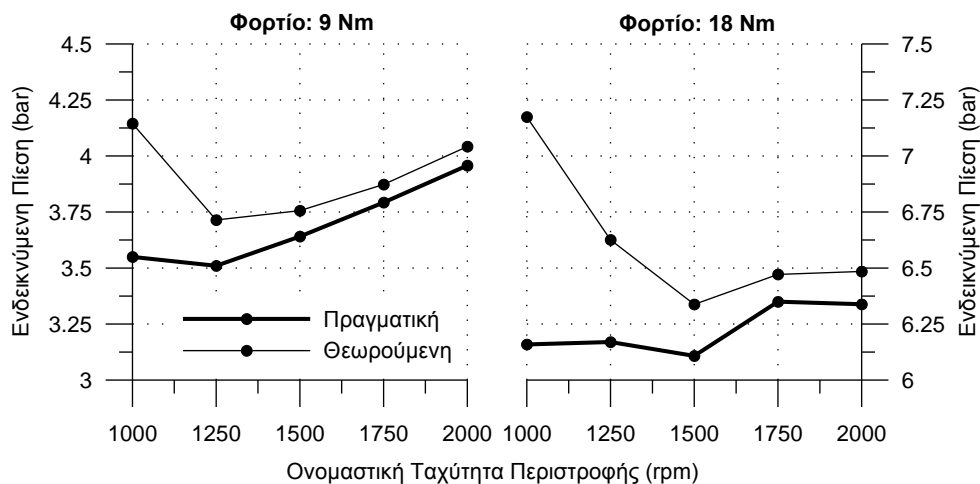
Όπως είναι αναμενόμενο το σφάλμα μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και την μείωση του φορτίου.



Σχήμ. 6-25 Κανονικοποιημένος σωρευτικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας εκτιμημένος από την θεωρούμενη και την πραγματική πίεση, συναρτήσεως της γωνίας στροφάλου για τρία σημεία λειτουργίας.

6.7.4 Η επίδραση του σφάλματος στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης μέσης πίεσης

Στο Σχήμ. 6-26 φαίνεται η μέση ενδεικνύμενη πίεση υπολογισμένη από τα δυο σύνολα δεδομένων, την πραγματική και την θεωρούμενη πίεση, συναρτήσεως της ταχύτητας περιστροφής για τα δυο φορτία. Το ποσοστιαίο σφάλμα είναι, εξ ορισμού, ίδιο με το ποσοστιαίο σφάλμα στην ισχύ.



Σχήμ. 6-26 Ενδεικνύμενη πίεση υπολογισμένη από τα δυο σύνολα δεδομένων (πραγματική και θεωρούμενη πίεση) συναρτήσεως της ταχύτητας περιστροφής για δυο φορτία

6.8 Πρόταση νέων εμπειρικών μεθόδων για την διόρθωση του σφάλματος λόγω διακύμανσης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής.

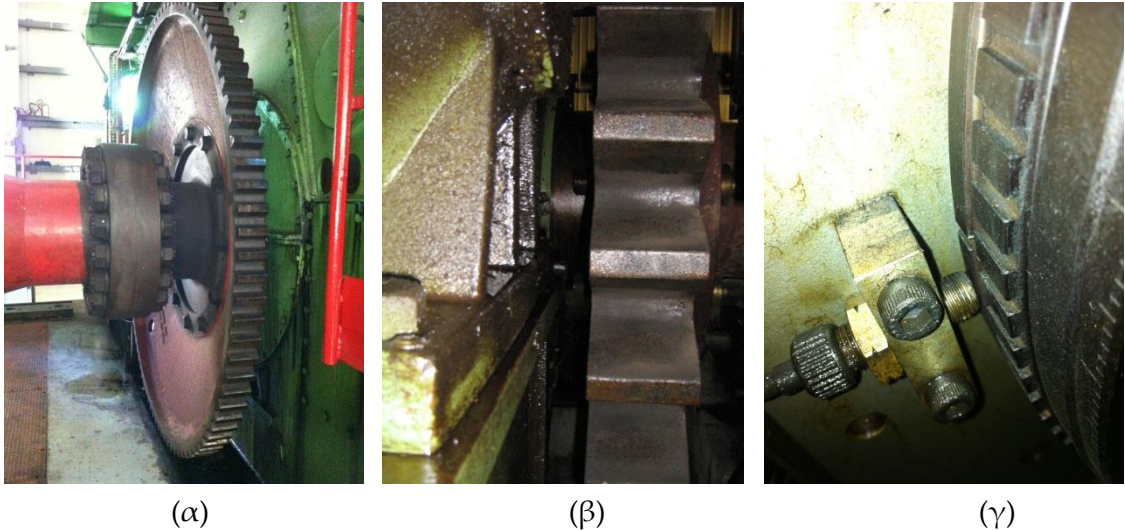
Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκε το σφάλμα που προκύπτει στην μέτρηση της πίεσης του θαλάμου καύσης όταν η μέτρηση γίνεται με σταθερό βήμα χρόνου, υπάρχει διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής εντός του κύκλου και ο υπολογισμός της γωνίας στροφάλου που αντιστοιχεί σε κάθε δείγμα της μέτρησης γίνεται γραμμικά με τον χρόνο.

Οι τρεις μέθοδοι που παρουσιάζονται στην συνέχεια αφορούν στον υπολογισμό της πραγματικής γωνίας στροφάλου που αντιστοιχεί στα μετρημένα δείγματα σε μια προσπάθεια εξεύρεσης μεθοδολογίας για τη διόρθωση του σφάλματος. Ο υπολογισμός γίνεται με την μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 6.4.2. Όπως αναφέρεται, με αυτόν τον τρόπο προκύπτει πλήρως διορθωμένη μέτρηση, ισοδύναμη με την μέτρηση αναφοράς που γίνεται με την χρήση γωνιακής δειγματοληψίας. Οι τρεις μέθοδοι που ακολουθούν, αφορούν στον τρόπο εκτίμησης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής. Η εκτίμηση και στις τρεις μεθόδους γίνεται χρησιμοποιώντας την ίδια τη μέτρηση, ή την ήδη διαθέσιμη μετρητική διάταξη.

6.8.1 Μέθοδος “Α”

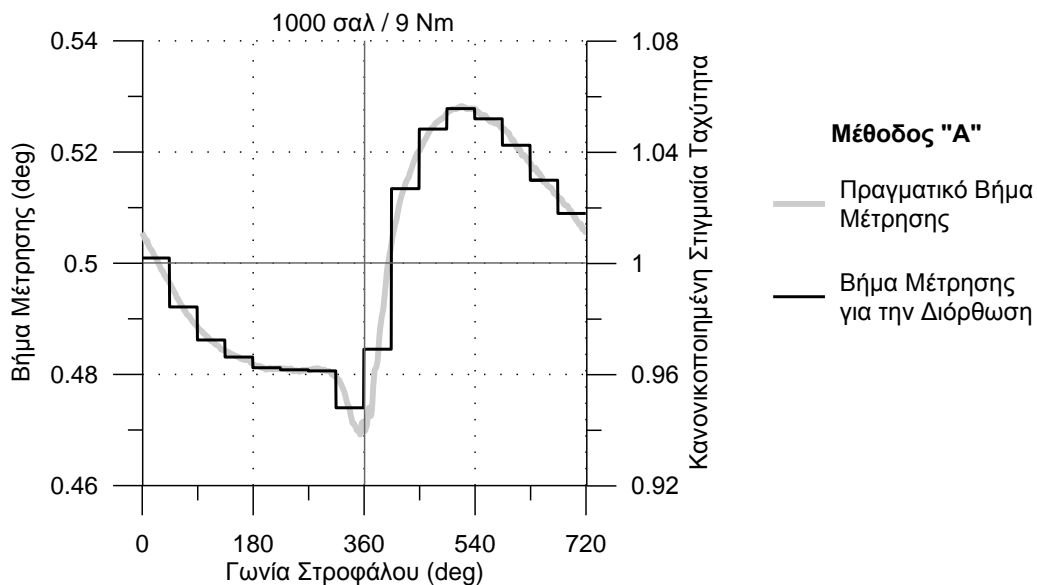
Η πρώτη μέθοδος διόρθωσης χρησιμοποιεί σαν είσοδο το σήμα ενός αισθητήρα εγγύτητας που σαρώνει εγκοπές ή προεξοχές πάνω στο σφόνδυλο του κινητήρα, Εικόνα 6-5. Το σήμα εξόδου του αισθητήρα συνίσταται σε ηλεκτρικούς παλμούς, έναν κάθε φορά που διέρχεται από τον αισθητήρα μια εγκοπή ή προεξοχή. Από αυτό προκύπτει η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής που μετατρέπεται σε μοίρες περιστροφής ανά διάστημα μέτρησης. Η ανάλυση του σήματος είναι αντίστοιχη του αριθμού των σημαδιών στο σφόνδυλο.

Υπάρχουν δυο προσεγγίσεις για την λήψη αυτού το σήματος. Η πρώτη, είναι η χρήση μετατροπέα συχνότητας- τάσης. Η τάση εξόδου του, είναι ανάλογη της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής. Τα ειδικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα, όπως η υστέρηση, πρέπει να εξεταστούν για την επιβεβαίωση της καταλληλότητας του για την εφαρμογή. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η απευθείας ψηφιοποίηση του σήματος του αισθητήρα. Το διάστημα γωνίας στροφάλου ανάμεσα σε δυο σημάδια στο σφόνδυλο προς τον αντίστοιχο χρόνο, αντιστοιχεί στην μέση γωνιακή ταχύτητα του διαστήματος ανάμεσα στα δυο σημάδια. Η ακρίβεια εκτίμησης της ταχύτητας περιστροφής είναι συνάρτηση της συχνότητας δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται.



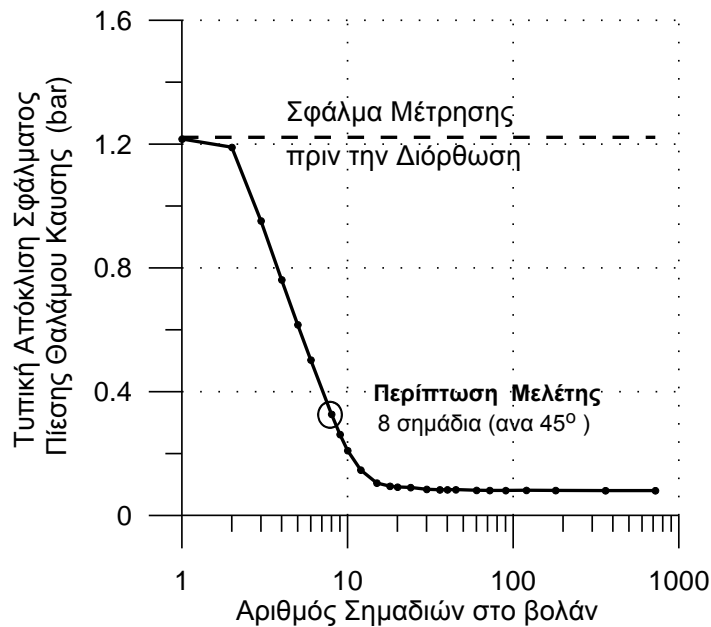
Εικόνα 6-5 Παραδείγματα προεξοχών ή εγκοπών στο σφόνδυλο κινητήρων. (α) και (β) μεγάλοι κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής και (γ) κινητήρας Ricardo Hydra εργαστηρίου MEK

Στο Σχήμ. 6-27, που αφορά στη λειτουργία του κινητήρα στις 1000 σαλ στο χαμηλό φορτίο, με την γκρι γραμμή φαίνεται το πραγματικό βήμα της μέτρησης, δηλαδή η περιστροφή του κινητήρα που αντιστοιχεί σε σταθερά διαστήματα χρόνου. Η μαύρη γραμμή είναι το σήμα εισόδου της μεθόδου. Η ακρίβεια της μεθόδου για την διόρθωση της μέτρησης της πίεσης καύσης είναι συνάρτηση της ανάλυσης του σήματος εισόδου, διότι η μικρή ανάλυση του σήματος δεν απεικονίζει σωστά τις οξείες μεταβολές της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής κοντά στο ΑΝΣ της καύσης. Στο Σχήμ. 6-27 το σήμα αντιστοιχεί σε μέτρηση από σφόνδυλο με 8 σημεία.



Σχήμ. 6-27 Το βήμα της μέτρησης από δειγματοληψία σταθερού βήματος χρόνου σε όρους γωνίας στροφάλου: πραγματικό και αυτό που χρησιμοποιείται στην Μέθοδο "Α".

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης το σήμα εισόδου της μεθόδου δεν λήφθηκε με τον τρόπο μέτρησης που έχει περιγραφεί αλλά από την διαθέσιμη στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής με μείωση της ανάλυσης. Έτσι δίνεται η δυνατότητα παραμετρικής εξέτασης των αποτελεσμάτων της μεθόδου για διαφορετικό αριθμό σημαδιών στο σφόνδυλο (διαφορετική ανάλυση του σήματος).



Σχήμ. 6-28 Τυπική απόκλιση του σφάλματος στην εκτίμηση της πίεσης καύσης με την εφαρμογή της μεθόδου “Α” συναρτήσει του αριθμού των σημαδιών στο σφόνδυλο

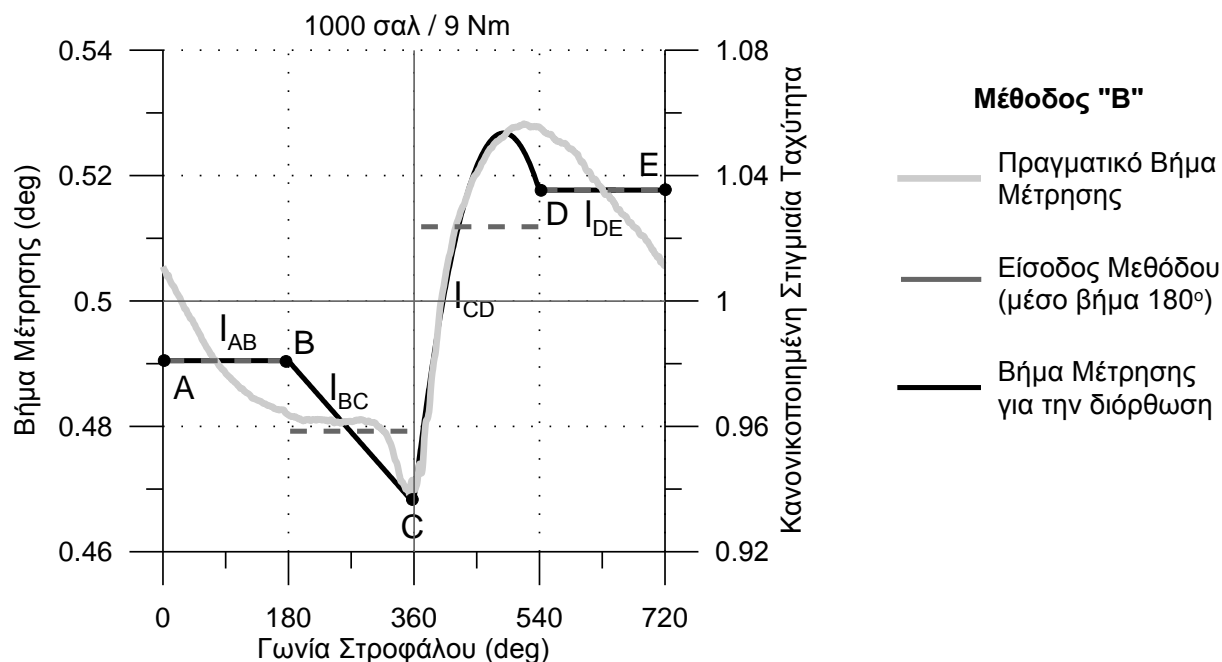
Στο Σχήμ. 6-28 φαίνεται η τυπική απόκλιση του σφάλματος εκτίμησης της πίεσης καύσης συναρτήσει του αριθμού των σημαδιών. Φαίνεται η σαφής μείωση του σφάλματος, όσο αυξάνονται τα σημάδια. Επίσης φαίνεται ότι 15 σημάδια είναι αρκετά για την σημαντική μείωση του σφάλματος.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης δίνονται αναλυτικά στην συνέχεια για την περίπτωση με 8 σημάδια στο βολάν. Επιπλέον δίνονται παραμετρικά αποτελέσματα συναρτήσει του αριθμού των σημαδιών.

6.8.2 Μέθοδος “B”

Η Μέθοδος “B” χρησιμοποιεί το ψηφιοποιημένο σήμα του αισθητήρα εγγύτητας που σαρώνει σημάδια στο βολάν και συγκεκριμένα σημάδια στο άνω και κάτω νεκρό σημείο. Το σήμα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής και όχι αυτούσιο, όπως στην περίπτωση “A”. Δηλαδή η μέση ταχύτητα των διαστημάτων ανάμεσα στο

ακραία σημεία του εμβόλου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας περιστροφής η οποία όμως έχει γνωστή μέση τιμή.



Σχήμ. 6-29 Βήμα της μέτρησης από δειγματοληψία σταθερού βήματος χρόνου σε όρους γωνίας στροφάλου: πραγματικό και αυτό που χρησιμοποιείται στην Μέθοδο “B”.

Στο Σχήμ. 6-29 που αφορά την λειτουργία του κινητήρα στις 1000 σαλ στο χαμηλό φορτίο, με την γκρι συνεχή γραμμή φαίνεται το πραγματικό βήμα της μέτρησης. Η διακεκομμένη γκρι γραμμή είναι το σήμα εισόδου της μεθόδου, που είναι το μέσο βήμα μέτρησης ανά διαστήματα 180°. Η μαύρη γραμμή είναι η εκτίμηση του στιγμιαίου βήματος με βάση το οποίο γίνεται η διόρθωση. Ο δεξιός κατακόρυφος άξονας δείχνει την κανονικοποιημένη στιγμιαία ταχύτητα, που ισούται με το βήμα μέτρησης προς το διάστημα δειγματοληψίας. Όλες οι γραμμές αναφέρονται και στους δύο κατακόρυφους άξονες.

Η εκτίμηση για το στιγμιαίο βήμα μέτρησης (ή ισοδύναμα για την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής) δεν έγινε με τον ίδιο τρόπο και στα τέσσερα διαστήματα των 180°. Το αντικείμενο της παρούσας μεθόδου είναι η αναπαραγωγή με τον πλέον απλό τρόπο του βήματος μέτρησης κατά την συμπίεση και την εκτόνωση. Η επίδραση του σφάλματος αναφοράς στην φάση εναλλαγής των αερίων δεν είναι σημαντική στην εκτίμηση των μεγεθών επίδοσης του κινητήρα.

Έτσι, στα διαστήματα 0-180° και 540°-720° το βήμα μέτρησης θεωρείται σταθερό και ίσο με το μέσο βήμα, που είναι το δεδομένο εισόδου της μεθόδου. Στην συμπίεση, θεωρείται ότι η στιγμιαία ταχύτητα, και συνεπώς το βήμα,

μειώνεται γραμμικά, ξεκινώντας από την μέση τιμή του προηγούμενου διαστήματος (Σημείο Β στο σχήμα). Η τελική τιμή (Σημείο C) καθορίζεται ώστε η μέση τιμή της γραμμικής μείωσης, να ισούται με το μέσο βήμα που είναι και η τιμή εισόδου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, υιοθετώντας την γραμμική μείωση, δεν λαμβάνεται υπόψη η απότομη επιβράδυνση στα τελευταία στάδια της συμπίεσης. Για την φάση της εκτόνωσης (τμήμα CD) χρησιμοποιείται η εξίσωση δευτέρου βαθμού.

Ακολουθώς παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της εκτίμησης της στιγμιαίας ταχύτητας. Από την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής υπολογίζεται το βήμα μέτρησης που χρησιμοποιείται για την διόρθωση της μέτρησης της πίεσης καύσης.

Για το διάστημα $0-180^\circ$ Γ.Σ. (γραμμή I_{AB}) με μέση ταχύτητα $\overline{\omega_{0-180}}$, η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής θεωρείται σταθερή και ίση με :

$$I_{AB} : y = \overline{\omega_{0-180}} \quad (6-11)$$

Για το διάστημα $180^\circ - 360^\circ$ Γ.Σ. (γραμμή I_{BC}), χρησιμοποιείται η ακόλουθη γραμμική έκφραση ώστε η ευθεία I_{BC} να διέρχεται από τα σημεία B, C και η μέση στιγμιαία ταχύτητα του διαστήματος να ισούται με την μετρομένη, $\overline{\omega_{180-360}}$:

$$I_{BC} : \begin{cases} y_B = 180a_{IBC} + b_{IBC} \\ y_C = 540a_{IBC} + b_{IBC} \end{cases} \quad (6-12)$$

$$\frac{y_C + y_B}{2} = \overline{\omega_{180-360}} \quad (6-13)$$

Για το διάστημα $360^\circ - 540^\circ$ Γ.Σ. (γραμμή I_{CD}), χρησιμοποιείται η ακόλουθη έκφραση ώστε η καμπύλη δευτέρου βαθμού I_{CD} να διέρχεται από τα σημεία C, D και η μέση στιγμιαία ταχύτητα του διαστήματος να ισούται με την μετρομένη, $\overline{\omega_{360-540}}$:

$$I_{CD} : \begin{cases} y_C = 360^2 a_{ICD} + 360b_{ICD} + c_{ICD} \\ y_D = 540^2 a_{ICD} + 540b_{ICD} + c_{ICD} \end{cases} \quad (6-14)$$

$$\int_{360}^{540} (a_{ICD} x^2 + b_{ICD} x + c_{ICD}) dx = \overline{\omega_{360-540}} \quad (6-15)$$

Τέλος για το διάστημα $540-720^\circ$ Γ.Σ. (γραμμή I_{DE}) με μέση ταχύτητα $\overline{\omega_{540-720}}$, η στιγμιαία ταχύτητα θεωρείται σταθερή:

$$I_{DE} : \mathcal{Y} = \overline{\omega}_{540-720} \quad (6-16)$$

Λύνοντας το σύστημα των ανωτέρω εξισώσεων, προκύπτει η εκτίμηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής, απ' όπου υπολογίζεται το «πραγματικό» βήμα μέτρησης σε γωνία στροφάλου τελικά η διορθωμένη σειρά τιμών γωνίας στροφάλου όπου αντιστοιχείται η σειρά με τις μετρημένες τιμές πίεσης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 6.4. Έτσι προκύπτει η διορθωμένη πίεση του θαλάμου καύσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο "B".

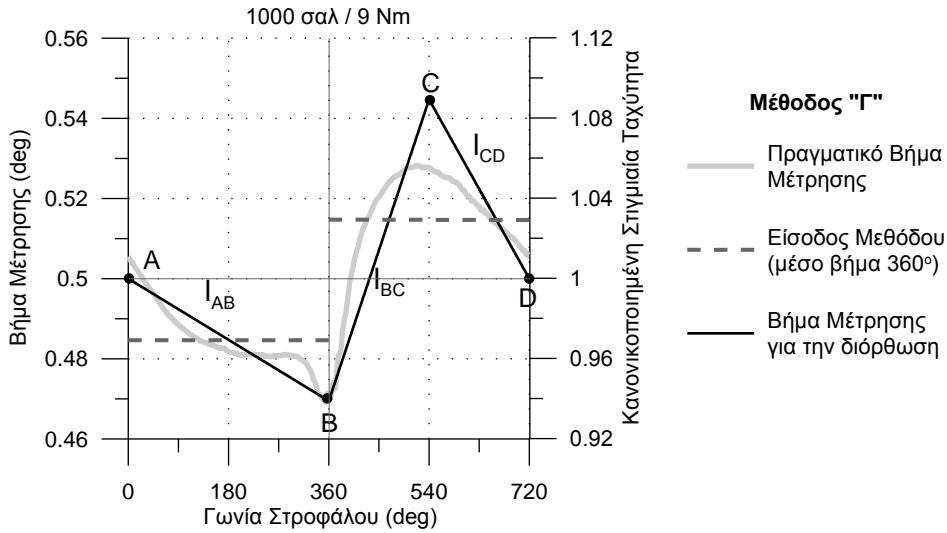
6.8.3 Μέθοδος "Γ"

Για την μέθοδο "Γ" σαν πληροφορία εισόδου χρησιμοποιείται μόνο ο λόγος της διάρκειας των δυο περιστροφών, της περιστροφής στο στάδιο της «εισαγωγής – συμπίεσης» και της περιστροφής στο στάδιο «εκτόνωσης – εξαγωγής». Ο λόγος μπορεί να υπολογιστεί από τον αριθμό των δειγμάτων της μέτρησης με σταθερό βήμα χρόνου για κάθε περιστροφή. Από την ανομοιομορφία της ταχύτητας περιστροφής των δυο περιστροφών, προκύπτει το μέσο βήμα κάθε περιόδου. Στο Σχήμ. 6-30 το μέσο βήμα των διαστημάτων $0 - 360^\circ$ και $360^\circ - 720^\circ$ Γ.Σ. , που απεικονίζεται με την διακεκομμένη γκρι γραμμή, αποτελεί το σήμα εισόδου της μεθόδου. Η συνεχής γκρι γραμμή είναι το πραγματικό βήμα μέτρησης – διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής (με αναφορά στον αριστερό και δεξί κατακόρυφο άξονα, αντίστοιχα)

Για την εκτίμηση του βήματος μέτρησης που θα χρησιμοποιηθεί στην διορθωση της μέτρησης της πίεσης καύσης γίνονται οι εξής παραδοχές:

1. στο άνω νεκρό σημείο της εναλλαγής των αερίων ($0, 720^\circ$) η στιγμιαία ταχύτητα είναι ίση με την μέση και
2. στο κάτω νεκρό σημείο μετά την εκτόνωση παρουσιάζεται η μέγιστη στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής.

Οι παραδοχές αυτές δεν αποκλίνουν σημαντικά από τη πραγματικότητα.



Σχήμ. 6-30 Βήμα της μέτρησης από δειγματοληψία σταθερού βήματος χρόνου σε όρους γωνίας στροφάλου: πραγματικό και αυτό που χρησιμοποιείται στην Μέθοδο “Γ”.

Με βάση τις ανωτέρω παραδοχές, θεωρώντας γραμμική μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου και διατηρώντας την γνωστή μέση τιμή της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής, καταστρώνονται οι παρακάτω σχέσεις που εκφράζουν την εκτιμώμενη στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής και συνεπώς το βήμα μέτρησης που θα χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση της μέτρησης της πίεσης καύσης. Αυτή η εκτίμηση απεικονίζεται στο Σχήμ. 6-30 με την μαύρη γραμμή.

Για το διάστημα 0-360° (γραμμή I_{AB}), η γραμμική εξίσωση εφαρμόστηκε για τα σημεία A και B, ενώ η μέση ταχύτητα του διαστήματος διατηρήθηκε ίση με την μετρούμενη, $\overline{\omega_{0-360}}$:

$$I_{AB} : \begin{cases} y_A = \overline{\omega_{0-360}} \\ y_B = 360a_{IAB} + b_{IAB} \end{cases} \quad (6-17)$$

$$\frac{y_A + y_B}{2} = \overline{\omega_{0-360}} \quad (6-18)$$

Το διάστημα 360-720°Γ.Σ. διαιρέθηκε σε δυο τμήματα 360-540 και 540-720 °Γ.Σ. Η γραμμική εξίσωση εφαρμόστηκε για τα σημεία B, C και C, D. Η μέση ταχύτητα του διαστήματος διατηρήθηκε ίση με την μετρούμενη, $\overline{\omega_{36-720}}$:

$$I_{BC} : \begin{cases} y_B = 360a_{IBC} + b_{IBC} \\ y_C = 540a_{IBC} + b_{IBC} \end{cases} \quad (6-19)$$

$$I_{CD} : \begin{cases} y_C = 540a_{ICE} + b_{ICE} \\ y_D = \bar{\omega} \end{cases} \quad (6-20)$$

$$\frac{y_B + y_C}{2} + \frac{y_C + y_D}{2} = \overline{\omega_{360-720}} \quad (6-21)$$

Λύνοντας το σύστημα των ανωτέρω εξισώσεων, προκύπτει η εκτίμηση για την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής, απ' όπου υπολογίζεται το βήμα μέτρησης και τελικά η διορθωμένη σειρά τιμών γωνίας στροφάλου όπου αντιστοιχείται η σειρά με τις μετροημένες τιμές πίεσης, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 6.4. Έτσι προκύπτει η διορθωμένη πίεση του θαλάμου καύσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο "Γ".

6.8.4 Αξιολόγηση μεθόδων διόρθωσης του σφάλματος

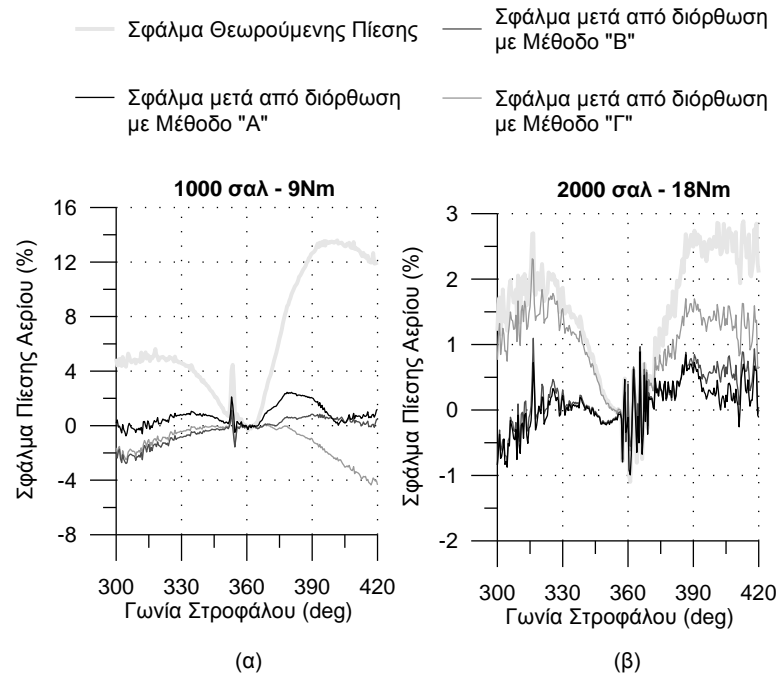
Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζεται η διόρθωση που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των τριών παραπάνω μεθόδων στα χαρακτηριστικότερα λειτουργικά μεγέθη του κινητήρα που επηρεάζονται περισσότερο από τη διακύμανση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Τα μεγέθη αυτά είναι:

- ◆ η πίεση του θαλάμου καύσης,
- ◆ η εκτίμηση της γωνίας έναυσης
- ◆ η εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος.

Το σφάλμα μετά την εφαρμογή των διορθωτικών μεθόδων συγκρίνεται με το αρχικό σφάλμα. Έτσι γίνεται σαφής η σημαντική βελτίωση που επιτυγχάνεται.

6.8.4.1 Ικανότητα Διόρθωσης στην Πίεση Θαλάμου Καύσης

Στο Σχήμ. 6-31 φαίνεται η διαφορά της πραγματικής πίεσης του κυλίνδρου από τη διορθωμένη με τις τρεις μεθόδους και από την θεωρούμενη (που περιλαμβάνει το σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου) για τις δυο ακραίες συνθήκες λειτουργίας που εξετάστηκαν δηλαδή 1000 σαλ - 9Nm και 2000σαλ - 18Nm. Για την παραγωγή του σχήματος απαιτήθηκε γραμμική παρεμβολή τιμών στα πολλαπλάσια των 0.5°Γ.Σ. για να είναι δυνατή η αφαίρεση.



Σχήμ. 6-31 Σφάλμα μέτρησης της πίεσης κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου πριν και μετά τη διόρθωση με τις μεθόδους "Α", "Β", "Γ".

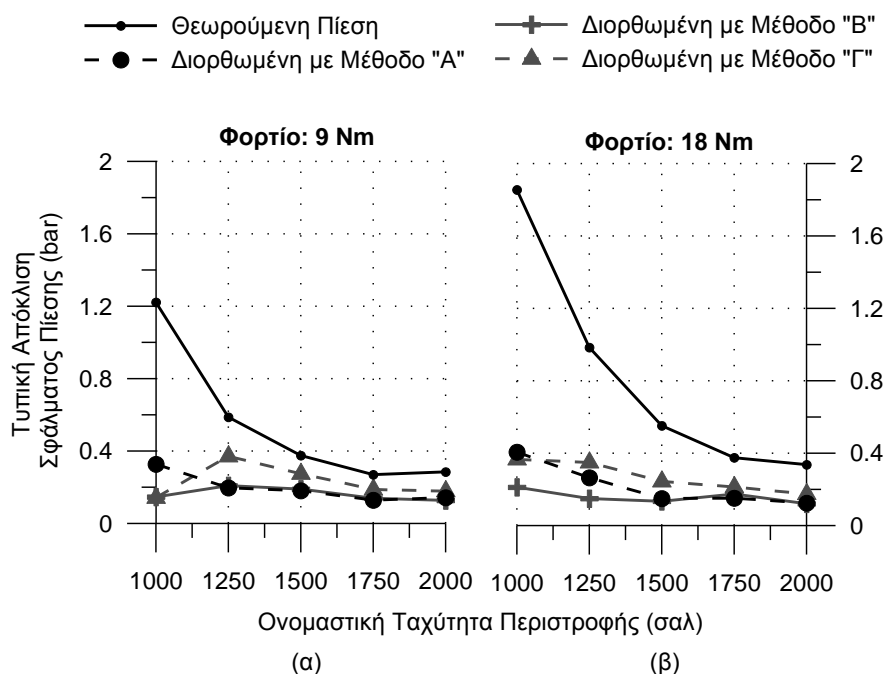
Συγκρίνοντας την απόκλιση της θεωρούμενης πίεσης με την απόκλιση των τριών διορθωμένων, είναι φανερό ότι το σφάλμα έχει μειωθεί σημαντικά.

Για την μέθοδο "Α" στη διάρκεια της συμπίεσης, στην χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, η μέγιστη απόκλιση είναι 1%. Εξαιρεση αποτελεί ένα τοπικό μέγιστο, το οποίο μετά την διόρθωση μειώνεται κατά το ήμισυ. Στην μεγάλη ταχύτητα περιστροφής κατά την συμπίεση το σφάλμα μειώνεται δραστικά. Όμως παρατηρείται μετατόπισή του στα αρνητικά (υποεκτίμηση πίεσης κυλίνδρου) με πιθανή επίδραση στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος. Στην εκτόνωση και στα δυο σημεία λειτουργίας παρατηρείται σημαντική βελτίωση. Το σήμα εισόδου της μεθόδου λόγω της βηματικής του φύσης αδυνατεί να περιγράψει την απότομη αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μετά το ΑΝΣ με αποτέλεσμα εκεί να παρατηρείται η μεγαλύτερη αδυναμία στην διόρθωση που παρέχει η μέθοδος "Α".

Με την χρήση της μεθόδου "Β", η διαφορά κατά την συμπίεση είναι αρνητική, δηλαδή προκαλείται υποεκτίμηση της πίεσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γενικής χρήσης γραμμική θεώρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής δεν περιγράφει την απότομη μείωση της ταχύτητας περιστροφής στα τελευταία στάδια της συμπίεσης. Πλησιάζοντας στο ΑΝΣ η απόκλιση από την πραγματική πίεση μηδενίζεται. Κατά την εκτόνωση το μέγιστο σφάλμα είναι ~1%, καθώς το πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού περιγράφει καλά το στιγμιαίο βήμα μέτρησης που χρησιμοποιείται στη διόρθωση.

Η Μέθοδος “Γ” στην συμπίεση και στη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά με την μέθοδο “Β”, ενώ στην υψηλή ταχύτητα περιστροφής η βελτίωση δεν είναι σημαντική. Στην εκτόνωση λόγω της γραμμικής προσέγγισης της μεταβολής του βήματος δειγματοληψίας παραμένει η απόκλιση από την πραγματική πίεση. Για την χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, όπου υπάρχει ραγδαία αύξηση της ταχύτητας περιστροφής η πίεση υποεκτιμάται, αλλά με σημαντική μείωση του σφάλματος. Για την περίπτωση της υψηλής ταχύτητας περιστροφής, όπου η μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας δεν είναι τόσο γρήγορη, η διορθωμένη πίεση ακολουθεί την μη διορθωμένη αλλά με ελαφρώς μειωμένο σφάλμα.

Η εφαρμογή κάθε μιας εκ των τριών μεθόδων παρέχει καλύτερα αποτελέσματα σε όλο το εύρος λειτουργίας σε σχέση με την πρωτογενή όπως επιβεβαιώνεται στο Σχήμ. 6-32 στο οποίο φαίνεται η τυπική απόκλιση της διαφοράς της διορθωμένης πίεσης με τις τρεις μεθόδους και της μη διορθωμένης από την πραγματική συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για δυο φορτία.



Σχήμ. 6-32 Τυπική απόκλιση σφάλματος μέτρησης της πίεσης κυλίνδρου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής πριν και μετά τη διόρθωση με τις μεθόδους “Α”, “Β”, “Γ” για δυο φορτία.

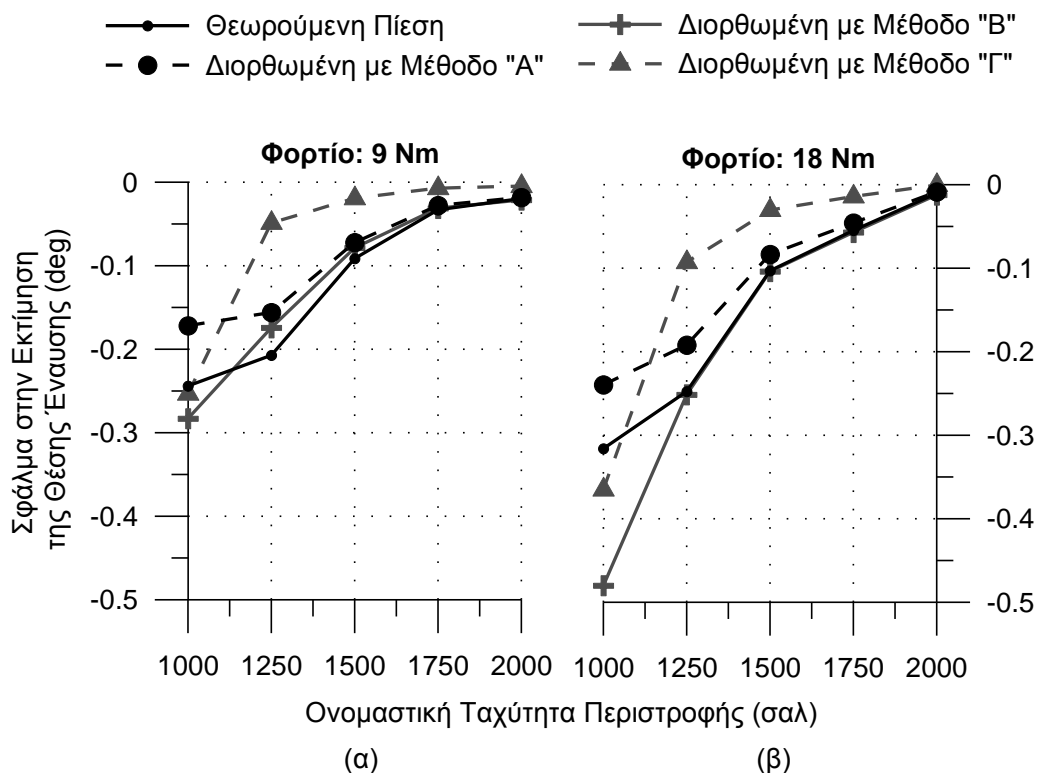
6.8.4.2 Ικανότητα Διόρθωσης Σφάλματος στην Εκτίμηση της Θέσης Έναυσης

Στο Σχήμ. 6-33 φαίνεται το σφάλμα εκτίμησης της θέσης έναυσης υπολογισμένο από τα διαγράμματα πίεσης που προέκυψαν από τις τρεις

μεθόδους διόρθωσης και από το μη διορθωμένο διάγραμμα πιέσεων (θεωρούμενη πίεση) συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για τα δυο φορτία που εξετάζονται.

Το σφάλμα χρησιμοποιώντας την θεωρούμενη πίεση μειώνεται συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό δυο παραγόντων. Αφενός το σφάλμα της πίεσης κυλίνδρου μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και αφ' ετέρου στη συγκεκριμένη εφαρμογή όσο μεγαλώνει η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται η απόσταση της θέσης έναυσης από το ΑΝΣ στο οποίο το σφάλμα μηδενίζεται. Όσον αφορά στην επίδραση του φορτίου, η αύξηση στο σφάλμα εκτίμησης της γωνίας έναυσης με την αύξηση του φορτίου οφείλεται αμιγώς στην ίδια τάση του πρωτογενούς σφάλματος.

Η εγγύτητα της γωνίας έναυσης στο ΑΝΣ (όπου το πρωτογενές σφάλμα μηδενίζεται) περιορίζει το σφάλμα στην εκτίμηση της γωνίας έναυσης σε τιμές μικρότερες της μισής μοίρας. Επιπλέον, όπως επισημάνεται και στις παραγράφους 6.8.1 - 6.8.3, η οξεία πτώση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής πριν το Α.Ν.Σ. δεν προβλέπεται από τις εμπειρικές μεθόδους που περιγράφονται, οπότε δεν είναι δυνατή η διόρθωση ενός τόσο λεπτομερούς σφάλματος. Για την διόρθωσή του θα ήταν αναγκαία η καταγραφή ή πρόβλεψη της ακριβούς στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής.



Σχήμ. 6-33 Τυπική απόκλιση σφάλματος εκτίμησης θέσης έναυσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής πριν και μετά τη διόρθωση με τις μεθόδους "Α", "Β", "Γ" για δυο φορτία.

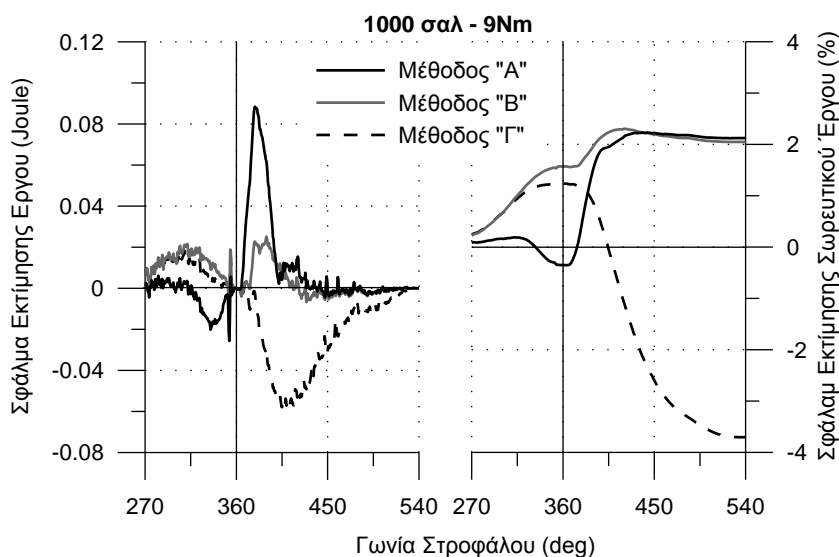
Σε προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η σημαντική επίδραση του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος. Στο Σχήμ. 6-19 της σελίδας 219, φαίνεται αναλυτικά πως προκύπτει το σφάλμα που υπερβαίνει το 15%. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η επίδραση της διόρθωσης της πίεσης καύσης με τις τρεις μεθόδους στο σφάλμα εκτίμησης της ενδεικνύμενης ισχύος.

Στο Σχήμ. 6-34 δίνεται το σφάλμα εκτίμησης του ενδεικνύμενου έργου υπολογισμένο από τις διορθωμένες σειρές τιμών πίεσης και το σωρευτικό σφάλμα εκφρασμένο ποσοστιαία. Σημειώνεται ότι το σφάλμα με τη χρήση της μη-διορθωμένης πίεσης κυλίνδρου δεν προβάλλεται στο ίδιο διάγραμμα διότι είναι σημαντικά μεγαλύτερο (βλέπε Σχήμ. 6-19).

Η μέθοδος "Α" επιτυγχάνει πολύ καλή διόρθωση της πίεσης στην αρχή της συμπίεσης και στο τέλος της εκτόνωσης. Σε γενικές όμως γραμμές παρατηρείται υπερεκτίμηση της πίεσης. Αυτό συνεπάγεται υποεκτίμηση του έργου στο τέλος της συμπίεσης και υπερεκτίμηση στην αρχή της εκτόνωσης. Επειδή το σφάλμα στην εκτόνωση είναι μεγαλύτερο, υπερισχύει και τελικά παρατηρείται υπερεκτίμηση της ισχύος κατά ~2%.

Η μέθοδος "Β" παρουσιάζει υποεκτίμηση της πίεσης μέχρι το Α.Ν.Σ. που συνεπάγεται υπερεκτίμηση του έργου. Μετά το ΑΝΣ εμφανίζεται τάση υπερεκτίμησης της πίεσης που συνεπάγεται και υπερεκτίμηση του έργου. Τελικά υπερισχύει και πάλι υπερεκτίμηση της τάξης του ~2%

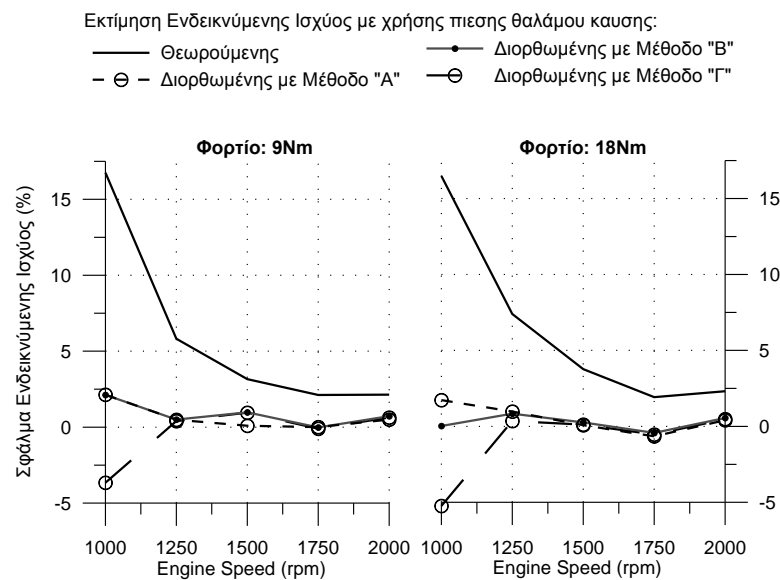
Η μέθοδος "Γ" εμφανίζει υπερεκτίμηση της πίεσης στη διάρκεια της συμπίεσης και μεγαλύτερη υποεκτίμηση στην διάρκεια της εκτόνωσης. Έτσι το έργο αρχικά υπερεκτιμάται αλλά μετά το ΑΝΣ παρατηρείται σοβαρή υποεκτίμηση η οποία και επικρατεί, με τελικό σφάλμα κοντά στο -4%. Αυτό το σφάλμα είναι ανεκτό και πάνω από τέσσερις φορές μικρότερο από το αρχικό.



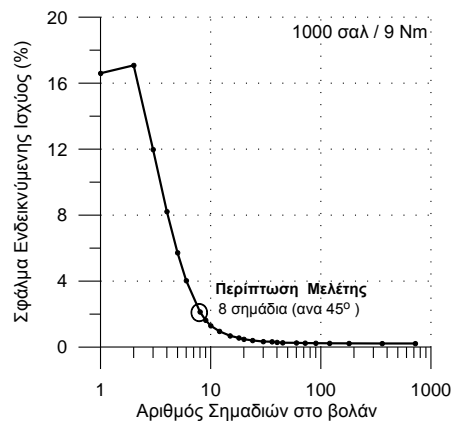
Σχήμ. 6-34 Σφάλμα στην εκτίμηση του έργου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου πριν και μετά τη διόρθωση με τις μεθόδους "Α", "Β", "Γ" για δυο φορτία.

Στο Σχήμ. 6-35 δίνεται το σφάλμα εκτίμησης της ενδεικνύμενης ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για τα δυο φορτία, υπολογισμένο χρησιμοποιώντας την θεωρούμενη πίεση (αρχική, μη-διορθωμένη) και τις τρεις διορθωμένες σειρές πίεσης από τις μεθόδους “Α”, “Β” και “Γ”. Είναι σαφές ότι και τρεις μέθοδοι διόρθωσης οδηγούν σε περιορισμό του σφάλματος εντός των ορίων του ανεκτού.

Τέλος στο Σχήμ. 6-36 φαίνεται για την μέθοδο “Α” το σφάλμα εκτίμησης της ισχύος συναρτήσει του αριθμού των «σημαδιών» στο σφόνδυλο που σαρώνει ο αισθητήρας που παρέχει το σήμα εισόδου της μεθόδου. Από τα 8 σημάδια και κάτω παρατηρείται ικανοποιητική βελτίωση ενώ από τα 20 σημάδια και πάνω (σημάδι ανά 36°) πρακτικά το σφάλμα μηδενίζεται.



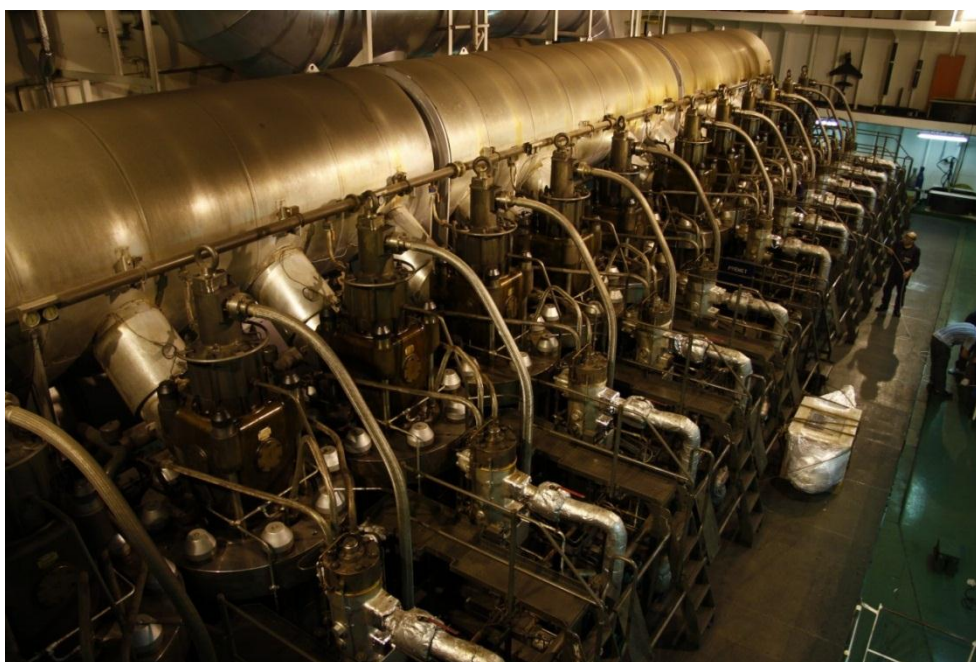
Σχήμ. 6-35 Σφάλματος εκτίμησης ενδεικνύμενης ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής πριν και μετά τη διόρθωση με τις μεθόδους “Α”, “Β”, “Γ” για δυο φορτία.



Σχήμ. 6-36 Σφάλμα εκτίμησης της ενδεικνύμενης ισχύος χρησιμοποιώντας την πίεση κυλίνδρου διορθωμένη με την μέθοδο “Α” συναρτήσει του αριθμού των σημαδιών στον σφόνδυλο (που είναι παράμετρος της μεθόδου).

6.9 Συσχέτιση του σφάλματος εκτίμησης ισχύος με την ταχύτητα περιστροφής και την ισχύ μεγάλων κινητήρων πρόωσης πλοών και ηλεκτροπαραγωγής

Από την εργαστηριακή διερεύνηση που διενεργήθηκε στο μονοκύλινδρο κινητήρα, προκύπτει ότι η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής κατά την μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου με σταθερό βήμα χρόνου, έχει σημαντική επίδραση στο ισοδύναμο βήμα γωνίας στροφάλου. Το σφάλμα στις υπολογισμένες τιμές γωνίας στροφάλου που αντιστοιχούνται στις τιμές της πίεσης έχει με την σειρά του πολύ μεγάλη επίδραση στις εκτιμήσεις που βασίζονται στην πίεση του θαλάμου καύσης και κυρίως στον υπολογισμό της ενδεικνύμενης ισχύος.



Εικόνα 6-6 Φωτογραφική άποψη των κεφαλών του 12-κύλινδρου κινητήρα «Δ», μέγιστης ισχύος συνεχούς λειτουργίας 68.4 MW

Στον συγκεκριμένο κινητήρα, λόγω της μονοκύλινδρης φύσης του, οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής είναι σημαντικές, όμως, όπως φανερώνεται από την ανάλυση στις προηγούμενες παραγράφους, πολύ σημαντική επίδραση έχει η μεταβολή της στιγμιαίας ταχύτητας κοντά στο άνω νεκρό σημείο κατά την συμπίεση και την εκτόνωση. Ακόμα και σε πολυκύλινδρους κινητήρες αναμένεται σε αυτές τις φάσεις να παρουσιάζεται επιβράδυνση και επιτάχυνση, αντίστοιχα αν και μικρότερης έντασης. Στην βιβλιογραφία επιβεβαιώνεται το γεγονός, κυρίως με προσομοίωση, καθώς αναφέρονται σημαντικές μεταβολές στην περιοχή κοντά στο ΑΝΣ, [6.26]. Το

φαινόμενο αναμένεται πιο έντονο στους βραδύστροφους κινητήρες, όπου τα δυναμικά φαινόμενα είναι πιο έντονα, όπως επιβεβαιώνεται και από την προηγούμενη διερεύνηση. Τέτοιοι κινητήρες είναι συνήθως δίχρονοι και χρησιμοποιούνται στην πρόωση πλοίων και στην ηλεκτροπαραγωγή.



Εικόνα 6-7 Φωτογραφική άποψη του κινητήρα "B" και στιγμιότυπο από την λήψη μετρήσεων πίεσης κυλίνδρου από τεχνικό του πλοίου

Για την άμεση διερεύνηση της παρουσίας σφάλματος που οφείλεται στην διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής, εξετάζεται το σφάλμα στην εκτίμηση της ισχύος συναρτήσει των παραμέτρων που επηρεάζουν την διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής, δηλαδή την μέση ταχύτητα περιστροφής και την ισχύ. Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από τέσσερις κινητήρες. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων γινόταν ακριβής καταγραφή της ισχύος. Ο Πίνακ. 6-4 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων κινητήρων. Ο πρώτος («Α») είναι κινητήρας ηλεκτροπαραγωγής εγκατεστημένος σε Θερμοηλεκτρικό Σταθμό σε Ελληνικό Νησί. Οι υπόλοιποι τρεις κινητήρες («Β», «Γ», «Δ») είναι οι κύριες μηχανές πρόωσης πλοίων με έλικα σταθερού βήματος.

Στον Πίνακ. 6-5 παρουσιάζονται τα σημεία λειτουργίας στα οποία ελήφθησαν μετρήσεις, η ισχύς από τις ενδείξεις των διαθέσιμων οργάνων της κάθε μονάδας, η εκτίμηση της ισχύος υπολογισμένη από το μετρημένο δυναμοδεικτικό και το αντίστοιχο σφάλμα. Παρατηρείται ότι υπάρχει εξάρτηση του σφάλματος από την ταχύτητα περιστροφής και το φορτίο.

Πίνακ. 6-4 Τα βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην διερεύνηση

Κινητήρας	Τύπος Μηχανής	Αριθμός Κυλίνδρων	NCR (kW)
«Α»	9K60MC-S	9	14840
«Β»	6S70MC-C8	6	18622
«Γ»	7S60MC-C	7	16630
«Δ»	12K98MC	12	68640

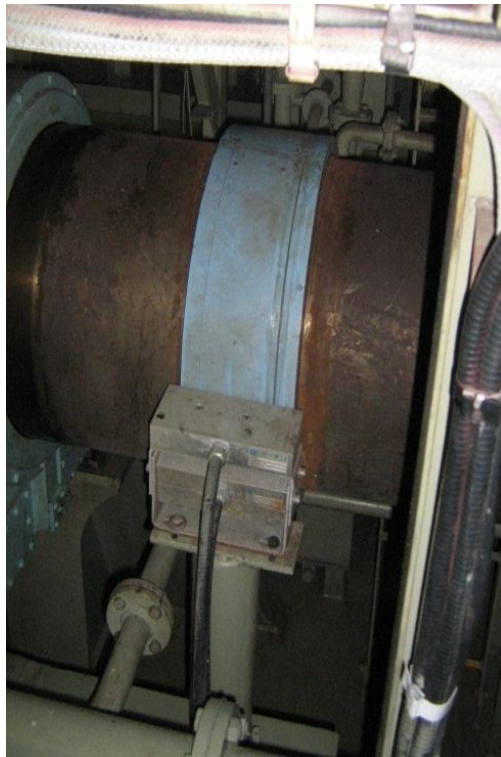
Πίνακ. 6-5 Οι ληφθέντες μετρήσεις από τους τέσσερις κινητήρες

Κινητήρας	Μέση Ταχύτητα (σ.α.λ)	Φορτίο (%)	Ένδειξη Ισχύος (kW)	Εκτίμηση Ισχύος (kW)	Σφάλμα (%)
«Α»	142.5	50.0	7300	7149	-2.07
	142.5	25.0	4000	3964	-0.90
	142.5	75.0	10900	10943	0.39
	142.5	90.0	13000	13062	0.48
	142.5	75.0	11000	10951	-0.45
	142.5	50.0	7300	7238	-0.85
«Β»	50.0	15.4	2878	2660	-7.57
	70.2	42.0	7800	7288	-6.56
	80.8	65.0	12228	11502	-5.94
	85.1	77.0	14460	13829	-4.36
	90.4	91.7	17393	16766	-3.60
	92.5	100.0	18698	18184	-2.75
«Γ»	65.8	21.9	3640	3363	-7.60
	82.8	44.7	7429	7100	-4.42
	95.2	68.7	11423	11179	-2.13
	89.2	55.3	9193	9083	-1.20
«Δ»	58.9	18.0	13000	12393	-4.67
	74.9	42.0	28260	28027	-0.82
	85.7	63.0	42660	41487	-2.75
	94.0	82.0	54500	54501	0.00

Παρά το γεγονός ότι στη προηγούμενη εργαστηριακή διερεύνηση στο μονοκύλινδρο κινητήρα προέκυψε σημαντικότερη εξάρτηση του σφάλματος από την ταχύτητα περιστροφής παρά από το φορτίο, στις περιπτώσεις «Β», «Γ», και «Δ» (που αφορούν σε ναυτικό κινητήρα) παρατηρείται παρόμοια εξάρτηση από το φορτίο και από την ανηγμένη ταχύτητα περιστροφής (λόγος ταχύτητας περιστροφής προς μέγιστη ταχύτητα περιστροφής κινητήρα).

Όμως αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη καθώς το φορτίο στη περίπτωση των Ναυτικών κινητήρων δεν εκφράζεται με το κλασικό τρόπο αλλά με το λόγο της παρούσας ισχύος προς την μέγιστη. Επειδή η ταχύτητα περιστροφής στη περίπτωση αυτή συνδέεται με την ισχύ με σταθερή ισχύ, τον νόμο της έλικας " $P=aN^3$ " θα υπάρχει επίδραση και από τα δυο παραμέτρους.

Τα ανωτέρω προφανώς δεν ισχύουν στη περίπτωση του κινητήρα H/Z διότι αυτός λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής.



(α)



(β)



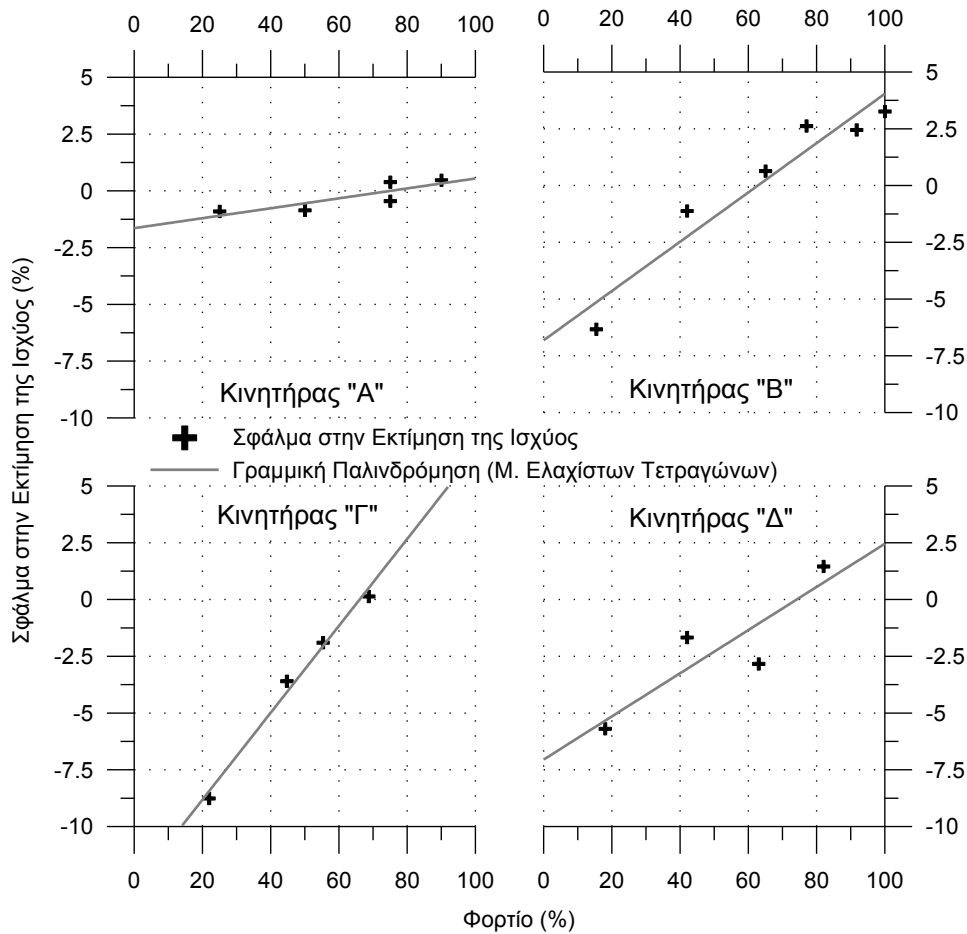
(γ)

Εικόνα 6-8 (α) Η μονάδα μέτρησης της ροπής του κινητήρα «Γ», εγκατεστημένη στον άξονα και (β) το αντίστοιχο τερματικό απεικόνισης. (γ) Το τερματικό απεικόνισης ισχύος του κινητήρα «Δ» .

Στο Σχήμ. 6-37 φαίνεται το σφάλμα εκτίμησης της ισχύος χρησιμοποιώντας μετρήσεις πίεσης καύσης με δειγματοληψία σταθερού βήματος χρόνου για τους τέσσερις κινητήρες. Το σφάλμα υπολογίστηκε με βάση την τιμή της ισχύος από τα εγκατεστημένα όργανα ελέγχου του κάθε κινητήρα (Εικόνα 6-8 για του κινητήρες «Γ» και «Δ»). Από τα ζεύγη τιμών σφάλματος – φορτίου προκύπτει ότι υπάρχει σχετικά καλή γραμμική συσχέτιση. Το μέτρο αξιολόγησης της προσαρμογής είναι παρόμοιο με αυτό που προκύπτει από τα την γραμμική προσαρμογή των ζευγών σφάλματος – ανηγμένης ταχύτητας περιστροφής.



Εικόνα 6-9 Στιγμιότυπο από την μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου στον κινητήρα "Γ"

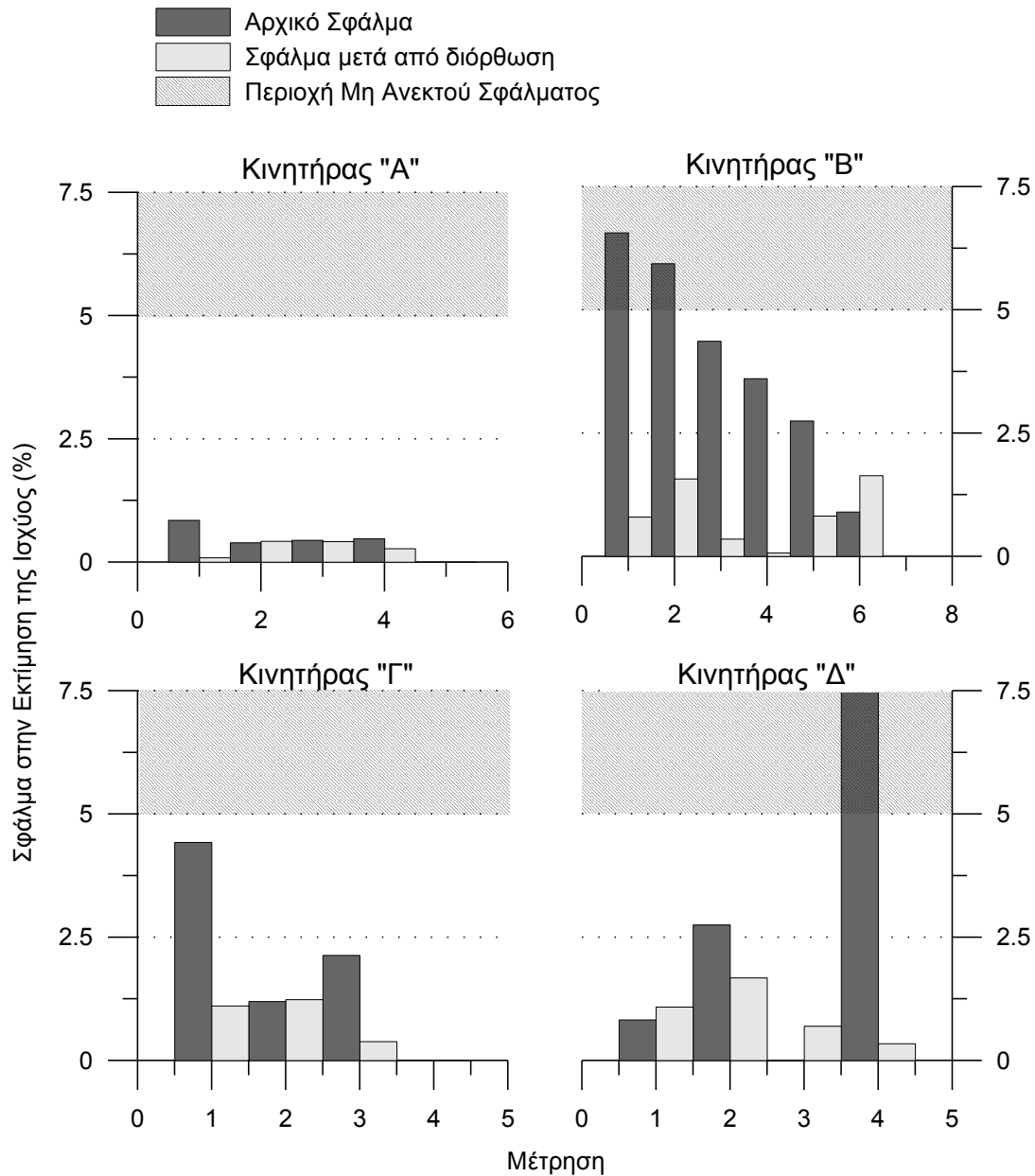


Σχήμ. 6-37 Σφάλμα εκτίμησης της ισχύος από μετρήσεις πίεσης καύσης με σταθερό βήμα χρόνου, συναρτήσεϊ του φορτίου για τέσσερις βραδυστροφους δίχρονους κινητήρες.

Για το κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής παρουσιάζεται πολύ μικρή εξάρτηση του σφάλματος από το σημείο λειτουργίας. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται σταθερή σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα και είναι κοντά στην μέγιστη τιμή για τέτοιου είδους κινητήρες όπου το σφάλμα εν γένει μειώνεται σημαντικά. Επιπλέον το απόλυτο σφάλμα είναι πολύ μικρό. Έτσι συμπεραίνεται ότι η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής εντός του κύκλου είναι πολύ μικρή, ακόμα και γύρω από το ΑΝΣ. Αυτό το συμπέρασμα συνάδει με τις ενδείξεις που προέκυψαν από την προσπάθεια καταγραφής της στιγμιαίας ταχύτητας που περιγράφεται στην παράγραφο 6.2.5. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στην διάταξη και στη φύση του κινητήρα που είναι κινητήρας ηλεκτροπαραγωγής. Τέλος σημαντική συμβολή έχει και η γεννήτρια λόγω της υψηλής της ροπής αδράνειας.

Στους κινητήρες πρόωσης πλοίων παρουσιάζεται σημαντική εξάρτηση του σφάλματος από το φορτίο και την ταχύτητα περιστροφής. Η συσχέτιση του φορτίου με το σφάλμα και στις τρεις περιπτώσεις είναι παρόμοια. Η διαφοροποίηση που υπάρχει, η οποία σχετίζεται με την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής γύρω από το ΑΝΣ, οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που σχετίζονται με την ροπή αδράνειας του, το μέγεθός του και τις ρυθμίσεις. Σημαντική επίδραση έχει και η προπορεία έγχυσης στην στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής διότι η επηρεάζει την επιτάχυνση του εμβόλου. Αυτό έχει σαν συνέπεια την διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής σε τιμές χαμηλότερες από την μέση για μεγαλύτερο διάστημα μετά το ΑΝΣ. Η μελέτη μετρήσεων από τον ίδιο κινητήρα με διαφορετικές ρυθμίσεις VIT, θα μπορούσε να αποσαφηνίσει την επίδραση της προπορείας στο σφάλμα εκτίμησης της ισχύος.

Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές της γραμμικής προσαρμογής, έγινε διόρθωση στις τιμές της εκτιμώμενης ισχύος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμ. 6-38. Παρατηρείται σαφής βελτίωση των αποτελεσμάτων, καθώς στις διορθωμένες τιμές το μέγιστο σφάλμα δεν υπερβαίνει το 2.5%. Τα αποτελέσματα καθιστούν σαφές ότι είναι δυνατή η υιοθέτηση συντελεστή βαθμονόμησης για κάθε κινητήρα χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα που θα μειώνει δραστικά το σφάλμα στην εκτίμηση της ισχύος. Ο συντελεστής θα υπολογίζεται από μετρήσεις σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα ή ακόμα και από δυο μετρήσεις σε δύο ακραία σημεία λειτουργίας. Βασική προϋπόθεση για την σωστή εφαρμογή της μεθόδου είναι η λεπτομερής καταγραφή της πραγματικής ισχύος κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Πλεονέκτημα όμως της μεθόδου είναι ότι απαιτείται να γίνει μια μόνο φορά για κάθε κινητήρα.



Σχήμ. 6-38 Εκτίμηση ισχύος πριν και μετά την διόρθωση.

6.10 Ορολογία και Συμβολισμοί

Λατινικά Σύμβολα

Q	Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (J/deg)
f_c	Συχνότητα ρολογιού (Hz)
M	Αριθμός σημαδιών στον σφόνδυλο (-)
n_c	Αριθμός κύκλων επεξεργασίας (-)
t	Χρόνος (sec)

Ελληνικά Σύμβολα

γ	Λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων (-)
θ	Γωνία στροφάλου (deg)
φ	Γωνία στροφάλου (deg)
ω	Γωνιακή ταχύτητα (deg/sec)

Δείκτες

app	Θεωρούμενη (apparent)
em	Προσομοιωμένη (emulated)
i	Αύξων αριθμός
nom	Πραγματική (nominal)

Συντομεύσεις

rpm	Στροφές ανα λεπτό (revolutions per minute)
TDC	Άνω νεκρό σημείο
ttl	Transistor-transistor logic
VIT	Revolutions per minute
ΑΝΣ	Άνω νεκρό σημείο
ΓΣ	Γωνία στροφάλου

Γραμμές δεδομένων και σήματα

TRIG	Σήμα χρονισμού
RX	Γραμμή λήψης UART
TX	Γραμμή αποστολής UART
PGR0	Γραμμή SS δίαυλου SPI
PGR1	Γραμμή SCL δίαυλου SPI
PGR2	Γραμμή MOSI δίαυλου SPI
PGR3	Γραμμή MISO δίαυλου SPI
TDC	Σήμα αναφοράς άνω νεκρού σημείου
0.5DEG	Σήμα αναφοράς περιστροφής μισής μοίρας

6.11 Αναφορές

- [6.1] F. Payri, J.M. Luján, J. Martín, A. Abbad, Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 24, Issue 6, August 2010, Pages 1767-1784
- [6.2] J. Binder, New generation of automotive sensors to fulfil the requirements off uel economy and emission control, Sensors and Actuators A—Physical 31 (1–3) (1992) 60–67.

- [6.3] J.G. Yang, L.J. Pu, Z.H. Wang, Y.C. Zhou, X.P. Yan, Fault detection in a diesel engine by analysing the instantaneous angular speed, *Mechanical Systems and Signal Processing* 15 (3) (2001) 549–564.
- [6.4] F. Taglialatela, M. Lavorgna, E. Mancaruso, B.M. Vaglieco, Determination of combustion parameters using engine crankshaft speed, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 38, Issue 2, 20 July 2013, Pages 628–633
- [6.5] Yuhua Li, Fengshou Gu, Georgina Harris, Andrew Ball, Nick Bennett, Ken Travis, The measurement of instantaneous angular speed, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 19, Issue 4, July 2005, Pages 786–805
- [6.6] C.D. di Cenzo, B. Szabados, N.K. Sinha, Digital measurement of angular velocity for instrumentation and control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation IECI* 23 (1) (1976) 83–86.
- [6.7] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamiyama, M. Tachikawa, A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor-drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 29 (3) (1982) 207–211.
- [6.8] K. Saito, K. Kamiyama, T. Ohmae, T. Matsuda, A microprocessor-controlled speed regulator with instantaneous speed estimation for motor-drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 35 (1) (1988) 95–99.
- [6.9] R. Bonert, Design of a high performance digital tachometer with a microcontroller, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 38 (6) (1989) 1104–1108.
- [6.10] M. Prokin, Double buffered wide-range frequency measurement method for digital tachometers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 40 (3) (1991) 606–610.
- [6.11] M. Prokin, Extremely wide-range speed measurement using a double-buffered method, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 41 (5) (1994) 550–559.
- [6.12] Y.H. Li, H.Q. Zheng, N.B. Jones, M.J. Pont, Multi-channel rotational speed measurement: a software based approach, *Measurement and Control* 31 (8) (1998) 229–231.
- [6.13] T. Laopoulos, A. Tsiolis, C.A. Karybakas, Digital frequency-to-voltage conversion, *International Journal of Electronics* 77 (2) (1994) 219–224.
- [6.14] E. Galvan, A. Torralba, L.G. Franquelo, ASIC implementation of a digital tachometer with high precision in a wide speed range, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 43 (6) (1996) 655–660.
- [6.15] Kistler, Crank Angle Encoder for Accurate Signals at Speeds of up to 20000 1/min, Type 2613B, datasheet, http://www.kistler.com/mediaaccess/2613B__000-366e-06.05.pdf
- [6.16] Emiliano Pipitone, Alberto Beccari, Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach, *APPL THERM ENG* 2010; 30(14):1914-26.
- [6.17] M. Tazerout, O. Le Corre and S. Rouseau, TDC Determination in IC Engines Based on the Thermodynamic Analysis of the temperature-Entropy Diagram, *SAE paper* 1999-01-1489; 1999.
- [6.18] Stas MJ. Thermodynamic determination of TDC in piston combustion engines. *SAE paper* No 960610; 1996.
- [6.19] ATMEGA8 8-bit AVR Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash, Datasheet, ATMEL, San Jose, California, USA, 2010

- [6.20] ECX-3S- SMD Quartz Crystal, ECS INC., Kansas USA
- [6.21] R. Sawada, E. Higurashi, Y. Jin, Hybrid microlaser encoder, *Journal of Lightwave Technology* 21 (3) (2003) 815–820.
- [6.22] T. Fabian, G. Brasseur, A robust capacitive angular speed sensor, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 47 (1) (1998) 280–284.
- [6.23] S.K. Kaul, R. Koul, C.L. Bhat, I.K. Kaul, A.K. Tickoo, Use of a 'look-up' table improves the accuracy of a lowcost resolver-based absolute shaft encoder, *Measurement Science & Technology* 8 (3) (1997) 329–331.
- [6.24] E G Giakoumis, C D Rakopoulos, A M Dimaratos, Study of crankshaft torsional deformation under steady-state and transient operation of turbocharged diesel engines, *P I MECH ENG K-J Multi-body Dynamics* 2008; 222:17-30.
- [6.25] S. Schagerberg, T. McKelvey, Instantaneous Crankshaft Torque Measurements- Modeling and Validation, SAE 2003, Technical Paper 2003-01-0713 [18] D. Taraza, N.A. Henein, Determination of the Gas-Pressure Torque of a Multicylinder Engine from Measurements of the Crankshaft's Speed Variation, SAE 1998, Technical Paper 980164
- [6.26] F.V. Tinaut, et al. "Misfire and compression fault detection through the energy model". *Mechanical Systems and Signal processing* 2002; 21:1521-1535
- [6.27] J.N. Lygouras, V. Kodogiannis, T.P. Pachidis, G.Ch. Sirakoulis, A new method for digital encoder adaptive velocity/acceleration evaluation using a TDC with picosecond accuracy, *Microprocessors and Microsystems*, Volume 33, Issues 7–8, October–November 2009, Pages 453-460

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ

Η απρόσκοπτη και αποδοτική λειτουργία κινητήρων που χρησιμοποιούνται για την πρόωση πλοίων και την ηλεκτροπαραγωγή, είναι βασικός στόχος των μεθόδων επιτήρησης και διάγνωσης. Λόγω της πολυπλοκότητας της λειτουργίας των κινητήρων, πολλές παράμετροι παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων. Μια παράμετρος που συχνά υποτιμάται είναι η διακύμανση της ισχύος του κινητήρα κατά την διαδοχική μέτρηση της πίεσης αερίου στους κυλίνδρους.

Στη περίπτωση του ναυτικού κινητήρα πρόωσης, το φορτίο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται συνεχώς, άλλοτε λιγότερο και άλλοτε περισσότερο, λόγω μεταβολών που σχετίζονται με την ισχύ που μπορεί να αποδώσει η έλικα, όπως η ένταση και η κατεύθυνση των ρευμάτων, οι διαταραχές της θάλασσας, η αλλαγή κατεύθυνσης πλεύσης, κ.α. Στην περίπτωση των κινητήρων ηλεκτροπαραγωγής, οι διακυμάνσεις του φορτίου του κινητήρα οφείλονται είτε στην διακύμανση της ζήτησης είτε στις μεταβολές της παραγόμενης ισχύος των υπόλοιπων διασυνδεδεμένων ηλεκτροπαραγωγών. Αυτό είναι σύνηθες φαινόμενο στα μικρά δίκτυα στα ελληνικά νησιά, όπου οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν διείσδυση έως και 20%. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι διακυμάνσεις στην παραγόμενη από τις ανεμογεννήτριες ισχύ, λόγω διακυμάνσεων στην ένταση ή την κατεύθυνση του αέρα, μεταφέρονται ακέραιες στους κινητήρες της ηλεκτροπαραγωγής.

Μια βασική εφαρμογή της διαγνωστικής μεθόδου, είναι η εξέταση της ομοιομορφίας λειτουργίας των κυλίνδρων και η πρόταση ρυθμίσεων για την διόρθωσή της. Όμως για οικονομικούς και πρακτικούς λόγους η μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων γίνεται διαδοχικά και όχι ταυτόχρονα. Συνεπώς μια διακύμανση της ισχύος του κινητήρα κατά τις διαδοχικές μετρήσεις, μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων. Η ρύθμιση της παροχής καυσίμου των κυλίνδρων με σκοπό την παραγωγή ίδιας ισχύος μεταξύ τους, αν βασίζεται σε λανθασμένα αποτελέσματα, όχι μόνο δεν θα επιτύχει την ομοιόμορφη λειτουργία, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε χειροτέρευση.

Στην περίπτωση όμως που η διακύμανση είναι γνωστή, τότε μπορεί να γίνει αναγωγή των αποτελεσμάτων σε σταθερή ισχύ και να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα. Ο τρόπος της αναγωγής παρουσιάζεται στην παράγραφο 7.1. Η διακύμανση μπορεί να μετρηθεί άμεσα με την ακριβή καταγραφή της ισχύος. Αυτή η λύση όμως δεν είναι εφικτή για εφαρμογές σε βιομηχανικό περιβάλλον. Γι αυτόν τον λόγο προτείνονται και εξετάζονται δυο μέθοδοι για τον εντοπισμό

της διακύμανσης ισχύος και την διόρθωση του προβλήματος με μετρήσεις που υλοποιούνται εύκολα στην διάρκεια των συμβατικών μετρήσεων.

- ♦ Στη πρώτη μέθοδο γίνεται διαδοχική μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων με ταυτόχρονη, παράλληλη μέτρηση ενός κυλίνδρου αναφοράς με χρήση ενός δεύτερου αισθητήρα. Η διακύμανση της ισχύος του κυλίνδρου αναφοράς παρέχει πληροφορίες για την διακύμανση της ισχύος του κινητήρα.
- ♦ Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί την πίεσης σάρωσης. Η μεταβολή της πίεσης σάρωσης συσχετίζεται με την μεταβολή της ισχύος του κινητήρα.

Για την διερεύνηση της επάρκειας και την συγκριτική αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων, διενεργήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση σε δίχρονο κινητήρα σε διάταξη σειράς και τετράχρονο κινητήρα σε διάταξη V εγκατεστημένους σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής σε Ελληνικά νησιά. Οι κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής επιλέχθηκαν για την διερεύνηση, έναντι των ναυτικών κινητήρων, διότι λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Έτσι, κατά την διάρκεια της διακύμανσης ισχύος παρατηρείται διακύμανση μόνο στο φορτίο του κινητήρα και όχι στην ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον οι κινητήρες εγκατεστημένοι σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής προσφέρουν ένα περισσότερο ελεγχόμενο περιβάλλον για την διενέργεια διερευνήσεων. Συγκεκριμένα είναι δυνατή η ακριβής καταγραφή του φορτίου και επιπλέον υπάρχει δυνατότητα ελεγχόμενης κατανομής του ηλεκτρικού φορτίου στους κινητήρες της μονάδας δημιουργώντας έτσι τις απαιτούμενες συνθήκες για την διενέργεια του πειράματος (καθορισμός επιθυμητής ισχύος, μείωση ή αύξηση των διακυμάνσεων κλπ). Η αύξηση των διακυμάνσεων γίνεται «κλειδώνοντας» τους υπόλοιπους κινητήρες της μονάδας σε σταθερό φορτίο ώστε ο συγκεκριμένος να παραλαμβάνει το σύνολο των διακυμάνσεων.

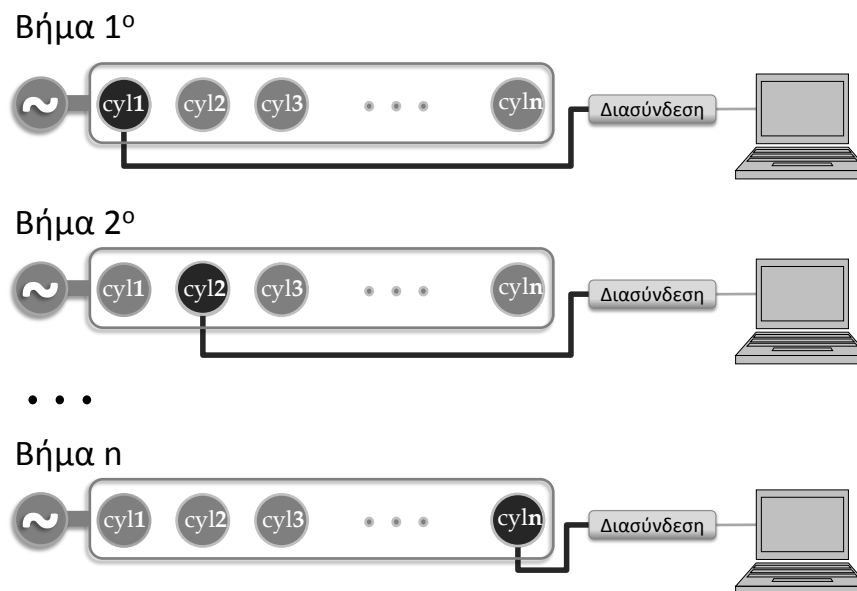
Στην διερεύνηση που διενεργείται στον δίχρονο κινητήρα (§7.5) τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εστιάζουν στην αξιολόγηση της επίδρασης της διακύμανσης ισχύος στην εκτιμώμενη ισχύ των κυλίνδρων και την κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον αξιολογούνται συγκριτικά οι δυο μέθοδοι διόρθωσης. Με προϋπόθεση την ομαλή λειτουργία του συστήματος έγχυσης σε κάθε φορτίο ο κύλινδρος που έχει τη μεγαλύτερη παροχή καυσίμου θα αποδίδει και μεγαλύτερη ισχύ καθώς διαφορές στον βαθμό απόδοσης δεν μπορούν υπό κανονικές συνθήκες να αντισταθμίσουν το φαινόμενο αυτό. Έτσι, ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μεθόδων διόρθωσης είναι η σύγκριση του μοτίβου παραγωγής ισχύος ανά κύλινδρο σε διαφορετικά φορτία.

Στην διερεύνηση που διενεργείται στον τετράχρονο κινητήρα (§7.6) έμφαση δίνεται στο αποτέλεσμα της ρύθμισης του κινητήρα με σκοπό την εξομάλυνση της λειτουργίας του. Χρησιμοποιώντας την αρχική και την διορθωμένη εικόνα ισχύος των κυλίνδρων, προτείνονται αντίστοιχες απαιτούμενες ρυθμίσεις του κανόνα καυσίμου για την παραγωγή ίσης ισχύος

από κάθε κύλινδρο. Προφανώς, χρησιμοποιώντας τα αρχικά δεδομένα ισχύος ανά κύλινδρο, όπου δεν έχει ληφθεί καθόλου υπόψη η διακύμανση της ισχύος, είναι δυνατόν οι νέες ρυθμίσεις να έχουν δυσμενή αποτελέσματα στην λειτουργία του κινητήρα. Για την διερεύνηση εφαρμόζεται μόνο η μία εκ των δύο μεθόδων που προτείνονται (με χρήση κυλίνδρου αναφοράς ισχύος) καθώς όπως φαίνεται στην §7.5, όπου γίνεται συγκριτική αξιολόγηση, οι δυο μέθοδοι έχουν ισοδύναμα αποτελέσματα.

7.1 Μεθοδολογία εκτίμησης της διακύμανσης φορτίου και διόρθωσης της ισχύος με χρήση μέτρησης πίεσης κυλίνδρου αναφοράς

Για την διάγνωση της κατάστασης του κινητήρα όπως ήδη έχει αναφερθεί απαιτείται η μέτρηση της πίεσης του αερίου σε κάθε κύλινδρο. Η μέτρηση αυτή γίνεται με τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα που περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.2 ο οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω του κυκλώματος διασύνδεσης (παράγραφος 2.1.3) στον αναλογοψηφιακό μετατροπέα.



Σχήμ. 7-1 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας διαδοχικής μέτρησης της πίεσης των κυλίνδρων

Για τον σχηματισμό πλήρους εικόνας του κινητήρα σε ένα σημείο λειτουργίας, είναι απαραίτητη η μέτρηση της πίεσης όλων των κυλίνδρων. Η πλέον ενδεδειγμένη μέθοδος θα ήταν η ταυτόχρονη μέτρηση. Όμως για την ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων απαιτούνται πολλοί αισθητήρες γεγονός που αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Γι

αυτόν τον λόγο αποτελεί κανόνα η διαδοχική μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων έναντι της ταυτόχρονης, ακόμα και σε μόνιμα εγκατεστημένα συστήματα, με την χρήση ενός μόνο αισθητήρα.

Στο Σχήμ. 7-1 φαίνεται η διαδικασία διαδοχικής μέτρησης της πίεσης των κυλίνδρων. Αρχικά μετράται η πίεση στον πρώτο κύλινδρο. Κατόπιν αφαιρείται ο αισθητήρας και τοποθετείται στον επόμενο κύλινδρο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους κυλίνδρους. Στη περίπτωση κινητήρα σε διάταξη V, μετριοούνται διαδοχικά οι κύλινδροι της πρώτης σειράς και στην συνέχεια οι κύλινδροι της δεύτερης σειράς.

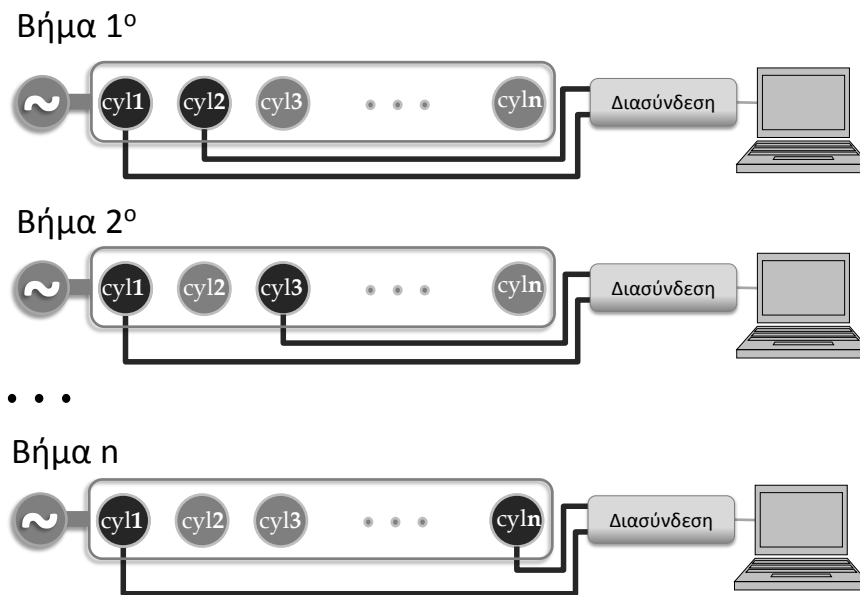
Με αυτήν την μεθοδολογία η κάθε μέτρηση χρησιμοποιείται αυτόνομα. Από την κάθε μέτρηση υπολογίζονται τα αποτελέσματα της διάγνωσης για τον συγκεκριμένο κύλινδρο, συμπεριλαμβανομένης και της ισχύος του κυλίνδρου. Αν όμως στην διάρκεια των μετρήσεων παρουσιαστεί διακύμανση στην ισχύ του κινητήρα, η υπολογισμένη ισχύς των κυλίνδρων θα περιλαμβάνει και την διακύμανση αυτή. Θα δημιουργηθεί επομένως η εντύπωση κάποιος κύλινδρος παράγει περισσότερη ή λιγότερη ισχύ σε σχέση με τους υπόλοιπους, με αποτέλεσμα να προταθεί αύξηση ή ελάττωση της θέσης του κανόνα καυσίμου με σκοπό την εξομάλυνση της λειτουργίας του κινητήρα. Αυτό προφανώς μπορεί να οδηγήσει σε χειροτέρευση της λειτουργίας του. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι η συνολική ισχύς του κινητήρα σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι σταθερή στην διάρκεια της μέτρησης.

Το πρόβλημα του εντοπισμού της διακύμανσης της ισχύος του κινητήρα αντιμετωπίζεται με την προτεινόμενη διαδικασία μέτρησης που απεικονίζεται στο Σχήμ. 7-2 και χρησιμοποιεί δυο αισθητήρες πίεσης, αντί για έναν που χρησιμοποιεί η συνήθης διαδικασία. Σε ένα κύλινδρο που ορίζεται σαν κύλινδρος αναφοράς, έστω ο κύλινδρος No. 1, προσαρτάται ο πρώτος αισθητήρας πίεσης. Με τον δεύτερο αισθητήρα μετρώνται διαδοχικά οι υπόλοιποι κύλινδροι ενώ πάντα μετράται ο πρώτος. Έτσι για κάθε μέτρηση είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διακύμανσης του φορτίου του κινητήρα μέσω της διακύμανσης της ισχύος του κυλίνδρου αναφοράς. Χρησιμοποιώντας την γνωστή πλέον διακύμανση, γίνεται διόρθωση στον υπολογισμό της ισχύος του κάθε κυλίνδρου για να προκύψει μια ανηγμένη τιμή.

Σε μικρές διακυμάνσεις της ισχύος του κινητήρα, θεωρείται ότι μεταβάλλεται η ισχύς όλων των κυλίνδρων αναλογικά το οποίο αποτελεί μια αρκετά λογική προσέγγιση. Συνεπώς, όταν η ισχύς του κυλίνδρου αναφοράς είναι $P_{ref,i}$ και η ισχύς του κυλίνδρου i , P_i , θεωρώντας σαν βάση διόρθωσης την μέση από τις τιμές του κυλίνδρου αναφοράς $P_{mean,ref}$, η διορθωμένη ισχύς του κυλίνδρου i θα είναι:

$$P_{cor,i} = P_i \frac{P_{mean,ref}}{P_{ref}} \quad (7-1)$$

όπου το i ταυτίζεται με τον αύξοντα αριθμό της μέτρησης και τον αριθμό του κυλίνδρου.



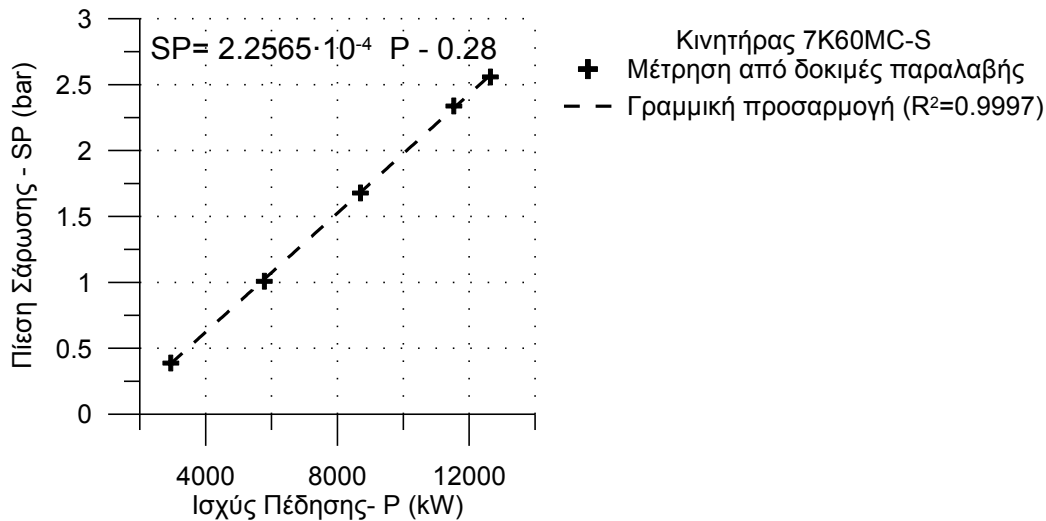
Σχήμ. 7-2 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας διαδοχικής μέτρησης της πίεσης των κυλίνδρων με ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης του κυλίνδρου αναφοράς

7.2 Μεθοδολογία εκτίμησης της διακύμανσης φορτίου και διόρθωσης της ισχύος από την πίεση σάρωσης

Η πίεση στην αρχή της συμπίεσης στους υπερπληρωμένους κινητήρες σχετίζεται άμεσα με την πίεση σάρωσης. Η πίεση σάρωσης (Scavenging air Pressure, SP) είναι μια λειτουργική παράμετρος που εξαρτάται άμεσα από τη στιγμιαία τιμή του φορτίου του κινητήρα καθώς σχετίζεται, με την ενέργεια που προσδίδεται από τα καυσαέρια στο στρόβιλο ο οποίος με τη σειρά του κινεί το συμπιεστή [7.1]. Οποιαδήποτε μεταβολή στο φορτίο του κινητήρα έχει αντίστοιχη επίδραση στην τιμή της πίεσης σάρωσης. Στις εφαρμογές της διατριβής οι μεταβολές που εξετάζονται είναι μικρές ή αργές, οπότε το φαινόμενο της υστέρησης (turbolag) είναι περιορισμένο [7.2]. Εξαιτίας αυτού κάθε μεταβολή φορτίου έχει άμεση επίπτωση στη τιμή της πίεσης σάρωσης.

Για την συσχέτιση της ισχύος, P , συναρτήσει της πίεσης σάρωσης, SP , καταstrώνεται η αντίστοιχη γραμμική συνάρτηση $P=f(SP)=\alpha SP+\beta$ με τα δεδομένα των δοκιμών παραλαβής του κινητήρα:

$$SP \xrightarrow{f} P \quad (7-2)$$



Σχήμ. 7-3 Μεταβολή της πίεσης σάρωσης συναρτήσει της ισχύος με δεδομένα από τις δοκιμές παραλαβής σε κινητήρα 7K60MC

Μια τέτοια συσχέτιση παρουσιάζεται στο Σχήμ. 7-3 όπου φαίνεται η ισχύς του κινητήρα συναρτήσει της πίεσης σάρωσης. Τα δεδομένα προέρχονται από τις δοκιμές παραλαβής του κινητήρα (ο οποίος περιγράφεται στην §7.5.1).

Η συσχέτιση αυτή αφορά σε νέο κινητήρα. Λόγω ρύπανσης και φθορών η ευθεία είναι δυνατόν να μετατοπισθεί, όμως η κλίση της, a , (δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος ως προς την πίεση σάρωσης) θεωρείται ότι δεν αλλάζει σημαντικά.

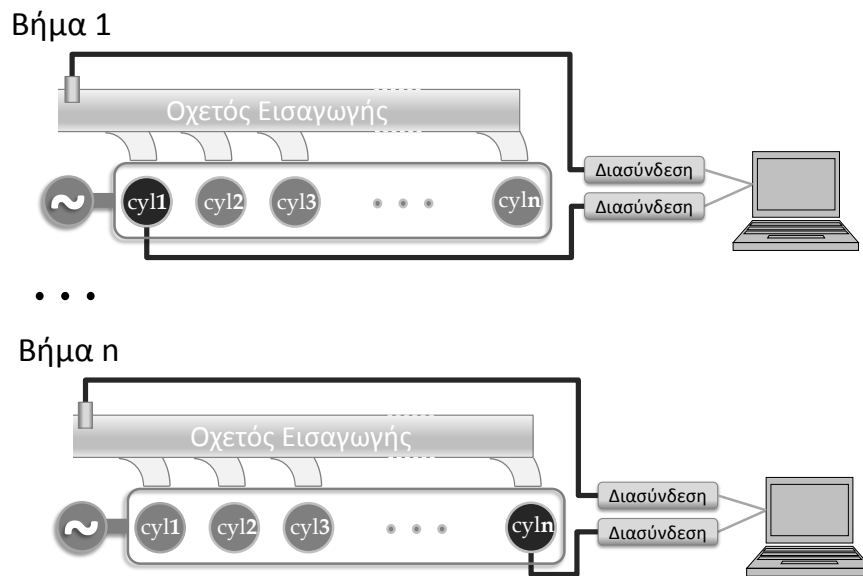
Συνεπώς ισχύει:

$$a = \frac{SP_{mean} - SP_i}{P_{cor,i} - P_i} \quad (7-3)$$

Η διορθωμένη ισχύς προκύπτει συναρτήσει του παράγοντα που εξαρτάται από την μέση πίεση σάρωσης SP_{mean} και την πίεση σάρωσης SP_i κατά την διάρκεια της μέτρησης του κυλίνδρου i :

$$P_{cor,i} = \frac{SP_{mean} - SP_i}{a} + P_i \quad (7-4)$$

Ταυτόχρονα με την μέτρηση του κάθε κυλίνδρου, μετράται και η πίεση σάρωσης με ειδικό αισθητήρα, με τις ίδιες ρυθμίσεις δειγματοληψίας. Ο αισθητήρας της πίεσης σάρωσης είναι μόνιμα τοποθετημένος στον οχετό εισαγωγής, ενώ ο αισθητήρας της πίεσης του θαλάμου καύσης εναλλάσσεται από κύλινδρο σε κύλινδρο (Σχήμ. 7-4). Για κάθε μέτρηση i , μετά την αναφορά της σε γωνία στροφάλου, υπολογίζεται μια μέση τιμή πίεσης σάρωσης για τα διαστήματα της απόπλυσης, "SP". Από τις τιμές SP_i υπολογίζεται η μέση τιμή SP_{mean} . Η διορθωμένη τιμή της ισχύος $P_{cor,i}$ υπολογίζεται από την αρχική P_i με την εφαρμογή της εξίσωσης (7-4).



Σχήμ. 7-4 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας διαδοχικής μέτρησης της πίεσης των κυλίνδρων με ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης σάρωσης

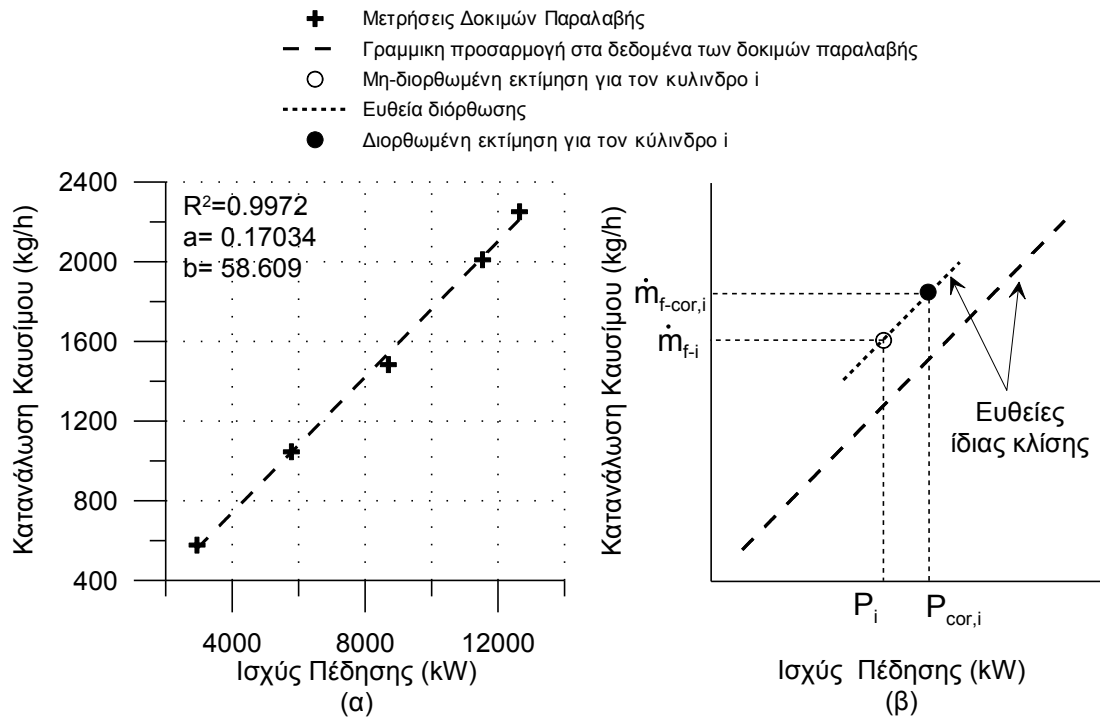
7.3 Μεθοδολογία διόρθωσης βασικών μεγεθών του κινητήρα με την διακύμανση του φορτίου

Από τις μετρήσεις των δοκιμών παραλαβής του κινητήρα δίνεται η δυνατότητα να καθοριστεί η συσχέτιση κάθε μετρημένου μεγέθους με την ισχύ του κινητήρα, εφόσον υφίστανται συσχέτιση.

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται η κατανάλωση καυσίμου και η μέγιστη πίεση καύσης. Από την προσαρμογή των δεδομένων δημιουργείται μια καμπύλη συσχέτισης του κάθε μεγέθους με την ισχύ. Από την συσχέτιση, που είναι γραμμική, διατηρείται μόνο η κλίση της ευθείας δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής του μεγέθους ως προς την μεταβολή της ισχύος.

Στο Σχήμ. 7-5α, φαίνεται η κατανάλωση καυσίμου σε τέσσερα σημεία λειτουργίας (δεδομένα από τις μετρήσεις των δοκιμών παραλαβής του κινητήρα 7K60MC_S). Από τα ζεύγη τιμών διέρχεται ευθεία (με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων). Στο Σχήμ. 7-5β, το μη συμπαγές κυκλικό σύμβολο αντιστοιχεί στην εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου \dot{m}_{f-i} του κυλίνδρου i που αντιστοιχεί σε ισχύ P_i . Με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία των προηγούμενων παραγράφων έγινε διόρθωση της ισχύος από την τιμή P_i στην τιμή $P_{cor,i}$. Η διορθωμένη τιμή κατανάλωσης καυσίμου, $\dot{m}_{f-cor,i}$ (συμπαγές κυκλικό σύμβολο), βρίσκεται σε ευθεία που διέρχεται από το σημείο (P_i, \dot{m}_{f-i}) και είναι παράλληλη με την ευθεία των δεδομένων από τις δοκιμές παραλαβής.

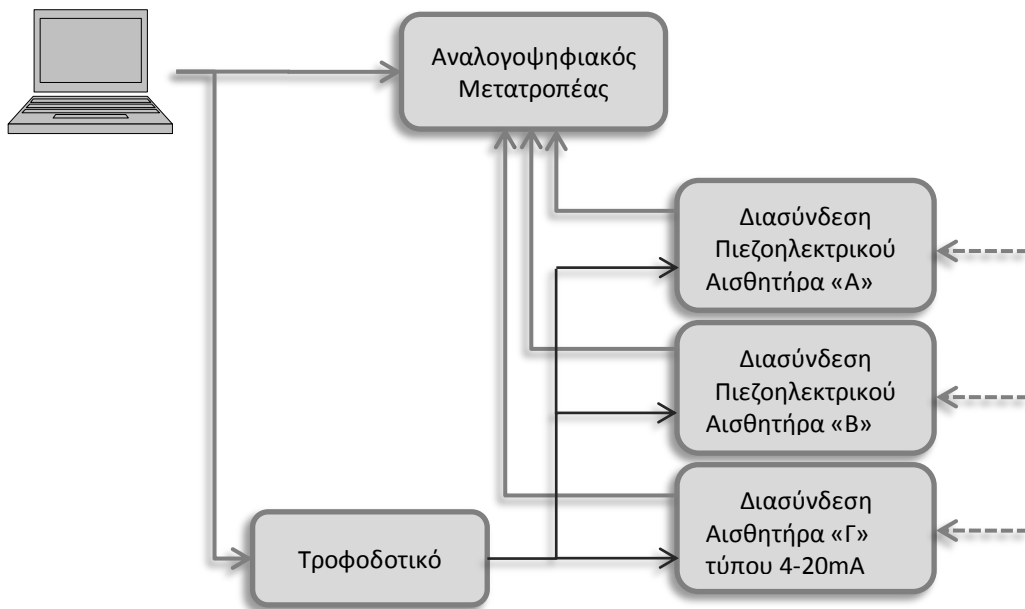
Αντίστοιχη μεθοδολογία ακολουθείται για την διόρθωση της μέγιστης πίεσης καύσης.



Σχήμ. 7-5 Μεθοδολογία διόρθωσης λειτουργικών μεγεθών του κινητήρα αξιοποιώντας την διορθωμένη ισχύ και την κλίση της ευθείας διόρθωσης που υπολογίζεται από δεδομένα των δοκιμών παραλαβής.

7.4 Περιγραφή της μετρητικής διάταξης για την πειραματική διερεύνηση.

Αναπτύχθηκε μετρητική διάταξη για την ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης του κυλίνδρου αναφοράς, του κυλίνδρου που εναλλάσσεται και της πίεσης σάρωσης. Η διάταξη κατασκευάστηκε για τους σκοπούς των συγκεκριμένων μετρήσεων, που είναι η αναγνώριση της διακύμανσης του φορτίου κατά την διάρκεια των διαδοχικών μετρήσεων των κυλίνδρων, η επίπτωση στα αποτελέσματα της διάγνωσης και η αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων διόρθωσης του σφάλματος.



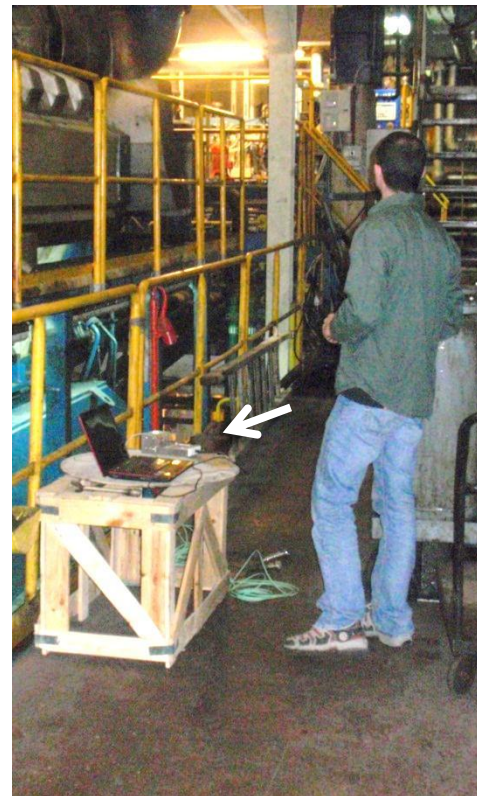
Σχήμ. 7-6 Διάγραμμα συνδέσεων της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διερεύνηση για την ανίχνευση της διακύμανσης φορτίου.



(β)



(α)



(γ)

Εικόνα 7-1 (α), (β) Φωτογραφικές απόψεις της διάταξης και των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διερεύνηση. (γ) Η διάταξη συνδεδεμένη με τον υπολογιστή και τους αισθητήρες κατά την διενέργεια μετρήσεων.

Η διάταξη αποτελείται από τμήματα που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2 και συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμ. 7-6:

- ◆ αναλογοψηφιακό μετατροπέα (USB-9215),
 - ◆ τροφοδοτικό,
 - ◆ κύκλωμα διασύνδεσης πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα με ενσωματωμένο μεσολαβητή και
 - ◆ κύκλωμα διασύνδεσης αισθητήρα τύπου 4-20mA.
- Στην διάταξη συνδέθηκαν οι αισθητήρες:
- ◆ Kistler 7613C για την μέτρηση του κυλίνδρου αναφοράς, αισθητήρας «Α»
 - ◆ Kistler 6613CP για την μέτρηση του κυλίνδρου που εναλλάσσεται, «Β» και
 - ◆ Wika A10 για την μέτρηση της πίεσης σάρωσης, «Γ».

7.5 Συγκριτική αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων-Εφαρμογή σε δίχρονο κινητήρα

7.5.1 Σκοπός και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Η διακύμανση του φορτίου του κινητήρα κατά την διάρκεια των διαδοχικών μετρήσεων της πίεσης των κυλίνδρων μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της διάγνωσης. Για την αξιολόγηση αφενός αυτής της επίδρασης και αφετέρου της επάρκειας των δύο προτεινόμενων μεθόδων να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα όταν υπάρξει διακύμανση φορτίου, διενεργήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση σε δίχρονο, επτακύλινδρο κινητήρα μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, με ονομαστική ισχύ 11.2MW, εγκατεστημένο σε Θερμοηλεκτρικό Σταθμό Ελληνικού Νησιού. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα φαίνονται στον Πίνακ. 7-1.

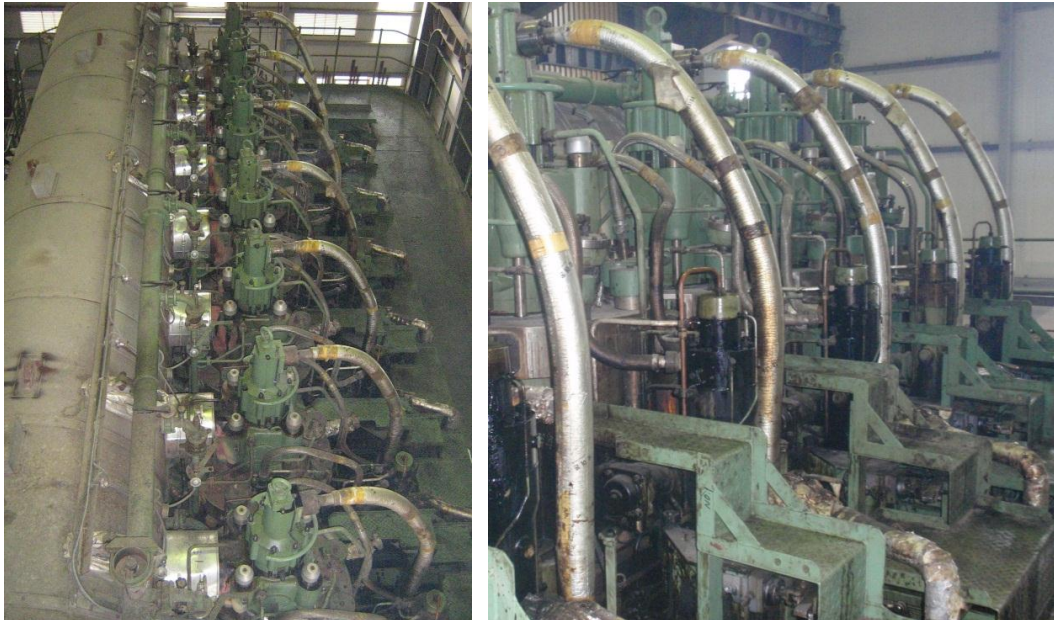
Πίνακ. 7-1 Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Κινητήρα 7K60MC-S

Κινητήρας:	-	MAN 7K60MC-S
Τύπος:	-	2-X
Αριθμός Κυλίνδρων:	-	7
Ονομαστική Ταχύτητα Περιστροφής:	σαλ	143
Ονομ. Ισχύς Συνεχούς Λειτουργίας (NCR):	MW	11.2
Διάμετρος Εμβόλου:	mm	600
Διαδρομή Εμβόλου:	mm	1650

Πραγματοποιήθηκαν τρία σύνολα μετρήσεων, στο 50%, 75% και 100% του φορτίου του κινητήρα. Σε κάθε φορτίο έγιναν 6 μετρήσεις, όπου ψηφιοποιούνταν ταυτόχρονα:

- ◆ η πίεση του κυλίνδρου Νο.1 (κύλινδρος αναφοράς),
- ◆ η πίεση σάρωσης, και
- ◆ διαδοχικά η πίεση των κυλίνδρων Νο. 2 έως Νο. 7.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται για τον κύλινδρο Νο.1 εξήχθησαν από την μέτρηση που έγινε παράλληλα με την μέτρηση του κυλίνδρου Νο.2. Κάθε μέτρηση διαρκούσε χρόνο αντίστοιχο με 30 περιστροφές και η δειγματοληψία ήταν ισοδύναμη με 0.5° γωνίας στροφάλου. Για την συνεχή και ακριβή μέτρηση της πίεσης σάρωσης, χρησιμοποιήθηκε ειδικός πιεζοαντιστατικός αισθητήρας (παράγραφος 2.2.2) ο οποίος συνδέθηκε μέσω του αντίστοιχου κυκλώματος διασύνδεσης (παράγραφος 2.2.3) στον αναλογιοψηφιακό μετατροπέα (παράγραφος 0). Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε κρουνό που βρίσκεται στον οχετό αέρα σάρωσης του κινητήρα.

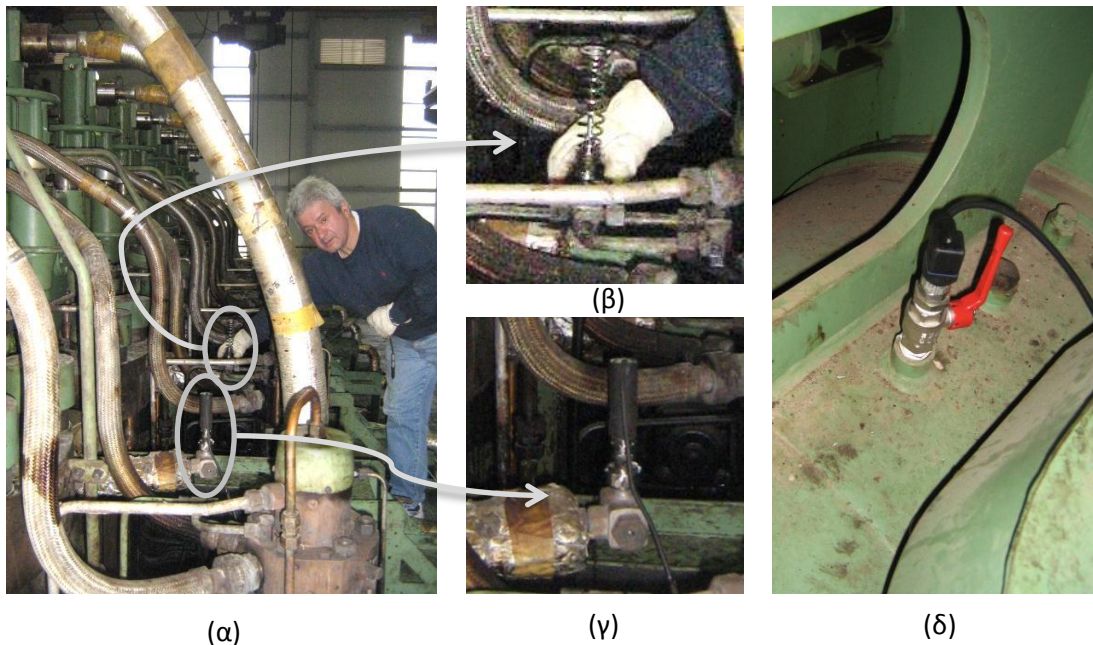


Εικόνα 7-2 Φωτογραφικές απόψεις των κυλινδροκεφαλών του κινητήρα. Αριστερά διακρίνεται ο οχετός εξαγωγής.

Στη διάρκεια κάθε μέτρησης καταγράφονταν από ηλεκτρονική ένδειξη στην αίθουσα ελέγχου η παραγόμενη από την γεννήτρια ισχύς. Στον Πίνακ. 7-2 συνοψίζονται οι συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα στην διάρκεια των τριών σειρών μετρήσεων. Η ισχύς του κινητήρα υπολογίστηκε από την καταγραφή της ηλεκτρικής ισχύος και τον βαθμό απόδοσης της γεννήτριας που δίνεται στις δοκιμές παραλαβής. Η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή καθώς πρόκειται για κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής (η συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος πρέπει να είναι σταθερή). Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, καταγράφονταν επίσης περιφερειακά μεγέθη όπως η θέση κανόνα καυσίμου, η πίεση και θερμοκρασία σάρωσης και άλλα δεδομένα που δεν αξιοποιούνται άμεσα στην παρούσα διερεύνηση.

Πίνακ. 7-2 Συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα κατά την διάρκεια των τριών συνόλων μετρήσεων

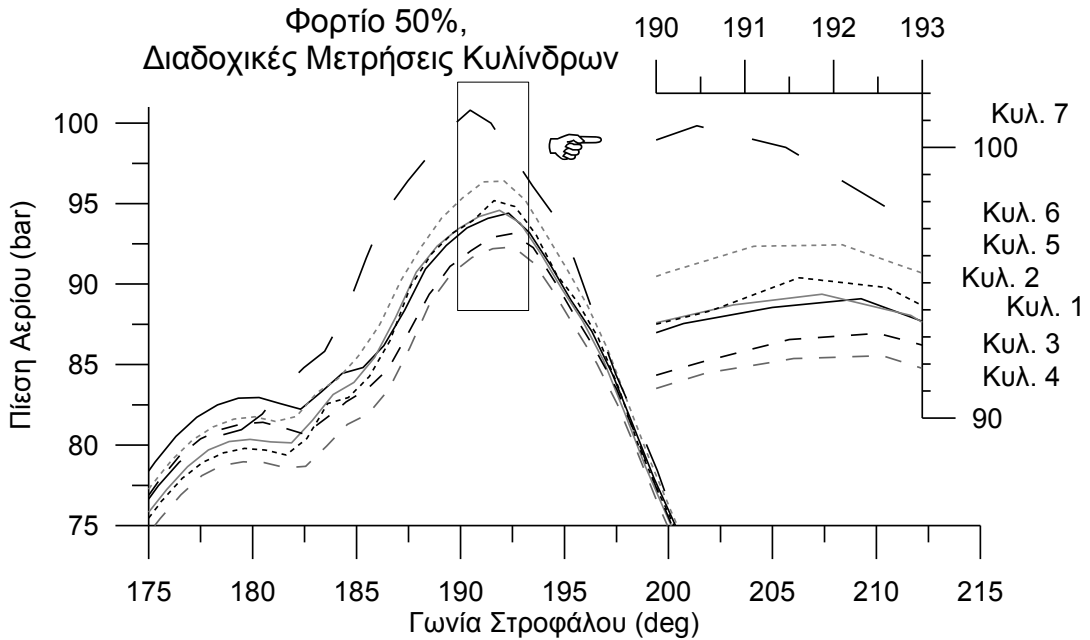
Σύνολο Μετρήσεων	Ταχύτητα Περιστροφής σαλ	Φορτίο %	Ισχύς Γεννήτριας kW	Ισχύς Κινητήρα kW
1	143	50	5770	6272
2	143	75	8552	9566
3	143	100	11352	11467



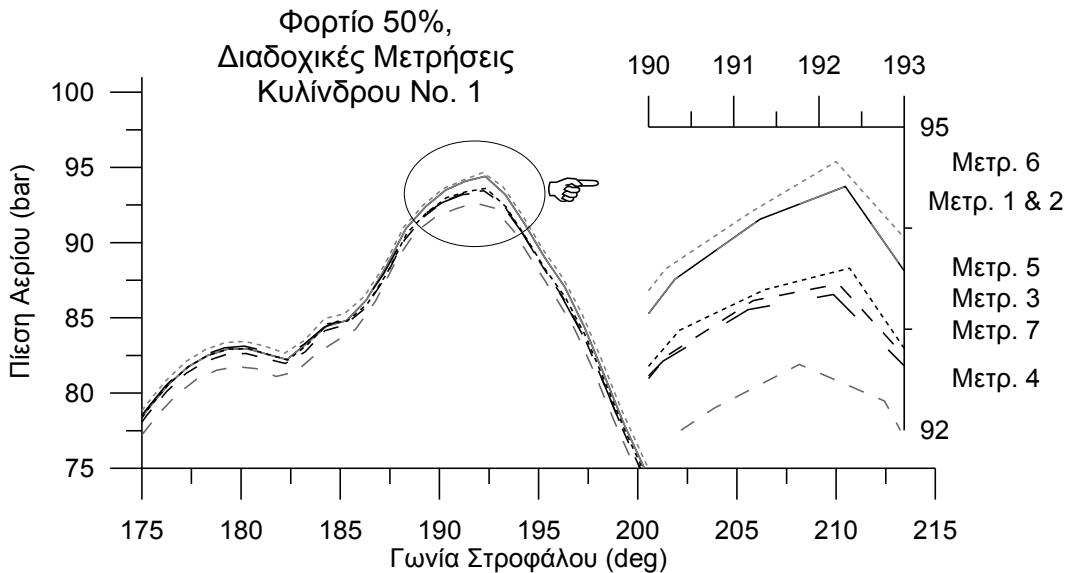
Εικόνα 7-3 (α – γ) Στιγμιότυπο από την πρώτη μέτρηση της σειράς, στην οποία αισθητήρας «Α» είναι τοποθετημένος στον κύλινδρο Νο. 1 (κύλινδρος μέτρησης αναφοράς)- εικόνα (γ), και ο αισθητήρας «Β» στον κύλινδρο Νο. 2 – εικόνα (β). (δ) Ο αισθητήρας «Γ» τοποθετημένος στο οχετό εισαγωγής, μέσω κρουνού.

7.5.2 Η επίδραση της διακύμανσης φορτίου στην πίεση των κυλίνδρων.

Στο Σχήμ. 7-7 απεικονίζονται τμήματα του μέσου κύκλου από τις διαδοχικές μετρήσεις των κυλίνδρων σε φορτίο 50%. Παρατηρείται μεγάλη διασπορά μεταξύ των τιμών πίεσης των κυλίνδρων. Σε πρώτη προσέγγιση, αυτό μπορεί να οφείλεται στην κατάσταση του κυλίνδρου (φθορές χιτωνίου ή εγχυτήρα, κτλ), στις ρυθμίσεις (χρονισμού έγχυσης, παροχής καυσίμου, κτλ) ή και στην διακύμανση της ισχύος στη διάρκεια της μέτρησης.



Σχήμ. 7-7 Διαγράμματα πίεσης όλων των κυλίνδρων από διαδοχικές μετρήσεις.

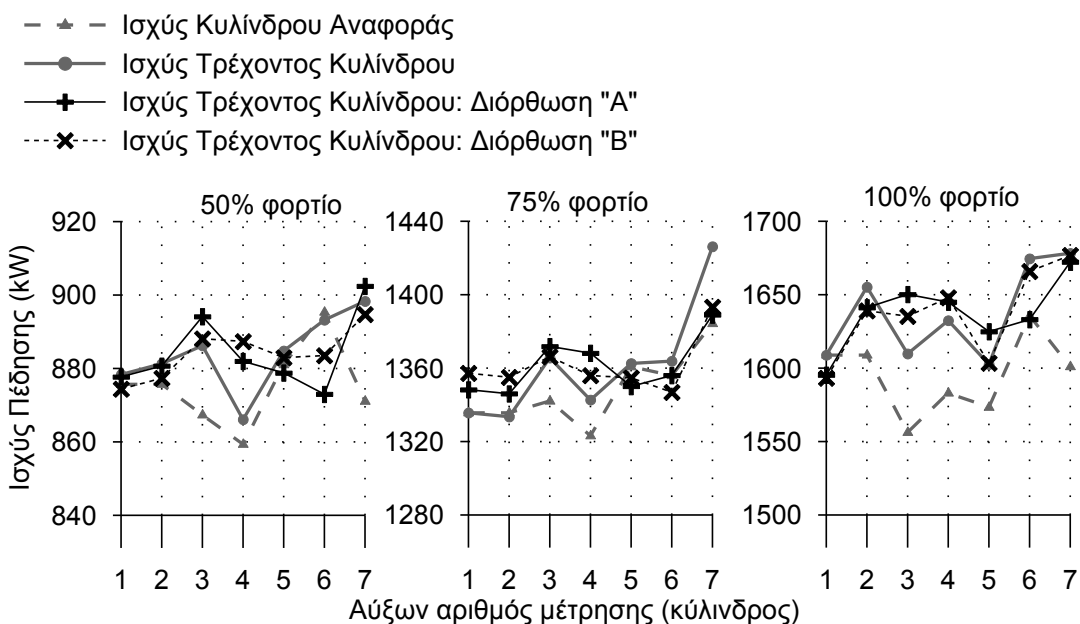


Σχήμ. 7-8 Διαγράμματα πίεσης του κυλίνδρου αναφοράς από διαδοχικές μετρήσεις.

Παρατηρώντας όμως το Σχήμ. 7-8 φαίνεται ότι και οι διαδοχικές μετρήσεις του ίδιου κυλίνδρου (του κυλίνδρου αναφοράς), ενώ θα αναμενόταν να ταυτίζονται, παρουσιάζουν διασπορά, μικρότερου εύρους από τις μετρήσεις στους διαφορετικούς κυλίνδρους αλλά όχι αμελητέα. Συνεπώς η διασπορά που παρατηρείται στις διαδοχικές μετρήσεις στους διαφορετικούς κυλίνδρους οφείλεται εν μέρει σε διαφορές κατάστασης και ρύθμισης αλλά οφείλεται επίσης και σε διακύμανση της ισχύος του κινητήρα από μέτρηση σε μέτρηση.

7.5.3 Η επίδραση της διακύμανσης φορτίου στην ισχύ των κυλίνδρων

Στο Σχήμ. 7-9 με την γκρι συνεχή γραμμή και τα κυκλικά σύμβολα απεικονίζεται η ισχύς των διαδοχικά μετρούμενων κυλίνδρων. Η διακύμανση που παρατηρείται στην τιμή της ισχύος θα μπορούσε να αποδοθεί σε μη ορθή ρύθμιση ή ακόμη και σε κάποια δυσλειτουργία. Όμως από τις τιμές της ισχύος του κυλίνδρου αναφοράς, διακεκομμένη γκρι γραμμή και τριγωνικά σύμβολα, παρατηρείται διακύμανση της ισχύος του που υποδηλώνει πιθανή διακύμανση ισχύος στη διάρκεια της μέτρησης. Συνεπώς η εικόνα για την ισχύ των διαδοχικά μετρούμενων κυλίνδρων δεν είναι ορθή καθώς η συνολική ισχύς του κινητήρα δεν ήταν σταθερή στη διάρκεια λήψης των μετρήσεων.



Σχήμ. 7-9 Αρχική, διορθωμένη με την μέθοδο "Α" και διορθωμένη με την μέθοδο "Β" ισχύς των διαδοχικά μετρημένων κυλίνδρων σε αντιπαραβολή με την ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς για τα τρία φορτία που εξετάζονται.

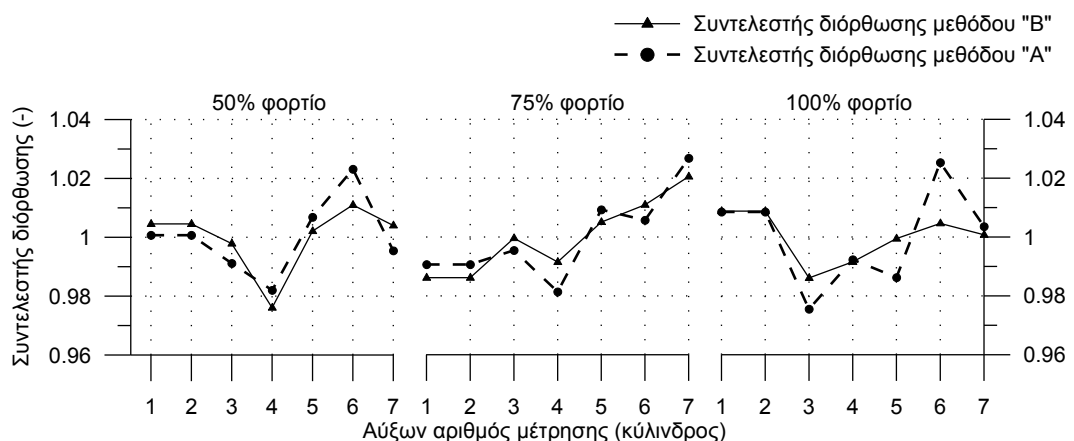
Οι δυο μαύρες γραμμές των τριών φορτίων αντιστοιχούν στην διορθωμένη ισχύ μετά την επιβολή των δυο προτεινόμενων μεθόδων διόρθωσης. Η ισχύς που προκύπτει από την μέθοδο που αξιοποιεί την μέτρηση του κυλίνδρου αναφοράς απεικονίζεται με την συνεχή γραμμή. Η ισχύς που προκύπτει από την μέθοδο κατά την οποία η διακύμανση του φορτίου ανιχνεύεται από την πίεση σάρωσης, απεικονίζεται με την διακεκομμένη γραμμή.

Παρατηρείται ότι η διορθωμένη ισχύς από τις δυο μεθόδους είναι παρόμοια και διαφοροποιείται σε ορισμένα σημεία αρκετά από την μη διορθωμένη ισχύ. Για παράδειγμα κατά την τέταρτη μέτρηση στο φορτίο 50%, παρατηρήθηκε πτώση του φορτίου του κινητήρα, όπως συμπεραίνεται από την ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς (που φαίνεται στο σχήμα) αλλά και από τις μετρήσεις της πίεσης σάρωσης. Συνεπώς, η ισχύς του κυλίνδρου Νο. 4, η οποία εκτιμάται από την μέτρηση ως χαμηλότερη από την μέση ισχύ των κυλίνδρων, δίνει την εντύπωση ότι ο κύλινδρος παράγει την μικρότερη ισχύ. Στη πραγματικότητα όμως, όπως φαίνεται μετά την επιβολή διόρθωσης, η παραγωγή ισχύος του κυλίνδρου είναι λίγο παραπάνω από τον μέσο όρο.

7.5.4 Αξιολόγηση των μεθόδων για την διόρθωση της εκτιμούμενης ισχύος κυλίνδρων

Όπως περιγράφεται στην μεθοδολογία διόρθωσης, από την ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς και την μέση τιμή της προκύπτει ένας συντελεστής αναγωγής της ισχύος στην μέση τιμή. Πολλαπλασιάζοντας την ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς της κάθε μέτρησης με τον αντίστοιχο συντελεστή, το αποτέλεσμα θα ήταν σταθερή ισχύς του κυλίνδρου αναφοράς για τις διαδοχικές μετρήσεις.

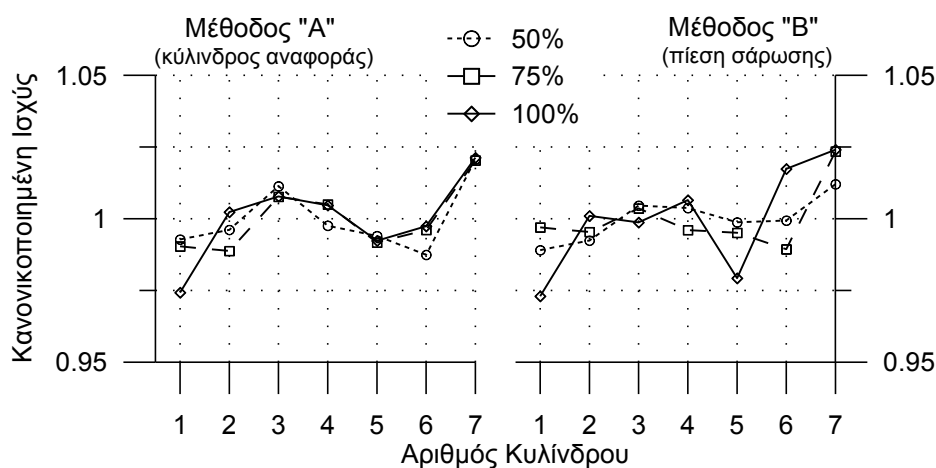
Στο Σχήμ. 7-10 με την διακεκομμένη και την συνεχή γραμμή φαίνεται ο συντελεστής διόρθωσης κάθε μέτρησης για τα τρία φορτία που εξετάστηκαν, υπολογισμένο με βάση την ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς και την διακύμανση της πίεσης σάρωσης, αντίστοιχα.



Σχήμ. 7-10 Συντελεστές διόρθωσης της ισχύος των κυλίνδρων από τις διαφορετικές μεθόδους διόρθωσης, "Α" με την χρήση αισθητήρα αναφοράς και "Β" μέσω της μέτρησης της πίεσης σάρωσης, για τα τρία φορτία που εξετάζονται.

Παρατηρείται ότι από τις δύο μεθόδους προκύπτει παρόμοια μεταβολή του συντελεστή διόρθωσης, γεγονός που δείχνει ότι κατ' αρχήν και οι δύο μέθοδοι διόρθωσης έχουν παρόμοιο αποτέλεσμα.

Στο Σχήμ. 7-11 φαίνεται η κανονικοποιημένη διορθωμένη ισχύς, δηλαδή η ισχύς ανά κύλινδρο διαιρεμένη ως προς τη μέση τιμή. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται το μοτίβο παραγωγής ισχύος από τους κυλίνδρους. Το μοτίβο αυτό πρέπει να παραμένει σχετικά σταθερό ανεξάρτητα του φορτίου, διότι απεικονίζει την ρύθμιση και την κατάσταση των κυλίνδρων. Εξαιρέσεις αποτελούν, για παράδειγμα, οι περιπτώσεις δυσλειτουργίας του συστήματος έγχυσης και του συστήματος μεταβολής της προπορείας έγχυσης. Το όμοιο μοτίβο παραγωγής ισχύος χρησιμοποιείται σαν κριτήριο «επιτυχούς» διόρθωσης.



Σχήμ. 7-11 Κανονικοποιημένη διορθωμένη ισχύς ανά κύλινδρο για τα τρία φορτία με την μέθοδο "Α" και "Β". Η κατανομή παραγωγής ισχύος στους κυλίνδρους πρέπει να είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από το φορτίο, γεγονός ορατό στα αποτελέσματα και από τις δυο μεθόδους διόρθωσης.

Το αριστερό γράφημα του σχήματος αναφέρεται στην διόρθωση της ισχύος με την μέθοδο που βασίζεται στην ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς. Παρατηρείται ότι το μοτίβο παραγωγής ισχύος πρακτικά ταυτίζεται για τα τρία φορτία. Στο αριστερό γράφημα, για το οποίο η ανίχνευση της διακύμανσης της ισχύος έγινε από την μέτρηση της πίεσης σάρωσης, παρατηρείται ότι παρόλο που γενικά τα τρία μοτίβα ταιριάζουν, σε κάποια σημεία διαφοροποιούνται το οποίο είναι φυσιολογικό καθώς πρόκειται για πραγματικές μετρήσεις. Παράδειγμα αποτελεί η ισχύς του κυλίνδρου 5 στο φορτίο 100%. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η διόρθωση που επιτυγχάνεται είναι ικανοποιητική.

7.6 Η επίδραση της εφαρμογής ρυθμίσεων βασισμένες σε λανθασμένες εκτιμήσεις λόγω διακύμανση του φορτίου. - Εφαρμογή σε τετράχρονο κινητήρα

7.6.1 Σκοπός και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η αξιολόγηση της επίδρασης της διακύμανσης φορτίου στην εκτίμηση της ισχύος και της κατανάλωσης καυσίμου. Επιπροσθέτως αξιολογήθηκε η επάρκεια των προτεινόμενων μεθόδων να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμα και όταν λάβει χώρα κάποια σημαντική διακύμανση φορτίου. Για την περαιτέρω κατανόηση της φύσης του σφάλματος που προκύπτει από την διακύμανσης της ισχύος στα αποτελέσματα της διάγνωσης καθώς και για την γενίκευση της μεθοδολογίας, διενεργήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση σε τετράχρονο, δωδεκακύλινδρο κινητήρα διάταξης V, με ονομαστική ισχύ 10.36 MW, εγκατεστημένο σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής Ελληνικού νησιού. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα φαίνονται στον Πίνακ. 7-3.

Πίνακ. 7-3 Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Κινητήρα 12V46

Μοντέλο Κινητήρα:	-	Wartsila 12V46
Τύπος:	-	4-X
Αριθμός Κυλίνδρων:	-	12
Ονομαστική Ταχύτητα Περιστροφής:	σαλ	500
Ονομ. Ισχύς Συνεχούς Λειτουργίας (NCR):	MW	10.36
Διάμετρος Εμβόλου:	mm	460
Διαδρομή Εμβόλου:	mm	580

Στην παρούσα διερεύνηση έμφαση δίνεται στις συνέπειες του σφάλματος που οφείλεται στην διακύμανση του φορτίου κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Οι συνέπειες αφορούν στην ρύθμιση του κινητήρα με βάση τα λανθασμένα αποτελέσματα ισχύος των κυλίνδρων χρησιμοποιώντας τις πρωτογενείς μετρήσεις πίεσης των κυλίνδρων.

Πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές μετρήσεων, στο 50% και 92% της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα. Σε κάθε φορτίο έγιναν 16 μετρήσεις, όπου ψηφιοποιούνταν ταυτόχρονα:

- ◆ η πίεση του κυλίνδρου αναφοράς (A1 για το block A και, B1 για το block B)
- ◆ διαδοχικά η πίεση των κυλίνδρων A2 έως A9 και B2 έως B9.

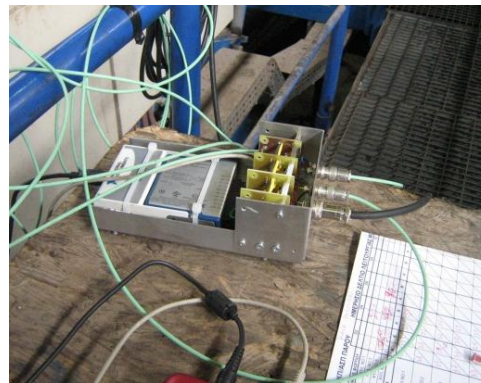
Έγινε μια επιπλέον (17^η) μέτρηση για την συσχέτιση των κυλίνδρων A1 και B1 που ανήκουν στις δυο σειρές των κυλίνδρων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται για τους κυλίνδρους A1 και B1 εξήχθησαν από την 17^η μέτρηση.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 7-4 (α) Οι κεφαλές των έξι κυλίνδρων της σειράς A του κινητήρα WARTSILA 12V46 (β) οι δύο αισθητήρες πίεσης κυλίνδρου τοποθετημένοι στους κρουνοί των κυλίνδρων A1 και A2, αφού αφαιρέθηκαν τα καπάκια, και (γ) η διάταξη λήψης μετρήσεων.

Κάθε μέτρηση διαρκούσε χρόνο αντίστοιχο με 50 περιστροφές και η δειγματοληψία ήταν ισοδύναμη με 0.5° γωνίας στροφάλου. Κατά την διάρκεια κάθε σειράς μετρήσεων καταγραφόταν από ηλεκτρονική ένδειξη στην αίθουσα ελέγχου η παραγόμενη από την γεννήτρια ισχύς.

Πίνακ. 7-4 Συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα κατά την διάρκεια των δυο συνόλων μετρήσεων

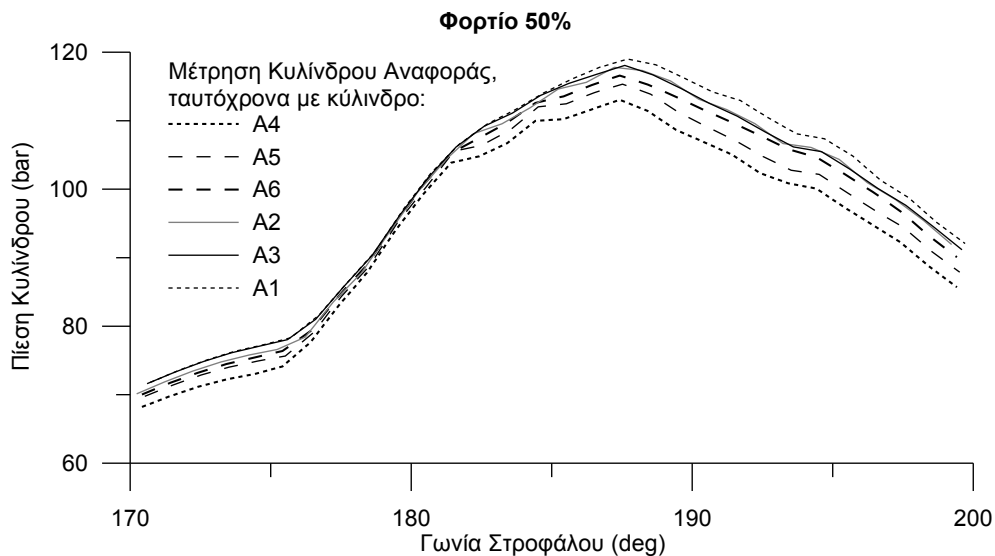
Σύνολο Μετρήσεων	Ταχύτητα Περιστροφής σαλ	Φορτίο %	Ισχύς Γεννήτριας kW	Ισχύς Κινητήρα kW
1	500	50	5180	5320
2	500	92	9324	9733

Στον Πίνακ. 7-4 συνοψίζονται οι συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα στην διάρκεια των δυο σειρών μετρήσεων. Η ισχύς του κινητήρα υπολογίστηκε από τον βαθμό απόδοσης της γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής του συγκεκριμένου κινητήρα είναι σταθερή καθώς πρόκειται για κινητήρα

ηλεκτροπαραγωγής, όπου η συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος πρέπει να είναι σταθερή. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, καταγράφονται επίσης περιφερειακά μεγέθη όπως η θέση κανόνα καυσίμου, η πίεση και θερμοκρασία του αέρα σάρωσης και άλλα δεδομένα που δεν αξιοποιούνται άμεσα στην παρούσα διερεύνηση.

7.6.2 Επίδραση της διακύμανσης φορτίου στην πίεση των κυλίνδρων- εντοπισμός του προβλήματος.

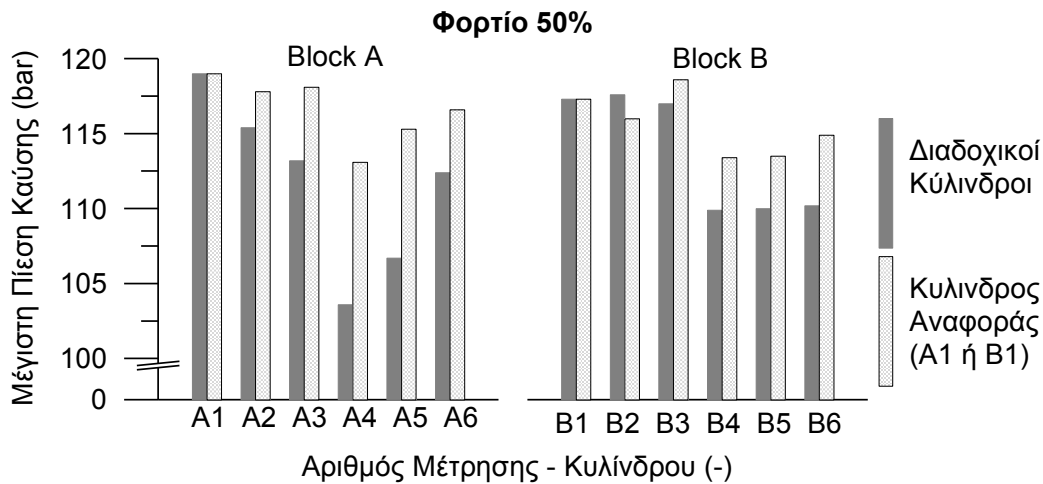
Στο Σχήμ. 7-12 φαίνονται οι διαδοχικές μετρήσεις του κυλίνδρου αναφοράς A1. Παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των μετρήσεων οι οποίες είναι πιο έντονες στα τελευταία στάδια της συμπίεσης και στα αρχικά στάδια της καύσης. Λόγω της μετατόπισης της καμπύλης συμπίεσης που υποδηλώνει μεταβολή της πίεσης σάρωσης συνάγεται ότι η διακύμανση στην μέτρηση της πίεσης του κυλίνδρου αναφοράς οφείλεται στην διακύμανση του φορτίου κατά τις διαδοχικές μετρήσεις.



Σχήμ. 7-12 Μεταβολή της πίεσης του κυλίνδρου αναφοράς A1, σε διαδοχικές μετρήσεις

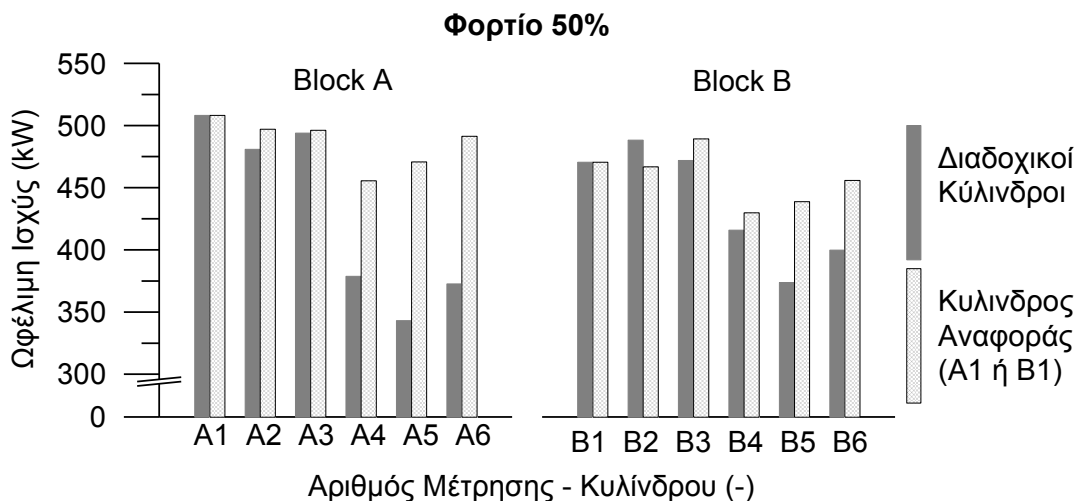
Στο Σχήμ. 7-13 απεικονίζεται η μέγιστη πίεσης καύσης (μέσου κύκλου) του κυλίνδρου που μετράται και του κυλίνδρου αναφοράς σε φορτίο 50%. Στις μπάρες με το γκρι χρώμα όπου φαίνεται η μέγιστη πίεση καύσης των κυλίνδρων που εναλλάσσονται, παρατηρείται μεγάλη διασπορά. Σε πρώτη προσέγγιση, αυτό μπορεί να οφείλεται στην κατάσταση του κυλίνδρου (φθορές χιτωνίου ή εγχυτήρα, κτλ), σε κακή ρύθμιση (χρονισμού έγχυσης, παροχής καυσίμου, κτλ) ή και σε διακύμανση του φορτίου. Όμως διασπορά παρατηρείται και στις μπάρες με λευκό φόντο που αντιστοιχούν σε διαδοχικές μετρήσεις του κυλίνδρου αναφοράς (A1 για τις μετρήσεις 1-6 και B1 για τις μετρήσεις 7-12). Θα αναμενόταν η μέγιστη πίεση από διαδοχικές μετρήσεις του ίδιου κυλίνδρου να

έχουν περίπου την ίδια τιμή με μικρή μόνο διακύμανση εφόσον αυτός και το σύστημα έγχυσης καυσίμου του ευρίσκονται σε καλή κατάσταση. Η διασπορά υποδηλώνει την ύπαρξη διακύμανσης φορτίου από μέτρηση σε μέτρηση.



Σχήμ. 7-13 Μέγιστη πίεση καύσης των κυλίνδρων που μετρώνται διαδοχικά σε αντιπαραβολή με την μέγιστη πίεση καύσης του κυλίνδρου αναφοράς που μετρήθηκε ταυτόχρονα.

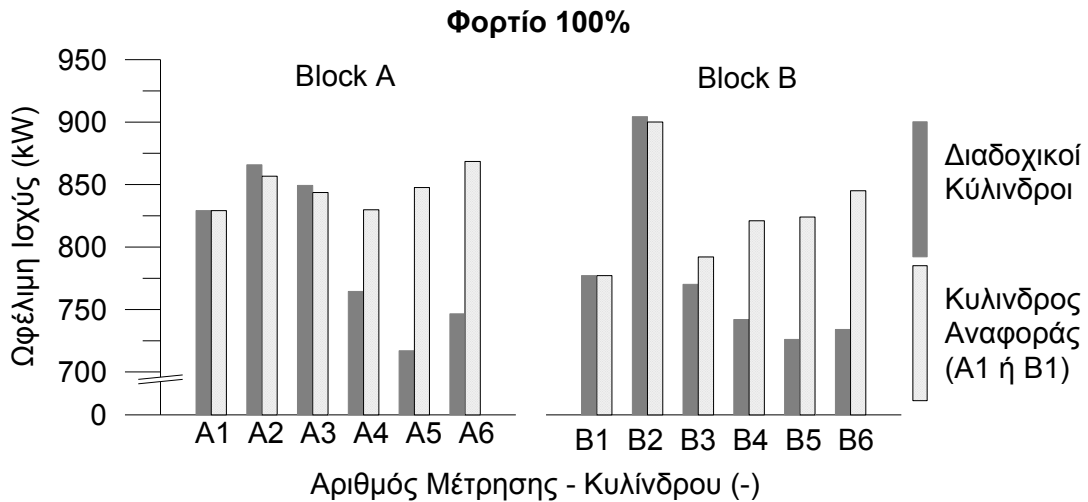
7.6.3 Η επίδραση της διακύμανσης του φορτίου στην εκτίμηση της ισχύος των κυλίνδρων.



Σχήμ. 7-14 Ισχύς κυλίνδρου αναφοράς και διαδοχικά μετρούμενων κυλίνδρων στο 50% του πλήρους φορτίου

Στα Σχήμ. 7-14 και Σχήμ. 7-15, για τα φορτία 50% και 100%, αντίστοιχα, με γκρι μπάρες φαίνεται η ισχύς των κυλίνδρων A1 έως A6 και B1 έως B6. Με τις διαγραμμισμένες μπάρες φαίνεται η ισχύς του κυλίνδρου αναφοράς (A1 ή B1) μετρούμενου ταυτόχρονα με τους διαδοχικούς κυλίνδρους. Όπως παρατηρήθηκε

και για την μέγιστη πίεση καύσης αλλά τώρα με άμεσο τρόπο η ύπαρξη σημαντικής διακύμανσης στην ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς υποδηλώνει ότι η διακύμανση της ισχύος των κυλίνδρων οφείλεται εν μέρει στην κατάσταση και την ρύθμιση του κάθε κυλίνδρου αλλά και στην διακύμανση του φορτίου στη διάρκεια της μέτρησης.



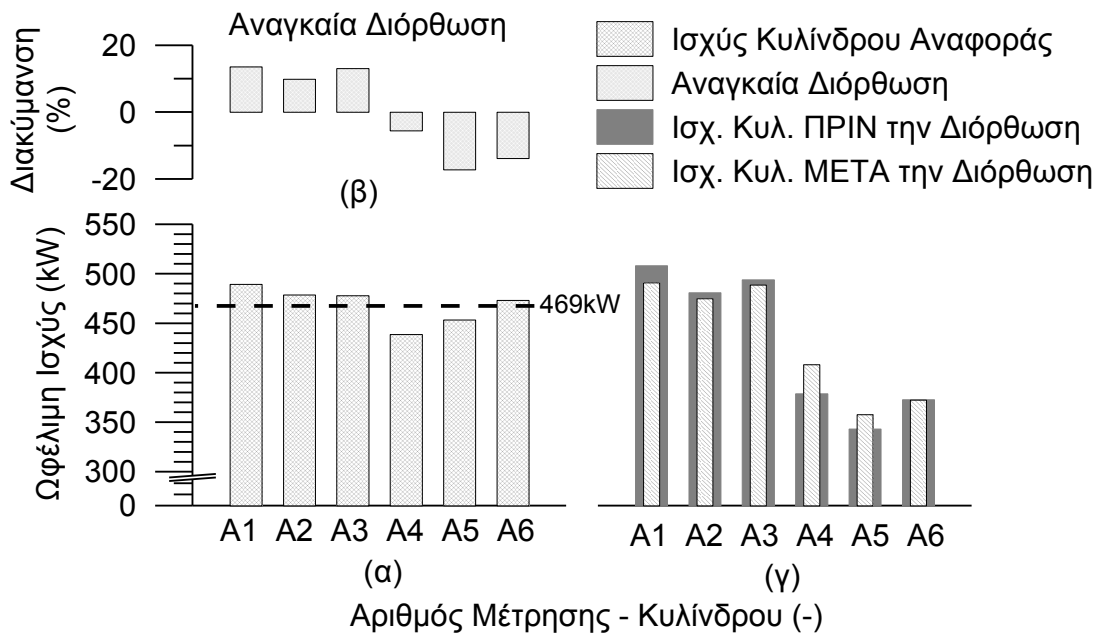
Σχήμ. 7-15 Ισχύς κυλίνδρου αναφοράς και διαδοχικά μετρούμενων κυλίνδρων στο 100% του πλήρους φορτίου.

7.6.4 Εφαρμογή διόρθωση της ισχύος.

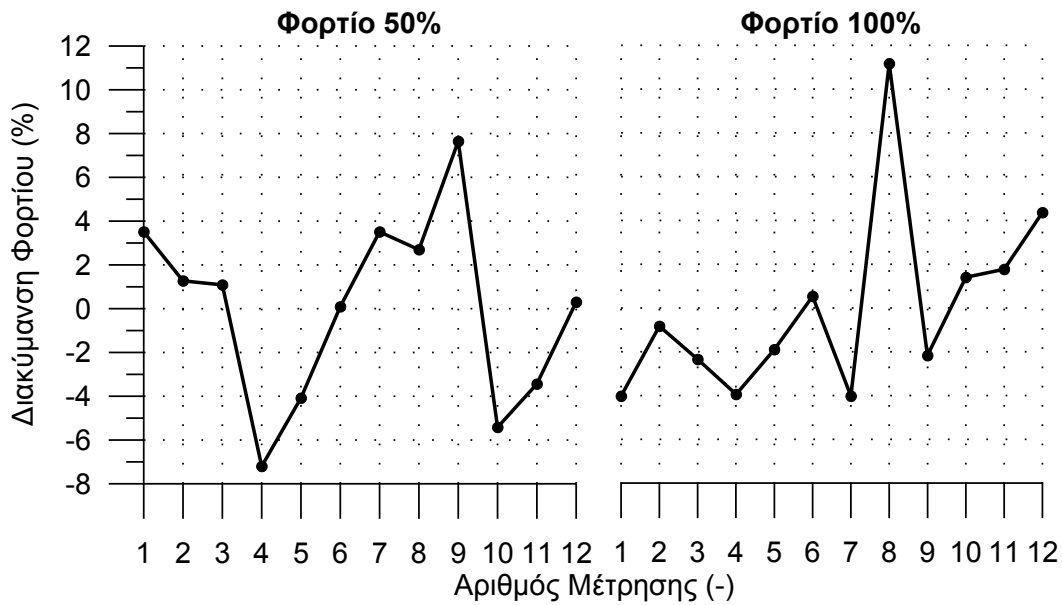
Εφαρμόζοντας την μεθοδολογία διόρθωσης που περιγράφεται στην παράγραφο 7.1, διορθώνονται οι τιμές της ισχύος του κάθε κυλίνδρου. Στο Σχήμ. 7-16, οι μπάρες του τμήματος (α) αντιστοιχούν στην ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς κατά τις διαδοχικές μετρήσεις. Στο τμήμα (β) απεικονίζεται η αναγκαία διόρθωση ώστε αυτή μετά την διόρθωση ισχύος να γίνει ίση με την μέση ισχύ ~ 486kW. Επιβάλλοντας αυτήν την διόρθωση στην υπολογισμένη ισχύ του κάθε κυλίνδρου (γκρι μπάρες στο τμήμα (γ)), προκύπτει η ισχύς που αντιστοιχεί σε κάθε κύλινδρο (διαγραμμισμένες μπάρες) αν το φορτίο του κυλίνδρου A1 ήταν σταθερό και ίσο με ~486kW.

Από την ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς υπολογίζεται η διακύμανση της συνολικής ισχύος του κινητήρα, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμ. 7-17. Παρατηρείται διακύμανση έως και 9% στη διάρκεια των μετρήσεων. Αυτή η διακύμανση θα απαλειφτεί από την ισχύ των κυλίνδρων, ώστε να προκύψει νέα εικόνα κατανομής ισχύος σε κυλίνδρους του κινητήρα που να ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα.

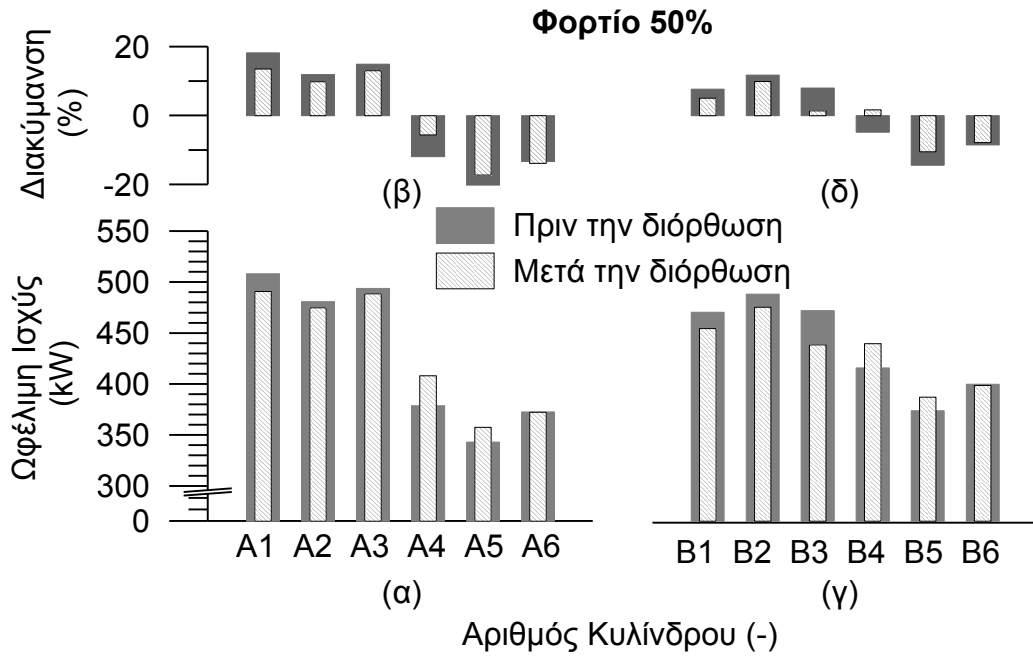
Φορτίο 50% - Block A



Σχήμ. 7-16 Εφαρμογή μεθοδολογίας διόρθωσης της ισχύος.

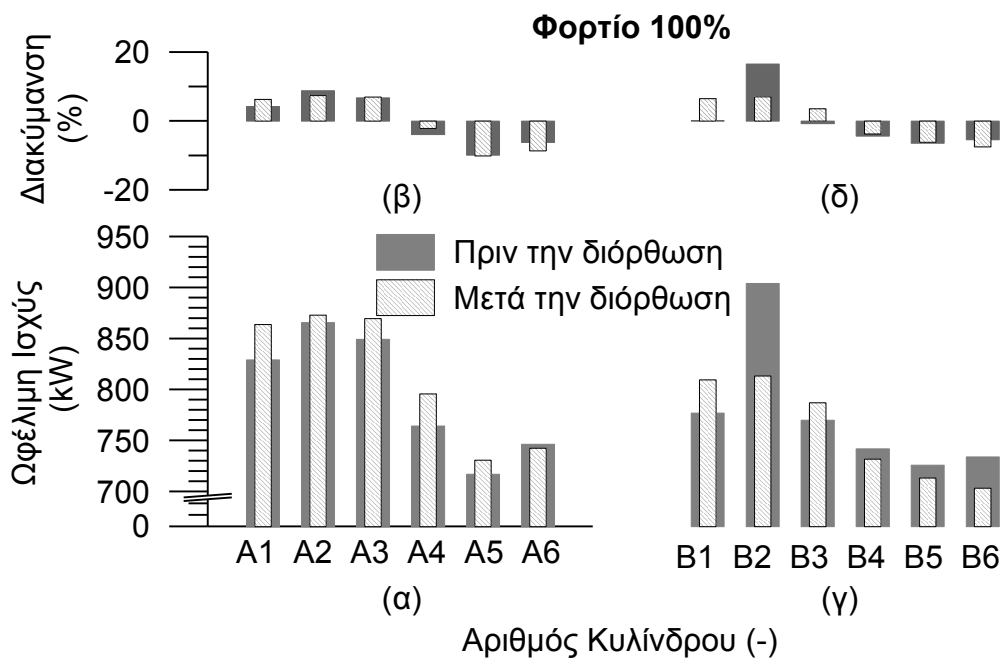


Σχήμ. 7-17 Διακύμανση φορτίου του κινητήρα στην διάρκεια μέτρησης των κυλίνδρων, όπως εκτιμήθηκε από την ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς.

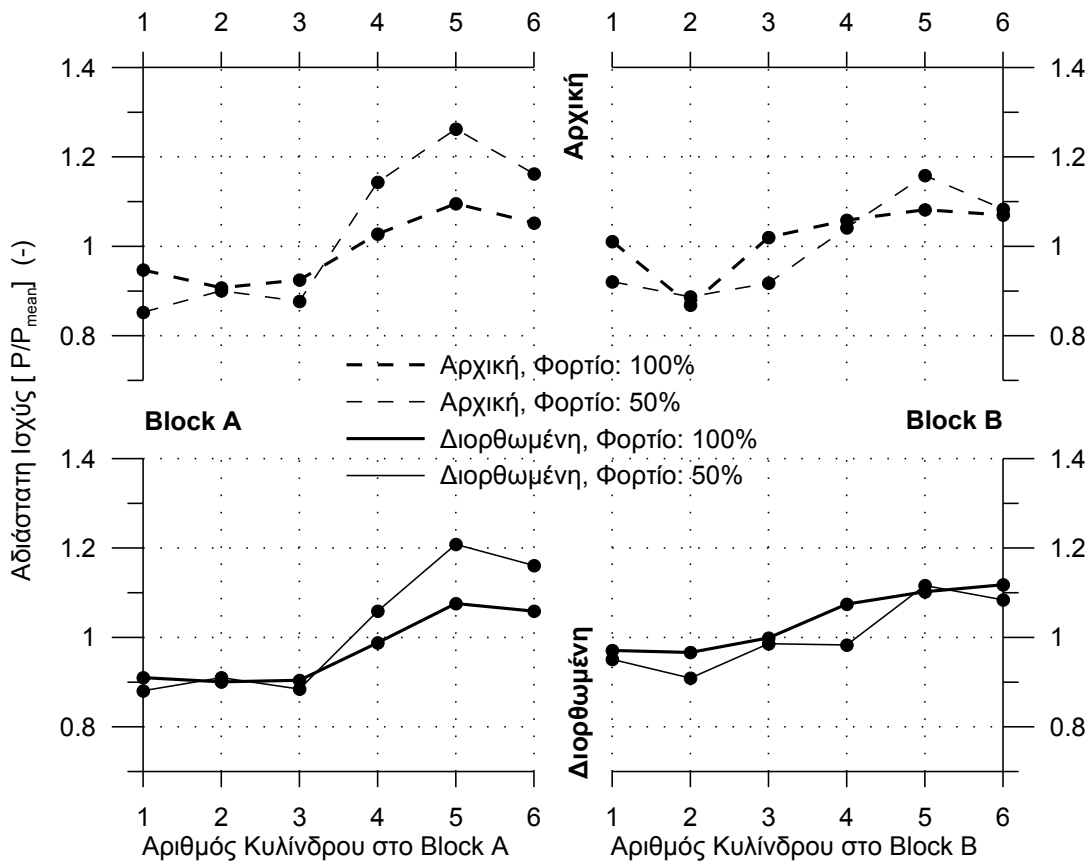


Σχήμ. 7-18 Η ισχύς των κυλίνδρων των δυο σειρών πριν και μετά την διόρθωση για τα δυο μπλοκ (α,γ) και οι αντίστοιχες αποκλίσεις από τον μέσο όρο (β,δ) για φορτίο 50%

Στο Σχήμ. 7-18 και Σχήμ. 7-19 φαίνεται η ισχύς των κυλίνδρων πριν και μετά την διόρθωση. Επίσης φαίνεται και η αντίστοιχη διακύμανση.



Σχήμ. 7-19 Η ισχύς των κυλίνδρων των δυο σειρών πριν και μετά την διόρθωση (α,γ) και οι αντίστοιχες αποκλίσεις από τον μέσο όρο (β,δ) για φορτίο 100%



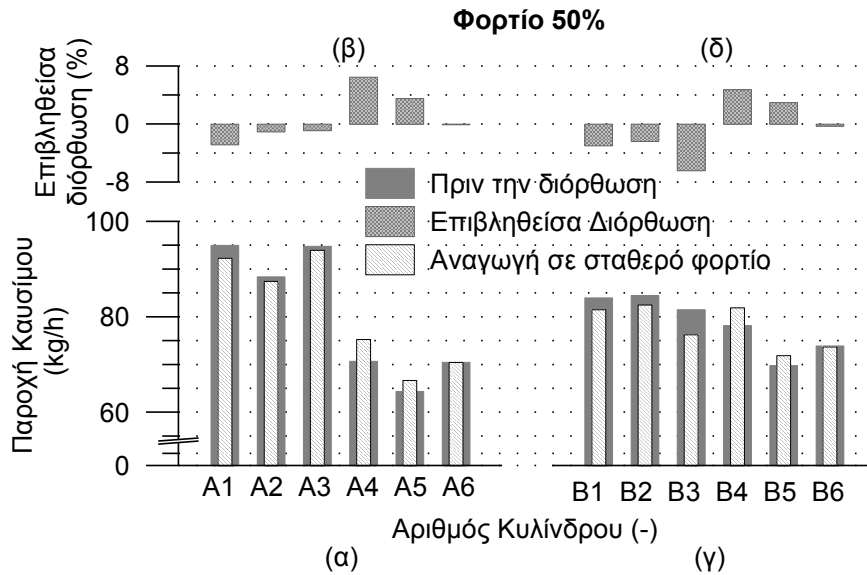
Σχήμ. 7-20 Κανονικοποιημένη ισχύς των κυλίνδρων στα δυο φορτία πριν και μετά την διόρθωση.

Η σύγκριση της αδιάστατης ισχύος σε διαφορετικά φορτία χρησιμοποιείται ως ένδειξη ύπαρξης διακύμανσης αλλά και ως κριτήριο επιτυχούς διόρθωσης, διότι η κατανομή παραγωγής ισχύος στους κυλίνδρους σε γενικές γραμμές είναι ανεξάρτητη του φορτίου. Στο Σχήμ. 7-20 φαίνεται το μοτίβο κατανομής παραγωγής ισχύος. Στο κάτω τμήμα του σχήματος αντιπαραβάλλονται κανονικοποιημένες τιμές από τα δυο φορτία χρησιμοποιώντας την διορθωμένη ισχύ, ενώ στο πάνω τμήμα η ίδια αντιπαραβολή γίνεται για τις μη διορθωμένες τιμές. Παρατηρείται σαφώς καλύτερη σύγκλιση των τιμών αδιάστατης ισχύος στην περίπτωση που έχει εφαρμοστεί η διόρθωση (κάτω τμήμα του σχήματος) απ' ότι στην περίπτωση που δεν έχει εφαρμοστεί διόρθωση (πάνω τμήμα του σχήματος).

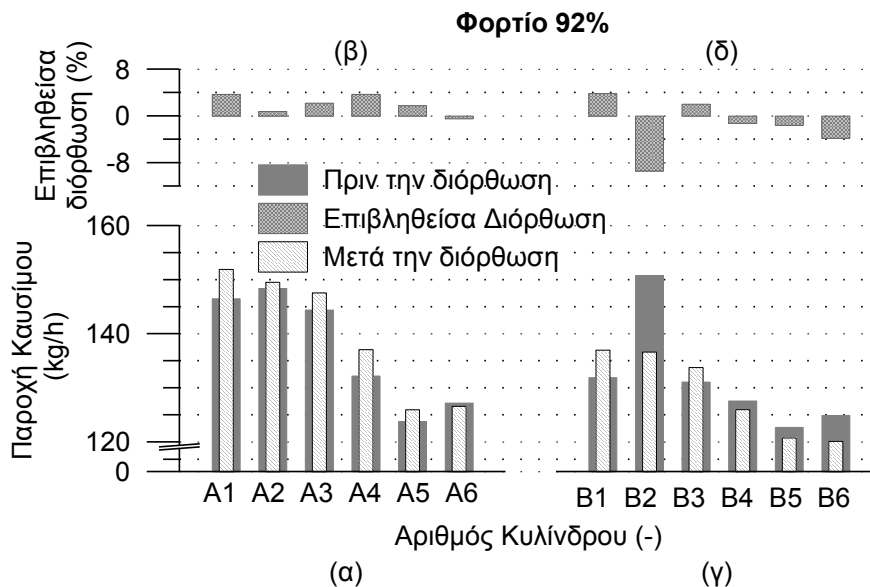
7.6.5 Εφαρμογή Διόρθωσης στην κατανάλωση καυσίμου

Η κατανάλωση καυσίμου εκτιμάται από τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας, η εκτίμηση του οποίου επηρεάζεται από το φορτίου του κινητήρα. Επομένως είναι αναμενόμενο η διακύμανση της συνολικής ισχύος του κινητήρα στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων να επηρεάσει και την κατανομή καυσίμου στους κυλίνδρους. Στο Σχήμ. 7-21 και Σχήμ. 7-22 φαίνεται η παροχή καυσίμου

πριν και μετά την επιβολή της διόρθωσης καθώς και η διόρθωση που επιβλήθηκε, για τα δύο φορτία που εξετάζονται.



Σχήμ. 7-21 Κατανάλωση καυσίμου των κυλίνδρων των δυο σειρών πριν και μετά την διόρθωση (α,γ) και η αντίστοιχη ποσοστιαία διόρθωση (β,δ) για φορτίο 50%



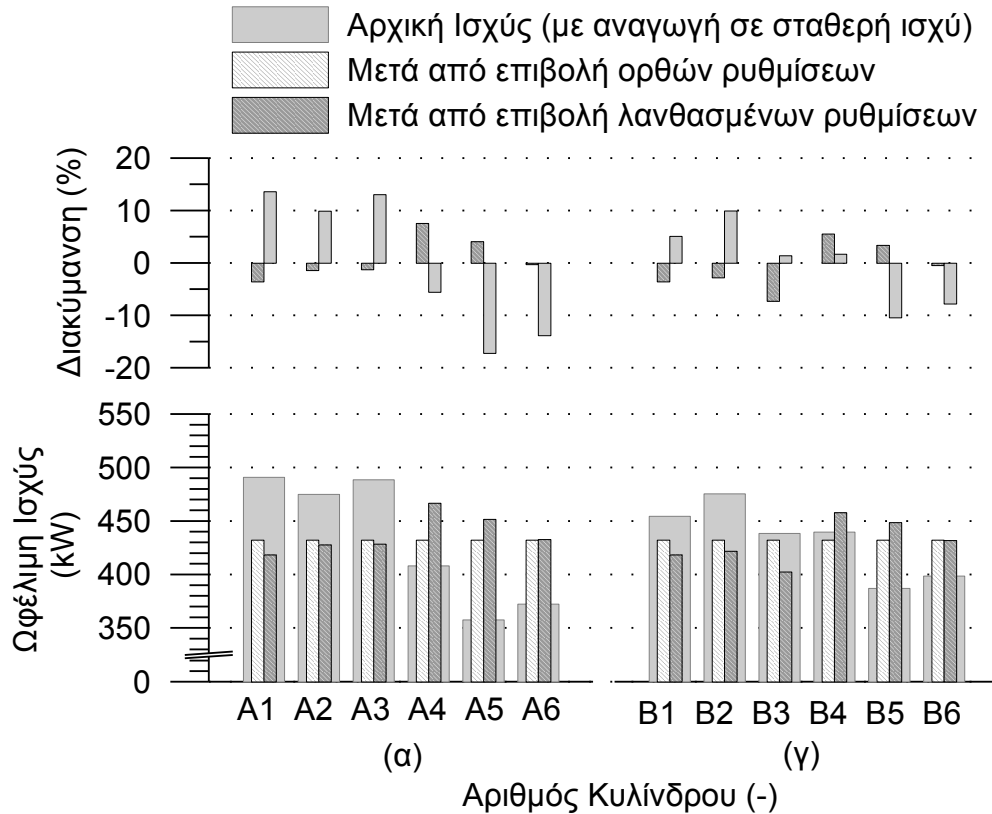
Σχήμ. 7-22 Κατανάλωση καυσίμου των κυλίνδρων των δυο σειρών κυλίνδρων πριν και μετά την διόρθωση (α,γ) και η αντίστοιχη ποσοστιαία διόρθωση (β,δ) για φορτίο 100%

7.6.6 Ρύθμιση του κινητήρα για την εξομάλυνση της ισχύος των κυλίνδρων στη περίπτωση διακύμανσης φορτίου στη διάρκεια της μέτρησης.

Βασικό ζητούμενο από την διαγνωστική τεχνική είναι η πρόταση για επιβολή ρυθμίσεων με σκοπό την εξομάλυνση της λειτουργίας του κινητήρα.

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται το αποτέλεσμα της επιβολής ρυθμίσεων όταν υιοθετηθεί η λανθασμένη πληροφορία που προκύπτει από μετρήσεις κατά τις οποίες λαμβάνει χώρα διακύμανση φορτίου.

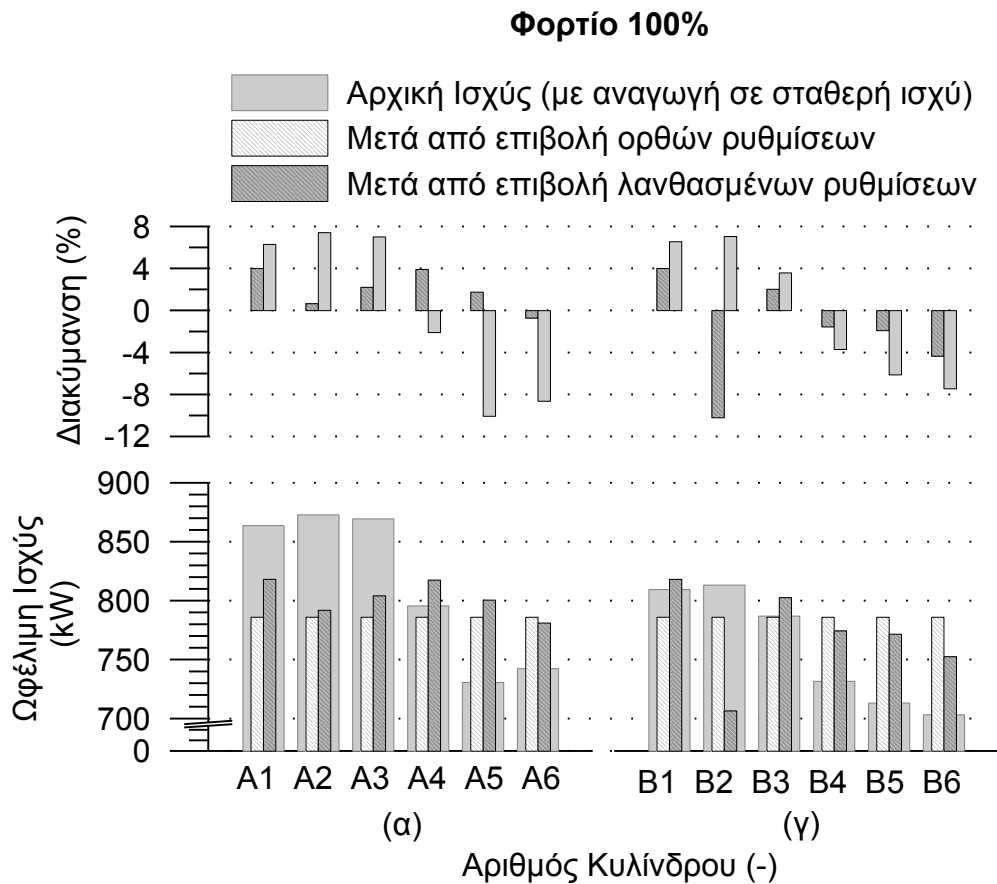
Φορτίο 50%



Σχήμ. 7-23 Ισχύς των κυλίνδρων, αρχική και μετά την επιβολή ρύθμισης με και χωρίς διόρθωση λόγω διακύμανσης φορτίου στο 50% του φορτίου.

Η ρύθμιση του κινητήρα στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται μέσω της ρύθμισης του εγχυόμενου καυσίμου ανά κύλινδρο ώστε να επιτευχθεί ίση παραγωγή ισχύος από κάθε κύλινδρο. Στο Σχήμ. 7-23 και στο Σχήμ. 7-24, που αφορούν το φορτίο 50% και 100% αντίστοιχα, με την γκρι μπάρα φαίνεται η αρχική ισχύς των κυλίνδρων, διορθωμένη από την διακύμανση φορτίου δηλαδή με αναφορά σε σταθερή ισχύ του κυλίνδρου αναφοράς. Με τις διαγραμμισμένες μπάρες φαίνεται η ισχύς των κυλίνδρων μετά την ρύθμιση. Οι διαγραμμισμένες μπάρες με λευκό φόντο είναι η ισχύς των κυλίνδρων μετά την επιβολή των ορθών ρυθμίσεων. Είναι φανερό ότι η διακύμανση της ισχύος των κυλίνδρων μετά την ορθή ρύθμιση έχει εξομαλυνθεί. Οι διαγραμμισμένες μπάρες με γκρι φόντο δείχνουν την αναμενόμενη εικόνα του κινητήρα εάν είχαν εφαρμοσθεί οι ρυθμίσεις που προκύπτουν από την κλασική μεθοδολογία χωρίς δηλαδή διόρθωση για την διακύμανση φορτίου. Παρατηρείται ότι η επιβολή των ρυθμίσεων αλλοιώνει προς το χειρότερο την λειτουργική εικόνα του κινητήρα

προκαλώντας ακόμη μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις ισχύος μεταξύ των κυλίνδρων.



Σχήμ. 7-24 Ισχύς των κυλίνδρων, αρχική και μετά την επιβολή ρύθμισης με και χωρίς διόρθωση λόγω διακύμανσης φορτίου στο 100% του φορτίου.

7.7 Ορολογία και Συμβολισμοί

Λατινικά Σύμβολα

P	Πίεση (bar)
SP	Πίεση σάρωσης
f	Συνάρτηση
m	Μάζα (kg)

Ελληνικά Σύμβολα

α	Συντελεστής γραμμικής εξίσωσης
β	Συντελεστής γραμμικής εξίσωσης

Δείκτες

mean	Μέση τιμή
ref	Αναφοράς
cor	Διορθωμένη
i	Αυξων αριθμός μέτρησης ή κυλίνδρου
f	Καύσιμο

7.8 Αναφορές

- [7.1] Rakopoulos C.D., Giakoumis E.G., Diesel Engine Transient Operation, Springer-Verlag, London, 2009
- [7.2] J.M. Luján, J. Galindo, J.R. Serrano, A methodology to identify the intake charge cylinder-to-cylinder distribution in turbocharged direct injection diesel engines, Meas. Sci. Technol. 19 (2008) 065401.
- [7.3] Al-Hinti I, Samhoury M, Al-Ghandoor A, Sakhrieh A. The effect of boost pressure on the performance characteristics of a diesel engine: a neuro-fuzzy approach. Appl Energy 2009;86:113–21.
- [7.4] Lamaris VT, Hountalas DT. Possibility to determine diesel engine condition and tuning from the application of a diagnostic technique at a single operating point. SAE paper no. 2009-01-0681; 2009
- [7.5] Hountalas, D., Antonopoulos, A., Zovanos, G., and Papagiannakis, R., Evaluation of a New Diagnostic Technique to Detect and Account for Load Variation during Cylinder Pressure Measurement of Large-Scale Four-Stroke Diesel Engines, SAE Technical Paper 2012-01-1342, 2012
- [7.6] Hountalas DT et al. Comparative evaluation of various methodologies to account for the effect of load variation during cylinder pressure measurement of large scale two-stroke diesel engines. Appl Energy (2013)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ.

Το διαγνωστικό λογισμικό σε προγενέστερη μορφή έχει επαληθευτεί από εκτενείς εργαστηριακές μελέτες [8.1, 8.2]. Επιπλέον, από διερευνήσεις που έχουν εκτελεσθεί σε κινητήρες που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες υπάρχουν σαφείς ενδείξεις για την αξιοπιστία του [8.3]. Όμως δεν έχει γίνει εκτενής εξειδικευμένη διερεύνηση με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας στην εκτίμηση βασικών μεγεθών όπως η κατανάλωση και η ισχύς στο πεδίο δοκιμών. Παρόμοιες δοκιμές δεν έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία και για άλλα συστήματα ανάλυσης της λειτουργίας. Η κύρια αιτία για αυτό είναι η μεγάλη δυσκολία εκτέλεσης μετρήσεων ακριβείας ιδίως σε ναυτικούς κινητήρες εν πλω.

Στις εγκαταστάσεις των ναυτικών κινητήρων πολύ συχνά δεν διατίθενται διατάξεις για μετρήσεις της ισχύος. Όμως, ακόμα και όταν υπάρχουν, η ακρίβειά τους δεν είναι αρκετή ώστε να τις καθιστά ικανές για αναφορά. Επίσης, το δίκτυο διανομής του καυσίμου στις ναυτικές εγκαταστάσεις είναι αρκετά πολύπλοκο λόγω περιορισμού χώρου και αναγκών τροφοδότησης επιπλέον κινητήρων και άλλων μηχανών (βοηθητικές ηλεκτρογεννήτριες και καυστήρες) με αποτέλεσμα να μην ενδείκνυται για μετρήσεις αναφοράς. Σημαντικός παράγοντας ανασφάλειας των μετρήσεων σε ναυτικό κινητήρα εν πλω είναι η περίπτωση διακύμανσης του φορτίου κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου απαιτείται η καταγραφή της για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα της τάξης συνήθως των 30 λεπτών της ώρας. Αν όμως υπάρχει διακύμανση της ισχύος σε αυτό το διάστημα η ειδική κατανάλωση καυσίμου προ προκύπτει δεν αναφέρεται στην χρονική στιγμή της μέτρησης αλλά αποτελεί ένα μέσο όρο και δεν μπορεί να αποτελέσει βάση σύγκρισης. Στους ναυτικούς κινητήρες και σε μετρήσεις εν πλω, δεν μπορεί να διασφαλιστεί απόλυτα η σταθερότητα της ισχύος οπότε στη περίπτωση αυτή απαιτείται συνεχής καταγραφή της ισχύος και των ενδείξεων κατανάλωσης καυσίμου από τα εγκατεστημένα ροόμετρα.

Οι κύριες απαιτήσεις για την διενέργεια αξιόπιστης διερεύνησης αξιολόγησης του διαγνωστικού συστήματος είναι:

- ◆ Δυνατότητα ακριβούς καταγραφής της ισχύος
- ◆ Δυνατότητα ακριβούς καταγραφής της κατανάλωσης καυσίμου
- ◆ Δυνατότητα σταθεροποίησης του φορτίου του κινητήρα κατά την διάρκεια των μετρήσεων

Διάφορες δοκιμές αξιολόγησης του διαγνωστικού λογισμικού πραγματοποιήθηκαν σε πλήθος κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής και σε εφαρμογές πρόωσης πλοίων. Στο παρόν κεφάλαιο

παρουσιάζονται δυο περιπτώσεις στις οποίες είναι εξασφαλισμένες οι παραπάνω κύριες απαιτήσεις.

Αρχικά παρουσιάζεται πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής σε Ελληνικό νησί, στα πλαίσια της διαδικασίας για την έκδοση πιστοποιητικού που αφορά στην ακρίβεια εκτίμησης της ισχύος και της κατανάλωσης καυσίμου με την προτεινόμενη διαγνωστική τεχνική, παρουσία εκπροσώπου του οίκου πιστοποίησης GL (Germanischer Lloyd). Για την πραγματοποίηση της διερεύνησης έγινε κατάλληλη προετοιμασία (πχ βαθμονόμηση ροόμετρων καυσίμου). Ελήφθησαν μετρήσεις σε τέσσερα φορτία και επιπλέον δυο μετρήσεις με διαφορετική ρύθμιση προπορείας.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται μετρήσεις που ελήφθησαν στις δοκιμές παραλαβής κινητήρα, πριν εγκατασταθεί σε νεότευκτο εμπορικό πλοίο και σύγκριση με τις επίσημες μετρήσεις. Οι δοκιμές παραλαβής του κινητήρα γίνονται σε πέδη και έχουν επίσημο χαρακτήρα. Οι μετρήσεις είναι ιδιαίτερα αξιόπιστες επειδή αφορούν στην πιστοποίηση του κινητήρα και στον έλεγχο εκπλήρωσης των συμβατικών υποχρεώσεων του κατασκευαστή.

Τέλος, παρουσιάζεται εφαρμογή της διαγνωστικής τεχνικής για την μείωση της κατανάλωσης σε εμπορικό πλοίο μέσω της ρύθμισης της προπορείας.

8.1 Αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθόδου σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής

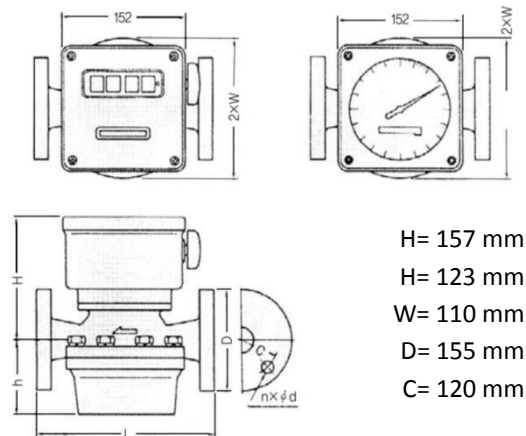
8.1.1 Συνοπτική περιγραφή του κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής 9K60MC-S

Όπως αναφέρθηκε μέρος της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής. Ο κινητήρας ήταν ο 9K60MC-S, εγκαταστημένος το 2005 σε σταθμό ηλεκτροπαραγωγής ελληνικού νησιού, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 78.5 MW. Πρόκειται για κινητήρα Diesel, άμεσης έγχυσης με εννέα κυλίνδρους σε σειρά και με μέγιστη ισχύ συνεχούς λειτουργίας 14840 kW. Διαθέτει σύστημα μεταβλητού χρονισμού έγχυσης, έναν υπερπληρωτή και ένα ψυγείο αέρα. Ο κινητήρας είναι συζευγμένος με γεννήτρια και συνεπώς περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, ίση με 143 σ.α.λ.

8.1.2 Διαδικασία μέτρησης της πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου

Για την μέτρηση της κατανάλωσης καυσίμου χρησιμοποιήθηκε το ροόμετρο περιστρεφόμενου εμβόλου "RS A0 050 A0" της εταιρίας Nitto Seiko (Σχήμ. 8-1 και Εικόνα 8-2). Η εγκατάστασή του έγινε το 2005 ενώ πραγματοποιήθηκε εκ νέου βαθμονόμηση σε μετρολογικό εργαστήριο

διακρίβωσης 13 ημέρες πριν την διεξαγωγή των μετρήσεων. Το όργανο φέρει περιστρεφόμενο δείκτη με ανάλυση κλίμακας «1» lt. Μια πλήρης περιστροφή του δείκτη αντιστοιχεί σε 10 lt. Σε κάθε πλήρη περιστροφή μια 6-ψηφια ένδειξη αυξάνεται κατά μια μονάδα, εκφράζοντας την σωρευτική παροχή σε $lt \cdot 10^{-1}$. Ακριβώς στην έξοδο του ροόμετρου είναι εγκατεστημένο θερμομέτρο (Εικόνα 8-2) για την εκτίμηση της πυκνότητας του καυσίμου και την μετατροπή της παροχής σε kg/h.



Σχήμ. 8-1 Σχέδιο με τις βασικές διαστάσεις του ροόμετρου καυσίμου



Εικόνα 8-1. Απεικόνιση του εγκατεστημένου ροόμετρου και οι ενδείξεις πίεσης και θερμοκρασίας.

Για την μέτρηση της κατανάλωσης καυσίμου καταγράφηκε η τιμή του ροομέτρου (σωρευτική ογκομετρικής παροχής) αρχικά μετά την σταθεροποίηση του κινητήρα στο εκάστοτε φορτίο και τουλάχιστον 20 λεπτά της ώρας αργότερα,

ενώ ο κινητήρας παρέμενε σε σταθερό φορτίο. Εντός του διαστήματος των είκοσι λεπτών πραγματοποιούνταν η μέτρηση της πίεσης κυλίνδρων. Από την αφαίρεση της αρχικής από την τελική τιμή σωρευτικής ογκομετρικής παροχής του καυσίμου και την διαίρεση με το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, προέκυψε η συνολική ογκομετρική παροχή καυσίμου. Σε κάθε μέτρηση κατανάλωσης καταγραφόταν και η θερμοκρασία καυσίμου όπως έχει ήδη αναφερθεί για τον προσδιορισμό της πυκνότητάς του.



Εικόνα 8-2 Ροόμετρο καυσίμου και ενδείξεις πίεσης και θερμοκρασίας καυσίμου.



Εικόνα 8-3 Δεξαμενή επιστροφών του καυσίμου.

Στην Εικόνα 8-3 φαίνεται η δεξαμενή επιστροφών, με εσωτερικές διαστάσεις $1 \cdot 1 \cdot 1 \text{m}^3$. Κοντά στην αρχή και το τέλος του παραπάνω χρονικού διαστήματος (μέτρησης της συνολικής παροχής) μετριούνταν η στάθμη του καυσίμου εντός της δεξαμενής επιστροφών. Διαιρώντας την μεταβολή της στάθμη επί την επιφάνεια που ήταν 1m^2 με το χρονικό διάστημα μεταξύ των μετρήσεων προκύπτει η παροχή των επιστροφών.

Αφαιρώντας τη παροχή των επιστροφών από την συνολική προκύπτει η ογκομετρική παροχή καυσίμου στον κινητήρα, Q (m³/sec).

Ο υπολογισμός της παροχής μάζας καυσίμου, \dot{m} , από την ογκομετρική παροχή καυσίμου, Q , υπολογίζεται από την πυκνότητα, ρ_{act} :

$$\dot{m} = \rho_{act}Q \quad (8-1)$$

Η πυκνότητα του καυσίμου στην θερμοκρασία των $T_{act}=117^{\circ}\text{C}$ από την οποία διέρχεται από το ροόμετρο, ρ_{act} , υπολογίζεται από την πυκνότητα στην θερμοκρασία αναφοράς $T_{15}=15^{\circ}\text{C}$, $\rho_{15}=988.8 \text{ kg/m}^3$, στο πιστοποιητικό του καυσίμου, μέσω του συντελεστή διόρθωσης V_{CF} (Volume Correction Factor):

$$\rho_{act} = \rho_{15}V_{CF} \quad (8-2)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης, V_{CF} , υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D1250-80 συναρτήσει των παραμέτρων K_0 και K_1 που έχουν υπολογισθεί με στατιστικές μεθόδους και σχετίζονται με τον συντελεστή διαστολής του υλικού, ως ακολούθως:

$$V_{CF} = \exp\left(-a_{15}(t_{act} - t_{15})(1 + 0.8 a_{15}(t_{act} - t_{15}))\right) \quad (8-3)$$

$$a_{15} = \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}} \quad (8-4)$$

Οι τιμές των παραμέτρων K_0 και K_1 , δίνονται στον Πίνακ. 8-1

Πίνακ. 8-1. Οι τιμές των παραμέτρων για την αναγωγή της πυκνότητας του καυσίμου διαφορετική θερμοκρασία [8.4]

	Fuel Oil
K_0	186.97
K_1	0.4862

Τελικά η διορθωμένη πυκνότητα στην θερμοκρασία $T_{act}=117^{\circ}\text{C}$, η οποία παρέμεινε σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων ήταν $\rho_{act}=918.7 \text{ kg/m}^3$.

Πίνακ. 8-2 Βασικές φυσικές και χημικές ιδιότητες του καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε

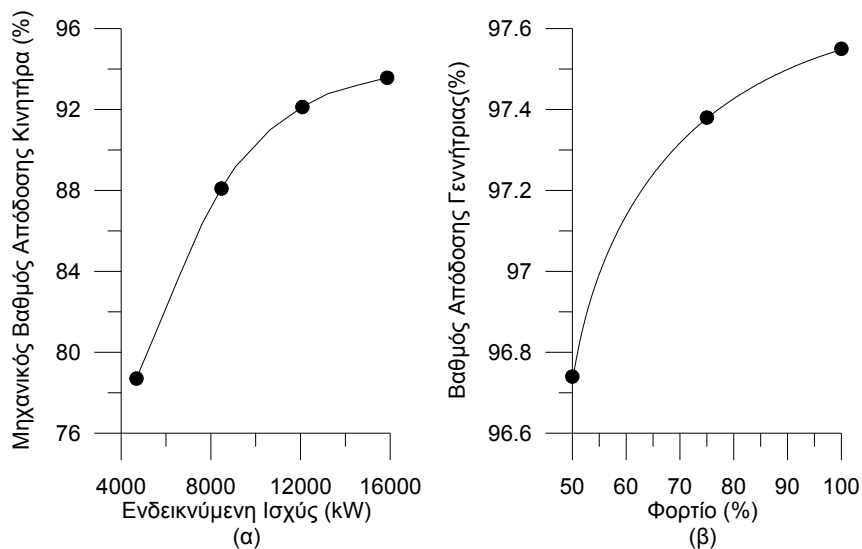
Πυκνότητα (15°C)	kg/m ³	988.8
Κινηματικό ιξώδες (50°C)	mm ² /s	343.5
Κατώτερα Θερμογόνο Δύναμη	kCal/kg	9679.0

Στον Πίνακ. 8-2 δίνονται ιδιότητες του καυσίμου που χρησιμοποιούνταν στον σταθμό παραγωγής κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

8.1.3 Διαδικασία μέτρησης της πραγματικής ισχύος

Η ισχύς του κινητήρα στην διάρκεια των μετρήσεων προσδιορίστηκε από την ένδειξη παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στον αίθουσα ελέγχου του σταθμού.

Για την κοινή αναφορά ισχύος το διαγνωστικό λογισμικό ρυθμίστηκε ώστε να παρέχει την ηλεκτρική ισχύ χρησιμοποιώντας τον μηχανικό βαθμό απόδοσης που προκύπτει από τις δοκιμές παραλαβής και τον βαθμό απόδοσης της γεννήτριας, Σχήμ. 8-2(α) και Σχήμ. 8-2 (β), αντίστοιχα.



Σχήμ. 8-2(α) Μηχανικός βαθμός απόδοσης κινητήρα, (β) Βαθμός απόδοσης γεννήτριας.

8.1.4 Μετρητική διαδικασία

Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκε η μετρητική διάταξη που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2 και το λογισμικό που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Το διαγνωστικό λογισμικό ρυθμίστηκε ώστε να προσδιορίζει την πίεση σάρωσης σαν μέρος της επίλυσης. Συνεπώς στο διαγνωστικό λογισμικό δεν παρέχεται κανένα δεδομένο εκτός από την μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου για κάθε κύλινδρο που είναι και το δυσμενέστερο (πιο δύσκολο προς επίλυση) σενάριο.

Αρχικά ελήφθησαν μετρήσεις πίεσης των διαδοχικών κυλίνδρων σε φορτία 25%, 50%, 75% και 90% με κανονική ρύθμιση προπορείας (μετρήσεις 1,2,3 και 4 στον Πίνακ. 8-3). Στην συνέχεια ρυθμίστηκε χειροκίνητα η θέση του κανόνα VIT, που ρυθμίζει την προπορεία της έγχυσης. Η ρύθμιση έγινε σε χιλιοστά του κανόνα VIT χωρίς να είναι αρχικά γνωστή η αντίστοιχη μεταβολή της προπορείας έγχυσης. Ελήφθησαν μετρήσεις σε δυο διαφορετικές θέσεις του VIT και σε δυο διαφορετικά φορτία 76% και 50% (μετρήσεις 5 και 6 στον Πίνακ.

8-3). Η μείωση της προπορείας (περαιτέρω καθυστέρηση της έγχυσης) αναμένεται να μειώσει την μέγιστη πίεσης καύσης και να αυξήσει την ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Οι διαδοχικές μετρήσεις των κυλίνδρων έγιναν εντός του διαστήματος καταγραφής της κατανάλωσης καυσίμου, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονταν και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας. Σε κάθε σύνολο μετρήσεων καταγράφηκε και η θέση κανόνων καυσίμου και του συστήματος μεταβλητού χρονισμού VIT.

Πίνακ. 8-3 Ληφθείσες Μετρήσεις

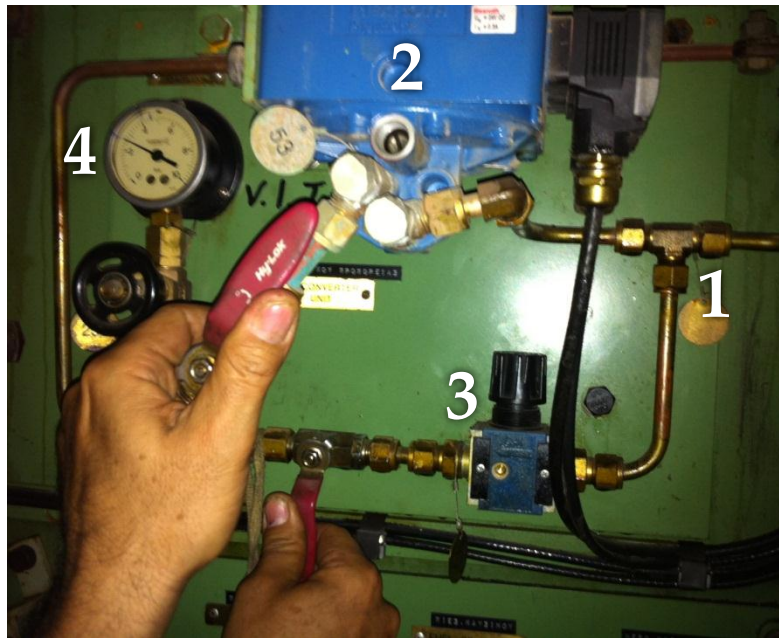
A/A Μέτρησης	Φορτίο	Παρατήρηση
1	~25%	
2	~50%	
3	~75%	
4	~90%	
5	~75%	Ρύθμιση VIT -40 mm
6	~50%	Ρύθμιση VIT -20 mm

8.1.5 Ανίχνευση θέσης έναυσης και η λειτουργία του συστήματος μεταβλητού χρόνου έγχυσης.

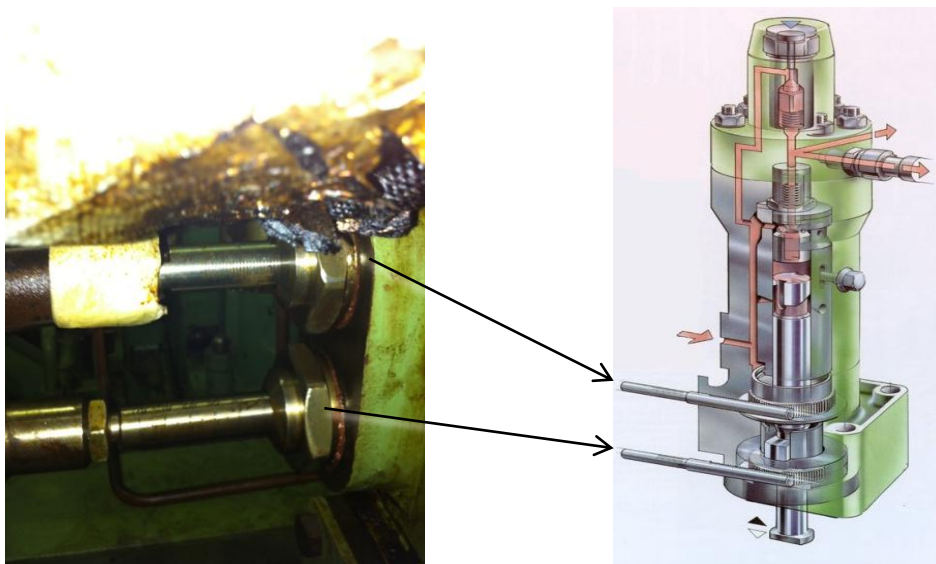
Όπως φαίνεται στον Πίνακ. 8-3 οι πρώτες τέσσερις μετρήσεις ελήφθησαν με αυτόματη λειτουργία του συστήματος μεταβλητού χρονισμού έγχυσης (VIT). Στις επόμενες δυο μετρήσεις ρυθμίστηκε η λειτουργία του συστήματος VIT χειροκίνητα δηλαδή επιβλήθηκε μια συγκεκριμένη τιμή.

Η θέση του κανόνα του συστήματος VIT ελέγχεται από υδραυλικό σύστημα. Στην αυτόματη λειτουργία, ένας ενεργοποιητής καθορίζει την πίεση ρύθμισης και συνεπώς την προπορεία χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Η ρύθμιση αυτή μεταβάλλεται αυτόματα με το φορτίο του κινητήρα.

Για την χειροκίνητη ρύθμιση ο ενεργοποιητής απομονώνεται ενώ ταυτόχρονα συνδέεται ένα χειροκίνητος ρυθμιστής πίεσης. Στο στιγμιότυπο της Εικόνα 8-4 φαίνεται αυτός ο χειρισμός, ακριβώς πριν την εφαρμογή του. Με τον επάνω κρουνό απομονώνεται ο ενεργοποιητής (μπλέ εξάρτημα) ενώ ταυτόχρονα με τον κάτω συνδέεται ο ρυθμιστής πίεσης (μαύρος κρουνός). Στη δεξιά πλευρά διακρίνεται η διακλάδωση που παρέχει ρευστό υπό πίεση στον ενεργοποιητή και τον ρυθμιστή πίεσης. Αριστερά φαίνεται το μανόμετρο με την ένδειξη της πίεσης μετά την ρύθμιση είτε την χειροκίνητη είτε την αυτόματη. Μετά την σύνδεση του συστήματος στον ρυθμιστή πίεσης, η ρύθμιση γίνεται από εκεί έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή θέση κανόνα VIT (Εικόνα 8-5)



Εικόνα 8-4 Χειροκίνητη ρύθμιση του κανόνα του συστήματος μεταβλητού χρονισμού έγχυσης. (1) διακλάδωση αέρα υπό πίεση, (2) ενεργοποιητής πίεσης ελεγχόμενος από μονάδα ελέγχου, (3) χειροκίνητος ρυθμιστή πίεσης, (4) ενδείκτης πίεσης ελέγχου συστήματος η τιμή του οποίου συσχετίζεται με την θέση του κανόνα του VIT.

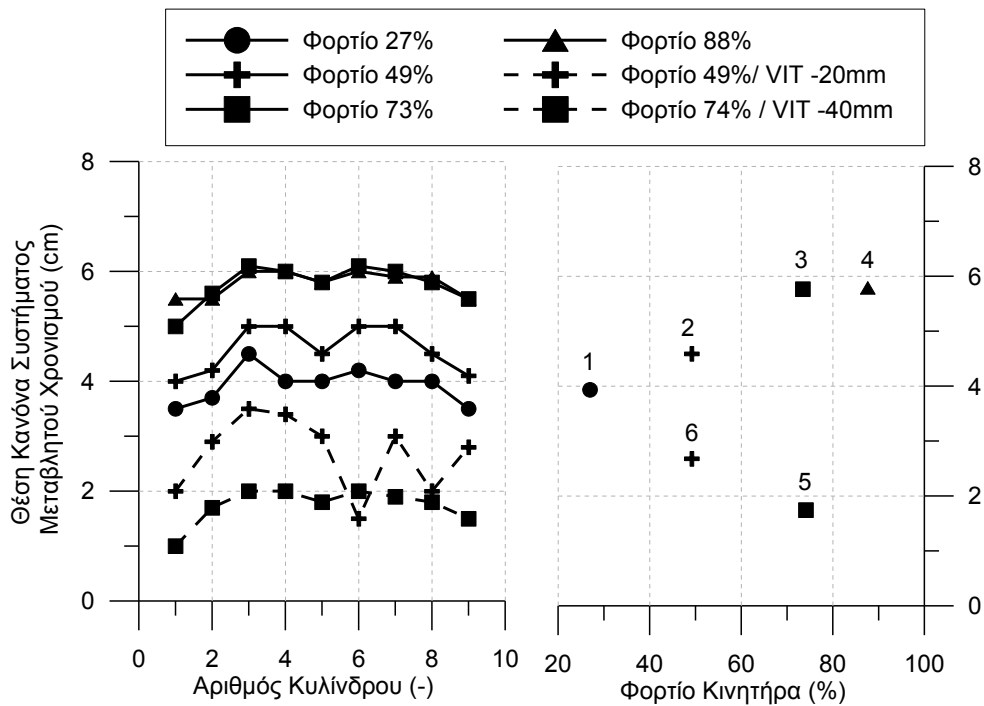


Εικόνα 8-5(α) Επάνω: κανόνας ρύθμισης του συστήματος μεταβλητού χρονισμού έγχυσης και Κάτω: ο κανόνας καυσίμου. (β) εικονογράφηση της αντλίας καυσίμου [8.5]. Ο κάτω κανόνας καθορίζει τον όγκο του θαλάμου της αντλίας (με περιστροφή του εσωτερικού άξονα) ενώ ο επάνω καθορίζει την θέση κλεισίματος της θυρίδας πλήρωσης και συνεπώς την έναρξη της έγχυσης.

Στην περίπτωση της χειροκίνητης ρύθμισης, η θέση του κανόνα VIT δεν μεταβάλλεται αυτόματα με το φορτίο. Γι αυτό το λόγο, κατά την αλλαγή του

φορτίου από το 75% στο 50%, (από την μέτρηση 5 στην 6), η λειτουργία του VIT είχε τεθεί στην αυτόματη θέση με την αντίστροφη διαδικασία από αυτή που περιγράφεται ανωτέρω.

Στο Σχήμ. 8-3α φαίνεται η τιμή του κανόνα VIT για κάθε κύλινδρο για κάθε ένα από τα έξι σύνολα μετρήσεων. Στο Σχήμ. 8-3β φαίνεται η μέση τιμή του κανόνα VIT συναρτήσει του φορτίου. Στα σημεία 1, 2, 3, 4, αντίστοιχα των μετρήσεων, οι ρύθμιση του VIT γινόταν αυτόματα από την μονάδα ελέγχου. Τα σημεία 5, 6 είναι αυτά που ορίστηκαν χειροκίνητα.



Σχήμ. 8-3 (α) Η θέση του κανόνα VIT των κυλίνδρων για όλες τις μετρήσεις. (β) Μέσος όρος της θέσης του κανόνα VIT όλων των κυλίνδρων συναρτήσει του φορτίου, με επισήμανση του A/A μέτρησης.

Στον Πίνακ. 8-4 δίνεται η γωνία έναυσης όπως εκτιμήθηκε από το διαγνωστικό λογισμικό για κάθε μέτρηση.

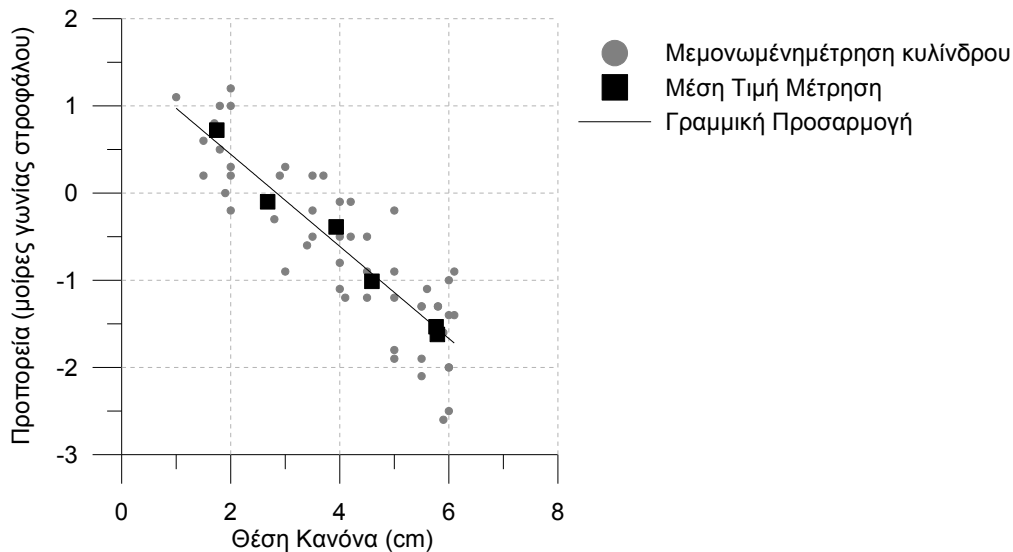
Στο Σχήμ. 8-4 φαίνεται η προπορεία συναρτήσει της μετρομένης θέσης του κανόνα VIT. Από το σχήμα αυτό συνάγεται ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της θέσης του κανόνα VIT και της προπορείας έγχυσης, η οποία είναι περίπου γραμμική το οποίο συμφωνεί απόλυτα με τα δεδομένα του κατασκευαστή. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι παρέχει μια βαθμονόμηση για το σύστημα που επιτρέπει τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του αλλά και τον καθορισμό της απαιτούμενης θέσης του κανόνα VIT για την επίτευξη της εκάστοτε επιθυμητής προπορείας έγχυσης χωρίς δοκιμές.

Πίνακ. 8-4 Η θέση έναυσης κάθε κυλίνδρου σε όλα τα φορτία και ρυθμίσεις προπορείας που εξετάστηκαν.

Α/Α Μέτρησης	Φορτίο	Αριθμός Κυλίνδρου									Μέση Τιμή
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	~25%	0.8	1.3	0.5	0.6	1.1	1.0	0.0	0.2	0.5	0.7
2	~50%	0.3	0.3	0.0	-0.9	0.0	0.7	-1.0	-0.3	-0.3	-0.1
3	~75%	-0.5	-0.5	-0.8	-1.4	-0.6	-0.2	-1.9	-1.0	-1.2	-0.9
4	~90%	-0.7	-0.7	-1.0	-1.5	-0.8	-0.4	-2.0	-1.1	-1.5	-1.1
5 ¹	~75%	1.6	1.5	1.6	0.9	1.6	1.7	0.6	1.0	1.1	1.3
6 ²	~50%	1.0	1.1	1.1	0.3	1.2	1.1	0.0	0.7	0.5	0.8

¹ Χειροκίνητη ρύθμιση VIT κατά 20mm

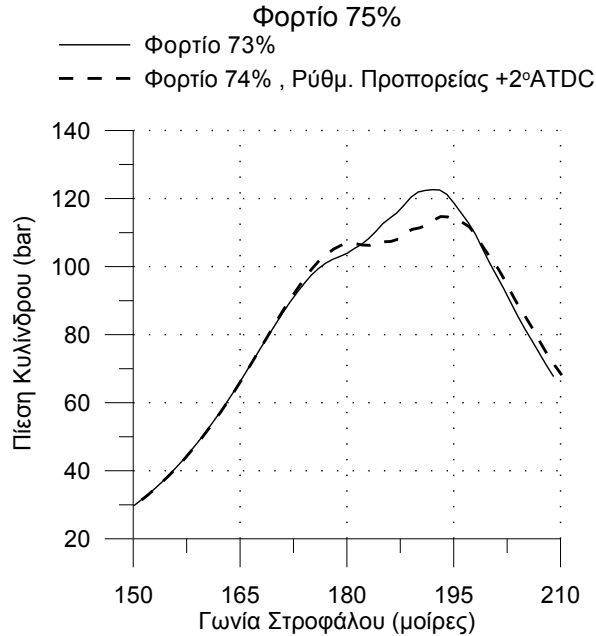
² Χειροκίνητη ρύθμιση VIT κατά 40mm



Σχήμ. 8-4 Προπορεία έγχυσης συναρτήσει της μετρημένης θέσης του κανόνα VIT, για όλους του κυλίνδρους σε όλα τα σημεία λειτουργίας. Με το μαύρο σύμβολο, οι αντίστοιχοι μέσοι όροι ανά σύνολο μετρήσεων (που περιλαμβάνει τις εννέα μετρήσεις των κυλίνδρων).

8.1.6 Η επίδραση της μεταβολής της προπορείας στην πίεση καύσης του κυλίνδρου

Στο Σχήμ. 8-5 φαίνεται η πίεση του κυλίνδρου Νο. 1 σε φορτίο ~75% πριν και μετά την μεταβολή της προπορείας. Η θέση έναυσης (Πίνακ. 8-4) μετατοπίστηκε από τις ~0.5° BTDC στις ~1.5° ATDC, δηλαδή επετεύχθητε μια μετατόπιση κατά 2° CA. Η μεταβολή αυτή, όπως είναι αναμενόμενο, επηρέασε σημαντικά την πίεση κυλίνδρου, μειώνοντας την μέγιστη πίεση καύσης.

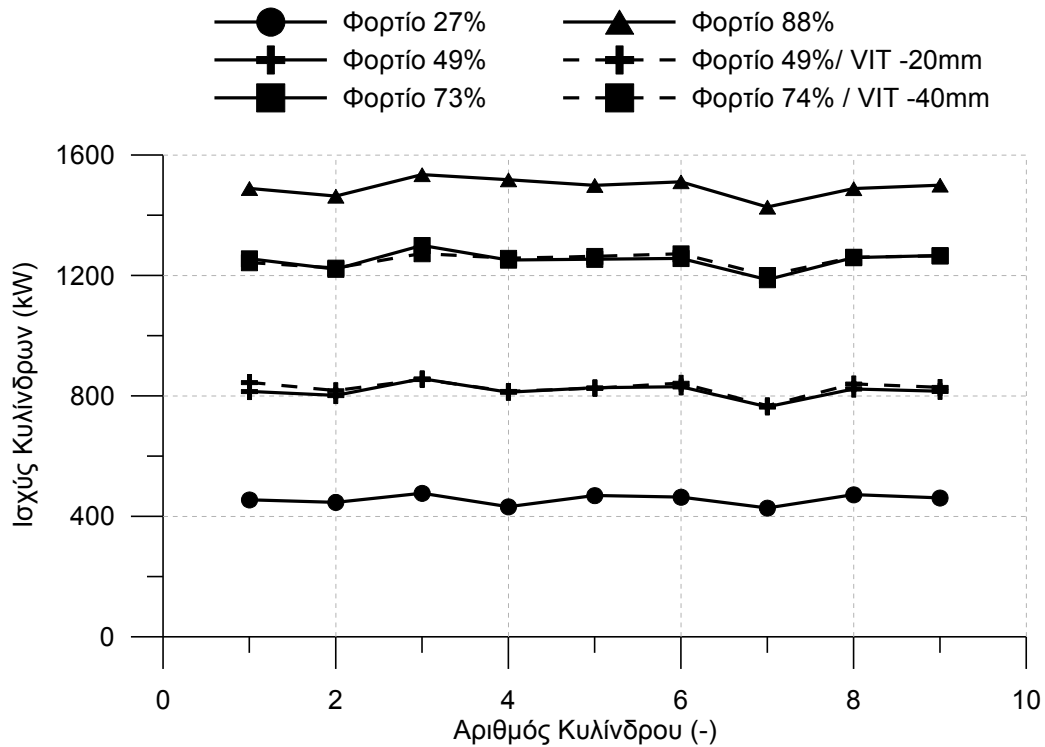


Σχήμ. 8-5 Η πίεση του κυλίνδρου No.1 στο φορτίο 75% πριν και μετά την μεταβολή της προπορείας.

8.1.7 Αποτελέσματα αξιολόγησης της εκτίμησης της ισχύος από την διαγνωστική μέθοδο

Όπως ήδη έχει περιγραφεί τα διαγνωστικό λογισμικό παρέχει την ισχύ του κάθε κυλίνδρου και την συνολική. Για την αξιολόγηση αυτής της προβλεπτικής ικανότητας γίνεται εκτενής διερεύνηση μέσω της σύγκρισης των προβλεπόμενων από το διαγνωστικό τιμών με τις αντίστοιχες μετροημένες χρησιμοποιώντας την ένδειξη παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (και τους συντελεστές απόδοσης κινητήρα και γεννήτριας).

Στο Σχήμ. 8-1 φαίνεται η ισχύς των κυλίνδρων, όπως εκτιμήθηκε από το διαγνωστικό λογισμικό με δεδομένο εισόδο μόνο την πίεση των κυλίνδρων. Παρατηρείται ότι η διακύμανση της ισχύος των κυλίνδρων είναι όμοια σε κάθε φορτίο, γεγονός αναμενόμενο καθώς η ισχύς διατηρείτο σταθερή στην διάρκεια της μέτρησης. Το άθροισμα της ισχύος των κυλίνδρων σε κάθε φορτίο δίνει την ισχύ του κινητήρα.



Σχήμ. 8-6 Διακύμανση της ισχύος των κυλίνδρων.

Στον Πίνακ. 8-5 δίνεται η ηλεκτρική ισχύς από την ένδειξη της αίθουσας ελέγχου του κινητήρα, η ισχύς που υπολογίστηκε από τον διαγνωστικό κώδικα (από την ενδεικνύμενη, με εφαρμογή των βαθμών απόδοσης κινητήρα και γεννήτριας, υπολογίστηκε και δίνεται η ηλεκτρική) καθώς και το αντίστοιχο σφάλμα.

Πίνακ. 8-5 Η ακρίβεια της διαγνωστικής τεχνικής στην εκτίμηση της ισχύος.

A/A Μέτρησης	Φορτίο [%]	VIT [mm]	Ένδειξη Ηλεκτρικής Ισχύος [kW]	Εκτίμηση Ισχύος από Διαγν. Κώδικα [kW]	Σφάλμα [%]
1	27.0	auto	4000.0	4000.0	0.00
2	49.2	auto	7300.0	7162.0	-1.89
3	73.5	auto	10900.0	10968.0	0.62
4	87.6	auto	13000.0	13096.0	0.74
5	74.1	-40	11000.0	10977.0	-0.21
6	49.2	-20	7300.0	7250.0	-0.68

Παρατηρείται ότι το μέγιστο σφάλμα παίρνει την τιμή -1.9%, ενώ το μέσο σφάλμα είναι -0.24%. Το μέγιστο σφάλμα εκφρασμένο ως προς την μέγιστη ισχύ συνεχούς λειτουργίας (MCR) είναι μικρότερο από 1%.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO), στο Παράρτημα VI του NOX Technical και Code και το MARPOL Annex VI, απαιτεί για την εφαρμογή οποιοδήποτε ρυθμίσεων τον έλεγχο της επίπτωσης αυτών στις εκπομπές NOx εκφρασμένων σε g/kWh. Αυτό όμως απαιτεί την εκτίμηση της ισχύος με σφάλμα όχι μεγαλύτερο του 5%ως προς την μέγιστη ισχύ του κινητήρα. Η προϋπόθεση αυτή προφανώς και ικανοποιείται όπως φαίνεται στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

8.1.8 Αποτελέσματα αξιολόγησης της εκτίμησης της κατανάλωσης από την διαγνωστική μέθοδο

Όπως ήδη έχει περιγραφεί τα διαγνωστικό λογισμικό παρέχει την κατανάλωση καυσίμου του κάθε κυλίνδρου και την συνολική. Για την αξιολόγηση αυτής της προβλεπτικής ικανότητας γίνεται εκτενής διερεύνηση μέσω της σύγκρισης των προβλεπόμενων από το διαγνωστικό τιμών με τις αντίστοιχες μετρομημένες χρησιμοποιώντας βαθμονομημένο ροόμετρο.

Στον Πίνακ. 8-6 δίνεται η μετρομημένη κατανάλωση, η εκτίμηση από το διαγνωστικό λογισμικό και το αντίστοιχο σφάλμα, για όλα τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα που μετρήθηκαν. Παρατηρείται υποεκτίμηση της κατανάλωσης με μέγιστο σφάλμα -2.35%.

Πίνακ. 8-6 Σφάλμα εκτίμησης της κατανάλωσης από το διαγνωστικό λογισμικό

A/A Μέτρησης	Φορτίο [%]	VIT [mm]	Μέτρηση Κατανάλωσης (ροόμετρο) [kg/h]	Εκτίμηση Κατανάλωσης (διάγνωση) [kg/h]	Σφάλμα [%]
1	27.0	auto	873.9	873.0	-0.10
2	49.2	auto	1467.1	1437.0	-2.05
3	73.5	auto	2078.5	2076.0	-0.12
4	87.6	auto	2439.6	2444.0	0.18
5	74.1	-40	2125.5	2099.0	-1.25
6	49.2	-20	1488.9	1454.0	-2.35

Στον Πίνακ. 8-7 δίνεται η σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης υπολογισμένης από τις μετρήσεις και από το διαγνωστικό λογισμικό (από την εκτίμηση της ισχύος και της κατανάλωσης καυσίμου) για όλα τα σημεία που μετρήθηκαν. Όπως προκύπτει το μέγιστο σφάλμα είναι ~-1% και το μέσο -0.7%. Συνεπώς η προβλεπτική ικανότητα της διαγνωστικής μεθόδου κρίνεται επαρκή.

Μια ιδιαίτερα σημαντική εφαρμογή της διαγνωστικής τεχνικής είναι η χρήση της για την μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου μέσω ρυθμίσεων. Στη παρούσα εφαρμογή παρουσιάζεται η ικανότητα της να περιορίσει την ειδική κατανάλωση καυσίμου μέσω της ρύθμισης της προπορείας έγχυσης. Πρόκειται για δύσκολη διαδικασία διότι οι αναμενόμενες μεταβολές για μικρές μεταβολές

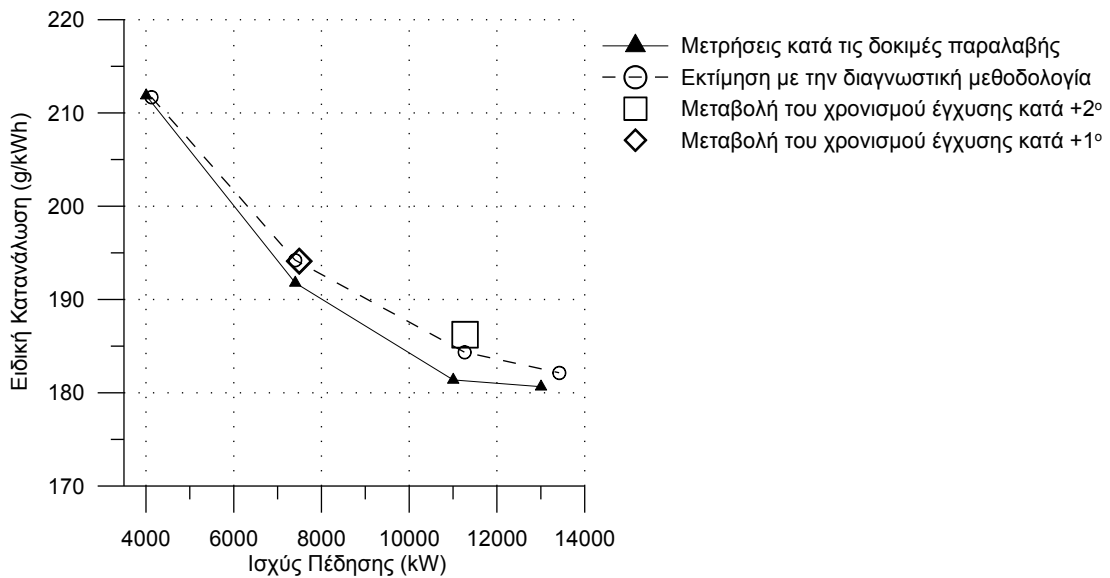
της προπορείας είναι στα όρια του σφάλματος εκτίμησης της κατανάλωσης καυσίμου. Παράλληλα ο προσδιορισμός της προπορείας έγχυσης με συμβατικές μεθόδους είναι χρονοβόρος και σχετικά ακριβός. Στη περίπτωση δε των μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων δεν υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής μεθόδων δοκιμής –διόρθωσης για προφανείς λόγους (χρόνου και κόστους). Παράλληλα η εκτίμηση της επίδρασης χρησιμοποιώντας πειραματικές μεθόδους δηλαδή μέτρηση ισχύος και κατανάλωσης καυσίμου σε ναυτικές εφαρμογές είναι πρακτικά αδύνατη λόγω των σφαλμάτων μέτρησης των δυο αυτών μεγεθών

Πίνακ. 8-7 Σφάλμα εκτίμησης της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου από τη διαγνωστική τεχνική

Α/Α Μέτρησης	Φορτίο [%]	VIT [mm]	Ειδική Κατανάλωση		Σφάλμα [%]
			Δεδομένα αναφοράς [g/kWh] ¹	Αποτελέσματα διάγνωσης [g/kWh] ¹	
1	27.0	auto	218.48	218.25	-0.10
2	49.2	auto	200.97	200.64	-0.16
3	73.5	auto	190.69	189.28	-0.74
4	87.6	auto	187.66	186.62	-0.56
5	74.1	-40	193.23	191.22	-1.04
6	49.2	-20	203.96	200.55	-1.67

¹ Παραγόμενου ρεύματος

Στο Σχήμ. 8-7 δίνεται η εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου που έγινε από το διαγνωστικό λογισμικό ως συνάρτηση της ισχύος του κινητήρα για όλες τις μετρήσεις ελήφθησαν. Διακρίνονται με διαφορετικό σύμβολο οι μετρήσεις στις οποίες μειώθηκε η προπορεία έγχυσης. Σε αυτές παρατηρείται, ως αναμενόταν μαζί με την μείωση της μεγίστης καύσεως και μικρή αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου που ανιχνεύεται απόλυτα από το διαγνωστικό λογισμικό. Επιπλέον, στο σχήμα φαίνονται εκτιμήσεις της ειδικής κατανάλωσης από τις δοκιμές παραλαβής, οι οποίες έχουν διορθωθεί ως προς την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Αυτές χρησιμοποιούνται απλά ως μέτρο σύγκρισης. Παρατηρείται μια αύξηση της ειδικής κατανάλωσης σε σχέση με την αναφορά (εργοστασιακές δοκιμές) η οποία είναι απόλυτα φυσιολογική λόγω φθορών αλλά κυρίως λόγω των συνθηκών των δοκιμών (ελεγχόμενο περιβάλλον στη διάρκεια των εργοστασιακών δοκιμών).



Σχήμ. 8-7 Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με και χωρίς μεταβολή της προπορείας με τις αντίστοιχες των δοκιμών παραλαβής.

Από το προηγούμενο σχήμα συνάγεται ότι παρά το οποιοδήποτε σφάλμα στην εκτίμηση της απόλυτης τιμής της κατανάλωσης καυσίμου το διαγνωστικό λογισμικό έχει την ικανότητα να προσδιορίζει πολύ μικρές μεταβολές τιμών αξιόπιστα το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές μεγάλων κινητήρων και δει ναυτικών .

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO), στο Παράρτημα VI του NOX Technical και Code και το MARPOL Annex VI, ορίζει ότι για την ρύθμιση του κινητήρα και συνεπώς τη μεταβολή των δεδομένων που εμπεριέχονται στο τεχνικό εγχειρίδιο του κινητήρα, απαιτείται εξοπλισμός που να παρέχει δυνατότητα μέτρησης της κατανάλωσης με μέγιστο σφάλμα 5%. Το κριτήριο αυτό ικανοποιείται από το παρόν διαγνωστικό λογισμικό και η τεχνική εκτίμησης της ισχύος και της κατανάλωσης καυσίμου πιστοποιήθηκε από τον οίκο αξιολόγησης GL (Germanischer Lloyd) [8.6].

8.2 Αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθόδου σε ναυτικό κινητήρα σε πέδη.

Πριν την εγκατάσταση ενός ναυτικού κινητήρα πραγματοποιούνται οι επίσημες δοκιμές παραλαβής του στον οίκο κατασκευής. Σε αυτές, σε ελεγχόμενο περιβάλλον πραγματοποιούνται δοκιμαστικές μετρήσεις με το κινητήρα συνδεδεμένο σε πέδη σε διάφορα φορτία λειτουργίας από το 0% έως 110%. Σκοπός των μετρήσεων συνήθως είναι:

- ♦ Ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας του κινητήρων και των υποσυστημάτων του.

- ◆ Η δημιουργία ενός τεχνικού φυλλαδίου που περιγράφει την κατάσταση αναφοράς του κινητήρα για μελλοντική χρήση.
- ◆ Ο έλεγχος συμμόρφωσης με τους διεθνείς κανονισμούς (πχ εκπομπής ρύπων).
- ◆ Ο έλεγχος συμμόρφωσης των επιδόσεων του κινητήρα με τις προδιαγραφές που έχουν συμφωνηθεί μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή.

Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται με μεθόδους και χρήση εξοπλισμού που εξασφαλίζουν σημαντική ακρίβεια και γι αυτόν τον λόγο θεωρούνται γενικά ως οι πλέον αξιόπιστες για την αξιολόγηση του διαγνωστικού λογισμικού.

Κατά τις δοκιμές παραλαβής κινητήρα 6S70MC-C (MCR 18660kW) στο εργοστάσιο της εταιρείας CMD (CSSC-MES Diesel Co., Ltd.) στην Σαγκάη της Κίνας, παράλληλα με τις μετρήσεις του πρωτοκόλλου του εργοστασίου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τις διατάξεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.

Στον Πίνακ. 8-8 συνοψίζονται οι συνθήκες λειτουργίας στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, συνολικά έξι τον αριθμό.

Πίνακ. 8-8 Οι ληφθείσες μετρήσεις

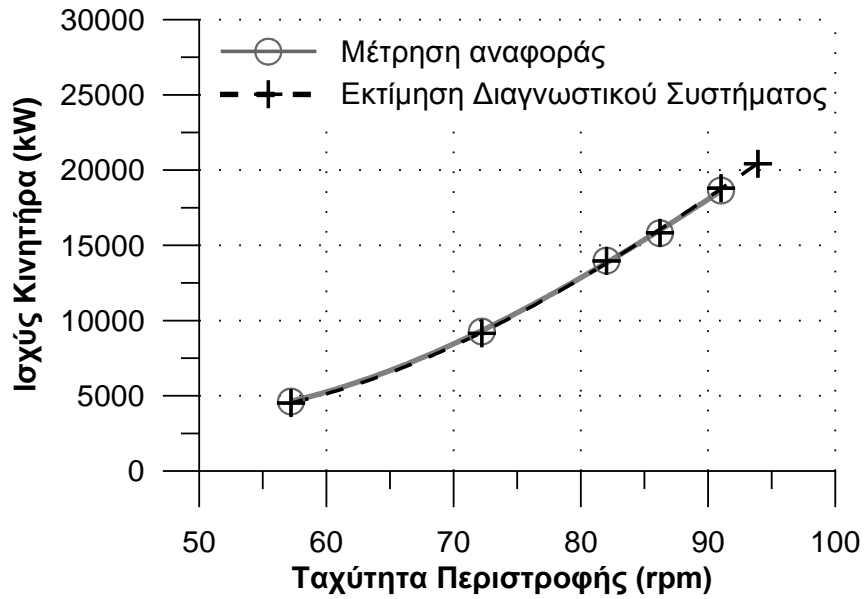
A/A	Φορτίο	Ταχύτητα	Μετρημένη
Μέτρησης	(%)	Περιστροφής	Ισχύς
		(rpm)	(kW)
1	57.2	24.8	4635.0
2	72.2	49.8	9289.0
3	82.0	75.0	13999.0
4	86.2	84.8	15822.0
5	91.0	100.0	18658.0
6	93.9	109.8	20485.0

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται η σύγκριση των εκτιμήσεων βασικών παραμέτρων του κινητήρα από διάγνωση με τις μετρήσεις. Έμφαση δίνεται στην ισχύ και την κατανάλωση καυσίμου που αποτελούν δυο από τις πλέον βασικές παραμέτρους για τον έλεγχο της κατάστασης ενός ναυτικού κινητήρα.

8.2.1 Ακρίβεια εκτίμησης της ισχύος

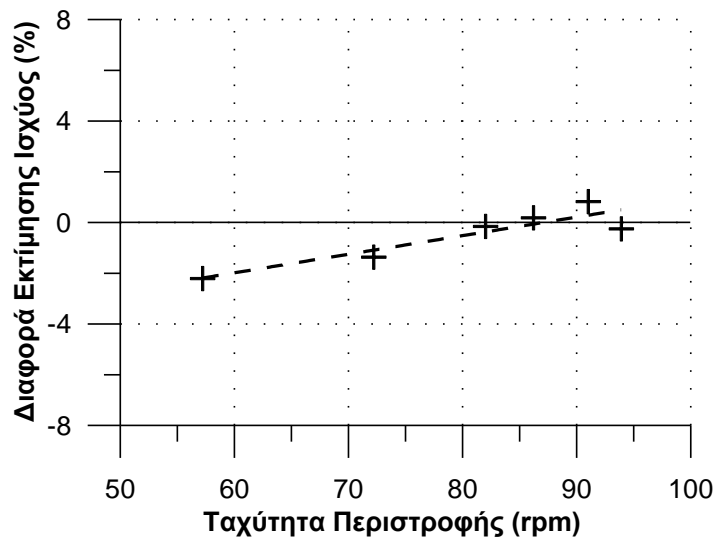
Στο Σχήμ. 8-8 δίνεται η ισχύς του κινητήρα για όλα τα σημεία λειτουργίας που εξετάστηκαν. Με τα κυκλικά σύμβολα δίνεται η μετρημένη ισχύς αναφοράς. Τα σταυροειδή σύμβολα αντιστοιχούν στις εκτιμήσεις με την χρήση της

προτεινόμενης μεθοδολογίας. Παρατηρείται πολύ καλή σύμπτωση των τιμών σε όλες τις ταχύτητες περιστροφής.



Σχήμ. 8-8 Σύγκριση μετρημένης και εκτιμώμενης από τη διαγνωστική τεχνική ισχύος συναρτήσεως της ταχύτητας περιστροφής

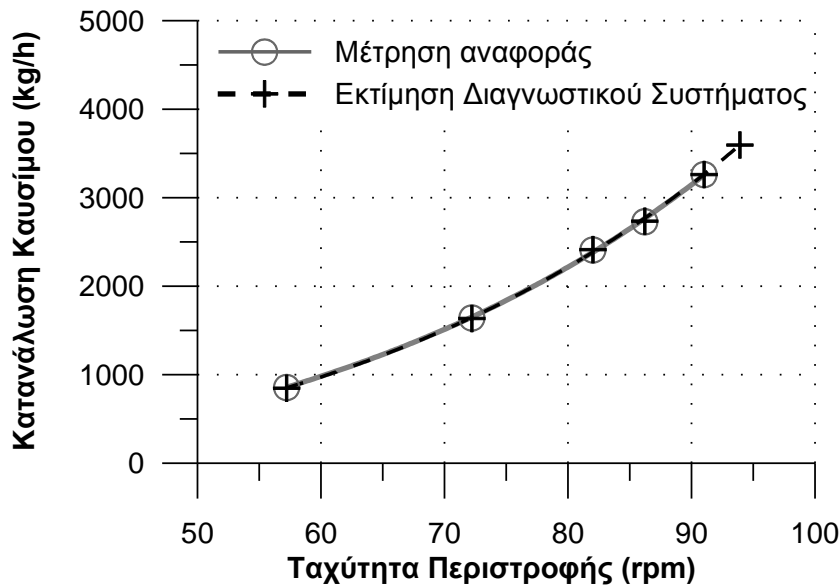
Στο Σχήμ. 8-9 φαίνεται το αντίστοιχο σφάλμα εκτίμησης της ισχύος. Παρατηρείται ότι το σφάλμα είναι μικρότερο από $\pm 2\%$. Επίσης παρατηρείται μια μικρή εξάρτηση του σφάλματος από τη ταχύτητα περιστροφής. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 6, το σφάλμα αυτό πιθανώς συνδέεται με την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου και μπορεί να αντιμετωπισθεί με τη χρήση ενός συντελεστή διόρθωσης που θα είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής.



Σχήμ. 8-9 Σφάλμα εκτίμησης της ισχύος συναρτήσεως της ταχύτητας περιστροφής.

8.2.2 Εκτίμηση κατανάλωσης καυσίμου

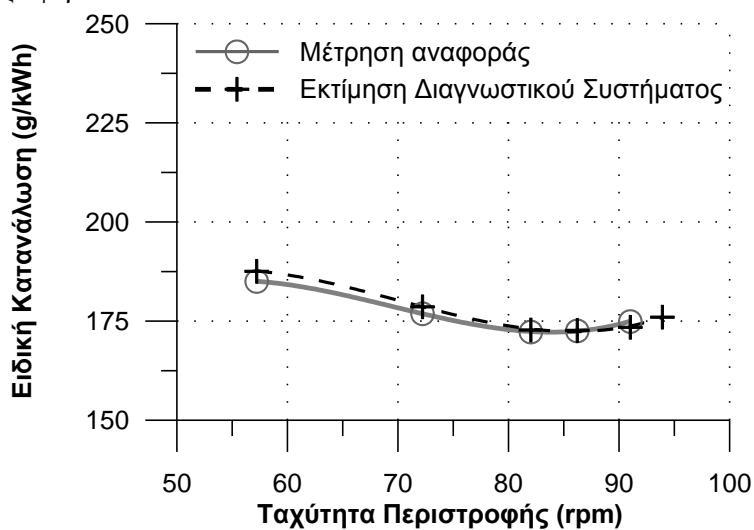
Στο Σχήμ. 8-10 δίνεται η μετρημένη κατανάλωση καυσίμου συγκρινόμενη με την αντίστοιχη εκτίμηση από τη διαγνωστική τεχνική. Παρατηρείται πολύ καλή σύμπτωση τιμών.



Σχήμ. 8-10 Σύγκριση Μετρημένης και Εκτιμώμενης κατανάλωσης καυσίμου σε όλα τα σημεία λειτουργίας

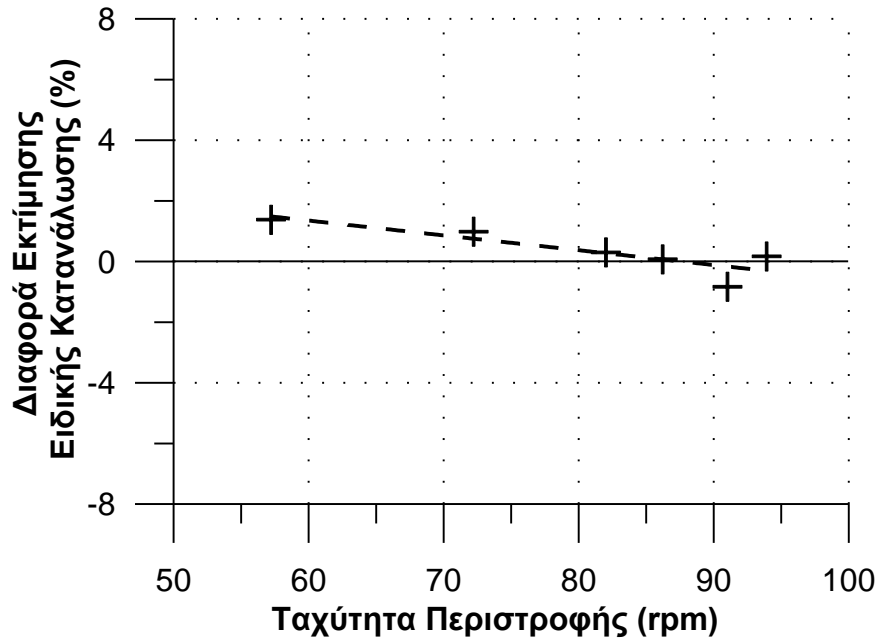
8.2.3 Εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

Στο Σχήμ. 8-11 δίνεται η σύγκριση μεταξύ της μετρημένης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και αυτής από τη διάγνωση συναρτήσεως της ταχύτητας περιστροφής.



Σχήμ. 8-11 Σύγκριση Μετρημένης και Εκτιμώμενης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε όλα τα σημεία λειτουργίας

Όπως προκύπτει η τάση της ειδικής κατανάλωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής που εκτιμάται από την διαγνωστική μεθοδολογία ταυτίζεται με την μετρημένη. Στο Σχήμ. 8-12 δίνονται οι αντίστοιχες αποκλίσεις. Το σφάλμα είναι μικρότερο από $\pm 2\%$ και στη περιοχή φορτίου άνω του 50% προσεγγίζει το 1%. Σε κάθε περίπτωση το σφάλμα είναι εντός ανεκτών ορίων.



Σχήμ. 8-12 Σφάλμα εκτίμησης της ειδικής κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής.

8.3 Εφαρμογή της διαγνωστικής μεθόδου για τον περιορισμό της κατανάλωσης ναυτικού κινητήρα σε ποντοπόρο πλοίο.

Σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου παρουσιάστηκε η μέθοδος εκτίμησης της μεταβολής της προπορεία συναρτήσει της θέσης του κανόνα VIT (κλίμακα VIT), με την χρήση της διαγνωστικής τεχνικής και μετρήσεων σε διάφορα φορτία. Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η χρήση του διαγνωστικού λογισμικού για τη ρύθμιση της προπορείας μέσω του συστήματος VIT και η αξιολόγηση με τελικό σκοπό το περιορισμό της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Η διερεύνηση διενεργήθηκε σε κινητήρα 7K98MC(MCR: 40MW) εγκατεστημένο σε ποντοπόρο πλοίο στη περιοχή της Ολλανδίας. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις (Μετρήσεις 1-3 στον Πίνακ. 8-9) με σκοπό τον υπολογισμό της κλίμακας του συστήματος VIT. Στην συνέχεια μετά την επεξεργασία των μετρήσεων προσδιορίσθηκε η σχέση μεταξύ της θέσης του VIT

και της προπορείας έγχυσης και προτάθηκε η νέα τιμή του VIT για να εξασφαλισθεί αύξηση της προπορείας έγχυσης κατά $\sim 1^\circ$ γωνίας στροφάλου.

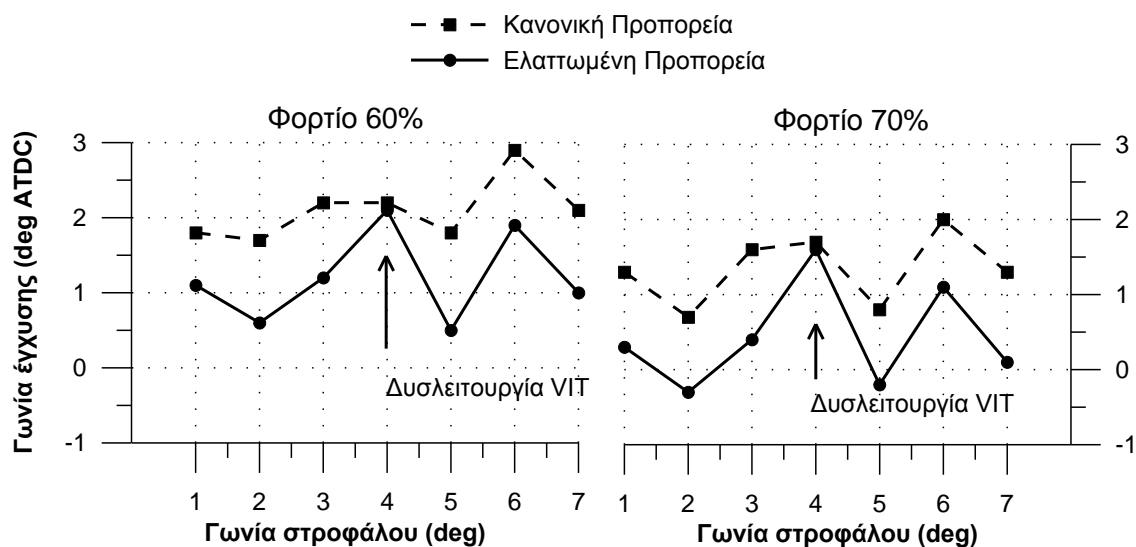
Στη συνέχεια ελήφθησαν νέες μετρήσεις μετά τη ρύθμιση προπορείας (μετρήσεις 4,5). Τέλος ο κινητήρας επαναφέρθηκε στην αρχική του ρύθμιση, όπου ελήφθη μια τελευταία μέτρηση (μέτρηση 6). Έτσι είναι διαθέσιμα ζεύγη μετρήσεων στο ίδιο φορτίο με διαφορετική ρύθμιση προπορείας έγχυσης, στο 60% του φορτίου οι μετρήσεις 3 και 4, και στο 70% οι μετρήσεις 6 και 5, με κανονική και αυξημένη προπορεία, αντίστοιχα.

Παράλληλα με τις μετρήσεις της πίεσης κυλίνδρου, μετρούνταν και οι εκπομπές ρύπων για τον έλεγχο των NOx, καθώς η σύνθεσή τους ευνοείται από την αύξηση της θερμοκρασία που αναμένεται να προκαλέσει η αύξηση της προπορείας έγχυσης.

Πίνακ. 8-9 Μετρήσεις που ελήφθησαν για τους σκοπούς της διερεύνησης

A/A Μέτρησης	Φορτίο (%)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Λειτουργία VIT
1	27.8	59.8	Αυτόματη
2	49.4	75.0	Αυτόματη
3	59.9	80.2	Αυτόματη
4	59.7	80.1	Χειροκίνητη
5	69.6	84.8	Χειροκίνητη
6	69.8	84.8	Αυτόματη

Στο Σχήμ. 8-13 φαίνεται η γωνία έγχυσης των κυλίνδρων πριν και μετά την μεταβολή της ρύθμισης του VIT, για τα δύο φορτία που εξετάζονται.

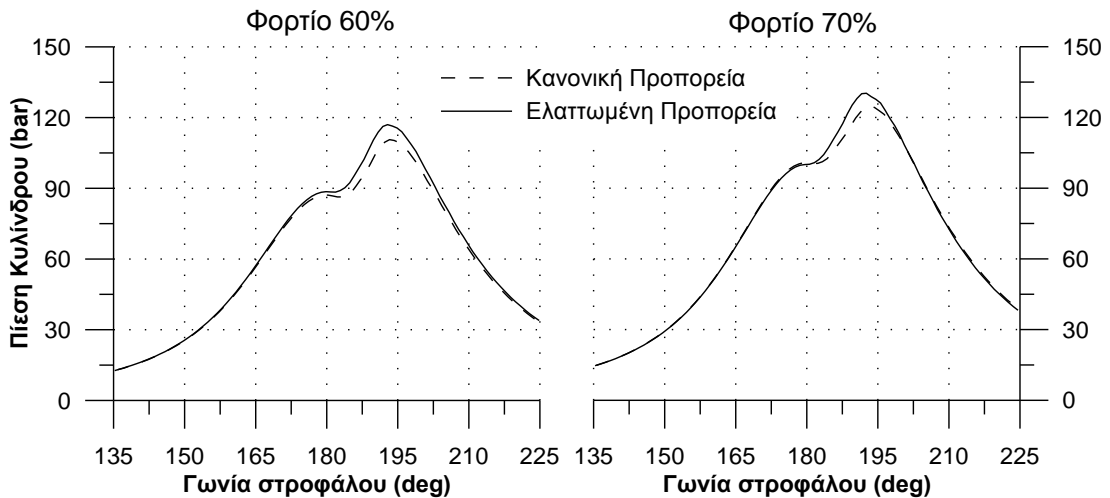


Σχήμ. 8-13 Επίδραση της μεταβολής της θέσης του κανόνα VIT στην γωνία έγχυσης των κυλίνδρων

Γενικά παρατηρείται επαναληψιμότητα στη θέση έγχυσης κάθε κυλίνδρου. Συγκεκριμένα ο κύλινδρος 6 έχει την μικρότερη προπορεία ενώ οι κύλινδροι 2 και 5 την μεγαλύτερη. Η μετατόπιση της θέσης έγχυσης μετά την αλλαγή ρύθμιση του VIT είναι ομοιόμορφη με εξαίρεση τον κύλινδρο Νο. 4. Η θέση έγχυσης αυτού του κυλίνδρου πρακτικά δεν μεταβλήθηκε μετά την αλλαγή της ρύθμισης του VIT το οποίο αποτελεί ένδειξη δυσλειτουργίας.

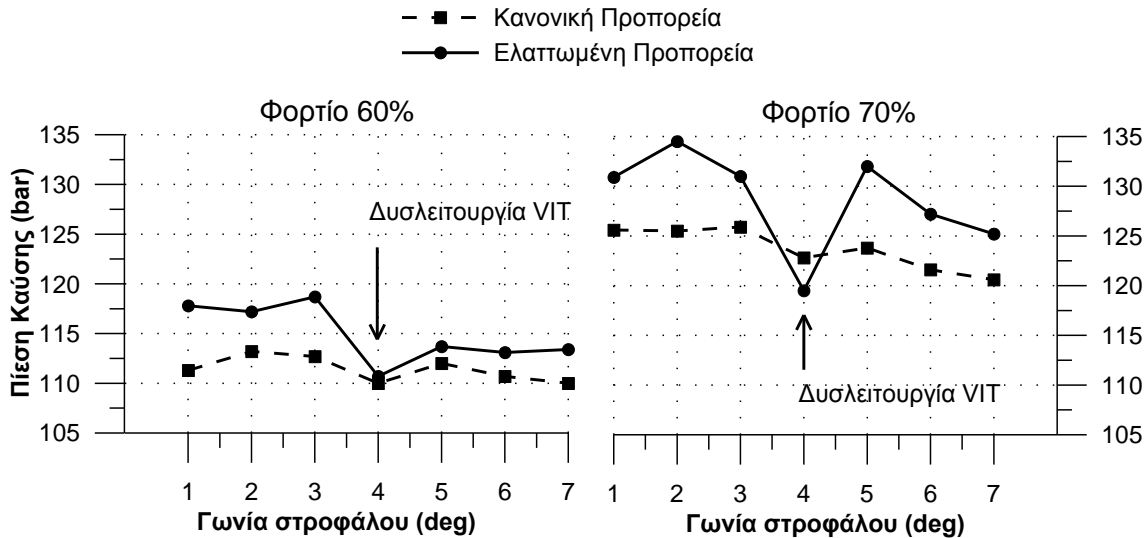
8.3.1 Επίδραση της μεταβολής προπορείας στα διαγράμματα της πίεσης

Στο Σχήμ. 8-14 δίνεται το διάγραμμα πιέσεων του κυλίνδρου Νο.1 πριν και μετά την μεταβολή της προπορείας για τα δύο φορτία που εξετάζονται. Με την αύξηση της προπορείας παρατηρείται αύξηση της μέγιστης πίεσης καύσης, όπως αναμενόταν. Στα φορτία που εξετάστηκαν, δεν υπερβαίνει τη τιμή των 150bar που θεωρείται το άνω όριο για το συγκεκριμένο κινητήρα.



Σχήμ. 8-14 Δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κυλίνδρου Νο.1 πριν και μετά την αλλαγή της ρύθμισης του VIT για τα δύο φορτία που εξετάζονται.

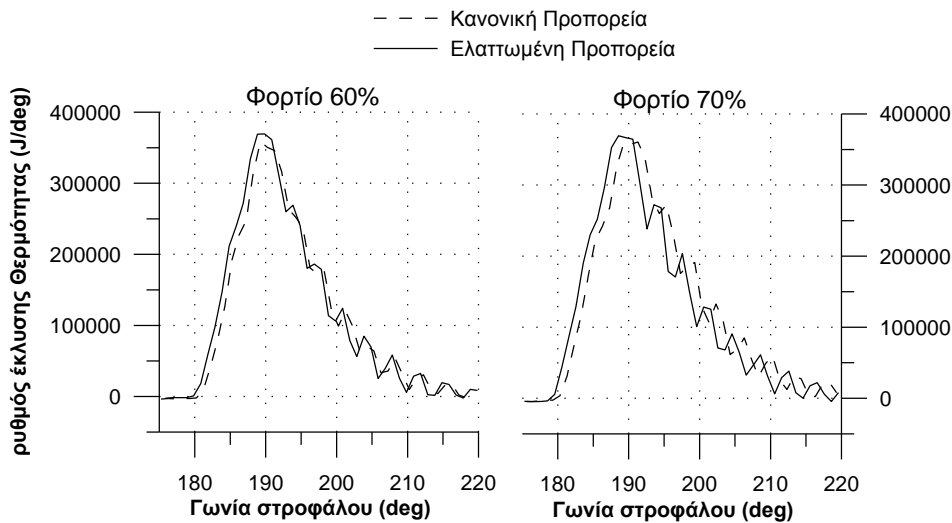
Από το Σχήμ. 8-15 συνάγεται ότι αύξηση της πίεσης καύσης λαμβάνει χώρα σε όλους τους κυλίνδρους εκτός από τον Νο.4 στον οποίον παρατηρείται δυσλειτουργία του συστήματος VIT.



Σχήμ. 8-15 Μέγιστη πίεση καύσης των κυλίνδρων πριν και μετά την αλλαγή ρύθμισης του VIT για τα δύο φορτία που εξετάζονται.

8.3.2 Επίδραση της μεταβολής της προπορείας έγχυσης στον ρυθμό έκλυσης θερμότητας

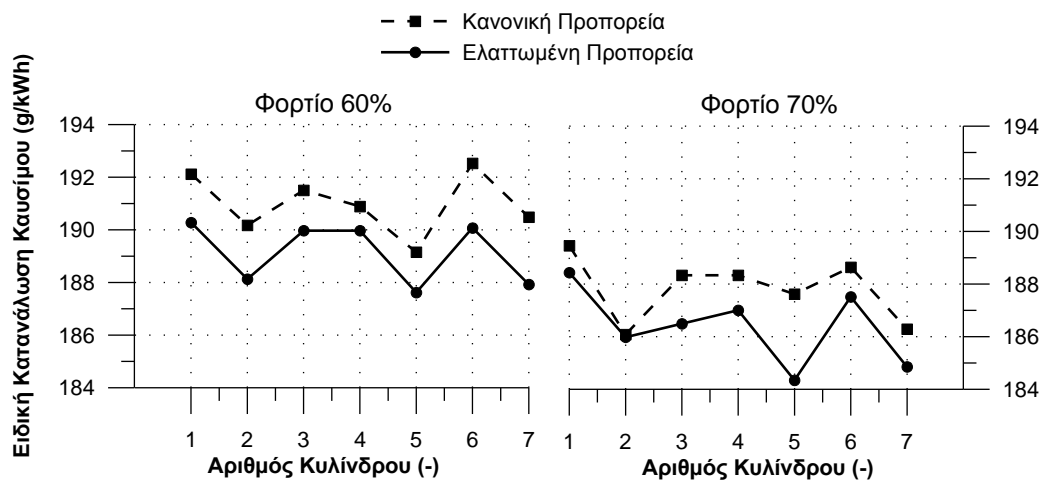
Στο Σχήμ. 8-16 δίνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας του κυλίνδρου Νο. 1 πριν και μετά την μεταβολή της προπορείας για τα δυο φορτία που εξετάζονται. Παρατηρείται ότι η μεταβολή της προπορείας κατά 1° δεν προκαλεί ποιοτική μεταβολή στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας παρά μόνο μια μετατόπιση προς τα αριστερά στον άξονα της γωνίας στροφάλου.



Σχήμ. 8-16 Ρυθμός έκλυσης θερμότητας του κυλίνδρου Νο.1 πριν και μετά την μεταβολή της προπορείας για τα δυο φορτία που εξετάζονται.

8.3.3 Επίδραση της μεταβολής της προπορείας έγχυσης στην κατανάλωση καυσίμου

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της προπορείας έγχυσης στην κατανάλωση καυσίμου γίνεται χρήση της ειδικής κατανάλωσης καθώς ανάμεσα στα δυο σημεία λειτουργίας υπάρχει διαφορά στη παραγόμενη ισχύς (λογικό και αναμενόμενο για πραγματικές δοκιμές). Στο Σχήμ. 8-17 δίνεται η ειδική κατανάλωση πριν και μετά την ελάττωση της προπορεία κατά $\sim 1^\circ$. Η ειδική κατανάλωση έχει μειωθεί από ~ 1.5 έως ~ 2.5 g/kWh για το φορτίο 60% με μέση τιμή μείωσης της ειδικής κατανάλωσης ~ 2 g/kWh. Στο φορτίο 70% η αντίστοιχη μέση μείωση είναι ~ 1.5 g/kWh.



Σχήμ. 8-17 Ειδική κατανάλωση καυσίμου πριν και μετά την αλλαγή ρύθμισης του συστήματος VIT για τα δύο φορτία που εξετάζονται.

Στον Πίνακ. 8-10 δίνεται η αντίστοιχη ημερήσια κατανάλωση πριν και μετά την μεταβολή της προπορείας. Παρατηρείται εξοικονόμηση καυσίμου που ξεπερνάει τον 1tn ημερησίως στα συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας.

Πίνακ. 8-10 Η μεταβολή στην ημερήσια κατανάλωση καυσίμου σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της προπορείας για τα δυο φορτία που εξετάζονται

Φορτίο (%)	Κατανάλωση Καυσίμου (tn/day)		
	Πρίν την ρύθμιση	Μετά την ρύθμιση	Ελάττωση
60	109.5	108.5	1.1
70	125.8	124.8	1.0

Η αύξηση στην συγκέντρωση των NOx βρέθηκε μικρότερη από 5% και παραμένει σαφώς εντός ορίων. Η μέγιστη πίεση καύσης απέχει αρκετά από το όριο. Επομένως υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω εξοικονόμησης καυσίμου με μικρή πρόσθετη αύξηση της προπορείας.

Συνεπώς παρατηρείται ότι με την χρήση της διαγνωστικής μεθοδολογία είναι δυνατός ο καθορισμός ρυθμίσεων με σκοπό την βελτίωση της λειτουργίας του κινητήρα αποφεύγοντας χρονοβόρες και πιθανός επικίνδυνες για τον κινητήρα μεθόδους δοκιμής- διόρθωσης. Επιπλέον είναι δυνατή η άμεση αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ρύθμισης.

8.4 Ορολογία

Λατινικά Σύμβολα

m	Μάζα (kg)
V	Ογκος (m ³)
Q	Ογκομετρική παροχή (m ³)
V _{CF}	Συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας (-)
K ₀ , K ₁	Παράμετροι συντελεστή διόρθωσης
t	Θερμοκρασία (°C)

Ελληνικά Σύμβολα

ρ	Πυκνότητα (kg/m ³)
---	--------------------------------

Δείκτες

act	Πραγματικός (actual)
CF	Συντελεστής διόρθωσης

Συντομεύσεις

VIT	Σύστημα μεταβλητού χρονισμού έγχυσης
CA	Γωνία στροφάλου
ATDC	Γωνία μετά το άνω νεκρό σημείο
BTDC	Γωνία πριν το άνω νεκρό σημείο
MCR	Μέγιστη ισχύς συνεχούς λειτουργίας (maximum continuous rating)

8.5 Βιβλιογραφία

- [8.1] Lamaris V.T., Antonopoulos A.K., Hountalas D.T., "Evaluation of an Advanced Diagnostic Technique for the Determination of Diesel Engine Condition and Tuning Based on Laboratory Measurements ", SAE Paper No. 2010-01-0154.
- [8.2] Lamaris V.T., Hountalas D.T., "Validation of a Diagnostic Method for Estimating the Compression Condition of DI Diesel Engines via Detailed Laboratory Measurements", Proceedings of the IMechE, Part A: Journal of Power and Energy, Vol.224, 2009

- [8.3] Lamarinis V.T., Hountalas D.T., "A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines – Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel", Energy Conversion & Management, Vol.51 (4), pp.740-753, 2010.
- [8.4] American Petroleum Institute, Manual of Petroleum Measurement Standards
- [8.5] http://www.marinediesels.info/2_stroke_engine_parts/Other_info/...MANBW_VIT_pump.htm
- [8.6] Lloyd Germanischer. Type approval certificate for emission measurement and diagnosis system. Certificate no. 37 974-12HH, Hamburg

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑΣ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

9.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα Διατριβής

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι ο προσδιορισμός, η αντιμετώπιση και η επίλυση των τεχνικών δυσκολιών που σχετίζονται με την εφαρμογή υπάρχουσας διαγνωστικής τεχνικής αλλά και γενικότερα διαγνωστικών τεχνικών σε κινητήρες Diesel μεγάλου μεγέθους που χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία και την ηλεκτροπαραγωγή. Παράλληλα σημαντικό αντικείμενο είναι η αξιολόγηση της διαγνωστικής τεχνικής σε πραγματικό περιβάλλον, σε κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής και σε ναυτικούς κινητήρες, εν πλω. Σημαντικό μέρος της πειραματικής διερεύνησης έγινε στο εργαστήριο MEK αλλά και σε σταθμούς παραγωγής της ΔΕΗ, σε ναυτικούς κινητήρες σε συνεργασία με Ναυτιλιακές εταιρείες, εν πλω και στα ναυπηγεία DAEWOO της Κορέας και SWS της Κίνας. Επιπλέον, ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στην σχεδίαση και ανάπτυξη του εξοπλισμού μέτρησης και στις διαδικασίες μέτρησης και επεξεργασίας των διαφόρων σημάτων.

Συγκεκριμένα, η διατριβή επικεντρώθηκε στα ακόλουθα αντικείμενα απ' όπου προέκυψαν και τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

1. Ανάπτυξη νέας πρωτότυπης μετρητικής διάταξης για την μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων και της πίεσης σάρωσης.

Μια δυσκολία που αντιμετωπίζεται στη διάρκεια μέτρησης της πίεσης κυλίνδρων είναι ο όγκος και η πολυπλοκότητα του μετρητικού εξοπλισμού. Η νέα διάταξη που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής συνδυάζει όλα τα απαραίτητα επί μέρους συστήματα για την τροφοδότηση των αισθητήρων, τη διαμόρφωση του σήματος σε μορφή αναγνώσιμη από τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα, τον ίδιο τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα, καθώς και όλων των απαραίτητων διασυνδέσεων. Για τη λειτουργία της απαιτείται μόνο η σύνδεση του αισθητήρα με αυτήν και, εν συνεχεία, η σύνδεσή της στον υπολογιστή. Συνεπώς, καταργεί την ανάγκη πολλών επιμέρους συσκευών / εξαρτημάτων για την μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων και της πίεσης σάρωσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για πρακτικές εφαρμογές στο πεδίο δοκιμών. Η νέα διάταξη συνδυάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Δεν απαιτείται καμία ρύθμιση από τον χρήστη, μειώνοντας το ενδεχόμενο λάθους στην ρύθμιση.
- Ο σχεδιασμός διασφαλίζει ασφάλεια και προστασία από ηλεκτρικές παρεμβολές που επηρεάζουν την ποιότητα της μέτρησης.

- Το βάρος, ο όγκος και η στιβαρότητα καθιστούν την νέα διάταξη εφαρμόσιμη για μετρήσεις σε εν λειτουργία κινητήρες, στο πεδίο δοκιμών. Συγκεκριμένα, ο όγκος είναι τάξης μεγέθους μικρότερος από ισοδύναμες διατάξεις.
- Όλο το hardware είναι πρωτότυπο, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από μηδενική βάση. Τα τυπωμένα κυκλώματα (ηλεκτρονικές πλακέτες) τυπώθηκαν στην Ελλάδα ενώ έγινε προμήθεια μόνο βασικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Τα εξαρτήματα είναι όλα ευρέως διαθέσιμα στο εμπόριο και το κόστος της διάταξης είναι πολύ μικρό.

2. Συστηματικοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας του σήματος της πίεσης κυλίνδρου και διερεύνηση της επίδρασης της επεξεργασίας στην ακρίβεια της διάγνωσης.

Έγινε εκτεταμένη αποτύπωση, σε μορφή εξισώσεων, της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας επεξεργασίας του σήματος της πίεσης. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι μέθοδοι αφαίρεσης ηλεκτρικού θορύβου, η εκτίμηση της μεταβαλλόμενης μετατόπισης του σήματος λόγω της θέρμανσης του αισθητήρα, η αναφορά του μετρημένου σήματος πίεσης σε γωνία στροφάλου και ο υπολογισμός του μέσου κύκλου. Από την διερεύνηση προέκυψαν τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

- Καθίσταται σαφής η δυνατότητα συμβατικών μικροελεγκτών να πραγματοποιήσουν την επεξεργασία του σήματος με σκοπό την δημιουργία αυτόνομου φορητού συστήματος λήψης μετρήσεων και απεικόνισης βασικών μεγεθών.
- Αντίθετα με ότι προτείνεται στην βιβλιογραφία γενικά για τους κινητήρες Diesel, για τους βραδύστροφους κινητήρες δεν ενδείκνυται η λήψη μέτρησης διάρκειας πολλών κύκλων, λόγω της αυξημένης χρονικής διάρκειας που συνεπάγεται μεγάλη πιθανότητα μεταβολής του φορτίου κατά την μέτρηση. Οι προτεινόμενες μέθοδοι επεξεργασίας της μέτρησης, που διαφοροποιούνται λόγω του μικρότερου αριθμού καταγεγραμμένων κύκλων, αξιολογούνται ως απολύτως ικανοποιητικές.

3. Ανάπτυξη νέου μετρητικού λογισμικού.

Αναπτύχθηκε νέο μετρητικό λογισμικό το οποίο είναι ευρείας χρήσης με εφαρμογή στο εργαστήριο και σε κινητήρες πραγματικής λειτουργίας. Το λογισμικό αυτό έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είναι πρωτότυπο και πλήρως παραμετροποιήσιμο ως προς τα κανάλια μέτρησης (αριθμό καναλιών και τύπο σήματος).

- Είναι δυνατή η μέτρηση κάθε τύπου κινητήρα 2-Χ ή 4-Χ, ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής, τον αριθμό και τη διάταξη των κυλίνδρων.
- Συνεργάζεται με κάθε τύπο αναλογοψηφιακού μετατροπέα, ενώ παρέχει αυτόματη αναγνώριση έως και δυο αναλογοψηφιακών μετατροπέων ταυτόχρονα (για ταυτόχρονη μέτρηση πολλών σημάτων).
- Στο λογισμικό περιέχονται για πρώτη φορά ρουτίνες αυτόματης διάγνωσης της κατάστασης του αναλογοψηφιακού μετατροπέα, που είναι πρωτότυπες.
- Το λογισμικό διαθέτει λειτουργίες διαχείρισης και απεικόνισης μετρήσεων από τον δίσκο του υπολογιστή.
- Για την διασφάλιση της ορθότητας της μέτρησης διατίθεται λειτουργία σταθερής δειγματοληψίας στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων των κυλίνδρων.
- Για εφαρμογή σε κινητήρες πραγματικής λειτουργίας, όπου η απλότητα του λογισμικού αποτελεί προτεραιότητα, η παραμετροποίηση του περιβάλλοντος γίνεται αυτόματα.

4. Ανάπτυξη πρότυπης συσκευής μέτρησης της στρεπτικής ροπής του κινητήρα.

Αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε ολοκληρωμένη πρότυπη συσκευή που αποτελείται από τμήμα προσαρμοσμένο στον περιστρεφόμενο άξονα για την διενέργεια και αποστολή μετρήσεων και στατική στεφάνη για την λήψη και μεταφορά τους στον υπολογιστή. Το τμήμα που είναι προσαρμοσμένο στον περιστρεφόμενο άξονα διεγείρει διάταξη μηκυνσιομέτρων, επεξεργάζεται, ενισχύει και ψηφιοποιεί το σήμα τους. Στην συνέχεια το μετατρέπει σε υπέρυθρες ακτίνες. Οι λειτουργίες αυτές ελέγχονται από μικροελεγκτή που εκτελεί κώδικα γραμμένο σε συμβολική γλώσσα (assembly). Το υπέρυθρο σήμα λαμβάνεται από την στεφάνη, διαμορφώνεται σε σειριακή συμβολοσειρά και μεταφέρεται στον υπολογιστή για αποθήκευση και επεξεργασία. Ταυτόχρονα με την μέτρηση δημιουργείται ένα σήμα αναφοράς ώστε οι μετρήσεις της ροπής να μπορούν να συγχρονιστούν με απόλυτη ακρίβεια με μετρήσεις από άλλη πηγή (αναλογοψηφιακός μετατροπέας). Για την οδήγηση της συσκευής αναπτύχθηκε πρωτότυπο ειδικό λογισμικό. Από την κατασκευή και εφαρμογή της συσκευής προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον εργαστηριακό μονοκύλινδρο κινητήρα Ricardo Hydra του Εργαστηρίου MEK και σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 11MW, διαπιστώθηκε η δυνατότητα της συσκευής να υπολογίζει με ακρίβεια την μέση ροπή του κινητήρα. Παράλληλα υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι μετρά με ικανοποιητική ακρίβεια και την στιγμιαία τιμή.

- Η βαθμονόμηση της συσκευής γίνεται με τη χρήση δύο μετρήσεων με προτίμηση τη χρήση χαμηλού και υψηλού φορτίου για μεγάλο εύρος.
- Η επιλογή της μετάδοσης των δεδομένων μέσω υπέρυθρων ακτινών, εξαλείφει πιθανά προβλήματα, όπως παρεμβολή θορύβου και αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση, που παρουσιάζουν άλλες μέθοδοι, όπως ραδιοκύματα και μέθοδοι με δαχτυλίδια επαφής.
- Η επιλογή επεξεργασίας και ψηφιοποίησης του πρωτογενούς σήματος σε πολύ μικρή απόσταση από την πηγή, αφενός κατέστησε δυνατή την μέτρηση της στιγμιαίας ροπής και αφετέρου απήλλαξε το σύστημα από θόρυβο. Αυτή η επιλογή διαφοροποιεί ουσιαστικά τη νέα συσκευή από τις υπάρχουσες.
- Η οδήγηση του λαμβανόμενου σήματος από την στεφάνη λήψης στον υπολογιστή χωρίς κάποια ενδιάμεση επεξεργασία προσέδωσε απλότητα στην λύση και αξιοπιστία στην μέτρηση. Εναλλακτική λύση, που αποδείχτηκε υποδεέστερη, είναι η εκ νέου μετατροπή του σήματος σε αναλογικό.
- Η αναπτυχθείσα μέθοδος «παρακολούθησης» της αποστολής δεδομένων από εξωτερική συσκευή για την δημιουργία σήματος αναφοράς έναρξης και λήξης της μέτρησης, που χρησιμεύει στον συγχρονισμό των μετρήσεων με μετρήσεις από άλλη πηγή, είναι πρωτότυπη και κρίνεται ως απολύτως ικανοποιητική.
- Η γλώσσα assembly, παρόλο που είναι πρωτογενούς επιπέδου και συνεπώς δυσχεραίνει τον προγραμματισμό, προσδίδει πολύ καλό έλεγχο της λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή με ακρίβεια κύκλου επεξεργασίας.

5. Ανάπτυξη μεθοδολογίας και πρωτότυπης συσκευής μέτρησης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου.

Για την μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής με μεγάλη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας το σήμα κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου, αναπτύχθηκε πρωτότυπη συσκευή που βασίζεται σε μικροελεγκτή. Η συσκευή αναπτύχθηκε για να διερευνηθεί η επίδραση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στα αποτελέσματα της διάγνωσης. Η μέτρηση ξεκινάει και ολοκληρώνεται στο ΑΝΣ, ενώ παράγεται σήμα συγχρονισμού για ταυτόχρονη μέτρηση με άλλο σύστημα δειγματοληψίας. Η συσκευή είναι προγραμματισμένη με κώδικα assembly. Για την οδήγηση της διάταξης αναπτύχθηκε ειδικό λογισμικό στο περιβάλλον LabView. Η συσκευή εφαρμόστηκε στον εργαστηριακό μονοκύλινδρο κινητήρα Ricardo Hydra του Εργαστηρίου MEK και από την εκτεταμένη εφαρμογή της προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Το σύνολο της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας παρέχει απολύτως συνεπή αποτελέσματα και αξιόπιστη λειτουργία.
- Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της διάρκειας παλμών είναι γενικής χρήσης και χρησιμοποιεί εξαρτήματα συμβατικής τεχνολογίας.
- Η συνολική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής, εμφανίζει μηδενική υστέρηση με αποτέλεσμα την ορθή αναφορά γωνίας στροφάλου της ίδιας της μέτρησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν παρουσιάζει υστέρηση στην καταγραφή, σε αντίθεση με άλλες διαθέσιμες τεχνικές.
- Εκτενή πειραματικά αποτελέσματα για την διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής σε μονοκύλινδρο πρότυπο κινητήρα.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου, σε συνθήκες ετεροκίνησης και έμφορτης λειτουργίας, σε μεγάλο εύρος στροφών του κινητήρα Ricardo Hydra του Εργαστηρίου ΜΕΚ. Από τις δοκιμές αυτές εξήχθησαν τα ακόλουθα:

- Διαπιστώθηκε ότι η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στον μονοκύλινδρο κινητήρα μειώνεται με την αύξηση της μέσης ταχύτητας περιστροφής και αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου. Η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής είναι πολύ πιο έντονη από αυτήν του φορτίου.
- Διαπιστώθηκε ότι στην ετεροκίνηση η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου φτάνει το 7%, ενώ στο χαμηλό και υψηλό φορτίο φτάνει το 6% και 8%, αντίστοιχα, για τον συγκεκριμένο κινητήρα.
- Επιβεβαιώθηκε η ραγδαία μείωση της ταχύτητας περιστροφής στα τελευταία στάδια της συμπίεσης. Κατά την εκτόνωση, παρόλο που αυξάνεται ραγδαία η ταχύτητα περιστροφής, η στιγμιαία της τιμή είναι χαμηλότερη από την μέση για ένα σημαντικό διάστημα .
- Το μοτίβο της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής είναι όμοιο, με διαφορετική ένταση, σε όλα τα σημεία της έμφορτης λειτουργίας του κινητήρα.

6. Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στην αντιστοίχιση γωνίας στροφάλου στα δείγματα μετρήσεων με δειγματοληψία σταθερού χρονικού βήματος.

Πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά εκτεταμένη και λεπτομερειακή πειραματική διερεύνηση για την παρατήρηση και ποσοτικοποίηση του σφάλματος αναφοράς σε γωνία στροφάλου των μετρήσεων πίεσης καύσης που

λαμβάνονται με σταθερό βήμα χρόνου. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν τυπική διαδικασία στις μετρήσεις κινητήρων παραγωγής, λόγω περιορισμών στην τοποθέτηση εξοπλισμού που θα επέτρεπε μετρήσεις σταθερού βήματος γωνίας στροφάλου. Το σφάλμα, όπως προκύπτει από τη διερεύνηση, οφείλεται στην γραμμική αντιστοίχιση χρόνου σε γωνία στροφάλου. Για τους σκοπούς της διερεύνησης αναπτύχθηκε πρωτότυπη διάταξη με τρία διαφορετικά συστήματα δειγματοληψίας για την ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου- με δυο διαφορετικές ρυθμίσεις δειγματοληψίας- και της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής. Με την συγκεκριμένη διάταξη που αναπτύχθηκε, κατέστη δυνατό να επιβεβαιωθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα της διερεύνησης καθώς αυτά υπολογίστηκαν με διάφορες μεθόδους, χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύνολα δεδομένων. Επίσης, αναπτύχθηκε πρωτότυπο εκτενές ειδικό λογισμικό για την οδήγηση της πολύπλοκης αυτής διάταξης. Από την διερεύνηση προέκυψαν πρωτότυποι χάρτες σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου για τον συγκεκριμένο κινητήρα, για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και διάφορα φορτία, τα οποία όμως προσφέρουν γενικότερες πληροφορίες. Εξάγονται τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

- Η ανάπτυξη χαρτών σφάλματος μπορεί να έχει σημαντική συμβολή στη ποσοτικοποίηση του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου, με εφαρμογές στην διόρθωση του εντοπισμού της θέσης συμβάντων στη διάρκεια του κύκλου (π.χ. χρονισμού έγχυσης, θέσης μεγίστης πίεσης καύσης, πραγματικής θέσης ΑΝΣ, αν ο αισθητήρας δεν είναι τοποθετημένος σε αυτό).
- Καθίσταται σαφές ότι η επίδραση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής εντός του κύκλου, σε μετρήσεις με σταθερό βήμα χρόνου, είναι σημαντική. Στον συγκεκριμένο κινητήρα διαπιστώθηκαν σφάλματα αντιστοίχισης της πίεσης σε γωνία στροφάλου έως και 3.5° , για το ευνοϊκότερο από τα συμβατικά σενάρια των μεθόδων αναφοράς της μέτρησης (αναφορά γωνίας στροφάλου σε κάθε άνω νεκρό σημείο).
- Το σφάλμα αντιστοίχισης της πίεσης σε γωνία στροφάλου, μεταβάλλεται κύρια με τη μέση ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, λόγω της συνεπαγόμενης μεταβολής της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου. Το σφάλμα αυξάνει με τη μείωση της μέσης ταχύτητας περιστροφής

7. Διερεύνηση της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στην πίεση του κυλίνδρου με δειγματοληψία σταθερού χρονικού βήματος και στην εκτίμηση παράγωγων μεγεθών με διαγνωστική αξία.

Για την διερεύνηση της επίδρασης της διακύμανσης της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής, στη διάρκεια του κύκλου, έγινε εκτενής πειραματική

μελέτη στον μονοκύλινδρο 4-Χ πειραματικό κινητήρα Ricardo Hydra. Συγκεκριμένα εξετάστηκε η επίδραση του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος, της γωνίας έναυσης, του ρυθμού καύσης και της σωρευτικής έκλυσης θερμότητας, μεγέθη που επηρεάζονται περισσότερο από το εξεταζόμενο σφάλμα. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στον συγκεκριμένο μονοκύλινδρο κινητήρα διότι εμφανίζει έντονη διακύμανση ταχύτητας περιστροφής στην διάρκεια του κύκλου, διευκολύνοντας την μελέτη του αντικειμένου αυτού. Επειδή όμως αυτό που χαρακτηρίζει έναν κινητήρα είναι η μέση ταχύτητα του εμβόλου και όχι η ταχύτητα περιστροφής του, μπορούμε να επεκτείνουμε τα εξαγόμενα συμπεράσματα προσεγγιστικά (τάξη μεγέθους) και σε μεγάλου μεγέθους δίχρονα κινητήρες. Επομένως, τα συμπεράσματα που ακολουθούν και αφορούν στον συγκεκριμένο μονοκύλινδρο 4-Χ κινητήρα, επεκτείνονται ποιοτικά σε πολυκύλινδρους 2-Χ και 4-Χ κινητήρες:

- Διαπιστώνεται ότι ανάλογα με την μέθοδο επεξεργασίας της μέτρησης (θέση και πλήθος σημείων που χρησιμοποιούνται για την αναφορά γωνίας στροφάλου στις δυο περιστροφές του κύκλου για 4-Χ κινητήρα και θέση σημείων για 2-Χ) επηρεάζεται σημαντικά το διάγραμμα της πίεσης του κυλίνδρου. Για τον τετράχρονο κινητήρα, η μη αξιοποίηση όλων των θέσεων ANΣ (καύσης και εναλλαγής αερίων στον τετράχρονο κινητήρα) συνεπάγεται σημαντική αλλοίωση του δυναμοδεικτικού διαγράμματος
- Στο σημείο που χρησιμοποιείται για αναφορά γωνίας στροφάλου, συνήθως το ANΣ, η θεωρούμενη τιμή της πίεσης ταυτίζεται με την πραγματική. Το σφάλμα γωνίας στροφάλου αυξάνει με την απόσταση από αυτό το σημείο.
- Διαπιστώνεται ότι η τυπική απόκλιση του σφάλματος της πίεσης που εκτιμάται με σταθερό χρονικό βήμα στο διάστημα ενός κύκλου ακολουθεί τις τάσεις διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής. Συγκεκριμένα το σφάλμα αυξάνει με την μείωση της ταχύτητας περιστροφής και την αύξηση του φορτίου. Η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής είναι η πλέον σημαντική.
- Η τιμή της μέγιστης πίεσης δεν επηρεάζεται από την διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής. Αντίθετα επηρεάζεται η γωνία στροφάλου στην οποία αυτή ανιχνεύεται. Όσο πλησιέστερα ευρίσκεται αυτή στη θέση αναφοράς τόσο μειώνεται το σφάλμα.
- Στον μονοκύλινδρο κινητήρα που πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση της πίεσης του κυλίνδρου κατά την συμπίεση και την εκτόνωση σε συγκεκριμένη γωνία στροφάλου (λόγω εσφαλμένης αντιστοίχισης) έως και 13.6% .

- Το σφάλμα στην εκτίμηση της γωνίας έναυσης είναι μικρό ($<0.3^\circ$) λόγω της εγγύτητας στο άνω νεκρό σημείο (θέση αναφοράς), όπου τα σφάλματα μηδενίζονται.
- Η υπερεκτίμηση της πίεσης στην συμπίεση και την εκτόνωση έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή διαφορετικού πρόσημου σφάλματος στην εκτίμηση του έργου πριν και μετά το ΑΝΣ της καύσης, με θετική επίδραση στην εκτίμηση της ισχύος. Το σφάλμα στην διάρκεια της εκτόνωσης υπεριοχύει και τελικά υπάρχει υπερεκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος. Είναι όμως διαφορετικό σε κάθε φορτίο του κινητήρα λόγω της ασυμμετρίας του διαγράμματος πιέσεων.
- Όσον αφορά στο διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας, παρατηρείται φαινομενική μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης και χαμηλότερη μέγιστη τιμή ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Παράλληλα, υποεκτιμάται η διάρκεια της καύσης.
- Η υπερεκτίμηση της ενδεικνύμενης ισχύος στη περίπτωση του μονοκύλινδρου κινητήρα, που είναι η πλέον δυσμενής περίπτωση, φτάνει το 16% (υψηλό λόγω του μονοκύλινδρου κινητήρα) στις 1000 σ.α.λ. (~20% των ονομαστικών στροφών) και σταθεροποιείται στο 2% πάνω από τις 1750 σ.α.λ. (~40% των ονομαστικών).
- Η επίδραση του φορτίου στο σφάλμα εκτίμησης της ισχύος είναι μικρή.

8. Ανάπτυξη μεθοδολογίας προσομοίωσης των μεθόδων δειγματοληψίας.

Αναπτύχθηκε πρωτότυπη μεθοδολογία συσχετισμού των μετρήσεων με σταθερό βήμα χρόνου, σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου και ταχύτητας περιστροφής. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται στην διερεύνηση του μηχανισμού εισαγωγής του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου. Χρησιμεύει επίσης και στην διόρθωση του σφάλματος.

9. Πρόταση και αξιολόγηση εμπειρικών μεθόδων ανίχνευσης και διόρθωσης του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου.

Προτείνεται νέα μέθοδος αξιολόγησης της έντασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής από την ίδια την μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου με σταθερό βήμα χρόνου, χωρίς δηλαδή την ανάγκη πρόσθετης μέτρησης ή εξοπλισμού. Από την ένταση της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής καθίσταται σαφές αν υπάρχει ανάγκη διόρθωσης. Επιπλέον, προτείνονται τρεις νέες εμπειρικές μέθοδοι διόρθωσης για τρία διαφορετικά σενάρια διαθέσιμων δεδομένων εισόδου. Τέλος, εξετάζεται λεπτομερώς η επάρκεια των τριών μεθόδων για την διόρθωση του σφάλματος σε μεγέθη με διαγνωστική αξία. Διευκρινίζεται ότι οι απόλυτες τιμές αφορούν την συγκεκριμένη εφαρμογή του

μονοκύλινδρο κινητήρα, στον οποίο η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου αναμένεται υψηλή και ότι οι μέθοδοι που προτείνονται έχουν εφαρμογή στο 4-X κινητήρα ενώ για τον 2-X αποτελούν μόνο βάση περαιτέρω έρευνας. Προέκυψαν τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

- Στη διάρκεια της συμπίεσης, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μειώνεται ενώ στη διάρκεια της εκτόνωσης αυξάνεται. Διαπιστώθηκε ότι ο λόγος «ανισότητας» της διάρκειας των δυο περιστροφών αποτελεί αξιόπιστο κριτήριο για την ανίχνευση της διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής. Η απόκλιση από την μονάδα δείχνει την ύπαρξη διακύμανσης.
- Το μέγιστο σφάλμα στις τιμές της πίεσης για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μειώνεται από το 13.6% (υψηλό λόγω του μονοκύλινδρου κινητήρα), στο 2.4%, 2% και 4% με την εφαρμογή των τριών μεθόδων διόρθωσης «Α», «Β» και «Γ», αντίστοιχα. Η τυπική απόκλιση του σφάλματος σε όρους πίεσης, στις συνθήκες με το μέγιστο αρχικό σφάλμα, μειώνεται από 1.8 bar στα 0.4 bar, 0.2 bar και 0.4 bar, αντίστοιχα, με την εφαρμογή των τριών μεθόδων διόρθωσης που προτάθηκαν.
- Διαπιστώνεται ότι το μέγιστο σφάλμα στην εκτίμηση της ισχύος μειώνεται από 16.5% (σε μικρή ταχύτητα περιστροφής και μονοκύλινδρο κινητήρα που παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου) σε 1.7%, 0.2% και 5.1% με την εφαρμογή των τριών μεθόδων. Στις μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής η μείωση του σφάλματος είναι ακόμα υψηλότερη.

10. Εντοπισμός και αξιολόγηση του σφάλματος στην εκτίμηση της ισχύος που οφείλεται στην διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής σε μεγάλους πολυκύλινδρους κινητήρες που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες και πρόταση μεθόδου αντιμετώπισης του προβλήματος.

Για την διεύρυνση της διερεύνησης σε μεγάλους δίχροτους πολυκύλινδρους κινητήρες, επιλέχθηκαν τρεις ναυτικοί με ισχύ 18MW, 16MW και 68MW και ένας ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 15MW, που παρείχαν αξιόπιστη ένδειξη ισχύος. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πίεσης κυλίνδρου στο μεγαλύτερο δυνατό εύρος λειτουργίας κάθε κινητήρα. Από τις μετρήσεις της πίεσης κυλίνδρου με σταθερό βήμα χρόνου εκτιμήθηκε η ισχύς στην διάρκεια κάθε μέτρησης. Έτσι, εκτιμήθηκε το σφάλμα στον υπολογισμό της ισχύος, που αποδίδεται στην διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής εντός του κύκλου για κάθε κινητήρα συναρτήσει του φορτίου. Επίσης, παρουσιάζεται πρωτότυπη μέθοδος διόρθωση του σφάλματος. Από την διερεύνηση προέκυψαν τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

- Διαπιστώθηκε σαφής εξάρτηση του σφάλματος εκτίμησης της ισχύος, λόγω διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στην διάρκεια του κύκλου, συναρτήσει του φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.
- Στον κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής, που λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, η εξάρτηση του σφάλματος από το σημείο λειτουργίας είναι σημαντικά μικρότερη απ' ότι στους ναυτικούς κινητήρες.
- Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των κυλίνδρων δεν μειώνει σημαντικά το σφάλμα, παρότι αναμένεται να μειώνει την διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σφάλμα αποδίδεται κύρια στις διακυμάνσεις της ταχύτητας περιστροφής γύρω από το ΑΝΣ, οι οποίες δεν επηρεάζονται πολύ από το πλήθος των κυλίνδρων. Τα σφάλματα αναφοράς γωνίας στροφάλου σε αυτές τις περιοχές του δυναμοδεικτικού, λόγω των υψηλών πιέσεων, έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο σφάλμα εκτίμησης μεγεθών, όπως η ισχύς κλπ.

11. Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ανίχνευση διακύμανσης του φορτίου στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων των κυλίνδρων.

Από τη μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων εξάγονται συγκριτικά συμπεράσματα για την λειτουργία τους, όπως η παραγόμενη ισχύς και η κατανάλωση καυσίμου. Αν όμως στην διάρκεια των διαδοχικών μετρήσεων υπάρχει διακύμανση της ισχύος του κινητήρα, είναι δυνατόν να εξαχθούν λανθασμένα συγκριτικά συμπεράσματα. Για την διερεύνηση και επίλυση του θέματος προτείνονται δυο νέες μεθοδολογίες για την καταγραφή της διακύμανσης αυτής.

Το σήμα εισόδου της πρώτης είναι η πίεση ενός από τους κυλίνδρους, που ορίζεται ως κύλινδρος αναφοράς και μετράται ταυτόχρονα με τους υπόλοιπους κυλίνδρους. Η διακύμανση της ισχύος του κυλίνδρου αναφοράς παρέχει ενδείξεις για την διακύμανση της συνολικής ισχύος του κινητήρα. Στη δεύτερη μεθοδολογία καταγράφεται ταυτόχρονα με την πίεση των διαδοχικών κυλίνδρων και η πίεση σάρωσης. Αξιοποιώντας την συσχέτιση της πίεσης σάρωσης με το φορτίο του κινητήρα, από τις μετρήσεις των δοκιμών παραλαβής, εκτιμάται η διακύμανση του φορτίου του κινητήρα. Για την διερεύνηση του θέματος αναπτύχθηκε διάταξη για την ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης δύο κυλίνδρων και της πίεσης σάρωσης με μεγάλη ακρίβεια και ανάλυση. Ελήφθησαν μετρήσεις σε δυο κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής, έναν δίχρονο κινητήρα 11.2MW με επτά κυλίνδρους σε σειρά και έναν τετράχρονο κινητήρα 10.4MW με δώδεκα κυλίνδρους σε διάταξη V. Αξιολογήθηκε η επίδραση της διακύμανσης φορτίου, όταν αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη στην εικόνα που εξάγεται για τον κινητήρα από την διαγνωστική τεχνική. Αξιολογήθηκαν οι δύο προτεινόμενες μέθοδοι ανίχνευσης της διακύμανσης φορτίου. Αξιολογήθηκε η

επίδραση στην λειτουργική συμπεριφορά του κινητήρα της εφαρμογής ρυθμίσεων που βασίζονται σε εκτιμήσεις, οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη την διακύμανση του φορτίου του κινητήρα. Από την διερεύνηση εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Και οι δύο μεθοδολογίες για την ανίχνευση της διακύμανσης φορτίου, οι οποίες εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα, αποκαλύπτουν παρόμοια διακύμανση. Συμπεραίνεται ότι και οι δυο είναι αξιόπιστες.
- Η μέθοδος που βασίζεται στην χρήση δυο αισθητηρίων πίεσης πλεονεκτεί, διότι παρέχει άμεση ένδειξη για την διακύμανση της ισχύος του κινητήρα.
- Η συσχέτιση της μεταβολής της πίεσης σάρωσης με την μεταβολή του φορτίου με βάση τα δεδομένα από τις δοκιμές παραλαβής του κινητήρα καθιστούν εύκολη την εφαρμογή της μεθόδου. Επιπλέον, η μέτρηση της πίεσης σάρωσης δεν εμφανίζει τεχνικές δυσκολίες και σαφώς πλεονεκτεί από πλευράς κόστους και εφαρμογής.
- Και από τις δυο μεθόδους συμπεραίνεται ότι το μοτίβο κατανομής παραγωγής ισχύος του κινητήρα από τους κυλίνδρους μετά την διόρθωση δεν μεταβάλλεται σημαντικά με το φορτίο.
- Και οι δύο αναπτυχθείσες μέθοδοι εμφανίζουν πολύ καλά αποτελέσματα, όσον αφορά στον εντοπισμό της διακύμανσης της ισχύος στη διάρκεια της μέτρησης, σε κινητήρες τετράχρονους ή δίχρονους, σε διάταξη σειράς ή V.
- Διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή ρυθμίσεων στο κινητήρα για την εξομάλυνση της παραγωγής ισχύος και την κατανάλωση των κυλίνδρων, αν δεν ληφθεί υπόψη η διακύμανση του φορτίου, μπορεί να επιφέρει δυσμενέστερη κατάσταση από την αρχική.

Η μεθοδολογία που προτείνεται για την αναγωγή των αποτελεσμάτων σε συνθήκες σταθερού φορτίου παρέχει αποτελέσματα που μπορούν να αξιοποιηθούν για την εφαρμογή των απαιτούμενων ρυθμίσεων για την εξομάλυνση της λειτουργίας του κινητήρα.

12. Αξιολόγηση διαγνωστικής μεθόδου σε κινητήρες στο πεδίο δοκιμών

Πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση με σκοπό την αξιολόγηση της ακρίβειας της διαγνωστικής μεθοδολογίας, όσον αφορά στον προσδιορισμό της ισχύος και της κατανάλωσης καυσίμου του κινητήρα, με μοναδικό δεδομένο την μέτρηση της πίεσης κυλίνδρων (η πίεση σάρωσης υπολογίστηκε από τον διαγνωστικό κώδικα). Η ακρίβεια στον προσδιορισμό αυτών των μεγεθών αποτελεί σαφή ένδειξη της ακρίβειας της μεθοδολογίας, συνολικά.

Το πρώτο μέρος της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε σε εννεακύλινδρο κινητήρα ηλεκτροπαραγωγής σε σταθμό παραγωγής σε Ελληνικό νησί, ονομαστικής ισχύος 14.8MW. Η κατανάλωση καυσίμου μετρήθηκε με χρήση πιστοποιημένου εξοπλισμού και με τη παρουσία εκπροσώπου του οίκου πιστοποίησης GL. Ελήφθησαν μετρήσεις στο 25%, 50%, 75%, 100% του φορτίου του κινητήρα, καθώς και δυο μετρήσεις στο 75% και 50%, με διαφορετική ρύθμιση προπορείας, με μεταβολή προπορείας (μείωση) κατά 2^ο και 1^ο, αντίστοιχα. **Το δεύτερο μέρος** της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε στο εργοστάσιο CMD του ναυπηγείου Shanghai Waigaoqiao Shipyard, στη διάρκεια των επίσημων δοκιμών παραλαβής του κινητήρα. Ο κινητήρας λειτουργούσε σε ελεγχόμενο περιβάλλον, συνδεδεμένος με πέδη. Ελήφθησαν μετρήσεις σε έξι σημεία λειτουργίας, από το 55% έως το 95% της μέγιστης ισχύος.

Τονίζεται ότι για πρώτη φορά διεξάγεται παρόμοιας έκτασης διερεύνηση σε κινητήρες αυτού του μεγέθους. Αυτό οφείλεται στο πλήθος των δυσκολιών που πηγάζουν από το μέγεθος του κινητήρα.

Συμπεράσματα από το πρώτο μέρος της διερεύνησης:

- Η εκτίμηση της ισχύος από τη διαγνωστική μεθοδολογία εμφάνισε μέγιστη απόκλιση 2.1% και μέση απόκλιση 0.6% σε σχέση με την μετρομημένη με τα διαθέσιμα εγκατεστημένα όργανα.
- Η εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου από τη διαγνωστική μεθοδολογία εμφάνισε μέγιστη απόκλιση 1.9% και μέση απόκλιση 0.9% σε σχέση με την μετρομημένη με βαθμονομημένο ροόμετρο.
- Τα αποτελέσματα της διαγνωστικής τεχνικής ταυτίζονται με τα δεδομένα του κατασκευαστή όσον αφορά στη συσχέτιση της θέσης του κανόνα VIT με την προπορεία της έγχυσης.
- Με την εφαρμογή της διαγνωστικής μεθοδολογίας μπορεί να ανιχνευθεί η μεταβολή της προπορείας έγχυσης με ακρίβεια.
- Η ακρίβεια της διαγνωστικής τεχνικής στην εκτίμηση της ισχύος και της κατανάλωσης καυσίμου είναι ανεξάρτητη του σημείου λειτουργίας του κινητήρα μετά την εφαρμογή της διόρθωσης που σχετίζεται με την διακύμανση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής.

Συμπεράσματα από το δεύτερο μέρος της διερεύνησης:

- Η εφαρμογή της διαγνωστικής μεθοδολογίας παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα χωρίς βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας στατιστικές τιμές.
- Το μέγιστο σφάλμα στην εκτίμηση της ισχύος είναι ~2.2% με μέση τιμή ~0.5%.

- Το μέγιστο σφάλμα στην κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερο από 1%, ενώ το αντίστοιχο της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου είναι ~1.4%, και το μέσο 0.4%.

13. Εφαρμογή της διαγνωστικής τεχνικής σε κινητήρα ποντοπόρου πλοίου για την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου μέσω μεταβολής της προπορείας .

Με την χρήση της διαγνωστικής τεχνικής έγινε αρχικά προσπάθεια προσδιορισμού της κλίμακας του συστήματος VIT (συσχέτιση θέσης κανόνα VIT με την γωνία έγχυσης). Με βάση αυτήν την κλίμακα προτάθηκε στη συνέχεια μεταβολή της θέσης του VIT, ώστε να προκύψει αύξηση της προπορείας κατά 1° γωνίας στροφάλου. Από την επεξεργασία των μετρήσεων διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- Τρεις μετρήσεις αρκούν για τον ακριβή υπολογισμό της κλίμακας VIT με την χρήση της μεθοδολογίας. Η κλίμακα στην συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για την επιβολή ρυθμίσεων. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν δεν είναι γνωστή η κλίμακα, η διαδικασία ρύθμισης είναι χρονοβόρος και εγκυμονεί κινδύνους για το κινητήρα.
- Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να γίνει χρήση της διαγνωστικής μεθοδολογίας για το περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου, μέσω της ρύθμισης της προπορείας χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπέρβασης του ορίου εκπομπών NOx.
- Από την συγκεκριμένη εφαρμογή διαπιστώθηκε ότι με μεταβολή της προπορείας έγχυσης κατά μόλις 1° είναι δυνατόν να γίνει εξοικονόμηση καυσίμου κατά 1 τόνο ημερησίως σε κινητήρα με ονομαστική ισχύ ~40MW. Αυτό αναγνωρίστηκε επίσημα από την πλοιοκτήτρια εταιρεία.

9.2 Στοιχεία Πρωτοτυπίας

Τα κύρια σημεία πρωτοτυπίας της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Η ανάπτυξη νέου μετρητικού εξοπλισμού από μηδενική βάση, με πρωτότυπα χαρακτηριστικά, για την ικανοποίηση των ιδιαίτερων απαιτήσεων της μέτρησης πίεσης καύσης σε κινητήρες μεγάλου μεγέθους . Στα πρωτότυπα χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται:
 - Η ανεξάρτηση από ρυθμίσεις.
 - Η ανεξάρτηση από εξωτερική ηλεκτρική τροφοδοσία.
 - Η σχεδίαση που συνεπάγεται πολύ χαμηλό κόστος, όγκο και βάρος. Η μείωση είναι τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους.

- Η ανάπτυξη νέου μετρητικού λογισμικού για χρήση στο εργαστήριο, αλλά και σε πρακτικές εφαρμογές. Το λογισμικό λειτουργεί με διάφορους τύπους αναλογοψηφιακών μετατροπέων και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τύπο κινητήρα. Στα πρωτότυπα χαρακτηριστικά του νέου λογισμικού, επίσης περιλαμβάνονται:
 - Παραμετροποίηση που γίνεται από οθόνες ή από αρχεία, με αποτέλεσμα την δυνατότητα επιλογής από την πλήρη αυτοματοποίηση (για εφαρμογές στο πεδίο πραγματικής λειτουργίας), έως την υψηλή παραμετροποίηση (για εφαρμογές στο εργαστήριο).
 - Η αυτόματη αναγνώριση και επιλογή του αναλογοψηφιακού μετατροπέα και η δυνατότητα διάγνωσης βλαβών στην μετρητική αλυσίδα.
 - Δυνατότητα χρήσης πολλών αναλογοψηφιακών μετατροπέων ταυτόχρονα για ειδικές εφαρμογές.
 - Προσαρμογή του πρωτοκόλλου μετρήσεων, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα.
 - Διατήρηση σταθερής δειγματοληψίας στην διάρκεια διαδοχικών μετρήσεων των κυλίνδρων.
- Συστηματοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας της πρωτογενούς μέτρησης που γίνεται για πρώτη φορά με γνώμονα την εφαρμοσιμότητα σε πρακτικές εφαρμογές.
- Η ανάπτυξη νέας πρωτότυπης συσκευής με πρωτοποριακή σχεδίαση, πολύ χαμηλού κόστους, για την μέτρηση της στιγμιαίας ροπής με τα ακόλουθα πρωτότυπα χαρακτηριστικά:
 - Ψηφιοποίηση του σήματος της ροπής πολύ κοντά στο σημείο δημιουργίας του, με αποτέλεσμα την μηδενική του αλλοίωση.
 - Αποστολή των δεδομένων από τον περιστρεφόμενο άξονα γίνεται με οπτικό ψηφιακό σήμα.
 - Δυνατότητα καταγραφής της στιγμιαίας ροπής, δηλαδή στη διάρκεια του κύκλου.
 - Απλή και πρωτότυπη λύση για τον συγχρονισμό των μετρήσεων με μετρήσεις από άλλες πηγές του υπολογιστή (πχ. αναλογοψηφιακό μετατροπέα).
 - Λειτουργία με αναλογοψηφιακό μετατροπέα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής.
- Η ανάπτυξη νέας μεθοδολογίας και αντίστοιχης συσκευής για την μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής (χρησιμοποιώντας το σήμα του

κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου). Η νέα μεθοδολογία βασίζεται στην συνδυασμένη χρήση μεθόδων μέτρησης χρόνου ανάμεσα σε διαδοχικούς παλμούς και μέτρησης παλμών σε προκαθορισμένο διάστημα. Η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει μεγάλη ευελιξία στο εύρος ταχυτήτων που δύναται να μετρήσει, αλλά και πολύ μεγάλη ακρίβεια και μηδενική υστέρηση. Επιπλέον, αξιοποιεί συμβατικά υλικά πολύ χαμηλού κόστους.

- Η ανάδειξη της σπουδαιότητας της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής κατά την επεξεργασία των μετρήσεων, σε αντίθεση με την κοινή αντιμετώπισή της στην πράξη ως ελάσσων πρόβλημα. Συγκεκριμένα, πρωτότυπα σημεία της διερεύνησης αποτελούν τα ακόλουθα:
 - Εκτενής προσδιορισμός, για πρώτη φορά, της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής σε μετρήσεις σταθερού βήματος χρόνου στο διάγραμμα πιέσεων και στην εκτίμηση της ισχύος, της γωνιάς έναυσης, του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.
 - Προσδιορισμός από τη πειραματική διερεύνηση ότι ανάλογα με τη διακύμανση της στιγμιαίας τιμής της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου προκύπτει σφάλμα στην αναφορά γωνιάς στροφάλου από 0.5° έως 4°, με συνέπεια σφάλμα στην ισχύ από 2% έως 16%, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας ενός τετράχρονου μονοκύλινδρου κινητήρα.
 - Συσχετισμός του σφάλματος εκτίμησης της ισχύος με τη ταχύτητα περιστροφής. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε συσχέτιση με τη ταχύτητα περιστροφής στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται σύστημα δειγματοληψίας με σταθερό χρονικό βήμα για την μέτρηση της πίεσης καύσης. Αντίστοιχα, όπως προέκυψε, η επίδραση του φορτίου είναι μικρή.
 - Πρόταση και αξιολόγηση τριών πρωτότυπων εμπειρικών μεθόδων διόρθωσης του σφάλματος αναφοράς γωνιάς στροφάλου μετρήσεων με σταθερό βήμα χρόνου.
 - Αναγνώριση του σφάλματος αναφοράς γωνιάς στροφάλου μετρήσεων με σταθερό βήμα χρόνου σε πολυκύλινδρους βραδύστροφους κινητήρες πρόωσης πλοίων και ηλεκτροπαραγωγής και πρόταση πρωτότυπης μεθόδου διόρθωσης που παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα.
- Εκτενής διερεύνηση και αξιολόγηση της επίδρασης της διακύμανσης φορτίου κατά τη διαδοχική μέτρηση των κυλίνδρων σε ναυτικούς κινητήρες και κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής στα αποτελέσματα της διάγνωσης και κυρίως στη φόρτιση των κυλίνδρων.
- Διαπίστωση ότι η εφαρμογή ρυθμίσεων, χρησιμοποιώντας τις πρωτογενώς μετρημένες τιμές, χωρίς διόρθωση, μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις οδηγώντας σε απορύθμιση του κινητήρα.

- Πρόταση και αξιολόγηση δύο νέων πρωτότυπων μεθόδων ανίχνευσης της διακύμανσης φορτίου και διόρθωσης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της διάγνωσης, με έμφαση στη φόρτιση των κυλίνδρων.
- Διενέργεια εκτενών μετρήσεων σε μεγάλο μεγέθους κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής και ναυτικούς, σε πλήθος συνθηκών λειτουργίας, με σκοπό την αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθοδολογίας. Τέτοιας κλίμακας αξιολόγηση της διαγνωστικής μεθόδου λαμβάνει χώρα για πρώτη φορά. Επίσης αποτελεί σημαντική βάση δεδομένων για μελλοντική χρήση.
- Εφαρμογή για πρώτη φορά της διαγνωστικής τεχνικής, εν πλω, για την επιτόπου εκτίμηση της συσχέτισης της θέσης του κανόνα του συστήματος μεταβλητού χρονισμού με την προπορεία και την άμεση ρύθμιση, με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

9.3 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η έρευνα που παρουσιάζεται στη διατριβή μπορεί να αποτελέσει αφετηρία περαιτέρω σχετικών διερευνήσεων και βελτιώσεων. Ενδεικτικά, αναφέρονται ορισμένα θέματα, η μελέτη των οποίων αναμένεται να παρουσιάζει ενδιαφέρον:

- Η εφαρμογή του αισθητήρα στιγμιαίας ροπής που αναπτύχθηκε για την ανάλυση της συνεισφοράς των κυλίνδρων στην παραγόμενη ισχύ.
- Η μετατροπή της υφιστάμενης διαγνωστικής τεχνικής ώστε να αξιοποιεί άμεσα την μετρημένη ισχύ από τον αισθητήρα που αναπτύχθηκε.
- Η επέκταση των μετρήσεων στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής σε πολυκύλινδρους βραδύστροφους ναυτικούς κινητήρες, με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση της φύσης του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου, σε μετρήσεις με σταθερό βήμα χρόνου και η ανάπτυξη αντίστοιχου μοντέλου για την παράλληλη θεωρητική διερεύνηση.
- Η εξέλιξη της διαγνωστικής τεχνικής, ώστε η εκτίμηση της πίεσης σάρωσης να χρησιμοποιείται στην ανίχνευση της διακύμανσης φορτίου και τελικά στον συνυπολογισμό της διακύμανσης, στα αποτελέσματα της διάγνωσης.
- Η εξέλιξη της διαγνωστικής τεχνικής στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης του κώδικα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση των δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο και μάλιστα από μικροελεγκτή, αντί για προσωπικό υπολογιστή.
- Η εξέλιξη της διαγνωστικής τεχνικής, ώστε να παρέχει σε πραγματικό χρόνο προτάσεις ρύθμισης (προπορείας και κατανομής καυσίμου), που να

τροφοδοτούν τα συστήματα αυτόματου ελέγχου που διαθέτουν οι κινητήρες νέας τεχνολογίας.

9.4 Δημοσιεύσεις

Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και διεθνή συνέδρια με σύστημα κριτών και κρίση στο πλήρες κείμενο:

- ◆ Lamaris, V., Antonopoulos, A., and Hountalas, D., "Evaluation of an Advanced Diagnostic Technique for the Determination of Diesel Engine Condition and Tuning Based on Laboratory Measurements", SAE Technical Paper 2010-01-0154, 2010
- ◆ D.T. Hountalas and A.K. Antonopoulos , "Comparative Evaluation of available TDC estimation techniques", Proceedings of the 24th International Conference 'ECOS 2011', Novi Sad, Serbia, July 4-7, 2011 ¹
- ◆ A.K. Antonopoulos and D.T. Hountalas, Effect of Instantaneous Rotational Speed on the Analysis of Measured Diesel Engine Cylinder Pressure Data, Proceedings of the 24th International Conference 'ECOS 2011', Novi Sad, Serbia, July 4-7, 2011 ¹
- ◆ R. Papagiannakis, A. Antonopoulos, C. Nikita and D. Hountalas, "Use of a diagnostic methodology for spark ignited engines to investigate the effect of AFR on the performance and combustion characteristics of a reciprocating aircraft engine", ICES2012-81105, Proceedings of the ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference, Torino, Italy May 6-9, 2012
- ◆ D. Hountalas, G. Zovanos, D. Sakellarakis, A. Antonopoulos, "Validation of multi-zone combustion model ability to predict two stroke diesel engine performance and nox emissions using on board measurements", ICES2012-81100, Proceedings of the ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference, Torino, Italy May 6-9, 2012
- ◆ D. Hountalas, A. Antonopoulos, N. Sakellaridis, G. Zovanos, E. Pariotis and R. Papagiannakis, "Computational Investigation of the Effect of Ambient Conditions on the Performance of Turbocharged Large Scale Marine Diesel

¹ Παρουσίαση από τον ίδιο

Engines”, Proceedings of the 25th International Conference ‘ECOS 2012’, Perugia, Italy, June 26-29, 2012

- ◆ Hountalas, D., Antonopoulos, A., Zovanos, G., and Papagiannakis, R., “Evaluation of a New Diagnostic Technique to Detect and Account for Load Variation during Cylinder Pressure Measurement of Large-Scale Four-Stroke Diesel Engines”, SAE Technical Paper 2012-01-1342, 2012 ¹
- ◆ Antonopoulos, A. and Hountalas, D., "Identification and Correction of the Error Induced by the Sampling Method Used to Monitor Cylinder Pressure of Reciprocating Internal Combustion Engines," SAE Technical Paper 2012-01-1155, 2012 ¹
- ◆ A.K. Antonopoulos, D.T. Hountalas, “Effect of instantaneous rotational speed on the analysis of measured diesel engine cylinder pressure data”, Energy Conversion and Management, Vol. 60, pp 87-95, August 2012
- ◆ D.T. Hountalas, R.G. Papagiannakis, G. Zovanos, A. Antonopoulos, “Comparative evaluation of various methodologies to account for the effect of load variation during cylinder pressure measurement of large scale two-stroke diesel engines”, Applied Energy, Vol. 113, pp. 1027-1042, January 2014 (in press)

¹ Παρουσίαση από τον ίδιο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΟΡΘΗΣ ΑΝΗΓΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

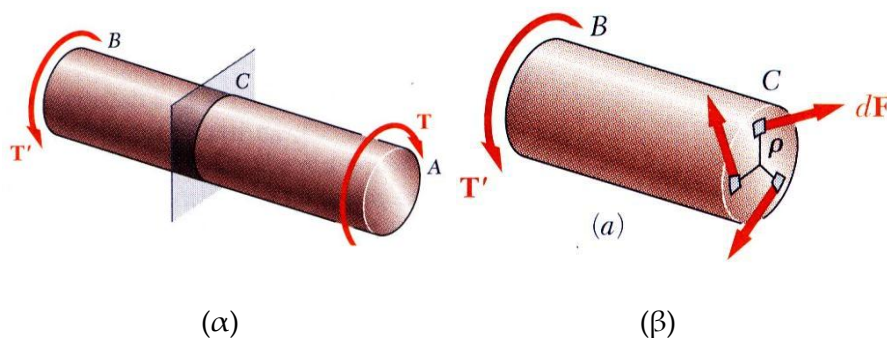
Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η μεθοδολογία υπολογισμού της ροπής T από την ανηγμένη παραμόρφωση στην επιφάνεια του άξονα (τροπή). Η τροπή μετρείται με την κατάλληλη εφαρμογή μηκυνσιομέτρων.

Θεωρούμε ότι το διάνυσμα της ροπής είναι παράλληλο στον άξονα περιστροφής και ότι η επίδραση άλλων δυνάμεων είναι αμελητέα (πχ κάμψη άξονα λόγω βάρους). Σημειώνεται ότι η κατάλληλη χρήση των μηκυνσιομέτρων μπορεί να αντισταθμίσει την επίδραση άλλων δυνάμεων πέραν της ροπής (πχ κάμψη του άξονα όταν τα μηκυνσιόμετρα τοποθετηθούν αντιδιαμετρικά). Η μεθοδολογία που περιγράφεται, αναφέρεται σε κυκλικές συμπαγείς ή δακτυλιοειδείς διατομές από ομογενές και ισότροπο υλικό, που υπόκειται σε τάσεις εντός της ελαστικής περιοχής (μικρότερες της τάσης διαρροής) [A.1], συνθήκες που συνήθως πληρούνται στις εφαρμογές μετάδοσης ισχύος που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή.

Επιπλέον γίνεται χρήση των αναπόδεικτων υποθέσεων ότι:

1. οποιαδήποτε ακτίνα τυχούσας κυκλικής διατομής παραμένει ευθύγραμμη μετά την ανάπτυξη της ροπής στρέψης,
2. οποιαδήποτε διατομή παραμένει επίπεδη μετά την ανάπτυξη της ροπής στρέψης, και
3. η γωνία στρέψης είναι σταθερή.

A.1 Ανάλυση της ροπής σε διατμητικές τάσεις



Σχήμ. 9-1 (α) Τομή σε άτρακτο που υπόκειται σε ζεύγος ροπών. (β) ανάλυση εσωτερικής ροπής σε διατμητικές τάσεις [A.2].

Θεωρούμε μια τομή κάθετη στον άξονα ατράκτου **AB**, η οποία υπόκειται στα σημεία **A** και **B** σε ίσες και αντίθετες ροπές στρέψης **T** και **T'**, Σχήμ. 9-2 (α). Από τις συνθήκες ισορροπίας προκύπτει ότι το σύστημα των κάθετων στην ακτίνα της ατράκτου στοιχειωδών δυνάμεων **dF**, Σχήμ. 9-2 (β), είναι ισοδύναμο με μια εσωτερική ροπή στρέψης **T**, ίσης και αντίθετης από την **T'**. Συμβολίζοντας με **ρ** την κάθετη απόσταση της δύναμης **dF** από τον άξονα της ατράκτου και ολοκληρώνοντας τις ροπές των τεμνουσών δυνάμεων **dF** συνάγεται η ακόλουθη σχέση :

$$\int \rho \cdot dF = T \quad (9-1)$$

Εκφράζοντας τις δυνάμεις **dF** σε διατμητικές τάσεις **τ** που επιδρούν σε στοιχείου εμβαδού **dA**, η ροπή στρέψης **T** εκφράζεται:

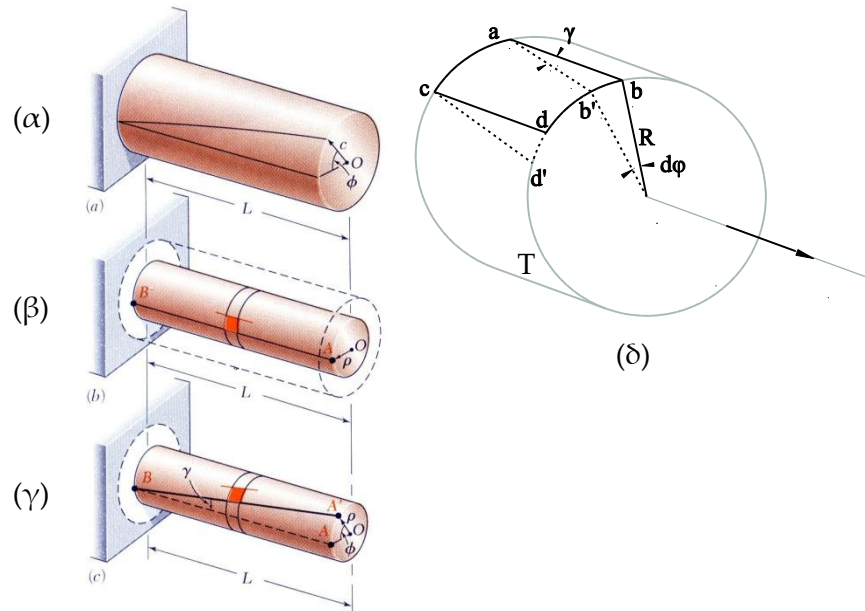
$$\int \rho \cdot \tau \cdot dA = T \quad (9-2)$$

A.2 Προσδιορισμός της διατμητικής ανηγμένης παραμόρφωσης

Για τον προσδιορισμό της κατανομής των διατμητικών τροπών (διατμητική ανηγμένη παραμόρφωση) σε μια κυκλική άτρακτο μήκους **L** και ακτίνας **c**, η οποία έχει υποστεί στρέψη κατά μια γωνία **φ**, Σχήμ. 9-2(α), θεωρούμε το εσωτερικό διαφορικό τετραγωνικό στοιχείο που σχηματίζεται από γειτονικούς κύκλους κάθετους στον άξονα της ατράκτου καθώς και δύο γενέτειρες παράλληλες στο άξονα, με απόσταση από αυτόν **ρ**, Σχήμ. 9-2(β). Καθώς η άτρακτος υποβάλλεται σε στρέψη, το στοιχείο παραμορφώνεται σε ρόμβο, Σχήμ. 9-2(γ).

Η διατμητική τροπή **γ** σε ένα δεδομένο στοιχείο υπολογίζεται από την μεταβολή των γωνιών που σχηματίζονται από τις πλευρές του στοιχείου. Επειδή οι κύκλοι που καθορίζουν δυο από τις πλευρές του στοιχείου παραμένουν αμετάβλητοι, σύμφωνα με την αυταπόδεικτη παραδοχή, η διατμητική τροπή **γ** πρέπει να είναι ίση με την γωνία μεταξύ των γραμμών **ab** και **ab'**. Για μικρές τιμές του **γ**, το μήκος του τόξου **AA'** μπορεί να εκφραστεί ως **AA'=L·γ**. Επιπλέον ισχύει ότι **A'A=ρ·dφ**, συνεπώς:

$$\gamma = \frac{\rho \cdot \varphi}{L} \quad (9-3)$$



Σχήμ. 9-2 Παραμορφώσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις διαφορικού στοιχείου στην επιφάνεια άξονα [A.2].

Από την Εξ. (9-3) προκύπτει επίσης ότι η διατμητική τροπή, γ , γίνεται μέγιστη στην επιφάνεια της ατράκτου, όπου $\rho=c$. Τότε έχουμε:

$$\gamma_{max} = \frac{c \cdot \varphi}{L} \quad (9-4)$$

Απαλείφοντας την γωνία στέψης ϕ από τις εξισώσεις (9-3) και (9-4) εκφράζεται η διατμητική τροπή γ συναρτήσει της απόστασης ρ από τον άξονα της ατράκτου, ως ακολούθως:

$$\gamma = \frac{\rho}{c} \gamma_{max} \quad (9-5)$$

A.3 Προσδιορισμός διατμητικών τάσεων

Σύμφωνα με τις παραδοχές στην αρχή της παραγράφου , το υλικό λειτουργεί κάτω από το όριο ελαστικότητας και συνεπώς ισχύει ο νόμος του Hooke επιτρέποντάς τη σύνδεση των διατμητικών τάσεων , τ , με τις διατμητικές τροπές, γ . Τα δυο μεγέθη είναι ανάλογα, με συντελεστή αναλογίας το μέτρο διάτμησης G , δηλαδή $\tau=\gamma \cdot G$. Έτσι, η εξίσωση (9-6) γίνεται:

$$\tau = \frac{\rho}{c} \tau_{max} \quad (9-6)$$

Αντικαθιστώντας το τ στην εξ.(9-2), έχουμε:

$$T = \int \rho \cdot \tau \cdot dA = \frac{\tau_{max}}{c} \cdot \int \rho^2 \cdot dA \quad (9-7)$$

Το ολοκλήρωμα στο τελευταίο μέλος παριστάνει την πολική ροπή αδρανείας J της εγκάρσιας διατομής ως προς τον άξονα της ατράκτου. Έτσι προκύπτει:

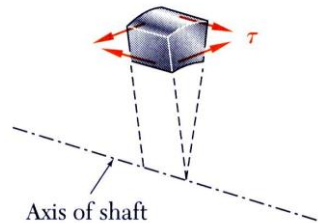
$$\tau_{max} = \frac{T \cdot c}{J}, \quad (9-8)$$

όπου J ,

$$J = \frac{1}{2} \pi \cdot (c^4 - c_0^4) \quad (9-9)$$

Το c_0 είναι η εσωτερική διάμετρος στην περίπτωση του κοίλους άξονα.

Η διατμητική τάση τ_{max} αναφέρεται στις επιφάνειες του στοιχείου που είναι κάθετες στον άξονα της ατράκτου. Όμως οι συνθήκες ισορροπίας ενός στοιχείου, Σχήμ. 9-3, απαιτούν την ύπαρξη ίσων τάσεων στις επιφάνειες του στοιχείου οι οποίες σχηματίζονται από τα δυο επίπεδα που περιέχουν το άξονα της ατράκτου.

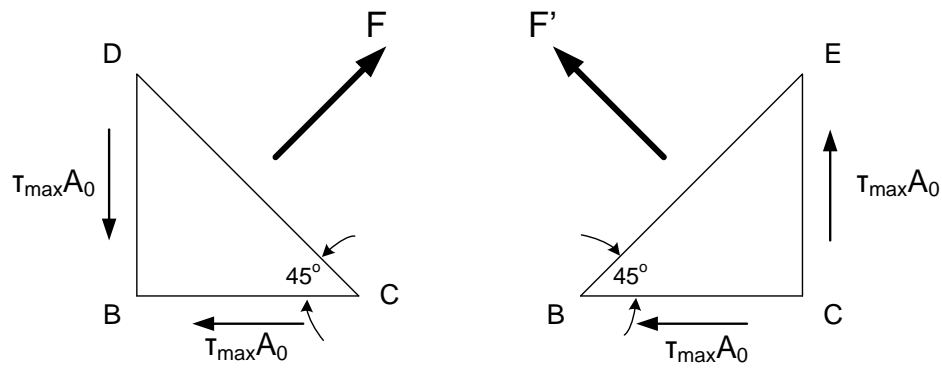


Σχήμ. 9-3 Ίσες τάσεις στις επιφάνειες του στοιχείου, ως προϋπόθεση ισορροπίας [A.2]

A.4 Προσδιορισμός ορθών τάσεων

Για τον υπολογισμό των ορθών τάσεων σε στοιχείο που σχηματίζει γωνία 45° με τον άξονα της ατράκτου, θεωρούνται τα τριγωνικά στοιχεία του Σχήμ. 9-4 και σχεδιάζονται τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος. Οι τάσεις που ασκούνται στις έδρες BC και BD είναι οι διατμητικές τάσεις τ_{max} , εξ. (9-8) Το μέτρο των τεμνουσών δυνάμεων είναι $\tau_{max}A_0$, όπου A_0 το εμβαδό της έδρας. Οι συνιστώσες επί της έδρας DC, είναι ίσες και αντίθετες. Συνεπώς η δύναμη F που ασκείται πάνω στη έδρα DC είναι κάθετη σε αυτήν, εφελκυστική και έχει μέτρο:

$$F = 2(\tau_{max}A_0)\cos 45^\circ = \tau_{max}A_0\sqrt{2} \quad (9-10)$$



Σχήμ. 9-4 Διαγράμματα ελευθέρου σώματος στοιχείου που σχηματίζει γωνία 45° με τον άξονα της ατράκτου

Η αντίστοιχη τάση ισούται με:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\tau_{max} A_0 \sqrt{2}}{A_0 \sqrt{2}} = \tau_{max} \quad (9-11)$$

Με όμοια ανάλυση του αριστερού τριγωνικού στοιχείου του Σχήμ. 9-4, προκύπτει ότι η τάση στην επιφάνεια BE είναι $\sigma = -\tau_{max}$. Συνεπώς σε διεύθυνση 45° ως προς τον άξονα της ατράκτου, επιδρούν μόνο ορθές τάσεις με μέτρο ίδιο με αυτό της διατμητικής τάσης που συνδέεται με την ροπή μέσω της εξ. (9-8). Έτσι μπορούμε να γράψουμε:

$$T = \frac{\sigma \cdot J}{c} \quad (9-12)$$

A.5 Υπολογισμός ορθών τάσεων από τις μετρήσιμες τροπές.

Από τις ίσες σε μέτρο τροπές ϵ_1 και ϵ_2 που προκαλούνται από την εφαρμογή ζεύγους ροπών T , Σχήμ. 5-3, μπορούν να υπολογιστούν οι ορθές τάσεις σ_1 και σ_2 , επίσης ίσες σε μέτρο, θεωρώντας διαξονική καταπόνηση με γνωστές τις βασικές κατευθύνσεις, ως εξής:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_1 + \nu \cdot \epsilon_2) \quad (9-13)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_2 + \nu \cdot \epsilon_1) \quad (9-14)$$

Γίνεται η υπόθεση ότι η τάση σ_3 , στην βασική κατεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια είναι μηδενική.

Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ισχύει:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \quad (9-15)$$

A.6 Ορολογία και Συμβολισμοί

Λατινικά Σύμβολα

A	Επιφάνεια (m ²)
c	Ακτίνα (m)
E	Μέτρο ελαστικότητας (N/m ²)
F	Δύναμη (N)
G	Μέτρο διάτμησης (Pa)
J	Ροπή αδράνειας (kg/m ²)
L	Μήκος (m)
T	Ροπή (Nm)

Ελληνικά Σύμβολα

γ	Διατμητική ανηγμένη παραμόρφωση (διατμητική τροπή) (rad)
ε	Ορθή ανηγμένη παραμόρφωση (τροπή, strain) (χωρίς μονάδα ή μm/m)
ν	Λόγος Poisson (-)
ρ	Ακτινική απόσταση (m)
σ	Ορθή τάση (N/m ²)
τ	Διατμητική τάση (N/m ²)
φ	Γωνία (rad)

Δείκτες

0	Αρχική τιμή
max	Μέγιστη τιμή

A.7 Βιβλιογραφία

- [A.1] F. P. Beer, κ.α., Μηχανική των υλικών, Εκδ. Τζιόλας, Θεσσαλονίκη, 2006
- [A.2] F.P. Beer, E.R. Johnston Jr., J.T. DeWolf, Mechanics of Materials, New York: McGraw-Hill, 1981

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΣΗΣ ΡΟΠΗΣ

B.1 Μονάδα μέτρησης και μετάδοσης

Η μονάδα μετρήσεων είναι τοποθετημένη πάνω στο περιστρεφόμενο άξονα και έχει σαν σκοπό την πραγματοποίηση της αναλογική μέτρησης και στην συνέχεια την ψηφιοποίηση και αποστολή του σήματος στην στατική βάση (μονάδα λήψης μετρήσεων). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των τμημάτων στα οποία συνίσταται, ενώ παραλείπονται σημαντικά στοιχεία που έχουν ήδη αναφερθεί στην §5.3.

B.1.1 Τμήμα Διαμόρφωσης και Ψηφιοποίησης

Το τμήμα διαμόρφωσης και ψηφιοποίησης διαμορφώνει και ψηφιοποιεί το σήμα στην έξοδο της διάταξης των μηχανομετρών. Η διαμόρφωση αφορά στην αλλαγή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του σήματος, όπως επιλογή συχνοτήτων, αλλαγή εμπέδισης και ενίσχυση, ενώ η ψηφιοποίηση στην δημιουργία ενός ψηφιακού κώδικα ισοδύναμου με το σήμα εισόδου την στιγμή της ψηφιοποίησης (χρησιμοποιώντας την τεχνολογία sample and hold) [5.12].

Η τροφοδοσία του τμήματος ρυθμίζεται από ανεξάρτητο ρυθμιστή τάσης. Μετά από την διέλευση του σήματος από χαμηλοπερατό φίλτρο αυτό στη συνέχεια ενισχύεται. Η ενίσχυση γίνεται με ρυθμιζόμενη από τον μικροεπεξεργαστή απολαβή (gain) και αντιστάθμιση (offset). Το ενισχυμένο σήμα οδηγείται στον αναλογοψηφιακό μετατροπέα, όπου ψηφιοποιείται με οδήγηση (χρονισμό) από τον μικροεπεξεργαστή. Η τάση αναφοράς του αναλογοψηφιακού μετατροπέα παρέχεται από εξειδικευμένο εξάρτημα, η πηγή τροφοδοσίας του οποίου είναι κοινή με αυτή του ενισχυτή.

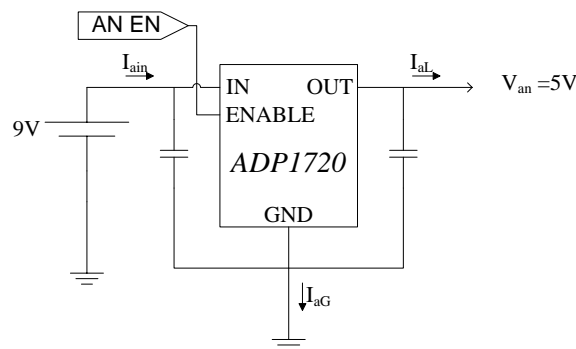
B.1.1.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας τμήματος διαμόρφωσης και ψηφιοποίησης

Το κύκλωμα παρέχει στο υπόλοιπο αναλογικό τμήμα ηλεκτρική τροφοδοσία. Για την απομόνωση του ηλεκτρικού θορύβου που προέρχεται από την λειτουργία των τρανζίστορ του ψηφιακού κυκλώματος, επιλέχθηκε η τροφοδοσία του τμήματος διαμόρφωσης και ψηφιοποίησης από ξεχωριστό κανονικοποιητή τάσης.

Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο χαμηλής ισχύος γραμμικός κανονικοποιητής (Micropower Linear Regulator) ADP1720 που κατασκευάζεται από την εταιρεία Analog Devices. Κριτήρια για την επιλογή του είναι το εύρος τάσης εισόδου, που

ικανοποιεί την τροφοδοσία του από μπαταρία 9V, σε συνδυασμό με την ικανότητά του να λειτουργεί σταθερά σε χαμηλά ρεύματα εξόδου. Σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι η σταθερότητα της τάσης εξόδου του σε μεταβολές θερμοκρασίας και ρεύματος, η οποία εξασφαλίζει την σταθερότητα στην λειτουργία όλου του αναλογικού κυκλώματος ενίσχυσης και ψηφιοποίηση. Ο κανονικοποιητής παρέχει επίσης προστασία από υπερφόρτωση και από διέλευση μεγάλου ρεύματος. Η δυνατότητά του για καθορισμό της τάσης εξόδου δεν χρησιμοποιήθηκε, καθώς συνδέθηκε σε συνδεσμολογία σταθερής τάσης εξόδου 5V. Αντίθετα χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα απενεργοποίησης, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση στα διαστήματα που δεν λαμβάνεται μέτρηση.

Στο Σχήμ. 9-5 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος. Η τροφοδοσία γίνεται απευθείας από μπαταρία. Ο έλεγχος της ενεργοποίησης γίνεται από τον επεξεργαστή (Παράγραφος Β.1.2.5), μέσω της σύνδεσης "AN EN". Η σταθερή λειτουργία του ADP1720 επιτυγχάνεται, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, με την χρήση πυκνωτών με κατώτατη τιμή 1 μF και ισοδύναμη αντίσταση (ESR) 500 m Ω , τοποθετημένους ως προς την γείωση στην είσοδο και την έξοδο. Το μέγιστο ρεύμα που υπολογίστηκε ότι διαρρέει το ολοκληρωμένο είναι αρκετά μικρό, οπότε δεν προκύπτει ανάγκη για ανάλυση της θερμικής του συμπεριφοράς. Όμως προβλέφτηκε τοποθέτηση μεγάλων επιφανειών χαλκού στα τερματικά του εξαρτήματος για αποβολή θερμότητας εφόσον αυτό απαιτηθεί.



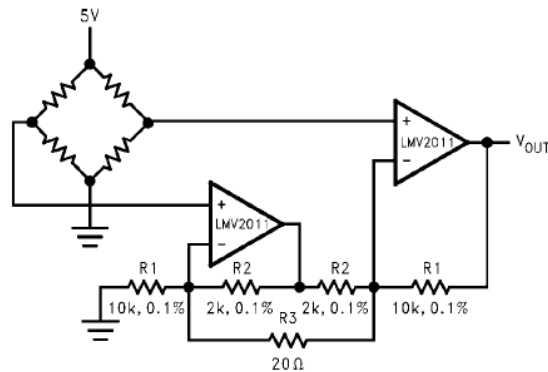
Σχήμ. 9-5 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος τροφοδοσίας του τμήματος διαμόρφωσης και ψηφιοποίησης.

B.1.1.2 Κύκλωμα Διαμόρφωση Σήματος

Το κύκλωμα φροντίζει για την ενίσχυση και το «φιλτράρισμα» του πρωτογενούς σήματος (διαμόρφωση σήματος) πριν την είσοδό του στον αναλογοψηφιακό μετατροπέα. Η διαμόρφωση του σήματος είναι ίσως το κρισιμότερο σημείο για την ορθή μέτρηση του σήματος εξόδου της διάταξης των μηχανοσυστημάτων. Τα συνήθη προβλήματα σχετίζονται με [5.12]:

1. Τη αστάθεια και τη μετακίνηση (drift) σαν αποτέλεσμα εξωγενών παραγόντων, με σημαντικότερη την μεταβολή της θερμοκρασίας.

2. Το δυναμικό εύρος και την μη-γραμμικότητα στα όρια του
3. Την ανακρίβεια στον υπολογισμό αναλογικών μεγεθών (ενίσχυση)
4. Το εύρος συχνοτήτων σήματος εισόδου



Σχήμ. 9-6 Αρχική λύση για την ενίσχυση του σήματος της διάταξης των μηκυνσιομέτρων

Σε πρώτη φάση της ανάπτυξης επιλέχθηκε μια λύση η οποία αφορούσε αμιγώς την ενίσχυση και μάλιστα με σταθερή απολαβή (gain) και αντιστάθμιση (offset), Σχήμ. 9-6. Η λειτουργία της κρίθηκε γενικά πολύ καλή. Όμως σε ορισμένες συνθήκες άρχισαν να εμφανίζονται τα παραπάνω προβλήματα 1, 3, 4. Η πρώτη προσέγγιση για την λύση των προβλημάτων ήταν να αντιμετωπιστούν κατά περίπτωση. Δηλαδή:

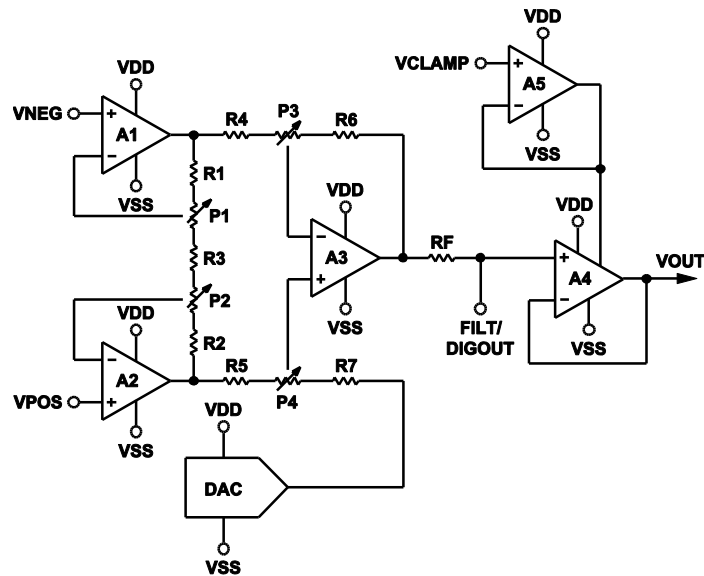
- ♦ να προστεθεί ένα φίλτρο,
- ♦ οι αντιστάσεις που καθορίζουν την απολαβή (gain) να γίνουν μεταβλητές ελεγχόμενες από τον επεξεργαστή, αντιμετωπίζοντας έτσι και το πρόβλημα της θερμοκρασιακής αστάθειας.

Η προσέγγιση αυτή εγκαταλείφθηκε επειδή θα αύξανε σημαντικά την πολυπλοκότητα και το μέγεθος. Όμως βρέθηκε νέα ολοκληρωμένη λύση που περιελάμβανε την προηγούμενη προσέγγιση.

Το ολοκληρωμένο εξάρτημα AD8555 της εταιρείας Analog Devices [B.3], είναι ένας ενισχυτής με ψηφιακά προγραμματιζόμενη απολαβή και αντιστάθμιση. Η ενίσχυση (gain) ρυθμίζεται από το 70 έως το 1280 και η αντιστάθμιση (offset) από 0 έως 5 V. (Η διαδικασία προγραμματισμού περιγράφεται στην §Γ.9). Επιπλέον διαθέτει κυκλώματα αυτόματου μηδενισμού και τεχνολογία έλεγχου των ρευμάτων έτσι ώστε να παρουσιάζει μηδενική μετακίνηση (drift). Σημαντικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι η αβεβαιότητα της τάσης αντιστάθμισης, την οποία ο κατασκευαστής δίνει προσεγγιστικά, επιβεβαιώνοντας όμως την μονοτονία της, συναρτήσει της επιβαλλόμενης ρύθμισης. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με την βαθμονόμηση παραλληλισμού (παράγραφος 5.2.3).

Το σχηματικό διάγραμμα που περιγράφει την λειτουργία του ολοκληρωμένου εξαρτήματος φαίνεται στο Σχήμ. 9-7 [B.3] και επεξηγείται στην

συνέχεια. Το κύκλωμα μέσα στο οποίο χρησιμοποιείται το εξάρτημα φαίνεται στο Σχήμ. 9-8.



Σχήμ. 9-7 Σχηματικό διάγραμμα AD855 [B.3]

Ένα σύνηθες μη επιθυμητό φαινόμενο στους τελεστικούς ενισχυτές, είναι η ανόρθωση του υψίσυχνου θορύβου σε μια σταθερή συνιστώσα, η οποία μετράται αλλά δεν αποτελεί μέρος του επιθυμητού για μέτρηση σήματος [B.4, B.5]. Το σήμα (V_{0+} , V_{0-} , Σχήμ. 5-2 και Σχήμ. 5-3) από την διάταξη των μηκυνσιομέτρων, πριν από την είσοδο στον ολοκληρωμένο ενισχυτή, υποβάλλεται σε φιλτράρισμα υψηλών συχνοτήτων από το δικτύωμα R1-C9 και R2-C10 τα οποία εξασθενούν κατά 3dB τις συνιστώσες μεγαλύτερες από 4kHz. Ο πυκνωτής C3 χρησιμοποιείται για να διατηρήσει τον αποκλεισμό κοινού σήματος (common mode rejection) στις χαμηλές συχνότητες, σχηματίζοντας ένα δεύτερο χαμηλοπερατό φίλτρο με τα στοιχεία R1+R2 – C3.

Απαλλαγμένο από υψίσυχνο θόρυβο το σήμα εισέρχεται στον ολοκληρωμένο διαφορικό ενισχυτή από τους ακροδέκτες VPOS και VNEG. Τα στοιχεία A1, A2, R1, R2, R3, P1 και P2 σχηματίζουν το πρώτο στάδιο απολαβής του διαφορικού ενισχυτή. Οι τελεστικοί ενισχυτές P1 και P2 είναι αυτό-μηδενιζόμενοι μειώνοντας το σφάλμα αντιστάθμισης στην είσοδο. Τα ποτενσιόμετρα P1 και P2 προγραμματίζονται ψηφιακά προσφέροντας το πρώτο στάδιο της απολαβής από 4 έως 6.4 με ανάλυση 7-bit. Η απολαβή πρώτου σταδίου GAIN1, περιγράφεται από την εξίσωση:

$$GAIN1 = 4 \cdot \left(\frac{6.4}{4}\right)^{\frac{G1}{127}} \quad (9-16)$$

Η παράμετρος G1 προγραμματίζεται στο ολοκληρωμένο από τον επεξεργαστή (§Γ.9).

Τα στοιχεία A3, R4, R5, R6, R7, P3 και P4 σχηματίζουν το δεύτερο στάδιο απολαβής του διαφορικού ενισχυτή. Ο τελεστικός ενισχυτής P3 είναι επίσης αυτό-μηδενιζόμενος. Τα ποτενσιόμετρα P3 και P4 προγραμματίζονται ψηφιακά προσφέροντας το δεύτερο στάδιο της απολαβής από 17,5 έως 200 με ανάλυση 3-bit. Η απολαβή δευτέρου σταδίου GAIN2 σαν συνάρτηση της προγραμματιζόμενης παραμέτρου G2 δίνεται στον Πίνακ. Β-1.

Πίνακ. Β-1 Η απολαβή δευτέρου σταδίου συναρτήσει της παραμέτρου G2

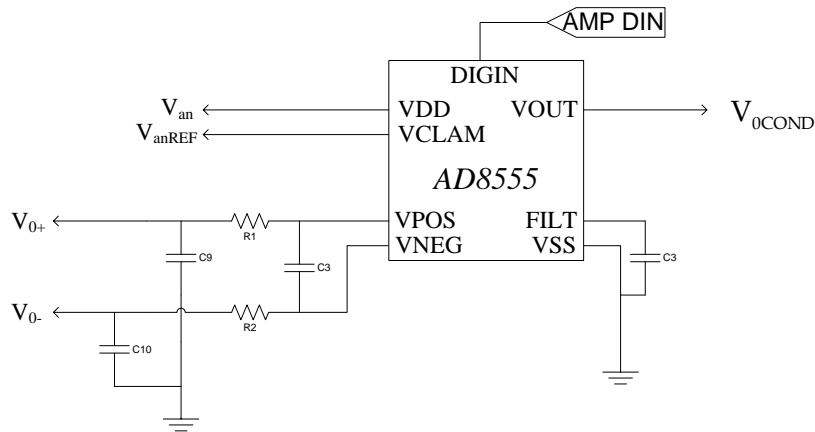
Παράμετρος G2	Απολαβή GAIN2
0	17.5
1	25
2	35
3	50
4	70
5	100
6	140
7	200

Για την παραγωγή μεταβλητής τάσης αντιστάθμισης στην έξοδο του ενισχυτή χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (DAC). Η τάση εξόδου δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{DAC} \approx \left(\frac{OffCode + 0.5}{256} \right) * 5 \quad (9-17)$$

Η αντίσταση RF του Σχήμ. 9-7 σε συνδυασμό με τον πυκνωτή που είναι συνδεδεμένος στην έξοδο "FILT" του ολοκληρωμένου (Σχήμ. 9-8) σχηματίζουν ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με κατώφλι το 1kHz. Το φιλτραρισμένο σήμα διέρχεται από το Buffer A4 για να μειωθεί η εμπέδισή του και να περιοριστεί το πλάτος του στην τιμή της τάσης αναφοράς ψηφιοποίησης VCLAM = V_{anREF} (Σχήμ. 9-7 και Σχήμ. 9-8 αντίστοιχα). Το σήμα V_{0COND} που εξέρχεται από την VOUT είναι ενισχυμένο, φιλτραρισμένο και θα οδηγηθεί στο αναλογοψηφιακό μετατροπέα. Η συνολική ενίσχυση είναι το γινόμενο της απολαβής πρώτου και δεύτερου σταδίου. Τελικά, η τάση εξόδου, V_{0COND}, εκφράζεται συναρτήσει της τάσης εισόδου V_{POS}-V_{NEG}, των δυο συντελεστών απολαβής, GAIN1 και GAIN2, και της τάσης αντιστάθμισης V_{DAC}:

$$V_{0COND} = GAIN1 GAIN2 (V_{POS} - V_{NEG}) + V_{DAC} \quad (9-18)$$



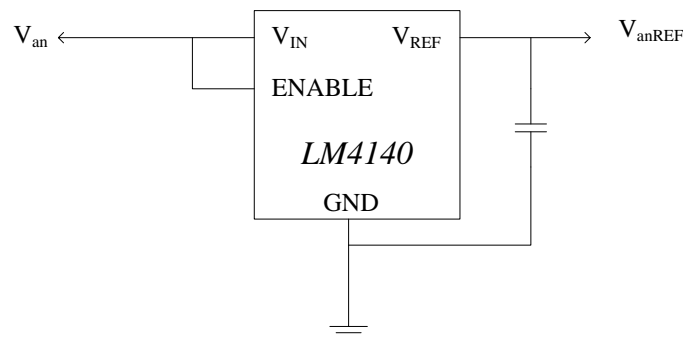
Σχήμ. 9-8 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διαμόρφωσης σήματος

B.1.1.3 Τάση αναφοράς ψηφιοποίησης

Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας συγκρίνει την τιμή προς ψηφιοποίηση με μια σταθερά (τάση αναφοράς) για να δημιουργήσει ένα ψηφιακό κώδικα. Πολύ σημαντική είναι η ακρίβεια και η σταθερότητα της τάσης αναφοράς. Γι αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκε το εξάρτημα LM4140 της εταιρείας National Semiconductors [B.6] . Πρόκειται για ένα εξάρτημα που παρέχει τάση αναφοράς εμφανίζοντας τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ◆ υψηλή ακρίβεια,
- ◆ χαμηλό θόρυβο,
- ◆ χαμηλή κατανάλωση (μικρές απώλειες)
- ◆ χαμηλή μετακίνηση (*drift*)

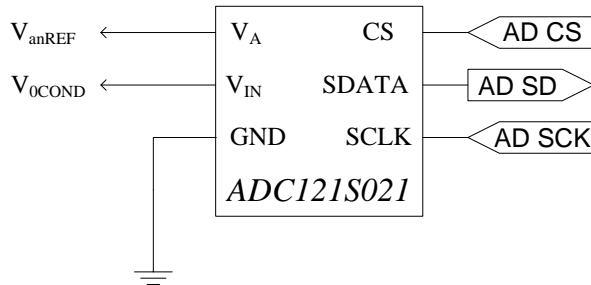
Η τάση αναφοράς είναι $V_{anREF}=4.096\text{ V}$ (Σχήμ. 9-9), με ακρίβεια 0.1% και συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής 10 ppm/°C . Στην έξοδο V_{REF} έχει τοποθετηθεί πυκνωτής ειδικού τύπου, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή [B.6].



Σχήμ. 9-9 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος τάσης αναφορά ψηφιοποίησης

B.1.1.4 Κύκλωμα ψηφιοποίησης

Για την ψηφιοποίηση του διαμορφωμένου σήματος χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα αναλογοψηφιακής μετατροπής ADC121S021 της εταιρείας National Semiconductors [B.7]. Πρόκειται για ένα μετατροπέα 12-bit, με ενσωματωμένο κύκλωμα λήψης και διατήρησης δείγματος που ψηφιοποιεί με ρυθμό από 50 ksps έως 200 ksps. Η μετατροπή γίνεται με την μέθοδο διαδοχικής προσέγγισης.



Σχήμ. 9-10 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ψηφιοποίησης

Στο Σχήμ. 9-10 φαίνεται η συνδεσμολογία του μετατροπέα. Το σήμα V_{anREF} είναι η τάση αναφοράς, με την οποία γίνεται η σύγκριση για την δημιουργία ψηφιακού κώδικα και χρησιμοποιείται επίσης για την τροφοδοσία του εξαρτήματος. Το σήμα V_{oCOND} είναι το διαμορφωμένο σήμα προς ψηφιοποίηση. Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στην παροχή χρονισμού από τον μικροεπεξεργαστή, μέσω της διασύνδεσης “AD SCL”. Η έναρξη κάθε μετατροπής ελέγχεται από την διασύνδεση “AD CS”, ενώ ο ψηφιοποιημένος κώδικας μεταφέρεται μέσω της διασύνδεσης “AD SD”. Η διαδικασία χρονισμού και λήψης μετρήσεων περιγράφεται στην §Γ.12.

Ο ψηφιακός κώδικας, M , που παράγεται, εκφράζει την τάση προς ψηφιοποίηση V_{oCOND} ως προς την τάση αναφοράς V_{anREF}

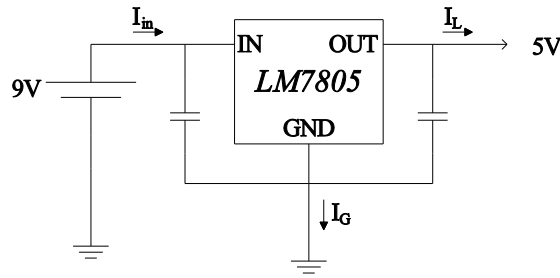
$$M = \frac{255 V_{oCOND}}{V_{anREF}} \quad (9-19)$$

B.1.2 Τμήμα Λειτουργίας

B.1.2.1 Κύκλωμα τροφοδοσίας τμήματος λειτουργίας και μηχανομετρών

Το κύκλωμα τροφοδοσίας παρέχει τάση 5V σε ολόκληρο το τμήμα. Σαν ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιήθηκε ο LM7805, με τάση εξόδου τα 5V [B.8]. Σκοπός του είναι η παροχή σταθερής τάσης στα υπόλοιπα εξαρτήματα του τμήματος. Επιπλέον προστατεύει με περιορισμό ρεύματος στην περίπτωση κάποιου βραχυκυκλώματος. Η μονάδα τροφοδοτείται με μπαταρία, οπότε ο

ρόλος του τμήματος είναι περιορισμένος, καθώς δεν τίθεται θέμα θορύβου από την τροφοδοσία.

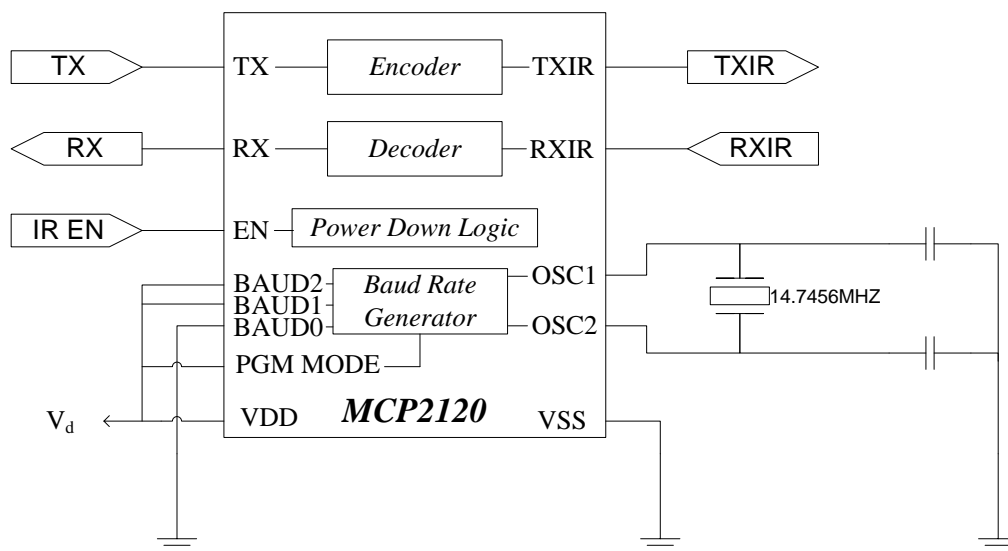


Σχήμ. 9-11. Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος τροφοδοσίας των τμημάτων λειτουργίας και μηκυνσιομέτρων

Στο Σχήμ. 9-11 φαίνεται η συνδεσμολογία του ολοκληρωμένου κυκλώματος LM7805. Η τροφοδότησή του γίνεται απευθείας από την μπαταρία. Στην είσοδο και στην έξοδό του έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές, ακολουθώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή.

B.1.2.2 Κύκλωμα διαμόρφωσης στο πρότυπο υπέρυθρης μετάδοσης

Το κύκλωμα μετατρέπει το σειριακό σήμα του μικροελεγκτή σε σήμα κατάλληλο για υπέρυθρη μετάδοση. Βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP2120 της εταιρείας Microchip [B.10], που είναι ένας αμφίδρομος μετατροπέας μεταξύ ασύγχρονου σειριακού σήματος [B.9] και του πρωτοκόλλου μεταφοράς δεδομένων IrDA [B.11].

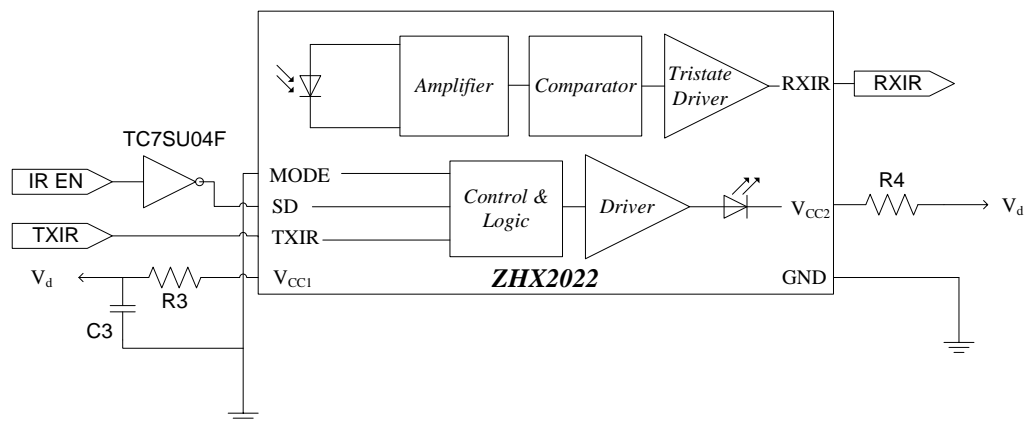


Σχήμ. 9-12 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διαμόρφωσης στο πρωτόκολλο υπέρυθρης μετάδοσης

Η ρύθμιση της ταχύτητας διαμόρφωσης γίνεται από την ενσωματωμένη γεννήτρια ρυθμού μεταφοράς (baud rate generator) είτε στατικά μέσω συγκεκριμένης συνδεσμολογίας, είτε δυναμικά προγραμματιζόμενη από τον μικροεπεξεργαστή. Στην παρούσα εφαρμογή ρυθμίστηκε στατικά, μέσω του κώδικα [BAUD2:BAUD0]=011 στους αντίστοιχους ακροδέκτες (Σχήμ. 9-12). Η ρύθμιση αυτή σε συνδυασμό με τον κρύσταλλο των 14.7456 MHz έχει σαν αποτέλεσμα την λειτουργία του μετατροπέα στην μέγιστη εγγυημένη ταχύτητα διαμόρφωσης, τα 115.2 kbaud. Η σύνδεση με τον μικροελεγκτή, ο οποίος φυσικά πρέπει να είναι ρυθμισμένος στην ίδια ταχύτητα ασύγχρονης μετάδοσης, γίνεται μέσω των διασυνδέσεων "TX" και "RX". Η σύνδεση με τον πομποδέκτη υπερέυθρων γίνεται μέσω των διασυνδέσεων "TXIR" και "RXIR". Η διασύνδεση "IR EN" γίνεται με τον μικροεπεξεργαστή. Όταν η αντίστοιχη έξοδος του επεξεργαστή είναι λογικό ένα, τότε ο μετατροπέας λειτουργεί, αλλιώς βρίσκεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης.

B.1.2.3 Κύκλωμα Πομποδέκτη Υπερέυθρων

Το κύκλωμα αποτελείται από τους ασύρματους πομποδέκτες για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων. Το εξάρτημα ZHX2022 της εταιρείας Zilog [B.12] συνδυάζει μια δίοδο εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας με τον οδηγό της και μια φωτοδίοδο ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας με το κύκλωμα διαμόρφωσης και ενίσχυσης.

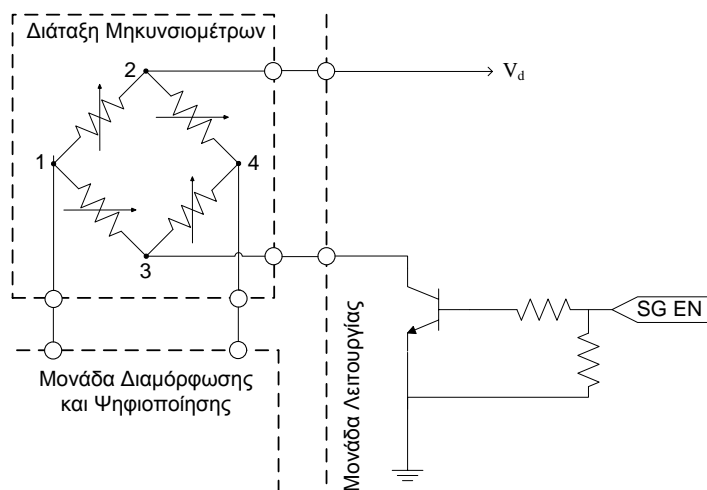


Σχήμ. 9-13 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος πομποδέκτη υπερέυθρων

Στο Σχήμ. 9-13 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του πομποδέκτη. Το τερματικό V_{CC1} είναι για την τροφοδοσία του κυκλώματος (V_d). Ακολουθήθηκε η προτροπή του κατασκευαστή για τοποθέτηση χαμηλοπερατού φίλτρου ($R3 - C3$). Το ληφθέν από την φωτοευαίσθητη δίοδο σήμα, διαμορφώνεται σύμφωνα με το πρότυπο υπέρυθρης μετάδοσης και οδηγείται

στον μετατροπέα σειριακού σήματος (§B.1.2.2) μέσω της διασύνδεσης “RXIR”. Το σήμα προς εκπομπή έρχεται διαμορφωμένο μέσω της διασύνδεσης “TXIR”, και οδηγεί την διόδο εκπομπής. Η τροφοδοσία της διόδου εκπομπής γίνεται ξεχωριστά από την τροφοδοσία του υπόλοιπου κυκλώματος, μέσω του τερματικού V_{CC}. Τοποθετείται σε σειρά αντίσταση R4 για το περιορισμό του ρεύματος που διαρρέει την φωτοδίοδο. Η έξοδος “MODE” χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ταχύτητας λειτουργίας. Δίνοντας λογικό “0”, ο πομποδέκτης λειτουργεί στο πρότυπο SIR, για ταχύτητες μέχρι 115.2 kBaud. Για τον περιορισμό της κατανάλωσης, χρησιμοποιείται η λειτουργία απενεργοποίησης, μέσω του τερματικού “SD”. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια διασύνδεση με τον επεξεργαστή “IR EN” για την απενεργοποίηση του τμήματος διαμόρφωσης και του πομποδέκτη. Για το πρώτο κύκλωμα λογικό “ένα” σημαίνει ενεργοποίηση ενώ για το δεύτερο απενεργοποίηση. Γι αυτόν το λόγο αντιστρέφεται το σήμα πριν την είσοδό του στον πομποδέκτη από την πύλη “NOT” με κωδικό “TC7SU04F”.

B.1.2.4 Κύκλωμα ελέγχου διάταξης μηχανομετρών



Σχήμ. 9-14 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου μηχανομετρών

Η διάταξη των μηχανομετρών έχει συνολική αντίσταση περίπου 350 Ω, συνεπώς η λειτουργίας τους απαιτεί ρεύμα έντασης περίπου 14 mA. Για την μείωση της κατανάλωσης της μονάδας τοποθετήθηκε διπολική κρυσταλλοτρίοδος επαφής (BJT) τύπου NPN σε διάταξη διακόπτη κοινού εκπομπού [B.9]. Στο Σχήμ. 9-14 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος, το οποίο οδηγείται από τον μικροελεγκτή μέσω της διασύνδεσης “SG EN”.

B.1.2.5 Μικροελεγκτής και περιφερειακά βοηθητικά κυκλώματα

Ο μικροελεγκτής “ATtiny2313” της εταιρείας “ATMEL” είναι βασισμένος στην αρχιτεκτονική RISC, με 120 εντολές οι περισσότερες των οποίων εκτελούνται σε ένα κύκλο ρολογιού. Διαθέτει 32 γενικής χρήσης καταχωρητές των 8 bits που συνδέονται στην Αριθμητική και Λογική Μονάδα (ALU) και κατά συνέπεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σαν έντελα στις εντολές του μικροελεγκτή. Επιπλέον υπάρχει καταχωρητής κατάστασης (Status), Μετρητής Προγράμματος (Program Counter – 10bits) καθώς και κάποιοι καταχωρητές ειδικής χρήσης όπως για τον προγραμματισμό της Flash ή την αποκωδικοποίηση των εντολών.

Στην εσωτερική αρτηρία των 8-bit, η οποία προσπελαύνει τους γενικής και ειδικής χρήσης καταχωρητές, συνδέονται επίσης και τα περιφερειακά :

- ◆ Οι δυο μετρητές/χρονιστές 8-bit και 16bit και ο ρολόι ελέγχου (Watchdog Timer),
- ◆ η EEPROM,
- ◆ το τμήμα χειρισμού διακοπών (*interrupt unit*) με 19 διανύσματα διακοπής,
- ◆ οι διασυνδέσεις SPI και USART και
- ◆ η λογική για τις θύρες A, B και D οι οποίες παρέχουν 18 ακροδέκτες γενικού σκοπού.

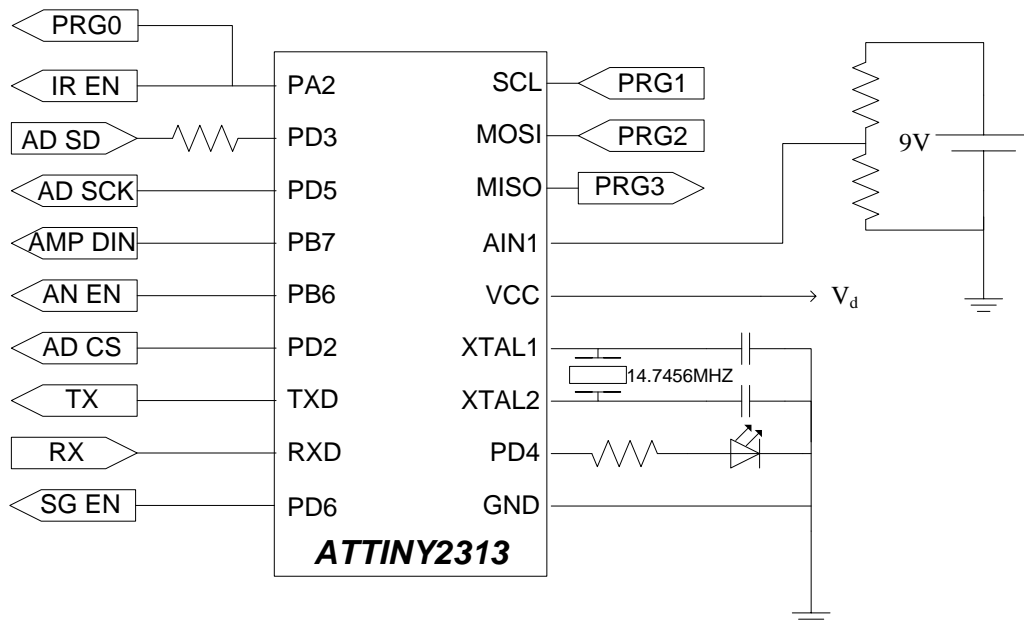
Οι 18 ακροδέκτες γενικού σκοπού είναι πολυπλεγμένοι με περισσότερες από μία λειτουργίες, όπως:

- ◆ είσοδοι με ικανότητα να προκαλούν διακοπή (*interrupt*) στην ροή του προγράμματος,
- ◆ είσοδοι αναλογικών συγκριτών,
- ◆ είσοδοι μετατροπέων αναλογικού σε ψηφιακό (ADC),
- ◆ είσοδοι κεντρικού ρολογιού (*oscillator*)
- ◆ είσοδοι ασύγχρονης οδήγησης μετρητών (*counters*),
- ◆ ακροδέκτες για σύνδεση με διεπαφές όπως USART και SPI

Ο μικροελεγκτής έχει ενσωματωμένη μνήμη Flash 2Kbytes για την αποθήκευση του λογισμικού (*firmware*), μνήμη RAM 128 byte και μνήμη EEPROM 128 byte.

Στο Σχήμ. 9-15 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα με τις συνδέσεις του μικροελεγκτή. Η τροφοδοσία του γίνεται από το σήμα V_a. Σαν ρολόι συστήματος έχει χρησιμοποιηθεί εξωτερικός κρύσταλλος 14.7456 MHz. Στον ακροδέκτη 4 της θύρας D (D4), έχει τοποθετηθεί ενδεικτική φωτοδίοδος σε σειρά με αντίσταση για τον περιορισμό του ρεύματος. Χρησιμοποιείται ο αναλογικός συγκριτής “AIN1”, (που αποτελεί εναλλακτική χρήση του ακροδέκτη PB1) σε συνδυασμό με διαιρέτη τάσης για την ανίχνευση της τάσης της μπαταρίας τροφοδοσίας. Χρησιμοποιούνται οι εναλλακτικές χρήσης των ακροδεκτών PD0 και PD1 για την

λήψη και αποστολή ασύγχρονων σειριακών συμβολοσειρών μέσω των διασυνδέσεων “RX” και “TX”. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έγινε σειριακά μέσω της αρτηρίας SPI, χρησιμοποιώντας τις διασυνδέσεις “PRG0”, “PRG1”, “PRG2”, “PRG3”. Επιπλέον χρησιμοποιούνται 7 ακροδέκτες σαν γενικής χρήσης είσοδοι/ έξοδοι.



Σχήμ. 9-15 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος μικροελεγκτή

B.2 Μονάδα λήψης μετρήσεων

B.2.1 Τμήμα τροφοδοσίας

Η τροφοδοσία των μονάδων γίνεται από τρία τροφοδοτικά με εξόδους $V_{CC1}=5V$, $V_d=5V$ και $V_{CC2}=3.6V$. Οι διατάξεις των πρώτων δυο τροφοδοτικών είναι όμοιες με αυτήν που περιγράφεται στην παράγραφο B.1.2 . Το τρίτο τροφοδοτικό βασίζεται στο ολοκληρωμένο LM317 σε ίδια διάταξη με τις προηγούμενες και επιπλέον την προσθήκη δυο αντιστατών που ρυθμίζουν την τάση εξόδου στα 3.6 V. Η χρήση τριών διαφορετικών τροφοδοτικών έγινε για την απομόνωση του ψηφιακού θορύβου και την ελαχιστοποίηση των εξαρτημάτων στους πομποδέκτες.

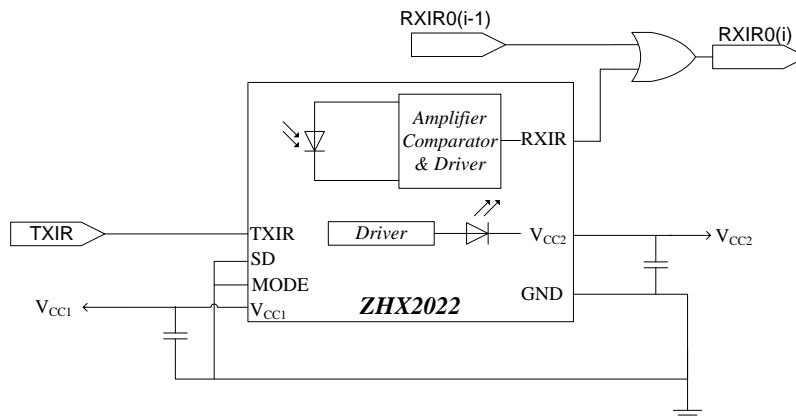
B.2.2 Συστοιχία πομποδεκτών – τμήμα πομποδέκτη

Οι μετρήσεις αποστέλλονται ασύρματα από την μονάδα μέτρησης και μετάδοσης (§5.3.1 και §B.1), η οποία είναι τοποθετημένη και περιστρέφεται μαζί με τον άξονα. Η λήψη γίνεται από συστοιχία πομποδεκτών υπερέθρων η οποία είναι τοποθετημένη περιμετρικά από τον άξονα. Ανάλογα με την γωνία του

άξονα, τα δεδομένα που στέλνονται από την περιστρεφόμενη μονάδα προσπίπτουν σε πομποδέκτες της συστοιχίας λήψης που βρίσκονται στην αντίστοιχη θέση. Η εκπεμπόμενη δέσμη είναι δυνατόν να προσβάλει ταυτόχρονα παραπάνω από έναν πομποδέκτη της συστοιχίας λήψης. Έτσι, διαφορετικά τμήματα του σήματος λαμβάνονται από διαφορετικούς πομποδέκτες. Για αυτόν τον λόγο οι πομποδέκτες έχουν συζευχθεί με λογικές πύλες που ανασυνθέτουν το σήμα.

Η φωτοηλεκτρική ανάλυση που καθορίζει τον αναγκαίο αριθμό πομποδεκτών της συστοιχίας έχει περιγραφεί στην §5.3.3.

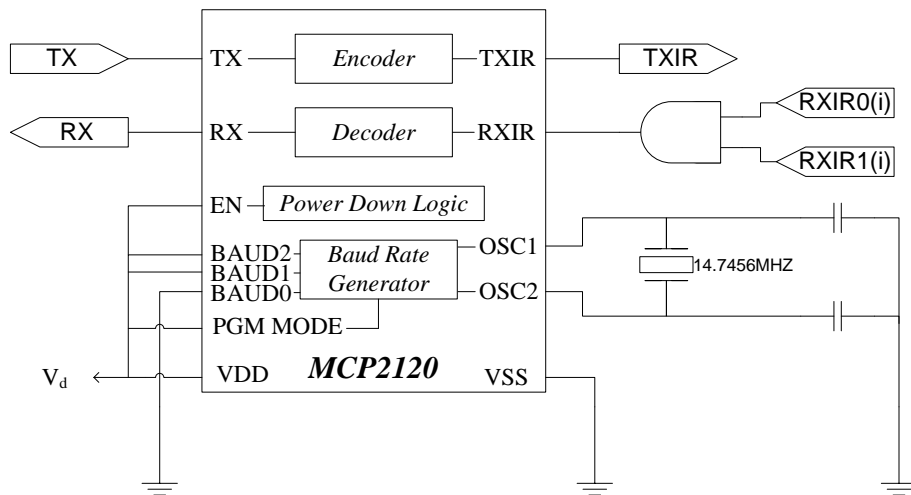
Στο Σχήμ. 9-16 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του τμήματος του πομποδέκτη. Η διάταξη είναι σχεδόν όμοια με την αντίστοιχη της μονάδας μέτρησης και μετάδοσης (§B.1.2.3). Η πρώτη διαφορά έγκειται στην ξεχωριστή τροφοδοσία, V_{CC2} , της διόδου εκπομπής που γίνεται με σκοπό την μείωση των εξαρτημάτων πάνω σε κάθε πομποδέκτη της συστοιχίας. Η δεύτερη διαφορά είναι η ύπαρξη της λογικής πύλης που συνθέτει το λογικό σήμα από τα δεδομένα του κάθε δέκτη.



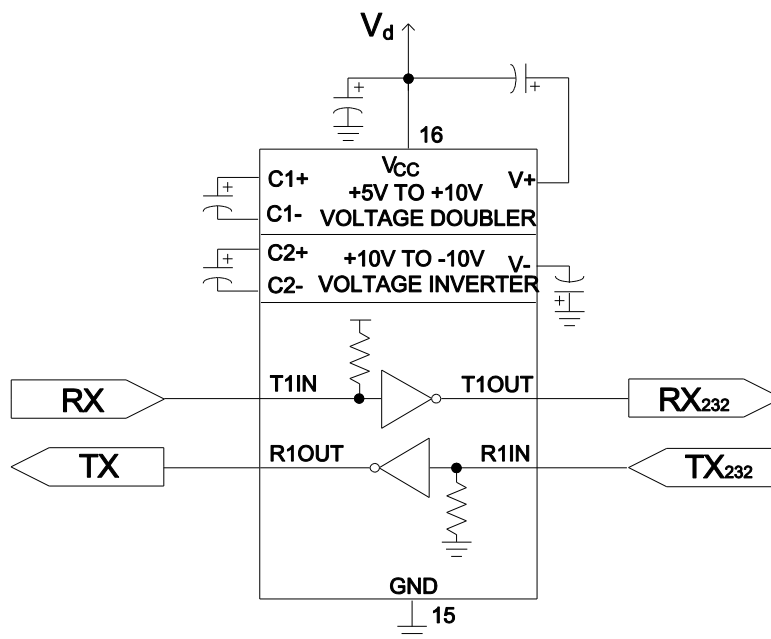
Σχήμ. 9-16 Σχηματικό διάγραμμα τμήματος πομποδέκτη λήψης μετρήσεων

B.2.3 Τμήμα διασύνδεσης

Το τμήμα διασύνδεσης εκτελεί την διαμόρφωση των σημάτων στο πρότυπο υπέρυθρης μετάδοσης και στην διαμόρφωση στο πρότυπο ασύγχρονης σειριακής μετάδοσης RS-232 [B.13], το οποίο είναι αναγνώσιμο από τον υπολογιστή [B.14]. Η διάταξη που επιτελεί την πρώτη λειτουργία είναι παντελώς όμοια με αυτήν που περιγράφεται στην παράγραφο B.1.2.2. Στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήμ. 9-17, φαίνονται οι διασυνδέσεις της με τα άλλα τμήματα της μονάδας. Για την δεύτερη λειτουργία χρησιμοποιείται το εξάρτημα MAX232 της εταιρείας MAXIM [B.15]. Οι διασυνδέσεις του και τα εξωτερικά εξαρτήματα φαίνονται στο Σχήμ. 9-18



Σχήμ. 9-17 Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας διαμόρφωσης σήματος στο πρότυπο υπέρυθρης μετάδοσης



Σχήμ. 9-18 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διαμόρφωσης / αποδιαμόρφωσης σειριακού σήματος στο πρότυπο RS-232.

B.2.4 Τμήμα συγχρονισμού

Για τον συγχρονισμό των μετρήσεων της ροπής με μετρήσεις από άλλες πηγές, παράγεται ένα σήμα αναφοράς που δίνει την αρχή και το τέλος της μέτρησης.

Στην κατάσταση ηρεμίας, το σήμα αυτό έχει την τιμή 0 volt. Όταν πρόκειται να ξεκινήσει η μέτρηση της ροπής, το σήμα αυτό παίρνει την τιμή 5

volt. Μόλις τελειώσει η μέτρηση, το σήμα επιστρέφει στην κατάσταση αναμονής, 0 volt. Οι εναλλαγές γίνονται με μεγάλη ακρίβεια.

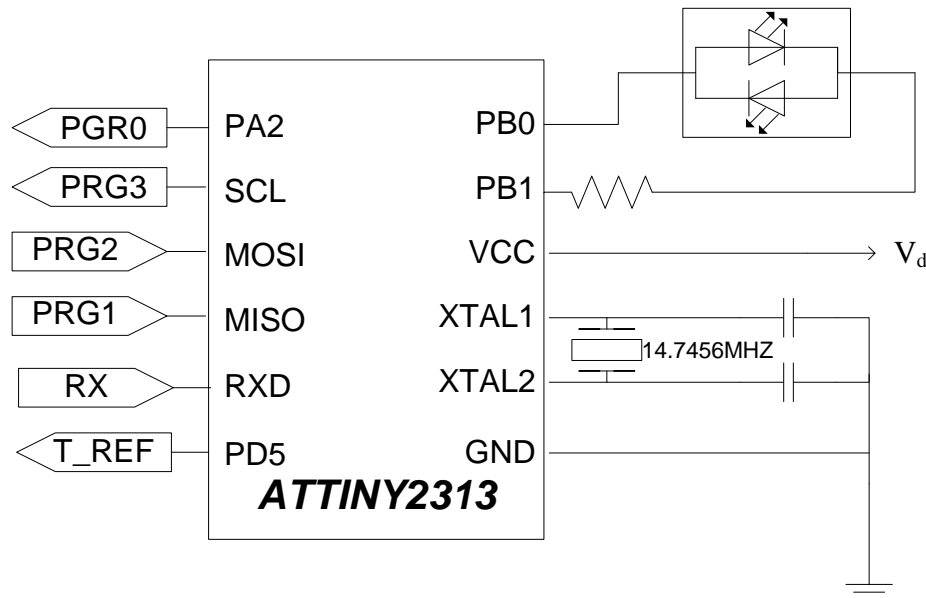
Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας που εκτελεί τις υπόλοιπες μετρήσεις (πχ δυναμοδεικτικό), μετρά και αυτό το σήμα αναφοράς. Η μέτρηση ξεκινά πριν και τελειώνει μετά την μέτρηση της ροπής. Το τμήμα της μέτρησης στο οποίο το σήμα αναφοράς είναι 5 volt γίνεται ταυτόχρονα με τη μέτρηση της ροπής.

Κώδικ. Β-1 Εκκίνηση ροής προγράμματος

```
.NOLIST
.INCLUDE "C:\2313def.inc"
.LIST
.DEF mp = R16
.def mp2=r17
.def was0 = r19
RJMP main
;reads from RxD
;it makes Pd5 on when it reads 250 after 0
;and turns it off when it reads the next byte
main :
;_____
ldi mp, RAMEND
out spl,mp
;_____
; Set baud rate 57.6 sta 14.xxxmhz: 15
115200-7
;initialize uart
ldi mp,14745600/(115200*16)-1
;set baud rate (fosc/16 BAUD)-1
clr mp2
out UBRRH, mp2;
out UBRRL, mp
ldi mp, (1<<RXEN)|(1<<TXEN);
Enable receiver and
transmitter
out UCSRB,mp
ldi mp, (1<<USBS)|(3<<UCSZ0);
Set frame format: 8data,
2stop bit
out UCSRC,mp
;kanei output to led(portd4)
ldi mp,0b00000011
out ddrb, mp
sbi portb,0 ;prasino
cbi portb,1 ;kokkino
;kanei output tin Pd5
sbi ddrd,5
cbi portd, 5
clr was0
loop:
receive :
sbis ucsra, rxc
rjmp receive
in mp, udr
cpi mp,0
breq is0
cpi mp, 250
breq is250
clr was0
rjmp loop
is250 :
cpi was0, 1
breq turnOnPd5
rjmp loop
is0 :
ldi was0, 1
rjmp loop
turnOnPd5 :
clr was0
sbis portd,5
rjmp Pd5on
cbi portd,5
sbi portb,0 ;prasino
cbi portb,1 ;kokkino
rjmp loop
Pd5on :
sbi portd,5
cbi portb,0 ;prasino
sbi portb,1 ;kokkino
rjmp loop
```

Για την δημιουργία του σήματος αναφοράς χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής ATtiny2313, η λειτουργία του οποίου περιγράφεται στην παράγραφο Β.1.2.5. Όπως φαίνεται στο Σχήμ. 9-19, ο μικροελεγκτής «υποκλέπτει» το σήμα "RX" με τις μετρήσεις. Όπως περιγράφεται στην παράγραφο Γ.12, η κάθε μέτρηση ξεκινά με την αποστολή της αλληλουχίας

τιμών 0 και 250 και τερματίζεται με την αποστολή των ίδιων τιμών. Ο μικροελεγκτής που επιτελεί τον συγχρονισμό, αντιλαμβάνεται αυτές τις αλληλουχίες και αντιστρέφει την κατάσταση της εξόδου "PD5". Οπότε κατά την έναρξη της μέτρησης η διασύνδεση "T_REF" παίρνει την τιμή λογικό "1" και κατά τον τερματισμό την τιμή λογικό "0". Κατά την διάρκεια της μέτρησης ενεργοποιεί πράσινο χρώμα σε LED, το οποίο σε κατάσταση αναμονής είναι κόκκινο. Ο Κώδικ. B-1 έχει προγραμματιστεί στον μικροελεγκτή και επιτελεί την ανωτέρω λειτουργία.



Σχήμ. 9-19 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος τμήματος συγχρονισμού

B.3 Ορολογία και Συμβολισμοί

Γραμμές δεδομένων και σήματα

AN EN	Σήμα ενεργοποίησης αναλογικού τμήματος
PRG0	Γραμμή SS δίαυλου SPI
PRG1	Γραμμή SCL δίαυλου SPI
PRG2	Γραμμή MOSI δίαυλου SPI
PRG3	Γραμμή MISO δίαυλου SPI
AMP DIN	Ψηφιακό σήμα προγραμματισμού του ενισχυτή
AD CS	Γραμμή ελέγχου δίαυλου I ² C
AD SD	Γραμμή δεδομένων δίαυλου I ² C
AD SCL	Γραμμή χρονισμού δίαυλου I ² C
AMP DIN	Ψηφιακή είσοδος προγραμματισμού ενισχυτή
AN EN	Ψηφιακή είσοδος ενεργοποίησης ενισχυτή

TX	Γραμμή αποστολής UART
TX ₂₃₂	Γραμμή αποστολής σειριακών δεδομένων στο πρότυπο RS-232
RX	Γραμμή λήψης UART
RX ₂₃₂	Γραμμή λήψης σειριακών δεδομένων στο πρότυπο RS-232
TXIR	Γραμμή αποστολής σειριακών δεδομένων πρωτόκολλου υπερέυθρων
RXIR	Γραμμή λήψης σειριακών δεδομένων πρωτόκολλου υπερέυθρων
RXIR0(i)	Γραμμή λήψης σειριακών δεδομένων πρωτόκολλου υπερέυθρων του δέκτη i της σειράς 0
IR EN	Σήμα ενεργοποίησης κυκλώματος πομποδέκτη
SG EN	Σήμα ενεργοποίησης διάταξης μηχανομετρών
T_REF	Ψηφιακό σήμα συγχρονισμού

Συμβολισμοί

C	Πυκνωτής (F)
M	Ψηφιακός κώδικας
R	Αντίσταση (Ω)
V	Ηλεκτρική τάση (V)
VCLAM	Τάση αναφοράς ψηφιοποίησης (V)

Δείκτες

ain	Τροφοδοσία αναλογικού τμήματος
in	Εισόδου
anREF	Αναφοράς
DAC	Αναλογοψηφιακού μετατροπέα
an	Τροφοδοσία εξαρτήματος αναλογικού τμήματος
aG	Κοινή γείωση αναλογικού τμήματος
g	Κοινή γείωση
out	Εξόδου
neg	Αρνητικό
pos	Θετικό
0cond	Επεξεργασμένο (φιλτραρισμένο) σήμα

Συντομεύσεις

UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
IrDA	Πρωτόκολλο ασύρματης υπερέυθρης επικοινωνίας
I ² C	Inter-Integrated Circuit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SPI	Δίαυλος Serial Peripheral Interface

ADC	Analog digital converter
SIR	Slow Infrared
LED	Light emitting diode
BJT	Bipolar junction transistor

B.4 Βιβλιογραφία

- [B.1] Jerry Luecke, *Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications*, Newnes- Elsevier, Massachusetts, USA, 2005
- [B.2] 50 mA, High Voltage, Micropower Linear Regulator, ADP1720, Datasheet, Analog Devices, Norwood, Massachusetts, USA, 2011
- [B.3] Zero-Drift, Digitally Programmable Sensor Signal Amplifier AD8555, Datasheet, Revision A, Analog Devices, Noewood, Massachusetts, USA, 2009
- [B.4] James Wong, et. Al., Systems Application Guide, Analog Devices Inc., Norwood, Massachusetts, USA, 1993,
- [B.5] Hank Zumbahlen, Linear Circuit Design Handbook, Elsevier-Newnes, Massachusetts, USA, 2008
- [B.6] LM4140 High Precision Low Noise Low Dropout Voltage Reference, Datasheet, National Semiconductors - Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, 2005
- [B.7] ADC121S021, Single Channel, 50 to 200 ksps, 12-Bit A/D Converter, Datasheet, National Semiconductors - Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, 2010
- [B.8] LM341/LM78MXX Series3-Terminal Positive Voltage Regulators, Datasheet, Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, 2011
- [B.9] Diefenderfer, James and Holton, Brian, Principles of Electronic Instrumentation, 2nd Ed. ,Saunders College Publ., 1994
- [B.10] MCP2120 Infrared Encoder Decoder, Datasheet, Microchip, Chandler, Arizona, USA, 2001
- [B.11] Knutson, C.D.,Brown, J.M., IrDA Principles and Protocols: The IrDA Library, MCL Press, 2004
- [B.12] ZHX2022, FIR Transceiver, Product Specification, Zilog, San Jose, California, USA, 2005
- [B.13] Wilson, Michael R., "TIA/EIA-422-B Overview", Application Note 1031, National Semiconductor - Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, 2010
- [B.14] Serial Programming, Wikibook, Retrieved 5/2011
- [B.15] +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receiver MAX220 - MAX249, Datasheet, MAXIM, Sunnyvale, California, USA, 2010

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΡΟΗΣ.

Γ.1 Δηλώσεις καταχωρητών (μεταβλητών)

Στην αρχή του κώδικα δηλώνεται από εξωτερικό αρχείο ισοδυναμία λεκτικών σε φυσικές διευθύνσεις των καταχωρητών του μικροελεγκτή [Γ.1, Γ.2, Γ.3]. Επιπλέον δηλώνονται λεκτικά που χρησιμοποιούνται σαν μεταβλητές σε ήδη δηλωμένα λεκτικά που αντιστοιχούν σε καταχωρητές γενικού σκοπού.

Κώδικ. Γ-1. Δηλώσεις

1	<code>.NOLIST</code>	14	<code>.def gain2 =R22</code>
2	<code>.INCLUDE "C:\2313def.inc"</code>	15	<code>.def offset =R23</code>
3	<code>.LIST</code>	16	<code>.def tr =R24</code>
4	<code>.def mp =R16</code>	17	<code>.def res =R25</code>
5	<code>.def mp2 =R17</code>	18	<code>.def k1 =R26</code>
6	<code>.def k2 =R18</code>	19	<code>.def status =R27</code>
7	<code>.def T1 =R19</code>	20	<code>.def clk_cs_L=R28</code>
8	<code>.def T2 =R20</code>	21	<code>.def clk_cs_H=R29</code>
9	<code>.def gain1 =R21</code>	22	<code>.def clk_H_cs_L=R30</code>

Γ.2 Εκκίνηση κώδικα

Στις πρώτες διευθύνσεις της μνήμης του προγράμματος, δηλώνονται ανακατευθύνσεις για υπηρεσίες διακοπής. Συγκεκριμένα η θέση 0x0000 του προγράμματος αντιστοιχεί στην ανακατεύθυνση μετά από εκκίνηση ή επανεκκίνηση, ενώ η διεύθυνση 0x0004 αντιστοιχεί στην ανακατεύθυνση που θα συμβεί στην περίπτωση που το ρολόι Timer1 φτάσει την ρυθμισμένη τιμή [Γ.4. Στην ετικέτα "reset:" ξεκινάει η ροή του προγράμματος. Εκεί εκκινείται ο δείκτης στοιβάδας, που κρατά πληροφορίες για την διεύθυνση εκτέλεσης του κώδικα πριν από μια διακοπή, με σκοπό την ανάκτησή της.

Κώδικ. Γ-2 Εκκίνηση ροής προγράμματος

1	<code>; Reset Handle</code>	5	<code>reset :</code>
2	<code>0x0000 rjmp reset</code>	6	<code>;initialize stack pointer</code>
3	<code>; Timer1 CompareA Handler</code>	7	<code>ldi mp, RAMEND</code>
4	<code>0x0004 TIM1_COMPA</code>	8	<code>out spl,mp</code>

Γ.3 Ενεργοποίηση ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας

Στην συνέχεια του κώδικα, ενεργοποιείται η ασύγχρονη σειριακή επικοινωνία, μέσω της οποίας αποστέλλονται και λαμβάνονται δεδομένα. Η

ταχύτητα επικοινωνίας ρυθμίζεται συναρτήσει της συχνότητας του κρυστάλλου, στα 115.2 Kbaud.

Κώδικ. Γ-3 Ενεργοποίηση ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας

1	<i>;initialize uart</i>	7	Enable receiver & transmit.
2	ldi mp,14745600/(115200*16)-1 ;BAUD =	8	ldi mp, (1<<RXEN)|1<<TXEN);
3	(fosc/16 BAUD)-1	9	out UCSRB,mp
4	clr mp2	10	<i>; Set frame format: 8data, 2stop bit</i>
5	out UBRRH, mp2;	11	ldi r16,(1<<USBS)|3<<UCSZ0)
6	out UBRRL, mp	12	out UCSRC,r16

Γ.4 Καθορισμός λειτουργίας θυρών

Στη συνέχεια καθορίζεται ποιοι ακροδέκτες λειτουργούν σαν είσοδοι ή έξοδοι και ο τύπος της συνδεσμολογία (ύπαρξη ή όχι pull up αντίστασης) [Γ.5].

Κώδικ. Γ-4 Καθορισμός λειτουργίας θυρών

1	<i>;Port B Data Direction</i>	6	sbi ddrd, 5
2	ldi mp,0b11111001;PB0=SR test	7	sbi ddrd, 4
3	out ddrb, mp	8	sbi ddrd, 2
4	<i>;Port D Data Direction</i>	9	clr status
5	sbi ddrd, 6	10	sbi portb,5

Γ.5 Ενεργοποίηση ρολογιού αναφοράς κατάστασης και η υπηρεσία διακοπής

Με σκοπό την γνώση της κατάστασης του μικροεπεξεργαστή κάθε χρονική στιγμή, θεωρήθηκε απαραίτητο να αποστέλλει ανά προδιαγεγραμμένα χρονικά βήματα πληροφορίες για την τρέχουσα κατάστασή του. Οι πληροφορίες για την κατάστασή του περιέχονται στην μεταβλητή "status". Κάθε ένα από τα 8 bit της μεταβλητής, αναφέρεται σε κάποια ρύθμιση/ ιδιότητα. Στον Πίνακ. Γ-1 συνοψίζονται οι πληροφορίες του κάθε ενός από τα 8 bit της μεταβλητής "status".

Αρχικά ρυθμίζεται η υπηρεσία διακοπής (Κώδικ. Γ-5). Από ορισμό των τιμών των καταχωρητών OCR1AH:OCR1AL=0xEF00, και ρύθμιση prescale $clk_{io}/1024$ στον καταχωρητή TCCR1B=0x5 προκύπτει το διάστημα προς μέτρηση, ίσο με 4 sec . Όταν το διάστημα προς μέτρηση επιτευχθεί εκτελείται η υπηρεσία διακοπής και γίνεται ανακατεύθυνση της ροή του προγράμματος στην αντίστοιχη ετικέτα "TIM1_COMPA" (Κώδικ. Γ-6). Σημειώνεται ότι πριν την είσοδο στις ρουτίνες λειτουργίας (σε όλες τις ρουτίνες εκτός της κατάστασης αναμονής) η υπηρεσία διακοπής απενεργοποιείται.

Πίνακ. Γ-1 Σύνοψη των πληροφοριών της μεταβλητής "status"

Θέση	Ανάγνωση / Εγγραφή	Εντολή / Κατάσταση
bit 0	r/w δ6	Ενεργοποίηση διάταξης μηκυνσιομέτρων
bit 1	r/w β6	Ενεργοποίηση τμήματος διαμόρφωσης και τροφοδοσίας
bit 2	r/w	Επιλογή μέτρησης μηκυνσιομέτρων
bit 3		Διατηρημένο για μελλοντική χρήση
bit 4	r	Ένδειξη χαμηλής μπαταρίας
bit 5		Διατηρημένο για μελλοντική χρήση
bit 6	r	Ένδειξη εγγραφής ρυθμίσεων δειγματοληψίας
bit 7	r	Ένδειξη εγγραφής ρυθμίσεων τμήματος διαμόρφωσης

Κώδικ. Γ-5 Ρύθμιση υπηρεσίας διακοπής

1	init_status_timer :	8	out TCCR1A, mp
2	cli	9	ldi mp, 5
3	ldi mp, 239	10	out TCCR1B, mp
4	clr mp2	11	ldi mp, 0b01100000
5	out OCR1AH, mp	12	out TIMSK, mp
6	out OCR1AL, mp2	13	sei
7	clr mp	14	rjmp bat_test

Όταν παρέλθει ο χρόνος των 4 sec, η ροή του κώδικα εκτρέπεται και εκτελείται ο Κώδικ. Γ-6. Ελέγχονται οι θύρες που ελέγχουν την ενεργοποίηση της διάταξης των μηκυνσιομέτρων και του τμήματος διαμόρφωσης-ψηφιοποίησης, και εγγράφεται η αντίστοιχη τιμή στην μεταβλητή status. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις που περιλαμβάνονται στην μεταβλητή δεν ελέγχονται γιατί ο πρότερος ορισμός τους δεν μπορεί να έχει αρθεί. Στην συνέχεια αποστέλλεται η τιμή της μεταβλητής στον υπολογιστή και η ροή του προγράμματος επανέρχεται στην προηγούμενη θέση της.

Κώδικ. Γ-6 Υπηρεσία διακοπής- αποστολή μεταβλητής status.

1	<i>;timer overflow routine (called from interrupt</i>	11	sbr status, 1
2	<i>vector)</i>	12	sbic portb,6
3	TIM1_COMPA : ; Timer1 CompareA	13	sbr status, 2
4	<i>Handler --> sent status</i>	14	mov tr, status
5	push mp	15	rcall transmit
6	in mp, SREG	16	pop mp
7	push mp	17	out SREG, mp
8	cli	18	pop mp
9	andi status, 0b11111100	19	reti
10	sbic portd,6		

Γ.6 Έλεγχος στάθμης του συσσωρευτή.

Στην συνέχεια της εκτέλεσης του κώδικα πραγματοποιείται έλεγχος της στάθμης του συσσωρευτή μέσω του αναλογικού συγκριτή, με τον οποίο είναι εφοδιασμένος ο μικροελεγκτής. Η ρουτίνα αυτή μπορεί να κληθεί και σε άλλη θέση εκτέλεσης του προγράμματος διαφορετική από τη κατάσταση αναμονής (παράγραφος Γ.7).

Κώδικ. Γ-7 Έλεγχος στάθμης μπαταρίας

1	bat_test :	13	rcall wait
2	cli	14	sbic acsr, 5
3	ldi mp, 0b01000100	15	sbr status, 16
4	out ACSR, mp	16	sbis acsr,5
5	push t1	17	cbr status, 16
6	push t2	18	in mp2,acsr ; is in use?
7	ldi t1, 200 ;l	19	clr mp
8	ldi t2, 214 ;l 15ms	20	out ACSR, mp ;turn off refV
9	rcall wait	21	pop t2
10	rcall wait	22	pop t1
11	rcall wait	23	sei
12	rcall wait	24	rjmp wait_command

Γ.7 Κατάσταση αναμονής

Στην κατάσταση αναμονής ο μικροεπεξεργαστής αναμένει κάποιο δεδομένο από την θύρα ασύγχρονης επικοινωνίας, περιμένει δηλαδή από τον χρήστη κάποια εντολή. Η εντολή δίνεται σε ένα byte. Στον Πίνακ. Γ-2 δίνονται οι πιθανές εντολές σε δεκαδική και δυαδική μορφή και η αντίστοιχη λειτουργία του μικροελεγκτή.

Πίνακ. Γ-2 Αντιστοίχιση εντολών (δεκαδική και ισοδύναμη δυαδική μορφή) σε λειτουργίες του μικροελεγκτή.

	Εντολή	Λειτουργία
250	0b11111010	Έλεγχος στάθμης
50	0b00110010	Λήψη ρυθμίσεων συχνότητας δειγματοληψίας
70	0b01000110	Λήψη και εφαρμογή ρυθμίσεων τμήματος διαμόρφωσης
90	0b01011010	Ρουτίνα δειγματοληψίας και αποστολής μετρήσεων
110	0b01101110	Λήψη ρυθμίσεων μέσω της μεταβλητής "status"
230	0b11100110	Έλεγχος ποιότητας επικοινωνίας

Κώδικ. Γ-8 Κατάσταση αναμονής

1	wait_command :	9	breq get_amp_settings
2	rcall receive	10	cpi mp, 90
3	mov mp, res	11	breq start_meas0
4	cpi mp, 250	12	cpi mp,110
5	breq bat_test	13	breq set_status
6	cpi mp, 50	14	cpi mp, 230
7	breq get_sr_settings	15	breq com_test
8	cpi mp, 70	16	rjmp wait_command

Γ.8 Έλεγχος ποιότητας επικοινωνίας

Η ρουτίνα ελέγχου ποιότητας χρησιμεύει στην αξιολόγηση της αλυσίδας επικοινωνίας της πληροφορίας η οποία αλλάζει 6 μορφές από τον μικροελεγκτή έως τον υπολογιστή (UART, IrDA tx, IrDA rx, UART, RS-232, USB). Ο μικροελεγκτής αποστέλλει την τιμή 231, ως αναγνωριστικό ότι έχει εισέλθει στην ρουτίνα. Στην συνέχεια αναμένει από τον υπολογιστή μια τιμή, την οποία αποστέλλει πίσω. Αυτό επαναλαμβάνεται έως ότου ο υπολογιστής αποστείλει την τιμή 255. Όταν ληφθεί η τιμή 255, το πρόγραμμα επιστρέφει στην κατάσταση αναμονής. Σημειώνεται ότι η δοκιμή πραγματοποιείται σε πλήρη ταχύτητα σχετικά με τον χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα σε δυο δείγματα.

Κώδικ. Γ-9 Ρουτίνα ελέγχου ποιότητας επικοινωνίας

1	com_test ;: kanei echo mexri na labeli 255	8	cpi res, 255
2	cli	9	breq end_com_test
3	ldi tr, 231	10	rcall transmit
4	rcall transmit	11	rjmp com_test1
5	com_test1 :	12	end_com_test :
6	rcall receive	13	sei
7	mov tr, res	14	rjmp wait_command

Γ.9 Λήψη και εφαρμογή ρυθμίσεων τμήματος διαμόρφωσης

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο Β.1.1.2, η ενίσχυση του σήματος των μηκυνσιομέτρων είναι προγραμματιζόμενη. Για τον προγραμματισμό του τμήματος διαμόρφωσης αποστέλλονται από τον υπολογιστή τρεις τιμές ρύθμισης, **gain1**, **gain2** και **offset**, που χρησιμεύουν στην ρύθμιση της απολαβής πρώτου σταδίου, της απολαβής δευτέρου σταδίου και της τάσης αντιστάθμισης, αντίστοιχα.

Όταν ο μικροελεγκτής εισέλθει στην ρουτίνα λήψης ρυθμίσεων τμήματος διαμόρφωσης, αποστέλλει την τιμή 60 ως αναγνωριστικό. Στην συνέχεια αναμένει τις τρεις τιμές, **gain1**, **gain2** και **offset**, επαναλαμβάνοντας τις μετά την λήψη της κάθε μιας.

Μετά γίνεται μετάβαση στην ρουτίνα “Write_amp_settings” η οποία στέλνει στο ολοκληρωμένο κύκλωμα AD8555 τρεις λέξεις των 38-bit με τις ρυθμίσεις. Ο συνολικός χρόνος εγγραφής των ρυθμίσεων είναι 6.9ms. Το ακριβές πρωτόκολλο επικοινωνίας που ακολουθήθηκε περιγράφεται στο φύλλο δεδομένων του ολοκληρωμένου AD8555 [B.3]. Οι ρουτίνες που αντιστοιχούν στις ετικέτες “write_12bit” και “wait60us” παραλείπονται λόγω έκτασης και μη κρισιμότητας. Μετά την εγγραφή των ρυθμίσεων αποστέλλεται στον υπολογιστή το αναγνωριστικό 60 και εγγράφεται λογικό “1” στο 8^ο bit της μεταβλητής “status” σαν ένδειξη ότι έχει γίνει η ρύθμιση. Η ροή εκτέλεσης του προγράμματος επιστρέφει στην κατάσταση αναμονής.

Κώδικ. Γ-10 Λήψη και εφαρμογή ρυθμίσεων τμήματος διαμόρφωσης

1	get_amp_settings :	20	<i>ori</i> status, 0b10000000
2	<i>cli</i>	21	<i>sei</i>
3	<i>ldi</i> tr, 60	22	<i>rjmp</i> wait_command
4	<i>rcall</i> transmit	23	Write_amp_settings :
5	<i>rcall</i> receive	24	<i>mov</i> mp, offset
6	<i>mov</i> gain1, res	25	<i>ldi</i> mp2, 2
7	<i>mov</i> tr, res	26	<i>rcall</i> write_12bit
8	<i>rcall</i> transmit	27	<i>rcall</i> wait60us
9	<i>rcall</i> receive	28	<i>rcall</i> wait60us
10	<i>mov</i> gain2, res	29	<i>mov</i> mp, gain1
11	<i>mov</i> tr, res	30	<i>ldi</i> mp2, 1
12	<i>rcall</i> transmit	31	<i>rcall</i> write_12bit
13	<i>rcall</i> receive	32	<i>rcall</i> wait60us
14	<i>mov</i> offset, res	33	<i>rcall</i> wait60us
15	<i>mov</i> tr, res	34	<i>mov</i> mp, gain2
16	<i>rcall</i> transmit	35	<i>clr</i> mp2
17	<i>rcall</i> write_amp_settings	36	<i>rcall</i> write_12bit
18	<i>ldi</i> tr, 60	37	<i>ret</i>
19	<i>rcall</i> transmit		

Γ.10 Λήψη ρυθμίσεων συχνότητας δειγματοληψίας και διάρκειας μέτρησης

Το επιδιωκόμενο βήμα μέτρησης σε μονάδα γωνίας στροφάλου, υπολογίζεται ως ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο μετρήσεις χρησιμοποιώντας την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Από τον χρόνο αυτό και από την συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή, υπολογίζεται ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας που χρειάζεται να «καθυστερήσει» από μέτρηση σε μέτρηση για να επιτύχει την επιθυμητή συχνότητα δειγματοληψίας. Στην § Γ.12 περιγράφεται η ρουτίνα καθυστέρησης, η οποία δημιουργεί την καθυστέρηση συναρτήσει δυο μεταβλητών, T1, T2.

Η ρουτίνα δειγματοληψίας και αποστολής μετρήσεων χρησιμοποιεί δυο μεταβλητές για να καθορίσει το πλήθος των μετρήσεων.

Οι τέσσερις μεταβλητές T1, T2, k1 και k2, λαμβάνονται από την ρουτίνα του Κώδικ. Γ-11. Αρχικά αποστέλλεται σαν αναγνωριστικό η τιμή 55. Στη συνέχεια λαμβάνονται και αποστέλλονται σαν επιβεβαίωση διαδοχικά οι τέσσερις τιμές . Στο τέλος αποστέλλεται ξανά η τιμή 55 και εγγράφεται λογικό "1" στο 7ο bit της μεταβλητής "status" ως ένδειξη ότι έχει γίνει η ρύθμιση. Η ροή εκτέλεσης του προγράμματος επιστρέφει στην κατάσταση αναμονής.

Κώδικ. Γ-11 Λήψη ρυθμίσεων συχνότητας δειγματοληψίας και διάρκειας μέτρησης

1	get_sr_settings:	14	mov k1, res
2	cli	15	mov tr, res
3	ldi tr, 55	16	rcall transmit
4	rcall transmit	17	rcall receive
5	rcall receive	18	mov k2, res
6	mov T1, res	19	mov tr, res
7	mov tr, res	20	rcall transmit
8	rcall transmit	21	ldi tr, 55
9	rcall receive	22	rcall transmit
10	mov T2, res	23	ori status, 0b01000000
11	mov tr, res	24	sei
12	rcall transmit	25	rjmp wait_command
13	rcall receive		

Γ.11 Λήψη ρυθμίσεων μέσω της μεταβλητής "status"

Η μεταβλητή status χρησιμοποιείται για την γνωστοποίηση των ρυθμίσεων του μικροελεγκτή στον υπολογιστή, όπως περιγράφεται στην παράγραφο Γ.5. Χρησιμοποιείται επιπλέον και για την λήψη εντολής ενεργοποίησης της διάταξης των μηκυνσιομέτρων και του τμήματος διαμόρφωσης-ψηφιοποίησης Αφού σταλεί το αναγνωριστικό 55, στέλνεται από τον υπολογιστή η τιμή της μεταβλητής status και ο μικροελεγκτής την επιστρέφει σαν επιβεβαίωση. Μόνο τα τρία πρώτα bit λειτουργούν σαν έντολα για την εκτέλεση λειτουργιών, ενώ τα υπόλοιπα αγνοούνται.

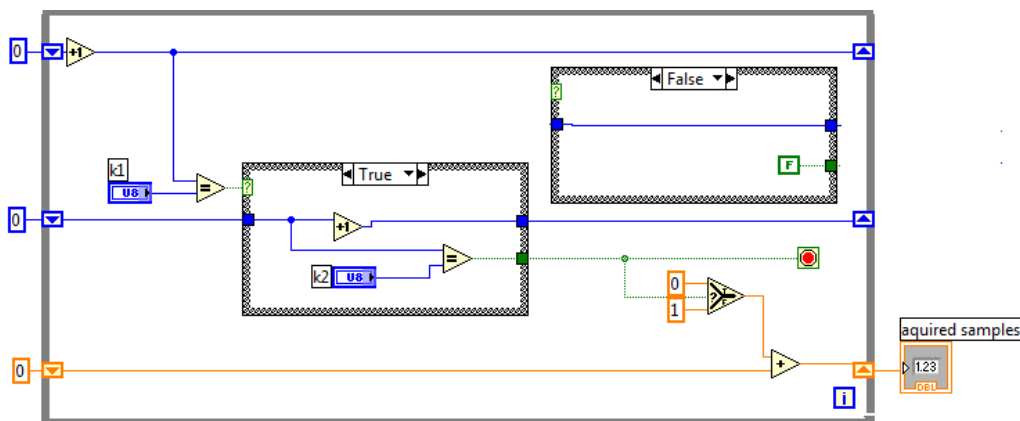
Κώδικ. Γ-12 Λήψη ρυθμίσεων μέσω της μεταβλητής "status"

1	set_status :	12	sbrs res, 1
2	cli	13	cbi portb,6
3	ldi tr, 110	14	sbrc res,2 ;mode:accel=1 amp=0
4	rcall transmit	15	sbr status, 4
5	rcall receive	16	sbrs res, 2
6	sbrc res,0 ;transistor	17	cbr status ,4
7	sbi portd,6	18	mov tr, res
8	sbrs res, 0	19	rcall transmit
9	cbi portd,6	20	rcall transmit
10	sbrc res,1 ;Analog	21	sei
11	sbi portb,6	22	rjmp wait_command

Γ.12 Ρουτίνα δειγματοληψίας και αποστολής μετρήσεων

Στην αρχή της εκτέλεσης (ετικέτα `start_meas0`), αποστέλλονται στον υπολογιστή οι ρυθμίσεις της συχνότητας δειγματοληψίας και του τμήματος διαμόρφωσης με την ενίσχυση και την απόσβεση. Στη συνέχεια στέλνεται η αλληλουχία τιμών 0 και 250 σαν αναγνωριστικό για την μονάδα λήψης μετρήσεων (παράγραφος) σημαίνοντας ότι ξεκινάει η αποστολή δεδομένων. Στη συνέχεια γίνεται μετάβαση στην ρουτίνα “ `one_amp_byte` ” η οποία επικοινωνεί και λαμβάνει από το ολοκληρωμένο κύκλωμα `adc121s021` την μέτρηση, μεγέθους ενός byte. Το ακριβές πρωτόκολλο επικοινωνίας που ακολουθήθηκε περιγράφεται στο φύλλο δεδομένων του ολοκληρωμένου [B.7]. Η ρουτίνα που αντιστοιχεί στην ετικέτα “ `one_amp_byte` ” παραλείπεται λόγω μεγάλης έκτασης.

Στην συνέχεια του κώδικα ελέγχεται αν έχει σταλεί το προηγούμενο δείγμα στον υπολογιστή και ξεκινά η αποστολή του τρέχοντος. Η διαδικασία λήψης και αποστολής δειγμάτων επαναλαμβάνεται. Αν δεν έχει προλάβει να σταλεί το προηγούμενο δείγμα, τότε στέλνεται στον υπολογιστή η αναγνωριστική αλληλουχία 0 255 0 255 και η ροή του κώδικα επανέρχεται στην κατάσταση αναμονής. Το γεγονός ότι δεν έχει σταλεί το προηγούμενο δείγμα ενώ ο κώδικας είναι σε θέση να στείλει νέο, σημαίνει ότι η τρέχουσα ρυθμισμένη συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη από την «συχνότητα» αποστολής (115.2kbaud) και συνεπώς δεν είναι εφικτή. Σημειώνεται ότι για την αποστολή του δείγματος στον υπολογιστή, απλά αυτό καταχωρείται σε έναν καταχωρητή και η αποστολή γίνεται αυτοματοποιημένα από το hardware του μικροελεγκτή, οποίος συνεχίζει την ροή του προγράμματος.



Σχήμ. 9-20 Κώδικας πρόβλεψης αριθμού δειγμάτων

Κώδικ. Γ-13 Δειγματοληψία και αποστολή μετρήσεων

1	start_meas0 :	41	rjmp not_sent
2	cli	42	rjmp meas_loop ;count 4 5
3	mov tr,T1	43	end :
4	rcall transmit	44	ldi tr, 0
5	mov tr,T2	45	rcall transmit
6	rcall transmit	46	ldi tr, 250
7	mov tr,gain1	47	rcall transmit
8	rcall transmit	48	rcall receive
9	mov tr,gain2	49	cpi res, 100
10	rcall transmit	50	breq again
11	mov tr,offset	51	sei
12	rcall transmit	52	cbi portd,6
13	kcuif :	53	pop gain2
14	sbis UCSRA,UDRE	54	pop gain1
15	rjmp kcuif	55	rjmp wait_command
16	push gain1	56	again :
17	push gain2	57	ldi tr, 0
18	rjmp again	58	rcall transmit
19	meas_loop :	59	ldi tr, 250
20	sbi portb,0 ;count 6 7	60	rcall transmit
21	inc gain1 ;count 8	61	clr gain1
22	cp gain1,k1 ;count 9	62	clr gain2
23	breq inc_k2 ;countB 10 11 countA 10	63	rjmp meas_loop
24	case countA= not_equal countB=equal	64	not_sent :
25	nop ;countA 11	65	sbis UCSRA,UDRE
26	nop ;countA 12	66	rjmp not_sent
27	rjmp continue ;countA 13 14	67	ldi tr, 0
28	inc_k2 :	68	rcall transmit
29	cp gain2,k2 ;countB 12	69	ldi tr, 255
30	breq end ;countB 13 if true: meas end	70	rcall transmit
31	inc gain2 ;countB 14	71	ldi tr, 0
32	continue :	72	rcall transmit
33	sbrs status, 2 ;count 15	73	ldi tr, 255
34	rcall one_amp_byte ;count 15+ 3 (rcall)+ 140(one_byte)=158	74	rcall transmit
35	sbrs status, 2 ;count 159 160	75	clr mp
36	rcall one_accel_byte	76	sei
37	out udr, mp ;count 161	77	cbi portd,6
38	rcall wait ;count [161+3(rcall)]	78	pop gain2
39	cbi portb,0 ;count 1 2	79	pop gain1
40	sbis UCSRA,UDRE ;count 2 3	80	rjmp wait_command

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων μετράται ο αριθμός των byte που έχουν ληφθεί και συγκρίνεται με τις μεταβλητές k1 και k2. Η θέση του κώδικα όπου συμβαίνει η σύγκριση των μεταβλητών μέτρησης με τις μεταβλητές k1 και k2 σε σχέση με την θέση του κώδικα όπου αυξάνονται οι μεταβλητές μέτρησης, επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα. Έγιναν διάφορες δοκιμές, που σχετίζονται κυρίως με την σταθερότητα του κώδικα και την ικανότητα πρόβλεψης της συχνότητας δειγματοληψίας και υιοθετήθηκε αυτή που παρουσιάζεται στον

Κώδικ. Γ-13. Ο καθορισμός των μεταβλητών k1 και k2, έτσι ώστε να προκύψει ο επιθυμητός αριθμός δειγμάτων, γίνεται με δοκιμές χρησιμοποιώντας τον σχηματικό κώδικα που φαίνεται στο Σχήμ. 9-20. Ο μέγιστος αριθμός δειγμάτων που μπορεί να ληφθεί είναι 65065. Όμως στο τέλος της λήψης του καθορισμένου αριθμού δειγμάτων, ελέγχεται το αναγνωριστικό που έχει σταλεί από τον υπολογιστή κατά την διάρκεια της μέτρησης και ανάλογα συνεχίζει η λήψη ή τερματίζεται. Στην περίπτωση που συνεχίζει, μηδενίζονται οι μεταβλητές και ξεκινάει η μέτρηση από την αρχή. Στην περίπτωση που σταματήσει η μέτρηση, στέλνεται από το μικροελεγκτή η αναγνωριστική αλληλουχία 0 , 250 σημαίνοντας ότι σταματάει η αποστολή δεδομένων.

Κάθε εντολή assembly εκτελείται σε προκαθορισμένο από τον κατασκευαστή αριθμό κύκλων επεξεργασίας, ο κάθε ένας εκ των οποίων απαιτεί χρόνο αντίστροφο της συχνότητας του κρυστάλλου ($6.782 \cdot 10^{-8}$ sec). Επίσης έχει προβλεφτεί έτσι ώστε ο κώδικας σε κάθε επανάληψη (σε όλες τις δυνατές ροές προγράμματος) για την λήψη και αποστολή ενός δείγματος, να χρειάζεται τον ίδιο αριθμό κύκλων επεξεργασίας που είναι ίσος με 164 κύκλους δηλαδή περίπου 10^{-5} sec. Η συχνότητα δειγματοληψίας θα ήταν 89912Hz (όπως αναφέρθηκε αυτή περιορίζεται από την ταχύτητα επικοινωνίας, που είναι μικρότερη, περίπου 12kHz). Για να υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της επιθυμητής συχνότητας δειγματοληψίας, σε κάθε επανάληψη καλείται μια ρουτίνα καθυστέρησης που περιγράφεται στην ακόλουθη παράγραφο.

Γ.13 Ρουτίνα εφαρμογής συχνότητας δειγματοληψίας

Για το καθορισμό της συχνότητας δειγματοληψίας, παρεμβάλετε ανάμεσα στις διαδοχικές εντολές για την λήψης μιας μέτρησης μια ρουτίνα καθυστέρησης. Το άθροισμα των κύκλων επεξεργασίας που οφείλονται στις ρουτίνες καθυστέρησης και λήψης μέτρησης αποτελεί την περίοδο μέτρησης σε κύκλους επεξεργασίας. Ο αριθμός των κύκλων επεξεργασίας που απαιτείται για την εκτέλεση της ρουτίνας λήψης μέτρησης είναι σταθερός και υπολογίζεται όπως αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Για την ρύθμιση της συχνότητας δειγματοληψίας αναπτύχθηκε η ρουτίνα καθυστέρησης, της οποίας ο απαιτούμενος, για την εκτέλεση αριθμός κύκλων επεξεργασίας είναι μεταβλητός και μάλιστα συνάρτηση δυο παραμέτρων του προγράμματος T1, T2.

Η ρουτίνα καθυστέρησης αποτελείται από έναν γραμμικό μετρητή μιας λέξης (Word). Εκτελεί δηλαδή την αύξηση κατά μια μονάδα της τιμής μιας μεταβλητής των 16bit (mp2:mp) από το μηδέν έως την τιμή που καθορίζεται από τις παραμέτρους των 8bit, T1 και T2 που συνθέτουν την παράμετρο των 16bit T2:T1. Αν η διαδικασία αυτή εκτελούνταν αυτόματα για παράδειγμα από κάποιο timer, θα απαιτούνταν T2:T1 κύκλοι επεξεργασίας. Οι απαιτούμενοι κύκλοι επεξεργασίας για την εκκίνηση και τον τερματισμό του timer δεν δίνονται από

τον κατασκευαστή με ακρίβεια, οπότε επιλέχθηκε η αρίθμηση του χρόνου με χρήση κώδικα. Σε αυτήν την περίπτωση, επειδή δεν αρκεί μια εντολή για την αύξηση της αρίθμηση και τον έλεγχο της τιμής που έχει φτάσει, διερευνάται στον Πίνακ. Γ-3 ο αριθμός των κύκλων επεξεργασίας που απαιτείται για την εκτέλεση του Κώδικ. Γ-14 συναρτήσει των μεταβλητών T1 και T2.

Κώδικ. Γ-14 Εφαρμογή συχνότητας δειγματοληψίας

1	wait :	9	cp mp2, t2
2	ldi mp, 255	10	brne inc_t1
3	ldi mp2, 255	11	inc_t1_last:
4	inc_t1 :	12	inc mp
5	inc mp	13	cp mp, T1
6	cpi mp, 255	14	brne inc_t1_last
7	brne inc_t1	15	ret
8	inc mp2		

Έτσι φαίνεται ότι η ρουτίνα καθυστέρησης απαιτεί:

$$C=1027 \cdot T2+4T1+1033 \quad (9-20)$$

κύκλους επεξεργασίας. Προσθέτοντας την καθυστέρηση που οφείλεται στην εκτέλεση του κώδικα δειγματοληψίας και αποστολής μετρήσεων, η συχνότητα δειγματοληψίας μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των μεταβλητών T1 και T2 ως εξής:

$$f_s = \frac{14745600}{1027 \cdot T2 + 4 \cdot T1 + 1197} \quad (9-21)$$

Γ.14 Ρουτίνα σειριακής αποστολής δεδομένων

Στον Κώδικ. Γ-15 είναι οι ρουτίνες αποστολής και λήψη δεδομένων, που χρησιμοποιούνται εκτενώς στους προηγούμενους κώδικες. Η αποστολή και λήψη γίνεται μέσω του καταχωρητή “UDR”, για την μεν λήψη διαβάζοντάς την, ενώ για την αποστολή καταχωρώντας την τιμή προς αποστολή.

Κώδικ. Γ-15 Σειριακή αποστολή και λήψη δεδομένων

1	receive :	1	transmit :
2	sbis UCSRA, rxc	2	sbis UCSRA,UDRE
3	rjmp receive	3	rjmp transmit
4	in res, udr	4	out UDR,tr
5	ret	5	ret

Πίνακ. Γ-3 Πρακτική διερεύνηση αναγκαίων κύκλων επεξεργασίας για την εκτέλεση της ρουτίνας καθυστέρησης συναρτήσεων των μεταβλητών T1, T2, με χρήση των καταχωρητών mp και mp2

Γραμμή Κώδικα	Κώδικας	mp	mp2	Αριθμός κύκλων Επεξεργασίας
wait:				
1	ldi mp, 255		255	1
2	ldi mp2, 255	255		2
inc_t1:				
3	inc mp		0	2+1
4	cpi mp, 255			2+2
5	brne inc_t1			2+4
inc_t1:				
3	inc mp		1	2+4+1
4	cpi mp, 255			2+4+2
5	brne inc_t1			2+4+4
inc_t1:				
3	inc mp		2	2+4+4+1
4	cpi mp, 255			2+4+4+2
5	brne inc_t1			2+4+4+4
inc_t1:				
3	inc mp	255	255	2+(255*4)+1
4	cpi mp, 255			2+(255*4)+2
5	brne inc_t1			2+(255*4)+3
6	inc mp2	0		2+(255*4)+4
7	cp mp2, t2			2+(255*4)+5
8	brne inc_t1			2+(255*4)+7
inc_t1:				
9	inc mp		0	[2+(255*4)+7]+1
4	cpi mp, 255			[2+(255*4)+7]+2
5	brne inc_t1			[2+(255*4)+7]+4
3	inc mp		255	[2+(255*4)+7]+(255*4)+1

4	cpi mp, 255			[2+(255*4)+7]+(255*4)+2
5	brne inc_t1			[2+(255*4)+7]+(255*4)+3
6	inc mp2	1		[2+(255*4)+7]+(255*4)+4
7	cp mp2, t2			[2+(255*4)+7]+(255*4)+5
8	brne inc_t1			[2+(255*4)+7]+(255*4)+7
inc_t1:				
3	inc mp		0	[2+(255*4)+7]+(255*4)+7+1
4	cpi mp, 255			
5	brne inc_t1			
3	inc mp		255	[2+(255*4)+7]+(255*4)+7+1+(255*4)
4	cpi mp, 255			[2+(255*4)+7]+(255*4)+7+1+(255*4)+1
5	brne inc_t1			[2+(255*4)+7]+(255*4)+7+1+(255*4)+2
6	inc mp2	2		[2+(255*4)+7]+(255*4)+7+1+(255*4)+3
6	inc mp2	T2	255	2+[(255*4)+7]*T2+(255*4)+4
7	cp mp2, t2			2+[(255*4)+7]*T2+(255*4)+5
8	brne inc_t1			2+[(255*4)+7]*T2+(255*4)+6
inc_t1_last:				
9	inc mp		0	2+[(255*4)+7]*(T2+1)
10	cp mp, T1			
11	brne inc_t1_last			
inc_t1_last:				
9	inc mp		1	2+[(255*4)+7]*(T2+1)+4
10	cp mp, T1			2+[(255*4)+7]*(T2+1)+4+1
11	brne inc_t1_last			2+[(255*4)+7]*(T2+1)+4+3
inc_t1_last:				
9	inc mp		2	2+[(255*4)+7]*(T2+1)+4+4
10	cp mp, T1			2+[(255*4)+7]*(T2+1)+4+4+1
11	brne inc_t1_last			2+[(255*4)+7]*(T2+1)+4+4+2
inc_t1_last:				
9	inc mp		T1	2+[(255*4)+7]*(T2+1)+T1*4
10	cp mp, T1			2+[(255*4)+7]*(T2+1)+T1*4+1
11	brne inc_t1_last			2+[(255*4)+7]*(T2+1)+T1*4+2
12	ret			2+[(255*4)+7]*(T2+1)+T1*4+4

Γ.15 Ορολογία και Συμβολισμοί

Συμβολισμοί

TX	Γραμμή αποστολής UART
RX	Γραμμή λήψης UART

Συντομεύσεις

UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
IrDA	Πρωτόκολλο ασύρματης υπέρυθρης επικοινωνίας

Γ.16 Βιβλιογραφία

- [Γ.1] 8-bit AVR Instructions Set, Rev. 0856I–AVR–07/10, Atmel Corporation, 2010
- [Γ.2] ATtiny2313, 8-bit AVR Microcontroller with 2K Bytes In-System Programmable Flash, Datasheet, ATMEL, San Jose, California, USA, 2010
- [Γ.3] Chuck Baird, Programming Microcontrollers using Assembly Language, Chuck Baird, 2006
- [Γ.4] Development Tools User Guide- AVR Assembler User Guide, Atmel Corporation, 2010
- [Γ.5] Timothy S Margush, Some Assembly Required: Assembly Language Programming with the AVR Microcontroller Hardcover, CRC Press, 2011

Αντώνης Κ. Αντωνόπουλος

ΣΥΝΟΠΤΙΚΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Προσωπικά Στοιχεία

Ημ/νία Γέννησης: 24 Νοεμβρίου 1983
Διεύθυνση: 28^{ης} Οκτωβρίου 10^Α, Αγία Παρασκευή
Τηλέφωνα: 210 6560979 , 210 7723568, 6972225843
E- mail: antonis.k.antonopoulos@gmail.com, antant@central.ntua.gr

Σπουδές

2007- 2014 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.) / Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών / Τομέας Θερμότητας
Εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής
Θέμα: Διαγνωστική Εμβολοφόρων Κινητήρων Ντήζελ
Επιβλέπων: Καθηγητής Δρ Δ. Θ. Χουντάλας
Τίτλος: Ανάπτυξη και Εξέλιξη Τεχνικών Μέτρησης και Επεξεργασίας Λειτουργικών Μεγεθών που Αφορούν στην Πίεση Καύσης και στον Άξονα Μετάδοσης Ισχύος με Σκοπό την Διάγνωση
Άδειας Συγγραφής: Απρίλιος 2012

2001-2006 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.) / Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών / Τομέας Μεταλλουργίας & Τεχνολογίας Υλικών
Δίπλωμα Μηχανικού Μεταλλείων – Μεταλλουργού
Βαθμός: Λίαν Καλώς, 7.46
Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας: Συσχέτιση δομής - ιδιοτήτων με παραμετρικό έλεγχο μηχανικής καταπόνησης
Βαθμός Διπλωματικής Εργασίας: 10

09/2003- 01/2004 Faculte Polytechnique de Mons / Département Chimie – Science des Matériaux
Φοίτηση ως σπουδαστής ERASMUS

Υποτροφίες

2008-2011 Υπότροφος Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (τριετής υποτροφία και επιπλέον παράταση για ένα έτος)

09/2003- 01/2004 Υπότροφος Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών για το πρόγραμμα κινητικότητας σπουδαστών ΣΩΚΡΑΤΗΣ/ ERASMUS

Πρακτική Εκπαίδευση

- 11/2012-03/2013 307 Τεχνικό Συγκρότημα Υποστήριξης Αεροπορικού Υλικού
- ο Εκπαίδευση Ειδικότητας Μηχανοσυνθέτη Ελικοπτέρων (21 ημέρες)
 - ο Υπηρεσίες ως Οπλίτης Θητείας στην Διεύθυνση Μελετών: Μελέτη και Εφαρμογή Τεχνικών Οδηγιών (82 ημέρες)
- 08-09/2005 Κέντρο Δοκιμών Έρευνας και Προτύπων, ΔΕΗ Α.Ε.
- ο Συμμετοχή στην επιθεώρηση εγκαταστάσεων του ΑΗΣ Λαυρίου με χρήση θερμοκάμερας και στην συγγραφή αναφοράς
 - ο Εφαρμογή συσκευής δεινορευμάτων στην επιθεώρηση σωληνώσεων
- 08-09/2004 Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης, ΔΕΗ Α.Ε.
- ο Παρακολούθηση παραγωγής ορυχείου
 - ο Κατάστροψη ημερήσιας αναφοράς

Συμμετοχή σε Επαγγελματικούς – Επιστημονικούς Φορείς

- 2010 Society of Automotive Engineers (SAE) International
- 2007 Μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΕΕ) (Αρ. Μητρώου. 112913)

Δημοσιεύσεις – Ανακοινώσεις

1. Lamaris, V., Antonopoulos, A., and Hountalas, D., "Evaluation of an Advanced Diagnostic Technique for the Determination of Diesel Engine Condition and Tuning Based on Laboratory Measurements," SAE Technical Paper 2010-01-0154, 2010
2. D.T. Hountalas and A.K. Antonopoulos , Comparative Evaluation of available TDC estimation techniques, ECOS 2011 *
3. A.K. Antonopoulos and D.T. Hountalas, Effect of Instantaneous Rotational Speed on the Analysis of Measured Diesel Engine Cylinder Pressure Data, ECOS 2011 *
4. R. Papagiannakis, A. Antonopoulos, C. Nikita and D. Hountalas, Use of a diagnostic methodology for spark ignited engines to investigate the effect of AFR on the performance and combustion characteristics of a reciprocating aircraft engine, ASME 2012
5. D. Hountalas, G. Zovanos, D. Sakellarakis, A. Antonopoulos, Validation of multi-zone combustion model ability to predict two stroke diesel engine performance and nox emissions using on board measurements, ASME 2012
6. D. Hountalas, A. Antonopoulos, N. Sakellaridis, G. Zovanos, E. Pariotis and R. Papagiannakis, Computational Investigation of the Effect of Ambient Conditions on the Performance of Turbocharged Large Scale Marine Diesel Engines, ECOS 2012
7. Hountalas, D., Antonopoulos, A., Zovanos, G., and Papagiannakis, R.,

- Evaluation of a New Diagnostic Technique to Detect and Account for Load Variation during Cylinder Pressure Measurement of Large-Scale Four-Stroke Diesel Engines, SAE Technical Paper 2012-01-1342, 2012 *
8. Antonopoulos, A. and Hountalas, D., "Identification and Correction of the Error Induced by the Sampling Method Used to Monitor Cylinder Pressure of Reciprocating Internal Combustion Engines," SAE Technical Paper 2012-01-1155, 2012 *
 9. A.K. Antonopoulos, D.T. Hountalas, Effect of instantaneous rotational speed on the analysis of measured diesel engine cylinder pressure data, Energy Conversion and Management, Volume 60, August 2012, Pages 87-95
 10. D.T. Hountalas, R.G. Papagiannakis, G. Zovanos, A. Antonopoulos, "Comparative evaluation of various methodologies to account for the effect of load variation during cylinder pressure measurement of large scale two-stroke diesel engines", Applied Energy, Vol. 113, pp. 1027-1042, January 2014

* Παρουσίαση από τον ίδιον

Συμμετοχή σε Προγράμματα Εθνικής, Ευρωπαϊκής και Ιδιωτικής Χρηματοδότησης

- | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2008-2013 | Διάφοροι Χρηματοδότες / Παροχή Συμβουλευτικών και Επιστημονικών Υπηρεσιών σε Θέματα Λειτουργίας και Εκπομπής Ρύπων Κινητήρων |
| 2012 | Anangel Maritime Services Inc. / Ανάπτυξη και Κατασκευή Διαγνωστικών Συστημάτων Κινητήρων Ντήζελ |
| 2004-2011 | Διάφοροι Χρηματοδότες / Παροχή επιστημονικών υπηρεσιών σε Θέματα Απόδοσης και Εκπομπής Ρύπων Κινητήρων Ντήζελ. |
| 2011 | ΟΣΕ / Μελέτη για τη Διερεύνηση και Αντιμετώπιση των Αστοχιών του Υπερπληρωτή και την Πρόληψη των Επιπτώσεων αυτών στους Διζελοκινητήρες MTU12V183TDI13 Αυτοκινηταμαξών Rail Bus Της ΠΣ35 |
| 2011 | TESTO AG / Scientific Consultancy for the Development of a Portable Hardware System for Cylinder Pressure Measurement |
| 2011 | TESTO AG / Development of a Software Tool for the Processing of Measured Emission Data and Conversion of NOx Values into g/KWh as required by Marpol Annex VI |
| 2011 | EAB AE / Ανάπτυξη και Κατασκευή εξελιγμένου διαγνωστικού συστήματος των κινητήρων R2800 A/Φων CL215 |
| 2011 | Tsakos Columbia Shipmanagement SA / Ανάπτυξη και Κατασκευή Διαγνωστικών Συστημάτων Κινητήρων Ντήζελ |
| 2010 | Υπηρεσία Προμηθειών Πολεμικής Αεροπορίας / Συντήρηση Συσκευών Analyser Τύπου EDS-2 και EDS-3 των Εμβολοφόρων Κινητήρων των Πυροσβεστικών Αεροσκαφών CL-215, PZL M-18 και G164A Grumman |
| 2010 | E.C. / Real-Skills-Europe: Refrigerant Emissions And Leakage Skills For Europe |

- 2009 **ΟΣΕ** / Αξιολόγηση των Ενεργειών του Κατασκευαστή για την Επίλυση των Λειτουργικών Προβλημάτων των Δ/Κ των Δ/Η Bombardier (Πρώην Adtranz) ΠΣ/ΣΔ 50
- 2009 **Διάφοροι Χρηματοδότες** / Αξιολόγηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κτιρίων Και Η/Μ Εγκαταστάσεων
- 2007 **ΟΣΕ** / Προκαταρκτική Διερεύνηση για την αντιμετώπιση των Λειτουργικών Προβλημάτων των Αμαξοστοιχιών Railbus
- 2006 **ΔΕΗ ΑΕ** / Επίβλεψη Δοκιμών Παραλαβής των δυο Μονάδων Ντήζελ της ΔΕΗ του Σταθμού Αθερινόλακου Κρήτης Ισχύος 2Χ51MW
- 2006 **ΔΕΗ ΑΕ** / Μελέτη Εφαρμογής για τη Μείωση Εκπομπών ΝΟx των Κινητήρων Εσωτερικής Καύσης των Μονάδων Ντήζελ 1 & 2 του ΑΗΣ Ρόδου
- 2005 **ΟΣΕ** / Ανάπτυξη και Κατασκευή Διαγνωστικού Συστήματος για Χρήση στους Κινητήρες Ντήζελ του ΟΣΕ
- 2005 **ΟΣΕ** / Αντιμετώπιση των προβλημάτων αστοχίας που εμφανίζονται στους κινητήρες Ντήζελ MTU του ΟΣΕ
- 2005 **E.C. /Green Heavy Duty Engine**

Γνώσεις Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Γλώσσες
Προγραμματισμού

Fortran, C, Visual Basic (VBA), Assembly

Τεχνικό Λογισμικό

LabView, AutoCad, Protel DXP

Επιστημονικός
Προγραμματισμός

Matlab

Δημιουργικές
Εφαρμογές

Photoshop, Illustrator, Premier, Flash

Διαδίκτυο

PHP, HTML, Joomla

Βάσεις Δεδομένων

SQL

Ξένες Γλώσσες

Αγγλικά

First Certificate in English

Γαλλικά

Diplome d' Etude en Langue Francaise (DELF) 1er Degré

Ενδιαφέροντα

Προσκοπισμός

2009-2012

Τοπικός Έφορος Προσκόπων Αγίας Παρασκευής

2006-2009

Αρχηγός 1^{ης} Κοινότητας Ανιχνευτών Αγίας Παρασκευής

2002

Πτυχιούχος Πρόσκοπος Έθνους (απονομή από τ. Πρόεδρο της Δημοκρατίας κ. Κωστή Στεφανόπουλο)

Αθλήματα βουνού

Ορειβασία, Χειμερινή Ορειβασία, Κατάβαση Φαραγγιών, Αναρρίχηση, Χιονοδρομία