

Μέτρηση παραμέτρων της ισχύος ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης

I. Γ. Γράβαλος¹, I. Κ. Ράπτης¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης είναι η πλέον αποδοτική θερμική μηχανή. Χρησιμοποιείται ευρέως σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται μεγάλες συγκεντρώσεις ισχύος, όπως των αυτοκινούμενων γεωργικών μηχανημάτων. Οι κλασικές μέθοδοι μέτρησης της ισχύος των κινητήρων με δυναμόμετρα είναι μη πρακτικές για τους σκοπούς της τεχνικής διαγνωστικής, λόγω της επίπονης και χρονοβόρας διαδικασίας. Η μέτρηση μεγεθών όπως: η συμπίεση των χώρων καύσης ή η πίεση που δημιουργείται στο χώρο της ελαιολεκάνης από διαφυγόντα καυσαέρια κ.ά., δίνουν πληροφορίες για την τεχνική κατάσταση επιμέρους τμημάτων του κινητήρα. Γι' αυτό λοιπόν αναζητούνται μέθοδοι, με τις οποίες μπορούν να μετρηθούν οι παράμετροι της ισχύος σύντομα και με μη επεμβατικό τρόπο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία μέθοδος μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης στους επιμέρους κυλίνδρους ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης. Πρόκειται για μία μέθοδο γρήγορης διάγνωσης της τεχνικής κατάστασης του κινητήρα στο σύνολό του, που υλοποιήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων.

Λέξεις κλειδιά: κινητήρας εσωτερικής καύσης, τεχνική διαγνωστική, ισχύς, γωνιακή επιτάχυνση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης είναι η πλέον αποδοτική θερμική μηχανή. Χρησιμοποιείται ευρέως σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται μεγάλες συγκεντρώσεις ισχύος, όπως των αυτοκινούμενων γεωργικών μηχανημάτων.

Η τεχνική κατάστασή του, παίζει σημαντικό ρόλο σε τρέχοντα ζητήματα της γεωργικής παραγωγής (όπως η αποδοτικότητα και οικονομικότητα των μηχανημάτων, η έγκαιρη ολοκλήρωση των εργασιών κ.λ.π.). Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία του κινητήρα εσωτερικής καύσης, που έχει σχέση με την αποδοτικότητά, είναι η ισχύς του. Η μέτρησή της πραγματοποιείται με έμμεσο τρόπο, δηλαδή με μέτρηση των παραμέτρων που τη συνιστούν (ISO 789/1), (Τσατσαρέλης, 1997). Η μέτρηση της ισχύος των κινητήρων εσωτερικής καύσης μπορεί να γίνει με τη βοήθεια δυναμόμετρου (Zhang et al., 1987), (Nishizaki et al., 1987) και εναλλακτικά με τη μέθοδο της επιτάχυνσης άνευ φορτίου, της οποίας διαγνωστικό σήμα είναι η γωνιακή επιτάχυνση. Σύμφωνα με τον Heywood (1992), η γωνιακή επιτάχυνση του κινητήρα, είναι ένα σημαντικό διαγνωστικό σήμα ανάλογο της ροπής στρέψης και της ισχύος. Τα τελευταία χρόνια, έχουμε σημαντικές προσπάθειες μέτρησης της ισχύος των ελκυστήρων, στις συνθήκες εργασίας των αγρών. Στην κατεύθυνση αυτή συνετέλεσε η ραγδαία εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής. Για το σκοπό αυτό, οι Zheng και Luyan (1985), Palmer (1985), Zheng (1988), ανέπτυξαν φορητές συσκευές καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων, που σχετίζονται με την ισχύ.

Για μία συνολική προσέγγιση της τεχνικής κατάστασης του κινητήρα επαρκεί η μέτρηση της ισχύος ολόκληρου του κινητήρα, αλλά για ένα λεπτομερέστερο διαγνωστικό έλεγχο χρειάζεται η μέτρηση της ισχύος στους επιμέρους κυλίνδρους του. Για παράδειγμα, η μερική φθορά των βαλβίδων σε έναν από τους κυλίνδρους ενός τετρακύλινδρου κινητήρα των 60 kW, μπορεί να προκαλέσει πτώση της ισχύος κατά 1.5 kW δηλαδή 2.5%. Μετρώντας συνολικά την ισχύ του κινητήρα δεν μπορούμε να ανιχνεύσουμε αυτή τη διαφορά, επειδή το 2.5% βρίσκεται στο όριο ακριβείας των χρησιμοποιούμενων μεθόδων μέτρησης της ισχύος (Havlicek et al., 1983).

Βασικό στόχο της εργασίας αποτελεί η παρουσίαση σχεδίασης, υλοποίησης και πειραματικής επαλήθευσης ενός συστήματος μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης σαν συνάρτηση του αριθμού στροφών για κινητήρες εσωτερικής καύσης.

¹ Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Σχολή Τεχνολόγων Γεωπονίας, Τμήμα Γεωργικών Μηχανών & Αρδεύσεων, 41110, Λάρισα (e-mail: gravalos@in.gr)

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.1 Παρουσίαση της μεθόδου

Πρόκειται για μία μέθοδο μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης, η οποία διακρίνεται για το σχετικά χαμηλό κόστος και τη σύντομη διάρκεια εκτέλεσης. Επειδή η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε τετρακύλινδρους κινητήρες, κάθε άλλη αναφορά θα παραπέμπει μόνο σε αυτούς.

Ο κινητήρας κατά τη διάρκεια της μέτρησης επιλέχθηκε να λειτουργεί με τους μισούς κυλίνδρους. Δύο ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες κατευθύνσεως συνδέονται αντίστοιχα διά ενός "T" στο κύκλωμα υψηλής πίεσης του πρώτου και τρίτου κυλίνδρου του κινητήρα. Οι βαλβίδες αυτές βασίζόμενες σε μία διακοπτική λογική, ανοίγουν και κλείνουν γρήγορα, επιτρέποντας μια μέγιστη παροχή καυσίμου στους κυλίνδρους. Ο κινητήρας επιταχύνει για σύντομο χρονικό διάστημα και επομένως μπορεί να μετρηθεί η γωνιακή επιτάχυνση των επιμέρους κυλίνδρων. Στους δύο άλλους κυλίνδρους πραγματοποιείται μέτρηση της παροχής καυσίμου με τη βοήθεια ενός μετρητή σταθερού όγκου (δηλαδή διαπιστώνεται ο αριθμός των εγχύσεων σε σταθερό όγκο).

Οι στροφές του κινητήρα ρυθμίζονται αυτόματα με τη βοήθεια ηλεκτρονικής διάταξης, της οποίας ενεργοποιητές είναι οι δύο ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες. Οι δύο βαλβίδες βρίσκονται αρχικά στην κατάσταση "1". Με την έναρξη της μέτρησης οι βαλβίδες περνούν στην κατάσταση "2", δηλαδή της επιτάχυνσης του κινητήρα. Κατά τη διάρκεια μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης, οι βαλβίδες περνούν στην κατάσταση "3" και στη συνέχεια στην κατάσταση "4", ώστε να μετρηθούν οι (ϵ_1) και (ϵ_2) αντίστοιχως. Τη μέτρηση της γωνιακής επιτάχυνσης ακολουθεί η μέτρηση της γωνιακής επιβράδυνσης (ϵ_3) , όπως προβλέπεται στην κατάσταση "5". Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων οι δύο βαλβίδες επιστρέφουν στην αρχική κατάσταση "1". Η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές και στη συνέχεια λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται για τη μέτρηση της γωνιακής επιτάχυνσης του δεύτερου και τέταρτου κυλίνδρου και τη μέτρηση παροχής καυσίμου στον πρώτο και τρίτο κύλινδρο.

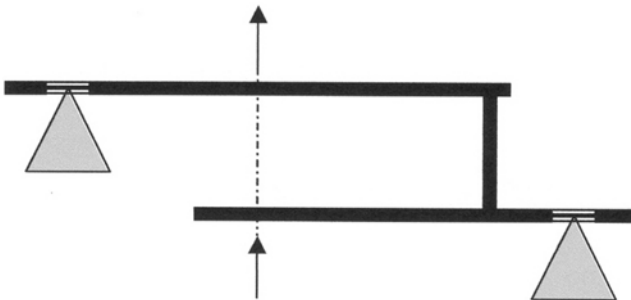
Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το *t*-test, όπως περιγράφεται από τους Miller et al. (1990) και Papoulis (1990), σε επίπεδο σημαντικότητας $< 0,05$. Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων μπορούμε να υπολογίσουμε την ενδεικτική ροπή στρέψης των επιμέρους κυλίνδρων και επομένως ολόκληρου του κινητήρα.

2.2 Περιγραφή του εξοπλισμού

Στον εξοπλισμό περιλαμβάνονται δύο ηλεκτρονικές διατάξεις: α) η διάταξη ρύθμισης των στροφών του κινητήρα και β) η διάταξη μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης.

Διάταξη ρύθμισης των στροφών

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης των παλμοσειρών και τις δύο ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες. Για την κατασκευή των κυκλωμάτων χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά λογικά στοιχεία όπως πύλες (gates) NAND και απλά κυκλώματα RC, των οποίων η σταθερή χρόνου (time constant) υπολογίστηκε από τη σχέση: $t = R \cdot C$, όπου R είναι η αντίσταση σε $[\Omega]$ και C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή σε [F].



Σχήμα 1: Άποψη του μηχανισμού μετάδοσης της δύναμης

Βασικό στοιχείο της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας είναι μία βαλβίδα κατάθλιψης όμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται στην αντλία εκτόξευσης. Για την ολοκλήρωση της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας απαιτούνται ακόμη δύο μοχλοί που συνδέονται μηχανικά μεταξύ τους (σχήμα 1), ένα επίμηκες πηνίο και ο πυρήνας του. Υπολογίστηκε ότι για μία διαδρομή 0.15 mm της βαλβίδας κατάθλιψης, ώστε να απελευθερωθεί το καύσιμο στο κύκλωμα υψηλής πίεσης, απαιτείται δύναμη 300 N. Με βάση τα στοιχεία αυτά σχεδιάστη-

κε και κατασκευάστηκε το σωληνοειδές.

Διάταξη μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης

Για τη μέτρηση της γωνιακής επιτάχυνσης χρησιμοποιήθηκαν ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, το οποίο βασίζεται σε ένα δυαδικό απαριθμητή. Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης (DMP 333) της BD Sensors, επιλέχθηκε επειδή: λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες, έχει μικρό μέγεθος και δεν επηρεάζεται από τους κραδασμούς. Ο αισθητήρας ανιχνεύει τις μεταβολές της πίεσης, μέσω της μετατόπισης ενός λεπτού διαφράγματος, που πιέζει έναν πιεζοηλεκτρικό κρυστάλλο. Τα ηλεκτρικά φορτία που εμφανίζονται στις όψεις του κρυστάλλου είναι ανάλογα της ασκούμενης πίεσης. Μεταξύ αγωγού υψηλής πίεσης και εγχυτήρα προστέθηκε ένα μεταλλικό παραλληλεπίπεδο, στο οποίο κατασκευάστηκαν οπές και δίοδοι για τη ροή του πετρελαίου και χρησιμεύει ως υποδοχέας του αισθητήρα.

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα αποτελείται από ένα διασταθές κύκλωμα latch και το ολοκληρωμένο του δυαδικού απαριθμητή (binary counter) 74LS93. Με το κύκλωμα αυτό μπορεί να μετρηθεί το χρονικό διάστημα μεταξύ πρώτου και δεύτερου ψεκασμού (t_1) και το χρονικό διάστημα μεταξύ δεύτερου και τρίτου ψεκασμού (t_2). Γνωρίζοντας τους χρόνους (t_1) και (t_2) μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνιακή επιτάχυνση από την ακόλουθη σχέση (Kozousek, 1971):

$$\varepsilon = 100 (\Delta t / t^3) \quad (1)$$

Όπου: $\Delta t = t_1 - t_2$ και $t = t_1 + t_2$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Την "ισχύ" και τη "ροπή στρέψης" ως φορείς πληροφοριών θα πρέπει να τις εξετάζουμε από δύο διαφορετικές πλευρές. Αφενός από την πλευρά της απόδοσης του μηχανήματος κατά την εκτέλεση των εργασιών (από τις πιο σημαντικές πληροφορίες για την οικονομική εκμετάλλευση ενός μηχανήματος) και αφετέρου από την πλευρά του επιστημονικού πεδίου της τεχνικής διαγνωστικής. Στην πρώτη περίπτωση θα πρέπει να ασχοληθούμε με τα ωφέλιμα μεγέθη, ενώ στη δεύτερη είναι προτιμότερο να μελετήσουμε τα ενδεικτικά μεγέθη. Για τη σύνταξη μίας γενικής έκθεσης, που να αφορά συνολικά την τεχνική κατάσταση ενός κινητήρα, είναι επαρκής η μέτρηση της ολικής ισχύος (P). Όμως για να προβούμε στη σύνταξη μίας λεπτομερειακής διάγνωσης θα πρέπει να διερευνήσουμε με προσοχή την ισχύ (P_j) και τις παραμέτρους που τη συνιστούν (M_j , ε_j) στους διαφορετικούς κυλίνδρους του κινητήρα. Η μέτρηση της ισχύος πραγματοποιείται με τη βοήθεια δυναμόμετρου και με βάση ειδικούς κώδικες δοκιμών. Μία εναλλακτική μέθοδος μέτρησης της ισχύος είναι η μέθοδος της επιτάχυνσης του κινητήρα χωρίς φορτίο, της οποίας διαγνωστικό σήμα είναι η γωνιακή επιτάχυνση. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται απόλυτα για τους σκοπούς της τεχνικής διαγνωστικής. Επίσης για την αποτελεσματικότερη ανίχνευση των διαφόρων δυσλειτουργιών συνιστάται η μέτρηση των μεγεθών αυτών να γίνεται στο 45%, 75% ή 90% των ονομαστικών στροφών.

Για την πειραματική επαλήθευση της μεθόδου μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης, χρησιμοποιήθηκε ένας ελκυστήρας με κινητήρα ισχύος 46 KW. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ειδική αίθουσα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος χώρου (θερμοκρασίας αέρα $\theta_0 = 20$ °C, πίεσης $p_0 = 97.9$ kPa και σχετικής υγρασίας 57 %). Ο ενιαίος τρόπος εκτέλεσης των δοκιμών δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων και εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων για την αξιοπιστία του συστήματος μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης. Αρχικά έγινε η μέτρηση του χρόνου (t_1), δηλαδή του χρονικού διαστήματος μεταξύ του πρώτου και δεύτερου ψεκασμού, αφού προηγουμένως εντοπίστηκε η στιγμή έναρξης του πρώτου ψεκασμού. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τον πρώτο κύλινδρο παρατίθενται στον πίνακα I. Στη συνέχεια στον πίνακα II παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του χρόνου (t_2), δηλαδή του χρονικού διαστήματος μεταξύ του δεύτερου και τρίτου ψεκασμού επίσης για τον πρώτο κύλινδρο. Παρόμοια δεδομένα που αφορούν το χρονικό διάστημα, το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών ψεκασμών μετρήθηκαν και για τους υπόλοιπους κυλίνδρους του κινητήρα.

Από τη μελέτη των δεδομένων στους πίνακες I και II επιβεβαιώνεται ότι ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών ψεκασμών μειώνεται καθώς ο κινητήρας επιταχύνει και ακριβώς πάνω σ' αυτή τη χρονική διαφορά βασίζεται η αρχή της προτεινόμενης μεθόδου μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης. Επίσης από τη στατιστική ανάλυση

των αποτελεσμάτων αφενός τεκμηριώνεται η καλή επαναληψιμότητα του συστήματος και αφετέρου προκύπτει ότι οι μέσοι όροι τόσο για το χρονικό διάστημα t_1 όσο και για το χρονικό διάστημα t_2 δε διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας < 0.05 . Σύμφωνα με τους Beckwith et al. (1995), επίπεδο σημαντικότητας < 0.05 θεωρείται ότι είναι πολύ ικανοποιητικό για προβλήματα όπως το εξεταζόμενο.

Πίνακας I: Μετρήσεις του χρονικού διαστήματος (t_1) για τον πρώτο κύλινδρο.

	n [rpm]	t_1 [ms]	n [rpm]	t_1 [ms]	n [rpm]	t_1 [ms]
	959.8	125.54	1264.1	94.84	1664.6	72.07
	955.0	124.64	1262.3	94.48	1664.1	72.18
	958.2	125.24	1263.5	94.72	1664.4	72.11
	961.4	125.84	1262.9	94.60	1663.8	72.23
	956.6	124.94	1264.7	94.96	1664.2	72.15
	959.8	125.54	1263.5	94.72	1664.5	72.13
	955.0	124.64	1262.3	94.48	1664.1	72.18
	958.2	125.24	1264.1	94.84	1664.6	72.07
	955.0	124.64	1264.7	94.96	1663.8	72.23
	959.8	125.54	1262.9	94.60	1664.2	72.15
M.O.	957.9	125.18	1263.5	94.72	1664.2	72.15
T.A.	2.4	0.4	0.9	0.2	0.3	0.1
μ	125.18 \pm 0.29		94.72 \pm 0.14		72.15 \pm 0.07	

Επίπεδο σημαντικότητας < 0.05

Πίνακας II: Μετρήσεις του χρονικού διαστήματος (t_2) για τον πρώτο κύλινδρο.

	n [rpm]	t_2 [ms]	n [rpm]	t_2 [ms]	n [rpm]	t_2 [ms]
	961.4	123.41	1268.1	93.87	1668.5	71.74
	962.0	123.50	1267.5	93.78	1667.9	71.65
	961.6	123.44	1268.3	93.90	1668.3	71.71
	961.8	123.47	1267.9	93.84	1668.1	71.68
	962.2	123.53	1268.3	93.90	1668.5	71.74
	961.6	123.44	1267.7	93.81	1668.3	71.71
	962.0	123.50	1267,5	93.78	1668.7	71.77
	961.4	123.41	1268.1	93.87	1668.1	71.68
	962.2	123.53	1267.7	93.81	1668.5	71.74
	961.6	123.44	1268.3	93.90	1667.9	71.65
M.O.	961.8	123.47	1267.9	93.84	1668.3	71.71
T.A.	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1
μ	123.47 \pm 0.07		93.84 \pm 0.07		71.71 \pm 0.07	

Επίπεδο σημαντικότητας < 0.05

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων και της στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων ακολούθησε ο υπολογισμός των ενδεικτικών τιμών της γωνιακής επιτάχυνσης και της ροπής στρέψης (πίνακας III). Για το σκοπό αυτό έγινε ένα μικρό πρόγραμμα εκτέλεσης υπολογισμών σε Microsoft Excel, του οποίου το φύλλο εργασίας παραθέτουμε στην οθόνη του σχήματος 2. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε υπολογίστηκαν για

κάθε κύλινδρο ξεχωριστά η γωνιακή επιτάχυνση (ϵ_j), η ενδεικτική γωνιακή επιτάχυνση (ϵ_{ij}) και η ενδεικτική ροπή στρέψης (M_{ij}), με βάση τις μέσες τιμές των χρόνων (t_1) και (t_2). Ακόμη υπολογίστηκε συνολικά η ενδεικτική ροπή στρέψης ($\Sigma M_i = 243.14 \text{ Nm}$). Τα αποτελέσματα αυτά διασταυρώθηκαν και επιβεβαιώθηκαν με βάση τα στοιχεία δοκιμών του κατασκευαστή. Προφανώς, έχοντας στη διάθεσή μας αυτά τα δεδομένα μπορούμε πλέον να γνωματεύσουμε για την τεχνική κατάσταση του κινητήρα.

Πίνακας III: Υπολογισμός ενδεικτικών τιμών γωνιακής επιτάχυνσης και ροπής στρέψης στο 75% των ονομαστικών στροφών του κινητήρα.

ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ	t1 [ms]	t2 [ms]	Δt [ms]	t [ms]	εj [rad/s ²]	εd [rad/s ²]	εij [rad/s ²]	I [Nms ²]	Mij [Nm]
1	72,15	71,71	0,44	143,86	14,779	32,345	47,1239	1,29	60,7897965
2	72,17	71,73	0,44	143,9	14,766	32,345	47,1116	1,29	60,77390291
3	72,14	71,7	0,44	143,84	14,785	32,345	47,13	1,29	60,79774992
4	72,16	71,72	0,44	143,88	14,772	32,345	47,1177	1,29	60,78184749
								ΣMi [Nm]	243,1432968

Σχήμα 2: Η οθόνη του υπολογιστικού φύλλου του Excel.

Τα στοιχεία δοκιμών του κατασκευαστή αποτελούν σαφώς θετικές ενδείξεις για την ακρίβεια του συστήματος μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης, όμως δεν αποτελούν μετρήσεις. Για να διαπιστωθεί η ακρίβεια του συστήματος (αισθητήρες + ηλεκτρονικές διατάξεις) έγινε έλεγχος των μετρήσεων με τη βοήθεια ενός δυναμόμετρου ZÖLLNER 350 AC.

Στον πίνακα IV παρουσιάζεται ο χάρτης με βάση τον οποίο υλοποιείται η μέτρηση της ροπής στρέψης των επιμέρους κυλίνδρων ενός τετρακύλινδρου κινητήρα, με τη μέθοδο της σταδιακής αποσύνδεσης των κυλίνδρων. Η διαδικασία μέτρησης της ροπής στρέψης με τη μέθοδο της σταδιακής αποσύνδεσης κυλίνδρων και του τρόπου υπολογισμού της ενδεικτικής τιμής της, για τους επιμέρους κυλίνδρους ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης, δίνεται στο παράρτημα. Από τον πίνακα γίνεται φανερό ότι για έναν τετρακύλινδρο κινητήρα χρειάζονται συνολικά μόνο 5 μετρήσεις. Η μέθοδος αυτή είναι απλή και εκτελείται σχετικά γρήγορα. Στον πίνακα V που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της ενδεικτικής ροπής στρέψης (M_{ij}), οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων στο σφόνδυλο του κινητήρα. Στην προκειμένη περίπτωση η ενδεικτική ροπή στρέψης, στο 75% των ονομαστικών στροφών του κινητήρα, είναι $\Sigma M_i = 243.3 \text{ Nm}$.

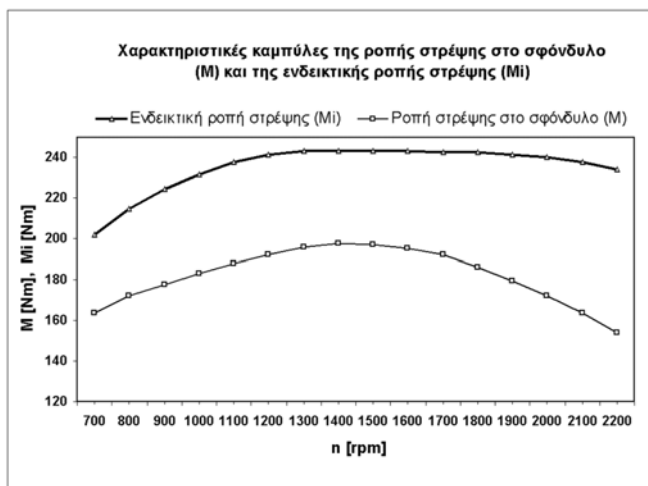
Τέλος στο σχήμα 3 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της ροπής στρέψης στο σφόνδυλο και της ενδεικτικής ροπής στρέψης σε συνάρτηση των στροφών του κινητήρα, όπως αυτές μετρήθηκαν με το δυναμόμετρο ZÖLLNER 350 AC και σύμφωνα με τον κώδικα DIN 70020. Από την καμπύλη της ενδεικτικής ροπής στρέψης του διαγράμματος διαπιστώνουμε ότι στο 75% των ονομαστικών στροφών (1650 rpm), η ενδεικτική ροπή λαμβάνει την τιμή $M_i = 243.3 \text{ Nm}$.

Πίνακας IV: Σειρά ανάφλεξης των κυλίνδρων κατά τη διάρκεια μέτρησης της ροπής στρέψης στο σφόνδυλο του κινητήρα.

Αριθμός μέτρησης	Σειρά ανάφλεξης κυλίνδρων				Μέτρηση ροπής στρέψης στο σφόνδυλο [N·m]	Ενδεικτική ροπή στρέψης M_{ij} [N·m]
1	1	-	3	-	$M_{1,3}$	$M_{i1} = M_{1,3} - M_3$
2	-	-	3	-	M_3	
3	-	2	3	-	$M_{2,3}$	$M_{i2} = M_{2,3} - M_3$
4	-	2	-	-	M_2	$M_{i3} = M_{2,3} - M_2$
5	-	2	-	4	$M_{2,4}$	$M_{i4} = M_{2,4} - M_2$

Πίνακας V: Οι τελικές τιμές της ενδεικτικής ροπής στρέψης στο 75% των ονομαστικών στροφών του κινητήρα.

M_{i1} [N·m]	M_{i2} [N·m]	M_{i3} [N·m]	M_{i4} [N·m]	ΣM_i [N·m]
60.9	60.7	60.9	60.8	243.3

**Σχήμα 3:** Οι χαρακτηριστικές καμπύλες της ροπής στρέψης στο σφόνδυλο και της ενδεικτικής ροπής στρέψης σε συνάρτηση των στροφών του κινητήρα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που ελήφθησαν με τις δύο διαφορετικές μεθόδους, δηλαδή τόσο με το σύστημα μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης όσο και με το δυναμόμετρο, διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές. Επομένως, μπορούμε να δεχτούμε την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου και του συστήματος μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης. Επίσης το σύστημα αυτό δοκιμάστηκε σε κινητήρες διαφορετικής ισχύος και τεχνικής κατάστασης. Μάλιστα η πειραματική έρευνα έδειξε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το αποτέλεσμα επηρεάζεται από την τεχνική κατάσταση του συστήματος τροφοδοσίας, ιδίως από

την παροχρεωμένη ποσότητα καυσίμου. Για το λόγο αυτό, όπως προαναφέρθηκε, γινόταν μετρήσεις της παροχής από μία ανεξάρτητη συσκευή σταθερού όγκου. Στην εργασία αυτή δεν δίδονται στοιχεία για την παροχή καυσίμου, την ειδική κατανάλωση και τη συσκευή μέτρησης σταθερού όγκου επειδή πρόκειται να αποτελέσουν το αντικείμενο μίας μελλοντικής εργασίας. Τέλος, οι ηλεκτρονικές διατάξεις προβλέπεται να ενσωματωθούν σε μία φορητή συσκευή, με την οποία θα είναι δυνατόν να μετρήσουμε γρήγορα και αξιόπιστα τις παραμέτρους οποιουδήποτε κινητήρα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Το ανωτέρω σύστημα αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο μέτρησης των παραμέτρων της ισχύος και μπορεί να συμβάλει στη γρήγορη και αξιόπιστη διάγνωση της τεχνικής κατάστασης οποιουδήποτε κινητήρα εσωτερικής καύσης.
2. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν με τις δύο διαφορετικές μεθόδους, δηλαδή τόσο με το σύστημα μέτρησης της γωνιακής επιτάχυνσης όσο και με το δυναμόμετρο ZÖLLNER 350 AC, προκύπτει ότι δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές. Επίσης από τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων τεκμηριώνεται η καλή επαναληψιμότητα του συστήματος, ενώ οι μέσοι όροι των χρόνων (t_1) και (t_2) δε διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας < 0.05 .
3. Το προτεινόμενο σύστημα σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους μέτρησης της ισχύος, προσαρμόζεται ευκολότερα στον ελκυστήρα, εκτελεί τις μετρήσεις γρηγορότερα και είναι χαμηλότερου κόστους. Η δοκιμή συμπεριλαμβανομένου του χρόνου σύνδεσης των ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων και του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης δεν ξεπερνά τα 30 λεπτά.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μέθοδος σταδιακής αποσύνδεσης κυλίνδρων

Η διαδικασία μέτρησης της ροπής στρέψης στους κινητήρες εσωτερικής καύσης με τη μέθοδο της σταδιακής αποσύνδεσης κυλίνδρων, περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1^ο: Ο κινητήρας εργάζεται με μικρότερο αριθμό κυλίνδρων, έστω (p). Κατά κανόνα στους τετρακύλινδρους κινητήρες, ο αριθμός των κυλίνδρων που εργάζονται λαμβάνεται $p=2$. Η ροπή στρέψης, με τη βοήθεια του δυναμόμετρου, μετράται στο σφόνδυλο και η ενδεικτική ροπή στρέψης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_{ip} = M_p + M_m \quad (\text{Π1})$$

Όπου: (M_{ip}) η ενδεικτική ροπή στρέψης για τον (p) αριθμό κυλίνδρων του κινητήρα, (M_p) η ροπή στρέψης στο σφόνδυλο για τον (p) αριθμό κυλίνδρων του κινητήρα και (M_m) η ροπή τριβών για ολόκληρο τον κινητήρα.

Βήμα 2^ο: Ο ένας από τους (p) κυλίνδρους αποσυνδέεται και η ροπή στρέψης μετράται εκ νέου στο σφόνδυλο. Στην περίπτωση αυτή για την ενδεικτική ροπή στρέψης θα ισχύει η σχέση:

$$M_{ip} - M_{iv} = M_{pv} + M_m \quad (\text{Π2})$$

Όπου: (M_{iv}) η ενδεικτική ροπή στρέψης του αποσυνδεδεμένου κυλίνδρου, ο οποίος συμβολίζεται με το δείκτη (v) και (M_{pv}) η ροπή στρέψης στο σφόνδυλο του κινητήρα, του οποίου ο αρχικός (p) αριθμός των κυλίνδρων έχει μειωθεί κατά τον κύλινδρο (v).

Η διαδικασία μέτρησης συνεχίζεται με τη διαδοχική σύνδεση και αποσύνδεση των επιμέρους κυλίνδρων και την καταγραφή των τιμών της ροπής στρέψης στο σφόνδυλο.

Βήμα 3^ο: Με βάση τις δύο ανωτέρω εξισώσεις (Π1) και (Π2) καταλήγουμε στην τελική σχέση υπολογισμού της ενδεικτικής ροπής στρέψης:

$$M_{iv} = M_p - M_{pv} \quad (\text{Π3})$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η ενδεικτική ροπή στρέψης ενός οποιουδήποτε κυλίνδρου (v) ισούται με τη διαφορά μεταξύ των ροπών στρέψης στο σφόνδυλο όταν ο κινητήρας εργάζεται με τον κύλινδρο (v) και όταν ο κύλινδρος αυτός έχει αποσυνδεθεί.

Power parameters measurement of a diesel engine**I. G. Gravalos¹, I. K. Raptis¹****ABSTRACT**

The diesel engine is the most efficient thermal engine. It is used widely in every case where big power concentrations are required, such as automotive agricultural machines. The classical power measurement methods with dynamometers are not practical for technical diagnostic purposes, because of the laborious and time-consuming procedure. The measurement of operating parameters, such as the combustion chamber pressure, the exhaust gas pressure in carter etc., provide us with information about the condition of the engine components. All the above help us to develop methods which can measure the power parameters in a direct, quick and non-intervening way. In the present paper we describe a measurement method of the angular acceleration in each cylinder of diesel engine, which may be used for quick diagnostic methods of the engine operating status, which can be accomplished electronically.

Key words: diesel engine, technical diagnosis, power parameters, angular acceleration.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beckwith, T., G., Marangoni, R., D., Lienhard, J., H., 1995. *Mechanical Measurements*. Fifth Edition. Addison Wesley Publishing Company.
- Havlicek, J., a kol., 1983. *Provozni spolehlivost stroju*. Statni zemedelske nakladatelstvi, Praha.
- Heywood, J. B., 1992. *Combustion Internal Engine Fundamentals*. McGraw-Hill International Editions.
- ISO 789/1: *Agricultural tractors – Test procedures*, Part: Power tests.
- Kozousek, J., 1971. *Teorie spalovacich motoru*. SNTL/ALFA.
- Miller, I., R., Freund, J., E., Johnson, R., 1990. *Probability and Statistics for Engineers*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Nishizaki, K., Ohshita, Y., Yagi, S., Ohtake, N., Sugiura, Y., Takahashi, H., 1987. Studies on the testing system for tractor performance. *Journal of the Japanese Society of Agricultural machinery*, vol. 49, no 4: 381-389.
- Palmer, J., 1985. Automatic collection of data on practical use of field machines. *Agric. Engr.* 40: 42-49.
- Papoulis, A., 1990. *Probability and Statistics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Τσατσαρέλης, Κ., 1997. *Γεωργικοί Ελκυστήρες*. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη. Θεσσαλονίκη.
- Zhang, N., Perumpral, J., V., Byler, R., K., 1987. Automatic control systems for optimizing diesel engine performance. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 2: 31- 46
- Zheng, D., Luyan, F., 1985. Microcomputerised dynamic strain indicator. Academic Conference on Application of Microcomputer and Microprocessor in Agricultural Machinery. *Chinese Society of Agricultural Machinery*, Tangshan.
- Zheng, D., 1988. Development of portable instruments for data acquisition and real time processing. *Agric Engr:* 53-57.

¹ *Technological Educational Institute of Larissa, Faculty of Agricultural Technology, Department of Agricultural Machinery & Irrigation, 41110, Larissa, Greece.*