

ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL

I. Γράβαλος*, **Z. Τσιρόπουλος**, **Θ. Γιαλαμάς**, **Δ. Κατέρης** και **Π. Ξυραδάκης**
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας,
Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, 41110 Λάρισα
*E-mail: gravalos@teilar.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή περιγράφει τη διάταξη ενός διαγνωστικού συστήματος, το οποίο θα μπορούσε να είναι χρήσιμο εργαλείο για τους μηχανικούς των συνεργείων, καλύπτοντας τις ανάγκες μίας γρήγορης και ακριβούς διάγνωσης βλαβών των κινητήρων diesel. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις διαγνωστικές συσκευές, εισάγονται από το χρήστη στο σύστημα λογισμικού TESTA_TOOL. Στη συνέχεια αρχίζει η διαβούλευση του συστήματος με το χρήστη και μετά την ολοκλήρωσή της, το λογισμικό παρουσιάζει το "λογικό" συμπέρασμα. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια υποδειγματικών περιπτώσεων, οι οποίες επιλύθηκαν από το σύστημα και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με λύσεις που δόθηκαν από διάφορους εμπειρογνώμονες. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ευρωστία στο σύστημα.

Λέξεις κλειδιά: σύστημα λογισμικού, διαγνωστική βλαβών, κινητήρας diesel.

A FAULT DIAGNOSIS SYSTEM FOR DIESEL ENGINES

I. Gravalos*, **Z. Tsiropoulos**, **Th. Gialamas**, **D. Kateris** and **P. Xyradakis**
Technological Educational Institute of Larissa, Faculty of Agricultural Technology,
Department of Biosystems Engineering, 41110 Larissa, Greece
*E-mail: gravalos@teilar.gr

ABSTRACT

This paper describes the test bench of a diagnostic system, which could be a useful tool for maintenance mechanics to generate rapid and precise fault diagnosis of the diesel engines. The data, which received from diagnostic devices, are given by the user to the software system TESTA_TOOL. Then the consultation of system with the user begins and after its completion, the software presents the "logical" conclusion. The control of system validation was realised through various test cases, that were solved by the system and then they were compared with solutions that were given by various experts. These results proved the robustness of the system.

Key words: software system, fault diagnosis, diesel engine.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συντήρηση και η τεχνική διάγνωση βλαβών των κινητήρων diesel όλων των μηχανημάτων βαρέως τύπου (όπως είναι και τα αυτο-προωθούμενα γεωργικά μηχανήματα) αποτελούν έναν πολυσύνθετο διεπιστημονικό έργο εφαρμοσμένης μηχανικής. Η τεχνική διάγνωση (technical diagnosis) ορίζεται ως μια διαδικασία ακριβούς προσδιορισμού των αιτιών μιας βλάβης και βασίζεται σε δύο διαφορετικούς τρόπους εκτίμησης. Ο πρώτος τρόπος αφορά την ποσοτική εκτίμηση μίας στιγμιαίας κατάστασης και ο δεύτερος τρόπος αφορά τον εντοπισμό των μηχανικών μερών με βλάβη. Η συντήρηση (maintenance) ορίζεται ως η διαδικασία αποκατάστασης μίας βλάβης, συνήθως με την αντικατάσταση ενός φθαρμένου ανταλλακτικού με ένα νέο, και περιλαμβάνει τρία βασικά βήματα: την υπηρετήση, επιθεώρηση και επισκευή. Η υπηρετήση (service) περιλαμβάνει όλα τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται για να διατηρήσουν έναν κινητήρα στην ονομαστική του κατάσταση και για να αποτρέψουν την οποιαδήποτε βλάβη. Η επιθεώρηση (inspection) περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα βήματα για να διαπιστωθεί και να αξιολογηθεί η τρέχουσα κατάσταση ενός κινητήρα, προκειμένου να ανιχνευθεί μία βλάβη σε αρχικό στάδιο και να ληφθούν τα αναγκαία προληπτικά μέτρα. Η επισκευή (repair) περιλαμβάνει όλα τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται για να αποκαταστήσουν έναν κινητήρα στην ονομαστική του κατάσταση. Η προληπτική συντήρηση γίνεται όλο και πιο σημαντική, καθώς οι κινητήρες diesel γίνονται περισσότερο σύνθετοι και το κόστος τους αυξάνεται. Ο έλεγχος της τεχνικής κατάστασης των κινητήρων diesel περιορίζει τους νεκρούς χρόνους των μηχανημάτων και αυξάνει την παραγωγικότητά τους.

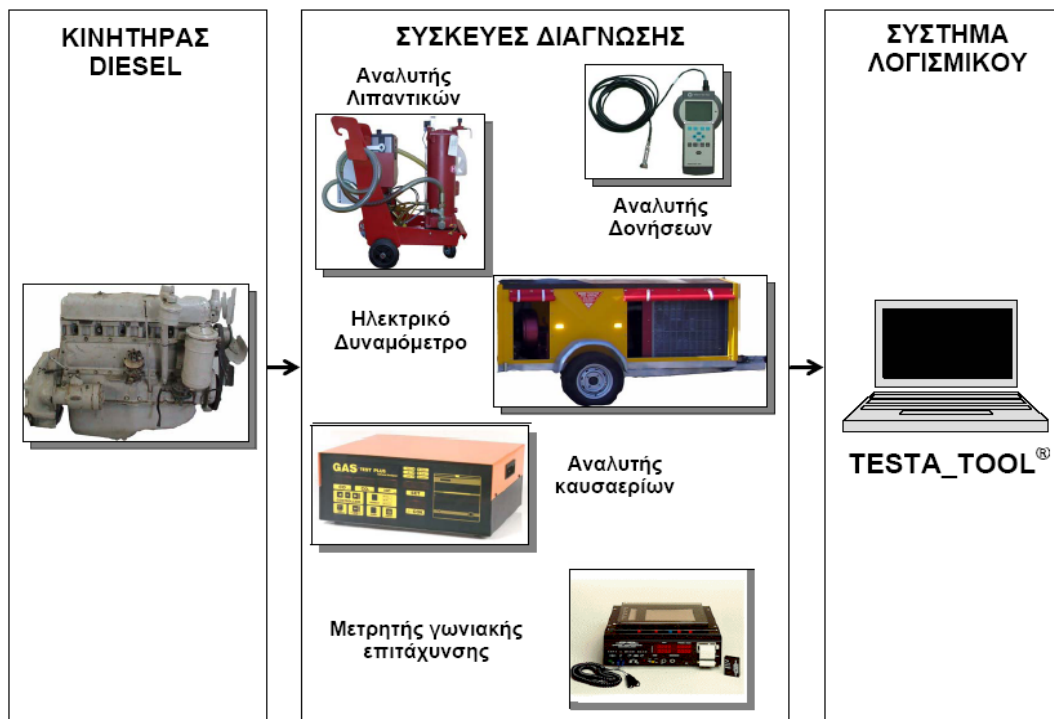
Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη συστημάτων διάγνωσης βλαβών για κινητήρες diesel. Οι Jardine et al. (1989) παρουσιάζουν μία μέθοδο μοντελοποίησης κινδύνου (hazards modelling) για να προσδιορίσουν, με τη βοήθεια ενός έμπειρου συστήματος ανάλυσης λιπαντικού, τον κίνδυνο εμφάνισης βλάβης σε κινητήρες diesel. Οι Gelgele και Wang (1998) περιγράφουν την εφαρμογή ενός έμπειρου συστήματος για κινητήρες αυτοκινήτων. Το πρωτότυπο λογισμικό που ονομάζεται EXEDS (expert engine diagnosis system) αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας την KnowledgePro, ένα εργαλείο ανάπτυξης έμπειρων συστημάτων, που τρέχει σε προσωπικό υπολογιστή. Ο σκοπός του λογισμικού αυτού είναι να βοηθήσει τους μηχανικούς στη διάγνωση βλαβών προβαίνοντας σε συστηματική ανάλυση των συμπτωμάτων της βλάβης, προσφέρει επίσης οδηγίες συντήρησης ή άλλων συμβουλευτικών υπηρεσιών. Οι Grimmelius et al. (1999) περιγράφουν και συγκρίνουν διαφορετικές τεχνικές παρακολούθησης καταστάσεων (condition-monitoring). Οι τεχνικές αυτές, που ανέπτυξαν για κινητήρες θαλάσσης, αφορούσαν την παρακολούθηση της τεχνικής κατάστασης με βάση τις δονήσεις από την περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα και την πίεση του συστήματος ψύξης. Οι Lebold και Thurston (2001) περιγράφουν τις απαιτήσεις ενός ευρύτερου συστήματος CBM (Condition Based Maintenance) και πρόγνωσης βλαβών. Οι Su et al. (2001) προσπάθησαν να μελετήσουν τη σχέση ανάμεσα στην ανθρώπινη γνώση και τη χρήση των ευφών μηχανών στο τομέα της τεχνικής συντήρησης. Για το σκοπό αυτό ανέπτυξαν ένα έμπειρο σύστημα προσδιορισμού των βλαβών για τις ανάγκες του τμήματος συντήρησης κινητήρων diesel των λεωφορείων της πόλης Ταϊπέι. Οι Tafreshi et al. (2002) περιγράφουν έναν αλγόριθμο ανάλυσης κυματομορφών, ο οποίος βασίζεται σε σήματα δονήσεων (vibration signals) στο πεδίο του χρόνου, τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζεται και προβαίνει σε ταξινόμηση βλαβών. Οι Mustapha et al. (2004) προτείνουν ένα σύστημα βασισμένο στη γνώση (knowledge-based system) που να παρέχει βοήθεια σε μηχανικούς για να πραγματοποιούν γρήγορη και ακριβή διάγνωση βλαβών των μηχανών αεροσκαφών. Οι Pernestal et al. (2006) περιγράφουν μια προσέγγιση κατά Bayes (Bayesian approach) που

απομονώνει τις βλάβες και μπορεί να βρει εφαρμογή στη διαγνωστική των κινητήρων diesel. Λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο μετρήσεων από το σύστημα και ένα σύνολο πιθανών βλαβών, ο στόχος είναι να υπολογιστεί η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης. Η τεχνική αξιολόγησης της ποιότητας των λιπαντικών είναι μια χρήσιμη μέθοδος στον έλεγχο της τεχνικής κατάστασης και τη διάγνωση βλαβών για τους κινητήρες diesel, ειδικά για εκείνους που λειτουργούν με χαμηλό αριθμό στροφών και υπό μεγάλα φορτία. Αλλά είναι δύσκολο να εφαρμοστεί ένα ευφύες σύστημα διάγνωσης, επειδή οι πληροφορίες που λαμβάνονται στερούνται λογικών σχέσεων. Για να λύσουν αυτό το πρόβλημα, οι Zhao et al. (2006) υιοθέτησαν μία μέθοδο συλλογιστικής των περιπτώσεων (case-based reasoning). Στη συλλογιστική αυτή χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες περιπτώσεις προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν στο παρελθόν. Η επιλογή της κατάλληλης περίπτωσης βασίζεται στην ομοιότητά της με την τρέχουσα.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα σύστημα διάγνωσης βλαβών κινητήρων diesel, αποτελούμενο από διαγνωστικές συσκευές και το λογισμικό TESTA_TOOL. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια υποδειγματικών περιπτώσεων, οι οποίες επιλύθηκαν από το σύστημα και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με λύσεις που δόθηκαν από διάφορους εμπειρογνώμονες.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

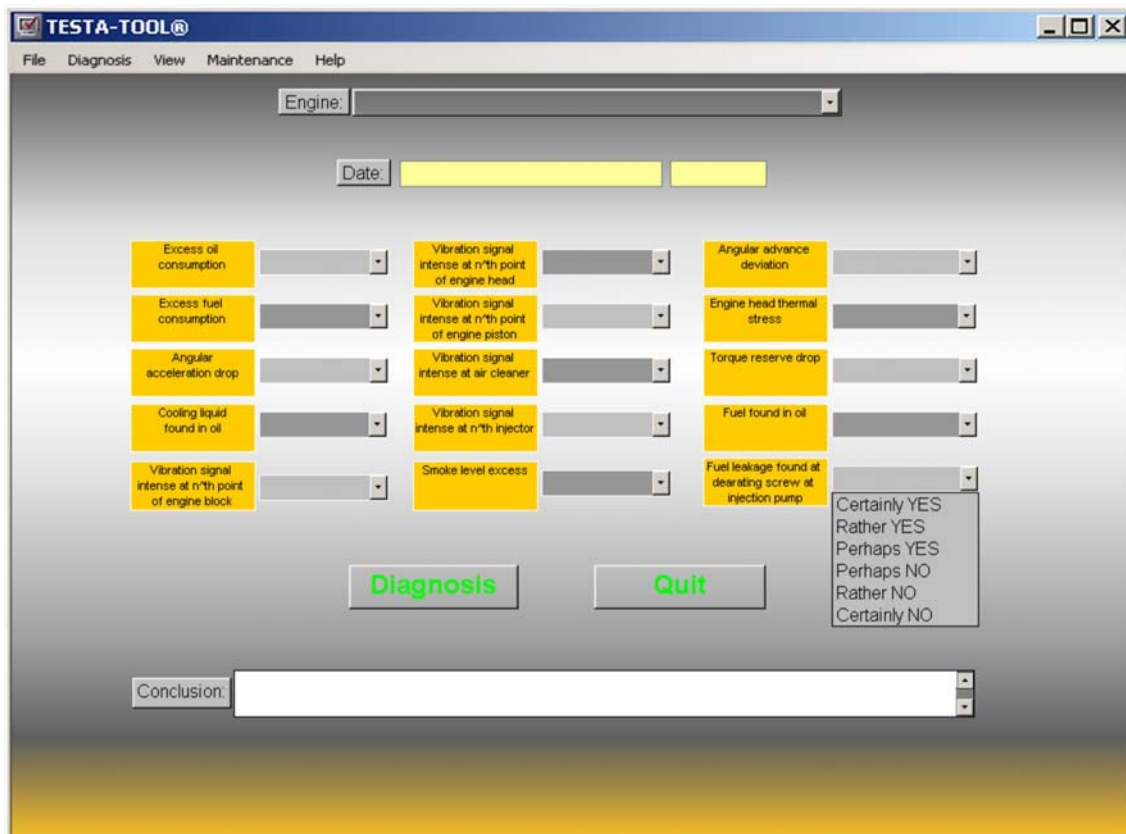
Το προτεινόμενο σύστημα διάγνωσης βλαβών κινητήρων diesel (Σχήμα 1) αποτελείται από διαγνωστικές συσκευές και ένα σύστημα λογισμικού με την κωδική ονομασία TESTA_TOOL. Με τη βοήθεια διαγνωστικών συσκευών όπως είναι: ο αναλυτής δονήσεων Vibrotest 60 (Bruel & Kjaer vibro), το αιθαλόμετρο (C'evertest Italia), το ηλεκτρικό δυναμόμετρο model XT200 με τον μετρητή ροής καυσίμου FM502 (N. J. Froment) και ο μετρητής γωνιακής επιτάχυνσης TB109 (Syntec Instruments), συλλέγονται τεχνικά δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια εισάγονται από τον χρήστη στο σύστημα λογισμικού TESTA_TOOL.



Σχήμα 1. Σύστημα διάγνωσης βλαβών κινητήρων diesel.

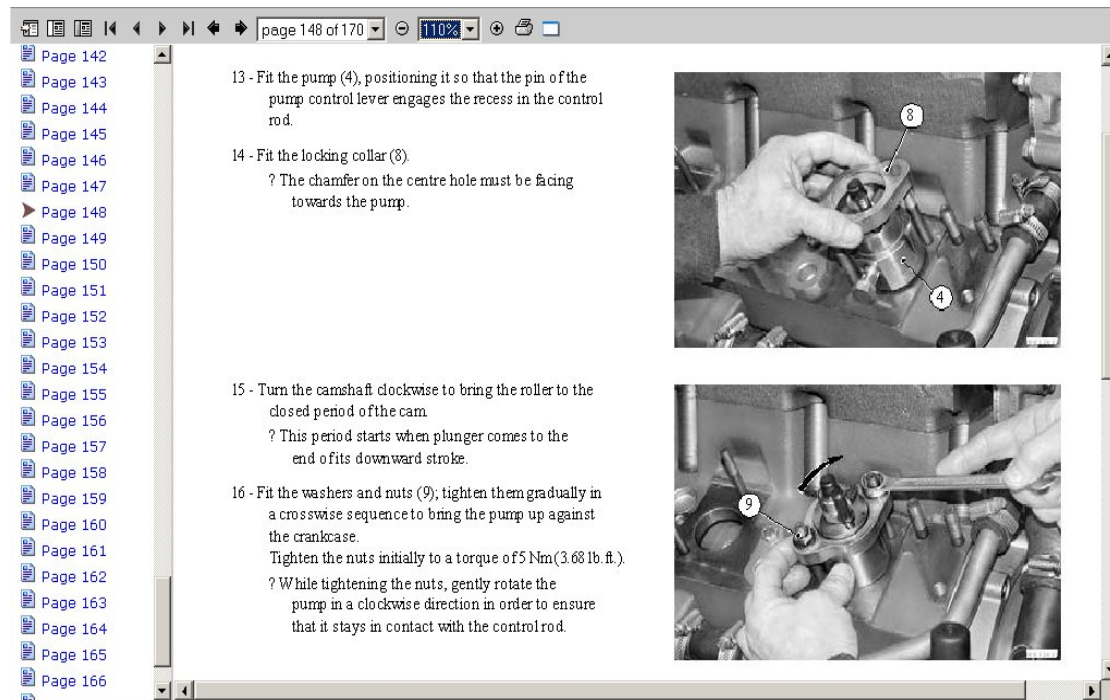
Το σύστημα λογισμικού TESTA_TOOL παρουσιάζεται αναλυτικά στην εργασία των Gravalos et al (2008). Είναι ένα πρωτότυπο σύστημα λογισμικού, του οποίου η αναπαράσταση της γνώσης έγινε με τη μορφή κανόνων (if-then) και βασίστηκε στην λογική προσέγγισης των παραθύρων. Η οθόνη (screen layout) διασφαλίζει ότι όλες οι λειτουργίες του συστήματος είναι πάντα προσιτές, ενώ περιορίζει την ανάγκη για το χρήστη να απομνημονεύσει διαφορετικές διαμορφώσεις της οθόνης. Το κεντρικό μενού έχει πέντε βασικές επιλογές: File, Diagnosis, View, Maintenance και Help.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η οθόνη πραγματοποίησης διαγνωστικών ελέγχων (DIAGNOSIS>ENGINE). Στην οθόνη αυτή γίνεται η σύννοδος διαβουλεύσεων με το χρήστη. Κατ' αρχάς, ο χρήστης επιλέγει τον τύπο του κινητήρα για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Μετά από την επιλογή, το σύστημα αρχίζει το διάλογο μαζί του. Το TESTA_TOOL υποβάλλει ερωτήσεις στο χρήστη. Οι πιθανές απαντήσεις του χρήστη είναι οι ακόλουθες: 1) Βεβαίως ναι, 2) μάλλον ναι, 3) ίσως ναι, 4) ίσως όχι, 5) μάλλον όχι, και 6) βεβαίως όχι. Μετά από την ολοκλήρωση της διαβούλευσης με το σύστημα, πρέπει να γίνει κλικ στο κλειδί "diagnosis" και το TESTA_TOOL παρουσιάζει το "λογικό" συμπέρασμα. Το κλειδί "Quit" επιτρέπει στο χρήστη να σταματήσει προσωρινά τη διαβούλευση για να συνεχίσει κάποια άλλη χρονική στιγμή, ενώ τα στοιχεία αποθηκεύονται σε ένα αρχείο (case file).



Σχήμα 2. Η οθόνη πραγματοποίησης διαγνωστικών ελέγχων του TESTA_TOOL.

MAINTENANCE > WORKSHOP MANUALS & > TROUBLESHOOTING CHARTS. Οι επιλογές αυτές ενεργοποιούν τη διαβούλευση με το σύστημα, όπου ο χρήστης μπορεί να λάβει χρήσιμες τεχνικές πληροφορίες για τον τρόπο αποκατάστασης μίας βλάβης. Συγκεκριμένα, μπορεί να ανατρέξει εύκολα και γρήγορα στα εγχειρίδια επισκευών συνεργείου (Σχήμα 3) ή να μελετήσει τα διαγράμματα ροής ανίχνευσης και αποκατάστασης βλαβών.



Σχήμα 3. Οθόνη παροχής τεχνικών συμβουλών.

Τέλος, το σύστημα λογισμικού TESTA_TOOL σχεδιάστηκε για να τρέχει σε υπολογιστές IBM PC-compatible με επεξεργαστή Pentium 166 ή μεγαλύτερο, 64 MB μνήμη RAM, 340 MB σκληρό δίσκο, 128 MB κάρτα γραφικών, CD-ROM για την εγκατάσταση του προγράμματος, ποντίκι ή άλλη συσκευή. Απαιτήσεις λογισμικού: Microsoft Windows 98/Me/NT, SP6/2000/XP/Vista.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας (validation) και η επαλήθευση (verification) της διαδικασίας και του συστήματος διάγνωσης βλαβών πραγματοποιήθηκαν σε έναν κινητήρα diesel Lamborghini 1000.6-WTI, με τη μελέτη τριών διαφορετικών υποδειγματικών περιπτώσεων (test cases): στη πρώτη περίπτωση μελετήθηκε "κακή ρύθμιση των ανεξάρτητων αντλιών εκτόξευσης πετρελαίου", στη δεύτερη περίπτωση μελετήθηκε "στόμωση του φίλτρου αέρα" και στην τρίτη περίπτωση μελετήθηκε "κακή ρύθμιση των βαλβίδων εισαγωγής/ εξαγωγής". Στη συνέχεια τα αποτελέσματα που έδωσε το σύστημα συγκρίθηκαν με λύσεις που προτάθηκαν από δέκα διαφορετικούς εμπειρογνώμονες (ειδικευμένους μηχανικούς).

3.1. ΠΡΩΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η οποιαδήποτε μεταβολή στη ρύθμιση του συστήματος τροφοδοσίας έχει επιπτώσεις στη συμπεριφορά του κινητήρα. Μία αύξηση της τάξεως του 20% της παροχής καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος κατά 10% με τίμημα σημαντική αύξηση των εκπομπών αιθάλης και καταπόνηση του κινητήρα. Για να επαληθευθεί η διαγνωστική διαδικασία, μελετήθηκε αρχικά, η περίπτωση της κακής ρύθμισης των ανεξάρτητων αντλιών εκτόξευσης πετρελαίου στον κινητήρα. Για το σκοπό αυτό τρεις από τις συνολικά έξι ανεξάρτητες αντλίες ρυθμίστηκαν εσφαλμένα ώστε να παρέχουν μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου. Οι μετρήσεις, με τη βοήθεια των διαγνωστικών συσκευών, πραγματοποιήθηκαν πριν και μετά από τη μεταβολή ρύθμισης των αντλιών. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στη συνέχεια, έγινε η τελική διαβούλευση με το λογισμικό TESTA_TOOL και το αποτέλεσμα που προέκυψε

από αυτήν ήταν: "Βλάβη στις αντλίες εκτόξευσης πετρελαίου, ενδεχόμενα αίτια βλάβης: κακή ρύθμιση αντλιών, σπασμένο ελατήριο βαλβίδας εκτόξευσης, κακή στεγανότητα κυλίνδρου και εμβόλου αντλίας, φθορά εμβόλου αντλίας, φθαρμένο ελατήριο εμβόλου".

Στο ίδιο ακριβώς συμπέρασμα κατέληξαν και οι δέκα από τους εμπειρογνώμονες με τους οποίους διαβουλευτήκαμε στη συνέχεια, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα της διάγνωσης από το σύστημα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι τέσσερις από αυτούς θεώρησαν πιθανό και το ενδεχόμενο βλάβης στους εγχυτήρες καυσίμου. Είναι φανερό, ότι για να διαγνωστεί επακριβώς η βλάβη στις αντλίες εκτόξευσης, χρειάζεται συμπληρωματικός διαγνωστικός έλεγχος. Ειδικότερα, χρειάζεται να μελετηθεί με προσοχή η χαρακτηριστική καμπύλη παροχής της κάθε αντλίας χωριστά, θα πρέπει να βρεθούν τα δύο σημεία της καμπύλης, που αντιστοιχούν στο 90% και 45% των ονομαστικών στροφών και να ελεγχθεί η απόκλισή τους από την κατάσταση της βέλτιστης ρύθμισης.

3.2. ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στη δεύτερη περίπτωση μελέτης, προκλήθηκε τεχνητά μερική "στόμωση του φίλτρου αέρα". Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, από τις διαγνωστικές συσκευές, δίδονται στον Πίνακα 1. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών δείχνει αυξημένη κατανάλωση καυσίμου, σημαντική πτώση της γωνιακής επιτάχυνσης, αύξηση του επιπέδου των δονήσεων στο φίλτρο αέρα και μεγάλη αύξηση των εκπομπών αιθάλης. Η αυξημένη εκπομπή αιθάλης σηματοδοτεί ενδεχόμενη στόμωση του φίλτρου αέρα, αλλά θα μπορούσε να μας οδηγήσει στην πρόβλεψη και άλλων βλαβών όπως στο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου, αλλά και στον ίδιο τον κινητήρα. Ο συνδυασμός αυτού του διαγνωστικού σήματος με άλλα, όπως για παράδειγμα η πτώση της γωνιακής επιτάχυνσης με ταυτόχρονη αύξηση των δονήσεων στο φίλτρο αέρα μας προϊδεάζει για ενδεχόμενη βλάβη στην είσοδο του αέρα και ειδικότερα του φίλτρου. Μετά την εισαγωγή των ευρημάτων στο σύστημα και τη διαβούλευση με αυτό, το σύστημα επιβεβαίωσε για ακόμη μία φορά την προσομοίωση της βλάβης. Επίσης, οι εμπειρογνώμονες κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα.

3.3. ΤΡΙΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην τρίτη υποδειγματική μελέτη, εξετάστηκε η περίπτωση "κακής ρύθμισης των βαλβίδων εισαγωγής/εξαγωγής". Για το λόγο αυτό, προβήκαμε σε εσφαλμένη ρύθμιση του διάκενου των βαλβίδων σε τέσσερις από τους έξι κυλίνδρους, με τον κινητήρα κρύο. Ειδικότερα, στον έκτο κύλινδρο οι βαλβίδες ρυθμίστηκαν με διάκενο στα 0,27 mm, στον τέταρτο κύλινδρο στα 0,28 mm, στον πρώτο στα 0,25 mm και στον τρίτο στα 0,30 mm. Τα διαγνωστικά σήματα που προέκυψαν με τη βοήθεια των διαγνωστικών συσκευών και τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 1, δείχνουν αυξημένη ειδική κατανάλωση, αυξημένο επίπεδο δονήσεων τόσο στις κεφαλές όσο και στο σώμα του κινητήρα, θερμική καταπόνηση των κεφαλών και πτώση της γωνιακής επιτάχυνσης. Η διαβούλευση με το σύστημα έδωσε "βλάβη στις βαλβίδες". Οι εμπειρογνώμονες δήλωσαν ότι σε πρώτη φάση θα έκαναν έλεγχο του διάκενου των βαλβίδων, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των διαγνωστικών σημάτων, κυρίως το αυξημένο επίπεδο δονήσεων των κεφαλών και εάν δεν προέκυπτε σφάλμα στη ρύθμιση των βαλβίδων, θα προέβαιναν σε συμπληρωματικό διαγνωστικό έλεγχο μετρώντας τη συμπίεση του χώρου καύσης. Εργασία, η οποία είναι κοπιαστική και χρονοβόρα.

Στον Πίνακα 2 δίνονται οι συντελεστές βεβαιότητας, όπως αυτοί προέκυψαν από το σύστημα, για τις τρεις υποδειγματικές περιπτώσεις που μελετήθηκαν και για διαφορετικούς συνδυασμούς των διαγνωστικών σημάτων.

Πίνακας 1. Διαγνωστικά σήματα, μετρούμενα μεγέθη, συσκευές και αποτελέσματα για τις τρεις υποδειγματικές περιπτώσεις μελέτης.

ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΟ ΣΗΜΑ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ	ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ		
			ΠΡΩΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΤΡΙΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ
Σ1	Μέτρηση ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ¹⁾	Ηλεκτρικό δυνάμιομετρο model XT200 και μετρητής ροής καυσίμου FM502 (N. J. Froment)	+3,5%	+4,9%	+4,2%
Σ2	Μέτρηση γωνιακής επιτάχυνσης στο 45% των ονομαστικών στροφών του κινητήρα ²⁾	Μετρητής γωνιακής επιτάχυνσης TB109 (Syntec Instruments)	+5,5%	-7,2%	-6,9%
Σ3	Μέτρηση γωνιακής επιτάχυνσης στο 90% των ονομαστικών στροφών του κινητήρα ²⁾	Μετρητής γωνιακής επιτάχυνσης TB109 (Syntec Instruments)	+5,3%	-6,1%	-5,3%
Σ4	Μέτρηση επιπέδου δονήσεων σε επιλεγμένα σημεία του κινητήρα	Αναλυτής δονήσεων Vibrotest 60 (Bruel & Kjaer vibro)	Αμελητέα διαφορά (φίλτρο εισαγ. αέρα)	+2,65 ms ⁻² μέση τιμή (φίλτρο εισαγ. αέρα)	+4,65 ms ⁻² (κεφαλές κινητ.) +2,42 ms ⁻² (σώμα κινητήρα)
Σ5	Μέτρηση εκπομπών αιθάλης ³⁾	Αιθαλόμετρο (C'evertest Italia)	+8,7%	+16,9%	Αμελητέα διαφορά
Σ6	Μέτρηση θερμοκρασίας κεφαλών κινητήρα	Θερμόμετρο επαφής	Αμελητέα διαφορά	+11°C	+4°C

¹⁾ Η ειδική κατανάλωση εκφράζει την ποσότητα καυσίμου που καταναλώνει ο κινητήρας ανά μονάδα ισχύος και ώρα λειτουργίας και αποδίδεται σε [g/kWh]. Ως εκ τούτου εκφράζει την αποδοτική λειτουργία του κινητήρα αλλά ταυτόχρονα αποτελεί ένα σημαντικό διαγνωστικό σήμα που μας πληροφορεί άμεσα για την τεχνική κατάσταση εμβόλων, μηχανισμού ελέγχου βαλβίδων, συστήματος τροφοδοσίας και φίλτρου εισαγωγής αέρα.

²⁾ Η γωνιακή επιτάχυνση είναι ένα τυπικό διαγνωστικό σήμα, το οποίο μαζί με την ειδική κατανάλωση και τις εκπομπές αιθάλης μας δίνουν πολύτιμες πληροφορίες για την τεχνική κατάσταση του συστήματος τροφοδοσίας. Η διαφορά της μέγιστης παροχής καυσίμου από την αντλία εκτόξευσης κατά το 90% και 45% των ονομαστικών στροφών του κινητήρα, η οποία υπολογίζεται με βάση την γωνιακή επιτάχυνση και επιβράδυνση στο συγκεκριμένο αριθμό στροφών, μπορεί να μας δώσει πολύτιμες πληροφορίες για φθορές στα επιμέρους εξαρτήματα της αντλίας.

³⁾ Η εκπομπή αιθάλης αξιωμαβήτητα σηματοδοτεί βλάβη στο σύστημα τροφοδοσίας αλλά και στον κινητήρα. Είναι δύσκολο να αποφανθούμε για τα αίτια της εκπομπής αιθάλης, θα πρέπει να γίνει συνδυασμός και με άλλα διαγνωστικά σήματα.

Πίνακας 2. Συντελεστές βεβαιότητας, όπως προέκυψαν από το σύστημα.

	Συνδυασμοί διαγνωστικών σημάτων	Συντελεστές βεβαιότητας
Πρώτη περίπτωση μελέτης	Σ2&Σ3&Σ4&Σ5	0,7
	Σ1&Σ4&Σ5	0,5
Δεύτερη περίπτωση μελέτης	Σ1&Σ2&Σ3&Σ4&Σ5	0,9
	Σ1&Σ2&Σ3&Σ5	0,8
Τρίτη περίπτωση μελέτης	Σ1&Σ2&Σ3&Σ4	0,8
	Σ1&Σ2&Σ3&Σ6	0,7

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα σύστημα διάγνωσης βλαβών, το οποίο θα μπορούσε να συμβάλει αποφασιστικά στην επίλυση προβλημάτων σχεδίασης και συντήρησης κινητήρων diesel, καθώς οργάνωσης και προγραμματισμού για την επίτευξη βέλτιστης λειτουργίας αυτών. Από τον έλεγχο αξιοπιστίας και επαλήθευσης της διαδικασίας και του συστήματος διάγνωσης βλαβών, σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρήθηκαν σημαντικά ποσοστά αβεβαιότητας. Το σύστημα λογισμικού βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο. Μετά την προσθήκη καινούργιας γνώσης, σειράς τροποποιήσεων και επεκτάσεων στη βασική του δομή θα μπορούσε να βελτιωθούν σημαντικά τα ποσοστά επιτυχούς διάγνωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Gelgele, H.L., Wang, K., 1998. *An expert system for engine fault diagnosis: development and application*. Journal of Intelligent Manufacturing, 9: 539-545.
- Gravalos, I., Tsiropoulos, Z., Kateris, D., Gialamas, Th., Xyradakis, P., Tsiropoulou, A., 2008. *An innovative software tool facilitates maintenance estimation of agricultural machinery diesel engine*. Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering, Hersonissos, Crete, Greece.
- Grimmelius, H.T., Meiler, P.P., Maas, H.L.M.M., Bonnier, B., Grevink, J.S., Van Kuilenburg, R.F., 1999. *Three state-of-the-art methods for condition monitoring*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 46 (2): 407-416.
- Jardine, A.K.S., Ralston, P., Reid, N., Stafford, J., 1989. *Proportional hazards analysis of diesel engine failure data*. Quality and Reliability Engineering International, 5: 207-216.
- Lebold, M., Thurston, M., 2001. *Open standards for condition-based maintenance and prognostic systems*. Proceedings of the MARCON, Tennessee, USA.
- Mustapha, F., Sapuan, S.M., Ismail, N., Mokhtar, A.S., 2004. *A computer-based intelligent system for fault diagnosis of an aircraft engine*. Engineering Computations, 21 (1): 78-90.
- Pernestal, A., Nyberg, M., Wahlberg, B., 2006. *A Bayesian approach to fault isolation with application to diesel engine diagnosis*. Proceedings of 17th International Workshop on Diagnosis (DX'06), Penaranda, Spain.
- Su, K.W., Liu, T.H., Hwang, S.L., 2001. *A developed model of expert system interface (DMESI)*. Expert Systems with Applications, 20: 337-346.
- Tafreshi, R., Ahmadi, H., Sassani, F., Dumont, G., 2002. *Informative wavelet algorithm in diesel engine diagnosis*. Proceedings of International Symposium on Intelligent Control, Vancouver, Canada.
- Zhao, C., Zhao, X., Tan, Z., Yan, X., 2006. *Research on multi-agent system model of diesel engine fault diagnosis by case-based reasoning*. Proceedings of the 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC'06), IEEE Computer Society.