



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

[ΤΟΜΕΑΣ]

[ΟΝΟΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ]

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη των φαινομένων τριβής και καύσης που ανιχνεύονται σε μηχανές
εσωτερικής καύσης με χρήση μεθόδων ακουστικών εκπομπών**

Ηλιόπουλος Αθανάσιος

Αριθμός Μητρώου:

1054538

Επιβλέπων: Παντελής Νικολακόπουλος, Καθηγητής

Επιβλέπων: Αναστάσιος Ζάβος, Ερευνητής

ΠΑΤΡΑ, [2/2025]

[Ηλιόπουλος Αθανάσιος]

© [2025] – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνώμών του συγγραφέα.

Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ**Μελέτη των φαινομένων τριβής και καύσης που ανιχνεύονται σε μηχανές
εσωτερικής καύσης με χρήση μεθόδων ακουστικών εκπομπών****Ηλιόπουλος Αθανάσιος**

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην τεχνολογική ανάπτυξη σε διάφορους τομείς, όπως η μετακίνηση, οι βιομηχανικές εφαρμογές και η παραγωγή ενέργειας. Παρά την αυξανόμενη έμφαση σε πιο οικολογικές και εναλλακτικές λύσεις, οι ΜΕΚ παραμένουν αναπόσπαστο μέρος της παγκόσμιας οικονομίας λόγω της υψηλής απόδοσης και της προσαρμοστικότητάς τους. Η απόδοση και η μακροζωία των ΜΕΚ επηρεάζονται κυρίως από τα φαινόμενα της καύσης και της τριβολογίας, τα οποία καθορίζουν τις ενεργειακές απώλειες και τη μηχανική φθορά.

Η παρούσα μελέτη διερευνά τα τριβολογικά φαινόμενα και τα φαινόμενα καύσης στις ΜΕΚ, μέσω της ανάλυσης των ακουστικών εκπομπών που αυτές παράγουν κατά τη λειτουργία τους. Η αλληλεπίδραση των μηχανικών εξαρτημάτων της μηχανής, όπως τα έμβολα, οι κύλινδροι και τα έδρανα, παράγει χαρακτηριστικά ακουστικά σήματα. Η ανάλυση αυτών των ακουστικών εκπομπών μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά της τριβής, τη φθορά και τις συνθήκες λίπανσης ενός κινητήρα, επιτρέποντας την έγκαιρη διάγνωση πιθανών αστοχιών.

Εκτός όμως των τριβολογικών φαινομένων, οι διαδικασίες και τα φαινόμενα της καύσης παίζουν κι αυτά καθοριστικό ρόλο στη θερμική απόδοση αλλά και τις εκπομπές της μηχανής. Οι διεργασίες της καύσης μπορούν να συσχετιστούν με συγκεκριμένα ακουστικά μοτίβα, προσφέροντας μια μέθοδο αξιολόγησης των συνθηκών καύσης η οποία είναι θελκτική για τον μη

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

παρεμβατικό της χαρακτήρα. Παράγοντες όπως η ανάμιξη του καυσίμου-αέρα, η ανάφλεξη και η έκρηξη δημιουργούν διακριτά ηχητικά φαινόμενα ,η ανάλυση των οποίων μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση των μηχανισμών της καύσης.

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η συστηματική ανασκόπηση του ρόλου των ακουστικών εκπομπών στη μελέτη των φαινομένων τριβής στις ΜΕΚ. Η διερεύνηση των ηχητικών μοτίβων που παράγονται από διάφορους μηχανισμούς της μηχανής μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη διαγνωστικών εργαλείων τα οποία θα βοηθήσουν στην περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης, της αξιοπιστίας και της μακροζωίας των κινητήρων. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η χρήση της ανάλυσης ακουστικών εκπομπών μπορεί να είναι αξιόπιστη μέθοδος για τη συνεχή παρακολούθηση και προληπτική συντήρηση των ΜΕΚ.

Λέξεις κλειδιά:

Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, Τριβολογία, Καύση, Ακουστικές εκπομπές, Μέθοδοι διάγνωσης
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &
Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

ABSTRACT**Study of friction and combustion phenomena detected in internal combustion engines using acoustic emission methods.****Iliopoulos Athanasios**

Internal combustion engines (ICEs) have played a crucial role in technological advancements across various fields, including transportation, industrial applications, and power generation. Despite the growing emphasis on sustainable alternatives, ICEs remain to play a key role to the global economy due to their high efficiency and adaptability. The performance and durability of ICEs are influenced by tribological and combustion phenomena, which impact energy losses, mechanical wear, and overall efficiency.

This study explores the tribological and combustion phenomena in ICEs through the analysis of their acoustic emissions. The interaction of mechanical components such as pistons, cylinders, and bearings generates characteristic acoustic and vibrational signals. The analysis of these acoustic emissions can provide valuable information into frictional behavior, wear patterns, and lubrication conditions within an engine, allowing for early detection of potential failures.

At the same time, combustion processes play a major factor in engine efficiency and emissions. The reactions involved in combustion can be correlated with specific acoustic patterns, offering a method for evaluating combustion conditions that is appealing for its non-intrusive nature. Factors such as air-fuel mixing, ignition, and detonation contribute to discrete sound signatures, the analysis of which can enhance the understanding of combustion dynamics.

The aim of this research is to examine the role of acoustic emissions in studying tribological and combustion phenomena in ICEs. By examining the acoustic patterns generated by various

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

engine mechanisms, this study contributes to the development of diagnostic techniques, ultimately improving engine performance, reliability, and durability. The findings highlight that the use of acoustic emission analysis could be a reliable method for real-time monitoring and predictive maintenance of ICEs.

Key words

Internal Combustion Engines, Tribology, Combustion, Acoustic Emissions, Diagnostic Methods

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Σύγκριση Μεθόδων Ανάλυσης (TSA-CFA).....σελ. 64	64
Πίνακας 2. Σύγκριση Μεθόδων Ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου.....σελ.79	79
Πίνακας 3. Συνθήκες λειτουργίας της μηχανής και τα λιπαντικά που έγινε το πείραμα ²⁵ ...σελ.86	86
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη ⁴²σελ.88	88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα:1 Διαδικασίες ενός τετράχρονου κινητήρα.....σελ. 9
Εικόνα 2:Τομή στροβιλοσυμπιεστή ενός βενζινοκινητήρα.....σελ.18
Εικόνα 3:Τύποι υπερσυμπιεστώνσελ.27
Εικόνα 4:Διαγραμματική απεικόνιση διαφόρων παραμέτρων του σήματος στο πεδίο του χρόνου.....σελ.59
Εικόνα 5:Αναπαράσταση των δεδομένων που προκύπτουν από την TSA ανάλυση για υγιές γρανάζι εντός κιβωτίου ταχυτήτωνσελ.61
Εικόνα 6: Αναπαράσταση διακριτοποιημένου σήματος με χρήση της FFTσελ.67
Εικόνα 7:Διάγραμμα παραγωγίσης της PSDσελ.75
Εικόνα 8: Πειραματική διάταξησελ.80
Εικόνα 9:Πειραματικά αποτελέσματα της ανάλυσης των AEσελ.82
Εικόνα 10:Πειραματικά αποτελέσματα της ανάλυσης των AEσελ.83
Εικόνα 11:Πειραματικά αποτελέσματα της ανάλυσης των AEσελ.83
Εικόνα 12: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξηςσελ.85
Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξηςσελ.88
Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας με χρήση του FFT μετ/σμουσελ.89
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ΑΕ- Ακουστικές εκπομπές

ΑΝΣ - Ανω Νεκρό Σημείο

ΚΝΣ - Κάτω Νεκρό Σημείο

 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \left(\frac{Pa}{s^2} \right)$ – Διαφορική εξίσωση κύματος $R_{xx}(\tau)$ -Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $R_{xy}(\tau)$ -Συνάρτηση διασυσχέτισης u – Διάνυσμα μετατόπισης σωματιδίων του κύματος (m),(Pa),(v/m) ανάλογα το κύμα FT -Μετασχηματισμός Fourier FFT -Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier $\nabla^2 u \left(\frac{Pa}{m^2} \right)$ -Τελεστής Laplace DFT -Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier $c \left(\frac{m}{s} \right)$ -Ταχύτητα διάδοσης κύματος $STFT$ -Βραχυχρόνιος Μετασχηματισμός Fourier E (Pa)-Μέτρο του Young $w(n)$ -Συνάρτηση Παραθύρου ν -Λόγος Poisson WT -Μετασχηματισμός κυματιδίου $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ -Πυκνότητα υλικού CWT -Συνεχής Μετασχηματισμός κυματιδίου G (Pa)-Μέτρο διάτμησης DWT -Διακριτός Μετασχηματισμός κυματιδίου RMS (V)-Μέση τετραγωνική τιμή HHT -Μετασχηματισμός Hilbert Huang E (J ή $Pa^2 \cdot s$)-Ενέργεια σήματος IMF -Εγγενείς τρόποι δόνησης K (1/m)-Κύρτωση σήματος EMD -Εμπειρική Διάσπαση τρόπων CF -Συντελεστής διαύγειας EMD -Εμπειρική Διάσπαση τρόπων S_k -Ασυμμετρία σήματος HSA -Φασματική ανάλυση Hilbert PPV (Pa)-Τιμή κορυφής προς κορυφή $PSD \left(\frac{Pa^2}{Hz} \right)$ -Πυκνότητα Φασματικής Ισχύος PPV (Pa)-Τιμή κορυφής προς κορυφή

TSA-Ανάλυση συγχρονισμένη στον χρόνο

CFA-Ανάλυση συνάρτησης συσχέτισης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	IV
ABSTRACT.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	X
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	XI
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	XII
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	XIV
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ	2
1.1.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΜΕΚ	3
• Χρόνοι λειτουργίας	3
• Σύστημα ανάφλεξης.....	8
• Κύλινδροι και διάταξη αυτών	10
1.2 ΜΕΚ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ	16
2.0 Ο ΗΧΟΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	28
3.0 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ.	40
3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	42
3.1.1 Εξίσωση διάδοσης του κύματος	44
3.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	46
3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ	54

3.3.1	Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (Time-Domain Analysis)	54
3.3.2	Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας (Frequency-Domain Analysis)	65
4.0	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	79
5.0	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μηχανή εσωτερικής καύσης (MEK) έχει αποτελέσει, σημαίνοντα ρόλο για την πορεία της τεχνολογικής ανάπτυξης σε όλους τους τομείς της. Η μετακίνηση, οι βιομηχανικές εφαρμογές και η παραγωγή ενέργειας, είναι οι βασικοί τομείς στους οποίους η MEK έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην πρόοδο τους. Παρότι η ίδια η βιομηχανική ανάπτυξη έφερε την ανάγκη για πιο φιλικές, προς το περιβάλλον, εφαρμογές, οι MEK αποτελούν μέχρι και σήμερα ένα αναπόσπαστο στοιχείο της παγκόσμιας οικονομίας, λόγω των υψηλών τους αποδόσεων, της ευελιξίας που τις χαρακτηρίζει αλλά και την υιοθέτηση τους σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο λόγω της ανησυχίας, της επιστήμης και των κοινωνικών φορέων, για την εξέλιξη των ενεργειακών πόρων και των οικολογικών φαινομένων, η μελέτη και η έρευνα για την τεχνολογία των MEK, εδώ και χρόνια εστιάζει στην υιοθέτηση εφαρμογών οι οποίες θα είναι περιβαλλοντικά περισσότερο βιώσιμες.

Κεντρικό ρόλο στην απόδοση και την «υγεία» των MEK, είναι τα φαινόμενα της καύσης και τριβολογίας τα οποία παίζουν έναν κρίσιμο ρόλο, στην μείωση των ενεργειακών απωλειών και των μηχανικών φθορών στην μηχανή. Η αλληλεπίδραση, μηχανισμών της MEK όπως, τα πιστόνια, οι κύλινδροι, τα έδρανα κύλισης παράγουν χαρακτηριστικά ταλαντωτικά και ηχητικά σήματα. Η μελέτη αυτών των ακουστικών εκπομπών μπορεί να αποτελέσει ένα αξιόπιστο εργαλείο για την παρακολούθηση της τριβολογικής συμπεριφοράς, της φθοράς, αλλά και της λίπανσης ενός κινητήρα, με σκοπό την ανίχνευση πιθανών ή ενδεχόμενων αστοχιών.

Τα φαινόμενα της καύσης, ωστόσο, παίζουν έναν κυρίαρχο ρόλο στην θερμική απόδοση και τις εκπομπές της μηχανής. Η διαδικασία της καύσης αποτελείται από χημικές και φυσικές διεργασίες οι οποίες μπορούν να σχετιστούν με ηχητικά μοτίβα. Τέτοιες διεργασίες μπορεί είναι η μίξη και η ροή του αέριου-καύσιμου, η ανάφλεξη και η έκρηξη. Η ανάλυση των ακουστικών

εκπομπών που προέρχονται από την καύση, μπορεί να προσφέρει μία αξιόλογη εκτίμηση των συνθηκών αλλά και των διεργασιών της καύσης.

Αυτή η εργασία έχει στόχο ,να κάνει μία ανασκόπηση στα τριβολογικά φαινόμενα που παράγονται εντός των ΜΕΚ μέσω της ανάλυσης των ακουστικών τους εκπομπών. Η μελέτη των ηχητικών «μοτίβων» που προκύπτουν από τους διάφορους μηχανισμούς της ΜΕΚ, μπορεί να αποδώσει σημαντικά ευρήματα για την περαιτέρω ανάπτυξη διαγνωστικών εργαλείων αλλά και την ίδια την απόδοση και λειτουργικότητα της.

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελούν ένα είδος θερμικής μηχανής το οποίο μετατρέπει την ενέργεια που απελευθερώνεται από την καύση ,του καυσίμου ,σε μηχανικό έργο. Στις Μ.Ε.Κ το μίγμα καυσίμου-αέρα ,αναφλέγεται εντός του θαλάμου καύσης παράγοντας έτσι αέρια υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας .Τα αέρια αυτά ,ασκούν δυνάμεις στα πιστόνια του κινητήρα τα οποία είναι συνδεδεμένα με τον στροφαλοφόρο άξονα προκαλώντας την περιστροφή αυτού και έτσι την κίνηση της μηχανής.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μηχανών εσωτερικής καύσης ,όπως οι βενζινοκινητήρες, οι ντιζελοκινητήρες ή και υβριδικές μηχανές, καθεμία με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Οι Μ.Ε.Κ. χρησιμοποιούνται κυρίως για την μετακίνηση (αυτοκίνητα ,φορτηγά, πλοία, αεροπλάνα) καθώς και για την παραγωγή ενέργειας (αεριοστρόβιλοι) και για άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

1.1.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΜΕΚ

- **Παλινδρομικοί ,εμβολοφόροι κινητήρες.**

Οι κύριοι τύποι μηχανής εσωτερικής καύσης είναι οι παλινδρομικές (εμβολοφόρες) . Σε αυτές, το έμβολο κινείται εντός κυλίνδρου μεταβάλλοντας συνεχώς τον όγκο του αερίου εντός του κυλίνδρου. Οι παλινδρομικοί κινητήρες μπορούν κι αυτοί με την σειρά τους να καταταχθούν από άλλες παραμέτρους όπως είναι:

- **Ο αριθμός των χρόνων.**

Χρόνος (stroke) λέγεται μία πλήρης διαδρομή του εμβόλου που αντιστοιχεί σε στροφή 180° του στροφαλοφόρου άξονα (crank-shaft). Εάν ο κύκλος χρειάζεται τέσσερεις χρόνους τότε η μηχανή λέγεται τετράχρονη, εάν χρειάζεται δύο χρόνους τότε λέγεται δίχρονη.

- **Ο τύπος ανάφλεξης.**

Η ανάφλεξη του μίγματος γίνεται ή με την βοήθεια του σπινθηριστή [μηχανές έναυσης δια σπινθηριστού (spark ignition-SI)] ,ή με αυτανάφλεξη του μίγματος λόγω των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν εντός του κυλίνδρου [μηχανές έναυσης δια συμπίεσης (compression ignition- CI)].

- **Από τον θερμοδυναμικό κύκλο** , δηλαδή τις θερμοδυναμικές διεργασίες που συμβαίνουν για την παραγωγή του έργου.

- **Χρόνοι λειτουργίας**

Όπως αναφέρθηκε, οι κινητήρες μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τον χρόνο, δηλαδή πόσες φορές το έμβολο κάνει μια πλήρη διαδρομή τα όρια της οποίας ονομάζονται **άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ)** και **κάτω νεκρό σημείο (ΚΝΣ)** .Ο όγκος του εμβόλου που ορίζουν αυτά τα δύο σημεία ονομάζεται **όγκος εμβολισμού (V_h)**

i. Δίχρονοι κινητήρες

Ο Δίχρονος κινητήρας είναι ένας τύπος Μ.Ε.Κ. ο οποίος ολοκληρώνει τον κύκλο παραγωγής ισχύος, σε δύο κινήσεις του εμβόλου που ισοδυναμούν σε μία πλήρη περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα.

Ο μειωμένος αριθμός των μαζών οι οποίες τίθενται σε κίνηση κατά την λειτουργία ,κάνει τον δίχρονο κινητήρα απλούστερο σε σχέση με τον τετράχρονο. Ωστόσο ο κύκλος που πραγματοποιεί ο δίχρονος κινητήρας είναι φαινομενικά ο ίδιος με αυτόν του τετράχρονου μιας και περιλαμβάνει τις ίδιες 4 φάσεις(Αναρρόφηση- Συμπίεση- Εκτόνωση/Παραγωγή έργου -Εξαγωγή) με την διαφορά ότι εκτελούνται σε 2 χρόνους.

Αναλυτικότερα, όταν το έμβολο κινείται από το κάτω νεκρό σημείο προς το άνω νεκρό σημείο ,κάποια στιγμή θα κλείσει την θυρίδα σάρωσης .Τότε δημιουργείται στον στροφαλοθάλαμο υποπίεση ,εξαιτίας της αύξησης του όγκου του. Καθώς ανοίξει η θυρίδα εισαγωγής εξαιτίας της κίνησης του εμβόλου ,τότε το μίγμα αέρα-καυσίμου λόγω της διαφοράς πίεσης ,ωθείται στον κύλινδρο. Ταυτόχρονα το έμβολο κλείνει την βαλβίδα εξαγωγής και αρχίζει η συμπίεση του μίγματος .Λίγο πριν φτάσει στο άνω νεκρό σημείο γίνεται η ανάφλεξη του μίγματος.

Τα προϊόντα αέρια κατά την εκτόνωση τους, κινούν το έμβολο από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ. Καθώς το έμβολο κινείται προς το ΚΝΣ ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής και έτσι εξέρχονται τα καυσαέρια. Στην συνέχεια το έμβολο απελευθερώνει την θυρίδα σάρωσης ,η οποία συνδέει τον στροφαλοθάλαμο με τον κύλινδρο μέσω των πλευρικών οπών του εμβόλου ή της πλευρικής οπής στον κύλινδρο. Αφού το έμβολο κλείσει την θυρίδα εισαγωγής ,αρχίζει η προσυμπίεση του μίγματος αέρα-καυσίμου μέσα στον στροφαλοθάλαμο .

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό, ότι οι δίχρονοι κινητήρες θεωρητικά μπορούν να παράγουν διπλάσια ισχύ από έναν αντίστοιχο τετράχρονο στον ίδιο χρόνο. Συνήθως είναι ελαφρύτεροι ,οικονομικότεροι και έχουν περισσότερη ανοχή στη φθορά.

Στην περίπτωση των περισσότερων από έναν, κυλίνδρων, ο δίχρονος κινητήρας είναι πιο περίπλοκος, καθώς για την λειτουργία του απαιτείται πρόσθετη αντλία αέρα, που σαν στόχο έχει την τροφοδότηση του συστήματος με αέρα ο οποίος παρέχεται από την κίνηση του στροφαλοφόρου, μειώνοντας έτσι την διαθέσιμη ισχύ του. Γι' αυτό το λόγο θεωρείται ότι βασικό χαρακτηριστικό του δίχρονου κινητήρα είναι η ανοιχτή εναλλαγή αερίων. Δηλαδή ότι οι θυρίδες εισαγωγής, εξαγωγής και σάρωσης κλείνουν μόνο με την επικάλυψη τους από το έμβολο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, μια μικρή ποσότητα καυσαερίου να περάσει στον στροφαλοθάλαμο και να ανακυκλωθεί στην επόμενη καύση, μειώνοντας έτσι την ποιότητα του καυσίμου ,ενώ κάποια ποσότητα νέου μίγματος θα καταφέρει να διαφύγει από την θυρίδα εξαγωγής αναπτύσσοντας έτσι το μεγαλύτερο μειονέκτημα του δίχρονου κινητήρα ,δηλαδή την απώλεια καυσίμου.

Εκτός της μεγαλύτερης κατανάλωσης ειδικού καυσίμου που απαιτεί ο δίχρονος κινητήρας παρουσιάζει και κάποια άλλα μειονεκτήματα που τον κάνουν να υστερεί σε σχέση με τον τετράχρονο. Ένα τέτοιο μειονέκτημα αποτελεί η αυξημένη κατανάλωση λαδιού λόγω του ότι, αυτό συμπαρασύρεται στον θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα να καίγεται μαζί με το καύσιμο αέριο-μίγμα κι έτσι να παράγονται ρυπογόνα καυσαέρια. Για αυτόν τον λόγο οι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια στην αυτό-κίνηση.

ii. Τετράχρονοι κινητήρες

Ο τετράχρονος κινητήρας είναι ένας τύπος Μ.Ε.Κ. ο οποίος ολοκληρώνει τον κύκλο παραγωγής ισχύος ,με τέσσερις κινήσεις του εμβόλου που αντιστοιχούν σε δύο πλήρεις περιστροφές του στροφαλοφόρου άξονα. Οι φάσεις λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα αποτελούνται από τις διαδικασίες της εισαγωγής, συμπίεσης, εκτόνωσης/παραγωγή έργου , εξαγωγή.

Οι χρόνοι:

- **Εισαγωγή καυσίμου:**

Αρχικά το έμβολο βρίσκεται στο **ΑΝΣ** και κατευθυνόμενο προς το **ΚΝΣ** η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει. Λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ του εσωτερικού του κυλίνδρου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας ,μάζα αέρα εισέρχεται εντός του κυλίνδρου στις Μ.Ε.Κ που λειτουργούν με ανάφλεξη λόγω συμπίεσης, ή μάζα μίγματος αέρα-καυσίμου στις Μ.Ε.Κ που λειτουργούν με ανάφλεξη από σπινθηριστή. Μόλις το έμβολο φτάσει στο **ΚΝΣ** και αφού ο κύλινδρος έχει γεμίσει είτε με αέρα είτε με μίγμα αέρα-καύσιμο, η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει.

- **Συμπίεση:**

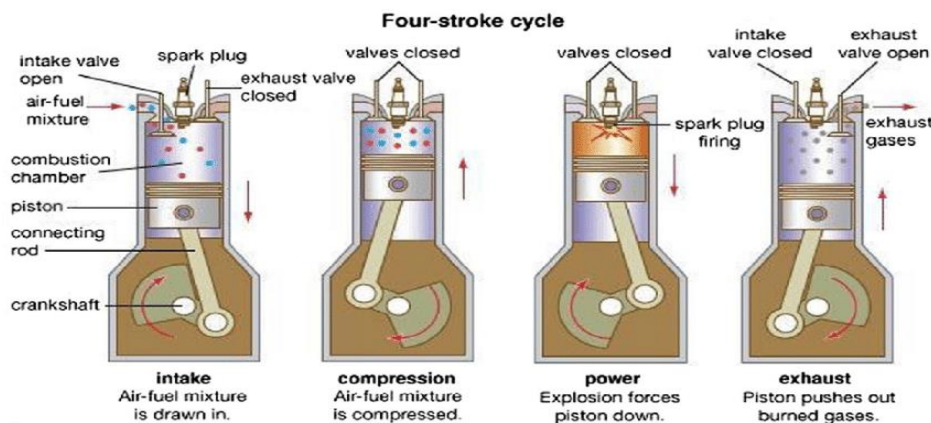
Κατά τη φάση της συμπίεσης και αφού οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι κλειστές ,το έμβολο ξεκινάει την ανοδική του πορεία προς το **ΑΝΣ**. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του όγκου του θαλάμου καύσης .Η μείωση του όγκου συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας ,της πίεσης και της πυκνότητας του αερίου μίγματος. Λίγο πριν το έμβολο φτάσει στην θέση του **ΑΝΣ** ,ο σπινθηριστής (μπουζί) λαμβάνοντας παλμό υψηλής τάσης αναφλέγει το μίγμα αέρα-καυσίμου στην περίπτωση των **SI MEK** ,ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση των **CI MEK** το μπεκ ψεκασμού ψεκάζει καύσιμο εντός του συμπιεσμένου αέρα ,και το μίγμα αυταναφλέγεται λόγω των συνθηκών που επικρατούν εντός του κυλίνδρου (θερμοκρασία ,πίεση).

- **Εκτόνωση /Παραγωγή Έργου:**

Λόγω της πίεσης των προϊόντων της καύσης το έμβολο ωθείται προς τα κάτω με προορισμό και τελικό σημείο το **ΚΝΣ** .Λόγω της αύξησης του όγκου του κυλίνδρου και συνεπώς των καυσαερίων ,ελαττώνεται η πίεση και η θερμοκρασία τους .Λίγο πριν το έμβολο φτάσει στο **ΚΝΣ**, τότε ανοίγει η βαλβίδα εκτόνωσης.

- **Εξαγωγή:**

Σε αυτήν την φάση η βαλβίδα εξαγωγής παραμένει ανοιχτή. Το έμβολο ξεκινώντας πάλι την ανοδική του πορεία προς το **ΑΝΣ** ωθεί τα καυσαέρια εκτός του κυλίνδρου. Για πραγματικούς κινητήρες (μη ιδανικούς) ,ένα μικρό μέρος των καυσαερίων παραμένει εντός του κυλίνδρου μιας και είναι αδύνατο να αδειάσει ο κύλινδρος ολοκληρωτικά. Ωστόσο ,το μέρος αυτό θα διαλυθεί κατά την επόμενη φόρτισή του. Μόλις φτάσει στο **ΑΝΣ** ,κλείνει η βαλβίδα εξαγωγής και ανοίγει ξανά η βαλβίδα εισαγωγής με σκοπό να αρχίσει ξανά η φόρτιση του και ο κύκλος του.¹



Εικόνα: 1 Διαδικασίες ενός τετράχρονου κινητήρα. Πηγή: https://oilproducts.eni.com/da_DK/Nyheder-og-events/the-right-engine-oil-for-your-motorcycle

- **Σύστημα ανάφλεξης**

1. Μ.Ε.Κ ανάφλεξης με σπινθήρα – Spark Ignition Engine – S.I.E

Μ.Ε.Κ ανάφλεξης με σπινθήρα χαρακτηρίζονται οι μηχανές εκείνες στις οποίες η διαδικασία της καύσης του μίγματος αέρα εκκινείται μέσω της ανάφλεξης του μίγματος από ηλεκτρικό κύκλωμα σπινθηριστή-μπουζί, που τροφοδοτείται από μπαταρία. Ο λόγος του όγκου το κυλίνδρου προς τον όγκο στον οποίο συμβαίνει η καύση καλείται λόγος συμπίεσης. Ο λόγος συμπίεσης είναι ανάλογος της παραγόμενης ισχύς του κινητήρα γι' αυτό και είναι επιθυμητός σε υψηλές τιμές. Οι μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα, συναντώνται κυρίως σε βενζινοκίνητα οχήματα.

Όπως προαναφέρθηκε στις 4-χρονες μηχανές η ανάφλεξη με σπινθήρα συμβαίνει στο τέλος της διαδικασίας της συμπίεσης. Στις 2-χρονες μηχανές, αντίστοιχα η ανάφλεξη γίνεται λίγο πριν το πιστόνι φτάσει στο ΑΝΣ.

Οι μηχανές με σύστημα ανάφλεξης με σπινθήρα χρησιμοποιούν κυρίως ως καύσιμο βενζίνη την οποία τροφοδοτούν στον αέρα εντός του κυλίνδρου, μέσω του carburetor ή μέσω συστήματος ψεκασμού.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των μηχανών με ανάφλεξη με σπινθήρα, είναι η ομαλή τους λειτουργία λόγω της ελεγχόμενης καύσης μέσω της προγραμματισμένης ανάφλεξης. Οι μηχανές με ανάφλεξη παρέχουν ομαλότερη λειτουργία με λιγότερο θόρυβο και ταλαντώσεις. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των μηχανών αυτών αποτελεί η ευελιξία στην σχεδίαση αλλά και την παραγωγή τους αφού είναι ικανές για ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών που εκτείνεται από χρήση σε κηπουρικά εργαλεία, μέχρι σπορ αυτοκίνητα.

Ωστόσο οι μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα χαρακτηρίζονται και από κάποια μειονεκτήματα. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτών, είναι η χαμηλότερη θερμική τους απόδοση, σε σχέση με τις ΜΕΚ

με ανάφλεξη με συμπίεση. Οι SI μηχανές απαιτούν έναν μεγαλύτερο στοιχειομετρικά όγκο καυσίμου για την καύση από τις CI. Οι ρύποι επίσης που αποβάλλουν χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα (CO) αλλά και από υδρογονάνθρακες οι οποίοι προκύπτουν λόγω ατελούς καύσης. Αυτό παρατηρείται κυρίως σε συνθήκες που λειτουργούν υπό πλούσιο σε καύσιμο μίγμα, ή συνθήκες όπου η εκκίνηση γίνεται σε κρύο περιβάλλον.

2. Μ.Ε.Κ ανάφλεξης με συμπίεση – ICE with compression ignition (CI)

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με ανάφλεξη λόγω συμπίεσης, αποτελούν τους κοινούς κινητήρες diesel. Σε αυτές τις μηχανές, το μίγμα αέρα-καυσίμου, αυτοαναφλέγεται λόγω της αυξημένης θερμότητας ως αποτέλεσμα της υψηλής πίεσης εντός του θαλάμου καύσης. Λίγο πριν το έμβολο φτάσει το ΑΝΣ κατά τη διαδικασία της συμπίεσης, ψεκάζεται υγρό καύσιμο εντός του συμπιεσμένου αλλά και θερμού αέρα. Η υψηλή θερμοκρασία του αέρα, προκαλεί την καύση του καυσίμου, ακαριαία, χωρίς την ανάγκη ανάφλεξης από άλλη πηγή.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των CI μηχανών είναι ο υψηλός λόγος συμπίεσης που έχουν σε σχέση με τις SI μηχανές. Αυτός ο λόγος μπορεί να κυμαίνεται από 14:1 μέχρι και 22:1.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των CI μηχανών έναντι των SI, είναι η υψηλή αποδοτικότητα καυσίμου που παρέχουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, καλύτερη θερμική απόδοση αλλά και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Επίσης οι CI μηχανές μπορούν και παράγουν υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως σε βαρέα οχήματα όπως φορτηγά, λεωφορεία αλλά και κατασκευαστικά οχήματα (γερανοί, μπουλντόζες, κλπ.). Οι CI κινητήρες συνηθίζεται να έχουν πιο στιβαρή κατασκευή. Αυτό, σε συνδυασμό με την χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας τους, είναι και οι λόγοι για τους οποίους τείνουν να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής αλλά και να λειτουργούν υπό πιο ακραίες συνθήκες.

Ένα από τα πιο σημαίνοντα μειονεκτήματα των CI μηχανών είναι ρύποι που παράγουν. Τα αέρια εμπεριέχουν οξείδια του αζώτου (NOx) και σωματίδια (αιθάλης). Αυτά τα ιδιαίτερος ρυπογόνα στοιχεία δεν ανιχνεύονται στα αέρια των SI μηχανών. Οι σύγχρονοι κινητήρες ντίζελ, ωστόσο, χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες όπως την ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR) και την επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR) για τη μείωση των εκπομπών. Ένα ακόμη μειονέκτημα των CI μηχανών ,είναι ο θόρυβος και οι ταλαντώσεις που παράγονται λόγω της υψηλής πίεσης αλλά και της απότομης καύσης του μίγματος αέρα-καυσίμου. Τέλος βασικό μειονέκτημα αποτελεί το περίπλοκο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου που απαιτούν οι ντιζελ κινητήρες, κάνοντας τους πιο κοστοβόρους από τους SI.¹

- **Κύλινδροι και διάταξη αυτών**

Όπως αναφέρθηκε οι Μ.Ε.Κ μπορούν να διακριθούν και ανάλογα την ποσότητα των κυλίνδρων που διαθέτουν. Ανάλογα την χρήση για την οποία προορίζονται οι κινητήρες μπορεί να είναι μονοκύλινδροι, δικύλινδροι, τρικύλινδροι, τετρακύλινδροι, πεντακύλινδροι, εξακύλινδροι, οχτακύλινδροι.

Οι μονοκύλινδροι κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελαφρές μηχανές. Αυτές συνήθως είναι μοτοσυκλέτες, σκούτερ, εργαλεία κηπουρικής αλλά και φορητές γεννήτριες. Οι δικύλινδροι κινητήρες αξιοποιούνται σε μοτοσυκλέτες και μικρά αγροτικά οχήματα ενώ οι τρικύλινδροι κινητήρες είναι δημοφιλείς σε μικρά αυτοκίνητα μιας και παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα στην ισχύ σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου. Οι τετρακύλινδροι κινητήρες είναι οι πιο δημοφιλείς

κινητήρες, αφού συναντώνται σε όλη την αυτοκινητιστική βιομηχανία σε ένα πολύ ευρύ φάσμα. Ο πεντακύλινδρος κινητήρας από την άλλη δεν είναι τόσο διαδεδομένος, έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα στην αυτοκινητιστική βιομηχανία, και κυρίως σε μερικά μεγάλα αυτοκίνητα τύπου SUV. Ο εξακύλινδρος κινητήρας χρησιμοποιείται και αυτός στην αυτοκινητοβιομηχανία, και κυρίως σε οχήματα τύπου SEDAN και SUVs. Συναντάται επίσης σε ελαφριά φορτηγά αλλά και σε αγροτικά αυτοκίνητα. Ο οκτακύλινδρος κινητήρας χρησιμοποιείται κυρίως σε οχήματα που όπως sport αυτοκίνητα ή μεγάλα αγροτικά. Η κατασκευή όμως των MEK δεν περιορίζεται μόνο στους 8 κυλίνδρους. Υπάρχουν κινητήρες που διαθέτουν μέχρι και 20 αλλά και 24 κυλίνδρους.

Πέρα από τον αριθμό των κυλίνδρων που διαθέτει μια μηχανή, πολύ σημαντικό ρόλο, στην λειτουργία της ,παίζει και η διάταξη αυτών μιας και υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί τρόποι τοποθέτησης αυτών ανάλογα με την λειτουργία τους.

a. Ευθεία διάταξη:

Η διάταξη σε ευθεία είναι η πιο συνήθης διάταξη κυλίνδρων μέχρι σήμερα. Κατά αυτή την διάταξη οι κύλινδροι τοποθετούνται κατακόρυφα ή σε γωνία ,ευθυγραμμισμένοι, σε μια ευθεία ,ο ένας δίπλα στον άλλον σε ευθεία σειρά.

Η ευθεία διάταξη χρησιμοποιείται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία με πιο συνήθη κινητήρα τον straight-4. Αυτό προκύπτει λόγω του ότι είναι εύκολο να κατασκευαστεί. Ακόμη, οι κινητήρες με ευθεία διάταξη μπορεί να είναι πιο στενοί αλλά πιο ψηλοί. Διατάξεις με περισσότερους κυλίνδρους ωστόσο παρότι ήταν διαδεδομένοι ,οι περισσότεροι υιοθέτησαν τη V διάταξη για εργονομικούς λόγους.

b. V διάταξη:

Η V ή Vee διάταξη αποτελείται από δύο σειρές κυλίνδρων (συνήθως ίση ποσότητα κυλίνδρων ανά σειρά) συνδεδεμένες στον ίδιο στρόφαλο. Οι σειρές αυτές των κυλίνδρων είναι

τοποθετημένες υπό γωνία μεταξύ τους ,με τέτοιο τρόπο ώστε στην εμπρόσθια όψη της μηχανής να σχηματίζουν το σύμβολο V. Η γωνία αυτή μπορεί να κυμαίνεται από 10° έως 180° .

Οι μηχανές με V διάταξη έχουν μικρότερο μήκος αλλά μεγαλύτερο πλάτος από τις straight διάταξης μηχανές, ίσης ποσότητας κυλίνδρων .Η διαφορά στο μέγεθος εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των κυλίνδρων.

Υπάρχουν, κινητήρες που χρησιμοποιούν γωνία V πολύ μικρότερη περίπου ίση με 10° διαθέτοντας μία κυλινδρο-κεφαλή για κάθε σειρά κυλίνδρων. Επιπλέον ο κινητήρας με διάταξη V μπορεί να χαρακτηρίζεται από περισσότερη ευστάθεια, μιας και οι κύλινδροι είναι κατανεμημένοι πιο ισομετρικά στο χώρο με αποτέλεσμα η ισορροπία του να εξαρτάται κυρίως από παράγοντες όπως το διάστημα πυροδότησης ,τα αντίβαρα του στροφαλοφόρου και η ύπαρξη ή μη αξόνων εξισορρόπησης .¹

c. Επίπεδη /Οριζοντίως αντίθετη διάταξη

Οριζόντια διάταξη ονομάζεται αυτή κατά την οποία οι κύλινδροι είναι τοποθετημένοι, κάθετα στον στροφαλοφόρο άξονα και αντίθετα μεταξύ τους, σχηματίζοντας γωνία 180° μεταξύ τους.

Επίπεδης διάταξης μηχανή, είναι η μηχανή αντίθετου εμβόλου στην οποία ο οριζόντιος κύλινδρος έχει 2 πιστόνια τα οποία έχουν κοινό θάλαμο καύσης.

Στη χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία η επίπεδη διάταξη έχει αναδείξει πολλά θετικά .Το χαμηλό κέντρο μάζας και το μικρό μήκος της σε σχέση με αντίστοιχες V, κάνουν το χειρισμό του αυτοκινήτου πιο ασφαλή. Επίσης το χαμηλό της ύψος μειώνει το ρίσκο, αφού σε περίπτωση ατυχήματος, θα πέσει κάτω αντί να συνθλιβεί. Με αυτή η διάταξη μειώνονται οι κραδασμοί ενώ, η μηχανή μπορεί να ψυχθεί αποτελεσματικά, λόγω της μεγάλης επιφάνειας που είναι εκτεθειμένη

στον αέρα .Μπορούν να αναπτύξουν υψηλή ροπή από τις χαμηλές κιόλας στροφές λόγω της θέσης των κυλίνδρων.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα των μηχανών σε ευθεία διάταξη ,το μεγάλο πλάτος τους ,και οι δύο κυλινδροκεφαλές που απαιτεί, τις κάνουν ιδιαίτερα κοστοβόρες και ως προς τη παραγωγή αλλά και τη συντήρηση .Μηχανές ευθείας διάταξης έχουν τοποθετηθεί κυρίως σε σπορ αυτοκίνητα

d. Διάταξη W,H,U,X

Οι διατάξεις W,H,U,X είναι σπάνιες σε χρήση σε σχέσεις με τις διατάξεις που αναφέρθηκαν παραπάνω ωστόσο τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους ,τις κάνουν κατάλληλες για συγκεκριμένες εφαρμογές στις οποίες ο χώρος, η ισχύς και η απόδοση αποτελούν κυρίαρχο στόχο.

- Διάταξη W

Η διάταξη W μπορεί να περιγραφεί ως ο συνδυασμός δύο V μηχανών οι οποίες έχουν κοινό στροφαλοφόρο άξονα. Η W μηχανή, έχει τρεις ή και τέσσερις σειρές κυλίνδρων. Η πιο κοινή W-διάταξη ,αποτελείται από 12 κυλίνδρους. Η διάταξη αποτελείται από τρεις σειρές των 4 κυλίνδρων. W-διάταξη 16 κυλίνδρων συναντάται και στο Bugatti Veyron και Chiron, όπου αποτελείται από 4 σειρές των 4 κυλίνδρων.²

Η W διάταξη χαρακτηρίζεται από υψηλές επιδόσεις αλλά και μικρό μέγεθος σε σχέση με αυτές γι' αυτό και χρησιμοποιείται κυρίως σε πολυτελή και σπορ αυτοκίνητα.

- Διάταξη H

Αυτή η μηχανή αποτελείται από δύο επίπεδους κινητήρες τοποθετημένους ο ένας πάνω στον άλλον, με κάθε ζεύγος κυλίνδρων να είναι οριζόντια και αντικριστά. Αυτοί οι κινητήρες,

χρησιμοποιούν δύο στροφαλοφόρους άξονες που συνδέονται μεταξύ τους ,με γρανάζια ή αλυσίδες ,σχηματίζοντας το σχήμα «Η». Η Η διάταξη χαρακτηρίζεται από το χαμηλό κέντρο βάρους κάνοντας το όχημα πιο σταθερό. Το γεγονός ωστόσο ότι αυτή η διάταξη απαιτεί παραπάνω από έναν στροφαλοφόρους άξονες ,την κάνουν πολύ απαιτητική στον σχεδιασμό αλλά και στο κόστος.³

- Διάταξη U

Ένας κινητήρας τύπου U, αποτελείται από δύο σειριακούς κινητήρες, τοποθετημένους, δίπλα-δίπλα, συνδεδεμένους όμως σε έναν κοινό στροφαλοφόρο άξονα. Οι δύο κινητήρες, λειτουργούν παράλληλα. Ο κινητήρας U, έχει χρησιμοποιηθεί μόνο σε μερικές μεγάλες ντιζελομηχανές και σε κινητήρες αεροσκαφών, όπου ο σχεδιασμός επέτρεπε και απαιτούσε συμπαγή κατασκευή αλλά και υψηλή ισχύ. Οι μηχανές αυτές είναι πολύ συμπαγείς σε σχέση με άλλες διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος ωστόσο η πολύπλοκη κατασκευή αλλά και ο συγχρονισμός των δύο κινητήρων που απαιτεί δεν ευδοκίμησαν στο να αναπτυχθεί παραπάνω αυτή η διάταξη πέρα από τις βιομηχανικές, ναυτιλιακές και αεροπορικές εφαρμογές που έχει χρησιμοποιηθεί.⁴

- Διάταξη X

Ο σχεδιασμός του κινητήρα τύπου X διαθέτει τέσσερις σειρές κυλίνδρων διατεταγμένες σε σχήμα «X». Ουσιαστικά πρόκειται για δύο κινητήρες τύπου V τοποθετημένους κάθετα σε έναν κοινό στροφαλοφόρο άξονα. Η κύρια εφαρμογή τους, εντοπίζεται σε αεροσκάφη και στρατιωτικές εφαρμογές. Παράδειγμα αποτελεί ο X24 κινητήρας, που διαθέτει 24 κυλίνδρους διατεταγμένους σε τέσσερις σειρές, ο οποίος αξιοποιήθηκε από την Βρετανική αεροπορία. Η πολύπλοκη και κοστοβόρα κατασκευή όμως αυτού του κινητήρα ήταν και οι λόγοι που δεν αναπτύχθηκαν περαιτέρω.⁵

1.2 ΜΕΚ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Ένας τρόπος για την αύξηση της απόδοσης, των κινητήρων εσωτερικής καύσης, είναι η εγκατάσταση τεχνολογίας υπερτροφοδότησης. Η τεχνολογία υπερτροφοδότησης είναι στην ουσία μία διαδικασία η οποία επιτρέπει την είσοδο ,μεγαλύτερης ποσότητας αέρα εντός του θαλάμου καύσης ,με επακόλουθο αποτέλεσμα ,την καύση περισσότερου καύσιμου μίγματος άρα και την αύξηση της ισχύος του κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με σύστημα στροβιλοσυμπιεστή ή με σύστημα υπερσυμπιεστή.

- Σύστημα στροβιλοσυμπιεστή.

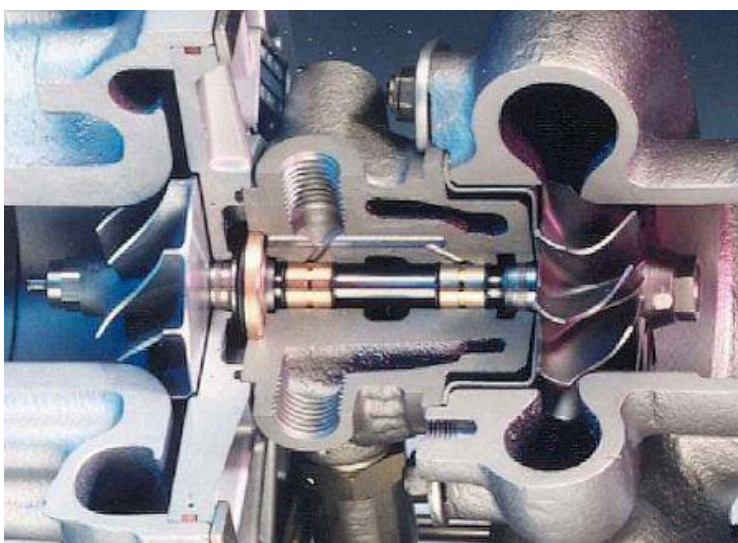
Η εγκατάσταση ενός του στροβιλοσυμπιεστή, αποτελείται από δύο κύρια μέρη, τον στρόβιλο και τον συμπιεστή οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με έναν άξονα. Τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον κινητήρα, προκαλούν την περιστροφή του στροβίλου με αποτέλεσμα, να κινείται ο συμπιεστής, ο οποίος εισάγει και συμπιέζει τον ατμοσφαιρικό αέρα πριν αυτός εισέλθει στην πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα. Το σύστημα του στροβιλοσυμπιεστή, χρησιμοποιεί τη θερμική ενέργεια των αποβαλλόμενων καυσαερίων ώστε να συμπιέσει τον εισερχόμενο αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας που εισέρχεται εντός του θαλάμου καύσης, έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση μορίων οξυγόνου. Αυτό επιτρέπει στον κινητήρα να καίει περισσότερο καύσιμο και να παράγει μεγαλύτερη ισχύ.

Το σύστημα του στροβιλοσυμπιεστή αποτελείται από βασικά εξαρτήματα που συνεργάζονται για τη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα. Το περίβλημα του στροβίλου καθοδηγεί τα καυσαέρια προς τα πτερύγια του ρότορα, ο οποίος περιστρέφεται από την κινητική τους ενέργεια. Η βαλβίδα εκτόνωσης ελέγχει τη ροή των καυσαερίων, αποτρέποντας την υπερβολική ταχύτητα του στροβίλου. Στην άλλη πλευρά του άξονα, ο ρότορας του συμπιεστή συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα, ενώ το περίβλημα του συμπιεστή τον καθοδηγεί προς τον

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

κινητήρα, με τον εναλλάκτη θερμότητας (intercooler) να μειώνει τη θερμοκρασία του για βελτιωμένη καύση.

Το CHRA συγκρατεί τα ρουλεμάν και τον κεντρικό άξονα, ενώ η βαλβίδα απορρόφησης πίεσης ρυθμίζει τη ροή των καυσαερίων, προστατεύοντας τον κινητήρα από ανεπιθύμητες πιέσεις. Τα ρουλεμάν μειώνουν την τριβή μεταξύ του περιστρεφόμενου άξονα και του πλαισίου, επιτρέποντας ομαλότερη λειτουργία και αυξημένη διάρκεια ζωής του συστήματος. Τέλος, ο ψύκτης βελτιώνει την απόδοση του υπερτροφοδότη, ψύχοντας τον συμπιεσμένο αέρα και αυξάνοντας την πυκνότητά του σε οξυγόνο, γεγονός που βελτιώνει την ποιότητα του καυσίμου μίγματος και την απόδοση του κινητήρα.



Εικόνα: 2 Τομή στροβιλοσυμπιεστή ενός βενζινοκινητήρα. Αριστερά το πτερύγιο του συμπιεστή και δεξιά τα πτερύγια του στροβίλου. Πηγή: https://dieselnet.com/tech/air_turbocharger.php

Ο στροβιλοσυμπιεστής αποτελεί μία τεχνολογία η οποία έχει συνεισφέρει ιδιαίτερα στον σχεδιασμό των ΜΕΚ λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Η αυξημένη ισχύς, η οικονομία και η ποιοτική αναβάθμιση του καυσίμου σε συνδυασμό με τη διατήρηση της απόδοσης του κινητήρα σε μέρη όπου η πυκνότητα του αέρα είναι χαμηλή, είναι τα πιο ενδεικτικά πλεονεκτήματα του συστήματος υπερτροφοδότησης.

Μία από τις πιο συνηθισμένες προκλήσεις είναι η καθυστέρηση του στροβιλοσυμπιεστή ή αλλιώς Turbo Lag. Αυτό είναι, η χρονική περίοδος μεταξύ της πίεσης του πεντάλ του επιταχυντή και της αισθητής αύξησης της ισχύος από την υπερτροφοδότηση. Η καθυστέρηση συμβαίνει επειδή τα καυσαέρια στις χαμηλές ταχύτητες του κινητήρα δεν επαρκούν για τη λειτουργία του στροβιλοσυμπιεστή. Συνήθως, τα οχήματα χρησιμοποιούν έναν μεγάλο υπερτροφοδότη για να καλύψουν τις απαιτήσεις ισχύος σε υψηλότερες ταχύτητες του κινητήρα. Ωστόσο, στις χαμηλές ταχύτητες του κινητήρα, η ροή των καυσαερίων δεν είναι επαρκής για να περιστρέψει τον ρότορα ενός τέτοιου στροβίλου.

Μία ακόμη πρόκληση, που προκύπτει στην τεχνολογία turbo, είναι η διαχείριση της θερμότητας. Η συμπίεση του αέρα αυξάνει τη θερμοκρασία του, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε προανάφλεξη και μειωμένη απόδοση του κινητήρα ,αν δεν γίνει σωστή διαχείριση.

Τέλος , η πολυπλοκότητα και το κόστος των συστημάτων turbo είναι ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την περαιτέρω ανάπτυξη αυτών.

Οι στροβιλοσυμπιεστές διατίθενται σε διάφορα σχέδια, το καθένα με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα ανάλογα με τις απαιτήσεις του κινητήρα. Οι στροβιλοσυμπιεστές σταθερής γεωμετρίας (FGT) διαθέτουν έναν απλό και οικονομικό σχεδιασμό με σταθερό περίβλημα στροβίλου, βελτιστοποιημένο για συγκεκριμένες ταχύτητες και φορτία, αλλά με περιορισμένη αποδοτικότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αντίθετα οι στροβιλοσυμπιεστές μεταβλητής γεωμετρίας (VGT) χρησιμοποιούν ρυθμιζόμενα περύγια για τη βελτίωση της ροής του αέρα ανάλογα με τις απαιτήσεις του κινητήρα, αυξάνοντας την απόδοση και μειώνοντας την καθυστέρηση, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλους για πετρελαιοκινητήρες.

Οι στροβιλοσυμπιεστές διπλού καναλιού (Twin-Scroll Turbochargers) διαχωρίζουν τις παλμικές ροές των καυσαερίων από διαφορετικούς κυλίνδρους, μειώνοντας τις αλληλεπιδράσεις, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

βελτιώνοντας τη διαδικασία σάρωσης και ενισχύοντας τη ροπή σε χαμηλές στροφές. Η σειριακή υπερτροφοδότηση (Sequential Turbocharging) συνδυάζει δύο στροβιλοσυμπιεστές διαφορετικού μεγέθους: έναν μικρότερο για γρήγορη απόκριση σε χαμηλές στροφές και έναν μεγαλύτερο για μεγαλύτερη ώθηση σε υψηλές στροφές, επιτυγχάνοντας την ισορροπία μεταξύ απόδοσης και ανταπόκρισης.

Η συνδυαστική υπερτροφοδότηση (Compound Turbocharging) χρησιμοποιεί δύο στροβιλοσυμπιεστές σε σειρά για προοδευτική συμπίεση του αέρα εισαγωγής, επιτρέποντας εξαιρετικά υψηλές πιέσεις ώθησης, κάτι που την καθιστά ιδανική για βαρέα ντιζελοκίνητα οχήματα και ναυτικές εφαρμογές. Οι ηλεκτρικοί στροβιλοσυμπιεστές (Electric Turbochargers) χρησιμοποιούν ηλεκτροκινητήρα για την εξάλειψη της καθυστέρησης, παρέχοντας άμεση ώθηση, αν και η πολυπλοκότητα και το κόστος τους περιορίζουν τη χρήση τους.

Τέλος, οι υβριδικοί στροβιλοσυμπιεστές (Hybrid Turbochargers) συνδυάζουν έναν παραδοσιακό στροβιλοσυμπιεστή που κινείται από καυσαέρια με ηλεκτρική υποβοήθηση, προσφέροντας άμεση ώθηση στις χαμηλές στροφές και υψηλή απόδοση στις υψηλές, βελτιώνοντας συνολικά την απόδοση και την κατανάλωση καυσίμου σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας.⁶⁷⁸

Η εφαρμογή της υπερτροφοδότησης διαφέρει μεταξύ κινήτρων δύο και τεσσάρων χρόνων, λόγω των διαφορετικών κύκλων λειτουργίας τους αλλά και της διαφορετικής κατασκευής τους. Ο δίχρονος κινητήρας, χαρακτηρίζεται από συνεχόμενη παραγωγή καυσαερίων, τα οποία τροφοδοτούν την τουρμπίνα του στροβιλοσυμπιεστή με συνεχή ροή με αποτέλεσμα, η κίνηση της

να καθίσταται πιο ομαλή. Αντίστοιχα στους τετράχρονους κινητήρες, όπου η διαδικασία της εξαγωγής των αερίων αποτελεί έναν χρόνο του κύκλου, η παραγωγή καυσαερίων είναι πιο διακοπτόμενη, δημιουργώντας παλμούς στη λειτουργία του στροβιλοσυμπιεστή. Στους δίχρονους κινητήρες, η ροή καυσαερίων επιτρέπει τη χρήση στροβιλοσυμπιεστών με χαμηλή αδράνεια, δηλαδή με μικρής διαμέτρου, τροχό στροβίλου. Σε ένα 2-χρονο κινητήρα, η διαδικασία της σάρωσης (scavenging) είναι μία από τις πιο κρίσιμες διαδικασίες, κατά τον κύκλο φόρτισης, αφού κατά αυτήν εισέρχεται φρέσκο μείγμα καυσίμου-αέρα, και ταυτόχρονα εξέρχονται τα καυσαέρια προϊόντα. Ο στροβιλοσυμπιεστής μπορεί να διασφαλίσει την αποτελεσματική απομάκρυνση των καυσαερίων. Αντίστοιχα στους 4-χρονους κινητήρες οι παλμοί καυσαερίων κάνουν την κατανομή ενέργειας στην τουρμπίνα λιγότερο ομαλή. Αυτό ενίοτε απαιτεί τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, όπως twin-scroll τουρμπίνες ή τουρμπίνες μεταβλητής γεωμετρίας (VGT).

Το turbo-lag διαφέρει σε κάθε κινητήρα. Στους 2-χρονους είναι λιγότερο εμφανές λόγω της συνεχούς ροής των καυσαερίων. Η σχεδόν σταθερή ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας, παρέχει πίεση με μικρότερη καθυστέρηση. Στους 4-χρονους κινητήρες ωστόσο το turbo-lag είναι πιο αισθητό σε χαμηλές στροφές, λόγω της χαμηλής ροής καυσαερίων, λόγω της μεγαλύτερης μάζας του τροχού της τουρμπίνας. Σε χαμηλές στροφές, η διαφορά μεταξύ της διαθέσιμης και της απαιτούμενης ενέργειας του στροβιλοσυμπιεστή γίνεται εμφανής, καθώς η ζήτηση ροπής από τον κινητήρα αυξάνει δυσανάλογα σε σχέση με την παροχή του συμπιεστή. Ωστόσο όπως αναφέρθηκε, το φαινόμενο του turbo lag αντιμετωπίζεται με την χρήση των κατάλληλων τεχνολογιών στροβιλοσυμπιεστών. Τέτοιες μπορεί να είναι οι στροβιλοσυμπιεστές διπλού καναλιού ή οι στροβιλοσυμπιεστές μεταβλητής γεωμετρίας.

Όπως αναφέρθηκε στους δίχρονους κινητήρες η διαδικασία της σάρωσης διευκολύνεται από τον στροβιλοσυμπιεστή. Ωστόσο η πίεση του συμπιεσμένου αέρα θα πρέπει να ρυθμιστεί να

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

μην διαφύγει το μίγμα αέρα-καυσίμου απ' την βαλβίδα εξαγωγής. Αντίθετα, στους τετράχρονους κινητήρες, η σάρωση είναι λιγότερο κρίσιμη, καθώς η εισαγωγή και η εξαγωγή γίνονται σε ξεχωριστές φάσεις. Ο στροβιλοσυμπιεστής επικεντρώνεται κυρίως στην αύξηση της πίεσης εισαγωγής. Η αυξημένη πίεση εισαγωγής, επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου, αυξάνοντας την απόδοση καύσης και ισχύος.

Στους δίχρονους κινητήρες, η συνεχής λειτουργία του στροβιλοσυμπιεστή μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση, γι' αυτόν τον λόγο η ψύξη της τουρμπίνας και η σωστή λίπανση είναι κρίσιμες για τη σωστή συντήρηση του. Αντίθετα οι στροβιλοσυμπιεστές στους τετράχρονους κινητήρες, δεν δέχονται τόσο έντονη θερμική καταπόνηση, λόγω της περιοδικής φύσης της λειτουργίας τους.

Η χρήση των στροβιλοσυμπιεστών σε δίχρονες ή τετράχρονες μηχανές, εξαρτάται και από την εφαρμογή αλλά και τον σχεδιασμό. Στις δίχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως σε ναυτιλιακές εφαρμογές και βαρέα οχήματα. Αντίθετα στους τετράχρονους κινητήρες, χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα, μοτοσικλέτες και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές.

Η σχεδίαση και η λειτουργία των στροβιλοσυμπιεστών διαμορφώνονται ώστε να καλύπτουν τις ειδικές απαιτήσεις κάθε τύπου κινητήρα. Στους δίχρονους κινητήρες, δίνεται έμφαση στη σάρωση και στη συνεχή παροχή αέρα, ενώ στους τετράχρονους ο σχεδιασμός επικεντρώνεται στην αύξηση της πίεσης εισαγωγής και στη μείωση της καθυστέρησης (turbo-lag). Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από την προοριζόμενη χρήση και τις συγκεκριμένες ανάγκες του εκάστοτε κινητήρα^{1 9}

- Σύστημα υπερσυμπιεστή.(supercharger)

Οι υπερσυμπιεστές ,λειτουργούν μέσω της σύνδεση τους, με τον στροφαλοφόρο άξονα, χρησιμοποιώντας μέσα μετάδοσης κίνησης όπως ιμάντες, συστήματα γραναζιών ή καδένες.Ο ατμοσφαιρικός αέρας, εισέρχεται στον συμπιεστή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον στροφαλοφόρο άξονα. Ο μηχανισμός του συμπιεστή μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο που εισέρχεται σε αυτόν ο αέρας. (rotors in Roots-type, screws in twin-screw ή impeller). Καθώς ο αέρας εξέρχεται, από τον συμπιεστή, ψύχεται με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του σε καθαρό οξυγόνο. Ο ψυχόμενος πλέον αέρας, εισέρχεται εντός των κυλίνδρων ακολουθώντας την διαδικασία της καύσης και της εκτόνωσης. Ανάλογα τον τύπο του υπερσυμπιεστή, γίνεται και η τοποθέτηση αυτού, στη μηχανή.

Όπως αναφέρθηκε, η λειτουργία των υπερσυμπιεστών βασίζεται στην ίδια την ισχύ της μηχανής ,με αποτέλεσμα ένα μέρος της εξαγόμενης ισχύς της, να καταναλώνεται στην ίδια την λειτουργία του συμπιεστή. Ωστόσο το γεγονός ότι ο αέρας εισέρχεται εντός του συμπιεστή σε χαμηλή θερμοκρασία, αυξάνει την απόδοση της καύσης, ανακτώντας τις χαμένες απώλειες ειδικά στις υψηλές στροφές.

Οι υπερσυμπιεστές αποδίδουν διαφορετικά σε δίχρονους και τετράχρονους κινητήρες. Η χρήση τους στους δίχρονους κινητήρες, ενδείκνυται για τη διευκόλυνση της διαδικασίας της σάρωσης, όπως και στους στροβιλοσυμπιεστές. Αντίθετα, στους τετράχρονους κινητήρες, οι υπερσυμπιεστές χρησιμοποιούνται για την αύξηση της πυκνότητας του αέρα, και άρα την αύξηση της απόδοσης στη διαδικασία της καύσης. Οι τύποι των υπερσυμπιεστών είναι οι εξής:

1. Ο φυγοκεντρικός υπερσυμπιεστής.

Ο φυγοκεντρικός υπερσυμπιεστής, αποτελείται από μία πτερωτή, η οποία περιστρέφεται ώστε να οδηγήσει τον αέρα, εντός του θαλάμου συμπίεσης. Η πτερωτή είναι το κύριο στοιχείο του υπερσυμπιεστή και είναι αυτό το οποίο οδηγεί τον αέρα προς τον φυσητήρα, όπου αυτός αυξάνει

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

την πίεση του. Η πτερωτή ,κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ανθεκτική σε υψηλές θερμοκρασίες γι' αυτό και συνήθως είναι από αλουμίνιο ή χάλυβα. Το σχήμα του καλύμματος ,των φυγοκεντρικών υπερσυμπιεστών έχει χαρακτηριστική σπειροειδή μορφή και είναι κατασκευασμένο από χυτό ή διαμορφωμένο, αλουμίνιο. Μεταξύ του σπειρώματος του συμπιεστή, και της φτερωτής υπάρχει, ο διαχύτης όπου η λειτουργία του ,έγκειται στην μείωση της υψηλής ταχύτητας του εισερχόμενου αέρα, ώστε να αυξηθεί η πίεση του, κατά την έξοδο του.

Για την ενίσχυση της φτερωτής, χρησιμοποιείται, ένα εσωτερικό σύστημα μετάδοσης με γρανάζια, ώστε να μπορέσει η φτερωτή να προσεγγίσει τις πολύ υψηλές ταχύτητες(50000-100.000 RPM), που απαιτούνται για την συμπίεση του αέρα. Το σύστημα γραναζιών μπορεί να είναι ένα απλό ζεύγος δύο γραναζιών ή πιο περίπλοκο. Στο όλο σύστημα της φτερωτής είναι εγκατεστημένα ρουλεμάν, τα οποία συνεισφέρουν στην ομαλοποίηση της κίνησης της, μέσω της μείωσης της τριβής. Οι φυγοκεντρικοί υπερσυμπιεστές είναι πιο αποτελεσματικοί στις υψηλές στροφές του κινητήρα ,σε σχέση με τους άλλους τύπους υπερσυμπιεστών διότι ο φυγοκεντρικός συμπιεστής, καθοδηγεί τον αέρα αντί να τον μετατοπίζει. Ο απλός σχεδιασμός, επίσης του φυγοκεντρικού συμπιεστή τον κάνει ιδιαίτερα αποδοτικό αφού δεν αποτελείται από πολλά μηχανικά στοιχεία με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται πολύ χαμηλές απώλειες λόγω τριβής, εντός του.

Όπως αναφέρθηκε, ο φυγοκεντρικός συμπιεστής, υστερεί σε απόδοση στις χαμηλές στροφές λόγω του ότι η συμπίεση του αέρα εξαρτάται από την ταχύτητα του κινητήρα. Το φαινόμενο αυτό καθιστά τους φυγοκεντρικούς υπερσυμπιεστές, λιγότερο θελκτικούς σε εφαρμογές όπου η ροπή σε χαμηλές στροφές είναι καίριας σημασίας όπως για παράδειγμα σε βαρέα φορτηγά οχήματα. Ωστόσο, ο φυγοκεντρικός συμπιεστής, κυριαρχεί ως προς τη χρήση σε τετράχρονους κινητήρες.

2. Ο συμπιεστής τύπου Roots

Ο υπερσυμπιεστής τύπου Roots, μεταφέρει σταθερό όγκο αέρα ανά περιστροφή, ανεξάρτητα από τις στροφές ή το φορτίο του κινητήρα χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος από περιστρεφόμενους ρότορες για την μεταφορά του αέρα εντός της μηχανής. Ο συμπιεστής τύπου Roots, σε αντίθεση με τον φυγοκεντρικό, δεν συμπιέζει τον αέρα εντός του, αλλά στην πολλαπλή εισαγωγής.

Ο υπερσυμπιεστής αυτός ,αποτελείται από δύο αλληλοεπιδρώμενους ρότορες ,δύο ή και τριών λοβών. Καθώς οι ρότορες περιστρέφονται, όγκος αέρα, παγιδεύεται εντός των κοιλοτήτων μεταξύ των λοβών και του πλαισίου. Ο συμπιεστής τύπου Roots, τροφοδοτεί τον κινητήρα, με συγκεκριμένη ποσότητα αέρα, ανά περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα. Ο αέρας συμπιέζεται εντός της πολλαπλής εισαγωγής, καθώς αναμειγνύεται με το καύσιμο. Οι ρότορες, είναι συνδεδεμένοι μέσω ιμάντα, στον στροφαλοφόρο άξονα.

Ο υπερσυμπιεστής τύπου Roots, επιλέγεται για την αμεσότητα που προσφέρει ως προς την αύξηση της ισχύος του κινητήρα. Το γεγονός ότι τροφοδοτεί με σταθερή και συγκεκριμένη ποσότητα αέρα, τον κύλινδρο, κάνει το Roots συμπιεστή, θελκτικό για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές στροφές αλλά υψηλή ροπή αφού η αύξηση της ισχύος επιτυγχάνεται αμέσως. Ο roots συμπιεστής χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές και στην ναυπηγική βιομηχανία ειδικά σε δίχρονους κινητήρες. Η απλότητα του σχεδιασμού του ,επίσης ,είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους ένα roots type μπορεί να προτιμηθεί από άλλους υπερσυμπιεστές.

Στον roots συμπιεστή ωστόσο συναντώνται και κάποια μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να αναφερθούν. Το γεγονός ότι η συμπίεση του αέρα δεν γίνεται εντός του συμπιεστή, αλλά εντός της πολλαπλής, τον καθιστά και λιγότερο αποδοτικό, γι' αυτό και ο συμπιεστής τύπου Roots, δεν ενδείκνυται για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες. Όταν αναπτύσσονται μεγάλες

διαφορές πιέσεις αέρα, παρουσιάζονται φαινόμενα υπερθέρμανσης και ενδεχόμενης φθοράς, καθώς οι λοβοί ενδέχεται να αναπτύσσουν φαινόμενα τριβής. Η υπερθέρμανση ενισχύεται επίσης, από φαινόμενα τύρβης που μπορεί να αναπτυχθούν στον αέρα, για αυτό και η χρήση ενδιάμεσου ψύκτη (intercooler) είναι επιβεβλημένη σε υψηλές πιέσεις.

3. Twin screw υπερσυμπιεστής

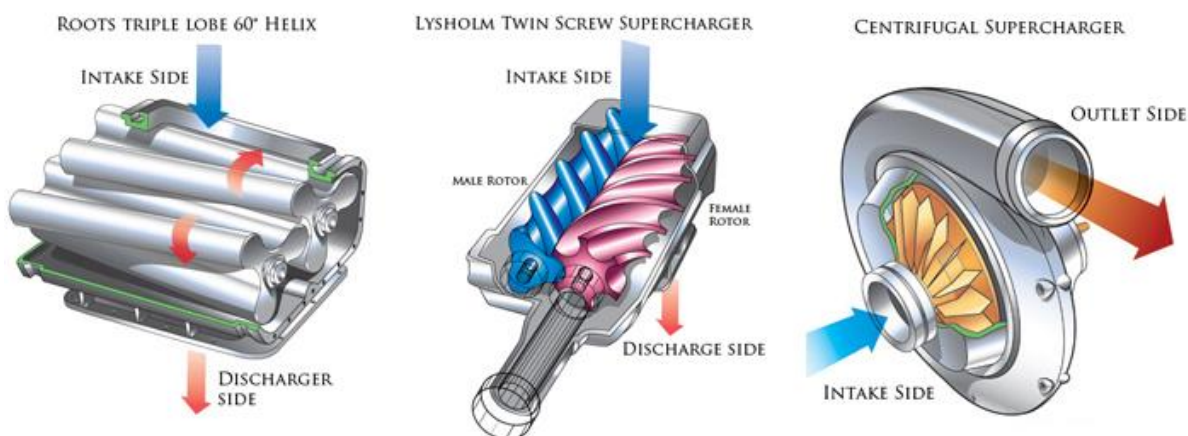
Ο υπερσυμπιεστής τύπου twin-screw, είναι ένας συμπιεστής ο οποίος διακρίνεται για την υψηλή του απόδοση. Η συμπίεση του αέρα, στον twin-screw υπερσυμπιεστή, συμβαίνει εσωτερικά, πριν οδηγηθεί ο αέρας στην μηχανή. Ο twin screw λειτουργεί κι αυτός με δύο αλληλοδιαπλεκόμενους ρότορες, ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση οι ρότορες, έχουν ελικοειδές σχήμα ώστε να εφαρμόζει ο ένας στον άλλον. Η διαδικασία λειτουργίας του screw twin υπερσυμπιεστή ξεκινά με την εισαγωγή αέρα. Καθώς, οι ρότορες περιστρέφονται, εγκλωβίζουν όγκο αέρα, μεταξύ του κενού που υπάρχει μεταξύ των ρότορων και του πλαισίου του συμπιεστή. Καθώς ο αέρας, οδηγείται επί του μήκους του ρότορα, το κενό μεταξύ των λοβών του ρότορα, και του τοιχείου του καλύμματος, στενεύει, με αποτέλεσμα την μείωση του όγκου του αέρα πριν αυτός εξέλθει από τον συμπιεστή. Ο συμπιεσμένος αέρας έπειτα, εισέρχεται μέσω της πολλαπλής εισαγωγής εντός του κινητήρα. Γι' αυτό το λόγο ο twin-screw συμπιεστής, είναι πιο αποδοτικός, αφού μειώνονται τα φαινόμενα υπερθέρμανσης, που συναντώνται στον roots υπερσυμπιεστή.

Το ελικοειδές σχήμα των αλληλοεπιδρούμενων ρότορων, είναι αυτό που επιτυγχάνει μία ομαλή και σταθερή συμπίεση του αέρα, καθώς χάρις σε αυτό το σχήμα, μειώνονται φαινόμενα τύρβης που μπορεί να αναπτύσσονται στους roots συμπιεστές.

Όπως αναφέρθηκε ο twin-screw συμπιεστής, χαρακτηρίζεται από την θερμοδυναμική του αποτελεσματικότητα λόγω του ότι η συμπίεση του αέρα, γίνεται εντός του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την εισαγωγή αέρα, χαμηλής θερμοκρασίας, υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο

εντός της μηχανής. Ακόμη, το ελικοειδές σχήμα του ζεύγους των ρότορων, διατηρεί τα υψηλά επίπεδα πίεσης του αέρα, δίχως την αύξηση της καταπόνησης. Επιπλέον, λόγω του σχεδιασμού του, η πίεση του αέρα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά, με αποτέλεσμα η αύξηση της ισχύος να είναι και αυτή σταθερή, σε ένα ευρύ φάσμα στροφών του κινητήρα. Γι' αυτό και ο screw type συμπιεστής είναι ιδανικός για εφαρμογές, που απαιτούν ισορροπία μεταξύ ροπής σε χαμηλές στροφές και ισχύος σε υψηλές στροφές.

Παρά τα πολλά οφέλη τα οποία χαρακτηρίζουν τον twin-screw συμπιεστή, αυτός χαρακτηρίζεται και από κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι και ο λόγος που η χρήση του δεν είναι και τόσο διαδεδομένη. Το χαρακτηριστικότερο από τα μειονεκτήματα του, είναι η περιπλοκότητα, στον σχεδιασμό του. Αυτός ο σχεδιασμός, απαιτεί πολύ ποιοτικά κατασκευαστικά υλικά αλλά και έναν πολύ αξιόπιστο έλεγχο, κάνοντας το κόστος του υπερσυμπιεστή ιδιαίτερα, αυξημένο σε σχέση με τον φυγοκεντρικό ή τον τύπο roots υπερσυμπιεστή.



Εικόνα: 3 Τύποι υπερσυμπιεστών. Αριστερά: Roots με τρεις λοβούς .Μέση: Twin screw υπερσυμπιεστής. Δεξιά:

Φυγοκεντρικός υπερσυμπιεστής. Πηγή: <https://stateofspeed.com/2021/07/27/what-is-a-supercharger/>

Όπως γίνεται διακριτό οι υπερσυμπιεστές και οι στροβιλοσυμπιεστές κατέχουν μια ζωτικής σημασίας θέση στον τομέα της βελτίωσης της απόδοσης των κινητήρων, καλύπτοντας διαφορετικές ανάγκες και εφαρμογές. Οι στροβιλοσυμπιεστές, διακρίνονται για την

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού & Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

αποδοτικότητα τους και την εξοικονόμηση καυσίμου, αφού χρησιμοποιούν την ενέργεια των καυσαερίων ,γεγονός που τους καθιστά ιδανικές για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Από την άλλη οι υπερσυμπιεστές παρέχουν άμεση ώθηση ισχύος. Σημαντικές εξελίξεις και στις δύο τεχνολογίες, έχουν σημειωθεί τα τελευταία χρόνια οι οποίες κυρίως στοχεύουν στη μείωση της καθυστέρησης στην τουμπίνα, και στην διαχείριση της θερμότητας στους υπερσυμπιεστές. Οι υπερσυμπιεστές και οι στροβιλοσυμπιεστές, κατέχουν μία σημαίνουσα θέση στην τεχνολογία των μηχανών εσωτερικής καύσης. Η προσαρμοστικότητα και ευελιξία τους ,σε σύγχρονες και πιο βιώσιμες τεχνικές θα είναι και ο παράγοντας που θα επηρεάσει την εξελικτική τους πορεία.¹⁰¹¹¹²

2.0 Ο ΗΧΟΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.

Ο ήχος που παράγεται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης αποτελεί μια πολύπλοκη ακουστική υπογραφή, η οποία δημιουργείται από διάφορες μηχανικές και θερμοδυναμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τον κύκλο λειτουργίας του κινητήρα. Αυτοί οι ήχοι προέρχονται από πολλαπλές πηγές, συμπεριλαμβανομένης της ταχείας διαστολής των αερίων κατά την καύση, της κίνησης και της αλληλεπίδρασης των παλινδρομικών εξαρτημάτων, όπως τα έμβολα, οι βαλβίδες και ο στροφαλοφόρος άξονας, καθώς και από τη στροβιλώδη ροή των αερίων εισαγωγής και εξαγωγής.

Κάθε φάση της λειτουργίας του κινητήρα—εισαγωγή, συμπίεση, καύση και εξαγωγή—συμβάλλει με διακριτές συχνότητες και μεταβολές πίεσης στο συνολικό φάσμα του ήχου. Τα χαρακτηριστικά αυτών των εκπομπών επηρεάζονται από παράγοντες όπως η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, το φορτίο, ο τύπος καυσίμου και η δομική σχεδίαση, καθιστώντας την ακουστική ανάλυση των κινητήρων ένα πολύτιμο διαγνωστικό εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης, της αποδοτικότητας και πιθανών μηχανικών αστοχιών.

Η κατανόηση αυτών των ακουστικών εκπομπών παρέχει πολύτιμες πληροφορίες τόσο για τις τριβολογικές αλληλεπιδράσεις όσο και για τη δυναμική της καύσης, αποτελώντας τη βάση για προηγμένες τεχνικές παρακολούθησης και προγνωστικής συντήρησης.

Η καύση

Η διαδικασία της καύσης είναι μία από τις κύριες πηγές θορύβου σε μία ΜΕΚ είτε αυτή γίνεται μέσω σπινθηριστή (βενζινοκινητήρες) ή μέσω της συμπίεσης του μίγματος

(ντιζελοκινητήρες). Η απότομη αύξηση της πίεσης εντός του κυλίνδρου, δημιουργεί ηχητικά κύματα τα οποία έχουν μεγάλο πλάτος και μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Αυτά τα κύματα έχουν υψηλή ένταση και συχνότητα λόγω της εκρηκτικής φύσης της καύσης. Κύματα που παράγονται από την καύση, συγκρούονται με τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Οι κραδασμοί αυτοί μεταφέρονται στα δομικά στοιχεία της μηχανής ενισχύοντας τον συνολικό θόρυβο. Ωστόσο πολύ σημαντικό παράγοντα για τον ήχο που παράγεται αποτελεί και η ίδια η χρονική στιγμή της ανάφλεξης. Πιο συγκεκριμένα αν η καύση επιτελεστεί πρωτύτερα, δηλαδή πριν το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ, τα ωστικά κύματα είναι πιο ισχυρά, προκαλώντας έντονους κρουστικούς «μεταλλικούς» ήχους (knock). Μέσω αυτού του χαρακτηριστικού ήχου, μπορεί να ανιχνευτεί ζημιά ή βλάβη στον κινητήρα. Αντίστοιχα, αν η ανάφλεξη συμβεί πιο αργά, μειώνεται η ένταση της πίεσης και, κατά συνέπεια, ο ήχος είναι πιο ήπιος, αλλά η ενεργειακή απόδοση του κινητήρα είναι μειωμένη.¹ Ένας παράγοντας που επηρεάζει την ένταση της καύσης, είναι η «ποιότητα» του καυσίμου μίγματος. Ένα μίγμα που έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα καυσίμου οδηγεί σε πιο έντονες εκρήξεις και άρα ισχυρότερα ηχητικά κύματα ενώ ένα μίγμα με μικρή περιεκτικότητα καυσίμου παράγει ήχους χαμηλότερης έντασης. Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας επηρεάζουν άμεσα το ηχητικό αποτέλεσμα της καύσης, αφού υψηλή πίεση συνεπάγεται περισσότερη απελευθέρωση ενέργειας, άρα και υψηλή ένταση του κύματος ενώ υψηλή θερμοκρασία συνεπάγεται παραγωγή πιο «αιχμηρών» ήχων. Τέλος πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή του ήχου, λόγω της καύσης, παίζουν και τα μέσα από τα οποία αυτός διαδίδεται. Όπως προαναφέρθηκε τα τοιχώματα του κυλίνδρου και του μπλοκ της μηχανής, μεταφέρουν τις δονήσεις, συμβάλλοντας στον συνολικό

θόρυβο του κινητήρα γι' αυτό και ο σχεδιασμός της μηχανής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν την κατάλληλη κατεύθυνση των ηχητικών κυμάτων. Ανάλογα σχεδιάζεται και το σύστημα εξάτμισης.

Ο θόρυβος εισαγωγής

Ο θόρυβος που παράγεται από τη ροή του αέρα μέσω του συστήματος εισαγωγής είναι μια πηγή ηχητικού περιεχομένου. Τα φαινόμενα που δημιουργούν τον θόρυβο, είναι η κίνηση του αέρα. Καθώς ο κινητήρας απορροφά αέρα κατά τον κύκλο εισαγωγής, δημιουργούνται έντονες μεταβολές πίεσης. Αυτές οι διακυμάνσεις παράγουν ήχους. Σε υψηλές στροφές και φορτία, η ροή του αέρα μέσα από το σύστημα εισαγωγής γίνεται περισσότερο τυρβώδεις, ειδικά στα σημεία όπου υπάρχει αλλαγή διαμέτρου, ή αλλαγή κατεύθυνσης, δημιουργώντας θόρυβο. Ακόμη ο θόρυβος, κατά την κίνηση του αέρα εισαγωγής, μπορεί να είναι αυξημένος αν εντός, των αγωγών εισαγωγής δημιουργηθούν αντηχήσεις (resonators), ενισχύοντας τις «ψηλές» συχνότητες του θορύβου.¹³ Ωστόσο, ο θόρυβος που παράγεται από την εισαγωγή του αέρα, εξαρτάται και από τα κανάλια εισαγωγής. Μικρά και στενά κανάλια, αυξάνουν την ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα, παράγοντας θορύβους υψηλών συχνοτήτων. Αντίστοιχα μεγαλύτερα κανάλια, μειώνουν τις αντιστάσεις ενισχύοντας τον θόρυβο, στις χαμηλές συχνότητες. Για την μείωση αυτού του θορύβου χρησιμοποιούνται θάλαμοι, οι οποίοι εξομαλύνουν τη ροή του αέρα λειτουργώντας ως φίλτρα. Άλλα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την περαιτέρω μείωση αυτού του θορύβου, είναι οι ακουστικοί συντονιστές (resonators) που τοποθετούνται συνήθως, στη πεταλούδα του γκαζιού ή στους σωλήνες εισαγωγής. Οι συντονιστές λειτουργούν βασιζόμενοι στην αρχή του συντονισμού. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να εξουδετερώνουν συγκεκριμένες ανεπιθύμητες

συχνότητες θορύβου, δημιουργώντας αντίθετα κύματα που ακυρώνουν αυτές τις συχνότητες (phase cancellation).¹⁴

Μία ακόμη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε προηγμένα συστήματα, για την ελαχιστοποίηση του θορύβου εισαγωγής, είναι η χρήση καναλιών εισαγωγής με μεταβλητή γεωμετρία. Το σύστημα προσαρμόζει δυναμικά το μήκος ή το σχήμα των καναλιών εισαγωγής, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Στην ουσία κατά αυτό το σύστημα στις χαμηλές στροφές, το μήκος των καναλιών αυξάνεται για να ενισχυθεί ο συντονισμός χαμηλών συχνοτήτων. Αυτό βοηθά στη βελτίωση της ροπής και στη μείωση του θορύβου στις χαμηλές στροφές. Αντίστοιχα στις υψηλές στροφές οι αγωγοί έχουν μικρότερη διάμετρο για να επιτυγχάνεται ταχύτερη ροή του αέρα. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο θόρυβος στο εύρος των υψηλών συχνοτήτων. Με τον δυναμικό σχεδιασμό επιτυγχάνεται μείωση θορύβου, αφού μειώνονται οι συντονισμοί, ενώ αυξάνεται και η απόδοση καύσης. Γι' αυτόν τον λόγο, η τεχνολογία αυτή συναντάται σε κινητήρες υψηλής απόδοσης, όπως σε σπορ αυτοκίνητα και μηχανές, όπου απαιτείται συνδυασμός δυναμικού ήχου και υψηλής ισχύος.¹⁵

Ο μηχανικός θόρυβος

Πέρα από τον θόρυβο λόγω της καύσης, μία άλλη πολύ ισχυρή πηγή που συνεισφέρει κατά ένα μεγάλο ποσοστό στον συνολικό θόρυβο στις ΜΕΚ, αποτελεί ο θόρυβος που προκύπτει από την αλληλεπίδραση των κινούμενων μερών, όπως τα έμβολα, οι βαλβίδες, οι εκκεντροφόροι και οι στροφαλοφόροι άξονες, καθώς και από τις δομικές δονήσεις. Αυτός ο θόρυβος, καλείται μηχανικός θόρυβος.

Μία πηγή μηχανικού θορύβου, είναι η πλευρική κρούση του πιστονιού στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Αυτό το φαινόμενο είναι αρκετά σύνηθες και μπορεί να προκύψει λόγω ασυμμετριών στην δύναμη της καύσης. Μία άλλη αιτία που μπορεί να προκαλέσει αυτό το φαινόμενο (piston-slap) είναι οι διαφορετικές θερμοκρασίες που μπορεί να έχει το έμβολο και ο κύλινδρος. Η διαστολή, λόγω θερμότητας, που προκύπτει στο έμβολο και τα τοιχώματα του κυλίνδρου δημιουργεί ανομοιογένεια στο κενό που υπάρχει μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το έμβολο να προσκρούει σε διάφορα σημεία. Αυτό το φαινόμενο συναντάται συχνότερα κατά την εκκίνηση της μηχανής όπου ο κινητήρας είναι κρύο και παρατηρείται σε κινητήρες με φθορά. Φθαρμένοι δακτύλιοι εμβόλου ή κυλινδρικά τοιχώματα με εκδορές μπορούν να αυξήσουν την αστάθεια στην κίνηση του εμβόλου, οδηγώντας σε ισχυρότερες κρούσεις.¹³¹⁶

Ο θόρυβος που προκύπτει από την τριβή μεταξύ του δακτυλίου του εμβόλου, και του τοιχώματος του κυλίνδρου είναι μία από τις κύριες πηγές μηχανικού θορύβου. Αυτός είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της τριβής, της λίπανσης και των δυνάμεων πίεσης που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου. Ο θόρυβος αυτός εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από τη συνθήκη λίπανσης που επικρατεί στον μηχανισμό του εμβόλου. Στην περιοχή κοντά στο ΑΝΣ όπου επικρατεί συνθήκη οριακής λίπανσης οι δυνάμεις τριβής είναι αυξημένες με αποτέλεσμα, ο θόρυβος που παράγεται να είναι έντονος ειδικά στο φάσμα των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων. Ο θόρυβος που παράγεται από την τριβή του εμβόλου, καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό στις συνολικές ηχητικές εκπομπές της μηχανής. Εξαρτάται κυρίως από παράγοντες όπως η ποιότητα της λίπανσης, η γεωμετρία των εξαρτημάτων,

και η κατάσταση του κινητήρα και η ανάλυση αυτού μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση του εμβόλου και των δακτυλίων αλλά και τη συνθήκη της λίπανσης.¹⁷

Ένα άλλο είδος μηχανικού θορύβου, είναι ο θόρυβος του συστήματος βαλβίδων. Καθώς οι βαλβίδες ανοιγοκλείνουν, προσκρούουν στις «έδρες», όπου και προκαλείται ένας μεταλλικός θόρυβος. Η ένταση αυτού του θορύβου εξαρτάται από την ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα και την ποιότητα της ρύθμισης του μηχανισμού. Ακόμη, το έκκεντρο, καθώς περιστρέφεται, επαφίεται με το ωστήριο το οποίο μεταφέρει την κίνηση προς την βαλβίδα, αναγκάζοντας την, να ανοίξει. Θόρυβος μπορεί να προκύψει από την επαφή του εκκεντροφόρου με το ωστήριο, ειδικά αν υπάρχουν μεγάλα κενά ή ανοχές μεταξύ τους (π.χ. λόγω φθοράς ή κακής ρύθμισης). Αυτός ο θόρυβος εξαρτάται από την ταχύτητα και την ένταση με την οποία η δύναμη ασκείται στο ωστήριο. Ένα άλλο φαινόμενο θορύβου, στον μηχανισμό των βαλβίδων, συμβαίνει όταν υπάρχει μεγάλο κενό μεταξύ του εκκεντροφόρου και του ωστηρίου. Τέλος τα ελατήρια επαναφοράς των βαλβίδων αποτελούν πηγή θορύβου, λόγω των κραδασμών που προκαλούν ειδικά σε υψηλές ταχύτητες. Την ένταση του θορύβου, την επηρεάζουν η σκληρότητα και η ποιότητα των ελατηρίων. Ο θόρυβος που προκύπτει λόγω του συστήματος βαλβίδων εξαρτάται κυρίως από τα υλικά κατασκευής του συστήματος, μιας και απαρτίζεται από υλικά κατασκευασμένα από κράματα υψηλής σκληρότητας, κάτι το οποίο ενισχύει τις υψηλές συχνότητες θορύβου. Όπως και στα άλλα μέρη του κινητήρα, έτσι και στον μηχανισμό των βαλβίδων, ο θόρυβος είναι πιο έντονος στις υψηλές στροφές, λόγω της αυξημένης συχνότητας πρόσκρουσης των εξαρτημάτων.

Ο θόρυβος λόγω συντονισμού αλλά και σχεδιασμού του κινητήρα

Ο ήχος που παράγεται από έναν κινητήρα, εξαρτάται σε ένα μεγάλο βαθμό και από την ίδια την διαμόρφωση και τον σχεδιασμό του. Η διάταξη και η ποσότητα των κυλίνδρων, είναι εγγενείς παράμετροι ,της «φύσης» των ηχητικών φαινομένων του κινητήρα, που συνδέονται τόσο με τη μηχανική λειτουργία όσο και με την αντίληψη του ήχου.

Οι κινητήρες σε σειρά για παράδειγμα χαρακτηρίζονται από την ομοιομορφία των κύριων δυνάμεων που προκύπτουν από την κίνηση των εμβόλων και της καύσης στον κινητήρα. Ωστόσο η παλινδρομική κίνηση του εμβόλου, δημιουργεί δυνάμεις δευτέρας τάξης, οι οποίες συνδέονται με τη γεωμετρία του στροφαλοφόρου άξονα και του διωστήρα και έχουν συχνοτική φύση. Παράδειγμα τέτοιων δυνάμεων αποτελούν οι ανισορροπίες που δημιουργούνται λόγω της μεταβολής της ταχύτητας του εμβόλου στην διάρκεια του κύκλου. Οι δυνάμεις δευτέρας τάξης ,μπορεί να αυξήσουν την τραχύτητα του ήχου στις υψηλές στροφές αφού προκαλούν δονήσεις υψηλής συχνότητας.¹⁸

Αντίστοιχα ένας εξακύλινδρος σε σειρά κινητήρας, θεωρείται πιο ομαλός ,λόγω της συμμετρικής κατανομής των εμβόλων και των δυνάμεων αδράνειας. Ο ήχος στους εξακύλινδρους κινητήρες είναι πιο βαθύς με πλούσιο περιεχόμενο στις «μεσαίες» συχνότητες λόγω των συχνότερων αναφλέξεων που συμβαίνουν σε αυτόν (κάθε 120° περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα). Η ισορροπημένη λειτουργία των εμβόλων μειώνει τις δονήσεις που διαφορετικά θα μπορούσαν να προκαλέσουν μηχανικό θόρυβο

Όπως προαναφέρθηκε ,πέρα από τον αριθμό των κυλίνδρων, σημαντικό ρόλο στην μορφή του ήχου, έχει και η ίδια η διάταξη των κυλίνδρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η V

διάταξη όπου ανάλογα την γωνία των κυλίνδρων παράγεται και διαφορετικής μορφής ήχος. Αν η γωνία διάταξης είναι 60° ο ήχος είναι πιο ομαλός ,ενώ αν είναι 90° είναι πιο τραχύς λόγω της ανισορροπίας στις δυνάμεις αδράνειας.

Στους επίπεδους κινητήρες αντίστοιχα, οι δυνάμεις αδρανείας είναι πιο εξισορροπημένες λόγω της οριζόντιας διάταξης των κυλίνδρων. Αυτό μειώνει τους ανεπιθύμητους κραδασμούς κάνοντας τους επίπεδους κινητήρες να κατέχουν μια μοναδική ηχητική ταυτότητα.

Ο συντονισμός του κινητήρα επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι μηχανικές και οι ακουστικές δονήσεις αλληλοεπιδρούν αλλά και πως γίνονται αυτές αντιληπτές. Το φαινόμενο του συντονισμού μπορεί να διακριθεί στην εξάτμιση, στην διαδικασία της εισαγωγής αλλά και στον στροφαλοφόρο άξονα.

2.1.1.1 Ο ΗΧΟΣ ΣΤΙΣ ΜΕΚ ΜΕ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ

Οι στροβιλοσυμπιεστές παράγουν ιδιαίτερα ηχητικά χαρακτηριστικά, λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς της τουρμπίνας και του συμπιεστή. Οι υψηλές ταχύτητες στις οποίες λειτουργεί ο στροβιλοσυμπιεστής, δημιουργεί αεροδυναμικά φαινόμενα τα οποία έχουν ηχητικά αποτελέσματα. Αυτός ο αεροδυναμικός θόρυβος, ανιχνεύεται σε ένα φάσμα συχνοτήτων μεταξύ 1-10kHz. Η αλληλεπίδραση των λεπίδων της τουρμπίνας και του συμπιεστή, με τον εισερχόμενο αέρα, δημιουργεί συνήθως έναν θόρυβο ο οποίος διακρίνεται από τα «τονικά» του χαρακτηριστικά. Αυτό ο ήχος ανιχνεύεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ,η οποία προκύπτει ως συνάρτηση, της περιστροφικής ταχύτητας της τουρμπίνας και των αριθμό των λεπίδων της. Αυτός ο «τονικός» ήχος είναι το χαρακτηριστικό «σφύριγμα» που συναντάται στους κινητήρες με υπερτροφοδότηση. Ένα άλλο ηχητικό φαινόμενο που ανιχνεύεται στους στροβιλοσυμπιεστές, προκύπτει όταν η απότομη συμπίεση του αέρα παράγει φαινόμενα τύρβης, στην ροή του αέρα

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

παράγοντας αναταράξεις οι οποίες ενισχύουν τον θόρυβο σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων λόγω της αλληλεπίδρασης της συμπίεσης και της εκτόνωσης του αέρα, στα συστήματα υπερτροφοδότησης.¹⁹

Στην ουσία το σύστημα του στροβιλοσυμπιεστή λειτουργεί και ως φίλτρο, για τις εκπομπές θορύβου του κινητήρα, αφού ακυρώνει τις «μεσαίες» και «χαμηλές» συχνότητες, ενώ ενισχύει τις «υψηλές». Αυτό το φιλτράρισμα δημιουργεί μία μοναδική ηχητική ταυτότητα, η οποία κάνει τους κινητήρες με στροβιλοσυμπιεστή, διακριτούς από τους κινητήρες δίχως στροβιλοσυμπιεστή. Γι' αυτόν τον λόγο, τα ηχητικά κύματα που παράγονται από τους στροβιλοσυμπιεστές, έχουν μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο.

Υπό συνθήκες χαμηλών στροφών κινητήρα, ο αέρας μπορεί να αναπτύξει ταλαντωτικά φαινόμενα μεταξύ της εμπρόσθιας και της αντίστροφης κατεύθυνσης του, στον συμπιεστή. Έτσι ο συμπιεστής εισέρχεται σε κατάσταση παροδικότητας (surge) που οδηγεί σε παραγωγή θορύβου, χαμηλών συχνοτήτων. Από την άλλη, η λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες κοντά στα όρια του παροδικού φαινομένου, μπορεί να οδηγήσει σε άλλου είδους αεροδυναμικές αστάθειες οι οποίες παράγουν αρμονικούς θορύβους.²⁰

Η τουρμπίνα στο σύστημα υπερτροφοδότησης, διαμορφώνει την ροή της διαδικασίας εξατμίσης. Αυτό δημιουργεί ένα πιο ομαλό ακουστικό χαρακτήρα ο οποίος όμως χαρακτηρίζεται από αρμονικά χαρακτηριστικά υψηλών συχνοτήτων τα οποία δεν υπάρχουν στους συμβατικούς κινητήρες. Η τεχνολογία της υπερτροφοδότησης, είναι συγχρονισμένη με τα κύματα εκτόνωσης,

κάτι το οποίο δημιουργεί έναν συνδυασμό θορύβου, ο οποίος αντικατοπτρίζει τα φαινόμενα της καύσης αλλά και της υπερτροφοδότησης.

Σε γενικές γραμμές οι κινητήρες, με στροβιλοσυμπιεστή, διακρίνονται από ένα χαρακτηριστικό και σύνθετο ηχητικό προφίλ, το οποίο περιλαμβάνει «σφυρίγματα» υψηλών συχνοτήτων, θορύβους από την τυρβώδη ροή του αέρα αλλά και κύματα χαμηλών συχνοτήτων που σχετίζονται με το παροδικό φαινόμενο του συμπιεστή. Αυτά τα μοναδικά ηχητικά χαρακτηριστικά ενισχύουν την πολυπλοκότητα της ακουστικής σχεδίασης στους κινητήρες με υπερσυμπίεση.²¹

Οι αλλαγές στο ακουστικό αποτύπωμα οφείλονται κυρίως στα μηχανικά εξαρτήματα του υπερσυμπιεστή τα οποία επηρεάζουν με δυναμικό τρόπο την εισαγωγή του αέρα, εντός της μηχανής. Ακόμη η διαδικασία της καύσης έχει διαφορετικό ακουστικό αποτέλεσμα. Σε γενικές γραμμές, οι υπερσυμπιεστές παράγουν διακριτούς τονικούς ήχους αλλάζοντας τις συνολικές ακουστικές εκπομπές ως προς συχνοτικό φάσμα αλλά και ως προς τα επίπεδα ηχητικής πίεσης.

Καθώς οι ρότορες των τύπου Roots και Twin screw συμπιεστών, περιστρέφονται ,δημιουργούν περιοδικές διακυμάνσεις πίεσης αλλά και μηχανικούς κραδασμούς στο μηχανικό πλέγμα. Αυτό συχνά παράγει έναν χαρακτηριστικό ήχο υψηλής συχνότητας, με τονικά χαρακτηριστικά. Το καθολικό ηχητικό αποτύπωμα της μηχανής ενισχύεται από το σύστημα μετάδοσης κίνησης, που είναι συνδεδεμένο με το στροφαλοφόρο άξονα, είτε αυτό αποτελείται από σύστημα γραναζιών είτε ιμάντα. Τα τονικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται κυρίως από την ποσότητα των λοβών που έχουν οι ρότορες ,στους roots -type συμπιεστές.²²

Στις μηχανές με σύστημα υπερσυμπίεσης, η διαδικασία υπερπλήρωσης μεταβάλλει έντονα τη δυναμική της πίεσης μέσα στην πολλαπλή εισαγωγής. Η αύξηση της πυκνότητας του εισερχομένου αέρα είναι πιθανό να αλλάξει τη συχνότητα συντονισμού που χαρακτηρίζει τους αγωγούς της πολλαπλής εισαγωγής. Αυτό συνήθως προκαλεί μία συχνοτική μεταβολή στο παραγόμενο ακουστικό περιεχόμενο που προκύπτει από τον συντονισμό των αγωγών. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα διακριτό, όταν οι αντηχητήρες (resonators) δεν είναι κατάλληλοι για συνθήκες υπερπλήρωσης ή αν η γεωμετρία των αγωγών ,δεν είναι σχεδιασμένη για συνθήκες υπερπλήρωσης.²³

Άμεσο ηχητικό αντίκτυπο στον συνολικό θόρυβο, έχει και η διαδικασία της καύσης, με υπερσυμπίεση. Η πιο αποδοτική καύση εντός του κυλίνδρου, παρότι μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο θόρυβο, σε ένα ορισμένο φάσμα συχνοτήτων, από την άλλη μπορεί να τον ενισχύσει λόγω της αυξημένης πίεσης με την οποία εξέρχονται τα προϊόντα της καύσης. Αυτό συχνά έχει σαν αποτέλεσμα ένα πιο «οξύ» και «καθαρό» ήχο ο οποίος πρέπει να αντιμετωπιστεί κατάλληλα με κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος εξαγωγής.²⁴

Η κύρια διαφορά στο ηχητικό αποτύπωμα της υπερτροφοδότησης με turbo ή με συμπίεστή, έγκειται στην ίδια την λειτουργία του εκάστοτε συστήματος υπερτροφοδότησης. Στους υπερσυμπίεστες,²⁵ ο ενισχυμένος θόρυβος, είναι αποτέλεσμα της μηχανικής αλληλεπίδρασης του συστήματος μετάδοσης των γραναζιών ή του ιμάντα ,που χαρακτηρίζεται από το τονικό του περιεχόμενο , σε υψηλές συχνότητες. Από την άλλη στην περίπτωση της υπερτροφοδότησης, με σύστημα στροβιλοσυμπίεστή, ο θόρυβος συχνά εκδηλώνεται ως ένα διακριτικό «σφύριγμα» λόγω

της αεροδυναμικής του φύσης. Ο ήχος ενισχύεται και από τα φαινόμενα «τύρβης» που αναπτύσσονται εντός της τουρμπίνας.

Η μηχανική σύνδεση του υπερσυμπιεστή συνεπάγεται και συσχέτιση του θορύβου του με την ταχύτητα του κινητήρα. Καθώς αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα, οι ρότορες και τα γρανάζια του υπερσυμπιεστή περιστρέφονται ταχύτερα, αυξάνοντας την ένταση και την τονικότητα του μηχανικού θορύβου. Από την άλλη η ταχύτητα του υπερτροφοδότη, εξαρτάται από τον όγκο και την ταχύτητα των καυσαερίων. Ο χαρακτηριστικός ήχος της περιστροφής της τουρμπίνας, γίνεται πιο έντονος υπό υψηλό φορτίο λόγω του υψηλού περιεχομένου, σε ενέργεια που μεταφέρουν τα καυσαέρια. Η αύξηση του φορτίου στον στροβιλοσυμπιεστή, συνοδεύεται από έναν ήχο «φυσήματος» λόγω της αεροδυναμικής φύσης του θορύβου.

3.0 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ.

Οι ακουστικές εκπομπές ορίζονται ως τα στιγμιαία ελαστικά κύματα τα οποία παράγονται από την απότομη απελευθέρωση ενέργειας από τοπική πηγή προς το υλικό. Όταν ένα δομικό στοιχείο υπόκειται σε εξωτερικό φορτίο, συγκεκριμένες πηγές απελευθερώνουν ενέργεια με την μορφή κυμάτων, τάσης, τα οποία διαδίδονται προς την επιφάνεια του στοιχείου, και μπορούν να ανιχνευτούν από αισθητήρια όργανα. Αυτή η εκτόνωση ενέργειας ποικίλλει και μπορεί να ανιχνευτεί σε φυσικά φαινόμενα, όπως σεισμοί έως και μηχανικά φαινόμενα όπως κινήσεις ολίσθησης και μετατόπισης, φαινόμενα θραύσης, τήξης, κόπωσης, διάδοσης ρωγμών ή και μετασχηματισμούς φάσης των υλικών. Το κύριο χαρακτηριστικό των κυμάτων ακουστικών εκπομπών είναι ότι δεν έχουν ως μέσο διάδοσης τον αέρα αλλά διαδίδονται μέσα από στέρεο υλικό, στο φάσμα των 30kHz έως 1MHz. Το σήμα ακουστικών εκπομπών, που ανιχνεύεται από τους ακουστικούς αισθητήρες, μπορεί να χαρακτηριστεί ως παροδικό ή σήμα burst ή συνεχές σήμα. Τα σήματα burst έχουν καθορισμένα σημεία έναρξης και λήξης και μπορούν να διακριθούν εύκολα από τον περιβάλλοντα θόρυβο. Παρατηρούνται συνήθως κατά τη διάδοση των αναπτυγμένων ρωγμών εντός ενός υλικού ή κατά τη διάρκεια κρούσης και θραύσης. Τα συνεχή κύματα, από την άλλη είναι επαναλαμβανόμενα, και μπορεί να έχουν μεταβλητές εντάσεις και συχνότητες. Τα συνεχή κύματα σχετίζονται με την παραμόρφωση σε όλκιμα υλικά και μπορούν να ανιχνευτούν κατά τη λειτουργία μηχανών. Κατά την εκτέλεση μεθόδων ακουστικών εκπομπών, οι αισθητήρες και κατά συνέπεια, οι μετρήσεις των σημάτων αποτελούν το κύριο στοιχείο ενός συστήματος ακουστικών εκπομπών. Οι αισθητήρες επιλέγονται κυρίως βάσει των συχνοτήτων ανίχνευσης που ενδιαφέρουν την κάθε εφαρμογή. Τα υπόλοιπα μέρη ενός συστήματος AE Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού & Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

περιλαμβάνουν τον προενισχυτή που στόχο έχει την ενίσχυση του ληφθέντος σήματος, τα φίλτρα που στόχο έχουν την αφαίρεση των συχνοτήτων που δεν ενδιαφέρουν την μελέτη αλλά και τους ενισχυτές για την απόκτηση και αντίστοιχα την ενίσχυση ή την μείωση δεδομένων.²⁶

Για την χρήση των ΑΕ για την παρακολούθηση της κατάστασης και την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας, ως εργαλείο διάγνωσης δηλαδή, είναι αναγκαίο να καθοριστεί μία ποιοτική ή ποσοτική σχέση μεταξύ του ληφθέντος σήματος ακουστικής εκπομπής και της κατάστασης του υλικού ανάλογα το υλικό ή και τη δομή που μελετάται. Για να καθοριστεί μία τέτοια σχέση υπάρχουν τρεις κύριες προσεγγίσεις :

- Διαμόρφωση θεωρητικής σχέσης

Είναι αναγκαίο να διαμορφωθεί η θεωρητική σχέση μεταξύ των παραμέτρων ακουστικής εκπομπής και των χαρακτηριστικών τους με τις βλάβες των μηχανών.

- Περιγραφή της κατάστασης της μηχανής

Περιγραφή της κατάστασης της μηχανής καθορίζοντας με πειραματικό τρόπο ένα χαρακτηριστικό σύνολο παραμέτρων ακουστικής εκπομπής που θα μπορούν μοναδικά να αποτελέσουν κάποιο δείκτη που θα υποδεικνύει τη βλάβη της μηχανής.

- Προσδιορισμός της αποτελεσματικότερης μεθόδου επεξεργασίας ΑΕ σήματος.

Προσδιορισμός της πιο αποτελεσματικής μεθόδου επεξεργασίας σημάτων ΑΕ για την ανίχνευση ελαττωμάτων και τη διάγνωση βλαβών. Ο προσδιορισμός θα πρέπει να βασίζεται στην εξέταση του παραγόμενου σήματος ΑΕ καθώς και στην ανάλυση ακατέργαστων δεδομένων με τη χρήση διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης σήματος. Οι μέθοδοι ανάλυσης σήματος διακρίνονται σε ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (Time domain analysis) ,ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας

(frequency domain analysis) ,ανάλυση κυματιδίων (wavelet analysis) ή συνδυασμός αυτών των μεθόδων.

Οι ακουστικές εκπομπές στις ΜΕΚ, παράγονται κυρίως από την δυναμική αλληλεπίδραση των μηχανισμών που σχετίζονται με τα φαινόμενα της τριβής, της φθοράς και της καύσης. Οι εκπομπές αυτές με την κατάλληλη μεθοδολογία λήψης και επεξεργασίας τους, μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα για την παρακολούθηση και διάγνωση της υγείας της μηχανής σε πραγματικό χρόνο. Η θελκτικότητα αυτών των μεθόδων εντοπίζεται στον μη παρεμβατικό χαρακτήρα τους.

3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.

Η κατανόηση των θεωρητικών αρχών της διάδοσης των κυμάτων είναι απαραίτητη για την ανάλυση των ακουστικών εκπομπών στα υλικά. Η διάδοση του κύματος είναι και αυτή που χαρακτηρίζει τα κύματα γι' αυτό και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση αυτή

Ο πιο συνηθισμένος τύπος κύματος ΑΕ που συναντάται είναι τα διαμήκη κύματα. Στα διαμήκη κύματα η μετατόπιση των σωματιδίων γίνεται προς την ίδια κατεύθυνση που ακολουθεί και η διάδοση του κύματος, με αποτέλεσμα να προκαλούνται περιοδικές συμπίεσεις και διαστολές μέσα στο υλικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αλλάζουν οι περιοχές υψηλής και χαμηλής πυκνότητας σωματιδίων κατά μήκος της διαδρομής του κύματος. Τα διαμήκη κύματα είναι ο ταχύτερος τύπος κυμάτων και μπορεί να διαδοθεί τόσο σε στερεά μέσα όσο και σε υγρά. Λόγω της φυσικής τους ιδιότητας, τα διαμήκη κύματα είναι αυτά που ανιχνεύονται πρώτα από τους αισθητήρες γι' αυτό και η ευαισθησία των αισθητηρίων στην ανίχνευση τέτοιων τύπων κυμάτων

καθίσταται κρίσιμη. Η υψηλή ταχύτητα και η χαμηλή απόσβεσή τους επιτρέπουν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις σε στερεά, διατηρώντας την ακεραιότητα του σήματος.

Ένας άλλος αρκετά διαδεδομένος τύπος κυμάτων ΑΕ είναι τα εγκάρσια κύματα. Κατά την διάδοση των εγκάρσιων κυμάτων η μετατόπιση των σωματιδίων του μέσου διάδοσης είναι κάθετη προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος λόγω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στο μέσο διάδοσης. Τα εγκάρσια κύματα μπορούν να διαδοθούν μόνο μέσω στερεών σωμάτων και συνήθως έχουν μικρότερη ταχύτητα μετάδοσης από τα διαμήκη κύματα λόγω της υψηλής αντίστασης που συναντούν κατά τη διάδοσης εντός του υλικού. Τα εγκάρσια κύματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, όπως το μέτρο διάτμησης και η σκληρότητα του υλικού. Τα εγκάρσια κύματα είναι εξίσου σημαντικά στην ανάλυση με ΑΕ καθώς μέσω αυτών μπορούν να ανιχνευτούν τυχόν διαφοροποιήσεις στις φυσικές ιδιότητες του υλικού ή εσωτερικές τάσεις οι οποίες μπορεί να αναπτυχθούν κατά τη διάδοση ρωγμών ή τον μετασχηματισμό των υλικών.

Τέλος τα επιφανειακά κύματα είναι από τα κύματα που ανιχνεύονται περισσότερο στις ΑΕ των ΜΕΚ καθώς έτσι χαρακτηρίζονται τα κύματα τα οποία καθόσον διαδίδονται στο μέσο, η κίνηση των σωματιδίων του μέσου, μειώνεται εκθετικά με το βάθος ως αποτέλεσμα της εκθετικής μείωσης του πλάτους του κύματος, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του, συγκεντρώνεται κοντά στην επιφάνεια του υλικού. Λόγω των ιδιοτήτων των επιφανειακών κυμάτων ,αυτά ,χαρακτηρίζονται από την χαμηλή ταχύτητα διάδοσης τους, σε σχέση με τα διαμήκη και τα εγκάρσια. Τα επιφανειακά κύματα χρησιμοποιούνται για την ανάλυση φαινομένων

που δημιουργούνται στην επιφάνεια του υλικού, όπως διάβρωση, ρωγμές ή άλλων επιφανειακών ανωμαλιών.²⁷

3.1.1 Εξίσωση διάδοσης του κύματος

Η εξίσωσης διάδοσης σε ένα ελαστικό μέσο μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικό τρόπο από την εξίσωση κύματος:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u \quad (1)$$

Όπου :

- u : Το διάνυσμα της μετατόπισης των σωματιδίων λόγω του κύματος.

- c : Ταχύτητα του κύματος η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού.

- ∇^2 : Τελεστής Laplace, και αντιπροσωπεύει τη χωρική μεταβολή του κύματος.

Όπως αναφέρθηκε ,κάθε τύπος κύματος έχει και άλλη ταχύτητα. Η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων εκφράζεται μαθηματικώς με την παρακάτω εξίσωση:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

Όπου :

- ♦ E : είναι το μέτρο του Young, όπου εκφράζει την ακαμψία του υλικού

$$\left(Pa \text{ ή } \frac{N}{m^2} \right)$$

- ♦ ν : είναι ο λόγος Poisson

- ♦ ρ : είναι η πυκνότητα του υλικού.

Αντίστοιχα η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$c_s = \sqrt{G/\rho} \quad (3)$$

Όπου :

- ♦ G είναι το μέτρο διάτμησης του υλικού

Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του λόγου Poisson και είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτή των εγκάρσιων και εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$c_R \approx 0.87 + 1.12\nu \quad (4)$$

Σε γενικές γραμμές η διάδοση των κυμάτων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες ,οι οποίοι καθορίζουν και την συμπεριφορά τους καθώς διασχίζουν διαφορετικά μέσα. Ο κύριος και πιο σημαντικός παράγοντας είναι οι ιδιότητες του υλικού μέσου διάδοσης. Υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους πυκνότητα ή το υψηλό μέτρο ελαστικότητας ευνοούν τη ταχύτερη διάδοση των κυμάτων. Ένας ακόμη παράγοντας για τη διάδοση των κυμάτων, είναι η απόσβεση αυτών. Το υλικό μέσο διάδοσης μπορεί να απορροφά την ενέργεια του κύματος με τη μορφή θερμότητας. Απόσβεση μπορεί να προκύψει ακόμα και λόγω σκέδασης η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση των κυμάτων με τη δομή του υλικού. Επιπλέον, τα κύματα επηρεάζονται έντονα από τα όρια και τις επιφάνειες που συναντούν. Τα κύματα καθώς προσκρούουν στις επιφάνειες μπορεί να ανακλαστούν, να διαθλαστούν ή να εκτραπούν ,τροποποιώντας έτσι τη κατεύθυνση τους και την ένταση τους. Η διασπορά τέλος αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα στη διάδοση και λήψη του κύματος, καθώς τα κύματα μπορεί να ληφθούν

παραμορφωμένα αφού κύματα διαφορετικών συχνοτήτων ταξιδεύουν εντός του υλικού με διαφορετικές ταχύτητες.²⁸

Στην ανάλυση ακουστικών εκπομπών (ΑΕ), αυτές οι αρχές βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλες χρήσεις. Κατά την ανάλυση των φαινομένων της καύσης, διαμήκη κύματα παράγονται από την καύση αντανακλώντας τις ταχείες αλλαγές της πίεσης μέσα στον κύλινδρο. Από την ταχύτητα των κυμάτων αυτών μπορούν να αναχθούν συμπεράσματα για τις ιδιότητες των αερίων αλλά και για την απελευθέρωση ενέργειας. Από την άλλη για την ανίχνευση ελαττωμάτων, τα επιφανειακά κύματα έχουν περισσότερη αξία, μιας και είναι τα κατάλληλα για την ανίχνευση ρωγμών ή επιφανειακής φθοράς. Τα εγκάρσια κύματα είναι ικανά για την ανίχνευση εσωτερικών διαρροών και δομικών ελαττωμάτων. Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων μπορούν να παρέχουν επαρκείς πληροφορίες για την διάγνωση αστοχιών ανάφλεξης, χτυπήματα ή προανάφλεξη.

3.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.

Οι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) αποτελούν το πιο βασικό στοιχείο της τεχνολογίας ΑΕ, καθώς μέσω αυτών λαμβάνεται η μηχανική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος που παράγει ΑΕ. Οι αισθητήρες, σχεδιάζονται ώστε να ανιχνεύουν κύματα τάσης υψηλών συχνοτήτων, τα οποία προκύπτουν από τοπικά φαινόμενα, όπως η διάδοση ρωγμών, η τριβή ή οι κρούσεις και να τα μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα.

Η λειτουργία των αισθητήρων ΑΕ ,βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο κάποια υλικά παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν δέχονται μηχανική τάση. Τα πιο δημοφιλή πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες ΑΕ είναι ο τιτανικός ζirkόνιος του μολύβδου (PZT) και ο χαλαζίας. Όταν ένα κύμα τάσης φτάνει στον αισθητήρα, προκαλεί μηχανικές δονήσεις στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπει αυτές τις δονήσεις σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι ανάλογο του πλάτους και της συχνότητας του κύματος. Λόγω αυτής της αναλογίας το σήμα αυτό ενισχύεται και υπόκειται σε περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση.²⁹

Η ευαισθησία των αισθητήρων αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες, όσον αφορά την ικανότητα τους, να εντοπίζουν με ακρίβεια, τα κύματα υψηλών συχνοτήτων. Η ευαισθησία κυρίως εξαρτάται από τον σχεδιασμό του αισθητήρα αλλά και τις ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού υλικού όπου χρησιμοποιείται. Οι PZT αισθητήρες είναι ικανοί να ανιχνεύσουν ΑΕ σήματα χαμηλού πλάτους, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για την παρακολούθηση φαινομένων όπως ο σχηματισμός μικρό-ρωγμών, ή φθορά σε αρχικό στάδιο ή μικρές μεταβολές στην τριβή. Το ευρύ φάσμα συχνοτικής απόκρισης του PZT αισθητήρα (20kHz έως 1 MHz) επιτρέπει την καταγραφή πολλών και διαφορετικών ειδών σημάτων ΑΕ, κάτι που τους κάνει ιδιαίτερα χρήσιμους σε εφαρμογές όπως την παρακολούθηση της καύσης, εντός του κινητήρα ,αφού τα γεγονότα ΑΕ κατά την καύση παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις τόσο στη συχνότητα όσο και στο πλάτος.³⁰

Πέραν όμως του υλικού από το οποίο αποτελείται ο αισθητήρας, σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες του, παίζει και ο σχεδιασμός αυτού. Η γεωμετρία του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, ο τύπος του καλύμματος, αλλά και το ζεύγος μεταξύ του αισθητήρα και του υλικού «παρακολούθησης» έχουν ιδιαίτερη σημασία στη λήψη του σήματος ενδιαφέροντος.

Το σχήμα και το μέγεθος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι αυτό που καθορίζει τη συχνότητα συντονισμού και την ευαισθησία του αισθητήρα. Ένα «λεπτό» πιεζοηλεκτρικό στοιχείο θα συντονίζεται σε υψηλές συχνότητες, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευαίσθητο σε κύματα ΑΕ υψηλών συχνοτήτων. Από την άλλη ένα πιο «παχύ» πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μπορεί να είναι πιο κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν την ανίχνευση κυμάτων ΑΕ χαμηλών συχνοτήτων.³¹ Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο συχνά, είναι προστατευμένο από ένα κάλυμμα που στόχο έχει την προστασία του στοιχείου, από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως την θερμοκρασία, την υγρασία ή τυχόν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Το περίβλημα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε το σήμα να μην λαμβάνεται εξασθενημένο αλλά και να προστατεύεται το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Τέλος πολύ κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει την ευαισθησία του αισθητήρα αποτελεί το μέσο σύζευξης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη στερέωση του αισθητήρα στο υπό παρακολούθηση υλικό. Τα πιο συνήθη μέσα σύζευξης, περιλαμβάνουν γράσο, εποξικές ρητίνες και συγκολλητικές ουσίες. Η σωστή σύζευξη εξασφαλίζει την αποδοτική μετάδοση των κυμάτων τάσης από το υλικό προς τον αισθητήρα, ελαχιστοποιώντας την απώλεια σήματος και μεγιστοποιώντας την ευαισθησία.³⁰

Όπως αναφέρθηκε η ευαισθησία αποτελεί το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των αισθητήρων ΑΕ. Η ευαισθησία αναφέρεται στην ικανότητα του αισθητήρα να ανιχνεύσει σήματα χαμηλού πλάτους τα οποία μπορεί να προκύπτουν από μικρές εκλύσεις ενέργειας, όπως ο σχηματισμός μικρορωγμών, ή μικρές μεταβολές στις συνθήκες τριβής. Υψηλή ευαισθησία είναι απαραίτητη για την καταγραφή ασθενών σημάτων ΑΕ, τα οποία συχνά αποτελούν προειδοποιητικά σημάδια επικείμενων βλαβών ή μικρών αλλαγών στο υπό παρακολούθηση σύστημα. Το PZT είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιημένο, υλικό, λόγω των υψηλών πιεζοηλεκτρικών σταθερών d_{33} και g_{33} οι οποίες περιγράφουν την απόκριση του αισθητήρα σε μηχανικά και ηλεκτρικά ερεθίσματα. Υψηλή τιμή της σταθεράς d_{33} δηλώνει ότι ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει χαμηλού πλάτους σήματα ΑΕ. Η τιμή g_{33} από την άλλη δηλώνει την τάση του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του αισθητήρα ως αποτέλεσμα της μηχανικής τάσης που δέχτηκε.²⁵ Ωστόσο, πολύ υψηλή ευαισθησία μπορεί επίσης να οδηγήσει στην ανίχνευση ανεπιθύμητου θορύβου, όπως ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) ή μηχανικών δονήσεων από εξωτερικές πηγές. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι αισθητήρες ΑΕ συχνά διαθέτουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα επεξεργασίας σήματος, όπως προενισχυτές και φίλτρα, για τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος και τη μείωση του θορύβου. Σε εφαρμογές όπως οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, όπου τα σήματα ΑΕ μπορεί να είναι ασθενή και επαναλαμβανόμενα, η υψηλή ευαισθησία του αισθητήρα είναι πολύ ζωτικής σημασίας για την ανίχνευση συγκεκριμένων φαινομένων όπως η προανάφλεξη, η λανθασμένη καύση ή η πρόωμη

φθορά των εξαρτημάτων του κινητήρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ²⁵ στην οποία αποδεικνύεται ότι οι αισθητήρες ΑΕ υψηλής ευαισθησίας μπορούν να ανιχνεύσουν ανωμαλίες καύσης στις ΜΕΚ, ακόμη και υπό συνθήκες λειτουργίας με θόρυβο.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των αισθητηρίων, αποτελεί η απόκριση τους. Η απόκριση συχνότητας ενός αισθητήρα ΑΕ είναι αυτή που καθορίζει την ικανότητα του να καταγράφει σήματα σε ένα εύρος συχνοτήτων. Η επιλογή του εύρους συχνοτήτων εξαρτάται και από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται ο αισθητήρας. Για παράδειγμα, στην παρακολούθηση της καύσης, τα σήματα ΑΕ που σχετίζονται με προανάφλεξη ή λανθασμένη καύση περιέχουν υψηλές συχνότητες, γεγονός που απαιτεί αισθητήρες με απόκριση σε υψηλές συχνότητες ενώ αντίθετα, για την μελέτη τριβολογικών φαινομένων όπως η τριβή, η λίπανση και η φθορά, που παράγουν χαμηλότερες συχνότητες, είναι αναγκαίοι αισθητήρες με ευρύτερο φάσμα απόκρισης.

Οι αισθητήρες ΑΕ κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στη μία κατηγορία ανήκουν οι συντονισμένοι αισθητήρες (resonant sensors) ενώ στην άλλη κατηγορία ανήκουν οι ευρυζωνικοί αισθητήρες (wideband sensors). Ανάλογα τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα προκύπτει και η καταλληλότητα αυτού για διαφορετικές εφαρμογές.

Οι συντονισμένοι αισθητήρες, έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε μία συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού η οποία βρίσκεται συνήθως μεταξύ 20-300kHz. Λόγω της ευαισθησίας τους σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων είναι ιδανικοί για την ανίχνευση γεγονότων όπως ανάπτυξη ρωγμών, δονήσεις λόγω τριβής ή τοπικές παραμορφώσεις υλικών. Οι συντονισμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που είναι μηχανικά συντονισμένο ώστε να δονείται σε μία συγκεκριμένη συχνότητα. Τα κύματα τάσης που δέχεται ο αισθητήρας προκαλούν δονήσεις

στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο στη συχνότητα συντονισμού του, με αποτέλεσμα να παράγεται ενισχυμένο ηλεκτρικό σήμα. Οι συντονισμένοι αισθητήρες είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι σε ΑΕ σήματα εντός της καθορισμένης ζώνης συχνοτήτων, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για ανίχνευση χαμηλού πλάτους σημάτων. Το φαινόμενο συντονισμού ενισχύει το σήμα στη συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα, βελτιώνοντας τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και διευκολύνοντας την ανίχνευση ασθενών ΑΕ σημάτων.

Πέραν όμως των χαρακτηριστικών που καθιστούν τους συντονισμένους αισθητήρες χρήσιμους κι αναγκαίους, η χρήση αυτών, ενέχει και κάποιους περιορισμούς. Ένας από αυτούς είναι το γεγονός ότι οι συντονισμένοι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο σήματα εντός ενός στενού εύρους συχνοτήτων, γεγονός που τους καθιστά λιγότερο ακατάλληλους για εφαρμογές όπου τα ΑΕ σήματα παρουσιάζουν ευρεία κατανομή συχνοτήτων. Φαινόμενα τα οποία προκύπτουν κατά την καύση δεν μπορούν να ανιχνευτούν από τους συντονισμένους αισθητήρες λόγω των υψηλών συχνοτήτων των κυμάτων ΑΕ που παράγονται. Επίσης οι συντονισμένοι αισθητήρες, δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου το συχνοτικό περιεχόμενο των ΑΕ σημάτων δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό²⁹. Οι συντονισμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου η συχνότητα των ΑΕ σημάτων είναι καλά καθορισμένη και σταθερή όπως ανίχνευση συγκεκριμένων τύπων φθοράς ή τριβής ή παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των υλικών.

Οι ευρυζωνικοί αισθητήρες είναι σχεδιασμένοι για να ανιχνεύουν σήματα ΑΕ σε ένα πιο ευρύ φάσμα συχνοτήτων 20kHz έως 1MHz ή και υψηλότερα. Οι ευρυζωνικοί αισθητήρες χαρακτηρίζονται από την ευελιξία τους και είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου το συχνοτικό

περιεχόμενο των ΑΕ σημάτων είτε δεν είναι γνωστό είτε παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις. Ο αισθητήρας δεν ενισχύει το σήμα σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα μπορώντας να ανιχνεύσει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται χάρις τον σχεδιασμό του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου αλλά και της δομής του ίδιου του αισθητήρα. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σχεδιάζεται με τρόπο τέτοιο, ώστε να ελαχιστοποιείται ο μηχανικός συντονισμός ο οποίος προκύπτει όταν η συχνότητα ταλάντωσης του αισθητήρα είναι ίση με την συχνότητα των κυμάτων ΑΕ που δέχεται. Το φαινόμενο συντονισμού μπορεί να αλλοιώσει την απόκριση του αισθητήρα σε ορισμένες συχνότητες. Γι' αυτό τον λόγο οι ευρυζωνικοί αισθητήρες μέσω της γεωμετρίας τους αλλά και μέσω μηχανισμών απόσβεσης στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση τέτοιων φαινομένων.

Τα κύματα ΑΕ που παράγονται από την καύση, είναι αυτά που μπορούν να μελετηθούν με χρήση ευρυζωνικών αισθητήρων. Φαινόμενα όπως ο «χτύπος» ή η άκαιρη ανάφλεξη που εντοπίζονται κατά την καύση, παράγουν σήματα ΑΕ υψηλών συχνοτήτων και συγκεκριμένα στο εύρος των 100kHz-1MHz.

Τα τριβολογικά φαινόμενα, όπως η τριβή και η φθορά, παράγουν σήματα ΑΕ, χαμηλότερης συχνότητας και συνήθως στην περιοχή 20kHz έως 100 kHz. Οι ευρυζωνικοί αισθητήρες, είναι ικανοί να ανιχνεύσουν αυτά τα χαμηλής συχνότητας σήματα, καθιστώντας τους κατάλληλους για την παρακολούθηση κατάστασης της τριβής διάφορων μηχανισμών.³²

Παρά την ικανότητα, των ευρυζωνικών αισθητήρων, να ανιχνεύουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, αυτοί, χαρακτηρίζονται και από κάποιους περιορισμούς. Ένας πολύ σημαντικός περιορισμός είναι το γεγονός ότι αδυνατούν να αποκριθούν σε σήματα ΑΕ χαμηλού πλάτους ή χαμηλής συχνότητας. Επίσης οι ευρυζωνικοί αισθητήρες, είναι πιο ευάλωτοι σε θόρυβο.

Οι αισθητήρες ΑΕ που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα όπου επικρατούν ακραίες συνθήκες ,πρέπει να έχουν και την αντοχή σε αυτές, για την ορθή λειτουργία τους. Ο αισθητήρας θα πρέπει να είναι ανθεκτικός ως προς τις υψηλές θερμοκρασίες, τα έντονα ταλαντωτικά φορτία αλλά και την έκθεση σε υγρά, όπως έλαια ή και ψυκτικά υγρά. Η υψηλή θερμοκρασία είναι ένας εξωτερικός παράγοντας ο οποίος μπορεί να υποβαθμίσει την ευαισθησία των αισθητήρων, γι' αυτό και αισθητήρες που προορίζονται για λειτουργία σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών, κατασκευάζονται από υλικά τα οποία διατηρούν σταθερές τις πιεζοηλεκτρικές τους ιδιότητες. Τέτοια υλικά συνηθίζεται να είναι ο τιτανικός του βισμούθιου (bismuth titanate) ή lithium niobate.³³

Η απόκριση συχνότητας και η ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την απόδοση των αισθητήρων ΑΕ, ειδικά σε απαιτητικές εφαρμογές όπως η παρακολούθηση της καύσης και των τριβολογικών φαινομένων. Με προσεκτική επιλογή και σχεδιασμό των αισθητήρων ΑΕ, οι μηχανικοί μπορούν να διασφαλίσουν αξιόπιστη και ακριβή ανίχνευση σημάτων ΑΕ, βελτιώνοντας την απόδοση και τη μακροχρόνια σταθερότητα των συστημάτων παρακολούθησης.

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ

Η σωστή επεξεργασία των σημάτων ΑΕ είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση και την απόδοση του κινητήρα. Το ποια μέθοδος επεξεργασίας σήματος θα ακολουθηθεί, επιλέγεται με βάση το σήμα ενδιαφέροντος αλλά και τα συμπεράσματα που θέλει η εκάστοτε μελέτη να αποκομίσει. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις μεθόδους επεξεργασίας σημάτων ΑΕ και η σημασία τους στη διάγνωση των ΜΕΚ.

3.3.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (Time-Domain Analysis)

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επεξεργασίας σήματος ΑΕ. Κατά αυτήν την μέθοδο, τα ληφθέντα σήματα ΑΕ μελετώνται ως συνάρτηση του χρόνου. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική για την παρακολούθηση μηχανισμών στις ΜΕΚ, σε πραγματικό χρόνο.

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου εξετάζει άμεσα το σήμα ΑΕ, το οποίο λαμβάνεται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, ως σήμα τάσης στο πεδίο του χρόνου. Η συσχέτιση της κυματομορφής στο πεδίο του χρόνου, μπορεί να αναδείξει τα κύματα τάσης, που προκύπτουν από μηχανολογικά συμβάντα όπως κτύπους, τριβή ή τη διάδοση ρωγμών. Αυτό κάνει την ανάλυση αυτή κατάλληλη για την παρακολούθηση της υγείας της μηχανής σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο για την αποτελεσματική εξαγωγή συμπερασμάτων θα πρέπει να γίνεται και η σωστή συσχέτιση των παραμέτρων του σήματος με τα φαινόμενα μελέτης.

Οι παράμετροι οι οποίοι εξάγονται από σήμα ΑΕ $x(t)$ στο πεδίο του χρόνου ώστε να συσχετισθούν με τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής, είναι οι εξής:

- Πλάτος (Amplitude) (A):

Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ είναι η μέγιστη τιμή του μέτρου του σήματος και εκφράζεται ως:

$$A = \max(|x(t)|) \quad (5)$$

Όπου:

- ♦ $x(t)$ είναι το ληφθέν σήμα στο πεδίο του χρόνου.

- Διάρκεια (Duration) (τ):

Η διάρκεια ενός σήματος ΑΕ είναι η το χρονικό διάστημα μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας φοράς που το σήμα υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι (threshold) V_{th} .

$$\tau = t_{end} - t_{start} \quad (6), \text{ με } x(t) > V_{th} \text{ για } t_{start} \leq t \leq t_{end}$$

Όπου:

- ♦ t_{start} είναι η στιγμή στην οποία το $x(t)$ υπερβαίνει την τιμή V_{th} για πρώτη φορά
- ♦ t_{end} είναι η τελευταία φορά κατά την οποία το $x(t)$ είναι πάνω από V_{th} .

- Χρόνος ανόδου (rise time) (t_r):

$$t_r = t_{max} - t_{start} \quad (7)$$

Όπου:

- ♦ t_{max} είναι η στιγμή στην οποία το σήμα φτάνει στο μέγιστο του πλάτος.

- Μετρήσεις (Hits) (N_c):

Οι μετρήσεις αναφέρονται στον αριθμό των φορών που το σήμα διασχίζει ένα προκαθορισμένο κατώφλι V_{th} , υποδεικνύοντας το επίπεδο δραστηριότητας:

$$N_c = \sum_{i=1}^n I(x(t_i) > V_{th}) \quad (8)$$

Όπου:

- ♦ $I()$ είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση που ισούται με 1 αν η συνθήκη $x(t_i) > V_{th}$ ικανοποιείται, αλλιώς ισούται με 0.
- ♦ n είναι ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται για το σήμα $x(t)$

- Μέση τετραγωνική ρίζα RMS τιμή:

Η τιμή RMS είναι ένα μέτρο της συνολικής ενέργειας του σήματος και ορίζεται ως:

$$RMS = \sqrt{1/T \int_0^T x^2(t) dt} \quad (9)$$

Όπου:

- ♦ T είναι η συνολική διάρκεια του σήματος.
- Ενέργεια (E):

Η ενέργεια του AE σήματος υπολογίζεται ως:

$$E = \sum_{i=1}^n x^2(t_i) \quad (10)$$

Όπου:

- ♦ $x(t_i)$ είναι το διακριτοποιημένο ως προς το χρόνο σήμα.
- Κύρτωση (K):

Η κύρτωση είναι ένα στατιστικό μέτρο που υποδεικνύει την παρουσία παλμικών συνιστωσών στο σήμα και εκφράζεται ως:

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2\right)^2} \quad (11)$$

Όπου:

- ◆ x_i είναι τα δείγματα του σήματος ΑΕ.
- ◆ μ είναι η μέση τιμή του σήματος
- ◆ n είναι ο αριθμός των δειγμάτων.
- Συντελεστής διαύγειας (*Clearance Factor – CF*):

Ο συντελεστής διαύγειας (Clearance Factor) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση υψηλών κορυφών στα σήματα ακουστικής εκπομπής (ΑΕ), οι οποίες συχνά υποδηλώνουν τοπικές φθορές και εκφράζεται ως:

$$CF = \frac{\max(|x(t)|)}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|\right)^2} \quad (12)$$

Ο συντελεστής διαύγειας είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στην παρακολούθηση της κατάστασης μηχανικών συστημάτων, καθώς βοηθά στον εντοπισμό αιχμηρών παλμών που μπορεί να σχετίζονται με τοπικές αστοχίες ή δομικές ανωμαλίες.

- Ασυμμετρία (Skewness)

Η ασυμμετρία είναι ένα μέτρο ποσοτικοποίησης της ασυμμετρίας της κατανομής του σήματος και εκφράζεται ως:

$$S_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2\right)^{3/2}} \quad (13)$$

Η ασυμμετρία βοηθά στην κατανόηση της μορφολογίας του σήματος ακουστικής εκπομπής (ΑΕ), αποκαλύπτοντας αν η κατανομή του είναι συμμετρική ή εάν παρουσιάζει

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

απόκλιση προς θετικές ή αρνητικές τιμές, κάτι που μπορεί να υποδηλώνει συγκεκριμένους μηχανισμούς φθοράς ή ανωμαλίες στο σύστημα.

- Τιμή κορυφής-προς-κορυφή (Peak-to-Peak Value-PPV)

Η τιμή κορυφής-προς-κορυφή (PPV) είναι το μέτρο της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του πλάτους του σήματος ακουστικής εκπομπής (AE) και εκφράζεται ως:

$$PPV = \max(x(t)) - \min(x(t)) \quad (14)$$

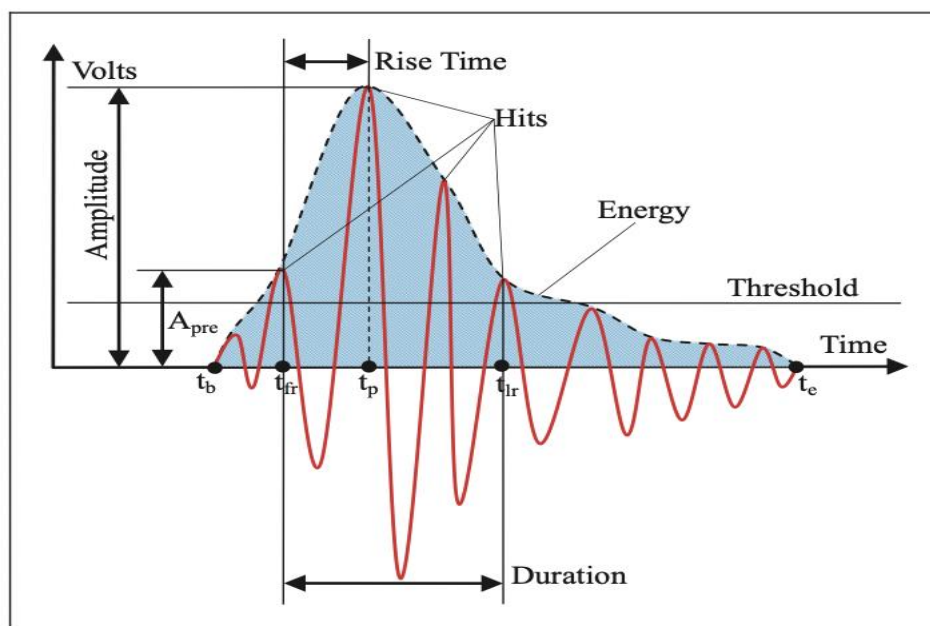
Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανίχνευση έντονων μεταβολών στο σήμα, καθώς παρέχει άμεση ένδειξη της έντασης παλμικών συμβάντων. Υψηλές τιμές PPV μπορεί να υποδηλώνουν την παρουσία έντονων κρουστικών γεγονότων, όπως τοπικές αστοχίες ή ρωγμές σε μηχανικά συστήματα.³⁴

Οι μαθηματικές αυτές εκφράσεις παρέχουν μια δομημένη μέθοδο ανάλυσης των σημάτων AE στο πεδίο του χρόνου. Οι τεχνικές επεξεργασίας σημάτων διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανάλυση των σημάτων ακουστικής εκπομπής (AE), με διάφορες στατιστικές και ενεργειακές παραμέτρους να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα μηχανικά φαινόμενα. Χαρακτηριστικά όπως το πλάτος, η τιμή κορυφής προς κορυφή (peak-to-peak) βοηθούν στην αναγνώριση παλμικών γεγονότων, ενώ η ενεργός τιμή (RMS), ο συντελεστής σχήματος (shape factor) και η ασυμμετρία (skewness) παρέχουν πληροφορίες για την κατανομή ενέργειας και τη συμμετρία του σήματος.

Οι παράμετροι που βασίζονται στο πλάτος, όπως το μέγιστο πλάτος, η τιμή κορυφής-προς-κορυφή (PPV) και η ενεργός τιμή (RMS), συμβάλλουν στην ποσοτικοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των σημάτων AE, καθιστώντας τες απαραίτητες για την αξιολόγηση των φθορών.

Στατιστικά χαρακτηριστικά όπως η κύρτωση (kurtosis), η ασυμμετρία (skewness) και ο συντελεστής κορυφής (crest factor) αναδεικνύουν παλμικά γεγονότα, διευκολύνοντας τη διάκριση των παροδικών εκρήξεων από τον περιβάλλοντα θορύβου.

Παράλληλα, οι μετρήσεις του αριθμού συμβάντων (counts) και της συνολικής ενέργειας παρακολουθούν δραστηριότητα των ΑΕ σημάτων με την πάροδο του χρόνου, προσφέροντας ένα μέτρο της εξέλιξης των ελαττωμάτων.



Εικόνα: 4 Διαγραμματική απεικόνιση διαφόρων παραμέτρων του σήματος στο πεδίο του χρόνου

Μέθοδοι ανάλυσης σήματος ηχητικών εκπομπών ,στο πεδίο του χρόνου

- **TSA (Time-Synchronous Analysis)**

Η TSA βασίζεται στην μέση τιμή πολλαπλών κύκλων ενός περιοδικού σήματος, συγχρονισμένη με ένα συγκεκριμένο γεγονός ή δείκτη, όπως η περιστροφή ενός άξονα. Με την ευθυγράμμιση των τμημάτων του σήματος που αντιστοιχούν σε κάθε κύκλο και τη μέση τιμή αυτών, η TSA ενισχύει τα περιοδικά συστατικά και μειώνει τον τυχαίο θόρυβο και τις μη

συγχρονισμένες διαταραχές. Κατά την μεθοδολογία της TSA , αρχικά γίνεται συλλογή σημάτων στην σταθερά του χρόνου, έπειτα επιλέγεται ένα σήμα αναφοράς που αντιστοιχεί στο περιοδικό γεγονός. Στη συνέχεια γίνεται η τμηματοποίηση του σήματος που μελετάται, αφού διαιρείται σε τμήματα που αντιστοιχούν σε κάθε περίοδο του σήματος αναφοράς. Κάθε σήμα αντιπροσωπεύει και έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας της μηχανής. Στη συνέχεια γίνεται ευθυγράμμιση των τμημάτων με βάση το σήμα αναφοράς. Τέλος υπολογίζονται οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων των ευθυγραμμισμένων τμημάτων, σημείο προς σημείο. Κατά αυτό το βήμα ενισχύονται τα συστατικά που είναι συγχρονισμένα με το σήμα αναφοράς, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η επίδραση του θορύβου, λόγω μη συγχρονισμού, στο σήμα.

Αν $x(t)$ είναι το σήμα σε αναφορά στον χρόνο, και N οι περίοδοι δειγματοληψίας του σήματος αναφοράς, τότε το σήμα ανασκευάζεται ως:

$$x_{TSA}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t - \tau_i) \quad (16)$$

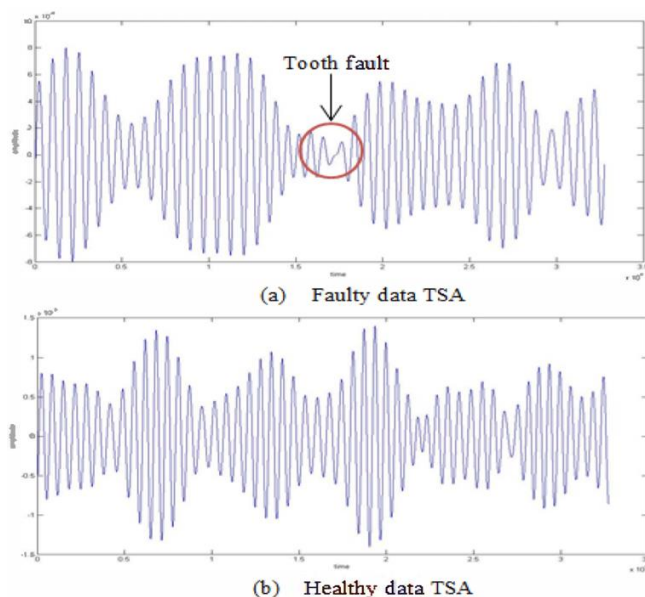
Όπου:

- $x_i(t)$ είναι το ληφθέν σήμα κατά τον i -οστό κύκλο,
- N είναι ο αριθμός των κύκλων
- τ_i είναι η χρονική μετατόπιση που απαιτείται για την ευθυγράμμιση των σημάτων με βάση έναν δείκτη αναφοράς.

Η TSA είναι ευρέως διαδεδομένη στον τομέα της μηχανικής αφού χρησιμοποιείται κυρίως για τη διάγνωση βλαβών σε περιστροφικούς και παλινδρομικούς μηχανισμούς, όπως ρουλεμάν και γρανάζια μιας και είναι εύκολος ο εντοπισμών των περιοδικών βλαβών. Η ευκρίνεια που παρέχει στα περιοδικά σήματα την κάνουν μια θελκτική μέθοδο ανάλυσης κυρίως σε εφαρμογές που εμπεριέχουν περιβάλλοντα θόρυβο.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών



Εικόνα: 5 Αναπαράσταση των δεδομένων που προκύπτουν από την TSA ανάλυση για υγιές γρανάξι εντός κιβωτίου ταχυτήτων ³⁶

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της TSA σε μηχανικά συστήματα εντοπίζεται στη μελέτη των γραναζιών λόγω της περιοδικότητας που χαρακτηρίζει την κίνησή τους.³⁶

Η TSA εκτός των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, όπως η μείωση του θορύβου και η ευκρίνεια του σήματος ενέχει και κάποιους περιορισμούς. Τέτοιοι είναι η εξάρτηση της ακρίβειας της από την ποιότητα και την σταθερότητα του σήματος αναφοράς μιας και οποιαδήποτε αλλοίωση σε αυτό μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά τα αποτελέσματα της TSA. Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι η εφαρμογή της είναι κατάλληλη μόνο για τη μελέτη στάσιμων κυμάτων και τέλος η υψηλή υπολογιστική ισχύς που απαιτεί.

▪ Correlation Function Analysis (CFA)

Η CFA είναι μια τεχνική επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της σχέσης μεταξύ δύο ή περισσότερων σημάτων. Μπορεί να συσχετίσει μεταξύ τους ταλαντωτικά σήματα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές εντοπίζοντας τυχόν συγχρονισμούς στα σήματα, ελέγχοντας έτσι καθολικά ένα σύστημα. Η βασική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στην CFA είναι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης για την ανάλυση ενός σήματος και η συνάρτηση διασυσχέτισης για την ανάλυση δύο σημάτων.

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $R_{xx}(\tau)$ ενός σήματος $x(t)$ περιγράφει την ομοιότητα του σήματος, με μια εκδοχή του ίδιου του σήματος με μία χρονική καθυστέρηση:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t+\tau)dt \quad (17)$$

Όπου:

- $R_{xx}(\tau)$ είναι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος $x(t)$
- τ είναι η χρονική καθυστέρηση

Αντίστοιχα η συνάρτηση διασυσχέτισης μεταξύ δύο σημάτων $x(t)$ και $y(t)$ περιγράφει τη σχέση ομοιότητας του ενός σήματος με μία εκδοχή του άλλου σήματος υπό χρονική καθυστέρηση και εκφράζεται :

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (18)$$

Η συνάρτηση διασυσχέτισης χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση σημάτων ΑΕ και σημάτων εκτόνωσης πίεσης, τα οποία μπορούν να αναδείξουν τυχόν «ανωμαλίες» στην καύση. Η συνάρτηση διασυσχέτισης μπορεί να είναι επιθυμητή, σε περίπτωση που επιχειρείται η σύγκριση και συσχέτιση σημάτων τα οποία λαμβάνονται από διαφορετικούς αισθητήρες.

Τέλος κατά την CFA ανάλυση μπορεί να επιστρατεύεται η κανονικοποιημένη σταθερά συσχέτισης.

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (19)$$

Όπου η $\rho_{xy}(\tau)$ είναι ένα μέτρο μέτρησης της ομοιότητας των σημάτων, και παίρνει τιμές στο διάστημα [-1,1].

Η μεθοδολογία της CFA βασίζεται αρχικά στην συλλογή δεδομένων από σήματα στη σταθερά του χρόνου. Συνήθως αυτά τα σήματα συλλέγονται από αισθητήρια στα σημεία ενδιαφέροντος. Έπειτα γίνεται ο υπολογισμός των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης ή διασυσχέτισης ,ανάλογα με τη μελέτη. Τα αποτελέσματα της συνάρτησης μπορούν να αναδείξουν περιοχές συσχέτισης, ή επαναλαμβανόμενων μοτίβων τα οποία έπειτα ερμηνεύονται με βάση τη φυσική σημασία των σημάτων και τη ή δομή του συστήματος.

Οι κύριες εφαρμογές που εφαρμόζεται η CFA είναι στη διάγνωση βλαβών σε παλινδρομικές μηχανές μέσω του εντοπισμού ασυνήθιστων συσχετίσεων που μπορεί να υποδεικνύουν μηχανικές φθορές ή βλάβες. Η CFA χρησιμοποιείται επίσης στην ανάλυση κραδασμών σε στατικές μελέτες που απαιτούν τον έλεγχο της δομικής υγείας του στοιχείου που μελετάται .

Η CFA μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική μέθοδος στην εύρεση συσχετίσεων μεταξύ σημάτων τα οποία δεν μπορούν να βρεθούν με άλλες μεθόδους, κάνοντας την κατάλληλη και ευέλικτη στην ανάλυση συστημάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από πολλαπλές εισόδους και εξόδους ,γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα συστημάτων από μηχανικές δομές μέχρι βιολογικά συστήματα που εκπέμπουν σήματα. Λόγω των δυνατοτήτων συσχέτισης της CFA όμως εμφανίζονται και οι περιορισμοί της, αφού η συσχέτιση μεταξύ σημάτων απαιτεί έναν πολύ

μεγάλο όγκο δεδομένων για την ακριβή ερμηνεία των αποτελεσμάτων ,και γι' αυτό τον λόγο η CFA απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.³⁷

Πίνακας 1. Σύγκριση Μεθόδων Ανάλυσης (TSA-CFA).

	TSA	CFA
Σκοπός	Εξαγωγή περιοδικών συνιστωσών από το σήμα	Ανάλυση στατιστικών συσχετισμών στο χρόνο για την ανίχνευση επαναλαμβανόμενων μοτίβων
Πεδίο ανάλυσης	Χρόνος	Χρόνος και συχνότητα
Βασική αρχή	Μέσος όρος πολλαπλών κύκλων σήματος συγχρονισμένων με ένα σήμα αναφοράς για ενίσχυση περιοδικών συνιστωσών	Χρησιμοποιεί αυτοσυσχέτιση ή διασυσχέτιση για τον προσδιορισμό ομοιοτήτων στα χαρακτηριστικά του σήματος στο χρόνο
Πλεονεκτήματα	Ενισχύει τις περιοδικές συνιστώσες, μειώνει τον τυχαίο θόρυβο, χρήσιμη για την ανίχνευση βλαβών σε περιστρεφόμενα μηχανήματα	Αποτελεσματική για την ανίχνευση περιοδικότητας, σχέσεων φάσης και επαναλαμβανόμενων συνιστωσών του σήματος
Περιορισμοί	Αναποτελεσματική για μη περιοδικά ή παροδικά σήματα, απαιτεί ακριβή συγχρονισμό αναφοράς	Λιγότερο αποτελεσματική για παροδικά γεγονότα, ευαίσθητη στις αποκλίσεις φάσης και στις παραμορφώσεις του σήματος
Εφαρμογή στις ΑΕ	Χρήσιμη για την ανίχνευση επαναλαμβανόμενων μηχανικών βλαβών σε γρανάζια, ρουλεμάν και περιστρεφόμενα μηχανήματα	Ανίχνευση βλαβών σε περιστρεφόμενα μηχανήματα και για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας μέσω Ακουστικών Εκπομπών
Ευαισθησία στο θόρυβο	Χαμηλή (αποτελεσματική στη μείωση του θορύβου)	Μέτρια (εξαρτάται από τις τεχνικές προεπεξεργασίας)
Υπολογιστική πολυπλοκότητα	Μέτρια. Εξαρτάται κατά πολύ από τον αριθμό των κύκλων υπολογίζονται	Υψηλή. Απαιτεί υπολογισμό συναρτήσεων συσχέτισης σε μεγάλα σύνολα δεδομένων
Συνήθεις χρήσεις	Ανίχνευση βλαβών σε γρανάζια και ρουλεμάν, παρακολούθηση κατάστασης περιστρεφόμενων μηχανημάτων	Διάγνωση βλαβών σε περιστρεφόμενα μηχανήματα, ανίχνευση δομικών βλαβών, ανίχνευση κυκλικών προτύπων στις Ακουστικές Εκπομπές

3.3.2 Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας (Frequency-Domain Analysis)

Η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας αποτελεί θεμελιώδη προσέγγιση στην επεξεργασία σημάτων, την ταυτοποίηση αυτών αλλά και διάφορες εφαρμογές της μηχανικής, όπου τα σήματα ή οι αποκρίσεις των συστημάτων, αναλύονται με βάση το συχνοτικό τους περιεχόμενο αντί για το πεδίο του χρόνου.

Σε αντίθεση με την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, η οποία περιγράφει την εξέλιξη των σημάτων ως συνάρτηση του χρόνου, οι μέθοδοι στο πεδίο της συχνότητας διασπούν τα σήματα σε ημιτονικά στοιχεία, παρέχοντας πληροφορίες για τα φασματικά τους χαρακτηριστικά.

Οι βασικές τεχνικές είναι οι εξής:

- Μετασχηματισμός Fourier (FT) και γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT).

Ο μετασχηματισμός Fourier (FT) είναι ένα θεμελιώδες εργαλείο που διασπά ένα σήμα στις συχνότητες που το απαρτίζουν. Ορίζεται για ένα συνεχές σήμα $x(t)$ ως:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2j\pi ft} dt \quad (20)$$

Όπου:

- $X(f)$ είναι η αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας είναι η αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας.
- f είναι η συχνότητα του σήματος σε Hz.
- j η φανταστική μιγαδική μονάδα.

Ο μετασχηματισμός Fourier χρησιμοποιείται για την ανάλυση περιοδικών και μη σημάτων στο πεδίο της συχνότητας

- Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) και γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT).

Για αριθμητική ανάλυση, χρησιμοποιείται ο Διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) όπου εφαρμόζεται σε διακριτοποιημένα σήματα και ορίζεται ως:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (21)$$

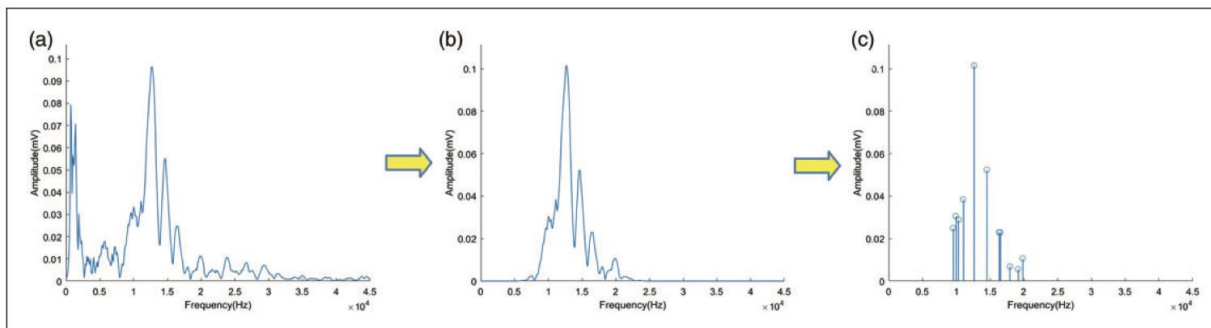
Όπου:

- N είναι το συνολικό πλήθος δειγμάτων.
- $x[n]$ είναι διακριτοποιημένο σήμα.
- k αντιπροσωπεύει τον δείκτη της συχνότητας.

Κάθε έξοδος $X[k]$ απαιτεί άθροιση πάνω από N όρους, και καθώς υπάρχουν N διαφορετικά k η υπολογιστική πολυπλοκότητα αυξάνεται τετραγωνικά με την αύξηση του N , γεγονός που καθιστά το DFT μετασχηματισμό, μη πρακτικό για μεγάλο πλήθος δειγμάτων. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο αντί του DFT χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές με μεγάλο ποσό δειγμάτων, ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) ο οποίος βελτιώνει σημαντικά την υπολογιστική απόδοση του Διακριτού μετασχηματισμού Fourier.

Ο FFT εκμεταλλεύεται τις συμμετρίες και τις περιοδικότητες του DFT για να διασπάσει το πρόβλημα σε μικρότερα, υποπροβλήματα. Ο πιο διαδεδομένος FFT αλγόριθμος είναι ο Radix-2 Decimation-in-Time (DIT) Algorithm του Cooley-Tukey³⁹.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{\text{even}}[n] e^{-j\frac{2\pi k(2n)}{N}} + e^{-j\frac{2\pi k}{N}} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{\text{odd}}[n] e^{-j\frac{2\pi k(2n+1)}{N}} \quad (22)$$



Εικόνα: 6 Αναπαράσταση διακριτοποιημένου σήματος με χρήση της FFT ⁴³

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να απλοποιηθεί η πράξη.

- Ο Short Time Fourier μετασχηματισμός (STFT):

Η STFT μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανάλυση της συχνότητας ενός σήματος σε σχέση με τον χρόνο. Η διαδικασία της STFT έγκειται στην διαίρεση του σήματος σε μικρότερα μέρη, τα οποία ονομάζονται «παράθυρα», στο πεδίο του χρόνου. Κάθε τμήμα πολλαπλασιάζεται με μία συνάρτηση «παραθύρου» όπου οι πιο συνήθεις απ' αυτές περιλαμβάνουν τα παράθυρα Hamming, Hanning και Gaussian.

- Παράθυρο Hamming: Οι συναρτήσεις παραθύρου είναι βοηθητικές στην εξομάλυνση του σήματος μέσω της μείωσης των απότομων ασυνεχειών στα άκρα του παραθύρου.

Ο τύπος του παραθύρου είναι:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (23)$$

Όπου:

- N είναι το συνολικό πλήθος δειγμάτων.
- n είναι ο δείκτης του δείγματος.
- Παράθυρο Hanning: είναι παρόμοιο με το παράθυρο Hamming αλλά χρησιμοποιεί άλλον τύπο.:

$$w(n) = 0.5(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)) \quad (24)$$

- Παράθυρο Gaussian: βασίζεται στη κανονική κατανομή Gauss και παρέχει μια εξομαλυμένη καμπύλη σε για την μείωση του σήματος, χαρακτηρίζεται από μια παράμετρο που ελέγχει το πλάτος του παραθύρου, επιτρέποντας ευελιξία στην ανάλυση του χρόνου και της συχνότητας και ο τύπος του είναι:

$$e^{-0.5\left(\frac{n-(N-1)/2}{\sigma(N-1)/2}\right)^2} \quad (25)$$

Όπου:

- σ είναι η παράμετρο που καθορίζει την καμπύλη Gauss.

Στην ουσία η διαδικασία του παραθύρου εφαρμόζεται για τη μείωση των διαρροών που προκύπτουν στο φάσμα, δηλαδή τις παρεμβολές στα άκρα του τμήματος στο φάσμα των συχνοτήτων. Οι παρεμβολές αυτές συνήθως οφείλονται στην απότομη μεταβολή των τιμών των συχνοτήτων του σήματος στα σημεία όπου τελειώνει το τμήμα που προκύπτει από τη διαίρεση. Το παράθυρο σαν στόχο έχει να κρατήσει το σήμα όσο πιο «καθαρό» γίνεται.

Έπειτα εκτελείται ο μετασχηματισμός Fourier για κάθε τμήμα ξεχωριστά όπου θεωρείται ως στάσιμο. Κάθε τμήμα μετατρέπεται από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Έτσι, διατίθεται μία σειρά φασμάτων όπου το καθένα αντιπροσωπεύει το συχνοτικό περιεχόμενο κάθε

τμήματος και κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται μια αναπαράσταση του αρχικού σήματος στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.³⁹

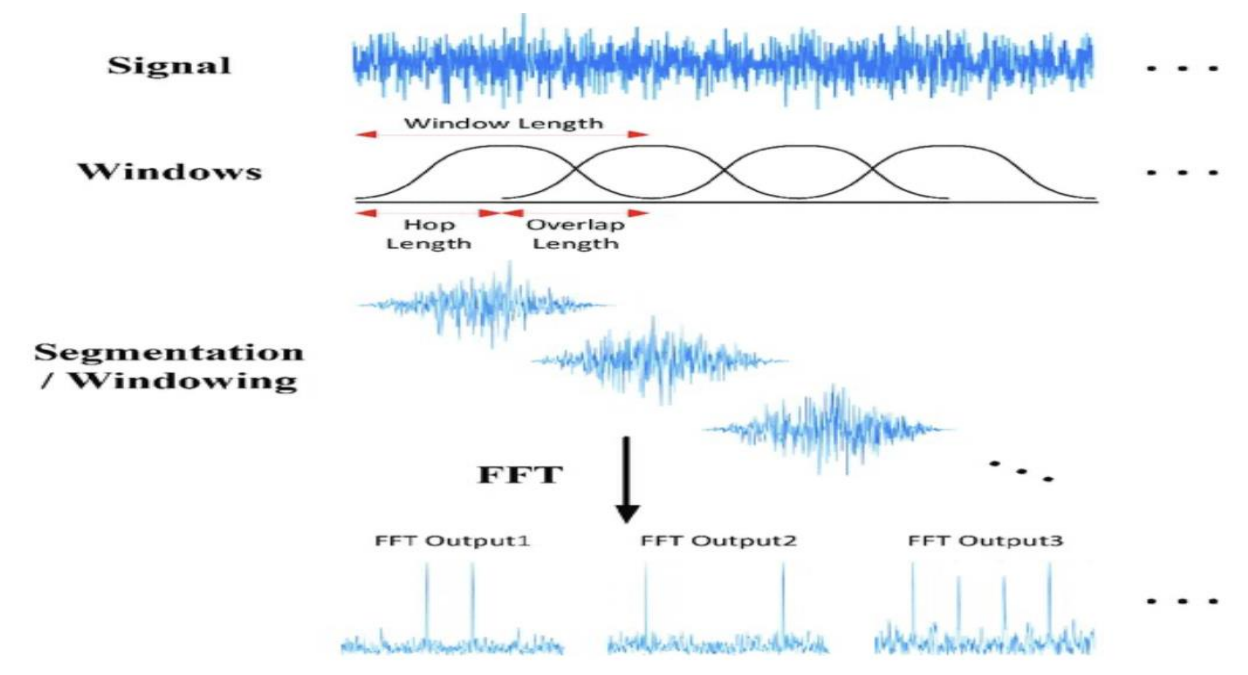


Figure 1 Διαδικασίες της STFT³⁹

Η μαθηματική έκφραση του STFT μετασχηματισμού είναι η εξής:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)g(\tau - t)]e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (26)$$

Όπου:

- $x(t)$ αποτελεί το αρχικό σήμα ως συνάρτηση του χρόνου τ .
- $g(t - \tau)$ αποτελεί τη συνάρτηση «παραθύρου» η οποία είναι κεντραρισμένη γύρω από τον χρόνο t . Η συνάρτηση «παραθύρου»

χρησιμοποιείται για να απομονώσει ένα μικρό τμήμα του σήματος γύρω από το t .

- $e^{-j\omega\tau}$ είναι ο μιγαδικός όρος ο οποίος αποτελεί τον «πυρήνα» του μετασχηματισμού αφού διασπά το σήμα στις συχνοτικές του συνιστώσες.
- $\int_{-\infty}^{\infty} d\tau$ το ολοκλήρωμα στο χρονικό διάστημα τ είναι το άθροισμα των συνεισφορών όλων των τμημάτων του διασπασμένου σήματος επιβαρυνόμενο από την συνάρτηση παραθύρου και τον μιγαδικό εκθετικό όρο, υπολογίζοντας έτσι το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα t .

Ο κύριος περιορισμός ωστόσο της STFT είναι ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων για διαφορετικές συχνότητες δεν μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη υπό την ίδια συνάρτηση παραθύρου, κάτι που κάνει αυτή τη μέθοδο να υστερεί σε προσαρμοστικότητα. Γι' αυτόν τον λόγο προέκυψε και η ανάγκη μιας άλλης μεθόδου, της Wavelet Transform, η οποία ξεπερνά το εμπόδιο της μη προσαρμοστικότητας της συνάρτησης παραθύρου σε σχέση με τη συχνότητα.

- Ο wavelet μετασχηματισμός (WT-Wavelet Transform):

Η wavelet Transform σε αντίθεση με τον μετασχηματισμό Fourier ,που αναπαριστά ένα σήμα με όρους συναρτήσεων ημιτόνου και συνημίτονου επεκτεινόμενα στον χρόνο, χρησιμοποιεί μικρές κυματοειδείς συναρτήσεις τοπικοποιημένες στον χρόνο και στην συχνότητα ,δηλαδή με πεπερασμένη διάρκεια και πεπερασμένες τιμές συχνότητας . Αυτές οι συναρτήσεις αποτελούν τα κυματίδια, όπου δημιουργούνται μέσω της μετάθεσης (μετατόπισης) και της κλιμάκωσης (επέκταση ή συμπίεση) του αρχικού κύματος . Η ανάλυση μπορεί να γίνει είτε με συνεχή τρόπο (CWT) είτε με διακριτό (DWT). Κατά τον συνεχή μετασχηματισμό το σήμα αναλύεται σε κάθε δυνατή κλίμακα και μετάθεση έτσι ώστε να παρέχεται μια συνεχής και λεπτομερής αναπαράσταση Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

της σχέσης συχνότητας- χρόνου, ενώ ο διακριτός μετασχηματισμός αναλύει το σήμα σε διακριτές κλίμακες και μεταθέσεις και είναι κατάλληλος κυρίως για πρακτικές εφαρμογές επεξεργασίας σήματος.

Ο συνεχής μετασχηματισμός ορίζεται ως η συνέλιξη του σήματος με μια κλιμακωτή και μετατοπισμένη έκδοση μιας κυματομορφικής συνάρτησης και δίνεται από τον τύπο:

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (27)$$

Όπου:

- $W_x(a, b)$ είναι ο κυματομορφικός συντελεστής.
- $x(t)$ είναι το αρχικό σήμα
- a είναι η παράμετρος κλίμακας (διαστολή ή συμπίεση της κυματομορφής)
Επηρεάζει το πλάτος της κυματομορφής αφού όταν $|a| > 1$ η κυματομορφή διαστέλλεται ,καλύπτοντας μεγαλύτερο χρονικό παράθυρο αλλά με χαμηλότερη ανάλυση συχνότητας, ενώ όταν $|a| < 1$ η κυματομορφή συμπιέζεται με υψηλότερη ανάλυση συχνότητας. Μεγάλες κλίμακες χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση χαμηλών συχνοτήτων ενώ μικρές κλίμακες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση υψηλών συχνοτήτων
- b είναι η παράμετρος μετατόπισης, δηλαδή η μετακίνηση της κυματομορφής στο χρόνο.
- $\psi(t)$ είναι η πρωταρχική συνάρτηση από την οποία προκύπτουν όλες οι κυματομορφές. Η συνάρτηση είναι μη μηδενική μόνο για μια σύντομη χρονική περίοδο. Συνήθως έχει ταλαντωτικό χαρακτήρα ,καταγράφοντας τη συχνοτική πληροφορία μέσα στο χρονικό της παράθυρο. Το

ολοκλήρωμα αυτής σε όλο το χρόνο είναι μηδέν, διασφαλίζοντας ότι καταγράφει τις αλλαγές και τις μεταβολές στο σήμα και όχι τις σταθερές του συνιστώσες.

- $\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$ είναι η μετατοπισμένη κυματομορφή ενώ το * δηλώνει το συζυγές της μητρικής κυματομορφής ψ .

Τα κυματίδια είναι συναρτήσεις περιορισμένου χρόνου και χώρου και μη περιοδικά και κινούνται σταθερά στον χώρο-χρόνο, το οποίο μας βοηθά στην ανάκτηση των χαρακτηριστικών της συνάρτησης στο χώρο-χρονικό πεδίο. Η διακριτή μορφή του μετασχηματισμού εκφράζεται έτσι :

$$DWT(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*(2^{-j}t - k) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (28)$$

Όπου η βασική κυματιδιακή συνάρτηση είναι η:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z. \quad (29)^{40}$$

- Μετασχηματισμός Hilbert-Huang (HHT)

Ο μετασχηματισμός Hilber-Huang είναι ειδικά σχεδιασμένος για την ανάλυση μη γραμμικών και μη στάσιμων σημάτων. Βασίζεται σε δύο βασικά βήματα : το Empirical Mode Decomposition(EMD) και την Hilbert Spectral Analysis (HSA) ή φαμαστική ανάλυση Hilbert.

Κατά την EMD το σήμα αποσυντίθεται σε ένα σύνολο συνιστάμενων συναρτήσεων που ονομάζονται Intrinsic Mode Functions (IMFs) και αναπαριστούν μία απλή ταλαντωτική μορφή που είναι ενσωματωμένη στο σήμα, το σύνολο αυτών ανασυνθέτουν το αρχικό σήμα. Στην EMD η αποσύνθεση βασίζεται στα εγγενή χαρακτηριστικά του ίδιου του σήματος, δίχως την χρήση βασικών ημιτονοειδών συναρτήσεων όπως συμβαίνει στον μετασχηματισμό Fourier. Τα βήματα που ακολουθεί η EMD είναι ο εντοπισμός όλων των τοπικών μεγίστων και ελαχίστων στο σήμα, η δημιουργία άνω περιγράμματος με παρεμβολή μεταξύ των μεγίστων, και κάτω περιγράμματος Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

με παρεμβολή, μεταξύ των ελαχίστων. Έπειτα γίνεται ο υπολογισμός του μέσου όρου αυτών. Στην συνέχεια γίνεται αφαίρεση του μέσου όρου από το αρχικό σήμα για την εξαγωγή μιας πιθανώς κατάλληλης IMF και επανάληψη αυτής της διαδικασίας μέχρι η IMF να πληροί τα συγκεκριμένα κριτήρια που έχουν τεθεί, κι έτσι να θεωρηθεί πραγματική. Τέλος γίνεται αφαίρεση της IMF από το αρχικό σήμα και γίνεται επανάληψη της διαδικασίας με το υπόλοιπο σήμα που θεωρείται το νέο σήμα για την εξαγωγή της επόμενης IMF.

Μαθηματική έκφραση της HHT :

Αν $x(t)$ είναι το αρχικό σήμα, τότε αυτό μπορεί να αποσυντεθεί ως:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (30)$$

Όπου:

➤ $c_i(t)$ είναι οι IMFs και $r_n(t)$ είναι το τελικό υπόλοιπο.

Τα IMF έπειτα χρησιμοποιούνται στην Φασματική Ανάλυση Hilbert (HSA), κατά την οποία κάθε IMF υποβάλλεται σε μετασχηματισμό Hilbert για την ανάκτηση της στιγμιαίας συχνότητας και του πλάτους της.

Ο μετασχηματισμός Hilbert

$$H(y(t)) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (31)$$

όπου $P.V.$ αποτελεί την κύρια τιμή Cauchy. Έτσι κάθε IMF $c_i(t) = a_i(t)\cos(\theta_i(t))$ όπου $a_i(t)$ είναι το στιγμιαίο πλάτος και $\theta_i(t)$ είναι η στιγμιαία φάση και η στιγμιαία συχνότητα:

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (32)$$

Έπειτα ο μετασχηματισμός Hilbert παρέχει μια μιγαδική συνάρτηση που ονομάζεται το αναλυτικό σήμα, όπου το πραγματικό μέρος είναι το αρχικό σήμα και το φανταστικό μέρος είναι το σήμα που έχει μετασχηματιστεί κατά Hilbert και εκφράζεται:

$$z(t) = x(t) + jH\{x(t)\} \quad (33)$$

Η στιγμιαία συχνότητα της κάθε IMF μπορεί να υπολογιστεί απ' τις πληροφορίες φάσης που λαμβάνονται από τον μετασχηματισμό αφού το πλάτος αποτελεί την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων του πραγματικού και φανταστικού μέρους του αναλυτικού σήματος, ενώ η φάση αποτελεί την αντίστροφη εφαπτομένη των στοιχείων του αναλυτικού σήματος.

Το φάσμα Hilbert προκύπτει με την απεικόνιση της στιγμιαίας συχνότητας και του πλάτους σε σχέση με τον χρόνο για κάθε IMF. Ωστόσο η EMD προσέγγιση παράγει μη έγκυρες IMFs στις χαμηλές συχνότητες και αν στο σήμα παρεμβάλλεται έντονος θόρυβος είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθεί κάποια κατάλληλη IMF.⁴⁵

- Πυκνότητα φασματικής ισχύος (Power Spectral Density-PSD)

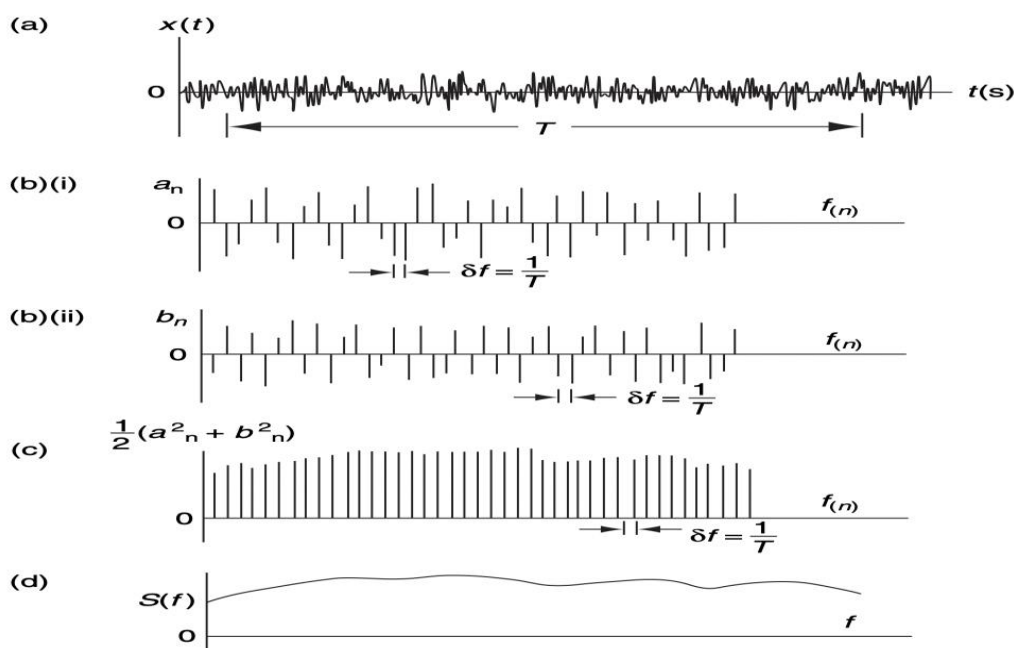
Η πυκνότητα φασματικής ισχύος (PSD) είναι μια θεμελιώδης έννοια στην επεξεργασία σήματος, που περιγράφει πως η ισχύς ενός σήματος κατανέμεται στις διάφορες συχνότητες. Αυτή η μέθοδος έχει ευρεία χρήση στην ανάλυση δονήσεων, τον χαρακτηρισμό θορύβου και τη μελέτη των ηχητικών εκπομπών της καύσης.

Η PSD στην ουσία, ποσοτικοποιεί την περιεχόμενη ισχύ ενός σήματος ανά μονάδα συχνότητας, παρέχοντας πληροφορίες για τα φασματικά του συστατικά και τη συνεισφορά ισχύος τους. Για ένα στάσιμο τυχαίο σήμα $x(t)$, η PSD ορίζεται ως ο Μετασχηματισμός Fourier της αυτοσυσχέτισης του σήματος:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (34)$$

Όπου:

- $S_x(f)$ είναι η πυκνότητα φασματικής ισχύος
- $R_x(\tau)$ είναι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος $x(t)$ που ορίζεται ως: $R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)]$
- f είναι η συχνότητα.



Εικόνα: 7 Διάγραμμα παραγωγίσης της PSD. a) Το σήμα στον χρόνο, b(i) & b(ii) σταθερές Fourier, διακριτοποιημένα συχνοτικά στοιχεία c) εκτίμηση της φασματικής ισχύος, d) σχηματική αναπαράσταση της Πυκνότητας Φασματικής Ισχύος $S(f)$ ⁴⁴

Η ανάλυση Πυκνότητας Φασματικής Ισχύος (PSD) μπορεί να αποτελέσει ένα εργαλείο στην παρακολούθηση των ΑΕ στις ΜΕΚ, καθώς επιτρέπει την ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών στο πεδίο της συχνότητας που σχετίζονται με τα φαινόμενα καύσης, τη μηχανική φθορά και την ανώμαλη λειτουργία.

Με την αποσύνθεση των ηχητικών σημάτων του κινητήρα στα φασματικά τους συστατικά, η PSD παρέχει πληροφορίες για το χτύπημα (knocking), την ανίχνευση λανθασμένης ανάφλεξης (misfire), τις ανωμαλίες χρονισμού των βαλβίδων και τις αστοχίες των ρουλεμάν. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα υψηλής συχνότητας συστατικά της PSD σχετίζονται με τριβολογικές αλληλεπιδράσεις, όπως το χτύπημα του εμβόλου (piston slap) και οι δονήσεις που προκαλούνται από την τριβή, ενώ τα χαμηλής συχνότητας συστατικά αντικατοπτρίζουν τη δυναμική της καύσης και τις δομικές συντονιστικές αποκρίσεις.⁴⁶

Οι μέθοδοι επεξεργασίας σήματος στο πεδίο της συχνότητας προσφέρουν διάφορες προσεγγίσεις για την ανάλυση πολύπλοκων σημάτων, καθεμία με διακριτά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Ο μετασχηματισμός Fourier παρέχει μία αναπαράσταση της συχνοτικής κατανομής του σήματος ωστόσο είναι αναποτελεσματικός για μη στάσιμα σήματα λόγω του ότι δεν λαμβάνει καθόλου την χρονική ανάλυση του σήματος. Από την άλλη ο STFT μετασχηματισμός, εισάγοντας το «παράθυρο» μετριάζει τον περιορισμό του FT βελτιώνοντας την χρονική ανάλυση με αποτέλεσμα όμως, την μείωση της ευκρίνειας στη συχνοτική ανάλυση. Ο μετασχηματισμός Wavelet, είναι η μέθοδος ανάλυσης κατά την οποία γίνεται πολλαπλή ανάλυση, κάνοντας τη μέθοδο αυτή ιδανική για την ανάλυση παροδικών σημάτων. Ο Μετασχηματισμός Hilbert-Huang (HHT) υιοθετεί μια διαφορετική προσέγγιση, χρησιμοποιώντας την Αποσύνθεση Εμπειρικών Τρόπων (EMD) για την προσαρμοστική διάσπαση σημάτων σε εγγενείς τρόπους πριν από την εφαρμογή του Μετασχηματισμού Hilbert, καθιστώντας τον ιδιαίτερα αποτελεσματικό για μη γραμμικά και μη στάσιμα σήματα. Η μέθοδος Πυκνότητας Φασματικής Ισχύος (PSD) εκτιμά την κατανομή ισχύος του σήματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα, παρέχοντας πολύτιμες

πληροφορίες για την ενεργειακή περιεκτικότητα του σήματος, ιδιαίτερα στις διαγνωστικές αναλύσεις δονήσεων και καύσης. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σήματος και τους στόχους της ανάλυσης, με τις εφαρμογές στην τριβολογία και στις μελέτες καύσης να απαιτούν έναν προσεκτικό συμβιβασμό μεταξύ ανάλυσης, προσαρμοστικότητας και ερμηνείας.

Πίνακας 2. Σύγκριση Μεθόδων Ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας και χρόνου

	FT	STFT	HHT	PSD
Σκοπός	Μετατροπή σημάτων από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων	Ανάλυση μεταβαλλόμενων συχνοτικών συνιστωσών ως προς το χρόνο, ενός σήματος	Ανάλυση μη γραμμικών και μη στατικών σημάτων με προσαρμοστικό τρόπο	Μέτρηση κατανομής ισχύος στο συχνοτικό πεδίο
Πεδίο ανάλυσης	Συχνότητας	Χρόνος και συχνότητα	Χρόνος και συχνότητα	Συχνότητας
Βασική αρχή	Αποσύνθεση ενός σήματος σε ημιτονοειδείς συνιστώσες	Εφαρμογή του Μετασχηματισμού Fourier σε μικρά επικαλυπτόμενα παράθυρα	Χρήση της EMD και του Μετασχηματισμού Hilbert για εξαγωγή εσωτερικών τρόπων ταλάντωσης	Εκτίμηση της ισχύος των συνιστωσών του σήματος
Πλεονεκτήματα	Αποτελεσματική για ανάλυση στατικών σημάτων	Παρέχει πληροφορίες του σήματος ως προς το χρόνο και συχνότητα.	Άριστη για μη γραμμικά, παροδικά σήματα, δεν απαιτεί προκαθορισμένες βάσεις	Παρέχει πληροφορίες για την κατανομή της ισχύος του σήματος, χρήσιμη για στατικά σήματα
Περιορισμοί	Δεν είναι κατάλληλος για μη στατικά σήματα	Περιορισμένη ανάλυση λόγω σταθερού παραθύρου	Υπολογιστικά απαιτητική	Δεν είναι κατάλληλη για παροδικά ή χρονομεταβαλλόμενα σήματα
Υπολογιστική πολυπλοκότητα	Χαμηλή	Μέτρια (εξαρτάται από το παράθυρο)	Υψηλή	Χαμηλή έως μέτρια.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

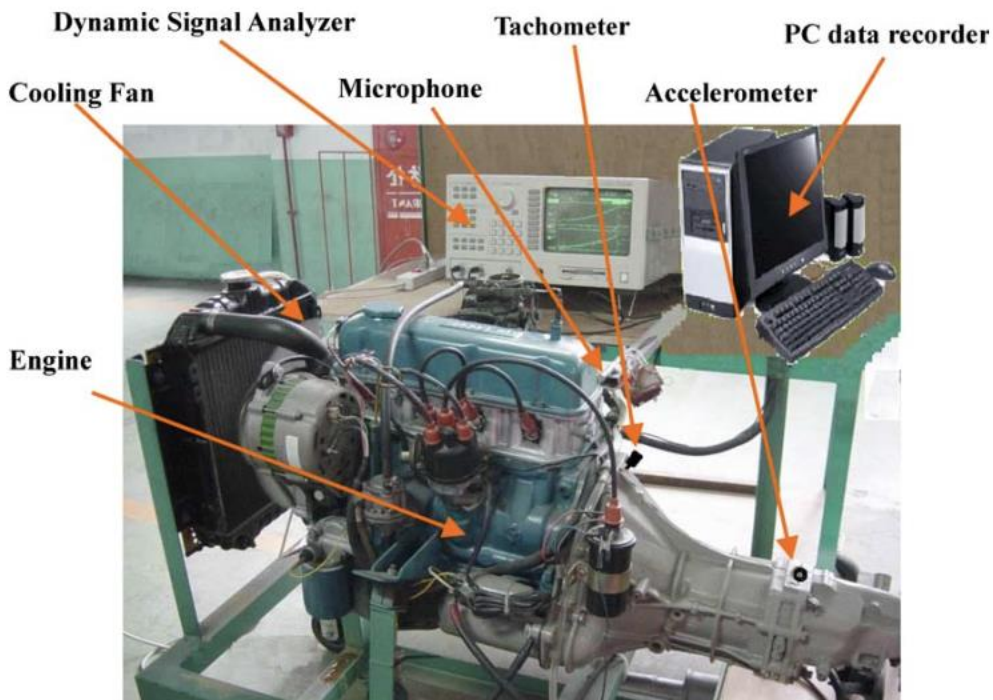
Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

4.0 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι αναλυτικές μέθοδοι επεξεργασίας σήματος διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διάγνωση βλαβών και την αξιολόγηση της κατάστασης μηχανικών συστημάτων. Εφαρμόζοντας αυτές τις προηγμένες τεχνικές σε πειραματικά δεδομένα, οι ερευνητές μπορούν να εξάγουν κρίσιμα χαρακτηριστικά από δονήσεις και ακουστικές εκπομπές, βελτιώνοντας την ακρίβεια της διάγνωσης βλαβών σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ⁴¹ στην οποία μέσω συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης αναλύονται ακουστικά σήματα για την διάγνωση τυχόν αστοχιών σε μια ΜΕΚ και στους ανεμιστήρες του συστήματος ψύξης. Η ανάλυση επιχειρείται μέσω της ανάπτυξης της αναλυτικής μεθόδου Continuous Wavelet Transform.

Η πειραματική διάταξη, για την διάγνωση τυχόν αστοχιών με χρήση ΑΕ, αποτελείται από μία τετρακύλινδρη, τετράχρονη ΜΕΚ, όγκου 1.2 lt στην οποία είναι εγκατεστημένο σύστημα ψύξης. Η διάταξη του συστήματος περιλαμβάνει ένα πυκνωτικό μικρόφωνο (ACO P4012) τοποθετημένο κοντά στις λεπίδες του ανεμιστήρα ψύξης. Το σύστημα λήψης των σημάτων ΑΕ , αποτελείται από έναν επεξεργαστή ψηφιακών σημάτων Texas Instruments TMS320C32 ο οποίος λειτουργεί στα 60 MHz και επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνονται από το μικρόφωνο σε πραγματικό χρόνο. Η πειραματική διάταξη φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα: 8 Πειραματική διάταξη. Αποτελείται από τη μηχανή, το σύστημα ψύξης, τον δυναμικό επεξεργαστή σήματος, το μικρόφωνο και τον υπολογιστή .⁴¹

Το μικρόφωνο τοποθετείται σε σημείο τέτοιο ώστε να ληφθούν τα σήματα ΑΕ ανάλογα την πηγή ενδιαφέροντος, κοντά στη μηχανή ή στον ανεμιστήρα. Ο επεξεργαστής διαθέτει έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Ο επεξεργαστής λειτουργεί με υψηλή συχνότητας δειγματοληψίας, ώστε να μπορέσει να διακρίνει τα ακουστικά γεγονότα υψηλών συχνοτήτων σε πραγματικό χρόνο. Η ανάλυση του σήματος διεκπεραιώνεται με την Continuous Wavelet Transform, χρησιμοποιώντας ως εξίσωση κυματιδίου το κυματίδιο Morlet. Μέσω αυτού του κυματιδίου, μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για το πλάτος αλλά και τη φάση του ληφθέντος σήματος. Το κυματίδιο αυτό, χρησιμοποιείται επειδή σε πολλά μηχανικά δυναμικά σήματα, οι

παροδικές διαταραχές είναι πάντα σύμπτωμα βλαβών και το κυματίδιο Morlet είναι πολύ παρόμοιο με ένα παροδικό στοιχείο και εκφράζεται ως :

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_1 t} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

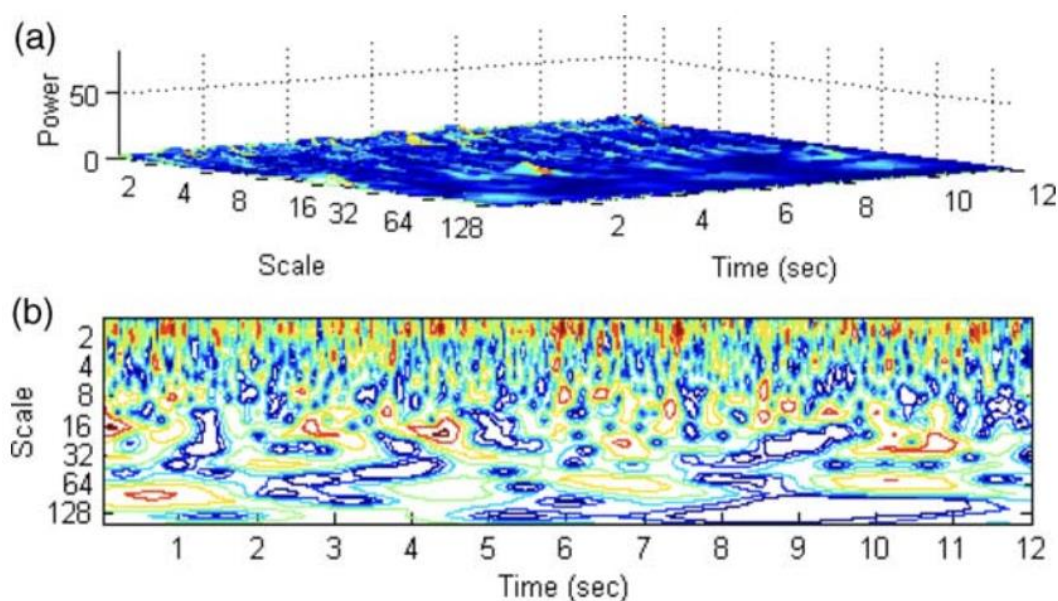
όπου το ω_1 εκφράζει την αδιαστατοποιημένη συχνότητα.

Η συνάρτηση κυματιδίου Morlet είναι ένα εκθετικά ημιτονοειδές σήμα, επομένως το σχήμα του μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ταιριάζει με τις διάφορες ημιτονοειδείς κυματομορφές που συναντώνται συνήθως σε δυναμικά συστήματα.

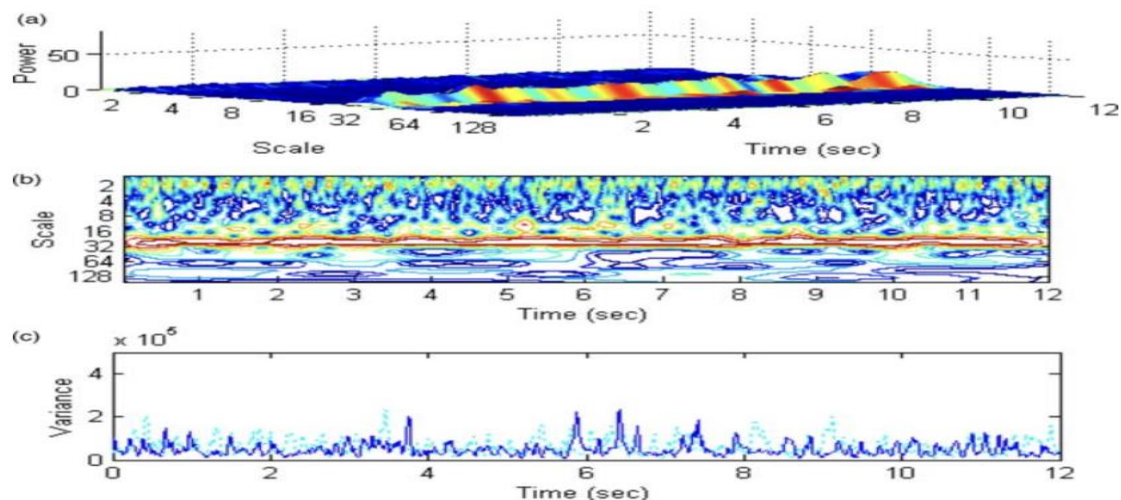
Το πείραμα εκτελείται και η λήψη ΑΕ γίνεται από τον ανεμιστήρα ψύξης , ο οποίος είναι ελαττωματικός κατά δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ο ανεμιστήρας διακρίνεται από σημειακή φθορά ενώ στη δεύτερη διακρίνεται από γενικευμένη φθορά, λόγω τριβής. Μέσω του επεξεργαστή γίνεται η ανάλυση του σήματος και παράγονται τα διαγράμματα ανάλυσης της κύρτωσης, χρόνου-κλίμακας και το διάγραμμα μετασχηματισμού του κυματιδίου σε κλίμακα και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα διαγράμματα που έχουν παραχθεί από τη λειτουργία του ανεμιστήρα δίχως βλάβες.

Το διάγραμμα κύρτωσης μπορεί να αναδείξει αν στο σήμα υπάρχουν παλμικές διακυμάνσεις ενέργειας. Χαμηλή κύρτωση σημαίνει ότι το σήμα ΑΕ έχει μικρές και σταθερές διακυμάνσεις, ενώ υψηλή κύρτωση σημαίνει ότι στο σήμα υπάρχουν αιχμές οι οποίες αναδεικνύουν στιγμές κατά τις οποίες απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Το διάγραμμα χρόνου-κλίμακας, αναδεικνύει. Το διάγραμμα χρόνου-κλίμακας, δείχνει πως εξελίσσονται οι διαφορετικές συχνότητες του σήματος με την πάροδο του χρόνου. Όπως έχει προαναφερθεί η ανάλυση κυματιδίων επιτρέπει την συχνотική ανάλυση μη στάσιμων κυμάτων επιτρέποντας την ανίχνευση παροδικών συμβάντων τα οποία μεταβάλλονται κατά την πάροδο του

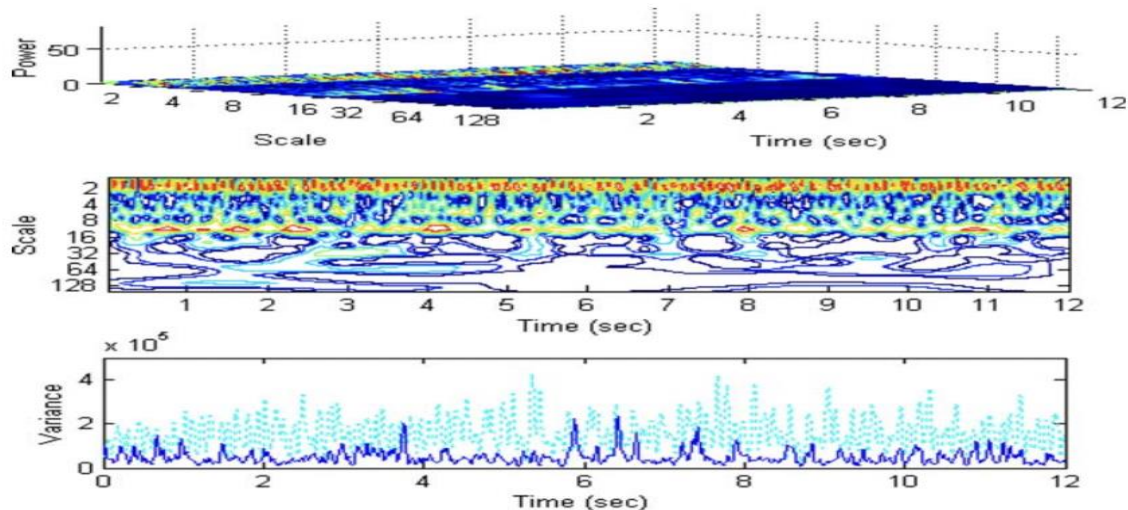
χρόνου. Μικρή κλίμακα ισοδυναμεί με απότομες και σύντομες ηχητικές εκρήξεις σε υψηλές συχνότητες, ενώ μεγάλη κλίμακα ισοδυναμεί σε σταδιακή διακύμανση χαμηλών συχνοτήτων. Το διάγραμμα του μέσου μετασχηματισμού κυματιδίων παρέχει μια συνοπτική εικόνα των πιο σημαντικών συχνοτικών συνιστωσών του σήματος στον χρόνο. Το διάγραμμα αυτό αναπαριστά την ισχύ των μέσων συντελεστών κυματιδίων στις επιλεγμένες κλίμακες. Υψηλή τιμή διακύμανσης, σημαίνει ότι ορισμένες συχνοτικές συνιστώσες είναι ισχυρότερες από άλλες, ενώ η κορυφή σε αυτό το διάγραμμα αντιστοιχεί σε μία κυρίαρχη συχνότητα ή κλίμακα στο σήμα. Στην ουσία το διάγραμμα αυτό παρέχεται ώστε να μπορεί να γίνει ένα «φιλτράρισμα» αφού εστιάζει στις συχνότητες-κλίμακες που μπορεί να σχετίζονται με βλάβη.



Εικόνα: 9 Πειραματικά αποτελέσματα της ανάλυσης των ΑΕ σημάτων από τον ανεμιστήρα ψύξης, για μηχανή που λειτουργεί στις 3300 rpm χωρίς κάποια ελλάττωμα. α) Διάγραμμα κλίμακας-χρόνου κατανομής της κύρτωσης β) διάγραμμα κλίμακας-χρονος. ⁴¹



Εικόνα: 10 Πειραματικά αποτελέσματα των ΑΕ από τον ανεμιστήρα ψύξης για λειτουργία της μηχανής στις 3300 rpm ,με σημειακή φθορά. α) Διάγραμμα κλίμακας-χρόνου της κατανομής της κύρτωσης, β) διάγραμμα κλίμακας-χρόνου γ) διάγραμμα μέσου-κλίμακας (η συνεχής γραμμή για μηχανή χωρίς βλάβη ενώ η διακεκομμένη για μηχανή με βλάβη)

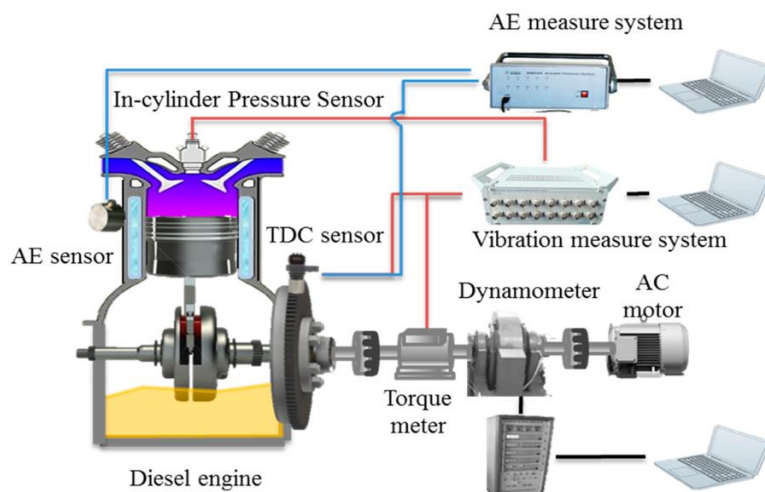


Εικόνα: 11 Πειραματικά αποτελέσματα των ΑΕ από τον ανεμιστήρα ψύξης για λειτουργία της μηχανής στις 3300 rpm ,με σημαντική φθορά από τριβή . α) Διάγραμμα κλίμακας-χρόνου της κατανομής της κύρτωσης, β) διάγραμμα κλίμακας-χρόνου γ) διάγραμμα μέσου-κλίμακας (η συνεχής γραμμή για μηχανή χωρίς βλάβη ενώ η διακεκομμένη για μηχανή με βλάβη)

Όπως γίνεται διακριτό η κατάσταση χωρίς βλάβες εμφανίζει σχετικά ομοιόμορφα χαρακτηριστικά σημάτων ΑΕ με χαμηλές τιμές κύρτωσης. Οι ελαφριές τριβές προκαλούν μικρές αποκλίσεις στο φάσμα σημάτων ΑΕ, με μέτριες αυξήσεις στην κύρτωση. Οι σοβαρές τριβές Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού & Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

οδηγούν σε σημαντικές εντάσεις σημάτων ΑΕ, με έντονες κορυφές κύρτωσης, υποδεικνύοντας εκτεταμένη μηχανική υποβάθμιση. Σύμφωνα με την μελέτη, ο μετασχηματισμός κυματιδίων (CWT) αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη διάγνωση βλαβών σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και συστήματα ψύξης μέσω εκπομπών ήχου. Τα πειραματικά αποτελέσματα επικυρώνουν τη δυνατότητα των διαγνωστικών μεθόδων με βάση την ακουστική εκπομπή, αποδεικνύοντας την ικανότητά τους να ανιχνεύουν λεπτές μεταβολές στη λειτουργία του κινητήρα και στη μηχανική ακεραιότητα.

Πέραν όμως της μελέτης της μηχανικής φθοράς, τα σήματα ΑΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παρακολούθηση και ανάλυση των συνθηκών λίπανσης που επικρατούν εντός ενός μηχανισμού. Στην ²⁵ εισάγεται ένα μοντέλο ανάλυσης ΑΕ, το οποίο θα μπορεί να αναλύει τα σήματα που παράγονται από τριβές, υπό διαφορετικές συνθήκες λίπανσης, επιτρέποντας τη διαφοροποίηση λιπαντικών διαφορετικού ιξώδους και την ταυτοποίηση της υποβάθμισης χρησιμοποιημένων ελαίων. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο που επιχειρείται να αναπτυχθεί στην συγκεκριμένη έρευνα, αναλύει σήματα ΑΕ τα οποία παράγονται από ελαστική παραμόρφωση αλλά και την θραύση των μικροεσοχών που υπάρχουν στις επιφάνειες επαφής του δακτυλίου του πιστονιού και του κυλίνδρου κατά τη συνθήκη οριακής λίπανσης (Asperity-Asperity Collision-AAC). Το μοντέλο επιχειρεί την και ανάλυση των σημάτων που παράγονται κατά τη συνθήκη της υδροδυναμικής λίπανσης στην οποία η επαφή μεταξύ δακτυλίου και κυλίνδρου δεν είναι άμεση (Fluid-Asperity Shearing-FAS). Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων γίνεται με χρήση συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης, η οποία αναπαρίσταται σχηματικά παρακάτω.



Εικόνα: 12 Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης.²⁵

Πιο συγκεκριμένα η πειραματική διάταξη αποτελείται από έναν μονοκύλινδρο ντιζελοκινητήρα, απευθείας ψεκασμού (Anhui Quanchai Engine) , 1.4 lt με ονομαστική ισχύ 20.6 kW 2200 rpm. Ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος με ένα δυναμόμετρο ρεύματος και ένα χειριστήριο (Chengbang, China, Model: DW160). Η ταχύτητα και το φορτίο του κινητήρα ελέγχονται μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης προς το δυναμόμετρο ρεύματος. Ένας ευρυζωνικός AE αισθητήρας SR800 (Soundewel Technology Co, Ltd) είναι τοποθετημένος στην εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου για την μέτρηση των AE. Ο αισθητήρας έχει μέγιστη ευαισθησία >70 dB, συχνότητα λειτουργίας τα 50-800 kHz, συχνότητα συντονισμού τα 600 kHz, και θερμοκρασία λειτουργίας από -20 έως 80 °C. Το πείραμα έγινε με 3 είδη λιπαντικών και υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

Πίνακας 3. Συνθήκες λειτουργίας της μηχανής και τα λιπαντικά που έγινε το πείραμα ²⁵.

Λιπαντικό	Φορτίο (Nm)	Φορτίο (Nm)	Ιξώδες (Pa s) στους 40 °C.	Ιξώδες (Pa s) στους 100 °C.
CD-10W30	1000,1200,1400, 1600	10,40	0.0765	0.0099
CD-15W40	1800,1200		0.1128	0.0147
CH4- χρησιμοποι ημένο			0.2354	0.0339

Η καταγραφή των σημάτων διήρκεσε 11s, και η δειγματοληψία έγινε στα 800 kHz, το οποίο καλύπτει 100 κύκλους της μηχανής. Ένα σήμα αναφοράς στο ΑΝΣ καταγράφηκε ,ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η ανάλυση και να συσχετιστούν τα σήματα ΑΕ , με συμβάντα του κινητήρα.

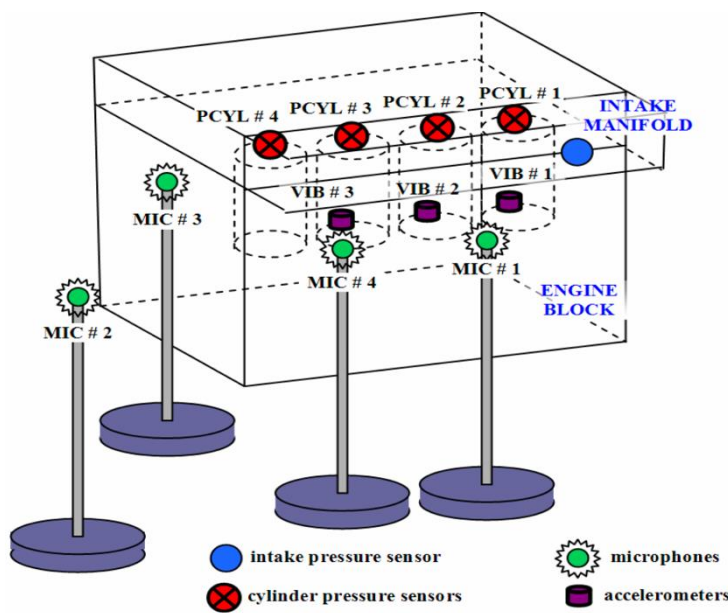
Για την ανάλυση και απομόνωση των σημάτων ΑΕ, από άλλες πηγές θορύβου της μηχανής, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός κυματιδίων WPT ο οποίος βασίζεται στον DWT και χρησιμοποιείται ευρέως για την παρακολούθηση κατάστασης και διάγνωση σε περιστροφικούς μηχανισμούς. Το κυματίδιο Daubechies (db35) επιλέγεται για την WPT ανάλυση. Τα σήματα αφού αναλύθηκαν ,διασπάστηκαν στα συχνοτικά υπο-φάσματα των 30-50kHz, 70-90kHz, 140-160kHz, 174-186kHz αφού σε αυτά τα φάσματα σχετίζονται ΑΕ που ανταποκρίνονται στα φαινόμενα της λίπανσης.

Σύμφωνα με τον ερευνητή ,οι αποκρίσεις των ΑΕ, στη φάση της καύσης, παρουσιάζουν γραμμική συσχέτιση με την ταχύτητα του κινητήρα. Κατά τη χρήση του λιπαντικού με το υψηλότερο ιξώδες (CD-15W40) παρήχθησαν, ΑΕ με τα υψηλότερο πλάτος. Αυτό συνέβη στις ζώνες 70-90kHz και 140-160kHz. Αντίθετα στις ζώνες 30-50kHz και 174-186kHz παρουσίασαν η διακριτοποίηση των ΑΕ, από την λίπανση δεν ήταν εφικτή. Από την άλλη τα σήματα ΑΕ για το

επαναχρησιμοποιημένο λιπαντικό εμφάνισαν μη γραμμική και ασταθή συμπεριφορά με την αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα, διαφοροποιώντας το από τα νέα λιπαντικά.

Με βάση αυτό το μοντέλο, αποδεικνύεται ότι η χρήση ακουστικών εκπομπών μπορεί να επεκταθεί και στην παρακολούθηση της κατάστασης του λιπαντικού της μηχανής σε πραγματικό χρόνο αφού με βάση αυτές μπορεί να διακριθεί το ιξώδες του και να αξιολογηθεί η κατάσταση του. Προσφέροντας έτσι μια βιώσιμη εναλλακτική αλλά και μη παρεμβατική μέθοδο ανάλυσης λιπαντικών.

Εκτός της φθοράς αλλά και των συνθηκών λίπανσης, οι μέθοδοι ανάλυσης των σημάτων ΑΕ ,μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την μελέτη της καύσης . Στην ⁴² για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται πολλαπλές μέθοδοι ανάλυσης σήματος θορύβου για την εξαγωγή συμπερασμάτων που σχετίζονται με την καύση. Σε αυτήν την μελέτη χρησιμοποιείται μία πειραματική διάταξη η οποία αποτελείται από έναν τετρακύλινδρο βενζινοκινητήρα, όγκου 1.4 lt, και από 4 αισθητήρες κυλινδρικής πίεσης, 3 μικρόφωνα αλλά και 3 επιταχυνσιόμετρα. Η χρήση των διαφορετικών τύπου αισθητηρίων έχει σαν στόχο την σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των ΑΕ σε σχέση με τις πιο καθιερωμένες μεθόδους ανάλυσης των φαινομένων της καύσης. Η σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης διαφαίνεται παρακάτω:



Εικόνα: 13 Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης ⁴²

Τα μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τα εξής χαρακτηριστικά :

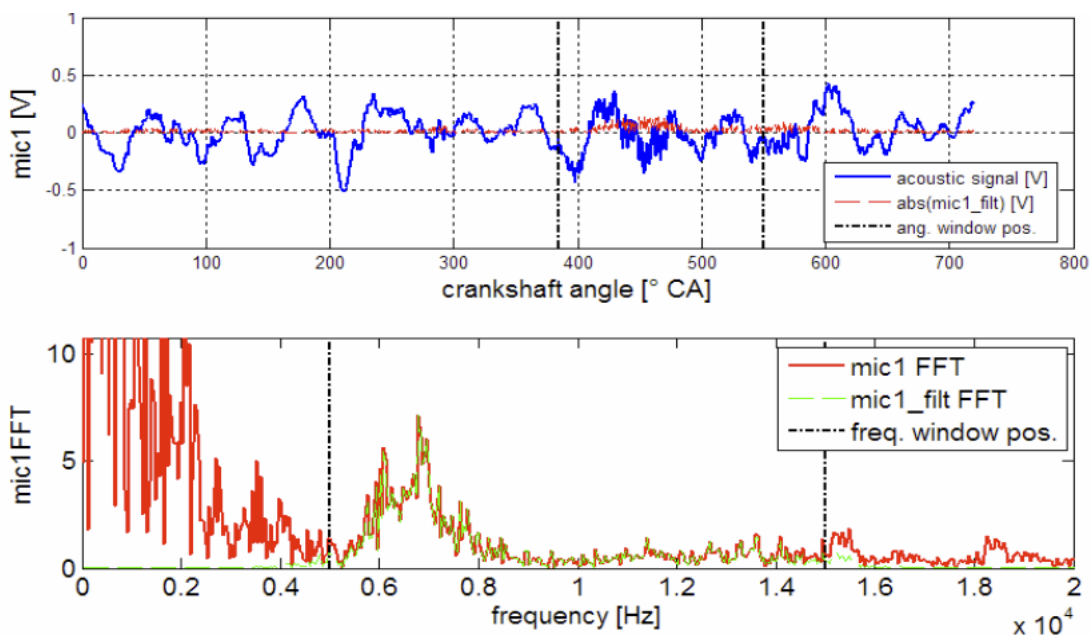
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη ⁴².

Μικρόφωνα	#1 και #2	3# και 4#
Τύπος	Πανκατευθυντικό	Κατευθυντικό
Ευαισθησία	1V/Pa @ 1kHz	1V/Pa @ 1kHz
Αντίσταση	680 Ω	2200 Ω
Συχνότητα	100-16000 Hz	20-20000Hz

Η τοποθέτηση των αισθητηρίων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να να συγκριθούν οι πληροφορίες που σχετίζονται με τον ήχο και τη δόνηση υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Η μελέτη επικεντρώθηκε ειδικά σε φαινόμενα κτύπων και κακής ανάφλεξης, χρησιμοποιώντας εξωτερικά προκληθείσες ανωμαλίες για την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου. Κατά αυτήν την μελέτη χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση της τιμής RMS για την ανάλυση του πλάτους και της ενέργειας των σημάτων, ο μετασχηματισμός Fourier, ο STFT μετασχηματισμός και ο CWT μετασχηματισμός για την συσχέτιση των ακουστικών εκπομπών με

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού & Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

τα χαρακτηριστικά της καύσης αλλά και μέθοδος μεσοπερατού φιλτραρίσματος (5-15kHz) για την εξαγωγή των γεγονότων που σχετίζονται με τους κτύπου κατά την καύση.



Εικόνα: 14 Σχηματική αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας με χρήση του FFT μετ/σμου για σήμα που λήφθηκε από το μικρόφωνο 1 για έναν κύκλο λειτουργίας της μηχανής.⁴²

Για την ανίχνευση των κτύπων η ανάλυση επιτυγχάνεται τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και στο πεδίο του χρόνου. Συγκεκριμένα για την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, το σήμα από τον αισθητήρα πίεσης είναι το σήμα αναφοράς. Ο κτύπος του πιστονιού προκάλεσε διακριτές ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας σε όλα τα σήματα. Το ακουστικό σήμα παρουσίασε χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τα σήματα πίεσης λόγω των φαινομένων διάδοσης του ήχου. Το σήμα του μικροφώνου ήταν καθαρότερο σε σύγκριση με το σήμα του επιταχυνσιόμετρου, το οποίο επηρεαζόταν από μηχανικό θόρυβο. Στο πεδίο της συχνότητας ωστόσο τα συμβάντα κτύπου παρήγαγαν κορυφές στην περιοχή 5-15 kHz στα σήματα πίεσης, κραδασμών και ήχου. Η ενέργεια των κτύπων από την άλλη ήταν εντονότερη στα σήματα πίεσης και ήχου ενώ τα σήματα δόνησης ήταν επηρεασμένα από τον υπόβαθρο θόρυβο. Με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν η έρευνα

συμπεραίνει ότι τα πανκατευθυντικά μικρόφωνα υπερείχαν σε σχέση με τα μονοκατευθυντικά στην ακριβή ανίχνευση των φαινομένων προανάφλεξης.

Εκτός όμως του φαινομένου των κτύπων κατά τη διαδικασία της καύσης, η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει την προσοχή της και στην ανίχνευση τυχόν αστοχιών της διαδικασίας της ανάφλεξης. Το πείραμα εκτελέστηκε αφού τα συμβάντα αστοχίας ανάφλεξης προκλήθηκαν με απενεργοποίηση του ψεκασμού σε μεμονωμένους κυλίνδρους, και οι επιπτώσεις τους αναλύθηκαν. Ως προς την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου η έρευνα συμπεραίνει ότι Οι κύλινδροι με αστοχία ανάφλεξης εμφάνισαν απότομη μείωση της RMS τιμής του ηχητικού σήματος. Από την άλλη η συχνοτική ανάλυση των σημάτων ανέδειξε Οι κύκλοι με αστοχία ανάφλεξης μετατόπιζαν την ενέργεια σε χαμηλότερες συχνότητες. Αναλύοντας τη φάση και το πλάτος αυτών των συχνοτήτων, ήταν δυνατός ο εντοπισμός του ελαττωματικού κυλίνδρου.

Η μελέτη απέδειξε ότι η ανάλυση ηχητικών εκπομπών μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη εναλλακτική μέθοδο για την παρακολούθηση της καύσης. Το φαινόμενο της προανάφλεξης αποδεικνύεται ότι μπορεί να ανιχνευτεί από τις ΑΕ, με ακρίβεια ισοδύναμη με μεθόδους που βασίζονται στην πίεση. Η αστοχία ανάφλεξης επίσης είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται στη διαδικασία της καύσης, και η συγκεκριμένη έρευνα αναδεικνύει, ότι οι κύλινδροι με αστοχία ανάφλεξης μπορούν να ανιχνευθούν είτε μέσω ανάλυσης RMS είτε μέσω μετατόπισης του φάσματος συχνοτήτων δίχως την ανάγκη πρόσθετων αισθητηρίων.

5.0 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη των τριβολογικών και των φαινομένων της καύσης στις μηχανές εσωτερικής καύσης μέσω μεθόδων ανάλυσης των ακουστικών εκπομπών. Με χρήση της ηχητικής ανάλυσης μπορούν να παραχθούν κρίσιμες πληροφορίες για τη διάγνωση της φθοράς αλλά και τη λειτουργική κατάσταση των κινητήρων. Τα χαρακτηριστικά μοτίβα που προκύπτουν από τις ταλαντώσεις και τις ηχητικές εκπομπές των μηχανικών εξαρτημάτων, όπως τα έμβολα και τα έδρανα, μπορούν να αποβούν χρήσιμα εργαλεία για την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων όπως η αυξημένη τριβή και η μηχανική κόπωση. Συνεπώς, η προσέγγιση αυτή αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο τόσο στη συντήρηση όσο και στην προγνωστική διάγνωση των μηχανών.

Η διαδικασία της καύσης δημιουργεί ηχητικά σήματα με διακριτά χαρακτηριστικά, τα οποία σχετίζονται με τη ροή του καυσίμου, την ανάφλεξη αλλά και τις συνηθίκες της καύσης. Μέσω της ανάλυσης αυτών των σημάτων, είναι εφικτή η αξιολόγηση της καύσης, επιτρέποντας τον εντοπισμό προβλημάτων όπως η ατελής καύση, η λανθασμένη αναλογία αέρα-καυσίμου και οι ανώμαλες αναφλέξεις. Κατά αυτόν το τρόπο μπορεί να επιτευχθεί η ενίσχυση της αποδοτικότητας του κινητήρα καθώς και στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους διάγνωσης, η ανάλυση των ηχητικών εκπομπών προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Το κύριο απ' αυτά τα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα παρακολούθησης της μηχανής σε πραγματικό χρόνο, δίχως την ανάγκη αποσυναρμολόγησης της με πολύ χαμηλό κόστος. Η έγκαιρη ανίχνευση φθοράς μπορεί να συμβάλει στην αποτροπή σοβαρών βλαβών και στην ελάττωση του κόστους συντήρησης. Η μέθοδος αυτή έχει δυνατότητα

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού &

Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

εφαρμογής σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους, όπως η αεροναυπηγική, η ναυτιλία και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία των κινητήρων είναι καίριας σημασίας.

Η εφαρμογή διαφόρων μεθόδων ανάλυσης σήματος, όπως η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (Time-Domain Analysis) και η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας (Frequency-Domain Analysis), αναδεικνύει ότι η σωστή επεξεργασία των σημάτων ΑΕ μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την κατάσταση του κινητήρα. Η χρήση τεχνικών όπως ο Μετασχηματισμός Fourier (FFT) και η ανάλυση συσχέτισης (Correlation Function Analysis) επιτρέπει την ανίχνευση επαναλαμβανόμενων μοτίβων και την ταυτοποίηση πιθανών προβλημάτων. Πέραν όμως του τρόπου ανάλυσης που θα επιλεγεί για την μελέτη της κατάστασης της μηχανής πολύ σημαντικό είναι η επιλογή των αισθητήρων για τον καθορισμό του συστήματος ΑΕ. Οι ευρυζωνικοί αισθητήρες αποδείχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμοι για την ανίχνευση ενός ευρέος φάσματος συχνοτήτων, ενώ οι συντονισμένοι αισθητήρες είναι κατάλληλοι για συγκεκριμένες εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ευαισθησία σε συγκεκριμένες συχνότητες.

Αυτή η εργασία θα μπορούσε να ανοίξει νέες προοπτικές για περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη διαγνωστικών εργαλείων τα οποία βασίζονται στην ανάλυση των ακουστικών εκπομπών. Βασικός στόχος για οποιαδήποτε εξέλιξη ,θα μπορούσε να είναι η βελτίωση των μεθόδων ανάλυσης, καθώς και η αξιοποίηση και ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης (AI) για την αυτοματοποιημένη ανίχνευση και ταξινόμηση των ηχητικών δεδομένων που προκύπτουν.

Παράλληλα, η ανάπτυξη συστημάτων που θα επιτρέπουν την παρακολούθηση των μηχανών σε πραγματικό χρόνο αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για την πρόβλεψη πιθανών

αστοχιών. Η ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων απευθείας στους κινητήρες θα δώσει τη δυνατότητα συνεχούς διάγνωσης της λειτουργίας τους.

Τέλος, η εξέλιξη των αισθητήρων αποτελεί έναν ακόμη τομέα που μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Η ανάπτυξη νέων αισθητήρων με μεγαλύτερη ευαισθησία και αντοχή σε ακραίες συνθήκες, όπως υψηλές θερμοκρασίες και υγρασία, θα επιτρέψει πιο αξιόπιστες μετρήσεις, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής της ακουστικής διάγνωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[Παράδειγμα: Αναφορά σε επιστημονική δημοσίευση]

1. John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Second revised edition, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering (New York Chicago San Francisco [und 9 andere]: McGraw-Hill Education, 2018).
2. Bugatti-W16-Engine,” accessed December 2, 2024, <https://www.bugatti-broward.com/bugatti-information/bugatti-w16-engine/>
3. “H engine” accessed December 2, 2024, https://en.wikipedia.org/wiki/H_engine
4. “U_engine,” accessed December 3, 2024, https://en.wikipedia.org/wiki/U_engine.
5. X_engine,” accessed December 3, 2024, https://en.wikipedia.org/wiki/X_engine
6. Paul Moraal and Ilya Kolmanovsky, “Turbocharger Modeling for Automotive Control Applications,” 1999.
7. Martinez-Botas Ricardo, Pesiridis Apostolos, and MingYang Yang, “Overview of Boosting Options for Future Downsized Engines,” Science China Technological Sciences 54, no. 2 (February 2011): 318–31
8. Huayin Tang et al., “A Review of the Application of Variable Geometry Turbines to the Downsized Gasoline Engine,” International Journal of Engine Research 16, no. 6 (September 2015): 810–25
9. N. Watson and M.S. Janota, Turbocharging the Internal Combustion Engine, 1st ed. (Bloomsbury Publishing Plc, 1982),
10. Ricardo, Apostolos, and Yang, “Overview of Boosting Options for Future Downsized Engines.”

11. Ranaji Arib Hafiz Ayyub Akbar Ahmedi, “Forced Induction Technologies in an IC Engine: A Review,” International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology 9, no. VI (June 25, 2021): 2766–70
12. J. H. Pitford, “Supercharging of Compression-Ignition Engines,” Proceedings of the Institution of Automobile Engineers 33, no. 1 (December 1938): 279–333
13. Gordon Blair, Design and Simulation of Four-Stroke Engines, 1st ed (Warrendale: SAE International, 1999)
14. Morgan Hunter, Damien Leclercq, and Carl Howard, “MECHANICAL DESIGN OF FLOW CONTROL OF THE EXHAUST NOISE FROM A V6 PETROL ENGINE
15. ChangChun Xu and HaengMuk Cho, “Analysis on the Noise Reduction of Engine with Air Intake Resonator in Engine Intake System,” International Journal of Engineering and Technology 10, no. 1 (February 28, 2018): 149–53
16. Jian Chen, Robert Bond Randall, and Bart Peeters, “Advanced Diagnostic System for Piston Slap Faults in IC Engines, Based on the Non-Stationary Characteristics of the Vibration Signals,” Mechanical Systems and Signal Processing 75 (June 2016): 434–54
17. H. Kanda, M. Okubo, and T. Yonezawa, “Analysis of Noise Sources and Their Transfer Paths in Diesel Engines
18. Guo-Qing Dong and Wen-Bin Shangguan, “Structural Vibration Analysis and Sound Quality Improvement for a Four-Cylinder Engine” (Noise and Vibration Conference & Exhibition, Grand Rapids, Michigan, United States, 2023), 2023-01–1153
19. Heiki Tiikoja et al., “Sound Transmission in Automotive Turbochargers,” 2011, 2011-01–1525

20. Zhanbin Gao et al., “Experimental Investigation of Characteristic Frequency in Compressor Surge of a Turbocharger,” *Noise Control Engineering Journal* 65, no. 6 (November 1, 2017): 611–17
 21. K.M. Kumar and M.L. Munjal, “Direct Estimation and Experimental Validation of the Acoustic Source Characteristics of Turbocharged Diesel Engine Exhaust System,” *Applied Acoustics* 149 (June 2019): 171–80
 22. Vinayak H. Patil et al., “Improved Techniques in Intake Acoustic System Modeling of a Supercharged Engine,” 2017, 2017-01–1790
 23. N.A. Rubayi, “Acoustic Vibrations in Intake Manifold System and the Supercharging of Engines,” *Applied Acoustics* 5, no. 1 (January 1972): 39–53
 24. Wolfgang Wenzel, “Acoustic Design for Charged Engines,” *MTZ Worldwide* 67, no. 5 (May 2006): 6–9
 25. Nasha Wei et al., “An Investigation into the Acoustic Emissions of Internal Combustion Engines with Modelling and Wavelet Package Analysis for Monitoring Lubrication Conditions,” *Energies* 12, no. 4 (February 16, 2019): 640
 26. Salah M. Ali Al-Obaidi et al., “A Review of Acoustic Emission Technique for Machinery Condition Monitoring: Defects Detection & Diagnostic,” *Applied Mechanics and Materials* 229–231 (November 29, 2012): 1476–80
 27. Masayasu Ohtsu, “Source Mechanisms of AE,” in *Acoustic Emission Testing*, ed. Christian Grosse and Masayasu Ohtsu (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008):149-74
 28. A. R. Baev and M. V. Asadchaya, “Specific Features of Excitation and Propagation of Longitudinal and Transverse Subsurface Waves in Solids: II. Effects of Some Boundary
-
- Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού & Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

- Conditions on Formation of Acoustic Fields,” Russian Journal of Nondestructive Testing 41, no. 9 (September 2005): 577–85
29. Christian Grosse and Masayasu Ohtsu, eds., Acoustic Emission Testing (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,(2018)
30. Wei Nasha and Gu James Xi., “An Investigation into the Acoustic Emissions of Internal Combustion Engines with Modelling and Wavelet Package Analysis for Monitoring Lubrication Conditions
31. T J Holroyd et al., “Development of a Practical Acoustic Emission-Based Structural Monitoring System,” Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 45, no. 2 (February 1, 2003): 127–29
32. Tribological Behaviour Diagnostic and Fault Detection of Mechanical Seals Based on Acoustic Emission Measurements,” Friction 7, no. 6 (December 2019): 572–86
33. D. Machura, J. Rymarczyk, and J. Ilczuk, “Ceramic Bismuth Titanate for High – Temperature Electro-Acoustic Transducers,” The European Physical Journal Special Topics 154, no. 1 (February 2008): 131–34
34. Muhammad Sohaib et al., “Leakage Detection of a Spherical Water Storage Tank in a Chemical Industry Using Acoustic Emissions,” Applied Sciences 9, no. 1 (January 8, 2019): 196
35. P.D. McFadden, “A Revised Model for the Extraction of Periodic Waveforms by Time Domain Averaging,” Mechanical Systems and Signal Processing 1, no. 1 (January 1987)
36. Development of a New Acoustic Emission Based Fault Diagnosis Tool for Gearbox,” in 2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM) (2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM), Gaithersburg, MD, USA: IEEE, 2013), 1–9
- Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Εργαστήριο Υπολογισμού & Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών

37. Oppenheim, A. V. and Schaffer, R. W., “Discrete-Time Signal Processing,” Prentice Hall, 2009.
38. James W. Cooley and John W. Tukey, “An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series,” *Mathematics of Computation* 19, no. 90 (1965): 297–301
39. Hohyub Jeon et al., “Area-Efficient Short-Time Fourier Transform Processor for Time–Frequency Analysis of Non-Stationary Signals,” *Applied Sciences* 10, no. 20 (October 15, 2020): 7208
40. I. Daubechies, “The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis,” *IEEE Transactions on Information Theory* 36, no. 5 (September 1990): 961–1005
41. Jian-Da Wu and Jien-Chen Chen, “Continuous Wavelet Transform Technique for Fault Signal Diagnosis of Internal Combustion Engines,” *NDT & E International* 39, no. 4 (June 2006): 304–11
42. Nicolò Cavina et al., “Combustion Monitoring Based on Engine Acoustic Emission Signal Processing,” 2009, 2009-01–1024
43. Di Lu and Weidong Yu, “Correlation Analysis between Acoustic Emission Signal Parameters and Fracture Stress of Wool Fiber,” *Textile Research Journal* 89, no. 21–22 (November 2019): 4568–80
44. Douglas Thorby, “Random Vibration,” in *Structural Dynamics and Vibration in Practice* (Elsevier, 2008), 267–324
45. Norden E. Huang et al., “The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 454, no. 1971 (March 8, 1998): 903–95

46. Robert Bond Randall, Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications, 1st ed. (Wiley, 2011)

