ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

> Διπλωματική Εργασία Μπουσούνη Παναγιώτη

# «ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΦΟΡΗΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΤΟΥ ΕΝΜ»

Επιβλέπων Καθηγητής: Ν.Π. Κυρτάτος

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

# Πρόλογος

Ένα πολύ μεγάλο τμήμα της προσπάθειάς μου για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2010-2011 στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας του ΕΜΠ οφείλεται αποκλειστικά στη συνεργασία μου με τους ανθρώπους του εργαστηρίου.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ν.Π. Κυρτάτο για την ανάθεση και την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς επίσης, και για την παροχή όλων των απαιτούμενων μέσων για την ολοκλήρωσή της. Επίσης, τον επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου κ. Μ. Ιωάννου για την συνεχή και αμέριστη βοήθεια και καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Γ. Παπαλάμπρου και κ. Ν. Αλεξανδράκη καθώς και το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου, κ. Χ. Σαρρή και κ. Γ. Δταλιαπέ, για τη σημαντική τους βοήθεια στην χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού και την διεξαγωγή των πειραμάτων. Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους υποψήφιους διδάκτορες Σ. Τοπάλογλου και Σ. Γλαρό, αλλά και τον συμφοιτητή και φίλο μου Ν. Βρεττάκο για την καθημερινή συνεργασία και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος1				
Πίν	Πίνακας Συμβόλων			
Пε	Περίληψη-Στόχος Εργασίας			
1.	Εισαγωγή	7		
	1.1. Μέτρηση Πίεσης στους Κυλίνδρους Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.	7		
	1.2. Μετρήσεις στα Καυσαέρια μιας Μ.Ε.Κ.	13		
	1.3. Μέτρηση Ισχύος στον άξονα μιας Μ.Ε.Κ.	15		
2.	Μέτρηση Πίεσης Κυλίνδρου	16		
	2.1. Εισαγωγή	16		
	2.2. Το σύστημα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων "The Doctor-DM8" της Fuchs Technology _	20		
	2.3. Το σύστημα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων του ΕΝΜ	27		
3.	Μέτρηση Ισχύος Άξονα	33		
	3.1. Εισαγωγή	33		
	3.2. Μέτρηση Ροπής Άξονα	33		
	3.2.1.Εισαγωγή	33		
	3.2.2.Το σύστημα μέτρησης ροπής άξονα του ΕΝΜ	35		
	3.3. Μέτρηση Ταχύτητας περιστροφής Άξονα	37		
	3.3.1.Εισαγωγή	37		
	3.3.2.Το σύστημα μέτρησης ταχύτητας περιστροφής άξονα του ENM	40		
4.	Μετρήσεις Ρύπων στα Καυσαέρια	49		
	4.1. Εισαγωγή	49		
	4.2. Μέτρηση Περιεκτικότητας Ρύπων στα Καυσαέρια	50		
	4.3. Μέτρηση Περιεκτικότητας Η2Ο στα Καυσαέρια	54		
	4.3.1.Εισαγωγή	54		
	4.3.2.Το σύστημα μέτρησης Η <sub>2</sub> Ο στα καυσαέρια του ENM	54		
	4.4. Μέτρηση Ταχύτητας Καυσαερίων	60		
	4.4.1.Εισαγωγή	60		
	4.4.2.Το σύστημα μέτρησης ταχύτητας καυσαερίων του ENM	61		
5.	Διεξαγωγή Μετρήσεων	66		
	5.1. Εισαγωγή	66		
	5.2. Το συνολικό σύστημα μετρητικών μονάδων του ENM	66		
	5.3. Μετρήσεις στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας Ε.Μ.Π.	68		
	5.3.1.Εισαγωγή	68		
	5.3.2.Προετοιμασία εξοπλισμού	68		
	5.3.3.Επισκόπηση δοκιμών	73		
	5.3.4.Αποτελέσματα δοκιμών	74		

	5.4. Μετρήσεις στο Speedrunner III - AegeanSpeed Lines	85
	5.4.1.Εισαγωγή	85
	5.4.2.Προετοιμασία εξοπλισμού	85
	5.4.3.Επισκόπηση δοκιμών	
	5.4.4.Αποτελέσματα δοκιμών	
6.	Συμπεράσματα - Προοπτικές βελτίωσης	94
	Βιβλιογραφία	
	Αναφορές	
	Παραρτήματα	

# Πίνακας Συμβόλων

2-Χ: δίχρονη (ΜΕΚ)	LME: Laboratory of Marine Engineering
4-Χ: τετράχρονη (ΜΕΚ)	MCR: Maximum Continuous Rating
ΑΝΣ: Άνω Νεκρό Σημείο	MU: Mobile Unit
ΕΝΜ: Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας	NI: National Instruments®
ΜΕΚ: Μηχανή Εσωτερικής Καύσης	Ρ: Πίεση
φ: γωνία στροφάλου	pf: profile factor
	PMD: Paramagnetic Detector
A/D: Analog/Digital	q <sub>MF</sub> : παροχή καυσίμου
DAQ: Data Acquisition Device	R&D: Research and Development
DNV: Det Norske Veritas	RPM: Revolutions per Minute
ECS: Electrochemical Sensor	SNS: Smart NOx Sensor
EG: Exhaust Gas	SRIII: Speedrunner III
f: frequency	TDC: Top Dead Center
GETDC: Gas Exchange Top Dead Center	V: Όγκος εμβολισμού
IMEP: indicated mean effective pressure	VI: virtual instrument
IMO: International Maritime Organization	

# Περίληψη – Σκοπός εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί τμήμα της ευρύτερης προσπάθειας του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας (ΕΝΜ) του Ε.Μ.Π. προς τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός πλήρως φορητού συστήματος για τη διεξαγωγή συνδυασμένων μετρήσεων επί μηχανολογικών εγκαταστάσεων (χερσαίων και θαλασσίων). Στον ευρύτερο τομέα της μηχανολογίας, αλλά κυρίως στο χώρο των ναυτικών μηχανών, η διεξαγωγή αναλυτικών μετρήσεων κατέχει πρωταρχική σημασία, τόσο σε ερευνητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο συμμόρφωσης με τους διεθνείς κανονισμούς. Με το εγχείρημα αυτό, λοιπόν, το ΕΝΜ αποσκοπεί στη παροχή ολοκληρωμένων μετρήσεων για τον έλεγχο και την αξιολόγηση της λειτουργίας και της απόδοσης ενός κινητήρα.

Το εν λόγω φορητό μετρητικό σύστημα Mobile Unit (MU), θα αποτελείται από τις εξής μονάδες:

- Μονάδα μέτρησης καυσαερίων
- Μονάδα μέτρησης ισχύος στον άξονα
- Μονάδα μέτρησης πίεσης στον κύλινδρο

Το παραπάνω σύστημα, στο προϋπάρχον στάδιο της εξέλιξής του (έκδοση MU-Mk2.1), αποτελούνταν από τις δύο πρώτες μονάδες (μέτρησης καυσαερίων και ισχύος άξονα) και από το αντίστοιχο λογισμικό για την καταγραφή και την επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων. Ως αποτέλεσμα μιας σειράς ερευνητικών προγραμμάτων και διπλωματικών εργασιών του ENM, το σύστημα MU-Mk2.1 βρίσκεται ήδη σε αρκετά προχωρημένο επίπεδο λειτουργικότητας. Ωστόσο, απαιτείται ακόμα η αντιμετώπιση ορισμένων λειτουργικών προβλημάτων, κυρίως στο τμήμα της ταυτόχρονης επεξεργασίας των σημάτων από τις διάφορες μονάδες και αισθητήρες μέσω κοινού προγράμματος (VI-Virtual Instrument) στην πλατφόρμα LabVIEW. Επίσης, στο πλαίσιο της περαιτέρω εξέλιξης του συστήματος, επόμενος στόχος είναι ο σχεδιασμός και η ενσωμάτωση της μονάδας μέτρησης της πίεσης κυλίνδρου, που αποτελεί και το βασικό σκοπό της παρούσας εργασίας. Το ΕΝΜ διαθέτει μια ανεξάρτητη φορητή μονάδα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων και σκοπός είναι να χρησιμοποιηθεί ως βάση για να αναπτυχθεί ένα νέο σύστημα (εξοπλισμός & λογισμικό), συμβατό με το συνολικό προϋπάρχον σύστημα.

5

Με βάση τα παραπάνω, αντικείμενα της εν λόγω διπλωματικής εργασίας αποτελούν:

- Η δοκιμαστική χρήση της ανεξάρτητης φορητής μονάδας μέτρησης πίεσης κυλίνδρου στην κλίνη δοκιμών του ENM.
- Ο σχεδιασμός ενός νέου συστήματος μέτρησης πίεσης κυλίνδρου, με σκοπό την ενσωμάτωση του στο προϋπάρχον σύστημα MU-Mk2.1.
- Η βελτιστοποίηση των συστημάτων μετρήσεων στα καυσαέρια και μέτρησης ισχύος στον άξονα, ως προς την ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων.
- Η ενσωμάτωση του νέου συστήματος μέτρησης πίεσης στο συνολικό προϋπάρχον-βελτιωμένο μετρητικό σύστημα.
- Η δοκιμαστική χρήση του νέου συνολικού φορητού μετρητικού συστήματος στην κλίνη δοκιμών του ENM.
- 6. Η διεξαγωγή συνδυασμένων μετρήσεων επί της μηχανολογικής εγκατάστασης ενός Ε/Γ Ο/Γ πλοίου (Speedrunner III της Aegean Speed Lines) σε κανονικές συνθήκες ταξιδιού, με σκοπό τη αξιολόγηση της καλής λειτουργίας της ολοκληρωμένης φορητής μονάδας.

#### 1. Εισαγωγή

#### 1.1. Μέτρηση της Πίεσης στους Κυλίνδρους Εμβολοφόρων ΜΕΚ

Απαρχή της λειτουργίας μιας εμβολοφόρου μηχανής εσωτερική καύσης (Μ.Ε.Κ.) αποτελούν οι διαδοχικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των κυλίνδρων. Συντελώντας σταδιακά στη δημιουργία του μίγματος αέρα-καυσίμου, την καύση και τέλος, την έξοδο των καυσαερίων, οι

διεργασίες αυτές εξασφαλίζουν τόσο την παραγωγή της διαθέσιμης προς εκμετάλλευση ενέργειας, όσο και τη διατήρηση της συνεχούς λειτουργίας της μηχανής. Ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, οι εν λόγω διεργασίες εξελίσσονται σε κάθε πλήρη κύκλο λειτουργίας, μέσα σε δύο (δίχρονες) ή τέσσερα (τετράχρονες - Σχήμα 1.1) διαδοχικά στάδια. Όπως είναι αναμενόμενο, κάθε στάδιο ξεχωριστά αλλά και η συνολική εξέλιξη ενός πλήρους κύκλου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την καλή λειτουργία ενός κινητήρα.



Σχήμα 1.1 Πλήρης κύκλος ενός τετράχρονου κινητήρα Diesel [1]

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα της «παρακολούθησης» και της μελέτης των φαινομένων που εκτυλίσσονται στο εσωτερικό των κυλίνδρων ενός κινητήρα, αποτελώντας βασικά εργαλεία ενός μηχανικού, τόσο στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης κινητήρων σε σχεδιαστικό/κατασκευαστικό επίπεδο (R&D), όσο και της διαγνωστικής υπαρχόντων κινητήρων, για τον έλεγχο της λειτουργίας τους, την πρόληψη βλαβών και τη συντήρηση τους (onboard monitoring).

Η αποτελεσματικότερη μέθοδος για την άμεση παρακολούθηση και εν συνεχεία μελέτη των διαδοχικών διεργασιών στους κυλίνδρους μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ, είναι η μέτρηση της πίεσης στο εσωτερικό τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η μέτρηση της πίεσης του ρευστού στα διάφορα στάδια ενός πλήρους κύκλου, αλλά και μεταξύ διαδοχικών κύκλων, παρέχοντας πρόσβαση στα πολλαπλά και στιγμιαία γεγονότα που λαμβάνουν χώρα μέσα στον κύλινδρο, φέρει μεγάλο όγκο πληροφοριών, που περιγράφουν λεπτομερώς πολλά και διαφορετικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας ενός κινητήρα και που μπορούν να εξαχθούν, είτε άμεσα, από τις τιμές της μέτρησης, είτε έμμεσα, σε συνδυασμό με άλλες γνωστές ή/και μετρούμενες παραμέτρους.

7

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η μέτρηση της πίεσης εντός των κυλίνδρων βρίσκει σημαντική εφαρμογή στο πεδίο της εργαστηριακής έρευνας των μηχανών εσωτερικής καύσης, αποτελώντας ένα από τα σημαντικότερα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και τη βελτιστοποίηση των διαφόρων πτυχών της λειτουργίας και της απόδοσης ενός κινητήρα.

Οι μετρήσεις της πίεσης στον κύλινδρο ενός εμβολοφόρου κινητήρα εκφράζονται στα εξής κύρια διαγράμματα:



R&D

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα – Σχήματα 1.2 & 1.3, μπορούν να αντληθούν χρήσιμα μεγέθη, που χαρακτηρίζουν την απόδοση και την κατάσταση λειτουργίας ενός κινητήρα. Ανάλογα με το σκοπό και το αντικείμενο της εκάστοτε μελέτης, η μετρήσεις πίεσης μπορούν να δώσουν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων της λειτουργίας του κινητήρα. Τέτοιες παραμέτρους μπορούν να αποτελούν, η κατανομή και η διακύμανση της πίεσης μέσα σε έναν ολόκληρο κύκλο ή σε μικρότερες περιοχές αυτού (έναυση, έναρξη καύσης [3], καύση, εισαγωγή αέρα/καυσίμου, εξαγωγή καυσαερίων κ.α.), οι διαφοροποιήσεις μεταξύ διαδοχικών κύκλων λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά της διεργασίας της καύσης [4], η έκλυση θερμότητας κατά την εξέλιξη της καύσης, η μηχανική και θερμική καταπόνηση των διαφόρων τμημάτων του κυλίνδρου κλπ.

Πέραν των διαφόρων μελετών που μπορούν να γίνουν βασιζόμενες σχεδόν αποκλειστικά στις μετρήσεις πίεσης και που αφορούν σε παραμέτρους άμεσα συνδεδεμένες με την διακύμανσή της στους κυλίνδρους μιας ΜΕΚ, η καταγραφή της πίεσης μπορεί να οδηγήσει σε εκτενέστερες μελέτες, εφόσον συνδυαστεί με άλλες μετρήσεις ή/και με ανεπτυγμένα μαθηματικά μοντέλα για την ανάλυσή τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ερευνών είναι ο έμμεσος προσδιορισμός μεγεθών, όπως η περιεκτικότητα διαφόρων ρύπων στα καυσαέρια, ο λόγος αέρα/καυσίμου [5], η παροχή αέρα [6] και ο λόγος συμπίεσης [7] ενός κινητήρα, η συσχέτιση της μετρούμενης πίεσης με τα επίπεδα των εκλυόμενων ρύπων, τα φαινόμενα κραδασμών και θορύβων [8], κ.α.

Αξιοποιώντας ακόμα περισσότερο μια σημαντική μέτρηση όπως αυτή της πίεσης στους κυλίνδρους ενός κινητήρα, η εργαστηριακή έρευνα αποσκοπεί στη χρήση των συλλεγόμενων δεδομένων ως εργαλείο ελέγχου της λειτουργίας ενός κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της

ανάπτυξης σύγχρονων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου κινητήρων, οι μετρήσεις τις πίεσης (σε συνδυασμό με άλλες μετρήσεις), αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο κριτήριο για την αυτόματη ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας, με σκοπό τη βελτιστοποίηση σε επίπεδο απόδοσης, κατανάλωσης, αλλά και μείωσης των εκλυόμενων ρύπων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων μελετών είναι,



Σχήμα 1.4 Σύστημα "Intelligent Combustion Control" της Wärtsilä [9]

το σύστημα *"Intelligent Combustion Control"* της Wärtsilä [9] – Σχήμα 1.4, καθώς και το ερευνητικό πρόγραμμα "LIFETIME" του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας του ΕΜΠ [10] – Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5 Ερευνητικό πρόγραμμα "LIFETIME" του ENM [10]

#### **Onboard Monitoring**

Πέραν από την αδιαμφισβήτητη χρησιμότητά τους σε ερευνητικό επίπεδο, οι μετρήσεις πίεσης αποτελούν επίσης ένα σημαντικό εργαλείο για τον έλεγχο και τη διαγνωστική εν λειτουργία κινητήρων. Πιο συγκεκριμένα, η καταγραφή της πίεσης στους κυλίνδρους μιας ΜΕΚ κατά τη διάρκεια της εφαρμοσμένης λειτουργίας της και η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με το ιστορικό των μετρήσεων, συνθέτουν ένα λεπτομερές αποτύπωμα της «υγείας» του κινητήρα και της χρονικής της εξέλιξης. Η πλούσια αυτή πηγή πληροφοριών είναι διαθέσιμη, τόσο για την παρούσα αξιολόγηση της λειτουργίας ενός κινητήρα, όσο και για μελλοντική ανάλυση και επεξεργασία.

#### Onboard Monitoring και Συντήρηση

Μέσω του τακτικού ελέγχου μεγεθών και παραμέτρων που μπορούν να προκύψουν από τις μετρήσεις της πίεσης των κυλίνδρων, καθίσταται δυνατή η βελτιστοποίηση της διαδικασίας της συντήρησης και της πρόληψης βλαβών σε έναν κινητήρα (Condition Monitoring based Maintenance) [11] – Σχήμα 1.6. Μεταξύ των συνήθων μεθόδων παρακολούθησης και συντήρησης ενός κινητήρα, η διεξαγωγή άμεσων μετρήσεων αποτελεί αποδεδειγμένα τη βέλτιστη λύση, τόσο σε οικονομικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο αξιοπιστίας.



Σχήμα 1.6 Condition Monitoring based Maintenance [2]

Προς το στόχο αυτό, άλλωστε, στρέφονται, στο χώρο των ναυτικών μηχανών, οι κατασκευάστριες εταιρείες και οι νηογνώμονες. Χαρακτηριστικά, ο Νορβηγικός Νηογνώμονας, DNV,

έχει εισάγει στο πλαίσιο της επιθεώρησης της μηχανολογικής εγκατάστασης πλοίων, το πρόγραμμα "Machinery CM (Condition Monitoring)" [12] – Σχήμα 1.7, το οποίο βασίζεται στην έκδοση πιστοποιητικών μέσω της τακτικής διεξαγωγής μετρήσεων επί του πλοίου από το πλήρωμα, μέρος των οποίων αποτελεί και η μέτρηση της πίεσης στους κυλίνδρους των μηχανών.



Σχήμα 1.7 Machinery Survey Arrangement "Machinery Condition Monitoring" του DNV [12]

## Onboard Monitoring και Διεθνείς Κανονισμοί

Στο ευρύτερο πλαίσιο της συμμόρφωσης με τους διεθνείς κανονισμούς για τη μείωση των επιπέδων των εκλυόμενων ρύπων από τις χερσαίες και τις θαλάσσιες μηχανολογικές εγκαταστάσεις, η βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός κινητήρα μέσω της παρακολούθησης - διεξαγωγής μετρήσεων, αποτελεί, πλέον, μια ακόμα σημαντικότερη παράμετρο. Η μέτρηση της πίεσης στους κυλίνδρους καθίσταται, λοιπόν, ως ένα απαραίτητο εργαλείο, χάρη στο πλήθος των πληροφοριών που παρέχει. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται, άλλωστε, και από την αυξημένη εμφάνιση στην αγορά φορητών συστημάτων μέτρησης της πίεσης – Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8 Φορητό σύστημα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων της Fuchs Technology [2]

#### 1.2. Μετρήσεις στα καυσαέρια μιας ΜΕΚ

Η επιτακτική ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος αποτυπώνεται, πλέον, ξεκάθαρα στο χώρο τις βιομηχανίας και των μεταφορών, μέσω της έκδοσης διεθνών κανονισμών για τον περιορισμό των επιπέδων των εκλυόμενων ρύπων από τις χερσαίες και τις θαλάσσιες δραστηριότητες. Στο χώρο της ναυτιλίας, συγκεκριμένα, ο διεθνής ναυτιλιακός οργανισμός (IMO), μέσω του παραρτήματος έξι (ANNEX VI) της MARPOL, ορίζει τους προς περιορισμό ρύπους και τα αντίστοιχα όρια αυτών [13] – Σχήμα 1.9. Οι εν λόγω ρυπογόνες ουσίες είναι:

Οξείδια του αζώτου, ΝΟχ



• Οξείδια του θείου, SOx

Σχήμα 1.9 Όρια Κανονισμών της MARPOL για τη μείωση των επιπέδων NOx και SOx [13]

Για τον ακριβή υπολογισμό των εκπεμπόμενων ρύπων NOx , οι διεθνείς κανονισμοί χρησιμοποιούν τις περιεκτικότητες των παρακάτω ρύπων:

- Υδρογονάνθρακες, HCs
- Διοξείδιο του άνθρακα, CO<sub>2</sub>
- Μονοξείδιο του άνθρακα, CO

Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές από τις μετρήσεις των παραπάνω ρύπων χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της παροχής των καυσαερίων, όπως προδιαγράφεται από τη σχετική νομοθεσία [14].

Τόσο οι κατασκευαστές, όσο και οι ναυτιλιακές εταιρείες ωθούνται, λοιπόν, προς τη σταδιακή συμμόρφωση με τους κανονισμούς, αναζητώντας πρακτικές λύσεις, σχεδιαστικού και λειτουργικού επιπέδου, για την κάλυψη των σχετικών ορίων. Παρόμοια είναι η κατάσταση στον τομέα της βιομηχανίας και των χερσαίων μεταφορών.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα της διεξαγωγής μετρήσεων στα καυσαέρια μιας βιομηχανικής εγκατάστασης ή ενός πλοίου, για τον υπολογισμό - μέσω τις ανάλυσης τους - των επιπέδων των εκλυόμενων ρύπων και τον έλεγχό τους σε σύγκριση με τις απαιτούμενες τιμές. Η διεξαγωγή επιτόπου μετρήσεων, άλλωστε, θεωρούμενη ως η βέλτιστη μέθοδος, περιλαμβάνεται, τόσο στα κείμενα των κανονισμών όσο και στην τακτική των κατασκευαστριών εταιρειών και τον και τον χωροτης τους της ναυτιλίας).

Στο πλαίσιο αυτό, κυκλοφορούν στην αγορά πρακτικές συσκευές για την εύκολη και γρήγορη καταγραφή των επιπέδων των ρύπων στα καυσαέρια μηχανών – Φωτογραφία 1.1.



Φωτογραφία 1.1 Φορητή συσκευή ανάλυσης ρύπων της TESTO [15]

Οι μετρήσεις στα καυσαέρια μπορούν, τέλος, να αποτελέσουν και μια ακόμα συμπληρωματική παράμετρο ενός συστήματος ελέγχου της λειτουργίας και της απόδοσης μιας μηχανής. Με βάση τις μετρούμενες τιμές ρύπων και σε συνδιασμό με άλλες μετρήσεις/παραμέτρους, το σύστημα θα προσαρμόζει τη λειτουργία της μηχανής με σκοπό την επίτευξη των απαιτούμενων επιπέδων εκλυόμενων ρύπων.

#### 1.3. Μέτρηση Ισχύος στον Άξονα μιας ΜΕΚ

Η παραγωγή ισχύος από μια μηχανή αποτελεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή τον πρωταρχικό σκοπό της λειτουργίας της. Είτε πρόκειται για μια προωστήρια εγκατάσταση ή για ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, η επιλογή της χρησιμοποιούμενης μηχανής βασίζεται κατά κύριο λόγο στην απαίτηση ισχύος της εφαρμογής και την ικανότητα της μηχανής να την καλύψει επαρκώς. Ως εκ τούτου, η ισχύς στον άξονα μιας μηχανής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προς μέτρηση μεγέθη, χαρακτηρίζοντας άμεσα την κατάσταση λειτουργίας της. Η παραγόμενη από τον άξονα ισχύς, περιγράφοντας τη φόρτιση στην οποία υποβάλλεται η μηχανή, σχετίζεται πλήρως με τις πιο σημαντικές παραμέτρους της λειτουργίας της, όπως είναι η κατανάλωση καυσίμου και τα επίπεδα των εκλυόμενων ρύπων. Για το λόγο αυτό η μέτρηση της ισχύος αποτελεί, ουσιαστικά, τη βάση αναφοράς για οποιαδήποτε άλλη μέτρηση είτε σε ερευνητικό επίπεδο (R&D), είτε σε επίπεδο παρακολούθησης απόδοσης κινητήρα (engine performance monitoring).

Για τους παραπάνω λόγους, οι διεθνείς κανονισμοί για τη μείωση των εκλυόμενων ρύπων στην ατμόσφαιρα από τη βιομηχανία και τις μεταφορές, περιλαμβάνουν την ισχύ στον άξονα των μηχανών ως απαιτούμενη συμπληρωματική παράμετρο. Τα μετρούμενα επίπεδα ρύπων ελέγχονται, άλλωστε, πάντα σε σχέση με την κατάσταση λειτουργίας της μηχανής, που εκφράζεται άμεσα μέσω της ισχύος.

Στην περίπτωση των κανονισμών για τα πλοία, το σχετικό κείμενο της ΜΕΡC/MARPOL περιλαμβάνει είτε την άμεση μέτρηση της ισχύος στον άξονα του πλοίου, είτε τον έμμεσο υπολογισμό της με διάφορες μεθόδους [16]. Ωστόσο, συνίσταται η μέθοδος της μέτρησης, μιας και δίνει πάντα το ακριβέστερο αποτέλεσμα. Ο συνηθέστερος τρόπος μέτρησης της ισχύος στον άξονα ενός κινητήρα είναι μέσω μέτρησης της ασκούμενης σε αυτόν ροπής και της ταχύτητας περιστροφής του – Σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10 Σύστημα μέτρησης Ισχύος στον άξονα της Kongsberg [17]

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει για τα υπόλοιπα μετρούμενα μεγέθη (πίεση κυλίνδρων, ρύποι), η μέτρηση της ισχύος αποτελεί μια επίσης βασική παράμετρο συστημάτων αυτομάτου ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός κινητήρα [10].

# 2. Μέτρηση Πίεσης Κυλίνδρου

## 2.1. Εισαγωγή

Η δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής της διακύμανσης της πίεσης στους κυλίνδρους εμβολοφόρων ΜΕΚ αποτελούσε πάντοτε πρωταρχική ανάγκη για την εξέλιξη της τεχνολογίας τους, καθώς εμφανίστηκε σχεδόν ταυτόχρονα με την κατασκευή των πρώτων μηχανών. Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε για τη μέτρηση της πίεσης, προερχόμενη από την εφαρμογή της στις ατμομηχανές, αποτελούταν από ένα πλήρως μηχανικό σύστημα. Μια γραφίδα κινούταν, ανάλογα με τη διακύμανση της πίεσης, επάνω σε ένα χαρτί τυλιγμένο σε ένα, περιστρεφόμενο από την κίνηση του πιστονιού, τύμπανο – Σχήμα 2.1. Με τον τρόπο αυτό στο χαρτί σχεδιαζόταν το διάγραμμα πίεσης - όγκου, P-V, του κυλίνδρου – Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.1 Το μηχανικό σύστημα χάραξης του διαγράμματος P - V του D. McInnes [18]



Σχήμα 2.2 Το διάγραμμα P-V της μηχανής του Ν. Otto, σχεδιασμένο με χρήση του D. McInnes Indicator [19]

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών συστημάτων αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι για τη μέτρηση και την καταγραφή της πίεσης στους κυλίνδρους μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ. Η πλέον συνήθης και αποτελεσματική εξ αυτών, είναι η χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων πίεσης – Σχήμα 2.3. Η

επικράτηση αυτού του τύπου αισθητήρων οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στη γραμμικότητα του παραγόμενου σήματος σε σχέση με το προς μέτρηση μέγεθος (pC ~ P) καθώς επίσης και χάρη στην ικανότητά τους να διατηρούν την ακρίβεια της λειτουργίας τους υπό τις ακραίες συνθήκες μηχανικής και θερμικής καταπόνησης που υφίστανται στο περιβάλλον του κυλίνδρου μιας σύγχρονης μηχανής.



Σχήμα 2.3 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης της Kistler [20]

Η αρχή της λειτουργίας ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης βασίζεται, όπως μαρτυρά και η ονομασία του, στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Πρόκειται για την φυσική ιδιότητα ορισμένων κρυσταλλικών υλικών (π.χ. χαλαζίας - SiO<sub>2</sub>) να εμφανίζουν ηλεκτρική φόρτιση στα άκρα τους ως αποτέλεσμα της άσκησης δύναμης (πίεσης) σε αυτά. Πιο συγκεκριμένα, η μηχανική παραμόρφωση ενός τέτοιου κρυστάλλου προκαλεί μια διαφορά δυναμικού στα άκρα του, η οποία είναι ευθέος

ανάλογη του μέτρου της παραμόρφωσης αυτής, ενώ η πολικότητά της είναι επίσης ανάλογη κατεύθυνσης της της παραμόρφωσης – Σχήμα 2.4. Βασιζόμενοι, λοιπόν, στο παραπάνω φαινόμενο, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες διαθέτουν μια κρυστάλλων, σειρά στους οποίους μεταφέρεται η ασκούμενη στην επιφάνεια του αισθητήρα πίεση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ανάλογου αυτής ηλεκτρικού φορτιού.



Σχήμα 2.4 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο [21]

Λόγω της αρχής λειτουργίας τους, οι αισθητήρες αυτοί έχουν τη δυνατότητα μέτρησης μόνο της μεταβολής της πίεσης στην επιφάνειά τους και όχι της απόλυτης τιμής της (διαφορικοί αισθητήρες). Κατά την εφαρμογή, λοιπόν, ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός ενός, τουλάχιστον, σημείου αναφοράς, ώστε η μετρούμενες τιμές να ταυτίζονται με τις πραγματικές (zero-line detection). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προς το σκοπό αυτό, με πιο συνήθεις τις ακόλουθες [19]:

- Μέθοδος σταθερού σημείου (fixed point), όπου ως πίεση αναφοράς λαμβάνεται η γνωστή πίεση σε ένα ορισμένο σημείο του κύκλου, P<sub>ref</sub> - φ<sub>ref</sub>. Το σημείο αυτό συνήθως είναι,
  - η πίεση του περιβάλλοντος,
  - ή, γενικότερα, η πίεση του αέρα εισαγωγής, στο ΑΝΣ κατά τη διεργασία της ανταλλαγής
     αερίων (GETDC)
- Θερμοδυναμική μέθοδος, όπου η βαθμονόμηση βασίζεται στη σύγκριση της μετρούμενης με την υπολογιζόμενη (θερμοδυναμικά) διακύμανση της πίεσης. Ένας συνήθης τρόπος για αυτό είναι η θεώρηση μιας σταθερής τιμής του πολυτροπικού συντελεστή σε ένα ορισμένο εύρος σημείων στον κύκλο (π.χ. P<sub>1</sub>,φ<sub>1</sub>=100°-80° πριν το ΑΝΣ και P<sub>2</sub>,φ<sub>2</sub>=70°-60° πριν το ΑΝΣ).

Από τις παραπάνω μεθόδους βαθμονόμησης, παρατηρούμε ότι απαιτείται η συσχέτιση της διακύμανσης της πίεσης με τη γωνία στροφάλου της μηχανής, ώστε να ορισθούν οι σωστές τιμές της πίεσης σε συγκεκριμένες - ανάλογα με τη μέθοδο - θέσεις της κίνησης του πιστονιού. Ως εκ τούτου, τα σύγχρονα συστήματα καταγραφής της πίεσης με χρήση πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα, χρησιμοποιούν ως βάση αναφοράς το χρονικό πεδίο και συγκεκριμένα τη γωνία του στροφάλου. Έτσι, η μέτρηση της πίεσης γίνεται συνήθως ταυτόχρονα με την καταγραφή της γωνίας του στροφάλου. Έτσι, η μέτρηση της παρουσιάζει το διάγραμμα P-φ. Το διάγραμμα, αφού πλέον γίνει και η κατάλληλη βαθμονόμηση, παρουσιάζει τη χρονική διακύμανση τη πίεσης στον κύλινδρο κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας της μηχανής. Με βάση το διάγραμμα P-φ, μπορεί εύκολα να σχεδιαστεί και το διάγραμμα P-V. Η συνολική, λοιπόν, διάταξη, για τη διεξαγωγή ολοκληρωμένων μετρήσεων πίεσης στους κυλίνδρους μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ, αποτελείται από τα εξής τμήματα – Σχήμα 2.5:

- 1. Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας
- 2. Ενισχυτής σήματος
- 3. Αισθητήρας γωνίας στροφάλου
- 4. Μονάδα Α/D
- 5. Ηλεκτρονικός Υπολογιστής



Σχήμα 2.5 Διάταξη συστήματος μέτρησης πίεσης κυλίνδρων

# 2.2. Το σύστημα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων "The Doctor – DM8" της Fuchs Technology

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ΕΝΜ διαθέτει μια ανεξάρτητη φορητή μονάδα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων. Στο πρώτο στάδιο της ανάπτυξης ενός νέου συστήματος μέτρησης πίεσης για την ενσωμάτωσή του στο προϋπάρχον φορητό σύστημα MU-Mk2.1, μελετήθηκε και δοκιμάστηκε η λειτουργία της εν λόγω μονάδας, βάση της οποίας αξιολογήθηκε και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του νέου συστήματος μέτρησης πίεσης πίεσης κυλίνδρων του ΕΝΜ.

Το σύστημα "The Doctor – DM8" της Fuchs Technology αποτελεί μια φορητή μονάδα επιτόπου καταγραφής, επεξεργασίας και αποθήκευσης συνδυασμένων μετρήσεων πίεσης στους κυλίνδρους μιας εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης. Συγκεκριμένα, έχοντας τα κατάλληλα μηχανήματα, παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης των εξής μεγεθών:

- Πίεση στους κυλίνδρους
- Πίεση καυσίμου
- Πίεση αέρα εισαγωγής
- Γωνία στροφάλου
- Ταχύτητα περιστροφής άξονα

Τα σήματα των αισθητήρων των παραπάνω μεγεθών συγκεντρώνονται σε μια συσκευή συλλογής δεδομένων (data acquisition device – DAQ) συνδεδεμένη με ένα φορητό υπολογιστή. Η επεξεργασία και η αποθήκευση των μετρήσεων γίνεται εν συνεχεία από το λογισμικό "The Doctor PC software". Τέλος, τα δεδομένα μπορούν να σταλούν για αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία σε άλλους Η/Υ – Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Διάταξη συστήματος "The Doctor - DM8" της Fuchs Technology [2]

#### Hardware

To hardware της φορητής μονάδας DM-8 αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

Αισθητήρες (και αντίστοιχες καλωδιώσεις και αντάπτορες)

Μετρούμενο μέγεθος	Αισθητήρας
Πίεση στους κυλίνδρους	Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας της Kistler
Πίεση καυσίμου	Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας της Kistler
Πίεση αέρα εισαγωγής	Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας της Kistler
Γωνία στροφάλου/ Ταχύτητα περιστροφής άξονα	Επαγωγικός αισθητήρας

Κάρτα DAQ

Η μονάδα φέρει μια πολυκάναλη κάρτα συλλογής δεδομένων - (DAQ) της National Instruments. Η κάρτα συνδέει τους αισθητήρες με τον Η/Υ μετατρέποντας τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά – Φωτογραφία 2.1.



Φωτογραφία 2.1 Η κάρτα DAQ της National Instruments [22]

H/Y

Ο φορητός Η/Υ της μονάδας DM-8 είναι σχεδιασμένος ώστε να μεταφέρεται και να χρησιμοποιείται εύκολα, ακόμα και στις αντίξοες συνθήκες μιας μηχανολογικής εγκατάστασης. Διαθέτει οθόνη αφής και προστατεύεται από ένα ειδικά σχεδιασμένο περίβλημα – Φωτογραφία 2.2.



Φωτογραφία 2.2 Ο Η/Υ της μονάδας DM-8 [2]

#### Software

Ο Η/Υ του συστήματος DM-8, χρησιμοποιώντας το λειτουργικό σύστημα των Windows XP, έχει εγκατεστημένο το ειδικά σχεδιασμένο λογισμικό, "The Doctor PC software", για την συλλογή, την επεξεργασία και την αποθήκευση των μετρήσεων. Βασιζόμενο σε έναν αλγόριθμο σε πλατφόρμα LabView, το σύστημα επεξεργάζεται τα δεδομένα που συλλέγονται από την κάρτα DAQ και προβάλει μια σειρά από διαγράμματα, πίνακες και υπολογιζόμενα μεγέθη – Σχήμα 2.7. Με τον τρόπο αυτό, παράλληλα με τη διεξαγωγή των μετρήσεων παρουσιάζεται μια πλήρης εικόνα των μετρούμενων μεγεθών καθώς και πλήθος άλλων παραμέτρων που περιγράφουν την κατάσταση λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 2.7 Παρουσίαση των μετρούμενων μεγεθών από το πρόγραμμα "The Doctor PC Software" της μονάδας DM-8 [2]

Το λογισμικό δίνει, επίσης, τη δυνατότητα στο χρήστη να επεξεργάζεται τα παραγόμενα διαγράμματα, είτε επιτόπου, είτε μετά το πέρας των μετρήσεων. Δημιουργώντας ένα ιστορικό των μετρήσεων, επιτρέπει τη σύγκρισή τους και την παραγωγή χρονοδιαγραμμάτων για την παρακολούθηση της εξέλιξης διαφόρων μεγεθών – Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης μεγεθών του προγράμματος "The Doctor PC Software" της μονάδας DM-8 [2]

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όσον αφορά στη λειτουργία του εν λόγω συστήματος σχετικά με την επεξεργασία των μετρούμενων σημάτων, παρουσιάζει η δυνατότητα άμεσης βαθμονόμησης του σήματος της πίεσης κυλίνδρου μέσω εφαρμογής της μεθόδου σταθερού σημείου [19]. Η απαιτούμενη, για το σκοπό αυτό, τιμή της πίεσης στον αέρα εισαγωγής, είτε μετράται (εφόσον διατίθεται σχετικός αισθητήρας), είτε ορίζεται στο σύστημα από το χρήστη, ενώ ο προσδιορισμός του ΑΝΣ του εκάστοτε μετρούμενου κυλίνδρου προκύπτει:

- 1. Άμεσα από το σήμα του επαγωγικού αισθητήρα (εφόσον διατίθεται) (TDC pick up).
- 2. Έμμεσα από το σήμα της μετρούμενης πίεσης στον κύλινδρο (Automatic TDC adjustment).

Στην τελευταία περίπτωση, το λογισμικό του συστήματος εφαρμόζει έναν ειδικά σχεδιασμένο αλγόριθμο, ο οποίος επεξεργαζόμενος το σήμα της πίεσης καθενός πλήρους κύκλου της μηχανής, προσδιορίζει το ΑΝΣ του κυλίνδρου. Πιο συγκεκριμένα, η κεντρική ιδέα της λειτουργίας του εν λόγω αλγορίθμου βασίζεται στο γεγονός, ότι κατά τη χρονική στιγμή όπου το έμβολο διέρχεται από το ΑΝΣ, ο



Σχήμα 2.9 Εφαρμογή του αλγορίθμου Automatic TDC adjustment [2]

Στις περιπτώσεις όπου δεν εντοπίζεται σημείο μηδενισμού, το πρόγραμμα λαμβάνει ως ΑΝΣ, το σημείο όπου η καμπύλη του ρυθμού μεταβολής της πίεσης θα έτεμνε τον οριζόντιο άξονα, εάν δεν πραγματοποιούταν η διεργασία της καύσης (motored cycle). Το σημείο αυτό εντοπίζεται με τεχνητή



Σχήμα 2.10 Εφαρμογή του αλγορίθμου Automatic TDC adjustment [2]

Τέλος, όσον αφορά στη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα της μετρούμενης μηχανής, το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της μέσω του σήματος της πίεσης *(πέραν της άμεσης μέτρησης με χρήση επαγωγικού αισθητήρα).* Το λογισμικό υπολογίζει κατά τη διάρκεια της μέτρησης τη στιγμιαία συχνότητα του σήματος της πίεσης και με βάση τον δεδομένο από το χρήστη τύπο της εκάστοτε μηχανής (2-X ή 4-X), δίνει την αντίστοιχη τιμή της ταχύτητας περιστροφής του άξονα



Σχήμα 2.11 Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής άξονα από το λογισμικό "The Doctor PC Software" [2]

#### 2.3. Το σύστημα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων του ΕΝΜ

Με την ολοκλήρωση της μελέτης και δοκιμής του συστήματος "The Doctor-DM8", σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε το νέο σύστημα μέτρησης πίεσης κυλίνδρου, αποτελούμενο τόσο από τον απαιτούμενο εξοπλισμό όσο και από το αντίστοιχο λογισμικό για την καταγραφή των δεδομένων της μέτρησης. Βασιζόμενο κυρίως στο ήδη εγκατεστημένο σύστημα μέτρησης πίεσης της κλίνης δοκιμών του ΕΝΜ (μονάδα AVL) αλλά και στην ανεξάρτητη φορητή μονάδα "The Doctor-DM8", το σύστημα σχεδιάστηκε σταδιακά, χρησιμοποιώντας τον διαθέσιμο από το εργαστήριο εξοπλισμό. Για τη προβολή, την επεξεργασία και την αποθήκευση των μετρήσεων στον Η/Υ, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα LabView, ως συνέχεια του ήδη υπάρχοντος VI για το σύστημα MU-Mk2.1 [23]. Με την ανάπτυξη του νέου αυτού συστήματος και τη σταδιακή αναβάθμισή του, επιτυγχάνεται τόσο η ευελιξία στη διαμόρφωση της λειτουργίας και των δυνατοτήτων του συστήματος, όσο και η ενσωμάτωσή του στο προϋπάρχον φορητό σύστημα διεξαγωγής συνδυασμένων μετρήσεων του ΕΝΜ (MU-Mk2.1).

#### Διάταξη & Συνδεσμολογία

Τα επιμέρους τμήματα του συστήματος για τη μέτρηση της πίεσης στον κύλινδρο καθώς και οι διαδοχικές μετατροπές του σήματος, φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα – Σχήμα 2.12:



Σχήμα 2.12 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος μέτρησης πίεσης κυλίνδρου του ΕΝΜ

Με βάση τα παραπάνω διαδοχικά μέρη της μετρητικής διάταξης του συστήματος, το σήμα της πίεσης μεταφέρεται σταδιακά έως ότου με τις κατάλληλες μετατροπές να καταγραφεί ως φυσικό μέγεθος στην οθόνη του Η/Υ. Οι καλωδιώσεις για τη συνδεσμολογία και την τροφοδοσία των παραπάνω συσκευών κατασκευάστηκαν στο ΕΝΜ, παρέχοντας τη δυνατότητα μεταφοράς των σημάτων σε μεγάλη απόσταση από το σημείο μέτρησης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται μια σχετική άνεση ως προς την τοποθέτηση του εξοπλισμού στο χώρο μιας μηχανολογικής εγκατάστασης (π.χ. μηχανοστάσιο πλοίου).

Οι παραπάνω μετατροπές καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του σήματος και από τα δεδομένα λειτουργίας των διαφόρων στοιχείων. Πιο αναλυτικά έχουμε:

Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας: Για κάθε πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα, ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του προκύπτει ένας συντελεστής ευαισθησίας (sensitivity), ορίζοντας τη γραμμική σχέση του παραγόμενου σήματος – pC/bar.

*Ενισχυτής*: Ο ενισχυτής σήματος, ενισχύει το σήμα της εισόδου με βάση κάποιο συντελεστή κλίμακας (scale), που συνήθως ορίζεται από το χρήστη μεταξύ ενός μεγάλου εύρους τιμών. Η τιμή που επιλέγεται σχετίζεται άμεσα με το εύρος των αναμενόμενων τιμών της μέτρησης και το εύρος του σήματος εξόδου του ενισχυτή. Συμπεριλαμβάνοντας τον συντελεστή ευαισθησίας του χρησιμοποιούμενου αισθητήρα, ο συντελεστής κλίμακας ορίζει τη γραμμική σχέση μεταξύ της μετρούμενης τιμής πίεσης και του σήματος στην έξοδο του ενισχυτή

Πολυζεύκτης: Ο αναλογικός πολυζεύκτης είναι μια συσκευή, που χρησιμοποιείται στην ηλεκτρολογία για τη μετατροπή αναλογικών σημάτων, τόσο ως προς τον τύπο (τάση / ρεύμα) όσο και ως προς το εύρος των τιμών του (π.χ. 0..10 V, ± 20mA κ.α.). Η εν λόγω μετατροπή πραγματοποιείται μέσω ενός εξωτερικά τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού κυκλώματος. Στην προκειμένη περίπτωση, ο πολυζεύκτης χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του σήματος από σήμα τάσης σε σήμα ρεύματος – (V→mA). Ανάλογα με το εύρος του σήματος εισόδου και το επιθυμητό εύρος του σήματος εξόδου, η μετατροπή γίνεται με κατάλληλη ρύθμιση του πολυζεύκτη, οπότε προκύπτουν και οι αντίστοιχοι συντελεστές που ορίζουν τη γραμμική σχέση της μετατροπής.

Σε σύγκριση με το υπάρχον σύστημα μέτρησης πίεσης της κλίνης δοκιμών του ΕΝΜ, που ακολουθεί τη συνήθη διάταξη (Σχήμα 2.5), το προς σχεδίαση σύστημα, λόγω ορισμένων περιορισμών, διαφέρει στα εξής:

28

#### 1. Χρήση πολυζεύκτη

Λόγω του ότι οι διαθέσιμες από το εργαστήριο κάρτες συλλογής δεδομένων - DAQ, δέχονται στην είσοδο αναλογικό σήμα ρεύματος (± 20 mA), ενώ το σήμα στην έξοδο του ενισχυτή είναι τάση (±

10 V), γίνεται χρήση ενός πολυζεύκτη – Φωτογραφία 2.3, ώστε να γίνει η κατάλληλη μετατροπή του σήματος (V → mA). Συγκεκριμένα, επιλέγεται ένας πολυζεύκτης υψηλής ταχύτητας, λόγω της υψηλής συχνότητας του σήματος της πίεσης στον κύλινδρο καθώς και λόγω της ανάγκης για αναλυτική καταγραφή του.



Φωτογραφία 2.3 Πολυζεύκτης της Phoenix Contact [24]

## 2. Απουσία Αισθητήρα γωνίας στροφάλου

Η καταγραφή της πίεσης με βάση αναφοράς τη γωνία του στροφάλου στο εύρος ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας της μηχανής, προϋποθέτει τη χρήση ενός αισθητήρα γωνίας στροφάλου. Αυτό χρησιμεύει, επίσης, τόσο για τον προσδιορισμό του ΑΝΣ, όσο και για τη βαθμονόμηση της μέτρησης με βάση κάποια από της μεθόδους που περιγράφηκαν παραπάνω. Στην περίπτωση, ωστόσο, της σχεδίασης ενός φορητού μετρητικού συστήματος, η ακριβής καταγραφή της γωνίας στροφάλου παρουσιάζει ορισμένες πρακτικές δυσκολίες, όπως είναι η εγκατάσταση ενός συστήματος ακριβούς προσδιορισμού του ΑΝΣ των κυλίνδρων μιας μηχανής. Για το λόγο αυτό, το εν λόγω σύστημα καταγράφει τη διακύμανση της πίεσης στο πεδίο του χρόνου. Η παρουσίαση των μετρήσεων ως συνάρτηση της γωνίας στροφάλου και η βαθμονόμηση τους μπορούν να γίνουν, ως εκ τούτου, μετά το πέρας των μετρήσεων στο στάδιο της επεξεργασίας τους στον Η/Υ. Εναλλακτικά, η παραπάνω επεξεργασία θα μπορούσε να γίνει με χρήση ενός σχετικού αλγόριθμου, ο οποίος θα τρέχει κατά τη διάρκεια της μέτρησης *(βλ. μονάδα The Doctor DM8, Automatic TDC adjustment [2]*) Ωστόσο, η πολυπλοκότητα ενός τέτοιου αλγόριθμου ξεπερνάει τα όρια της παρούσας εργασίας, αποτελώντας, ενδεχομένως αντικείμενο μιας μελοντικής μελέτης προς τη βελτιστοποίηση του συστήματος.

#### VI "InCylinder Pressure Measurement" στη LabView

Όπως αναφέρεται παραπάνω, μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων – DAQ, το αναλογικό σήμα της μέτρησης μετατρέπεται σε ψηφιακό. Στην πλατφόρμα προγραμματισμού LabView σχεδιάστηκε, λοιπόν, το VI "InCylinder Pressure Measurement" για την καταγραφή και την επεξεργασία του σήματος, με σκοπό την παρουσίαση και την αποθήκευση της αντίστοιχης μετρούμενης τιμής της πίεσης.

Αρχικά, επιλέχθηκε η συχνότητα δειγματοληψίας (sampling rate) και ο αριθμός των δεδομένων (samples to read). Πρόκειται για δύο πολύ σημαντικά μεγέθη τόσο για τη λειτουργία του προγράμματος, όσο και για τη μορφή του παραγόμενου αποτελέσματος. Στις περιπτώσεις της μέτρησης ενός "πυκνού" και γρήγορα εναλλασσόμενου μεγέθους, όπως αυτό της πίεσης στους κυλίνδρους μιας ΜΕΚ, υπάρχει ανάγκη για λεπτομερή καταγραφή του σήματος της μέτρησης, ώστε να αποτυπωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι διακυμάνσεις των τιμών και οι πληροφορίες που φέρουν. Ως εκ τούτου, η τιμή της συχνότητας δειγματοληψίας του προγράμματος επιλέχθηκε, έτσι ώστε, στην οριακή περίπτωση της λειτουργίας της μηχανής στις μέγιστες δυνατές στροφές, το σήμα να καταγράφεται με τέτοια ταχύτητα, όπου να αντιστοιχεί μια τιμή της πίεσης σε κάθε μια μοίρα γωνίας στροφάλου. Όπως είναι αντιληπτό, σε χαμηλότερες στροφές η καταγραφή του σήματος θα προκύπτει ακόμα πιο πυκνή.

Με βάση τα παραπάνω, για τη εφαρμογή του συστήματος στην κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ, ισχύει:

• Max RPM: 1200  
• 4-X
$$Sampling Rate = \frac{1200 rpm}{60 sec/min} \times \frac{1}{2} \times \frac{720^{\circ}}{cycle} = 7200 samples/sec$$

Η τιμή του αριθμού των δεδομένων καθορίζει, πλέον, με βάση την τιμή της συχνότητας δειγματοληψίας, την περίοδο επανάληψης της συλλογής δεδομένων από το πρόγραμμα. Για να έχουμε, λοιπόν, στην παραπάνω περίπτωση, ανανέωση της δειγματοληψίας κάθε ένα δευτερόλεπτο - 1 sec, επιλέγουμε,

Συνεχίζοντας τον σχεδιασμό του προγράμματος, ορίζουμε τους καταλλήλους συντελεστές (calibration factors), ώστε η τιμή του σήματος στην είσοδο του Η/Υ να μετατραπεί μέσω μιας εξίσωσης στην αντίστοιχη τιμή της μετρούμενης πίεσης (mA→bar). Οι συντελεστές αυτοί, όπως περιγράφεται παραπάνω, προκύπτουν με βάση της διαδοχικές μετατροπές που υφίσταται το σήμα από το σημείο της μέτρησης μέχρι την κάρτα DAQ. Στην περίπτωση, λοιπόν, του σχεδιαζόμενου συστήματος οι εν λόγω μετατροπές προκύπτουν, 1) από τον συντελεστή κλίμακας {scale} του ενισχυτή {bar→V} και 2) από τη σχέση μετασχηματισμού στον πολυζεύκτη {V→mA}. Λόγω της γραμμικότητας των παραπάνω σχέσεών, η συνολική εξίσωση μετασχηματισμού θα είναι μια γραμμική εξίσωση.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της μέτρησης της πίεσης στην κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ, ισχύουν:

- Κλίμακα ενισχυτή σήματος = 20 bar/V
- Μετασχηματισμός πολυζεύκτη (±10V → 0-20 mA): y(V) = 1000 x(A) 10



Σχήμα 2.13 Σχέση μετασχηματισμού του σήματος της πίεσης

Τέλος, η διακύμανση της μετρούμενης πίεσης παρουσιάζεται σε συνάρτηση του χρόνου σε ένα διάγραμμα και οι τιμές αποθηκεύονται σε ένα αρχείο txt για περεταίρω επεξεργασία και ανάλυση. Συμπληρωματικά, το πρόγραμμα υπολογίζει και παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του κάθε δείγματος δεδομένων της πίεσης.

Στις παρακάτω εικόνες – Σχήματα 2.14 & 2.15, φαίνεται το VI "InCylinder Pressure Measurement" που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα LabView.



Σχήμα 2.14 "InCylinder Pressure Measurement".vi Block Diagram



Σχήμα 2.15 "InCylinder Pressure Measurement".vi Front Panel

## 3. Μέτρηση Ισχύος Άξονα

# 3.1. Εισαγωγή

Η επιτόπου μέτρηση της παραγόμενης από μια μηχανή ισχύος στον άξονα αποτελεί την βασικότερη ένδειξη του επιπέδου της λειτουργίας της. Στην περίπτωση διεξαγωγής συνδυασμένων μετρήσεων σε μία μηχανολογική εγκατάσταση, η ισχύς αποτελεί, ως εκ τούτου, τη βάση αναφοράς των υπολοίπων μετρούμενων μεγεθών, μιας και αυτά σχετίζονται άμεσα με το φορτίο λειτουργίας της μηχανής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πιο άμεση και ακριβής μέθοδος για τη μέτρηση της ισχύος στον άξονα ενός κινητήρα βασίζεται στην ταυτόχρονη μέτρηση της ασκούμενης στον άξονα ροπής, *T* και της ταχύτητας περιστροφής, *RPM*. Η ισχύς, τότε, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$Power = Torque \times 2\pi \times \frac{RPM}{60}$$

#### 3.2. Μέτρηση Ροπής Άξονα

# 3.2.1. <u>Εισαγωγή</u>

Ο συνηθέστερος τρόπος για τη μέτρηση της ασκούμενης ροπής σε έναν περιστρεφόμενο άξονα βασίζεται στη χρήση ενός επιμηκυνσιόμετρου (strain gage) – Φωτογραφία 3.1. Πρόκειται για έναν αισθητήρα η λειτουργία του οποίου βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής του αντίστασης ανάλογα με την ασκούμενη σε αυτόν τάση. Πιο αναλυτικά, το επιμηκυνσιόμετρο αποτελείται από ένα λεπτό

σύρμα, το οποίο εφαπτόμενο στη μετρούμενη επιφάνεια δέχεται τις ασκούμενες σε αυτή τάσεις. Οι παραμορφώσεις που υφίσταται το σύρμα αλλάζουν τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, έχοντας ως αποτέλεσμα την ευθέος ανάλογη μεταβολή της ηλεκτρικής του αντίστασης – Σχήμα 3.1. Μετατρέποντας, τη μεταβολή αυτή της ηλεκτρικής αντίστασης μέσω



Φωτογραφία 3.1 Αισθητήρας επιμηκυνσιόμετρου [25]

ενός ηλεκτρικού κυκλώματος σε μεταβολή ηλεκτρικής τάσης παράγεται το σήμα της μέτρησης του αισθητήρα. Η εφαρμογή, λοιπόν, ενός τέτοιου αισθητήρα στον άξονα μιας μηχανής, μπορεί να καταγράψει τη διακύμανση της διατμητικής τάσης στην επιφάνειά του και επομένως την ασκούμενη στον άξονα στρεπτική ροπή.



Σχήμα 3.1 Αρχή λειτουργίας επιμηκυνσιόμετρου [26]

# 3.2.2. Το σύστημα μέτρησης ροπής άξονα του ΕΝΜ

Το σύστημα μέτρησης της ασκούμενης ροπής στον άξονα μηχανής που σχεδιάστηκε στο ΕΝΜ, αποτελεί το ένα από τα δύο επιμέρους συστήματα για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος μιας μηχανής. Ως τμήμα του ευρύτερου συστήματος συνδυασμένων μετρήσεων του ΕΝΜ, χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ο διαθέσιμος από το εργαστήριο εξοπλισμός, με σκοπό να ενσωματωθεί με τα υπόλοιπα επιμέρους τμήματα του συστήματος. Όπως και στην περίπτωση των υπολοίπων μετρήσεων, το πρόγραμμα για την καταγραφή, την επεξεργασία και την αποθήκευση του σήματος της ροπής στον Η/Υ σχεδιάστηκε στην πλατφόρμα LabView.

#### Διάταξη & Συνδεσμολογία

Τα επιμέρους τμήματα του συστήματος για τη μέτρηση της ροπής στον άξονα καθώς και οι διαδοχικές μετατροπές του σήματος, φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα – Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος μέτρησης ροπής άξονα του ΕΝΜ

Το παραπάνω σύστημα βασίζεται, ως επί το πλείστον, στη μονάδα μέτρησης ροπής TorqueTrak

10K της Binsfeld Engineering [27] -Φωτογραφία 3.2. Πρόκειται για μια συσκευή, η οποία λαμβάνοντας ασύρματα το σήμα στην έξοδο ενός επιμηκυνσιόμετρου, εφαρμόζει τους κατάλληλους μετασχηματισμούς δίνοντας στην έξοδό του, σήμα ευθέος τάσης ανάλογο της ασκούμενης στον άξονα ροπής. Παρά το γεγονός ότι η συσκευή συνοδεύεται από κατάλληλο λογισμικό για την παρουσίαση και



Φωτογραφία 3.2 Η μονάδα TorqueTrak 10K της Binsfeld Engineering [27]
την αποθήκευση των μετρούμενων τιμών της ροπής στον Η/Υ, για να ενσωματωθεί στο σχεδιαζόμενο σύστημα πολλαπλών μετρήσεων του ΕΝΜ, απαιτείται η σχεδίαση ενός νέου προγράμματος συμβατού με τα αντίστοιχα προγράμματα των υπολοίπων μετρήσεων. Ως εκ τούτου, το αναλογικό σήμα τάσης στην έξοδο της μονάδας TorqueTrak 10K, μεταφέρεται - μέσω μετατροπής σε κατάλληλα ρυθμισμένο πολυζεύκτη - στην κάρτα συλλογής δεδομένων της National Instruments (DAQ), όπου συλλέγονται τα σήματα όλων των μετρούμενων μεγεθών. Οι απαιτούμενες καλωδιώσεις κατασκευάστηκαν επιτρέποντας τη μεταφορά του σήματος σε μεγάλη απόσταση από το σημείο της μέτρησης.

## VI "Shaft Torque Measurement" στη LabView

Το VI "Shaft Torque Measurement", σχεδιασμένο στην πλατφόρμα LabView, χρησιμοποιείται για την προβολή και την αποθήκευση των μετρούμενων τιμών της ροπής στον άξονα, σε συνάρτηση του χρόνου. Συλλέγοντας τα δεδομένα της μέτρησης της ροπής μέσω επαναλαμβανόμενης δειγματοληψίας του σήματος που φθάνει στην κάρτα DAQ, το πρόγραμμα καταγράφει το σήμα ανάλογα με την επιθυμητή από τον χρήστη ταχύτητα (sampling rate). Εν συνεχεία, μετατρέπει τις τιμές αυτές του σήματος ρεύματος, μέσω κατάλληλου μετασχηματισμού, στις αντίστοιχες τιμές ροπής, τις οποίες παρουσιάζει στο πεδίο του χρόνου. Τέλος, τα δεδομένα της μέτρησης αποθηκεύονται σε ένα αρχείο txt.

Όσον αφορά στον μετασχηματισμό του σήματος, αυτός καθορίζεται, τόσο από τον συντελεστή αναλογίας της μετατροπής του σήματος στη μονάδα TorqueTrak 10K, όσο και από τη ρύθμιση του πολυζεύκτη. Ο συντελεστής της μονάδας TorqueTrak 10K υπολογίζεται κατά την εφαρμογή του αισθητήρα στον άξονα και τη βαθμονόμηση της μονάδας. Συγκεκριμένα, προκύπτει ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών του μετρούμενου άξονα (γεωμετρία, υλικό), του χρησιμοποιούμενου επιμηκυνσιόμετρου και της μέγιστης αναμενόμενης τιμής της μετρούμενης τοι μέγιστης αναμενόμενης τιμής της μετρούμενης μετρούμενου

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της μέτρησης της ροπής στον άξονα της κλίνης δοκιμών του ENM, ισχύουν:

- Συντελεστής μονάδας TorqueTrak 10K = 2.3 kNm/V
- Μετασχηματισμός πολυζεύκτη (±10V → 0-20 mA): y(V) = 1000 x(A) 10

36

Οπότε, προκύπτει, η ακόλουθη σχέση μετασχηματισμού:

## Y(kNm) = 2300 X(A) - 23



Σχήμα 3.3 Σχέση μετασχηματισμού του σήματος της ροπής

Στις παρακάτω εικόνες – Σχήματα 3.4 & 3.5, φαίνεται το VI "Shaft Torque Measurement" που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα LabView.



Σχήμα 3.4 "Shaft Torque Measurement".vi Block Diagram



Σχήμα 3.5 "Shaft Torque Measurement".vi Front Panel

## 3.3. Μέτρηση Ταχύτητας περιστροφής Άξονα

#### 3.3.1. <u>Εισαγωγή</u>

Η μέτρηση της ταχύτητας ενός περιστρεφόμενου άξονα διεξάγεται ως επί το πλείστον μέσω της λήψης ενός περιοδικού σήματος-παλμού, η συχνότητα του οποίου σχετίζεται άμεσα με την προς μέτρηση συχνότητα περιστροφής του άξονα – Σχήμα 3.6. Για την παραγωγή του σήματος-παλμού χρησιμοποιούνται ένα ή περισσότερα - περιστρεφόμενα μαζί με τον άξονα - σημεία αναφοράς, που

διέρχονται μπροστά από έναν σταθερό αισθητήρα. Όπως είναι αντιληπτό, στην περίπτωση του ενός σημείου αναφοράς, η συχνότητα του σήματος ισούται με τη συχνότητα περιστροφής του άξονα, μιας και το σήμα παράγεται ύστερα από κάθε πλήρη περιστροφή. Στην περίπτωση περισσότερων σημείων, η συχνότητα του άξονα είναι ακέραιο κλάσμα της συχνότητας του σήματος.



Σχήμα 3.6 Το περιοδικό σήμα-παλμός

Γενικά, λοιπόν, ισχύει,

$$f_{shaft} = rac{f_{signal}}{k}$$
, όπου k, ο αριθμός των σημείων αναφοράς

Ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου αισθητήρα, καθορίζεται και το είδος των σημείων αναφοράς. Στο προς σχεδίαση σύστημα μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής του ΕΝΜ

χρησιμοποιείται ένας επαγωγικός αισθητήρας ανίχνευσης μετάλλων (inductive proximity sensor) – Φωτογραφία 3.3. Σε αυτή, λοιπόν, την περίπτωση, ως σημεία αναφοράς λαμβάνονται μικρά μεταλλικά αντικείμενα στερεωμένα επί του άξονα. Μια καλή τακτική είναι η - όσο το δυνατόν εκμετάλλευση ήδη υπαρχόντων σημείων, όπως είναι οι κοχλίες σε κάποια φλάντζα του άξονα ή οι οδοντώσεις στον σφόνδυλο της μηχανής (flywheel) – Σχήμα 3.7. Με τον τρόπο



Φωτογραφία 3.3 Επαγωγικός αισθητήρας της Autonics [28]

αυτό αυξάνεται η ακρίβεια της μέτρησης, τόσο λόγο του μεγάλου αριθμού σημείων αναφοράς, όσο και λόγο της ακρίβειας της ισαπόστασής τους.

Η αρχή της λειτουργίας ενός επαγωγικού αισθητήρα (inductive sensor) βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού ως αποτέλεσμα της μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνειά που αυτός ορίζει. Στην λειτουργία ενός επαγωγικού αισθητήρα, το παραπάνω φαινόμενο λαμβάνει χώρα κάθε φορά που το, παραγόμενο από τον αισθητήρα, μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται λόγο της παρουσίας ενός μεταλλικού αντικειμένου εντός του πεδίου (δηλαδή, σε συγκεκριμένη απόσταση από την επιφάνεια του αισθητήρα) – Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού αισθητήρα στον σφόνδυλο μηχανής [28]

Πέραν των επαγωγικών αισθητήρων, για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής ενός άξονα χρησιμοποιούνται, συχνά, μαγνητικοί και οπτικοί αισθητήρες.

## 3.3.2. Το σύστημα μέτρησης ταχύτητας περιστροφής άξονα του ΕΝΜ

Το σύστημα μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής του άξονα μιας μηχανής αποτελεί το δεύτερο επιμέρους σύστημα για τον υπολογισμό της ισχύος. Όπως αναφέρθηκε και για το σύστημα μέτρησης ροπής, με χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού και τη σχεδίαση ενός VI στην πλατφόρμα LabView, το σύστημα θα αποτελέσει τμήμα μιας σειράς φορητών μετρητικών μονάδων.

## Διάταξη & Συνδεσμολογία

Τα επιμέρους τμήματα του συστήματος για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα καθώς και οι διαδοχικές μετατροπές του σήματος, φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα – Σχήμα 3.8:





Όπως και στις περιπτώσεις των υπόλοιπων μετρούμενων μεγεθών που παρουσιάζονται παραπάνω, η χρήση του πολυζεύκτη γίνεται για την απαραίτητη μετατροπή του σήματος από τάση σε ρεύμα, ώστε να μπορεί να καταγραφεί στη διαθέσιμη κάρτα DAQ.

## VI "Shaft RPM Measurement" στη LabView

Στην περίπτωση του συστήματος για την καταγραφή της ταχύτητας περιστροφής άξονα με χρήση ενός αισθητήρα επαγωγής, η πληροφορία της μέτρησης δε βρίσκεται, ως συνήθως, στην καθαυτή τιμή του σήματος, αλλά στη συχνότητα με την οποία αυτό εκπέμπεται. Ως εκ τούτου, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μετρούμενα μεγέθη, οι συντελεστές των διαφόρων μετασχηματισμών που υφίσταται το σήμα δεν έχουν πρακτική σημασία. Για τον εντοπισμό της ζητούμενης ταχύτητας περιστροφής απαιτείται, λοιπόν, ο σχεδιασμός ενός VI στην πλατφόρμα LabView, όπου με κατάλληλη επεξεργασία του σήματος των παλμών, θα υπολογίζεται η στιγμιαία συχνότητά του. Όπως αναφέρεται και παραπάνω, οι παλμοί εκπέμπονται κάθε φορά που ένα από τα σημεία αναφοράς του περιστρεφόμενου άξονα διέρχεται από το πεδίο ανίχνευσης του επαγωγικού αισθητήρα.

Ο σχεδιασμός του VI πραγματοποιήθηκε σταδιακά μέσω διαδοχικών επαναληπτικών δοκιμών σε μικρή περιστροφική μηχανή του ENM, με ευελιξία στη ρύθμιση των στροφών – Φωτογραφία 3.4.



Φωτογραφία 3.4 Ο ηλεκτροκινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές στο ΕΝΜ

Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας του VI "Shaft RPM Measurement" βασίζεται στον υπολογισμό της στιγμιαίας συχνότητας περιστροφής του άξονα, μέσω του υπολογισμού του χρονικού διαστήματος, δt μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών στο σήμα του αισθητήρα. Ο εν λόγω υπολογισμός για το σύνολο των εντοπισθέντων παλμών ανά επανάληψη του VI, περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{shaft} = \frac{\left[\frac{loop[\delta t]}{n_{pulses}}\right]^{-1}}{k},$$

όπου, f<sub>shaft</sub>, η στιγμιαία συχνότητα περιστροφής του άξονα δt, το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών n<sub>pulses</sub>, ο αριθμός των εντοπισθέντων παλμών ανά επανάληψη (loop) k, ο αριθμός των σημείων αναφοράς Μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας δειγματοληψίας (loop), το VI συλλέγει το εκπεμπόμενο από τον αισθητήρα σήμα και εντοπίζει τους παλμούς που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της εκάστοτε επανάληψης καθώς επίσης και τις χρονικές στιγμές όπου αυτοί έλαβαν χώρα\*. Στη συνέχεια, αφού το VI υπολογίσει το δt για κάθε ζευγάρι διαδοχικών παλμών που εντοπίστηκαν – Σχήμα 3.9, εφαρμόζει την παραπάνω σχέση. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει σε κάθε επανάληψη του loop μια μέση τιμή της στιγμιαίας συχνότητας περιστροφής του άξονα.



Σχήμα 3.9 Τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών παλμών σε μια επανάληψη



\*Για τον εντοπισμό των παλμών και της χρονικής στιγμής όπου αυτοί λαμβάνουν χώρα, το VI χρησιμοποιεί το υπό-VI "PeakDetector". Το υπό-VI, αναγνωρίζει ως «παλμό» κάθε διακύμανση του σήματος η οποία ξεπερνάει την τιμή ενός κατώτατου opίoυ (threshold) για αριθμό δεδομένων μεγαλύτερο-ίσο της τιμής ενός εύρους δεδομένων (width). Εν συνεχεία, το υπο-VI υπολογίζει, τη χρονική στιγμή όπου εντοπίστηκε ο εκάστοτε παλμός.

Η παραπάνω μέθοδος υπολογισμού της ταχύτητας περιστροφής άξονα από το σήμα επαγωγικού αισθητήρα, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις όπου,

- i. εντοπίζεται ένας μόνον παλμός κατά τη διάρκεια κάποιας επανάληψης (loop)
- ii. δεν εντοπίζεται παλμός κατά τη διάρκεια κάποιας επανάληψης

,μιας και στις παραπάνω περιπτώσεις δε μπορεί να ορισθεί το μέγεθος δt στο σήμα της επανάληψης.

Όσον αφορά, λοιπόν, στην πρώτη περίπτωση, το VI σχεδιάστηκε έτσι ώστε να υπολογίζει το ζητούμενο για την εφαρμογή του παραπάνω τύπου δt, χρησιμοποιώντας - πέραν του εντοπισθέντος παλμού (επανάληψη N) - τον τελευταίο παλμό που εντοπίστηκε στην μόλις προηγούμενη επανάληψη (επανάληψη N-1) – Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 Ο υπολογισμός του δt στην περίπτωση εντοπισμού ενός μόνο παλμού

Σχετικά με τη δεύτερη περίπτωση, όπου δεν εντοπίζεται παλμός εντός του χρονικού διαστήματος κάποιας επανάληψης, το VI σχεδιάστηκε ώστε να μην εκτελεί τον ζητούμενο υπολογισμό (το αποτέλεσμα του οποίου θα ήταν άπειρο, ∞), αλλά να παρουσιάζει την τελευταία σωστά υπολογισμένη συχνότητα, μέχρι και τον εντοπισμό ενός νέου παλμού σε επόμενη επανάληψη, οπότε και θα μπορεί να πραγματοποιηθεί εκ νέου ο υπολογισμός. Στην περίπτωση αυτή, το γραφικό λάθος, που θα προέκυπτε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε συνάρτηση του χρόνου, καλύπτεται μέσω παρεμβολής της περιοχής λανθασμένων τιμών με μια ευθεία γραμμή.

Το ενδεχόμενο εμφάνισης μιας εκ των δύο παραπάνω περιπτώσεων, (όπου εντοπίζεται ένας ή κανένας παλμός κατά τη διάρκεια κάποιας επανάληψης), εξαρτάται αποκλειστικά από τη σχέση μεταξύ των τιμών της μετρούμενης συχνότητας (shaft frequency) και της συχνότητας της επανάληψης του VI (loop frequency).

Πιο συγκεκριμένα,

- Εάν f<sub>shaft</sub> > f<sub>loop</sub> / k , δεν εμφανίζονται παλμοί σε όλες τις επαναλήψεις, ενώ, όποτε εμφανίζεται παλμός, είναι ο μοναδικός εντός της επανάληψης (περίπτωση ii).
- Eáv  $f_{shaft} \approx f_{loop} / k$ , εμφανίζεται ένας παλμός ανά επανάληψη (περίπτωση i).
- Εάν  $f_{shaft} < f_{loop} / k$ , εμφανίζονται τουλάχιστον δύο παλμοί ανά επανάληψη.

# 

Rate, η ταχύτητα συλλογής δεδομένων του VI Samples to read, ο αριθμός των δεδομένων που συλλέγονται σε κάθε επανάληψη του VI k, ο αριθμός των σημείων αναφοράς

Από τα παραπάνω, προκύπτει, λοιπόν, μια οριακή-ελάχιστη τιμή της προς μέτρηση συχνότητας περιστροφής του άξονα,  $f_{\text{limit}} = f_{loop} / k$ , κάτω από την οποία, το VI αδυνατεί να εκτελέσει σωστούς υπολογισμούς.

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση της τιμή του f<sub>limit</sub>, επιτρέποντας στο πρόγραμμα να υπολογίσει ακόμα χαμηλότερες τιμές ταχύτητας περιστροφής, απαιτείται:

1. Μείωση της ταχύτητας δειγματοληψίας, Sampling Rate = Rate/Samples to Read.

Από την τιμή του Sampling Rate καθορίζεται η συχνότητα της επαναληπτικής διαδικασίας του προγράμματος (loop), και επομένως η συχνότητα ανανέωσης των αποτελεσμάτων. Επιθυμώντας, η τιμή της μετρούμενης ταχύτητας περιστροφής να ανανεώνεται τακτικά, θεωρούμε ως ελάχιστη αποδεκτή τιμή του Sampling Rate το 1Hz. Ως εκ τούτου θέτουμε τον εξής περιορισμό: S.R.≥ 1Hz

## 2. Αύξηση του αριθμού των σημείων αναφοράς, k.

Στην περίπτωση όπου τα σημεία αναφοράς τοποθετούνται επί τόπου πάνω στον άξονα πριν τη μέτρηση, προτιμάται η χρήση μόνον ενός σημείου αναφοράς, προς αποφυγή τυχόν λαθών κατά την ευθυγράμμιση περισσοτέρων. Επομένως, θέτουμε τον περιορισμό, *k=1*.

Λόγω των παραπάνω δύο περιορισμών, η ελάχιστη τιμή του fmin προκύπτει:

$$f_{min} = \frac{1 Hz}{1} = 1 Hz = 60 RPM$$

Βάση των παραπάνω, το VI προβάλει το αποτέλεσμα της μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής του άξονα σε συνάρτηση του χρόνου και παράλληλα αποθηκεύει τις μετρήσεις σε ένα αρχείο txt. Συμπληρωματικά, παρουσιάζεται το σήμα των παλμών που φθάνει από τον επαγωγικό αισθητήρα.

Στις παρακάτω εικόνες – Σχήματα 3.11 & 3.12, φαίνεται το VI *"Shaft RPM Measurement"* που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα LabView.







Το παραπάνω σύστημα μέτρησης της ισχύος στον άξονα, αποτελούμενο από τα δύο υποσυστήματα (μέτρησης ροπής άξονα & μέτρησης ταχύτητας περιστροφής άξονα), σχεδιάστηκε με σκοπό τη βελτιστοποίηση του προϋπάρχοντος συστήματος MU-MK2.1 και συγκεκριμένα για την αντιμετώπιση του προβλήματος που εντοπίστηκε όσον αφορά στην ταυτόχρονη καταγραφή και επεξεργασία των σημάτων ροπής, ταχύτητας περιστροφής και ρύπων. Αυτό επιτεύχθηκε χάρη στη μετατροπή των σημάτων από ψηφιακά σε αναλογικά (χρήση εξόδου αναλογικού σήματος στο σύστημα TorqueTrak 10K και νέου επαγωγικού αισθητήρα με αναλογικό σήμα εξόδου). Ως εκ τούτου, ήταν πλέον δυνατόν, τα σήματα να οδηγηθούν στις κάρτες DAQ της NI, όπως γινόταν για τα σήματα της μέτρησης των ρύπων από τους αναλυτές, καθιστώντας την καταγραφή τους από ένα κοινό VI στην πλατφόρμα LabVIEW μη προβληματική.

## 4. Μετρήσεις Ρύπων στα Καυσαέρια

### 4.1. Εισαγωγή

Η διεξαγωγή μετρήσεων ρύπων στα καυσαέρια που εκπέμπονται κατά τη λειτουργία μιας μηχανολογικής εγκατάστασης αποτελεί πλέον ένα από τα χρησιμότερα εργαλεία, τόσο για τον έλεγχο της εκπομπής ρύπων - με σκοπό τον περιορισμό τους, όσο και για σκοπούς βελτιστοποίησης και διαγνωστικής στους κινητήρες αυτούς. Οι εν λόγω μετρήσεις αφορούν είτε στο συνολικό μίγμα των καυσαερίων (μέτρηση παροχής, πίεσης, θερμοκρασίας), είτε στα επιμέρους συστατικά του (μέτρηση περιεκτικότητας σε ρύπους, οξυγόνο, νερό κ.α.), ενώ λαμβάνουν χώρα είτε επί τόπου μέσω παρεμβολής αισθητήρων στη ροή των καυσαερίων, είτε σε εξωτερικούς αναλυτές με χρήση δειγματοληπτικού προβόλου – Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης διεξαγωγής μετρήσεων στα καυσαέρια

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, το προς σχεδίαση σύστημα μετρήσεων στα καυσαέρια αποτελείται από τρείς επιμέρους μονάδες:

- $\circ$  Μονάδα μέτρησης ρύπων CO<sub>2</sub>/CO/SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>/NO/O<sub>2-dry</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>
- $\circ$  Αισθητήρες μέτρησης O<sub>2 wet</sub>
- Μηχάνημα μέτρησης ταχύτητας καυσαερίων

## 4.2. Μέτρηση Περιεκτικότητας Ρύπων στα Καυσαέρια

Το τμήμα του συνολικού συστήματος που αφορά στη μέτρηση της περιεκτικότητας των καυσαερίων σε αέριους ρύπους, αποτέλεσε αντικείμενο παλαιότερης διπλωματικής εργασίας του ENM [23]. Ως εκ τούτου, όσον αφορά σε λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά, την εγκατάσταση και τη λειτουργία των φορητών μονάδων συλλογής και ανάλυσης των καυσαερίων, γίνεται παραπομπή στο κείμενο της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Η σχεδίαση του VI "Emissions Measurement" σε πλατφόρμα LabView για τη συλλογή, την παρουσίαση και την αποθήκευση των μετρήσεων στον Η/Υ, βασίστηκε αποκλειστικά στο προϋπάρχον VI που παρουσιάζεται στην προαναφερθείσα εργασία [23].

Περιληπτικά, το σύστημα αποτελείται από μια σειρά αναλυτών της ABB – Φωτογραφία 4.1, οι οποίοι επεξεργάζονται δείγμα των εκλυόμενων καυσαερίων και υπολογίζουν την περιεκτικότητά του στις ακόλουθες χημικές ενώσεις:

- ο Διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>
- ο Μονοξείδιο του άνθρακα CO
- Διοξείδιο του θείου SO₂
- ο Οξείδια του αζώτου NO<sub>x</sub>
- Μονοξείδιο του αζώτου ΝΟ
- Οξυγόνο Ο<sub>2-dry</sub>
- Προπάνιο C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

Το εν λόγω δείγμα συλλέγεται και μεταφέρεται στους αναλυτές μέσω ενός δειγματολήπτη που παρεμβάλλεται στη ροή των καυσαερίων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκεντρώνονται στην έξοδο των αναλυτών σε μορφή αναλογικών σημάτων ρεύματος, τα οποία συλλέγονται από τις κάρτες DAQ και διαβάζονται από το αντίστοιχο VI της LabView στον Η/Υ – Σχήματα 4.2 & 4.3.



Φωτογραφία 4.1 Η μονάδα μέτρηση ρύπων του ΕΝΜ



Σχήμα 4.2 "Emissions Measurement".vi Block Diagram



Σχήμα 4.3 "Emissions Measurement".vi Front Panel

## 4.3. Μέτρηση Περιεκτικότητας Η<sub>2</sub>Ο στα Καυσαέρια

## 4.3.1. <u>Εισαγωγή</u>

Μια σημαντική παράμετρος που απαιτείται κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων στα καυσαέρια μιας μηχανολογικής εγκατάστασης, είναι το ποσοστό της υγρασίας στο εξεταζόμενο δείγμα. Ανάλογα με τα προς μέτρηση μεγέθη και τις αντίστοιχες μεθόδους που χρησιμοποιούνται, η ανάλυση του δείγματος των καυσαερίων ενδέχεται να πραγματοποιείται είτε σε «ξηρό» (dry), είτε σε «υγρό» (wet) περιβάλλον. Οι μετρήσεις που γίνονται σε «ξηρό» περιβάλλον αφορούν σε δείγμα, το οποίο πριν εκτεθεί στον αναλυτή ψύχεται, ώστε να αφαιρεθεί η ποσότητα του νερού που περιέχεται σε αυτό. Αντιθέτως, οι μετρήσεις που γίνονται σε «υγρό» περιβάλλον αφορούν σε δείγμα που εισέρχεται στον αναλυτή (ή αισθητήρα) με κάποιο ποσοστό υγρασίας. Για να γίνει, λοιπόν, άμεση σύγκριση μετρήσεων συγκεκριμένου παράγοντα (π.χ. Ο<sub>2</sub>) ο οποίος μετρήθηκε σε «ξηρό» αλλά και σε «υγρό» περιβάλλον, χρειάζεται γνώση της περιεκτικότητας του νερού στο δείγμα αυτό. Αντίστοιχα, εάν χρησιμοποιούνται δύο μηχανήματα για τη μέτρηση του ίδιου παράγοντα ταυτόχρονα σε «ξηρό» και «υγρό» και «υγρό» περιβάλλον, τότε η διαφορά τους δίνει άμεσα την περιεκτικότητα του νερού στο δείγμα.

## 4.3.2. Το σύστημα μέτρησης H<sub>2</sub>O στα Καυσαέρια του ENM

Ο υπολογισμός της περιεκτικότητας των καυσαερίων σε νερό, H<sub>2</sub>O, βασίζεται αποκλειστικά στη μέτρηση της περιεκτικότητας ξηρού (dry) και υγρού (wet) οξυγόνου στα καυσαέρια, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\% H_2 O = \frac{\% O_{2 dry} - \% O_{2 wet}}{\% O_{2 dry}} \times 100$$

## Μέτρηση Ο<sub>2 dry</sub>

Η μέτρηση του O<sub>2 dry</sub> στα καυσαέρια γίνεται από τους αναλυτές ρύπων της ABB. Πιο συγκεκριμένα, οι αναλυτές εφαρμόζουν τις εξής δύο μεθόδους για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας του O<sub>2 dry</sub>:

- i. Παραμαγνητική μέθοδος, Paramagnetic Detector (PMD)
- ii. Ηλεκτροχημική μέθοδος, Electrochemical Sensor (ECS)

## Μέτρηση Ο<sub>2 wet</sub>

Η μέτρηση του O<sub>2 wet</sub> στα καυσαέρια επιτεύχθηκε με τη χρήση δύο διαθέσιμων από το εργαστήριο αισθητήρων Smart NOx Sensors (SNS) της Continental – Φωτογραφία 4.2, οι οποίοι

παρεμβάλλονται στη ροή των καυσαερίων. Όπως φαίνεται και από την ονομασία των αισθητήρων, η κύρια χρησιμότητά τους είναι η μέτρηση της περιεκτικότητας των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) στα καυσαέρια. Ωστόσο, η αρχή λειτουργίας τους [29] προϋποθέτει και την παράλληλη μέτρηση της περιεκτικότητας του O<sub>2 wet</sub>.



Φωτογραφία 4.2 Ο αισθητήρας SNS της Continental [29]

## Διάταξη & Συνδεσμολογία

Τα επιμέρους τμήματα του συστήματος για τη μέτρηση της περιεκτικότητας του νερού στα καυσαέρια καθώς και οι διαδοχικές μετατροπές του σήματος, φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα – Σχήμα 4.4:





Όπως αναφέρεται παραπάνω, οι αισθητήρες SNS τοποθετούνται στο εσωτερικό του αγωγού των καυσαερίων, διεξάγοντας τη μέτρηση επί τόπου εντός της ροής. Για τη στήριξή τους στο επιθυμητό σημείο εντός του αγωγού, χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένοι μεταλλικοί πρόβολοι που εισάγονται κάθετα στην επιφάνεια του αγωγού – Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης αισθητήρα O2 SNS στον αγωγό των καυσαερίων

Τα δεδομένα της μέτρησης του O<sub>2 wet</sub> δίδονται στην έξοδο των αισθητήρων σε μορφή αναλογικού σήματος τάσης. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση κατάλληλα ρυθμισμένων πολυζευκτών για τη μετατροπή του σήματος από τάση σε ρεύμα και την καταγραφή του από τις διαθέσιμες κάρτες DAQ της NI.

## VI "H<sub>2</sub>O Measurement" στη LabView

Το VI "H<sub>2</sub>O Measurement", σχεδιασμένο σε πλατφόρμα LabView, εφαρμόζει τον υπολογισμό της περιεκτικότητας του H<sub>2</sub>O με βάση τον τύπο που περιγράφεται παραπάνω. Αρχικά καταγράφονται και παρουσιάζονται οι τιμές της μέτρησης των O<sub>2 dry</sub> (PMD) και O<sub>2 wet</sub> (SNS1,2) από τις οποίες, εν συνεχεία, προκύπτει η αντίστοιχη τιμή του H<sub>2</sub>O. Τέλος, η διακύμανση των μεγεθών προβάλλεται και σε μορφή διαγραμμάτων στον άξονα του χρόνου, ενώ τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο txt για περεταίρω ανάλυση και επεξεργασία.

56

Οι σχέσεις για τη μετατροπή των σημάτων σε φυσικά μεγέθη (% vol.) προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά βαθμονόμησης των αισθητήρων/αναλυτών και στην περίπτωση των αισθητήρων SNS και από τις ρυθμίσεις στους πολυζεύκτες. Επομένως, προκύπτουν:

Μέτρηση Ο<sub>2 dry</sub> - Αναλυτής ABB:

Y(%) = 1562.2 X(A) - 6.25



Σχήμα 4.6 Σχέση μετασχηματισμού του σήματος του O<sub>2 dry</sub>

Μέτρηση O<sub>2 wet</sub> - Αισθητήρας SNS & Πολυζεύκτης:

Y(%) = 2062.5 X(A) - 20.25

Σχήμα 4.7 Σχέση μετασχηματισμού του σήματος του O<sub>2 wet</sub>

Στις παρακάτω εικόνες – Σχήματα 4.8 & 4.9, φαίνεται το VI "H<sub>2</sub>O Measurement" σχεδιασμένο στην πλατφόρμα LabView.



Σχήμα 4.8 "H<sub>2</sub>O Measurement".vi Block Diagram



Σχήμα 4.9 "H<sub>2</sub>O Measurement".vi Front Panel

### 4.4. Μέτρηση Ταχύτητας Καυσαερίων

#### 4.4.1. <u>Εισαγωγή</u>

Στο πλαίσιο του υπολογισμού των ποσοτήτων των εκλυόμενων ρύπων από τη λειτουργία ενός πλοίου απαιτείται αρχικά, σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς, ο προσδιορισμός της παροχής μάζας των καυσαερίων [14]. Ως εκ τούτου, ο αμεσότερος τρόπος υπολογισμού της εν λόγω παροχής είναι η επί τόπου μέτρηση της ταχύτητας των καυσαερίων στον αγωγό εξόδου. Η παροχή μάζας των καυσαερίων δίδεται, στην περίπτωση αυτή, από την εξής σχέση:

EGFlow 
$$\frac{kg}{s} = EGFlow \frac{m}{s} \times \frac{D}{2}^{-2} \times \pi \times \rho \times pf$$

όπου, D, η διάμετρος του αγωγού

ρ, η πυκνότητα των καυσαερίων

και pf (profile factor), συντελεστής σχετικός με το προφίλ της ταχύτητας του ρευστού εντός του αγωγού στο σημείο της μέτρησης.

Οι κανονισμοί, ωστόσο, ορίζουν και μια προσεγγιστική μέθοδο για τον υπολογισμό της παροχής των καυσαερίων, η οποία, εκτός των άλλων, περιλαμβάνει το μέγεθος της κατανάλωσης του καυσίμου, q<sub>MF.</sub> Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χημική αντίδραση της καύσης και συγκεκριμένα στην ισορροπία του άνθρακα (carbon-balance method) [14].

Το ΕΝΜ αξιοποιώντας τη δυνατότητα άμεσης μέτρησης της παροχής των καυσαερίων και χρησιμοποιώντας αντίστροφα τη σχέση της παραπάνω μεθόδου [14], αποσκοπεί με τον τρόπο αυτό στην ανάπτυξη μίας μεθόδου έμμεσου υπολογισμού της κατανάλωσης του καυσίμου, q<sub>MF</sub>, μιας μηχανής [30].

## 4.4.2. Το σύστημα μέτρησης Ταχύτητας Καυσαερίων του ΕΝΜ

Για τη διεξαγωγή της μέτρησης της ταχύτητας των καυσαερίων μιας μηχανής, κατά τη έξοδό τους, μέσω αγωγού, προς το περιβάλλον, χρησιμοποιείται ο διαθέσιμος από το εργαστήριο αισθητήρας μέτρησης ροής της Höntzsch – Σχήμα 4.10. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, ο αισθητήρας αποτελείται από μια έλικα προσαρτημένη στο άκρο ενός προβόλου. Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα βασίζεται στην περιστροφή της έλικας ως αποτέλεσμα της κίνησης του ρευστού που την περιβάλλει και στη γραμμική σχέση που συνδέει την ταχύτητα περιστροφής, με την ταχύτητα του ρευστού. Μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, παράγεται από τον αισθητήρα αναλογικό σήμα ρεύματος, ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής και, επομένως, ανάλογο και της ταχύτητας της ροής του ρευστού.



Σχήμα 4.10 Ο αισθητήρας μέτρησης ροής ρευστού της Höntzsch [31]

## Διάταξη & Συνδεσμολογία

Τα επιμέρους τμήματα του συστήματος για τη μέτρηση της ταχύτητας των καυσαερίων καθώς και οι διαδοχικές μετατροπές του σήματος, φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα – Σχήμα 4.11. Ο πρόβολος του αισθητήρα εισάγεται κάθετα στον αγωγό καυσαερίων από την ειδικά διαμορφωμένη οπή στην επιφάνειά του, επιτρέποντας έτσι την παρεμβολή του αισθητήρα-έλικα στο επιθυμητό σημείο εντός της ροής. Η αεροστεγής κάλυψη της οπής και η συγκράτηση του προβόλου στο σημείο μέτρησης, εξασφαλίζονται μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου για τον σκοπό αυτό προσαρμογέα [30] – Φωτογραφία 4.3. Εν συνεχεία, το σήμα της μέτρησης μεταφέρεται μέσω καλωδιώσεων στην κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) και τον Η/Υ.



Φωτογραφία 4.3 προσαρμογέας στήριξης του αισθητήρα μέτρησης Ροής Ρευστού της Höntzsch [30]



Σχήμα 4.11 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος μέτρησης ταχύτητας καυσαερίων του ΕΝΜ

Το VI "EG Flow Measurement" σχεδιάστηκε σε πλατφόρμα LabView με σκοπό τη συλλογή των δεδομένων της μέτρησης της ταχύτητας των καυσαερίων, τη γραφική απεικόνιση της διακύμανσής της και την αποθήκευση των τιμών της προς μελλοντική επεξεργασία. Με βάση τις πληροφορίες από το τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα σχετικά με τη σχέση αναλογίας του μετρούμενου μεγέθους (ταχύτητα ρευστού - m/s) και του παραγόμενου από τον αισθητήρα ηλεκτρικού σήματος (αναλογικό σήμα ρεύματος - A), το VI εφαρμόζει την κατάλληλη μετατροπή.

Ισχύει, δηλαδή:



Y(m/s) = 7200 X(A) - 28.8

Σχήμα 4.12 Σχέση μετασχηματισμού του σήματος της ταχύτητας

Τέλος, το VI υπολογίζει ταυτόχρονα την παροχή των καυσαερίων, βασιζόμενο στη μετρούμενη ταχύτητα και στις τιμές της διαμέτρου του αγωγού (D) ,της πυκνότητας των καυσαερίων (ρ) και του συντελεστή pf, που θα ορίσει ο χρήστης.

Στις παρακάτω εικόνες – Σχήματα 4.13 & 4.14, φαίνεται το VI "EG Flow Measurement " που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα LabView.



Σχήμα 4.13 "EG Flow Measurement".vi Block Diagram





Το παραπάνω σύστημα μετρήσεων στα καυσαέρια αποτελεί αναβάθμιση του προϋπάρχοντος συστήματος μέτρησης ρύπων του συνολικού συστήματος MU-Mk2.1. Πέραν από τους αναλυτές ρύπων, προστέθηκαν στο σύστημα οι μονάδες μέτρησης υγρασίας και ταχύτητας στα καυσαέρια. Τα νέα σήματα οδηγήθηκαν στις κάρτες DAQ της NI, ώστε να καταγράφονται παράλληλα με τα σήματα μέτρησης ρύπων και ισχύος σε ένα κοινό VI.

## 5. Διεξαγωγή Μετρήσεων

#### 5.1. Εισαγωγή

Στο ακόλουθο κεφάλαιο παρουσιάζονται, το ολοκληρωμένο μετρητικό σύστημα που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο ΕΝΜ, η διεξαγωγή και τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην κλίνη δοκιμών και τέλος, η επίσκεψη και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Ε/Γ – Ο/ Γ πλοίο Speedrunner III της Aegean Speed Lines.

### 5.2. Το ολοκληρωμένο σύστημα μετρητικών μονάδων του ΕΝΜ

Με σκοπό τη δυνατότητα διεξαγωγής συνδυασμένων μετρήσεων, τόσο στην κλίνη δοκιμών του ENM, όσο και στην προωστήρια εγκατάσταση του πλοίου, με χρήση των μετρητικών συστημάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, σχεδιάστηκε ένα κοινό VI στην πλατφόρμα LabVIEW (Παράρτημα B2). Το εν λόγω VI συλλέγει ταυτοχρόνως τα σήματα από όλες τις μετρητικές μονάδες και εν συνεχεία, επεξεργάζεται, προβάλει και αποθηκεύει ολόκληρο τον όγκο των δεδομένων της μέτρησης.

## Διάταξη & Συνδεσμολογία

Τα επιμέρους υποσυστήματα που συνθέτουν το συνολικό φορητό σύστημα μονάδων είναι:

- 1. Μονάδα Μέτρησης Πίεσης Κυλίνδρων
- 2. Μονάδα Μέτρησης Ροπής στον Άξονα και Ισχύος Κινητήρα
  - a. Μονάδα Μέτρησης Ροπής στον Άξονα
  - b. Μονάδα Μέτρησης Ταχύτητας Περιστροφής Άξονα
- 3. Μονάδα Μέτρησης Ρύπων
  - a. Mov $\alpha\delta\alpha$  Métρησης NOx, CO, CO<sub>2</sub>, Sox, HCs, O<sub>2-dry</sub>
  - b. Μονάδα Μέτρησης Οξυγόνου (wet) στα Καυσαέρια
  - c. Μονάδα Μέτρησης Ταχύτητας Καυσαερίων
- 4. Μονάδα Μέτρησης Συνθηκών Περιβάλλοντος (Πίεσης, Θερμοκρασίας και Υγρασίας)\*

\*Η μονάδα μέτρησης των συνθηκών περιβάλλοντος, περιλαμβάνεται συμπληρωματικά για τον ακριβή προσδιορισμό των συνθηκών αναφοράς κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Στο ακόλουθο σχήμα – Σχήμα 5.1, φαίνεται η πλήρης διάταξη του μετρητικού εξοπλισμού του συστήματος.



Σχήμα 5.1 Σχηματική απεικόνιση συστήματος συνδυασμένων μετρήσεων του ΕΝΜ

## 5.3. Μετρήσεις στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας Ε.Μ.Π.

#### 5.3.1. <u>Εισαγωγή</u>

Έχοντας πλέον ολοκληρωθεί η σχεδίαση και η σύνθεση του φορητού συστήματος συνδυασμένων μετρήσεων επί μηχανολογικής εγκατάστασης, ακολουθεί η παρουσίαση των διαδοχικών μετρήσεων που διεξήχθησαν στην κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ. Σκοπό των μετρήσεων αποτέλεσε, τόσο ο έλεγχος της λειτουργίας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος όσο και η προετοιμασία του εξοπλισμού για την εφαρμογή του επί της μηχανολογικής εγκατάστασης πλοίου. Παράλληλα, οι συνδυασμένες μετρήσεις στην κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ απέφεραν σημαντικό όγκο δεδομένων για τη λειτουργία του κινητήρα του εργαστηρίου, συντελώντας στον εμπλουτισμό της ήδη υπάρχουσας βάσης δεδομένων.

Συγκεκριμένα, έγιναν οι ακόλουθες μετρήσεις:

- Μέτρηση Πίεσης Κυλίνδρου
- Μέτρηση Ισχύος στον Άξονα, (ροπής και ταχύτητας περιστροφής)
- Μετρήσεις Ρύπων στα Καυσαέρια,
  - Μέτρηση Περιεκτικότητας NOx, CO, CO<sub>2</sub>, Sox, HCs, O<sub>2-dry</sub>
  - Μέτρηση Περιεκτικότητας H<sub>2</sub>O (O<sub>2-dry</sub>, O<sub>2-wet</sub>)
  - Μέτρηση Ταχύτητας Καυσαερίων
- Μέτρηση Συνθηκών Περιβάλλοντος Πίεση/Θερμοκρασία/Υγρασία

#### 5.3.2. Προετοιμασία εξοπλισμού

Η προετοιμασία του μετρητικού εξοπλισμού για τη διεξαγωγή δοκιμών στην κλίνη του ΕΝΜ, αποτελείται από την τοποθέτηση των διαφόρων αισθητηρίων στα εκάστοτε σημεία μέτρησης και από τη σύνδεση των καλωδίων για τη μεταφορά των σημάτων στον Η/Υ. Με σκοπό την όσο το δυνατόν πληρέστερη προσομοίωση των συνθηκών ενός μηχανοστασίου πλοίου - βάση των οποίων η μέτρηση στα καυσαέρια ενδέχεται να πραγματοποιείται σε σημείο μακριά από τον κινητήρα – επιλέχθηκε, ως σημείο συλλογής των μετρήσεων, το Χημείο του εργαστηρίου. Στο παρακάτω σχέδιο - Σχήμα 5.1, φαίνονται, σε τομή του κτηρίου του ΕΝΜ, η κλίνη δοκιμών, ο αγωγός των καυσαερίων, το σημείο συλλογής δεδομένων στον Η/Υ (Χημείο) και οι καλωδιώσεις μεταφοράς των σημάτων.



Σχήμα 5.1 Τομή του κτηρίου του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας [32]

Σημείο Συλλογής Σημάτων – Η/Υ
Κλίνη Δοκιμών - MAN-B&W L16/24 – Φωτογραφία 5.1
Αγωγός Καυσαερίων
Καλωδιώσεις Μεταφοράς Σημάτων



Φωτογραφία 5.1 Η κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ

## Μέτρηση Πίεσης Κυλίνδρων

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της πίεσης στον κύλινδρο, τόσο το σύστημα που σχεδιάστηκε στο ENM, όσο και η αυτόνομη μονάδα μέτρησης "The Doctor-DM8" της Fuchs Technology. Η μέτρηση της πίεσης πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός ήδη εγκατεστημένου πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα 6052C της Kistler στον κύλινδρο No. 1 του κινητήρα δοκιμών - Φωτογραφία 5.2.



Φωτογραφία 5.2 Εγκατάσταση Αισθητήρα Πίεσης στον κύλινδρο Νο.1 της κλίνης δοκιμών του ΕΝΜ

Το σήμα της μέτρησης διερχόμενο, εν συνεχεία, από έναν ενισχυτή 5011B της Kistler οδηγείται:

- 1. στην κάρτα DAQ και τον Η/Υ μέσω ενός πολυζεύκτη, στην περίπτωση του συστήματος του ΕΝΜ.
- 2. στη μονάδα "The Doctor-DM8", στην περίπτωση του συστήματος της Fuchs Technology.\*

\*στην περίπτωση χρήσης του συστήματος της Fuchs Technology, η σύνδεση του ενισχυτή με τη μονάδα "The Doctor-DM8" γίνεται μέσω ενός ειδικά για το σκοπό αυτό τροποποιημένου καλωδίου της Festo (Παράρτημα Α8)

## Μέτρηση Ροπής στον Άξονα

Η μέτρηση της ροπής στον άξονα του κινητήρα δοκιμών πραγματοποιήθηκε με χρήση του συστήματος TorqueTrak 10K της Binsfeld Engineering. Ακολουθώντας τις οδηγίες το εγχειριδίου χρήσης του συστήματος, εφαρμόστηκαν επί του άξονα, το επιμηκυνσιόμετρο, η μονάδα ασύρματης εκπομπής του σήματος και η μπαταρία [23]. Το σήμα της μέτρησης οδηγείται στη συνέχεια μέσω πολυζεύκτη στην κάρτα DAQ και τον Η/Υ.

## Μέτρηση Ταχύτητας περιστροφής Άξονα

Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα μετρήθηκε με χρήση ενός επαγωγικού αισθητήρα, ο οποίος στερεώθηκε μέσω ειδικού βραχίονα δίπλα στον περιστρεφόμενο άξονα –

Φωτογραφία 5.3. Επί του άξονα τοποθετήθηκε μεταλλικό αντικείμενο (παξιμάδι) ως σημείο αναφοράς για τη μέτρηση. Το σήμα της μέτρησης οδηγείται στη συνέχεια μέσω πολυζεύκτη στην κάρτα DAQ και τον H/Y.





Φωτογραφία 5.3 Εγκατάσταση Επαγωγικού Αισθητήρα στον άξονα της κλίνης δοκιμών του ΕΝΜ

## Μέτρηση Περιεκτικότητας Ρύπων & O2-dry

Η μέτρηση της περιεκτικότητας των ρύπων στα καυσαέρια και του ξηρού οξυγόνου πραγματοποιήθηκε μέσω δειγματοληψίας στον αγωγό των καυσαερίων του κινητήρα δοκιμών. Ο

δειγματολήπτης τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του αγωγού καυσαερίων μέσω οπής και συγκρατήθηκε με χρήση ειδικά σχεδιασμένων κοχλιών [23] – Φωτογραφία 5.4. Το σήμα της μέτρησης στην έξοδο των αναλυτών οδηγείται, εν συνέχεια, στην κάρτα DAQ και τον Η/Υ. Στο πλαίσιο της προετοιμασίας των αναλυτών για τη διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε, επίσης, βαθμονόμηση τους, με χρήση φιαλών αερίων στο Χημείο του εργαστηρίου.



Φωτογραφίας 5.4 Θέση δειγματολήπτη στον αγωγό καυσαερίων της L16/24
#### Μέτρηση Περιεκτικότητας O2-wet

Η μέτρηση της περιεκτικότητας του οξυγόνου στα καυσαέρια πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτηση των αισθητήρων SNS στο εσωτερικό του αγωγού των καυσαερίων του κινητήρα δοκιμών. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο κέντρο περίπου του αγωγού και στηρίχθηκαν στο κέλυφος του αγωγού με χρήση ειδικών προσαρμογέων (adaptors) – Φωτογραφία 5.5. Το σήμα της μέτρησης οδηγείται στη συνέχεια μέσω πολυζεύκτη στην κάρτα DAQ και τον Η/Υ.



Φωτογραφία 5.5 Εγκατάσταση Αισθητήρων SNS στον αγωγό καυσαερίων της κλίνης δοκιμών του ΕΝΜ

#### Μέτρηση Ταχύτητας Καυσαερίων

Η μέτρηση της ταχύτητας των καυσαερίων πραγματοποιήθηκε μέσω άμεσης παρεμβολής του αισθητήρα ροής της Höntzsch στο εσωτερικό του αγωγού των καυσαερίων του κινητήρα δοκιμών. Ο πρόβολος του αισθητήρα τοποθετήθηκε στο επιθυμητό σημείο μέτρησης με χρήση ειδικά σχεδιασμένου κοχλία συγκράτησης [30] - Φωτογραφία 5.6. Το σήμα της μέτρησης οδηγείται στη συνέχεια στην κάρτα DAQ και τον Η/Υ.



Φωτογραφία 5.6 Εγκατάσταση Αισθητήρα Μέτρησης Ταχύτητας Καυσαερίων στον αγωγό καυσαερίων της κλίνης δοκιμών του ΕΝΜ

# 5.3.3. <u>Επισκόπηση δοκιμών</u>

Στον ακόλουθο πίνακα – Πίνακας 5.1, φαίνονται οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο των διαδοχικών δοκιμών που διεξήχθησαν στο ΕΝΜ για την ανάπτυξη και βελτίωση του συστήματος.

Μετρούμενο Μέγεθος	14/6/2011	20/6/2011	23/6/2011	1/7/2011	5/7/2011
In Cylinder Pressure (The Doctor)	-	-	-	-	x
In Cylinder Pressure (ENM)	x	x	x	X	-
RPM	x	x	x	X	-
Torque	x	x	x	X	-
Power	x	x	x	X	-
EG Flow	-	x	x	-	-
CO <sub>2</sub>	-	-	x	X	-
СО	-	-	x	X	-
СО	-	-	x	X	-
SO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-
$C_3H_8$	-	-	x	X	-
NO <sub>x</sub>	-	-	x	X	-
NO	-	-	x	X	-
O <sub>2</sub> ECS	-	-	x	X	-
O <sub>2</sub> PMD	-	-	x	x	-
O <sub>2</sub> SNS 1	-	-	x	-	-
O <sub>2</sub> SNS 2	-	-	x	x	-
H <sub>2</sub> O	-	-	x	x	-
Ambient Pressure	x	x	x	X	-
Ambient Temperature	x	x	x	X	-
Ambient Humidity	X	X	X	X	-

Πίνακας 5.1 Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ENM

#### 5.3.4. Αποτελέσματα Δοκιμών

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ από τις μετρήσεις στις 23/6/2011.

Όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2°, το σύστημα που σχεδιάστηκε στο ΕΝΜ για τη μέτρηση της πίεσης στους κυλίνδρους μιας μηχανής, δεν πραγματοποιεί άμεσα την απαιτούμενη διόρθωση του σήματος ώστε να μετατραπεί σε φυσικό μέγεθος. Για το λόγο αυτό, απαιτείται επεξεργασία των δεδομένων στον Η/Υ, ώστε τα αποτελέσματα να διορθωθούν σε σχέση με το σημείο αναφοράς (δηλ. την πίεση του αέρα στο σύστημα εισαγωγής) αλλά και το ΑΝΣ.

Ο καθορισμός του ΑΝΣ στην L 16/24 προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν με ειδικό αργαλειό του εργαστηρίου, το οποίο προμηθεύτηκε από την ΑVL. Στην περίπτωση απουσίας τεχνητών μέσων για τον προσδιορισμό του ΑΝΣ μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπολογιστικές μέθοδοι, όπως αυτή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2° ("The Doctor-DM8" - Automatic TDC Adjustment).



Σχήμα 5.2 Διαγράμματα Ρ-φ πολλαπλών κύκλων



Σχήμα 5.3 Μ.Ο διαγραμμάτων Ρ-φ πολλαπλών κύκλων



Σχήμα 5.4 Διαγράμματα μέτρησης Ταχύτητας περιστροφής, Ροπής Άξονα και Ισχύος Κινητήρα



# Σχήμα 5.5 Διάγραμμα μέτρησης Ταχύτητας Καυσαερίων



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα μέτρησης Ρύπων στα Καυσαέρια



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα μέτρησης «ξηρού» και «υγρού» Οξυγόνου στα καυσαέρια



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα μέτρησης Νερού στα καυσαέρια

Συσχετίζοντας μεταξύ τους τα αποτελέσματα των μετρήσεων, όπως αυτά παρουσιάζονται στα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται εμφανής η αλληλεξάρτηση των διαφόρων μεγεθών και ιδιαιτέρα, η επίδραση της αλλαγής του επιπέδου φόρτισης του κινητήρα στη διακύμανση των τιμών τους.

<u>Ταχύτητα περιστροφής, Ροπή & Ισχύς άξονα</u>: Οι καμπύλες της ταχύτητας περιστροφής, της ροπής και της ισχύος του άξονα περιγράφουν τη διακύμανση της λειτουργίας του κινητήρα καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής των συνδυασμένων μετρήσεων της εν λόγω δοκιμής. Πρόκειται για τα μεγέθη τα οποία ελέγχονται από το Δωμάτιο Ελέγχου (Control Room), όπου και ρυθμίζεται πλήρως η λειτουργία του κινητήρα. Όπως φαίνεται, λοιπόν, από το αντίστοιχο διάγραμμα (Σχήμα 5.4), στο πλαίσιο της δοκιμής πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικές εκκινήσεις του κινητήρα. Στην πρώτη, το επιβαλλόμενο φορτίο έφθασε μόλις στο 15% της μέγιστης τιμής του, ενώ στη δεύτερη η διακύμανση του φορτίου ήταν η εξής: 10%, 50%, 75%, 90%, 25% και 50%.

<u>Πίεση κυλίνδρου</u>: Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η σταδιακή αύξηση των επιπέδων της πίεσης στο εσωτερικό του κυλίνδρου, ως αποτέλεσμα της ανάλογης αύξησης του φορτίου στον άξονα του κινητήρα. Όπως είναι αναμενόμενο, για την κάλυψη της αυξημένης απαίτησης σε ισχύ, η μηχανή αναπτύσσει όλο και μεγαλύτερη δύναμη στην επιφάνεια του πιστονιού, δηλαδή, μεγαλύτερη μέγιστη πίεση στο εσωτερικό των κυλίνδρων.

<u>Ταχύτητα καυσαερίων:</u> Η διακύμανση των τιμών της ταχύτητας των καυσαερίων είναι αναλόγη με αυτή της φόρτισης του κινητήρα. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, μιας και η παροχή των καυσαερίων εξαρτάται άμεσα από την παροχή του αέρα εισαγωγής, η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη της ταχύτητας λειτουργίας και της ισχύος του κινητήρα.

Περιεκτικότητα CO: Παρατηρώντας τη διακύμανση των επιπέδων CO στο μίγμα των καυσαερίων ως συνάρτηση της φόρτισης του κινητήρα, γίνεται εμφανής η σημαντική αύξηση των τιμών στα χαμηλά φορτία και στις περιοχές μεταβατικού φορτίο (εκκίνηση κινητήρα, 10%, 25%, αποφόρτιση κινητήρα). Αυτό συμβαίνει λόγω του φαινομένου της ατελούς καύσης (πλούσια καύση – μικρός λόγος αέρα/καυσίμου) στο εσωτερικό των κυλίνδρων, μιας και ο κινητήρας λειτουργεί σε επίπεδα μακριά από το σημείου συνεχούς λειτουργίας (MCR). Όσον αφορά σε μεγαλύτερες τιμές ισχύος, η περιεκτικότητα του CO παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα και σχετικά σταθερή, ως αποτέλεσμα της σχεδόν τέλειας καύσης του μίγματος αέρα καυσίμου προς το σχηματισμό CO<sub>2</sub>.

<u>Περιεκτικότητα CO<sub>2</sub>:</u> Όπως αναφέρεται και παραπάνω, στις υψηλές καταστάσεις φόρτισης του κινητήρα (σημείο λειτουργίας κοντά στο MCR), η καύση στο εσωτερικό των κυλίνδρων είναι σχεδόν

82

τέλεια. Με βάση λοιπόν τη χημική αντίδραση της καύσης υδρογονανθράκων (προπανίου C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), ο περιεχόμενος στο καύσιμο άνθρακας μετατρέπεται πλήρως σε CO<sub>2</sub>. Τα παραπάνω επεξηγούν την παράλληλη διακύμανση των επιπέδων CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια του κινητήρα σε συσχέτιση με τις διαδοχικές καταστάσεις φόρτισης.

Περιεκτικότητα NOx: Η δημιουργία του μίγματος οξειδίων του αζώτου (NO, NO<sub>2</sub>) στα καυσαέρια αποτελούμενο κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από NO, είναι αποτέλεσμα της οξείδωσης του αζώτου N<sub>2</sub> που περιέχεται στον αέρα εισαγωγής. Η αύξηση επομένως της παροχής αέρα επιφέρει ανάλογη αύξηση στα επίπεδα NOx. Επίσης, σύμφωνα με το μηχανισμό σχηματισμού των NOx (μηχανισμός Zeldovich), τα επίπεδα NOx εξαρτώνται άμεσα από τα επίπεδα της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας κατά τη διεργασία της καύσης. Ως εκ τούτου, οι τιμές της περιεκτικότητας των NOx είναι ανάλογες του επιπέδου φόρτισης, όπως άλλωστε είναι εμφανές και στο αντίστοιχο διάγραμμα (σχήμα 5.6)

<u>Περιεκτικότητα C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></u>: Παρατηρώντας το διάγραμμα της διακύμανσης των άκαυστων υδρογονανθράκων C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (σχήμα 5.6) φαίνεται η άμεση σύνδεση της αύξησης των τιμών τους με τις περιοχές μεταβατικής φόρτισης του κινητήρα. Μακροσκοπικά, η αύξηση του φορτίου επιφέρει ανάλογη αύξηση των C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, ως αποτέλεσμα της αντίστοιχης αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου. Ωστόσο, όσο πιο απότομη είναι η αλλαγή του φορτίου, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αύξηση της περιεκτικότητας C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, λόγω της πλούσιας καύσης (μικρός λόγος αέρα καυσίμου) που συντελείται στους κυλίνδρους τη μηχανής.

Περιεκτικότητα O<sub>2</sub>: Σε γενικές γραμμές η αύξηση του φορτίου στον κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της περιεκτικότητας του οξυγόνου στα καυσαέρια. Στην περίπτωση του O<sub>2</sub> συμβαίνει, ουσιαστικά, το αντίθετο απ' ότι περιγράφηκε σχετικά με τη διακύμανση των C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. Η σχεδόν τέλεια καύση έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλά επίπεδα εναπομένοντος οξυγόνου, ενώ στις περιπτώσεις ατελούς καύσης (χαμηλά ή/και μεταβατικά φορτία), μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου παραμένει στα καυσαέρια. Οι μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων καμπυλών του O<sub>2</sub> (wet: SNS-1,2 & dry: ECS,PMD) οφείλονται στη μέθοδο μέτρησης και στο αντίστοιχα επίπεδα της υγρασίας.

<u>Περιεκτικότητα H<sub>2</sub>O:</u> Όπως φαίνεται από την αντίστοιχη καμπύλη (σχήμα 5.8) η αύξηση του H<sub>2</sub>O κυμαίνεται παράλληλα με τη φόρτιση του κινητήρα, ως αποτέλεσμα της αντίστοιχης αύξησης της παροχής αέρα εισαγωγής και της μείωσης των επιπέδων του O<sub>2</sub> στα καυσαέρια. Οι απότομες στιγμιαίες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις περιοχές μεταβατικού φορτίου οφείλονται καθαρά

83

στη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αισθητήρων (PMD, SNS-1). Ο πρώτος βρίσκεται στους αναλυτές και «αντιλαμβάνεται» την αλλαγή του O<sub>2</sub> (οπότε και του φορτίου) με κάποια μικρή καθυστέρηση (χρόνος μεταφοράς δείγματος στον αναλυτή μέσω γραμμής δειγματοληψίας) σε σχέση με τον δεύτερο, ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό του αγωγού καυσαερίων, όπου η ανάλυση του O<sub>2</sub> γίνεται άμεσα.

Η διεξαγωγή των παραπάνω δοκιμών στην κλίνη του ΕΝΜ αποτέλεσε την απαιτούμενη προεργασία και προετοιμασία στο πλαίσιο της ανάπτυξης του συνολικού μετρητικού συστήματος για την προγραμματισμένη επίσκεψη και διεξαγωγή συνδυασμένων μετρήσεων στο Ε/Γ –Ο/Γ πλοίο Speedrunner III της Aegean Speed Lines.

#### 5.4. Μετρήσεις στο Ε/Γ – Ο/Γ Speedrunner III Aegean Speed Lines

#### 5.4.1. <u>Εισαγωγή</u>

Με σκοπό την ολοκληρωμένη επίτευξη συνδυασμένων μετρήσεων σε ναυτικούς κινητήρες πλοίων, το ΕΝΜ κανόνισε τη διεξαγωγή μετρήσεων ρύπων, ισχύος και πίεσης στους κυλίνδρους σε κινητήρα ενός από τα πλοία της ναυτιλιακής εταιρείας Aegean Speed Lines. Η διεξαγωγή των μετρήσεων θα ολοκληρωθεί σε δύο μέρη και γίνεται στο πλαίσιο ερευνητικού έργου σε συνεργασία με την πλοιοκτήτρια εταιρεία. Ως μέρος, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε η πρώτη επίσκεψη στο Ε/Γ – Ο/Γ πλοίο, "Speedrunner III" της Aegean Speed Lines – Φωτογραφία 5.7. Στο πλαίσιο της πρώτης αυτής δοκιμής, διεξήχθησαν μετρήσεις επί της μιας εκ των τεσσάρων κυρίων μηχανών πρόωσης του πλοίου καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού.

Συγκεκριμένα, έγιναν οι ακόλουθες μετρήσεις:

- Μέτρηση Πίεσης Κυλίνδρων
- Μέτρηση Ισχύος στον Άξονα (ροπής και ταχύτητας περιστροφής)



Φωτογραφία 5.7 Το Ε/Γ – Ο/Γ Speedrunner III της Aegean Speed Lines [33]

#### 5.4.2. Προετοιμασία εξοπλισμού

Η προετοιμασία του μετρητικού εξοπλισμού πραγματοποιήθηκε σε πρώτο στάδιο στο ΕΝΜ, όπου συγκεντρώθηκαν και συσκευάστηκαν όλες οι απαιτούμενες συσκευές καθώς και ο βοηθητικός εξοπλισμός, με σκοπό να μεταφερθούν με ευκολία και ασφάλεια στο πλοίο. Κατά την ολονύκτια παραμονή του πλοίου στο λιμάνι του Πειραιά, πριν από τον προγραμματισμένο απόπλου στις 07.35 π.μ., ο μετρητικός εξοπλισμός μεταφέρθηκε και εγκαταστάθηκε στο μηχανοστάσιο του πλοίου, όπου βρισκόταν ο προς μέτρηση προωστήριος κινητήρας.

#### Μέτρηση Πίεσης Κυλίνδρων

Η μέτρηση της πίεσης των κυλίνδρων στη μία εκ των τεσσάρων μηχανών πρόωσης του πλοίου, διεξήχθη με χρήση του φορητού συστήματος "The Doctor-DM8" της Fuchs Technology. Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης Kistler 6613CA του συστήματος εφαρμόστηκε διαδοχικά - με χρήση του ειδικού προσαρμογέα στο *Indicator cock* κάθε κυλίνδρου – Φωτογραφία 5.8.



Φωτογραφία 5.8 Εγκατάσταση Αισθητήρα Πίεσης στο Indicator cock κυλίνδρου με χρήση ειδικού προσαρμογέα

#### Μέτρηση Ροπής στον Άξονα / Μέτρηση Ταχύτητας περιστροφής Άξονα

Ο άξονας όπου κρίθηκε δυνατό να πραγματοποιηθεί η μέτρηση, βρίσκεται μετά και από το μειωτήρα της εγκατάστασης. Η μέτρηση της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής, διεξήχθησαν με χρήση του φορητού συστήματος TorqueTrack 10K της Binsfeld Engineering. Εφαρμόστηκαν επί του άξονα, το επιμηκυνσιόμετρο (strain gage), η μονάδα ασύρματης εκπομπής του σήματος, η μπαταρία καθώς επίσης και ο επαγωγικός αισθητήρας του συστήματος [23] - Φωτογραφία 5.9. Για τη συλλογή, την επεξεργασία και την αποθήκευση του σήματος των μετρήσεων στον φορητό Η/Υ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του συστήματος, Οp-Torq Field Test.



Φωτογραφία 5.9 Εγκατάσταση συστήματος TorqueTrak 10Κ στον άξονα της μηχανής

#### 5.4.3. <u>Επισκόπηση δοκιμών</u>

Η διεξαγωγή των μετρήσεων επί του πλοίου πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του προγραμματισμένου από την εταιρεία δρομολογίου, όπως αυτό παρουσιάζεται στον ακόλουθο σχήμα – Σχήμα 5.31



Σχήμα 5.9 Το ημερήσιο δρομολόγιο του Ε/Γ – Ο/Γ Speedrunner III [33&34]

Πιο συγκεκριμένα, η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του άξονα μετρήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού, ενώ η μέτρηση της πίεσης διεξήχθη διαδοχικά και στους 20 κυλίνδρους της υπό μέτρηση μηχανής. Οι συνθήκες λειτουργίας της μηχανής κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στους κυλίνδρους, κατόπιν ενημέρωσης από τον Α' Μηχανικό του πλοίου, ήταν κατά μέσον όρο:

- Φορτίο: 94%
- Ταχύτητα περιστροφής: 940 rpm (ταχύτητα περιστροφής μετρούμενου άξονα μετά το μειωτήρα: 554 rpm)

#### 5.4.4. Αποτελέσματα δοκιμών

#### Μέτρηση Πίεσης Κυλίνδρων

Στα παρακάτω διαγράμματα – Σχήματα 5.10 & 5.11 παρουσιάζονται, ενδεικτικά, ορισμένα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πίεσης κυλίνδρων στη μηχανή του Ε/Γ – Ο/ Γ Speedrunner III. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν στο μέσο όρο 350 κύκλων που πάρθηκαν από κάθε κύλινδρο.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων πίεσης στους 20 κυλίνδρους της μηχανής, παρουσιάζονται οι εξής διαφοροποιήσεις:

#### 1. Διακύμανση Μέγιστης Πίεσης

Η διακύμανση της μέγιστης πίεσης που μετρήθηκε απ' όλους τους κυλίνδρους ήταν:

- Bank Α: από 138 bar μέχρι 157 bar, με τους κυλίνδρους Α3 (138 bar), Α4 και Α10 (144 bar) να δίνουν τις χαμηλότερες πιέσεις.
- Bank Β: από 149 bar μέχρι 159 bar, με τους κυλίνδρους B4 και B8 (149 bar) να δίνουν τις χαμηλότερες πιέσεις.

#### 2. Διακύμανση ΑΝΣ (TDC)

Η διακύμανση μεταξύ των τιμών του ΑΝΣ που εντοπίσθηκαν για κάθε κύλινδρο, οφείλεται στη δυσλειτουργία του αλγόριθμου "Automatic TDC Adjustment" του λογισμικού "The Doctor PC Software". Όπως, άλλωστε, αναφέρεται και στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού, ο εν λόγω αλγόριθμος δεν είναι τελειοποιημένος στην παρούσα έκδοση του συστήματος.

Πέραν των παραπάνω γενικών παρατηρήσεων που αφορούν στο σύνολο των μετρήσεων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετρήσεις των κυλίνδρων **A2, A8** και **B5.** Η θερμοκρασία των καυσαερίων που καταγράφονταν από το σύστημα διαχείρισης της μηχανής ήταν σε φυσιολογικά επίπεδα κατόπιν συζήτησης με τους μηχανικούς του πλοίου. Με βάση αυτή την πληροφορία, με μια πρώτη εκτίμηση, η προβληματική ένδειξη της πίεσης στους κυλίνδρους A2, A8 και B6 φαίνεται να οφείλεται σε βλάβη (μικρής ή μεγαλύτερης έκτασης) στο Indicator cock των κυλίνδρων. Η εισήγηση, λοιπόν, του εργαστηρίου προς τη ναυτιλιακή εταιρεία ήταν η επιδιόρθωση ή και αλλαγή των indicator cocks στους συγκεκριμένους κυλίνδρους και η επανάληψη της μέτρησης.







Σχήμα 5.11 **Μ.Ο.** διαγραμμάτων Ρ-φ των κυλίνδρων **B1-B10** 





Με βάση τις διακυμάνσεις των καμπυλών στο παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 5.12) διακρίνονται οι εξής διαδοχικές φάσεις του ταξιδιού:

- 1. Αναχώρηση από το λιμάνι του Πειραιά
- 2. Πορεία εντός του διαύλου περιορισμένης ταχύτητας του Σαρωνικού Κόλπου
- Προσέγγιση στο λιμάνι της Σύρου Αναχώρηση από το λιμάνι της Σύρου
- 4. Προσέγγιση στο λιμάνι της Τήνου Αναχώρηση από το λιμάνι της Τήνου
- 5. Προσέγγιση στο λιμάνι της Μυκόνου Αναχώρηση από το λιμάνι της Μυκόνου
- 6. Προσέγγιση στο λιμάνι της Σύρου Αναχώρηση από το λιμάνι της Σύρου
- 7. Προσέγγιση στο λιμάνι του Πειραιά

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αναχωρήσεις από τα λιμάνια συνδέονται από αντίστοιχη αύξηση των μεγεθών (ταχύτητα περιστροφής, ροπή και ισχύς) ως αποτέλεσμα της επιτάχυνσης του πλοίου. Αντιστοίχως, η επιβράδυνση του πλοίου κατά την προσέγγιση κάποιου λιμανιού αποτυπώνεται με τη μείωση των τιμών των μεγεθών. Όσον αφορά στις φάσεις του ταξιδιού όπου το πλοίο εκτελούσε μανούβρες εντός τον λιμανιών για την προσέγγιση στην προβλήτα και την πρόσδεσή του, οι απότομες επιταχύνσεις και οι αντίστοιχες απότομες αυξομειώσεις στην ισχύ του κινητήρα είναι εμφανείς στο παραπάνω διάγραμμα και με ακόμα μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο ακόλουθο μεγεθυμένο τμήμα (*Προσέγγιση στο λιμάνι του Πειραιά,7*) – Σχήμα 5.13



Σχήμα 5.13 Λεπτομέρεια τμήματος 7 από τα διαγράμματα μέτρησης Ταχύτητας περιστροφής, Ροπής Άξονα και Ισχύος Κινητήρα Πλοίου

#### 6. Συμπεράσματα - Προοπτικές βελτίωσης

Με την επιτυχημένη διεξαγωγή συνδυασμένων μετρήσεων στην κλίνη δοκιμών του ENM και την πραγματοποίηση της πρώτης επίσκεψης στο Ε/Γ – Ο/Γ πλοίο Speedrunner III της Aegean Speed Lines, ολοκληρώνεται η παρούσα διπλωματική εργασία.

Συγκρίνοντας το προϋπάρχον φορητό σύστημα συνδυασμένων μετρήσεων MU-Mk2.1, με την βελτιωμένη - αναβαθμισμένη έκδοση MU-Mk3, προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

MU-Mk2.1 (προϋπάρχον σύστημα)	MU-Mk3 (νέα έκδοση)
<ul> <li>Μονάδα Μέτρησης Ρύπων στα Καυσαέρια</li> <li>Μονάδα Μέτρησης Ισχύος στον Άξονα</li> <li>Λογισμικό καταγραφής &amp; επεξεργασίας δεδομένων των παραπάνω μονάδων (LabVIEW VI)</li> </ul>	<ul> <li>Μονάδα Μέτρησης Ρύπων στα Καυσαέρια</li> <li>Μονάδα Μέτρησης Ισχύος στον Άξονα (με προσθήκη νέου επαγωγικού αισθητήρα)</li> <li>Μονάδα Μέτρησης Πίεσης Κυλίνδρου</li> <li>Μονάδα Μέτρησης Υγρασίας στα Καυσαέρια</li> <li>Μονάδα Μέτρησης Ταχύτητας Καυσαερίων</li> <li>Νέο Λογισμικό καταγραφής &amp; επεξεργασίας δεδομένων των παραπάνω μονάδων(LabVIEW VI)</li> </ul>

Ως αποτέλεσμα της εκτεταμένης χρήσης του βελτιωμένου φορητού συστήματος μετρητικών μονάδων του ENM και της μονάδας "The Doctor-DM8" της Fuchs Technology στο πλαίσιο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτουν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα.

Σχετικά με το συνολικό σύστημα συνδυασμένων μετρήσεων που σχεδιάστηκε στο ΕΝΜ, επιτεύχθηκε η δημιουργία μιας κοινής πλατφόρμας ταυτόχρονης συλλογής, επεξεργασίας, προβολής και αποθήκευσης των μετρούμενων μεγεθών στον Η/Υ. Η συγκέντρωση όλων των σημάτων σε κάρτες DAQ της NI επέτρεψε τον σχεδιασμό ενός ενιαίου LabVIEW VI, αντιμετωπίζοντας έτσι το προϋπάρχον πρόβλημα κατά την ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων από διαφορετικές μετρητικές μονάδες.

Το νέο σύστημα μέτρησης της πίεσης κυλίνδρου που σχεδιάστηκε βασιζόμενο στον διαθέσιμο από το εργαστήριο εξοπλισμό, ενσωματώθηκε επιτυχώς στο προϋπάρχον ευρύτερο σύστημα, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων - μετά και την επεξεργασία τους στον Η/Υ - περιγράφουν με ικανοποιητική ανάλυση τη διακύμανση της πίεσης στο εσωτερικού του μετρούμενου κυλίνδρου. Ωστόσο, ακόμα εντοπίζονται ορισμένα σημεία όπου απαιτείται βελτιστοποίηση του συστήματος και τα οποία αναφέρονται στο ακόλουθο κεφάλαιο.

Όσον αφορά στις μονάδες μέτρησης της ροπής στον άξονα και της ταχύτητας περιστροφής του, η μεταφορά των σημάτων στον Η/Υ μετατράπηκε από ψηφιακή σε αναλογική, απαλλάσσοντας το ευρύτερο σύστημα από τα προβλήματα που παρουσιάζονταν στη λειτουργία του προϋπάρχοντος LabVIEW VI. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένας νέος επαγωγικός αισθητήρας για την καταγραφή της συχνότητας περιστροφής του άξονα και σχεδιάστηκε ένα εξ ολοκλήρου νέο LabVIEW VI.

Το σύστημα μέτρησης ρύπων στα καυσαέρια αναβαθμίστηκε με την προσθήκη δύο ακόμα μετρητικών μονάδων για τη μέτρηση της ταχύτητας των καυσαερίων και της υγρασίας στο εσωτερικό του αγωγού.

Τέλος, η χρήση της φορητής μονάδας μέτρησης της πίεσης κυλίνδρου, "The Doctor-DM8", πρόβαλε εμπράκτως τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας και των δυνατοτήτων του συστήματος. Ως εκ τούτου, κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη των διαθέσιμων από την κατασκευάστρια εταιρεία αισθητήρων για την καταγραφή της γωνίας στροφάλου και τον ακριβή εντοπισμό του ΑΝΣ.

Με βάση τα προβλήματα που εντοπίσθηκαν στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, καθώς επίσης και τα παραπάνω συμπεράσματα, προκύπτουν οι ακόλουθες προοπτικές βελτίωσης των χρησιμοποιούμενων συστημάτων, αφορώντας τόσο σε σχεδιαστικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο. Τα εν λόγω σημεία, θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικών διπλωματικών εργασιών.

#### Σύστημα Μέτρησης Πίεσης Κυλίνδρου

Προσθήκη αισθητήρα γωνίας στροφάλου και εντοπισμού ΑΝΣ: Η καταγραφή της γωνίας στροφάλου και ο προσδιορισμός του ΑΝΣ του μετρούμενου κυλίνδρου αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για τη βελτιστοποίηση του συστήματος μέτρησης πίεσης. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατή η στιγμιαία βαθμονόμηση του σήματος της πίεσης στο διάγραμμα Ρ-φ, παράλληλα με τη διεξαγωγή της εκάστοτε μέτρησης. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει, επίσης, να διαμορφωθεί κατάλληλα το VI "Pressure Measurement", που σχεδιάστηκε στην πλατφόρμα LabVIEW, ώστε το

95

σήμα της μετρούμενης πίεσης να προβάλλεται βαθμονομημένο ως συνάρτηση της γωνίας στροφάλου.

- Σχεδιασμός/Βελτιστοποίηση αλγορίθμου TDC adjustment: Στην περίπτωση όπου δε διατίθενται αισθητήρες καταγραφής της γωνίας στροφάλου και εντοπισμού του ΑΝΣ, η βαθμονόμηση του σήματος της πίεσης και η προβολή του στο διάγραμμα P-φ, προκύπτει ως αποτέλεσμα επεξεργασίας στον Η/Υ. Με χρήση ενός προγράμματος στον Η/Υ όπου θα εντοπίζει το ΑΝΣ του κυλίνδρου βασιζόμενο στο σήμα της μετρούμενης πίεσης και εν συνεχεία θα σχεδιάζει το διάγραμμα p-φ, η εν λόγω επεξεργασία θα πραγματοποιείται εύκολα και γρήγορα. Κατ' επέκταση, η εφαρμογή ενός τέτοιου προγράμματος θα μπορούσε να πραγματοποιείται ταυτόχρονα με τη διεξαγωγή της μέτρησης, ώστε να προβάλλεται και να αποθηκεύεται απευθείας το σωστό-βαθμονομημένο σήμα της πίεσης.
- Χρήση Πολυζεύκτη πολύ υψηλής ταχύτητας : Η αντικατάσταση του υπάρχοντος, υψηλής ανάλυσης πολυζεύκτη του συστήματος, με έναν ακόμα μεγαλύτερης ανάλυσης, δίνει τη δυνατότητα υποστήριξης ακόμα μεγαλύτερων συχνοτήτων δειγματοληψίας της κάρτας DAQ και ως εκ τούτου αναλυτικότερη καταγραφή του σήματος της μετρούμενης πίεσης, (< 1°). Με τον τρόπο αυτό, πέραν της βελτιωμένης αναπαράστασης της διακύμανσης της πίεσης, θα επιτυγχάνεται και καλύτερη εφαρμογή του παραπάνω αλγόριθμου.</li>

#### Σύστημα Μετρήσεων στα Καυσαέρια

Προσθήκη μονάδων μέτρησης πίεσης και θερμοκρασίας καυσαερίων: Με σκοπό την αναβάθμιση του συστήματος μετρήσεων στα καυσαέρια προβλέπεται η χρήση αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι κατάλληλοι για χρήση υπό δυσμενείς συνθήκες, όπως αυτές που επικρατούν εντός του αγωγού καυσαερίων (υψηλές θερμοκρασίες, διαβρωτικό περιβάλλον, επικαθίσεις κ.λ.π.). Επίσης, απαιτείται η σχεδίαση και κατασκευή ειδικού προσαρμογέα για την παρεμβολή και τη στήριξη των αισθητήρων στο επιθυμητό σημείο εντός του αγωγού καυσαερίων.

#### Σύστημα προσδιορισμού θέσης & ταχύτητας πλοίου (GPS)

 Προσθήκη συστήματος GPS: Με σκοπό την αναβάθμιση του ευρύτερου συστήματος συνδυασμένων μετρήσεων σε πλοία του ΕΝΜ προβλέπεται η προσθήκη ενός συστήματος προσδιορισμού θέσης & ταχύτητας πλοίου (GPS).

#### Διεξαγωγή μετρήσεων

 Εφαρμογή συνολικού συστήματος μετρητικών μονάδων του ΕΝΜ επί πλοίου: Μετά την πρώτη δοκιμαστική χρήση του συνολικού συστήματος στην κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ και την πραγματοποίηση της πρώτης επίσκεψης στο Ε/Γ – Ο/Γ πλοίο Speedrunner III της Aegean Speed Lines, έπεται η πλήρης εφαρμογή του συστήματος συνδυασμένων μετρήσεων επί της μηχανολογικής εγκατάστασης πλοίου, στη δεύτερη επίσκεψη.

#### Σύστημα Μέτρησης Πίεσης Κυλίνδρου "The Doctor-DM8" της Fuchs Technology

- Προσθήκη νέων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων μέτρησης πίεσης κυλίνδρου: Η φορητή μονάδα μέτρησης πίεσης κυλίνδρων της Fuchs Technology παρέχει τη δυνατότητα παράλληλης σύνδεσης πολλαπλών πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ταυτόχρονη μέτρησης της διακύμανση της πίεσης στο εσωτερικό πολλών κυλίνδρων ενός κινητήρα.
- Προσθήκη αισθητήρα γωνίας στροφάλου και εντοπισμού ΑΝΣ: Το σύστημα "The Doctor-DM8" υποστηρίζει τη σύνδεση επαγωγικού αισθητήρα για την καταγραφή της γωνίας στροφάλου ενός κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή, ο προσδιορισμό του ΑΝΣ του εκάστοτε μετρούμενου κυλίνδρου και επομένως, και η βαθμονόμηση του σήματος της πίεσης, προκύπτουν βάση της μέτρησης αυτής με ιδιαίτερη ακρίβεια.

#### Βιβλιογραφία

#### Ελληνική βιβλιογραφία

- Αρμάγος, Ν., "Σύστημα Δειγματοληψίας Παραμέτρων Κινητήρα Diesel", Διπλωματική Εργασία, ΕΝΜ, Ε.Μ.Π, 2009
- Βρεττάκος, Ν., "Ανάλυση Μετρήσεων Πίεσης Κυλίνδρων Ναυτικών Κινητήρων", Διπλωματική Εργασία, ΕΝΜ, 2011
- Κυρτάτος, Ν.Π., "Ναυτικοί κινητήρες Diesel-Θέματα σχεδίασης και λειτουργίας", ISBN: 960-266-002-3, 1993
- Τοπάλογλου, Σ., "Ανάπτυξη φορητού συστήματος μέτρησης, αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων λειτουργίας και ρύπων από ναυτικούς κινητήρες", Διπλωματική Εργασία, ΕΝΜ, Ε.Μ.Π, 2010

#### Ξένη βιβλιογραφία

- Blažek, J., "The combustion process analysis by means of in-cylinder pressure measuremen". International Scientific Meeting Motor Vehicles & Engines, 2004
- Cavina, N., Ponti, F., *"Air fuel ratio estimation using in-cylinder pressure frequency analysis"*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 125, Issue 3, p. 812-820, 2003
- Desantesa, J.M., Galindoa, C., Dolza, V., "Air mass flow estimation in turbocharged diesel engines from in-cylinder pressure measurement". Experimental Thermal and Fluid Science Magazine, Vol. 34, Issue 1, p. 37-47, 2010
- Doggett, W., "Measuring Internal Combustion Engine In-Cylinder Pressure with LabVIEW", National Instruments

http://sine.ni.com/

- Gawande, S.H., Navale, L.G., Nandgaonkar, M.R., Butala, D.S., Kunamalla, S., "Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation". International Journal of Engineering Science and Technology, Vol.2, Issue 4, p.433-441, 2010
- Klein, M., Eriksson, L., Åslund, J., "Compression ratio estimation based on cylinder pressure data".
   Control Engineering Practice Magazine, Vol. 14, Issue 3, p. 197-211, 2006
- König, J., "Cylinder-Pressure Based Injector Calibration for Diesel Engines". Master's Degree Project, KTH, 2008
- "LIFETIME Project Final Presentation", Laboratory of Marine Engineering, NTUA, 2003

www.lme.ntua.gr/

- Lujána, J., Bermúdeza, V., Guardiolaa, C., Abbad, A., "A methodology for combustion detection in diesel engines through in-cylinder pressure derivative signal". Mechanical Systems and Signal Processing Magazine, Vol. 24, Issue 7, p. 2261-2275, 2010
- *"Machinery Survey Arrangements"*, Machinery Course Presentation, Det Norske Veritas Piraeus,
   2011
- Oezatay, E., Voegelin, P., Obrecht, P., Onder, C., Fuchs, P., Fuchs, W., "Malfunction diagnosis at marine diesel engines based on indicator cock pressure data". CIMAC paper No. 166, 2010
- "Pressure Indicating in Internal Combustion Engines", AVL User Handbook, AVL, 2002
- Priede, T., "Relation between form of cylinder-pressure diagram and noise in diesel engines".
   Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1996 Magazine, Vol. 1960, No. 1960/1960, p. 63-97, 1960
- Rolle, S., Häussler, A., Hansesn, L., Ryser, R., Thurnheer, T., Hug, P., "Combustion Control of Wärtsilä's two-stroke engines". 8th annual Green Ship Technology conference in Oslo, Wartsila Switzerland Ltd., 2011
- *"Simplified NOx Emission Procedures"*, Technical Report, NI Techn Report 472, Nordtest, Det Norske Veritas, 2001
- Stone, R., *"Introduction to Internal Combustion Engines (Third Edition)"*, ISBN: 978-0-333-74013-2, 1999
- Takats, M., "In-cylinder pressure recording and data acquisition system". Josef Bozek Resarch Center of Engine and Automotive Technology, Czech Technical University, 2004
- *"Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines",* REVISED NOx TECHNICAL CODE, IMO, 2008
- Yoon, M., Lee, K., Sunwoo, M., "A method for combustion phasing control using cylinder pressure measurement in a CRDI diesel engine". Mechtronics Magazine, Vol. 17, Issue 9, p.469-479, 2007
- Watzenig, D., Sommer, M.S., Steiner, G., "Engine state monitoring and fault diagnosis of large marine diesel engines". E & I - Elektrotechnik und Informationstechnik Magazine, Vol. 126, No. 5, p. 173-179, 2009
- Woodyard, D., "Pounder's marine diesel engines and gas turbines (ninth edition)". ISBN: 978-0-7506-8984-7, 2009
- Zhao, H., Ladammatos, N., "Engine combustion instrumentation and diagnostics". ISBN: 978-0-7680-0665-0, 2001

#### Αναφορές

[1] Vizard, D. "Twelve Engine Output Tips - Dandy Dyno Dozen", Stock Car Racing Magazine, Issue
 2009

www.stockcarracing.com

- [2] *"The Doctor PC software, User Manual"*, Fuchs International Technology GmbH, 2011
- [3] Lujána, J., Bermúdeza, V., Guardiolaa, C., Abbad, A., "A methodology for combustion detection in diesel engines through in-cylinder pressure derivative signal". Mechanical Systems and Signal Processing Magazine, Vol. 24, Issue 7, p. 2261-2275, 2010
- [4] Blažek, J., "The combustion process analysis by means of in-cylinder pressure measurement". International Scientific Meeting Motor Vehicles & Engines, 2004
- [5] Cavina, N., Ponti, F., "Air fuel ratio estimation using in-cylinder pressure frequency analysis".
   Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 125, Issue 3, p. 812-820, 2003
- [6] Desantesa, J.M., Galindoa, C., Dolza, V., *"Air mass flow estimation in turbocharged diesel engines from in-cylinder pressure measurement"*. Experimental Thermal and Fluid Science Magazine, Vol. 34, Issue 1, p. 37-47, 2010
- [7] Klein, M., Eriksson, L., Åslund, J., "Compression ratio estimation based on cylinder pressure data".
   Control Engineering Practice Magazine, Vol. 14, Issue 3, p. 197-211, 2006
- [8] Priede, T., "Relation between form of cylinder-pressure diagram and noise in diesel engines".
   Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1996 Magazine, Vol. 1960, No. 1960/1960, p. 63-97, 1960
- [9] Rolle, S., Häussler, A., Hansesn, L., Ryser, R., Thurnheer, T., Hug, P., "Combustion Control of Wärtsilä's two-stroke engines [image]". 8th annual Green Ship Technology conference in Oslo, Wartsila Switzerland Ltd., p. 4, 2011
- [10] "LIFETIME Project Final Presentation", Laboratory of Marine Engineering, NTUA, slide 9, 2003 www.lme.ntua.gr
- [11] Watzenig, D., Sommer, M.S., Steiner, G., "Engine state monitoring and fault diagnosis of large marine diesel engines". E & I Elektrotechnik und Informationstechnik Magazine, Vol. 126, No. 5, p. 173-179, 2009
- [12] "Machinery Survey Arrangements", Machinery Course Presentation, Det Norske Veritas Piraeus, slide 27, 2011

- [13] "IMO Marine Engine Regulations [figure]", Dieselnet www.dieselnet.com
- [14] "Calculation of exhaust gas mass flow (carbon-balance method)", Revised MARPOL ANNEX VI, MEPC 58/23/Add.1, ANNEX 14, p. 92, 2009
- [15] *"Testo 350 Combustion & Emission Analyzer [image]"*, Testo Inc. www.testo350.com
- [16] "Simplified NOx Emission Procedures", Technical Report, NI Techn Report 472, Nordtest, Det Norske Veritas, p. 21, 2001
- [17] "MetaPower [image]", Kongsberg Maritime www.km.kongsberg.com
- [18] "Engine Indicator Instruments 3, The Dobbie McInnes Steam Indicator [image]", Peter & Rita Forbes' Engine Webpages www.stationary-engine.co.uk
- [19] "Pressure Indicating in Internal Combustion Engines", AVL User Handbook, AVL, p. 1.1, 7.1-7.5, 2002
- [20] *"High-Temperature pressure sensor [image]",* Kistler www.kistler.com
- [21] *"Piezoelectric Energy Harvesting [image]",* Stevens Institute of Technology www.ece.stevens-tech.edu
- [22] *"NI USB-6218 [image]"*, National Instruments sine.ni.com
- [23] Τοπάλογλου, Σ., "Ανάπτυξη φορητού συστήματος μέτρησης, αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων λειτουργίας και ρύπων από ναυτικούς κινητήρες", Διπλωματική Εργασία, ΕΝΜ, Ε.Μ.Π, σ. 71-78,86-90, 120-131, 2010
- [24] *"Signal Isolators [image]"*, Phoenix Contact www.phoenixcontact.com
- [25] "Strain Gauge [image]", Bangkok Cryptography www.bkkcrypto.com
- [26] "Strain Gauge Technology [image]", Kistler www.kistler.com
- [27] "Torque Trak 10K [image]", Binsfeld Engineering Inc. www.binsfeld.com

- [28] "Proximity Sensors [image]", Autonics Co. www.autonics.com
- [29] "Specification Smart NOx Sensor Uninox24V", Continental Automotive www.conti-online.com
- [30] Βρεττάκος, Ν., "Ανάλυση Μετρήσεων Πίεσης Κυλίνδρων Ναυτικών Κινητήρων", Διπλωματική Εργασία, ΕΝΜ, Ε.Μ.Π., σ. 64, 69, 2011
- [31] "Cylindrical vane wheel sensor [image]", Hontzsch www.hoentzsch.com
- [32] "Facilities of Laboratory of Marine Engineering [image]", LME, NTUA www.lme.ntua.gr
- [33] "E/Г O/Г Speedrunner III [image & table]", Aegean Speed Lines www.aegeanspeedlines.gr
- [34] "Σαρωνικός Κόλπος Δυτικό Αιγαίο Πέλαγος"
   maps.google.com
- [35] *"NI -9203 [image]"*, National Instruments sine.ni.com
- [36] "Charge Amplifier Type 5011 B [image]", Kistler www.kistler.com
- [37] "Piezoelectric Pressure Sensor Type 6052 C [image]", Kistler www.kistler.com
- [38] *"Piezoelectric Pressure Sensor Type 6613 CA [image]",* Kistler www.kistler.com
- [39] *"Connecting Cable KM12 8pin [image]",* Festo www.festo.com
- [40] "RUSTON 20RK270 Diesel Engine Manual", MAN-B&W Diesel Ltd

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Κάρτες συλλογής δεδομένων της National Instruments (NI Data Acquisition Device – DAQ)

# NI 9203 (σύστημα ENM)

- Κανάλια εισόδου: 8
- Τύπος σήματος εισόδου: Αναλογικό σήμα ρεύματος
- Εύρος σήματος εισόδου: ±20 mA ή 0 ...20mA, ρυθμιζόμενο
- Ανάλυση: 16-bit
- Συνολική ταχύτητα δειγματοληψίας: 200 kS/s
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: -40 έως +70 °C



Φωτογραφία Π.1 Κάρτα DAQ NI 9203 [35]

# NI USB 6218 (σύστημα "The Doctor – DM8" της Fuchs Technology)

- Κανάλια εισόδου: 32 αναλογικά & 8ψηφιακά
- Τύπος σήματος εισόδου: Αναλογικό σήμα τάσης / ψηφιακό
- Εύρος σήματος εισόδου: ±10 V (αναλογικό)
- Ανάλυση: *16-bit*
- Ταχύτητα δειγματοληψίας: 250 kS/s
- Μετρητές: 2
- Μέγιστη συχνότητα μετρητών: 80Hz
- Ανάλυση μετρητών: 32-bit



Φωτογραφία Π.2 Κάρτα DAQ NI USB 6218 [36]

#### Πολυζεύκτες της Phoenix Contact (Isolators)

#### MCR-UI-UI-DCI & MCR-UI-UI-450-DCI

- Τύπος σήματος εισόδου/εξόδου: Αναλογικό σήμα ρεύματος & τάσης
- Εύρος σήματος εισόδου/εξόδου: *ρυθμιζόμενο*
- Βαθμονόμηση: ρυθμιζόμενο zero-span
- Συχνότητα αποκοπής: 30 Hz / 450 Hz
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: -20 έως +65 °C



Φωτογραφία Π.3 Πολυζεύκτης MCR-UI-UI-DCI της Phoenix Contact [24]



Σχήμα Π.1 Το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός πολυζεύκτη [24]

#### Ενισχυτής σήματος της Kistler (Charge Amplifier)

#### Ch. Amp. Type 5011B

- Τύπος σήματος εισόδου: Ηλεκτρικό φορτίο (pC)
- Εύρος σήματος εισόδου: *± 10...999,000 pC*
- Εύρος ευαισθησίας αισθητήρα: ± 0.01...9,990 pC/M.U.
- Κλίμακα: 0.001...9,990,000 M.U/V
- Τύπος σήματος εξόδου: Αναλογικό σήμα τάσης
- Εύρος σήματος εξόδου: ±10 V
- Εύρος συχνοτήτων: 0...200 kHz
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: 0 έως +50 °C



Φωτογραφία Π.4 Ενισχυτής σήματος Type 5011B της Kistler [36]

# Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης της Kistler (Piezoelectric Pressure Sensor)

# Type 6052C (σύστημα ENM)

- Εύρος μέτρησης: 0...250 bar
- Ευαισθησία: *20 pC/bar*
- Ιδιοσυχνότητα: 160 Hz
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: -50 έως +400 °C



Φωτογραφία Π.5 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης Type 6052C της Kistler [37]

# Type 6613CA (σύστημα "The Doctor – DM8" της Fuchs Technology)

- Ενσωματωμένος ενισχυτής σήματος
- Εύρος μέτρησης: 0...250 bar & 0...100 bar
- Ευαισθησία: *10 mV/bar & 25mV/bar*
- Τύπος σήματος εξόδου: Αναλογικό σήμα τάσης
- Εύρος σήματος εξόδου: 0...5 V
- Εύρος συχνοτήτων: 0...20'000 Hz
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: -50 έως +350 °C



Φωτογραφία Π.6 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης Type 60613CA της Kistler [38]
Επαγωγικός αισθητήρας της Autonics (Inductive Proximity Sensor)

## PR12-2DN

- Εύρος ανίχνευσης: 2mm ± 10%
- Τύπος σήματος εξόδου: Αναλογικό σήμα τάσης
- Ταχύτητα απόκρισης: 800 Hz
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: -25 έως +70 °C
- Ένδειξη ανίχνευσης: *Κόκκινο LED*



Φωτογραφία Π.7 Επαγωγικός αισθητήρας PR12-2DN της Autonics [28]

<u>Αισθητήρας οξειδίων του αζώτου (NOx) της Continental</u>

## Smart NOx Sensor – SNS

- Μετρούμενα μεγέθη:
  - *i.* Συγκέντρωση NOx
  - *ii. Λόγος αέρα καυσίμου*
  - iii. Συγκέντρωση O<sub>2 wet</sub>
  - *iv.* Συντελεστής λ
- Τύπος σήματος εξόδου: Αναλογικό σήμα τάσης
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας αισθητήρα: +800 °C / 950 °C
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας μονάδας: -40 έως +105 °C



Φωτογραφία Π.8 Smart NOx Sensor της Continental [29]

## Αισθητήρας ταχύτητας ροής ρευστού της Höntzsch

### Vane wheel flow sensor – ZS25

- Μετρούμενο ρευστό: Αέριο / Υγρό
- Εύρος μέτρησης: *1.4 ... 120 m/s*
- Τύπος σήματος εξόδου: Αναλογικό σήμα ρεύματος
- Εύρος σήματος εξόδου: 4...20 mA
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας αισθητήρα: -40 έως +500 °C
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας μονάδας: -40 έως +80 °C



Φωτογραφία Π.9 Vane wheel flow sensor  $-ZS25 \tau \eta \varsigma$  Höntzsch<sub>.</sub> [31]

## <u>Καλώδιο μεταφοράς σήματος & τροφοδοσίας της Festo</u>

#### Connecting Cable KM12 - 8pin

- Εύρος τάσης λειτουργίας: 0...30 V AC / 0...36 V DC
- Τύπος υποδοχής: *M12x1, 8 pin/wire*
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: -25 έως +80 °C



Φωτογραφία Π.10 Το καλώδιο KM12-8pin της Festo [39]

## Τροποποιημένα καλώδια μεταφοράς σήματος & τροφοδοσίας

Τόσο για τη σύνδεση του - ήδη εγκατεστημένου στην κλίνη δοκιμών - αισθητήρα πίεσης Kistler 6052C με το σύστημα "The Doctor - DM8" της Fuchs Technology (μέσω του ενισχυτή), όσο και για την εφαρμογή του αισθητήρα πίεσης Kistler 6613CA στο σύστημα μετρήσεων που σχεδιάστηκε στο ENM, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση καλωδίων με ειδικά διαμορφωμένες υποδοχές – Φωτογραφία Π.10, Φωτογραφία Π.11. Η κατασκευή των ζητούμενων καλωδίων πραγματοποιήθηκε στο ENM με τροποποίηση του καλωδίου της Festo, το οποίο αγοράστηκε από το ENM για το συγκεκριμένο σκοπό.



Φωτογραφία Π.11 Τροποποιημένο καλώδιο της Festo για τη σύνδεση του αισθητήρα πίεσης Kistler 6052C με το σύστημα "The Doctor - DM8" της Fuchs Technology



Φωτογραφία Π.12 Τροποποιημένο καλώδιο της Festo για τη σύνδεση του αισθητήρα πίεσης Kistler 6613CA με το σύστημα μετρήσεων του ENM

#### Η πλατφόρμα προγραμματισμού LabVIEW της National Instruments (NI)

Το λογισμικό LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) αποτελεί την πλατφόρμα εφαρμογής της γλώσσας εικονικού προγραμματισμού, "G", που αναπτύχθηκε από την NI, με σκοπό, τόσο την αυτοματοποιημένη χρήση - έλεγχο εργαστηριακού μετρητικού εξοπλισμού, μέσω προγραμματισμού της συλλογής, επεξεργασίας και αποθήκευσης μετρητικών σημάτων, όσο και γενικότερα, τη δυνατότητα διαχείρισης ή/και προσομοίωσης μηχανικών συστημάτων στον H/Y. Τα προγράμματα που σχεδιάζονται στο περιβάλλον του LabVIEW ονομάζονται V.I. (*Visual Instrument*) και αποτελούνται από δύο μέρη:

- 1. Το Block Diagram, το οποίο αποτελεί την πλατφόρμα σχεδιασμού ενός VI, με χρήση εικονικών προγραμματιστικών εντολών, καλωδίων μεταφοράς δεδομένων και υπο-VIs.
- 2. Το Front Panel, το οποίο αποτελεί την πλατφόρμα λειτουργίας και προβολής του VI, με χρήση διαγραμμάτων, ενδείξεων, εικονικών ρυθμιστικών μέσων (διακόπτες, κουμπιά) κ.α.

Σε συνδυασμό με τον παρεχόμενο από την ΝΙ εξοπλισμό για την καταγραφή και την ψηφιοποίηση των σημάτων αισθητήρων (π.χ. κάρτα DAQ), η πλατφόρμα LabVIEW και τα αντίστοιχα VIs παρέχουν τη δυνατότητα πλήρους αυτοματοποιημένης διεξαγωγής μετρήσεων στο πλαίσιο οποιασδήποτε εφαρμογής (εργαστηριακής και μη).

## VI "Combined Engine Performance Measurements" στη LabView

Το VI "Combined Engine Performance Measurements" – Σχήματα Π2 & Π3, σχεδιάστηκε στην πλατφόρμα LabView ως συνδυασμός των VI που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 2,3 & 4. Μέσω του εν λόγω VI είναι δυνατή η ταυτόχρονη παρουσίαση και αποθήκευση των δεδομένων όλων των μετρούμενων μεγεθών. Η προβολή των μετρήσεων σε μορφή διαγραμμάτων στον άξονα του χρόνου, επιτρέπει την επί τόπου παρακολούθηση της διακύμανσης των διαφόρων μεγεθών είτε μεμονωμένα, είτε σε σύγκριση μεταξύ τους.



Σχήμα Π2.1 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση **ρύπων στα καυσαέρια** 



Σχήμα Π2.2 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση **οξυγόνου στα καυσαέρια** 



Σχήμα Π2.3 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση **νερού στα καυσαέρια** 



Σχήμα Π2.4 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση παροχής καυσαερίων



Σχήμα Π2.5 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση **πίεσης κυλίνδρου** 



Σχήμα Π2.6 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση **ταχύτητας περιστροφής άξονα** 



Σχήμα Π2.7 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση **ροπής άξονα** 



Σχήμα Π2.8 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση **ισχύος άξονα** 



Σχήμα Π2.9 "Combined Engine Performance Measurements".vi Front Panel - Μέτρηση συνθηκών περιβάλλοντος



Σχήμα Π2.9 "Combined Engine Performance Measurements".vi Block Diagram

## Η κλίνη δοκιμών του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας

## Κινητήρας MAN-B&W Holeby L16/24

- Αριθμός κυλίνδρων: 5
- Διάταξη κυλίνδρων: In-line
- Κύκλος: 4-Χ
- Διάμετρος κυλίνδρου: 160 mm
- Διαδρομή εμβόλου: 240 mm
- Όγκος εμβολισμού / κύλινδρο: 4.8 *lt*
- Λόγος συμπίεσης: 15.5 : 1
- Μέγιστη Συνεχής Ισχύς: 500 kW
- Μέγιστη Ταχύτητα Άξονα: 1200 rpm
- Πέδη: Ηλεκτρική πέδη AEG με δυνατότητα λειτουργίας και ως ηλεκτροκινητήρας



Φωτογραφία Π.13 Η κλίνη δοκιμών του ΕΝΜ, MAN-B&W Holeby L16/24



Φωτογραφία Π.14 Η ηλεκτρική πέδη ΑΕG της κλίνης δοκιμών του ΕΝΜ

## <u>Το Ε/Γ – Ο/Γ πλοίο Speedrunner ΙΙΙ της Aegean Speed Lines</u>

## Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου

- Μήκος: *100.4 m*
- Πλάτος: 17.0 m
- Βύθισμα: 4.6 m
- Χωρητικότητα Επιβατών: 800
- Χωρητικότητα Οχημάτων: 170 αυτοκίνητα ή 145 αυτοκίνητα & 6 λεωφορεία
- Κύριες Μηχανές: *4 x RUSTON 20RK270MK ΙΙ*
- Συνολική Ισχύς: *27500 kW*
- Προωστήρια μέσα: 4 x water jets



Φωτογραφία Π.15 Το  $E/\Gamma - O/\Gamma \pi \lambda o$ ίο Speedrunner III της Aegean Speed Lines [33]

# Κύρια χαρακτηρίστηκα RUSTON 20RK270MK ΙΙ

- Αριθμός κυλίνδρων: *20*
- Διάταξη κυλίνδρων: V
- Κύκλος: 4-Χ
- Διάμετρος κυλίνδρου: 270 mm
- Διαδρομή εμβόλου: 305 mm
- Όγκος εμβολισμού / κύλινδρο: 17.5 lt
- Λόγος συμπίεσης: 12.3 : 1
- Μέγιστη Συνεχής Ισχύς: *7080 kW*
- Μέγιστη Ταχύτητα Άξονα: 1030 rpm



Φωτογραφία Π.16 Οι κύριες μηχανές πρόωσης του Ε/Γ – Ο/Γ πλοίου Speedrunner III



Σχήμα Π.4 Η μηχανή RUSTON 20RK270MK ΙΙ [40]