

ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Απόστολος Πεσιρίδης*
Επιστημονικός Συνεργάτης
Imperial College London
Exhibition Road,
London
SW7 2AZ, UK
apostolos.pesiridis@imperial.ac.uk

Ricardo Martinez-Botas
Αναπληρωτής Καθηγητής
Imperial College London
Exhibition Road,
London
SW7 2AZ, UK
r.botas@imperial.ac.uk

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πολυετούς ανάπτυξης μιας νέας τεχνολογίας υπερπλήρωσης που αναπτύχθηκε από την Ομάδα Στροβιλομηχανικής του Imperial College στην Αγγλία: του Υπερπληρωτή Ενεργού Ελέγχου (Active Control Turbocharger - ACT). Ο ACT είναι ένας υπερπληρωτής που αποτελείται από ένα σύστημα και μια μέθοδο λειτουργίας που παρέχουν την κατάλληλη γεωμετρία εισαγωγής, καθ' όλη την περίοδο εξαγωγής των καυσαερίων του κινητήρα με τον οποίο είναι συνδεδεμένος. Κατ' αυτόν τον τρόπο η γεωμετρία της εισαγωγής τροποποιείται με ενεργό τρόπο στα ιδιαίτερες δυναμικά χαρακτηριστικά υψηλής συχνότητας της ροής των καυσαερίων που περνούν από το στρόβιλο του υπερπληρωτή. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε με σκοπό να προσφέρει μια νέα επιλογή στην αντιμετώπιση τόσο των διαρκώς αυξανόμενων απαιτήσεων που προκύπτουν από τη διαρκώς αυστηρότερη νομοθεσία εκπομπών ρύπων, όσο και των απαιτήσεων οδηγισιμότητας των χρηστών. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα του πρώτου πρωτοτύπου ACT και τα αποτελέσματα από τη μονοδιάστατη προσομοίωση ACT σε πετρελαιοκινητήρα, βάσει των οποίων ο ACT παρουσιάζει ικανότητα αυξημένης εκμετάλλευσης της ενέργειας των καυσαερίων μέχρι 7.5% πειραματικά, ενώ το θεωρητικό μοντέλο δείχνει σημαντική βελτίωση ενός κινητήρα με ACT σε σχέση με κινητήρα εξοπλισμένο με υπερπληρωτή μεταβλητής γεωμετρίας μέχρι 30% από άποψη ισχύος. Για παρόμοια επίπεδα ισχύος ο ACT φαίνεται να μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη χωρητικότητα του κινητήρα κατά 20% σε σχέση με κινητήρα εφοδιασμένο με υπερπληρωτή μεταβλητής γεωμετρίας.

Λέξεις Κλειδιά: Υπερπληρωτής, Ενεργός Έλεγχος, Μεταβλητή Γεωμετρία, Σταθερή Ροή, Παλλόμενη Ροή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΘΕΩΡΙΑ

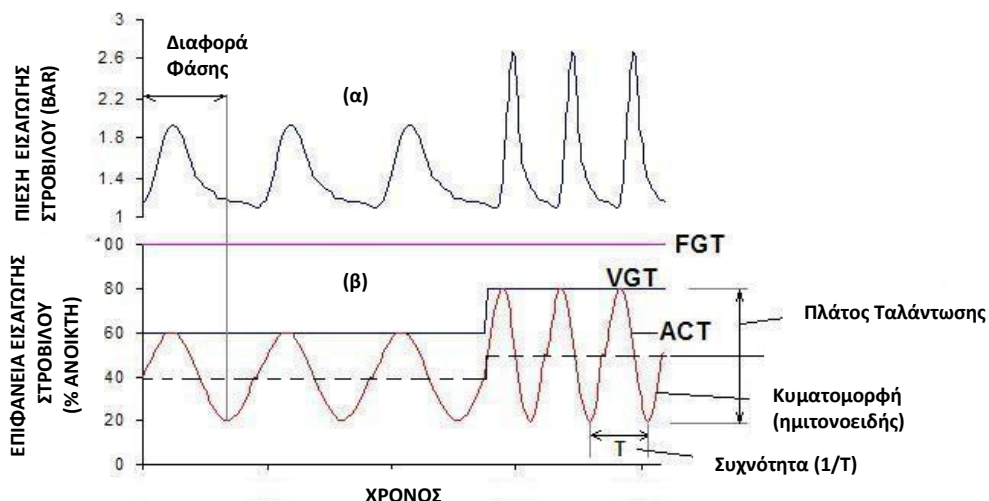
Η σπουδαιότητα των τεχνολογιών υπερπλήρωσης στην ανάπτυξη τόσο των πετρελαιοκινητήρων όσο και των βενζινοκινητήρων είναι τέτοια που, οι μεν πετρελαιοκινητήρες είναι εξ' ολοκλήρου εξοπλισμένοι με υπερπληρωτές, στους δε βενζινοκινητήρες οι υπερπληρωτές κερδίζουν συνεχώς έδαφος με περίπου το ένα τέταρτο των καινούριων βενζινοκινητήρων να παράγονται εξοπλισμένοι με υπερπληρωτές, Shahed (2003). Η υπερπληρωτές έχουν οδηγήσει στην εξίσωση της διαφοράς και στην ανώτερη από πολλές πλευρές απόδοση των πετρελαιοκινητήρων σε σχέση με τους βενζινοκινητήρες (σε σχέση με τους οποίους παραδοσιακά υστερούσαν). Η εξίσωση αυτή έγινε εφικτή εξαιτίας σε μεγάλο βαθμό της εξελιγμένης τεχνολογίας υπερπλήρωσης που εφαρμόστηκε. Αντίστοιχα, σήμερα βρισκόμαστε στη φάση που η υπερπλήρωση αρχίζει να εφαρμόζεται εκτενώς και στους

*Συγγραφέας που θα τηρήσει την αλληλογραφία

βενζινοκινητήρες με πολύ μεγαλύτερο εύρος βελτιώσης από τη συγκριτικά περισσότερο κορεσμένη τεχνολογία αγορά των πετρελαιοκινητήρων. Η συρρίκνωση της χωρητικότητας των βενζινοκινητήρων είναι η πιο αποδοτική μέθοδος μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με άλλες τεχνολογίες βελτίωσης της απόδοσης ενός βενζινοκινητήρα, Lumsden et al (2008).

Στη βασική τους μορφή οι υπερπληρωτές με στροβιλοσυμπιεστές καυσαερίου μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση της λειτουργίας τους ριζικά (πέρα, δηλαδή, από σχεδιαστικές βελτιώσεις στο στρόβιλο ή το συμπιεστή, μείωση των τριβών ή πολλαπλασιασμό των βαθμίδων του στροβίλου και του συμπιεστή) με δύο τρόπους σήμερα: με αλλαγή στη γεωμετρία της εισαγωγής του στροβίλου – Υπερπληρωτής Μεταβλητής Γεωμετρίας (Variable Geometry Turbocharger – VGT) - ή με κάποιας μορφής εγκατάσταση εξηλεκτρισμού (ή υβριδισμού, Electric Turbo – eTurbo ή Hybrid Turbo – hTurbo, αντίστοιχα). Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα ασχολήθηκε με την πρώτη κατηγορία υπερπληρωτών.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη υπερπλήρωσης για υπερπληρωτές μονής βαθμίδας: οι υπερπληρωτές σταθερής γεωμετρίας (Fixed Geometry Turbocharger - FGT) και όπως ήδη αναφέρθηκε, οι υπερπληρωτές μεταβλητής γεωμετρίας, VGT. Οι πρώτοι αποτελούν την τυπική μορφή υπερπληρωτή με στρόβιλο σταθερής γεωμετρίας εισαγωγής, ενώ οι δεύτεροι αποτελούν εξέλιξη του πρώτου και έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν την καταλληλή γεωμετρία στην εισαγωγή του στροβίλου, σε σχέση με το σημείο λειτουργίας του κινητήρα τη δεδομένη χρονική στιγμή, μέσω της μεταβολής της θέσης (γεωμετρίας) ενός ακροφυσίου. Τα ακροφύσια αυτά είναι μηχανισμοί διαφορετικών κατηγοριών που μεταβάλλουν το λόγο επιφανειών εισαγωγής/εξαγωγής. Οι υπερπληρωτές μεταβλητής γεωμετρίας αποτελούν την κορυφαία τεχνολογία σε παραγωγή σήμερα (με εφαρμογή σε πετρελαιοκινητήρες κυρίως, καθώς οι βενζινοκινητήρες περιορίζονται στη χρήση VGT από τις ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων τους που απαιτούν ακριβές λύσεις στον τομέα τεχνολογίας υλικών, προκειμένου η αξιοπιστία του ακροφυσίου μεταβλητής γεωμετρίας να είναι ικανοποιητική). Οι VGT έφεραν μια μικρή επανάσταση στη διάδοση των πετρελαιοκινητήρων και της απόδοσής τους. Εκεί που οι FGT βελτιστοποιούνταν, σχεδιαστικά, για ένα σημείο λειτουργίας του κινητήρα, οι VGT μπορούν να αυξήσουν εντυπωσιακά την ανάκτηση ενέργειας των καυσαερίων σε όλο το φάσμα της λειτουργίας του κινητήρα, εξαιτίας της ρυθμιζόμενης γεωμετρίας εισαγωγής που παρέχουν, αλλάζοντας έτσι το αποτελεσματικό «μέγεθος» του υπερπληρωτή ανάλογα με το μέσο όρο της ενέργειας των καυσαερίων που είναι διαθέσιμη σε κάθε σημείο λειτουργίας του κινητήρα (συνδυασμού ταχύτητας και φορτίου του κινητήρα).



Σχήμα 1: Σύγκριση του προφίλ λειτουργίας ενός FGT, ενός VGT και ενός ACT σε σχέση με τη γεωμετρία εισαγωγής του στροβίλου όταν αυτή είναι πλήρως ανοικτή (100% δηλαδή στην περίπτωση του FGT). Στο (α) φαίνεται ένα τυπικό παλμικό τρένο εκπεμπόμενων καυσαερίων και στο (β) η απόκριση των δύο τυπικών συστημάτων υπερπλήρωσης σε παραγωγή σήμερα (FGT και VGT) και του προτεινόμενου ACT.

Τα κίνητρα για την ανάπτυξη της τεχνολογίας ACT μπορούν να εντοπιστούν στη στοιχειώδη διαφορά στον τρόπο λειτουργίας ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης και μιας στροβιλομηχανής και κατά δεύτερο

λόγο στην ύπαρξη σημαντικών (και αναξιοποίητων) επιπέδων ενέργειας, εγγενών στην εκπομπή καυσαερίων. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας ACT, λοιπόν, ξεκίνησε με σκοπό την εκμετάλλευση αυτού του αναξιοποίητου ποσού ενέργειας που υπάρχει στα εκπεμπόμενα καυσαέρια, εξαιτίας της παλλόμενης μορφής της εκπομπής τους από τον κύλινδρο του κινητήρα. Επιπρόσθετα, σκοπός ανάπτυξης της τεχνολογίας ήταν και η απόδοση ενός ποιο ευέλικτου συστήματος, σε σχέση με το πιο εξελιγμένο τεχνολογικά υπερπληρωτή που υπάρχει σήμερα, τον VGT. Ο ACT δημιουργήθηκε με σκοπό να επιτρέψει το ποιο αποδοτικό ταίριασμα της γεωμετρίας της εισαγωγής του στροβίλου με τα στιγμιαία χαρακτηριστικά της ασταθούς ροής των εκπεμπόμενων καυσαερίων του κινητήρα. Ο υπερπληρωτής ενεργού ελέγχου (ACT) προχωράει ένα βήμα παραπέρα, βασιζόμενος στον τρόπο λειτουργίας των VGT. Έτσι, ο ACT είναι ικανός για περιοδική μεταβολή της γεωμετρίας εισαγωγής για κάθε παλμό καυσαερίων, εκπεμπόμενο από τους κυλίνδρους του κινητήρα. Στο Σχήμα 1, φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας του (ACT) σε σχέση με τα άλλα δύο συστήματα που περιγράφησαν, σε σχέση με τον τρόπο ρύθμισης (όπου υπάρχει) της επιφάνειας της εισαγωγής. Στο Σχήμα 1 (α) δίδεται μια τυπική μεταβολή του επιπέδου πίεσης στην εισαγωγή του στροβίλου. Η περιοδική μορφή αυτού του είδους ροής είναι εξαιρετικά δυναμική με εναλλαγές πίεσης από τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής, σχεδόν, πίεσης μέχρι στην προκειμένη περίπτωση τα 2.6 bar. Ο τρόπος λειτουργίας των σημερινών VGT υπολογίζει τη μέση πίεση που αντιστοιχεί από αυτό το χρονικά μεταβαλλόμενο εύρος πίεσης των καυσαερίων, ώστε αντίστοιχα, στον ενεργειακό ισολογισμό, να καταλήξει σε ένα αντίστοιχο ύψος πίεσης υπερπλήρωσης στον συμπιεστή, τέτοιο ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε υπερπλήρωση του κινητήρα τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Στο Σχήμα 1 (β) φαίνονται οι αποκρίσεις των συστημάτων ελέγχου γεωμετρίας της εισαγωγής των τριών συστημάτων ενδιαφέροντος: του «απλου» υπερπληρωτή σταθερής γεωμετρίας (FGT), του VGT και του υπό ανάπτυξη ACT. Το FGT δεν διαθέτει ακροφύσιο για τη ρύθμιση της ταχύτητας ή του ρυθμού ροής των καυσαερίων, επομένως η επιφάνεια διατομής της εισαγωγής του είναι πάντα η μέγιστη (100%). Ο VGT παρέχει κάποια ρύθμιση η οποία, για το συγκεκριμένο παράδειγμα, κυμαίνεται από 60% Ανοιχτή (επιφάνεια εισαγωγής) αρχικά (για τους πρώτους τρεις παλμούς) και στη συνέχεια, 80% Ανοιχτή (για τους υπόλοιπους τρεις παλμούς), καθώς αλλάζει η συχνότητα εκπομπής των καυσαερίων. Ο τρόπος λειτουργίας του ACT καθορίζεται από αυτές τις θέσεις του ακροφυσίου του VGT αλλά η κίνηση του ακροφυσίου του έχει ημιτονοειδή μορφή. Η ημιτονοειδής αυτή κίνηση (από μια μέγιστη τιμή, ίση με αυτή του VGT σε μια ελάχιστη τιμή που εξαρτάται από τις ανάγκες του κινητήρα) αποσκοπεί στην αύξηση της ταχύτητας της ροής μετά το ακροφύσιο (αντίστοιχα, της πίεσης πριν το ακροφύσιο), ώστε να αυξηθεί η μέση κινητική ενέργεια των καυσαερίων ή αντίστοιχα ο συνολικός λόγος αποτόνωσης ανάμεσα στην εισαγωγή και στην εξαγωγή του στροβίλου (αύξηση της συνολικής πτώσης της ενθαλπίας (που μπορεί να προσδιοριστεί από τη διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 1 (β))). Για ένα σχετικά αποδοτικό ακροφύσιο ACT συλλαμβάνεται μεγαλύτερο ποσό ισχύος από τα εκπεμπόμενα καυσαέρια, εξαιτίας της μεγαλύτερης ισεντροπικής ισχύος που γίνεται διαθέσιμη για παραγωγή έργου στο στρόβιλο.

Ο ACT διαχωρίζεται από τα σημερινά συστήματα VGT όντας ένα σύστημα ρύθμισης της γεωμετρίας της εισαγωγής, το οποίο αποτελείται από κατάλληλο ακροφύσιο και το οποίο προσδιορίζεται στην κίνησή του από συχνότητα και πλάτος ταλάντωσης και αντίστοιχα από τη φάση της κίνησής του σε σχέση με τη φάση του ίχνους της ταλάντωσης της εκπεμπόμενης ενέργειας του καυσαερίου (Σχήμα 1 (β)). Η εξίσωση που δίνουν την θέση του ακροφυσίου του ACT ανά πάσα στιγμή είναι οι παρακάτω:

$$\theta_{ACT} = \theta_{ACT,min} + \Delta\theta_{ACT} \left[1 - \left(\frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t)_{min}} \right) \right] \quad [1]$$

$$\text{όπου } \Delta\theta_{ACT} = \theta_{ACT,max} - \theta_{ACT,min} = \theta_{VGT} - \theta_{ACT,min} \quad [2]$$

Η θ_{ACT} δίνει τη στιγμιαία θέση του ακροφυσίου· $\theta_{ACT,min}$ είναι το ελάχιστο άνοιγμα του ACT (στο Σχήμα 1 (β) είναι 20% Ανοιχτό) και $\Delta\theta_{ACT}$ είναι το πλάτος ταλάντωσης (το υπόλοιπο του $\theta_{ACT,max}$ μείον $\theta_{ACT,min}$). Το $\theta_{ACT,max}$ είναι το μέγιστο ακρότατο σημείο της ταλάντωσης και στη θεωρητική του σύλληψη εξισώνεται με το θ_{VGT} . Ο λόγος της εξίσωσης αυτής είναι ότι, η εκάστοτε θέση του VGT (θ_{VGT}) θεωρείται ως βέλτιστη και επομένως η επιλογή του $\theta_{ACT,max}$ δε μπορεί να διαφέρει διότι στην περίπτωση που το ακροφύσιο του ACT είναι σε πιο ανοιχτή θέση τότε η σύγκριση απόδοσης με το VGT γίνεται

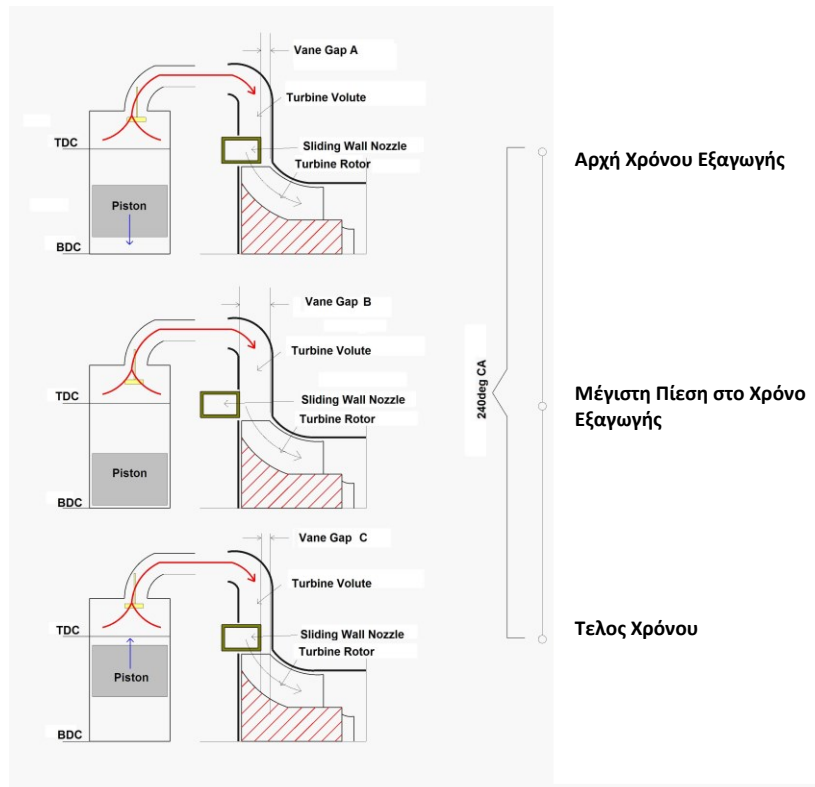
άστοχη (άδικη για το ACT) και στην αντίθετη περίπτωση είναι όχι μόνο άστοχη για το VGT αλλά και ενδεχόμενα επικίνδυνα για τον κινητήρα καθώς η θέση του ακροφυσίου είναι λιγότερο ανοικτή στο μέγιστο σημείο του παλμού της πίεσης και επομένως υπάρχει κίνδυνος αυξημένης υπερπλήρωσης, πέρα των ορίων πίεσης των κυλίνδρων.

Από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, ο ενεργειακός ισολογισμός του υπερπληρωτή δίνεται ως εξής, Watson and Janota (1982):

$$\left[(PR)^{\frac{\gamma_{air}-1}{\gamma_{air}}} - 1 \right] T_{c,outlet} C_{p,air} = \left[1 - (ER)^{\frac{\gamma_{exh}-1}{\gamma_{exh}}} \right] T_{t,inlet} c_{p,exh} \left(1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{air}} \right) \eta_c \eta_t \eta_{mech} \quad [3]$$

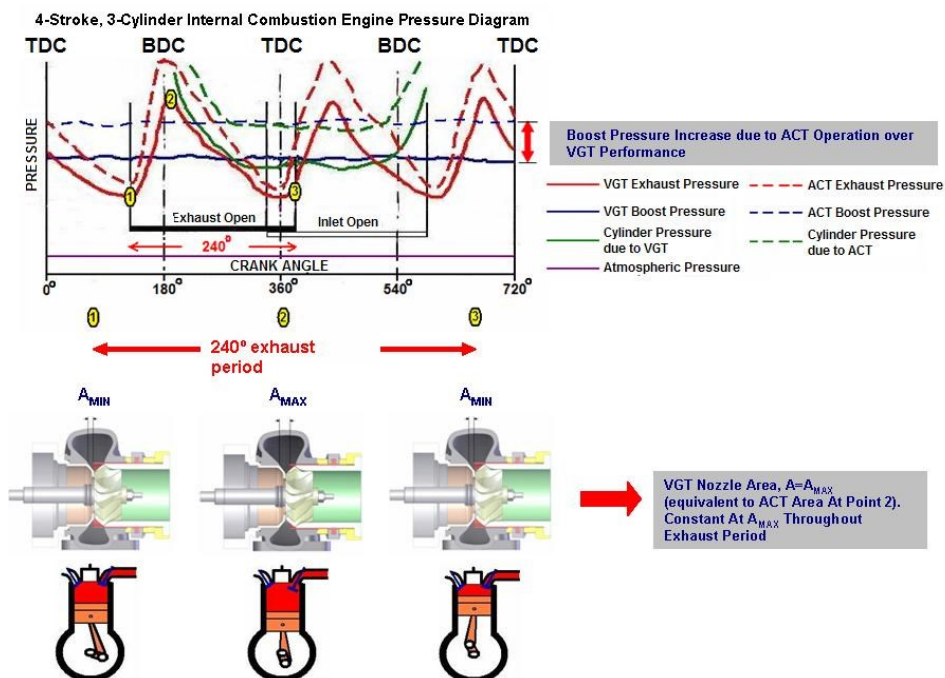
Οι μεταβλητές ενδιαφέροντος στην Εξίσωση [3] είναι ο λόγος συμπίεσης (PR) του συμπιεστή και ο λόγος αποτόνωσης (ER) του στροβίλου. Οι τιμές των μεταβλητών αυτών, τυπικά, δίνονται ως μέσοι όροι της μεταβολής τους σε ένα κύκλο λειτουργίας (δηλαδή σε μια περίοδο εξαγωγής του καυσαερίου). Εφόσον η μέση τιμή αποτόνωσης αυξάνεται στο ACT σε σχέση με το VGT, αυτό συνεπάγεται αύξηση του λόγου συμπίεσης, εφόσον δε υπάρχει αναντίστοιχα μεγάλη πτώση της ισεντροπικής απόδοσης του στροβίλου εξαιτίας τις αυξημένης μέσης μείωσης της επιφάνειας της εισαγωγής. Τα VGT λειτουργούν με βάσει αντιστοιχών αρχών (μειώνοντας την επιφάνεια εισαγωγής σε σχέση με ένα FGT και θυσιάζοντας σε ορισμένες περιπτώσεις μέρος της απόδοσης τους στροβίλου προκειμένου να πετύχουν αύξηση της πίεσης σε σχέση με την αρχική γεωμετρία. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1, ο ACT αποτελεί ένα σύστημα και μια μέθοδο αλλαγής του τρόπου ρύθμισης της επιφάνειας εισαγωγής του στροβίλου μέσω ενός κατ'ανάγκη εξαιρετικά γρήγορα κινούμενου ακροφυσίου. Ο περιοδικός τρόπος λειτουργίας του ακροφυσίου αποσκοπεί στην παροχή της βέλτιστης επιφάνειας σε σχέση με την στιγμιαία πίεση της εισαγωγής, καθώς αυτή μεταβάλλεται περιοδικά (Σχήμα 1). Η αντικειμενική δυσκολία αυτής τη μεταβολής έγκειται στον εξαιρετικά μεγάλο ρυθμό εκπομπής παλμών καυσαερίων και στο ακανόνιστο σχήμα αυτών των παλμών. Η αύξηση της πίεσης στην αρχή του χρόνου εξαγωγής σε ένα κινητήρα είναι απότομη και συμβαίνει τυπικά μέσα στο 1/3 με 1/4 της συνολικής περιόδου του χρόνου εξαγωγής. Η πτώση πίεσης από αυτό το σημείο και μετά είναι πιο σταδιακή. Η δυναμική απόκριση ενός ακροφυσίου με βάση αυτό το προφίλ εκπομπής θα έπρεπε να είναι τεράστια προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες ενός τέτοιου προφίλ λειτουργίας. Έτσι ένας ιδανικός συμβιβασμός είναι η χρήση του ημιτονοειδούς προφίλ λειτουργίας του ακροφυσίου με συμμασική λειτουργία των μεγίστων σημείων της θέσης του ακροφυσίου και της τιμή πίεσης στην εισαγωγή (ίση με την εκάστοτε αντίστοιχη τιμή της θέσης του ακροφυσίου του VGT) έτσι ώστε να μην υπάρχει περίπτωση υπερεπιτάχυνσης του συμπιεστή και επίτευξης υπερπλήρωσης πέρα των επιτρεπτών ορίων (Σχήμα 1 (β)). Παρ'όλα αυτά, πειραματικά πολλές διαφορετικές συζυγίες φάσεων (πίεσης/θέσης ακροφυσίου) δοκιμάστηκαν διότι τα κυματικά φαινόμενα και η γεωμετρία (μήκος/σχήμα) της πολλαπλής σε ένα σύγχρονο κινητήρα είναι τόσο πολύπλοκες που δεν μπορεί να υπάρχει γνώση αναφορικά με το ποία είναι η καταλληλότερη φάση της θέσης του ακροφυσίου σε σχέση με τη φάση της πίεσης στην εισαγωγή του στροβίλου και η οποία ταιριάζει αποδοτικότερα με το χρονισμό της βαλβίδας εξαγωγής, με την απλή και αποκομμένη από τον πραγματικό κινητήρα μελέτη του στροβίλου στο εργαστήριο.

Μια απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχήμα 2, όπου ένα ακροφύσιο τύπου Ολισθαίνοντος Δακτυλίου (Sliding Wall) κινείται σε αξονική διεύθυνση (ως προς τον άξονα περιστροφής του στροβίλου), εγκάρσια ως προς την κατεύθυνση των επερχόμενων καυσαερίων στην εισαγωγή του στροβίλου. Το ακροφύσιο λειτουργεί σαν βαλβίδα στραγγαλισμού, ελαττώνοντας την επιφάνεια της εισαγωγής στην αρχή του χρόνου εξαγωγής καυσαερίων (όταν η πίεση είναι ακόμα χαμηλή στις βαλβίδες εξαγωγής του κυλίνδρου). Όταν η πίεση φτάνει στο μέγιστο, το ακροφύσιο αυτό έχει αποσυρθεί στην αρχική θέση του, παραδίνοντας έτσι ολόκληρη την επιφάνεια διατομής της εισαγωγής στη ροή ώστε να αποφευχθεί υπερπίεση (εφ'όσον υπάρχει τέτοιος κίνδυνος, αλλιώς απλά εξισώνεται η θέση του με την αντίστοιχη θέση του VGT, π.χ., εάν το ακροφύσιο του VGT βρίσκεται σταθερά στο 60% της επιφάνειας της εισαγωγής, τότε το ακροφύσιο του ACT πάλλεται ανάμεσα στο 60% και κάποια κατώτερη τιμή π.χ., 30% συναρτήσει πάντα των αναγκών λειτουργίας του κινητήρα). Στο τέλος του χρόνου εξαγωγής το ακροφύσιο επανέρχεται στην ίδια θέση όπως αρχικά, για να μπορέσει να κρατήσει το επίπεδο ενέργειας των καυσαερίων υψηλά.



Σχήμα 2: Απλοποιημένη αρχή λειτουργίας του ενεργού ελέγχου της ροής καυσαερίων σε στρόβιλο υπερπληρωτή

Η αρχή λειτουργίας και η ιδέα πίσω από την ανάπτυξη του ACT σε σχέση και με το αποτέλεσμα της λειτουργίας του στον κινητήρα φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Αρχή λειτουργίας του ACT σε σχέση με το σημερινό VGT. Με διακεκομμένες γραμμές φαίνεται η επίδραση του ACT σε σχέση με το VGT, με κόκκινο η στιγμιαία απόδοση του ACT στην αύξηση της πίεσης των καυσαερίων και με μπλέ η μέση αύξηση στην πίεση υπερπλήρωσης, Pesiridis and Martinez-Botas (2007).

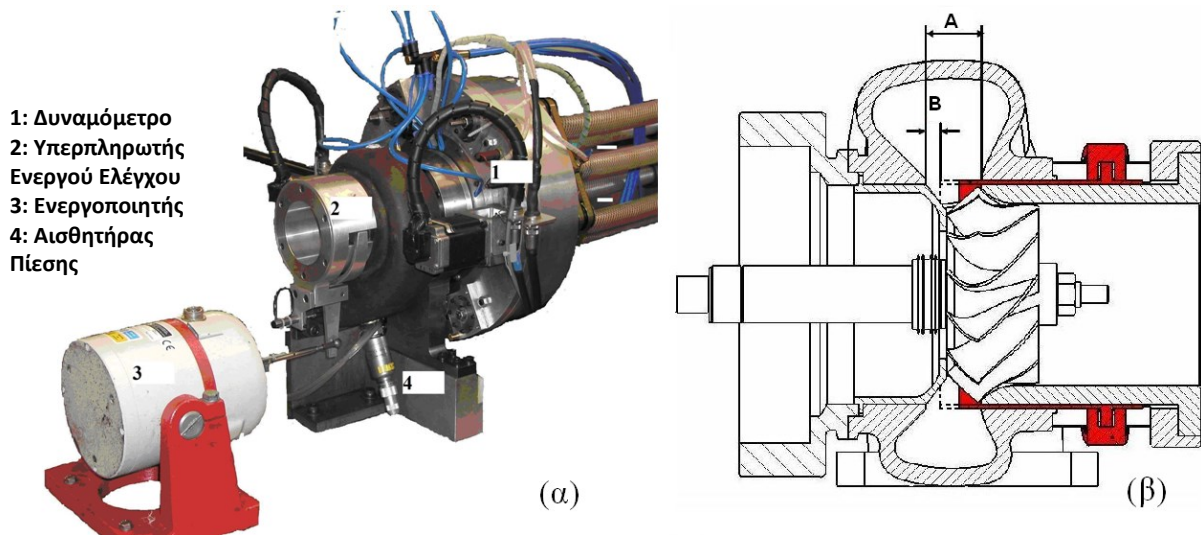
Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, δίνονται σε συντομία η πειραματική περιγραφή και τα αποτελέσματα από της δοκιμές του ACT στο Imperial College και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του ACT εφαρμοσμένου σε πετρελαιοκινητήρα

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΟΥ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1 Πειραματική Εγκατάσταση

Οι δοκιμές του ACT έγιναν στην εργαστήριο δοκιμών υπερπληρωτών του Imperial College τόσο σε σταθερές όσο και σε παλλόμενες συνθήκες ροής. Πεπιεσμένος αέρας χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις αντί καυσαερίου με τις μεταβλητές πιέσεις και ρυθμού ροής κλιμακούμενες ώστε να ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες των πολύ θερμότερων καυσαερίων του κινητήρα. Οι θερμοκρασίες στις οποίες έγιναν οι δοκιμές ήταν μεταξύ 60 και 71° C, Szymko et al (2005). Ο στρόβιλος ήταν συνδεδεμένος με δυναμόμετρο μόνιμου μαγνητισμού, ρευμάτων eddy, που επέτρεψε ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος δοκιμών στο χάρτη λειτουργίας του στρόβιλου απ'ότι θα επέτρεπε η λειτουργία του εάν ήταν συνδεδεμένος με συμπιεστή (λόγω των αεροδυναμικών περιορισμών του συμπιεστή με την εμφάνιση πάλμωσης ή στραγγαλισμού). Οι συνθήκες παλλόμενης ροής δημιουργούνται με τη χρήση μιας γεννήτριας παλμών – μια διπλής βαλβίδας αντιπεριστροφόμενων πλακών με εγκοπές - που προκαλεί τη δημιουργία κυματομορφής του αέρα στην εισαγωγή του στρόβιλου, παρόμοιας με αυτή των κυματομορφών που δημιουργούνται από την αυξομείωση της ροής των καυσαερίων σε κινητήρα, λόγω του ανοίγματος και κλεισίματος των βαλβίδων (Σχήμα 1 (α)).

Τα πειράματα με τον ACT έγιναν σε σύγκριση με την αντίστοιχη λειτουργία του ίδιου στρόβιλου ως VGT (η διαφορά στη λειτουργία τους έγκειται στη λειτουργία του ενεργοποιητή στην περίπτωση του ACT προς επίτευξη της ταλάντωσης του ακροφυσίου. Το Σχήμα 4 (α) δείχνει το εγκαταστημένο σύστημα ACT στο εργαστήριο και (β) τη διατομή ενός ACT με το αξονικό ακροφύσιο (τύπου Δακτυλίου) και τη μέγιστη (A) και ελάχιστη θέση (B) του στο λαιμό της εισαγωγής του στρόβιλου.



Σχήμα 4: (α) Πειραματική εγκατάσταση ACT, Pesiridis and Martinez-Botas (2007) και (β) διατομή του ACT με το μηχανισμό του ακροφυσίου.

2.2 Πειραματικές Δοκιμές

Οι δοκιμές του ACT έγιναν με την αναπαράσταση (μέσα από τον τρόπο λειτουργίας του εργαστηρίου) ενός βαρέος πετρελαιοκινητήρα χωρητικότητας 10 λίτρων. Οι συνθήκες λειτουργίας του ACT και του VGT κατά τις δοκιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 1, παρακάτω:

Πίνακας 1: Σταθερές συνθήκες δοκιμών του ACT και του VGT

Αντίστοιχη Ταχύτητα (%)	Ταχύτητα Στροβίλου (σ.α.λ.)	Θερμοκρασία Εισαγωγής Στροβίλου (° K)	Συχνότητα Παλμών (Hz)
50	29461	333	20-60
70	41491	337	20-60
90	53661	341	40

Η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί στο εργαστήριο ήταν 60,000 στροφές/λεπτό (σαλ). Οι δοκιμές έγιναν για τρεις διαφορετικές ταχύτητες και θερμοκρασίες αντίστοιχα από 333° K μέχρι 341° K. Για αυτές τις τρεις ταχύτητες περιστροφής του στροβίλου, η αλλαγή στη ρύθμιση των στατόρων του δυναμόμετρου, αλλάζει και το φορτίο στο στρόβιλο.

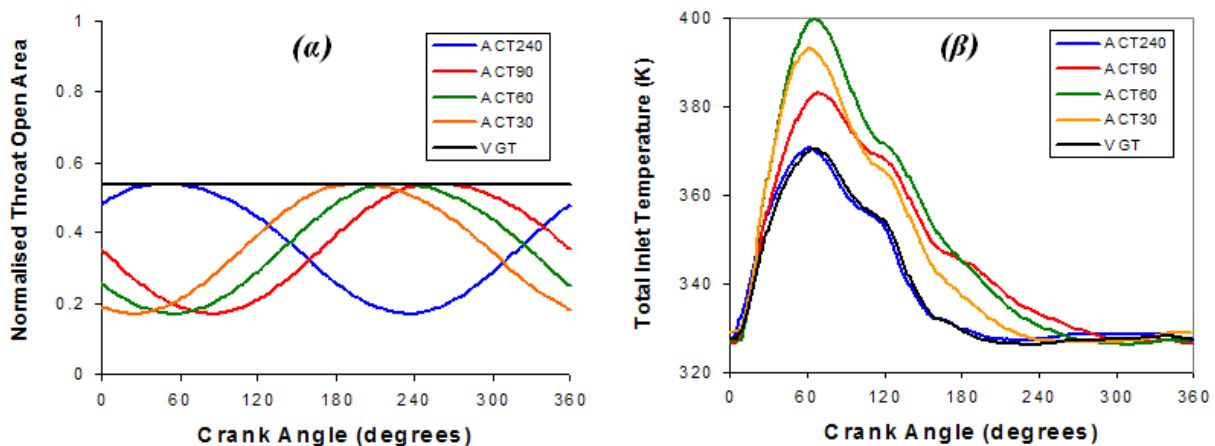
Πίνακας 2: Σταθερές συνθήκες ρύθμισης των αποκλειστικών μεταβλητών του ACT

Παράμετρος	Εύρος Δοκιμών		
Συχνότητα (Hz)	20, 40, 60		
Πλάτος, $\Delta\theta_{ACT}$ (% Ανοιχτό)	17.3-38.4	17.3-53.8	17.3-69.2
Φάση (°)	30, 60, 90, 240		

Έτσι οι δοκιμές διεξήχθησαν για ένα μεγάλο εύρος πιέσεων μέχρι το όριο των 3 bar στην εισαγωγή του στροβίλου. Στον Πίνακα 2 φαίνονται και οι συγκεκριμένες ρυθμίσεις του ACT κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Η φάση στον Πίνακα 2 αναφέρεται στη διαφορά φάσης ανάμεσα στο χρονικό σημείο όταν η θέση του ακροφυσίου, θ_{ACT} , ισούται με $\theta_{ACT,min}$ και την αρχή της περιόδου εξαγωγής (αρχή του παλμού ή αρχή ανοίγματος των βαλβίδων εξαγωγής του κινητήρα).

Ένα τυπικό παράδειγμα αποτελέσματος φαίνεται στο Σχήμα 5. Στο Σχήμα 5 (α) διακρίνεται μια αντιστοιχία συγκριτικών δοκιμών, όπου για συγκεκριμένη θέση του ακροφυσίου του VGT διακρίνονται τέσσερις διαφορετικές φάσεις του ACT σύμφωνα με τον Πίνακα 2. Στο Σχήμα 5 (β) φαίνεται η επίδραση στη θερμοκρασία εισαγωγής, όπου φαίνεται καθαρά ότι το ACT πετυχαίνει σημαντικά οφέλη από ενεργειακή άποψη, με την αύξηση της θερμοκρασίας στην εισαγωγή παρέχοντας τη δυνατότητα για μεγαλύτερη μετατροπή έργου στη φερωτή του στροβίλου. Τα αποτελέσματα για τις άλλες μεταβλητές ήταν πανομοιότυπα.



Σχήμα 5: (α) Θέσεις του ακροφυσίου για λειτουργία VGT και για τέσσερις διαφορετικές φάσεις του ACT για συγκεκριμένο πλάτος ταλάντωσης και (β) η επίδραση των διαφορετικών ρυθμίσεων στο (α) πάνω στη θερμοκρασία.

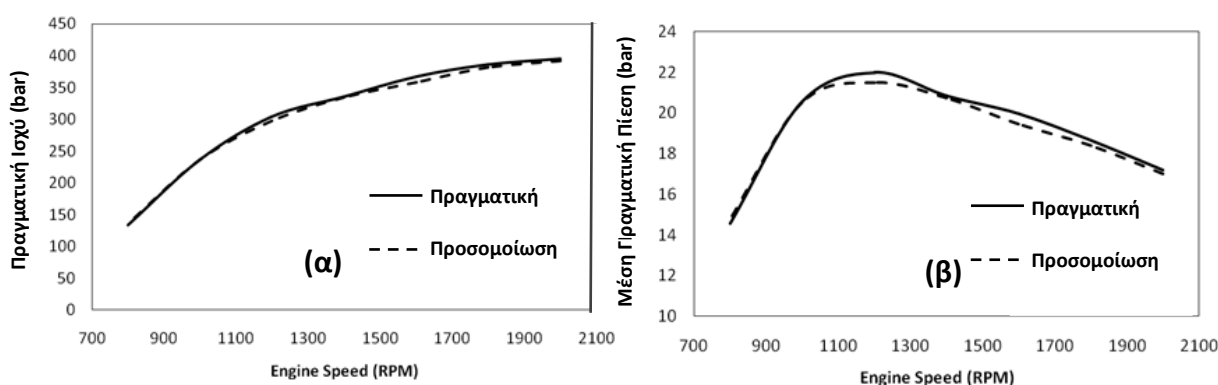
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η εφαρμογή ενεργού ελέγχου στην εισαγωγή του στροβίλου παρουσιάζει αξιοσημείωτη ικανότητα ανάκτησης της απορριφθείσας

ενέργειας των καυσαερίων του κινητήρα με μέγιστος όφελος σε πραγματική ισχύ στο στρόβιλο μέχρι 7,51% σε σχέση με το VGT (στο μέγιστο πλάτος ταλάντωσης που δοκιμάστηκε και στη φάση των 60°, Πίνακας 2) και με ελάχιστη ανάκτηση ενέργειας 1,36% στη φάση των 240°. Ο ACT επιτυγχάνει τις καλύτερες επιδόσεις του στις χαμηλότερες στροφές και ισχύεις του φακέλου λειτουργίας του και, αντίστοιχα, πετυχαίνει μεγαλύτερη ανάκτηση ισχύος όταν η ταλάντωση του ακροφυσίου έχει μέγιστο πλάτος και όταν η ελάχιστη θέση του βρίσκεται +60° εκτός φάσης από την αρχή της περιόδου του παλμού πίεσης που εισέρχεται στο στρόβιλο. Οι άλλες καλύτερες αποδόσεις των φάσεων στη λειτουργία του ακροφυσίου συμβαίνουν κατά σειρά 90°, 30° και 240° εκτός φάσης σε σχέση με την χρονική στιγμή της αρχής του παλμού πίεσης στην εισαγωγή του στροβίλου.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Ένας εμπορικά διαθέσιμος μονοδιάστατος κώδικας χρησιμοποιήθηκε και εφαρμόστηκε σε εξακύλινδρο πετρελαιοκινητήρα φορτηγού οχήματος χωρητικότητας 10 λίτρων ο οποίος διαθέτει VGT. Ύστερα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου ώστε οι επιδόσεις του σε ισχύ, ροπή και μέση αποτελεσματική πίεση να συμπίψουν με τα διαθέσιμα από την εταιρεία στοιχεία, τροποποιήθηκε στο μοντέλο η λειτουργία του VGT ώστε να μπορεί να λειτουργεί ανά παλμό παρέχοντας έτσι δυνατότητα ενεργού ελέγχου, χρησιμοποιώντας όμως τους ίδιους χάρτες λειτουργίας του VGT για δυνατότητα άμεσης σύγκρισης. Σκοπός της μοντελοποίησης ήταν

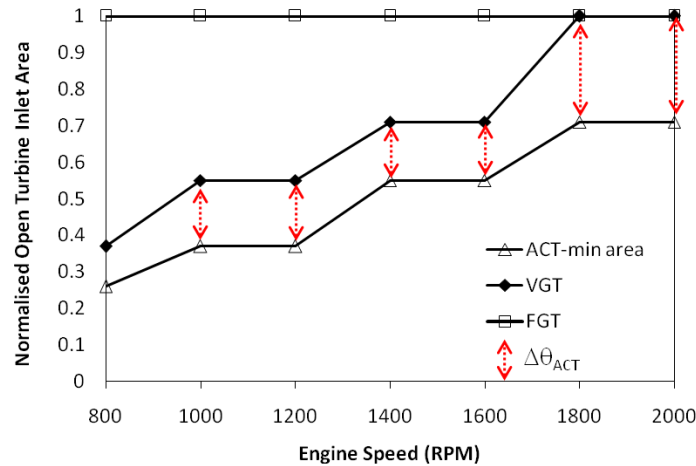
1. η σύγκριση του κινητήρα των 10 λίτρων με VGT και του ίδιου κινητήρα με υπερπληρωτή ACT βασισμένου στο υπάρχον VGT και
2. η σύγκριση ενός κινητήρα της ίδιας σειράς, οκτώ όμως, λίτρων εξοπλισμένου με ACT και τη σύγκρισή του με τις επιδόσεις του αρχικού μοντέλου κινητήρα 10 λίτρων με VGT.



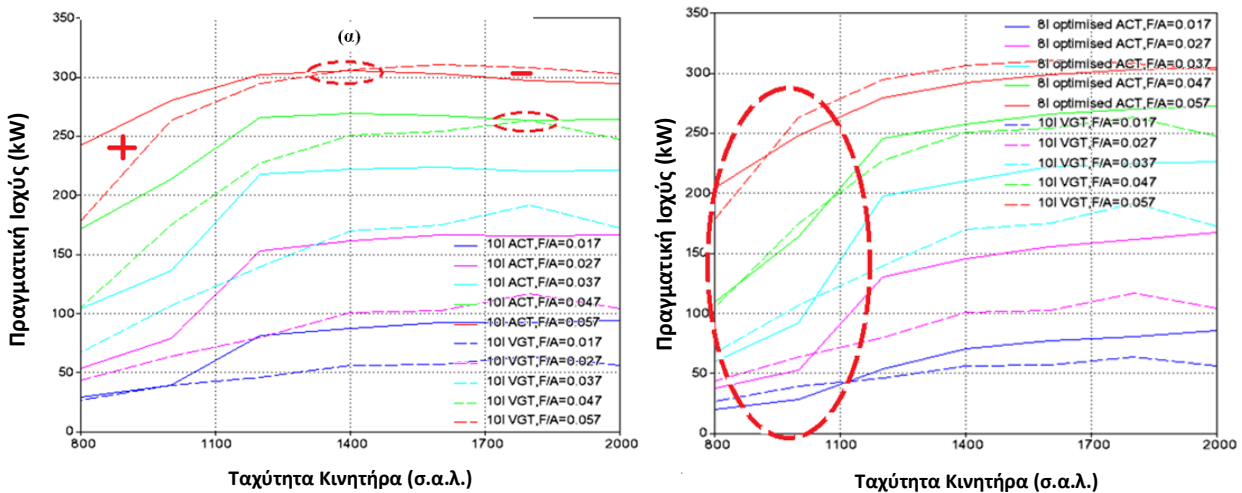
Σχήμα 6: Αποτελέσματα βαθμονόμησης μοντέλου 10λιτρου πετρελαιοκινητήρα ως προς (α)την πραγματική ισχύ του κινητήρα και ως προς (β) την μέση πραγματική, αποτελεσματική πίεση.

Η κυματομορφή όπως ήδη περιγράφηκε ήταν ημιτονοειδής, η συχνότητα ταλάντωσης ίδια με αυτή της συχνότητας εκπομπής παλμών καυσαερίου από τον κινητήρα ενώ το πλάτος περιοριζόταν στο άνω άκρο από την αντίστοιχη θέση του ακροφυσίου του VGT και στην ελάχιστη θέση από τους περιορισμούς του κινητήρα σε πίεση υπερπλήρωσης, θερμοκρασία εισαγωγής των καυσαερίων και την εσωτερική πίεση του μίγματος αέρα-καυσίμου στον κύλινδρο.

Διάφορες φάσεις δοκιμάστηκαν και η βέλτιστη χρησιμοποιήθηκε για χρήση στην προσομοίωση. Το Σχήμα 7, δείχνει τις θέσεις του ακροφυσίου για το FGT, VGT και το ACT.



Σχήμα 7: Θέσεις του ακροφυσίου για λειτουργία FGT VGT και το ACT στο μοντέλο



Σχήμα 8: Αποτελέσματα πραγματικής ισχύος στο εύρος ταχυτήτων του κινητήρα και διαφορετικούς λόγους καυσίμου/αέρα για (α) το 10λιτρο κινητήρα με VGT και ACT και (β) για το 10λιτρο VGT και το συρρικνωμένο 8λιτρο ACT

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για τη σύγκριση του ίδιου 10λιτρου κινητήρα τόσο με VGT όσο και με ACT (στο (α)) όσο και του συρρικνωμένου κινητήρα 8 λίτρων με ACT σε σχέση με το αρχικό 10λιτρο με VGT. Από τα αποτελέσματα στο Σχήμα 8 (α) προκύπτει ότι ο ACT είναι υπέρτερος σε όλο, ουσιαστικά το φάσμα ταχύτητας και λόγου καυσίμου/αέρα του κινητήρα ιδιαίτερα κάτω από τις 1800 στροφές. Στα φτωχότερα μείγματα στις υψηλές στροφές, οι επιδόσεις ισχύος είναι παρόμοιες με το ACT να υστερεί ελάχιστα, αλλά αυτό οφείλεται κυρίως στους περιορισμούς πίεσης και θερμοκρασίας στην πολλαπλή της εξαγωγής παρά σε αδυναμία του ACT για ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια υπό αυτές τις συνθήκες. Στο Σχήμα 8 (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ισχύος του συρρικνωμένου κινητήρα (8 λίτρων) με ACT σε σχέση με τον αρχικό 10λιτρο με VGT. Εδώ οι διαφορές είναι δυσδιάκριτες αλλά προκύπτουν τρία ουσιαστικά συμπεράσματα:

1. Ο συρρικνωμένος κινητήρας με ACT είναι συγκρίσιμος σε ισχύ με το μεγαλύτερο κινητήρα της σειράς του (αλλά μειωμένος σε χωρητικότητα της τάξης του 20%)
2. Στο μεγαλύτερο μέρος των πολύ χαμηλών στροφών (κάτω από 1000σ.α.λ.) ο VGT υπερτερεί ελαφρά του ACT.
3. Στο μεγαλύτερο μέρος των στροφών του κινητήρα (πάνω από 1000σ.α.λ.) ο ACT υπερτερεί ελαφρά του VGT παρά τη σημαντική μείωση της χωρητικότητας των θαλάμων καύσης.

Από τα παραπάνω συμπεράσματα διαφαίνεται επομένως, μια σαφής δυνατότητα του ACT να παρέχει μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τον VGT με δυνατότητα επίτευξης παρόμοιων επιδόσεων από κινητήρα μειωμένο σε χωρητικότητα κατά 20% και σε συνολική μάζα κατά 28%.

Σε σχέση με την ειδική κατανάλωση καυσίμου, στην περίπτωση του ίδιου κινητήρα η απόδοση του ACT σε σχέση με το VGT παρουσιάζεται καλύτερη μέχρι και 30% σε ισχύ και μέχρι 3,3% από την άποψη της βελτίωσης της ειδικής κατανάλωσης. Στην περίπτωση διαφορετικών κινητήρων, οι επιδόσεις του ACT με τον 8λιτρο κινητήρα σε σχέση με το 10λιτρο VGT παρουσιάζονται καλύτερες κατά ένα μέγιστο 13,3% σε υπέρτερη ισχύ και κατά ένα μέγιστο 7% σε μειωμένη κατανάλωση.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η εξέλιξη μιας νέας μορφής υπερπληρωτή που στηρίζεται στην εξέλιξη συστημάτων μεταβλητής γεωμετρίας εισαγωγής υπερπληρωτών: ο Υπερπληρωτής Ενεργού Ελέγχου (ACT). Τα πλεονεκτήματα της μείωσης της διατομής εισαγωγής του στροβίλου ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, στο φάσμα των ταχυτήτων και φορτίου λειτουργίας του είναι γνωστά και ενσωματωμένα στην τεχνολογία μεταβλητής γεωμετρίας (VGT). Η εφαρμογή ενεργού ελέγχου - ο εξ'ορισμού ελέγχος ασταθών ροών, δηλαδή – ξεπήδηξε από την εκτεταμένη ερευνητική εργασία που έχει προηγηθεί στις ασταθείς ροές, όπου το πλάτος εναλλαγής των στιγμιαίων ποσών ενέργειας των καυσαερίων σε ένα χρόνο εξαγωγής καυσαερίου σε κινητήρα εσωτερικής καύσης, είναι εξ'ίσου σημαντικό με τις ενεργειακές μεταβολές των καυσαερίων όταν ο κινητήρας αλλάζει σηματοντικά την ταχύτητα ή το φορτίο λειτουργίας του.

Στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών του πρωτοτύπου ACT παρουσιάζονται μαζί με τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση υπερπληρωτή VGT ώστε αυτός να λειτουργεί και σαν ACT σε ένα εμπορικό 10λιτρο πετρελαιοκινητήρα. Ο ACT μοντελοποιήθηκε επίσης και σε μικρότερο (8λιτρο) κινητήρα της ίδιας οικογένειας ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα τόσο από την άμεση σύγκριση στον ίδιο κίνητηρα όσο και για να εξαχθούν συμπεράσματα για την ικανότητα του ACT να πετυχαίνει συρρίκνωση της χωρητικότητας κινητήρα χωρίς απώλεια επιδόσεων, αλλά με παράλληλη σημαντική βελτίωση στην κατανάλωση καυσίμου και στους εκπεμπόμενους ρύπους.

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς παρουσιάστηκε βελτίωση στην ισχύ του στροβίλου ACT κατά 7,5% σε σχέση με την αντίστοιχη λειτουργία του VGT. Η μοντελοποίηση έδειξε σημαντικά ανώτερη ισχύ από τον ACT κινητήρα κατά 30% περίπου, με παράλληλο μικρό όφελος σε κατανάλωση (πτώση 3,3%). Ο ACT φαίνεται να μπορεί να επιτύχει μείωση της απαιτούμενης χωρητικότητας του 10λιτρου πετρελαιοκινητήρα κατά 20% χωρίς ουσιαστική απώλεια επιδόσεων, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει σημαντικά οφέλη από την άποψη της μείωσης κατανάλωσης καυσίμου (μέχρι 7%) σε σχέση με το VGT.

Βιβλιογραφία

Lumsden, G., OudeNijeweme, D., Fraser, N., and Blaxill, H., Development of a Turbocharged Direct Injection Downsizing Demonstrator Engine, SAE Paper 2008-01-0611, 2008.

Pesiridis, A., and Martinez-Botas, R., “Experimental Evaluation of Active Flow Control Mixed-Flow Turbine for Automotive Turbocharger Application”, Journal of Turbomachinery, Volume 129, Issue 1, pp. 44-52, January 2007.

Shahed, S. M., 2003, Gasoline Engine Downsizing and Boosting for CO₂ Emission Reduction, California Air Resource Board, Climate Change - International Vehicle Technology Symposium, March 11-13, 2003, Sacramento, CA, 2003.

Szymko, S., Martinez-Botas, R.F. and Pullen, K.R., Experimental Evaluation of Turbocharger Turbine Performance under Pulsating Flow Conditions, Proc. of ASME Turbo Expo, paper GT 2005-68878, 2005.

Watson, N., and Janota, M.S., Turbocharging the Internal Combustion Engine, Wiley Interscience, New York, 1982.

Summary in English

The present paper presents the results of many years of research into a new type of turbocharging technology, developed by the Turbomachinery Group of Imperial College in England: the Active Control Turbocharger (ACT). ACT is a turbocharger that consists of a system and method of operation which provide suitable inlet geometry throughout the exhaust gas period of the engine with which it is connected. In this way inlet geometry is adjusted in an active manner to the especially dynamic, high frequency characteristics of the exhaust flow which pass through the turbocharger turbine. The technology has been developed with a view to offer a new option in meeting with the ever increasing requirements as a result of the increasingly stringent emissions regulations, as well as the drivability requirements of users of internal combustion equipped vehicles. The present paper presents experimental results from the first prototype ACT and the results from a one-dimensional simulation of ACT on a Diesel engine, according to which ACT shows an increased capability to take advantage of exhaust gas energy of up to 7.5%, experimentally, while the theoretical model shows significant improvement of an ACT-equipped engine compared to a VGT engine of up to 30% in terms of power. For the same levels of power ACT appears to be capable of reducing the required engine capacity of the engine by 20% compared to the same initial VGT engine.