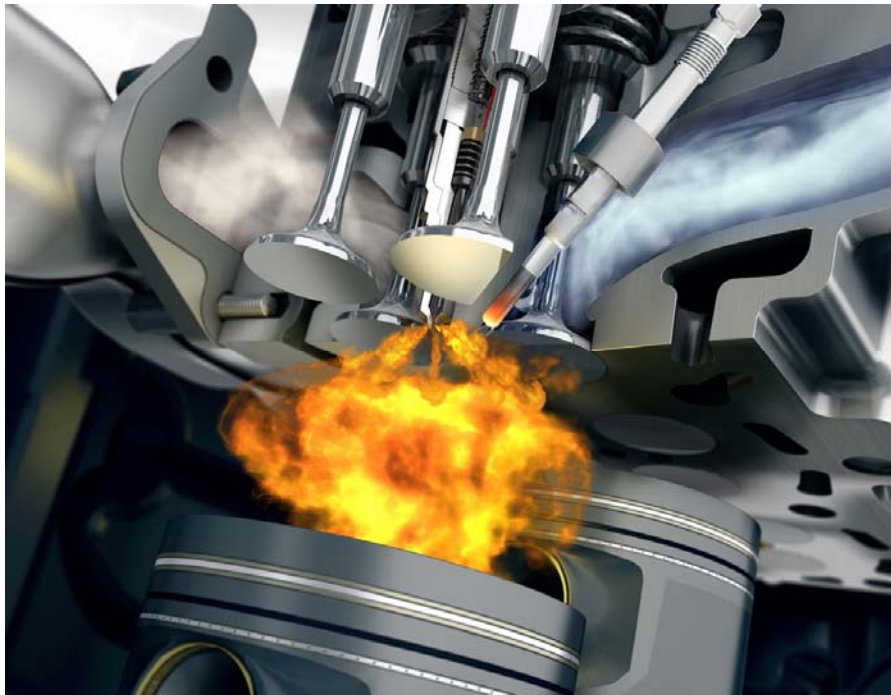




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ



ΑΛΕΞΙΟΣ Σ. ΚΑΚΑΪΤΣΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

Πρόλογος

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ευάγγελο Γιακουμή, για την ανάθεση του θέματος και για την συνεχή καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου, για την αμέριστη συμπαράστασή τους και την πολύτιμη συνεισφορά τους σε κάθε μου βήμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	5
1. Κινηματικός μηχανισμός εμβόλου-διωστήρα-στροφάλου	
1.1. Η μετατόπιση του εμβόλου.....	7
1.2. Η ταχύτητα του εμβόλου.....	8
1.3. Η επιτάχυνση του εμβόλου.....	9
2. Δυνάμεις του κινηματικού μηχανισμού	
2.1. Δυνάμεις από αέρια.....	12
2.2. Μαζικές δυνάμεις.....	16
2.2.1. Παλινδρομικές μαζικές δυνάμεις.....	19
2.2.2. Περιστρεφόμενες μαζικές δυνάμεις.....	21
2.3. Επαλληλία δυνάμεων από αέρια και μαζικών δυνάμεων.....	23
3. Ανομοιομορφία περιστροφής στροφαλοφόρου ατράκτου	
3.1. Ομοιομορφία στην ταχύτητα περιστροφής.....	25
3.2. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα στην περιστροφή του κινητήρα.....	26
3.2.1. Συμβατικός βαθμός ανομοιομορφίας περιστροφής.....	30
3.2.2. Ο σφόνδυλος.....	30
3.2.3. Μηχανικές απώλειες και ροπή τριβών.....	32
4. Εφαρμογή σε μονοκύλινδρο κινητήρα Diesel	
4.1. Γενικά.....	35
4.2. Αλγόριθμος υπολογισμού ταχύτητας περιστροφής.....	38
4.3. Υπολογισμός δυνάμεων και ροπών στα ονομαστικά μεγέθη.....	41
4.3.1. Συνολική ροπή.....	43
4.3.2. Στρεπτικές ροπές και ταχύτητα περιστροφής.....	44

5. Παραμετρική ανάλυση	
5.1. Γενικά.....	46
5.2. Επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στο βαθμό ανομοιομορφίας περιστροφής.....	47
5.2.1. Συνολική παλινδρομούσα μάζα.....	48
5.2.2. Συνολική ροπή αδράνειας.....	50
5.2.3. Λόγος λ.....	52
5.2.4. Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα.....	54
5.2.5. Φορτίο.....	58
5.2.6. Μορφή συνδεδεμένης αντίστασης.....	64
5.4. Πολυκύλινδροι κινητήρες.....	68
5.4.1. Δικόλινδρος 4-Χ κινητήρας.....	71
5.4.2. Τετρακύλινδρος 4-Χ κινητήρας διάταξης σειράς.....	73
5.4.3. Εξακύλινδρος 4-Χ κινητήρας διάταξης σειράς.....	76
5.4.4. Οκτακύλινδρος 4-Χ κινητήρας διάταξης σειράς.....	78
6. Σύνοψη – Συμπεράσματα.....	84
Βιβλιογραφία.....	87

Εισαγωγή

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η εξέταση του φαινομένου της ανομοιομορφίας περιστροφής της ατράκτου εμβολοφόρου κινητήρα, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, φαινόμενο που οφείλεται στην (ισχυρή) μεταβλητότητα που παρουσιάζει η στρεπτική ροπή του κινητήρα (πρωτίστως των δυνάμεων εξ' αερίων), κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας του. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε υπολογιστικός αλγόριθμος, με τα σχετικά αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Επίσης, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της επίδρασης διάφορων τεχνικών χαρακτηριστικών του κινητήρα στο μέγεθος της ανομοιομορφίας περιστροφής (Κεφάλαιο 5). Η θεωρητική ανάλυση στα Κεφάλαια 1 και 2, προέρχεται από την Παραπομπή Νο. 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	
b	Επιτάχυνση εμβόλου (m/s^2)
c	Ταχύτητα εμβόλου (m/s)
ℓ, L	Μήκος διωστήρα (m)
M	Στρεπτική ροπή (Nm)
m	Μάζα (Kg)
N	Δύναμη παρειάς κυλίνδρου (N)
P	Δύναμη (N)
r	Ακτίνα τροφάλου (m)
S	Δύναμη διωστήρα (N)
s	Διαδρομή εμβόλου (m)
T	Στρεπτική δύναμη (N)
β	Γωνία διωστήρα (μοίρες)
Θ	Μαζική ροπή αδρανείας (kgm^2)
φ	Γωνία τροφάλου (μοίρες)
χ	Μετατόπιση εμβόλου (m)
ω	Γωνιακή ταχύτητα τροφάλου (rad/s)
Δείκτες	
g	Από αέρια
ℓ	Παλινδρομούσες
r	Περιστρεφόμενες
δ	Διωστήρας
ε	Έμβολο
σ	Στρόφαλο

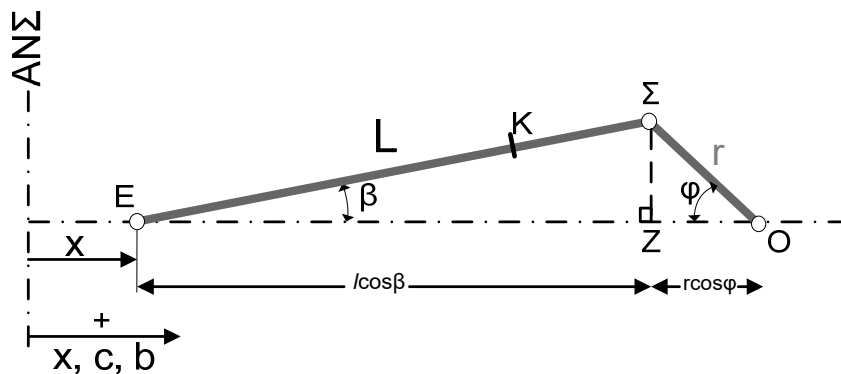
1. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΜΒΟΛΟΥ-ΔΙΩΣΤΗΡΑ-ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ

1.1. Η μετατόπιση του εμβόλου

Για τη τυχούσα θέση του στροφάλου, που καθορίζεται από τη σχετική γωνία στροφάλου φ (crank angle), η μετατόπιση του εμβόλου x από το ΑΝΣ, είναι σύμφωνα με το Σχήμα 1.1

$$x = r + \ell - \ell \cdot \cos\beta - r \cdot \cos\varphi \quad (1.1)$$

όπου β είναι η γωνία του διωστήρα, r η ακτίνα του στροφάλου ($r = \frac{s}{2}$, όπου s η διαδρομή του εμβόλου) και ℓ το μήκος του διωστήρα.



Σχήμα 1.1 Στοιχεία του κινηματικού μηχανισμού

Από τα ορθογώνια τρίγωνα ΕΣΖ και ΟΣΖ, παίρνουμε

$$(\Sigma Z) = \ell \cdot \sin\beta = r \cdot \sin\varphi \quad (1.2)$$

οπότε, θέτοντας $\lambda = \frac{r}{\ell}$ και εκφράζοντας το $\cos\beta$ συναρτήσει του $\sin\beta$, παίρνουμε

$$\sin\beta = \lambda \cdot \sin\varphi \text{ και } \cos\beta = \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi)} \quad (1.3)$$

Το μέγεθος $\lambda = \frac{r}{\ell}$ αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της δυναμικής του κινηματικού μηχανισμού του εμβολοφόρου κινητήρα.

Επομένως, η ακριβής έκφραση με την οποία υπολογίζεται η μετατόπιση x , είναι

$$x = r \cdot (1 - \cos\varphi) + \ell \cdot \left(1 - \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi)}\right) \quad (1.4)$$

1.2. Η ταχύτητα του εμβόλου

Η ταχύτητα του εμβόλου c , προκύπτει με παραγωγή ως προς το χρόνο της διαδρομής του εμβόλου

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.5)$$

με την προϋπόθεση ότι το στρόφαλο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ δηλαδή $\varphi = \omega \cdot t$, κάτι το οποίο, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 4, δεν είναι απόλυτα σωστό.

Έτσι, η τιμή της ταχύτητας προκύπτει από την εξίσωση (1.4), ως

$$c = \omega \cdot r \cdot \sin\varphi \cdot \left(1 + \frac{\lambda \cdot \cos\varphi}{\sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi)}} \right) \quad (1.6)$$

Η φορά αναφοράς της ταχύτητας c λαμβάνεται θετική, όταν κατευθύνεται από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ.

1.3. Η επιτάχυνση του εμβόλου

Η επιτάχυνση του εμβόλου b προκύπτει, ομοίως, με παραγωγή ως προς το χρόνο, της ταχύτητας του εμβόλου c :

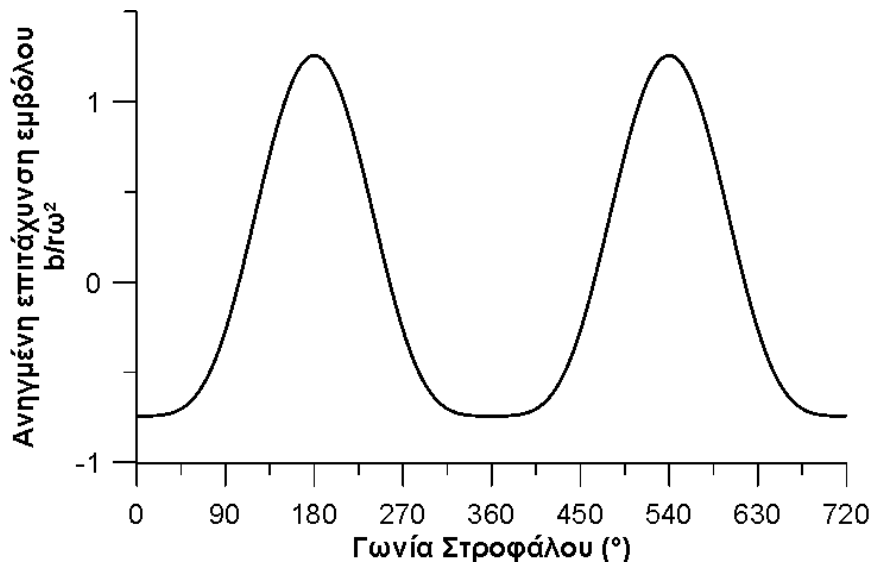
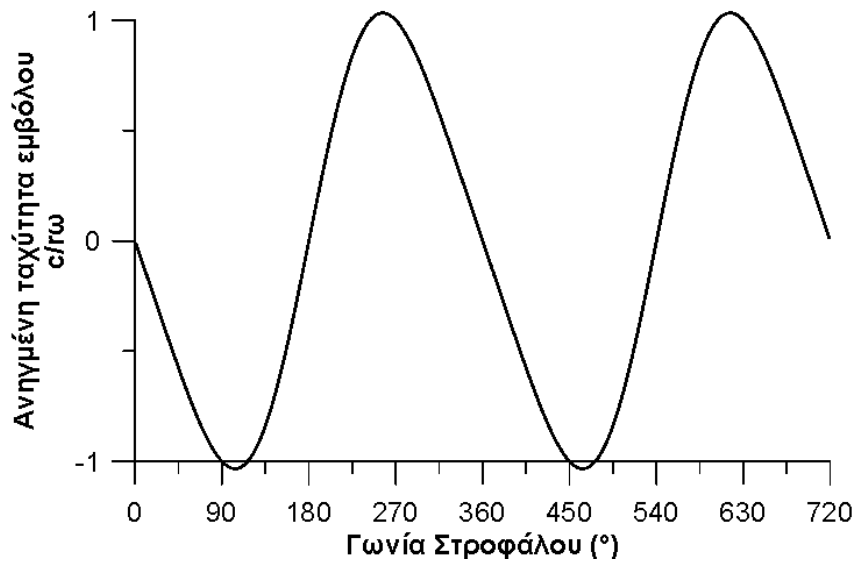
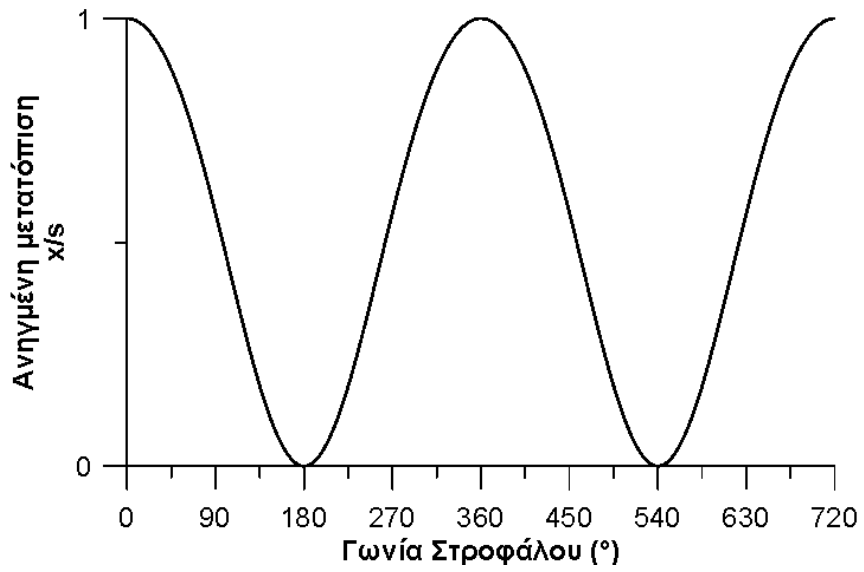
$$b = \frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.7)$$

και, πάλι με την προϋπόθεση ότι $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \text{σταθ.}$, βρίσκεται η τιμή της επιτάχυνσης που προκύπτει από την εξίσωση (1.7), ως

$$b = \omega^2 \cdot r \cdot \left[\cos\varphi + \frac{\lambda(\cos 2\varphi + \lambda^2 \sin^4\varphi)}{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi)^{3/2}} \right] \quad (1.8)$$

Στα Σχήματα 1.2, 1.3 και 1.4 που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της *ανηγμένης μετατόπισης* $\frac{x}{s} = \frac{x}{2r}$, της *ανηγμένης ταχύτητας* $\frac{c}{r\omega}$ και της *ανηγμένης επιτάχυνσης* του εμβόλου $\frac{b}{r\omega^2}$, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου φ , για τον κινητήρα που θα μελετήσουμε στο Κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα έχουν ληφθεί για την εξεταζόμενη περίπτωση λειτουργίας, που είναι στις 1200 rpm.

Σημειώνεται ότι, στην παρούσα μελέτη, 0° γωνίας στροφάλου αντιστοιχούν στο Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ) του εμβόλου, και συγκεκριμένα τη στιγμή που ξεκινά η φάση της συμπίεσης. Επομένως, η μέγιστη πίεση του αερίου στο εσωτερικό του κυλίνδρου, παρατηρείται όταν η άτρακτος έχει περιστραφεί κατά 180° (+ μερικές μοίρες). Τα στοιχεία αυτά, θα φανούν αναλυτικά στα Κεφάλαια 4 και 5, όπου και θα γίνει η έκθεση αποτελεσμάτων.



Σχήματα 1.2-1.3-1.4 Μεταβολή της ανηγμένης μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης του εμβόλου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για $n=1200\text{rpm}$

2. ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

2.1. Δυνάμεις από αέρια

Η πίεση των αερίων μέσα στον κύλινδρο μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ, μεταβάλλεται σε ευρύτατα όρια, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας. Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα (λαμβάνόμενο με μέτρηση), δίνει την τιμή της πίεσης p_g από αέρια, σε κάθε θέση του εμβόλου x , και επομένως και για κάθε συνολικό όγκο V , ή σε κάθε γωνία του στροφάλου φ (διάγραμμα p - φ ή p - t , εφόσον $\varphi = \omega \cdot t$, για ω σταθερό).

Τα αέρια, λόγω της πίεσης αυτής p_g , εξασκούν (Σχήμα 2.1):

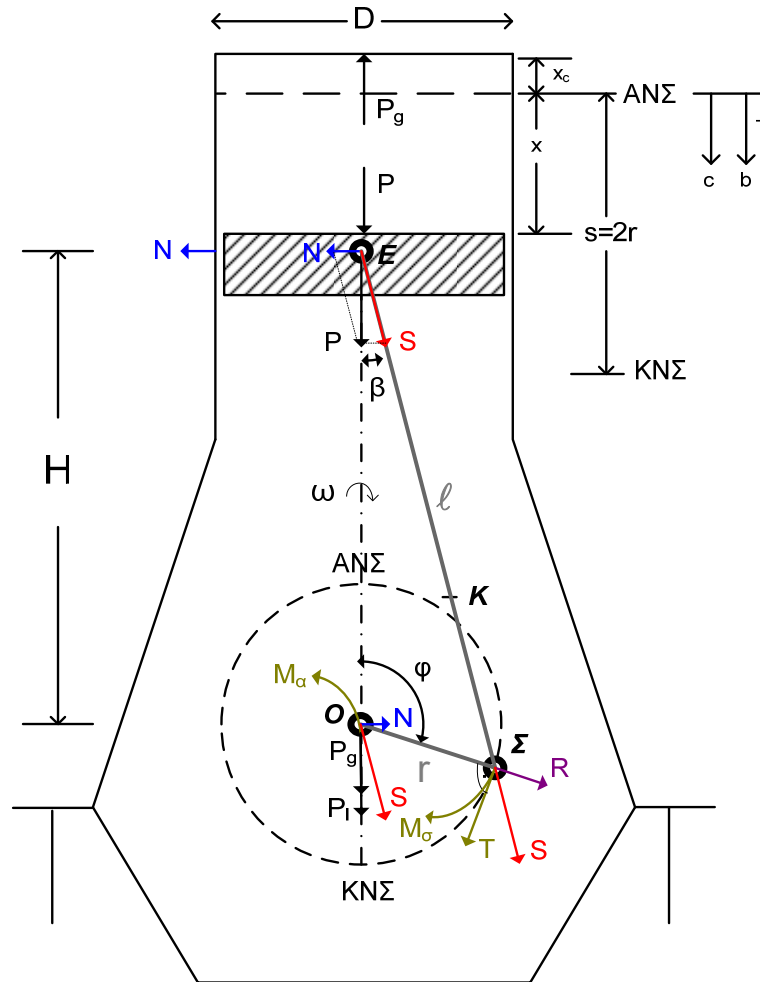
- Στο έμβολο τη δύναμη P_g κατά τον άξονα του κυλίνδρου με φορά πάντα από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ
- Στο κάλυμμα του κυλίνδρου ίση κατά μέτρο δύναμη P_g , με αντίθετη όμως φορά (στα παράπλευρα τοιχώματα η συνισταμένη είναι μηδενική)

Το μέτρο της P_g σε κάθε χρονική στιγμή (γωνία στροφάλου), δίνεται από τη σχέση:

$$P_g = \frac{\pi}{4} D^2 p_g \quad (2.1)$$

όπου η πίεση p_g δίνεται από τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα του κινητήρα για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Ως p_g λαμβάνεται, κατά κανόνα, η μανομετρική πίεση, καθώς στην κάτω πλευρά του εμβόλου (στροφαλοθάλαμος) ασκείται η πίεση της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 2.1 Δυνάμεις του κινηματικού μηχανισμού [6]

Την P_g παραλαμβάνει:

- Το τοίχωμα του κυλίνδρου μέσω του εμβόλου (δύναμη παρειάς κυλίνδρου N κάθετη στο τοίχωμα η οποία κείται στο επίπεδο που διαγράφει ο διωστήρας)

$$N_g = \text{δύναμη παρειάς κυλίνδρου} = P_g \cdot \tan\beta \quad (2.2)$$

- Ο διωστήρας (δύναμη S), ο οποίος μπορεί να μεταβιβάζει δύναμη μόνο κατά τον άξονά του, καθώς θεωρείται ως αβαρής ράβδος, αμφιαρθρωτή κατά τα δύο άκρα της προς το έμβολο και το στρόφαλο

$$S_g = \text{δύναμη διωστήρα} = \frac{P_g}{\cos\beta} \quad (2.3)$$

Η δύναμη S_g μεταβιβάζεται μέσω του διωστήρα στο κομβίο του στροφάλου και η αναγωγή της στο σημείο O δίνει μία δύναμη ίση προς αυτήν, που ασκείται στο έδρανο βάσης, καθώς και μία ροπή επί της στροφαλοφόρου ατράκτου, που αποτελεί τη στρεπτική ροπή του κινητήρα.

Η δύναμη S_g , μπορεί να αναλυθεί στο σημείο Σ σε δύο συνιστώσες T_g και R_g που ονομάζονται, αντίστοιχα, στρεπτική δύναμη στροφάλου (κάθετη πάντοτε στο στρόφαλο) και ακτινική δύναμη στροφάλου (κατά τη διεύθυνση της ακτίνας του στροφάλου).

Με βάση το Σχήμα 2.1, οι εκφράσεις των T_g και R_g (αμελώντας τριβές) είναι οι εξής:

$$T_g = S_g \sin(\varphi + \beta) = P_g \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \quad (2.4.α)$$

Να σημειωθεί ότι, από καθαρά ενεργειακή θεώρηση και λαμβάνοντας υπόψη ότι η ισχύς της P_g είναι ίση με την ισχύ της T_g (αμελουμένων μηχανικών απωλειών), δηλαδή ότι ισχύει $P_g c dt = T_g r d\varphi$ καταλήγουμε και στη σχέση για τον προσδιορισμό της T_g :

$$T_g = P_g \left(\frac{c}{r\omega} \right) \quad (2.4.β)$$

που είναι εξαιρετικά χρήσιμη, αφού παρέχει τη στρεπτική δύναμη T_g εάν είναι γνωστή η P_g (δηλαδή δεδομένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα, όπως και στην εφαρμογή στο Κεφάλαιο 4), δεδομένου ότι ο λόγος $c/r\omega$ είναι γνωστός για κάθε θέση του εμβόλου.

$$R_g = S_g \cos(\varphi + \beta) = P_g \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \quad (2.5)$$

Η στρεπτική ροπή είναι τότε:

$$M_{\sigma g} = T_g r = P_g r \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \quad (2.6)$$

με φορά αναφοράς τη φορά της γωνίας φ . Δηλαδή, η $M_{\sigma g}$ είναι θετική εάν έχει τη φορά αναφοράς της γωνιακής ταχύτητας ω , βάσει της οποίας ορίζεται η φορά της φ .

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, καταλήγουμε, ότι το τελικό αποτέλεσμα της δράσης της πίεσης των αερίων, επάνω στο κέλυφος της μηχανής, είναι η εξάσκηση των εξής δυνάμεων:

- Της P_g απευθείας στο κάλυμμα της μηχανής
- Της N_g στο τοίχωμα του κυλίνδρου
- Της S_g στο έδρανο βάσης του κινητήρα, η οποία μπορεί να αναλυθεί στις συνιστώσες N_g και P_g

Προφανώς, οι δυνάμεις αυτές, αναγόμενες σε τυχόν σημείο, δίνουν συνισταμένη δύναμη μηδενική, αλλά όμως ροπή διάφορη του μηδενός που καλείται Ροπή Ανατροπής $M_{\sigma g}$. Αυτή, τείνει να ανατρέψει τη μηχανή και αποτελεί τη μόνη δράση της πίεσης των αερίων στο κέλυφος, μεταβιβαζόμενη

και στη θεμελίωση. Η τιμή της ροπής αυτής, βρίσκεται εφαρμόζοντας το νόμο των ημιτόνων στο τρίγωνο ΟΕΣ (Σχήμα 2.1), οπότε παίρνουμε:

$$\frac{r}{\sin\beta} = \frac{H}{\sin(\varphi + \beta)} \quad (2.7)$$

η οποία με βάση τις εξισώσεις (2.2) και (2.4.α) καταλήγει στην

$$M_{ag} = N_g H = -M_{og} \quad (2.8)$$

Η σχέση αυτή δείχνει, ότι η ροπή ανατροπής σε κάθε χρονική στιγμή είναι ίση κατά μέτρο με τη στρεπτική ροπή, με αντίθετη όμως φορά.

Σημειώνεται ότι, όλη η προηγούμενη ανάλυση για τον προσδιορισμό δυνάμεων και ροπών, έγινε ξεκινώντας από τη δύναμη P_g των αερίων, όπως αυτή εφαρμόζεται επί του εμβόλου. Δεν ελήφθη δηλαδή υπόψη η συνεχής μείωση λόγω των παρεμβαλλόμενων τριβών. Αυτό έγινε εξ' ανάγκης, εφόσον δεν είναι γενικά δυνατός ο καθορισμός της διανομής των τριβών στις διάφορες θέσεις του μηχανισμού. Είναι φανερό όμως, ότι με αυτή τη μέθοδο, βρισκόμαστε πάντα στην ασφαλή πλευρά του υπολογισμού αντοχής.

2.2. Μαζικές δυνάμεις

Οι αναπτυσσόμενες μαζικές δυνάμεις προκαλούνται από τις κινούμενες μάζες του κινηματικού μηχανισμού. Οι μάζες αυτές εκτελούν παλινδρομική, περιστροφική και μικτή κίνηση.

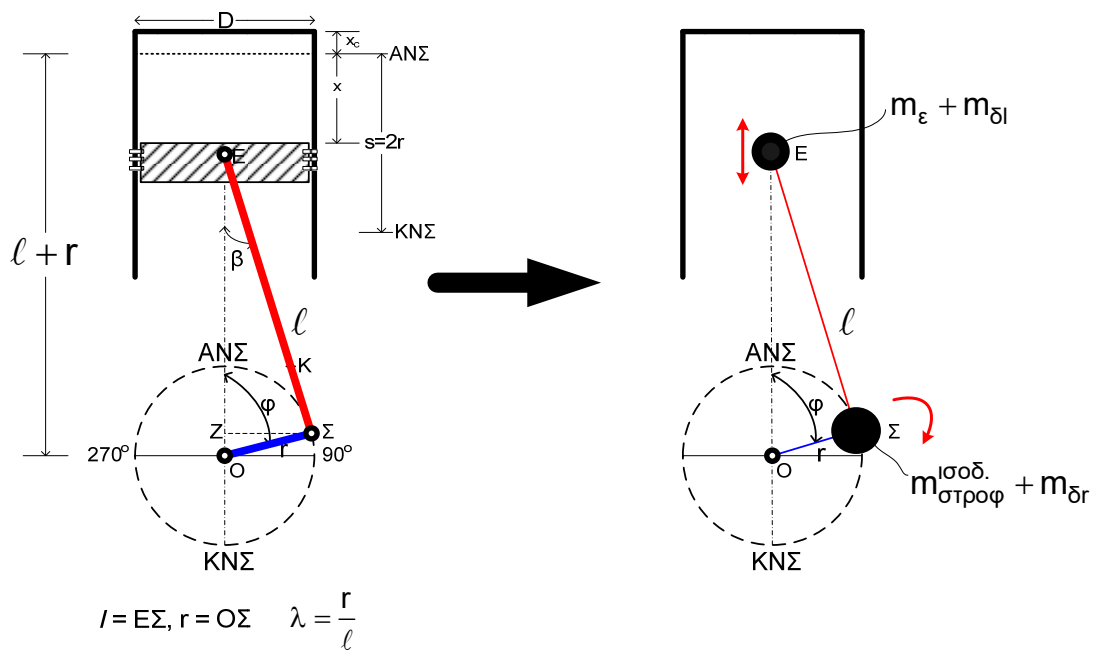
Στην πρώτη κατηγορία (παλινδρομούσες μάζες), ανήκουν οι μάζες του εμβόλου και των στοιχείων που παλινδρομούν μαζί του (ελατήρια στεγανότητας

και λίπανσης, πείρος του εμβόλου κλπ). Το σύνολο των μαζών αυτών συμβολίζεται με m_ϵ .

Στη δεύτερη κατηγορία (περιστρεφόμενες μάζες), ανήκει η μάζα ενός πλήρους στροφάλου (βραχίονες, κομβίο στροφάλου και βάσης), που, κατάλληλα ανηγμένη στην ακτίνα του στροφάλου r συμβολίζεται με m_σ .

Στην τρίτη κατηγορία, ανήκει η συνολική μάζα του διωστήρα m_δ .

Η αναγωγή της μάζας του στροφάλου στην ακτίνα r , για τον προσδιορισμό της m_σ , γίνεται όπως θα αποδείξουμε παρακάτω (σχέση 2.15).



Σχήμα 2.2 Δυναμικά ισοδύναμο σύστημα κινηματικού μηχανισμού [6]

Γνωρίζουμε ότι ο διωστήρας εκτελεί επίπεδη κίνηση και είναι γνωστή η κινηματική κατάσταση δύο μόνο σημείων του, του E και Σ. Το E έχει την ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου, ενώ το Σ διαγράφει κυκλική τροχιά ακτίνας r . Επειδή λοιπόν ο καθορισμός των δυνάμεων αδράνειας του διωστήρα είναι πολύ δύσκολος, λόγω της σύνθετης κίνησης των διαφόρων σημείων του (εκτός

των σημείων E και Σ), καθώς και λόγω του ότι απαιτείται η γνώση της κατανομής της μάζας του με συνολική τιμή m_δ , αναζητείται ένα δυναμικά ισοδύναμο σύστημα, που έχει δύο μόνο μάζες $m_{\delta\ell}$ (παλινδρομούσα) και $m_{\delta r}$ (περιστρεφόμενη), συγκεντρωμένες στα σημεία E και Σ, αντίστοιχα, συνδεδεμένες μεταξύ τους με αμφιαρθρωτή ράβδο, η οποία μεταβιβάζει δυνάμεις μόνο κατά τον άξονά της, Σχήμα 2.2.

Για να είναι το σύστημα των δύο αυτών μαζών δυναμικά ισοδύναμο προς το διωστήρα, θα πρέπει να αντιδρά σε σύστημα εξωτερικών δυνάμεων και ροπών ακριβώς όπως και ο διωστήρας, δηλαδή πρέπει να προκύπτει η ίδια επιτάχυνση του κέντρου βάρους και η ίδια γωνιακή επιτάχυνση του σώματος ως προς άξονα διερχόμενο από το κέντρο βάρους και κάθετου στο επίπεδο της κίνησης. Έτσι, οι αναγκαίες συνθήκες για το ισοδύναμο σύστημα είναι:

1. Η μάζα του να ισούται προς τη μάζα του διωστήρα
2. Το κέντρο βάρους του να συμπίπτει με το κέντρο βάρους του διωστήρα, K
3. Η ροπή αδράνειας του ως προς άξονα διερχόμενο από το κέντρο βάρους και κάθετου στο επίπεδο της κίνησης, να ισούται με την αντίστοιχη ροπή αδράνειας του διωστήρα

Ωστόσο, στις τεχνικές εφαρμογές που μας απασχολούν, όπως και στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, λαμβάνεται ως ισοδύναμο σύστημα του διωστήρα αυτό που προσδιορίζεται από τις δύο πρώτες αναγκαίες συνθήκες, χωρίς το σφάλμα να είναι σημαντικό.

Ο υπολογισμός, λοιπόν, του ισοδύναμου συστήματος των δύο μαζών γίνεται από τις εξισώσεις:

$$\left. \begin{aligned} m_{\delta\ell} + m_{\delta r} &= m_\delta \\ m_{\delta\ell} (EK) &= m_{\delta r} (K\Sigma) \end{aligned} \right| \quad (2.9)$$

Τελικά λοιπόν, ο όλος κινηματικός μηχανισμός ανάγεται σε δύο διακεκριμένες μάζες:

- Μάζα m_ℓ η οποία εκτελεί παλινδρομική κίνηση

$$m_\ell = m_\epsilon + m_{\delta\ell} \quad (2.10)$$

- Μάζα m_r η οποία εκτελεί περιστροφική κίνηση

$$m_r = m_\sigma + m_{\delta r} \quad (2.11)$$

Κατά συνέπεια, διακρίνουμε και δύο ειδών μαζικές δυνάμεις:

- Τις οφειλόμενες στις παλινδρομούσες μάζες (δείκτης ℓ)
- Τις οφειλόμενες στις περιστρεφόμενες μάζες (δείκτης r)

2.2.1. Παλινδρομικές μαζικές δυνάμεις

Η με το ρυθμό του εμβόλου κινούμενη συνολική παλινδρομούσα μάζα m_ℓ , έχει επιτάχυνση b , που δίνεται από την εξίσωση (1.8), με φορά αναφοράς τη φορά που δίνεται στο Σχήμα 2.1.

Έτσι, από το έμβολο θα εξασκείται επί του κινηματικού μηχανισμού η δύναμη

$$P_\ell = -m_\ell b = -m_\ell r \omega^2 \left(\frac{b}{r \omega^2} \right) \quad (2.12)$$

με σταθερό φορέα (άξονας του κυλίνδρου), μεταβαλλόμενης όμως φοράς και μεγέθους συναρτήσει της γωνίας φ .

Αυτό εξηγείται δυναμικώς, από το ότι η επιτάχυνση b του εμβόλου απαιτεί την εξάσκηση επ' αυτού, από τον υπόλοιπο κινηματικό μηχανισμό, μιας δύναμης ίσης προς $P'_\ell = P_\ell = m_\ell b$. Τότε λοιπόν, από το έμβολο θα ασκείται (δράση-αντίδραση) επί του κινηματικού μηχανισμού, η ίση και αντίθετης φοράς δύναμη P_ℓ .

Η P_ℓ , που ασκείται από την m_ℓ , μεταβιβάζεται τελικά, όπως και η P_g , μέχρι της βάσης και της θεμελίωσης της μηχανής, οπότε προκύπτουν μια στρεπτική δύναμη στροφάλου T_ℓ , μια στρεπτική ροπή $M_{\sigma\ell} = T_\ell r$, καθώς και μία ροπή ανατροπής $M_{\alpha\ell} = -M_{\sigma\ell}$.

Είναι προφανές λοιπόν, ότι όλες οι εξισώσεις από (2.1) έως (2.8) για την ανάλυση ή αναγωγή της P_g στα διάφορα σημεία του κινηματικού μηχανισμού, ισχύουν και για την P_ℓ (αντικατάσταση δείκτη g με ℓ).

Μια βασική διαφορά όμως είναι, πως στην περίπτωση της P_ℓ , στη θεμελίωση του κινητήρα μεταβιβάζεται εκτός της ροπής ανατροπής $M_{\alpha\ell}$ και αυτή η δύναμη P_ℓ . Αυτό φαίνεται και από το ότι στο κάλυμμα του κυλίνδρου δεν εξασκείται πλέον αντίστοιχη δύναμη (όπως στην περίπτωση της P_g), Σχήμα 2.1.

Η στρεπτική δύναμη T_ℓ , που προέρχεται από την δύναμη P_ℓ , μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση $P_\ell \cdot c = T_\ell \cdot r \cdot \omega$ διότι η P_ℓ και η c είναι ήδη γνωστές και αναλυμένες σε αρμονικές συνιστώσες, συνεπώς:

$$T_\ell = P_\ell \cdot \left(\frac{c}{r \cdot \omega} \right) \quad (2.13)$$

2.2.2. Περιστρεφόμενες μαζικές δυνάμεις

Το σύνολο των περιστρεφόμενων μαζών αποτελούν, αφενός, η περιστρεφόμενη μάζα του διωστήρα $m_{\sigma r}$ και αφετέρου η μάζα m_{σ} ενός πλήρους στροφάλου, που πρέπει να είναι ανηγμένη κατάλληλα στην ακτίνα του στροφάλου, με κριτήριο να προκύπτει η ίδια δύναμη αδράνειας.

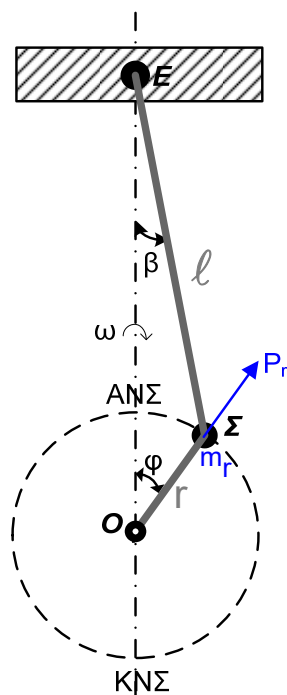
Η περιστρεφόμενη μάζα m_r , θεωρείται συγκεντρωμένη στο κομβίο του στροφάλου (σημείο Σ του Σχήματος 2.1 και του Σχήματος 2.2).

Η πραγματική δύναμη που ασκείται στην m_r , είναι η κεντρομόλος, οπότε η m_r ασκεί στα έδρανα και στο σώμα της μηχανής (δράση-αντίδραση), την αντίστοιχη φυγόκεντρη δύναμη, που οφείλεται στην m_r (Σχήμα 2.3) και έχει:

- Μέτρο σταθερό και ίσο με $m_r r \omega^2$, δηλαδή

$$P_r = m_r r \omega^2 \quad (2.14)$$

- Φορέα περιστρεφόμενο με το στρόφαλο και διεύθυνση την εκάστοτε διεύθυνση αυτού



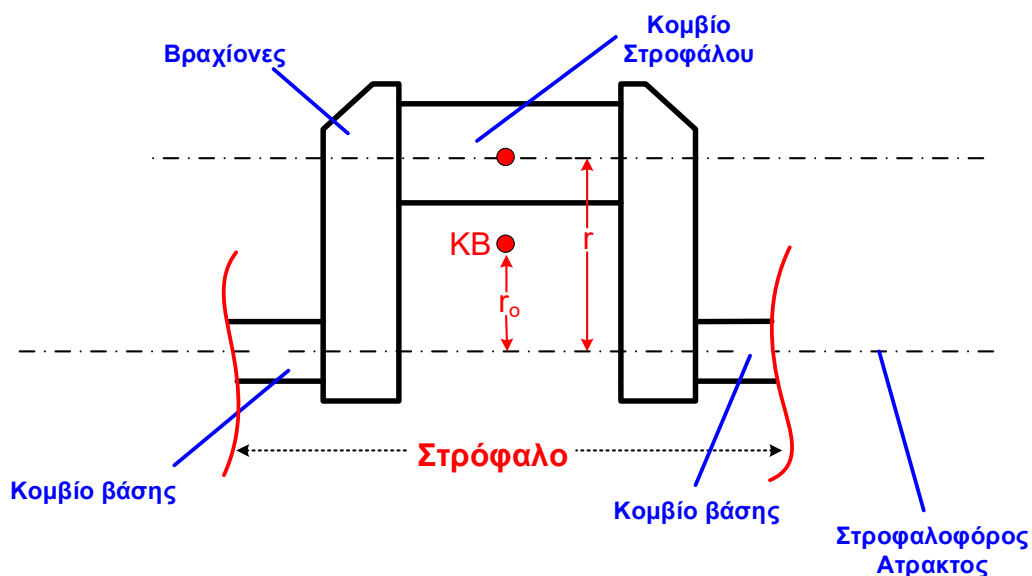
Σχήμα 2.3 Περιστρεφόμενη μαζική δύναμη [6]

Η P_r , μεταφέρεται ακέραιη στα έδρανα και το σώμα της μηχανής, και στη συνέχεια και στη θεμελίωση αυτής. Προφανώς, αυτή δεν έχει καμία επίδραση στην τιμή της στρεπτικής δύναμης, καθότι είναι συνεχώς κάθετη σε αυτή.

Η αναγωγή της μάζας του στροφάλου στην ακτίνα r , για τον προσδιορισμό της m_σ , γίνεται με βάση την ισότητα των σχετικών φυγοκεντρικών δυνάμεων, Σχήμα 2.4. Έτσι, αν m_o και r_o είναι, αντίστοιχα, η πραγματική μάζα του στροφάλου και η απόσταση του κέντρου βάρους από τον άξονα περιστροφής, τότε

$$P_{\sigma r} = m_o r_o \omega^2 = m_\sigma r \omega^2 \quad (2.15)$$

οπότε προκύπτει η προαναφερθείσα σχέση της ανηγμένης μάζας του στροφάλου $m_\sigma = \frac{m_o r_o}{r}$.



Σχήμα 2.4 Αναγωγή μάζας στροφάλου [6]

Σημειώνεται, ότι τα λεχθέντα στην προηγούμενη Παράγραφο 2.1 περί της μείωσης των δυνάμεων εξ' αερίων λόγω τριβών, ισχύουν παρομοίως και για τις μαζικές δυνάμεις.

2.3. Επαλληλία δυνάμεων από αέρια και μαζικών δυνάμεων

Από τη σύνθεση των P_g και P_ℓ , λαμβανομένων με το κατάλληλο πρόσημο, προκύπτει η συνισταμένη ή συνολική δύναμη στο έμβολο P (total force),

$$P = P_g + P_\ell \quad (2.16)$$

από την οποία εξασκούνται:

- Η ολική δύναμη παρειάς N (thrust force)

$$N = P \cdot \tan\beta \quad (2.17)$$

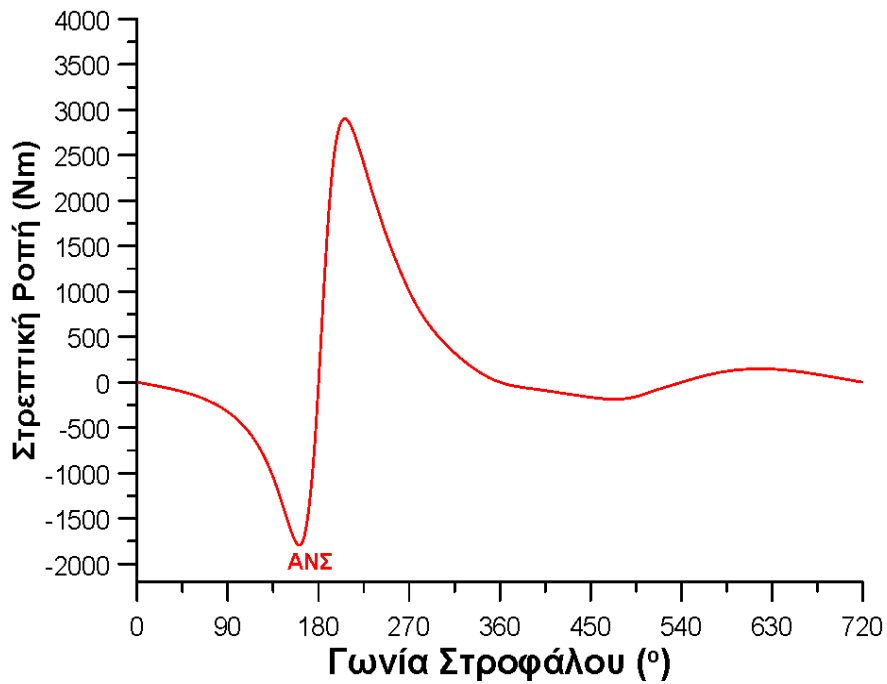
- Η ολική δύναμη διωστήρα (connecting rod force)

$$S = \frac{P}{\cos\beta} \quad (2.18)$$

- Ενώ για τη συνολική στρεπτική δύναμη T (torsional force), ισχύει

$$T = T_g + T_\ell = P \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \quad (2.19)$$

Στο Σχήμα 2.5, δίνεται γραφική παράσταση της ολικής στρεπτικής δύναμης, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας μονοκύλινδρου κινητήρα, με εμφανή τη μεγάλη τιμή της ροπής κατά τη φάση της καύσης-αποτόνωσης (πέριξ των 180°), όπου κυριαρχούν οι δυνάμεις εξ' αερίων, και τις αρκετά μικρότερες τιμές μετά τις 360° , οπότε και κυριαρχούν οι αδρανειακές δυνάμεις.

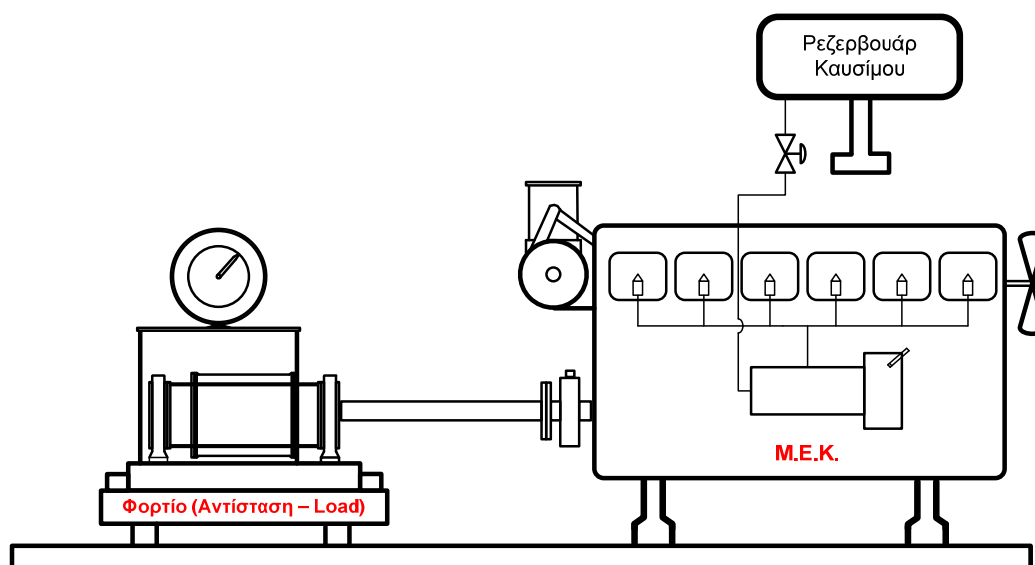


Σχήμα 2.5 Τυπικό διάγραμμα διακύμανσης ροπής κινητήρα εντός ενός 4-Χ κύκλου λειτουργίας

3. ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΦΟΡΟΥ ΑΤΡΑΚΤΟΥ

3.1. Ομοιομορφία στην ταχύτητα περιστροφής

Από το Σχήμα 2.5, έγινε φανερό, ότι η στρεπτική ροπή ενός κινητήρα δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης του στροφάλου μέσα σε ευρέα όρια, ιδιαίτερα σε μονοκύλινδρο κινητήρα. Η ανθιστάμενη ροπή, από την άλλη πλευρά, της κινούμενης από τον κινητήρα εγκατάστασης (π.χ. έλικα, γεννήτρια κλπ – Σχήμα 3.1), μπορεί να είναι είτε σταθερή, είτε μεταβαλλόμενη εντός ενός κύκλου λειτουργίας (συναρτήσει της θέσης του στροφάλου).



Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση κινητήρα με το συνδεδεμένο σε αυτόν φορτίο του [6]

Γενικά, η στιγμιαία τιμή της στρεπτικής ροπής του κινητήρα, δεν θα συμπίπτει σε κάθε χρονική στιγμή με την τιμή της ανθιστάμενης ροπής, αλλά θα υπάρχει προφανώς ανά πάσα στιγμή μια διαφορά αυτών. Οι μέσες τιμές τους βέβαια, για μόνιμη λειτουργία του κινητήρα θα είναι προφανώς ίσες. Λόγω της διαφοράς της στρεπτικής και της ανθιστάμενης ροπής (σε κάθε γωνία φ), βάσει του 2^{ου} νόμου του Νεύτωνα, θα υφίστανται στιγμιαίες επιταχύνσεις ή

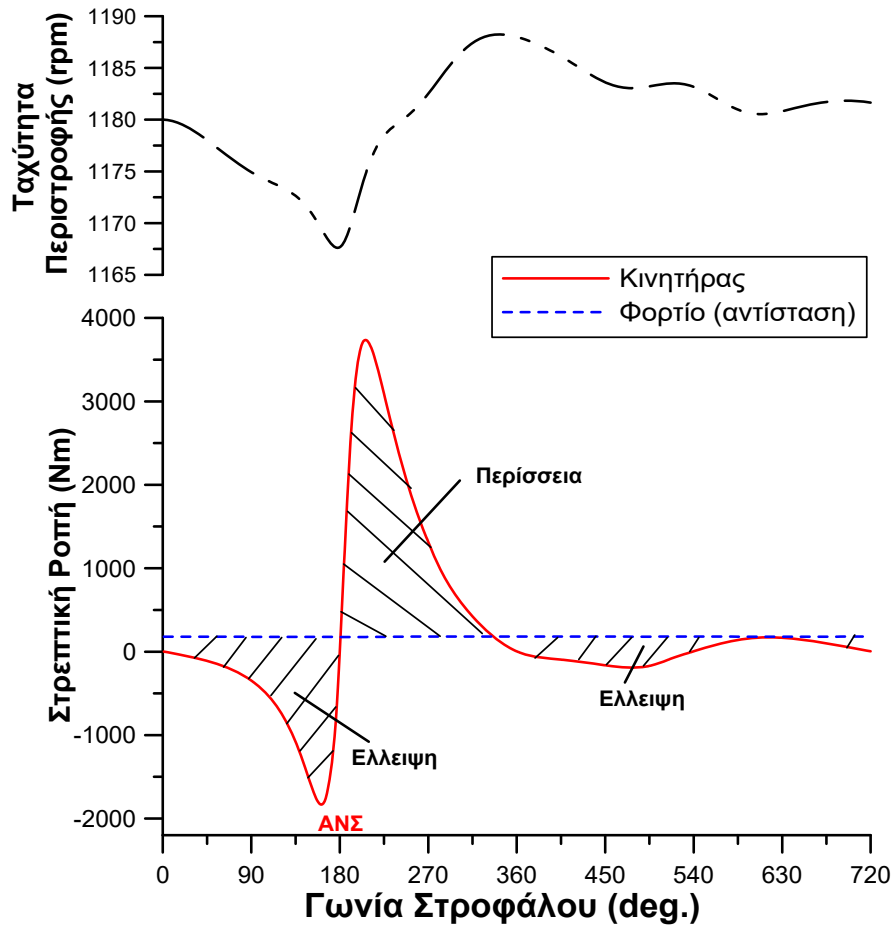
επιβραδύνσεις της στροφαλοφόρου ατράκτου, και άρα, στιγμιαία μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας της ατράκτου. Έτσι, θα υπάρχει απόκλιση από την κατάσταση της ομοιόμορφης περιστροφής. Η απόκλιση αυτή, δεν πρέπει να υπερβαίνει ορισμένα όρια, τα οποία τίθενται από τον κινούμενο μηχανισμό και την εκάστοτε εφαρμογή.

Πάντως, η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής κατά την διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, είναι αρκετά μικρή, όπως θα φανεί και στα Κεφάλαια 4, 5 και έτσι στην τεχνική πράξη δεχόμαστε ότι δεν προκαλούνται ουσιώδεις αποκλίσεις ως προς τον υπολογισμό όσων αναφέρθηκαν στα Κεφάλαια 1 και 2.

3.2. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα στην περιστροφή του κινητήρα

Στο Σχήμα 3.2, δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα σε ένα κύκλο λειτουργίας της ολικής στρεπτικής δύναμης (ή αντίστοιχα ροπής) T του κινητήρα (κόκκινη καμπύλη), με την αντίσταση που του εξασκείται T_L , η οποία για απλότητα δεχόμαστε ότι είναι σταθερή (μπλε καμπύλη). Έτσι ισχύει $T_L = \bar{T}$, εφόσον αναφερόμαστε σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, ενώ το ίδιο βέβαια ισχύει και για τις ροπές. Να σημειωθεί, ότι οι τιμές της T συμπίπτουν στην αρχή και στο τέλος του διαγράμματος, λόγω περιοδικότητας του φαινομένου.

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν κάποια σημεία στα οποία οι τιμές των T_L και T συμπίπτουν και ενδιάμεσά τους είτε η T υπερτερεί της T_L είτε η T_L υπερτερεί της T . Σε σημεία όπου υπερτερεί η T_L , εμφανίζεται επιβράδυνση του όλου κινηματικού μηχανισμού και άρα ελάττωση της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου, και, αντίστοιχα, όπου υπερτερεί η T , υπάρχει περίσσεια ροπής άρα (γωνιακή) επιτάχυνση του κινηματικού μηχανισμού.



Σχήμα 3.2 Αντιστοιχία μεταξύ στρεπτικής ροπής και ταχύτητα περιστροφής ατράκτου [6]

Συνοψίζοντας λοιπόν τα παραπάνω, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας του κινητήρα, η στρεπτική ροπή του τελευταίου είτε παρουσιάζει έλλειψη (στις φάσεις της εισαγωγής, συμπίεσης και εξαγωγής), είτε μεγάλη περίσσεια (στη φάση της αποτόνωσης), σε σχέση με την (πολύ πιο ομοιόμορφη - σχεδόν σταθερή) στρεπτική ροπή του φορτίου (κατανάλωση). Το γεγονός αυτό, αποτελεί τον κύριο παράγοντα της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής.

Για τη διαφορά $(T - T_L)$, ισχύει ότι:

$$(T - T_L) \cdot r = M = \Theta \cdot \ddot{\varphi} = \Theta \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \Theta \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.1)$$

δηλαδή, το μέγεθος $(T - T_L) \cdot r$, δίνει κάθε στιγμή την επιταχύνουσα ροπή. Η σχέση (3.1), είναι η εφαρμογή του 2^{ου} νόμου του Νεύτωνα στη στροφαλοφόρο άτρακτο, δηλαδή σε περιστρεφόμενο σύστημα. Στη σχέση αυτή, το μέγεθος Θ είναι η *συνολική ροπή αδράνειας κινητήρα και φορτίου* (το τελευταίο ανηγμένο στη στροφαλοφόρο άτρακτο), ενώ ο τελευταίος όρος δίνει την τιμή της *γωνιακής επιτάχυνσης, ϵ* .

Ο προσδιορισμός της συνολικής ροπής αδράνειας Θ , γίνεται από την εξίσωση $\Theta = \Theta_{\text{κιν}} + \Theta_{\text{σφονδ}} + \Theta_L$ και τα σύμβολα είναι:

- $\Theta_{\text{κιν}}$ η ροπή αδράνειας του κινητήρα (δηλ. παλινδρομικών και περιστρεφόμενων μαζών αλλά και των βοηθητικών εξαρτημάτων - δείκτης 'βσ' στην εξίσωση 3.2- αυτού), π.χ. ανεμιστήρας συστήματος ψύξης, διάφορες αντλίες κλπ)
- Θ_L η ροπή αδράνειας του φορτίου (αντίστασης), ανηγμένη στη στροφαλοφόρο άτρακτο
- $\Theta_{\text{σφονδ}}$ η ροπή αδράνειας του σφονδύλου

Ειδικά για τη ροπή αδράνειας του κινητήρα, μπορούμε να πούμε ακόμα ότι:

$$\Theta_{\text{κιν}} = z(\Theta_\ell + \Theta_r) + \Theta_{\beta\sigma} \quad (3.2)$$

Οι κινούμενες μάζες του κινητήρα είναι ως γνωστόν:

- ο Οι ανηγμένες στην ακτίνα του στροφάλου r περιστρεφόμενες μάζες m_r με γωνιακή ταχύτητα ω
- ο Οι παλινδρομούσες μάζες m_ℓ με την ταχύτητα του εμβόλου c

Άρα: $\Theta_\ell = m_\ell r^2 \left(\frac{c}{r\omega} \right)^2$ και $\Theta_r \approx m_r r^2$ [2].

Από τη σχέση 3.1, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τη γωνιακή ταχύτητα σε κάθε μοίρα γωνίας στροφάλου, και στη συνέχεια να εξάγουμε τα

συμπεράσματα που ενδιαφέρουν την παρούσα μελέτη σχετικά με το βαθμό ανομοιομορφίας περιστροφής.

Η ροπή του κινητήρα στη σχέση 3.1 μπορεί να αναλυθεί ως εξής, βάσει όσων αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2:

$$M_{\sigma}(\varphi) = M_g(\varphi) + M_{\ell}(\varphi) - M_{fr} = \left[\left(\rho_g(\varphi) \frac{\pi D^2}{4} \frac{c(\varphi)}{r\omega} \right) - \left(m_{\ell} r \omega^2 \frac{b(\varphi)}{r\omega^2} \frac{c(\varphi)}{r\omega} \right) \right] r - M_{fr} \quad (3.3)$$

Παράλληλα, η ροπή αντίστασης προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη σχέση:

$$M_L(\varphi) = a + k\omega^a$$

όπου οι συντελεστές a , k και α λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές ανάλογα με το είδος του φορτίου. Συγκεκριμένα

- Για φορτίο γραμμικής μορφής π.χ. γεννήτρια, $\alpha=1$, $a=0$
- Για φορτίο παραβολικής μορφής π.χ. έλικα σταθερού βήματος, υδραυλική πέδη, αεροδυναμική αντίσταση οχήματος $\alpha=2$, $a=0$
- Ο συντελεστής a αντιπροσωπεύει τον, ανεξάρτητο της ταχύτητας, παράγοντα του φορτίου π.χ. κλίση του οδοστρώματος όπου $a>0$

Για τη συνήθη, λοιπόν, περίπτωση:

$$M_L(\varphi) = k\omega^a \quad (3.4)$$

Κατά τη μόνιμη λειτουργία, η (σταθερή μέση) τιμή της ανθιστάμενης ροπής, ισούται με τη μέση τιμή της ροπής του κινητήρα. Συνεπώς, ο συντελεστής k , υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση, ως

$$k = \frac{\overline{M_{\sigma}}}{\omega_m^a} \quad (\text{Nms}) \quad (3.5)$$

όπου ω_m η μέση τιμή της γωνιακής ταχύτητας εντός ενός κύκλου λειτουργίας.

3.2.1. Συμβατικός βαθμός ανομοιομορφίας περιστροφής

Ο συμβατικός βαθμός ανομοιομορφίας περιστροφής δ , είναι ένα μέτρο του εύρους μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα, εντός ενός κύκλου λειτουργίας σε μόνιμη κατάσταση και ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής γωνιακής ταχύτητας προς την μέση τιμή αυτής, δηλαδή:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} \quad (3.6)$$

Η μέση τιμή ω_m λαμβάνεται συνήθως, λόγω της μικρής γενικά τιμής της διαφοράς ($\omega_{\max} - \omega_{\min}$) συγκριτικά προς την ω_m , με μεγάλη προσέγγιση ίση προς τον αριθμητικό μέσο όρο των δύο ακραίων τιμών ω_{\max} , ω_{\min} , και γενικά ίση προς την ονομαστική τιμή ω , ώστε:

$$\omega_m = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \equiv \omega \quad (3.7)$$

Τυπικές τιμές της ανομοιομορφίας περιστροφής, είναι $1/20 \div 1/30$ για εφαρμογές κίνησης αντλιών, $1/150 \div 1/300$ για γεννήτριες, $\sim 1/6$ για κινητήρες οχημάτων (κατά την άφορτη λειτουργία) και $1/3 \div 1/10$ για κίνηση πλοίων.

3.2.2. Ο σφόνδυλος

Ενώ οι μεταβολές της στρεπτικής ροπής εξαρτώνται από τον τύπο του κινητήρα (λόγω μεταβολών της στρεπτικής ροπής όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ανάλυση), η επιτρεπόμενη διακύμανση της γωνιακής ταχύτητας τίθεται από τον κινούμενο μηχανισμό.



Σχήμα 3.3 Στροφαλοφόρος άτρακτος μοντέρνου εξακύλινδρου κινητήρα, με σφόνδυλο [6].

Έτσι, στην περίπτωση που ο συμβατικός βαθμός ανομοιομορφίας δ δεν είναι ικανοποιητικός (λαμβάνομένης υπόψιν της ροπής αδράνειας Θ όλου του κινούμενου συστήματος), αυτός πρέπει να μειωθεί στο επιτρεπόμενο όριο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της ροπής αδράνειας των περιστρεφόμενων μαζών, δηλαδή με την προσθήκη του σφονδύλου, Σχήμα 3.3, έτσι ώστε η Θ να λάβει την αναγκαία τιμή που δίνει το επιθυμητό δ .

Συνολικά, μπορούμε να πούμε ότι ο σφόνδυλος:

- Μειώνει την ανομοιομορφία περιστροφής που προκαλείται από την ανισοκατανομή ροπής στους τέσσερις χρόνους λειτουργίας του κινητήρα, αλλά επιπλέον
- Αποθηκεύει ενέργεια κατά τη φάση της αποτόνωσης, παρέχοντάς την στη φάση της συμπίεσης και της εναλλαγής αερίων
- Παρέχει ένα σημείο στήριξης (σε κινητήρες οχημάτων), για το συμπλέκτη και τον εκκινητή (μίζα), Σχήμα 3.3.

3.2.3. Μηχανικές απώλειες και ροπή τριβών

Στη σχέση (3.3), για τον υπολογισμό της συνολικής ροπής του κινητήρα, αφαιρείται ο όρος της *ροπής μηχανικών απωλειών*, M_{fr} .

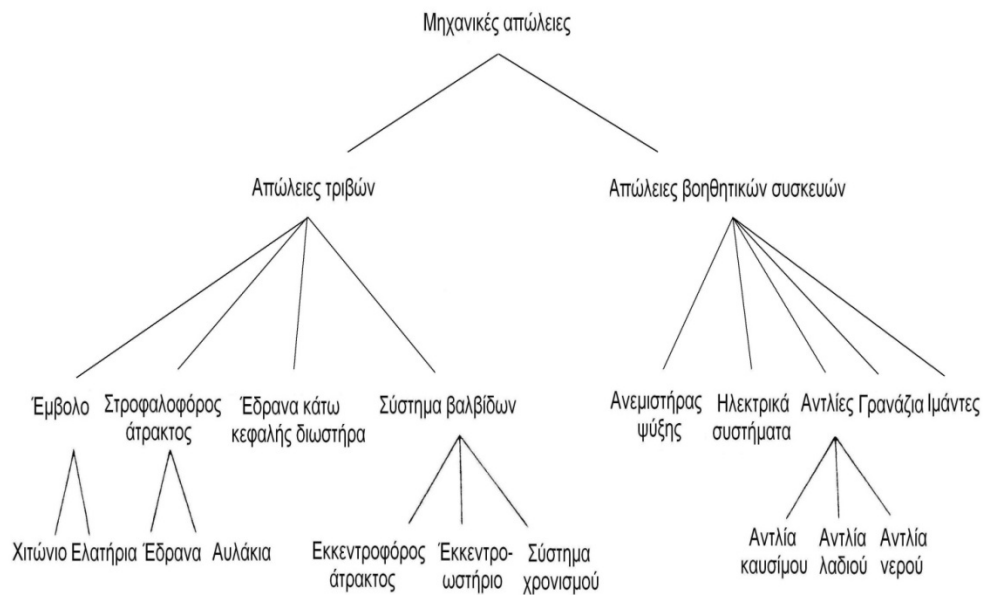
Οι μηχανικές απώλειες ενός κινητήρα, απορροφούν ένα σημαντικό κομμάτι του παραγόμενου έργου από τα αέρια στο εσωτερικό των κυλίνδρων του, καθώς το ποσοστό τους κυμαίνεται από περίπου 10% σε λειτουργία πλήρους φορτίου, έως και 100% σε λειτουργία χωρίς φορτίο («ρελαντί»).

Στη σχεδίαση και εξέλιξη ενός κινητήρα, ένας από τους πρωταρχικούς στόχους, είναι η μείωση του ποσοστού αυτού, καθώς συνδέεται άμεσα με το βαθμό απόδοσης και επομένως με την κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον, οι μειωμένες μηχανικές απώλειες, όταν αυτές οφείλονται στην ελαχιστοποίηση των τριβών μεταξύ των κινουμένων μεταλλικών μερών, προσδίδουν αυξημένη αξιοπιστία στον κινητήρα, λόγω της μειωμένης κόπωσης των υλικών του.

Επομένως, ο υπολογισμός τους αποτελεί θέμα μεγάλης πρακτικής σημασίας.

Οι μηχανικές απώλειες ενός κινητήρα (βλ. Σχήμα 3.4), περιλαμβάνουν:

- Τις απώλειες ενέργειας από την τριβή ανάμεσα στα κινούμενα μέρη του κινητήρα, οι οποίες ονομάζονται απώλειες τριβών και αποτελούν και το σημαντικότερο τμήμα των μηχανικών απωλειών
- Τις απώλειες ενέργειας των βοηθητικών συσκευών και συστημάτων, που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του κινητήρα



Σχήμα 3.4 Κατηγοριοποίηση μηχανικών απωλειών

Πιο συγκεκριμένα έχουμε (βλέπε και Σχήμα 3.4):

- Την τριβή ανάμεσα στα ελατήρια (συμπίεσης και λαδιού) του εμβόλου και στο εσωτερικό τοίχωμα του κυλίνδρου
- Την τριβή ανάμεσα στο χιτώνιο του εμβόλου και στο εσωτερικό τοίχωμα του κυλίνδρου
- Την τριβή στα έδρανα της στροφαλοφόρου ατράκτου
- Την τριβή στο μηχανισμό των βαλβίδων
- Τις μηχανικές απώλειες σε γρανάζια, τροχαλίες και ιμάντες που κινούν την εκκεντροφόρο άτρακτο και τα βοηθητικά συστήματα του κινητήρα

Το βασικό στοιχείο σε αυτήν την ανάλυση είναι, ότι, (και) οι μηχανικές απώλειες παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, κυρίως όταν το έμβολο βρίσκεται κοντά στο «θερμό» ΑΝΣ (λόγω σημαντικής επίδρασης του όρου τριβών στα ελατήρια του εμβόλου, ειδικά σε κινητήρες Diesel όπως αυτός που θα μελετηθεί στο Κεφάλαιο 4).

Στην περίπτωση μας όμως, για ευκολία, θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές μηχανικών απωλειών κατά την διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, μέσω του μεγέθους της μέσης πραγματικής πίεσης, όπως αυτές έχουν προκύψει από σχετική πειραματική διερεύνηση στο συγκεκριμένο κινητήρα, με δεδομένο ότι ο αναλυτικός υπολογισμός των διαφόρων όρων των τριβών, εκτός από εξαιρετικά δυσχερές, ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η στρεπτική ροπή λόγω μηχανικών απωλειών, δίνεται από

$$M_{fr} = \frac{\bar{p}_r \cdot V_h}{4\pi} [\text{Nm}] \quad (3.8)$$

όπου: V_h είναι ο όγκος εμβολισμού που ισούται με $\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot s$ ($s=2r$), ενώ ο όρος \bar{p}_r είναι η μέση πίεση μηχανικών απωλειών (friction mean effective pressure, f_{meP}), η οποία μπορεί να υπολογιστεί μέσω πειραματικού τύπου τριών συντελεστών

$$\bar{p}_r = \alpha_2 + \beta_2 p_{\max} + \gamma_2 \bar{c}_e \quad [\text{bar}] \quad (3.9)$$

με p_{\max} τη μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου βάσει δυναμοδεικτικού διαγράμματος και \bar{c}_e τη μέση ταχύτητα του εμβόλου ίση με $\frac{s \cdot n}{30}$.

Είναι προφανές από όσα προηγήθηκαν, πως, στην παρούσα μελέτη, θεωρούμε $M_{fr}(\varphi) = \bar{M}_{fr}$, ότι, δηλαδή, οι τριβές παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας μόνιμης κατάστασης.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΜΟΝΟΚΥΛΙΝΔΡΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL

4.1. Γενικά

Όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο περί ανομοιομορφίας περιστροφής, θα μελετηθούν πλέον υπολογιστικά. Αρχικά, εξετάζεται μια «μονοκύλινδρη έκδοση» του υπό μελέτη κινητήρα, προκειμένου τα αποτελέσματα της ταχύτητας περιστροφής της στροφαλοφόρου ατράκτου, να είναι απευθείας συγκρίσιμα με τις πιέσεις μέσα στον κύλινδρο και την παραγόμενη από τον κινητήρα ροπή, αλλά και να είναι πιο ευχερής η κατανόηση των φαινομένων.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα δοθούν τα διαγράμματα των ροπών, της ταχύτητας περιστροφής και τελικά θα υπολογιστεί ο βαθμός ανομοιομορφίας περιστροφής του μονοκύλινδρου κινητήρα Diesel, με τα ονομαστικά μεγέθη που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Οι διακεκριμένες μάζες των σχέσεων (2.10) και (2.11), μπορούν να υπολογιστούν στην μηχανή Diesel που μελετάμε ως εξής:

Από την εξίσωση (2.9) προκύπτει

$$m_{\delta\ell} = m_{\delta} \frac{(K\Sigma)}{\ell} = 6,33 \cdot \frac{0,094}{0,35} \Rightarrow m_{\delta\ell} = 1,70 \text{ kg}.$$

Από την εξίσωση (2.10) προκύπτει ότι

$$m_{\ell} = m_{\varepsilon} + m_{\delta\ell} = 4,97 + 1,70 \Rightarrow m_{\ell} = 6,67 \text{ kg}.$$

Από την εξίσωση (2.9) τώρα προκύπτει

$$m_{\delta r} = m_{\delta} - m_{\delta \ell} = 6,33 - 1,70 \Rightarrow m_{\delta r} = 4,63 \text{ kg}$$

Ενώ τέλος, από την εξίσωση (2.11) προκύπτει ότι

$$m_r = m_{\sigma} + m_{\delta r} = 1,00 - 4,63 \Rightarrow m_r = 5,63 \text{ kg}.$$

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	
Ταχύτητα περιστροφής	1200 rpm
Διάμετρος εμβόλου, D	140 mm
Διαδρομή εμβόλου, s	180 mm
Μήκος διωστήρα, ℓ	350 mm
Απόσταση κέντρου βάρους διωστήρα από τη κάτω κεφαλή του, (ΚΣ)	94 mm
Μάζα εμβόλου	4,97 kg
Μάζα διωστήρα	6,33 kg
Μάζα στροφάλου (ισοδύναμη)	1,00 kg
Όγκος εμβολισμού	16,62 lt
Συνολική ροπή αδρανείας, Θ	2 kgm ²

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά κινητήρα

Από τα προηγούμενα, προκύπτει η ονομαστική τιμή του λόγου λ , που είναι $\lambda = \frac{r}{\ell} = 0,2571$. Η τιμή του εκθέτη α της ροπής του φορτίου που θα εκληφθεί ως ονομαστική είναι $\alpha=2$, δηλαδή περίπτωση υδραυλικής πέδησης (ή έλικας).

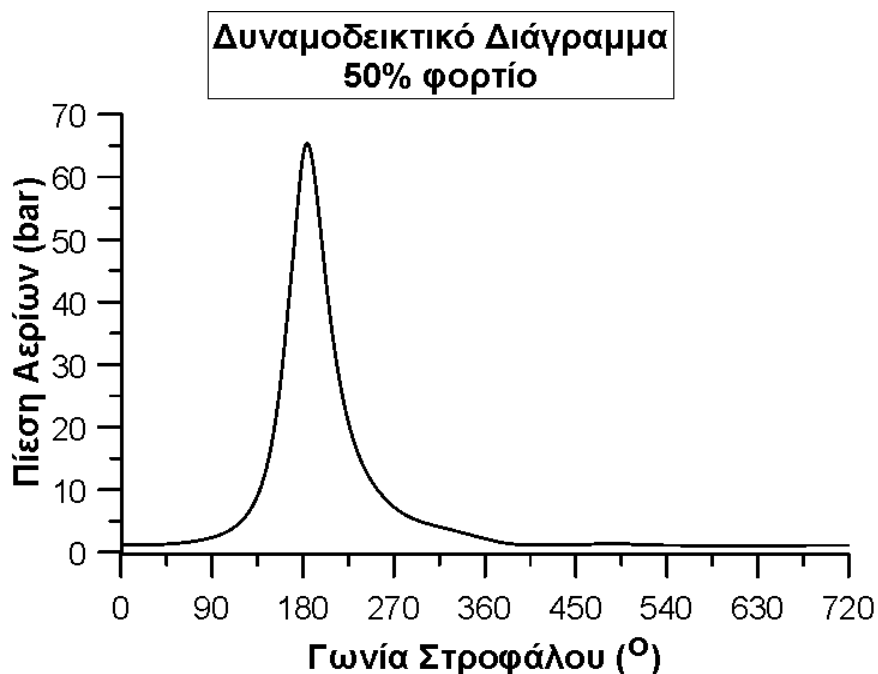
Τέλος, οι τρεις συντελεστές της εξίσωσης (3.9) των μηχανικών απωλειών για τον υπό μελέτη κινητήρα, έχουν προσδιοριστεί πειραματικά σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας και έχουν τιμές:

$$\alpha_2=0,137$$

$$\beta_2=0,005$$

$$\gamma_2=0,142.$$

Από πειραματικές επίσης μετρήσεις, προέκυψε η πίεση του αερίου σε κάθε μοίρα γωνίας στροφάλου, σε ονομαστικό φορτίο 50% και ακολούθως παρουσιάζεται το σχετικό δυναμοδεικτικό διάγραμμα (Σχήμα 4.1). Παρατηρούμε, ότι, η ελάχιστη πίεση των αερίων είναι η ατμοσφαιρική, ενώ η μέγιστη -στο τέλος της συμπίεσης και αρχή της εκτόνωσης- είναι περίπου 65 φορές μεγαλύτερη.



Σχήμα 4.1 Δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα στο ήμισυ του πλήρους φορτίου

4.2. Αλγόριθμος υπολογισμού ταχύτητας περιστροφής

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε αλγόριθμος, ο οποίος λαμβάνει ως δεδομένο την πίεση του αερίου μέσα στον κύλινδρο σε κάθε μοίρα γωνίας στροφάλου, δηλαδή το δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα στο εκάστοτε φορτίο, σε συνδυασμό, βέβαια, με τα βασικά του στοιχεία:

- D (διάμετρος εμβόλου)
- r (ακτίνα στροφάλου)
- V_h (όγκος εμβολισμού)
- m_t (συνολική παλινδρομούσα μάζα)
- k (συντελεστής της ροπής φορτίου)
- $f_{\text{μερ}}$ (ή \bar{p}_r , μέση πίεση μηχανικών απωλειών)
- Θ (συνολική ροπή αδράνειας)
- α (εκθέτης ροπής φορτίου)

Έτσι λοιπόν:

- Διαδοχικά, υπολογίζεται η μετατόπιση του εμβόλου και η αδιάστατη ταχύτητα και επιτάχυνση, μέσω των σχέσεων (1.4), (1.6), (1.8).
- Υπολογίζονται οι εξ' αερίων και παλινδρομικές δυνάμεις P_g , P_ℓ από τις (2.1) και (2.12), εκ των οποίων, στη συνέχεια, προκύπτουν οι αντίστοιχες στρεπτικές δυνάμεις T_g , T_ℓ από τις (2.4.β), (2.13).
- Βρίσκονται, μέσω της σχέσης (2.6), της αντίστοιχής της για παλινδρομικές μαζικές δυνάμεις και της (3.8), οι στρεπτικές ροπές αερίων, αδρανειακές και τριβών. Ο αλγόριθμος υπολογίζει επίσης τη συνολική ροπή που δίνει ο κινητήρας, από την εξίσωση (3.3).
- Επόμενο βήμα του αλγόριθμου, είναι η χρησιμοποίηση της εξίσωσης (3.1β), με αντικατάσταση της (3.4), δηλαδή:

$$M_{\sigma}(\varphi) - k\omega^{\alpha} = \Theta \cdot \frac{d\omega(\varphi)}{dt} = \Theta \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$

με σκοπό τον προσδιορισμό της συνάρτησης $\omega = \omega(\varphi)$, δηλαδή της διακύμανσης της γωνιακής ταχύτητας, εντός ενός κύκλου λειτουργίας.

- Ο συντελεστής k της αντίστασης της συνδεδεμένης κατανάλωσης, υπολογίζεται από τη μέση τιμή των ήδη γνωστών τιμών στρεπτικής ροπής του κινητήρα ανά μοίρα γωνίας στροφάλου, μέσω της σχέσης (3.5). Επομένως, τώρα, έχουμε στην παραπάνω εξίσωση δύο φορές την εμφάνιση της μεταβλητής της γωνιακής ταχύτητας, αφού στο δεύτερο μέλος είναι $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$. Προκειμένου να απαλοιφεί η χρονική μετατόπιση και να εμφανιστεί η γωνιακή που είναι δεδομένη, γίνεται χρήση της συσχέτισης:

$$\Delta\varphi = 6n\Delta t \quad (4.2.α)$$

όπου $\Delta\varphi$ η γωνιακή διαφορά σε μοίρες, n η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής (υπολογισμένη σε κάθε βήμα) σε rpm και Δt η χρονική διαφορά σε sec.

Επειδή το δυναμοδεικτικό διάγραμμα δίνεται σε κάθε μοίρα γωνίας στροφάλου, το μέγεθος $\Delta\varphi$ είναι σταθερό και ίσο με 1. Συνεπώς, σε κάθε βήμα έχουμε:

$$1^{\circ} = 6n\Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{1}{6n} = \frac{1}{6 \cdot \frac{30\omega}{\pi}} = \frac{1}{57,32\omega} \quad (4.2.β)$$

- Εδώ, αρχίζει μια κλειστή επαναληπτική διαδικασία, με αρχική τιμή την ονομαστική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα $\omega_1=125,6 \text{ rad/s}$ (αντιστοιχεί σε $n=1200 \text{ rpm}$).
- Προσδιορίζεται αρχικά το ε_1 από την εξίσωση (4.1) ως:

$$\varepsilon_1 = \frac{M_\sigma(1^\circ) - k\omega_1^\alpha}{\Theta} \quad (4.1.\alpha)$$

και άρα, η επόμενη τιμή της γωνιακής ταχύτητας βρίσκεται από τη σχέση

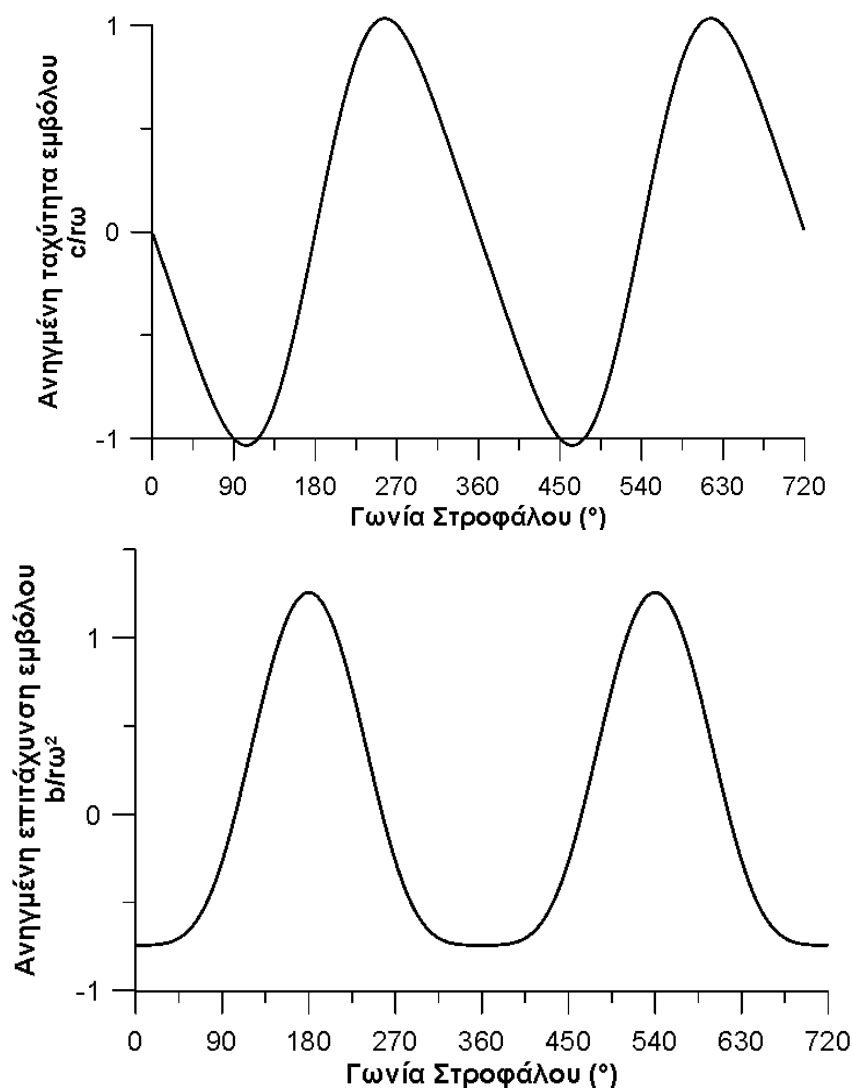
$$\omega_2 - \omega_1 = \varepsilon_1 \Delta t_1 \Rightarrow \omega_2 = \varepsilon_1 \cdot \frac{1}{57,32\omega_1} + \omega_1$$

- Με την ω_2 γνωστή, προσδιορίζεται η νέα ροπή της αντίστασης-φορτίου, άρα το μέγεθος ε_2 , εν συνεχεία η ταχύτητα ω_3 (στις 3° γωνίας στροφάλου από το ΚΝΣ), κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 719 φορές, ώστε να έχουμε την τελική σύγκλιση στο διάγραμμα μεταβολής της ω , για την οποία θα πρέπει η τιμή στο τέλος της διαδικασίας ($\varphi=720^\circ$) να ταυτίζεται με την αρχική ($\varphi=1^\circ$). Αν δεν υπάρχει σύγκλιση, πραγματοποιείται δεύτερος κύκλος επανάληψης, ξεκινώντας από την τελευταία τιμή του ω .
- Τελευταίο βήμα, αποτελεί ο υπολογισμός του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής δ , από την σχέση (3.6).

4.3. Υπολογισμός δυνάμεων και ροπών στα ονομαστικά μεγέθη

Με δεδομένα το δυναμοδεικτικό διάγραμμα (Σχήμα 4.1) και τις αδιαστατοποιημένες ταχύτητα και επιτάχυνση εμβόλου, οι οποίες παρουσιάζονται και σε αυτό το σημείο για λόγους πληρότητας στα Σχήματα 4.2, 4.3, προκύπτουν οι δυνάμεις εξ' αερίων P_g , T_g μέσω των σχέσεων (2.1) και (2.4.β), καθώς και οι παλινδρομικές P_i , T_i από τις (2.12) και (2.13).

Οι γεωμετρικές παράμετροι που υπάρχουν σε αυτές τις εξισώσεις, είναι οι ονομαστικές, όπως ορίστηκαν παραπάνω.



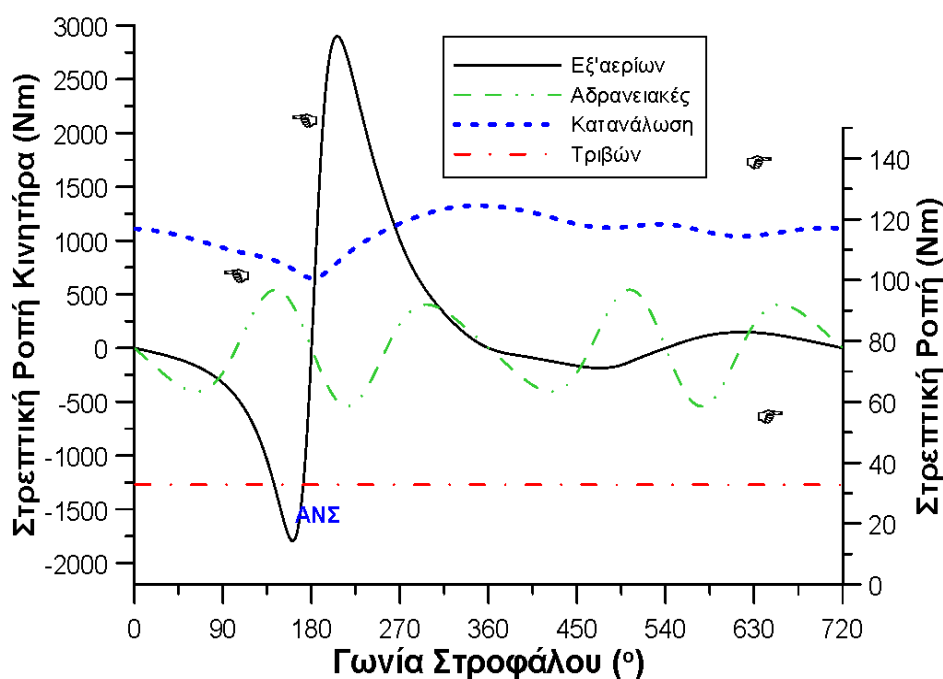
Σχήματα 4.2-4.3 Μεταβολή της ανηγμένης ταχύτητας και επιτάχυνσης του εμβόλου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου

Από τις δυνάμεις, προκύπτουν εύκολα μέσω πολλαπλασιασμού με την ακτίνα, οι στρεπτικές ροπές αερίων και οι παλινδρομικές, όπως και η ροπή τριβών, από τη σχέση (3.8).

Για το ονομαστικό φορτίο 50%, στην παρούσα ανάλυση, η μέση τιμή της στρεπτικής ροπής λόγω τριβών, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\bar{M}_{fr} = \frac{\bar{p}_r \cdot V_h}{4\pi} = \frac{1,486 \cdot 0,0027}{4 \cdot 3,14} = 32,776 \text{ Nm.}$$

Το διάγραμμα μεταβολής όλων των όρων στρεπτικών ροπών, δίνεται στο Σχήμα 4.4.



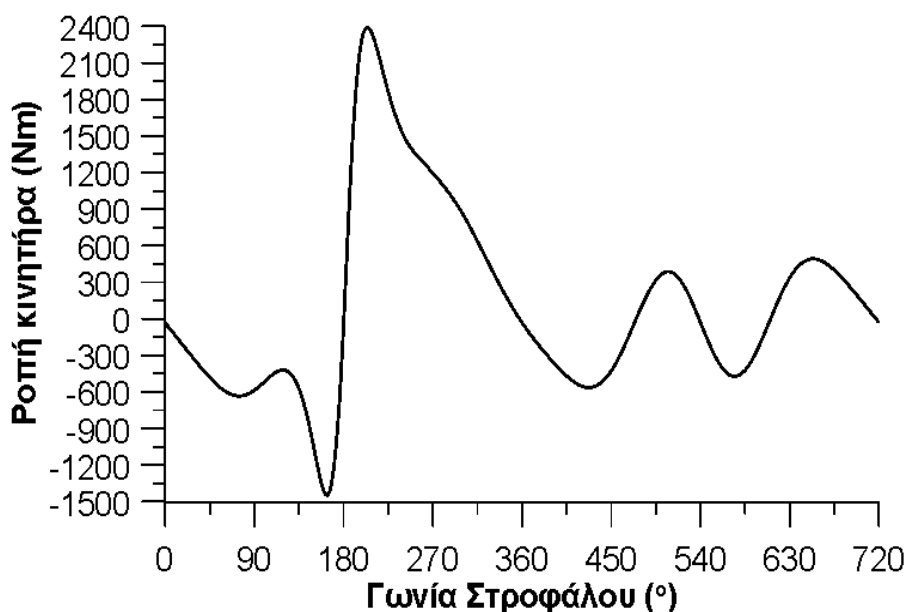
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα των στρεπτικών ροπών του μονοκύλινδρου κινητήρα στο ονομαστικό φορτίο

Παρατηρούμε, πως, οι δυνάμεις αερίων συνεισφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό κατά τη φάση της εκτόνωσης. Η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής, παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους κοντά στο «θερμό» ΑΝΣ. Μετά την έναρξη της

καύσης, υπάρχει περίσσεια στρεπτικής ροπής, λόγω των μεγάλων αναπτυσσόμενων δυνάμεων και πλέον ο κινητήρας βρίσκεται στην «παραγωγική» του φάση. Συνεπώς, η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται. Αυτό συνεχίζει να ισχύει σε όλη τη διάρκεια της αποτόνωσης.

4.3.1. Συνολική ροπή

Από τη σχέση (3.3), μπορεί να υπολογιστεί η ολική ροπή, η οποία δίνεται στο Σχήμα 4.5. Γίνεται φανερό, πως, κατά τη διάρκεια του κλειστού κύκλου (συμπύεση-αποτόνωση), οι δυνάμεις των αερίων είναι αυτές που δίνουν τη μέγιστη ροπή (των κατά προσέγγιση 2400 Nm). Αντιθέτως, κατά τη διάρκεια των φάσεων εξαγωγής και εισαγωγής όπου η πίεση μέσα στον κύλινδρο είναι περίπου ίση με την ατμοσφαιρική, η συνολική ροπή του κινητήρα ταυτίζεται με τη ροπή που δίνουν οι αδρανειακές δυνάμεις.

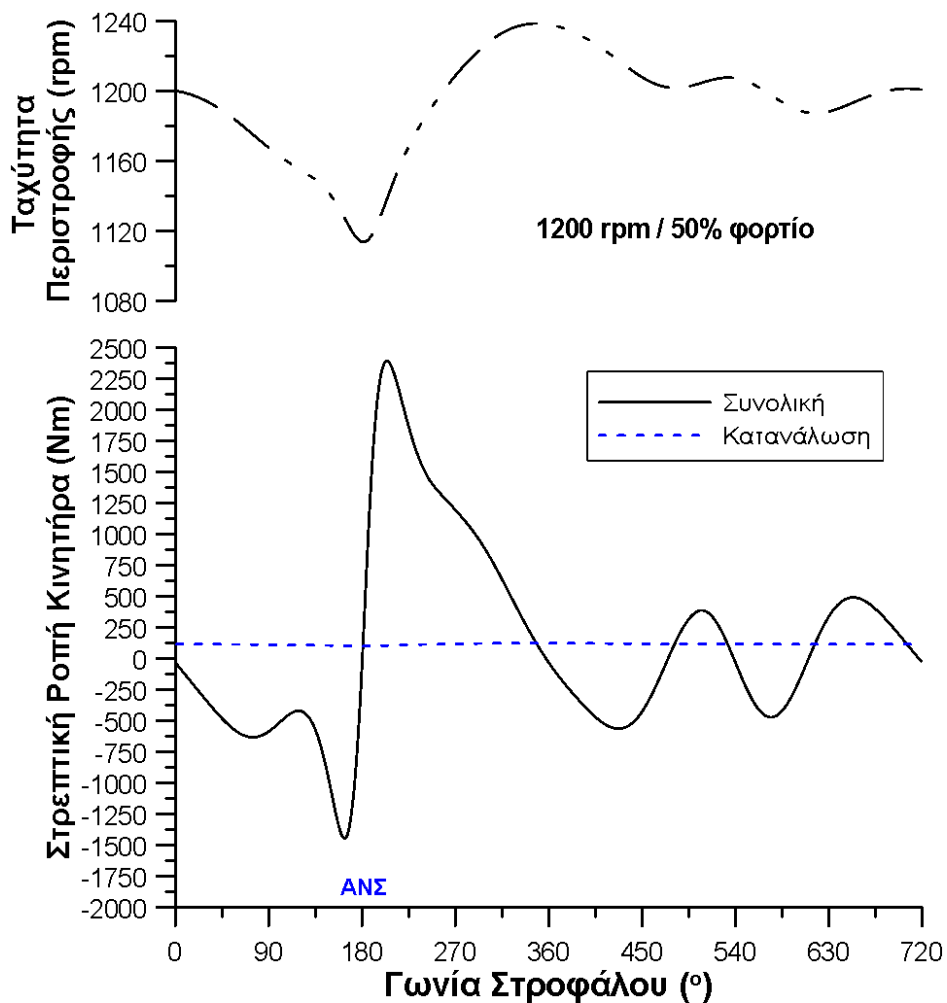


Σχήμα 4.5 Συνολική ροπή του κινητήρα στο ονομαστικό φορτίο

Τέλος, με δεδομένη την ροπή του κινητήρα, ξεκινά η επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού της γωνιακής ταχύτητας, εν συνεχεία των στροφών σε κάθε μοίρα περιστροφής και τελικά του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής, δ.

4.3.2. Στρεπτικές ροπές και ταχύτητα περιστροφής

Συγκεντρωτικά, έχουμε το παρακάτω γράφημα (Σχήμα 4.6), με τις καμπύλες της συνολικής ροπής και της ροπής της αντίστασης, από τις οποίες προκύπτει η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής (βλ. παράγραφο 3.2).



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών και μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής για τα ονομαστικά μεγέθη του μονοκύλινδρου κινητήρα

Ειδικά όσον αφορά τη ροπή της αντίστασης, ο συντελεστής k , προσδιορίζεται από την συσχέτιση (3.5) για $\alpha=2$ και $\omega=125,6$ rad/s και προκύπτει: $k = 0,00741$ Nms. Επομένως, η σχέση της ροπής που ανθίσταται στη ροπή του κινητήρα, διαμορφώνεται ως:

$$M_L(\varphi) = 0,00741 \cdot \omega^\alpha$$

Τέλος, ο βαθμός ανομοιομορφίας υπολογίζεται από τη σχέση (3.6), άρα

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,637 - 116,56}{124,915} = 0,1046$$

5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

5.1. Γενικά

Η παραμετρική ανάλυση που θα γίνει στο Κεφάλαιο αυτό, έχει ως κύριο στόχο την ανάδειξη των παραμέτρων εκείνων που πρωτίστως επιδρούν, άρα και των τρόπων αντιμετώπισης, της ανομοιομορφίας περιστροφής στροφαλοφόρου ατράκτου κινητήρα (Diesel), σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Θα μελετήσουμε, λοιπόν, στα ακόλουθα, τις διακυμάνσεις του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής, όταν μεταβάλλονται:

- Η συνολική παλινδρομούσα ανά κύλινδρο μάζα m_i
- Η συνολική ροπή αδράνειας του συστήματος Θ (πρακτικά μέσω επέμβασης στη ροπή αδράνειας του σφονδύλου)
- Ο τύπος της συνδεδεμένης κατανάλωσης, μέσω του εκθέτη α
- Ο γεωμετρικός λόγος $\lambda=r/l$
- Το φορτίο του κινητήρα και
- Η ταχύτητα περιστροφής

για τον μονοκύλινδρο κινητήρα της προηγούμενης παραγράφου.

Επιπλέον, θα γίνει ανάλυση για τις αντίστοιχες πολυκύλινδρες «εκδοχές» του κινητήρα του Κεφαλαίου 4, με μεταβαλλόμενο αριθμό κυλίνδρων – δίκύλινδρος, τετρακύλινδρος, εξακύλινδρος, οκτακύλινδρος – ώστε να φανεί η πολύ σημαντική επίδραση που έχει ο αριθμός των κυλίνδρων.

Σημειώνεται εδώ, ότι, οι δύο βασικοί τρόποι αντιμετώπισης της ανομοιομορφίας περιστροφής στροφαλοφόρου ατράκτου στην πράξη, είναι:

1. Πιο ομοιόμορφο διάγραμμα ροπής (πολυκύλινδροι κινητήρες)
2. Μεγαλύτερη ροπή αδράνειας

5.2. Επίδραση των διάφορων παραμέτρων στο βαθμό ανομοιομορφίας περιστροφής

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα και η τιμή του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής για τον μονοκύλινδρο κινητήρα Diesel που μελετάται, για τα διάφορα μεγέθη που ορίστηκαν (είτε υπολογίστηκαν), ως ονομαστικά, κατά τη διάρκεια των προηγούμενων ενοτήτων. Στον ακόλουθο πίνακα, βρίσκονται, συγκεντρωτικά, τα μεγέθη που θα γίνουν μεταβλητές στις εξισώσεις της αλγοριθμικής διαδικασίας, με την ονομαστική τους τιμή, αλλά και τις νέες τιμές βάσει των οποίων θα γίνει η παραμετρική ανάλυση για μονοκύλινδρο κινητήρα.

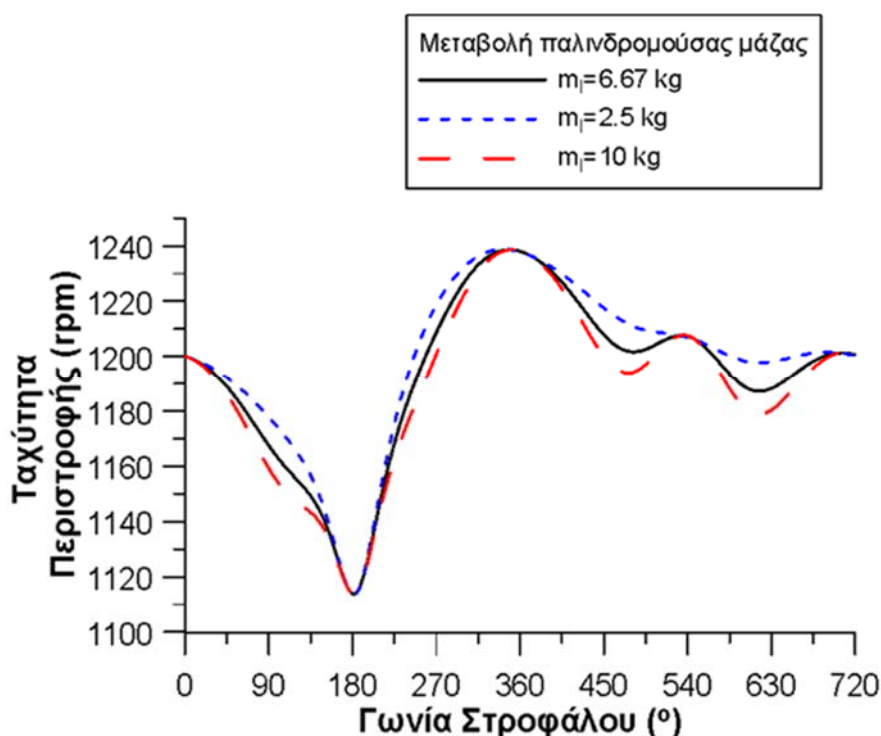
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ	ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ
Συνολική παλινδρομούσα μάζα, m_i	6,67 kg	- 2,5 kg - 10 kg
Συνολική ροπή αδράνειας, Θ	2 kgm ²	- 0,5 kgm ² - 5 kgm ² - 12 kgm ²
Λόγος $\lambda = \frac{r}{\ell}$	$\frac{90 \text{ mm}}{350 \text{ mm}} = 0,2571$	- 1/5 - 1/3
Ταχύτητα περιστροφής, n	1200 rpm	- 1000 rpm - 2000 rpm - 3000 rpm - 4000 rpm
Φορτίο	50%	- 0% (ρελαντί) - 90%
Εκθέτης α αντίστασης	2	- 0 - 1

Πίνακας 5.1 Μεγέθη της παραμετρικής ανάλυσης

Η παραμετρική ανάλυση των μεγεθών του Πίνακα 5.1 (εκτός βέβαια του φορτίου), θα πραγματοποιηθεί στο ονομαστικό φορτίο 50%, ενώ κατά τη μεταβολή μιας παραμέτρου, οι υπόλοιπες παραμένουν οι ονομαστικές.

5.2.1. Συνολική παλινδρομούσα μάζα

Στην παράγραφο αυτή, εξετάζεται η επίδραση των παλινδρομουσών μαζών του κινητήρα, στην ανομοιομορφία περιστροφής της στροφαλοφόρου ατράκτου. Για την παραμετρική ανάλυση, θεωρούμε ότι, κάθε φορά, αλλάζουν οι συνολικές μάζες που παλινδρομούν, χωρίς όμως να μεταβάλλεται κάποιος άλλος παράγοντας. Όσο μεγαλύτερες είναι οι μάζες, τόσο μεγαλύτερες είναι οι ροπές που δημιουργούνται από τις παλινδρομούσες μάζες. Η επίδραση των μαζών, φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Εξάρτηση διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής από τις παλινδρομούσες μάζες του κινηματικού μηχανισμού

Παρατηρούμε, πως η αλλαγή στην τιμή της συνολικής παλινδρομούσας μάζας δεν επηρεάζει τα όρια μέσα στα οποία μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής σε ένα κύκλο λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει, γιατί τα όρια αυτά εμφανίζονται στο κλειστό κομμάτι του κύκλου (συμπύεση-αποτόνωση), άρα εξαρτώνται πρωτίστως από τις δυνάμεις εξ' αερίων, οι οποίες δεν έχουν μεταβληθεί. Χαρακτηριστικά, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή ταχύτητας ταυτίζονται στις τρεις περιπτώσεις. Η μεταβολή, βέβαια, των παλινδρομουσών μαζών επηρεάζει τη διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής στα σημεία εκείνα όπου κυριαρχεί η ροπή από αδρανειακές δυνάμεις, δηλαδή κατά τη φάση εναλλαγής των αερίων.

Για την ονομαστική περίπτωση, ο βαθμός ανομοιομορφίας υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και είναι:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,637 - 116,56}{124,915} = 0,1046$$

Για την περίπτωση όπου $m_i=2,5$ kg, είναι:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,654 - 116,55}{125,434} = 0,1044$$

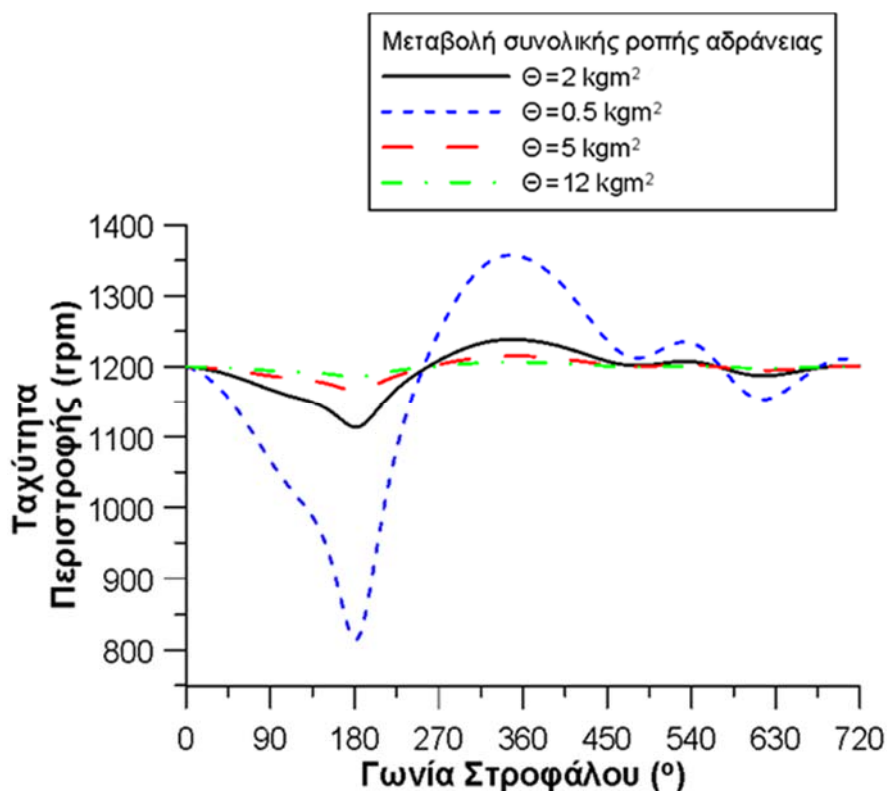
ενώ όταν $m_i=10$ kg

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,64 - 116,574}{124,498} = 0,1049.$$

Δηλαδή, η επίδραση των μαζών είναι αμελητέα (βλέπε και Πίνακα 5.3 συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων).

5.2.2. Συνολική ροπή αδράνειας

Οι ροπές αδράνειας των διαφόρων μαζών παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα με βάση και τις εξισώσεις που έχουν προηγηθεί (π.χ. σχέση 4.1). Η αύξηση της ροπής αδράνειας των εξαρτημάτων και ειδικότερα του σφονδύλου, που αποτελεί το μεγαλύτερο εξάρτημα, μπορεί να μειώσει δραματικά τις διακυμάνσεις της ταχύτητας, προσφέροντας σχεδόν απόλυτη εξομάλυνση του διαγράμματός της. Η ροπή αδράνειας, βρισκόμενη στον παρονομαστή της εξίσωσης (4.1.α), αναμένεται να επηρεάζει άμεσα με την αύξησή της την μεταβολή της κινητικής ενέργειας άρα και της ταχύτητας περιστροφής.



Σχήμα 5.2 Εξάρτηση διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής από ροπή αδράνειας

Το γράφημα 5.2, αποδεικνύει τα παραπάνω. Με αύξηση της συνολικής ροπής αδράνειας, όπως δείχνει η σύγκριση μαύρης-κόκκινης καμπύλης, έχουμε σημαντικά μικρότερα εύρη στην ταχύτητα περιστροφής, πλησιάζοντας

σε μια «ιδανική» (ανάλογα με την εφαρμογή) κατάσταση, όπου η ταχύτητα παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας.

Επομένως, για περιορισμό του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής, θα πρέπει να τοποθετούνται σφόνδυλοι μεγάλης ροπής αδράνειας, σε συνάρτηση πάντα με τους γεωμετρικούς περιορισμούς που τίθενται σε έναν κινητήρα, αλλά και την εκάστοτε χρήση του.

Για την ονομαστική περίπτωση, ο βαθμός ήταν:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,637 - 116,56}{124,915} = 0,1046$$

Με ροπή αδράνειας $\Theta=0,5 \text{ kgm}^2$ έχουμε:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{142,045 - 85,265}{123,001} = 0,462$$

Ενώ για $\Theta=5 \text{ kgm}^2$

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{127,206 - 122,045}{125,319} = 0,041$$

Τέλος, για $\Theta=12 \text{ kgm}^2$:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{126,267 - 124,128}{125,482} = 0,017$$

5.2.3. Λόγος λ

Σε αυτήν την παράγραφο, μελετάται η επίδραση του γεωμετρικού λόγου $\lambda = \frac{r}{\ell}$ (βλ. Σχήμα 1.1) στη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρούμε ότι το μήκος του στροφάλου παραμένει σταθερό ενώ μεταβάλλεται το μήκος του διωστήρα.

Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα, αφενός να αλλάζουν οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις του εμβόλου, βλ. σχέσεις (1.6), (1.8), (άρα και οι σχετικές ροπές) και αφετέρου να αλλάζουν οι συνολικές παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες, εξ' αιτίας της μεταβολής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών του διωστήρα.

Ειδικότερα, ενώ το «ονομαστικό» μήκος του διωστήρα είναι $\ell = 350$ mm, θα μεταβληθεί στις τιμές $\ell = 300$ mm και $\ell = 450$ mm, ώστε ο λόγος λ να γίνει $1/3$ και $1/5$ αντίστοιχα. Επαναλαμβάνεται, λοιπόν, η διαδικασία του Κεφαλαίου 4, με τις μάζες διωστήρα m_δ και εμβόλου m_ε , να παραμένουν σταθερές.

Περίπτωση $\lambda = \frac{1}{3}$:

$$\begin{array}{l} \text{Από το σύστημα εξισώσεων} \\ \left. \begin{array}{l} m_{\delta\ell} + m_{\delta r} = m_\delta \\ m_{\delta\ell} (\text{ΕΚ}) = m_{\delta r} (\text{ΚΣ}) \end{array} \right\} \end{array}$$

υπολογίζεται η $m_{\delta\ell}$, με τα δεδομένα του Πίνακα 1 που δεν αλλάζουν, δηλαδή

$$\begin{aligned} (\text{ΚΣ}) &= 94 \text{ mm} \\ m_\delta &= 6,33 \text{ kg} \end{aligned}$$

και στη συνέχεια, η m_ℓ από την $m_\ell = m_\varepsilon + m_{\delta\ell}$, με $m_\varepsilon = 4,97$ kg.

Η διαδικασία έχει ως εξής:

$$(ΕΚ) = \ell - (ΚΣ) = 300 - 94 = 206 \text{ mm}$$

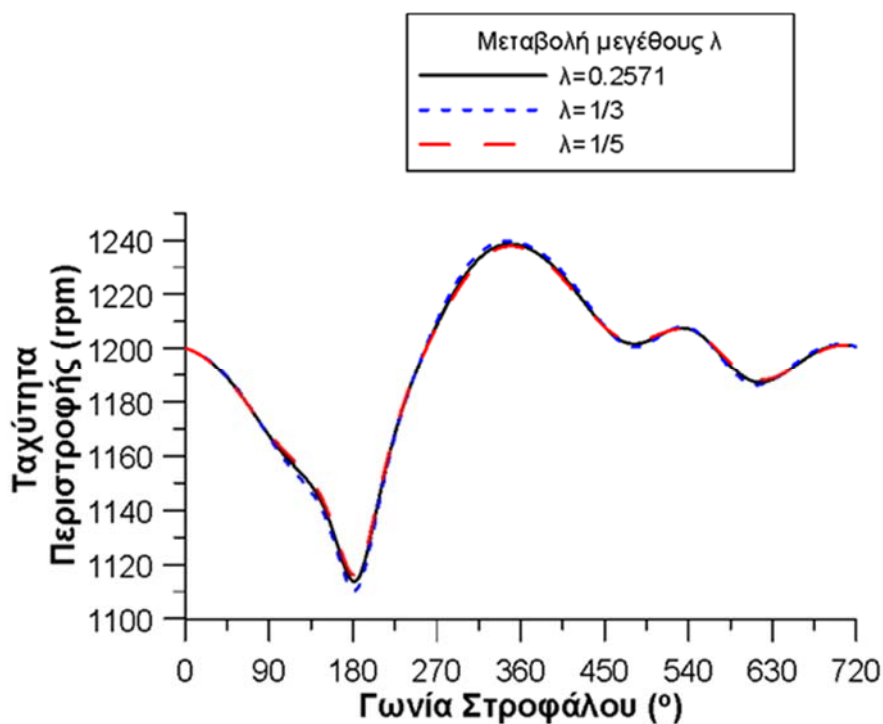
$$\begin{cases} m_{\delta\ell} + m_{\delta r} = 6,33 \\ m_{\delta\ell} \cdot 206 = m_{\delta r} \cdot 94 \end{cases} \Rightarrow m_{\delta\ell} = 1,98 \text{ kg}$$

Τελικά, προκύπτει $m_\ell = 4,97 + 1,98 = 6,95 \text{ kg}$.

Περίπτωση $\lambda = \frac{1}{5}$:

Με όμοιο τρόπο, σε αυτή την περίπτωση, βρίσκεται $m_\ell = 4,97 + 1,32 = 6,29 \text{ kg}$.

Το Σχήμα 5.3, δείχνει την εξάρτηση της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου από τη μεταβολή του συντελεστή λ .



Σχήμα 5.3 Εξάρτηση διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής από τον λόγο λ

Παρατηρούμε, πως ο λόγος λ , δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Οι αλλαγές, εν κατακλείδι, στο μήκος του διωστήρα, έχουν μικρή επίδραση στις συνολικές παλινδρομούσες μάζες και πρακτικά αμελητέα στη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ανά κύκλο λειτουργίας.

Όταν $\lambda=0,25714$ (ονομαστική περίπτωση), ισχύει ότι

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,637 - 116,56}{124,915} = 0,1046$$

Για $\lambda = \frac{1}{3}$, είναι:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,750 - 116,225}{124,906} = 0,108$$

ενώ για $\lambda = \frac{1}{5}$, είναι

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,555 - 116,81}{124,94} = 0,1019.$$

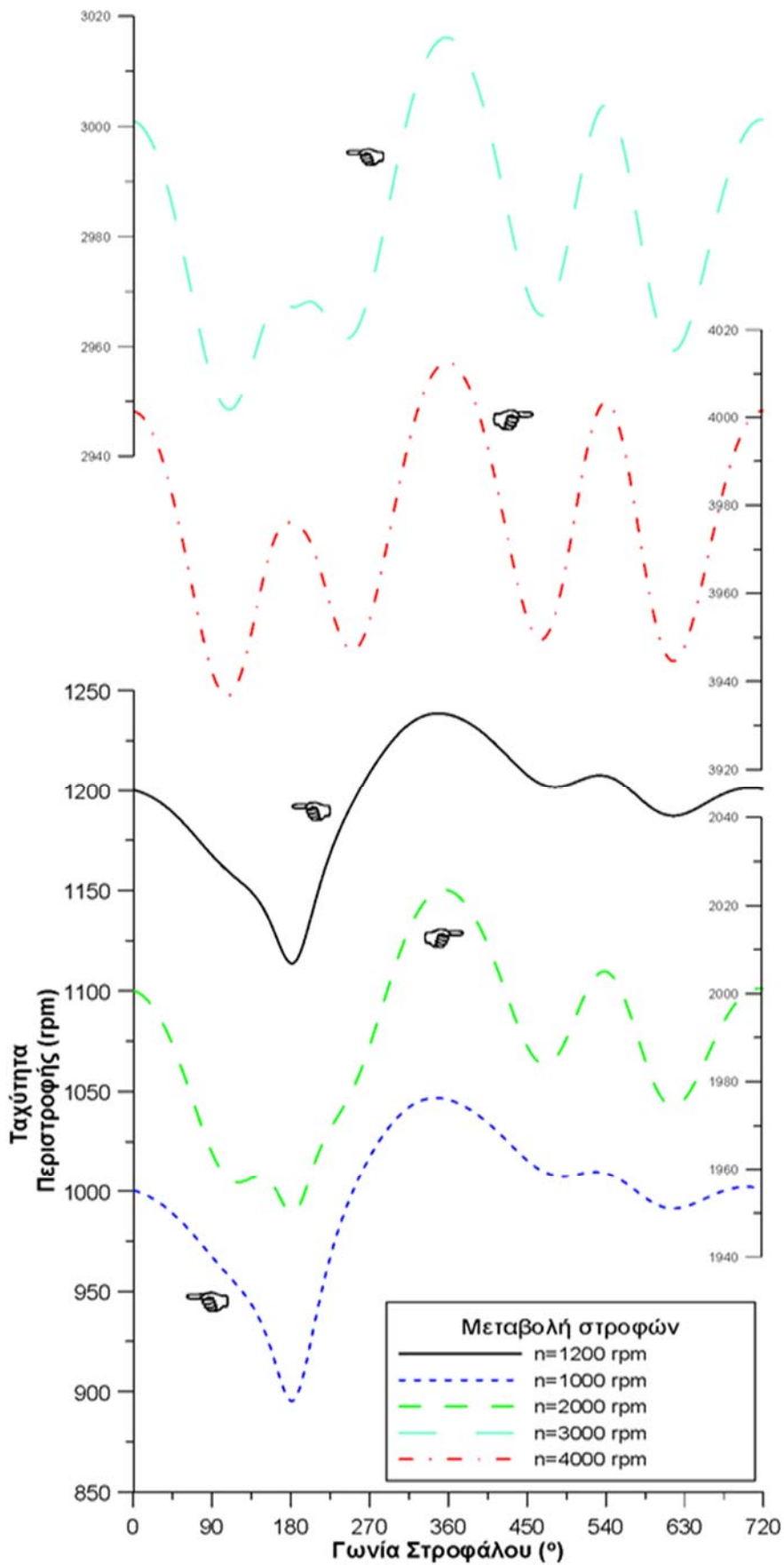
5.2.4. Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα

Οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, έχουν ενδιαφέρον στην εξέταση του τρόπου που οι στροφές αυξομειώνονται σε ένα κύκλο λειτουργίας. Μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής, δημιουργούν μεγαλύτερες (απόλυτες) ταχύτητες και επιταχύνσεις στις μάζες του κινητήρα και οδηγούν σε αυξημένες ροπές του κινητήρα, λόγω περιστρεφόμενων και παλινδρομουσών μαζών.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της αύξησης των στροφών, είναι η **αύξηση της Pe (δυνάμεις αδρανείας) και άρα των Me και M_σ** , όπως επίσης της μέσης ταχύτητας του εμβόλου. Αυτό με τη σειρά του, προκαλεί αύξηση της μέσης πίεσης τριβών (f_{mep}), συνεπώς αυξάνεται και η στρεπτική ροπή λόγω τριβών, M_{fr} . Τέλος, αλλάζει φυσικά και η ανθιστάμενη ροπή του φορτίου.

Η διαγραμματική απεικόνιση στην μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής, φαίνεται στο Σχήμα 5.4 παρακάτω.

Θα μπορούσε να ειπωθεί, αναλύοντας τα παρακάτω διαγράμματα μεταβολής, πως, καθώς οι στροφές του κινητήρα μεγαλώνουν, υπάρχει μια αύξηση των μεγίστων και ελαχίστων που παρουσιάζει η ταχύτητα περιστροφής, αλλά και η τάση αυτά να συγκλίνουν στην ίδια τιμή. Για αυτό το λόγο, αναμένεται μια σταδιακή μείωση του βαθμού ανομοιομορφίας με την άνοδο των στροφών.



Σχήμα 5.4 Εξάρτηση διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής από τις στροφές

Στις n=1200 rpm (στα ονομαστικά μεγέθη), έχουμε βαθμό ανομοιομορφίας

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,637 - 116,56}{124,915} = 0,1046$$

Στις n=1000 rpm, είναι:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{109,563 - 93,71}{104,19} = 0,152$$

Στις n=2000 rpm:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{211,799 - 204,078}{208,06} = 0,037$$

Στις n=3000 rpm, είναι

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{315,69 - 308,605}{312,002} = 0,023$$

Τέλος, έχουμε για τις 4000 rpm:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{419,99 - 412,038}{415,959} = 0,019$$

Η αύξηση των στροφών του κινητήρα έχει, λοιπόν, ως συνέπεια τη μείωση του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής, κατά μία περίπου τάξη μεγέθους.

5.2.5. Φορτίο

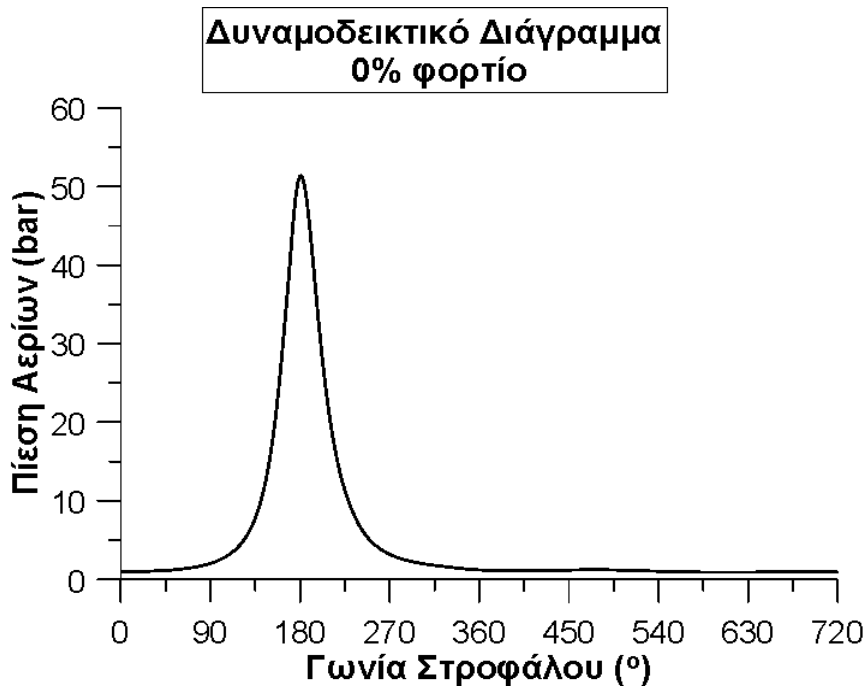
Σε αυτή την παράγραφο, εξετάζεται η επίδραση του φορτίου του κινητήρα. Η ανάλυση γίνεται για φορτίο ίσο με 0% («ρελαντί»), κατόπιν για φορτίο ίσο με 50% (το ονομαστικό του προηγούμενου Κεφαλαίου) και τέλος ίσο με 90%. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι, θεωρούνται σταθερές (ταχ. περιστροφής 1200 rpm κλπ).

Η σημαντικότερη συνέπεια από την αλλαγή στο φορτίο ενός κινητήρα Diesel είναι, φυσικά, η αλλαγή στις πιέσεις που επικρατούν μέσα στον κύλινδρο σε ένα κύκλο λειτουργίας.

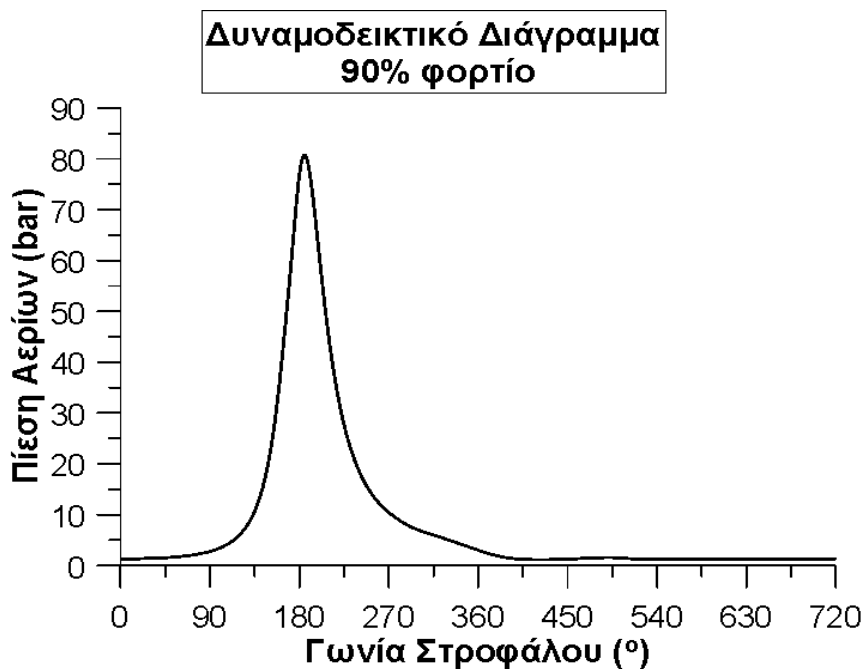
Είναι, λοιπόν, επόμενο, σε μεγαλύτερο φορτίο να υπάρχουν μεγαλύτερες δυνάμεις και ροπές εξ' αερίων και, άρα, μεγαλύτερη συνολική στρεπτική ροπή του κινητήρα. Από την άλλη πλευρά, αύξηση της p_{\max} στο εσωτερικό του κυλίνδρου, αυξάνει την μέση πίεση τριβών και επομένως την στρεπτική ροπή των τριβών.

Συμπεραίνουμε πως, οι αλλαγές στο φορτίο, θα έχουν άμεση επίδραση στην ανομοιομορφία περιστροφής της ατράκτου, αλλά και στις ροπές του κινητήρα.

Θα παρουσιαστούν παρακάτω, στα Σχήματα 5.5 και 5.6, τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα για τα φορτία 0% και 90%, ώστε να φανεί η διαφορά στις επικρατούσες πιέσεις των αερίων. Το αντίστοιχο διάγραμμα στο ονομαστικό φορτίο (50%), παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 (Σχήμα 4.1).

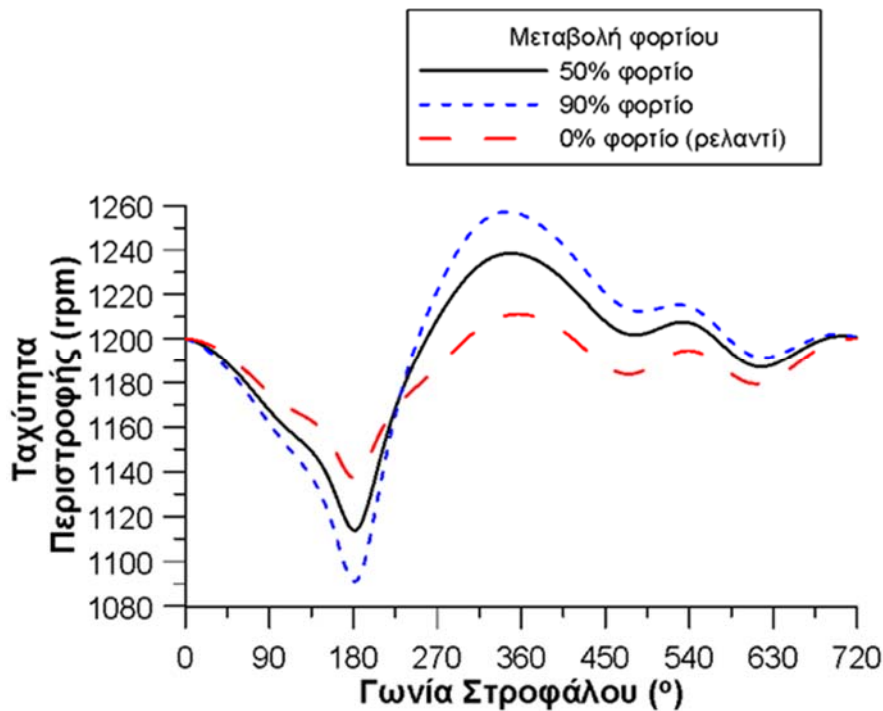


Σχήμα 5.5 Δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα στο ρελαντί



Σχήμα 5.6 Δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα στο 90% φορτίο

Το Σχήμα 5.7 που ακολουθεί, δείχνει τις μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής συναρτήσει του φορτίου.



Σχήμα 5.7 Εξάρτηση διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής από το φορτίο του κινητήρα

Είναι φανερό, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο στο οποίο δουλεύει ο κινητήρας (δηλαδή όσο μεγαλύτερες είναι οι πιέσεις μέσα στον κύλινδρο λόγω έγχυσης μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου), τόσο μεγαλύτερη η ροπή εξ' αερίων και τόσο μεγαλύτερες οι διακυμάνσεις της ταχύτητας περιστροφής, ειδικά κοντά στο ΑΝΣ, όπου εκεί η επίδραση των πιέσεων του κυλίνδρου είναι μεγαλύτερη. Οι δυνάμεις αδράνειας, αντιθέτως, διατηρούν τις ίδιες τιμές αφού η ταχύτητα περιστροφής και οι μάζες παραμένουν σταθερές.

Μπορεί, τώρα, να υπολογιστεί ο βαθμός ανομοιομορφίας περιστροφής, για τις τρεις περιπτώσεις του φορτίου κινητήρα. Έχουμε στο ονομαστικό φορτίο, τον βαθμό ανομοιομορφίας που παρουσιάζεται και πάλι για λόγους πληρότητας:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,637 - 116,564}{124,915} = 0,1046$$

Στο «ρελαντί» της μηχανής (0% φορτίο), είναι

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{126,766 - 119,013}{124,117} = 0,062$$

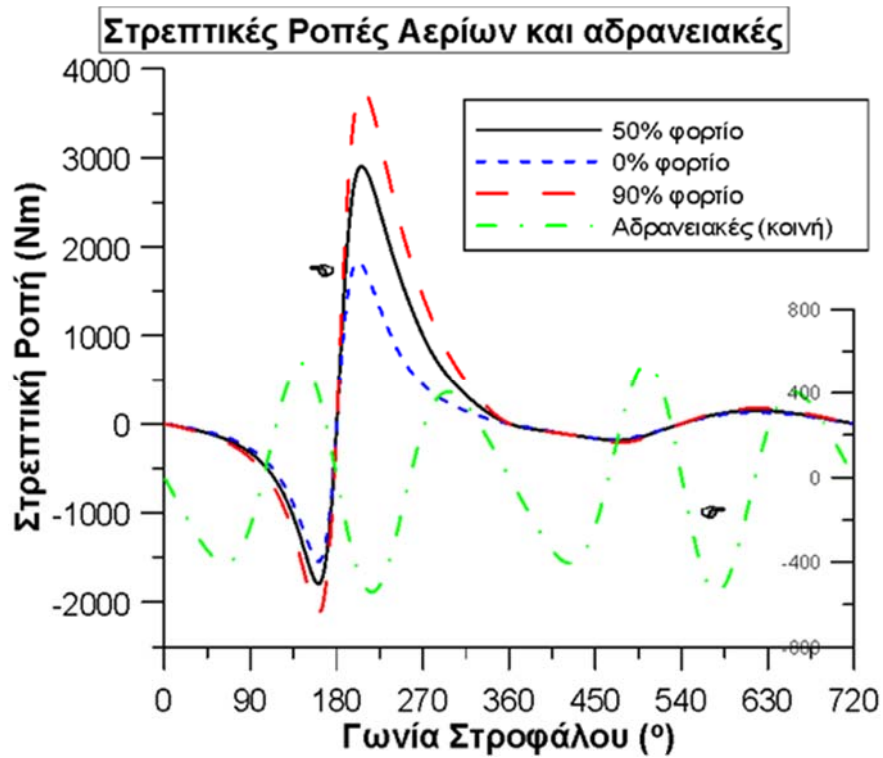
ενώ στο 90% φορτίο υπολογίζεται:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{131,579 - 114,211}{125,314} = 0,138$$

Η αύξηση του βαθμού ανομοιομορφίας, από το «ρελαντί» στο πλήρες φορτίο, παρατηρείται ότι είναι σημαντική. Συνεπώς, η παράμετρος του φορτίου μπορεί να καταταχθεί στις κυριότερες όσον αφορά τη μεταβολή του βαθμού ανομοιομορφίας (βλέπε και Πίνακα 5.1). Ειδικά, αν το επίπεδο υπερπλήρωσης του κινητήρα ήταν υψηλότερο, θα παρατηρούσαμε ακόμα μεγαλύτερες διαφορές.

Χρήσιμο θα ήταν, σε αυτό το σημείο, εκτός από τα διαγράμματα της ταχύτητας, να καταγραφούν και τα διαγράμματα των διαφόρων στρεπτικών ροπών στα εξεταζόμενα φορτία.

Οι στρεπτικές ροπές, οφειλόμενες στις δυνάμεις αερίων καθώς και η κοινή για τα τρία φορτία ροπή από τις αδρανειακές δυνάμεις, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8. Όπως προαναφέρθηκε, οι αδρανειακές δυνάμεις δεν μεταβάλλονται σε σχέση με το φορτίο, όπως φαίνεται άμεσα από τη σχέση (2.12).



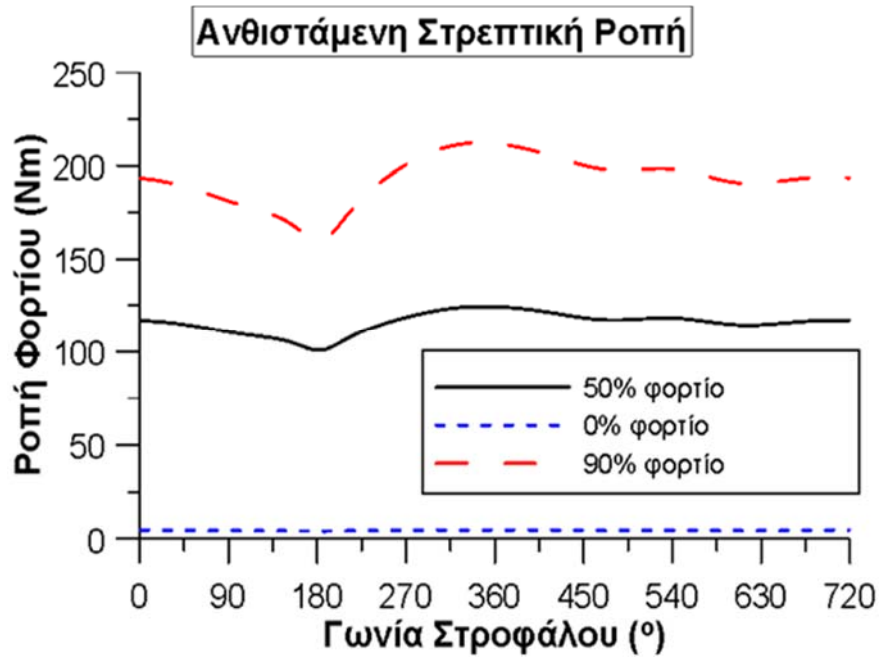
Σχήμα 5.8 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών αερίων και αδρανειακών για τις τρεις περιπτώσεις φορτίων

Είναι ξεκάθαρο, πως, οι σημαντικότερες μεταβολές στις στρεπτικές ροπές εξ' αερίων, παρατηρούνται λίγο πριν και μετά το ΑΝΣ, δηλαδή κατά το τέλος της συμπίεσης και την έναρξη της καύσης.

Παρακάτω, εμφανίζονται οι διαφορές όσον αφορά τις ανθιστάμενες ροπές, αλλά και τις συνολικές ροπές του κινητήρα.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών κινητήρα για τις τρεις περιπτώσεις φορτίων



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών αντίστασης για τις τρεις περιπτώσεις φορτίων

Ο Πίνακας 5.2, τέλος, δίνει τη διαφορά στις τιμές των στρεπτικών ροπών μηχανικών απωλειών με τη μεταβολή του φορτίου.

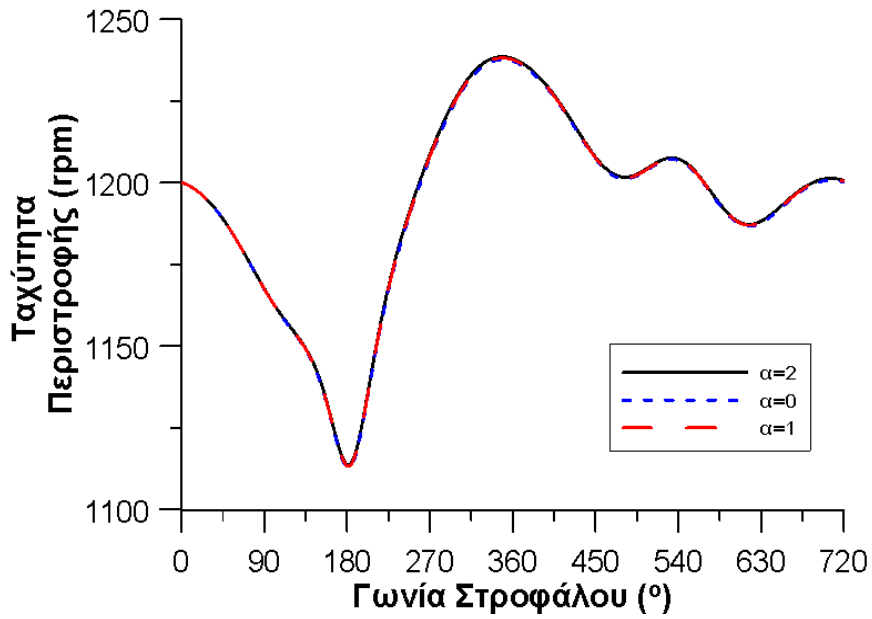
ΦΟΡΤΙΟ	M_{fr} (Nm)
0%	31,2305
50%	32,776
90%	34,469

Πίνακας 5.2 Ροπή μηχανικών απωλειών σε σχέση με το φορτίο

5.2.6. Μορφή συνδεδεμένης αντίστασης

Στην παράγραφο αυτή, θα μελετηθεί η επίδραση του τύπου της συνδεδεμένης με τον κινητήρα κατανάλωσης, στην ταχύτητα περιστροφής της στροφαλοφόρου ατράκτου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ροπή του ανθιστάμενου φορτίου είναι της μορφής $M_L(\varphi) = a + k\omega^a$ (σχέση 3.4). Η εξίσωση αυτή, χρησιμοποιείται στη σχέση (4.1.α) για τον υπολογισμό του μεγέθους ε σε κάθε βήμα, όπου το k βρίσκεται από τη σχέση (3.5) για $a=2$ και $a=0$. Συνεπώς, όταν οι ροπές του κινητήρα δεν αλλάζουν, ο συντελεστής k είναι σταθερός.

Το Σχήμα 5.11, παρουσιάζει την ανομοιομορφία της ταχύτητας περιστροφής, όταν το είδος του φορτίου είναι σταθερό ($a=0$, $a>0$) ή γραμμικό ($a=1$, $a=0$). Βλέπουμε ότι η αλλαγή της μορφής της αντίστασης δεν διαφοροποιεί τη διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής και αυτό οφείλεται στην ούτως ή άλλως αμελητέα διαφοροποίηση της στρεπτικής ροπής της κατανάλωσης κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας σε σύγκριση με αυτήν του κινητήρα.



Σχήμα 5.11 Εξάρτηση διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής από το είδος του φορτίου

Οι βαθμοί ανομοιομορφίας εκφράζονται ως εξής:

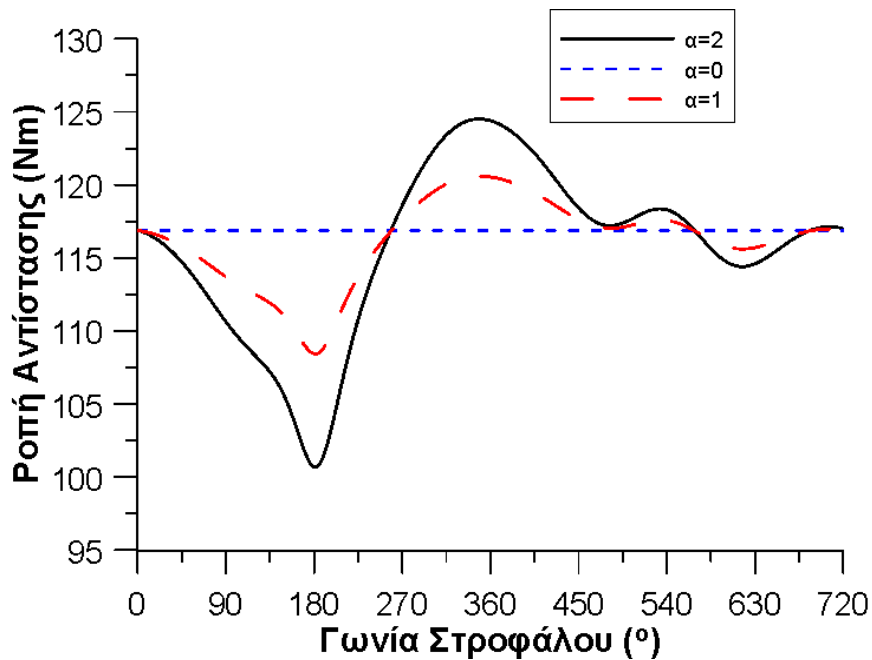
για $\alpha=0$:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,547 - 116,47}{124,852} = 0,1047$$

και για $\alpha=1$:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{129,59 - 116,52}{124,88} = 0,1047$$

Οι ροπές της αντίστασης για τους τρεις τύπους της, δίνονται στο κοινό διάγραμμα 5.12.



Σχήμα 5.12 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών αντίστασης για τα τρία είδη φορτίου

Οι στρεπτικές ροπές εξ' αερίων, οι αδρανειακές, καθώς και τριβών, παραμένουν ανεξάρτητες του είδους της αντίστασης.

Συγκεντρωτικά, όλα τα παραπάνω αποτελέσματα για την επίδραση των διαφόρων τεχνικών χαρακτηριστικών κινητήρα-αντίστασης στο βαθμό ανομοιομορφίας περιστροφής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, όπου συνοψίζονται οι **ποσοστιαίες αποκλίσεις του βαθμού ανομοιομορφίας σε σύγκριση με την ονομαστική τιμή**, σε κάθε εξεταζόμενο μέγεθος της παραμετρικής ανάλυσης. Η τιμή του βαθμού ανομοιομορφίας για τα ονομαστικά μεγέθη της ανάλυσης αυτής ($m_e=6,67 \text{ kg}$, $\Theta=2 \text{ kgm}^2$, $\alpha=2$, $\lambda=0,257$, **φορτίο 50%**, **στροφές 1200 rpm**, $r=90 \text{ mm}$, $D=140 \text{ mm}$), υπενθυμίζεται πως είναι $\delta = 0,1046$.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ		ΒΑΘΜΟΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	
			ΜΕΓΙΣΤΗ	ΜΕΣΗ
Συνολική μάζα m	2,5 kg	-0,18%	+0,013%	+0,42%
	10 kg	+0,27%	+0,0023%	-0,33%
Ροπή Αδράνειας Θ	0,5 kgm ²	+340,79%	+9,57%	-1,53%
	5 kgm ²	-60,65%	-1,87%	+0,32%
	12 kgm ²	-83,70%	-2,59%	+0,45%
Λόγος λ	1/3	+3,46%	+0,087%	-0,0073%
	1/5	-2,57%	-0,063%	+0,02%
Ταχύτητα περιστροφής *	1000 rpm	+45,37%	-15,48%	-16,59%
	2000 rpm	-64,55%	+63,38%	+66,56%
	3000 rpm	-78,31%	+143,52%	+149,79%
	4000 rpm	-81,73	+223,97%	+232,99%
Φορτίο	0%	-40,32%	-2,21%	-0,64%
	90%	+32,43%	+1,49%	+0,32%
Εκθέτης α	0	+0,03%	-0,07%	-0,05%
	1	+0,02%	-0,04%	-0,03%

Πίνακας 5.3 Ποσοστιαία μεταβολή του βαθμού ανομοιομορφίας, της μέγιστης και της μέσης ταχύτητας περιστροφής, συγκριτικά με τις ονομαστικές τιμές για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις

* Σημειώνεται, ότι, οι στήλες της ταχύτητας περιστροφής για την παράμετρο των στροφών, δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες με τις υπόλοιπες, αφού εξ' ορισμού αναφέρονται σε μεγαλύτερες μέγιστες και μέσες τιμές.

Ισχύουν επίσης:

$$\omega_{\max, \text{nominal}} = 129,637 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{\text{m, nominal}} = 124,915 \text{ rad/s}$$

Επιβεβαιώνεται, συνεπώς, όπως υποτέθηκε στην αρχή του Κεφαλαίου, πως η ροπή αδράνειας είναι η πιο καθοριστική παράμετρος στην αντιμετώπιση

της ανομοιομορφίας περιστροφής, καθώς (ενδεικτικά) η αύξησή της κατά 10 kgm² (από 2 σε 12 kgm²), επιφέρει μείωση του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής, σε ποσοστό περίπου 84%.

5.4. Πολυκύλινδροι κινητήρες

Μία από τις βασικότερες παραμέτρους που επηρεάζει την ανομοιομορφία περιστροφής της στροφαλοφόρου ατράκτου, είναι ο αριθμός των κυλίνδρων του κινητήρα (δευτερευόντως και η διάταξή τους). Αυξάνοντας τον αριθμό των κυλίνδρων, οι αναφλέξεις τους γίνονται συχνότερες εντός ενός κύκλου λειτουργίας, και έτσι, τα «νεκρά» διαστήματα μεταξύ φάσεων αποτόνωσης μειώνονται σημαντικά. Κατά συνέπεια, η διακύμανση της ροπής μέσα στους τέσσερις χρόνους λειτουργίας εξομαλύνεται.

Σε μονοκύλινδρο κινητήρα, η φάση της εκτόνωσης πραγματοποιείται κάθε 720° γωνίας στροφάλου (Σχήμα 4.5) και ο λόγος της μέγιστης τιμής ροπής προς τη μέση τιμή της ίσος με:

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{mean}}} = 20,46$$

Επίσης, το εύρος ακροτάτων της ροπής είναι

$$M_{\max} - M_{\min} = 3838,41 \text{ Nm}$$

Με την προσθήκη περισσότερων κυλίνδρων και όσο τα διαστήματα των αναφλέξεων ελαττώνονται, ο παραπάνω λόγος, καθώς και η διαφορά μέγιστης και ελάχιστης ροπής, κατά βάση μειώνονται.

Τελικά, έχοντας και ως αναφορά τη θεωρία του Κεφαλαίου 3, η διαφορά $\omega_{\max}-\omega_{\min}$ μειώνεται επίσης, άρα και ο βαθμός ανομοιομορφίας.

Τα ευρήματα των υπολογισμών για τον μονοκύλινδρο κινητήρα στις προηγούμενες παραγράφους, θα εφαρμοστούν πλέον και σε πολυκύλινδρο κινητήρα.

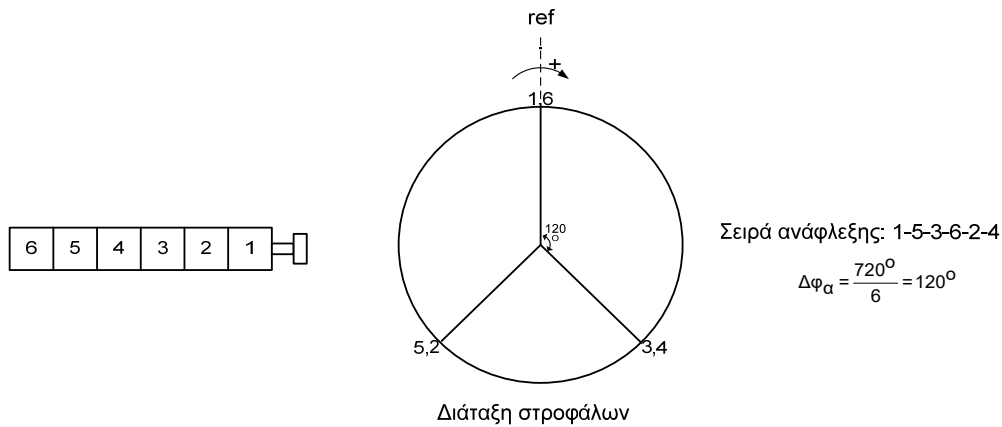
Στην ανάλυσή μας, θα θεωρήσουμε ότι σε κάθε κύλινδρο εγχύεται η ίδια ποσότητα καυσίμου, αφού έχουμε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας. Έτσι λοιπόν, σε κάθε κύλινδρο επικρατούν οι ίδιες συνθήκες πίεσης, οπότε και το προφίλ της ροπής που παράγεται από τον καθέναν είναι το ίδιο (ίδιο δυναμοδεικτικό διάγραμμα), με μία διαφορά φάσης η οποία οφείλεται στην εκάστοτε σειρά ανάφλεξης.

Συγκεκριμένα, η διαφορά ανάφλεξης $\Delta\varphi_{\alpha}$ δίνεται από την σχέση (5.1), για τους 4-Χ κινητήρες διάταξης σειράς υπό μελέτη (πάντα με ισοδιαστήματα ανάφλεξης):

$$\Delta\varphi_{\alpha} = \frac{720^{\circ}}{z} \quad (5.1)$$

όπου το z είναι ο αριθμός των κυλίνδρων και θα λάβει τιμές $z=2$, $z=4$, $z=6$ και $z=8$ στην παρούσα ανάλυση.

Για παράδειγμα, για 4-Χ εξακύλινδρο κινητήρα διάταξης σειράς, η σειρά ανάφλεξης είναι 1-5-3-6-2-4, και μονοσήμαντα ορίζεται η διάταξη των στροφάλων (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13 Διάταξη κυλίνδρων, στροφάλων και σειρά ανάφλεξης εξακύλινδρου 4-X κινητήρα

Έτσι, την στιγμή που ο κύλινδρος 1 βρίσκεται στο ΑΝΣ, ο κύλινδρος 5 έπεται κατά 120° . Με βάση τα παραπάνω, γίνεται υπολογισμός της ροπής που παράγει ο κάθε κύλινδρος και κατόπιν η υπέρθεση αυτών των ροπών, μας δίνει τη συνολική ροπή που παράγει ο κινητήρας.

Σε έναν τέτοιο κινητήρα, ο υπολογισμός της στρεπτικής δύναμης (ή ροπής) στις διάφορες θέσεις της στροφαλοφόρου ατράκτου του πολυκύλινδρου κινητήρα γίνεται ως εξής:

Αν $P_T = T(\varphi)$ είναι η στρεπτική δύναμη για το στρόφαλο 6, τότε η στρεπτική δύναμη σε όλες τις άλλες ενδιάμεσες θέσεις βρίσκεται ως:

Στρεπτική δύναμη μετά το στρόφαλο 6: $T_6 = T(\varphi)$

Στρεπτική δύναμη μετά το στρόφαλο 5: $T_5 = T_6 + T(\varphi + 2 \cdot 120)$

Στρεπτική δύναμη μετά το στρόφαλο 4: $T_4 = T_5 + T(\varphi + 4 \cdot 120)$

Στρεπτική δύναμη μετά το στρόφαλο 3: $T_3 = T_4 + T(\varphi + 1 \cdot 120)$

Στρεπτική δύναμη μετά το στρόφαλο 2: $T_2 = T_3 + T(\varphi + 5 \cdot 120)$

Στρεπτική δύναμη μετά το στρόφαλο 1: $T_1 = T_2 + T(\varphi + 3 \cdot 120)$

Η T_1 , αποτελεί την ολική στρεπτική δύναμη στον σύνδεσμο ισχύος (μετά τον κύλινδρο 1 στο Σχήμα 5.13), προερχόμενη από όλους τους κυλίνδρους.

Η διερεύνηση που θα ακολουθήσει, για τους τέσσερις πολυκύλινδρους κινητήρες, θα γίνει στο ονομαστικό φορτίο 50% και στα ονομαστικά μεγέθη της ανάλυσης (συμπ. της ολικής ροπής αδράνειας), ώστε τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα.

Γενικά, λοιπόν, με βάση το καταγεγραμμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα στο ονομαστικό φορτίο, αν φ_1 είναι η γωνία στην οποία βρίσκεται την τυχούσα στιγμή ο κύλινδρος 1 και $p(\varphi_1)$ η πίεση στο εσωτερικό του τη δεδομένη στιγμή, τότε ο κύλινδρος i θα έχει πίεση

$$p_i = p(\varphi_1 + \Delta\varphi_i) \quad (5.2)$$

όπου $\Delta\varphi_i$ η διαφορά φάσης του i κυλίνδρου από τον κύλινδρο 1. Τότε, η συνολική ροπή για όλους τους z κυλίνδρους του κινητήρα, προσδιορίζεται από το άθροισμα

$$M_e = \sum_{i=1}^z M_i(\varphi_1, \Delta\varphi_\alpha, \Delta\varphi_i) \quad (5.3)$$

5.4.1. Δικόλινδρος 4-X κινητήρας

Σε ένα δικόλινδρο κινητήρα σειράς με ομοιομορφία ανάφλεξης, η σειρά ανάφλεξης είναι 1-2-1 και η διαφορά ανάφλεξης 360° (σχέση 5.1).

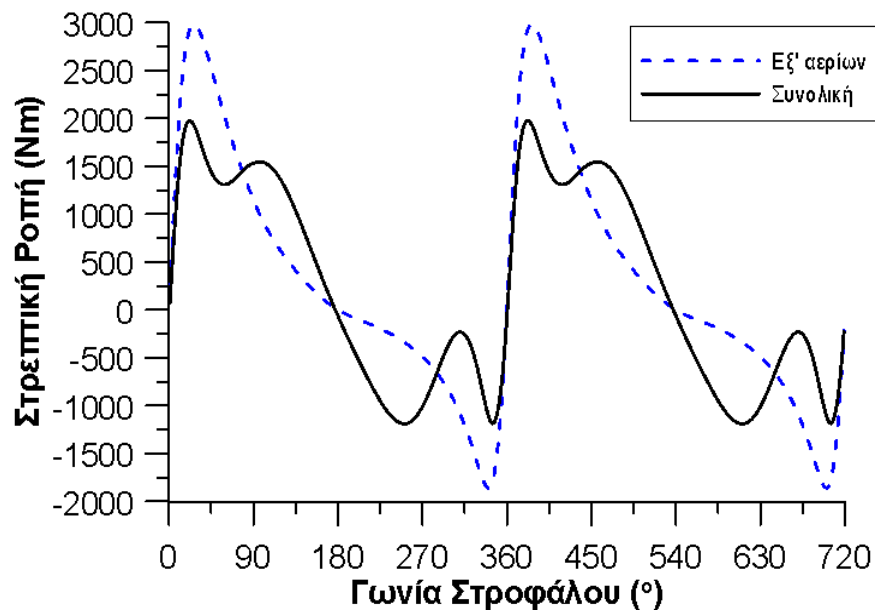
Τα διαγράμματα της στρεπτικής ροπής εξ' αερίων και της συνολικής ροπής του κινητήρα, δίνονται στο Σχήμα 5.14. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.15, παρουσιάζεται η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής.

Υπολογίζονται εδώ:

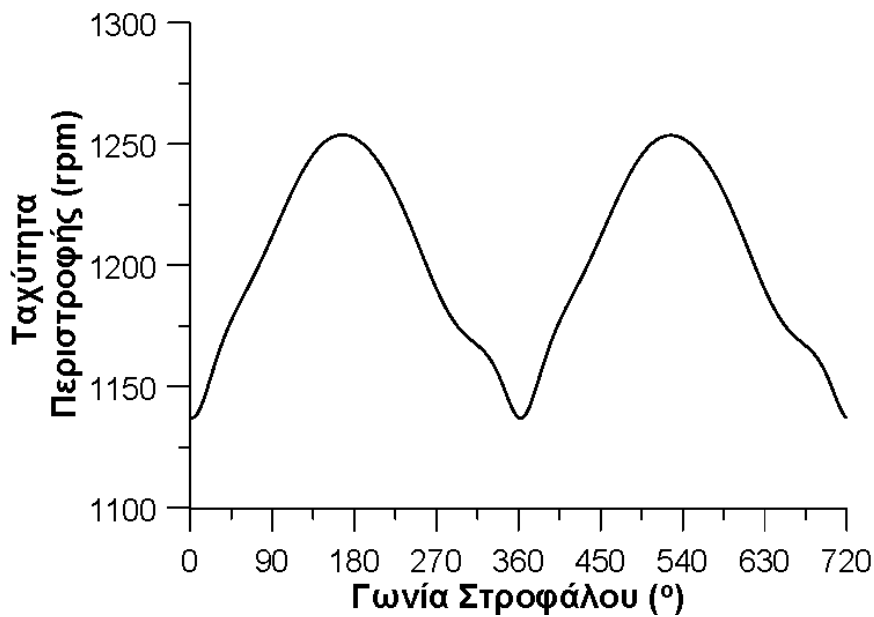
$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{mean}}} = 8,46$$

$$M_{\max} - M_{\min} = 3167,11 \text{ Nm}$$

Τα μεγέθη αυτά, παρατηρούμε πως είναι σημαντικά μικρότερα από τα αντίστοιχα του μονοκύλινδρου κινητήρα, συνεπώς ο βαθμός ανομοιομορφίας αναμένεται μικρότερος.



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών για δικύλινδρο 4-Χ κινητήρα



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής για δικύλινδρο 4-Χ κινητήρα

Είναι φανερά τα δύο μέγιστα στα Σχήματα 5.14 και 5.15 (λόγω δύο καύσεων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας), όπως επίσης και η αντιστοιχία του διαγράμματος της ταχύτητας με της ροπής του κινητήρα.

Για τη σύγκλιση του διαγράμματος της ταχύτητας, πραγματοποιήθηκαν αρκετοί κύκλοι επανάληψης, ώστε να καταλήξουμε στην αρχική (ίση με την τελική) τιμή της γωνιακής ταχύτητας $\omega=119,038 \text{ rad/s}$ και στη μέση τιμή που φαίνεται παρακάτω.

Εδώ, ο βαθμός ανομοιομορφίας θα είναι:

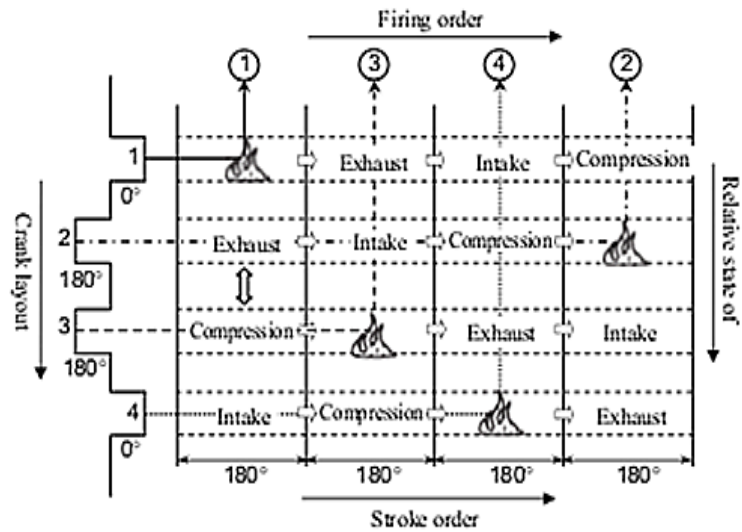
$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{131,23 - 118,99}{125,79} = 0,097$$

αναμενόμενα χαμηλότερος από τον αντίστοιχο για μονοκύλινδρο κινητήρα (βλ. Πίνακα 5.4).

5.4.2. Τετρακύλινδρος 4-Χ κινητήρας διάταξης σειράς

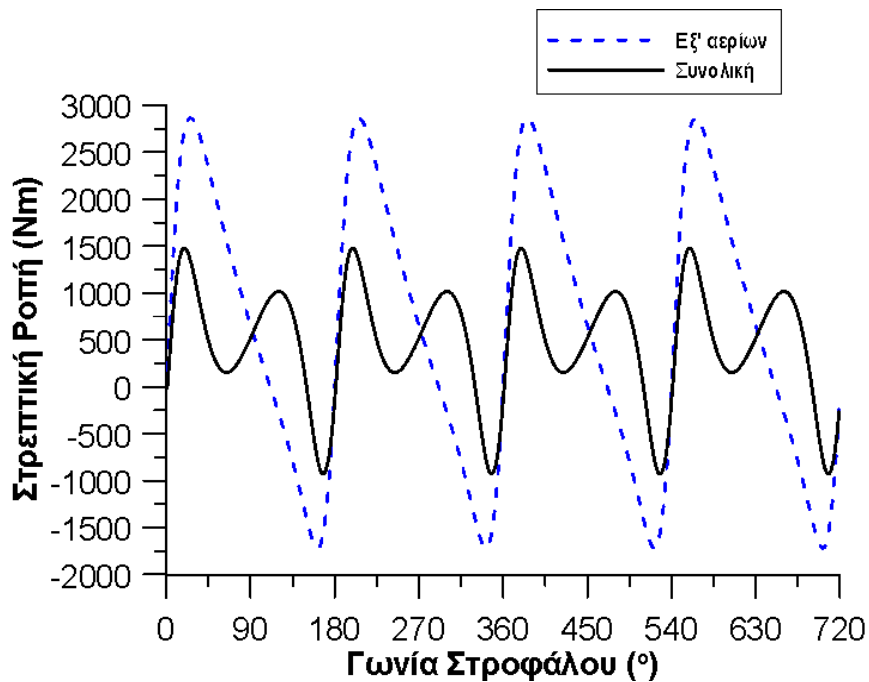
Για $z=4$ ισχύει (σχέση 5.5): $\Delta\varphi_\alpha = \frac{720^\circ}{4} = 180^\circ$ διαφορά ανάφλεξης.

Αυτό, φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.16) της σειράς ανάφλεξης και φάσεων των κυλίνδρων, σε σχέση με τη θέση της στροφαλοφόρου.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα σειράς ανάφλεξης τετρακύλινδρου τετράχρονου κινητήρα [7]

Τα διαγράμματα της στρεπτικής ροπής εξ' αερίων και της συνολικής ροπής του τετρακύλινδρου κινητήρα, δίνονται στο Σχήμα 5.17.



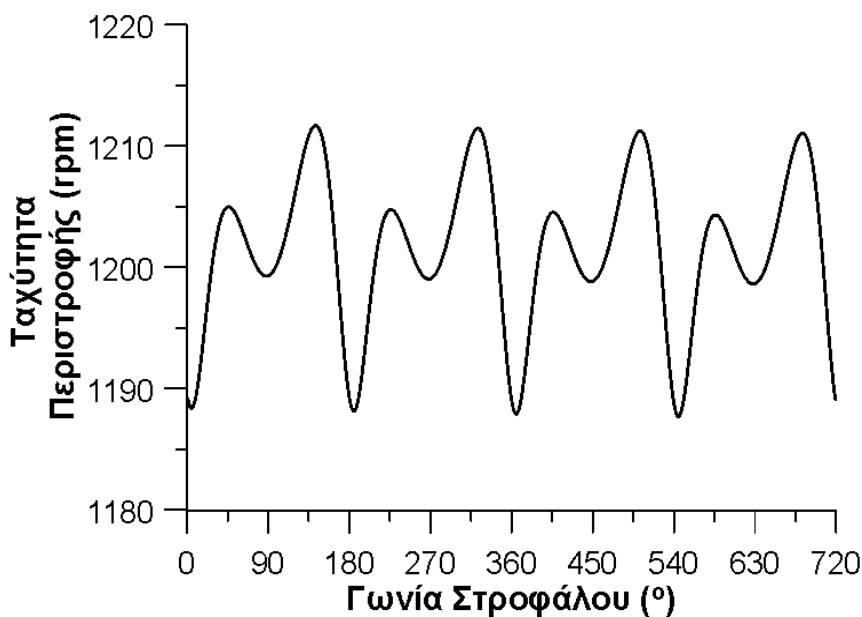
Σχήμα 5.17 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών για τετρακύλινδρο 4-Χ κινητήρα

Στον τετρακύλινδρο κινητήρα, ισχύουν:

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{mean}}} = 3,17$$

$$M_{\max} - M_{\min} = 2410,4 \text{ Nm}$$

Από το παραπάνω γράφημα, γίνεται φανερό ότι, ο τετρακύλινδρος κινητήρας σειράς έχει σαφώς πιο ομοιόμορφο διάγραμμα ροπών, λόγω τεσσάρων διεργασιών εντός ενός κύκλου λειτουργίας. Αντίστοιχης μορφής, καταγράφεται το διάγραμμα της ταχύτητας περιστροφής ατράκτου (Σχήμα 5.18).



Σχήμα 5.18 Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής για τετρακύλινδρο 4-X κινητήρα

Υπολογίζεται, λοιπόν, ο βαθμός ανομοιομορφίας σε αυτή την περίπτωση ως:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{126,83 - 124,312}{125,75} = 0,02$$

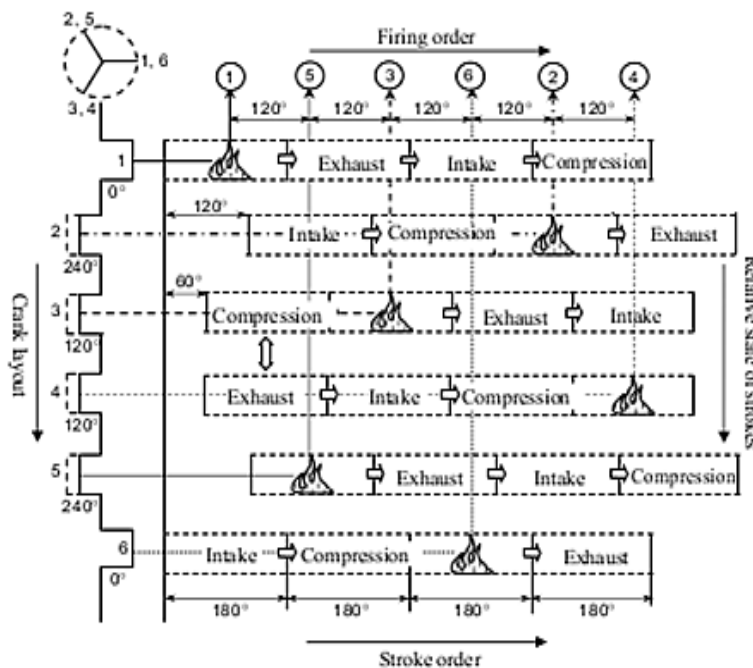
ο οποίος είναι αρκετά μικρότερος από του δικύλινδρου (Πίνακας 5.4).

Επίσης πραγματοποιήθηκαν αρκετοί κύκλοι επανάληψης στη σύγκλιση του Σχήματος 5.18 και της αρχικής τιμής της ταχύτητας σε $\omega=124,46 \text{ rad/s}$.

5.4.3. Εξακύλινδρος 4-Χ κινητήρας διάταξης σειράς

Το Σχήμα 5.19, δείχνει τη διαδοχή των διεργασιών των κυλίνδρων σε εξακύλινδρο κινητήρα σειράς, στον οποίο η διαφορά ανάφλεξης είναι

$$\Delta\varphi_{\alpha} = \frac{720^{\circ}}{6} = 120^{\circ}.$$



Σχήμα 5.19 Διάγραμμα σειράς ανάφλεξης εξακύλινδρου τετράχρονου κινητήρα [7]

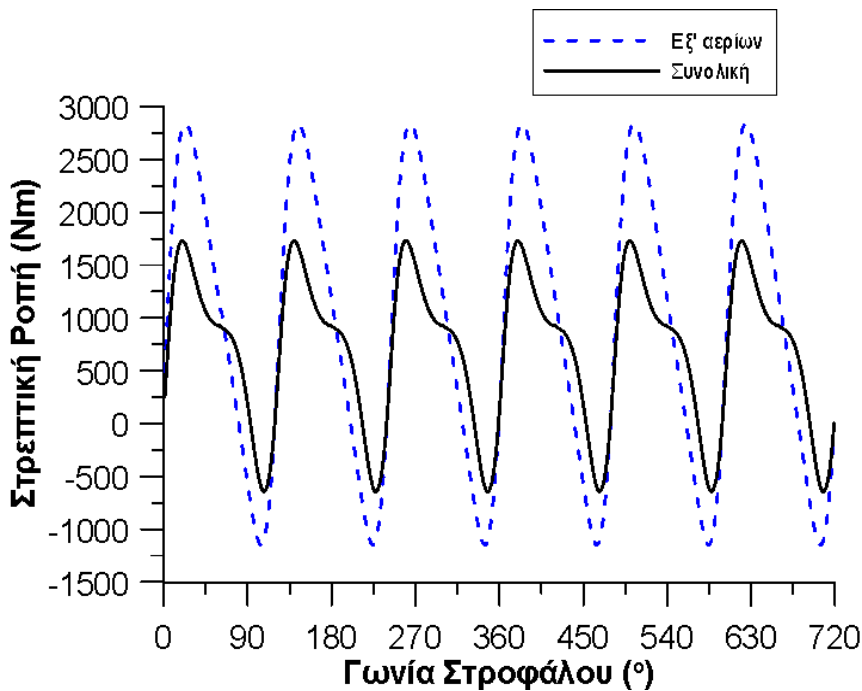
Έτσι, μετά την ανάφλεξη του κυλίνδρου 1 (όταν βρίσκεται στο ΑΝΣ του), ο κάθε κύλινδρος ξεκινά τη φάση της εκτόνωσης, με διαφορά 120°. Η σειρά ανάφλεξης 1-5-3-6-2-4 (βλ. Σχήμα 5.13), φαίνεται και σχηματικά παραπάνω.

Οι στρεπτικές ροπές που εξαγονται από εξακύλινδρο κινητήρα σε σειρά, εκτίθενται στο ακόλουθο Σχήμα 5.20. Τα έξι μέγιστα και ελάχιστα ανά 120° περιστροφής της στροφαλοφόρου ατράκτου, υποδεικνύουν την ύπαρξη έξι κυλίνδρων στη μηχανή. Σε αυτή την περίπτωση, προκύπτουν:

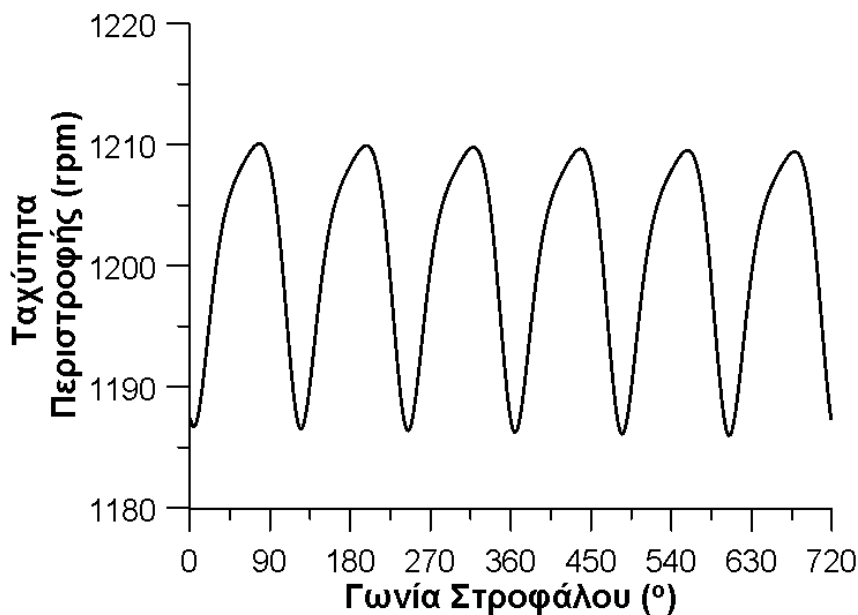
$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{mean}}} = 2,47$$

$$M_{\max} - M_{\min} = 2375,59 \text{ Nm}$$

Ο λόγος μέγιστης προς τη μέση ροπή του εξακύλινδρου κινητήρα είναι μικρότερος από το λόγο του τετρακύλινδρου, επομένως ο βαθμός ανομοιομορφίας αναμένεται να μειώνεται περαιτέρω.



Σχήμα 5.20 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών για εξακύλινδρο 4-Χ κινητήρα



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής για εξακύλινδρο 4-Χ κινητήρα

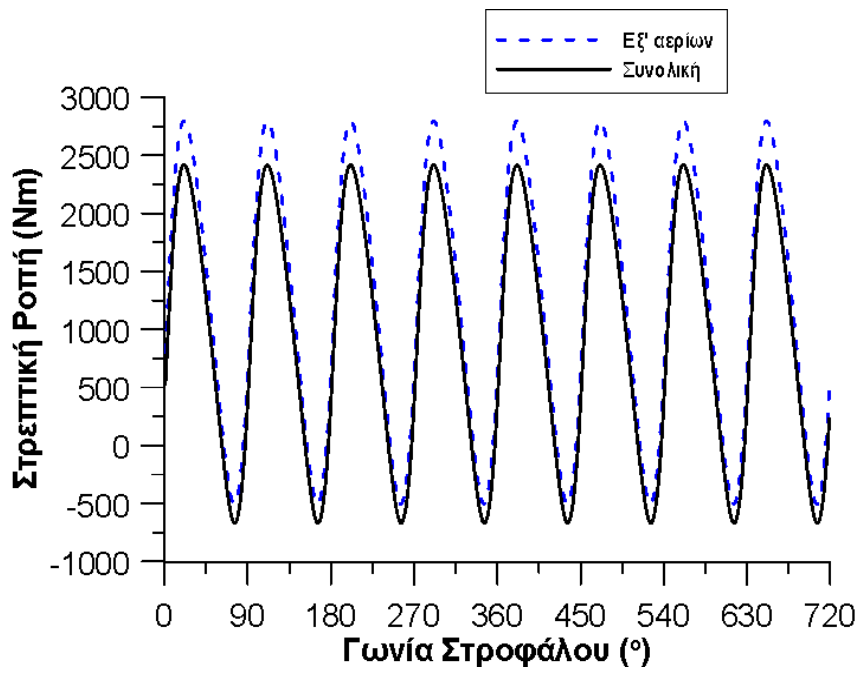
Πράγματι, προκύπτει βαθμός ανομοιομορφίας περιστροφής για τον εξακύλινδρο κινητήρα, από το Σχήμα 5.21 ως:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{126,66 - 124,133}{125,7} = 0,019.$$

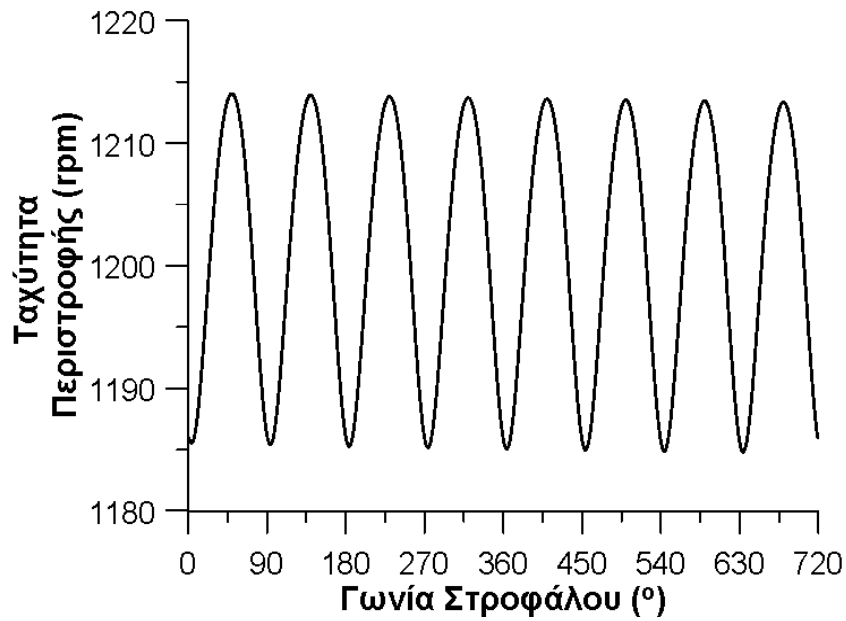
5.4.4. Οκτακύλινδρος 4-Χ κινητήρας διάταξης σειράς

Σε έναν οκτακύλινδρο κινητήρα με τους κυλίνδρους σε διάταξη σειράς και ισοδιαστήματα ανάφλεξης, η σειρά ανάφλεξης είναι 1-5-2-6-8-4-7-3, ενώ η διαφορά ανάφλεξης $\Delta\varphi_\alpha = \frac{720^\circ}{8} = 90^\circ$.

Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση, παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 5.22, 5.23):



Σχήμα 5.22 Διάγραμμα στρεπτικών ροπών για οκτακύλινδρο 4-Χ κινητήρα



Σχήμα 5.23 Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής για οκτακύλινδρο 4-Χ κινητήρα

Στον οκτακύλινδρο κινητήρα ισχύουν:

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{mean}}} = 2,59$$

$$M_{\max} - M_{\min} = 3087,7 \text{ Nm}$$

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις πολυκύλινδρων κινητήρων, στον οκτακύλινδρο κινητήρα (σειράς ή V90°), υπάρχει η *ιδιαιτερότητα*, ο λόγος μέγιστης προς μέση ροπή, καθώς και το μέγιστο εύρος ροπής, να είναι μεγαλύτερα από του εξακύλινδρου, παρ' όλο που τα διαστήματα ανάφλεξης μειώνονται. Συγκεκριμένα, ο βαθμός ανομοιομορφίας προκύπτει:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{127,07 - 124,006}{125,68} = 0,023$$

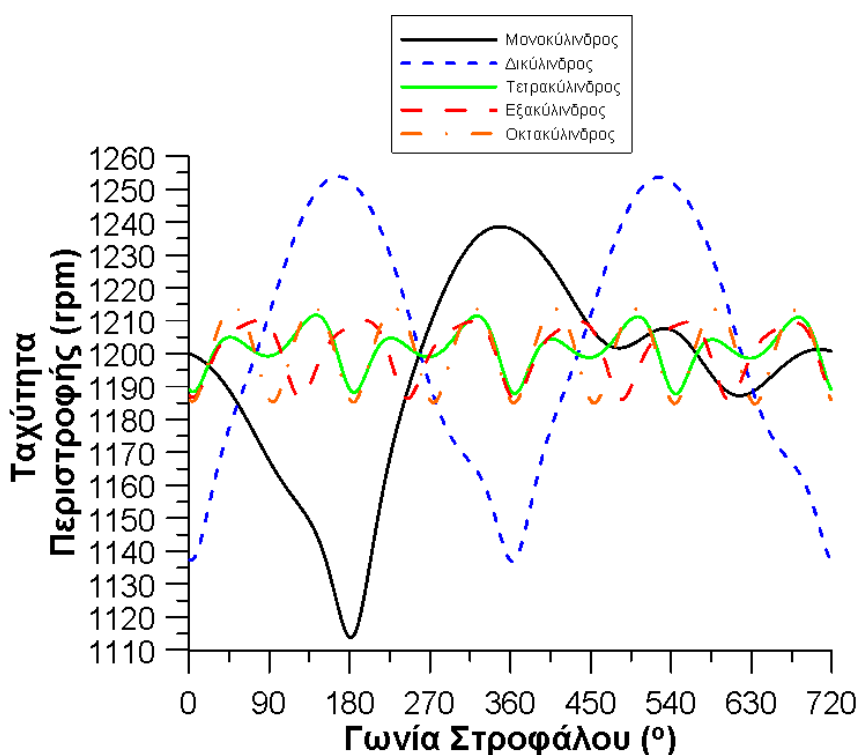
Ο Πίνακας 5.4 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα, **με τις ποσοστιαίες μεταβολές του δ , ως προς τον μονοκύλινδρο κινητήρα.**

ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ
Δικόλινδρος	-7,27%
Τετρακύλινδρος	-80,88%
Εξακύλινδρος	-81,84%
Οκτακύλινδρος	-78,01%

Πίνακας 5.4 Ποσοστιαία μεταβολή του βαθμού ανομοιομορφίας για πολυκύλινδρους κινητήρες συγκριτικά με την ονομαστική τιμή του μονοκύλινδρου κινητήρα

Ως σύνοψη αυτών που προηγήθηκαν, ακολουθεί στο Σχήμα 5.24 ένα κοινό διάγραμμα της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου, για όλα

τα είδη κινητήρων που εξετάστηκαν, με εμφανή τη μείωση των ακρότατων με την αύξηση του αριθμού των κυλίνδρων.

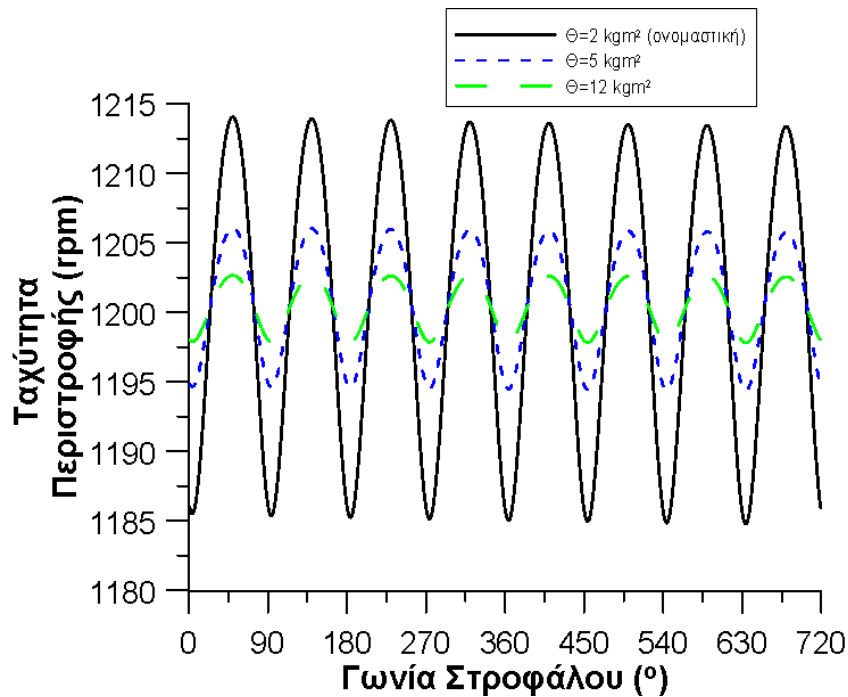


Σχήμα 5.24 Διαγράμματα διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής για κινητήρες με διαφορετικό αριθμό κυλίνδρων

Βάσει των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης για μονοκύλινδρο κινητήρα και των αποτελεσμάτων για τους πολυκύλινδρους, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μια μικρή επέκταση της ανάλυσης, στο συνδυασμό των δύο κυριότερων παραμέτρων που επιδρούν στο βαθμό ανομοιομορφίας.

Η παραμετροποίηση της συνολικής ροπής αδράνειας σε οκτακύλινδρο κινητήρα, αναμένεται να αποδείξει ότι η αύξηση μόνο δύο παραμέτρων από αυτές που μελετήθηκαν, μπορεί να ελαχιστοποιήσει το βαθμό ανομοιομορφίας περιστροφής. Η ροπή αδράνειας Θ θα λάβει επιπλέον τις δύο (μεγαλύτερες της ονομαστικής) τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανωτέρω παραμετρική ανάλυση, δηλαδή $\Theta=5 \text{ kgm}^2$ και $\Theta=12 \text{ kgm}^2$.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα για την ταχύτητα περιστροφής φαίνονται στο Σχήμα 5.25.



Σχήμα 5.25 Εξάρτηση διακύμανσης ταχύτητας περιστροφής από ροπή αδράνειας σε οκτακύλινδρο 4-Χ κινητήρα

Για $\Theta=5 \text{ kgm}^2$ έχουμε:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{126,23 - 125,009}{125,68} = 0,009$$

και για $\Theta=12 \text{ kgm}^2$:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{125,88 - 125,37}{125,65} = 0,004$$

Η τιμή αυτή του βαθμού ανομοιομορφίας, είναι κατά **82,61%** χαμηλότερη από την «ονομαστική» τιμή του για τον οκτακύλινδρο κινητήρα ($\delta=0,023$) και

γενικά «ιδανική» για ένα κινητήρα, ανάλογα με την εφαρμογή π.χ. για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ προφανώς είναι ακατάλληλη για εφαρμογές αυτοκίνησης όπου απαιτούνται άμεσες επιταχύνσεις, άρα μικρές αδρανειακές μάζες.

6. ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκε το φαινόμενο της ανομοιομορφίας περιστροφής στους εμβολοφόρους κινητήρες, που εμπίπτει στον τομέα της Κινηματικής και Δυναμικής λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Βασικός σκοπός ήταν να αναπτυχθεί αλγόριθμος, που θα υπολογίζει με αναλυτικό τρόπο το αδιάστατο μέγεθος που την εκφράζει, δηλαδή το βαθμό ανομοιομορφίας περιστροφής.

Αρχικά, στο Κεφάλαιο 1, έγινε αναφορά στις σχέσεις που διέπουν τον κινηματικό μηχανισμό μιας εμβολοφόρου μηχανής. Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 2, αναλύθηκαν διεξοδικά τα είδη των δυνάμεων του κινηματικού μηχανισμού, ο τρόπος που μεταβιβάζονται, καθώς και η «μετάφρασή» τους στη στρεπτική ροπή που παράγει ο κινητήρας.

Στο τελικό τμήμα της θεωρίας (Κεφάλαιο 3), αναπτύχθηκε η φυσική εξήγηση πίσω από το φαινόμενο της ανομοιομορφίας περιστροφής της ατράκτου. Φάνηκε πως ο κύριος παράγοντας που ευθύνεται, είναι η διαφορά στρεπτικής ροπής κινητήρα και ανθιστάμενης ροπής (φορτίου), η οποία προξενεί στιγμιαίες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις στη γωνιακή ταχύτητα της ατράκτου. Με άλλα λόγια, η έλλειψη και η περίσσεια ροπής σε σχέση με τη ροπή της αντίστασης στις διάφορες φάσεις ενός κύκλου λειτουργίας, αποτελούν την αιτία του φαινομένου που εξετάζουμε.

Το Κεφάλαιο 4, αφιερώθηκε στην ανάπτυξη αλγόριθμου για τον υπολογισμό του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής. Βάσει πειραματικών μετρήσεων της πίεσης αερίων εντός του κυλίνδρου (δυναμοδεικτικό διάγραμμα) σε τρία διαφορετικά φορτία ενός «μονοκύλινδρου» κινητήρα με συγκεκριμένα (ονομαστικά γεωμετρικά και άλλα, π.χ. μάζες) μεγέθη, προσδιορίστηκε κατ'

αρχήν, ο βαθμός ανομοιομορφίας του σε φορτίο 50%. Παρουσιάστηκαν επιπλέον τα διαγράμματα όλων των ειδών των ροπών του.

Το εκτενέστερο κομμάτι της μελέτης, αποτέλεσε η παραμετρική ανάλυση του μονοκύλινδρου κινητήρα στο Κεφάλαιο 5. Υπολογίστηκε ο βαθμός ανομοιομορφίας περιστροφής, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων του κινητήρα οι τιμές των οποίων ήταν μεταβλητές, ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή τους ή μη στην ανομοιομορφία της ταχύτητας.

Από την παραμετρική αυτή ανάλυση, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η συνολική παλινδρομούσα μάζα **δεν** αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επιδρά στο βαθμό ανομοιομορφίας.
- Η συνολική ροπή αδράνειας του συστήματος, είναι ίσως **ο πιο καθοριστικός παράγοντας** αντιμετώπισης της ανομοιομορφίας. Μικρή αύξηση της ροπής αδράνειας, ισοδυναμεί με αξιοσημείωτο περιορισμό της ανομοιομορφίας περιστροφής.
- Η αλλαγή του γεωμετρικού λόγου $\lambda = \frac{r}{\ell}$ του κινητήρα, **δεν** έχει καμία πρακτική επίδραση στη μεταβολή της ταχύτητας. Άρα, λοιπόν, η ταχύτητα περιστροφής σε κάθε στιγμή ενός κύκλου λειτουργίας, παραμένει ανεξάρτητη του μήκους του διωστήρα (για σταθερό r), το οποίο μπορεί να διαφέρει ανάμεσα σε διαφορετικές μηχανές.
- Η αύξηση των στροφών του κινητήρα, προκαλεί σημαντική μείωση του βαθμού ανομοιομορφίας περιστροφής του.
- Οι αλλαγές στο φορτίο του κινητήρα, είναι επίσης **κρίσιμος** παράγοντας. Υψηλά φορτία, συνεπάγονται και αρκετά μεγαλύτερη ανομοιομορφία, λόγω πολύ μεγαλύτερης συνεισφοράς των όρων εξ' αερίων.
- Επίσης, η αλλαγή του είδους του φορτίου από παραβολικό, είτε σε σταθερό, είτε σε γραμμικό, επιδρά αμελητέα στην τιμή του βαθμού ανομοιομορφίας.
- Τέλος, ο αριθμός των κυλίνδρων ενός κινητήρα, επηρεάζει **σημαντικά** την ανομοιομορφία περιστροφής, μια και η ύπαρξη περισσότερων της

μίας διεργασιών εντός 720° , οδηγεί σε πιο ομοιόμορφο διάγραμμα ροπής (με μικρότερα ακρότατα), άρα και σε πιο ομαλή διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής, και τελικά σε μικρότερη ανομοιομορφία περιστροφής.

Από τη συνολική παραμετρική ανάλυση προέκυψε λοιπόν, πως η μεγαλύτερη ροπή αδράνειας και το πιο ομοιόμορφο διάγραμμα ροπής, δηλαδή η ύπαρξη περισσότερων κυλίνδρων, επηρεάζουν καθοριστικά την ανομοιομορφία στην περιστροφή της ατράκτου ενός εμβολοφόρου κινητήρα. Μάλιστα, ο συνδυασμός υψηλής ροπής αδράνειας και μεγάλου αριθμού κυλίνδρων, τείνει να εξομαλύνει πλήρως το διάγραμμα της ταχύτητας περιστροφής περί τη μέση τιμή της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κ. Δ. Ρακόπουλος, «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα, 1988.
- 2) Κ. Δ. Ρακόπουλος, «Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα, 2000.
- 3) Δ. Κατσικαδάκος, «Μελέτη δυναμικής στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα diesel», Διπλωματική εργασία (Επιβλ. Καθηγητής: Ε.Γ. Γιακουμής), ΕΜΠ, 2007.
- 4) Η. Δόδουλας, «Μελέτη στρεπτικών παραμορφώσεων στροφαλοφόρου ατράκτου κινητήρα diesel», Διπλωματική εργασία (Επιβλ. Καθηγητής: Ε.Γ. Γιακουμής), ΕΜΠ, 2009.
- 5) Χ. Ομήρου, «Υπολογισμός μηχανικών απωλειών κινητήρα Diesel με χρήση πειραματικών δεδομένων», Διπλωματική εργασία (Επιβλ. Καθηγητής: Ε.Γ. Γιακουμής), ΕΜΠ, 2011.
- 6) Ε. Γιακουμής, Σημειώσεις παραδόσεων μαθήματος ΜΕΚ II στο Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2005-2015.

- 7) David Crolla, Behrooz Mashadi, «Vehicle Powertrain Systems – Integration and Optimization», Wiley, 2012.
- 8) Rolf Isermann, «Engine Modelling and Control», Springer, 2014.
- 9) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, «Diesel Engine Transient Operation», Springer, London, 2009.