



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας

Διπλωματική Εργασία

Ζυγοστάθμιση κινητήρων διάταξης σειράς μέσω υπολογιστικής
ανάλυσης (Fortran)



Καραταράκης Ζαχαρίας

Επιβλέπων καθηγητής : Ε. Γ. Γιακουμής , Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία ασχολείται με ένα από τα πιο σημαντικά θέματα της δυναμικής των Μ.Ε.Κ., τον υπολογισμό και την αντιμετώπιση των αδρανειακών δυνάμεων και ροπών. Αναφερόμαστε δηλαδή, πιο συγκεκριμένα, στην ανάλυση της ζυγοστάθμισης (ή αντιστάθμισης) δίχρονων (2-Χ) και τετράχρονων (4-Χ) κινητήρων, εν-σειρά διάταξης, με στόχο να εξεταστεί η παρουσία αδρανειακών δυνάμεων και ροπών στους κινητήρες καθώς και οι τρόποι εξουδετέρωσής τους, ώστε η μηχανή να έχει όσο το δυνατόν μικρότερες καταπονήσεις και κραδασμούς. Σκοπός της αναφερθείσας ανάλυσης είναι να δημιουργηθεί υπολογιστικό πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού το οποίο θα πραγματοποιεί τον υπολογισμό των παραμενουσών δυνάμεων και ροπών στα αναφερθέντα ήδη κινητήρων. Παρατίθεται η σχετική και απαραίτητη θεωρία και παρουσιάζεται ο συλλογισμός υπολογισμού καθώς βεβαίως και το πρόγραμμα. Τέλος παρατίθενται παραδείγματα για κάποια ήδη κινητήρων από τα αναφερθέντα και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με σχολιασμούς και συμπεράσματα.

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή, στο 1^ο Κεφάλαιο, και παρουσίαση κάποιων βασικών στοιχείων δυναμικής του κινηματικού μηχανισμού και συνεχίζοντας, στο 2^ο Κεφάλαιο, καταγράφονται και παρουσιάζονται οι δυνάμεις του κινηματικού μηχανισμού (εξ αερίων, μαζικές και καθώς επίσης και η επαλληλία αυτών). Τα δύο αυτά κεφάλαια προέρχονται από το βιβλίο «Μ.Ε.Κ. ΙΙ – εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία» (Εκδόσεις Γρηγ. Φούντας) Κ. Δ. Ρακόπουλου, καθηγητή Ε.Μ.Π. Έπειτα, στο 3^ο Κεφάλαιο, γίνεται μία εισαγωγή περί αδρανειακών δυνάμεων/ροπών και των προβλημάτων που αυτές δημιουργούν, και ακολουθεί, στο 4^ο Κεφάλαιο, η ανάλυση των παραμενουσών δυνάμεων του μονοκύλινδρου κινητήρα. Τα κεφάλαια 3 και 4 προέρχονται από το βιβλίο «Ζυγοστάθμιση Παλινδρομικών Εμβολοφόρων Κινητήρων» του Ευάγγελου Γ. Γιακουμή, αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π. Στη συνέχεια, στο 5^ο

και 6^ο Κεφάλαιο, ακολουθεί ο συλλογισμός και η παρουσίαση του προγράμματος που δημιουργήθηκε με σκοπό τον υπολογισμό των παραπάνω παραμενουσών δυνάμεων/ροπών, καθώς επίσης και κάποια επιλεκτικά παραδείγματα πολυκύλινδρων κινητήρων (2-X και 4-X) που είχαν αναλυθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [4]. Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα από τη μελέτη των παραμενουσών δυνάμεων/ροπών και τις μεθόδους ζυγοστάθμισης σε εμβολοφόρους κινητήρες διάταξης σειράς, καθώς δεν μελετήθηκαν άλλες διατάξεις επί της παρούσας εργασίας.

Επιπρόσθετα δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον κ. Ε. Γιακουμή για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κ. Ρακόπουλο και τον καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συν-διδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την κοπέλα μου για την άπλετη συμπαράσταση και καθοδήγησή τους σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Περιεχόμενα

Πίνακας Συμβόλων.....	5
1. Στοιχεία Δυναμικής του Κινηματικού Μηχανισμού.....	8
1.1 Μετατόπιση του Εμβόλου.....	8
1.2 Ταχύτητα του Εμβόλου.....	11
1.3 Επιτάχυνση του Εμβόλου.....	11
1.4 Αναγωγή του Διωστήρα σε δύο Μάζες.....	12
2. Δυνάμεις του Κινηματικού Μηχανισμού.....	15
2.1 Δυνάμεις από Αέρια.....	15
2.2 Μαζικές Δυνάμεις.....	18
2.2.1 Παλινδρομικές Μαζικές Δυνάμεις.....	19
2.2.2 Περιστροφικές Μαζικές Δυνάμεις.....	20
2.3 Επαλληλία Δυνάμεων από Αέρια και Μαζικών Δυνάμεων.....	21
3. Γενικά περί Ζυγοστάθμισης.....	22
4. Αρχές Ζυγοστάθμισης Εμβολοφόρων Κινητήρων & Πρόγραμμα Υπολογισμού.....	27
4.1 Περιστροφική Δύναμη.....	27
4.2 Παλινδρομική Δύναμη.....	29
4.2.1 Παλινδρομική Δύναμη 1 ^{ης} Τάξης.....	32
4.2.2 Παλινδρομική Δύναμη 2 ^{ης} Τάξης.....	34
4.3 Ζυγοστάθμιση Πολυκύλινδρων Κινητήρων εν-σειρά Διάταξης.....	37
4.4 Πρόγραμμα Υπολογιστικής Ανάλυσης.....	39

5. Ζυγοστάθμιση Δίχρονων Κινητήρων.....	40
5.1 3-Κύλινδρος 2-Χ Κινητήρας.....	40
5.2 4-Κύλινδρος 2-Χ Κινητήρας.....	46
5.3 5-Κύλινδρος 2-Χ Κινητήρας.....	50
5.4 7-Κύλινδρος 2-Χ Κινητήρας.....	54
5.5 9-Κύλινδρος 2-Χ Κινητήρας.....	58
5.6 12-Κύλινδρος 2-Χ Κινητήρας.....	62
6. Ζυγοστάθμιση Τετράχρονων Κινητήρων.....	66
6.1 3-Κύλινδρος 4-Χ Κινητήρας.....	66
6.2 4-Κύλινδρος 4-Χ Κινητήρας.....	71
6.3 6-Κύλινδρος 4-Χ Κινητήρας.....	75
6.4 8-Κύλινδρος 4-Χ Κινητήρας.....	79
6.5 9-Κύλινδρος 4-Χ Κινητήρας.....	83
6.6 10-Κύλινδρος 4-Χ Κινητήρας.....	87
7. Συμπεράσματα.....	91
Βιβλιογραφία.....	93

Πίνακας Συμβόλων

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
b	Επιτάχυνση εμβόλου	m/s^2
c	Ταχύτητα εμβόλου	m/s
D	Διάμετρος εμβόλου	m
d	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κυλίνδρων	m
F	Επιφάνεια εμβόλου	m^2
l, ℓ	Μήκος διωστήρα	m
L^{α}	Απόσταση αντιβάρων για αντιστάθμιση ροπών και δυνάμεων 1 ^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες	m
L^{β}	Απόσταση αντιβάρων για αντιστάθμιση ροπών και δυνάμεων 2 ^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες	m
L^{Γ}	Απόσταση αντιβάρων για αντιστάθμιση ροπών από περιστρεφόμενες μάζες	m
m	Μάζα	kg
m_{δ}	Μάζα διωστήρα	kg
$m_{\delta\ell}$	Παλινδρομούσα μάζα διωστήρα	kg
$m_{\delta r}$	Περιστρεφόμενη μάζα διωστήρα	kg
m_{ϵ}	Μάζα εμβόλου	kg
m_{γ}	Συνολική παλινδρομούσα μάζα	kg
m_{Γ}	Συνολική περιστρεφόμενη μάζα	kg
m_o	Πραγματική μάζα στροφάλου	kg
M	Ροπή	Nm

M_a	Ροπή ανατροπής	Nm
P	Δύναμη	N
P_g	Δύναμη εξ αερίων	N
P_ℓ	Δύναμη από παλινδρομούσες μάζες	N
P_r	Δύναμη από περιστρεφόμενες μάζες	N
p	Πίεση αερίου	bar
r	Ακτίνα τροφάλου	m
r_o	Απόσταση Κ.Β. τροφάλου από άξονα περιστροφής του	m
r^a	Απόσταση από τον άξονα περιστροφής για αντιστάθμιση δυνάμεων 1 ^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες	m
r^b	Απόσταση από τον άξονα περιστροφής για αντιστάθμιση δυνάμεων 2 ^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες	m
R	Συνισταμένη δύναμη	N
s	Διαδρομή εμβόλου	m
S	Δύναμη διωστήρα	N
T	Στρεπτική δύναμη	N
V	Συνολικός όγκος εμβολισμού	m ³
V_h	Όγκος εμβολισμού (κυλίνδρου)	m ³
V_c	Επιζήμιος όγκος	m ³
x	Μετατόπιση εμβόλου	m
z	Αριθμός κυλίνδρων	
Ελληνικά σύμβολα		
β, γ	Γωνίες διωστήρα	°
ϵ	Γωνία σφήνωσης τροφάλων	°
Θ_δ	Ροπή αδράνειας του διωστήρα	kgm ²
λ	Λόγος r/ℓ	
φ	Γωνία τροφάλου	°
ω	Γωνιακή ταχύτητα	rad/s

Συντομογραφίες	
2-X	Δίχρονος κινητήρας
4-X	Τετράχρονος κινητήρας
ΑΝΣ	Άνω νεκρό σημείο
Κ.Β.	Κέντρο βάρους
ΚΝΣ	Κάτω νεκρό σημείο
Μ.Ε.Κ.	Μηχανή εσωτερικής καύσης
Σ.Α.	Σειρά ανάφλεξης
Δείκτες	
g	Εξ αερίων
ℓ	Παλινδρομική
r	Περιστροφική
I	1 ^{ης} τάξης (παλινδρομούσες μάζες)
II	2 ^{ης} τάξης (παλινδρομούσες μάζες)

1. Στοιχεία Δυναμικής

Κινηματικού Μηχανισμού

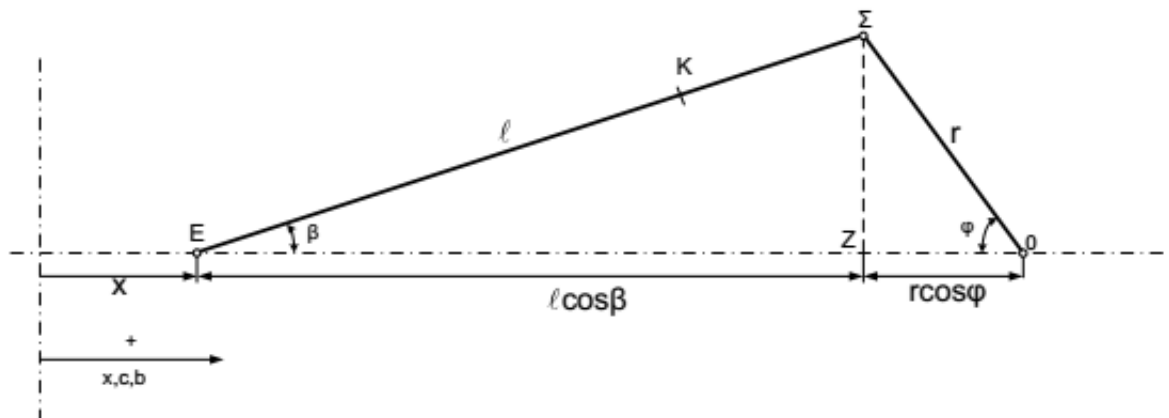
1.1 Μετατόπιση του εμβόλου

Για την τυχαία θέση του στροφάλου, που καθορίζεται από την σχετική γωνία φ , η μετατόπιση του εμβόλου x από το ΑΝΣ, σύμφωνα με το σχήμα 1.1, είναι :

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

Όπου β είναι η γωνία του διωστήρα, r η ακτίνα του στροφάλου και l το μήκος του διωστήρα. Από τα ορθογώνια τρίγωνα ΕΣΖ και ΟΣΖ παίρνουμε :

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



Σχήμα 1.1 Κινηματικός Μηχανισμός Εμβόλου-Διωστήρα-Στροφάλου [4]

Οπότε θέτοντας $\lambda = \frac{r}{l}$ και εκφράζοντας το $\cos \beta$ συναρτήσει του $\sin \beta$ παίρνουμε :

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

Το μέγεθος $\lambda = \frac{r}{l}$ αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της δυναμικής του κινηματικού μηχανισμού των εμβολοφόρων κινητήρων, με συνήθεις τιμές μεταξύ 1/5 και 1/3. Έτσι η ακριβής έκφραση για τη μετατόπιση x είναι :

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

Εφόσον $\lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi < 1$, το υπόρριζο στην προηγούμενη έκφραση, δηλαδή το $\cos \beta$, μπορεί να αναπτυχθεί, σύμφωνα με το θεώρημα του διωνύμου, σε σειρά με ισχυρή σύγκλιση, ως εξής :

$$\cos \beta = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \varphi + \frac{1}{8} \lambda^4 \sin^4 \varphi - \frac{1}{16} \lambda^6 \sin^6 \varphi + \frac{5}{128} \lambda^8 \sin^8 \varphi - \dots \quad (1.5)$$

Τα $\sin^m \varphi$ (όπου $m = \text{άρτιος}$) μπορεί να εκφραστούν συναρτήσει όρων συνημιτονικών, γωνίας πολλαπλασίου της φ , ως εξής :

$$\sin^2 \varphi = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\varphi$$

$$\sin^4 \varphi = \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2\varphi + \frac{1}{8} \cos 4\varphi$$

$$\sin^6 \varphi = \frac{5}{16} - \frac{15}{32} \cos 2\varphi + \frac{3}{16} \cos 4\varphi - \frac{1}{32} \cos 6\varphi, \quad \text{κλπ.}$$

Έτσι λοιπόν η έκφραση (1.4) μετασχηματίζεται στην :

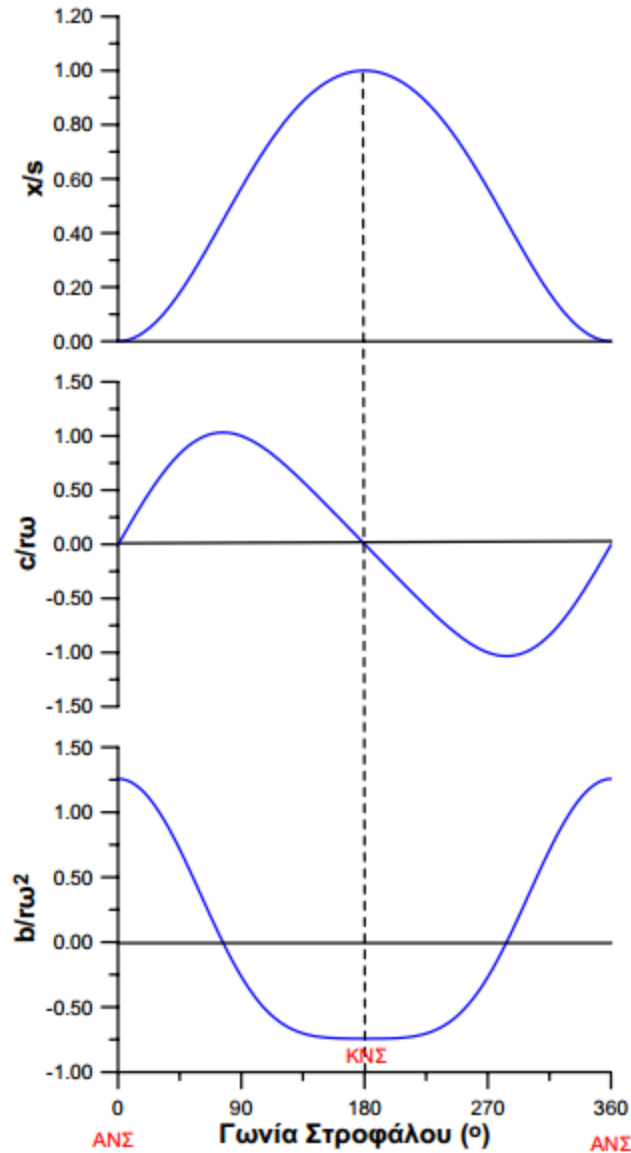
$$x = r(\alpha_0 + \alpha_1 \cos \varphi + \alpha_2 \cos 2\varphi + \alpha_4 \cos 4\varphi + \dots) \quad (1.6)$$

$$\text{Όπου : } \alpha_0 = 1 + \frac{\lambda}{4} + \frac{3\lambda^3}{64} + \frac{5\lambda^5}{256}, \quad \alpha_1 = -1, \quad \alpha_2 = -\frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda^3}{16} - \frac{15\lambda^5}{512}, \quad \alpha_4 = \frac{\lambda^3}{64} + \frac{3\lambda^5}{256},$$

$$\alpha_6 = -\frac{\lambda^5}{512} \quad \text{κλπ.}$$

Από τις σχέσεις αυτές φαίνεται ότι $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_4 + \alpha_6 + \dots = 0$, όπως έπρεπε για να ισχύει $x=0$ στη γωνία $\varphi=0$ ($\cos 0^\circ = 1$).

Έτσι το x , που είναι περιοδική συνάρτηση με συχνότητα την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, στη σχέση (1.6) δίνεται αναπτυγμένο σε σειρά Fourier που αποτελείται από ένα σταθερό όρο και το άθροισμα απείρων αρμονικών συνιστωσών (και μάλιστα μόνο συνημιτονικών) τάξεως $1^{\text{ης}}$, $2^{\text{ης}}$, $4^{\text{ης}}$, $6^{\text{ης}}$, $8^{\text{ης}}$, κλπ.



Σχήμα 1.2 Τυπική μορφή μετατοπίσεως, ταχύτητας και επιταχύνσεως εμβόλου.[2]

Ο δεύτερος όρος, $a_1 \cos \varphi = -\cos \varphi$, στη σχέση (1.6) δίνει την προβολή της ακτίνας του στροφάλου κατά τον άξονα του κυλίνδρου, ενώ οι υπόλοιποι όροι είναι συνάρτηση του λ και οφείλονται στη γωνιακότητα του διωστήρα. Παραλείποντας τους όρους λ^3 τάξεως και μεγαλύτερης (εφόσον $1/5 < \lambda < 1/3$ συνήθως) από τη σχέση (1.6), προκύπτει η προσεγγιστική αλλά χρήσιμη σχέση :

$$x \cong r \left(1 + \frac{\lambda}{4} - \cos \varphi - \frac{\lambda}{4} \cos 2\varphi \right) \quad (1.7)$$

1.2 Ταχύτητα του εμβόλου

Η ταχύτητα του εμβόλου c προκύπτει με παραγώγιση ως προς το χρόνο της διαδρομής του εμβόλου :

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.8)$$

Με την προϋπόθεση ότι το στρόφαλο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα $d\varphi/dt = \omega$ (δηλαδή $\varphi = \omega t$), $c = \omega(dx/d\varphi)$. Έτσι η ακριβής τιμή της ταχύτητας που προκύπτει από την εξίσωση (1.4) είναι :

$$c = \omega r \sin \varphi \cdot \left(1 + \frac{\lambda \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \right) \quad (1.9)$$

Ενώ από την (1.6) είναι ,

$$c = \omega r (\gamma_1 \sin \varphi + \gamma_2 \sin 2\varphi + \gamma_4 \sin 4\varphi + \dots) \quad (1.10)$$

Όπου, $\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda^3}{8} - \frac{15\lambda^5}{256}$, $\gamma_4 = -\frac{\lambda^3}{16} - \frac{3\lambda^5}{64}$, $\gamma_6 = \frac{3\lambda^5}{256}$ κλπ.

Η σχέση (1.10) δίνει το c αναπτυγμένο σε σειρά Fourier, που αποτελείται από το άθροισμα απείρων αρμονικών συνιστωσών (και μάλιστα μόνο ημιτονικών) τάξεως 1^{ης}, 2^{ης}, 4^{ης}, 6^{ης}, 8^{ης}, κλπ.

Η φορά αναφοράς της ταχύτητας c λαμβάνεται θετική όταν κατευθύνεται από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ. Γραφική παράσταση της ανηγμένης ταχύτητας $c/r\omega$ δίνεται στο Σχήμα 1.2.

Προσεγγιστική αλλά χρήσιμη για το c , αντίστοιχη της (1.7) σχέσης, είναι η :

$$c \cong \omega r \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \quad (1.11)$$

1.3 Επιτάχυνση του εμβόλου

Η επιτάχυνση του εμβόλου b προκύπτει ομοίως με παραγώγιση ως προς τον χρόνο της ταχύτητας του εμβόλου :

$$b = \frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.12)$$

Πάλι με την προϋπόθεση ότι το στρόφαλο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα $d\varphi/dt = \omega = \text{σταθερό}$, βρίσκεται η ακριβής τιμή της επιτάχυνσης, που προκύπτει από την εξίσωση (1.9) ως :

$$b = \omega^2 r \left(\cos \varphi + \lambda \frac{\cos 2\varphi + \lambda^2 \sin^4 \varphi}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \right) \quad (1.13)$$

Ενώ από την (1.10) προκύπτει :

$$b = \omega^2 r (\beta_1 \cos \varphi + \beta_2 \cos 2\varphi + \beta_4 \cos 4\varphi + \dots) \quad (1.14)$$

Όπου, $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = \lambda - \frac{\lambda^3}{4} - \frac{15\lambda^5}{128}$, $\beta_4 = -\frac{\lambda^3}{4} - \frac{3\lambda^5}{16}$, $\beta_6 = \frac{9\lambda^5}{128}$ κλπ.

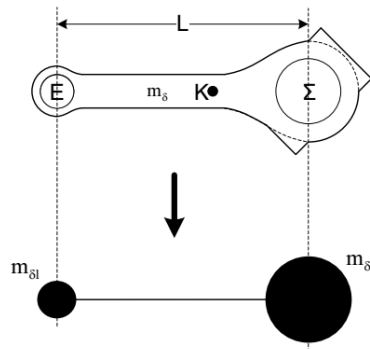
Η σχέση (1.14) δίνει το b αναπτυγμένο σε σειρά Fourier, που αποτελείται από το άθροισμα απείρων αρμονικών συνιστωσών (και μάλιστα μόνο συνημιτονικών) τάξεως $1^{\text{ης}}$, $2^{\text{ης}}$, $4^{\text{ης}}$, $6^{\text{ης}}$, $8^{\text{ης}}$, κλπ. Η φορά αναφοράς της επιτάχυνσης b λαμβάνεται θετική όταν κατευθύνεται από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ. Γραφική παράσταση της ανηγμένης ταχύτητας $b/r\omega^2$ δίνεται στο Σχήμα 1.2.

Προσεγγιστική αλλά πολύ χρήσιμη σχέση για το b , αντίστοιχη των (1.7) και (1.11), είναι η :

$$b \cong r\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) \quad (1.15)$$

Η σχέση αυτή περιέχει μόνο τους όρους $1^{\text{ης}}$ και $2^{\text{ης}}$ τάξης και αρκεί συνήθως για τις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές.

1.4 Αναγωγή του διωστήρα σε δύο μάζες



Σχήμα 1.3 Αναγωγή του Διωστήρα σε δύο μάζες [4].

Ο διωστήρας εκτελεί επίπεδη κίνηση και είναι γνωστή η κινηματική κατάσταση δύο μόνο σημείων του, του Ε και του Σ. Το Ε έχει την ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου, ενώ το Σ διαγράφει κυκλική τροχιά ακτίνας r.

Ο καθορισμός των λεγόμενων δυνάμεων αδρανείας του διωστήρα είναι πολύ δύσκολος, και τούτο οφείλεται στη σύνθετη κίνηση των διαφόρων σημείων αυτού (εκτός των σημείων Ε και Σ) και στο ότι απαιτείται η γνώση της κατανομής της μάζας του με συνολική τιμή m_δ . Έτσι αναζητείται ένα δυναμικά ισοδύναμο σύστημα, που έχει δύο μόνο μάζες $m_{\delta l}$ και $m_{\delta r}$ συγκεντρωμένες στα σημεία Ε και Σ, αντίστοιχα (με γνωστή κίνηση όπως αναφέρθηκε ανωτέρω), συνδεδεμένες στερεά μεταξύ τους με αμφιαρθρωτή ράβδο, η οποία μεταβιβάζει δυνάμεις μόνο κατά τον άξονά της.

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

- Η μάζα του να ισούται προς τη μάζα του διωστήρα.
- Το κέντρο βάρους του να συμπίπτει με το κέντρο βάρους του διωστήρα Κ.
- Η ροπή αδρανείας του ως προς άξονα διερχόμενο από το Κ.Β. και καθέτου στο επίπεδο της κινήσεως να ισούται προς την αντίστοιχη ροπή αδρανείας του διωστήρα Θ_δ .

Οι παραπάνω συνθήκες εκφράζονται μαθηματικά ως εξής :

$$m_{\delta l} + m_{\delta r} = m_\delta \quad (1.16)$$

$$m_{\delta l} \cdot (EK) - m_{\delta r} \cdot (\Sigma K) = 0 \quad (1.17)$$

$$m_{\delta l} \cdot (EK)^2 + m_{\delta r} \cdot (\Sigma K)^2 = \Theta_\delta \quad (1.18)$$

Αμέσως φαίνεται ότι η επίλυση των δύο πρώτων εξισώσεων προσδιορίζει τα $m_{\delta l}$ και $m_{\delta r}$, που εν γένει δεν θα ικανοποιούν και την τρίτη. Έτσι δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί πλήρης ισοδυναμία. Το δια των δύο πρώτων εξισώσεων καθοριζόμενο “ισοδύναμο” σύστημα θα έχει ροπή αδρανείας :

$$\Theta_\delta^* = m_{\delta l} \cdot (EK)^2 + m_{\delta r} \cdot (\Sigma K)^2 \quad (1.19)$$

που θα είναι εν γένει διάφορη του Θ_δ .

Ωστόσο, στις τεχνικές εφαρμογές λαμβάνεται συνήθως σαν ισοδύναμο σύστημα του διωστήρα το ανωτέρω καθορισθέν “ισοδύναμο” σύστημα των δύο μαζών $m_{\delta l}$, $m_{\delta r}$ (συγκεντρωμένων στα σημεία Ε και Σ, στερεά συνδεδεμένων μεταξύ τους με αβαρή ράβδο), που προσδιορίζεται από τις δύο πρώτες σχέσεις. Δηλαδή από τις :

$$m_{\delta l} + m_{\delta r} = m_{\delta} \quad \text{και} \quad m_{\delta l} \cdot (EK) - m_{\delta r} \cdot (\Sigma K) = 0$$

Το σφάλμα που γίνεται με τον τρόπο αυτόν είναι εν γένει αμελητέο, για εφαρμογές της τεχνικής πράξεως.

2. Δυνάμεις Κινηματικού Μηχανισμού

2.1 Δυνάμεις από αέρια

Η πίεση των αερίων μέσα στον κύλινδρο μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ μεταβάλλεται σε πλατιά όρια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας. Η ελάχιστη τιμή της είναι περίπου η ατμοσφαιρική ή η πίεση υπερπληρώσεως (σε υπερπληρωμένο κινητήρα), ενώ η μέγιστη είναι περίπου 40 έως 70 φορές μεγαλύτερη της πρώτης.

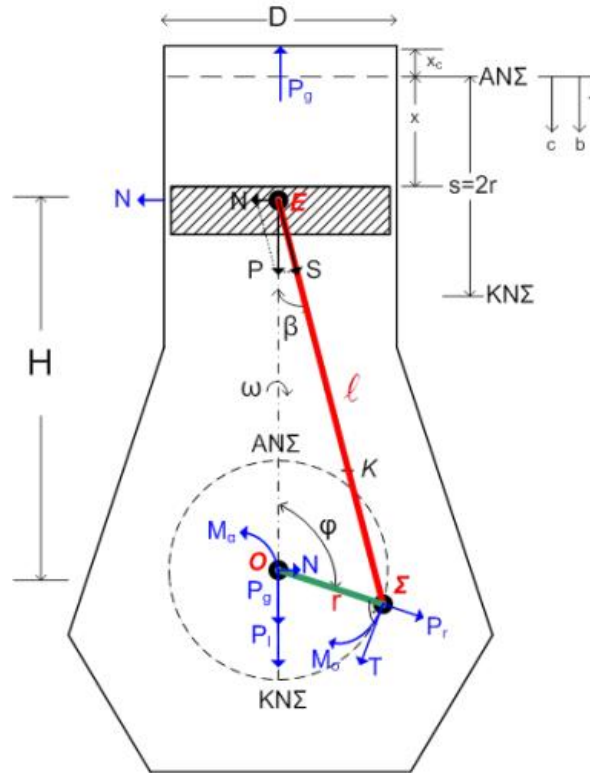
Το Δυναμοδεικτικό Διάγραμμα του κινητήρα (λαμβανόμενο με μέτρηση) δίνει την τιμή της πίεσεως p_g από αέρια, σε κάθε θέση του εμβόλου x (διάγραμμα $p_g - x$) και επομένως και για κάθε συνολικό όγκο $V = V_c + Fx$ (όπου V_c ο επιζήμιος όγκος και $F = \pi D^2/4$ η επιφάνεια του εμβόλου), ή σε κάθε γωνία στροφάλου φ (διάγραμμα $p - \varphi$ ή $p - t$, εφόσον $\varphi = \omega t$ για $\omega = \text{const}$).

Τα αέρια λόγω της πίεσεως 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 ίση με μηδέν).

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

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



Σχήμα 2.1 Δυνάμεις κινηματικού μηχανισμού [4]

Σαν p_g λαμβάνεται κατά κανόνα η μαομετρική πίεση (για κινητήρες απλής ενέργειας), διότι στην κάτω πλευρά του εμβόλου εξασκείται η πίεση της ατμόσφαιρας (στροφαλοθάλαμος).

Την P_g παραλαμβάνει το τοίχωμα του κυλίνδρου μέσω του εμβόλου (δύναμη N κάθετη στο τοίχωμα) και ο διωστήρας (δύναμη S), ο οποίος μπορεί να μεταβιβάξει δύναμη μόνο κατά τον άξονά του (θεωρείται ως αβαρή ράβδος, αμφιαρθρωτή κατά τα δύο άκρα της προς το έμβολο και το στρόφαλο). Έτσι η επί του εμβόλου δύναμη P_g αναλύεται στις ακόλουθες δύο συνιστώσες :

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

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

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

Η S_g μπορεί να αναλυθεί στο σημείο Σ σε δύο συνιστώσες T_g και R_g (Σχήμα 2.1) που ονομάζονται, αντίστοιχα, στρεπτική δύναμη στροφάλου (κάθετη πάντοτε στο στροφάλο) και ακτινική δύναμη στροφάλου (κατά τη διεύθυνση της ακτίνας του στροφάλου). Με βάσει το Σχήμα 2.1, οι εκφράσεις των T_g και R_g είναι :

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

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

(σημειώνουμε ότι η $\varphi + \beta$ είναι εξωτερική γωνία Σ στο τρίγωνο ΕΣΟ)

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

Από την προηγούμενη ανάλυση φαίνεται, ότι το τελικό αποτέλεσμα της δράσεως της πίεσεως των αερίων, επάνω στο κέλυφος της μηχανής, είναι η εξάσκηση των εξής δυνάμεων :

- Της P_g στο κάλυμμα της μηχανής (απευθείας).
- Της N_g στο τοίχωμα του κυλίνδρου.
- Της S_g στο έδρανο βάσεως 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 $M_{\alpha g}$. Αυτή τείνει να ανατρέψει τη μηχανή και αποτελεί τη μόνη δράση της πίεσεως των αερίων στο κέλυφος, μεταβιβαζόμενη και στη θεμελίωση. Η τιμή της ροπής αυτής βρίσκεται ευχερώς με εφαρμογή του νόμου των ημιτόνων στο τρίγωνο ΟΕΣ (Σχήμα 2.1), οπότε παίρνουμε :

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

η οποία με βάσει τις σχέσεις (2.2) και (2.3) καταλήγει στην :

$$M_{\alpha g} = N_g H = -M_{\sigma g} \quad (2.7)$$

Η σχέση (2.7) δείχνει ότι η ροπή ανατροπής (σε κάθε χρονική στιγμή) είναι ίση κατά μέτρο με τη στρεπτική ροπή, με φορά όμως αντίθετη. Αυτό το αποτέλεσμα έπρεπε να αναμένεται και απευθείας, εφόσον το τελικό αποτέλεσμα της δράσεως της πίεσεως των αερίων επάνω στη στροφαλοφόρο άτρακτο είναι η στρεπτική ροπή $M_{\sigma g}$, όπως τη δίνει η σχέση (2.6), στην οποία καταλήξαμε ακολουθώντας την “πορεία” της P_g δια του κινηματικού μηχανισμού.

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 ανήκουν οι μάζες του εμβόλου και των στοιχείων που παλινδρομούν μαζί του (ελατήρια στεγανότητας και λιπάνσεως, πείρος του εμβόλου, ενδεχομένως δε το ζύγωμα και το βάκτρο κλπ.). Το σύνολο των μαζών αυτών συμβολίζεται με m_ε .

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

Στην Τρίτη κατηγορία ανήκει η συνολική μάζα του διωστήρα m_δ . Σύμφωνα με τα αναπτυχθέντα στην παράγραφο 1.4, ο διωστήρας μπορεί να αντικατασταθεί από ένα σύστημα δύο μαζών $m_{\delta l}$ και $m_{\delta r}$ συγκεντρωμένων αντίστοιχα στις δύο αρθρώσεις αυτού E (με το έμβολο) και Σ (με το στρόφαλο), συνδεδεμένων στερεά μεταξύ των και υπολογιζόμενων από τις σχέσεις :

$$m_{\delta l} + m_{\delta r} = m_\delta \quad \text{και} \quad m_{\delta l} \cdot (EK) = m_{\delta r} \cdot (\Sigma K) \quad (2.10)$$

όπου K το μεταξύ των σημείων E και Σ κέντρο βάρους του διωστήρα. Έτσι η μάζα $m_{\delta l}$ παλινδρομεί, ενώ η μάζα $m_{\delta r}$ μόνο περιστρέφεται.

Τελικά λοιπόν, όλος ο κινηματικός μηχανισμός ανάγεται σε δύο διακεκριμένες μάζες, από τις οποίες η μεν μία

$$m_l = m_\varepsilon + m_{\delta l} \quad (2.11)$$

παλινδρομεί, η δε άλλη

$$m_r = m_\sigma + m_{\delta r} \quad (2.12)$$

Εκτελεί περιστροφική κίνηση.

Έτσι διακρίνουμε 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 συνολική παλινδρομούσα μάζα m_l , που κινείται με τον ρυθμό του εμβόλου, έχει επιτάχυνση b , που δίνεται σε ανηγμένη μορφή από την εξίσωση (1.13) ή (1.14), με φορά αναφοράς αυτήν που σημειώνεται στο σχήμα 3.1. Έτσι από το έμβολο θα ασκείται επί του κινηματικού μηχανισμού η δύναμη :

$$P_l = -m_l b = -m_l r \omega^2 \left(\frac{b}{r \omega^2} \right) \quad (2.13)$$

με σταθερό φορέα (άξονας του κυλίνδρου), μεταβαλλόμενης όμως φοράς και μεγέθους συναρτήσει της γωνίας φ . Τούτο εξηγείται δυναμικώς από το ότι η επιτάχυνση b του εμβόλου απαιτεί την εξάσκηση επ' αυτού, από τον υπόλοιπο κινηματικό μηχανισμό, μίας δυνάμεως ίσης προς $P_l' = -P_l = m_l b$. Τότε λοιπόν, από το έμβολο θα ασκείται (δράση-αντίδραση) επί του κινηματικού μηχανισμού η ίση και αντιθέτου φοράς δύναμη P_l .

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

Άρα είναι προφανές, 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 για την P_l (αντικατάσταση δείκτη g με l). Μια βασική διαφορά είναι ότι στην περίπτωση της P_l , στη θεμελίωση του κινητήρα μεταβιβάζεται εκτός της ροπής ανατροπής $M_{\sigma l}$ και αυτή η δύναμη P_l .

Από τη σχέση (2.13), με αντικατάσταση της τιμής της $(b/r\omega^2)$ από την (1.14), παίρνουμε :

$$P_l = -m_l b = -m_l r \omega^2 (\beta_1 \cos \varphi + \beta_2 \cos 2\varphi + \beta_4 \cos 4\varphi + \beta_6 \cos 6\varphi \dots) \quad (2.14\alpha)$$

Όστε η P_l είναι περιοδική συνάρτηση, με συχνότητα την συχνότητα περιστροφής της μηχανής (ανεξάρτητα από το εάν η μηχανή είναι δίχρονη ή τετράχρονη) περιλαμβάνουσα

αρμονικές δυνάμεις συχνότητας $n, 2n, 4n, 6n$, κλπ. , δηλαδή δυνάμεις $1^{ης}, 2^{ης}, 4^{ης}, 6^{ης}$, κλπ. τάξεως.

Όπως είπαμε και στο κεφάλαιο 1, στις πιο πολλές περιπτώσεις της τεχνικής πράξεως, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δυνάμεις $1^{ης}$ και $2^{ης}$ τάξης, δηλαδή (όμοια με σχέση (1.15)) :

$$P_l = -m_l r \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) \quad (2.13\beta)$$

2.2.2 Περιστρεφόμενες μαζικές δυνάμεις

Το σύνολο των περιστρεφόμενων μαζών αποτελούν, αφενός η περιστρεφόμενη μάζα του διωστήρα $m_{\delta r}$ (σχέση (2.12)) 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 αδρανείας, όπως εκτίθεται πιο κάτω).

Η μάζα αυτή ($m_r = m_{\sigma} + m_{\delta r}$) θεωρείται συγκεντρωμένη στο κομβίο του στροφάλου (σημείο Σ, του Σχήματος (2.1)). Η πραγματική όμως δύναμη που ασκείται στην m_r είναι η κεντρομόλος, οπότε η m_r ασκεί στα έδρανα και το σώμα της μηχανής (δράση-αντίδραση) την αντίστοιχη φυγόκεντρη δύναμη που οφείλεται στην m_r (Σχήμα 2.2) και έχει :

- Μέτρο σταθερό και ίσο με :

$$P_r = m_r r \omega^2 \quad (2.18)$$

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

Έτσι 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 δυνάμεως, καθότι είναι συνεχώς κάθετη σ' αυτήν.

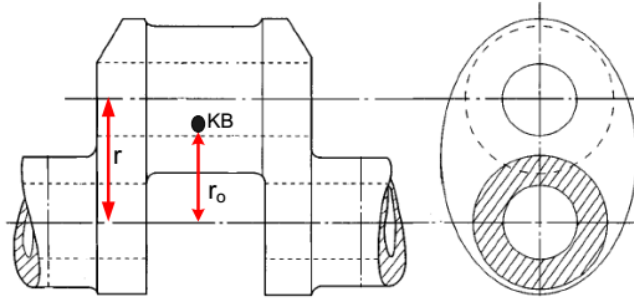
Η αναγωγή της μάζας του στροφάλου στην ακτίνα r , για τον προσδιορισμό της m_{σ} , γίνεται με βάση την ισότητα των σχετικών δυνάμεων (φυγόκεντρικών). Έτσι, αν m_o και r_o είναι , αντίστοιχα, η πραγματική μάζα του στροφάλου και η απόσταση του κέντρου βάρους του από τον άξονα περιστροφής, τότε :

$$P_{\sigma r} = m_o r_o \omega^2 = m_{\sigma} r \omega^2$$

οπότε προκύπτει :

$$m_{\sigma} = \frac{m_o r_o}{r} \quad (2.19)$$

Σημειώνεται ότι τα προαναφερθέντα στην προηγούμενη παράγραφο (2.1), περί της μείωσης των δυνάμεων από αέρια λόγω τριβών, ισχύουν ομοίως και για τις μαζικές δυνάμεις.



Σχήμα 2.3 Αναγωγή της μάζας του στροφάλου στην ακτίνα r [4]

2.3 Επαλληλία δυνάμεων από αέρια και μαζικών

Από τη σύνθεση των P_g και P_l , λαμβανομένων με το κατάλληλο πρόσημο, προκύπτει η συνισταμένη ή συνολική δύναμη P στο έμβολο ή η αντίστοιχη πίεση $p=P/F$. Τυπικές τέτοιες περιπτώσεις 2-X και 4-X κινητήρα δίνονται, αντίστοιχα, στα Διαγράμματα Δ-1 και Δ-3 (που παρατίθενται στο τέλος της παρούσης μελέτης).

Από τα διαγράμματα είναι φανερό, ότι για τον 4-X κινητήρα κατά το τέλος της εξαγωγής των καυσαερίων και κατά την αρχή της αναρροφήσεως του αέρα (ΑΝΣ) κυριαρχούν πλήρως οι μαζικές δυνάμεις, οι οποίες καταπονούν τον κινηματικό μηχανισμό και τα έδρανα της στροφαλοφόρου ατράκτου, γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει στον 2-X κινητήρα, όπου κατά το ΑΝΣ υπάρχει πάντα σοβαρή πίεση επί του εμβόλου.

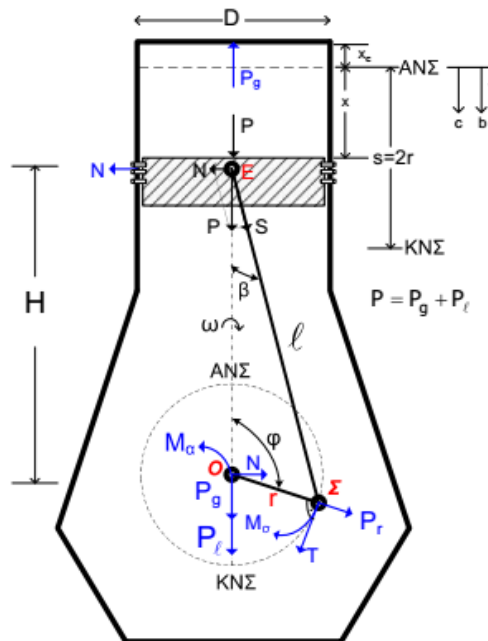
Τυπικές μεταβολές για 2-X και 4-X κινητήρα για την ολική στρεπτική δύναμη P_T ή πίεση p_T δίνονται, αντίστοιχα, στα Διαγράμματα Δ-2 και Δ-4. Παρατηρείται ότι λόγω της υπέρξεως της p_{Tl} , η οποία υπερτίθεται της p_{Tg} , το αρχικό διάγραμμα της p_{Tg} , παραμορφώνεται στο διάγραμμα της p_T , χωρίς να μεταβάλλεται η μέση τιμή αυτής, είναι δηλ. $\bar{P}_{Tl} = 0$ και $\bar{P}_T = \bar{P}_{Tg}$. Τέλος σημειώνεται η πολύ χρήσιμη σχέση, βάσει των σχέσεων (2.4) και (2.8) :

$$\frac{T}{P} = \frac{c}{r\omega} = \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (2.20)$$

που ισχύει για δυνάμεις από αέρια (βάζοντας δείκτη g), για δυνάμεις από παλινδρομούσες μάζες (βάζοντας δείκτη l) και για τις συνολικές δυνάμεις.

3. Γενικά περί Ζυγοστάθμισης

Ένα από τα σημαντικά στοιχεία που πρέπει να χαρακτηρίζουν κάθε παλινδρομικό εμβολοφόρο κινητήρα (οχήματος, ναυτικό αλλά και ηλεκτροπαραγωγής δηλαδή ‘stationary’) είναι, μεταξύ άλλων, και η ομαλή (smooth) λειτουργία, με απουσία δηλαδή κραδασμών, τρανταγμάτων και θορύβου. Σε επίπεδο κατασκευαστικό (εξαιρουμένων δηλαδή πιθανών λειτουργικών προβλημάτων, όπως κακή λίπανση ή φθορά, π.χ. στα έδρανα της στροφαλοφόρου ατράκτου), οι κυριότερες αιτίες που μπορεί να οδηγήσουν σε τραχιά (rough) λειτουργία έναν κινητήρα είναι η παρουσία των παρακάτω δυνάμεων/ροπών του κινηματικού μηχανισμού, Σχήμα 3.1 :



Σχήμα 3.1 Δυνάμεις κινηματικού μηχανισμού παλινδρομικής εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. [3]

- Περιστροφική δύναμη P_r (κατά μήκος της ακτίνας του στροφάλου),
- Παλινδρομική δύναμη P_l (ξεκίνησε από τον πείρο του εμβόλου στο σημείο E, και κατέληξε στη βάση του κινηματικού μηχανισμού στο σημείο O), και
- Ροπή ανατροπής M_a στη βάση του κινηματικού μηχανισμού (ως αποτέλεσμα της δράσης της πλευρικής δύναμης N στα σημεία O και E (με αντίθετη φορά).

Πιο συγκεκριμένα, οι δύο αδρανειακές δυνάμεις P_r και P_l (δεν εξαρτώνται δηλαδή από το φορτίο του κινητήρα παρά μόνον από την ταχύτητα περιστροφής του) αντιτίθενται στις μεταβολές της κίνησης του μηχανισμού (περιστροφικές και παλινδρομικές μάζες αντίστοιχα). Με άλλα λόγια, για να επιταχυνθεί το έμβολο, είναι συνολικά ο κινητήρας εκείνος ο οποίος παραλαμβάνει την αντίστοιχη αδρανειακή δύναμη P_l (ίση και αντίθετη με αυτήν της επιτάχυνσης του εμβόλου), υφιστάμενος, προφανώς λόγω της στερέωσής του, στιγμιαία μετακίνηση.

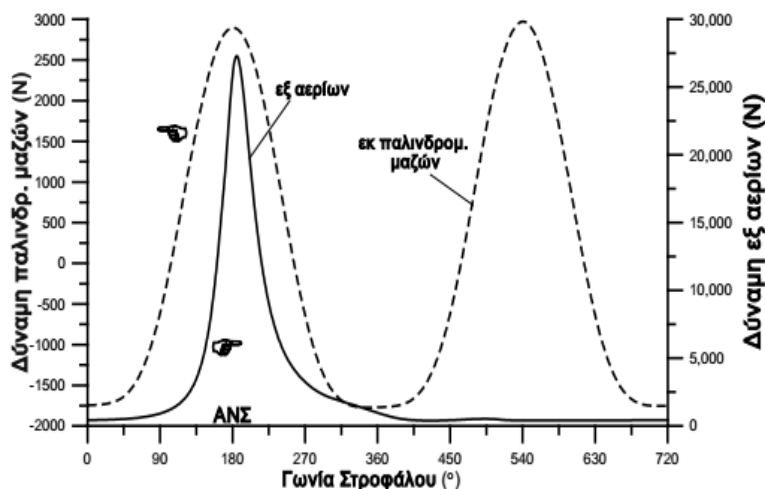


Σχήμα 3.2 Σύστημα ζυγοστάθμισης μονοκύλινδρου κινητήρα [4]

Η ροπή ανατροπής $M_a = -T \cdot r = -(P_g + P_l) \cdot \left(\frac{c}{r\omega}\right) = -N \cdot H$, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει όρους τόσο από αδρανειακές δυνάμεις (συγκεκριμένα μόνο την παλινδρομική) όσο και από δυνάμεις εξ αερίων (άρα επηρεάζεται και από το φορτίο του κινητήρα).

Με τον όρο ζυγοστάθμιση ή αντιστάθμιση εννοούμε την αντιμετώπιση (δηλαδή την ολική ή μερική εξουδετέρωση) των παραμενουσών δύο περιοδικών αδρανειακών δυνάμεων P_r και P_l (όπως και των συνεπακόλουθων ροπών τους σε πολυκύλινδρους κινητήρες). Τυχόν αδυναμία εξουδετέρωσής τους οδηγεί στη δημιουργία κραδασμών στον κινητήρα, απομακρύνοντας τη λειτουργία του από την ομαλή κατάσταση. Οι κραδασμοί αυτοί είναι

σχετικά μικρής έντασης σε μικρού όγκου εμβολισμού κινητήρες, όσο αυξάνεται όμως η ισχύς και οι διαστάσεις του κινητήρα, τόσο και αυτοί μεγαλώνουν.



Σχήμα 3.2 - Διακύμανση δυνάμεων εξ αερίων και αδρανειακών από παλινδρομούσες μάζες κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας 4-Χ κινητήρα Otto. [3]

Επιπλέον, όπως είναι γνωστό, υπάρχει συσχέτιση των αδρανειακών δυνάμεων με την ταχύτητα περιστροφής και μάλιστα υψωμένη στο τετράγωνο. Άρα, με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφή αυξάνεται με πολύ ισχυρότερο ρυθμό η επιβάρυνση από τις αδρανειακές δυνάμεις.

Για μέση ταχύτητα εμβόλου δε μεγαλύτερη των 15 m/s υπερτερούν, συχνά, των αντίστοιχων δυνάμεων εξ αερίων. Από την άλλη πλευρά, σε αντίθεση με τις (γενικά πολύ μεγαλύτερου μεγέθους) δυνάμεις εξ αερίων που επενεργούν όμως διακοπτόμενα με μικρά διαστήματα σημαντικής φόρτισης, οι αδρανειακές δυνάμεις διαρκούν καθ' όλη τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.

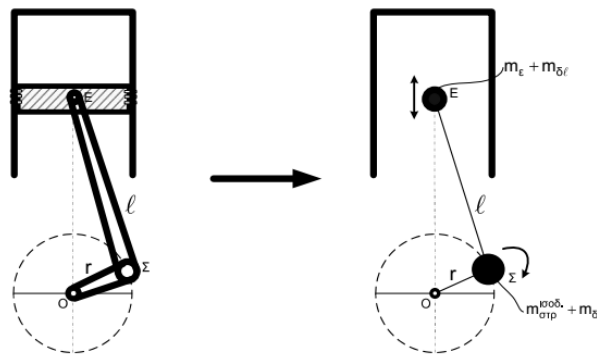
Οι παραμένουσες αδρανειακές δυνάμεις και ροπές επηρεάζουν ακόμα και την ισχύ του κινητήρα και το εύρος ταχυτήτων στο οποίο αυτός λειτουργεί (μέσω της επίδρασής τους σε θέματα ταλαντώσεων). Τέλος, ευθύνονται και για τη μείωση της διάρκειας ζωής του, καθώς οι κραδασμοί καταπονούν τη στροφαλοφόρο άτρακτο και τα έδρανα της μηχανής, και μάλιστα ανομοιόμορφα. Για τον λόγο αυτό, αποτελεί μεγάλης σημασίας θέμα η επιτυχής αντιστάθμιση των ελεύθερων δυνάμεων (και ροπών τους), ώστε ο κινητήρας όντας πλήρως ζυγοσταθμισμένος να είναι ελεύθερος από κραδασμούς, οι οποίοι σημειωτέων δεν περιορίζονται μόνο στα όρια του κινητήρα, αλλά μέσω της στερέωσης αυτού μεταδίδονται και σε γειτνιάζοντες χώρους, όπως

χαρακτηριστικά στην καμπίνα των επιβατών ενός αυτοκινήτου. Άλλη χαρακτηριστική περίπτωση είναι η άτρακτος της έλικας και το σκαρί του πλοίου, όπου πρέπει να ληφθεί πρόνοια κατά τη σχεδίαση ώστε να μην υπάρξει σύμπτωση της ιδιοσυχνότητάς τους με τη συχνότητα κάποιας από τις παραμένουσες δυνάμεις/ροπές του κινητήρα.

Τυπικά μέτρα για την πραγματοποίηση της ζυγοστάθμισης των αδρανειακών δυνάμεων/ροπών είναι :

1. Τοποθέτηση αντιβάρων στην προέκταση των στροφάλων,
2. Σε πολυκύλινδρους κινητήρες , επιλογή της κατάλληλης σειράς ανάφλεξης και διάταξης των στροφάλων,
3. Ειδικά σε κινητήρες διάταξης V ή W, επιλογή της κατάλληλης περιεχόμενης γωνίας δ ή/και της εκκεντρότητας του κομβίου στροφάλου,
4. Τοποθέτηση συστήματος αντιστάθμισης (συνήθως ζεύγους ατράκτων που φέρουν αντίβαρα και περιστρέφονται αντίρροπα).

Γενικά, η αντιμετώπιση των περιστροφικών δυνάμεων (και ροπών) είναι πιο εύκολη, σε αντίθεση με τις παλινδρομικές, οι οποίες όταν παραμένουν χρειάζονται πολύπλοκο σύστημα για την πλήρη αντιστάθμιση τους, καθώς και πιο βαθιά γνώση των σχετικών φαινομένων.



Σχήμα 3.3 - Απλοποίηση κινηματικού μηχανισμού για τη μελέτη ζυγοστάθμισης. [3]

Υπενθυμίζεται ότι για τη μελέτη της δυναμικής των παλινδρομικών εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. γίνεται απλοποίηση του κινηματικού μηχανισμού, όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3.3, δηλαδή από ανάλυση στερεών σωμάτων (έμβολο, διωστήρας, στρόφαλο) που κάνουν μικτή-σύνθετη και διαφορετική κίνηση το καθένα (Σχήμα 3.3 αριστερά), καταλήγουμε σε μελέτη σημειακών μαζών που πραγματοποιούν είτε παλινδρομική κίνηση (έμβολο και τμήμα μάζας διωστήρα στο σημείο E, δηλαδή στον πείρο του εμβόλου) είτε περιστροφική (ισοδύναμη




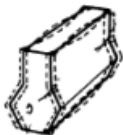
μάζα στροφάλου μαζί με το τμήμα του διωστήρα στο σημείο Σ, δηλαδή στο κομβίο στροφάλου), Σχήμα 3.3 δεξιά.

Επίσης, θεωρούμε ότι η γωνιακή ταχύτητα ω κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας είναι σταθερή, κάτι το οποίο, εν γένει, δεν ισχύει απόλυτα, ως απότοκο του φαινομένου της ανομοιόμορφης περιστροφής της στροφαλοφόρου ατράκτου.

Καταρχήν θα γίνει ανάλυση ζυγοστάθμισης του μονοκύλινδρου κινητήρα, βάσει του οποίου θα μελετηθούν και οι πολυκύλινδροι κινητήρες με τους οποίους θα ασχοληθούμε παρακάτω.

Ολοκληρώνοντας την εισαγωγή αυτή, στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται όλες οι ελεύθερες δυνάμεις και ροπές που εφαρμόζονται στον κινητήρα προκαλώντας κραδασμούς, καθώς και το ακριβές είδος της καταπόνησης που επιφέρουν, οι αιτίες δημιουργίας τους, τα σημαντικότερα μεγέθη του κινητήρα που τις επηρεάζουν και ο τρόπος αντιμετώπισης τους.

Πίνακας 3.1 - Εφαρμοζόμενες δυνάμεις/ροπές στον κινητήρα που προκαλούν κραδασμούς [3]

Δυνάμεις/ Ροπές				
Περιγραφή	Ροπή ανατροπής	Ελεύθερες δυνάμεις	Ελεύθερες ροπές	(εσωτερικές) Καμπικές ροπές
Αίτιο	Στρεπτικές δυνάμεις εξ αερίων και από παλινδρομούσες μάζες	<u>Παραμένουσες</u> δυνάμεις I ^{ης} και II ^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες, και δυνάμεις από περιστρεφόμενες μάζες	<u>Παραμένουσες</u> ροπές I ^{ης} και II ^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες, και ροπές από περιστρεφόμενες μάζες	Περιστροφικές και παλινδρομικές δυνάμεις
Βασικά μεγέθη επιρροής	Μέση πραγματική πίεση, βαθμός συμπίεσης, μάζες, ταχύτητα περιστροφής, $\Delta\phi_a$, λ , z , V_h	Μάζες, ταχύτητα περιστροφής, διαστάσεις, λ , διάταξη στροφάλων, πλήθος/διάταξη κυλίνδρων	Διάταξη στροφάλων, διάταξη/πλήθος κυλίνδρων, απόσταση αξόνων ανάμεσα στους κυλίνδρους, $\Delta\phi_a$, μάζες, ταχύτητα περιστροφής, λ	
Αντιμετώπιση	Στήριξη του κινητήρα	Βοηθητικές άτρακτοι με αντίβαρα, αποσβεστήρες κραδασμών	Βοηθητικές άτρακτοι με αντίβαρα, αποσβεστήρες κραδασμών	Αντίβαρα, σπιβαρή κατασκευή
Ανάλυση και Παραδείγματα	-	Κεφάλαια 2, 3, 4, 5	Κεφάλαια 3 (εν σειρά διάταξη), 4 (διάταξη V), 5 (διάταξη W και αστεροειδής)	Κεφάλαιο 3

4. Αρχές Ζυγοστάθμισης

Εμβολοφόρων Κινητήρων &

Πρόγραμμα Υπολογισμού

4.1 Περιστροφική Δύναμη

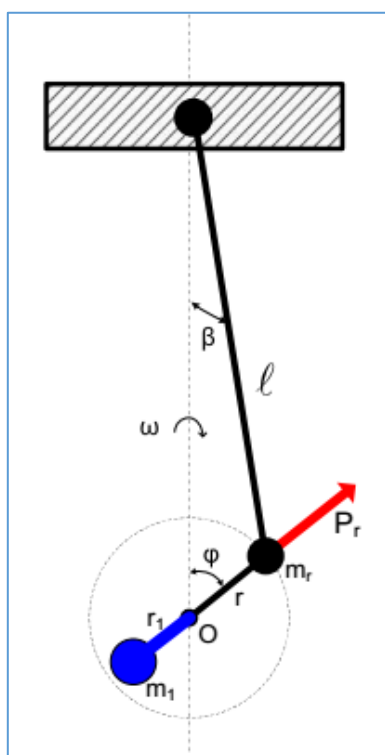
Από τις περιστρεφόμενες μάζες ασκείται στη στροφαλοφόρο άτρακτο μία φυγόκεντρη δύναμη (Σχήμα 4.1)

$$P_r = m_r r \omega^2 \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.1 - Αντίβαρο στην προέκταση του στροφάλου (αριστερά) και λεπτομέρειά του (δεξιά) για την αντιστάθμιση δυνάμεων από περιστρεφόμενες μάζες μονοκύλινδρου κινητήρα. [3]

Η περιστροφική αυτή δύναμη έχει πάντοτε σταθερό μέτρο (κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας), δεν εξαρτάται δηλαδή από τη γωνία στροφάλου, όπως φαίνεται και από τη σχέση (4.1) αλλά μόνον από τις διαστάσεις του κινητήρα και την ταχύτητα περιστροφής του, μεγέθη που, κατά τη βάση, μεταβάλλονται αντίστροφα. Έχει επίσης διεύθυνση μεταβλητή, αυτήν της ακτίνας του στροφάλου. Υπενθυμίζεται ότι η μάζα m_r που χρησιμοποιείται στη σχέση (4.1) συντίθεται από δύο όρους: ο πρώτος είναι η μάζα του στροφάλου κατάλληλα ανηγμένη στο κομβίο στροφάλου (το οποίο δεν συμπίπτει με το κέντρο βάρους του), και το δεύτερο από το τμήμα της μάζας του διωστήρα που περιστρέφεται μαζί με το στροφάλο (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 4.2 - Περιστροφική δύναμη και διάταξη αντιμετώπισής της. [3]

Λόγω του σταθερού μέτρου της δύναμης P_r , η πλήρης αντιστάθμισή της είναι εύκολη. Συγκεκριμένα, τοποθετείται αντίβαρο στην προέκταση της ακτίνας του στροφάλου, Σχήματα 4.1 και 4.2, με στοιχεία m_1 και r_1 τέτοια ώστε να ισχύει η σχέση:

$$m_1 r_1 = m_r r \quad (4.2)$$

όπου m_1 η μάζα του αντιβάρου και r_1 η απόσταση του κέντρου βάρους του από τον άξονα περιστροφής, δηλαδή το σημείο O.

Ανάλογα με την εφαρμογή, και με σκοπό την αποφυγή τοποθέτησης μεγάλου αντιβάρου (και άρα αποφυγή της αντίστασης που προκαλεί η κίνησή του με αποτέλεσμα να απορροφάει και ωφέλιμο έργο από τον κινητήρα), μπορεί να εξουδετερωθεί μέρος μόνον της περιστροφικής δύναμης, δηλαδή τότε

$$m_1 r_1 = a \cdot m_r r \quad (4.2\alpha)$$

όπου a ποσοστό που κυμαίνεται συνήθως από 50-100% (πλήρης ζυγοστάθμιση).

4.2 Παλινδρομική δύναμη

Σε αντίθεση με την περιστροφική δύναμη, η παλινδρομική δύναμη P_l έχει σταθερή ευθεία ενέργειας (διεύθυνση) στον άξονα του κυλίνδρου, και μεταβλητό μέτρο (σε κάθε γωνία στροφάλου), που δίνεται από την παρακάτω σχέση, με θετική φορά περιστροφής από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ :

$$P_l = -m_l r \omega^2 \frac{b}{r \omega^2} = -m_l r \omega^2 \left(\cos \varphi + \lambda \frac{\cos 2\varphi + \lambda^2 \sin^4 \varphi}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \right) \quad (4.3)$$

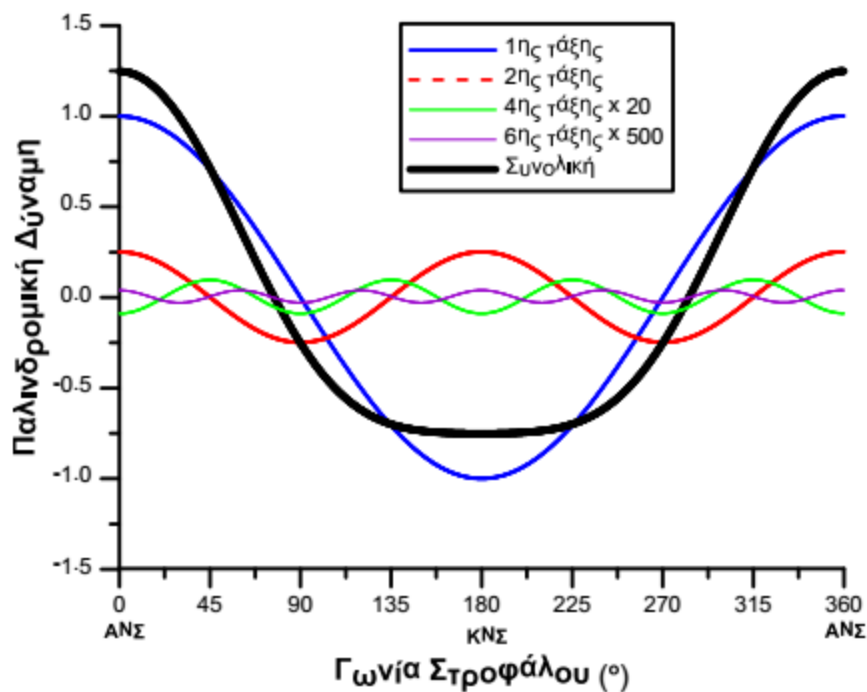
Από τη δύναμη αυτή, επάνω στο κέλυφος και τη θεμελίωση του κινητήρα, ασκούνται:

- Μια ελεύθερη, δηλαδή μη-ισορροπούμενη μέσα στον κινητήρα (σε αντίθεση δηλαδή με την P_g) περιοδική μαζική δύναμη P_l , η οποία, αναλυόμενη κατά Fourier, δίνει συνιστώσες συνημιτονικές (αρμονικές) $1^{ης}$, $2^{ης}$, $4^{ης}$, κλπ. τάξης σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$P_l = -m_l r \omega^2 (\beta_1 \cos \varphi + \beta_2 \cos 2\varphi + \beta_4 \cos 4\varphi + \beta_6 \cos 6\varphi \dots) \quad (4.3\alpha)$$

- Ένα ζεύγος ροπών $M_{al} = -M_{sl} = -T_l r$ με συνιστώσες ημιτονικές κατά Fourier $1^{ης}$, $2^{ης}$, $3^{ης}$, $4^{ης}$, κλπ. τάξης, επίσης ελεύθερο, δηλαδή μη-ισορροπούμενο εντός του κινητήρα.

Στη σχέση (4.3α) είναι : $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = \lambda - \frac{\lambda^3}{4} - \frac{15\lambda^5}{128}$, $\beta_4 = -\frac{\lambda^3}{4} - \frac{3\lambda^5}{16}$, $\beta_6 = \frac{9\lambda^5}{128}$ κλπ. (πέραν δηλαδή της $1^{ης}$, όλες οι υπόλοιπες είναι άρτιου αριθμού τάξεις). Από τις άπειρες αρμονικές συνιστώσες της P_l στη σχέση (4.3α), Σχήμα 4.3, μόνον οι δύο πρώτες έχουν σημαντική τιμή. Οι υπόλοιπες , στις περισσότερες εφαρμογές ζυγοστάθμισης μπορούν να αμεληθούν (προσοχή : όχι απαραίτητα σε θέματα ταλαντώσεων).



Σχήμα 4.3 Μεταβολή παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης}, 2^{ης}, 4^{ης}, 6^{ης}, τάξης και συνολικής (σχέση (4.3)) συναρτήσει της γωνίας στροφάλου ($\lambda=1/4$) [3]

Έτσι, από τη σχέση (4.3α) μπορούμε τελικά να καταλήξουμε στην παρακάτω προσεγγιστική, αλλά απολύτως επαρκή για τα επόμενα, σχέση :

$$P_l = -m_l r \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) \quad (4.4)$$

Με θετική φορά από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ.

Στο Σχήμα 4.3, η μορφή της συνολικής δύναμης (ανάλογη με την επιτάχυνση του εμβόλου) είναι χαρακτηριστική της ανομοιόμορφης κίνησης του εμβόλου, το οποίο κινείται ταχύτερα από το ΑΝΣ (0°) μέχρι το μέσο της διαδρομής (90°) έναντι της κίνησής του από το μέσο προς το ΚΝΣ (180°). Κατά συνέπεια, η αδρανειακή δύναμη είναι ισχυρότερη περίξ του ΑΝΣ έναντι της περιοχής του ΚΝΣ.

Ειδικά για τη μελέτη της ζυγοστάθμισης της παλινδρομικής δύναμης, θεωρείται θετική φορά από το ΚΝΣ προς το ΑΝΣ, οπότε από τη σχέση (4.4) φεύγει το αρνητικό πρόσημο, και αυτή γίνεται πλέον :

$$P_l = m_l r \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) \Rightarrow P_l = Z_I \cos \varphi + Z_{II} \cos 2\varphi \quad (4.5)$$

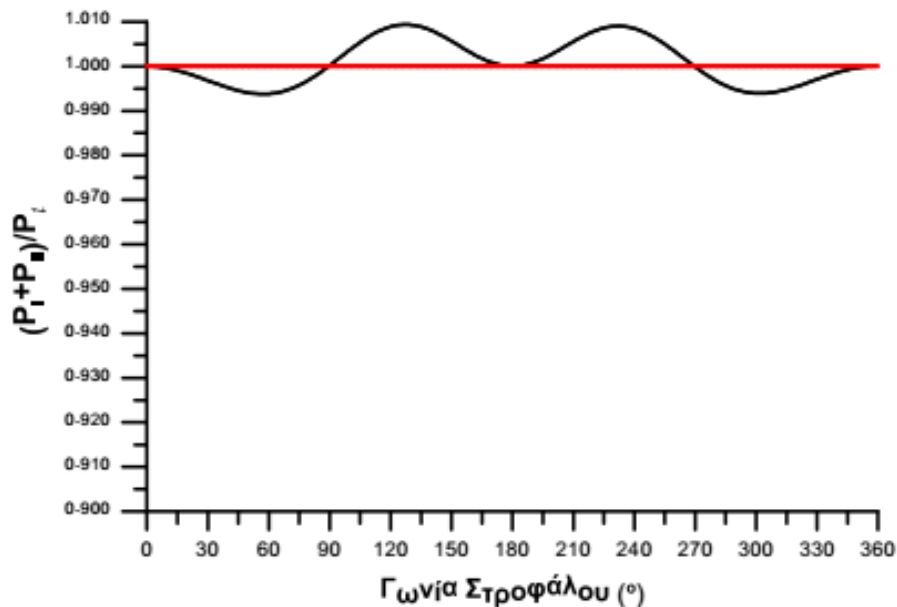
όπου

$$Z_I = m_l r \omega^2 \quad Z_{II} = \lambda m_l r \omega^2 \quad (4.6)$$

Η $P_I = Z_I \cos \varphi$ αποκαλείται παλινδρομική δύναμη 1^{ης} τάξης, Σχήμα 4.3, και έχει ουσιαστικά την έννοια μίας δύναμης που διεγείρει το σύστημα σε κραδασμούς μία φορά σε κάθε περιστροφή της ατράκτου (συχνότητα ίση με του στροφάλου). Μεγιστοποιείται δε δύο φορές κατά τη διάρκεια μίας περιστροφής, στις 0° και στις 180° (στα νεκρά σημεία δηλαδή), με μέγιστη τιμή $Z_I = m_l r \omega^2$.

Αντίστοιχα, η $P_{II} = Z_{II} \cos 2\varphi$ είναι η παλινδρομική δύναμη 2^{ης} τάξης, η οποία διεγείρει το σύστημα σε κραδασμούς δύο φορές σε κάθε περιστροφή της ατράκτου (διπλάσια συχνότητα), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.3. μεγιστοποιείται τέσσερις φορές κατά τη διάρκεια μίας περιστροφής (0°, 90°, 180°, 270°) με τιμή $Z_{II} = \lambda m_l r \omega^2$. Είναι προφανές ότι $Z_{II} = \lambda Z_I$, και με δεδομένο ότι το $\lambda (=r/l)$ κυμαίνεται συνήθως από 1/5 έως 1/3, η παλινδρομική δύναμη 2^{ης} τάξης είναι, αντίστοιχα 3-5 φορές μικρότερη από την 1^{ης} τάξης.

Τέλος, στο Σχήμα 4.4 φαίνεται το ποσοστό της προσεγγιστικής σχέσης (4.4) ως προς την ακριβή σχέση (4.3) κατά τη διάρκεια μίας περιστροφής της στροφαλοφόρου ατράκτου, όπου επιβεβαιώνεται η συντριπτική συνεισφορά των δυνάμεων των δύο πρώτων τάξεων.



Σχήμα 4.4 Ποσοστό δυνάμεων 1^{ης} και 2^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες προς την συνολική παλινδρομική δύναμη κατά τη διάρκεια μίας περιστροφής της στροφαλοφόρου. [3]

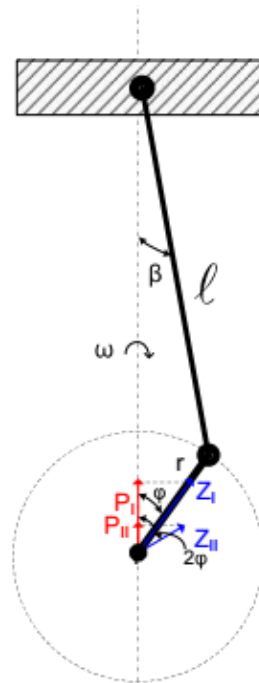
4.2.1 Παλινδρομική δύναμη 1^{ης} τάξης

Αυτή αποτελεί τον πρώτο όρο στη σχέση (4.5), δηλαδή :

$$P_I = Z_I \cos \varphi = m_l r \omega^2 \cos \varphi \quad (4.7)$$

και πρόκειται για δύναμη μεταβλητού μέτρου με σταθερή διεύθυνση αυτή της κίνησης του εμβόλου.

Η $Z_I \cos \varphi$ είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την προβολή επάνω στον άξονα του κυλίνδρου διάνυσματος μέτρου $Z_I = m_l r \omega^2$, που σχηματίζει στιγμιαία γωνία φ με τον άξονα αυτόν, δηλαδή το διάνυσμα αυτό θεωρείται ότι βρίσκεται επάνω στην ακτίνα του τροφάλου και περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα ω (Σχήμα 4.5). Προφανώς, το διάνυσμα αυτό δεν υπάρχει στην πραγματικότητα. Παρόλα αυτά, η χρήση του βοηθάει πολύ στη μελέτη της μεταβολής της παλινδρομικής δύναμης 1^{ης} τάξης και των δυνάμεων αντιστάθμισής της (κυρίως στους πολυκύλινδρους κινητήρες). Αυτό το διάνυσμα θα καλείται για συντομία βοηθητικό διάνυσμα 1^{ης} τάξης.



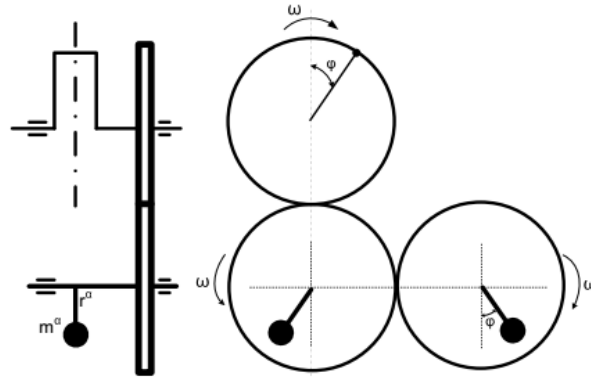
Σχήμα 4.5 - Διανυσματική παράσταση παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης} και 2^{ης} τάξης, καθώς και των αντίστοιχων βοηθητικών διανυσμάτων Z_I και Z_{II} . [3]

Για την πλήρη εξουδετέρωση της δράσης της παλινδρομικής δύναμης 1^{ης} τάξης, χωρίς την εμφάνιση πρόσθετων δυνάμεων, αρκεί να τοποθετηθούν δύο αντίβαρα μάζας m^a το καθένα, σε απόσταση r^a από τον άξονα περιστροφής τους, με στοιχεία $m^a r^a = m_l r / 2$, που έχουν γωνιακή ταχύτητα αυτή του στροφάλου ω , αλλά με αντίθετες φορές περιστροφής, και διατεταγμένα συμμετρικά προς το μέσο διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο του κινητήρα. Όταν ο κύλινδρος είναι στο ANΣ, τα αντίβαρα σφηνώνονται παράλληλα προς τον άξονα του κυλίνδρου. Προφανώς, τα δύο αυτά αντίβαρα θα είναι στερεωμένα σε διαφορετικές ατράκτους, που θα εδράζονται όμως στο κέλυφος της μηχανής. Σχηματική διάταξη με την οποία επιτυγχάνονται τα παραπάνω απεικονίζεται στα Σχήματα 4.6 (για τυχαία γωνία φ) και 4.7 (για $\varphi=90^\circ$ και $\varphi=180^\circ$). Από κάθε αντίβαρο, λόγω της φυγόκεντρης δύναμης $m^a r^a \omega^2 = m_l r \omega^2 / 2$, δημιουργούνται αντιδράσεις στα έδρανα της αντίστοιχης βοηθητικής ατράκτου, με αποτέλεσμα να μεταφέρονται στο κέλυφος της μηχανής. Σημειώνεται ότι τα αντίβαρα αυτά πρέπει να κείνται και επί επιπέδου καθέτου προς τον άξονα της στροφαλοφόρου ατράκτου που περιλαμβάνει τον άξονα του κυλίνδρου, για αποφυγή δημιουργίας ροπής.

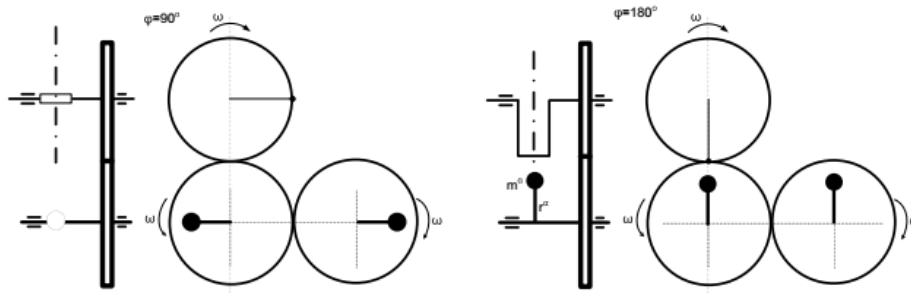
Άρα, λοιπόν, οι δύο φυγόκεντρες δυνάμεις (των αντιβάρων) κείνται επί του αυτού επιπέδου, το σημείο τομής των ευθειών ενεργείας τους κείται πάντοτε επάνω στον άξονα του κυλίνδρου, και δίνουν συνισταμένη επάνω στον άξονα, που με βάση τη σημειούμενη θετική φορά αναφοράς έχει τιμή :

$$-2m^a r^a \omega^2 \cos \varphi = -2 \left(\frac{m_l r}{2} \right) \omega^2 \cos \varphi = -m_l r \omega^2 \cos \varphi \quad (4.8)$$

δηλαδή επέρχεται πλήρης αντιστάθμιση της παλινδρομικής δύναμης 1^{ης} τάξης.



Σχήμα 4.6 Σχηματική διάταξη ζυγοστάθμισης παλινδρομικής δύναμης 1^{ης} τάξης σε τυχαία θέση της γωνίας στορφάλου φ με χρήση ατράκτων με αντίβαρα.[3]



Σχήμα 4.7 - Σχηματική διάταξη ζυγοστάθμισης παλινδρομικής δύναμης 1^{ης} τάξης για γωνίες στορφάλου φ=90° και φ=180° [3]

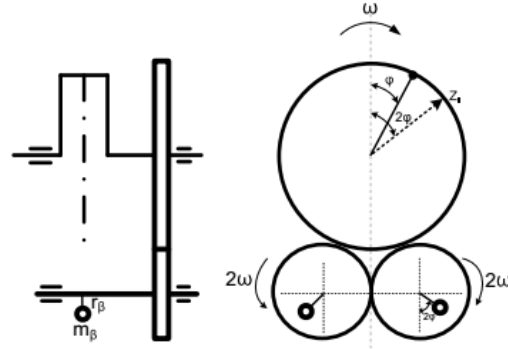
4.2.2 Παλινδρομική δύναμη 2^{ης} τάξης

Αυτή αποτελεί το δεύτερο όρο στη σχέση (4.5), με βάση τη νέα θετική φορά αναφοράς, δηλαδή :

$$P_{II} = Z_{II} \cos 2\varphi = \lambda m_l r \omega^2 \cos 2\varphi \quad (4.10)$$

Όπως και στην περίπτωση της παλινδρομικής δύναμης 1^{ης} τάξης, η δύναμη 2^{ης} τάξης μπορεί να θεωρηθεί σαν προβολή στον άξονα του κυλίνδρου διανύσματος μέτρου $Z_{II} = \lambda m_l r \omega^2$ που σχηματίζει στιγμιαία γωνία 2φ με τον άξονα αυτόν, δηλαδή περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα 2ω , Σχήμα 4.5. Σημειώνεται και πάλι ότι το διάνυσμα αυτό δεν υφίσταται στην

πραγματικότητα, αλλά η χρησιμότητά του είναι αντίστοιχη με αυτήν του αντίστοιχου βοηθητικού διανύσματος για την παλινδρομική δύναμη 1^{ης} τάξης, και κατά αναλογία καλείται βοηθητικό διάνυσμα 2^{ης} τάξης.



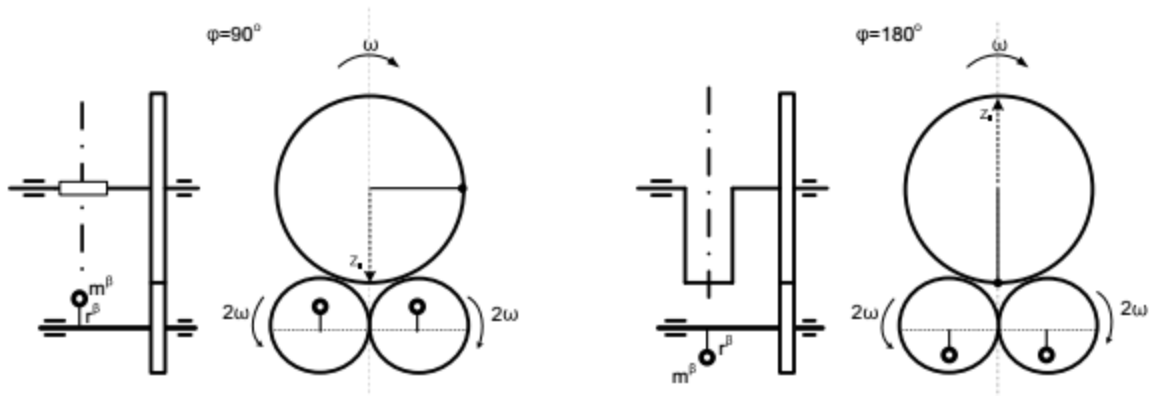
Σχήμα 4.8 - Σχηματική διάταξη ζυγοστάθμισης παλινδρομικής δύναμης 2ης τάξης.[3]

Με προσέγγιση ανάλογη αυτής της προηγούμενης παραγράφου, προκύπτει ότι η πλήρης ζυγοστάθμιση της παλινδρομικής δύναμης 2^{ης} τάξης είναι εφικτή μέσω κατάλληλης τοποθέτησης δύο συμμετρικών αντιβάρων (Σχήματα 4.9 και 4.10), το καθένα με στοιχεία που πληρούν τη σχέση $m^\beta r^\beta = \lambda m_l r / 8$, σε δύο βοηθητικές ατράκτους που περιστρέφονται αντίρροπα με γωνιακή ταχύτητα 2ω και εδράζονται στο κέλυφος της μηχανής. Σημειώνεται, και πάλι, ότι τα αντίβαρα πρέπει να κείνται και επί επιπέδου κάθετου προς τον άξονα της στροφαλοφόρου ατράκτου που περιλαμβάνει τον άξονα του κυλίνδρου, για την αποφυγή δημιουργίας ροπής.

Οι δημιουργούμενες φυγόκεντρες δυνάμεις δίνουν συνισταμένη δύναμη επάνω στον κατακόρυφο άξονα (οι συνιστώσες στον οριζόντιο άξονα αλληλο-εξουδετερώνονται, λόγω της αντίρροπης κίνησης των βοηθητικών ατράκτων) :

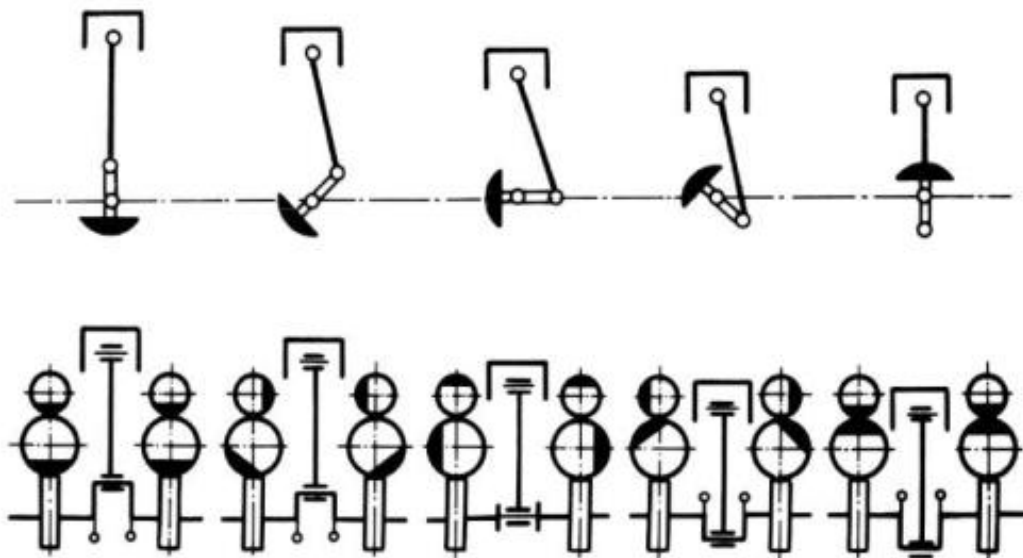
$$-2m^\beta r^\beta (2\omega)^2 \cos 2\varphi = -2 \left(\frac{\lambda m_l r}{8} \right) (2\omega)^2 \cos 2\varphi = -\lambda m_l r \omega^2 \cos 2\varphi \quad (4.11)$$

οπότε και επέρχεται πλήρης αντιστάθμιση της παλινδρομικής δύναμης 2^{ης} τάξης.



Σχήμα 4.9 - Διάταξη του συστήματος ζυγοστάθμισης παλινδρομικής δύναμης 2^{ης} τάξης σε γωνίες στροφάλου $\phi=90^\circ$ και $\phi=180^\circ$. [3]

Τέλος, στο Σχήμα 4.10 παρίσταται γραφικά ένα “πλήρες” σύστημα αντιστάθμισης μονοκύλινδρου κινητήρα (παλινδρομικές δυνάμεις 1^{ης} και 2^{ης} τάξης και περιστροφικές) σε δύο γωνίες στροφάλου.



Σχήμα 4.10 - Σύστημα πλήρους (ταυτόχρονης) αντιστάθμισης περιστρεφόμενων και παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης} και 2^{ης} τάξης μονοκύλινδρου κινητήρα . [3]

Οι διατάξεις αντιστάθμισης των Σχημάτων 4.6, 4.9 και 4.10 για τις αδρανειακές παλινδρομικές δυνάμεις $1^{ης}$ και $2^{ης}$ τάξης σπανίως χρησιμοποιούνται (εκτός ίσως από περιπτώσεις πειραματικών κινητήρων), καθώς είναι περίπλοκες και ογκώδεις. Πιο συχνά σε μονοκύλινδρους κινητήρες χρησιμοποιείται η έννοια της μερικής εξουδετέρωσης των παλινδρομικών δυνάμεων $1^{ης}$ τάξης που αναφέρθηκε πιο πάνω, με χρήση μεγαλύτερου αντιβάρου στην προέκταση του στροφάλου για την εξουδετέρωση μέρους της παλινδρομικής δύναμης $1^{ης}$ τάξης, με (αναπόφευκτα) δημιουργία συνιστώσας κατά τον οριζόντιο άξονα.

Συχνά, τοποθετούνται αποσβεστήρες κραδασμών, οι οποίοι, εκτός από τις παραπάνω αδρανειακές δυνάμεις, καλούνται να μετριάσουν και την επίδραση της ροπής ανατροπής, και συγκεκριμένα των τάξεων της 0,5 (για μονοκύλινδρο 4-X) και 1 (2-X και 4-X). Με δεδομένο ότι η ροπή ανατροπής περιλαμβάνει όρο από παλινδρομικές αλλά και δυνάμεις εξ αερίων, παρουσιάζονται, γενικά, όλες οι ακέραιες τάξεις, ενώ ειδικά σε 4-X λειτουργία, και οι “μισές”.

4.3 Ζυγοστάθμιση πολυκύλινδρων κινητήρων εν-σειρά διάταξης

Στην περίπτωση πολυκύλινδρων κινητήρων, εάν η διάταξη των κυλίνδρων είναι σε σειρά, σε κάθε στρόφαλο εμφανίζονται οι δυνάμεις από τον οικείο κύλινδρο, όπως στον μονοκύλινδρο κινητήρα. Εάν, όμως, η διάταξη των κυλίνδρων είναι τέτοια ώστε σε κάθε στρόφαλο να αρθρώνονται περισσότεροι από έναν διωστήρες (π.χ. κινητήρες V ή W ή αστεροειδείς), τότε σε κάθε στρόφαλο ασκείται η συνισταμένη από τους σχετικούς κυλίνδρους. Έτσι στη στροφαλοφόρο άτρακτο δρουν περισσότερες δυνάμεις, που εφαρμόζονται στις θέσεις των στροφάλων.

Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, οι παλινδρομικές δυνάμεις ($1^{ης}$ και $2^{ης}$ τάξης) είναι συν-επίπεδες (μέσο διάμηκες επίπεδο του κινητήρα για διάταξη σειράς). Οι περιστροφικές μαζικές δυνάμεις βρίσκονται γενικά σε διαφορετικά επίπεδα κάθετα στην άτρακτο του κινητήρα (στη θέση του αντίστοιχου στροφάλου).

Η αναγωγή των δυνάμεων αυτών σε ένα οποιοδήποτε σημείο θα δώσει εν γένει¹ μία συνισταμένη δύναμη R και μία συνισταμένη ροπή M, που είναι το τελικό αποτέλεσμα της

¹ Στην περίπτωση που R=0, τότε η τιμή της M είναι ανεξάρτητη του σημείου αναγωγής.

δράσεως των μαζικών δυνάμεων. Αυτές μεταφέρονται στο κέλυφος και στη θεμελίωση της μηχανής.

Φυσικά οι R_I και R_{II} έχουν ορισμένη διεύθυνση (άξονας κυλίνδρων) και μεταβλητό μέγεθος, ενώ η R_r έχει σταθερό μέτρο και μεταβαλλόμενη εκάστοτε διεύθυνση. Τα αντίστοιχα πράγματα ισχύουν για τις αντίστοιχες ροπές M_I , M_{II} και M_r , θεωρώντας τα διανύσματά τους ή καλύτερα αυτά στραμμένα κατά 90° , ώστε να πέσουν στο επίπεδο ενεργείας των αντίστοιχων δυνάμεων. Σημειώνεται ότι τα διανυσματικά διαγράμματα συνθέσεως των Z_I και P_r ή των αντίστοιχων ροπών, προς καθορισμό των R_I , R_r , M_I και M_r , είναι ακριβώς τα ίδια, αλλά έχουν διαφορετική σημασία.

Ο προσδιορισμός της συνισταμένης δυνάμεως και ροπής, λόγω μαζικών δυνάμεων, θα γίνει με τις γνωστές μεθόδους της Μηχανικής, συνήθως με τη βοήθεια της διανυσματικής παραστάσεως (δηλαδή αστέρες «βοηθητικών» διανυσμάτων Z_I και Z_{II}) των μαζικών δυνάμεων και ροπών. Για τις ροπές θα θεωρηθούν τα διανύσματά τους στραμμένα κατά 90° , όπως αναφέρθηκε, ώστε να συμπέσουν στο επίπεδο ενεργείας των αντίστοιχων δυνάμεων, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα οι αστέρες «βοηθητικών» διανυσμάτων των αντίστοιχων δυνάμεων. Προφανώς οι αστέρες «βοηθητικών» διανυσμάτων των R_I και M_I αποτελούν (με διαφορετική κλίμακα) τους πραγματικούς αστέρες για τις R_r και M_r , αντίστοιχα.

Για κινητήρες σειράς με αριθμό κυλίνδρων z , στην πολύ συνηθισμένη περίπτωση των ισοδιαστημάτων αναφλέξεως, η μικρότερη γωνία ε μεταξύ δύο στροφάλων είναι $\varepsilon=360^\circ/z$ για 2- X κινητήρες ή για 4- X κινητήρες με περιττό αριθμό κυλίνδρων, ενώ είναι $\varepsilon=720^\circ/z$ για 4- X κινητήρες με άρτιο αριθμό κυλίνδρων (εδώ τα στρόφαλα συμπίπτουν ανά δύο).

Έτσι οι αστέρες «βοηθητικών» διανυσμάτων για τις Z_I και Z_{II} και πραγματικών διανυσμάτων για τις P_r (που είναι ίδιοι με τους «βοηθητικούς» αστέρες για τις Z_I) δίνουν συνισταμένη ίση με το μηδέν (προσοχή στο ότι οι αντίστοιχες ροπές δεν είναι κατ' ανάγκη μηδέν), με εξαίρεση το δικύλινδρο 2- X ή 4- X κινητήρα και το μεγάλης πρακτικής σημασίας τετρακύλινδρο 4- X κινητήρα που έχει ελεύθερες παλινδρομικές δυνάμεις 2^{ης} τάξης.

Σχετικά παραδείγματα και εφαρμογή του προγράμματος που δημιουργήθηκε, με βάση την μεθοδολογία υπολογισμού που θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο, για επιλεκτικές περιπτώσεις κινητήρων παρουσιάζονται στα δύο επόμενα κεφάλαια.

4.4 Πρόγραμμα Υπολογιστικής Ανάλυσης

Να αναφέρουμε εδώ ότι το πρόγραμμα γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran 95 με τη βοήθεια του compiler Force 2.0 . Το πρόγραμμα αρχίζει ζητώντας από τον χρήστη να του δώσει το είδος του κινητήρα, δηλαδή αν είναι 2-X ή 4-X, τον αριθμό κυλίνδρων καθώς και τη σειρά ανάφλεξης. Γίνεται χρήση δύο υπορουτίνων, μία που υπολογίζει το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων και μια των ροπών οι οποίες καλούνται κάθε φορά από το κύριο πρόγραμμα για τον αντίστοιχο υπολογισμό.

Όπως είναι φανερό πρόκειται για ένα αδιάστατο υπολογισμό καθώς δεν γίνεται αναφορά σε διαστάσεις ούτε στροφές του κινητήρα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι παραμένουσες οι δυνάμεις/ροπές που υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση αναλογικά δεν επηρεάζονται από τις διαστάσεις του κινητήρα και την ταχύτητα περιστροφής. Δηλαδή, το πρόγραμμα υπολογίζει τους συντελεστές που προκύπτουν από το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων και ροπών, τους οποίους πολλαπλασιαζόμενους με τους κατάλληλους αριθμούς διαστάσεων προκύπτουν οι δυνάμεις/ροπές για τον επιθυμητό κινητήρα. Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθούν παραδείγματα υπολογισμών διάφορων περιπτώσεων όπου στο τέλος κάθε παραδείγματος παρατίθεται εικόνα με τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα και συγκρίνεται με τα υπολογισθέντα με βάση τη γνωστή μεθοδολογία υπολογισμού διανυσμάτων.

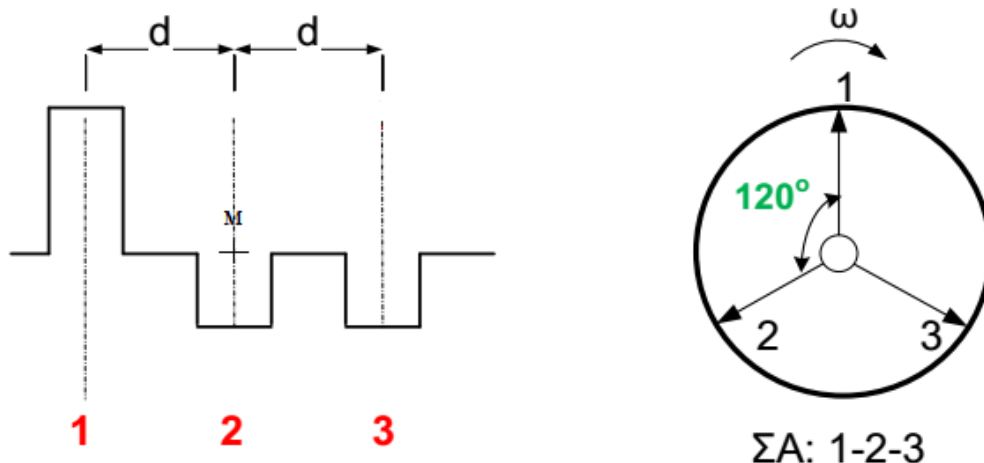
5. 2-X Κινητήρες Σειράς

5.1 3-κύλινδρος 2-X Κινητήρας



Σχήμα 5.1.6 - Στροφαλοφόρος άτρακτος 3-κύλινδρου κινητήρα εν-σειρά διάταξης.[4]

Η μορφή της στροφαλοφόρου ατράκτου φαίνεται στο Σχήμα 5.1.1. Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης δίνονται στο σχήμα 5.1.2. Η γωνία σφήνωσης των στροφάλων ϵ είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\varphi_a = 360^\circ/z = 360^\circ/3 = 120^\circ$. Δοθείσης της διάταξης των στροφάλων στο Σχήμα 5.1.2, η σειρά ανάφλεξης είναι 1-2-3.

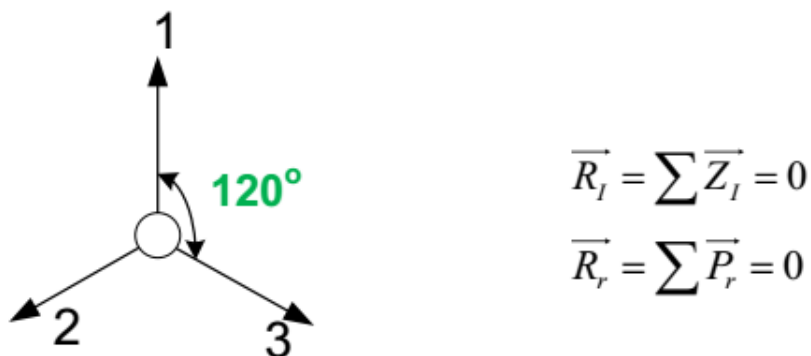


Σχήμα 5.1.2 Διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 3-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές Δυνάμεις 1^{ης} τάξης

Για κάθε κύλινδρο, η παλινδρομούσα δύναμη δίνεται από την προβολή στον άξονα του κυλίνδρου διανύσματος μέτρου $P = Z_I = m_p r \omega^2$ που έχει την εκάστοτε διεύθυνση του στροφάλου. Με βάση, την πρόταση ότι το άθροισμα των προβολών των συνιστασών πολλών διανυσμάτων σε ένα άξονα ισούται με την προβολή της συνισταμένης τους, σχεδιάζονται τα «βοηθητικά» διανύσματα Z_I και η συνισταμένη τους προβάλλεται στον άξονα των κυλίνδρων.

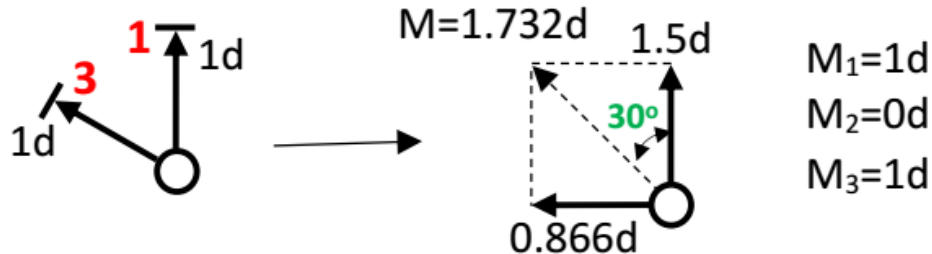
Το διάγραμμα των διανυσμάτων της 1^{ης} τάξης φαίνεται στο Σχήμα 5.1.3 για την θέση της ατράκτου, στην οποία το στρόφαλο του πρώτου (1) κυλίνδρου βρίσκεται στο ΑΝΣ.



Σχήμα 5.2.3 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 3-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

Στην περίπτωση αυτή, λόγω του συμμετρικού αστέρα των «βοηθητικών» διανυσμάτων, η συνισταμένη τους είναι μηδενική, δηλαδή $\vec{R}_I = \sum \vec{Z}_I = \vec{0}$, άρα και η προβολή της στην κοινή διεύθυνση των αξόνων των κυλίνδρων, δηλαδή η συνισταμένη των $Z_I \cos \varphi$ όλων των κυλίνδρων είναι σε κάθε γωνία φ μηδενική.

Εξετάζουμε επιπλέον, την πιθανή ύπαρξη συνισταμένης ροπής των δυνάμεων αυτών. Η στιγμιαία τιμή της ροπής από την $Z_I \cos \varphi$ κάθε κυλίνδρου θα ισούται με την τιμή επί την απόσταση του οικείου κυλίνδρου από το σημείο αναγωγής. Στο Σχήμα 5.1.4 φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει την ρπή M_I με σημείο αναγωγής το κέντρο της στροφαλοφόρου ατράκτου M του Σχήματος 5.1.2.



Σχήμα 5.1.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 3-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Επομένως, το μέτρο του διανύσματος M_I είναι $1.732Z_I d$ και η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 1.732Z_I d \cos(\varphi - 30^\circ) \quad (5.1.1)$$

- Δυνάμεις από Περιστρεφόμενες μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 5.1.3 και 5.1.4 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

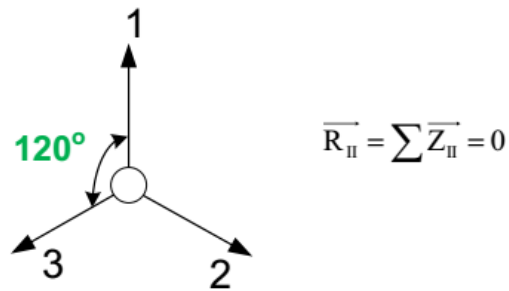
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (5.1.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 1.732 P_r d \cos(\varphi - 30^\circ) \quad (5.1.3)$$

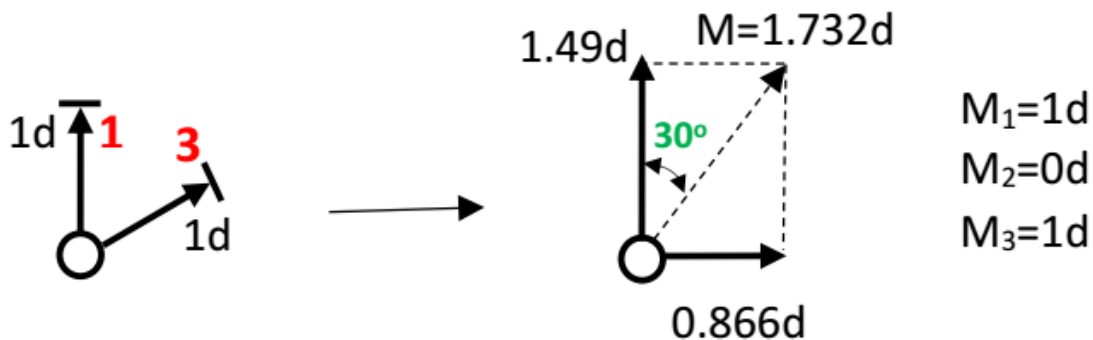
• **Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης**

Με ανάλογο τρόπο με αυτόν των παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης} τάξης, σχεδιάζονται τα «βοηθητικά» διαγράμματα για τις δυνάμεις 2^{ης} τάξης και τις ροπές τους στα Σχήματα 5.1.5 και 5.1.6 αντίστοιχα.

Η συνισταμένη δύναμη είναι μηδενική λόγω συμμετρίας, άρα και η προβολή της στην κοινή διεύθυνση των αξόνων των κυλίνδρων, δηλαδή η συνισταμένη των $Z_{II} \cos 2\varphi$ όλων των κυλίνδρων είναι σε γωνία φ μηδενική.



Σχήμα 5.1.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 3-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



Σχήμα 5.1.6 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες, 3-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ns} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_e r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.1.6 το μέτρο του διανύσματος M_{II} είναι $1.732Z_{II}d$ και επομένως η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\overline{M_{II}} = \sum \overline{Z_r} d = 4Z_{II}d \cos(2\varphi - 30^\circ) \quad (5.1.4)$$

- **Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran**

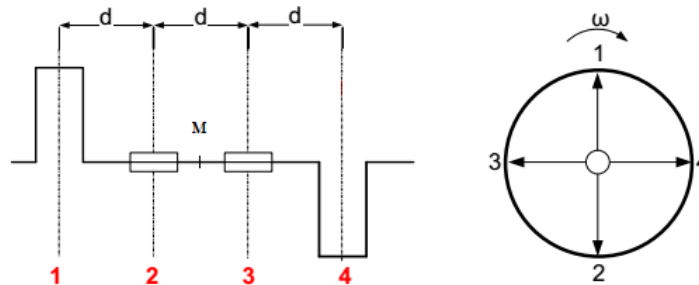
Αρχικά να θυμίσουμε ότι το πρόγραμμα υπολογισμού που αναπτύχθηκε δέχεται και ζητά ως δεδομένα από τον χρήστη τον τύπο του κινητήρα (αν είναι δίχρονος ή τετράχρονος), τον αριθμό κυλίνδρων, και τέλος την σειρά ανάφλεξης. Υπολογίζει τη συνισταμένη των δυνάμεων και ροπών αντίστοιχα, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα σαν μορφή συντελεστών που προκύπτουν από το διανυσματικό άθροισμα αντίστοιχα για κάθε είδος των παραμενουσών δυνάμεων και ροπών. Έτσι στο συγκεκριμένο παράδειγμα δίνουμε ως δεδομένα στο πρόγραμμα το είδος του κινητήρα, 2-Χ άρα του δίνουμε 2, τον αριθμό κυλίνδρων που είναι 3, καθώς και τη σειρά ανάφλεξης που είναι 1-2-3.

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.

```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικαζ\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
2
give number of cylinders
3
Give ignition order
1
2
3
ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°
RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°
RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°
ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 1.7321
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = -30.00
°
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 1.7321
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = -30.00
°
RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 1.7321
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 30.00
°
-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
```

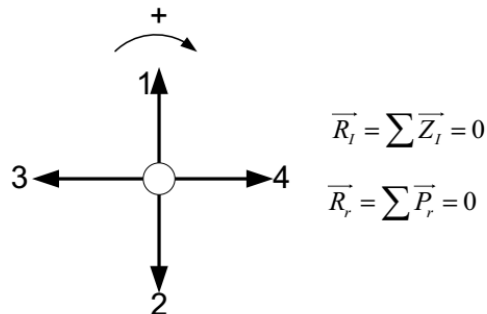
5.2 4-κύλινδρος 2-Χ κινητήρας

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης φαίνονται στο Σχήμα 5.2.1 η γωνία σφήνωσης των στροφάλων, ε , είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\varphi_\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/4 = 90^\circ$. Δοθείσης της διάταξης των στροφάλων στο Σχήμα 5.2.1 η σειρά ανάφλεξης είναι : 1-3-2-4.



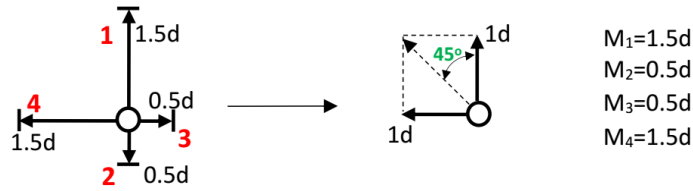
Σχήμα 5.2.1 Διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 4-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές δυνάμεις 1^{ης} τάξης



Σχήμα 5.2.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 4-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

Στο Σχήμα 5.2.3, φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει την ροπή M_I με σημείο αναγωγής το κέντρο M του Σχήματος 5.2.1.



Σχήμα 5.2.3 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 4-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Επομένως, το μέτρο του διανύσματος M_I είναι $\sqrt{2}Z_I d$ και η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = \sqrt{2}Z_I d \cos(\varphi - 45^\circ) \quad (5.2.1)$$

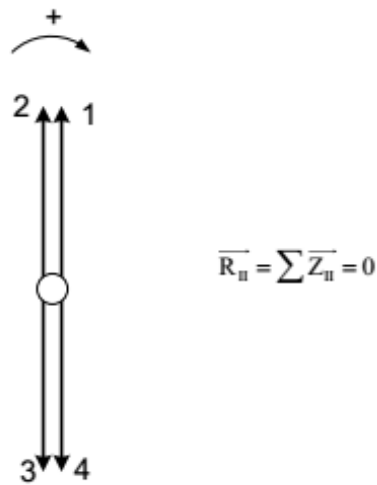
- **Δυνάμεις και Ροπές από Περιστρεφόμενες Μάζες**

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 5.2.2 και 5.2.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

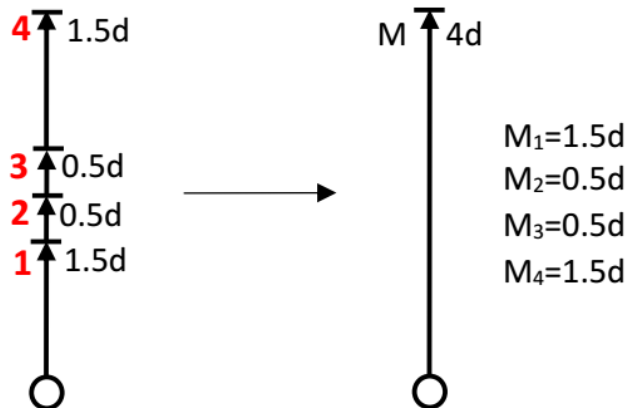
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (5.2.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = \sqrt{2}P_r d \cos(\varphi - 45^\circ) \quad (5.2.3)$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 5.2.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 4-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



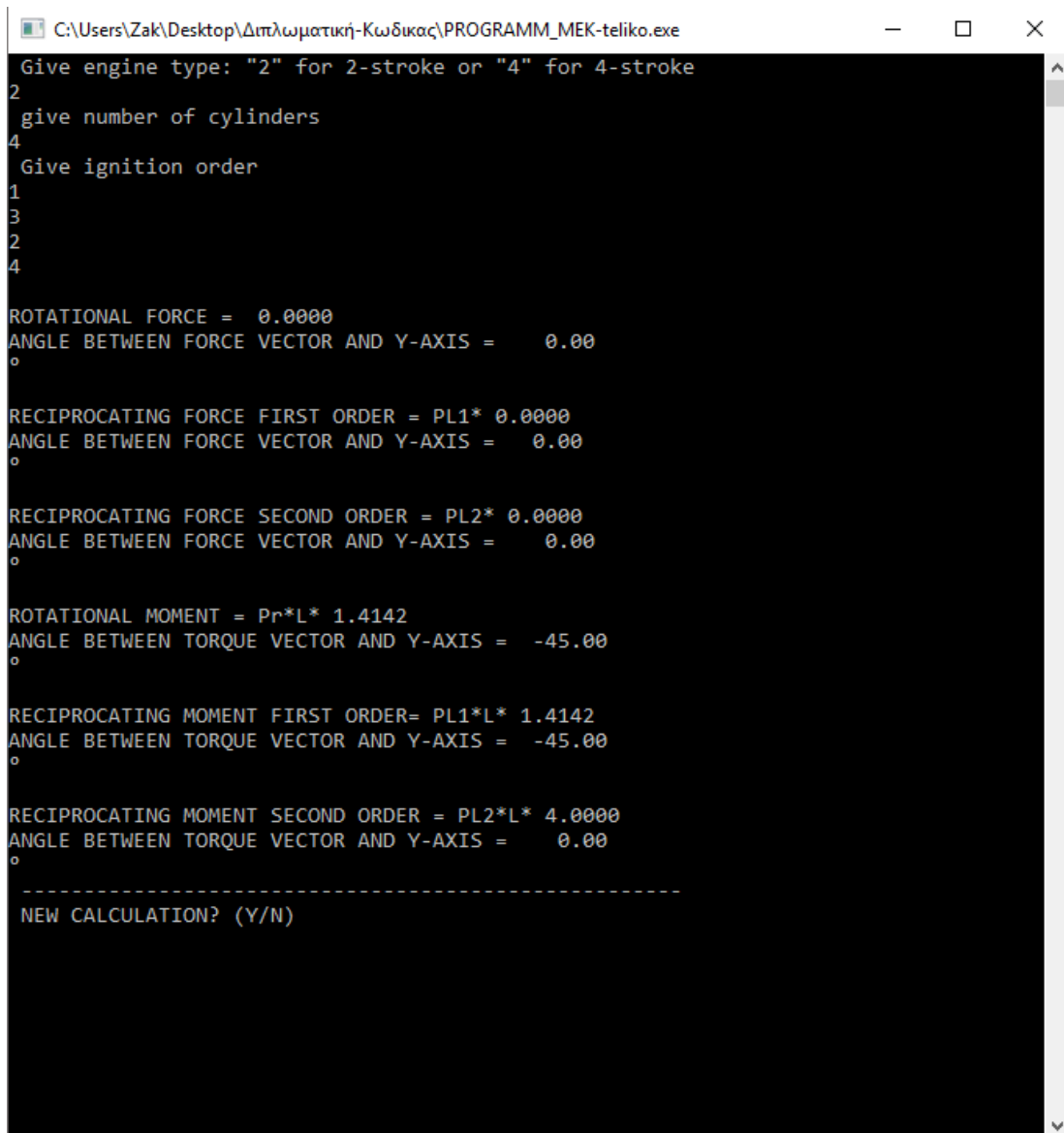
Σχήμα 5.2.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 4-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_e r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.2.5 το μέτρο του διανύσματος M_{II} είναι $4Z_{II}d$ και επομένως η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\overline{M_{II}} = \sum \overline{Z_r} d = 4Z_{II}d \cos 2\varphi \quad (5.2.4)$$

- Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
2
give number of cylinders
4
Give ignition order
1
3
2
4

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
0

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
0

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
0

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 1.4142
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = -45.00
0

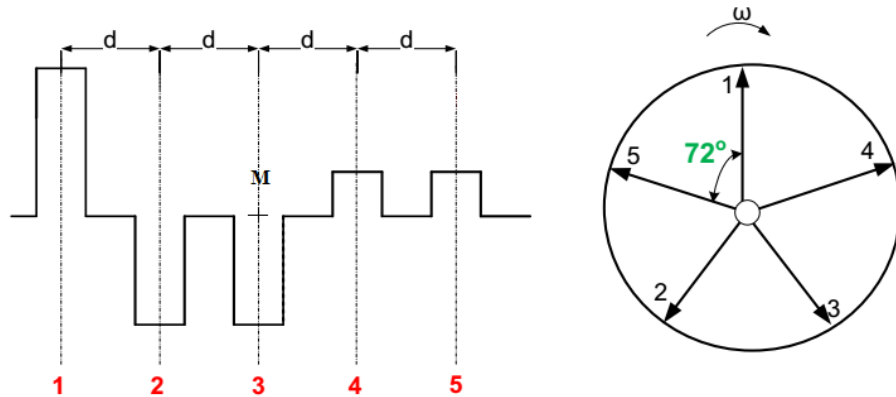
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 1.4142
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = -45.00
0

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 4.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
0

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
```

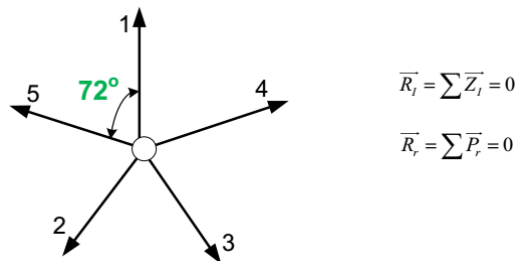
5.3 5-κύλινδρος 2-Χ κινητήρας

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης φαίνονται στο Σχήμα 5.3.1 η γωνία σφήνωσης των στροφάλων, ϵ , είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\phi_\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/5 = 72^\circ$. Δοθείσης της διάταξης των στροφάλων στο Σχήμα 5.3.1 η σειρά ανάφλεξης είναι 1-5-2-3-4.



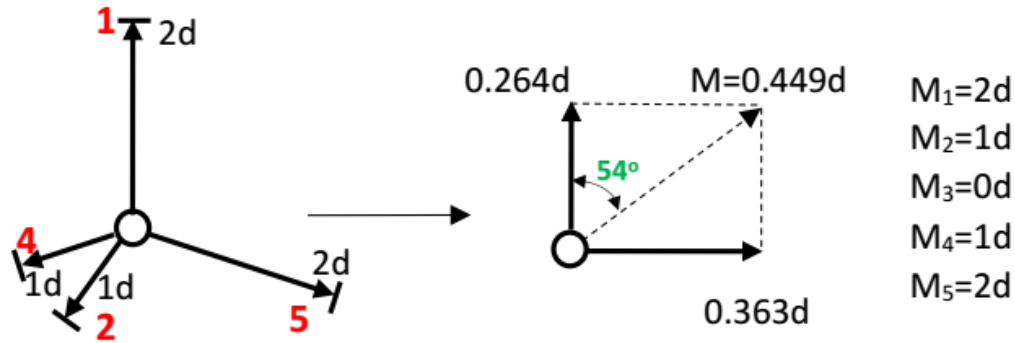
Σχήμα 5.3.1 Διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 5-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές δυνάμεις 1^{ης} τάξης



Σχήμα 5.3.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 5-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

Στο Σχήμα 5.3.3, φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει την ροπή M_I με σημείο αναγωγής το κέντρο M του Σχήματος 5.3.1, δηλαδή τον κύλινδρο 3.



Σχήμα 5.3.3 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 5-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Επομένως, το μέτρο του διανύσματος M_I είναι $0.449Z_I d$ και η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του τροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 0.449Z_I d \cos(\varphi + 54^\circ) \quad (5.3.1)$$

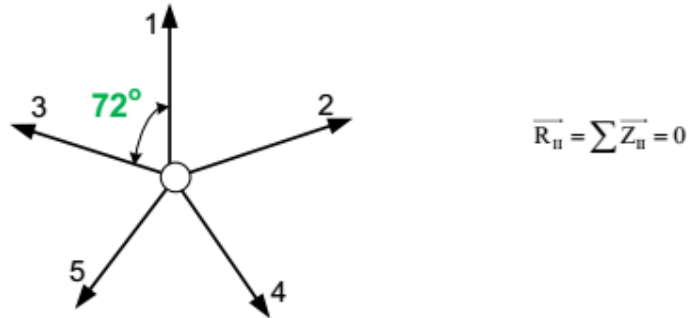
- Δυνάμεις και Ροπές από Περιστρεφόμενες Μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 5.3.2 και 5.3.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

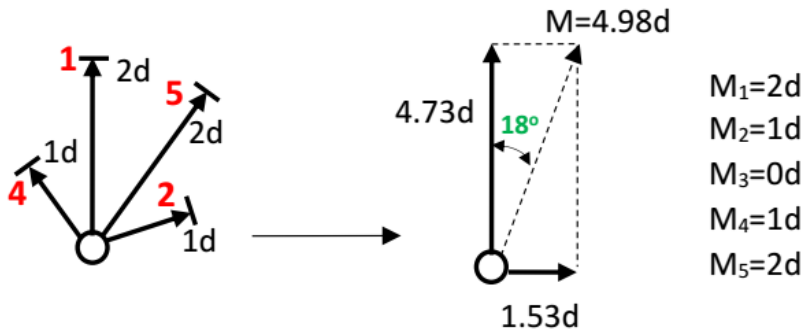
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (5.3.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 0.449P_r d \cos(\varphi + 54^\circ) \quad (5.3.3)$$

• Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 5.3.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 5-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



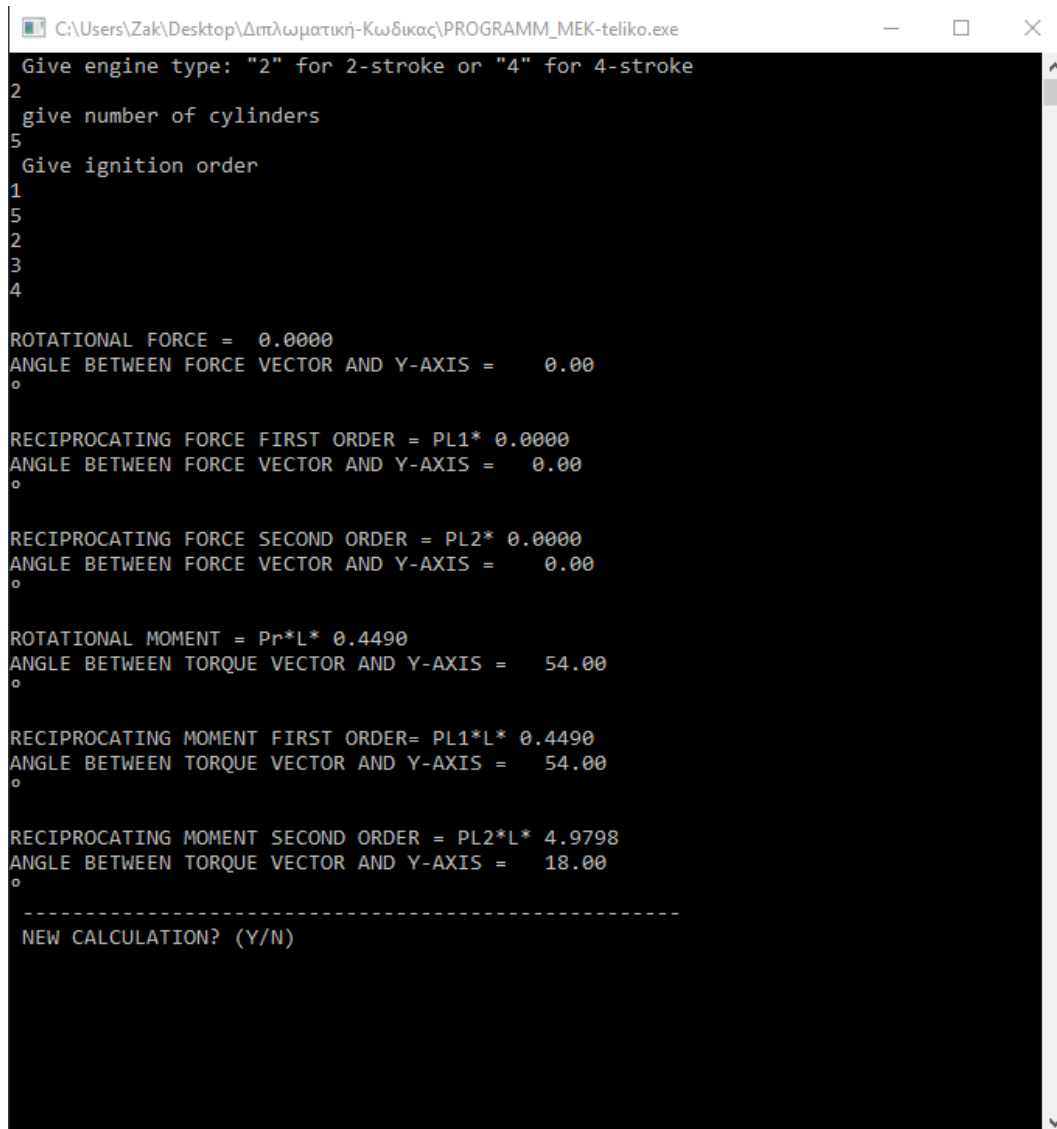
Σχήμα 5.3.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 5-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_e r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.3.5 το μέτρο του διανύσματος M_{II} είναι $4.98Z_{II}d$ και επομένως η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_r d = 4.98Z_{II}d \cos(2\varphi + 18^\circ) \quad (5.3.4)$$

- Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
2
give number of cylinders
5
Give ignition order
1
5
2
3
4

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.4490
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 54.00
°

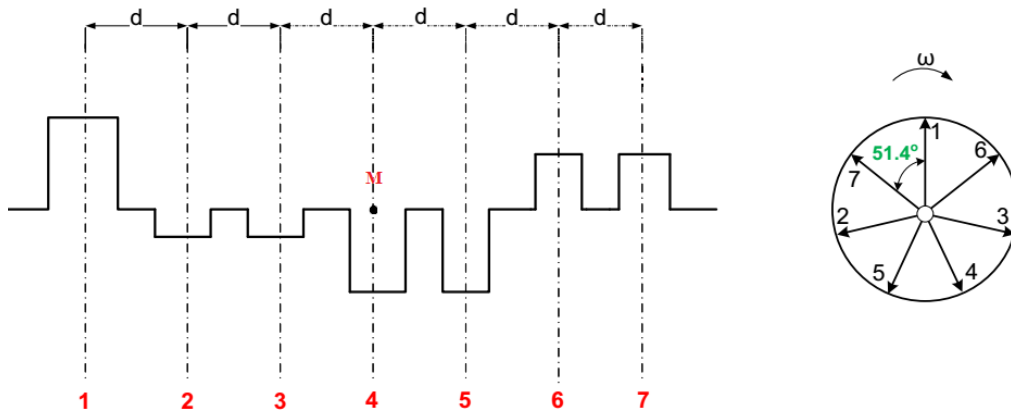
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.4490
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 54.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 4.9798
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 18.00
°

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
```

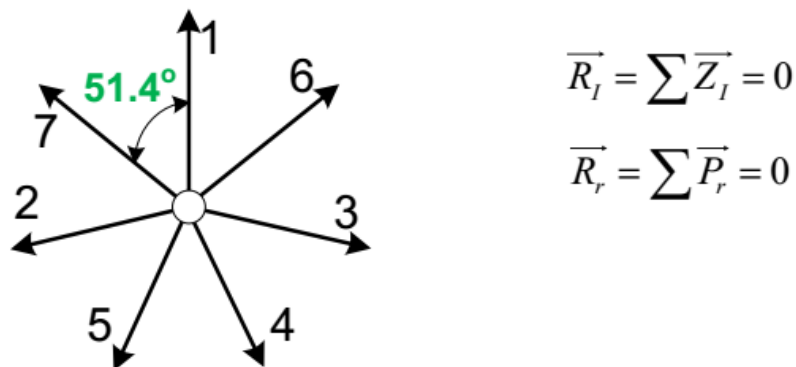
5.4 7-κύλινδρος 2-Χ κινητήρας

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης φαίνονται στο Σχήμα 5.4.1 η γωνία σφήνωσης των στροφάλων, ϵ , είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\phi_a = 360^\circ/z = 360^\circ/7 = 51.4^\circ$. Δοθείσης της διάταξης των στροφάλων στο Σχήμα 5.4.1 η σειρά ανάφλεξης είναι : 1-7-2-5-4-3-6.



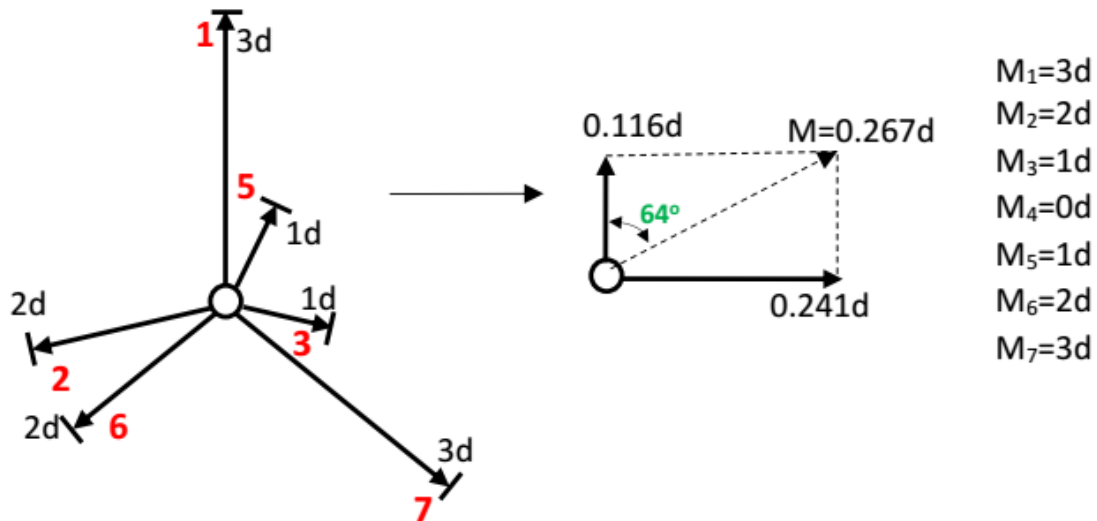
Σχήμα 5.4.1 Διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 7-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές δυνάμεις 1^{ης} τάξης



Σχήμα 5.4.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 7-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]

Στο Σχήμα 5.4.3, φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει την ροπή M_I με σημείο αναγωγής το κέντρο M του Σχήματος 5.4.1, δηλαδή τον κύλινδρο 4.



Σχήμα 5.4.3 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 7-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Επομένως, το μέτρο του διανύσματος M_I είναι $0.267Z_I d$ και η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 0.267Z_I d \cos(\varphi + 64^\circ) \quad (5.4.1)$$

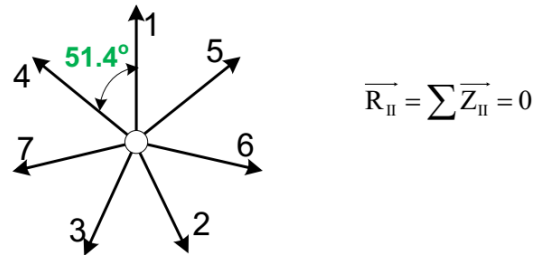
- **Δυνάμεις και Ροπές από Περιστρεφόμενες Μάζες**

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 5.4.2 και 5.4.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

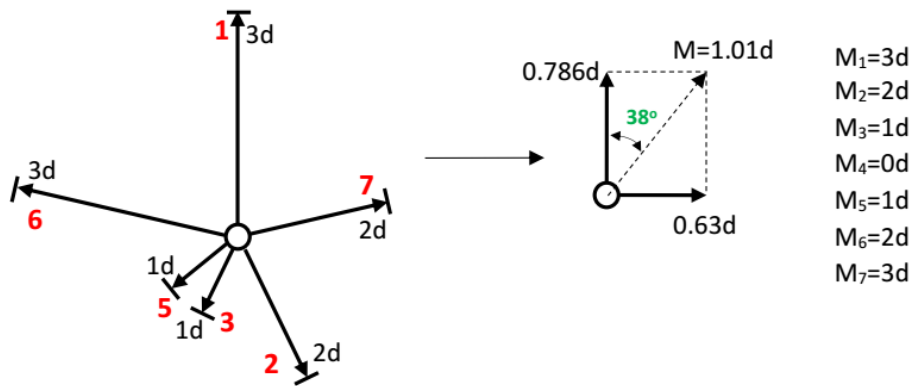
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (5.4.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 0.499P_r d \cos(\varphi + 64^\circ) \quad (5.4.3)$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 5.4.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 7-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



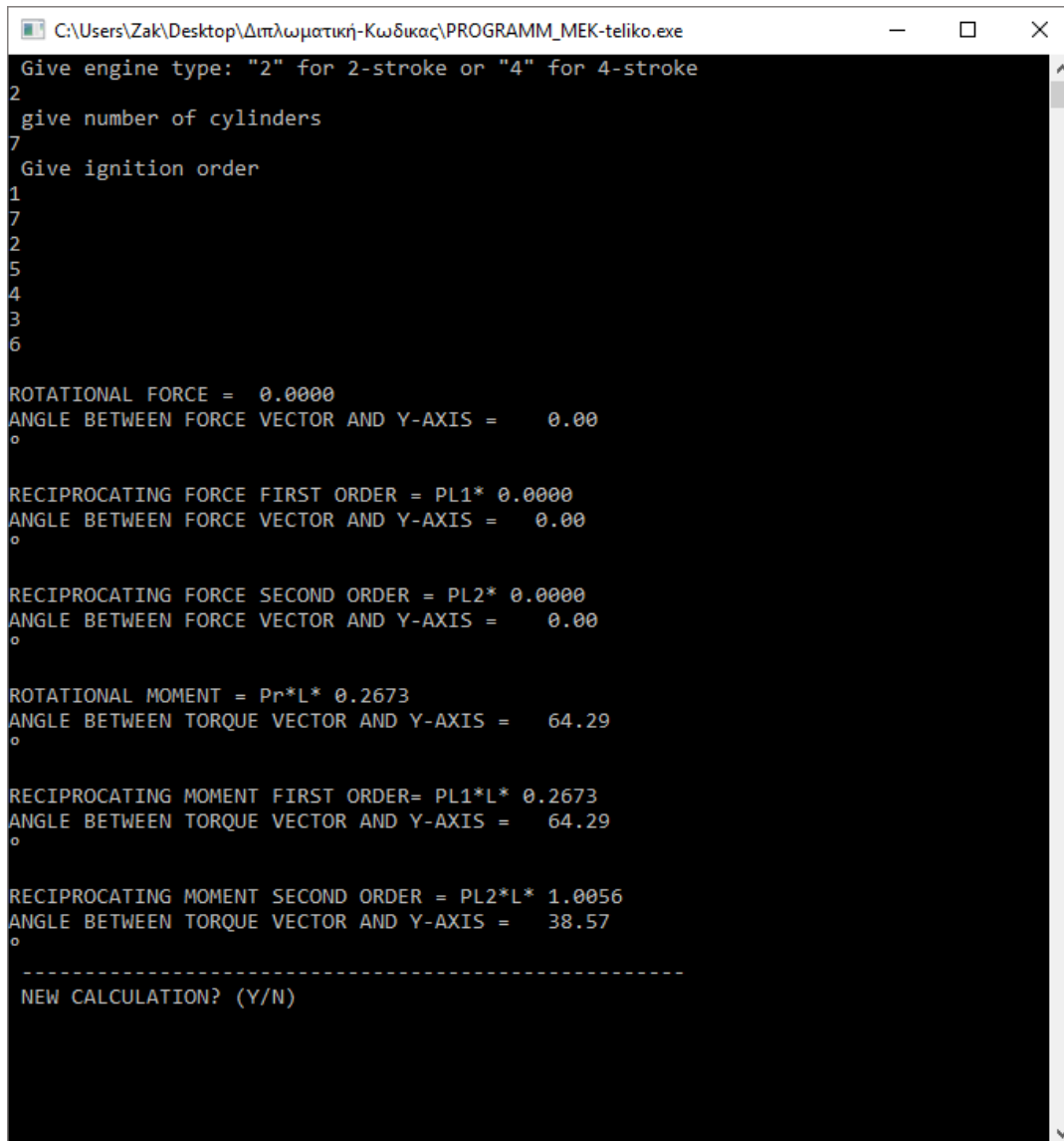
Σχήμα 5.4.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 7-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_e r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.4.5 το μέτρο του διανύσματος M_{II} είναι $1.01Z_{II}d$ και επομένως η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_r d = 1.01Z_{II}d \cos(2\varphi + 38^\circ) \quad (5.4.4)$$

- Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
2
give number of cylinders
7
Give ignition order
1
7
2
5
4
3
6

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.2673
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 64.29
o

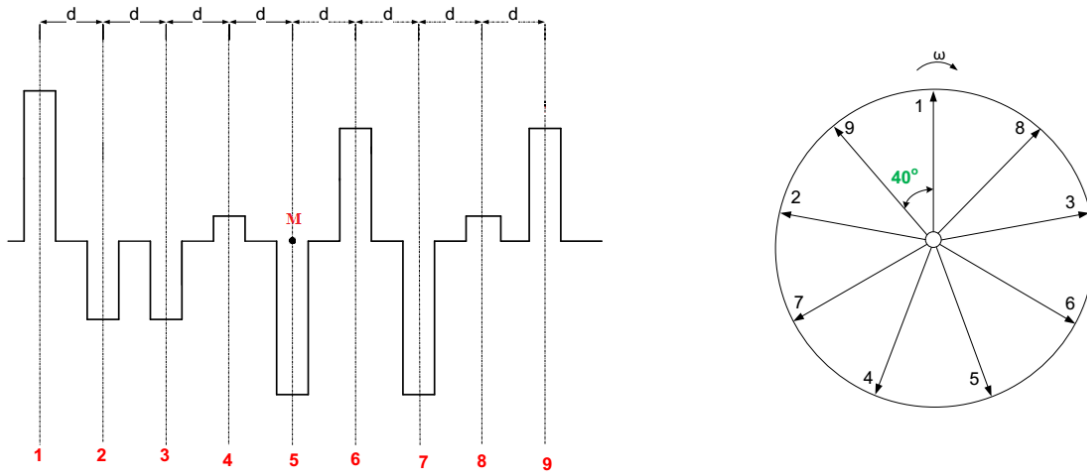
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.2673
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 64.29
o

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 1.0056
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 38.57
o

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
```

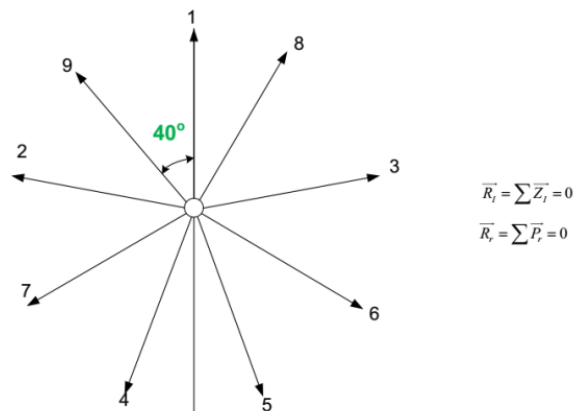
5.5 9-κύλινδρος 2-X κινητήρας (Σ.Α.1-9-2-7-4-5-6-3-8)

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης φαίνονται στο Σχήμα 5.5.1 η γωνία σφήνωσης των στροφάλων, ϵ , είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\phi_\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/9 = 40^\circ$. Δοθείσης της διάταξης των στροφάλων στο Σχήμα 5.5.1 η σειρά ανάφλεξης είναι : 1-9-2-7-4-5-6-3-8.



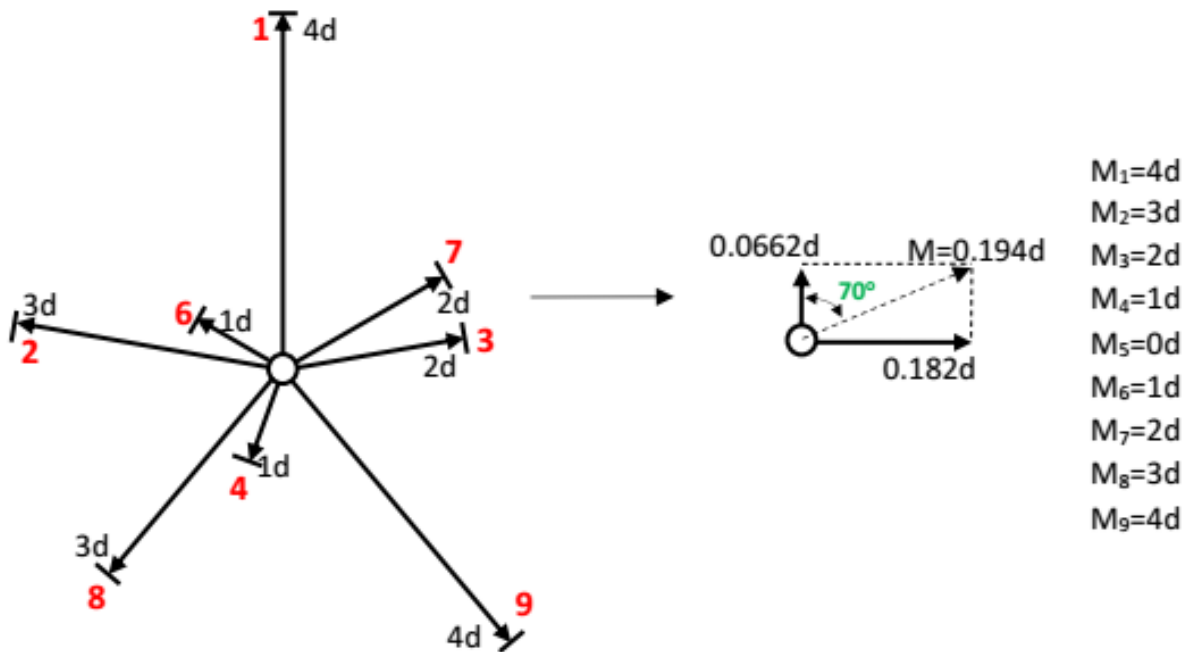
Σχήμα 5.5.1 Διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 9-κύλινδρου 2-X κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές δυνάμεις 1^{ης} τάξης



Σχήμα 5.5.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 9-κύλινδρου 2-X κινητήρα.[4]

Στο Σχήμα 5.5.3, φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει την ροπή M_I με σημείο αναγωγής το κέντρο M του Σχήματος 5.5.1, δηλαδή τον κύλινδρο 5.



Σχήμα 5.5.3 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 9-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Επομένως, το μέτρο του διανύσματος M_I είναι $0.194Z_I d$ και η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 0.194Z_I d \cos(\varphi + 70^\circ) \quad (5.5.1)$$

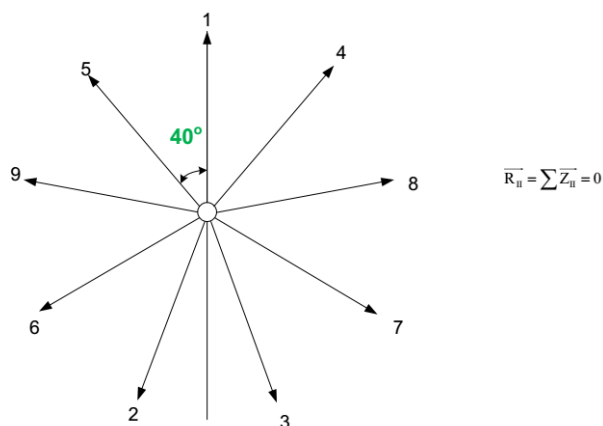
• **Δυνάμεις και Ροπές από Περιστρεφόμενες Μάζες**

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 5.5.2 και 5.5.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

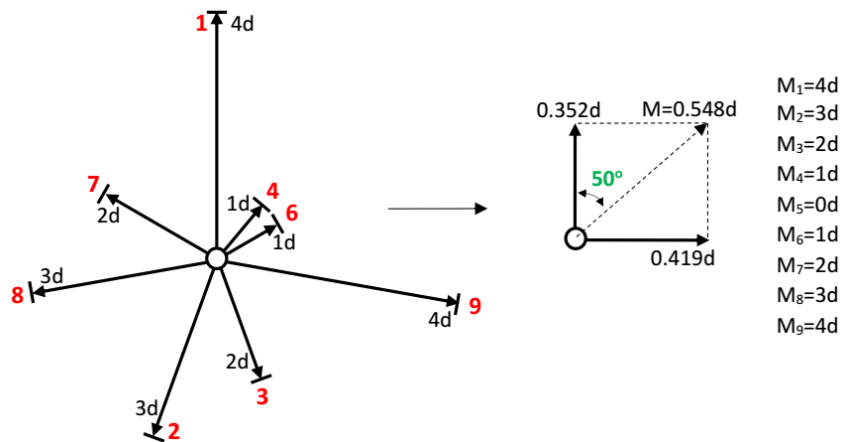
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (5.5.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 0.194P_r d \cos(\varphi + 70^\circ) \quad (5.5.3)$$

• Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 5.5.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 9-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



Σχήμα 5.5.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 9-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_r r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.5.5 το μέτρο του διανύσματος M_{II}

είναι $Z_{II}d$ και επομένως η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_{II} d = 0.548Z_{II}d \cos(2\varphi + 50^\circ) \quad (5.5.4)$$

- **Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran**

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.

```

C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
2
give number of cylinders
9
Give ignition order
1
9
2
7
4
5
6
3
8

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.1937
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 70.00
°

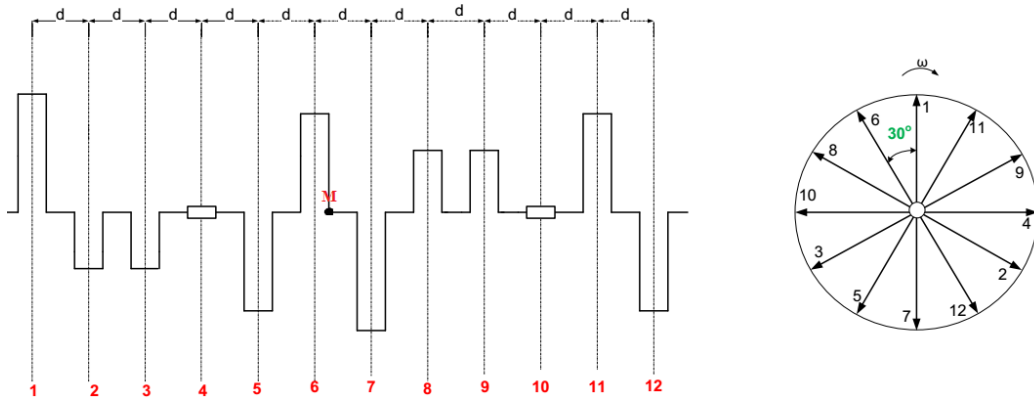
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.1937
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 70.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 0.5477
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 50.00
°

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
  
```

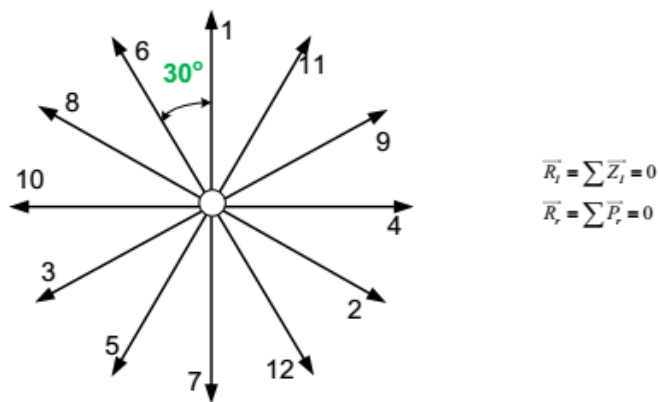
5.6 12-κύλινδρος 2-X κινητήρας

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης φαίνονται στο Σχήμα 5.6.1 η γωνία σφήνωσης των στροφάλων, ϵ , είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\phi_\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/12 = 30^\circ$. Δοθείσης της διάταξης των στροφάλων στο Σχήμα 5.6.1 η σειρά ανάφλεξης είναι : 1-6-8-10-3-5-7-12-2-4-9-11..



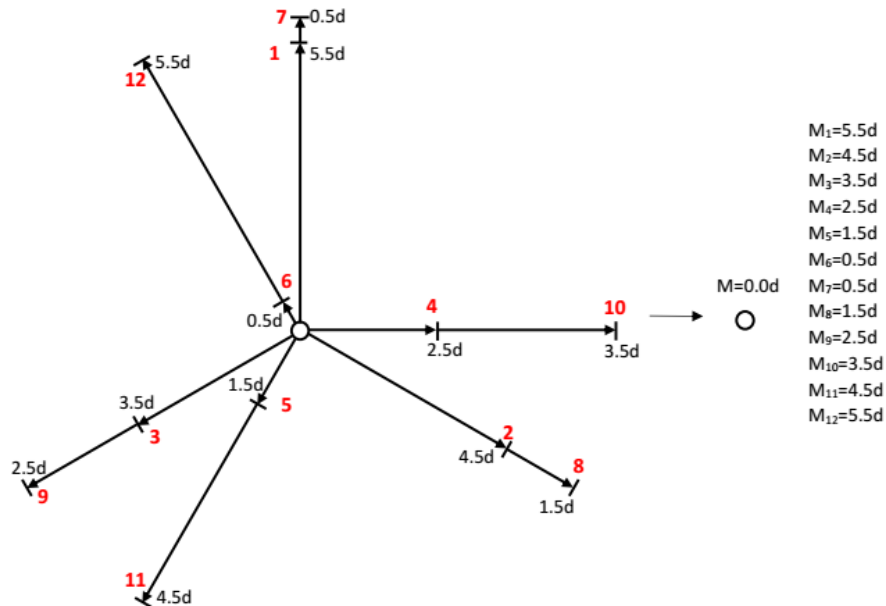
Σχήμα 5.6.1 Διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 12-κύλινδρου 2-X κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές δυνάμεις 1^{ης} τάξης



Σχήμα 5.6.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 12-κύλινδρου 2-X κινητήρα.[4]

Στο Σχήμα 5.6.3, φαίνεται το συνισταμένο διάνυσμα που παριστάνει την ροπή M_I με σημείο αναγωγής το κέντρο M του Σχήματος 5.6.1, δηλαδή το μέσο της απόστασης μεταξύ των κυλίνδρων 6 και 7.



Σχήμα 5.6.3 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 12-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Επομένως, το μέτρο του διανύσματος M_I είναι $0.0d$ και η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 0 \quad (5.6.1)$$

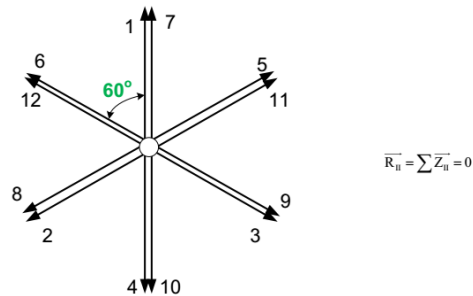
- **Δυνάμεις και Ροπές από Περιστρεφόμενες Μάζες**

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 5.6.2 και 5.6.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

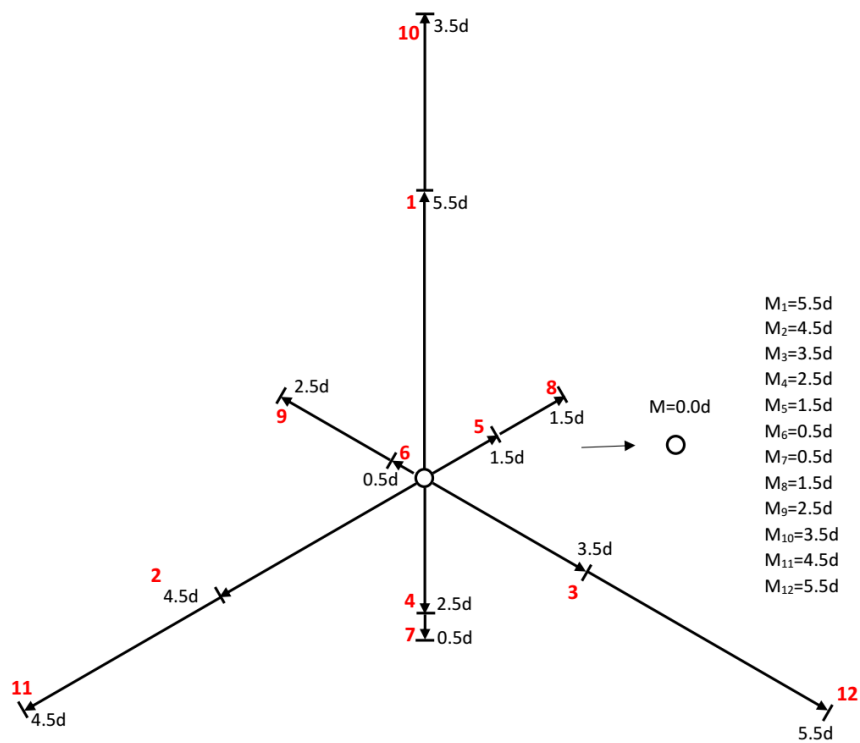
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (5.6.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 0 \quad (5.6.3)$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 5.6.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 12-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



Σχήμα 5.6.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 12-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα

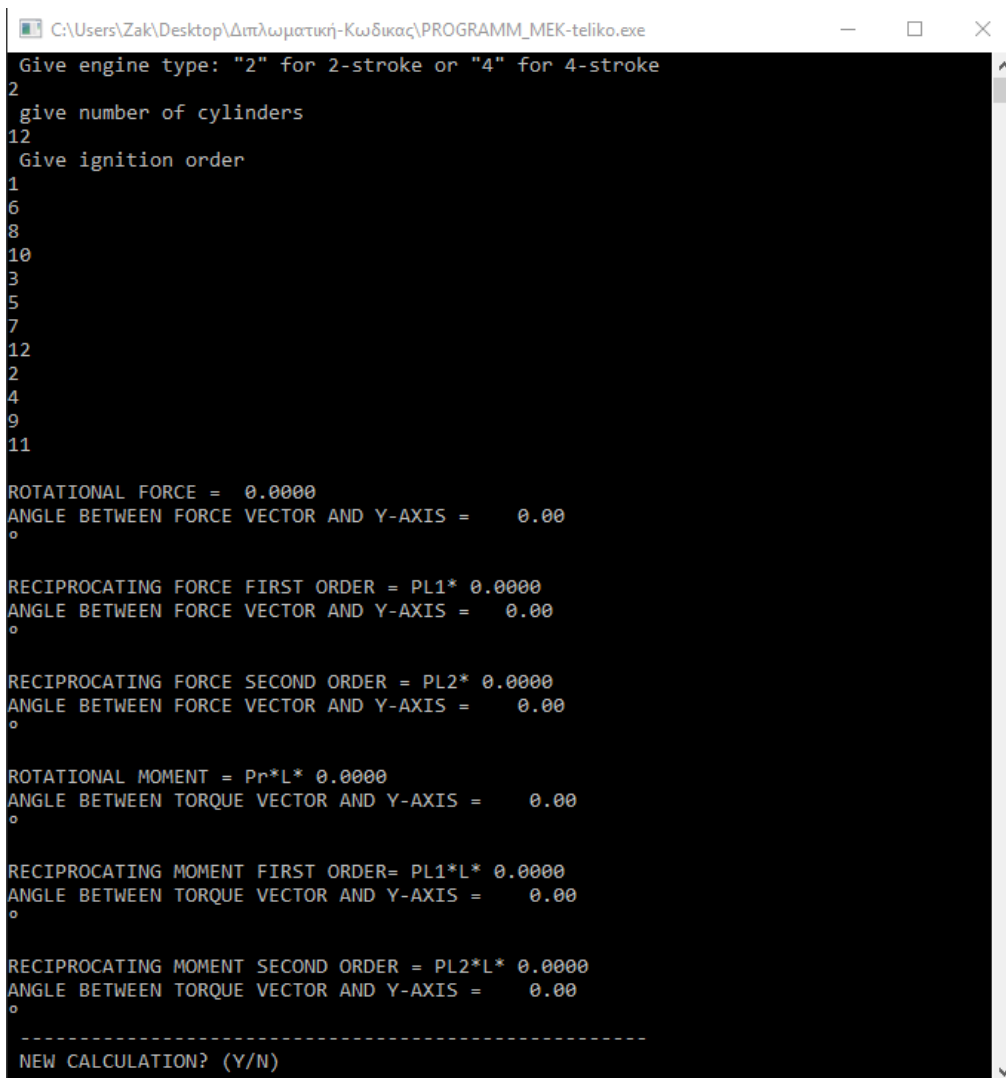
Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_e r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 5.6.5 το μέτρο του διανύσματος M_{II}

είναι μηδέν και επομένως η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_{II} d = 0 \quad (5.6.4)$$

- **Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran**

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
2
give number of cylinders
12
Give ignition order
1
6
8
10
3
5
7
12
2
4
9
11

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
```

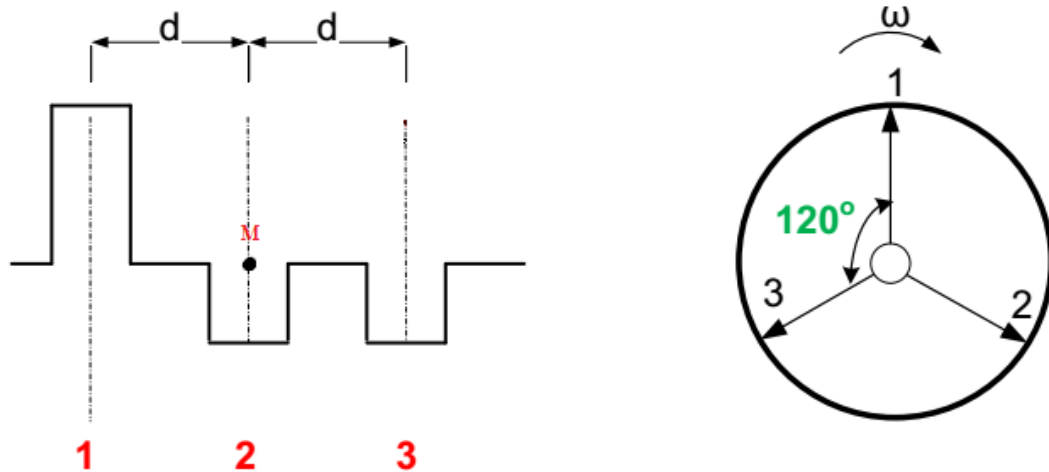
6. 4-X Κινητήρες Σειράς

6.1 3-κύλινδρος 4-X Κινητήρας



Σχήμα 6.1.1 Στροφαλοφόρος άτρακτος 3-κύλινδρου 4-X κινητήρα εν-σειρά διάταξης.[4]

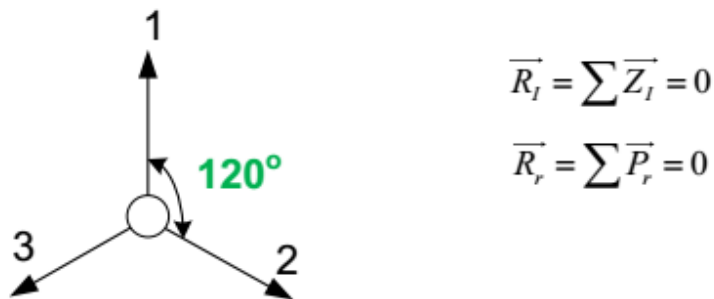
Η μορφή της στροφαλοφόρου άτρακτου φαίνεται στο Σχήμα 6.1.1. Η διάταξη της στροφαλοφόρου άτρακτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.2. Η γωνία ανάφλεξης $\Delta\varphi_{\alpha} = 720^{\circ}/z = 720^{\circ}/3 = 240^{\circ}$. Με δεδομένη τη διάταξη των στροφάλων στο σχήμα 6.1.2, η σειρά ανάφλεξης του κινητήρα είναι 1-2-3.



Σχήμα 6.1.2 Σχηματική διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 3-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]

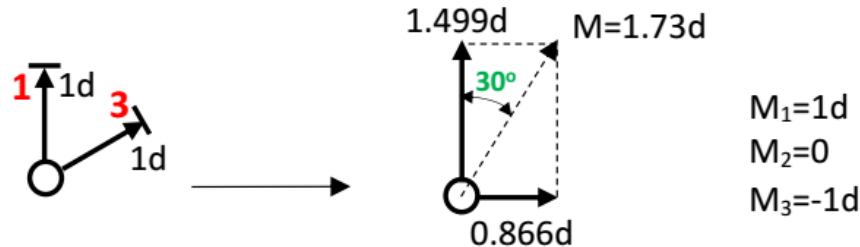
- **Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 1^{ης} τάξης**

Το διάγραμμα των διανυσμάτων παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης} τάξης φαίνεται στο Σχήμα 6.1.3 για τη θέση της ατράκτου στην οποία το στρόφαλο του κυλίνδρου No.1 βρίσκεται στο ΑΝΣ. Λόγω της συμμετρίας των βοηθητικών διανυσμάτων, η συνισταμένη τους είναι μηδενική, δηλαδή $\vec{R}_l = \sum \vec{Z}_l = 0$, άρα και η προβολή της στην κοινή διεύθυνση των αξόνων των κυλίνδρων, δηλαδή η συνισταμένη των $Z_l \cos \varphi$ όλων των κυλίνδρων, είναι σε κάθε γωνία φ μηδενική, άρα η συνολική παλινδρομική δύναμη 1^{ης} τάξης μηδενίζεται.



Σχήμα 6.1.3 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 3-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα σειράς.[4]

Εξετάζουμε, επιπλέον, την πιθανή ύπαρξη συνισταμένης ροπής των δυνάμεων αυτών. Στο Σχήμα 6.1.4 φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει τη ροπή M_I με σημείο αναγωγής το μέσο M του Σχήματος 6.1.2.



Σχήμα 6.1.4 Διάγραμμα ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες, και από περιστρεφόμενες μάζες 3-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.

Επομένως, το μέτρο του διανύσματος M_I είναι $1.732Z_I d$ και η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 1.732Z_I d \cos(\varphi + 30^\circ) \quad (6.1.1)$$

- Δυνάμεις από Περιστρεφόμενες μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 6.1.3 και 6.1.4 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

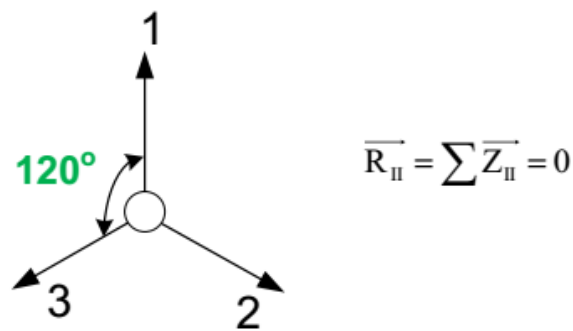
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (6.1.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 1.732P_r d \cos(\varphi + 30^\circ) \quad (6.1.3)$$

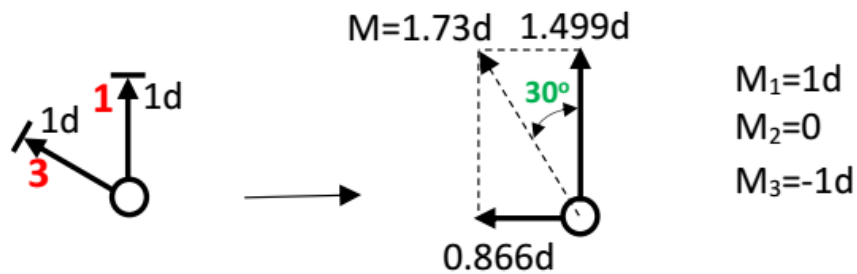
- **Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης**

Με ανάλογο τρόπο με αυτόν των παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης} τάξης, σχεδιάζονται τα «βοηθητικά» διαγράμματα για τις δυνάμεις 2^{ης} τάξης και τις ροπές τους στα Σχήματα 6.1.5 και 6.1.6 αντίστοιχα.

Η συνισταμένη δύναμη είναι μηδενική λόγω συμμετρίας, άρα και η προβολή της στην κοινή διεύθυνση των αξόνων των κυλίνδρων, δηλαδή η συνισταμένη των $Z_{II} \cos 2\varphi$ όλων των κυλίνδρων είναι σε γωνία φ μηδενική.



Σχήμα 6.1.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 3-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



Σχήμα 6.1.6 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες, 3-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

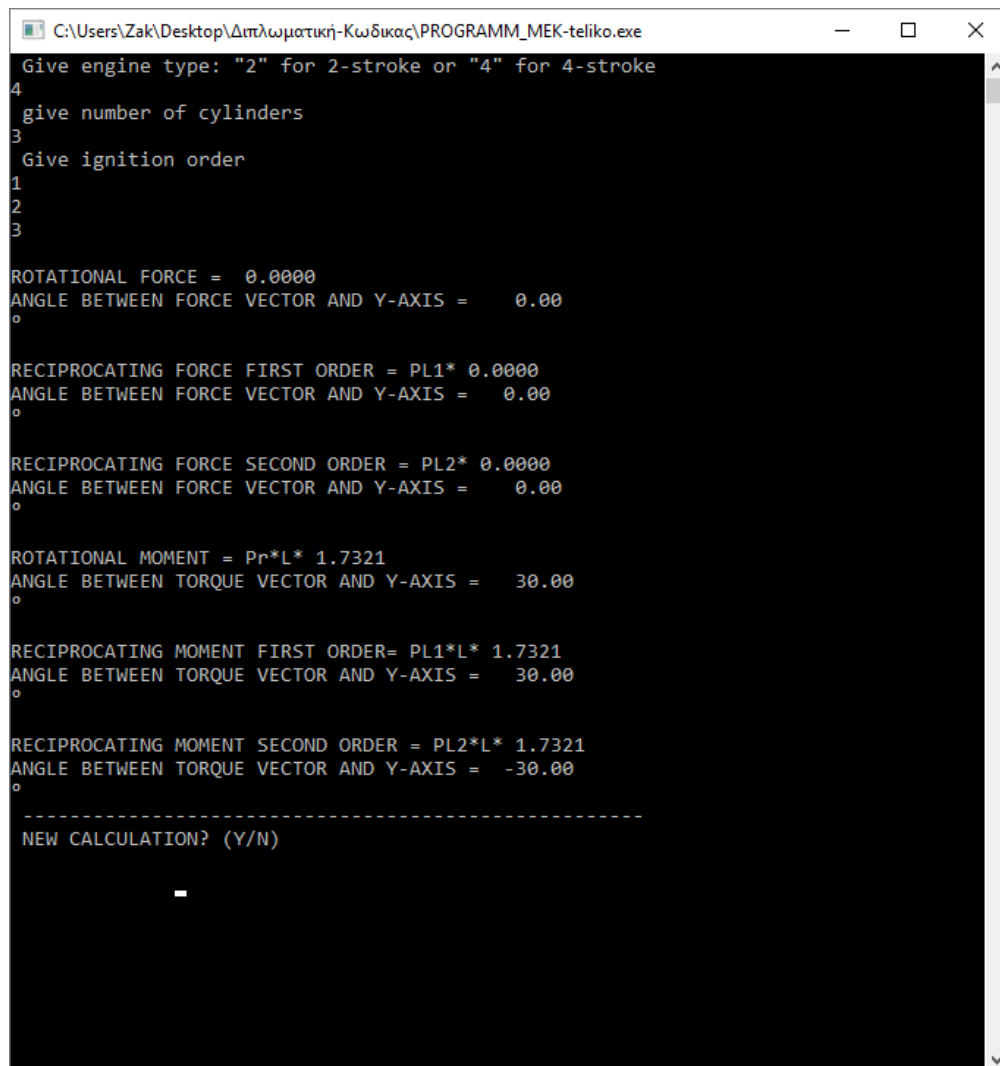
Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_{\rho} r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 6.1.6 το μέτρο του διανύσματος M_{II} είναι $1.732Z_{II}d$ και επομένως η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_r d = 4Z_{II}d \cos(2\varphi - 30^\circ) \quad (6.1.4)$$

- Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran

Σε αυτό το παράδειγμα λοιπόν, δίνουμε ως δεδομένα στο πρόγραμμα το είδος του κινητήρα, 4-Χ άρα του δίνουμε 4, τον αριθμό κυλίνδρων που είναι 3, καθώς και τη σειρά ανάφλεξης που είναι 1-2-3.

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικα\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
4
give number of cylinders
3
Give ignition order
1
2
3

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 1.7321
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 30.00
°

RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 1.7321
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 30.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 1.7321
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = -30.00
°

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)

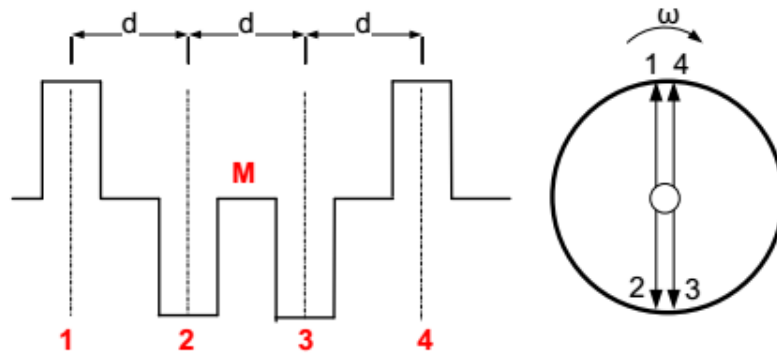
-
```


6.2 4-κύλινδρος 4-X Κινητήρας



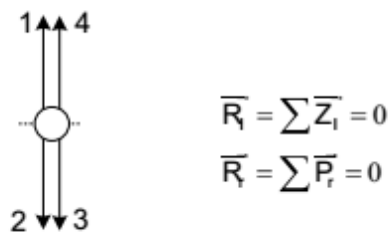
Σχήμα 6.2.1 Στροφαλοφόρος άτρακτος τετρακύλινδρου 4-X κινητήρα εν-σειρά διάταξης με αντίβαρα στην προέκταση των στροφάλων.[4]

Η μορφή της στροφαλοφόρου ατράκτου φαίνεται στο Σχήμα 6.2.1. Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου (συμμετρικής μορφής-flatplane), η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2.2. Η γωνία ανάφλεξης $\Delta\phi_\alpha = 720^\circ/z = 720^\circ/4 = 180^\circ$. Με δεδομένη τη διάταξη των στροφάλων στο σχήμα 5.2, η σειρά ανάφλεξης του κινητήρα είναι 1-3-4-2 ή 1-2-4-3. Πρόκειται ουσιαστικά για κινητήρα όπου ανά δύο τα στρόφαλα κινούνται μαζί (φασική διαφορά 360°).



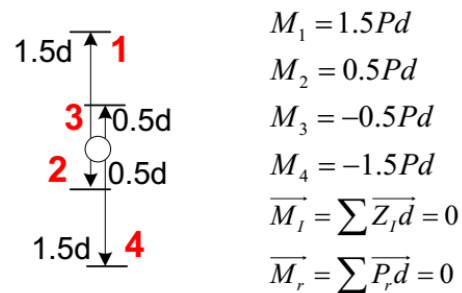
Σχήμα 6.2.2 Σχηματική διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου τετρακύλινδρου 4-X κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 1^{ης} τάξης



Σχήμα 6.2.3 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες τετρακύλινδρου 4-X κινητήρα σειράς.[4]

Στο Σχήμα 6.2.4 φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει τη ροπή M_I με σημείο αναγωγής το μέσο M του Σχήματος 6.2.2.



$$M_1 = 1.5Pd$$

$$M_2 = 0.5Pd$$

$$M_3 = -0.5Pd$$

$$M_4 = -1.5Pd$$

$$\overline{M}_I = \sum \overline{Z}_I d = 0$$

$$\overline{M}_r = \sum \overline{P}_r d = 0$$

Σχήμα 6.2.4 Διάγραμμα ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες, και από περιστρεφόμενες μάζες τετρακύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]

Να σημειωθεί ότι οι κύλινδροι 3 και 4 βρίσκονται αριστερά του σημείου αναφοράς M , άρα οι ροπές τους λαμβάνονται υπόψιν με αρνητικό πρόσημο.

Έτσι λοιπόν, η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής είναι $\overline{M}_I = \sum \overline{Z}_I d = 0$. Σημειωτέον ότι επειδή οι αντίστοιχες δυνάμεις έχουν συνισταμένη μηδέν, δεν έχει σημασία ως προς πιο σημείο θα γίνει εύρεση των ροπών (κάθε φορά το αποτέλεσμα είναι το ίδιο).

- Δυνάμεις από Περιστρεφόμενες Μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$

Τα διανύσματα των Σχημάτων 6.2.3 και 6.2.4 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, είναι :

$$\overline{R}_r = \sum \overline{Z}_r = 0 \quad \text{και} \quad \overline{M}_r = \sum \overline{Z}_r d = 0$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης

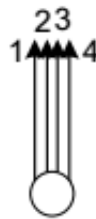
Με ανάλογο τρόπο με αυτόν των παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης} τάξης, σχεδιάζονται τα βοηθητικά διαγράμματα για τις δυνάμεις 2^{ης} τάξης και τις ροπές τους στα σχήματα 6.2.5 και 6.2.6 αντίστοιχα. Η συνισταμένη δύναμη προκύπτει μη μηδενική λόγω σύμπτωσης των σχετικών διανυσμάτων και των τεσσάρων κυλίνδρων. Η προβολή της στην κοινή διεύθυνση των αξόνων

των κυλίνδρων, δηλαδή η συνισταμένη των $Z_{II} \cos 2\varphi$ όλων των κυλίνδρων σε κάθε γωνία φ είναι:

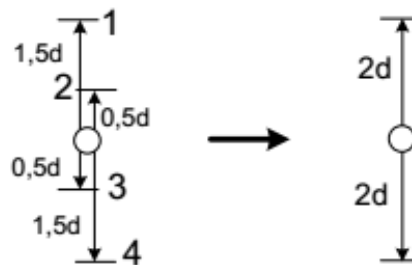
$$\vec{R}_{II} = \sum \vec{Z}_{II} = 4Z_{II} \cos 2\varphi \quad (6.2.1)$$

Δηλαδή τέσσερις φορές αυτή του μονοκύλινδρου κινητήρα που έχουμε αναφέρει ανωτέρω.

Συμπέρασμα: Ο τετρακύλινδρος 4-X κινητήρας είναι ο μοναδικός πολυκύλινδρος εν-σειρά διάταξης με ομοιομορφία ανάφλεξης (πλην του δικύλινδρου) με παραμένουσες δυνάμεις, εν προκειμένω 2^{ης} τάξης. Σημειωτέον ότι παραμένουν και αρμονικές με ανώτερη τάξη (4^η, 6^η κλπ.), πάντα με μέτρο τέσσερις φορές αυτό του μονοκύλινδρου.



Σχήμα 6.2.5 Διάγραμμα δυνάμεων 2^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες τετρακύλινδρου 4-X κινητήρα.[4]

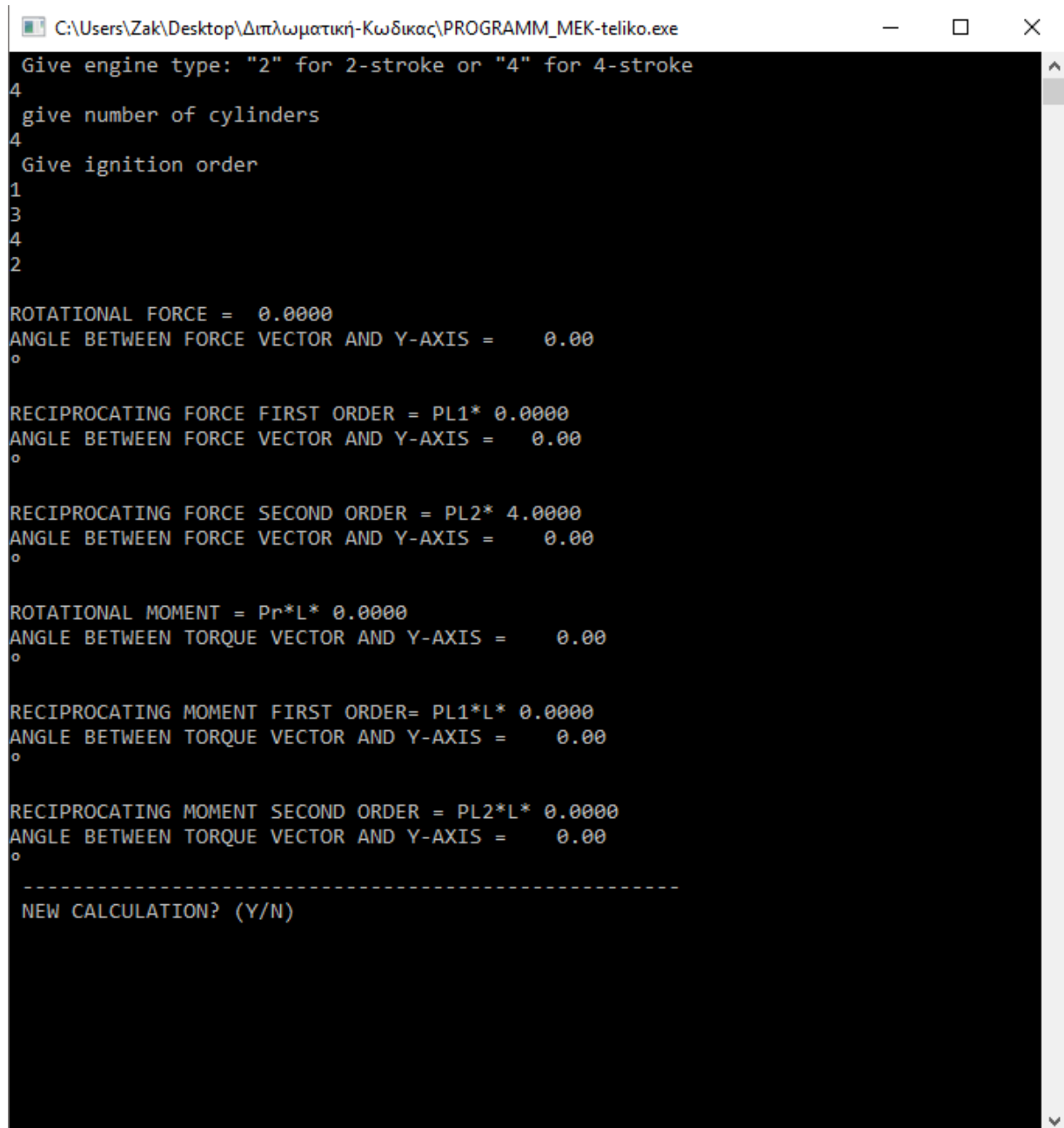


Σχήμα 6.2.6 Διάγραμμα ροπών 2^{ης} τάξης από παλινδρομούσες μάζες τετρακύλινδρου 4-X κινητήρα.[4]

Όσον αφορά τις ροπές, λόγω του ότι η συνισταμένη δύναμη 2^{ης} τάξης είναι διαφορετική του μηδενός, η τιμή για την αντίστοιχη ροπή εξαρτάται πλέον από το σημείο αναφοράς. Ειδικά όμως για το μέσο της ατράκτου, προκύπτει, σύμφωνα και με το Σχήμα 6.2.6, ότι η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής είναι $\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_I d = 0$.

- Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
4
give number of cylinders
4
Give ignition order
1
3
4
2

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 4.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

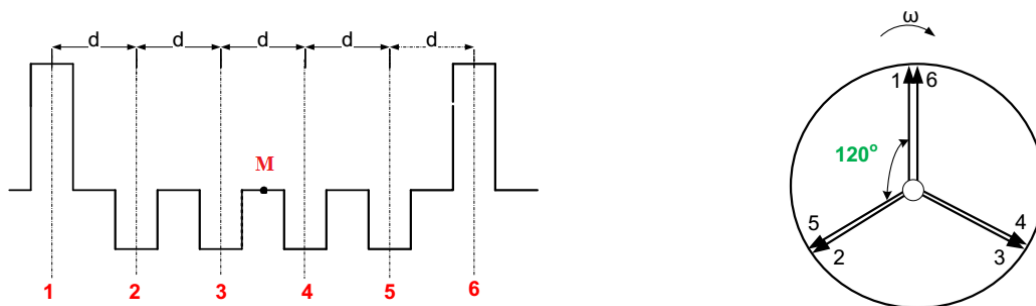
-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
```

6.3 6-κύλινδρος 4-Χ Κινητήρας



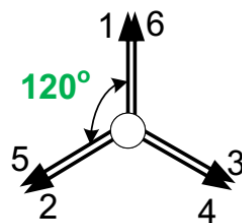
Σχήμα 6.3.1 Στροφαλοφόρος άτράκτος 6-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα εν-σειρά διάταξης.[4]

Η μορφή της στροφαλοφόρου ατράκτου φαίνεται στο Σχήμα 6.3.1. Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3.2. Η γωνία ανάφλεξης $\Delta\varphi_\alpha = 720^\circ/z = 720^\circ/6 = 120^\circ$. Με δεδομένη τη διάταξη των στροφάλων στο σχήμα 6.3.2, η σειρά ανάφλεξης του κινητήρα είναι 1-5-3-6-2-4.



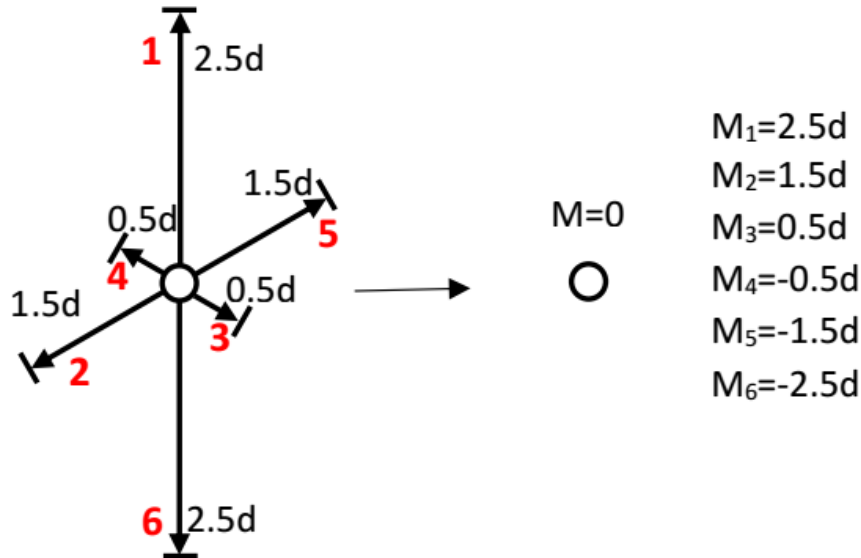
Σχήμα 6.3.2 Σχηματική διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 6-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 1^{ης} τάξης



$$\begin{aligned} \bar{R}_r &= \sum \bar{Z}_r = 0 \\ \bar{R}_r &= \sum \bar{P}_r = 0 \end{aligned}$$

Σχήμα 6.3.3 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 6-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα σειράς.[4]



Σχήμα 6.3.4 Διάγραμμα ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες, και από περιστρεφόμενες μάζες 6-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.

Επομένως, η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 0 \quad (6.3.1)$$

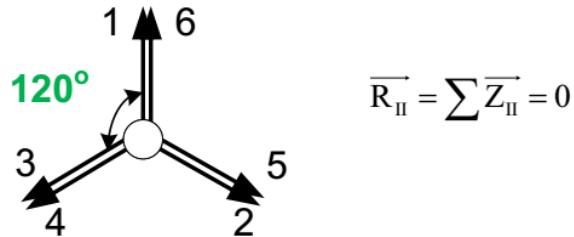
- Δυνάμεις από Περιστρεφόμενες μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 6.3.3 και 6.3.4 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

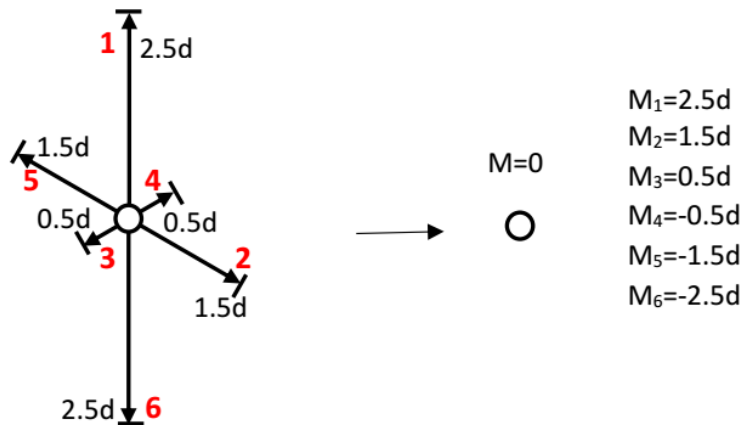
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (6.3.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 0 \quad (6.3.3)$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 6.3.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 6-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.[4]



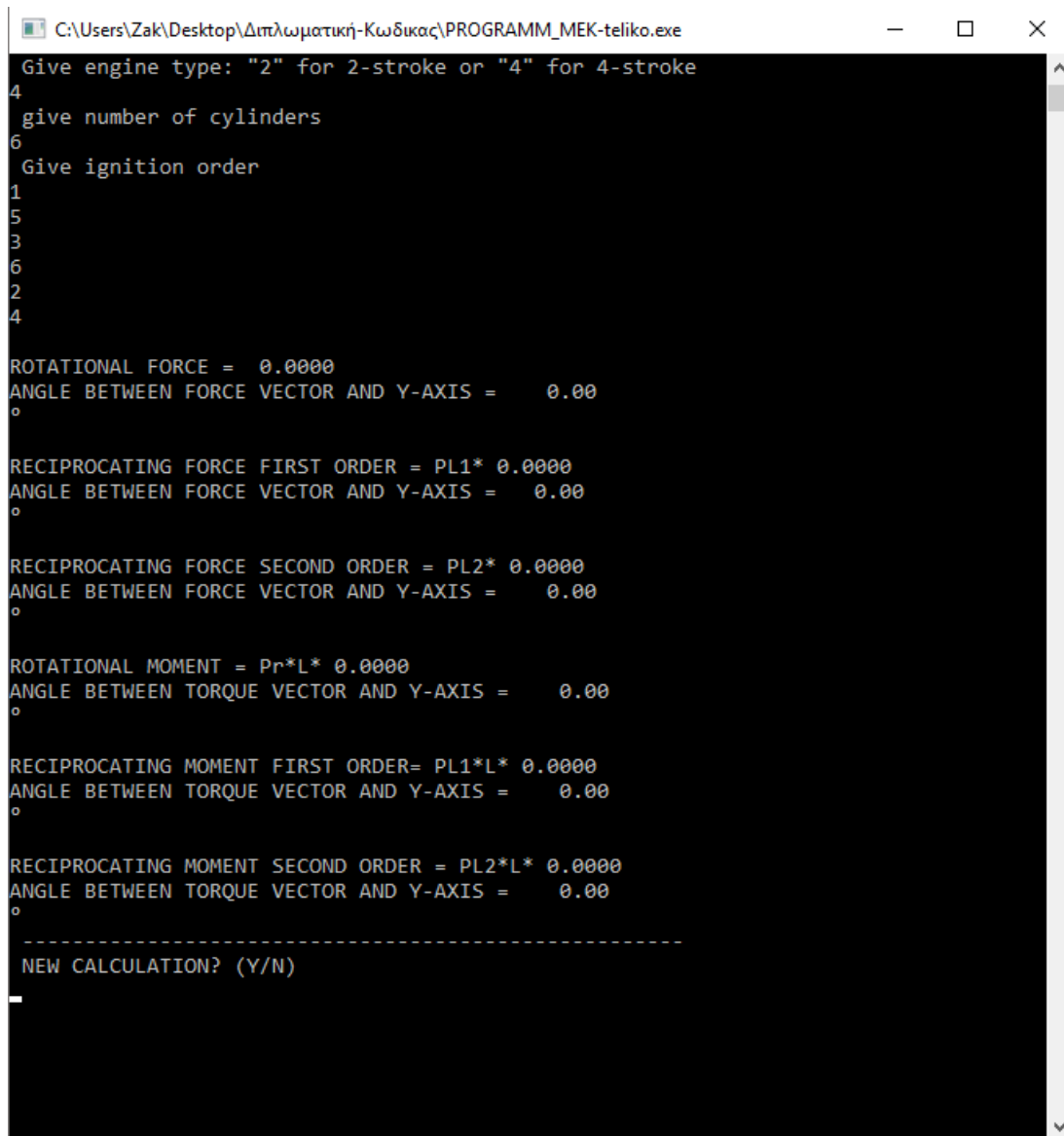
Σχήμα 6.3.6 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες, 6-κύλινδρου 2-Χ κινητήρα.

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_{\ell} r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 6.3.6 η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_r d = 0 \quad (6.3.5)$$

- Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
4
give number of cylinders
6
Give ignition order
1
5
3
6
2
4

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

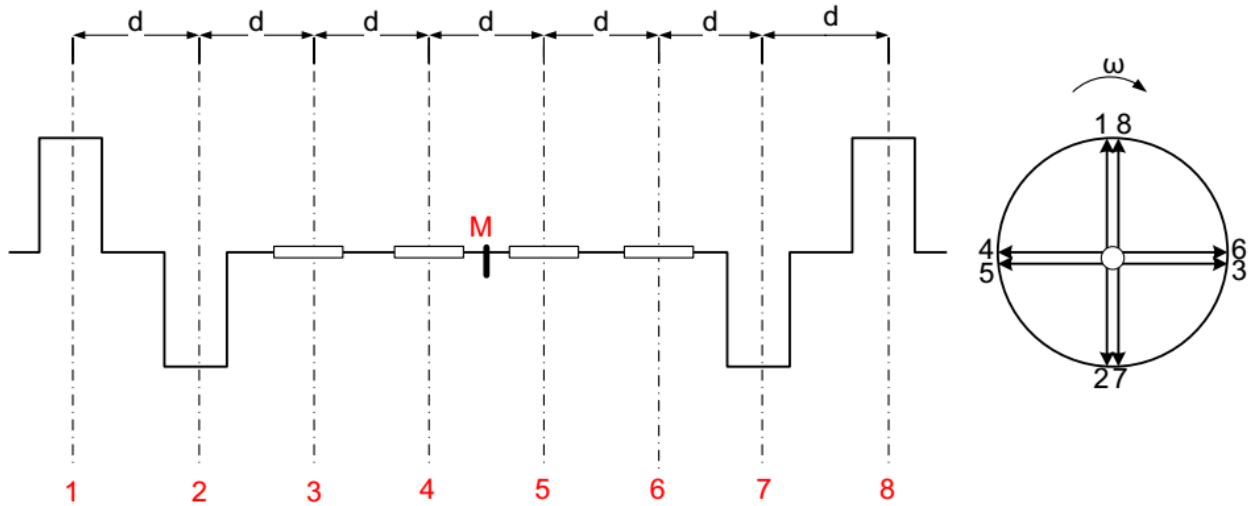
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
-
```

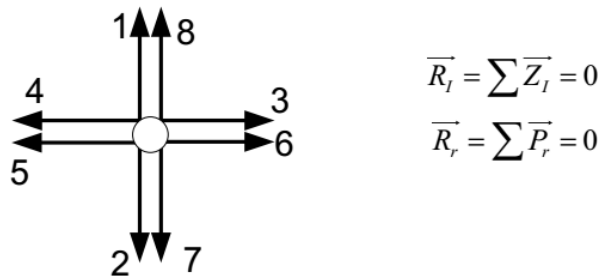

6.4 8-κύλινδρος 4-X Κινητήρας (Σ.Α.1-4-2-6-8-5-7-3 ή 1-5-7-3-8-4-2-6)

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4.1. Η γωνία σφήνωσης των στροφάλων ε είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\varphi_\alpha = 720^\circ/z = 720^\circ/8 = 90^\circ$. Με δεδομένη τη διάταξη των στροφάλων στο σχήμα 6.4.1, η σειρά ανάφλεξης του κινητήρα είναι 1-4-2-6-8-5-7-3 ή 1-5-7-3-8-4-2-6.



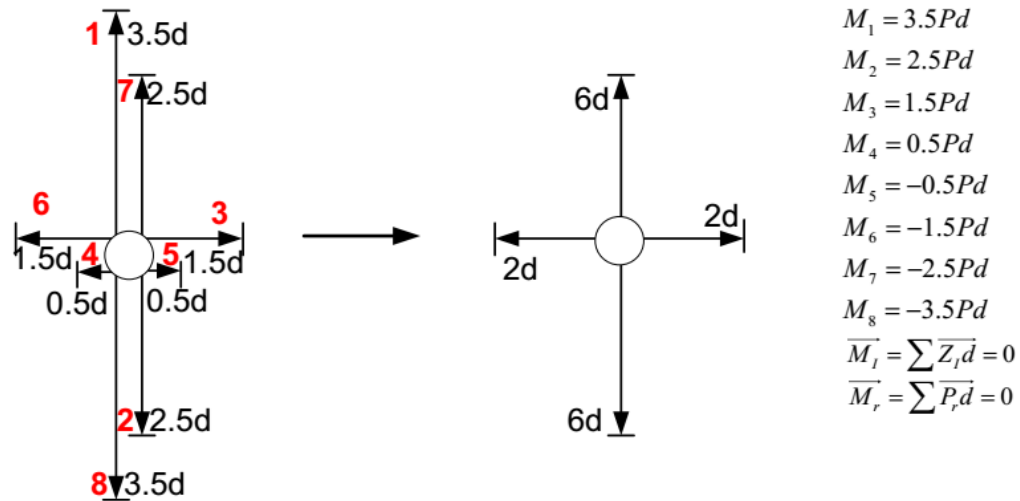
Σχήμα 6.4.1 Σχηματική διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 8-κύλινδρου 4-X κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 1^{ης} τάξης



Σχήμα 6.4.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 8-κύλινδρου 4-X κινητήρα σειράς.[4]

Στο Σχήμα 6.4.3 φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει τη ροπή M_I με σημείο αναγωγής το μέσο M του Σχήματος 6.4.1.



$$\begin{aligned}
 M_1 &= 3.5Pd \\
 M_2 &= 2.5Pd \\
 M_3 &= 1.5Pd \\
 M_4 &= 0.5Pd \\
 M_5 &= -0.5Pd \\
 M_6 &= -1.5Pd \\
 M_7 &= -2.5Pd \\
 M_8 &= -3.5Pd \\
 \overline{M}_I &= \sum \overline{Z}_I d = 0 \\
 \overline{M}_r &= \sum \overline{P}_r d = 0
 \end{aligned}$$

Σχήμα 6.4.3 Διάγραμμα ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες, και από περιστρεφόμενες μάζες 8-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]

Επομένως, η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\overline{M}_I = \sum \overline{Z}_I d = 0 \quad (6.4.1)$$

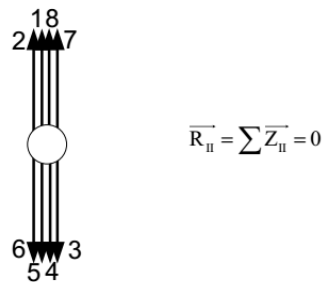
- Δυνάμεις από Περιστρεφόμενες μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 6.4.2 και 6.4.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

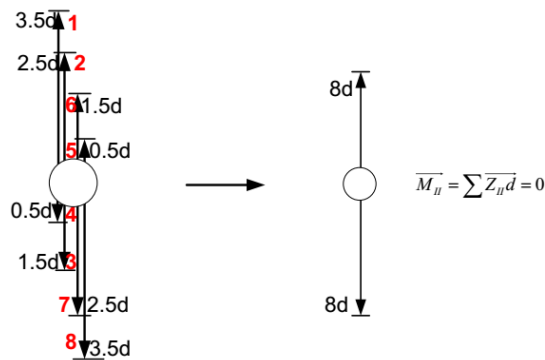
$$\overline{R}_r = \sum \overline{P}_r = 0 \quad (6.4.2)$$

$$\overline{M}_r = \sum \overline{P}_r d = 0 \quad (6.4.3)$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 6.4.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 8-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]



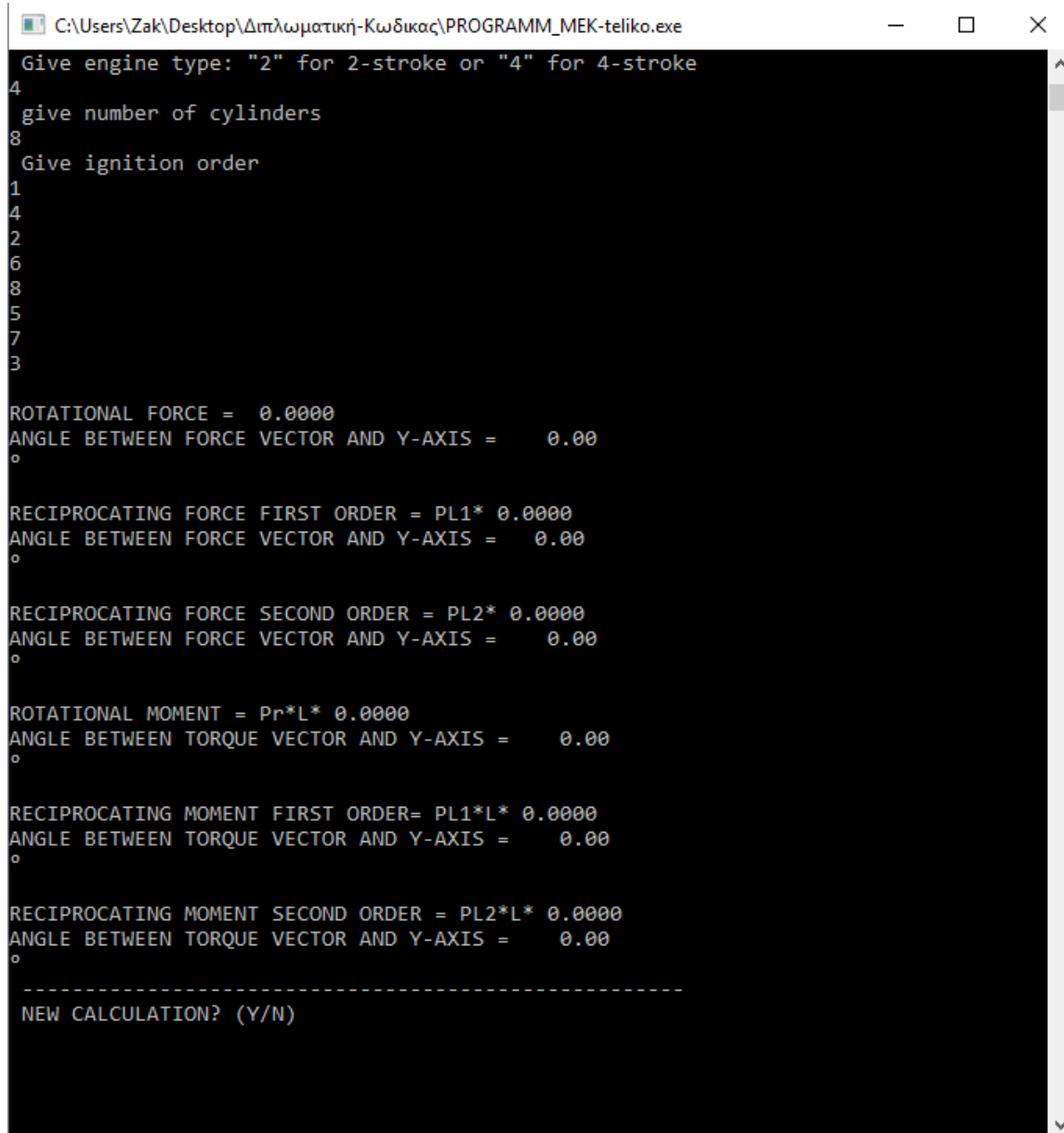
Σχήμα 6.4.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες, 8-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_{\rho} r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 6.4.5 η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\bar{M}_{II} = \sum \bar{Z}_r d = 0 \quad (6.4.4)$$

- Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
4
give number of cylinders
8
Give ignition order
1
4
2
6
8
5
7
3

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

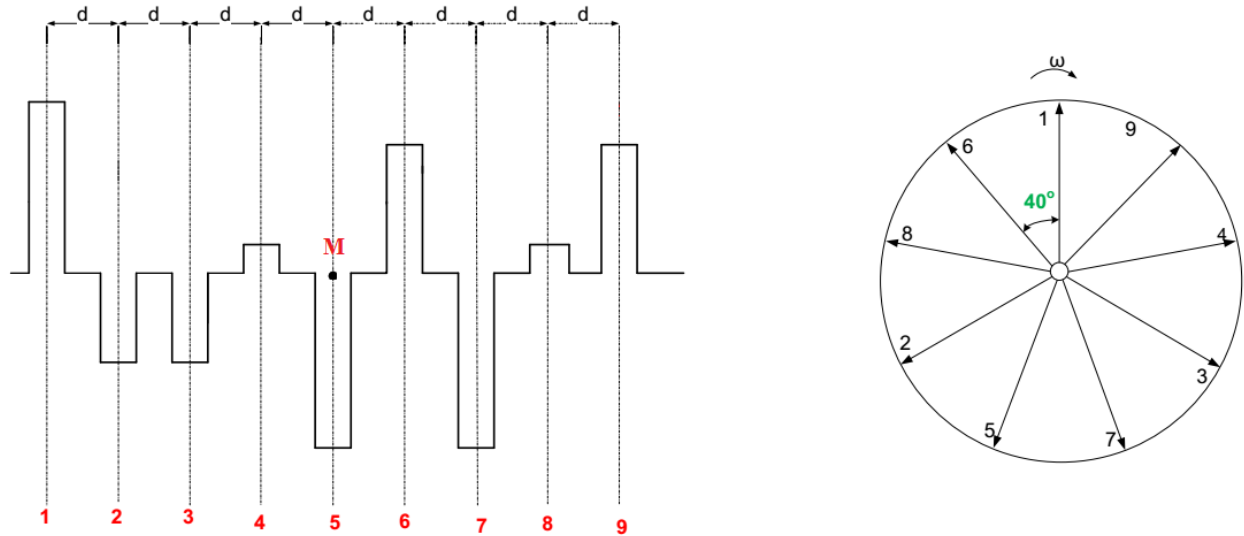
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
```

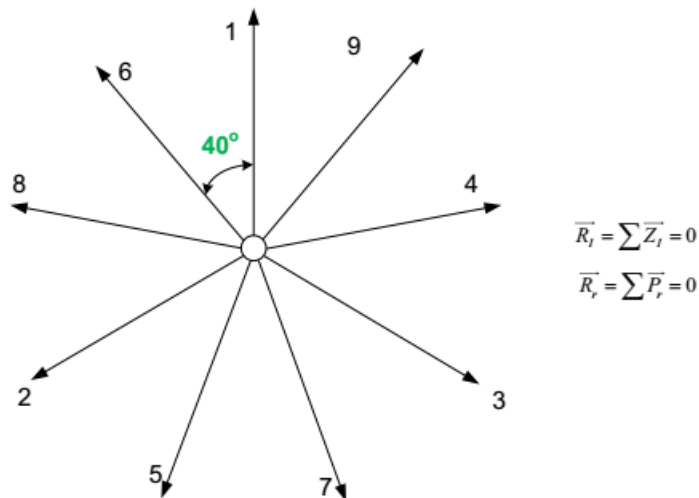
6.5 9-κύλινδρος 4-X Κινητήρας

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5.1. Η γωνία σφήνωσης των στροφάλων ε είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\varphi_\alpha = 720^\circ/z = 720^\circ/9 = 80^\circ$. Με δεδομένη τη διάταξη των στροφάλων στο σχήμα 6.5.1, η σειρά ανάφλεξης του κινητήρα είναι 1-8-5-3-9-6-2-7-4.



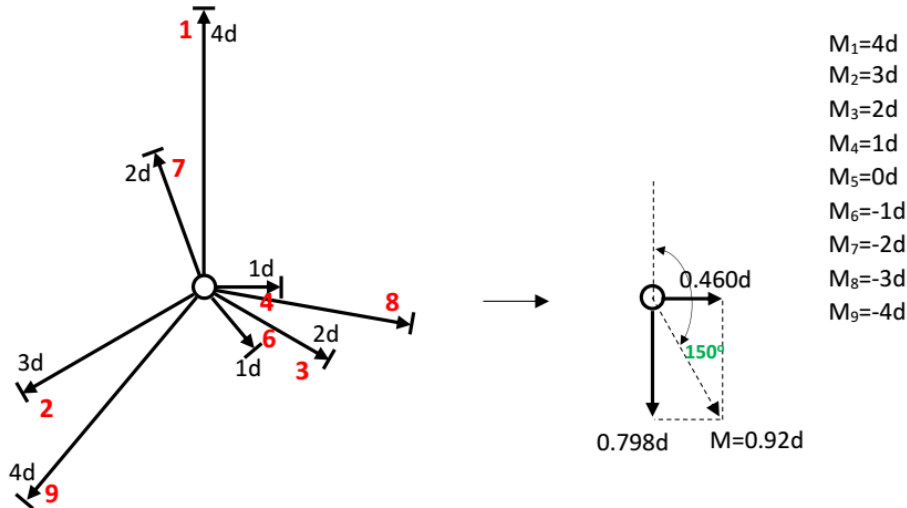
Σχήμα 6.5.1 Σχηματική διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 9-κύλινδρου 4-X κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 1^{ης} τάξης



Σχήμα 6.5.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 9-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα σειράς.[4]

Στο Σχήμα 6.5.3 φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει τη ροπή M_I με σημείο αναγωγής το μέσο M του Σχήματος 6.5.1.



Σχήμα 6.5.3 Διάγραμμα ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες, και από περιστρεφόμενες μάζες 9-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.

Επομένως, η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 0.92 Z_I d \cos(\varphi + 150^\circ) \quad (6.5.1)$$

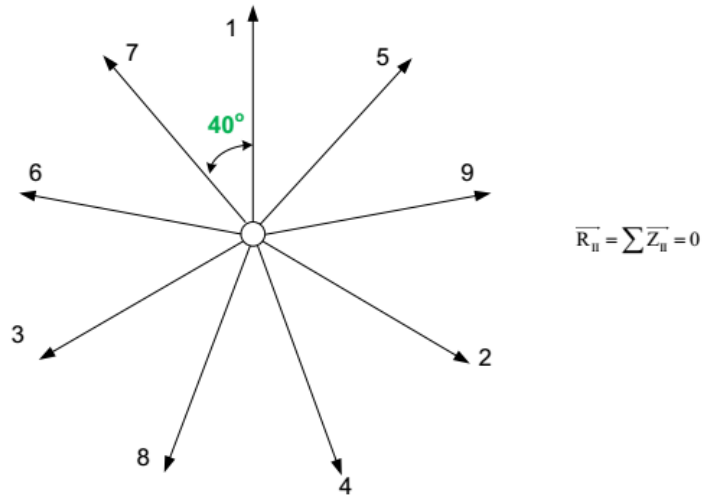
• Δυνάμεις από Περιστρεφόμενες μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 6.5.2 και 6.5.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

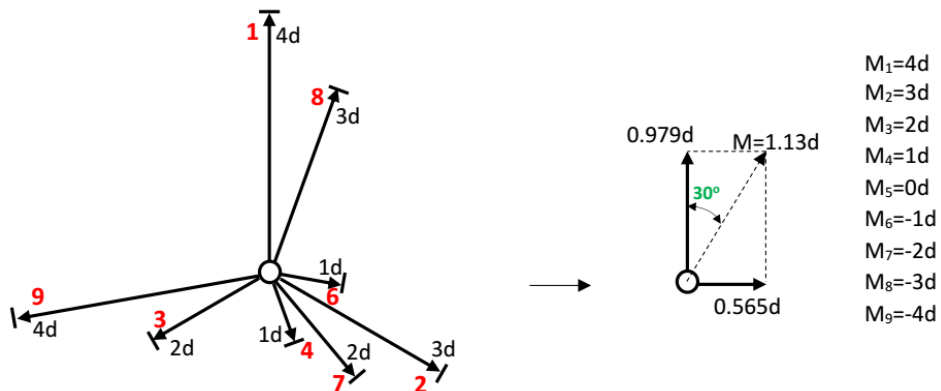
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (6.5.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 0.92 d \cos(\varphi + 150^\circ) \quad (6.5.3)$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 6.5.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 9-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]



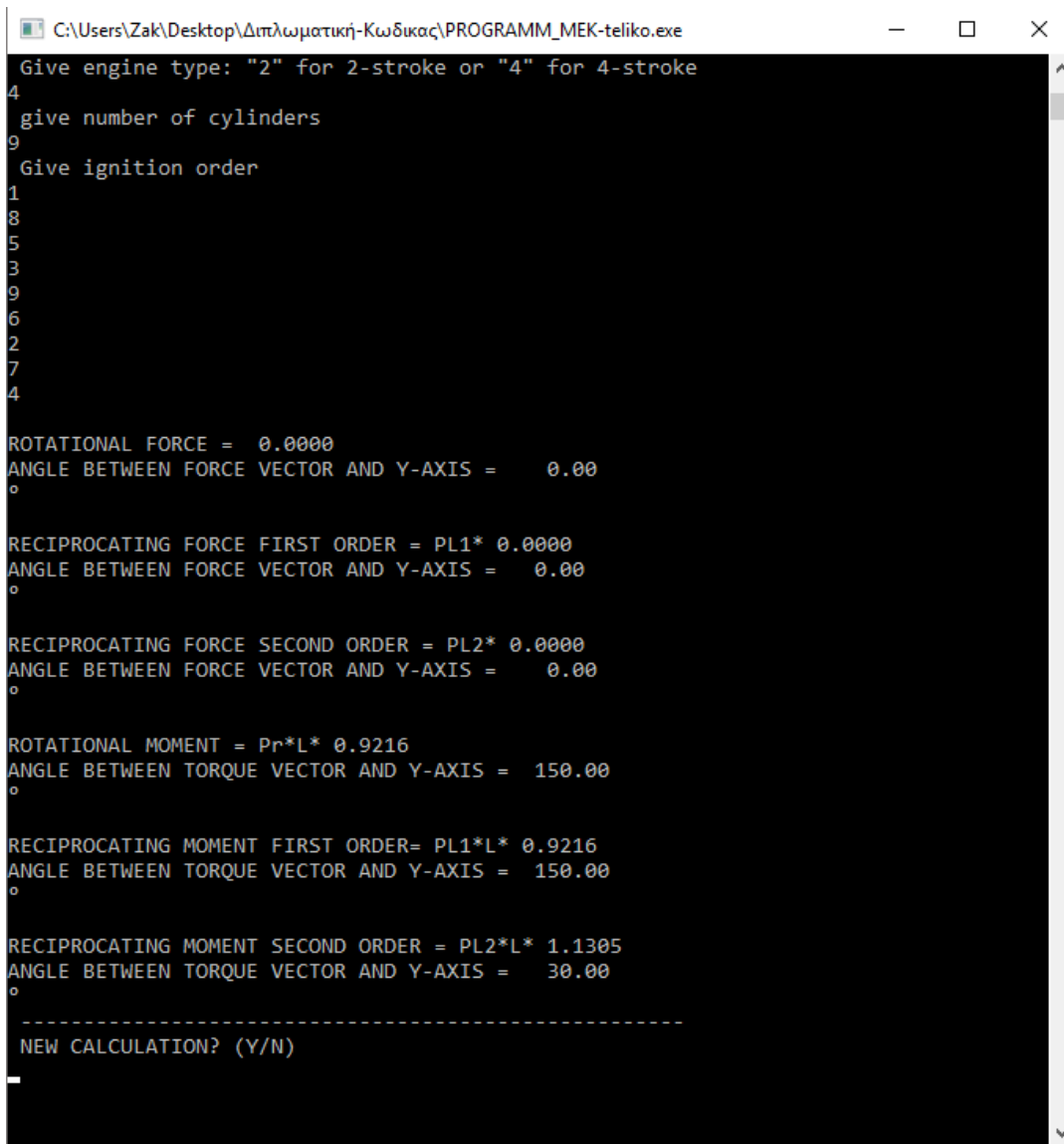
Σχήμα 6.5.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες, 9-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_r r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών» διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 6.5.5 η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_r d = 1.13d \cos(2\varphi + 30^\circ) \quad (6.4.4)$$

- **Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran**

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.



```
C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
4
give number of cylinders
9
Give ignition order
1
8
5
3
9
6
2
7
4

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
°

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.9216
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 150.00
°

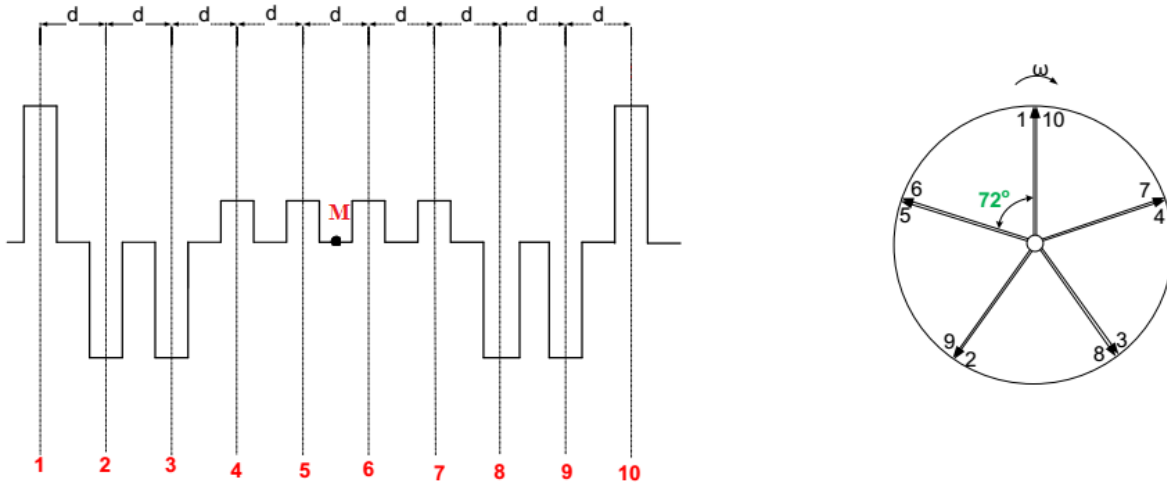
RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.9216
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 150.00
°

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 1.1305
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 30.00
°

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
_
```

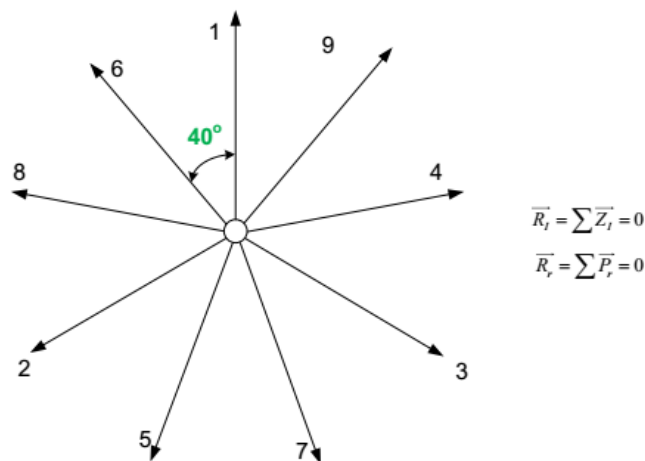

6.6 10-κύλινδρος 4-X Κινητήρας (Σ.Α.1-6-2-8-4-10-5-9-3-7 ή 1-6-9-3-7-10-5-2-8-4)

Η διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου, η φορά περιστροφής (δεξιόστροφη) και η σειρά ανάφλεξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6.1. Η γωνία σφήνωσης των στροφάλων ε είναι ίση με την γωνία ανάφλεξης $\Delta\phi_\alpha = 720^\circ/z = 720^\circ/10 = 72^\circ$. Με δεδομένη τη διάταξη των στροφάλων στο σχήμα 6.5.1, η σειρά ανάφλεξης του κινητήρα είναι 1-6-2-8-4-10-5-9-3-7 ή 1-6-9-3-7-10-5-2-8-4.



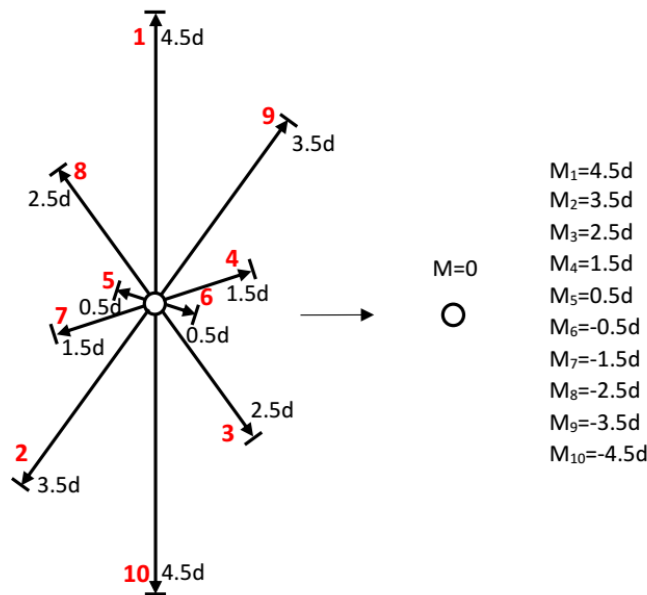
Σχήμα 6.6.1 Σχηματική διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου 10-κύλινδρου 4-X κινητήρα.[4]

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 1^{ης} τάξης



Σχήμα 6.6.2 Διάγραμμα δυνάμεων 1ης τάξης από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες 10-κύλινδρου 4-X κινητήρα σειράς.[4]

Στο Σχήμα 6.6.3 φαίνεται το συνιστάμενο διάνυσμα που παριστάνει τη ροπή M_I με σημείο αναγωγής το μέσο M του Σχήματος 6.6.1.



Σχήμα 6.6.3 Διάγραμμα ροπών 1ης τάξης από παλινδρομούσες, και από περιστρεφόμενες μάζες 10-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.

Επομένως, η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής κατά την τυχαία γωνία του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_I d = 0 \quad (6.6.1)$$

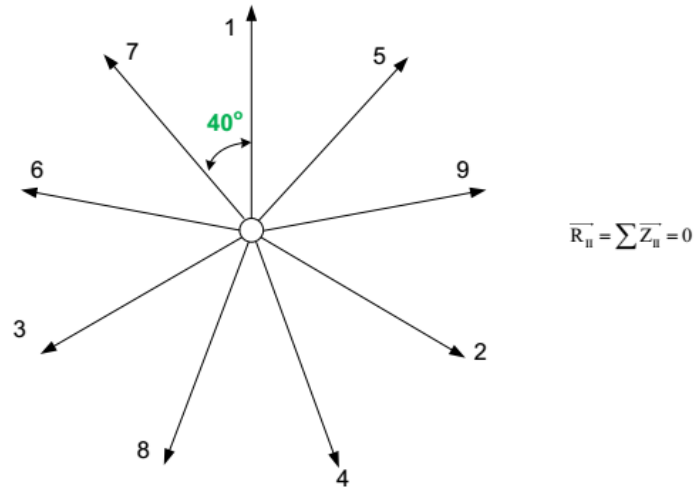
- Δυνάμεις από Περιστρεφόμενες μάζες

Το σταθερό μέτρο των δυνάμεων αυτών είναι $P = P_r = m_r \omega^2$. Τα διανύσματα των Σχημάτων 6.6.2 και 6.6.3 αντιπροσωπεύουν με ανάλογη κλίμακα, τις δυνάμεις αυτές ή τις ροπές τους. Έτσι, ισχύει:

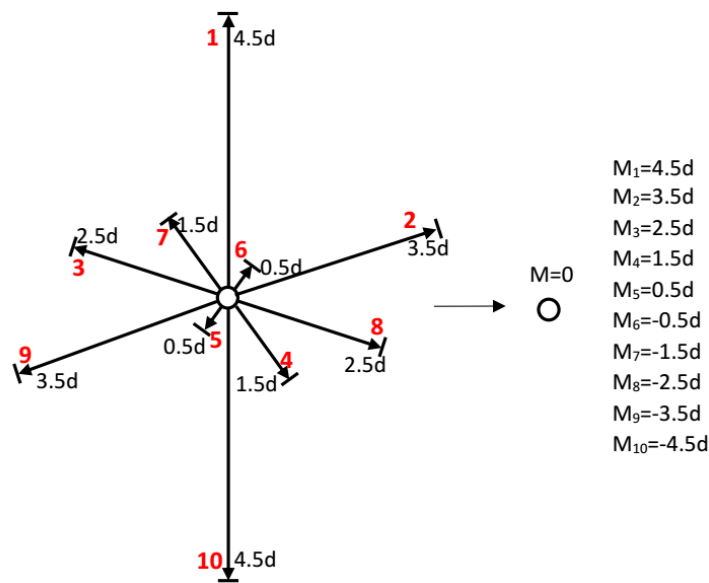
$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \quad (6.6.2)$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r d = 0 \quad (6.6.3)$$

- Παλινδρομικές Δυνάμεις και Ροπές 2^{ης} τάξης



Σχήμα 6.6.4 Συνθήκες ζυγοστάθμισης δυνάμεων 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες 10-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.[4]



Σχήμα 6.6.5 Συνθήκες ζυγοστάθμισης ροπών 2ης τάξης από παλινδρομούσες μάζες, 10-κύλινδρου 4-Χ κινητήρα.

Οι στιγμιαίες ροπές M_{II} είναι ίδιες με των παλινδρομουσών μαζών 1^{ης} τάξης με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε $P = Z_{II} = \lambda m_{\rho} r \omega^2$. Η συνισταμένη ροπή των «βοηθητικών»

διανυσμάτων δεν είναι μηδέν. Άρα, σύμφωνα με το Σχήμα 6.6.5 η στιγμιαία τιμή της ροπής αυτής κατά την τυχαία γωνία φ του στροφάλου (1) είναι :

$$\vec{M}_{II} = \sum \vec{Z}_r d = 0 \quad (6.6.4)$$

- **Αποτελέσματα και σύγκριση με πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε Fortran**

Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα από τα αποτελέσματα του προγράμματος με βάσει τα αναφερθέντα, όπου και επιβεβαιώνονται τα υπολογιζόμενα μεγέθη των δυνάμεων, των ροπών καθώς και των γωνιών μεταξύ της κάθε συνισταμένης δύναμης ή ροπής με τον κάθετο άξονα του εμβόλου.

```

C:\Users\Zak\Desktop\Διπλωματική-Κωδικας\PROGRAMM_MEK-teliko.exe
Give engine type: "2" for 2-stroke or "4" for 4-stroke
4
give number of cylinders
10
Give ignition order
1
6
2
8
4
10
5
9
3
7

ROTATIONAL FORCE = 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

RECIPROCATING FORCE FIRST ORDER = PL1* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

RECIPROCATING FORCE SECOND ORDER = PL2* 0.0000
ANGLE BETWEEN FORCE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

ROTATIONAL MOMENT = Pr*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

RECIPROCATING MOMENT FIRST ORDER= PL1*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

RECIPROCATING MOMENT SECOND ORDER = PL2*L* 0.0000
ANGLE BETWEEN TORQUE VECTOR AND Y-AXIS = 0.00
o

-----
NEW CALCULATION? (Y/N)
  
```

7. Συμπεράσματα

Παρακάτω ακολουθούν κάποια γενικά συμπεράσματα όσον αφορά τον υπολογισμό παραμενουσών δυνάμεων και ροπών παλινδρομικών $1^{\text{ης}}$ και $2^{\text{ης}}$ τάξης και περιστροφικών, και τη συνεπακόλουθη ζυγοστάθμιση των εμβολοφόρων κινητήρων βάσει όσων αναφέρθηκαν.

- Έχει σημασία ο αριθμός των κυλίνδρων και η διάταξή τους για τα αποτελέσματα των παραμενουσών δυνάμεων και ροπών.
- Δεν έχει σημασία ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας (2-X, 4-X) στην περίπτωση του μονοκύλινδρου κινητήρα, έχει όμως μεγάλη σημασία ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας στους πολυκύλινδρους κινητήρες, με διαφορετικά αποτελέσματα στον (π.χ.) εννεακύλινδρο 2-X έναντι του εννεακύλινδρου 4-X.
- Συνήθως, οι περιστροφικές και παλινδρομικές δυνάμεις $1^{\text{ης}}$ και $2^{\text{ης}}$ τάξης αλληλο-αναιρούνται. Η μοναδική περίπτωση κινητήρα σειράς (πλην δικύλινδρου) στην οποία δεν αλληλο-αναιρούνται, είναι ο 4-X τετρακύλινδρος κινητήρας σειράς με ομοιομορφία ανάφλεξης (μόνο για τις δυνάμεις $2^{\text{ης}}$ τάξης), ο πλέον διαδεδομένος στην πράξη δηλαδή κινητήρας επιβατικών αυτοκινήτων.
- Σε αντίθεση με τον μονοκύλινδρο κινητήρα, σε όλους τους πολυκύλινδρους κινητήρες δημιουργούνται και ροπές, οι οποίες χρειάζονται και αυτές ζυγοστάθμιση, καθώς και καμπτικές ροπές που καταπονούν την στροφαλοφόρο άτρακτο.
- Τα βοηθητικά διανύσματα των παλινδρομικών δυνάμεων και ροπών $1^{\text{ης}}$ τάξης έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τις δυνάμεις και ροπές από περιστρεφόμενες μάζες, οπότε και εξετάζονται μαζί.
- Έχει θεμελιώδη σημασία η σειρά ανάφλεξης του κινητήρα για τα αποτελέσματα της ζυγοστάθμισης. Συγκεκριμένα καθορίζει τις παραμένουσες ροπές, δεν επηρεάζει όμως

τις δυνάμεις. Η σειρά ανάφλεξης, τελικά, επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ροπές $1^{\text{ης}}$ και $2^{\text{ης}}$ τάξης από παλινδρομούσες μάζες.

- Σε πολυκύλινδρους κινητήρες μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μία ιδανικές σειρές ανάφλεξης (που οδηγούν δηλαδή σε βέλτιστη ή ακόμα και πλήρη ζυγοστάθμιση).
- Οι 3, 5, 7, 9, 11-κύλινδροι εν-σειρά διάταξης με ομοιομορφία ανάφλεξης έχουν παραμένουσες ροπές από περιστρεφόμενες μάζες και παλινδρομούσες μάζες $1^{\text{ης}}$ και $2^{\text{ης}}$ τάξης, για το λόγο αυτό και δεν προτιμώνται ιδιαίτερα στην πράξη.
- Οι 2- X κινητήρες με ομοιομορφία ανάφλεξης και αριθμό κυλίνδρων μικρότερο του δώδεκα, έχουν πάντα παραμένουσες ροπές. Σημειωτέον ότι από τους 2- X κινητήρες εν-σειρά διάταξης, μόνον ο 12-κύλινδρος (προφανώς με την κατάλληλη σειρά ανάφλεξης) είναι εγγενώς (απόλυτα) ζυγοσταθμισμένος όσον αφορά αδρανειακές δυνάμεις και ροπές.

Βιβλιογραφία

1. Κ. Δ. Ρακόπουλος, «Μ.Ε.Κ. ΙΙ – Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις Γρηγ. Φούντας, Αθήνα 2000.
2. Ε. Γ. Γιακουμής, Παρουσιάσεις μαθήματος Μ.Ε.Κ. ΙΙ στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., 2005-2015 <http://users.ntua.gr/vgiakms/MEKII.htm>
3. Ευάγγελος Γ. Γιακουμής «Ζυγοστάθμιση Παλινδρομικών Εμβολοφόρων Κινητήρων», ηλεκτρονική έκδοση, Αθήνα 2015.
4. Κωστάρας Ιωάννης, «Ανάλυση Ζυγοστάθμισης 2-Χ και 4-Χ Εμβολοφόρων Κινητήρων Εν-σειρά Διάταξης», Διπλωματική Εργασία, Επιβλέπων: Ε.Γ. Γιακουμής, ΕΜΠ, 2013.
5. C.F. Taylor, “The Internal Combustion Engine in Theory and Practice Volume 2: Combustion, Fuels, Materials, Design”, MIT Press, Cambridge, MA, 1977.
6. K. Mollenhauer, H. Tschöke, “Handbook of Diesel Engines”, Springer, London, 2010.
7. B. Challen, R. Baranescu (editors), “Diesel Engine Reference Book”, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.