

Περιστροφική μαζική δύναμη

Η δύναμη που ασκείται στη στροφαλοφόρο άτρακτο είναι μία και έχει σταθερό μέτρο ίσο με:

$$P_r = m_r r \omega^2$$

Η διεύθυνσή της είναι πάντοτε αυτή της ακτίνας του στροφάλου.

Η δύναμη αυτή αντισταθμίζεται πλήρως και με εύκολο τρόπο, απλά με την τοποθέτηση αντίβαρου στην προέκταση της ακτίνας του στροφάλου έχοντας τέτοια χαρακτηριστικά ώστε να ισχύει:

$$m^r r^r = m^r r$$

Όπου m^r η μάζα του αντίβαρου και r^r η απόσταση του Κ.Β. του από τον άξονα περιστροφής.

Παράσταση παλινδρομικών δυνάμεων με διπλά διανύσματα (στρόφαλα)

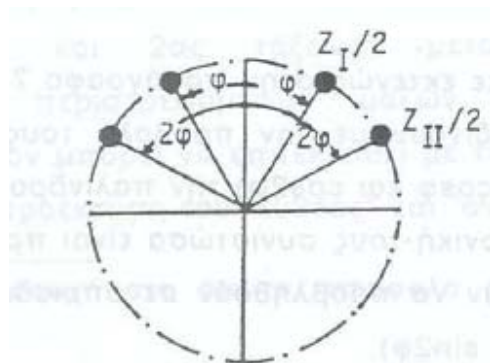
Τα βοηθητικά Z_I και Z_{II} είναι η συνιστώσες της παλινδρομικής δύναμης επάνω στον άξονα του κυλίνδρου.

Σε πολλούς κινητήρες όμως, όπως το μονοκύλινδρο το δικύλινδρο V ή τον αστεροειδή, για να πραγματοποιηθεί η ζυγιστάθμιση βολεύει, οι δυνάμεις $1^{ης}$ και $2^{ης}$ τάξης να αναπαρίστανται με δύο διανύσματα.

Αυτά περιστρέφονται με αντίθετες φορές και ταχύτητα ω και 2ω για τις δυνάμεις της $1^{ης}$ και $2^{ης}$ αντίστοιχα και παριστούν δυνάμεις κατά τη διεύθυνση του διανύσματος και άρα μπορούν να ληφθούν και οι δύο συνιστώσες τους σε δύο κάθετες κατευθύνσεις (συνημιτονικές και ημιτονικές).

Τα διανύσματα μπορούν να θεωρηθούν ότι προσομοιώνουν βάρη πάνω σε ζεύγος στροφάλων που περιστρέφονται με αντίθετες φορές γύρω από τον άξονα της στροφαλοφόρου άτρακτου.

- Το ένα στρόφαλο καλείται «ευθύ» και έχει την ίδια φορά με αυτή της περιστροφής του κινητήρα και
- Το άλλο λέγεται «ανάστροφο».



Για τις παλινδρομικές δυνάμεις 1^{ης} τάξης:

- Η τιμή του κάθε «βάρους» είναι $m_i/2$
- Είναι τοποθετημένο σε απόσταση r από τον άξονα περιστροφής

Για τις παλινδρομικές δυνάμεις 2^{ης} τάξης:

- Η τιμή του κάθε «βάρους» είναι $lm_i/8$
- Είναι τοποθετημένο σε απόσταση r από τον άξονα περιστροφής

Με τη διάταξη αυτή, οι μεν οριζόντιες συνιστώσες των σχετικών φυγόκεντρων δυνάμεων αλληλοαναιρούνται, ενώ οι κατακόρυφες αθροίζονται στην τιμή της παλινδρομικής 1^{ης} ή 2^{ης} τάξης αντίστοιχα.

Έτσι το πρόβλημα της ζυγοστάθμισης των παλινδρομικών 1^{ης} και 2^{ης} τάξης γίνεται πρόβλημα ζυγοστάθμισης περιστρεφόμενων μαζών, πρόβλημα πολύ ευκολότερο αφού λύνεται με τοποθέτηση κατάλληλων αντίβαρων στην προέκταση των υπό θεώρηση στροφάλων (ευθύ και ανάστροφου).

Αυτή η μέθοδος είναι προφανείς οι διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ζυγοστάθμιση των παλινδρομικών δυνάμεων μονοκύλινδρου κινητήρα όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Ζυγοστάθμιση μαζικών δυνάμεων και ροπών πολυκύλινδρων κινητήρων

Στις περιπτώσεις:

- Διάταξη κυλίνδρων σε σειρά: σε κάθε στρόφαλο εμφανίζονται δυνάμεις όπως στον μονοκύλινδρο κινητήρα.
- Διάταξη κυλίνδρων με πάνω από ένα διωστήρες σε ένα στρόφαλο: σε αυτόν ασκείται συνισταμένη δύναμη από τους σχετικούς κυλίνδρους.

Έτσι στη στροφαλοφόρο άτρακτο δρουν περισσότερες δυνάμεις, που εφαρμόζονται στις θέσεις των στροφάλων.

Παρακάτω, για πολυκύλινδρους κινητήρες, θα αναλυθούν:

- Χωριστά οι παλινδρομούσες μαζικές δυνάμεις 1^{ης} και 2^{ης} τάξης,
- Οι περιστρεφόμενες Pr και
- Θα αναζητηθούν μέθοδοι (π.χ. με την τοποθέτηση αντιβάρων) για την εξουδετέρωση τους (ζυγοστάθμιση μαζικών δυνάμεων και ροπών).

Κινητήρες σειράς

Για κινητήρες με αριθμό κυλίνδρων z τα ισοδιαστήματα αναφλέξεως, η μικρότερη γωνία ε μεταξύ δύο στροφάλων είναι:

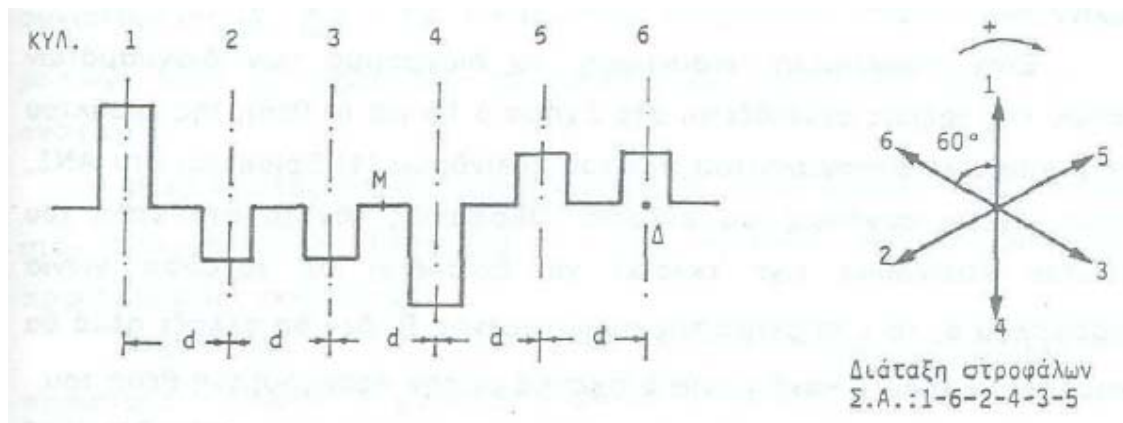
- $\varepsilon=360^\circ/z$ για όλους τους δίχρονους και για τετράχρονους με περιττό αριθμό κυλίνδρων
- $\varepsilon=720^\circ/z$ για τετράχρονους με άρτιο αριθμό κυλίνδρων (τα στρόφαλα συμπίπτουν ανά δύο)

Οι αστέρες «βοηθητικών» διανυσμάτων για τις Z_I και Z_{II} και πραγματικών διανυσμάτων για τις P_r (ίδιοι με τους βοηθητικούς αστέρες για τις Z_I) δίνουν συνισταμένη ίση με το μηδέν (οι αντίστοιχες ροπές δεν είναι κατ' ανάγκη μηδέν), με εξαίρεση το δικύλινδρο 2X και 4X κινητήρα και τον ευρέως χρησιμοποιούμενο τετρακύλινδρο 4X κινητήρα που έχει ελεύθερες παλινδρομικές δυνάμεις 2^{ης} τάξης.

Εξακύλινδρος 2X κινητήρας (σε σειρά)

- δεξιόστροφη φορά περιστροφής και σειρά ανάφλεξης
- γωνία σφηνώσεως των στροφάλων ε είναι ίση με τη γωνία ανάφλεξης

$$\Delta\varphi_\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/6 = 60^\circ$$



1. Παλινδρομικές 1^{ης} τάξης

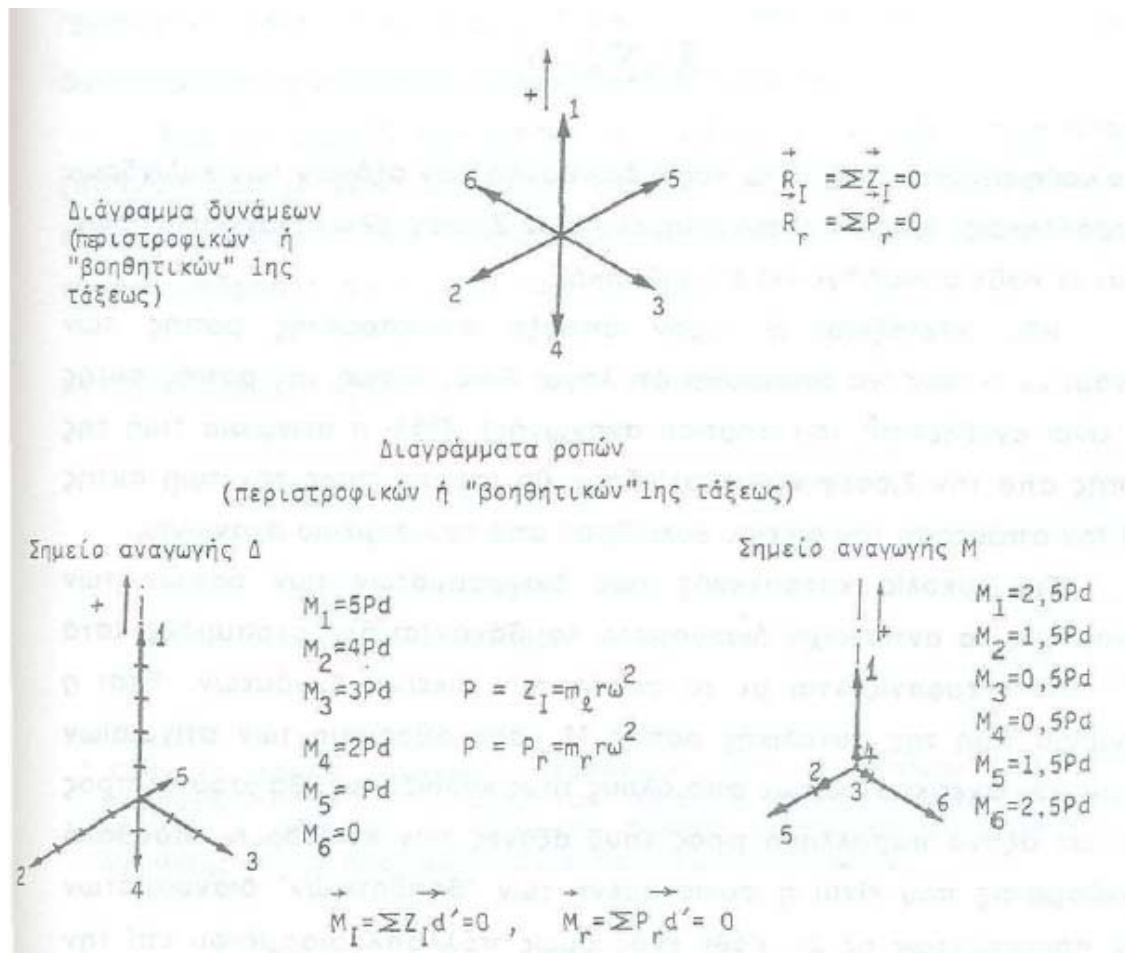
Για κάθε κύλινδρο η παλινδρομούσα δύναμη δίνεται από την προβολή στον άξονα του κυλίνδρου και έχει μέτρο:

$$Z_I = m_l r \omega^2$$

Με διεύθυνση την εκάστοτε του στροφάλου.

Επειδή το άθροισμα των προβολών των συνιστωσών πολλών διανυσμάτων σε ένα άξονα ισούται με την προβολή της συνισταμένης τους, σχεδιάζεται ο αστέρας των βοηθητικών διανυσμάτων Z_i και η συνισταμένη τους προβάλλεται στον άξονα των κυλίνδρων.

Ο πρώτος κύλινδρος (1) βρίσκεται για ευκολία στο ΑΝΣ



Λόγω του συμμετρικού του αστέρα των βοηθητικών διανυσμάτων η συνισταμένη τους είναι 0:

$$\vec{R}_I = \sum \vec{Z}_I = 0$$

Άρα και η προβολή της στην κοινή διεύθυνση των αξόνων των κυλίνδρων, δηλαδή η συνισταμένη των $Z_i \cos \phi$ όλων των κυλίνδρων είναι σε κάθε στιγμή μηδενική.

Η στιγμιαία τιμή της ροπής από την $Z_i \cos \phi$ για κάθε κύλινδρο θα ισούται με το γινόμενο της τιμής της επί την απόσταση του εν λόγω κυλίνδρου από το σημείο αναγωγής.

Για τη διευκόλυνση σχεδίασης των διαγραμμάτων των ροπών τα διανύσματά τους λαμβάνονται στραμμένα κατά 90° οπότε και εμφανίζονται όπως αυτά των δυνάμεων.

Ως εκ τούτου, η στιγμιαία τιμή της συνολικής ροπής M_I θα ισούται με την προβολή διανύσματος που είναι η συνισταμένη των βοηθητικών διανυσμάτων των Z_i κάθε ενός όμως πολλαπλασιασμένου επί την απόσταση του κυλίνδρου που αντιπροσωπεύει από το σημείο αναγωγής. Όλα γίνονται σε άξονα παράλληλο προς τους άξονες των κυλίνδρων.

$$\vec{M}_I = \sum \vec{Z}_i d' = 0 \text{ όπου } d' \text{ είναι η σχετική απόσταση του σημείου αναγωγής}$$

2. Περιστρεφόμενες δυνάμεις

Οι δυνάμεις αυτές έχουν σταθερό μέτρο και ίσο με:

$$P_r = m_r r \omega^2$$

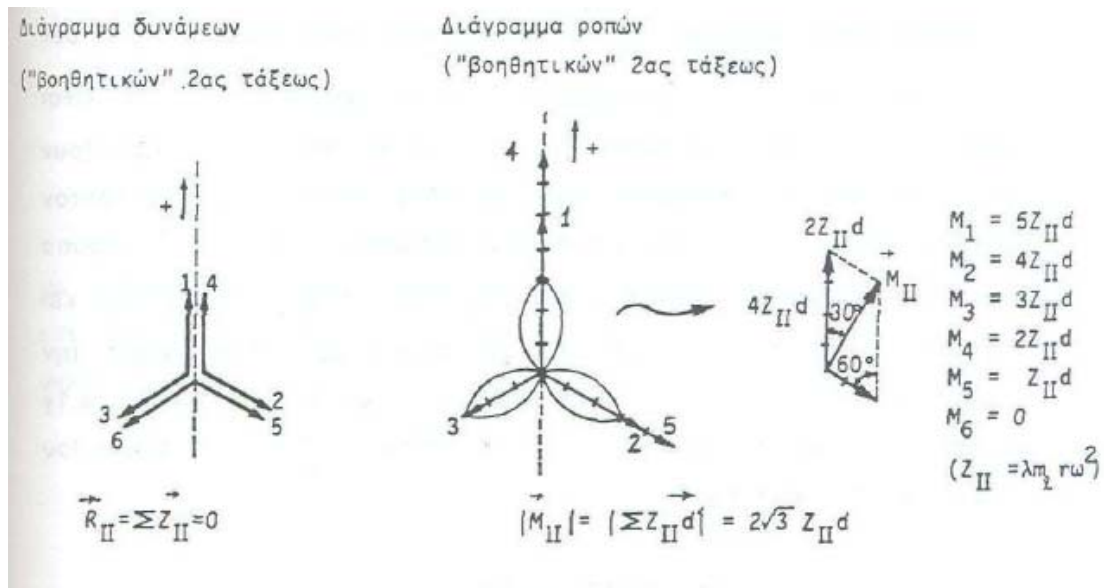
Οι δυνάμεις αυτές αντιπροσωπεύονται από τα ίδια διανύσματα με τις παλινδρομικές 1^{ης} τάξης (δυνάμεις ή ροπές), με ανάλογη κλίμακα που μπορεί να διαφέρει, θεωρώντας τον πρώτο κύλινδρο στο ΑΝΣ. Έτσι όπως και πριν έχουμε:

$$\vec{R}_r = \sum \vec{P}_r = 0 \text{ και}$$

$$\vec{M}_r = \sum \vec{P}_r \vec{d}' = 0$$

3. Παλινδρομικές δυνάμεις 2^{ης} τάξης

Με ανάλογο των παλινδρομικών δυνάμεων 1^{ης} τάξης, τα βοηθητικά διανύσματα για τις δυνάμεις 2^{ης} τάξης και τις ροπές τους σχεδιάζονται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σημείο αναγωγής είναι το Δ στο άξονα του κυλίνδρου 6.

Η συνισταμένη δύναμη των «βοηθητικών» διανυσμάτων όπως μπορεί να διακριθεί από το σχήμα είναι μηδενική:

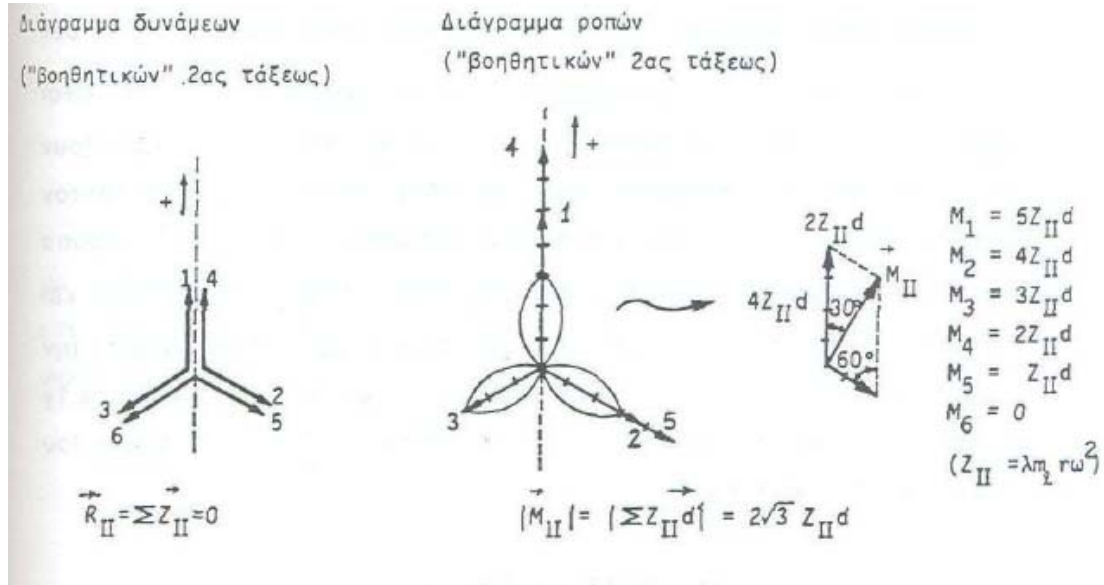
$$\vec{R}_{II} = \sum \vec{Z}_{II} = 0$$

Άρα και η συνισταμένη των $Z_{II} \cos 2\varphi$ (προβολή της Z_{II} στην κοινή διεύθυνση των αξόνων των κυλίνδρων) είναι μηδενική.

Όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα η M_{II} είναι πλευρά τριγώνου του οποίου οι δύο άλλες πλευρές σχηματίζουν γωνία 60° με πλευρές που έχουν μήκη

$$M_2 = 4Z_{II}d \text{ και } M_4 = 2Z_{II}d.$$

Τα διανύσματα που δίνουν συνισταμένη 0 παραλείπονται.



Άρα και το μέτρο του διανύσματος της M_{II} λόγω του Πυθαγορείου θεωρήματος (ορθογώνιο τρίγωνο) θα έχει μέτρο:

$$M_{II} = 2\sqrt{3}Z_{II}d$$

Η στιγμιαία τιμή της συνισταμένης ροπής για γωνία φ του στροφάλου του κυλίνδρου 1 είναι:

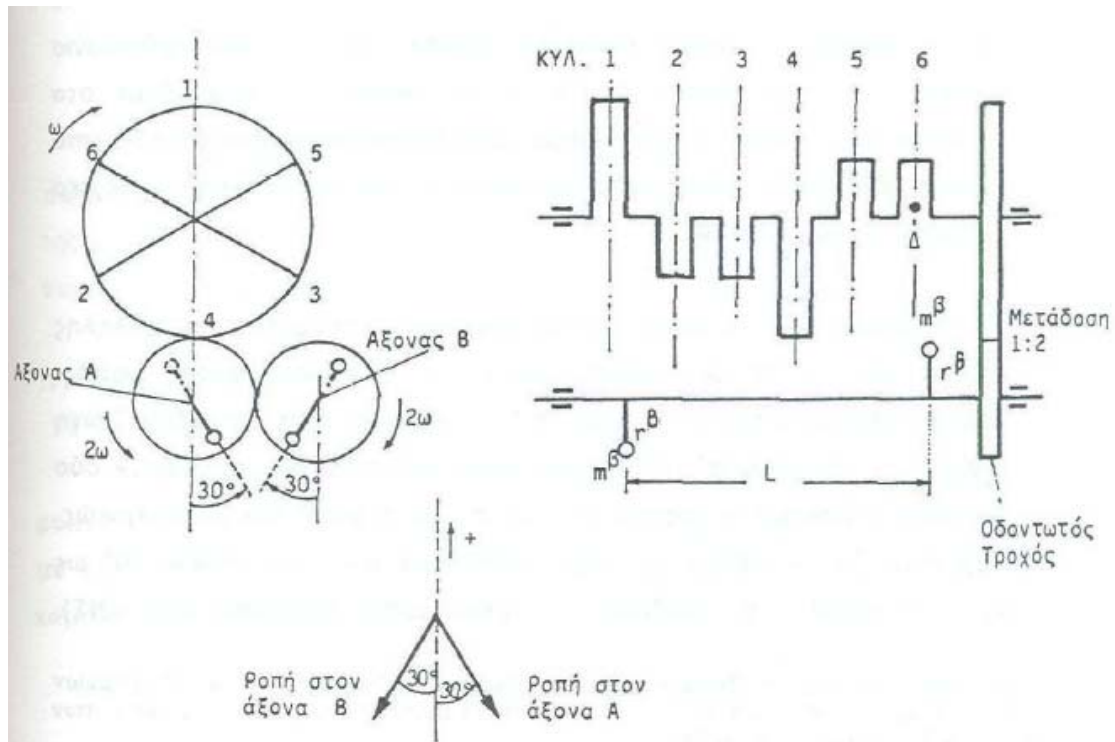
$$M_{II} = 2\sqrt{3}Z_{II}d \cos(2\varphi + 30^\circ)$$

Όπου 30° είναι η γωνία απόκλισης του διανύσματος της M_{II} ως προς το διάνυσμα της Z_{II} του κυλίνδρου 1.

Για την πλήρη αντιστάθμιση της ροπής αυτής χρησιμοποιείται η διάταξη του παρακάτω σχήματος.

Δύο ζεύγη αντίβαρων:

- με στοιχεία m^β, r^β
- Στρέφονται με αντίθετη φορά και συμμετρικώς με ταχύτητα 2ω
- Έκαστο ζεύγος σφηνωμένο υπό γωνία 30° ως προς το στρόφαλο του πρώτου κυλίνδρου που βρίσκεται στο ΑΝΣ.



Σε τυχαία θέση της ατράκτου η ροπή που δημιουργείται από τα αντίβαρα είναι:

$$-2m^\beta r^\beta (2\omega)^2 L \cos(2\varphi + 30^\circ)$$

Το επίπεδό της συμπίπτει προς το κατακόρυφο μέσο διαμήκες επίπεδο του κινητήρα στο οποίο δρα και η M_{II} .

Τα στοιχεία m^β, r^β, L πρέπει να επιλέγονται έτσι ούτως ώστε να ισχύει ότι:

$$2\sqrt{3}\lambda m_1 r \omega^2 d \cos(2\varphi + 30^\circ) - 2m^\beta r^\beta (2\omega)^2 L \cos(2\varphi + 30^\circ) = 0$$

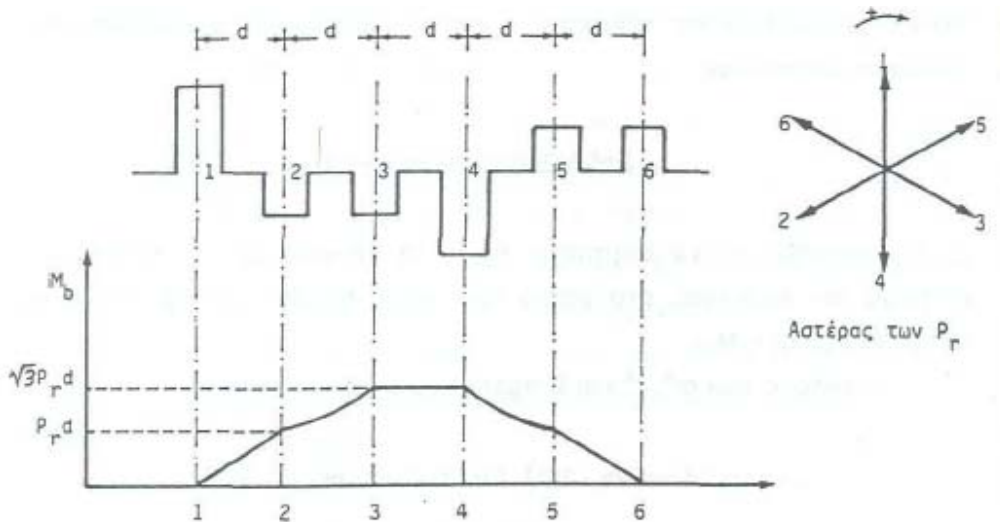
ή

$$\frac{\sqrt{3}}{4} \lambda m_1 r d = L m^\beta r^\beta$$

4. Καμπτικές ροπές M_b

Το μέτρο της καμπτικής ροπής μεταβάλλεται κατά μήκος της ατράκτου, με μέγιστη τιμή στο τμήμα 3-4, λόγω των περιστρεφόμενων δυνάμεων και όταν η άτρακτος εδράζεται στα δύο άκρα της.

Λόγω συμμετρίας στο παρακάτω σχήμα εξετάζονται οι καμπτικές ροπές ως τη μέση της ατράκτου (έως το τμήμα 3-4).



Τμήμα 1-2



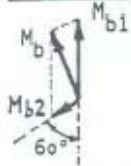
$$0 \leq x \leq d$$

$$M_{b1} = P_r x$$

$$M_b = P_r x$$

$$\text{Γιὰ } x=d \rightarrow M_{b \max} = P_r d$$

Τμήμα 2-3



$$0 \leq x \leq d$$

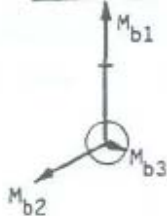
$$M_{b1} = P_r (x+d)$$

$$M_{b2} = P_r x$$

$$M_b = P_r \sqrt{(d+x)^2 + x^2 - 2(d+x)x \cos 60^\circ} = P_r \sqrt{d^2 + dx + x^2}$$

$$\text{Γιὰ } x=d \rightarrow M_{b \max} = \sqrt{3} P_r d$$

Τμήμα 3-4



$$0 \leq x \leq d$$

$$M_{b1} = P_r (2d+x)$$

$$M_{b2} = P_r (d+x)$$

$$M_{b3} = P_r x$$

$$M_b = \sqrt{3} P_r d$$

$$\forall x \rightarrow M_{b \max} = \sqrt{3} P_r d = \text{const}$$

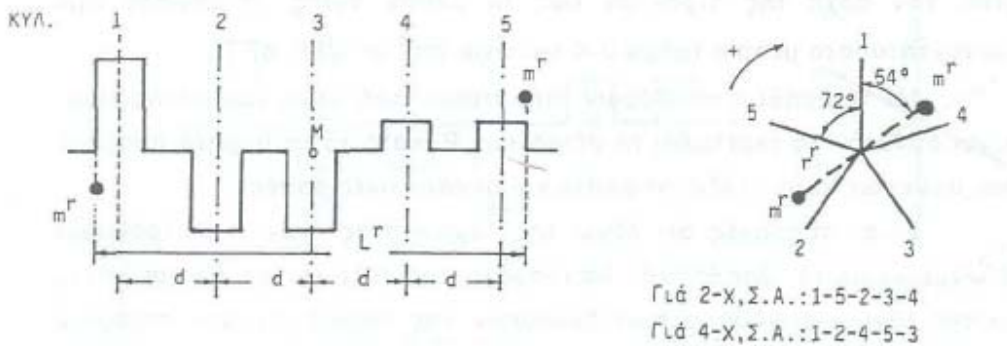
Πεντακύλινδρος 2X ή 4X κινητήρας (σε σειρά)

- Για 2X κινητήρα η γωνία σφηνώσεως των στροφάλων ϵ είναι ίση με τη γωνία αναφλέξεως: $\Delta\phi_\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/5 = 72^\circ$
- Για 4X κινητήρα (περιττός αριθμός κυλίνδρων) η γωνία σφηνώσεως των στροφάλων $\epsilon=72^\circ$, είναι το μισό της γωνίας αναφλέξεως $\Delta\phi_\alpha = 720^\circ/5 = 144^\circ$ δηλαδή 2 φορές τις 72° .

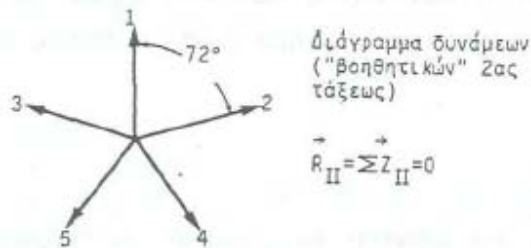
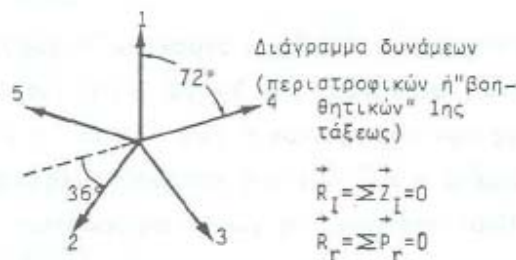
Από την άποψη της ζυγοστάθμισης το αποτέλεσμα είναι το ίδιο είτε ο κινητήρας δουλεύει σαν 2X ή σαν 4X.

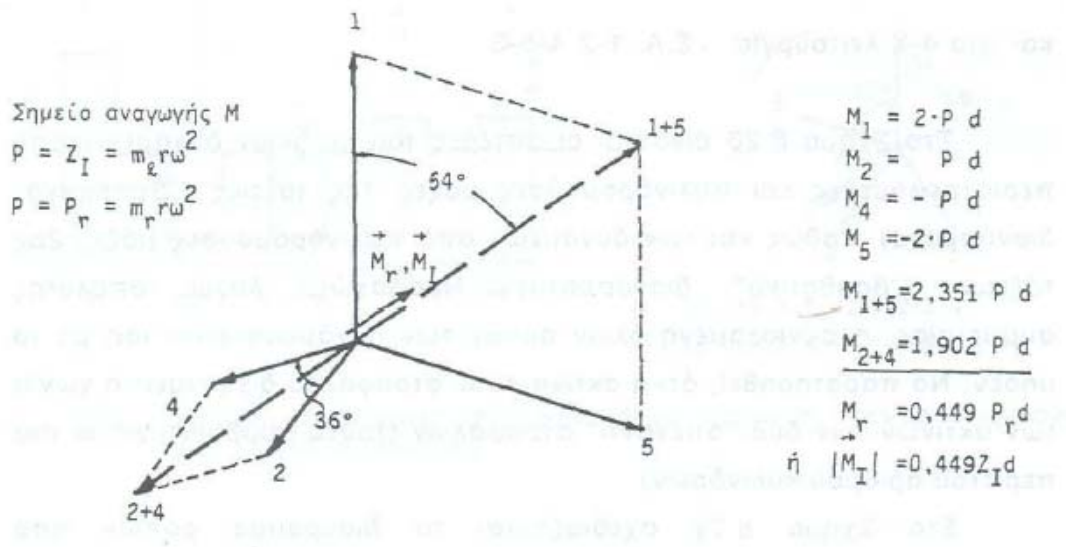
Με τη διάταξη των στροφάλων που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα οι σειρές αναφλέξεως είναι:

- 1-5-2-3-4 για 2X λειτουργία
- 1-2-4-5-3 για 4X λειτουργία



Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι αστέρες των μαζικών δυνάμεων από περιστρεφόμενες και παλινδρομούσες μάζες 1^{ης} τάξης και 2^{ης} τάξης (βοηθητικά διανύσματα όπως συνηθίζονται να αποκαλούνται).

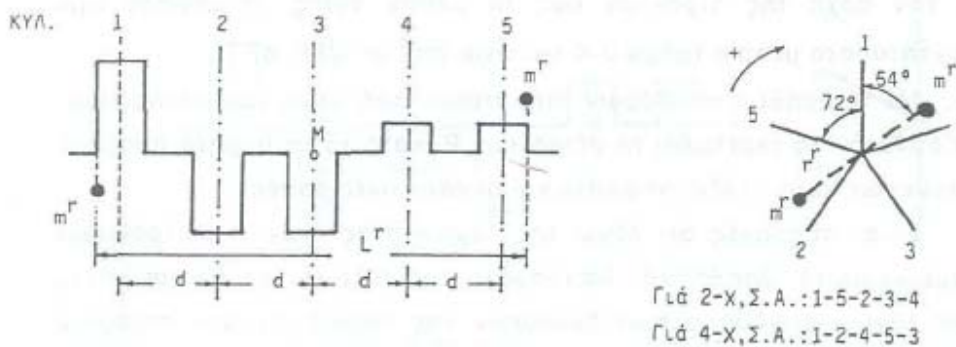




Έστω ότι ο κύλινδρος 1 είναι στο ANΣ του. Από τη γεωμετρία του σχήματος που φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα προκύπτει το διάνυσμα M_r της συνισταμένης ροπής από περιστρεφόμενες μάζες έχει μέτρο $M_r = 0,449 P_r d$ και απόκλιση 54° ως προς τον πρώτο στρόφαλο.

Η ζυγοστάμιση της ροπής αυτής δύναται να γίνει με την τοποθέτηση δύο αντίβαρων m^r σε ακτίνα r^r και απόσταση μεταξύ τους L^r τέτοια ώστε να ισχύει:

$$m^r r^r \omega^2 L^r = -M_r = -0,449 P_r d$$



Το μέγεθος L^r εκλέγεται κατά το δυνατόν μεγάλο (στερέωση στους δύο βραχίονες) ώστε το μέγεθος m^r να είναι μικρό.

Υπό άλλη κλίμακα η συνισταμένη των βοηθητικών διανυσμάτων των ροπών της πρώτης τάξης έχει μέτρο:

$$|\vec{M}_I| = \left| \sum \vec{Z}_I d^r \right| = 0,449 Z_I d$$

Και προηγείται του σχετικού διανύσματος του κυλίνδρου 1 κατά 54° . Άρα και η στιγμιαία τιμή της ροπής θα είναι:

$$M_I = 0,449 m_r r \omega^2 d \cos(\varphi + 54^\circ)$$

Όπου φ είναι η γωνία του στρόφαλου του κυλίνδρου 1.

Από τη γεωμετρία του παρακάτω σχήματος που παρουσιάζει το διάγραμμα των ροπών των βοηθητικών διανυσμάτων των δυνάμεων 2^{ης} τάξης (κύλινδρος 1 στο ΑΝΣ), προκύπτει ότι η συνισταμένη των βοηθητικών διανυσμάτων των ροπών 2^{ης} τάξης έχει μέτρο:

$$|\vec{M}_{II}| = \left| \sum \vec{Z}_{II} d' \right| = 4,98Z_{II}d$$

Και προηγείται του σχετικού διανύσματος του κυλίνδρου 1 κατά 18°. Άρα και η στιγμιαία τιμή της ροπής θα είναι:

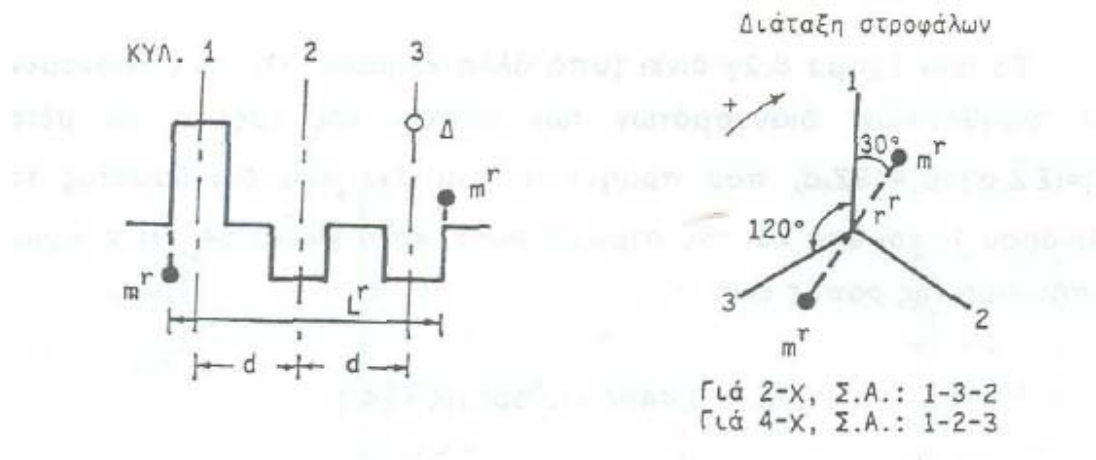
$$M_I = 4,98\lambda m_l r \omega^2 d \cos(2\varphi + 18^\circ)$$

Όπου φ είναι η γωνία του στροφάλου του κυλίνδρου 1.

Τρικύλινδρος 2X ή 4X κινητήρας (σε σειρά)

- Για 2X κινητήρα η γωνία σφηνώσεως των στροφάλων ϵ είναι ίση με τη γωνία αναφλέξεως: $\Delta\varphi_\alpha = 360^\circ/z = 360^\circ/3 = 120^\circ$
- Για 4X κινητήρα (περιττός αριθμός κυλίνδρων) η γωνία σφηνώσεως των στροφάλων $\epsilon=120^\circ$, είναι το μισό της γωνίας αναφλέξεως $\Delta\varphi_\alpha = 720^\circ/3 = 240^\circ$ δηλαδή 2 φορές τις 120° .

Σειρά αναφλέξεως και διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

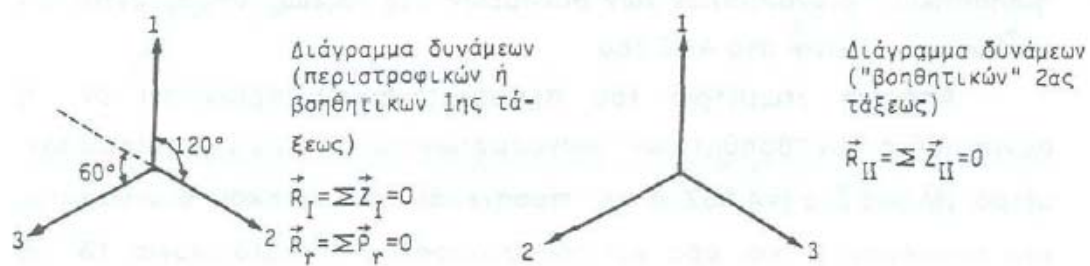


Από την άποψη της ζυγοστάθμισης το αποτέλεσμα είναι το ίδιο είτε ο κινητήρας δουλεύει σαν 2X ή σαν 4X.

Με τη διάταξη των στροφάλων που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα οι σειρές αναφλέξεως είναι:

- 1-3-2 για 2X λειτουργία
- 1-2-3 για 4X λειτουργία

Η συνισταμένη των μαζικών δυνάμεων από περιστρεφόμενες και παλινδρομούσες μάζες 1^{ης} και 2^{ης} τάξης είναι μηδέν λόγω της απόλυτης συμμετρίας των βοηθητικών διανυσμάτων (σχήμα που ακολουθεί).

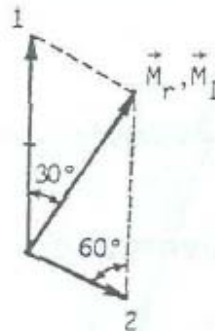


Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα των ροπών από περιστρεφόμενες μάζες ή υπό άλλη κλίμακα το διάγραμμα των βοηθητικών διανυσμάτων για τις ροπές πρώτης τάξης:

$$P = Z_1 = m_l r \omega^2$$

ή

$$P = P_r = m_r r \omega^2$$



$$\left. \begin{array}{l} M_1 = 2Pd \\ M_2 = Pd \end{array} \right\} \begin{array}{l} M_r = \sqrt{3} P_r d \\ |\vec{M}_I| = \sqrt{3} Z_I d \end{array}$$

Από τη γεωμετρία του σχήματος που φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα προκύπτει το διάνυσμα M_r της συνισταμένης ροπής από περιστρεφόμενες μάζες έχει μέτρο $M_r = \sqrt{3} P_r d$ και απόκλιση 30° ως προς τον πρώτο στρόφαλο.

Η ζυγοστάθμιση της ροπής αυτής δύναται να γίνει με την τοποθέτηση δύο αντίβαρων m' σε ακτίνα r' και απόσταση μεταξύ τους L' τέτοια ώστε να ισχύει:

$$m' r' \omega^2 L' = -M_r = \sqrt{3} P_r d$$

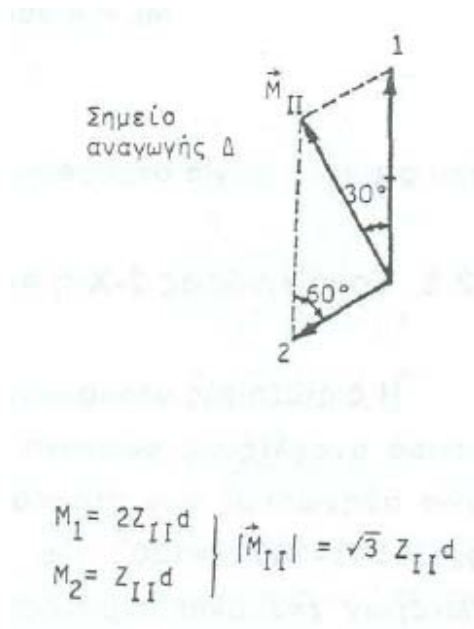
Υπό άλλη κλίμακα η συνισταμένη των βοηθητικών διανυσμάτων των ροπών της πρώτης τάξης έχει μέτρο:

$$|\vec{M}_I| = \left| \sum \vec{Z}_I d' \right| = \sqrt{3} Z_I d$$

Και προηγείται του σχετικού διανύσματος του κυλίνδρου 1 κατά 30° . Άρα και η στιγμιαία τιμή της ροπής θα είναι:

$$M_I = \sqrt{3}m_l r \omega^2 d \cos(\varphi + 30^\circ)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα των ροπών των βοηθητικών διανυσμάτων των δυνάμεων 2^{ης} τάξης (με τον κύλινδρο 1 στο ANΣ).



Από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτει ότι:

$$|\vec{M}_{II}| = \left| \sum \vec{Z}_{II} d' \right| = \sqrt{3} Z_{II} d$$

Και έπεται του σχετικού διανύσματος του κυλίνδρου 1 κατά 30° . Άρα και η στιγμιαία τιμή της ροπής θα είναι:

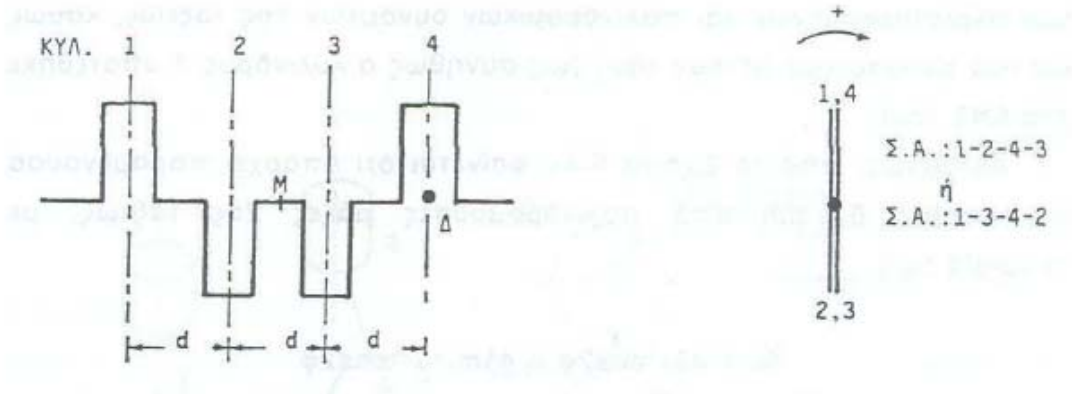
$$M_{II} = \sqrt{3}\lambda m_l r \omega^2 d \cos(2\varphi - 30^\circ)$$

Όπου φ είναι η γωνία του στροφάλου του κυλίνδρου 1.

Τετρακύλινδρος 4X κινητήρας (σε σειρά)

- Για 4X κινητήρα (άρτιος αριθμός κυλίνδρων) η γωνία σφηνώσεως των στροφάλων $\epsilon=360^\circ/2=180^\circ$, είναι ίση με τη γωνία αναφλέξεως $\Delta\phi_\alpha = 720^\circ/z=720^\circ/4 = 180^\circ$ αφού στην περίπτωση αυτή τα στρόφαλα συμπίπτουν ανά δύο.

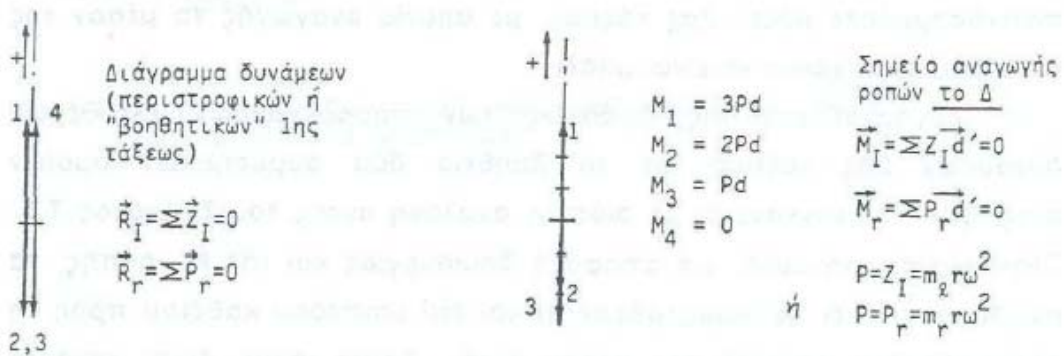
Σειρά αναφλέξεως και διάταξη στροφαλοφόρου ατράκτου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Με αυτή τη διάταξη στροφάλων υπάρχει δυνατότητα για εφαρμογή δύο διαφορετικών σειρών ανάφλεξης με την ίδια όμως διαδικασία ζυγοστάθμισης:

- 1-2-4-3 και
- 1-3-4-2

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ότι λόγω πλήρους συμμετρίας έχουμε ζυγοστάθμιση των περιστρεφόμενων και παλινδρομικών μαζών καθώς και των αντίστοιχων ροπών τους.

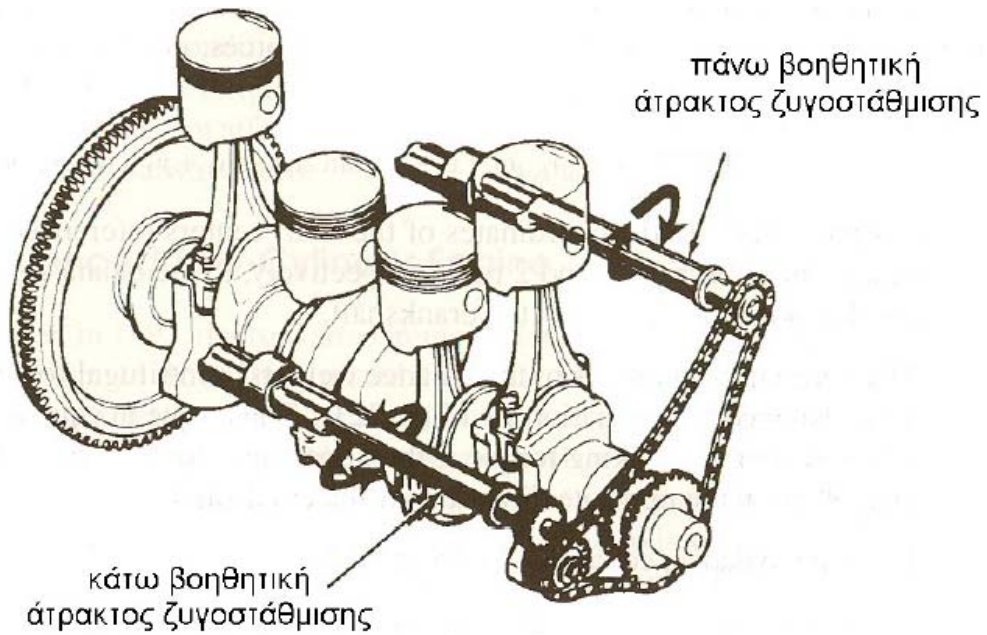
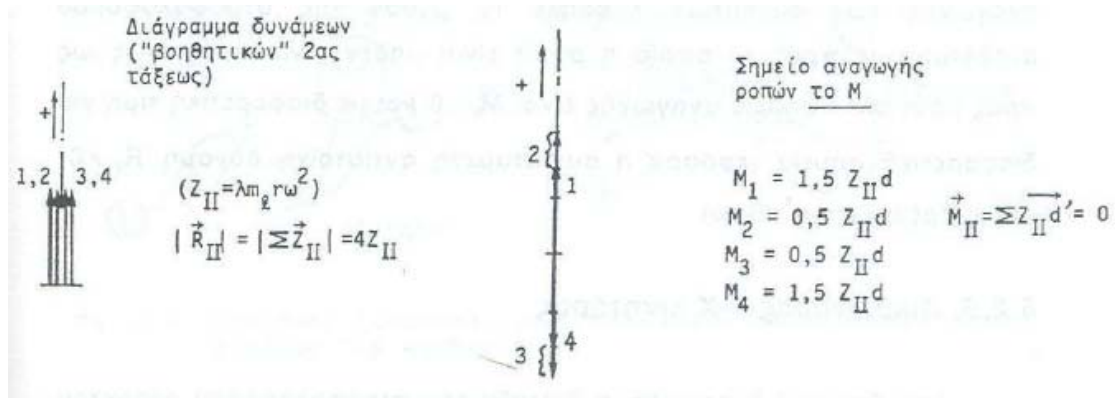


Αντίθετα η συνισταμένη δύναμη από παλινδρομούσες δυνάμεις 2^{ης} τάξης παραμένει και έχει στιγμιαία τιμή:

$$R_{II} = 4Z_{II} \cos 2\varphi = 4\lambda m_2 r \omega^2 \cos 2\varphi$$

Όπου φ η γωνία του στροφάλου του κυλίνδρου 1.

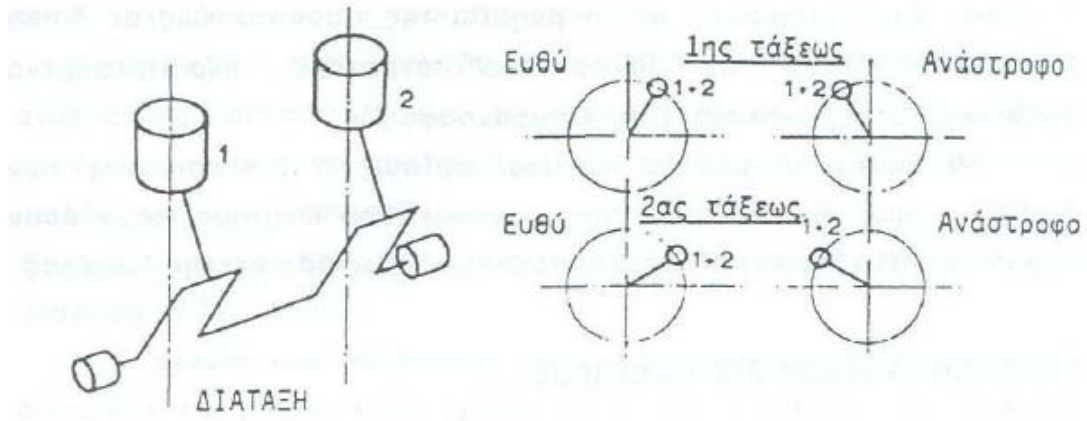
Η συνισταμένη ροπή από τις παλινδρομούσες δυνάμεις 2^{ης} τάξης είναι 0 όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα:



Δικύλινδρος 4X κινητήρας (σε σειρά)

Σύμφωνα με τη διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ισχύει ότι η γωνία σφηνώσεως των στροφάλων ϵ είναι 0° ή 360° και η γωνία ανάφλεξης

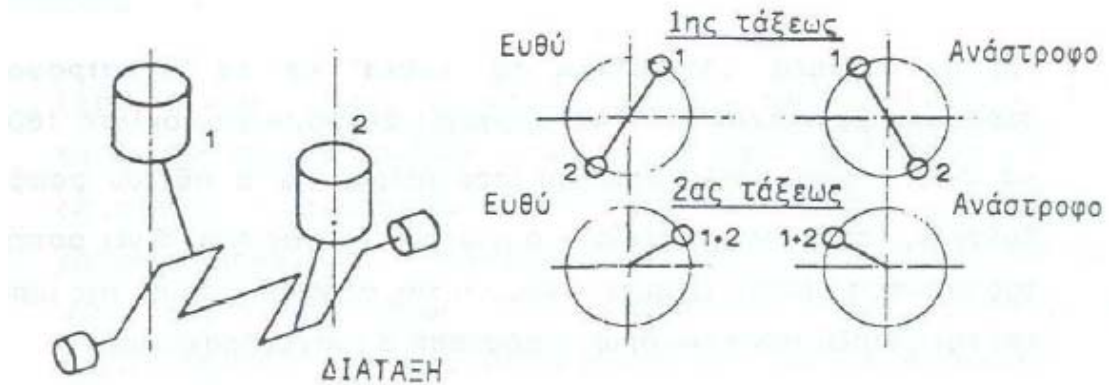
$$\Delta\phi_\alpha = 720^\circ / z = 720^\circ / 2 = 360^\circ. \text{ (4X με άρτιο αριθμό κυλίνδρων)}$$



Δικύλινδρος 4X κινητήρας (σε σειρά)

Σύμφωνα με τη διάταξη της στροφαλοφόρου ατράκτου που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ισχύει ότι η γωνία σφηνώσεως των στροφάλων ϵ είναι 180° και η γωνία ανάφλεξης

$$\Delta\phi_\alpha = 360^\circ / z = 360^\circ / 2 = 180^\circ.$$



Για άλλα είδη κινητήρων, μπορείτε να διαβάσετε στο βιβλίο «ΜΕΚ II» του Κ.Δ. Ρακόπουλου.