Δυναμικός Σχεδιασμός Γεννήτριας 180MW

Δυναμική Περιστρεφόμενων Μηχανών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Ονοματεπώνυμο: Παπαδάκης Μιχαήλ
Αριθμός Μητρώου: 02118026
Ακαδημαϊκό έτος: 4^o
Ημερομηνία: 21/12/21

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων

Εισαγωγή

Στην παρούσα άσκηση μελετήθηκε ένας πραγματικός άξονας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές για δημιουργία καλής ποιότητας διακριτοποίησης ενώ η δυναμική ανάλυση έγινε σε έτοιμο κώδικα από το εργαστήριο. Ακόμα, έγινε χρήση διαγραμμάτων για να ληφθεί υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά των εδράνων, λόγω της υδροδυναμικής λίπανσης, και με αριθμητικές μεθόδους προέκυψαν οι ζητούμενες αποκρίσεις και βρέθηκαν σημαντικά στοιχεία λειτουργίας.

Πεπερασμένα στοιχεία

Το πρώτο βήμα είναι η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία. Αρχικά επιλέχθηκε ένα πεπερασμένο στοιχείο για κάθε μέρος του άξονα με διαφορετική διάμετρο από τα διπλανά του. Ύστερα, γίνεται εκλέπτυνση της διακριτοποίησης σύμφωνα με δύο κριτήρια:

- Ο λόγος L/D κάθε στοιχείου να είναι στο εύρος των $[0.05,\ 0.8]$
- Ο σχετικός λόγος L/D δύο στοιχείων να είναι στο εύρος $[0,\ 4]$

Αυτό έγινε με τη βοήθεια του excel, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

L	R	D	L/D	(L/D)i+1 / (L/D)i	(L/D)i / (L/D)i-1	Διαχωρισμός για επίτευξη επιθυμητού L/D
90	150	300	0,3	0,555555556		
60	180	360	0,166667	1,411764706	1,8	
120	255	510	0,235294	3,1875	0,708333333	
270	180	360	0,75	1	0,31372549	
270	180	360	0,75	0,941176471	1	
360	255	510	0,705882	0,147569444	1,0625	
75	360	720	0,104167	9	6,776470588	
450	240	480	0,9375	0,237037037	0,111111111	2
120	270	540	0,222222	0,45	4,21875	
60	300	600	0,1	53,33333333	2,222222222	
4000	375	750	5,333333	0,01875	0,01875	8
60	300	600	0,1	2,222222222	53,33333333	
120	270	540	0,222222	4,21875	0,45	
450	240	480	0,9375	0,111111111	0,237037037	2
75	360	720	0,104167	5,333333333	9	
300	270	540	0,555556	1,725	0,1875	
345	180	360	0,958333	1	0,579710145	2
345	180	360	0,958333	0,125217391	1	2
90	375	750	0,12	0	7,986111111	

L	R	D	L/D	(L/D)i+1 / (L/D)i	(L/D)i / (L/D)i-1	Διαχωρισμός για επίτευξη ομαλών μεταβάσεων	Total	add for relative L/D	Divide for L/D
90	150	300	0,3	0,555555556			**1**		
60	180	360	0,166667	1,411764706	1,8		**1**		
120	255	510	0,235294	3,1875	0,708333333		**1**		
270	180	360	0,75	1	0,31372549		**1**		
270	180	360	0,75	0,941176471	1		**1**		
360	255	510	0,705882	0,147569444	1,0625		**1**	1	1
75	360	720	0,104167	4,5	6,776470588		**1**		
225	240	480	0,46875	0,474074074	0,222222222		**3**	1	2
120	270	540	0,222222	0,45	2,109375		**1**		
60	300	600	0,1	6,666666667	2,222222222		**1**		
500	375	750	0,666667	0,15	0,15		**14**	6	8
60	300	600	0,1	2,222222222	6,666666667		**1**		
120	270	540	0,222222	2,109375	0,45		**1**		
225	240	480	0,46875	0,222222222	0,474074074		**3**	1	2
75	360	720	0,104167	5,333333333	4,5		**1**		
300	270	540	0,555556	0,8625	0,1875		**2**	1	1
172,5	180	360	0,479167	1	1,15942029		**2**		2
172,5	180	360	0,479167	0,250434783	1		**2**		2
90	375	750	0,12	0	3,993055556		**1**		

L	R	D	L/D	(L/D)i+1 / (	(L/D)i / (L/D)i-1
90	150	300	0,3	0,555556	
60	180	360	0,166667	1,411765	1,8
120	255	510	0,235294	3,1875	0,708333333
270	180	360	0,75	1	0,31372549
270	180	360	0,75	0,470588	1
180	255	510	0,352941	0,295139	2,125
75	360	720	0,104167	3	3,388235294
150	240	480	0,3125	0,711111	0,333333333
120	270	540	0,222222	0,45	1,40625
60	300	600	0,1	3,809524	2,222222222
285,7143	375	750	0,380952	0,2625	0,2625
60	300	600	0,1	2,222222	3,80952381
120	270	540	0,222222	1,40625	0,45
150	240	480	0,3125	0,333333	0,711111111
75	360	720	0,104167	2,666667	3
150	270	540	0,277778	1,725	0,375
172,5	180	360	0,479167	1	0,579710145
172,5	180	360	0,479167	0,250435	1
90	375	750	0,12	0	3,993055556

Σχήμα 1: Διακριτοποίηση

Στο σχήμα 1 παρατηρείται πως με την αρχική διακριτοποίηση δεν τηρούνταν τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν (κίτρινη υπογράμμιση στις στήλες L/D, $(L/D)_{i+1}/(L/D)_i$ και $(L/D)_i/(L/D)_{i-1}$). Αφού διαιρέθηκαν κάποια στοιχεία για να ικανοποιηθεί το πρώτο κριτήριο (πράσινη υπογράμμιση στην στήλη L/D, μετά την πρώτη γκρι στήλη) αλλά ακόμα δεν τηρούνταν το δεύτερο κριτήριο. Συνεπώς προστέθηκαν κάποια ακόμα στοιχεία, και τελικά στο τέλος ικανοποιήθηκε και το πρώτο κριτήριο (πράσινη υπογράμμιση) και το δεύτερο. Τα αποτελέσματα επαληθεύονται και από το σχήμα 2.

Ύστερα, έπρεπε τα γεωμετρικά δεδομένα να περαστούν στη matlab . Τα δεδομένα μήκους και διαμέτρου (DOM) του κάθε στοιχείου ήταν διαθέσιμα από το excel. Ωστόσο, απαιτούνται και μερικά ακόμα δεδομένα:

- Diameter Outside Stifness
- R_{gyr}, $m_{add,i}$
- Θέσεις εδράνων

Για τη εύρεση της διαμέτρου δυσκαμψίας, υλοποιήθηκε ένα πρόγραμμα matlab το οποίο την υπολογίζει [1], με μια προϋπόθεση [2].

Για την εύρεση των στοιχείων που αφορούν την έξτρα μάζα έγιναν οι εξής υποθέσεις.

[1] Καθώς η γραμμή είναι $45°$, σε τριγωνικά εμβαδά το ύψος είναι ίσος με το μήκος των τριγώνων, και το σημείο ίσων εμβαδών προκύπτει πάντα στο μέσο του στοιχείου, άρα και το ύψος είναι ίσο με το μισό μήκος του στοιχείου, ενώ στη περίπτωση που τα εμβαδά ήταν τραπέζια, χρησιμοποιήθηκε μια ρουτίνα διχοτόμησης για να βρεθεί η DOS

[2] Η γραμμή των $45°$ που διαγράφεται από ένα στοιχείο, δεν πρέπει να τέμνει το γειτονικό του στην κατακόρυφη ευθεία που ενώνει την εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου με την αξονική γραμμή του άξονα **και** ύστερα να τέμνει και άλλα στοιχεία. Η υπόθεση επαληθεύτηκε από το solidworks.

- Αρχικά, στο σχέδιο δίνεται η πραγματική ακτίνα και πρέπει να υπολογιστεί η ακτίνα γυροσκόπισης.
- Επιπλέον, η μάζα είναι συμπαγής και το υλικό της είναι χάλυβας ίδιας πυκνότητας με το υλικό του άξονα.

Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τους τύπους:

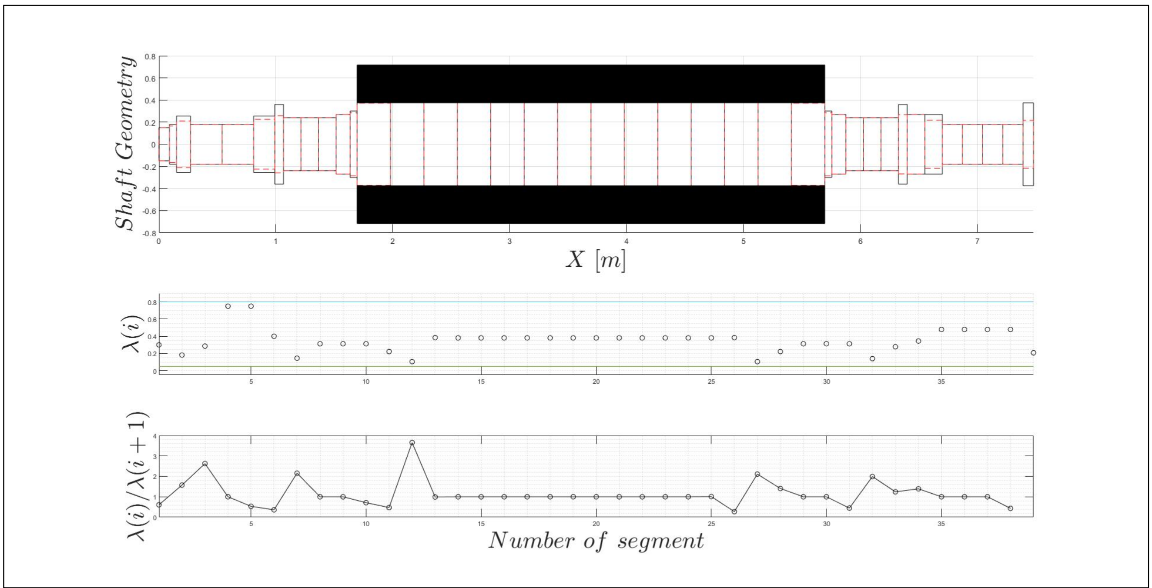
$$R_{gyr} = \sqrt{\frac{I_p}{A}} \tag{1}$$

$$M_d = \rho A L \tag{2}$$

με

$$I_p = \frac{\pi}{2}((1.350/2)^4 - (0.750/2)^4)$$
$$A = \pi((1.350/2)^2 - (0.750/2)^2)$$

προκύπτουν τα ζητούμενα στοιχεία, τα οποία, με ένα πρόγραμμα στο matlab πινακοποιούνται και γράφονται σε ένα αρχείο *geometryFINAL.txt* ώστε να αποτελέσουν είσοδο στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων του εργαστηρίου. Η γεωμετρία του άξονα φαίνεται στο διάγραμμα 2, στο οποίο επιβεβαιώνεται η λογική επιλογή των διαμέτρων στιβαρότητας από την υπορουτίνα που δημιουργήθηκε.



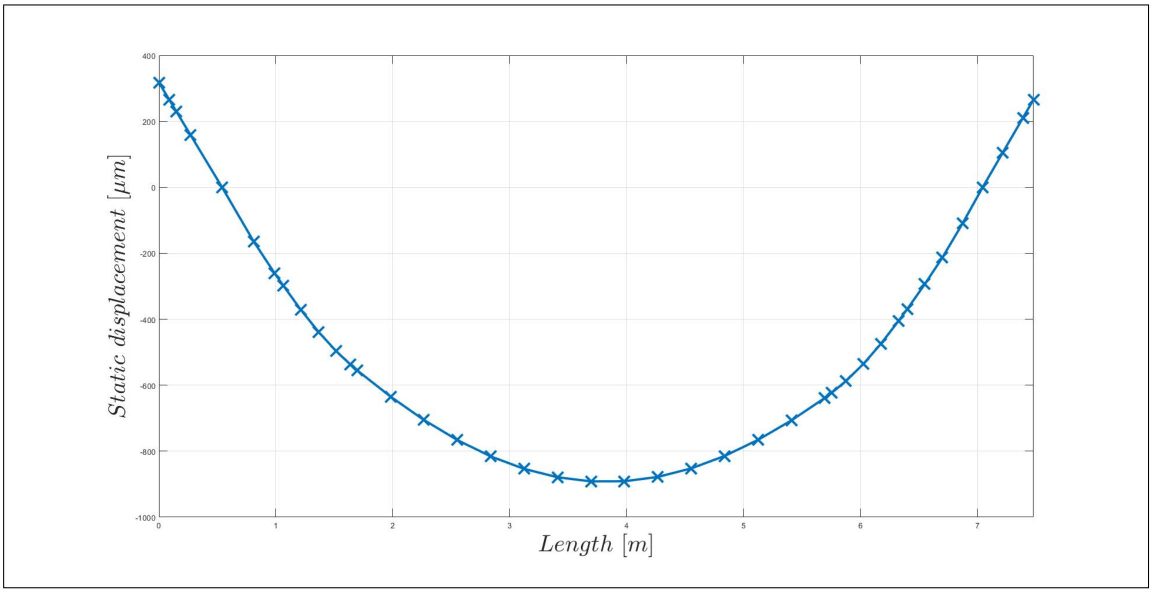
Σχήμα 2: Άξονας και αξιολόγηση διακριτοποίησης

Ερώτημα 1

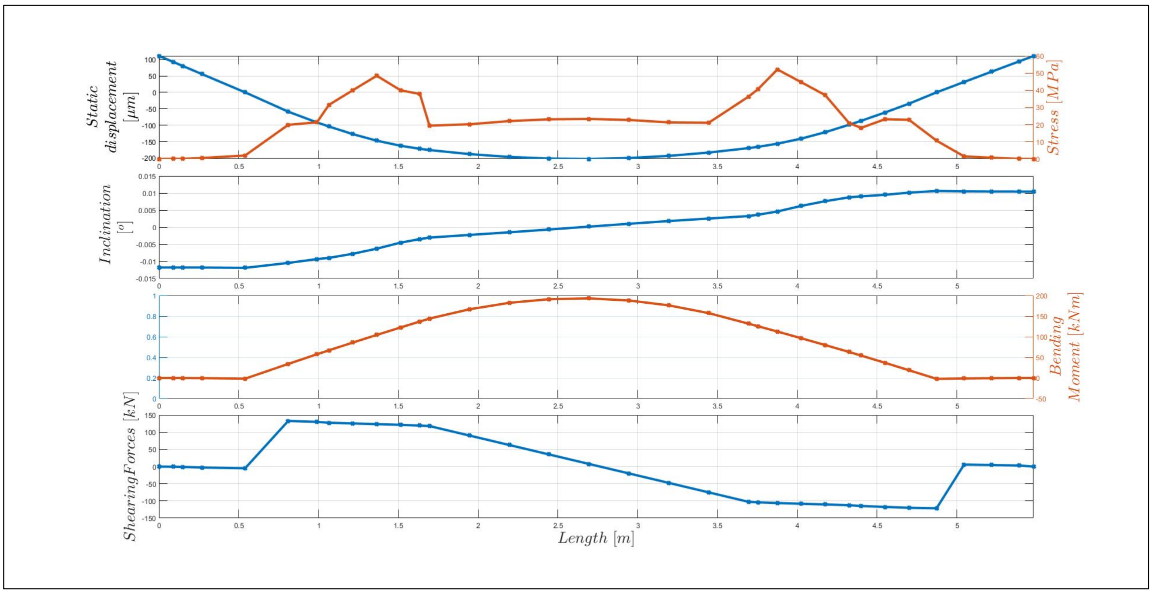
Ελαστική Γραμμή

Σε αυτό το στάδιο, μπορεί να υπολογιστεί η ελαστική γραμμή του άξονα. Αυτή παρατίθεται στο σχήμα 3.

Επιπλέον, παρουσιάζονται τα υπόλοιπα στοιχεία της στατικής ανάλυσης, στο σχήμα 4.



Σχήμα 3: Ελαστική Γραμμή Άξονα



Σχήμα 4: Στατικά στοιχεία από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Αριθμός Sommerfeld

Έχοντας ολοκληρώσει τη στατική ανάλυση, προκύπτει το φορτίο κάθε εδράνου. Συγκεκριμένα:

$$W_1 = 260.15kN,\ W_2 = 229.15kN$$

Η μέση πίεση κάθε εδράνου δίνεται από τον τύπο:

$$P_m = \frac{W}{2rl} < p_{\varepsilon\pi\iota\tau} \tag{3}$$

όπου $p_{\varepsilon\pi\iota\tau} = 0.7 - 1.1$ για άξονες μεγάλης ισχύος, κάτι που δεν ισχύει εδώ.

Ύστερα, πρέπει να υπολογισθεί ο αριθμός sommerfeld, ο οποίος εξαρτάται από τη μέση πίεση κάθε εδράνου, το δυναμικό ιξώδες του λαδιού, το οποίο εξαρτάται από θερμοκρασία, την ακτινική χάρη του εδράνου και τις στροφές λειτουργίας. Συγκεκριμένα, δύνεται από τον τύπο [3]:

$$S = \frac{\mu N}{P_m}(\frac{r}{c})^2 \tag{4}$$

Συνεπώς, για δεδομένη γεωμετρία, με υπόθεση πως η αλλαγή της θερμοκρασίας είναι αμελητέα (Γενικά δεν ισχύει, αφού η θερμοκρασία εξόδου στο σημείο λειτουργίας υπολογίσθηκε στους 20^oC, όπως φαίνεται στο Παράρτημα Α, και επειδή η εξάρτηση είναι λογαριθμική, αυτό συνεπάγεται πως το πραγματικό ιξώδες είναι 0.75% αυτού στους 40^oC) ο αριθμός sommerfeld σε κάθε τυχαίο σημείο λειτουργίας (i) εξαρτάται μόνο από τις στροφές και δύνεται από τον τύπο, όπου (ρ = rated speed):

$$S = S_r(\frac{N_i}{N_r}) \tag{5}$$

Ωστόσο, για την αρχικό υπολογισμό του αριθμού sommerfeld πρέπει να γίνει υπόθεση του λόγου r/c ο οποίος πρέπει να κυμαίνεται στο εύρος [500-1000] ($r = 0.001 \div 0.002c$). Για τον λόγο αυτό, αρχικά δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα που κάνει τους υπολογισμούς σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάζεται στο βιβλίο *Στοιχεία Μηχανών, Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλα*, και παρουσιάζεται στο παράρτημα. Ωστόσο, τελικά επιλέχθηκε τα μεγέθη που παρουσιάζονται στον πίνακα 1:

	1ο έδρανο	2ο έδρανο
Sommerfeld number	0.049678	0.056399
r/c	0.001087	0.001087

Πίνακας 1: Στοιχεία εδράνων στο σημείο λειτουργίας

Βαθμός ληγυρότητας

Ο βαθμός λυγηρότητας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$SR = \frac{L^2}{2A_s} \tag{6}$$

όπου L το μήκος του άξονα ανάμεσα σε δύο έδρανα και A_s το εμβαδόν από την αξονική μέχρι την διάμετρο στιβαρότητας για το διάστημα ανάμεσα από δύο έδρανα. Με βάση τον κώδικα, αυτό προκύπτει:

$$SR = 10.18739$$

[3] Πρέπει να τονισθεί πως στον τύπο 4, το ιξώδες μπαίνει με $1e-3Pas$, η μέση πίεση σε Pa, ενώ οι στροφές σε rpm σύμφωνα με το βιβλίο *Στοιχεία Μηχανών, Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλα*

Προσέγγιση Πρώτης Κρίσιμης Ταχύτητας

Η προσέγγιση της πρώτης κρίσιμης ταχύτητας γίνεται με χρήση του τύπου:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{48EI/L^3}{M_{total}}} \tag{7}$$

όπου $M_{total} = 49.87ton$ η συνολική μάζα του άξονα συν την επιπρόσθετη μάζα, $E = 2.01e + 11Pa$ η ελαστικότητα του άξονα, $L_{bs} = 6.5$ το μήκος ανάμεσα στα έδρανα και $I = \pi Deq^4/64$ με [4]:

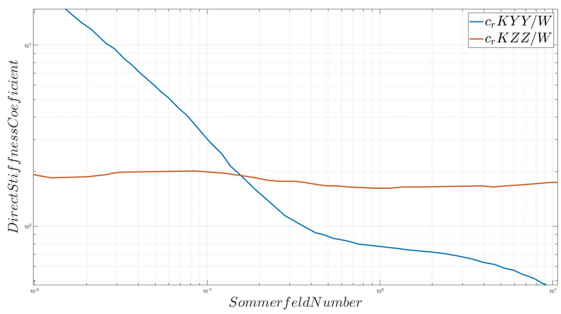
$$D_{eq} = \frac{2As}{L} = 0.639m \tag{8}$$

Προκύπτει:

$$\omega_{n,approx} = 77.4rad/s$$

Ερώτημα 2

Με βοήθεια του graph grabber πάρθηκαν αρκετά σημεία (παραπάνω των 5) από κάθε διάγραμμα, και μεταφέρθηκαν στο matlab. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι τιμές του πρώτου διαγράμματος στο σχήμα 5.



Σχήμα 5: Τιμές στιβαρότητας εδράνων συναρτήσει αριθμού sommerfeld - Δεδομένα που δόθηκαν

Ύστερα, χρησιμοποιώντας τη σχέση 5, έγινε παρεμβολή και πάρθηκαν οι τιμές της στιβαρότητας και της απόσβεσης εδράνων σε κάθε ταχύτητα και περάστηκαν σε ένα αρχείο *BearingsFINAL.txt* το οποίο διαβάζεται από το matlab. Καθώς κάθε έδρανο έχει διαφορετική πίεση, και συνεπώς αριθμό sommerfeld έγιναν οι κατάλληλες αλλαγές και στον κώδικα υπολογισμών ώστε να διαβάζει κάθε φορά τα δεδομένα για συγκεκριμένα έδρανο από τα δυο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.

Ερώτημα 3

Διάγραμμα Campbell

Οι εξισώσεις κίνησης είναι:

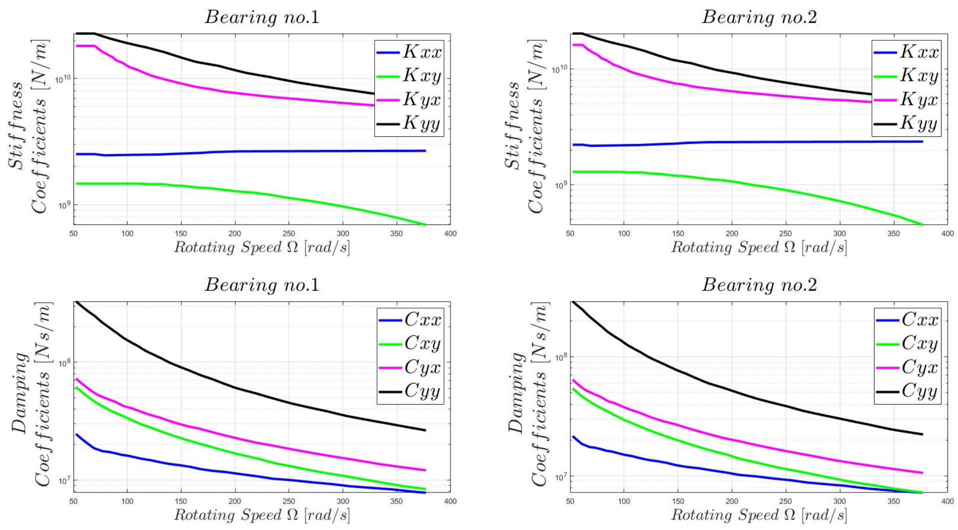
$$[M]\ddot{\boldsymbol{x}} + ([C] + \Omega[G])\dot{\boldsymbol{x}} + [K]\boldsymbol{x} = \boldsymbol{F} \tag{9}$$

όπου $[M]$ ο πίνακας αδράνειας,$[G]$ ο πίνακας γυροσκοπικής σύζευξης,$[K]$ ο πίνακας στιβαρότητας, $\boldsymbol{F}$ είναι το διάνυσμα δύναμης, οι οποίοι ορίζονται μέσα στο πρόγραμμα. Εδώ να αναφερθεί πως δεν υπάρχει ιξώδης απόσβεση, δηλαδή $[C] = 0$.

Για να λυθεί η παραπάνω διαφορική εξίσωση, γίνεται υπόθεση λύσης της μορφής:

$$\boldsymbol{x}(t) = \bar{\boldsymbol{x}} \cdot e^{\lambda t}$$

[4]Δηλαδή, επειδή το A_S προκύπτει από το άθροισμα ορθογώνιων εμβαδών κάθε στοιχείου, η ισοδύναμη διάμετρος αντικαθιστά έναν άξονα με διαμορφώσεις με έναν άλλο με ισοδύναμη διάμετρο που είναι σταθερή κατά μήκος



Σχήμα 6: Δεδομένα Εδράνων για κάθε ταχύτητα περιστροφής

Οπότε, λύνοντας την ομογενή προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$det([M]\lambda^2 + ([C] + \Omega[G])\lambda + [K]) = 0 \tag{10}$$

Η παραπάνω χαρακτηριστική εξίσωση είναι πολυωνυμική, όμως καθώς με 39 στοιχεία, με 40 κόμβους όπου ο καθένας έχει 4 βαθμούς ελευθερίας, συνολικά το σύστημα έχει 160 βαθμούς ελευθερίας. Συνεπώς το πολυώνυμο είναι βαθμού 160 και **δεν μπορεί να λυθεί η εξίσωση 10 απευθείας**.Επιπλέον, επειδή ο πίνακας $[C]$ δεν είναι συμμετρικός, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του ιδιοανυσματικού μετασχηματισμού. Έτσι, χρησιμοποιείται η μέθοδος duncan.

Γίνεται ο μετασχηματισμός:

$$y = \{\dot{x}, x\}^T \tag{11}$$

και ορίζοντας τους πίνακες:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & [M] \\ [M] & [C] + \Omega[G] \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} -[M] & 0 \\ 0 & [k] \end{bmatrix}$$

η εξίσωση 9 (στην ομογενή μορφή) μετατρέπεται στην :

$$A\dot{\boldsymbol{y}} + B\boldsymbol{y} = 0 \tag{12}$$

και συνεπώς με ίδια υπόθεση λύσης προκύπτει:

$$|\lambda[A] + [B]| = 0 => |[A]^{-1}[B] + \lambda I| = 0$$

και λύνοντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτουν $2NoD$ ιδιοτιμές, η οποίες είναι ίσες με τις NoD διπλές ιδιοτιμές που βγαίνουν από την εξίσωση 10.

Το διάγραμμα Campbell, ακολουθεί στο σχήμα 7.

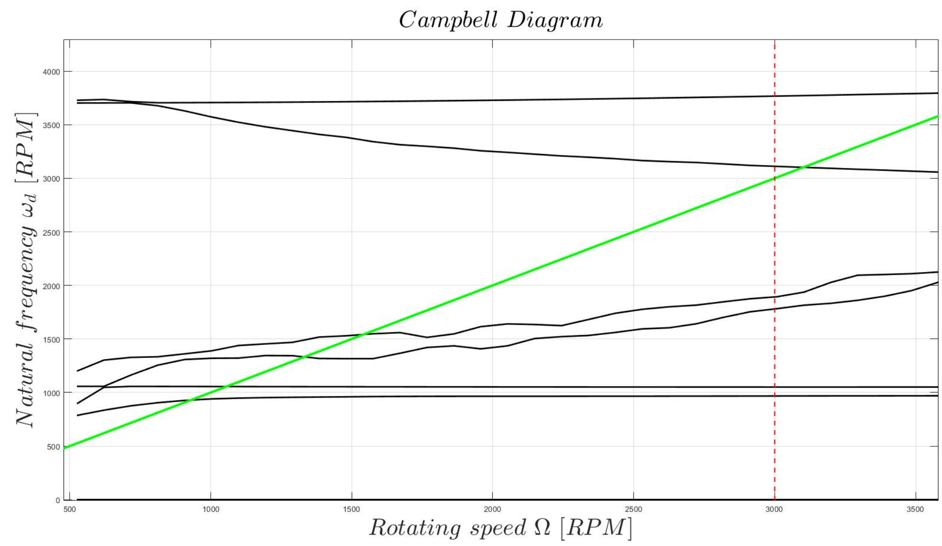
Stability Map

Σε ένα ευσταθές (ασυμπτωτικά ευσταθές) σύστημα το πλάτος των ταλαντώσεων ελεύθερης ταλάντωσης συνεχώς μειώνεται και τελικά τείνει στο μηδέν, συνεπώς ο λόγος λογαριθμικής μείωσης ορίζεται ως:

$$\delta = log(\frac{A^{n+1}}{A^n}) = -\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{13}$$

ενώ ο λόγος δυο διαδοχικών πλατών ορίζεται ως:

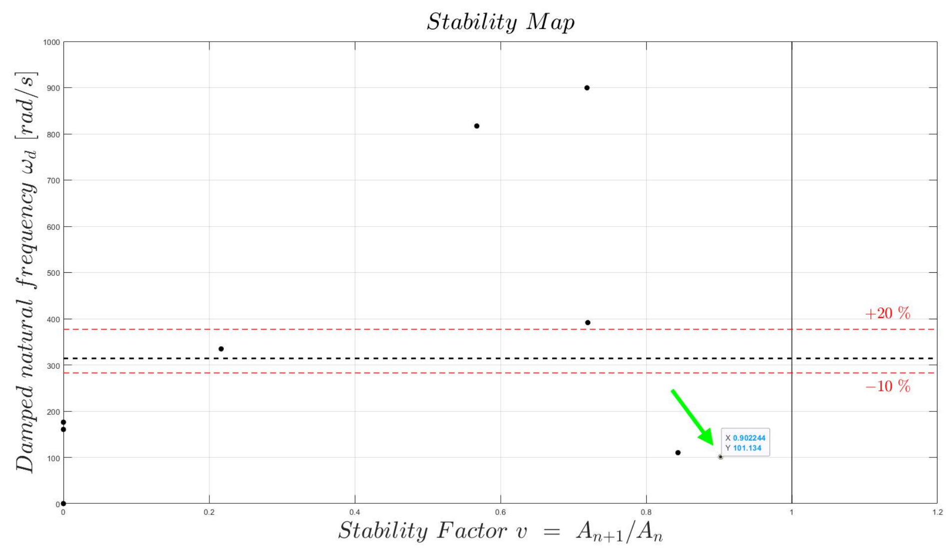
$$v = \frac{A^{n+1}}{A^n} = 10^\delta \tag{14}$$



Σχήμα 7: Διάγραμμα Campbell

Ο λόγος v πρέπει αν είναι μικρότερος της μονάδας αν το δ είναι μικρότερο του 0. Στο σχήμα 8, παρουσιάζεται ο λόγος v για όλες τις ιδιοσυχνότητες στην περιοχή ενδιαφέροντος. Παρατηρείται πως όλες οι ταλαντώσεις αποσβένουν. **Συνεπώς το σύστημα είναι ευσταθές στην περιοχή λειτουργίας.** Ωστόσο, παρατηρείται πως υπάρχει μια ιδιοσυχνότητα πολύ κοντά στην περιοχή λειτουργίας, συνεπώς αυτή θα διεγείρεται κατά την λειτουργία. **Έτσι, ο σχεδιασμός προκύπτει ακατάλληλος.**

Παρατηρείται πως το μέγιστο stability factor παρουσιάζεται στα $101.16 rad/s$ με τιμή $v = 0.9$. Έτσι, η αντίστοιχη λογαριθμική μείωση είναι $\delta = -0.04467$ και αντιστοιχεί σε $\zeta = 0.00711$.



Σχήμα 8: Stability map

Ερώτημα 4

Γενικά η απόκριση αζυγοσταθμίας υπολογίζεται ως εξής:

Γίνεται υπόθεση λύσης της μορφής:

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{A}cos(\Omega t) + \boldsymbol{B}sin(\Omega t) \tag{15}$$

Οπότε, ορίζοντας τους πίνακες:

$$[Q] = [K] - \Omega^2[M] \tag{16}$$

$$[W] = \Omega([C] + \Omega[G]) \tag{17}$$

Τα πλάτη $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{B} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [Q] & [W] \\ -[W] & [Q] \end{bmatrix}^{-1} \cdot \boldsymbol{F} \tag{18}$$

Θεωρώντας πως η απόκριση στους άξονες x,y μπορεί να παρασταθεί από έναν μιγαδικό αριθμό z, που ορίζεται ως εξής:

$$z = x - iy \tag{19}$$

Και χρησιμοποιώντας τους ορισμούς για τα R', R'', a', a'' του προγράμματος, η απόκριση είναι:

προκύπτει :

$$z = R'e^{ia'} \cdot e^{-i\theta} + R''e^{ia''} \cdot e^{+i\theta}$$

και τελικά:

$$z = R'e^{-i(\theta - a')} + R''e^{i(a''+\theta)} \tag{20}$$

O semi-major άξονας της έλλειψης ισούται με :

$$a = R' + R'' \tag{21}$$

ενώ ο semi-minor άξονας της έλλειψης προκύπτει:

$$a = |R' - R''| \tag{22}$$

Η διαφορά φάσης απόκρισης και διέγερσης προκύπτει:

$$\Delta\varphi = atan2(-im\{z\}, Re\{z\}) \tag{23}$$

Και ο δείκτης προπορείας u, ως:

$$u = \frac{-R' + R''}{R' + R''} = \begin{cases} -1 \leq u < 0, \text{ BW} \\ u = 0, \text{ line} \\ 0 < u \leq 1, \text{ FW} \end{cases} \tag{24}$$

Τα παραπάνω μπορούν να επιβεβαιωθούν τόσο από το προηγούμενο homework όσο και από τη σελίδα 234 του βιβλίου *Dynamics of rotors and foundations by Prof. Dr. rer. nat. Erwin Krämer*. Εκεί πέρα έχει οριστεί το $z = x+iy$ και συνεπώς η προπορεία, η διαφορά φάσης έχουν κάποια αντίθετα πρόσημα.

Γενικά, υπάρχουν 2 περιπτώσεις αζυγοσταθμίας (καθώς $SL > 10$ θεωρητικά υπάρχει και τρίτη) που πρέπει να ελεγχθούν, και ζητείται η απόκριση σε 3 σημεία, συνεπώς ακολουθούν 6 συνολικά γραφήματα.

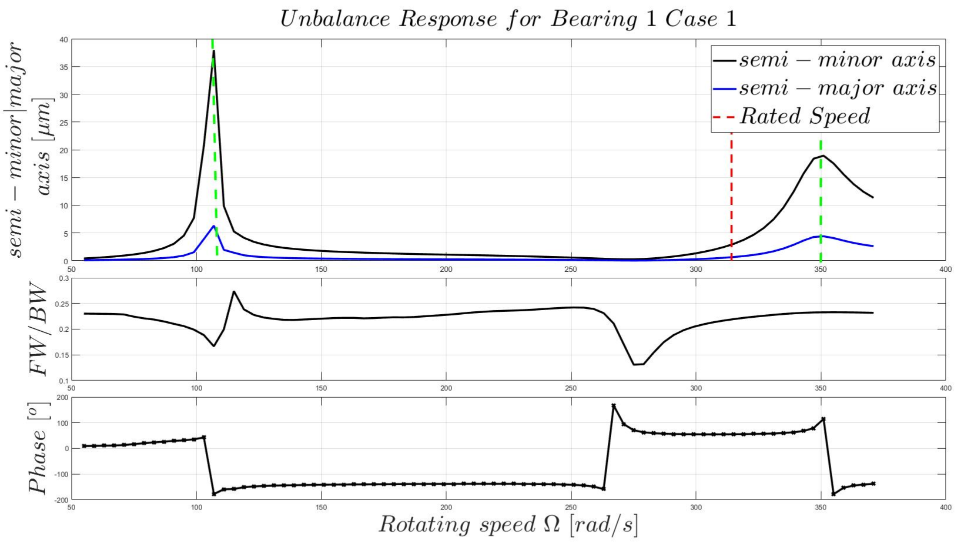
Επίσης, πρέπει να αναφερθεί, πως έγινε η τροποποίηση στο u_iso του προγράμματος, καθώς ισχύει:

$$u_{iso} = \frac{G}{1000\Omega_{rad/s}}M \tag{25}$$

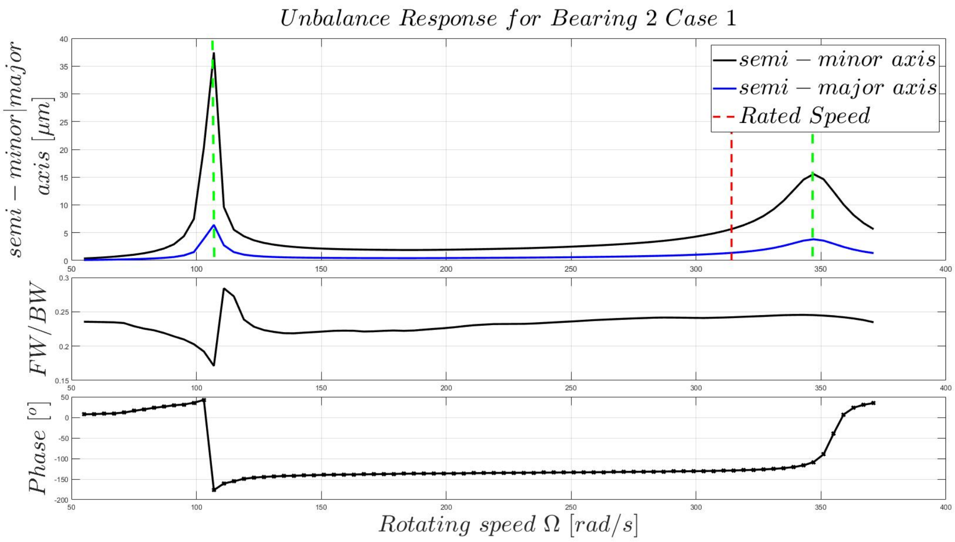
Πρώτη περίπτωση αζυγοσταθμίας

Στα σχήματα 9, 10, 11 παρουσιάζεται η απόκριση αζυγοσταθμίας στα 2 έδρανα και στο midspan αντίστοιχα. Παρατηρείται πως υπάρχει ένας πολύ οξύς συντονισμός κοντά στα $100rad/s$, ο οποίος πολύ πιθανών να δημιουργήσει προβλήματα. Στην πραγματικότητα, συγκρίνοντας τα διαγράμματα 7,8 και τα παρακάτω, προκύπτει πως γίνονται 3 συντονισμοί σε χαμηλές στροφές, αλλά 2 από αυτούς είναι αρκετά αποσβενυμένοι και έχουν αμελητέο πλάτος σε σύγκριση με το συντονισμό ο οποίος ευθύνεται και στον πόλο με το μεγαλύτερο stability factor. Μάλιστα, ο πόλος αυτός, όπως υπολογίσθηκε στο προηγούμενο ερώτημα, αντιστοιχεί σε $\zeta = 0.00711$, το οποίο είναι υπερβολικά μικρό και οδηγεί σε μεγάλα πλάτη ταλάντωσης.

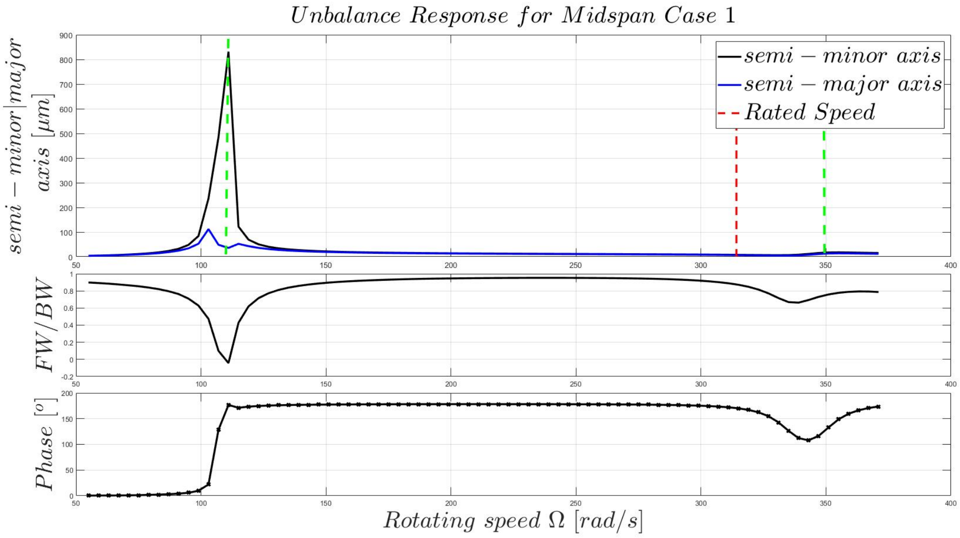
Παρατηρείται πως σε χαμηλές στροφές τόσο ο δείκτης προπορείας, όσο και η φάση είναι θετικά, τα οποία επιβεβαιώνουν τη σωστή προσήμανση των τύπων.



Σχήμα 9: Απόκριση αζυγοσταθμίας εδράνου 1 - Πρώτη περίπτωση Αζυγοσταθμίας



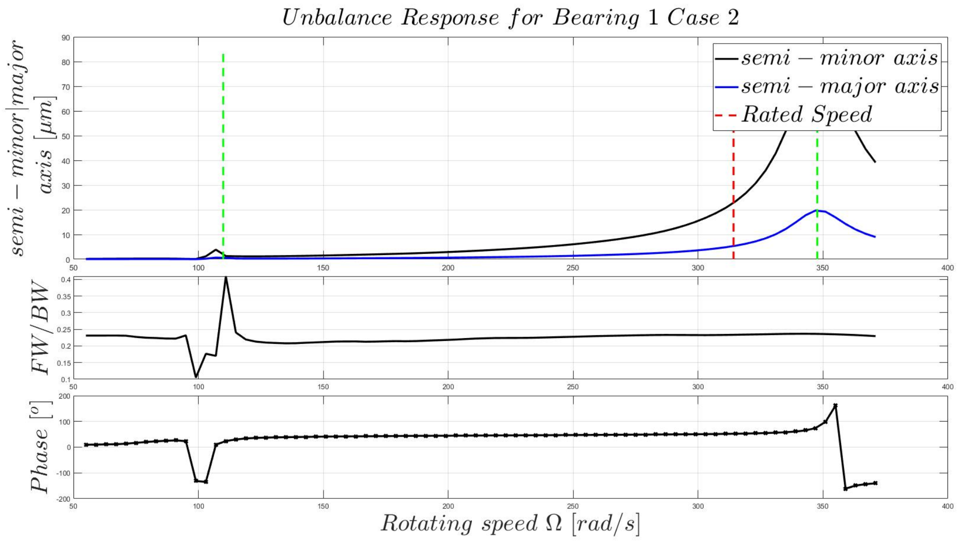
Σχήμα 10: Απόκριση αζυγοσταθμίας εδράνου 2 - Πρώτη περίπτωση Αζυγοσταθμίας



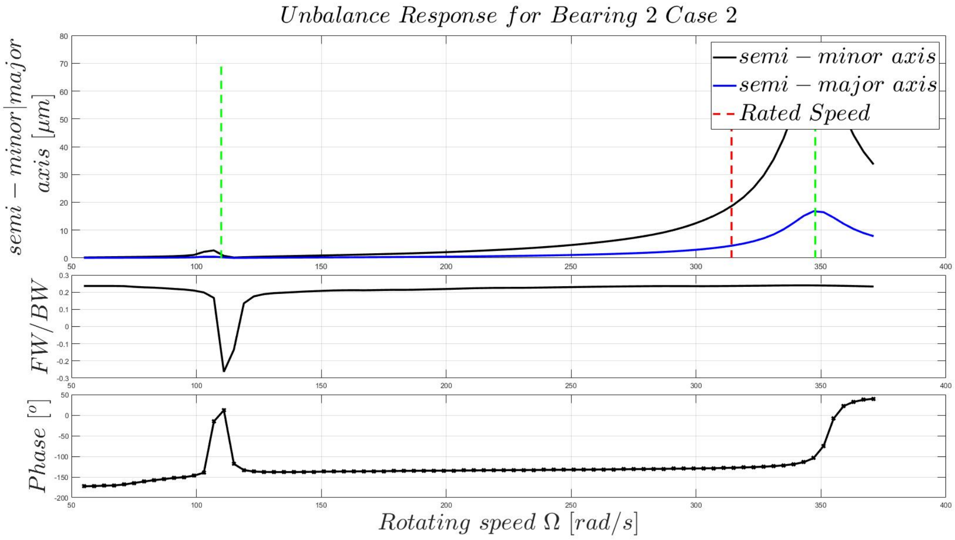
Σχήμα 11: Απόκριση αζυγοσταθμίας στο μέσο της απόστασης των 2 εδράνων- Πρώτη περίπτωση Αζυγοσταθμίας

Δεύτερη περίπτωση αζυγοσταθμίας

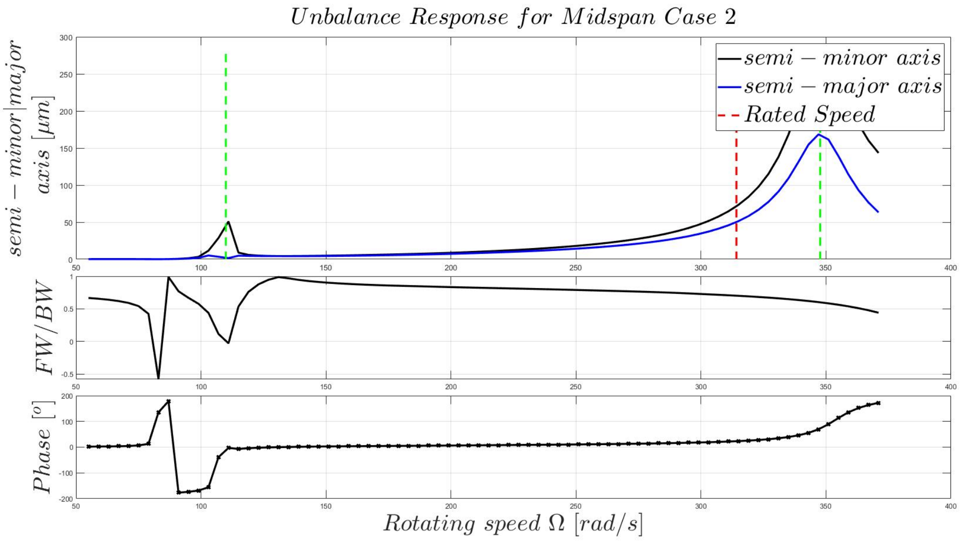
Στα σχήματα 12, 13, 14 παρουσιάζεται η απόκριση αζυγοσταθμίας στα 2 έδρανα και στο midspan αντίστοιχα. Παρατηρείται πως με αυτή την αζυγοσταθμία, διεγείρεται κυρίως η φυσική συχνότητα στα $340 rad/s$ και λιγότερη αυτή που είναι κοντά στα $100 rad/s$. Ακόμα, παρατηρείται πως διεγείρονται και ιδιοσυχνότητες πριν τα $100 rad/s$, οι οποίες φαίνονται και από το campbell .



Σχήμα 12: Απόκριση αζυγοσταθμίας εδράνου 1 - Δεύτερη περίπτωση Αζυγοσταθμίας



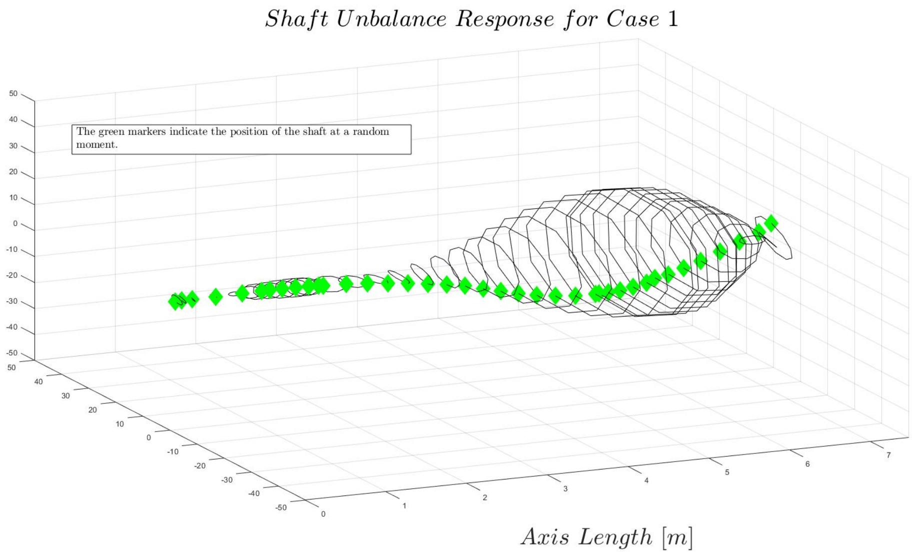
Σχήμα 13: Απόκριση αζυγοσταθμίας εδράνου 2 - Δεύτερη περίπτωση Αζυγοσταθμίας



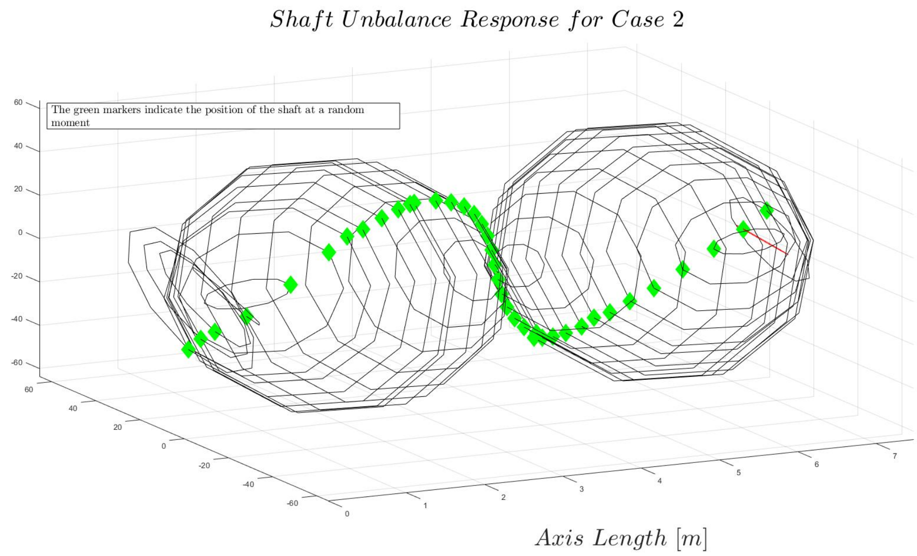
Σχήμα 14: Απόκριση αζυγοσταθμίας στο μέσο της απόστασης των 2 εδράνων- Δεύτερη περίπτωση Αζυγοσταθμίας

Ερώτημα 5

Παρουσιάζονται οι τροχιές όλων των σημείων του άξονα, στην ταχύτητα λειτουργίας, για τις δυο περιπτώσεις αζυγοσταθμίας. Μάλιστα, επισημαίνεται και με πράσινο ένα στιγμιότυπο της τροχιάς.



Σχήμα 15: Τροχιές ολόκληρου του άξονα - Πρώτη περίπτωση Αζυγοσταθμίας



Σχήμα 16: Τροχιές ολόκληρου του άξονα - Δεύτερη περίπτωση Αζυγοσταθμίας

Παράρτημα Α: Υπολογισμός Sommerfeld

Αρχικά, αφού περάστηκαν τα σχετικά διαγράμματα στο matlab , δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα που κάνει την εξής διαδικασία, **στην οποία γίνεται προσεγγιστική ανάλυση με κυλινδρικά έδρανα, παρότι το εξεταζόμενα είναι lemon bore** . Αρχικά γίνεται μια υπόθεση του αριθμού Sommerfeld, πως η μέση θερμοκρασία είναι $40°C$, ενώ επιλέχθηκε και ένα ελάχιστο πάχος λιπαντικού διαφορετικό για κάθε έδρανο [5].

1. Από το σχήμα 16.15 υπολογίζεται ο λόγος h_o/c και έτσι η ακτινική χάρη του εδράνου
2. Από το σχήμα 16.16 και το 16.21 υπολογίζονται ο λόγος της παροχής λιπαντικού και το ποσοστό της πλευρικής παροχής.
3. Από το σχήμα 16.17 υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής του εδράνου
4. Υπολογίζεται η άνοδος της θερμοκρασίας από τον τύπο:

$$\Delta T = \frac{(8.3 \cdot 1e-6)P}{1-0.5(Q_s/Q)} \cdot \frac{(r/c)f}{Q/(rcNl)} \tag{26}$$

5. Υπολογίζεται η μέση θερμοκρασία με βάση τον τύπο

$$T_m = T + \Delta T/2 \tag{27}$$

6. Γίνεται παρεμβολή του δυναμικού ιξώδους του λαδιού ISO grade 46 στη νέα θερμοκρασία
7. Υπολογίζεται ο νέος αριθμός sommerfeld.
8. Συγκρίνεται με τον προηγούμενο αριθμό. Αν η διαφορά ξεπερνάει το $1e-3$, επαναλαμβάνεται η διαδικασία

Τα στοιχεία για κάθε έδρανο παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 2:

	1ο έδρανο	2ο έδρανο
Sommerfeld number	0.02789	0.02933
r/c	0.00173	0.00177
h_{min} $[mm]$	0.0485	0.0485

Πίνακας 2: Στοιχεία εδράνων στο σημείο λειτουργίας

Τελικά όμως χρησιμοποιήθηκαν άλλα μεγέθη για να ληφθούν καλύτερα δεδομένα από τα διαγράμματα του κατασκευαστή

[5] Λήφθηκαν διάφορες τιμές μέχρι να συγκλίνει το πρόγραμμα.

Παράρτημα Β: Matlab codes

Το πρόγραμμα που υπολογίζει τη διάμετρο στιβαρότητας (stiffness_diameter.m) παρατίθεται παρακάτω:

```
function DOS = stiffness_diameter(L,D)



nel = length(L);
Nnodes =  nel+1;
DOS = D;
%We always choose the minimum DOS

for i=1:nel
    i

    % Should we draw the right 45deg line?
    if i<nel
        if(D(i+1) > D(i))
        Dx = L(i+1);

            if Dx >= D(i+1)-D(i)
                % the line passes through the element, so equal Area
                    means the
                % line is al L(i+1)/2, so because the angle is 45 deg,
                    the
                % height is also L(i+1)/2
                DOSp =  L(i+1)/2;

            else %Dx < D(i+1)-D(i)
                %initialization
                f = @(x) x^2-(2*L(i+1)-Dx-x )*(D(i+1)-D(i)-x)
                %x_crit = DOSp
                DOSp = dixotomisi1D(f,0,Dx,10^(-3),10^(-6));

            end

            % ----- We always choose the minimum DOS
            if (DOS(i+1) > DOSp+D(i))
                DOS(i+1) = DOSp+D(i);
            end
        end
    end
    % Should we draw the left 45deg line?
    if i>2
        if(D(i) < D(i-1))
            Dx = L(i-1);

            if Dx >= D(i)-D(i+1)
                % the line passes through the element, so equal Area
                    means the
                % line is al L(i+1)/2, so because the angle is 45 deg,
                    the
                % height is also L(i+1)/2
                DOSp =  L(i-1)/2;

            else %Dx < D(i)-D(i+1)
```

```
            %initialization
            f = @(x) x^2-(2*L(i)-Dx-x )*(D(i)-D(i+1)-x)
            %x_crit = DOSp
            DOSp = dixotomisi1D(f,0,Dx,10^(-3),10^(-6));

        end

        % ---- We always choose the minimum DOS
        if (DOS(i-1) > DOSp+D(i))
            DOS(i-1) = DOSp+D(i);
        end

      end
   end

end


end
```