

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Βασικό αντικείμενο της επιστημονικής περιοχής "ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΠΛΟΙΟΥ", είναι η μελέτη των ταλαντώσεων της κατασκευής του πλοίου, θεωρούμενου ως παραμορφώσιμου σώματος. Βασικά στοιχεία της μελέτης είναι η

- ❖ μελέτη των διεγέρσεων που προκαλούν τις ταλαντώσεις, και
- ❖ μελέτη των περιοδικών κινήσεων της κατασκευής.

Η κατασκευή πλοίων μεγάλου μήκους και σχετικά εύκαμπων, επιβάλλει την πιο συστηματική μελέτη των ταλαντωτικών φαινομένων, αφού εκτός από την επίδραση των ταλαντωτικών κινήσεων στους επιβαίνοντες και στα όργανα, έχει παρατηρηθεί ότι η επαγόμενη εντατική κατάσταση είναι δυνατόν να προκαλέσει και ρωγμές σε στοιχεία της κατασκευής του πλοίου.

Συνάγεται λοιπόν, ότι οι επιστήμονες που μελετούν το φαινόμενο, δεν πρέπει να σταματούν στη μελέτη του, αλλά πρέπει να προτείνουν και λύσεις που να ελαχιστοποιούν τις συνέπειες της ταλάντωσης της κατασκευής του πλοίου.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

Λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής του πλοίου γίνεται διαχωρισμός της μελέτης των ταλαντώσεων του πλοίου θεωρουμένου ως δοκού, και των ταλαντώσεων στοιχείων της κατασκευής του, όπως ένα ενισχυμένο έλασμα ή κάποιο δοκάρι. Μια αυστηρότερη θεώρηση του προβλήματος, θα έπρεπε να λάβει υπ' όψη της, την αλληλεπίδραση της ταλάντωσης του πλοίου υπό μορφή δοκαριού, και της απόκρισης στοιχείων της κατασκευής του. Παρόλο που ο διαχωρισμός αυτός γίνεται για την απλούστευση του προβλήματος, αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις ικανοποιητική προσέγγιση του θέματος. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, και κατά τη διάρκεια της σχεδίασης ενός συμβατικού

πλοίου, η μελέτη των ταλαντώσεων περιορίζεται κατά κύριο λόγο στη μελέτη της ταλάντωσης του πλοίου θεωρουμένου ως δοκού, και της υπερκατασκευής, και κατά δεύτερο λόγο στη μελέτη της ταλάντωσης του πρυμναίου άκρου, και του διπύθμενου.

Σχετικά με τη ταλάντωση κατασκευαστικών στοιχείων της γάστρας χαλύβδινων πλοίων, γίνεται αναφορά στους κανονισμούς των Νορβηγικών Νηογνομόνων DnV, κεφ. 3, έκδοση Ιανουαρίου 1989, σύμφωνα με τους οποίους "Ταλαντώσεις των κατασκευαστικών στοιχείων της γάστρας, δε λαμβάνονται υπ' όψη σε σχέση με τις απαιτήσεις των κανονισμών. Γίνεται παρ'όλα ταύτα η παραδοχή, ότι ειδικές μελέτες γίνονται για να αποφευχθούν ζημιογόνες ταλαντώσεις, που προκαλούν αστοχία της κατασκευής (κυρίως στο πρυμναίο άκρο και τις δεξαμενές στο χώρο του μηχανοστασίου), κακή λειτουργία των μηχανών και οργάνων, και δυσαρέσκεια στο πλήρωμα και τους επιβαίνοντες. ...".

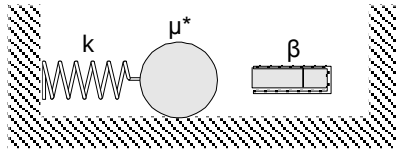
Σημειώνονται τέλος οι περιπτώσεις ταλαντώσεων στοιχείων του μηχανολογικού εξοπλισμού των πλοίων, όπως η ταλάντωση του αξονικού συστήματος και της μηχανής.

Στα πλαίσια του μαθήματος "ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ", θα εξεταστούν οι ταλαντώσεις του πλοίου θεωρουμένου ως δοκού, της υπερκατασκευής καθώς επίσης και οι ταλαντώσεις κατασκευαστικών στοιχείων .

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ένα ταλαντούμενο σύστημα περιλαμβάνει

- ❖ ένα μηχανισμό που αποθηκεύει και αποδίδει δυναμική ενέργεια,
- ❖ ένα μηχανισμό που αποθηκεύει και αποδίδει κινητική ενέργεια, και
- ❖ ένα μηχανισμό που καταναλώνει ενέργεια.

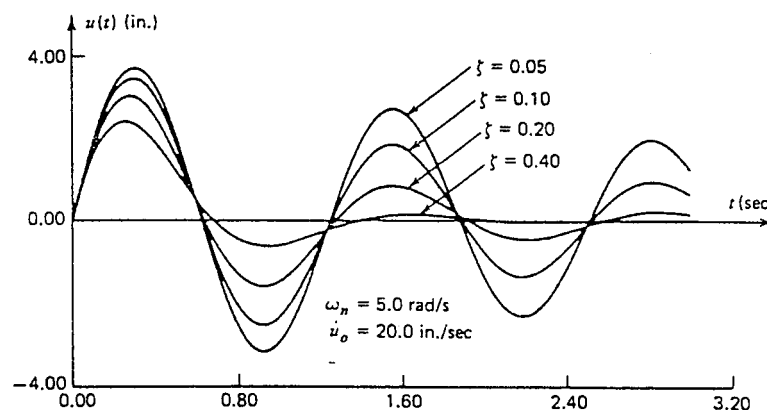


σχήμα 1-1 σύστημα μάζας-ελατηρίου-στοιχείου απόσβεσης

Στην περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 1-1 (μάζα-ελατήριο-στοιχείο απόσβεσης) οι μηχανισμοί αυτοί είναι το ελατήριο με σταθερά k , η μάζα μ^* , και το στοιχείο απόσβεσης, ιξώδους β -συντελεστής ιξώδους ζ . Όταν οι συντελεστές k , μ^* , β είναι σταθεροί τότε οι εξισώσεις που περιγράφουν την απόκριση του συστήματος είναι γραμμικές, και κατ' επέκταση το σύστημα αναφέρεται ως γραμμικό. Η ιδιοσυχνότητα ω του συστήματος χωρίς απόσβεση είναι συνάρτηση των k και μ , ενώ η απόκριση του ελεύθερα ταλαντούμενου συστήματος δίνεται από τη σχέση

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1-1)$$

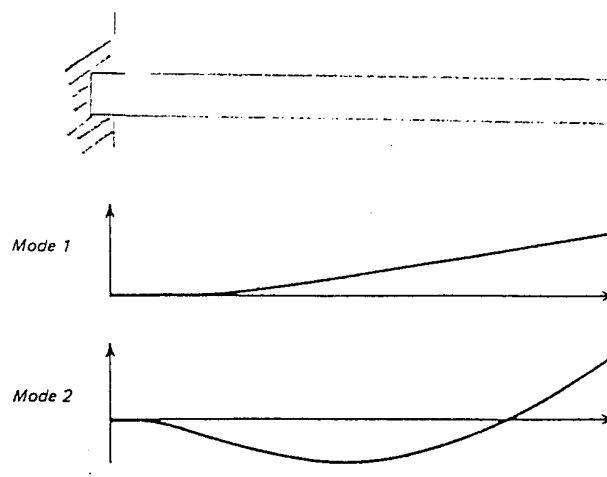
Στο σχήμα 1-2 παρουσιάζεται η απόκριση για περιπτώσεις $\zeta < 1$.



σχήμα 1-2 απόκριση συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας

Στην περίπτωση του σχήματος 1-3 παρουσιάζεται δοκάρι από γραμμικά ελαστικό υλικό, που εκτελεί ελεύθερη καμπτική ταλάντωση στο επίπεδο

του. Το δοκάρι περιέχει όπως και το σύστημα του σχήματος 1-1 τους ίδιους μηχανισμούς. Δυναμική ενέργεια αποθηκεύεται και αποδίδεται στο σύστημα λόγω της δυνατότητας που έχει το δοκάρι να κάμπτεται στο επίπεδο του, και οι δυνάμεις επαναφοράς, οι δυνάμεις δηλαδή που τείνουν να επαναφέρουν το δοκάρι στην αρχική του θέση, συνδέονται με τη μεταβλητή που προσδιορίζει τη θέση του δοκαριού στο χώρο, μέσω της καμπτικής δυσκαμψίας του δοκαριού EI . Πιο συγκεκριμένα αν η καμπυλότητα του δοκαριού είναι κ , και η ροπή που αναπτύσσεται σε κάποια διατομή συμβολίζεται με m , ισχύει



σχήμα 1-3 καμπτική ταλάντωση δοκαριού Euler

$$m = EI\kappa \quad (1-2)$$

(θεωρείται ότι το δοκάρι υπακούει στις παραδοχές Euler). Συγκρίνοντας τη σχέση αυτή, με τη σχέση που συνδέει τη δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου και τη συμπίεση του, η ομοιότητα τους είναι προφανής.

Ο μηχανισμός που αποθηκεύει και αποδίδει δυναμική ενέργεια, στην περίπτωση του δοκαριού αποτελείται από τη μάζα του, και αν μ , J η

μάζα και η μαζική ροπή αδράνειας ανά μονάδα μήκους αντίστοιχα, ισχύει ότι

$$\mu dx \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial q}{\partial x} dx \quad \text{και} \quad J dx \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial t^2} = q dx - \frac{\partial m}{\partial x} dx \quad (1-3)$$

όπου v η κατακόρυφη μετατόπιση του στοιχείου μήκους dx , και q , m η διατμητική δύναμη και καμπτική ροπή αντίστοιχα.

Σε ότι αφορά στο μηχανισμό που καταναλώνει ενέργεια κατά την ταλάντωση, οφείλεται στην απόκλιση που παρουσιάζει το υλικό από τη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά, και αποδίδεται κατά κύριο λόγο στην υστέρηση κατά τη διάρκεια της περιοδικής φόρτισης. Πρακτικά, κατά την αρμονική ταλάντωση, μπορεί να θεωρηθεί, ότι η δύναμη απόσβεσης που αντιτίθεται στην κίνηση, είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας των υλικών σημείων. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται, για την περίπτωση της καμπτικής ταλάντωσης του δοκαριού του σχήματος, από τη σχέση:

$$m_d = \beta \frac{\partial m}{\partial t} \quad (1-4)$$

m_d η καμπτική ροπή, που οφείλεται στην απόσβεση.

Οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων ενός ταλαντούμενου συστήματος είναι συνάρτηση των μεγεθών, που χαρακτηρίζουν τους προαναφερθέντες μηχανισμούς. Αν γίνει ενεργειακός ισολογισμός ενός συστήματος μάζας-ελατήριου χωρίς απόσβεση, που ταλαντώνται αρμονικά, προκύπτει ότι σε κάθε πλήρη κύκλο, η μέγιστη δυναμική και κινητική ενέργεια του συστήματος ισούται με

$$E_p = k v_m^2 / 2 \quad \text{και} \quad E_k = \mu \dot{v}_m^2 / 2 = \omega^2 v_m^2 / 2 \quad (1-5)$$

αντίστοιχα, όπου v_m , $\dot{v}_m$ είναι η μέγιστη απόκλιση και ταχύτητα αντίστοιχα, και ω η συχνότητα της εκτελούμενης αρμονικής ταλάντωσης.

Επειδή κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης η μέγιστη δυναμική ενέργεια ισούται με τη μέγιστη κινητική ενέργεια ισχύει, ότι

$$E_p = E_k \rightarrow k v_m^2 / 2 = \omega^2 \mu^* \dot{v}_m^2 / 2 \rightarrow \omega = \sqrt{k / \mu^*} \quad (1-6)$$

Από τη σχέση αυτή η επίδραση της σταθεράς του ελατηρίου και της μάζας καθίσταται σαφής. Αλλά η σημασία, δεν περιορίζεται στο παράδειγμα αυτό. Αν η μέγιστη δυναμική και κινητική ενέργεια, μπορούν να εκφραστούν με τη μορφή, $k v_m^2 / 2$ και $\omega^2 \mu^* v_m^2 / 2$ τότε και η ιδιοσυχνότητα του συστήματος δίνεται από τη από την παραπάνω σχέση.

Εστω το δοκάρι του σχήματος 1-3, και έστω ότι η εξίσωση των μετατοπίσεων είναι η $v(x,t)$. Η δυναμική ενέργεια, που το δοκάρι έχει αποθηκευμένη ισούται με $\int_L 0.5 EI (\partial^2 v / \partial x^2)^2 dx$, και η αντίστοιχη κινητική με $\int_L 0.5 \mu (\partial v / \partial t)^2 dx$. Αν θεωρηθεί ότι η $v(x,t)$ έχει τη μορφή $V(x) \cdot p(t)$, μια υπόθεση που θα εξεταστεί διεξοδικά στα επόμενα, με την $p(t)$ να είναι αρμονική με συχνότητα ω , ισχύει ότι οι μέγιστες τιμές των πιο πάνω ολοκληρωμάτων ισούνται με:

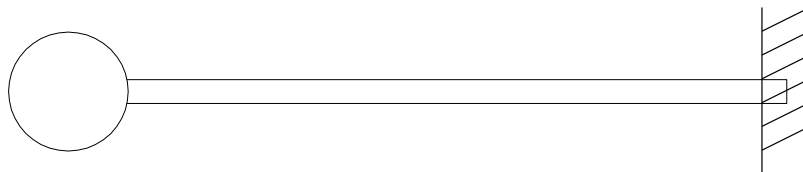
$$\int_L 0.5 EI (d^2 V / dx^2)^2 dx \quad \text{και} \quad \omega^2 \int_L 0.5 \mu V^2 dx \quad (1-7)$$

αντίστοιχα. Εξισώνοντας τη μέγιστη κινητική και δυναμική ενέργεια προκύπτει ότι

$$\omega^2 = \frac{\int_L 0.5 EI (d^2 V / dx^2)^2 dx}{\int_L 0.5 \mu V^2 dx} \quad (1-8)$$

Αν η μορφή της $V(x)$ είναι γνωστή, τότε είναι δυνατός ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας ω . Στην περίπτωση ομοιόμορφου δοκαριού, χωρίς εξωτερικούς περιορισμούς και αν η καμπύλη αυτή, είναι δευτέρου βαθμού, και συμμετρική ως προς το μέσο του δοκαριού, καμπύλη δηλαδή που ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες ελεύθερου δοκαριού, τότε η συχνότητα ταλάντωσης που προκύπτει ισούται με $10.95\sqrt{EI/\mu L^4}$. Η τιμή αυτή είναι περίπου 11% μικρότερη της τιμής που προκύπτει αν θεωρηθεί η ακριβής μορφή της κατώτερης ελαστικής ταλάντωσης του δοκαριού, που είναι η $\sin(\pi x/L)$

Ασκηση: Να υπολογιστεί η ιδιοσυχνότητα του προβόλου με το συγκεντρωμένη μάζα στο ελεύθερο άκρο του αν η ιδιομορφή του είναι καμπύλη δευτέρου βαθμού.



ΥΔΡΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ενας σημαντικός διαχωρισμός των προβλημάτων των ταλαντώσεων, που παρουσιάζονται στο πλοίο, συνδέεται με το μέσο, μέσα στο οποίο ταλαντώνται το εξεταζόμενο στοιχείο. Όταν το μέσο μέσα στο οποίο ταλαντώνται ένα στοιχείο επιδρά σημαντικά στη ταλάντωση, όπως επί παραδείγματι το θαλάσσιο περιβάλλον επιδρά στη ταλάντωση της γάστρας του πλοίου, τότε πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση αυτή στο φυσικό και κατ' επέκταση στο μαθηματικό μοντέλο του ταλαντούμενου στοιχείου. Ως παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων αναφέρονται η καμπτική ταλάντωση του πλοίου θεωρουμένου ως δοκαριού, η ταλάντωση της έλικας στο θαλάσσιο περιβάλλον, η ταλάντωση ελασμάτων που είναι σε επαφή με τη θάλασσα ή με υγρό φορτίο. Αντίθετα στην

περίπτωση που το μέσο δεν επιδρά στη ταλάντωση, δεν επάγει δηλαδή σημαντικές δυνάμεις στο ταλαντούμενο σώμα, όπως επί παραδείγματι ο αέρας κατά την ταλάντωση του αξονικού συστήματος, τότε η επίδραση του μέσου είναι δυνατόν να αγνοηθεί κατά τη μελέτη.

Η μελέτη των ταλαντώσεων στοιχείων της κατασκευής ενός πλοίου μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι αντικείμενο της υδροελαστικότητας. Ο όρος αυτοπροσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό, με τη χρήση των συνθετικών "υδρο" και "ελαστικότητα": είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ελαστικών σωμάτων μέσα στο νερό, η γενικότερα μέσα σε ασυμπίεστο ρευστό.

ΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΔΡΑΖΟΜΕΝΟ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Στην περίπτωση που το ταλαντούμενο δοκάρι εδράζεται στην επιφάνεια της θάλασσας, η κατακόρυφη κίνηση του μέσα σε αυτήν προκαλεί ένα σύστημα πιέσεων, που με τη σειρά του ασκεί δυνάμεις στο δοκάρι. Οι δυνάμεις αυτές, μπορούν να αναλυθούν σε τρεις συνιστώσες:

δυνάμεις σε φάση με την επιτάχυνση του δοκαριού,
δυνάμεις σε φάση με την ταχύτητα του δοκαριού, και
δυνάμεις σε φάση με την απόκλιση του δοκαριού από τη θέση ισορροπίας του.

Οι τελευταίες αναφερόμενες δυνάμεις είναι υδροστατικής προέλευσης και όπως οι δυνάμεις ελατηρίου και η ελαστική ροπή που αναπτύσσεται στο καμπτόμενο δοκάρι, είναι δυνάμεις επαναφοράς, που τείνουν να επαναφέρουν το δοκάρι στην αρχική του θέση. Οι δυνάμεις σε φάση με την επιτάχυνση έχουν αδρανειακό χαρακτήρα, και πρέπει να υπερνικηθούν για να αλλάξει η κινητική κατάσταση του δοκαριού. Τέλος οι δυνάμεις σε φάση με την ταχύτητα του δοκαριού, καταναλώνουν ενέργεια και είναι δυνάμεις απόσβεσης της κίνησης.

ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

Οι βασικές αιτίες διέγερσης που προκαλούν ταλαντώσεις στα στοιχεία ενός πλοίου είναι:

- η έλিকা
- το θαλάσσιο περιβάλλον, και
- η κύρια μηχανή.

Στα πλαίσια του μαθήματος θα μελετηθούν οι δύο πρώτες πηγές διέγερσης.

Έλিকা

Η λειτουργία της έλικας έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη περιοδικών δυνάμεων που προκαλούν ταλαντώσεις στα στοιχεία ενός πλοίου. Οι δυνάμεις αυτές μπορεί να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

τις δυνάμεις τριβών, και
τις δυνάμεις επιφανείας.

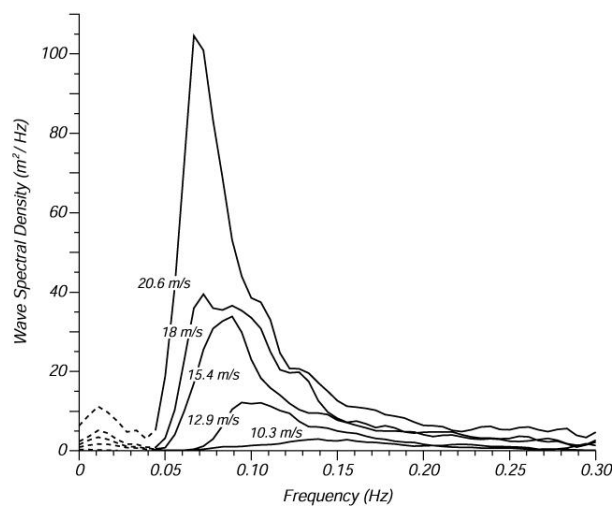
Οι δυνάμεις τριβών είναι οι περιοδικές δυνάμεις που μεταφέρονται μέσω του αξονικού συστήματος στην κατασκευή του πλοίου. Προκύπτουν από τις πιέσεις που αναπτύσσονται στα πτερύγια της έλικας, των οποίων οι συνισταμένες είναι περιοδικές κυρίως λόγω της ανομοιομορφίας του ομόρρου, καθώς επίσης και λόγω διαφορών που υπάρχουν στα πτερύγια.

Οι δυνάμεις επιφανείας είναι οι συνισταμένες των πιέσεων που αναπτύσσονται στο πρυμναίο τμήμα του σκάφους. Το περιοδικό πεδίο πιέσεων οφείλεται στην περιστροφή της έλικας και εξαρτάται από το πάχος των πτερυγίων της και τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά.

Το θαλάσσιο περιβάλλον

Η διέγερση από το θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να έχει τοπικό ή μη χαρακτήρα.

Στην περίπτωση κυματισμών που προσπίπτουν στο πλοίο, ένα περιοδικό πεδίο πιέσεων αναπτύσσεται σε όλη τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας. Ο χαρακτήρας της διέγερσης αυτής της μορφής είναι τυχαίος και μπορεί να προκύψει αν είναι γνωστό ο φάσμα των κυματισμών. Στο σχήμα 1-4 παρουσιάζεται το φάσμα Pierson-Moskowitz, που αποτελεί ίσως μία από τις απλούστερες περιγραφές του θαλασσίου περιβάλλοντος. Το φάσμα περιγράφει την κατάσταση της θάλασσας στην περίπτωση ανεμογενών κυματισμών, οι οποίοι πνέουν για αρκετή ώρα και σε αρκετά μεγάλη περιοχή, ούτως ώστε οι κυματισμοί να μπορούν να θεωρηθούν πλήρως αναπτυγμένοι (fully developed sea). Η περιγραφή της θάλασσας σύμφωνα με το φάσμα αυτό εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου σε συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της.



σχήμα 1-4 φάσμα Pierson-Moskowitz

Η απόκριση στη διέγερση λόγω του προσπίπτοντος κυματισμού μπορεί να αναλυθεί στην

- απόκριση του πλοίου ως στερεό σώμα, και

- την κάμψη του πλοίου δοκαριού, κατά την οποία προεξέχουσα μορφή είναι η ταλάντωση δύο κόμβων (springing).

Οι χαμηλής συχνότητας τάσεις που προκαλούνται από την εναλλαγή της θέσης του πλοίου δοκαριού, στην κορυφή και το κοίλο του κύματος, αντιστοιχούν στην πρώτη αναφερθείσα μορφή απόκρισης, ενώ οι υψίσυχνες τάσεις στην τελευταία.

Εκτός του προσπίπτοντος κυματισμού, ταλαντώσεις του πλοίου δοκαριού προκαλούνται λόγω της σφυρόκρουσης. Το φαινόμενο (slamming), που είναι μεταβατικό, προκαλεί ισχυρή καμπτική ταλάντωση αμέσως μετά την κρούση, και οι επαγόμενες τάσεις αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως whipping stresses. Σε αντίθεση με τις δυνάμεις κυματισμού που ασκούνται σε όλο το μήκος του πλοίου, οι δυνάμεις διέγερσης κατά τη σφυρόκρουση είναι κατά κύριο λόγο τοπικές.

ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΑ ΟΡΙΑ

Η κατασκευή ενός πλοίου, που δεν ταλαντούται είναι πρακτικά ανέφικτη. Η προσπάθεια, που καταβάλετε από τους ειδικούς είναι να διατηρηθεί η απόκριση - επιταχύνσεις, μετατοπίσεις, τάσεις, ταχύτητες, συχνότητα -σε επίπεδα, στα οποία δεν παρατηρούνται δυσμενείς επιδράσεις. Τα αποδεκτά επίπεδα ταλάντωσης, εξαρτώνται:

από την ανοχή που επιδεικνύουν επιβάτες και πλήρωμα,
την αντοχή των στοιχείων της κατασκευής σε κόπωση,
την επίδραση των ταλαντώσεων στη λειτουργία των μηχανών και των οργάνων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές πλοίου - δοκαριού
ιδιοσυχνότητες υπερκατασκευών

διέγερση από κυματισμούς

απόκριση πλοίου-δοκαριού σε κυματισμούς

διέγερση από έλικα

ταλάντώσεις κατασκευαστικών στοιχείων

μελέτη ταλαντώσεων/μετρήσεις