

# Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 656.61

Д.Н. Гудков<sup>1</sup>, І.В. Тихонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київська державна академія водного транспорту  
імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Київ

<sup>2</sup> Міністерство інфраструктури України, Київ

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ЩОДО РУХУ ОБ'ЄКТІВ В НЕОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ І ШЛЯХИ ЙОГО ВИРІШЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

*У статті здійснюється постановка задачі, яка пов'язана з управлінням руху морських об'єктів в неоднорідному середовищі. В ході проведених досліджень запропоновано шлях побудови системи управління рухом динамічного об'єкта на основі аналізу та обліку основних процесів водного середовища, які призводять до неоднорідностей при експлуатації засобів водного транспорту.*

**Ключові слова:** система управління судном, неоднорідне поле, обурення, структура.

### Вступ

Сучасне морське судно являє собою складне в конструктивному плані споруду, яка в процесі експлуатації піддається одночасному впливу двох неоднорідних рухомих середовищ – води і повітря [1]. Неоднорідності середовища носять невпорядкований просторово-часовий характер, тобто представляють випадкове рушійне поле. До таких ситуацій можна віднести: рух суден в турбулентних зонах; рух надводних кораблів при наявності хвилювання; рух підводних кораблів, обурюються внутрішніми хвилями, підводними течіями і морської турбулентністю. Таким чином, можна вважати, що судно знаходиться у випадковому динамічному полі зовнішніх впливів.

**Аналіз предметної області.** У результаті впливу випадкового рушійного поля на об'єкти можуть виникати небажані наслідки.

1. Знесення траєкторії і уповільнення швидкості суднових транспортних засобів. Знесення з траєкторії і особливо уповільнення швидкості судів відбувається внаслідок хвильового опору, який чинить хвилювання руху суден. Судно, яке рухається перебуває під впливом сукупності хвильових систем: первинне поле хвилювання; відображених і дифрагуювання судном хвиль; корабельних хвиль, утворених самим судном [1, 2].

Ця сукупність хвильових систем призводить до появи навколо змочуваної поверхні судна складного випадкового поля тиску і швидкостей, яке в загальному випадку знижує швидкість судна в порівнянні з його рухом на нерухомій воді. Зниження швидкості доходить до 25% і більше відсотків залежно від характеристик хвилювання і параметрів судна. При сильному хвилюванні навіть великі судна істотно знижують свою швидкість.

Якби вдалося спостерігати поточне поле швидкостей навколо судна при хвилюванні, то, очевидно, можна було б вибрати такий курс і швидкість руху при якому хвилювання навіть допомогло б рухатися судну.

2. Качка судів. Невпорядковані обертальні коливання об'єктів відбуваються навколо трьох осей (кільова, бортова хитавиця і нишпорення) [2, 3]. Поступальні коливання також відбуваються у трьох напрямках. Хаотичні рухи об'єктів при хитавиці і бовтанки пов'язані зі значними знакозмінними перевантаженнями, що призводить до поступового нагромадження втоми конструкційних матеріалів і подальшого руйнування.

3. Катастрофічні наслідки. Щорічно від дії хвиль гинуть 15 – 20 великих суден [3].

**Мета статті.** Виникає необхідність провести аналіз, який пов'язаний з вивченням неоднорідних процесів впливу при здійсненні управління судном і запропонувати шляхи регулювання рухом транспортних засобом у неоднорідному середовищі для підвищення його якості керованості при експлуатації.

### Виклад основного матеріалу

Для початку розглянемо основні впливаючі процеси, які призводять до неоднорідностей і знижують керованість судна, а також судноводіння в складних умовах.

1. Зона сильної турбулентності.

Руйнування надводних кораблів відбувається внаслідок потрапляння в зону значної інтенсивності турбулентних рухів [3]. Такі області мають здійснюють термічно-динамічну взаємодію атмосфери і океану на рух судна і носять локальний характер. Для запобігання катастрофи судна необхідно дистанційно змінити маршрут руху і обійти дану область.

## 2. Резонанс при хитавиці (качке).

Резонанс при хитавиці настає при збігу періоду коливання при кільовій хитавиці з періодом морських хвиль, сприйманих рухомим судном  $\tau_n$  [4]. Курсові кути  $q$  і швидкість судна  $V$  при резонансі пов'язані з параметрами хвилювання співвідношенням

$$\cos q = \pm \frac{1}{V} \left( c - \frac{\Lambda}{\tau_n} \right), \quad (1)$$

де  $c$  – середня фазова швидкість руху осі;

$V$  – середня довжина хвилі.

При виході судна в резонансну зону стрімкість кільової качки і її амплітуди досягають максимальних величин. У більшості випадків спостерігається зрушення фаз хвильових коливань морської поверхні і коливань судна при кільовій хитавиці. Це призводить до сильної залежності у носовій частині судна, явища слемінг. Судно бере багато води через бак, її потоки руйнують надбудови і навіть саме судно. Однак особливо небезпечний слемінг. У цьому випадку ніс періодично виходить з води, а потім сильно вдаряється днищем про воду. Виникає пошкодження обшивки днища, в корпусі з'являються синхронновібраційні процеси коливання, що призводять до руйнування найбільш слабких ділянок корпусу, видавлювання заклепок і тріщин у швах.

Цікаво відзначити, що явище резонансу може наступити і при груповій будові хвилювання, коли висоти хвиль промодульовані квазіперіодичними функціями [1, 4]. У цьому випадку  $c$  – групова швидкість хвиль, рівна половині середньої фазової швидкості хвилювання;  $\Lambda$  – середня довжина груп хвиль. Однак спостерігалася групова структура хвиль і параметри груп хвиль ( $\Lambda_{гр}$ ,  $C_{гр}$ ) задовольняли умові резонансу. Явище резонансу може бути припинено правильним вибором курсу і швидкості судна. Однак для цього необхідно мати поточні дані про параметри хвилювання, які визначають умови резонансу.

3. Невдале розташування судна на гребенях великих хвиль.

При потужному штормовому хвилюванні довжини хвиль можуть досягати 150 – 300 м і відповідати довжині великих суден [3]. При розташуванні носа і корми гребенів, а середній частині судна в улоговині хвилі, або середній частині на гребені, а носа і корми судна в улоговинах, виникають сильні згинальні моменти [3, 5].

Для запобігання подібних аварійних ситуацій необхідно визначити не тільки поточні середні параметри хвилювання, але й конкретну конфігурацію хвиль по курсу судна, у тому числі і фази великих хвиль щодо рухомого корабля.

## 4. Удари особливо великих хвиль.

Особливо небезпечні удари в борт корабля великих одиночних хвиль, що виникають в результаті інтерференції кількох систем хвилювання, або регулярні удари великих хвиль при груповій будові хвилювання. Корабель виявляється лагом до хвилі і під

впливом великих хвиль перекидається. У разі групового будови може спостерігатися також явище резонансу періодів видимих хвиль з періодом бортовий качки.

Для запобігання аварійних ситуацій необхідно дистанційне вимірювання великих хвиль і параметри їх руху. При груповій структурі висоти в максимумах досягає 20 м і більше, в той час як в мінімумах висоти в 4 – 5 разів менше. У цьому випадку потрібно дистанційне вимірювання групової структури хвилювання і всіх параметрів групового будови.

5. Штовхання, що виникає при наявності декількох систем хвилювання (вітрові хвилювання системи зибі).

У результаті інтерференції хвиль виникає складна система пагорбів і западин [4]. Судно відчуває неупорядковану хитавицю. У результаті інтерференції окремі хвилі можуть досягати гігантських розмірів, а їх поява відбувається з найнесподіваніших сторін. Судно виявляється на гребені такої хвилі лагом до вітру, втрачає стійкість і перекидається.

Для запобігання подібних аварійних ситуацій потрібно детальна поточна інформація про всіх інтерферуючі системи хвиль (середньої довжини, швидкості фази відносно судна і т.д.). Більш того, необхідний прогноз про можливу появу особливо великої хвилі по курсу судна.

## Шляхи вирішення питання регулювання рух об'єктів у неоднорідних середовищах

У загальному випадку неоднорідності середовища змінити не можна. Необхідно на самому об'єкті створити адаптивну систему, яка в процесі руху реагувала б на безперервні зміни параметрів середовища. Якби вздовж траєкторії руху заздалегідь були б відомі очікувані неоднорідності, то, очевидно, можливо створити таку систему управління, яка забезпечила б несприйнятливості об'єкта до перешкод, створюваних руху в неоднорідному середовищі. Однак неоднорідності середовища представляють просторово-часове випадкове поле. Тому першим етапом є отримання в реальному масштабі часу інформації про просторове розподіл неоднорідностей для будь-якого моменту часу, тобто послідовності реалізації замороженого поля [5]

$$Q(t) = Q(\rho, t); \quad \rho = \{x, y, z\}. \quad (2)$$

Якщо до кінця часу регулювання поле незначно змінило свою структуру, тобто залишилося практично замороженим, то тимчасових змін поля можна не враховувати, а оперувати тільки просторовими характеристиками. Ступінь заморожене поля можна оцінювати величиною відносини середнього квадрата різниць значень поля в моменти часу  $t$  і  $t+T_p$  до дисперсії поля

$$\frac{[Q(\rho, t) - Q(\rho, t + T_p)]^2}{Q^2(\rho, t)}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\overline{Q^2(\rho, t)} - 2\overline{Q(\rho, t)Q(\rho, t+T_p)} + \overline{Q^2(\rho, t+T_p)}}{\overline{Q^2(\rho, t)}} = \\ &= 2\left[1 - R(T_p)\right], \end{aligned} \quad (3)$$

де  $R(\tau)$  – часова кореляційна функція поля неоднорідностей середовища.

Огинають кореляційних функцій таких геофізичних полів як морське хвилювання добре апроксимуються експоненційної залежністю [4, 5]

$$R(\tau) = \exp\left(-\alpha \frac{\tau}{\Delta T_k}\right); \quad R(T_p) = \exp\left(-\alpha \frac{T_p}{\Delta T_k}\right), \quad (4)$$

де  $\Delta T_k$  – інтервал часу кореляції.

Умови залежності можна записати у вигляді

$$T_p/\Delta T_k \ll 1. \quad (5)$$

При цьому, чим більше судно тим постійне часу регулювання  $T_p$  збільшується. Тому умова (5) може не виконуватися для масивних судів. Тому другим етапом для забезпечення адаптації об'єктів до збурень середовища є прогнозування, тобто прококування часових вимірів випадкового поля хвилювання. Воно полегшується тим, що тимчасові  $\mu$  і просторові  $\Delta$  частоти одних і тих же спектральних складових хвилювання пов'язані дисперсійним співвідношенням [4]

$$\mu^2 = gK. \quad (6)$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Як це може бути досягнуто? Припустимо, що вдалося отримати для деякого часу  $t$  двовимірну просторову реалізацію піднесень хвильового рельєфу  $z(x, y, t)$ . Уявімо цю реалізацію у вигляді суми всіх плоских спектральних складових, тобто здійснимо двовимірне перетворення Фур'є над отриманою реалізацією рельєфу хвиль [3, 5]

$$\begin{aligned} z(x, y, t) = \sum_i \sum_j a_{ij} \times \\ \times \cos\left[K_i(x \cos Q_j + y \sin Q_j) - \mu_i t - \varepsilon_{ij}\right], \end{aligned} \quad (7)$$

де  $Q_j$  – напрямок спектральної складової щодо осі  $x$ ;  $a_{ij}$  – амплітуда елементарної площини хвилі.

Вона може бути виражена через спектр амплітуд комплексного спектра, або енергетичний спектр

$$a_{ij} = \sqrt{2S_Z(K_i; Q_j) \Delta K \Delta Q}.$$

З дисперсійного відносини випливає, що кожна спектральна складова довгою хвилі  $\Lambda_i = 2\pi/K_i$  і періодом коливань  $T_i = 2\pi/\mu_i$  має відповідну швидкість поширення

$$C_i = \frac{\Lambda_i}{T_i} = \frac{2\pi}{K_i} \frac{2\pi}{\mu_i} = \frac{\mu_i}{K_i} = \sqrt{\frac{g}{K_i}}. \quad (8)$$

Змінюється в часі складова фази  $\varphi_i = \mu_i t$  може бути виражена через хвильове число,  $K_i \varphi_i = (gK_i)^{\frac{1}{2}} t$  тобто через просторову характеристику хвилювання.

Для прогнозування поля підвищень рельєфу хвиль на момент часу  $t + \Delta t$  необхідно задати кожної спектральної складової доповнітельний зсув фаз  $\Delta \varphi_i = (gK_i)^{\frac{1}{2}} \Delta t$ . Потім над отриманим комплексним спектром рельєфу для моменту часу  $t + \Delta t$ :

$$\begin{aligned} z(x, y, t + \Delta t) = \sum_i \sum_j a_{ij} \times \\ \times \cos\left[K_i(x \cos Q_j + y \sin Q_j) - (gK_i)^{\frac{1}{2}}(t + \Delta t) - \varepsilon_{ij}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

здійснити зворотне перетворення Фур'є. У результаті ми отримаємо шуканий рельєф хвиль  $z(x, y, t + \Delta t)$ .

Схематично послідовність операцій з отримання прогностичного рельєфу можна записати у вигляді такої послідовності:

$$\begin{aligned} z(\rho, t) \rightarrow F\{z(\rho, t)\} \rightarrow s'_z(iK, Q, t) \rightarrow \\ \rightarrow s'_z(iK, Q, t + \Delta t) \rightarrow F^{-1}\{s'_z(iK, Q, t)\} \rightarrow \\ \rightarrow z(\rho, t + \Delta t). \end{aligned} \quad (10)$$

Таким чином, якщо здійснити операції (9) і (10), то можна через  $\Delta t$  прогнозувати значення підвищень рельєфу хвиль в будь-якій точці  $\rho(x, y)$ . Очевидно для якісного регулювання необхідна послідовність реалізації  $z[\rho, t + \Delta t (0 < \Delta t < T_p)]$ . Прогнозування всього рельєфу хвиль в околицях траєкторії об'єкта дає можливість передбачити виникнення особливо високих хвиль з напрямками їх руху та іншими аварійними ситуаціями.

Прогнозування неминуче пов'язане з помилками. Основними причинами похибок є:

- обмеження розмірів двовимірної реалізації рельєфу хвиль, яку вдалося дистанційно виміряти;
- похибки самих дистанційних вимірювань;
- інерційність процесу дистанційного вимірювання та обробки інформації;
- зміна амплітуд і фазових співвідношень спектральних складових за час прогнозування під впливом їхнього загасання і дії збуджуючих хвилювань сил.

Оцінка значень похибок є самостійною задачею і виходить за рамки даних досліджень.

Дані про поточний і прогнозований рельєф хвиль для моменту часу  $t + \Delta t (0 \leq \Delta t \leq T_p)$  попадають в систему вироблення команд управління.

Наступним етапом є вироблення керуючих команд для забезпечення інваріантності параметрів руху до дії збуреної середовища.

Інформація з дистанційного вимірювача структури хвилювання в залежності від конкретних цілей може подаватися в самому різному вигляді:

- послідовність двовимірних реалізацій рельєфу хвиль або
- послідовність двовимірних комплексних спектрів зазначених двовимірних функцій;
- послідовність перетинів хвильового рельєфу (хвильовий профіль) або
- послідовність одновимірних комплексних спектрів цих хвильових профілів;
- координати найбільш високих і низьких хвиль і траєкторії їх руху;
- послідовність огинають висот хвиль або
- послідовність двовимірних комплексних спектрів цих огинають і т.д.

Одним з варіантів структурної схеми системи управління рухом об'єкта на схвилюваній поверхні моря показаний на рис. 1.

Дистанційні неконтактні хвилеміри дозволяють отримати перераховані вище характеристики хвилювання, необхідні для компенсації несприятливого впливу, який надає хвилювання на руху суден.

### Висновки по роботі

У ході аналізу основних некерованих зовнішніх процесів впливаючих на систему управління судна був вироблений один з можливих шляхів їх стабілізації в неоднорідному (обуреному) середовищі. Крім цього були розглянуті особливості процесу стабілізації в процесі управління судном в динамічному середовищі. Це дозволило розробити і запропонувати структурну схему системи управління рухом об'єкта в неоднорідному середовищі, що може дозволити застосувати при необхідності в складних умовах управління судном.

Таким чином, в статті розглянуті основні неоднорідності, які впливають на управління судном та запропоновано шляхи стабілізації транспортного засобу при його експлуатації.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРО ДВИЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СРЕДСТВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Д.Н. Гудков, И.В. Тихонов

*В статье осуществляется постановка задачи, которая связана с управлением движением морских объектов в неоднородной среде. В ходе проведенных исследований предложен путь построения системы управления движением динамического объекта на основе анализа и учета основных процессов водной среды, которые приводят к неоднородностям при эксплуатации средств водного транспорта.*

**Ключевые слова:** система управления судном, неоднородное поле, возмущения, структура.

### PROBLEM ABOUT SUBJECTS MOVEMENT IN INHOMOGENEOUS ENVIRONMENT AND THE WAYS TO SOLVE OPERATION OF WATER TRANSPORT

D.N. Gudkov, I.V. Tikhonov

*The article made formulation of the problem, which is related to control the movement of the offshore objects in inhomogeneous environment. In the course of conducted research proposed way to build a motion control system of dynamic object, based on the analysis and consideration of the basic processes of water environment, which lead to irregularities in the operation of water transport.*

**Keywords:** vessel control system, inhomogeneous field, perturbation, structure.



Рис. 1. Структурна схема системи управління рухом об'єкта в неоднорідному середовищі

### Список літератури

1. Дідик А.Д. Управління судном і його технічна експлуатація / А.Д. Дідик, В.Д. Усов, Р.Ю. Титов. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
2. Вагуценко Л.Л. Системи автоматичного управління рухом судна / Л.Л. Вагуценко, Н.Н. Цимбал. – Одеса: Фенікс, 2007. – 328 с.
3. Небеснов В.І. Оптиміальні режими роботи суднових комплексів / В.І. Небеснов. – М.: Транспорт, 1974. – 200 с.
4. Ткаченко О.М. Суднові системи автоматичного управління і регулювання / А.Н. Ткаченко. – Л.: Суднобудування, 1984. – 288 с.
5. Ємельянов С.В. Нові типи зворотного зв'язку. Управління при невизначеності / С.В. Ємельянов, С.К. Коровін. – М.: Наука. Фізматліт, 1997. – 352 с.

Надійшла до редколегії 2.10.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.Л. Баранов, Національний транспортний університет, Київ.