

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кораблебудівний навчально-науковий інститут
Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри, в.о.

/ Бобров М.М. /  (підпис)

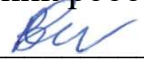
«22» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему:

«Дослідження впливу видів деформування на частоти вільних коливань корпусу судна»

Виконав: студент(ка) 6116м групи
 Шалюта В.О.
(підпис)

Керівник роботи: доцент кафедри, к.т.н.
 Соков В.М.
(підпис)

Миколаїв 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут (факультет): Кораблебудівний

Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

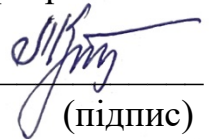
Спеціальність 135 Суднобудування

Освітня програма «Конструювання та міцність корпусу суден і плавучих споруд»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

Коростильов Л.І.



(підпис)

«02» грудня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти магістра

Студенту Шалюті Валерію Олександровичу

1. Тема роботи: Дослідження впливу видів деформування на частоти вільних коливань корпусу судна.

Керівник роботи: Соков В.М., к.т.н., доц. кафедри.

Затверджені наказом ректора № 1185-уч від «12» листопада 2024 року.

2. Термін подання роботи до 16 грудня 2025 року.

3. Вихідні дані по роботі: вихідні дані по судну, фахова література, матеріали конференцій, репозитарій університету.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

Розділ 1. Теоретичні основи розрахунку загальної вібрації корпусу суден.

Розділ 2. Обробка вихідних даних судна для подальшого їх використання.

Розділ 3. Визначення необхідних величин та елементів для розрахунку загальної вібрації корпусу судна.

Розділ 4. Аналіз впливу видів деформування на частоти вільних коливань корпусу судна.

5. Перелік презентаційних матеріалів виконаний в середовищі PowerPoint.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Соков В.М.		
2	Соков В.М.		
3	Соков В.М.		
4	Соков В.М.		

7. Дата видачі завдання: 16 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи розрахунку загальної вібрації корпусу суден	вересень 2025	виконано
2	Обробка вихідних даних судна для подальшого їх використання	вересень 2025	виконано
3	Визначення необхідних величин та елементів для розрахунку загальної вібрації корпусу судна	жовтень 2025	виконано
4	Аналіз впливу видів деформування на частоти вільних коливань корпусу судна	жовтень-грудень 2025	виконано
5	Оформлення магістерської роботи	грудень 2025	виконано
6	Передача магістерської роботи на рецензування рецензенту	грудень 2025	виконано
7	Передача магістерської роботи науковому керівнику для написання відгуку	грудень 2025	виконано
8	Кафедральний захист магістерської роботи	05 грудня 2025	виконано
9	Захист магістерської роботи	24 грудня 2025	виконано

Студент


(підпис)

Шалюта В.О.
(ПІБ)

Керівник роботи


(підпис)

Соков В.М.
(ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Шалюта В.О. Дослідження впливу видів деформування на частоти вільних коливань корпусу судна. Кваліфікаційна магістерська робота зі спеціальності 135 «Суднобудування», освітньої програми «Конструювання та міцність корпусу суден і плавучих споруд». Миколаїв: НУК ім. адмірала Макарова, 2025. 58 с.

В рамках даної магістерської кваліфікаційної роботи був досліджений вплив видів деформування на частоту вільних коливань корпусу судна першого тону. Робота складається з чотирьох розділів, які відображають послідовність розрахунку вібрації від передачі конструкторської документації по судну до виконання науково-дослідної частини. У першому розділі були описані методи розрахунку вільних коливань корпусу судна. У другому розділі була здійснена обробка вихідних даних судна для подальшого їх використання. У третьому розділі було проведено визначення необхідних величин та елементів для розрахунку загальної вібрації корпусу судна, згідно теоретичних засад, описаних у 1-му розділі. У 4-му розділі був проведений аналіз впливу видів деформування на частоти вільних коливань корпусу судна.

Ключові слова: буксир, вібрація, вільні коливання, частота.

SUMMARY

Shaliuta Valerii. Investigation of the influence of kinds of deformation onto free vibration frequencies of the ship hull. Qualification master's work on specialty 135 "Shipbuilding", of the educational program "Construction and Strength of Hull of Ships and Floating Structures". Mykolaiv: NUOS, 2025. 58 p.

Within the framework of this master's qualification work, the influence of deformation types on the frequency of free vibrations of the ship's hull of the first tone was investigated. The work consists of four sections, which reflect the sequence of vibration calculation from the transfer of design documentation for the ship to the implementation of the research part. The first section describes the methods for calculating free vibrations of

the ship's hull. The second section processes the initial data of the ship for their further use. The third section determines the necessary quantities and elements for calculating the total vibration of the ship's hull, according to the theoretical principles described in the 1st section. The 4th section analyzes the influence of deformation types on the frequencies of free vibrations of the ship's hull.

Keywords: tug, vibration, free vibration, frequency.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЗАГАЛЬНОЇ ВІБРАЦІЇ КОРПУСУ СУДЕН	9
1.1 Опис методу Релея-Папковича-Шиманського	9
1.2 Визначення форм вільних коливань	13
2 ОБРОБКА ВИХІДНИХ ДАНИХ СУДНА ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	15
2.1 Визначення погонних мас корпусу судна	15
3 ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНИХ ВЕЛИЧИН ТА ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЗАГАЛЬНОЇ ВІБРАЦІЇ КОРПУСУ СУДНА	31
3.1 Удиферентовка судна та визначення характеристик зануреної частини корпусу судна, необхідні для розрахунку загальної вібрації	31
3.2 Визначення геометричних характеристик поперечних перерізів корпусу судна та їх апроксимація	36
4 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИДІВ ДЕФОРМУВАННЯ НА ЧАСТОТИ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ КОРПУСУ СУДНА	51
4.1 Визначення частоти вільних коливань у вертикальній площині тільки від згинальної складової	51
4.2 Вивчення впливу зсуву на частоту вільних згинальних вертикальних коливань	52
4.3 Порівняння розрахованих власних частот з емпіричними	55
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КС – корпус судна

ЕБ – еквівалентний брус

РС – розрахунковий стан

ЦВ – центр ваги

ГВК – головні вільні коливання

ВСТУП

Розрахунок загальної вібрації корпусу судна є важливим етапом в рамках розрахунку загальної і місцевої міцності судна в цілому. Однією із задач розрахунку загальної вібрації є визначення власних частот коливань корпусу судна. В роботі вивчається вплив деяких додаткових видів деформування на частоту вільних згинальних коливань у вертикальній площині. Цими додатковими видами деформування є зсув та обертання поперечних перерізів, які виникають попутно при згинальних коливаннях. Необхідно виявити вплив цих додаткових видів деформування на частоту вільних коливань. Розрахунок проводився на основі даних буксиру Т3500.

Метою магістерської роботи є дослідження впливу видів деформування на частоту вільних згинальних коливань корпусу судна першого тону, для того щоб розуміти вклад тієї чи іншої складової деформування на частоту вільних коливань.

Щоб досягти поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

1) Обробити вихідні дані судна, які надані фірмою для подальшого використання цих даних в ключі розрахунку загальної вібрації корпусу судна.

2) Визначити необхідні величини та елементи для розрахунку загальної вібрації корпусу судна.

3) Провести аналіз впливу видів деформування на частоти вільних коливань корпусу судна. В рамках останньої задачі розраховуються вільні згинальні коливання у вертикальній площині, де аналізується вплив деформацій зсуву і вплив інерції обертання поперечних перерізів на частоту вільних коливань корпусу судна першого тону.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЗАГАЛЬНОЇ ВІБРАЦІЇ КОРПУСУ СУДЕН

У цьому розділі роботи описано енергетичний метод Релея-Папковича-Шиманського для розрахунку власних частот згинальних коливань корпусу судна у вертикальній площині з врахуванням зсуву та інерції обертання поперечних перерізів, без врахування кручення корпусу судна. Для розрахунку загальної вібрації корпус судна розглядається як непризматична невагома балка (сили ваги врівноважені силами підтримки), що коливається в рідині [1], [2].

1.1 Опис методу Релея-Папковича-Шиманського

Для розрахунку частот і форм вільних згинальних поперечних коливань корпусу судна (КС) використовується так званий енергетичний метод Релея-Папковича-Шиманського [1, с.179], [2, с. 126], з урахуванням зсуву та інерції обертання поперечних перерізів, без ітераційного уточнення форми коливань та відповідно власних частот у межах n -го тону, але з ортогоналізацією форми коливань кожного тону з формами коливань попередніх тонів. У нашому випадку врахування зсуву та обертання поперечних перерізів є обов'язковим, оскільки відношення довжини судна до висоти борту у міделевому перерізі становить $L/H_{\text{mid}} \approx 30\text{м}/9\text{м} \approx 3$. Врахування деформацій зсуву, як і врахування інерції обертання поперечних перерізів призводить до зменшення частоти вільних коливань. Вплив зсуву на частоту вільних коливань судна значно більший, ніж вплив інерції обертання поперечного перерізу. При цьому з підвищенням номера частоти вплив деформації зсуву збільшується, а вплив інерції обертання зменшується (див. [1], с.181).

Далі записані вирази цього методу, стосовно коливань в одній площині, які застосовуються для розрахунку як вертикальних, так і горизонтальних коливань. Потенційна енергія $V_{\text{КС}}$ визначиться за виразом

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) \left(\frac{\partial v_1(x,t)}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L GF(x) k_s(x) \left(\frac{\partial v_2(x,t)}{\partial x} \right)^2 dx, \quad (1)$$

де x – координата, яка відраховується від нульового шпангоута в кормі, м.

t – час, с;

$L = 29,7$ м – довжина судна для розрахунку, м;

$E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па – модуль Юнга;

$G = 7,7 \cdot 10^{10}$ Па – модуль зсуву;

$k_s(x)$ – коефіцієнт, який враховує форму поперечного перерізу при зсуві [3, 4].

$I(x)$ – головний центральний момент інерції, м⁴;

$v_1(x,t)$ – прогин викликаний тільки згином, який визначається виразом

$$v_1(x,t) = a \cdot \cos(\lambda_n t + \varepsilon_n) \cdot \varphi_n(x), \text{ м}, \quad (2)$$

$v_2(x,t)$ – прогин викликаний тільки зсувом, який визначається виразом

$$v_2(x,t) = b \cdot \cos(\lambda_n t + \varepsilon_n) \cdot \varphi_n(x), \text{ м}, \quad (3)$$

a, b – невідомі коефіцієнти для n -го тона;

n – номер тону коливань;

λ_n – частота вільних коливань КС n -го тону, рад/с;

ε_n – початкова фаза коливань, рад;

$\varphi_n(x)$ – прийнята форма коливань для n -го тону коливань.

Кінетична енергія T КС визначається виразом

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \left(\frac{\partial v_1(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial v_2(x,t)}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L I_m(x) \left(\frac{\partial^2 v_1(x,t)}{\partial x \partial t} \right)^2 dx, \quad (4)$$

де $m_{\Sigma n}(x)$ – сумарна погонна маса, яка представляє собою суму маси судна и

приєднаної води для n -го тону коливань, кг/м;

$\rho = 7800$ кг/м³ – густина матеріалу судна (сталь);

I_m – головний центральний момент інерції розподілених мас (або погонний момент інерції мас) з врахуванням приєднаних моментів інерції рідини при обертанні поперечних перерізів, (кг/м)·м².

Величина $I_m(x)$ обчислена аналогічно моментам інерції в розрахунках геометричних характеристик плоских фігур, але з урахуванням щільності матеріалу

поперечного перерізу як функції координат, до якої додані приєднані інерції обертання води.

Якщо в поперечному перерізі є різномірний матеріал, наприклад матеріал корпусу судна і матеріал вантажу, баласту, ПММ, і т.д. то положення головних центральних осей для погонних мас відрізнятимуться в такому разі від положення головних центральних осей поперечного перерізу КС. Беручи до уваги, що даний буксир не перевозить вантажів, а матеріал корпусу судна складається в основному зі сталі, при цьому маса змінних вантажів (ПММ, баласту, запасів, і т.д., щільність яких відрізняється від щільності сталі) і механізмів не беруть участь у роботі КС (двигуна, суднові пристрої і системи) становить відносно малу частку всієї маси. вважається, що майже вся маса КС бере участь у роботі деформування КС. У зв'язку з цим радіус інерції розподілених мас за поперечними перерізами можна прийняти приблизно рівним радіусу інерції плоскої фігури, що становить цей переріз, обчисленим за звичайною методикою розрахунку геометричних перерізів плоских фігур, т.я. щільність перерізу у разі належить постійної. З урахуванням вищесказаного, а також не маючи достовірних даних про приєднані моменти інерції рідини при обертанні перерізів і знаючи, що поправка на інерцію обертання нижчих частот невелика [1], [2], наближено приймаємо

$$I_m(x) = m(x) \cdot r^2(x), \quad r^2(x) = \frac{I(x)}{F(x)}. \quad (5)$$

де $m(x)$ – погоні маси судна тільки від вагового навантаження, кг/м;

r – радіус інерції мас поперечного перерізу, який наближено приймаємо за геометричними характеристиками КС, м.

Підставляючи (2), (3) в (1) і (4) і вважаючи, що максимуми потенціальної і кінетичної енергій знаходяться в протифазах, тобто коли $\cos(\lambda_n t + \varepsilon_n) = 1$ і $\sin(\lambda_n t + \varepsilon_n) = 1$, отримаємо наступні вирази для максимальної потенційної V_{max} і кінетичної T_{max} енергій

$$V_{max} = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) a^2 \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_n(x) \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L GF(x) k_s(x) b^2 \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 dx, \quad (6)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \int_0^L m_{\Sigma n}(x) (-a \varphi_n(x) \lambda - b \varphi_n(x) \lambda)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L I_m(x) a^2 \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 \lambda^2 dx, \quad (7)$$

Невідомі коефіцієнти a і b знайдуться з умов

$$\frac{\partial}{\partial a}(V_{\max} - T_{\max}) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial b}(V_{\max} - T_{\max}) = 0. \quad (8)$$

Підставляючи (6), (7) в (8) отримаємо систему двох однорідних алгебраїчних рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} & \left\{ \int_0^L EI(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L I_m(x) \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 dx \right\} a + \\ & + \left\{ -\lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \right\} b = 0; \\ & \left\{ -\lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \right\} a + \left\{ \int_0^L GF(x) k_s(x) \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \right\} b = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Прирівнюючи визначник (9) до нуля, отримаємо характеристичне рівняння, коріння якого є власними частотами для цієї форми коливань. Далі покажемо процес складання характеристичного рівняння. У матричному вигляді (9) можна записати так

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; \quad \det A = a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21} = 0, \quad (10)$$

де

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \int_0^L EI(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L I_m(x) \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 dx \\ a_{12} &= -\lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \\ a_{21} &= -\lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \\ a_{22} &= \int_0^L GF(x) k_s(x) \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Підставляючи (11) в (10) отримаємо характеристичне рівняння

$$\left. \begin{aligned} & \left(\int_0^L EI(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \left(\int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx + \int_0^L I_m(x) \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 dx \right) \right) \times \\ & \times \left(\int_0^L GF(x) k_s(x) \left(\frac{d}{dx} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \right) - \lambda^4 \left(\int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx \right)^2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Вирішуючи (12) для даного n-го тону отримаємо 4 корені, які є власними частотами за фізичним змістом: два з них позитивні, а два негативні. Негативне коріння відкидаємо, т.я. вони не відповідають фізичному уявленню задачі (негативних частот не може бути). З позитивного коріння беремо до уваги лише менший (т.зв. першу частоту), т.я. він відповідає прийнятій формі коливань даного n-го тону. Таким чином, шукана частота вільних згинальних поперечних коливань КС з урахуванням зсуву та інерції обертання поперечних перерізів дорівнюватиме меншому позитивному кореню з коренів (12) [1, 2].

1.2 Визначення форм вільних коливань

Форми коливань, які присутні в (2) і (3) задаються в наступному вигляді

$$\varphi_n(x) = \tilde{\varphi}_n(x) + \sum_{i=1}^{i=n-1} \delta_{n,i} \varphi_i(x), \text{ м}, \quad (13)$$

$$\tilde{\varphi}_n(x) = \psi_n(x) + \alpha_n + \beta_n x, \text{ м}, \quad (14)$$

де $\delta_{n,i}$ – коефіцієнти ортогоналізації, які визначаються за формулою [1, с.183]

$$\delta_{n,i} = - \frac{\int_0^L m_{\Sigma}^{n,i}(x) \cdot \tilde{\varphi}_n(x) \cdot \varphi_i(x) dx}{\int_0^L m_{\Sigma}^{n,i}(x) \cdot \varphi_i^2(x) dx}, \quad (15)$$

$m_{\Sigma}^{n,i}(x)$ – приведені маси, які визначаються за [1]

$$\left. \begin{aligned} m_{\Sigma}^{n,i}(x) &= 0,5(m_{\Sigma n}(x) + m_{\Sigma i}(x)); \\ m_{\Sigma}^{n,i}(x) &= \sqrt{(m_{\Sigma n}(x) \cdot m_{\Sigma i}(x))}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

де верхня формула відповідає пропозиції В.В. Давидова, а нижня рекомендації А.А. Курдюмова (див. пояснення в кінці цього пункту);

$m_{\Sigma n}, m_{\Sigma i}$ – сумарні погонні маси судового корпусу з врахуванням приєднаної води відповідно для n -го і i -го тонів коливань;

$\varphi_n(x)$ – форма коливань для n -го тону;

$\varphi_i(x)$ – попередні форми коливань від 1-й до $n - 1$, обчислені за (13);

α_n, β_n – коефіцієнти, які визначаються за умов динамічної врівноваженості сил інерції в КС при коливаннях як безопорної балки (умови замикання внутрішніх зусиль $Q_{\text{ін}}$ и $M_{\text{ін}}$ в кінцевих перерізах КС) [1], [2], [5]

$$\left. \begin{aligned} \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \cdot \tilde{\varphi}_n(x) dx &= 0, \\ \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \cdot x \cdot \tilde{\varphi}_n(x) dx &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$\psi_n(x)$ – форма коливань безопорної призматичної балки для n -го тону [6], геометричні характеристики якої відповідають поперечному перерізу міделя судна

$$\left. \begin{aligned} \psi_n(x) &= A_n [(\text{ch}(k_n L) - \cos(k_n L)) \cdot (\text{sh}(k_n x) + \sin(k_n x)) - \\ &\quad - (\text{sh}(k_n L) - \sin(k_n L)) \cdot (\text{ch}(k_n x) + \cos(k_n x))]; \\ k_n &= \sqrt[4]{\frac{m \cdot \lambda_n^2}{EI}}; \quad \lambda_n = \frac{\chi_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}; \quad m = \rho F; \\ \chi_n &= \frac{\pi}{2} (2(n+1) - 1); \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

де A_n – безрозмірний коефіцієнт, який знаходиться з умов нормування [2, (400)]

$$\int_0^L \psi(x)^2 dx = 1, \quad (19)$$

m – погонна маса призматичної балки, кг/м;

$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ – густина матеріалу призматичної балки і судна (сталь);

$F = 0,7469 \text{ м}^2$ – найбільша площа поперечного перерізу ЕБ КС, м^2 ;

I – головний центральний момент інерції поперечного перерізу відповідного перерізу найбільшої площі відносно головної центральної осі, яка поперечна до площини в якій відбуваються згинальні коливання, м^4 ;

Форма коливань для 1-го тону $\varphi_1(x)$ визначається виразом (14), т.я. немає попередніх тонів. Форма коливань для тонів від 2-го и вище $\varphi_n(x)$, $n = 2, 3, \dots, +\infty$ визначається виразом (13). В нашому випадку буде вивчатися лише 1-й тон вертикальних згинальних коливань.

2 ОБРОБКА ВИХІДНИХ ДАНИХ СУДНА ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

2.1 Визначення погонних мас корпусу судна

Погонні маси були визначені на основі вихідних даних, наданих фірмою ASABA Design Center. Вихідні дані являють собою масову таблицю статей навантаження та креслення загального розташування, розбиття на секції та ін., за якими можна визначити початок, кінець і протяжність окремого взятого елемента КС і наближено (де це можливо чи очевидно) з'ясувати закон розподілу мас цього елемента вздовж довжини судна. Для обробки результатів масової таблиці із застосуванням допоміжних креслень згаданих вище з метою побудови закону розподілених мас уздовж довжини судна був створений спеціальний алгоритм.

Елемент статті навантаження подано типом з такими полями

$$\text{елемент_КС} = \{M; f(x); x_G; x_{BEGIN}; x_{END}\}, \quad (20)$$

де M – маса елемента статті навантаження, кг;

$f(x)$ – закон розподілу мас цього елемента в границях своєї довжини в загальній системі координат, яка пов'язана з кораблем, кг/м;

x_G – положення ЦВ цього елемента, м;

x_{BEGIN} – початок елемента статті навантаження в загальній системі координат, м;

x_{END} – кінець елемента статті навантаження в загальній системі координат, м.

Якщо визначення закону $f(x)$ з (20) ускладнене або неможливе, то закон $f(x)$ вважається лінійним $f(x) = kx + b$, де постійні k , b можуть бути легко визначені, знаючи M , x_G , x_{BEGIN} , x_{END} (див. відповідні курси теоретичної механіки для ВНЗ). Якщо протяжність елемента статті навантаження дуже мала порівняно з довжиною КС, цей елемент належить *точковою масою* у якого $x_G = x_{BEGIN} = x_{END}$, а $f(x)$ не використовується. Якщо елемент статті навантаження протяжний $x_{BEGIN} < x_{END}$, а $f(x)$ визначений, то цей елемент назовемо *протяжний елемент* вздовж довжини судна.

Використовується ступінчаста апроксимація масової кривої вздовж судна. У межах кожної шпациї маса вважається постійною. Для всіх шпаций обчислюються повні маси, кг (не розподілені).

Обчислення повної маси в межах однієї довільної шпациї можна коротко описати в такий спосіб. Для окремо взятої i -ї шпациї спочатку виставляються межі шпациї: початок x_i^{begin} і кінець x_i^{end} у глобальній системі координат. Потім перебираються усі елементи *масової таблиці*. Якщо x_G точкової маси потрапляє у межі даної шпациї $x_i^{begin} \leq x_G < x_i^{end}$, то ця точкова маса додається до маси даної шпациї. Якщо ж елемент статті навантаження є протяжним елементом, то за x_{BEGIN}, x_{END} і за x_i^{begin}, x_i^{end} перевіряється зв'язок цього елемента зі шпациєю, а якщо цей зв'язок встановлений, то визначаються межі інтегрування для закону $f(x)$, щоб знайти масу від даного протяжного елемента в межах аналізованої шпациї і додати її до маси шпациї.

Нижче представлена масова таблиця, елементи якої оформлені згідно (20).

Таблиця 2.1 – Масова таблиця по елементам для судна при повному завантаженні (РС№1)

№ п/п	Назва елемента статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
	Судно порожнем				
1	Т3500-360065-008=Система збору та видачі нафтовмісних вод.			0,205	12,1
2	Т3500-360065-002=Система водяного пожежогасіння.			0,6	18,43
3	Т3500-360065-003=Система вуглекислотного пожежогасіння прим. МО			0,06	15,95
4	Т3500-360065-018=Система спеціальна водопіногасіння			2,5	17,2
5	Т3500-360065-019=Система водяних			0,15	17,5

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
	завіс та зрошення				
6	T3500-360065-009 =Система побутового водопостачання			0,8	21,2
7	T3500-360065-010=Система стічна			1,35	19,2
8	T3500-360065-016=Шпігати відкритих палуб			0,2	15,95
9	T3500-360065-011=Повітряно-вимірювальні труби СЕУ та ОСС			1,6	16,5
10	T3500-360065-017=Система повітря госппотреб			0,08	17,6
11	T3500-360065-012=Система загальносудинної вентиляції.			2,33	20,4
12	T3500-360065-013=Система кондиціювання повітря			0,5	21,9
13	T3500-360065-014=Система охолодження кондиціонера			0,205	15,4
14	T3500-360065-015=Система водяного обігріву			0,655	14,5
15	T3500-360065-004=Система об'ємного аерозольного пожежогасіння в МКО			0,06	14,3
16	Допоміжний дизель-генератор D9A MG HE (ВДГ) №1 Нел. = 168 кВт	7,7	10,45	2,48	9,35
17	Допоміжний дизель-генератор D9A MG HE (ВДГ) №1 Нел. = 168 кВт	7,7	10,45	2,48	9,35
18	Головний двигун №1, 12V4000M53 Ne=1380 кВт	12,375	15,4	7,774	14,1
19	Головний двигун (ДД) №2, 12V4000M53 Ne=1380 кВт	12,375	15,4	7,774	14,1
20	Винторульова колонка (ВРК) №1 US 205P20 CP з гвинтом регульованого	2,2	4,95	16,5	3,56

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
	кроку Ø 2200 мм				
21	Винторульова колонка (ВРК) №2 US 205P20 CP з гвинтом регульованого кроку Ø 2200 мм	2,2	4,95	16,5	3,56
22	Гідроблок управління ВРК №1			0,21	2,2
23	Гідроблок управління ВРК №2			0,21	2,2
24	Пластинчастий утилізаційний теплообмінник, що окремо стоїть, №1, N=40 кВт			0,05	15,26
25	Пластинчастий утилізаційний теплообмінник, що окремо стоїть, №2, N=40 кВт			0,05	15,26
26	Тепловентилятор водяний N=6 кВт, P=0,2 МПа			0,032	16,28
27	Тепловентилятор водяний N=6 кВт, P=0,2 МПа			0,032	9,63
28	Тепловентилятор водяний N=6 кВт, P=0,2 МПа			0,032	9,63
29	Тепловентилятор водяний N= 5 кВт, P=0,2 МПа			0,032	2,23
30	Тепловентилятор водяний N=5 кВт, P=0,2 МПа			0,032	2,23
31	Допоміжний водогрійний автоматизований котлоагрегат N=70 кВт			0,39	16,86
32	Електронасос циркуляційний системи опалення №1, Q=8м3/год, P=0,2 МПа			0,028	17,9
33	Електронасос циркуляційної системи опалення №2, Q=8м3/год, P=0,2 МПа			0,028	17,9
34	Блок сепаратора палива			0,1	10,6

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
35	Насос заповнення цистерни палива АСДГ Q=0,7 м3/год, P=0,2 МПа			0,052	17,942
36	Електронасос перекачування палива Q=10 м3/год, P=0,3 МПа			0,075	9,425
37	Ручний насос для зачистки паливних цистерн Fig. 950 SIZE 1			0,006	17,95
38	Компресор повітря госппотреб з балоном V =65 л, Q= 15 м3/год, P=10 кг/см2			0,25	17,34
39	Електронасос видачі нафтозалишків Q=3,0 м3/год, P=0,4 МПа			0,03	16,3
40	Електронасос перекачування олії, переносний Q=1 м3/год, P=0,2 МПа			0,035	5,243
41	Цистерна запасу олії ГД/ДГ, V=300/100 літрів			0,33	14,362
42	Цистерна напірна олії ВРК №1, V=30 літрів			0,045	14,305
43	Цистерна напірна олії ВРК №2, V=30 літрів			0,045	14,305
44	Електронасос перекачування нафтовмісних вод, що самоусмоктує Q=4,0 м3/год, P=0,6 МПа			0,065	16,8
45	Ежектор осушення Q=10 м3/год.			0,02	14,5
46	Баластний самоусмоктуючий відцентровий електронасос (насос аварійного осушення МО) Q= 30 м3/год, P=0,5 МПа			0,12	10,065
47	Головний стаціонарний пожежно- осушувальний, відцентровий самовсмоктувальний електронасос.			0,12	16,26
48	Стаціонарний пожежно-			0,12	20,25

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
	осушувальний, відцентровий самовсмоктувальний електронасос				
49	Насос системи зовнішнього пожежогасіння (навішений на ГД №1) Q=500 м3/год; P = 11 бар			0,65	15,63
50	Насос системи зовнішнього пожежогасіння (навішений на ДД №2) Q=500 м3/год; P = 11 бар			0,65	15,63
51	Вуглекислотне гасіння глушників (1 вогнегасник V=7л)			0,03	15,6
52	Гасіння витяжного каналу камбуза (1 балон V=5л)			0,02	15,6
53	Муфта роз'єднувальна навішеного пожежного насоса ГД №1			0,2	15,14
54	Муфта роз'єднувальна навішеного пожежного насоса ГД №2			0,2	15,14
55	Гідроблок муфти роз'єднувальної навісного пожежного насоса ГД №1			0,05	17,81
56	Секція 1014(1013)	0	2,4	7,3	1,411
57	Секція 1012(1011)	2,4	4,65	4,3	3,811
58	Секція 2014(2013)	4,65	10,7	19,6	7,5
59	Секція 2012(2011)	4,65	10,7	19,6	7,8
60	Секція 2024(2023)	10,7	17,4	18,1	14,2
61	Секція 2022(2021)	10,7	17,4	14,4	13,9
62	Секція 2032(2031)	17,4	24,4	22,2	20,8
63	Секція 2034(2033)	17,4	24,4	15,8	20,6
64	Секція 2041,2042,2043	6,6	24,755	1,2	16,315
65	Секція 3011	24,4	28,564	3,5	25,9
66	Секція 3012	24,4	29,65	10,34	28,5
67	Секція 4001 Основна надбудова	11	23,65	14,8	19,57
68	Секція 4002 Кожухи труб	10,45	13,75	3,1	13,222

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
69	Секція 4011 Рубка	14,85	19,856	4,3	17,3
70	Зовнішня обшивка	0	29,7	62	15,295
71	Щогла			1,8	18
72	Кілі скег			3,2	16,334
73	Фальшборт	0	29,7	12,5	16,6
74	Фундаменти	0	29,7	12	16,334
75	Сварка	0	29,7	3,5	16,6
76	Дільні речі	14,85	23,65	9,36	14,84
77	Лінолеум			0,29	20,81
78	Мастика	14,85	23,65	2,94	20,15
79	Резинові доріжки			0,03	17,16
80	Кераміка			0,75	19,08
81	Окраска	0	29,7	2,73	15,29
82	Ізоляція	14,85	23,65	4,75	16,27
83	Зашивки	14,85	23,65	8,99	19,92
84	Обладнання приміщень, постів	14,85	23,65	5,4	20,87
85	Якоря станові ПДС 360			0,72	28,1
86	Якірні ланцюги 19мм (275 м)			2,25	26,6
87	Стопори			0,1	26,6
88	Кнехти носові			0,22	25,44
89	Кнехти кормові			0,22	4,5
90	Швартовні канати			0,222	23,7
91	Лебідка носова	25,3	27,5	12	26,1
92	Бітенг кормовий	9,9	10,725	4,5	10,56
93	Лебідка кормова	11,55	13,475	17	12,65
94	Бітенг носовий	28,05	28,6	3	28,42
95	Пал підпалубний			0,25	1,65
96	Гак буксирний			0,8	9,2
97	Рол кормовий			0,35	0,14
98	Рятувальні плоті із кріпленням			0,49	15,88
99	Кран гідравлічний			1,81	10,74

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
100	Шлюпка з ложементами			0,15	13,05
101	Кранець носовий	23,1	29,7	5,9	28,1
102	Кранці бортові	4,4	23,1	2,95	13,82
103	Кранець кормовий	0	4,4	2,42	1,15
104	Кранці бортові (автошини) + кріплення	4,4	23,1	1,31	14,4
105	Щогла сигнальна з рангоутом і такелажем			1	16,3
106	Щити бортових ліхтарів			0,092	16,8
107	Лесрний пристрій			1	14,8
108	T3500-360065-001=Донно-бортова арматура та обладнання кінгстонних ящиків	0	29,7	1,3	15,22
109	T3500-360065-007=Баластна система.			2,05	14,3
110	T3500-360065-006 =Система осушувальна			0,73	15,4
111	T3500.36064.018=Силовий гідроблок вантажного крана			2	13,5
112	T3500.36064.017=Силовий гідроблок буксирного крюка			0,5	14,3
113	Трубопроводи системи гідравліки			0,25	12,9
114	Система видачі нафтозалишків			0,105	13,75
115	Системи контролю, регулювання, захисту.			0,06	14,85
116	Перетворювачі.			0,1	16,2
117	Трансформатори загальносудові.			0,27	16,8
118	Батарейні акумуляторні.			0,29	16,1
119	Головні, аварійні розподільні щити			1	17,3
120	Щити розподільні			0,24	17,4
121	Кабель			0,8	16,4
122	Кабельні коробки			0,1	17,6

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
123	Пристрої розподільні мережі освітлення			0,08	17,8
124	Арматура освітлювальна			0,4	17,2
125	Мережа електрогрілок			0,22	19,9
126	Мережа вентиляції			0,09	16,3
127	Дистанційне та автоматичне керування пристроями, системами			0,72	14,4
128	Внутрішньосудинний зв'язок та управління			0,46	17,1
129	Кріпильні деталі, монтажний матеріал	0	29,7	3,7	16,5
130	Радіотехнічне озброєння			0,13	17,8
131	Засоби радіозв'язку			0,21	18
132	Навігаційне озброєння			0,85	17,8
133	Вода у системі побутового водопостачання			0,4	21,2
134	Олія в системі прийому, перекачування			0,45	14,5
135	Олія в системі гідравліки			1,315	12,24
136	Піноутворювач	14,3	15,95	5,8	15,1
137	Вода у ГД			0,61	14,1
138	Вода у допоміжних механізмах			0,12	13
139	У трубах головних допоможуть. механізмів			0,84	13,8
140	У трубах головної та допоміжної енергетичної установки			0,32	11,4
141	У механізмах, апаратах			0,05	10,6
142	Олія в ГД			0,53	13,8
143	Олія в ДГР			0,092	9,55
144	Олія у ВРК			3,87	3,53
145	Аварійно-рятувальне майно та ППІ			0,86	17,8

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
146	Медико-санітарне			0,05	19,5
147	Інше			0,2	24,2
148	Маса судна порожнього, т			468,045	
149	Змінні вантажі				
150	Цистерна палива FO-1 ПрБ	18,15	22	17,55	19,87
151	Цистерна палива FO-2 ЛБ	18,15	22	11,6	19,81
152	Цистерна палива FOO (переливн) ПрБ	18,15	19,8	0	18,97
153	Цистерна палива FO-3 ПрБ	7,15	11,55	22,95	9,62
154	Цистерна палива FO-4 ЛБ	4,95	8,8	9,35	7,05
155	Цистерна палива FO-5 ЛБ	4,95	8,8	9,35	7,05
156	Цистерна палива FOS-1 ПрБ (витратн)	4,95	8,8	4,77	7,11
157	Цистерна палива FOS-2 ЛБ (витратні)	4,95	8,8	4,77	7,11
158	Цистерна прісної води FW-1 ПрБ	24,2	26,95	14,23	25,18
159	Цистерна прісної води FW-2 ЛБ	22,55	24,2	6	23,24
160	Цистерна баластна	26,95	29,7	10	27,85
161	Екіпаж			1,52	21,65
162	Провізія			0,87	21,4
163	Цистерна стічних вод SG ДП	18,15	19,8	0	19,25
164	Цистерна піноутворювача FF ДП	14,3	15,95	6,93	15,13
165	Цистерна нафтовмісних вод ВО ДП	11,55	14,3	0	13,15
166	Гідроблок муфти роз'єднувальної навісного пожежного насоса ГД №2			0,05	17,81
167	Електроventилятор вдувний двошвидкісний, реверсивний AXB- AL630-6/20, Q = 25000/12500 м³/год;			0,08	11,05
168	H=800 Па			0,08	11,05
169	Електроventилятор вдувний двошвидкісний, реверсивний RXV-			0,014	13,3

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
	AL630-9/16, Q=25000/12500 м3/год;				
170	H=800 Па			0,014	6,157
171	Електроventилятор радіальний втяжний EHND 225-2 Q=250 м3/год; P=630 Па			0,027	3,71
172	Електроventилятор радіальний втяжний EHND 225-2 Q=250 м3/год; P=630 Па			0,027	3,71
173	Електроventилятор радіальний вдувний EHND 280-2, Q=600 м3/год; P=630 Па			0,32	17,34
174	Електроventилятор радіальний вдувний EHND 280-2, Q=600 м3/год; P=630 Па			0,025	15,85
175	Компресорно-конденсатний агрегат системи ВКВ ВОР-40 N=41 кВт фірми Хладотехника			0,045	15,85
176	Електронасос циркуляції холодоносія, відцентровий Q=10 м3/год; P=0,25 Мпа			0,05	15,9
177	Розширювальний мембранний бак V=40 л, P=0,2 МПа			0,07	15,68
178	Електронасос охолодження ВРК заборною водою Q=14 м3/год			0,07	4,692
179	Електронасос охолодження ВРК та блоку гідравліки лебідки заборною водою Q=24 м3/ч			0,07	4,692
180	Підігрівач попереднього прогріву ГД №1			0,023	12
181	Підігрівач попереднього прогріву ГД №2			0,023	12

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
182	Пластинчастий водяний нагрівач N=23кВт			0,05	15,26
183	Установка антибактеріальна Q=3 м3/год, N=40Вт			0,02	22,12
184	Установка антибактеріальна Q=3 м3/год, N=40Вт			0,02	21,6
185	Установка антибактеріальна Q=3 м3/год, N=40Вт			0,02	22,12
186	Установка антибактеріальна Q=3 м3/год, N=40Вт			0,02	21,6
187	Гідрофор прісної питної води			0,1	21,3
188	Гідрофор прісної миття води			0,1	21,3
189	Підігрівник миття води ємнісний, електричний (бойлер) №1 V=150 л			0,038	20,91
190	Підігрівник миття води ємнісний, електричний (бойлер) №1 V=150 л			0,038	20,39
191	Нагрівач питної води ємнісний, електричний (бойлер) №2 V=50 л			0,015	18,1
192	Електронасос стічних вод горизонтальний, відцентровий Q=6 м3/год, P=0,2 МПа			0,05	20,075
193	Насос перекачування прісної води Q=10 м3/год.			0,036	22,3
194	Ежектор стічних вод Q=10 м3/год			0,01	21,6
195	Іскрогасник водогрійного котла SA Ду200			0,053	12,6
196	Глушник-іскрогасник ГД №1 Ду350			0,415	13,143
197	Глушник-іскрогасник ГД №2 Ду350			0,415	13,143
198	Глушник-іскрогасник ВДГ №1 Ду175			0,22	12
199	Глушник-іскрогасник ВДГ №2			0,22	12

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
	Ду175				
200	Верстат свердлильний			0,022	5,55
201	Верстат точильно-шліфувальний			0,02	6,75
202	Тиски			0,02	5,3
	Силовий гідроблок лебідок			2,2	13
	Силовий гідроблок вантажного крана			0,315	6,82
203	Гідроблок буксирного гака			0,15	14,39
204	Волопровід ВРК №1 з опорними підшипниками	4,675	12,1	0,76	8,75
205	Волопровід ВРК №1 з опорними підшипниками	4,675	12,1	0,76	8,75
206	Т3500.36064.009=Гідроприводи швидкозапірних клапанів паливних цистерн			0,024	14,36
207	Т3500.36064.003=Сис-ма розх- паливного трубопроводу ГД, ВДГ та ВК			0,5	13,75
208	Т3500.36064.008 = Система охолодження СЕУ.			3,9	12,95
209	Т3500.36064.007=Система газовихлопу ГД			1,248	13,1
210	Т3500.36064.007=Система газовихлопу ДГ			1,09	11,42
211	Т3500.36064.007=Система димоходу котла			0,56	13,9
212	Т3500.36064.005=Паливна система. Трубопр. прийому, перекачування палива			0,905	13,435
213	Т3500.36064.011=Система вентиляції МО.			0,85	11

№ п/п	Назва елементу статті навантаження	Початок елемента, x_{BEGIN} , м	Кінець елемента, x_{END} , м	Маса елемента M , кг	Абсциса центра ваги x_G , м
214	T3500.36064.006=Система масляна.			0,2	8,2
215	T3500.36064.015=Розташування протипожежного майна та аварійного посту в МКО			0,2	12,215
216	T3500.36064.012=Розташування обладнання в пом АСДГ			2,092	16,3
217	T3500.36064.013=Системи АСДГ			0,063	17
218	T3500.36064.016=Силовий гідроблок лебідок			0,5	12,6
219	Гідроблок муфти роз'єднувальної навісного пожежного насоса ГД №2			0,05	17,81
220	Електроventилятор вдувний двошвидкісний, реверсивний АХВ- AL630-6/20, Q = 25000/12500 м3/год;			0,08	11,05
	Сумарна маса судна, т			588,085	

Нижче у табл. 2.2 представлено розподіл мас за шпаціями, для 1-го РС.

Таблиця 2.2 – Розподіл мас за теоретичними шпаціями вздовж довжини судна для 1-го розрахункового стану

№ теоретичної шпації	Маса, т
1	7,03
2	8,58
3	19,29
4	22,88
5	19,82
6	17,95
7	21,66
8	26,94
9	19,96
10	25,00
11	19,79
12	35,38

№ теоретичної шпациї	Маса, т
13	25,95
14	36,44
15	32,84
16	25,28
17	28,31
18	28,84
19	26,37
20	25,14
21	16,47
22	14,53
23	14,40
24	19,88
25	18,60
26	18,38
27	12,82
Сумарна маса судна, т	588,51

На рисунку нижче представлена ступінчаста діаграма розподілу мас уздовж довжини судна для 1-го РС на основі табл. 2.2.

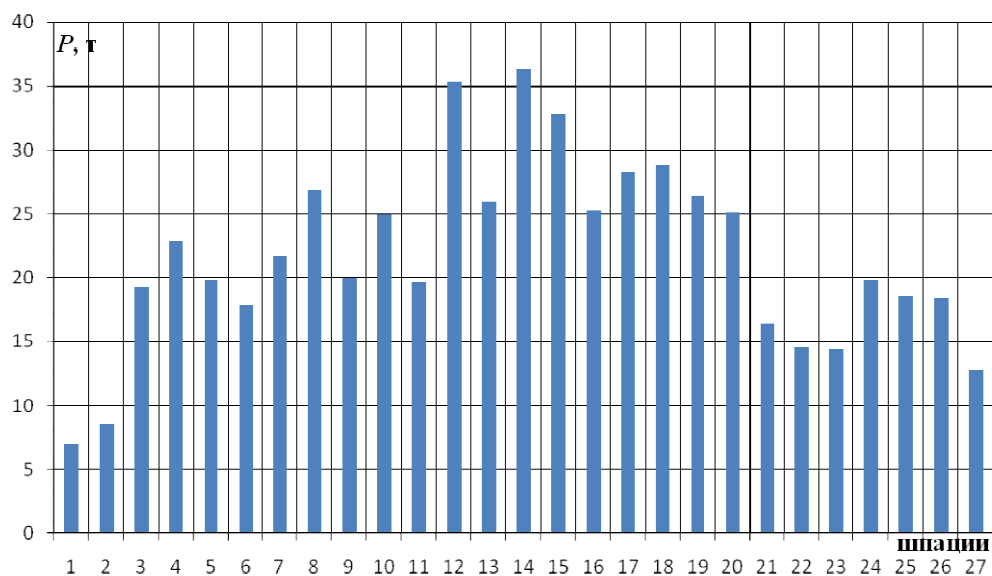


Рис. 2.1 – Розподіл мас по шпациям вздовж довжини судна при повному завантаженні (РС№1), т, основі даних табл. 2.2

Нижче в табл. 2.3 представлено порівняння ЦВ судна, отримані на основі табл. 2.1 і 2.2, використовуючи відомі залежності теоретичної механіки.

Таблиця 2.3 – ЦВ судна отримані різним шляхом

№ п/п	Розрахунковий стан	Дані по табл. 2.1		Дані по табл. 2.2		Різниця, %	
		ЦВ x_G^{elem} , м	Повна маса судна M_{ship}^{elem} , т	ЦТ x_G^{sp} , м	Повна маса судна M_{ship}^{sp} , т	для ЦВ ϵ_x	для повних мас судна ϵ_M
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>
1	РС№1	15,028	588,085	15,021	588,505	0,047	0,071

Примітка. Величини ϵ_x , ϵ_M обчислювались за формулами

$$\epsilon_x = \left| \frac{x_G^{elem} - x_G^{sp}}{x_G^{elem}} \right| 100\%, \quad \epsilon_M = \left| \frac{M_{ship}^{elem} - M_{ship}^{sp}}{M_{ship}^{elem}} \right| 100\%. \quad (21)$$

Як видно за даними, представленими в стовпцях VII та VIII табл. 2.3 повні маси та ЦТ судна, визначені різними шляхами на підставі табл. 2.1 та табл. 2.2, збігаються з високим ступенем точності. Тому приймаємо розподіл мас за шпаціями, поданий у табл. 2.2 для подальших обчислень.

3 ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНИХ ВЕЛИЧИН ТА ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЗАГАЛЬНОЇ ВІБРАЦІЇ КОРПУСУ СУДНА

3.1 Удиферентовка судна та визначення характеристик зануреної частини корпусу судна, необхідні для розрахунку загальної вібрації

Для диференціювання судна необхідне масове навантаження, визначене в п. 2.1, а також можливість зміни площі зануреної частини шпангоута залежно від осадки для всіх шпангоутів, за якими період розрахунок. Для диференціації та розрахунку параметрів підводної частини КС використовується програма, яка на вхід потім координати шпангоутів, абсциси розташування шпангоутів, масові навантаження по шпаціях. Як вже було згадано вище, розрахунок проводився по 28 теоретичних шпангоутах, рівновіддалених один від одного на відстані 1,1 м; теоретичних шпацій відповідно 27. Інформація про кожен шпангоут записана в один рядок. У кожному рядку представлена інформація по окремо взятому шпангоуту. Для кожного окремо взятого рядка (шпангоута) інформація про шпангоут записується наступною послідовністю чисел: $N, x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_i, y_i, \dots, x_n, y_n$, де i – номер точки, що належить обводам даного шпангоута, N – загальна кількість точок, що належать обводам даного шпангоута; координати x, y для кожної точки визначені відносно координатної системи, розташованої на перетині ОП і ДП судна, вісь x – горизонтальна, а вісь y – вертикальна. У цих файлах представлена та описана вся інформація, необхідна для проведення розрахунку загальної вібрації. Далі представлені формули, за якими проводився розрахунок характеристик зануреної частини КС.

Опір рідини при коливаннях враховується у вигляді приєднаних (або віртуальних) мас рідини, що коливається разом з КС, обчислених за [1], [7]. Для вертикальної вібрації приєднані маси залежать від номера тону n коливань, а для горизонтальних – практично не залежать [1, с.149].

Розрахунок приєднаних мас води для кожного шпангоута проводився за формулами, представленими в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Формули для розрахунку приєднаних мас води для кожного шпангоута при вертикальних та горизонтальних коливаннях корпусу судна

№	Найменування розрахункової величини	Розрахункова формула
1	Осадка шпангоута, м	d
2	Ширина шпангоута повна, м	b
3	Коефіцієнт повноти шпангоута	β
4	Густина води, кг/м ³	$\rho = 1025$
5	Коефіцієнт	$\lambda = \frac{2d}{b}$
6	Коефіцієнт	$\alpha = 1,5(1 + \lambda) - 0,5\sqrt{1 + 10\lambda + \lambda^2} - \frac{32\lambda\beta}{\pi}$
7	Поправковий коефіцієнт, що враховує відхилення реальної форми поперечного перерізу судна від еліпса, <i>при вертикальних</i> коливаннях	$c_b = (\lambda - \alpha)(\lambda - \alpha + 1) + 1$
8	Приєднана маса на одиницю довжини судна при плоскому обтіканні <i>для вертикальних</i> коливань, кг/м	$\mu_b^* = \frac{\pi}{2}\rho\left(\frac{b}{2}\right)^2 c_b$
9	Номер тону головних вільних коливань (ГСК)	$n = 1, 2, \dots, 4$
10	Коефіцієнт, що враховує тривимірні ефекти перетікання води вздовж корпусу судна, залежний від номера тону n , <i>для вертикальних</i> коливань	k_b^n по табл. 5.1, с.149 [1]
11	Погонна приєднана маса, залежна від номера тону n , <i>при вертикальних</i> коливаннях з урахуванням усіх поправкових коефіцієнтів, кг/м	$\mu_b^n = \mu_b^* k_b^n$
12	Поправковий коефіцієнт, що враховує відхилення реальної форми поперечного перерізу судна від еліпса, <i>при горизонтальних</i> коливаннях	$c_r = \frac{4}{\pi^2} \left[1 + \frac{4}{3\lambda^2} (\lambda - \alpha + 1)^2 \right]$
13	Приєднана маса на одиницю довжини судна при плоскому обтіканні <i>для горизонтальних</i> коливань, кг/м	$\mu_r^* = \frac{\pi}{2}\rho d^2 c_r$
14	Коефіцієнт, що враховує тривимірні ефекти перетікання води вздовж корпусу судна, який не залежить від номера тону n , <i>для горизонтальних</i> коливань	k_r по табл. 5.2, с.149 [1]
15	Погонна приєднана маса, яка не залежить від номера	$\mu_r = \mu_r^* k_r$

№	Найменування розрахункової величини	Розрахункова формула
	тону n , при горизонтальних коливаннях з урахуванням усіх поправкових коефіцієнтів, кг/м	

Примітка. Для апроксимації даних табл. 5.1, с.149 [1], при обчисленні $k_{\text{в}}^n$ використовувалась квадратична поверхність $k_{\text{в}}^n = f_{\text{в}}^n(L/B, T/B)$, $j = 1, 2, \dots, 12$ для кожного n -го тону. Найбільше відхилення табличних даних від аналітичних, обчислених по $f_{\text{в}}^n$ в вузлових точках не перебільшує 1,4%. Для апроксимації значень даних табл. 5.2, с.149 [1], при обчисленні $k_{\text{г}}$ використовувалась параболічна функція $k_{\text{г}} = f_{\text{г}}(L/B)$. Найбільше відхилення табличних даних від аналітичних, обчислених по $f_{\text{г}}$ в вузлових точках не перебільшує 0,1%. Нижче в табл. 3.2 наведені аналітичний вирази $k_{\text{в}}^n(L/B, T/B)$.

Таблиця 3.2 – Апроксимовані вирази для поправкових коефіцієнтів $k_{\text{в}}^n$ вертикальних коливань

№ тону	Аналітичні вирази для поправкових коефіцієнтів $k_{\text{в}}^n$ для вертикальної вібрації на основі табл. 5.1, с.149 [1]
1	$0,002 \cdot (L/B)^2 + 0,01364404812122505 \cdot (L/B) \cdot (T/B) - 0,02110809965422478 \cdot (T/B)^2 + 0,004159562605673709 \cdot (L/B) - 0,1961943899615848 \cdot (T/B) + 0,6124829599294631$

Приєднані маси води при вертикальних коливаннях співмірні з масою судна [5], а при горизонтальних коливаннях внаслідок особливості форми КС становлять $\approx 25\%$ маси судна [1].

Масове навантаження КС по шпаціях потрібно перерахувати в масове навантаження по шпангоутах. Це потрібно для розрахунку сумарних мас. Перерахунок масового навантаження КС з навантаження по шпаціях до навантаження по шпангоутах здійснюється за формулами

$$\left. \begin{aligned} m_1^f &= \frac{P_1}{2s}, \quad m_i^f = \frac{P_{i-1} + P_i}{2s}, \quad i = 2, 3, \dots, M \\ m_N^f &= \frac{P_M}{2s}, \quad N = M + 1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

де m_i^f – розподілена маса вагового навантаження КС, що припадає на i -й шпангоут, кг/м;

P_i – маса, що припадає на i -ю шпацию, кг;

$N = 28$ – кількість теоретичних шпангоутів;

$M = 27$ – кількість теоретичних шпаций;

$s = 1,1$ м – розмір теоретичної шпациї.

Сумарна маса $m_{\Sigma i}$, кг/м, що припадає на i -й довільний шпангоут обчислюється за формулою

$$m_{\Sigma i} = m_i^f + \mu_i, \quad (23)$$

де μ_i – приєднана маса води, як для вертикальних так і для горизонтальних коливань, обчислена по формулам табл. 3.1.

Для зменшення трудомісткості розрахунку загальної вібрації та забезпечення більшої прозорості й чіткості його, масив погонних мас КС від вагового навантаження m_i^f і масив сумарних мас $m_{\Sigma i}$ (23) були представлені рядами Фур'є по косинусам-синусам по системі лінійних функцій між точками даних. Для забезпечення достатньої точності апроксимації було взято 15 членів ряду Фур'є.

Вираз рядів Фур'є представлені в табл. 3.3 для РС№1. В табл. 3.3 для виразу ряду Фур'є введені наступні позначення: $h_p = 14,85$ півперіод, $p_i = \pi = 3,14 \dots$ – число пі, x відраховується від 0-го шпангоута корми.

Таблиця 3.3 – Вирази ряду Фур'є

№	Пояснення	Вираз рядів Фур'є
1	Розподілені маси вагового навантаження по шпангоутам $m^f(x)$, кг/м	$\text{shipHullDistributedMass_fourierCosSin_15} := (x) \rightarrow 1,965e+04 -$ $7626 * \cos(1 * p_i * x / h_p) + 123,7 * \sin(1 * p_i * x / h_p) + 170,6 * \cos(2 * p_i * x / h_p) + 903,9 * \sin(2 * p_i * x / h_p) -$ $1579 * \cos(3 * p_i * x / h_p) - 1098 * \sin(3 * p_i * x / h_p) - 983,2 * \cos(4 * p_i * x / h_p) -$ $1693 * \sin(4 * p_i * x / h_p) - 2369 * \cos(5 * p_i * x / h_p) - 165,8 * \sin(5 * p_i * x / h_p) -$ $551,4 * \cos(6 * p_i * x / h_p) - 663,2 * \sin(6 * p_i * x / h_p) + 19,45 * \cos(7 * p_i * x / h_p) -$ $730 * \sin(7 * p_i * x / h_p) + 70,94 * \cos(8 * p_i * x / h_p) + 86,36 * \sin(8 * p_i * x / h_p) -$ $284,6 * \cos(9 * p_i * x / h_p) - 376,4 * \sin(9 * p_i * x / h_p) -$ $217,7 * \cos(10 * p_i * x / h_p) + 169 * \sin(10 * p_i * x / h_p) - 167,7 * \cos(11 * p_i * x / h_p) -$ $306,4 * \sin(11 * p_i * x / h_p) - 127,4 * \cos(12 * p_i * x / h_p) + 57,02 * \sin(12 * p_i * x / h_p) -$

№	Пояснення	Вираз рядів Фур'є
		$191,4 \cdot \cos(13 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 64,56 \cdot \sin(13 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 165,1 \cdot \cos(14 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $59,83 \cdot \sin(14 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 81,51 \cdot \cos(15 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 137,1 \cdot \sin(15 \cdot \pi \cdot x / h_p)$
2	Сумарні маси $m_{\Sigma}(x)$, кг/м, для згинальних коливань у вертикальній площині для 1-го тону	$\text{totalMassVertical_tone_1_fourierCosSin_15} := (x) \rightarrow 3,921e+04 -$ $1,944e+04 \cdot \cos(1 \cdot \pi \cdot x / h_p) + 4129 \cdot \sin(1 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $3206 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot x / h_p) + 3776 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 3347 \cdot \cos(3 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $393,5 \cdot \sin(3 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 2219 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 1590 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $3136 \cdot \cos(5 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 316,5 \cdot \sin(5 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 997,2 \cdot \cos(6 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $909,9 \cdot \sin(6 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 198,5 \cdot \cos(7 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 1005 \cdot \sin(7 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $13,41 \cdot \cos(8 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 168,6 \cdot \sin(8 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 278,1 \cdot \cos(9 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $582,6 \cdot \sin(9 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 159,5 \cdot \cos(10 \cdot \pi \cdot x / h_p) + 15,79 \cdot \sin(10 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $79,52 \cdot \cos(11 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 410,1 \cdot \sin(11 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 27,97 \cdot \cos(12 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $0,7158 \cdot \sin(12 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 96,48 \cdot \cos(13 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 82,65 \cdot \sin(13 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $83,19 \cdot \cos(14 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 44,23 \cdot \sin(14 \cdot \pi \cdot x / h_p) - 17,9 \cdot \cos(15 \cdot \pi \cdot x / h_p) -$ $100,2 \cdot \sin(15 \cdot \pi \cdot x / h_p)$

Повна маса судна обчислена, обчислена з використанням розподіленого навантаження по шпангоутам $m_i^f(x)$, яке у свою чергу апроксимоване рядом Фур'є табл. 3.3 становить

$$M_{ship} = \int_0^L m_i^f(x) dx = \int_0^L \text{shipHullDistributedMass_fourierCosSin_15}(x) dx = 5,83605 \cdot 10^5 \text{ кг},$$

яка відрізняється від дійсної маси судна із табл. 2.3 на 0,8%.

Абсциса ЦВ обчислений з використанням апроксимації рядом Фур'є розподіленого навантаження

$$x_G = \frac{\int_0^L m_i^f(x) x dx}{M_{ship}} = \frac{\int_0^L \text{shipHullDistributedMass_fourierCosSin_15}(x) x dx}{M_{ship}} = 14,9744 \text{ м},$$

яка відрізняється від дійсної абсциси ЦВ із табл. 2.3 на 0,4%.

Вище наведені обчислення маси судна і абсциси ЦВ за рядом Фур'є, який апроксимує дискретний розподіл маси судна вздовж його довжини, показують, що згаданий ряд Фур'є чудово апроксимує розподілену масу судна і може бути використаний для подальших обчислень.

На рис. 3.1 показані графіки апроксимацій розподілених мас по шпангоутам, таких як вагове навантаження $m^f(x)$ та сумарних розподілених мас $m_\Sigma(x)$.

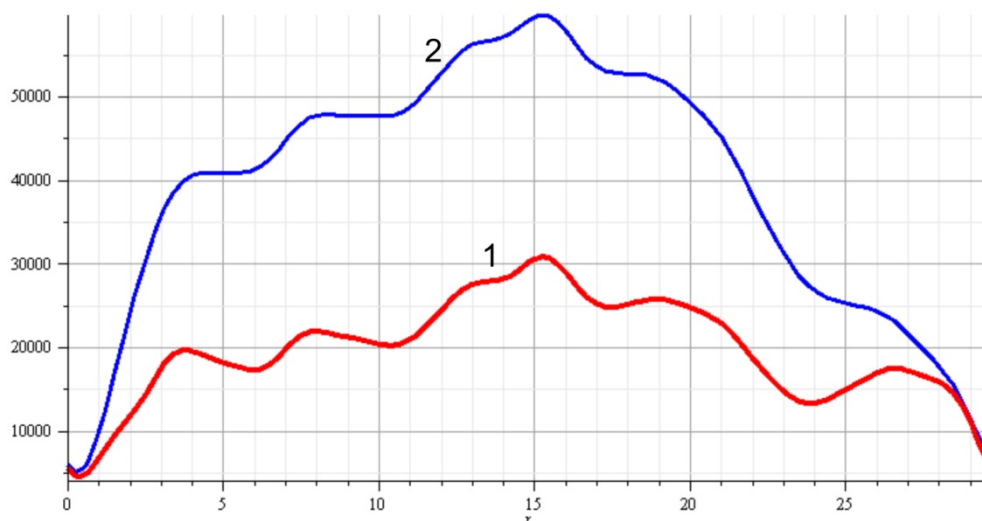


Рис. 3.1 – Розподілені масові навантаження, перераховані по шпангоутам, які апроксимовані рядами Фур'є з табл. 3.3: 1 – вагове навантаження $m^f(x)$; 2 – сумарні розподілені маси $m_\Sigma(x)$

3.2 Визначення геометричних характеристик поперечних перерізів корпусу судна та їх апроксимація

Для розрахунку загальної вібрації необхідно знати закони основних центральних моментів інерції та площі поперечних перерізів по довжині судна. Для цього було обчислено геометричні характеристики кількох поперечних перерізів, які потім апроксимовані рядами Фур'є по системах лінійних функцій між точками (значеннями).

У табл. 3.4÷3.7 представлені обчислення геометричних характеристик кількох поперечних перерізів еквівалентного бруса (ЕБ), а саме 7-го, 23-го, 34-го, 47-го шпангоутів, схеми яких показані на рисунках 3.2÷3.5 нижче (кожен шпангоут у своєму масштабі). Плавні криві обводи замінили ламаними прямими лініями, які вважаються прямокутниками. На рис. 3.2÷3.5 у дужках вказані точки: ламаних, прикріплення зварних таврів, монтажних стиків, центрів кіл.

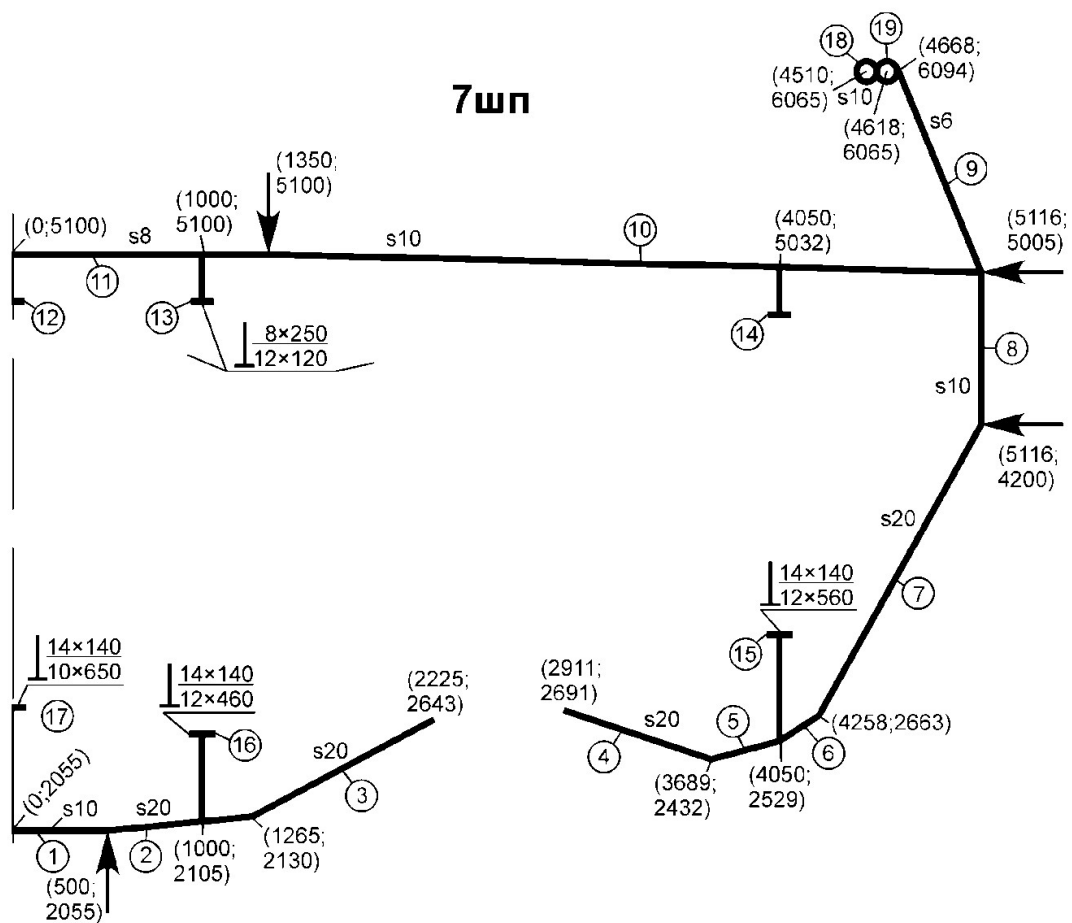


Рис. 3.2 – Схема 7-го шпангоута ЕБ

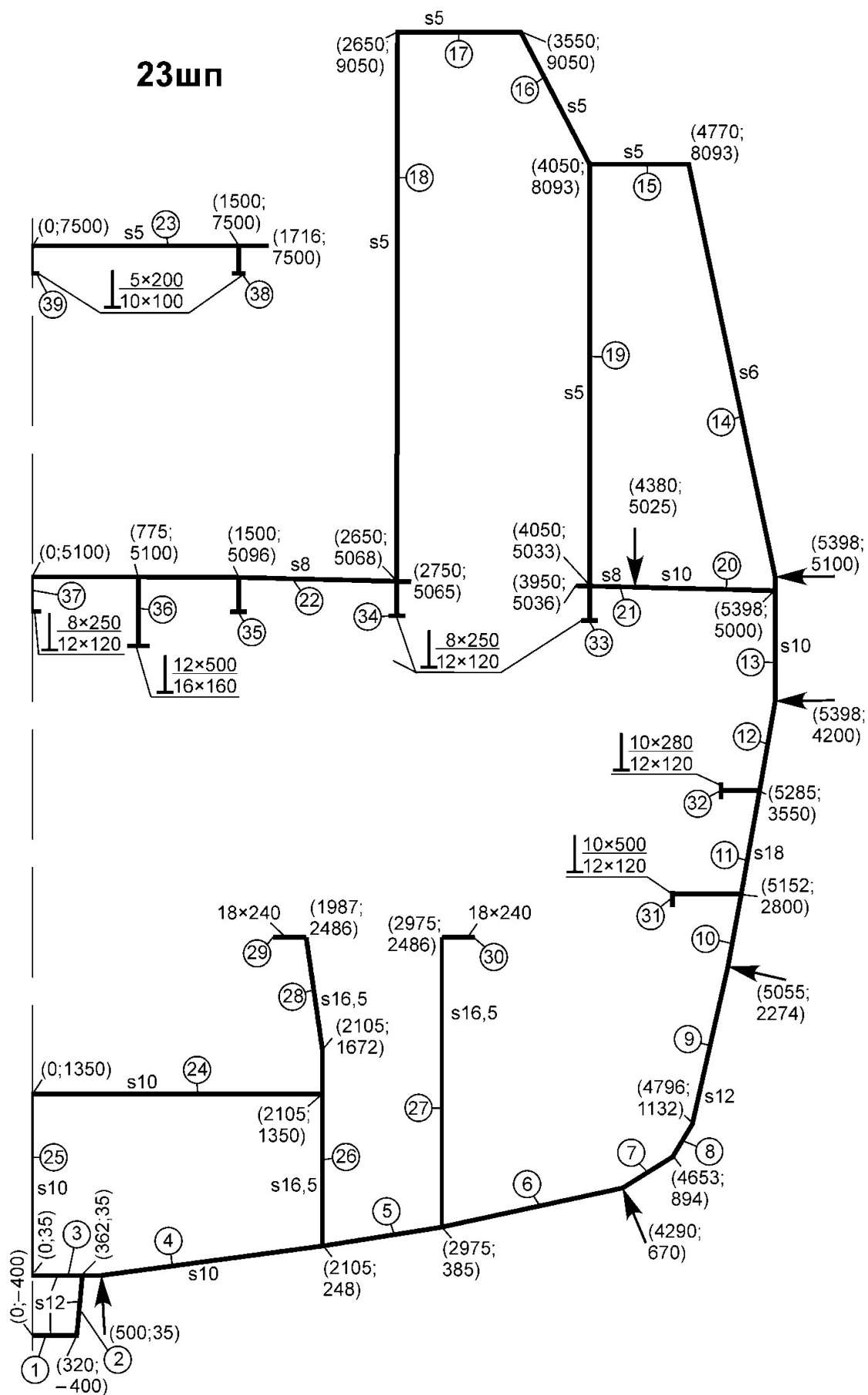


Рис. 3.3 – Схема 23-го шпангоута ЕБ

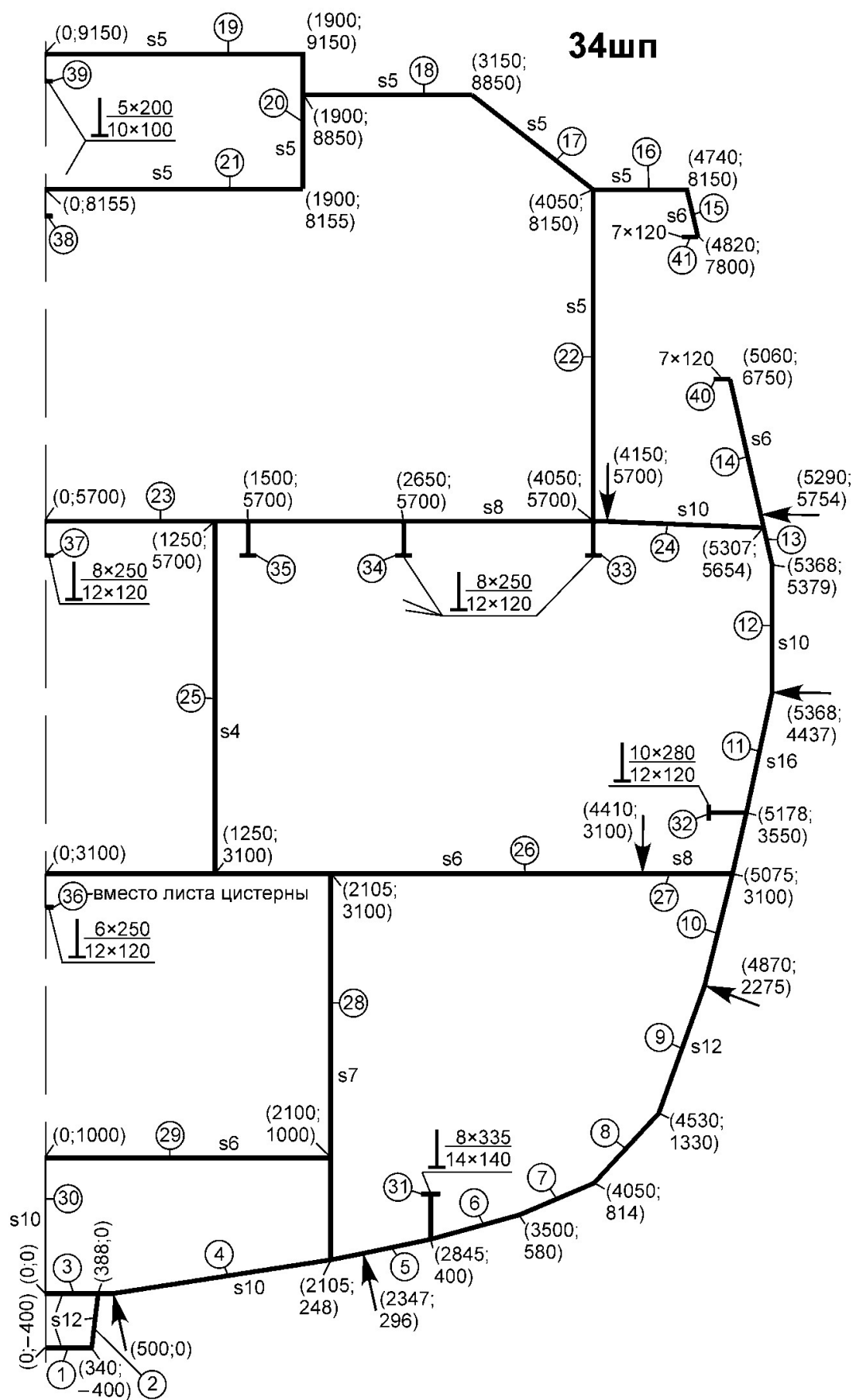


Рис. 3.4 – Схема 34-го шпангоута ЕБ

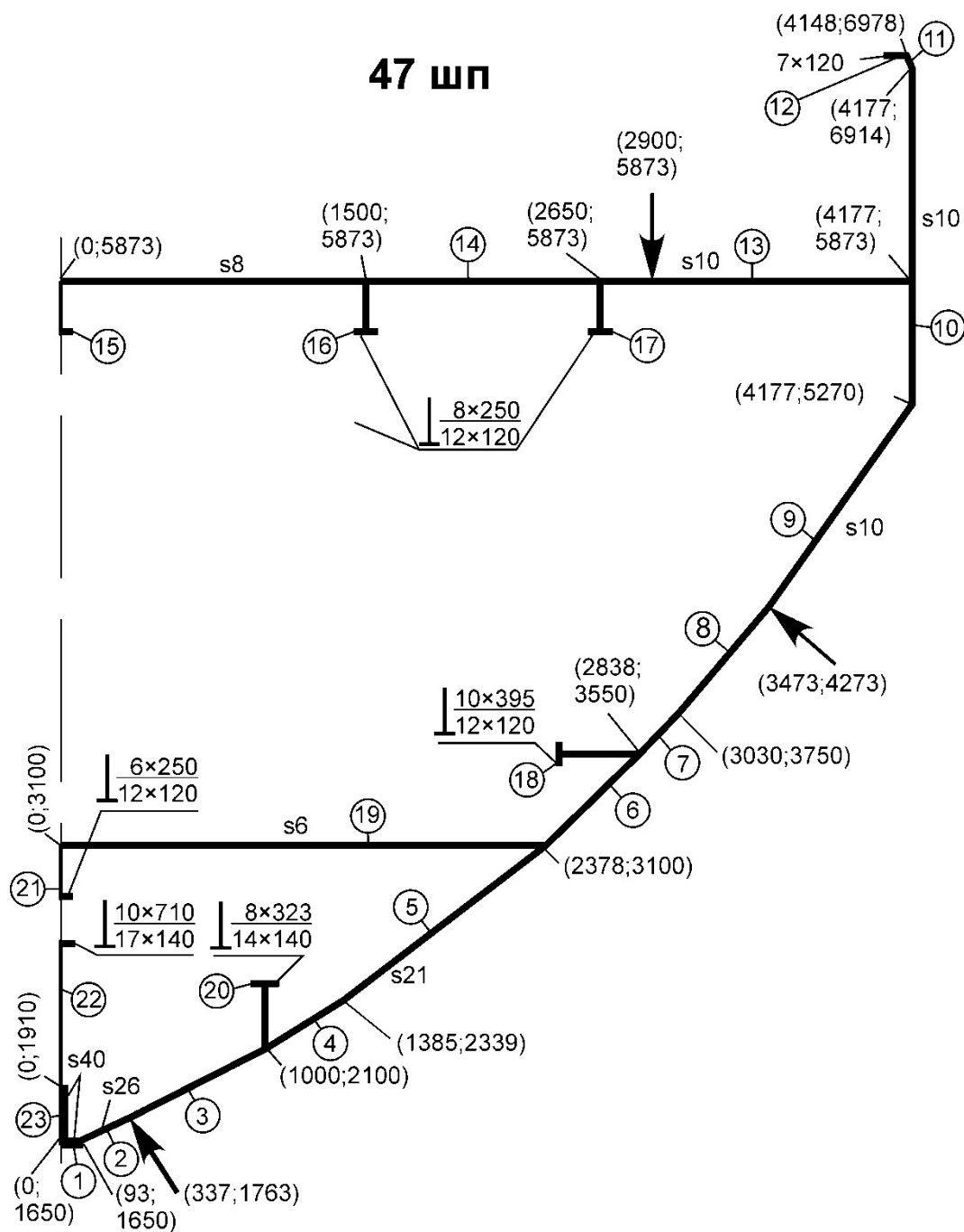


Рис. 3.5 – Схема 47-го шпангоута ЕБ

Далі у табл. 3.4÷3.7 представлені розрахунки геометричних характеристик поперечних перерізів шпангоутів 7-го, 23-го, 34-го, 47-го. Обчислення сумарних характеристик всього перерізу представлених наприкінці таблиці проводилися за відомими формулами курсу опору матеріалів з урахуванням симетрії перерізу щодо вертикальної осі.

Таблиця 3.4 – Розрахунок геометричних характеристик перерізу 7 шпангоута

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3		Перен. мом. ін. $I_x^{tr} = y^2F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>		<i>IX</i>	<i>X</i>
1	5,0000E-03	0,2500	2,0500	1,0250E-02		2,1012E-02	4,1667E-08
2	1,5373E-02	0,8835	2,0825	3,2016E-02		6,6674E-02	7,7138E-06
3	2,1769E-02	1,7497	2,3777	5,1761E-02		1,2307E-01	4,7798E-04
4	1,6400E-02	3,2968	2,5520	4,1852E-02		1,0681E-01	9,2167E-05
5	7,4761E-03	3,8721	2,4708	1,8472E-02		4,5642E-02	6,0943E-06
6	4,9485E-03	4,1594	2,5876	1,2805E-02		3,3134E-02	7,5212E-06
7	3,5205E-02	4,6957	3,4266	1,2064E-01		4,1337E-01	6,9309E-03
8	1,6100E-02	5,1260	4,6025	7,4100E-02		3,4105E-01	8,6943E-04
9	7,0653E-03	4,8948	5,5506	3,9217E-02		2,1768E-01	6,9824E-04
10	3,7672E-02	3,2331	5,0575	1,9053E-01		9,6358E-01	2,8646E-05
11	1,0800E-02	0,6750	5,1040	5,5123E-02		2,8135E-01	5,7600E-08
12	1,7200E-03	0,0137	4,9202	8,4627E-03		4,1638E-02	1,2401E-05
13	3,4400E-03	1,0000	4,9202	1,6925E-02		8,3276E-02	2,4801E-05
14	3,4400E-03	4,0500	4,8522	1,6691E-02		8,0990E-02	2,4801E-05
15	8,6800E-03	4,0500	2,8738	2,4945E-02		7,1686E-02	3,0064E-04
16	7,4800E-03	1,0000	2,3971	1,7930E-02		4,2981E-02	1,7861E-04
17	4,2300E-03	0,0100	2,4569	1,0393E-02		2,5534E-02	1,9744E-04
18	3,0767E-03	4,5100	6,0650	1,8660E-02		1,1318E-01	3,7296E-06
19	3,0767E-03	4,6180	6,0650	1,8660E-02		1,1318E-01	3,7296E-06
Σ	$\Sigma_1 = 0,21295$			$\Sigma_3 = 0,77943$		$\Sigma_5 = 3,19569$	
Геометричні характеристики всього перерізу							
Площа $F, \text{м}^2$		Абсциса ЦМ , $x_C, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y_C, \text{м}$	Головний центральний момент інерції $I_u = I_x^{cen}, \text{м}^4$			
0,425906		0	3,660080	0,685864			

Таблица 3.5 – Розрахунок геометричних характеристик перерізу 23 шпангоута

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3		Перен. мом. ін. $I_x^{tr} = y^2F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>		<i>IX</i>	<i>X</i>
1	3,8400E-03	0,1600	-0,4000	-1,5360E-03		6,1440E-04	4,6080E-08
2	5,2443E-03	0,3410	-0,1825	-9,5708E-04		1,7467E-04	8,2696E-05
3	6,0000E-03	0,2500	0,0290	1,7400E-04		5,0460E-06	7,2000E-08
4	1,6191E-02	1,3032	0,1365	2,2107E-03		3,0186E-04	6,1346E-05
5	8,8072E-03	2,5408	0,3116	2,7440E-03		8,5492E-04	1,3847E-05
6	1,3455E-02	3,6336	0,5226	7,0319E-03		3,6750E-03	9,1183E-05
7	5,1186E-03	4,4747	0,7769	3,9766E-03		3,0894E-03	2,1447E-05
8	3,3319E-03	4,7296	1,0099	3,3649E-03		3,3982E-03	1,5738E-05
9	1,4052E-02	4,9314	1,7017	2,3912E-02		4,0690E-02	1,5272E-03
10	9,6276E-03	5,1124	2,5354	2,4410E-02		6,1887E-02	2,2199E-04
11	1,3711E-02	5,2274	3,1734	4,3510E-02		1,3807E-01	6,4270E-04
12	1,1875E-02	5,3504	3,8735	4,5999E-02		1,7818E-01	4,1813E-04
13	9,0000E-03	5,4030	4,6500	4,1850E-02		1,9460E-01	6,0750E-04
14	1,8349E-02	5,0869	6,5971	1,2105E-01		7,9859E-01	1,3698E-02
15	3,6000E-03	4,4100	8,0955	2,9144E-02		2,3593E-01	7,5001E-09
16	5,3987E-03	3,8022	8,5727	4,6281E-02		3,9675E-01	4,1204E-04
17	4,5000E-03	3,1000	9,0525	4,0736E-02		3,6876E-01	9,3752E-09
18	1,9931E-02	2,7000	7,0575	1,4066E-01		9,9274E-01	2,6376E-02
19	1,5300E-02	4,0500	6,5630	1,0041E-01		6,5902E-01	1,1939E-02
20	1,0183E-02	4,8891	5,0175	5,1094E-02		2,5636E-01	6,1518E-07
21	3,4411E-03	4,1651	5,0345	1,7324E-02		8,7219E-02	5,3039E-08
22	2,2002E-02	1,3751	5,0865	1,1191E-01		5,6924E-01	2,3633E-06
23	8,5800E-03	0,8580	7,5025	6,4371E-02		4,8295E-01	1,7875E-08
24	2,1050E-02	1,0525	1,3550	2,8523E-02		3,8648E-02	1,7542E-07
25	6,5750E-03	0,0025	0,6925	4,5532E-03		3,1531E-03	9,4747E-04
26	2,3496E-02	2,1133	0,9600	2,2556E-02		2,1654E-02	3,9704E-03
27	3,4667E-02	2,9833	1,4355	4,9764E-02		7,1436E-02	1,2752E-02

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3	Перен. мом. ін. $I_x^{tr} = y^2 F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>
28	1,3571E-02	2,0542	2,0802	2,8231E-02	5,8726E-02	7,4937E-04
29	4,3200E-03	1,8670	2,4950	1,0778E-02	2,6892E-02	1,1664E-07
30	4,3200E-03	3,0950	2,4950	1,0778E-02	2,6892E-02	1,1664E-07
31	6,4400E-03	4,8448	2,7922	1,7982E-02	5,0208E-02	3,1392E-06
32	4,2400E-03	5,0954	3,5500	1,5052E-02	5,3435E-02	1,7513E-06
33	3,4400E-03	4,0500	4,8532	1,6695E-02	8,1023E-02	2,4801E-05
34	3,4400E-03	2,6500	4,8882	1,6815E-02	8,2196E-02	2,4801E-05
35	3,4400E-03	1,5000	4,9162	1,6912E-02	8,3140E-02	2,4801E-05
36	8,5600E-03	0,7750	4,7728	4,0856E-02	1,9500E-01	2,4450E-04
37	1,7200E-03	0,0137	4,9202	8,4627E-03	4,1638E-02	1,2401E-05
38	2,0000E-03	1,5000	7,3475	1,4695E-02	1,0797E-01	8,8542E-06
39	1,0000E-03	0,0131	7,3475	7,3475E-03	5,3986E-02	4,4271E-06
Σ	$\Sigma_1 = 0,37382$			$\Sigma_3 = 1,22968$	$\Sigma_5 = 6,54401$	
Геометричні характеристики всього перерізу						
Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x_C, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y_C, \text{м}$	Головний центральний момент інерції $I_u = I_x^{cen}, \text{м}^4$			
0,747635	0	3,289523	4,997881			

Таблиця 3.6 – Розрахунок геометричних характеристик перерізу 34 шпангоута

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3	Перен. мом. ін. $I_x^{tr} = y^2 F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>
1	4,0800E-03	0,1700	-0,4060	-1,6565E-03	6,7253E-04	4,8960E-08
2	4,8344E-03	0,3700	-0,2007	-9,7034E-04	1,9476E-04	6,4460E-05
3	6,0000E-03	0,2500	-0,0060	-3,6000E-05	2,1600E-07	7,2000E-08
4	1,8706E-02	1,4243	0,1431	2,6761E-03	3,8285E-04	1,3673E-04

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3	Перен. мом. ін. $I_x^p = y^2 F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>
5	6,1049E-03	2,5972	0,3421	2,0887E-03	7,1459E-04	5,5728E-06
6	8,1514E-03	3,1741	0,4842	3,9470E-03	1,9112E-03	2,2100E-05
7	7,1725E-03	3,7773	0,6915	4,9596E-03	3,4295E-03	3,2801E-05
8	8,4569E-03	4,2944	1,0679	9,0312E-03	9,6445E-03	1,8769E-04
9	1,2052E-02	4,7056	1,8005	2,1699E-02	3,9068E-02	8,9688E-04
10	2,0987E-02	5,0318	2,9106	6,1085E-02	1,7779E-01	2,8431E-03
11	1,4514E-02	5,2808	3,9918	5,7937E-02	2,3127E-01	9,5161E-04
12	9,4300E-03	5,3730	4,9085	4,6287E-02	2,2720E-01	6,9880E-04
13	3,8205E-03	5,3339	5,5680	2,1272E-02	1,1845E-01	4,4534E-05
14	6,1333E-03	5,1779	6,2527	3,8349E-02	2,3979E-01	5,0703E-04
15	2,1542E-03	4,7829	7,9757	1,7181E-02	1,3703E-01	2,1991E-05
16	3,4500E-03	4,3950	8,1525	2,8126E-02	2,2930E-01	7,1871E-09
17	5,7009E-03	3,6015	8,5020	4,8469E-02	4,1208E-01	2,3279E-04
18	6,2500E-03	2,5250	8,8525	5,5328E-02	4,8979E-01	1,3021E-08
19	9,5000E-03	0,9500	9,1525	8,6949E-02	7,9580E-01	1,9791E-08
20	4,9750E-03	1,9025	8,6525	4,3046E-02	3,7246E-01	4,1045E-04
21	9,5000E-03	0,9500	8,1575	7,7496E-02	6,3218E-01	1,9792E-08
22	1,2250E-02	4,0500	6,9250	8,4831E-02	5,8746E-01	6,1276E-03
23	3,3200E-02	2,0750	5,7040	1,8937E-01	1,0802E+00	1,7707E-07
24	1,1579E-02	4,7287	5,6820	6,5793E-02	3,7383E-01	2,1381E-06
25	1,0400E-02	1,2520	4,4000	4,5760E-02	2,0134E-01	5,8587E-03
26	2,6460E-02	2,2050	3,1030	8,2105E-02	2,5477E-01	7,9380E-08
27	5,3200E-03	4,7425	3,1040	1,6513E-02	5,1257E-02	2,8373E-08
28	1,9964E-02	2,1085	1,6740	3,3420E-02	5,5945E-02	1,3532E-02
29	1,2600E-02	1,0500	1,0030	1,2638E-02	1,2676E-02	3,7800E-08
30	5,0000E-03	0,0025	0,5000	2,5000E-03	1,2500E-03	4,1667E-04
31	4,6400E-03	2,8450	0,6412	2,9752E-03	1,9077E-03	5,9567E-05
32	4,2400E-03	4,9884	3,5500	1,5052E-02	5,3435E-02	1,7513E-06
33	3,4400E-03	4,0500	5,5202	1,8989E-02	1,0482E-01	2,4801E-05

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3	Перен. мом. ін. $I_x^p = y^2 F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>
34	3,4400E-03	2,6500	5,5202	1,8989E-02	1,0482E-01	2,4801E-05
35	3,4400E-03	1,5000	5,5202	1,8989E-02	1,0482E-01	2,4801E-05
36	1,4700E-03	0,0155	2,9108	4,2789E-03	1,2455E-02	1,0219E-05
37	1,7200E-03	0,0137	5,5202	9,4947E-03	5,2412E-02	1,2401E-05
38	1,0000E-03	0,0131	8,0025	8,0025E-03	6,4040E-02	4,4271E-06
39	1,0000E-03	0,0131	8,9975	8,9975E-03	8,0955E-02	4,4271E-06
Σ	$\Sigma_1 = 0,33314$			$\Sigma_3 = 1,26197$	$\Sigma_5 = 7,35070$	
Геометричні характеристики всього перерізу						
Площа $F, \text{м}^2$		Абсциса ЦМ , $x_C, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y_C, \text{м}$	Головний центральний момент інерції $I_u = I_x^{cen}, \text{м}^4$		
0,666270		0	3,788150	5,140377		

Таблиця 3.7 – Розрахунок геометричних характеристик перерізу 47 шпангоута

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3	Перен. мом. ін. $I_x^p = y^2 F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>
1	3,7200E-03	0,0465	1,6300	6,0636E-03	9,8837E-03	4,9600E-07
2	6,9913E-03	0,2205	1,6947	1,1848E-02	2,0079E-02	7,7636E-06
3	1,5618E-02	0,6733	1,9221	3,0021E-02	5,7704E-02	1,4827E-04
4	9,5162E-03	1,1980	2,2106	2,1036E-02	4,6502E-02	4,5550E-05
5	2,6272E-02	1,8879	2,7112	7,1229E-02	1,9311E-01	1,2685E-03
6	1,3514E-02	2,6153	3,3175	4,4831E-02	1,4873E-01	2,2830E-04
7	5,8221E-03	2,9416	3,6427	2,1208E-02	7,7256E-02	1,9510E-05
8	1,4393E-02	3,2595	4,0047	5,7642E-02	2,3084E-01	3,2831E-04
9	1,2205E-02	3,8291	4,7686	5,8201E-02	2,7754E-01	1,0110E-03
10	1,6440E-02	4,1820	6,0920	1,0015E-01	6,1013E-01	3,7027E-03

№ в'язі	Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y, \text{м}$	Статич. момент $S_x = yF,$ м^3	Перен. мом. ін. $I_x'' = y^2 F,$ м^4	Власний. мом. ін. $i_x, \text{м}^4$
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>
11	7,0264E-04	4,1671	6,9481	4,8820E-03	3,3920E-02	2,4083E-07
12	8,4000E-04	4,0880	6,9815	5,8645E-03	4,0943E-02	3,4300E-09
13	1,2770E-02	3,5385	5,8780	7,5062E-02	4,4121E-01	1,0642E-07
14	2,3200E-02	1,4500	5,8770	1,3635E-01	8,0131E-01	1,2373E-07
15	1,7200E-03	0,0137	5,6932	9,7922E-03	5,5749E-02	1,2401E-05
16	3,4400E-03	1,5000	5,6932	1,9584E-02	1,1150E-01	2,4801E-05
17	3,4400E-03	2,6500	5,6932	1,9584E-02	1,1150E-01	2,4801E-05
18	5,3900E-03	2,5861	3,5500	1,9135E-02	6,7927E-02	1,7609E-06
19	1,4268E-02	1,1890	3,1030	4,4274E-02	1,3738E-01	4,2804E-08
20	4,5440E-03	1,0000	2,3342	1,0607E-02	2,4758E-02	5,4143E-05
21	1,4700E-03	0,0155	2,9108	4,2789E-03	1,2455E-02	1,0219E-05
22	4,7400E-03	0,0107	2,3563	1,1169E-02	2,6316E-02	2,6692E-04
23	5,2000E-03	0,0100	1,7800	9,2560E-03	1,6476E-02	2,9293E-05
Σ	$\Sigma_1 = 0,20622$			$\Sigma_3 = 0,79207$	$\Sigma_5 = 3,56040$	
Геометричні характеристики всього перерізу						
Площа $F, \text{м}^2$	Абсциса ЦМ , $x_C, \text{м}$	Ордината ЦМ , $y_C, \text{м}$	Головний центральний момент інерції $I_u = I_x^{cen}, \text{м}^4$			
0,412434	0	3,840937	1,036244			

Виходячи з креслень судна, приймаємо поперечні перерізи: 23÷27 по 23шп., 27÷40 по 34шп. Ухвалені значення геометричних характеристик поперечних перерізів по шпангоутах представлені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Геометричні характеристики поперечних перерізів реальних шпангоутів

№ шп.	Абсциса $x, \text{м}$	Площа $F, \text{м}^2$	Головний центральний момент інерції $I_u = I_x^{cen}, \text{м}^4$
0	0	0	0

№ шп.	Абсциса x , м	Площа F , м ²	Головний центральний момент інерції $I_u = I_x^{cen}$, м ⁴
7	3,85	0,425906	0,685864
23	12,65	0,747635	4,997881
27	14,85	0,747635	4,997881
40	22	0,666270	5,140377
47	25,85	0,412434	1,036244
54	29,7	0	0

Нижче на рис. 3.6, 3.7 показані закони розподілу геометричних характеристик по довжині судна з шматково-лінійної апроксимації

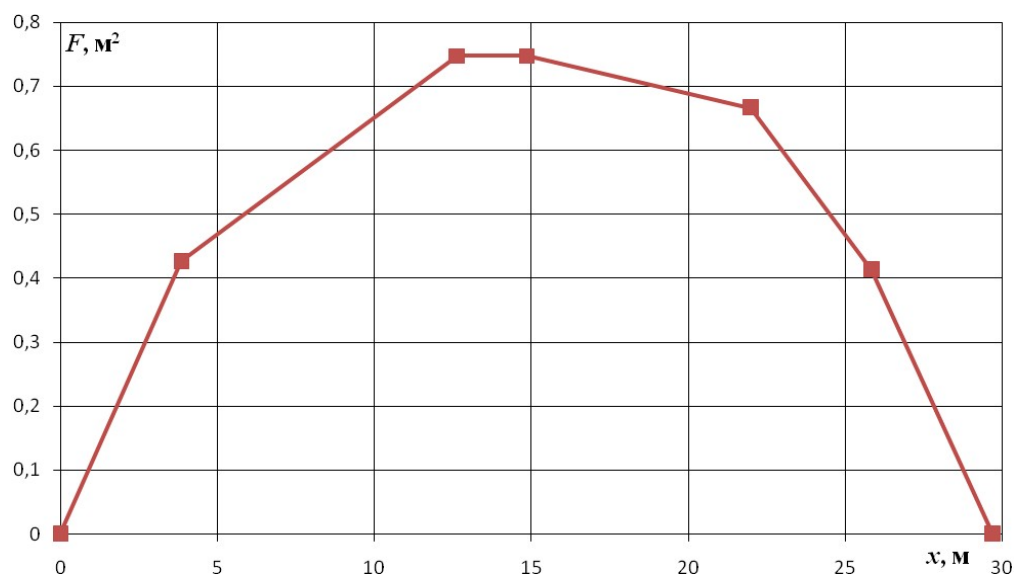


Рис. 3.6 – Закон розподілу площі поперечних перерізів F за довжиною судна

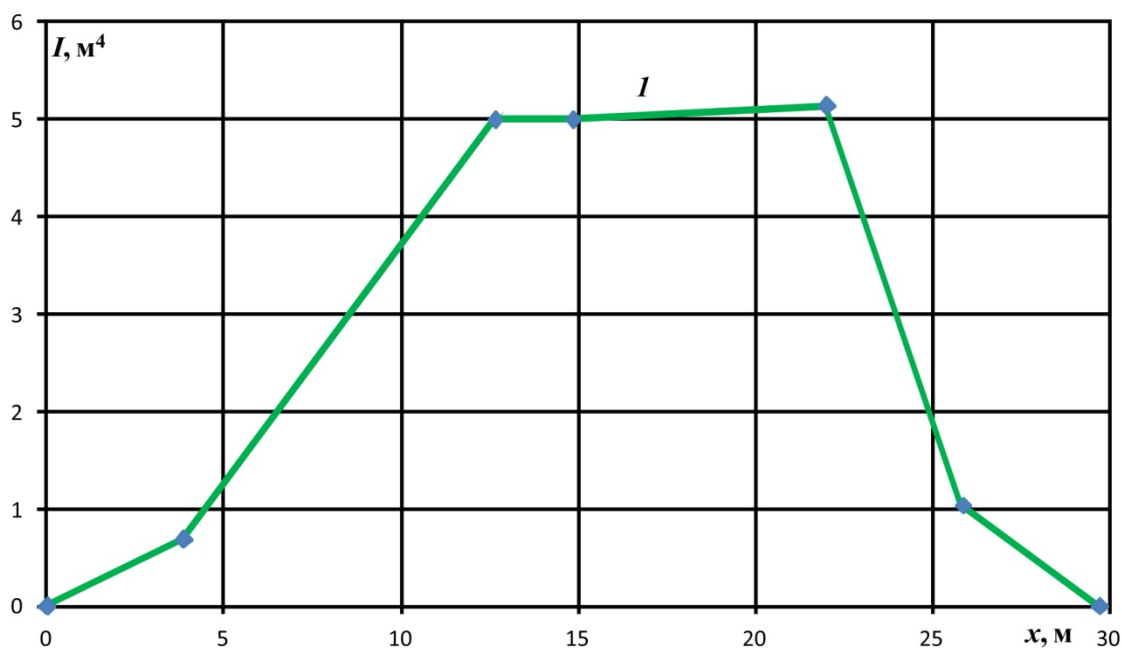


Рисунок 3.7 – Закон розподілу моментів інерції I поперечних перерізів по довжині судна: I – для $I_u = I_z^{cen}$

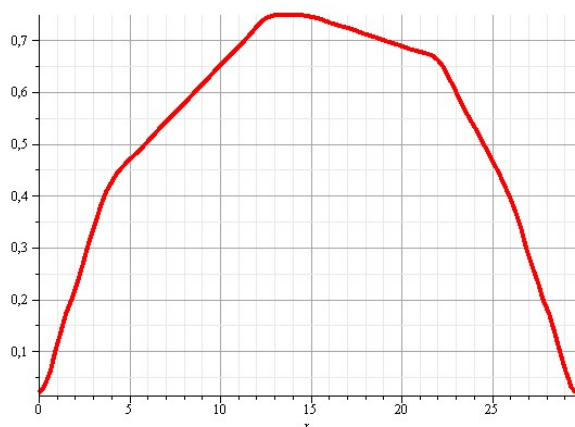
Використовуючи дані табл. 3.8 нижче у табл. 3.9 представлена апроксимація рядами Фур'є геометричних характеристик КС вздовж довжини судна за системою лінійних функцій між точками даних. Для забезпечення достатньої точності апроксимації геометричних характеристик було взято 15 членів Фур'є. У табл. 3.9 для виразів ряду Фур'є введені такі позначення: $h_p = 14,85$ напівперіод, $p_i = \pi = 3,14 \dots$ – число пі, x відраховується від 0-го шпангоуту корми.

Таблиця 3.9 – Вирази рядів Фур'є, що апроксимують геометричні характеристики

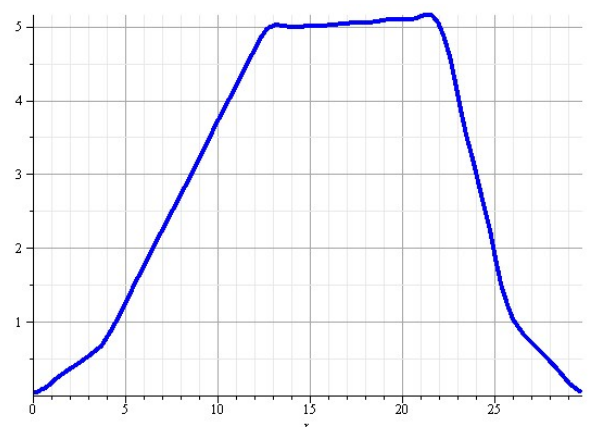
№ п/п	Найменування величини	Вираз ряду Фур'є
1	Головний центральний момент інерції відносно горизонтальної осі, m^4	$\text{inertiaMomentHorAxis_fourierCosSin_15} := (x) \rightarrow 2,945 - 2,542 * \cos(1 * p_i * x / h_p) - 0,7695 * \sin(1 * p_i * x / h_p) - 0,4472 * \cos(2 * p_i * x / h_p) + 0,0817 * \sin(2 * p_i * x / h_p) + 0,08784 * \cos(3 * p_i * x / h_p) + 0,3116 * \sin(3 * p_i * x / h_p) + 0,1458 * \cos(4 * p_i * x / h_p) - 0,07299 * \sin(4 * p_i * x / h_p) + 0,01562 * \cos(5 * p_i * x / h_p) - 0,06457 * \sin(5 * p_i * x / h_p) - 0,08947 * \cos(6 * p_i * x / h_p) - 0,01144 * \sin(6 * p_i * x / h_p) - 0,01342 * \cos(7 * p_i * x / h_p) + 0,02069 * \sin(7 * p_i * x / h_p) - 0,02316 * \cos(8 * p_i * x / h_p) - 0,002498 * \sin(8 * p_i * x / h_p) - 0,02377 * \cos(9 * p_i * x / h_p) - 0,01755 * \sin(9 * p_i * x / h_p) -$

№ п/п	Найменування величини	Вираз ряду Фур'є
		$0,01633 \cdot \cos(10 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,02333 \cdot \sin(10 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,01266 \cdot \cos(11 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,007943 \cdot \sin(11 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,01862 \cdot \cos(12 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,005736 \cdot \sin(12 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,01077 \cdot \cos(13 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,012 \cdot \sin(13 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,009018 \cdot \cos(14 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,001777 \cdot \sin(14 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,006772 \cdot \cos(15 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,005665 \cdot \sin(15 \cdot \pi \cdot x / hp)$
2	Площадь поперечного сечения, м ²	$\text{crossSectionArea_fourierCosSin_15} := (x) \rightarrow 0,5237 - 0,2797 \cdot \cos(1 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,02128 \cdot \sin(1 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,09232 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,003695 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,05254 \cdot \cos(3 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,01853 \cdot \sin(3 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,02617 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,004836 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,01736 \cdot \cos(5 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,003132 \cdot \sin(5 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,01137 \cdot \cos(6 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,001096 \cdot \sin(6 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,0023 \cdot \cos(7 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,0008531 \cdot \sin(7 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,001787 \cdot \cos(8 \cdot \pi \cdot x / hp) + 7,494e-05 \cdot \sin(8 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,003353 \cdot \cos(9 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,0009369 \cdot \sin(9 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,00432 \cdot \cos(10 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,001474 \cdot \sin(10 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,003905 \cdot \cos(11 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,0003101 \cdot \sin(11 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,002559 \cdot \cos(12 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,0002383 \cdot \sin(12 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,003096 \cdot \cos(13 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,000697 \cdot \sin(13 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,001248 \cdot \cos(14 \cdot \pi \cdot x / hp) + 8,183e-06 \cdot \sin(14 \cdot \pi \cdot x / hp) - 0,0007158 \cdot \cos(15 \cdot \pi \cdot x / hp) + 0,0003165 \cdot \sin(15 \cdot \pi \cdot x / hp)$

На рис. 2.9 показані графіки рядів Фур'є з табл. 2.12, які апроксимують геометричні характеристики.



а)



б)

Рис. 3.8 – Графіки рядів Фур'є з табл. 3.9, які апроксимують геометричні характеристики: а – площа F ; б – Головний центральний момент інерції відносно горизонтальної осі $I = I_u = I_z^{cen}$

Як бачимо ряди Фур'є добре апроксимують геометричні характеристики, представлені сукупностями лінійних залежностей на рис. 3.6 і 3.7.

У табл. 3.10 представлені найбільші значення геометричних характеристик, які використовуються для формування початкового наближення форми вільних коливань, отримані з рядів Фур'є табл. 3.9.

Таблиця 3.10 – Величини максимальних значень геометричних показників КС

№ п/п	Найменування величини	Значення
1	Найбільший головний центральний момент інерції відносно горизонтальної осі, m^4	5,0049
2	Найбільша площа $F_{\max}$, m^2	0,7469

4 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИДІВ ДЕФОРМУВАННЯ НА ЧАСТОТИ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ КОРПУСУ СУДНА

4.1 Визначення частоти вільних коливань у вертикальній площині тільки від згинальної складової

Покладемо в рівняннях (6) і (7)

$$F(x) = 0, I_m(x) = 0, v_2(x, t) = 0. \quad (24)$$

Це означає, що ми виключили деформацію зсуву та вплив обертання поперечних перерізів і будемо враховувати лише згинальну складову вільних коливань. Рівняння (6) і (7) перепишуться

$$V_{\max} = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) a^2 \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_n(x) \right)^2 dx, \quad (25)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \int_0^L m_{\Sigma n}(x) (-a \varphi_n(x) \lambda)^2 dx, \quad (26)$$

Невідомий коефіцієнт a знайдеться з умови

$$\frac{\partial}{\partial a} (V_{\max} - T_{\max}) = 0, . \quad (27)$$

Підставляючи (25), (26) в (27) отримаємо рівняння

$$a \int_0^L EI(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \cdot a \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx = 0. \quad (28)$$

Прирівнюючи визначник (28) до нуля, отримаємо характеристичне рівняння, коріння якого є власними частотами для цієї форми коливань.

Характеристичне рівняння на основі (28) має вигляд

$$\int_0^L EI(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_n(x) \right)^2 dx - \lambda^2 \int_0^L m_{\Sigma n}(x) \varphi_n(x)^2 dx = 0. \quad (29)$$

Значення величин формули (18)

$$\chi_n = 4,7124; m = 5825,8 \text{ кг/м}; \alpha_n = 338,14; k_n = 0,158666. \quad (30)$$

Коефіцієнт A_n при формі коливань (18) призматичної балки, визначений з умов (19) становить

$$A_n = 0,00325686. \quad (31)$$

Коефіцієнти α_n, β_n з (14), які визначені згідно умов (17) становлять

$$\alpha_n = -0,03647524162; \beta_n = -0,002183943066. \quad (32)$$

Вирішуючи рівняння (29), знаходимо, що частота вільних коливань λ_{A1} 1-го тону від тільки згинальної складової становить

$$\lambda_{A1} = 149,87 \text{ рад/с}. \quad (33)$$

4.2 Вивчення впливу зсуву на частоту вільних згинальних вертикальних коливань

Далі додаємо зсувну складову, але без врахування впливу обертання поперечних перерізів, тобто в (6) і (7) покладаємо

$$I_m(x) = 0. \quad (34)$$

Характеристичне рівняння в цьому випадку буде мати форму (12), при $I_m(x) = 0$. Але постає питання у визначенні коефіцієнту форми поперечного перерізу k_s , який у загальному випадку визначається загальновідомою залежністю опору матеріалів

$$k_s = \frac{F}{I^2} \int_F \frac{S_z^2}{b^2} dF, \quad (35)$$

де I – головний центральний момент інерції відносно горизонтальної осі, м^4 ;

F – площа поперечного перерізу, м^2 ;

S_z, b – статичний момент, м^3 , відсіченої площі та ширина перерізу, м , відповідно на даному горизонтальному рівні, які мають місце у формулі Журавського для дотичних напружень.

Як бачимо інтеграл в (35) для перерізів на рис. 3.2÷3.5 є трудомістким, тому що величини S_z, b є функціями від координат поперечного перерізу.

В даному випадку буде аналізуватися вплив зсуву на згинальні коливання 1-го тону у вертикальній площині, тримаючи k_s як параметр і змінюючи його в межах

$$k_s \in [1; 5]. \quad (36)$$

При чому закон зміни k_s будемо тримати постійним вздовж всієї довжини судна, тобто $k_s(x) = \text{const}$.

Вирішуючи характеристичне рівняння (12) при $I_m(x) = 0$, поступово змінюючи k_s в межах (36), отримуємо відповідні значення частот, які наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Частоти вільних коливань КС із врахуванням зсуву при $I_m(x) = 0$

k_s	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Частоти, рад/с	129,142	135,068	138,355	140,446	141,893	142,955	143,768	144,409	144,929

Далі розраховуємо власну частоту згинальних коливань 1-го тону у вертикальній площині із врахуванням зсуву приймаючи вже до уваги $I_m(x)$, який визначено (5), поступово змінюючи k_s в межах (36), отримуємо відповідні значення частот, які наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Частоти вільних коливань КС із врахуванням зсуву при $I_m(x) \neq 0$

k_s	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Частоти, рад/с	124,360	129,177	131,776	133,401	134,514	135,323	135,938	136,421	136,811

На рис. 4.1 представлені графіки залежностей власних частот згинальних коливань (у вертикальній площині 1-го тону) із врахуванням деформацій зсуву від значень коефіцієнту форми поперечного перерізу k_s для випадків, коли не враховується інерція обертання поперечних перерізів ($I_m(x) = 0$) і коли вона враховується ($I_m(x) \neq 0$). Вказані графіки залежностей побудовані на основі табл. 4.1 і 4.2.

Як видно з табл. 4.1 (тобто без врахування інерції обертання перерізів) при збільшенні коефіцієнту форми поперечного перерізу k_s від 1 до 5, загальна частота власних коливань збільшується на 12,22%.

Як видно з табл. 4.2 (тобто з врахуванням інерції обертання перерізів) при збільшенні коефіцієнту форми поперечного перерізу k_s від 1 до 5, загальна частота власних коливань збільшується на 10,01%.

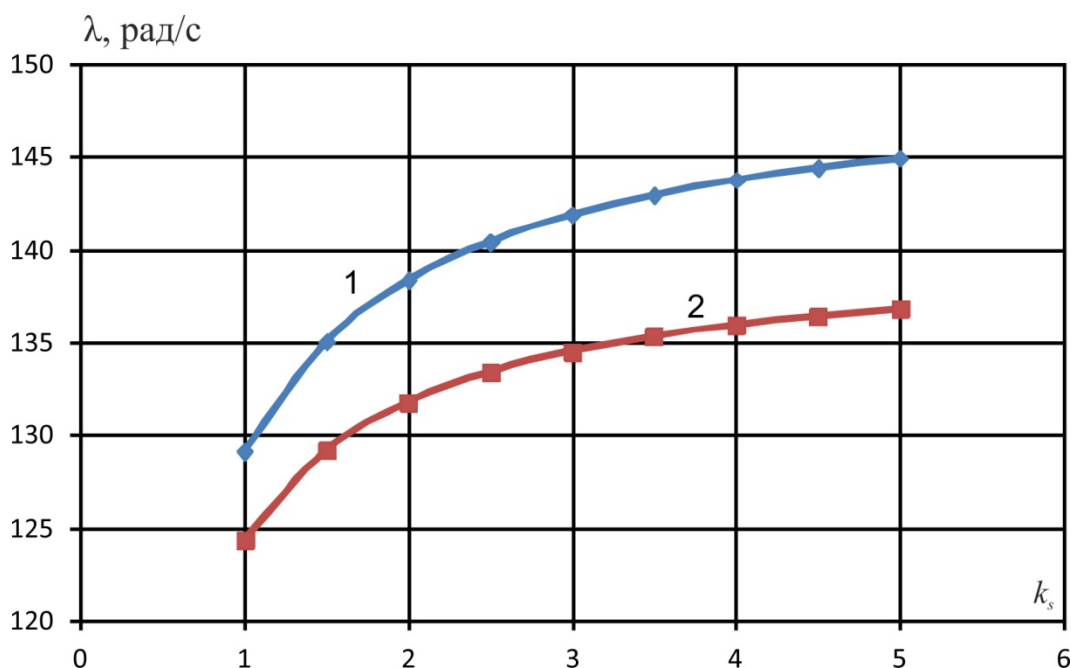


Рис. 4.1 – Залежності частот згинальних коливань з врахуванням зсуву в залежності від k_s : 1 – без врахуванням інерції обертання поперечних перерізів; 2 – з врахуванням інерції обертання поперечних перерізів

Врахування зсуву і інерції обертання поперечних перерізів знижує частоти власних коливань, т.я. енергія витрачається на ці види деформування.

На основі виразу (33) і табл. 4.1 можна зробити висновок, що врахування лише зсуву без врахування інерції обертання поперечних перерізів знижує частоту вільних коливань на від 3,3% до 13,8%.

На основі виразу (33) і табл. 4.2 можна зробити висновок, що врахування лише зсуву з врахуванням інерції обертання поперечних перерізів знижує частоту вільних коливань на від 8,7% до 17,0%. В останньому випадку враховані всі основні фактори, які мають місце впливу на частоти власних коливань.

На основі табл. 4.1 і 4.2 можна зробити висновок, що врахування впливу інерції обертання поперечних перерізів в рамках врахування зсуву знижує частоту на від 3,7% до 5,6%. Окремого дослідження впливу інерції обертання поперечних перерізів без врахування зсуву в даному випадку не проводилося.

4.3 Порівняння розрахованих власних частот з емпіричними

У цьому розділі порівнюються власні частоти, отримані за методом Релея-Папковича-Шиманського, який використовувався для теоретичних розрахунків в цій роботі з емпіричними залежностями.

В табл. 4.3 представлені емпіричні залежності для обчислення частот 1-го тону вільних вертикальних згинальних коливань.

Таблиця 4.3 – Частоти власних згинальних вертикальних коливань 1-го тону за емпіричними залежностями

№	Найменування	Формула	Значення
1	Головний центральний момент інерції відносно горизонтальної осі, см ⁴	$I = I_u = I_z^{cen}$	5,0049E+8
2	Водотоннажність, т	D	588,51
3	Довжина судна, м	L	29,7
4	Частота коливань 1-го тону за формулою Шліка	$N_1 = (280 \div 340) \sqrt{\frac{I}{DL^3}}$, кол/хв	1595,31÷1937,16 кол/хв = 167,06÷202,86 рад/с
5	Ширина на міделі по осадці, м	B	10,5914
6	Осадка, м	T	3,60353
7	Коефіцієнт для вертикальних коливань (взято для плоскодонних суден)	k_g	380
8	Частота коливань 1-го тону за формулою Шліка -Бюрилля	$N_1 = \frac{k_g}{\sqrt{1,2 + \frac{B}{3T}}} \sqrt{\frac{I}{DL^3}}$, кол/хв	1466,46 кол/хв = 153,57 рад/с

Розраховані власні частоти 1-го тону вертикальних згинальних коливань з врахуванням всіх факторів в рамках роботи (тобто з врахуванням зсуву і інерції

обертання поперечних перерізів), які визначені в табл. 4.2 менші в цілому на від 10,9% до 38,7% від тих, які обчислені за емпіричними формулами табл. 4.3.

Як бачимо, емпіричні залежності дають завищені значення власних частот, тому що були розроблені для транспортних суден з нормальними співвідношеннями головних розмірів. В нашому випадку для буксиру Т3500 відношення довжини судна до висоти борту у міделевому перерізі становить $L/H_{\text{mid}} = 2,8$. Відношення ширини $B=10,5914$ м до осадки $T = 3,60353$ м на міделі становить $\approx 2,9$, що теж є нестандартним. Архітектура Т3500 відрізняється від архітектури звичайних транспортних суден. Буксир Т3500 є плоскодонним, що підвищує опір води при вертикальних коливаннях. А малі коефіцієнти повноти (наприклад, коефіцієнт загальної повноти $\delta = 0,507$) пояснюються особливістю форми корпусу. По причині нестандартних співвідношень головних розмірів буксиру емпіричні залежності для визначення приєднаних мас можуть давати великі похибки, так як вказані залежності були розроблені для транспортних суден зі стандартними співвідношеннями головних розмірів. Звісно є спеціальні залежності для приєднаних мас рідини для незвичних тіл, які коливаються в рідині, які наведені в [7]. Більш того приєднані маси рідини тіла, яке коливається в ній можуть визначатися чисельно. Але це вже інші задачі, які виходять за межі даного дослідження.

ВИСНОВКИ

Таким чином в роботі були вирішені всі задачі, які були поставлені, щоб досягнути поставленої мети. Далі по пунктам перелічені основні висновки по розділам, які відповідають поставленим задачам.

1) За наданими даними робочої документації були проведені розрахунки, за якими було отримано ступінчатий закон розподіленого масового навантаження вздовж довжини судна.

2) У другому розділі був проведений перерахунок розподіленого масового навантаження зі шпаций на шпангоути. Був проведений розрахунок приєднаних мас рідини по шпангоутам і розрахований розподіл сумарних мас по шпангоутам. Була підготовлена математична модель згідно методу Релея-Папковича-Шиманського для вивчення впливу видів деформування на частоти вільних коливань.

3) У третьому розділі було проведено дослідження впливу видів деформування на частоти вільних згинальних коливань корпусу судна 1-го тону у вертикальній площині. Було встановлено, що вплив зсуву і інерції обертання поперечних перерізів зменшують частоту вказаних згинальних коливань до 17%. Це означає, що в реальних розрахунках врахуванням зсуву і інерцією обертання поперечних перерізів не можна нехтувати в реальних розрахунках, що підтверджується і [1, 2].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Постнов, В.А.**, Калинин В.С., Ростовцев Д.М. Вибрация корабля [Текст]: Учебник / **В.А. Постнов**, В.С. Калинин, Д.М. Ростовцев – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
2. **Курдюмов, А.А.** Вибрация корабля [Текст]: Учебник / **А.А. Курдюмов** – Л.: Судпромгиз, 1961.–320 с.
3. **Писаренко, Г.С.** Сопротивление материалов [Текст]: Учебник / Г.С. Писаренко, В.А. Огарев, А.Л. Квитка и др.; под ред. Г.С. Писаренко – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.
4. **Миролюбов И.Н.** Пособие к решению задач по сопротивлению материалов [Текст] / И.Н. Миролюбов [и др.]. – Москва: Высшая школа, 1969. – 482 с.
5. Справочник по строительной механике корабля [Текст]: в 3 т. / Г.В. Бойцов, О.М. Палий, В.А. Постнов, В.С. Чувиковский – Л.: Судостроение, 1982 – . – Т. 3: Динамика и устойчивость корпусных конструкций. – 1982. – 320 с.
6. **Сердюченко А.М.** Згин, стійкість та вільні коливання стержневих систем і пластин суднового корпусу [Текст]: Навчально-методичний посібник / А.М. Сердюченко – Миколаїв 2009. – 111 с.
7. **Короткин А.И.** Присоединенные массы судна [Текст]: Справочник / А.И. Короткин – Л.: Судостроение, 1986. – 312 с., ил.
8. **Тимошенко С.П.** Колебания в инженерном деле [Текст]/ С.П. Тимошенко, Янг Д.Х., Уивер У. – М. 1984 – 474с., ил.
9. **Пановко Я.Г.** Основы прикладной теории колебаний и удара [Текст]/ Я.Г. Пановко. – Изд. 3-е, доп. и переработ. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отделение), 1976. – 320 с., с ил.