УДК 629.565.2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ВИРОБІВ СУДНОВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ В СУДНОРЕМОНТІ ТА ПРИ ПЕРЕОБЛАДНАННІ СУДЕН

Калнауз А.О., студентка,
Терлич С.В., старший викладач
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова (Херсонська філія)
stterlych@ukr.net

Анотація. Розроблено математичну модель позиціонування виробів суднового машинобудування в процесі їх переміщення всередині корпусу судна.

Проаналізовано сучасний стан та виявлено основні недоліки технологій транспортування важких та великогабаритних вантажів (обладнання) при ремонті та модернізації морських суден на вітчизняних підприємствах. Запропоновано рекомендації прикладного характеру використання математичної моделі.

Створено теоретичну базу для проведення практичних розрахунків та експериментів.

Ключові слова: судноремонт, суднове обладнання, транспортування, технології.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ СУДНОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В СУДОРЕМОНТЕ И ПРИ ПЕРЕОБОРУДОВАНИИ СУДОВ

Калнауз А.А., студентка,
Терлыч С.В., старший преподаватель
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова (Херсонский филиал)
stterlych@ukr.net

Аннотация. Разработана математическая модель позиционирования изделий судового машиностроения в процессе перемещения их внутри корпуса.

Проанализировано современное состояние и выявлены основные недостатки технологий транспортировки тяжелого и крупногабаритного оборудования при ремонте и переоборудовании морских судов на отечественных предприятиях. Предложены рекомендации прикладного характера применения математической модели.

Создана теоретическая база для проведения практических расчётов и экспериментов.

Ключевые слова: судоремонт, судовое оборудование, транспортировка, технологии.

THE MATHEMATICAL MODEL OF SHIPS EQUIPMENT POSSITION IN SHIP-REPAR AND SHIP-REFIT

Kalnauz A.O., student
Terlych S.V., senior lecturer
National University of Shipbuilding after admiral Makarov (Kherson Branch)
stterlych@ukr.net

Abstract. The current state has been analyzed and the main disadvantages of transportation technology of heavy and bulky cargo (equipment) when repairing and modernizing sea vessels in domestic enterprises have been revealed.

Recommendations of applied use of a mathematical model have been offered. Theoretical basis for practical calculations and experiments has been created.

The developed mathematical model of basing items of maritime engineering when moving in the middle of the vessel hull allows to solve problems with the help of coordinates of the matrix equation, so, it is possible to receive different types of transformation matrices which can be used for practical purposes. The mathematical model allows to identify the real state of items basic points which move in the coordinate systems of the mounting space, as well as to identify intervals change of platform suspension with items placed on it, which provides platform movement for the required trajectory without any obstacles.

The mathematical model allows to indicate parameters which should be considered when carrying out loading and assembling works with the aim of preventing the transporting items from falling down .

Addition possibility of accounting dynamic characteristics of the system was introduced for the first time.

They are important when moving heavy and bulky items. In the whole the basing model allows to develop technological schemes and solve practical problems connected with transportation and displacement of ship equipment more quickly and accurately.

Key words: ship-repair, ships equipment, transportation, technologies.

Вступ. Переміщення виробів всередині корпусу судна є трудомістка операція, що вимагає від робочого персоналу необхідних навичок проведення даних робіт і забезпечення їх безпеки. Також при виконанні даної операції необхідно стежити за забезпеченням збереження виробів, які переміщуються [1, 2]. Для вдосконалення технології виконання вантажно-монтажних робіт запропонована **математична модель** базування та переміщення виробів, яка повинна вирішувати наступні **задачі**:

1) забезпечити базування виробів суднового машинобудування на етапі переміщення їх усередині корпусу судна;

2) забезпечити оптимальну траєкторію руху виробів;

3) скоротити до необхідного мінімуму розмір технологічних отворів, і обсяг простору яке забезпечує переміщення виробів;

4) отримати чіткий план проведення робіт, розрахувати кількість проміжних операцій;

5) підібрати необхідну технологічну оснастку для проведення операцій, враховуючи статичне навантаження, характер руху, динамічні навантаження;

6) з'ясувати необхідність демонтажу попутного обладнання, що знаходиться у відсіку;

7) виконати попередній аналіз можливості проведення самої операції.

Аналіз літературних джерел за тематикою статті [2-5] довів, що при транспортуванні і монтажі виробів суднового машинобудування необхідно знати дійсні положення їх базових точок, тобто тих точок, які служать для визначення положення виробу в просторі деякої системи координат. Ця система координат може бути пов'язана з місцем монтажу (наприклад, фундаментом) або іншими елементами конструкції, що обмежують свободу пересування виробу при транспортуванні.

Завдання першого типу, коли необхідно визначити дійсний стан базових точок виробу в системі координат монтажного місця, запропоновано називати позиційним завданням.

Завдання другого типу, коли необхідно визначити інтервали зміни параметрів підвісу платформи, при яких забезпечується безперешкодне переміщення платформи за заданою траєкторією без контакту з перешкодами, запропоновано називати завданням траєкторії переміщення.

В основі **методики вирішення завдань** обох типів лежить апарат однорідних координат, згідно з яким радіус-вектор деякої базової точки з декартовими координатами x, y, z заданими в системі координат S_i може бути представлений у вигляді (рис. 1.):

$$r = (x, y, z, 1)^T = x \cdot e_1 + y \cdot e_2 + z \cdot e_3 + 1 \cdot e_4,$$

де: e_1, e_2, e_3 – одиничні орти осей координат O_iX_i, O_iY_i, O_iZ_i; e_4 – одиничний орт початку координат O_i системи $O_iX_iY_iZ_i$; T – символ транспортування.

Виклад основного матеріалу. Системою координат S_i може бути, наприклад, власна система координат виробу. Тоді положення будь-якої точки цього виробу у власній системі координат тривіально визначається по його моделі або кресленні (рис. 2.). Іншою же системою координат S_{i-1}, щодо якої потрібно визначити положення будь-яких (базових, граничних) точок, що належать виробу, може бути, наприклад, система координат монтажного місця або перешкоди.

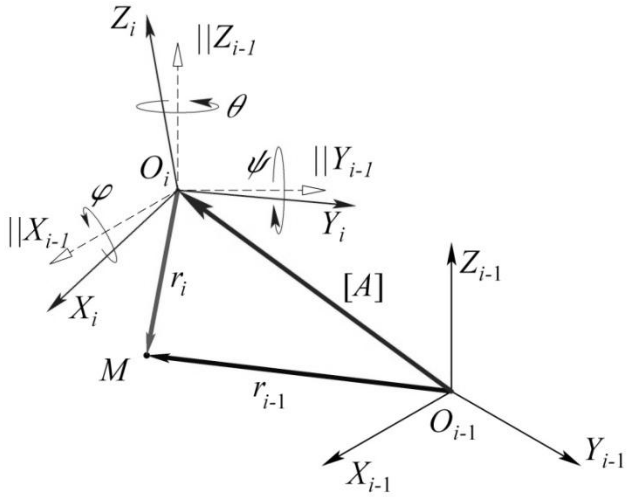


Рис. 1. Система координат S_i і S_{i-1}

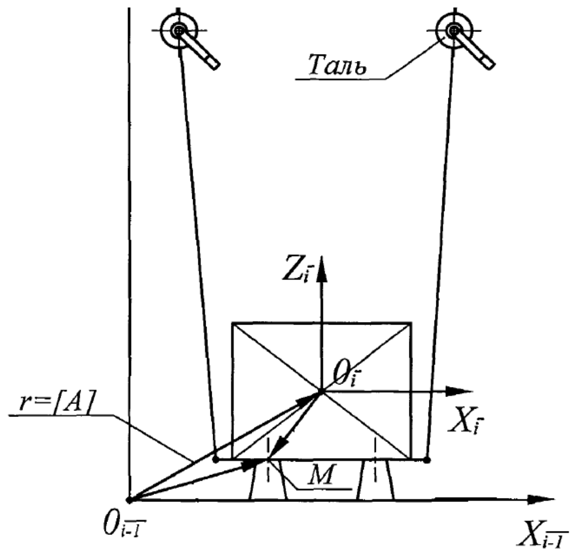


Рис. 2. Система координат креслення

Для обох типів завдань базування виробу (тобто визначення його положення, або, що те ж саме, − визначення положення його базових точок) буде полягати у визначенні його дійсного стану в системі координат S_{i-1} [4]. Для однієї і тієї ж точки M простору в системах координат S_{i-1} та S_i справедливо матричне рівняння перетворення координат:

$$r_{i-1} = \mathrm{A} \cdot r_i\,, \tag{1}$$

де: r_i, r_{i-1} –радіус-вектори деякої точки в системах координат S_i і S_{i-1} відповідно;

А − матриця перетворення координат точки з системи координат S_i в S_{i-1} виду:

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де: $a_{11} \div a_{33}$ − компоненти підматриці поворотів системи координат S_i навколо осей системи координат S_{i-1};

$a_{14} \div a_{34}$ − компоненти підматриці зсувів системи координат S_i вздовж осей системи координат S_{i-1}.

Рівняння (1) являє собою узагальнену математичну модель.

У цієї узагальненої математичної моделі повна матриця перетворення може бути представлена у вигляді:

$$\mathrm{A} = \prod \mathrm{A}_i \|_{i = [1,\, n],\, n \in \mathrm{Z}} = \mathrm{A}_1 \cdot \mathrm{A}_2 \cdot \mathrm{A}_3 \cdot \mathrm{A}_4 \cdot \mathrm{A}_5 \cdot \mathrm{A}_6,$$

де: i – номер перетворення; A_1, A_2, A_3 – часткові матриці зсувів системи координат S_i вздовж осей $O_{i-1}X_{i-1}$, $O_{i-1}Y_{i-1}$, $O_{i-1}Z_{i-1}$ системи координат S_{i-1}:

$$\mathrm{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \; \mathrm{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \; \mathrm{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де A_4, A_5, A_6 – матриці поворотів системи координат S_i навколо осей $O_{i\text{-}1}X_{i\text{-}1}$, $O_{i\text{-}1}Y_{i\text{-}1}$, $O_{i\text{-}1}Z_{i\text{-}1}$ системи координат S_{i-1}:

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_5 = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Як компонент векторів r_i та r_{i-1} в узагальнену математичну модель можуть бути підставлені не тільки координати, але і відповідні координатні складові похибки положення базових точок. При певних перетвореннях компонентами векторів r_i та r_{i-1} можуть бути складові сил і моментів, що діють на систему в заданій точці, лінійні і кутові швидкості і прискорення окремих точок системи.

Для зворотних перетворень із системи координат S_{i-1} в S_i справедливо:

$$r_i = A^{-1} \cdot r_{i-1}, \tag{2}$$

де: A^{-1} – зворотна матриця перетворень, яка також представляє собою добуток зворотних матриць відповідних часткових перетворень:

$$[A_i(q)]^{-1} = A_i(-q), \tag{3}$$

де: q – узагальнена координата (сукупність переміщень x, y, z уздовж осей $O_{i\text{-}1}X_{i\text{-}1}$, $O_{i\text{-}1}Y_{i\text{-}1}$, $O_{i\text{-}1}Z_{i\text{-}1}$, і кутів поворотів φ, ψ, θ навколо цих же осей).

Були визначені часткові висловлювання для узагальнених координат у функціях робітників геометричних параметрів системи (рис. 3.). Тоді, підставивши ці вирази в часткові матриці перетворення і, перемноживши їх зазначеним вище чином, отримуємо повну матрицю перетворення координат (і ряду інших параметрів) досліджуваного об'єкта.

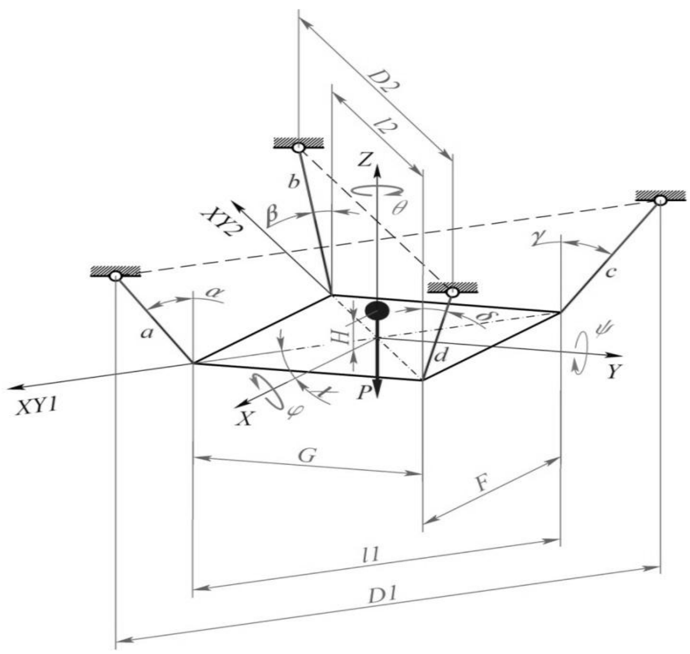


Рис. 3. Початкове положення платформи

Розглянута транспортна система такої схеми (рис. 4.): прямокутна в плані платформа підвішена на 4-х підвісах по кутах, вантаж (центр ваги встановленого на платформу виробу) в центрі платформи. За змінювані параметри системи прийняті довжини a, b, c, d підвісів. Так як в якості вихідного стану завжди можна вибрати рівність довжин всіх підвісів, то для параметризації схеми досить задати зміну довжини по одному з підвісів в кожній парі (наприклад, a та b).

Початкове (горизонтальне) положення платформи з центром тяжкості в площині платформ (при $H = 0$):

$$l1 = l2 = l = \sqrt{G^2 + F^2}\ ; \quad a = b = c = d.$$

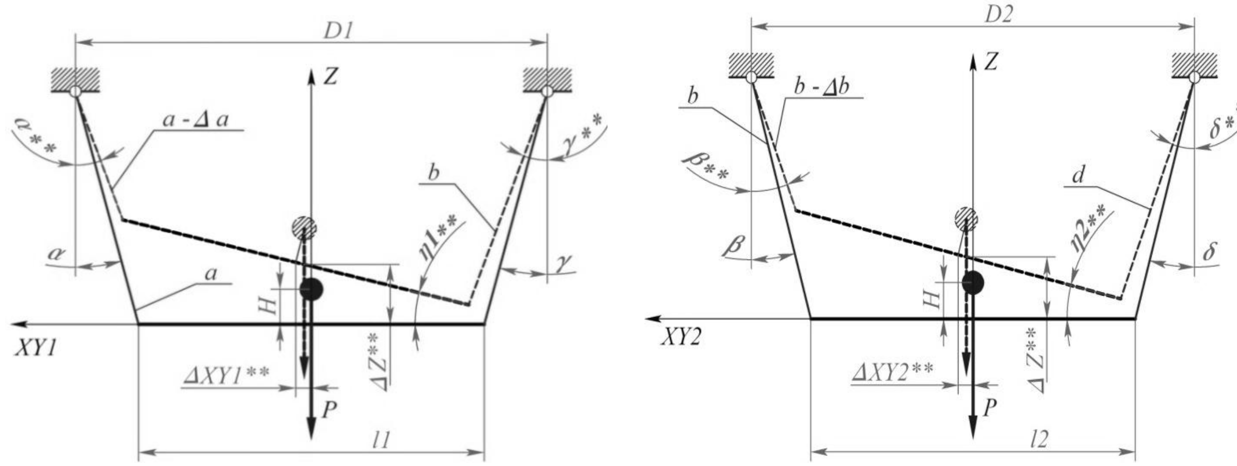
При зміні довжин підвісів Δa і Δb початкові зміни в напрямку відповідних діагоналей платформи (рис. 4, б) ($H > 0$) отримано вирази:

$$\sin\alpha * = \frac{(2a - \Delta a)\cdot\sin\alpha}{2(a - \Delta a)} = \sin\alpha + \frac{\Delta a\cdot\sin\alpha}{2(a - \Delta a)};$$

$$\sin\beta * = \frac{(2b - \Delta b)\cdot\sin\beta}{2(b - \Delta b)} = \sin\beta + \frac{\Delta b\cdot\sin\beta}{2(b - \Delta b)};$$

$$\Delta Z1^* = \frac{\Delta a\cdot c}{a + c - \Delta a}\cdot\cos\alpha^* = \frac{(a\cdot\Delta a)\cdot\cos\alpha^*}{2a - \Delta a};$$

$$\Delta Z2^* = \frac{\Delta b\cdot d}{b + d - \Delta b}\cdot\cos\beta^* = \frac{(b\cdot\Delta b)\cdot\cos\beta^*}{2b - \Delta b}.$$



а) б)

Рис. 4. Зміщене положення платформи:
а − зміщення діагональних підвісів $a - c$; б − зміщення діагональних підвісів $b - d$

При $\Delta a \neq \Delta b$ справедливо $\Delta Z1^* \neq \Delta Z2^*$:

$$\Delta Z^{**} = \max\{\Delta Z1^*, \Delta Z2^*\};$$

тобто при $\Delta a < \Delta b$ очевидно $\Delta Z^{**} = \Delta Z2^*$ і $\beta{**} = \beta{*}$, отже:

$$\alpha^{**} = \arccos\left(\frac{\Delta Z2^*\cdot a\cdot\Delta a\cdot(2a - \Delta a)}{\Delta a^3 - a\cdot\Delta a^2 + a}\right);$$

а при $\Delta a > \Delta b$, $\Delta Z^{**} = \Delta Z1^*$ і $\alpha{**} = \alpha{*}$, отже:

$$\beta^{**} = \arccos\left(\frac{\Delta Z1^*\cdot b\cdot\Delta b\cdot(2b - \Delta b)}{\Delta b^3 - b\cdot\Delta b^2 + b}\right).$$

Для обох розглянутих вище випадків справедливо:

$$\Delta XY1^{**} = \frac{(a \cdot \Delta a) \cdot \sin \alpha^{**}}{2a - \Delta a}; \quad \Delta XY2^{**} = \frac{(b \cdot \Delta b) \cdot \sin \beta^{**}}{2b - \Delta b};$$

$$\Delta X^{**} = [\Delta XY1^{**} - \Delta XY2^{**}]\cos\chi; \quad \Delta Y^{**} = -[\Delta XY1^{**} + \Delta XY2^{**}]\sin\chi;$$

$$\chi = arctg\left(\frac{G}{F}\right).$$

Кути нахилу платформи до горизонталі за рахунок зміни довжини підвісів в площинах XOY_1 і XOY_2 відповідно:

$$\eta 1^{**} = \arcsin\left(\frac{\Delta a \cdot \cos \alpha^{**}}{l1}\right); \quad \eta 2^{**} = \arcsin\left(\frac{\Delta b \cdot \cos \beta^{**}}{l1}\right).$$

Кути повороту платформи навколо глобальних осей OX та OY відповідно:

$$\varphi^{**} = -(\eta 1^{**} + \eta 2^{**})\cdot\sin\chi;$$

$$\psi^{**} = (\eta 2^{**} - \eta 1^{**})\cdot\cos\chi;$$

$$\theta^{**} = \arcsin\left([\Delta XY2^{**} - \Delta XY1^{**}] \cdot \sin\left(\frac{\chi}{F}\right)\right) \approx \left(\Delta XY2^{**} - \Delta XY1^{**}\right)\cdot \sin\left(\frac{\chi}{F}\right).$$

Якщо центр ваги виробу розташований на висоті H щодо площини платформи, то зміщення платформи:

$$\begin{aligned} \Delta X^{**} &= [\Delta XY1^{**} - \Delta XY2^{**})]\cos\chi - H\sin\psi; \\ \Delta Y^{**} &= -[\Delta XY1^{**} + \Delta XY2^{**})]\sin\chi - H\sin\varphi; \\ \Delta Z^{**} &= \max\{\Delta Z1^{*}, \Delta Z2^{*}\} - H\cos\varphi. \end{aligned} \tag{4}$$

Практичний приклад використання моделі виконано для завантаження прямокутної платформи ($G \times F$ = 1000×1600 мм) із виробом (рис. 2.) до трюму через палубний виріз вертикально за допомогою 4-х талей на глибину 3 м. Центр тяжіння разом із платформою штучно піднято над платформою на висоту H = 0,8 м. Обмеження на траєкторію платформи – 100 мм по горизонталі та вертикалі; максимальний кут нахилення у будь-якому напрямку – 20^0. Із вихідних даних отримано:

$$\Delta X^{**} = \Delta Y^{**} = 0{,}1; \quad \left|\varphi^{**}\right| = \left|\psi^{**}\right| = \pi\left(\frac{20}{180}\right) = 0{,}35; \quad \left|\theta^{**}\right| = \pi\left(\frac{10}{180}\right) = 0{,}175;$$

$$\frac{G}{F} = 0{,}625; \quad \chi = \mathrm{arctg}\left(\frac{G}{F}\right) \cong 32^0; \, l1 = l2 = \sqrt{1{,}000^2 + 1{,}600^2} = 1{,}889;$$

$$\alpha = \beta = \gamma = \delta = \alpha^{**} = \beta^{**} = \gamma^{**} = \delta^{**} = 0; \, x = y = 0; \quad z = \mathrm{var} = 5...0;$$

Підставивши вихідні параметри та координати базової точки у вираз (1) у системах координат S_{i-1} та S_i відповідно:

$$r_{i-1} = \begin{bmatrix} 0{,}1 \\ 0{,}1 \\ 0{,}01 \\ 1 \end{bmatrix}; \, r_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad \varphi = -0{,}28(\Delta a + \Delta b); \, \psi = 0{,}45\left(\Delta a - \Delta b\right).$$

$$X = 0; Y = 0;$$

$$Z = 5 - \min\left\{\left(\frac{\Delta a + \Delta c}{2}\right), \left(\frac{\Delta b + \Delta d}{2}\right)\right\}.$$

$$A_1 = A_2 = A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 5 - \min\left\{\left(\dfrac{\Delta a + \Delta c}{2}\right), \left(\dfrac{\Delta b + \Delta d}{2}\right)\right\} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos[-0{,}28(\Delta a + \Delta b)] & \sin[-0{,}28(\Delta a + \Delta b)] & 0 \\ 0 & \sin[-0{,}28(\Delta a + \Delta b)] & \cos[-0{,}28(\Delta a + \Delta b)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos[0{,}45(\Delta a + \Delta b)] & \sin[0{,}45(\Delta a + \Delta b)] & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin[0{,}45(\Delta a + \Delta b)] & \cos[0{,}45(\Delta a + \Delta b)] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Розв’язавши систему рівнянь, отримані гранично допустимі зміни довжин підвісів:

$\Delta a \le 1{,}02$ ì; $\Delta b \le 0{,}24$ ì.

Висновки. Розроблена математична модель базування виробів суднового машинобудування при їх переміщенні всередині корпусу корабля дозволяє вирішувати задачі із допомогою матричного рівняння координат, де можливо отримати різні типи матриць перетворення, які можна використовувати в практичних цілях. Математична модель дозволяє визначити дійсне положення базових точок виробу, що переміщується у системі координат монтажного місця, а також визначити інтервали змінення підвісу платформи із розташуванням на ній виробу. Математична модель дозволяє визначити параметри, які необхідно врахувати при проведенні вантажних та монтажних робіт із метою запобігання можливості падіння виробів, що транспортуються. Вперше введено додаткову можливість урахування динамічних характеристик системи, які важливі при переміщенні важких та великогабаритних виробів.

В цілому розроблена модель базування дозволяє більш швидко та чітко розробити технологічні схеми та вирішувати практичні задачі, пов’язані із транспортуванням та переміщенням суднового обладнання.

Література

1. Харас З.Б. Подъём и перемещение грузов / З.Б. Харас, В.М. Федоров, Э.Н. Исаков, Д.Л. Ярошевич // М.: Стройиздат. – 1987. – 319 с.

2. Leitao P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-art survey. Engineering Applications of Artificial Intelligence, No. 22. – Elsevier, 2009. – p. 979-991.

3. МДС 12-31.2007 Методические рекомендации по техническому освидетельствованию съёмных грузозахватных приспособлений. М.: ЦНИИОМТП. – 2007. – 154 с.

4. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк // Справочное пособие. – М.: Машиностроение. – 2004. – 512 с.

5. Перов В.Н. Реновация судов / В.Н. Перов // Николаев: НУК. – 2006. – 148 с.