

УДК 656.61.052

С. О. РОЖКОВ

Херсонська державна морська академія

**МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІЮВАННЯ
СУДНА - ПОСТАЧАЛЬНИКА ТИПУ PSV**

У статті виконано моделювання системи динамічного позиціювання для судна-постачальника типу PSV. Задачу керування 4-ма азимутними трасерними рушіями виконано з використанням спеціалізованого пакету Marine Simulator Systems (MSS). Метою дослідження є розробка математичної моделі керування судна, яка дозволить визначити мінімальну потужність судової електроенергетичної системи для керування судном.

Ключові слова: позиціювання, трасер, судно – постачальник, моделювання, керування, енергетична система.

С.А. РОЖКОВ

Херсонская государственная морская академия

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СУДНА -
СНАБЖЕНЦА ТИПА PSV**

В статье выполнено моделирование системы динамического позиционирования для судна-снабжения типа PSV. Задача управления 4-мя азимутальными трасерными двигателями выполнена с использованием специализированного пакета Marine Simulator Systems (MSS). Целью исследований является разработка математической модели управления судном, которая позволит определить минимальную мощность судовой электроэнергетической системы для управления судном.

Ключевые слова: позиционирование, трасер, судно-снабжение, моделирование, управление, энергетическая система.

S.A. ROZHKOV

Kherson State Maritime Academy

MODELLING DYNAMIC POSITIONING SYSTEM SUPPLY VESSEL TYPE PSV

The article is simulated dynamic positioning systems for the supply vessel type PSV. The control problem 4 azimuthally thruster engines of governmental executed with use specialized package Marine Simulator Systems (MSS). The purpose of research is to develop of a mathematical model control of the vessel that will enable define a minimum power ship power system to control the ship.

Keywords: positioning, traster, ship supplying, modeling, control, power system.

Постановка проблеми

Під математичною моделлю системи управління (СУ) розуміють сукупність формальних виразів, що відображають поведінку СУ в часі і дозволяють прогнозувати її стан. Відомо [0–5], що технічні системи управління зазвичай представляють двома комплексами: пристрій управління (ПУ) і об'єкт управління (ОУ), в які входять різні засоби управління. Залежно від особливостей системи ці засоби відносять або до ПУ або до ОУ, або розглядають окремо як третій елемент системи.

Наявність сучасних комплексів, що управляють, і персональних комп'ютерів, засобів відображення і реєстрації інформації, потужних програмних пакетів обумовлюють можливість вживання повної моделі динаміки надводного судна для різних цілей. Вона може використовуватися як основа:

- знаходження найкращого рішення при розробці систем управління рухом судна;
- чисельної оцінки і аналізу таких систем;
- для ознайомлення виучуваних з особливостями динаміки судна і систем управління ним;
- передбачення поведінки судна в різних умовах експлуатації і так далі.

При складанні рівнянь динаміки надводного судна зазвичай використовують наступні допущення:

- переміщення реального судна приймають еквівалентним руху його зануреної частини в площині ватерлінії без врахування хвилеутворення на вільній поверхні води;
- підводну частину корпусу вважають симетричною відносно площини мідель-шпангоута і ДП судна, а центр маси і центр бічного опору судна – що знаходяться в площині модель-шпангоута;

– крен в судна відсутній, що швидкість ходу не позначається на диференті і середньому осіданні, а прискорення в русі судна не впливають на гідродинамічні характеристики засобів управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Моделі динаміки судів, що показують реакцію судна на дії, що управляють, у вигляді перекладання керма і частоти обертання гребного гвинта фіксованого кроку (ВФШ) показані в роботах К.К.Федяевского, А.М.Басина, Г.В.Соболева, Р.Я.Першица, А.Д.Гофмана та ін. учених [2 – 4]. Моделі динаміки судів з трастерними рушійно-рулевыми комплексами є в роботах Perez T., Fossen Thor I. [5, 6].

Вважається, що при вирішенні багатьох завдань повні моделі не потрібні, а достатньою умовою є використання приватних моделей динаміки судна, які відображають зв'язки лише між окремими вихідними і вхідними величинами цього об'єкту. Проте такий підхід при аналізі управління судами не завжди є обґрунтованим.

Зручним апаратом моделювання динамічних процесів, у тому числі і руху судна, є різницеві рівняння, які описують елементарний цикл тривалістю Δt динамічного процесу і дозволяють послідовно розраховувати координати його станів.

Формування мети дослідження

Метою дослідження є розробка математичної моделі керування судна, яка дозволить визначити мінімальну потужність судової електроенергетичної системи.

Викладення основного матеріалу досліджень

Будь-яке диференціальне рівняння, вирішення якого можна знайти за допомогою чисельного методу з однаковим кроком змінної, наводить до різницевого рівняння, а основна відмінність між диференціальним і різницеvim рівняннями полягає у величині незалежної змінної. Тому різницеві рівняння процесів можна отримати з диференціальних заміною нескінченно малого приросту dt відповідним кінцевим Δt .

Диференціальна модель динаміки судна (1) може бути приведена до різницевого вигляду таким чином. Позначимо вектор стану руху судна через \mathbf{Y} , його похідну як $d\mathbf{Y}/dt$, вектор управління – \mathbf{U} , вектор збурень – \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} V_L \\ V_B \\ \omega \\ \eta \\ \Omega \end{pmatrix}; \quad \frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \begin{pmatrix} \dot{V}_L \\ \dot{V}_B \\ \dot{\omega} \\ \dot{\eta} \\ \dot{\Omega} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} \beta_3 \\ n_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} K_a \\ v_a \\ K_w \\ B_w \end{pmatrix}; \quad (1)$$

де B_w – бал хвилювання. Всі компоненти цих векторів залежать від часу. Сили і моменти в правій частині (1) є функціями елементів векторів \mathbf{Y} , \mathbf{U} , \mathbf{Q} . Тому система (1) в матричному вигляді може бути представлена як

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \Phi\{\mathbf{Y}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{Q}(t)\}. \quad (2)$$

Оберемо досить малий інтервал часу Δt , при якому можна вважати $\frac{d\mathbf{Y}}{dt} \approx \frac{\Delta\mathbf{Y}}{\Delta t}$.

Позначивши моменти часу, наступні через інтервал часу Δt , як: 0, 1, 2, ..., J-1, J, J+1. . Представимо $\Delta\mathbf{Y}$ у вигляді: $\Delta\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{J+1} - \mathbf{Y}_J$, а значення векторів $\mathbf{Y}(t)$, $\mathbf{U}(t)$, $\mathbf{Q}(t)$ у момент часу J – як \mathbf{Y}_J , \mathbf{U}_J , \mathbf{Q}_J .

Підставивши ці значення в диференціальне рівняння (2), отримаємо різницеве рівняння:

$$\mathbf{Y}_{J+1} = \mathbf{Y}_J + \Phi(\mathbf{Y}_J, \mathbf{U}_J, \mathbf{Q}_J)\Delta t. \quad (3)$$

Обчислення по цьому виразу виконуються циклічно. Визначивши по значеннях параметрів руху судна, сигналів, що управляють, і обурюючих дій у момент часу J значення сил і моментів, по вираженню (3) розраховують кінематичні параметри судна в подальший момент часу J+1. Потім момент часу J+1 стає поточним J, і обчислення повторюються. Таким чином, моделювання зводиться до послідовних обчислень за виразом (3). Для того, щоб забезпечити достатню для практичних цілей точність обчислень, інтервал часу Δt при розрахунку обрано 1 с. виконувалося.

У роботі виконано моделювання системи динамічного позиціонування для судна-постачальника при управлінні 4-ма азимутними трастерними рушійми з використанням спеціалізованого пакету Marine

Simulator Systems (MSS, Норвезький університет науки і технології – Norwegian university of Science and Technology, NTNU). Marine Simulator Systems (MSS) є Simulink-середовище, яке забезпечує необхідні ресурси для швидкої реалізації математичної моделі морських систем з акцентом на систему управління. Для MSS були використані модельні елементи бібліотеки Т. Perez, О.п. Smogeli, Thor I. Fossen і А.І. Sorensen [5].

На рис. 1 показано модель судна, де вказані стандартні умовні позначення і параметри системи координат для опису руху судна.

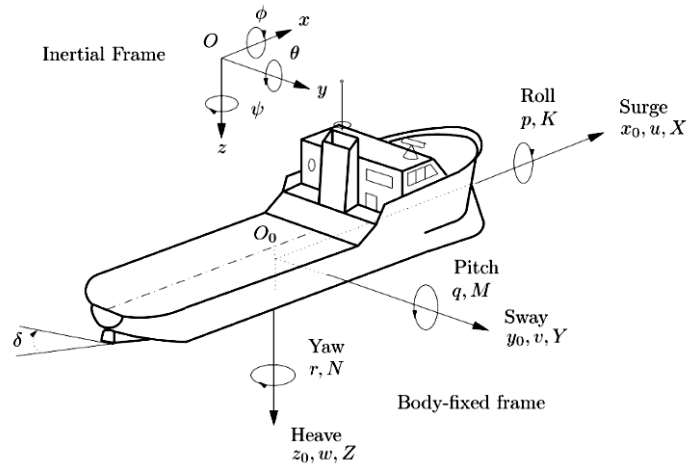


Рис.1. Умовні позначення і параметри для опису руху судна-постачальника типу MMC 887 PSV

Зазвичай серед формальних описів руху надводного судна виділяють повні моделі, які служать для представлення всіх маневрів судна на горизонтальній площині в 3-х або більш ступенях свободи. Рух судна в шести ступенях свободи розглядається як зміна положення в трьох напрямках: обертання руху (орієнтація) близько трьох осей: крен, кильова хитавиця або тангаж і рискання.

Матеріальне тіло може вільно переміщатися в трьох перпендикулярних осях: переміщення вперед-назад (surge), бічний зсув вліво-управо (sway) і вертикальне переміщення – хитавиця (heave), а у поєднанні з обертанням близько трьох перпендикулярних осей (рискання (yaw), кильовий крен або тангаж (pitch), бортовий крен (roll) – буде шість ступенів свободи (Six degrees of freedom, 6DoF).

При моделюванні були наступні припущення [5–6]:

- сили рушіїв (трастеров), що діють, визначається як X -сили і Y -сили;
- сили трастеров, що діють, не максимальні;
- немає моментів зовнішніх сил, що діють;
- немає штрафу за реверс тяги;
- судно представляється, як точка з масою;
- розраховуються лише розрахункові сили, без врахування парусності;
- не визначається інерція трастерів і судна.

Збурення, що діють на судно: поточні сили.

Далі визначаємо наступне:

$$F_c = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \rho V_c^2 C_{Xc}(\alpha_c) A_{TS} \\ \frac{1}{2} \rho V_c^2 C_{Yc}(\alpha_c) A_{LS} \end{pmatrix}, \quad M_c = \frac{1}{2} \rho V_c^2 C_{Mc}(\alpha_c) A_{LS} L. \quad (4)$$

де ρ – щільність води;

V_c – швидкість водотоку;

α_c – напрям водотоку;

A_{TS} – занурена поперечна проектована область корпусу судна,

A_{LS} – занурена подовжня проектована область корпусу судна,

L – довжина судна,

$C_{*c}(\alpha_c)$ – поточний коефіцієнт.

Збурення, що діють на судно: сила вітру

$$F_w = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \rho_{air} V_{rw}^2 C_{Xw}(\alpha_{rw}) A_T \\ \frac{1}{2} \rho_{air} V_{rw}^2 C_{Yw}(\alpha_{rw}) A_L \end{pmatrix}, \quad M_w = \frac{1}{2} \rho_{air} V_{rw}^2 C_{Mw}(\alpha_{rw}) A_L L. \quad (5)$$

де ρ_{air} – щільність повітря;
 V_{rw} – відносна швидкість вітру;
 α_{rw} – відносний напрям вітру;
 A_T – поперечна площа проекції вітру;
 A_L – подовжня площа проекції вітру;
 L – довжина судна;
 $C_{*w}(\alpha_{rw})$ – поточний коефіцієнт вітру.

$$V_w(z) = V_w(z=10m) \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{\frac{1}{8}} \quad (6)$$

де $V_w(z=10m)$ швидкість за 10 м.
 Збурення, що діють на судно: сила хвиль

$$F_{wd} = \begin{pmatrix} C_{Xwd}(\alpha_{wd}, f_{wd}) \frac{1}{8} \rho g H_{1/3}^2 L \\ C_{Ywd}(\alpha_{wd}, f_{wd}) \frac{1}{8} \rho g H_{1/3}^2 L \end{pmatrix}, \quad M_{wd} = C_{Mwd}(\alpha_{wd}, f_{wd}) \frac{1}{8} \rho g H_{1/3}^2 L. \quad (7)$$

де ρ – щільність води,
 α_{wd} – напрям хвилі,
 f_{wd} – регулярна частота вагання хвилі,
 $C_{*wd}(\alpha_{wd}, f_{wd})$ – коефіцієнт дрейфу,
 g – коефіцієнт гравітації,
 $H_{1/3}$ – висота хвилі;
 L – довжина судна.
 Зусилля, які формуються трастерами визначимо як

$$T = C_T \rho n^2 D^4, \quad (8)$$

та момент, що крутить:

$$Q = C_Q \rho n^2 D^5 \quad (9)$$

де ρ – щільність води,
 n – кількість обертів за хвилину,
 D – діаметра гвинта,
 C_T – коефіцієнт тяги;
 C_Q – момент, що крутить.

Розрахунок необхідних сил двигуна виконаємо наступним чином:

$$\text{Сили в напрямі } x : F_x = F_{x_{demand}} - F_{x_{wind}} - F_{x_{current}} - F_{x_{wave}} ;$$

$$\text{Сили в напрямі } y : F_y = F_{y_{demand}} - F_{y_{wind}} - F_{y_{current}} - F_{y_{wave}} ;$$

$$\text{Момент: } M = M_{demand} - M_{wind} - M_{current} - M_{wave} .$$

Далі маємо:

$$F_x = \sum_{i=1}^n (F_x)_i; \quad F_y = \sum_{i=1}^n (F_y)_i; \quad M = \sum_{i=1}^n (-y_i \cdot (F_x)_i + x_i \cdot (F_y)_i). \quad (10)$$

$$(F_x)_n = F_x - \sum_{i=1}^{n-1} (F_x)_i; \quad (F_y)_n = F_y - \sum_{i=1}^{n-1} (F_y)_i. \quad (11)$$

Виконаємо заміну F_{x_n} і F_{y_n} в інші змінні. За допомогою цього моменту і рівняння:

$$(F_y)_{n-1} = \frac{M + y_n \cdot F_x - x_n \cdot F_y}{x_{n-1} - x_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{y_i - y_n}{x_{n-1} - x_n} \cdot (F_x)_i \right) + \sum_{i=1}^{n-2} \left(\frac{x_n - x_i}{x_{n-1} - x_n} \cdot (F_y)_i \right), \quad (12)$$

визначимо повну потужність:

$$g((F_x)_1, \dots, (F_x)_{n-1}, (F_y)_1, \dots, (F_y)_{n-2}) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(F_x)_i^2 + (F_y)_i^2}. \quad (13)$$

Мінімізацію загальної потужності виконаємо за допомогою методу найшвидшого спуску з лінійним пошуком (рис.2).

```

 $\omega_{min} = 0, \quad \omega_{max} = 1.$ 
 $f_i = f(x^{old} - \omega_i \nabla f(x^{old})); \quad i = \{min, max\}$ 
IF  $f_{max} > f_{min}$ : STOP
ELSE:  $\omega_{min} = \omega_{max}; \quad \omega_{max} = 2 \cdot \omega_{max}$ 
 $f_{min} = f_{max}; \quad f_{max} = f(x^{old} - \omega_{max} \nabla f(x^{old}))$ 
REPEAT
 $\omega_{min} \leq \omega_{opt} \leq \omega_{max}$ 
    
```

Рис.2. Алгоритм найшвидшого спуску з лінійним пошуком

Далі знайдемо ω_{opt} в інтервалі

$$\omega = \omega_{opt} s.t. f(x^{old} - \omega \nabla f) \rightarrow min \quad (14)$$

IF $\|\omega_{min} - \omega_{max}\| \leq e$: STOP

ELSE подвійний інтервал ω_{opt} залишається між ω_{min} и ω_{max} .

REPEAT

Модельовання системи динамічного позиціювання судна-постачальника та результати моделювання зображено на рис. 3 – 6. Результати моделювання траєкторії руху судна за амплітудою та фазою наведено на рис. 7, а, б. Результати моделювання для моделей суден з 3-ма та 4-ма азимутальними трастерами показано на рис. 8.

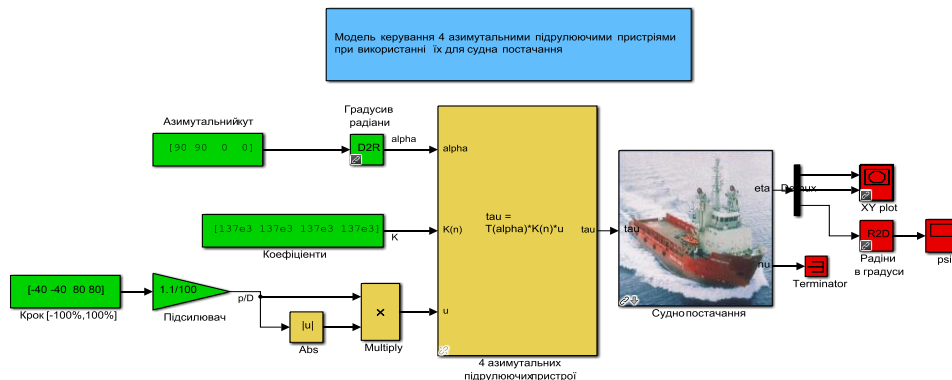


Рис. 3. Схема моделювання системи динамічного позиціювання судна-постачальника

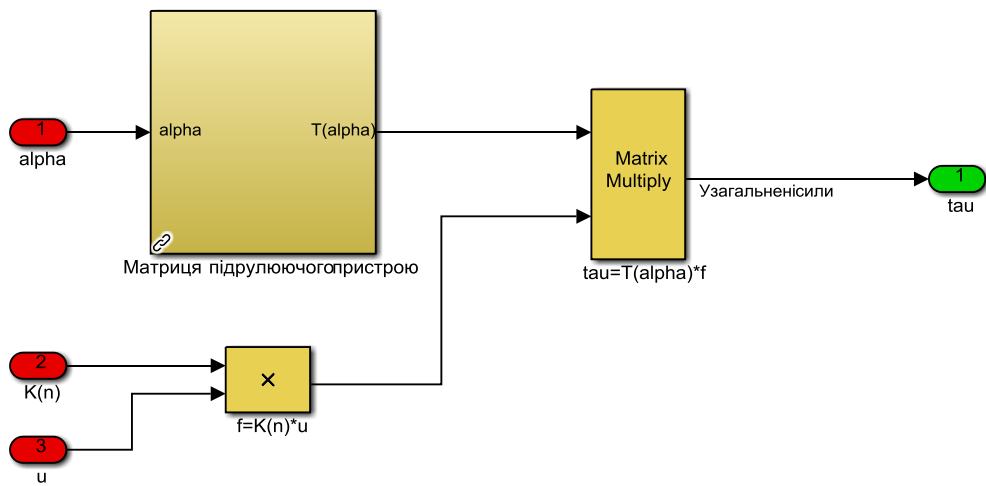


Рис. 4. Структура підсистеми з 4-ма азимутальними підрулюючими пристроями

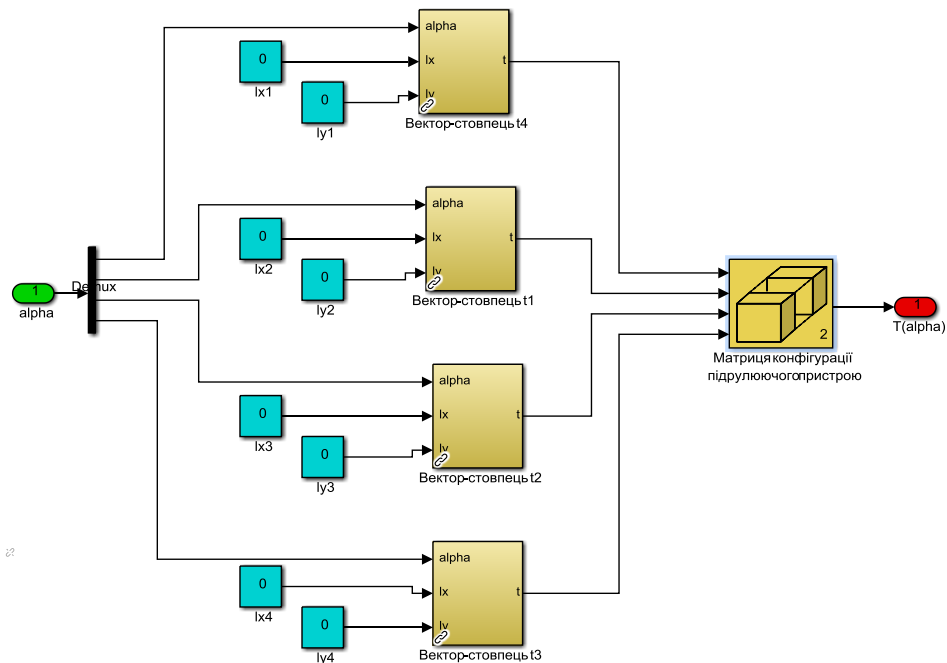


Рис. 5. Структура моделі матриці підрулюючого пристрою

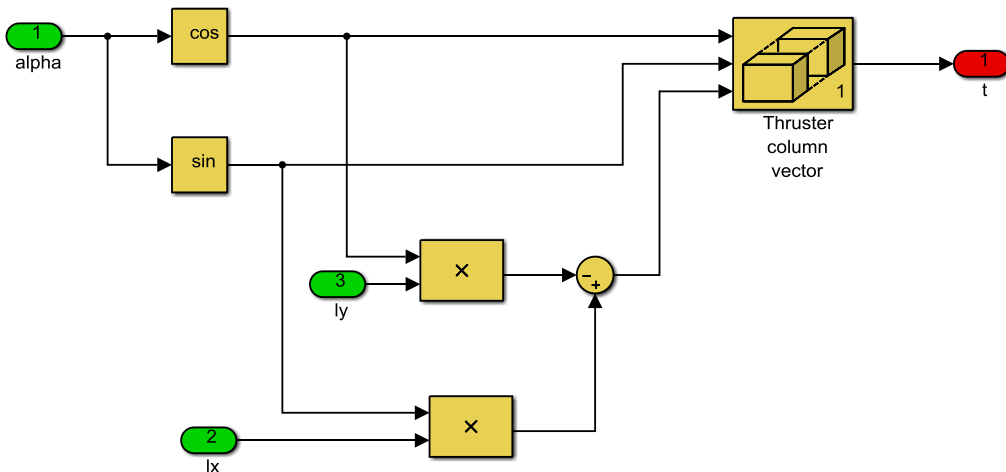
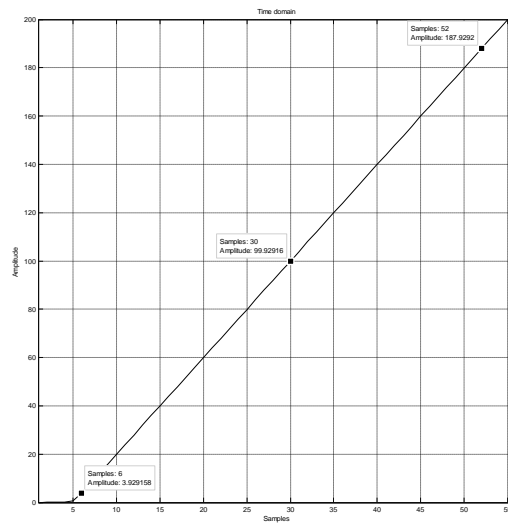
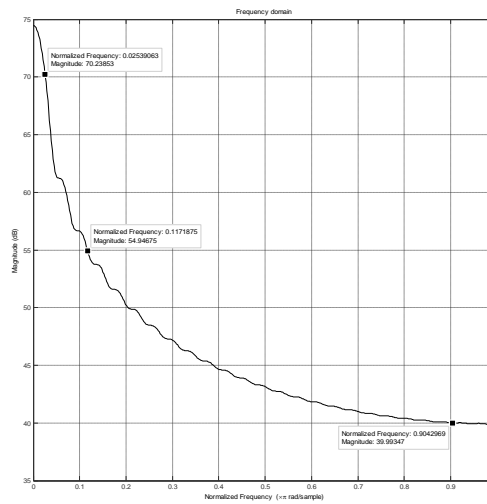


Рис. 6. Структура підсистеми керування координатами тростера

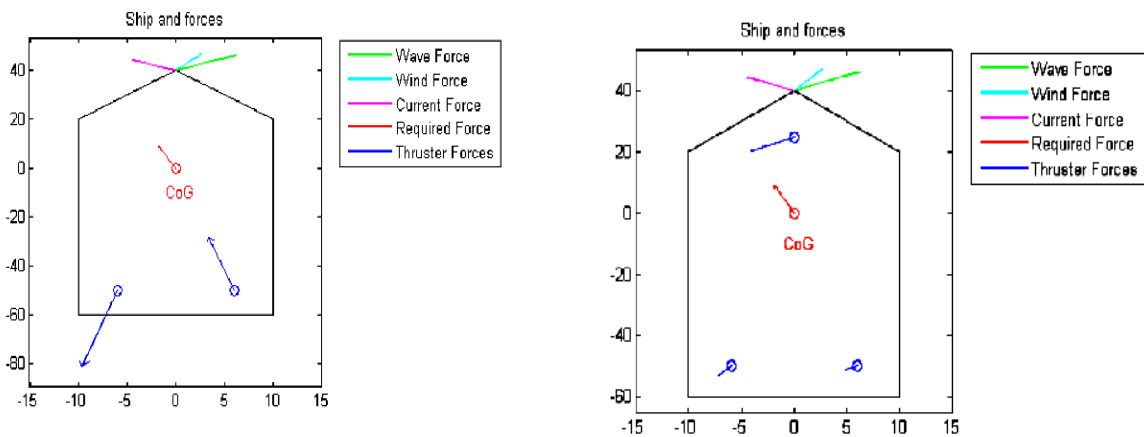


а)



б)

Рис. 7. Результати моделювання траєкторії судна : а) за амплітудою; б) фазою



Мінімальна потужність: 58.7518;
 Позиції: (-6, -50); (6, -50)
 Сили: (-4.1,-34.167); (-2.9,24.167)

Мінімальна потужність: 12.3296;
 Позиції: (-6, -50); (6, -50); (0,25)
 Сили: (-1,339, -3.325); (-1.16,-1.377);
 (-4.511,5.298)

Рис.8. Результати моделювання для моделей суден з 3-ма та 4-ма азимутальними трасерами

Висновки

Розроблено загальну структурну схему моделювання системи динамічного позиціонування і показано принципову можливість використання при моделюванні такої моделі судна, яке може бути представлено як матеріальна точка із 3-мя ступенями свободи. Моделювання системи динамічного позиціонування для аналізу траєкторії руху судна-постачальника типу PSV, яке виконано із застосування програмного комплексу MSS в середовищі системи MATLAB, дозволило визначити мінімальну потужність суднової електроенергетичної системи (СЕС) для керування судном.

Список використаної літератури

1. Суевалов Л.Ф. Справочник по расчетам судовых автоматических систем. – Л.: Судостроение, 1977. – 376 с.
2. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. – 3-е изд., перераб. и доп.- Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.
3. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник – Л.: Судостроение, 1988. –360 с.
4. Васильев А.В. Управляемость судов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
5. Perez T. Ship Motion Control. Monograph. –Berlin: Springer, 2005. –300 p.
6. Sorensen J.A. Survey of dynamic positioning control systems//Annual Reviews in Control 35 (2011) P.123–136.
7. MMC887 Platform Supply Vessel Technical Specification 480V Generator. Fujian Mawei Shipbuilding Ltd.