

Гусак І.Л., Ярмак В.Л.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО РОЗРОБКИ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА В ПОРТОВІЙ АКВАТОРІЇ

У ході дослідження запропоновано способи завдання траєкторії руху судна для різних районів плавання із властивими ним умовами навігації, що базуються на методах аналітичної геометрії та фізичних принципах маневрування судном. Використаний математичний апарат для завдання ліній траєкторій довів його ефективність, що полегшує роботу автоматичних регуляторів. Для кожного з типів траєкторій розроблений відповідний за функціоналом принцип формування управляючих впливів та псевдоуправління, що базується на теорії автоматичного управління. Регулятори базуються на принципах ПІД-управління. Введення додаткового каналу кутового прискорення при управлінні нестійким на курсі судном дозволяє перетворити коливальні перехідні процеси в аперіодичні. Даний підхід розширює область стійкості системи управління й суттєво підвищує якість управління за критеріями економічності й безпеки за рахунок можливості підвищення коефіцієнта підсилення системи управління. За результатами моделювання руху судна на кожному з типів траєкторій з обраним для них регулятором відхилення від заданих траєкторій не перевищують допустимого за критеріями безпеки значення для кожного з районів плавання.

Ключові слова: автоматизація, судноводіння, база знань, безпека судноводіння, зона небезпеки, інформаційна підтримка прийняття рішень, маневрування, маршрут судна, модель, навігаційна небезпека, навігаційна обстановка, обмеження плавання, переешкода, порт, портова акваторія, прийняття рішення, програмне значення курсу, система управління безпекою, судноводій, судноводіння, траєкторія, управління рухом судна, формалізація, штучний інтелект.

Актуальність теми дослідження. Складність умов навігації при русі судна у стиснених умовах – каналах, протоках, фарватерах, на мілководді та в районах з обмеженою акваторією – обумовлена впливом різноманітних факторів: навігаційний запас, ширина і глибина фарватеру (каналу), течії, вітер, топографія місцевості, стан головного двигуна (ГД) та рульового обладнання (РО), взаємне розташування суден тощо. Вони визначають типи навігаційних ризиків, які впливають на появу загроз і є передвісником інцидентів і катастроф [1]. Поява загроз обумовлена низкою об'єктивних (ризики відмов складних технічних систем судна, зіткнення з небажаними умовами і т. д.) і суб'єктивних (ризики неадекватної оцінки обстановки і, відповідно, вироблення некоректного рішення) ризиків. Отже, навігаційна безпека судноводіння забезпечується цілеспрямованою роботою щодо управління, попередження та мінімізації ризиків [2].

Впровадження на морському флоті автоматичної ідентифікаційної системи, що є морською навігаційною системою, в якій використовується взаємний автоматизований інформаційний радіообмін як між суднами, так і між судном і береговими службами, під час якого передають інформацію про позивний і назву кожного судна (для їхнього розпізнавання), їхні координати, параметри (розміри, вантаж, осадку та ін.), мету рейсу, параметри руху (курс, швидкість тощо) для розв'язання завдань запобігання зіткненням суден, контролю за дотриманням ними режиму плавання і загального моніторингу[3].

Доповнення глобальних навігаційних супутникових систем контрольно-коригувальними станціями розв'язує проблему високоточного визначення місця судна із субметровою точністю. Це забезпечить безпечніше плавання суден в умовах поганої видимості; виконання спеціальних

робіт (поглиблення каналів, будівництво хвилеломних і портових споруд, нафтових терміналів); точніше виставляння плавучих засобів навігаційного обладнання для покращення якості обслуговування суден у порту.

Незважаючи на широке впровадження систем високоточної навігації і засобів АІС, є актуальним вирішення наукового завдання щодо розроблення моделей та методів системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння в стиснутих водах (портовій акваторії) для підвищення ефективності системи безпеки судноводіння.

Метою даного дослідження полягає у розробці теоретичних і науково-методичних засад щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії.

Аналіз останніх досліджень. Загалом, дослідження у сфері обслуговування руху суден, особливо у портах, було дуже локалізованим, наприклад, впровадження ланцюгового планування в деяких європейських портах [4]. Більшість досліджень у даній сфері стосувалися розробки обладнання з акцентом на інструментах підтримки прийняття рішень для операторів.

Так, частка досліджень була зосереджена на джерелах даних і об'єднанні інформації для виявлення і відстеження суден. Дослідження [5-9], в основному, зосереджені на математичному моделюванні для підтримки людини-оператора за допомогою джерел інформації, об'єднаних в систему підтримки прийняття рішень. Однак, лише незначна увага приділяється повсякденній експлуатації, а людина-оператор розглядається як джерело збоїв.

На противагу цьому, важливість врахування інтересів кінцевих користувачів під час розробки систем підтримки прийняття рішень була підкреслена у роботах [10, 11], де автори використовували фокус-групи для оцінки поінформованості про ситуацію і демонстрації того, що оператори діяли протягом більш тривалого періоду часу, ніж очікувалося, і одержували підтримку від відповідної системи. Хоча предиктор був здатний передбачити шлях судна на одну хвилину вперед, оператори продемонстрували, що їхні рішення були правильними й оперативними.

Інший напрямок досліджень був зосереджений на визначенні основних завдань та методів роботи, щоб задовольнити майбутні потреби у транспортних перевезеннях. Так, автори [12] основний акцент спрямували на керівництво морськими рятувальними операціями, у тому числі у порту. Крім того, практика і процедури відрізнялися в різних портах внаслідок місцевих особливостей. У результаті надання послуг може відрізнитися в різних портах. Отже, ці відмінності можуть призвести до невизначеності у сфері обслуговування руху суден, що спричиняє труднощі для суден у розумінні того, чого можна очікувати від постачальника послуг, оператора і очікуваної реакції суден. Тобто ще залишається значний обсяг невиконаних досліджень щодо розробки методів управління рухом судна в портовій акваторії, що враховують особливості портів й ситуацій у них.

Виклад основного матеріалу. Стиснуті води через посадки на мілину, зіткнення, навали на причальні спорудження та пришвартовані судна вважаються найнебезпечнішим для судноводіння районом плавання [1]. Це обумовлено підвищеним потоком й інтенсивним маневруванням суден, швидкою зміною навігаційної обстановки, впливом приливних течій, наявністю банок і мілководдя.

Для забезпечення безпеки судноплавства у стиснутих водах Резолюція ІМО вимагає ретельного планування маршруту й маневрів згідно з такими вихідними даними [2]:

- а) точки початку і кінця повороту з урахуванням маневрених елементів, гідрометеорологічних та інших факторів навколишнього середовища;
- б) фактори забезпечення безпечної проводки й постановки до причалу (режими роботи ГД, рульового обладнання, швидкість та орієнтацію судна в момент контакту із причалом);
- в) встановлена безпечна швидкість поблизу навігаційних небезпек і причальних споруджень.

Траєкторія в стиснутих водах є комбінацією прямих і дуг окружностей. Вибір максимального кута між прямими (або дотичними за дугами окружностей у точці сполучення) й дотичними до дуг окружностей наступної ділянки траєкторії здійснюється за критерієм мінімізації відхилення судна від заданої траєкторії з врахуванням маневрених характеристик

судна.

Дуги окружності задаються рівняннями утворюючих їх окружностей: $(x_p - X_c)^2 + (y_p - Y_c)^2 = R_o^2$, де X_c, Y_c – координати центру окружності; R_o – радіус окружності.

Відхилення від траєкторії, заданою дугою окружності, є різницею між дистанцією від поточного положення до центру окружності та її радіусом:

$$\chi = \sqrt{(X - x_p)^2 + (Y - y_p)^2} - R_o. \quad (1)$$

Точки початку й кінця дуги визначаються автоматично за навігаційною обстановкою на карті, тому їх непотрібно визначати аналітично.

Регулятор відрізняється наявністю в диференціальному каналі заданої кутової швидкості для підвищення точності управління, враховуючи кривизну траєкторії. Задана кутова швидкість визначається через радіус кривизни поточної ділянки траєкторії й поточну поздовжню швидкість.

$$\omega_p = \frac{v}{R_o}. \quad (2)$$

При перевищенні заданою кутовою швидкістю максимальної кутової, яку судно здатне розвинути при максимальній перекладці керма, необхідно завчасно знизити поздовжню швидкість. і, якщо буде При недостатності цих заходів для збільшення упору потоку води на пері керма необхідно давати поштовхи машиною, тобто маневрування швидкістю є складним заходом.

Для автоматичної навігації при здійсненні проводки за траєкторією попередньо планується поздовжня швидкість або дискрети ходу ГД для різних ділянок траєкторії з її подальшим автоматичним корегуванням.

Морська практика і результати модельних експериментів доводять основні переваги завдання траєкторії дугами окружностей:

- 1) простота контролю положення судна щодо траєкторії;
- 2) простота опису траєкторії, коли задаються координати центру, радіус і полярні координати початку й кінця дуги;
- 3) простота управління, що забезпечує мінімум керуючих впливів.

Прийняте рішення про постановку до причалу порту у сукупності з різноманітним навігаційним, гідрометеорологічним та іншим факторів свідчать про практичну неповторюваність виконання судноводієм даного завдання [2]. Це підтверджує практика маневрування в стиснутих акваторіях і при швартових операціях, коли постфактум судноводії не можуть чітко визначити причинно-наслідковий зв'язок обставин проводки та прийняття рішень щодо виконання того або іншого виду маневру [3]. Також при рівнозначних умовах дії лоцмана при постановці до одного причалу різних суден суттєво відрізняються. Отже, на порядок денний виходить завдання формалізації та уніфікації траєкторій й способів проводки за нею суден в умовах обмеженої акваторії портів та підходів до причальних споруджень.

Математична модель формування програмних рухів судна гладкими кривими у портовій акваторії описується апроксимуючою сигмоїдальною траєкторною функцією (СТФ) $\Pi^c(S)$, яка описує режими зміни кінематичних параметрів (курс, швидкість, кут дрейфу) руху судна за певною траєкторією при заданих початкових умовах:

$$\Pi^c(S) = - \frac{\Pi_{max}^c - \Pi_0^c}{1 + \exp\left(4(S_{\Pi}^c + \Delta S_{\Pi}^c - S_i) \frac{g_{\Pi_{mn}^c}}{\Pi_{max}^c - \Pi_0^c} R_{\Pi}^c\right)}, \quad (3)$$

де mn – індекс значення параметра у середній точці перехідного періоду маневру;

ΔS_{Π}^c – поправка, що враховує зсув СТФ за початкових умов маневру;

S_i, S_{Π}^c – відстань за траєкторією від початкової позиції до поточної до точки перегину СТФ;
 R_{Π}^c – коефіцієнт зміни нахилу СТФ від управляючого впливу;
 $\Pi^c, \Pi_{max}^c, \Pi_0^c$ – кінематичний параметр, його максимальне та початкове значення відповідно.

У СППР судноводія задані кінематичні параметри судна (курс, кутова й поздовжня швидкості) визначатимуться як градієнти за траєкторією (рис. 1).

Перевизначимо задану поздовжню швидкість за траєкторією $v(S)$ в залежність від часу, використовуючи відомі фізичні співвідношення:

$$\begin{aligned} v(S) &= \frac{dS}{dt}; \\ t &= \int dt = \int \frac{dS}{v(S)}; \\ t &= \frac{S_i}{v_{max}^c - v_0^c} - \frac{\exp\left(4(S_v^c + \Delta S_v^c - S_i) \frac{g v_{mn}^c R_v^c}{v_{max}^c - v_0^c}\right)}{g v_{mn}^c R_v^c}, \end{aligned} \quad (4)$$

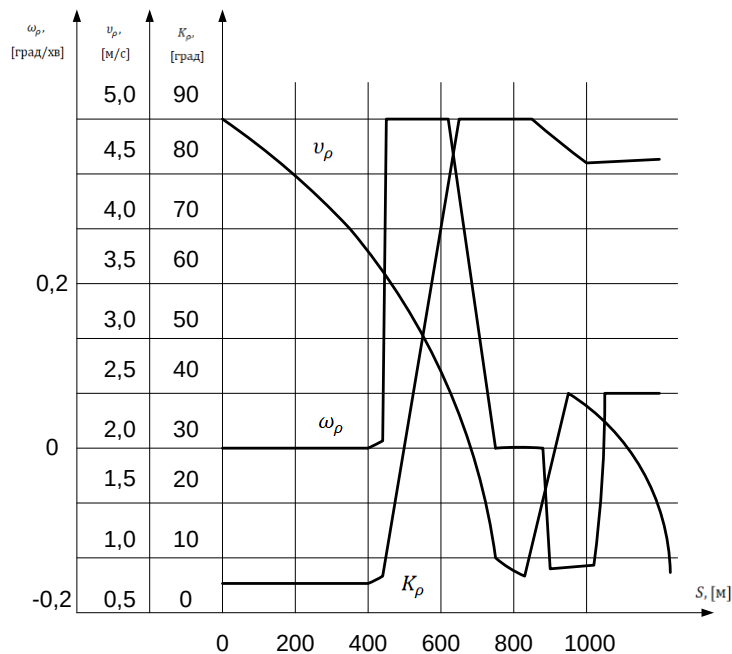


Рисунок 1 – Градієнти кінематичних параметрів руху судна за траєкторією
 (Джерело: розроблено автором)

де v_{max}^c, v_0^c – максимальне й початкове значення поздовжньої швидкості.

Побудуємо залежність пройденої відстані за траєкторією від часу (рис. 2).

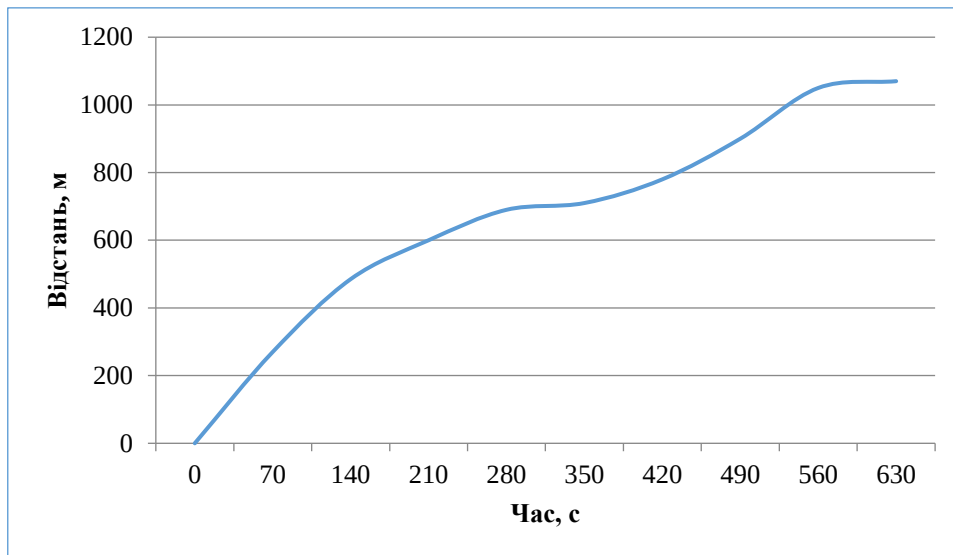


Рисунок 2 – Зміна пройденої за траєкторією відстані з часом
(Джерело: розроблено автором)

Отримана залежність $S(t)$ підставляється у формулу (4) та знаходяться залежності $v(t)$, $K(t)$, $\omega(t)$.

Множина координат точок заданої СТФ траєкторії визначається системою рівнянь

$$\begin{cases} x_p = X_0 + \int v_p(t) \sin(K_p(t) + a_p(t)) dt; \\ y_p = Y_0 + \int v_p(t) \cos(K_p(t) + a_p(t)) dt, \end{cases} \quad (5)$$

де v_p , K_p – задані у формі сигмоїдальних функцій швидкість і курс;

a_p – заданий кут дрейфу;

X_0 , Y_0 – початкові координати траєкторії.

Підстановка кінематичних параметрів вигляду (4) до системи рівнянь (5) робить останню складною і не дозволяє визначити відхилення судна від заданої СТФ траєкторії аналітично. Тому відстань від точки з координатами (X, Y) до найближчої точки траєкторії з координатами (x_p, y_p) , що належать множині координат точок заданої траєкторії, знаходиться повним перебором:

$$\chi = \min \left\{ \sqrt{(X - x_p)^2 + (Y - y_p)^2} \right\}. \quad (6)$$

Проведене моделювання управління судном за траєкторією показало переваги завдання траєкторії СТФ:

- 1) об'єкт управління може фізично реалізувати задану траєкторію;
- 2) траєкторія задається безперервною гладкою кривою;
- 3) не має потреби додаткового завдання точок початку маневру;

Недоліками завдання траєкторії СТФ є такі:

- 1) необхідність завдання всіх точок траєкторії з певною дискретністю;
- 2) складність визначення відхилення від траєкторії;
- 3) необхідність врахування взаємного впливу кінематичних параметрів.

Розглянемо автоматичне управління рухом судна у річковій акваторії (рис. 3). Нехай за

контрольний район плавання обрана ділянка акваторії ріки Міссісіпі з параметрами траєкторії.

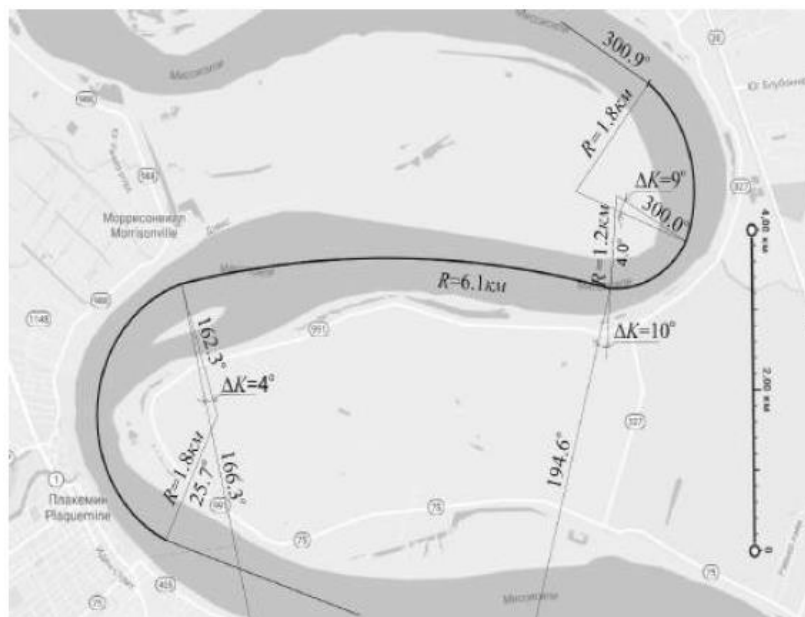


Рис. 3 – Траєкторія, задана дугами окружностей
(Джерело: розроблено автором)

Необхідно виконати S-подібний маневр й за визначеною траєкторією у вигляді трьох сполучених дуг окружності із заданими координатами центрів та радіусами. Координати точок сполучення дуг визначаються автоматично з електронної карти СППР безпеки судноводіння. Плануються точки початку й кінця маневру щодо переходу з однієї дуги на наступну.

Параметри регулятора, за якими метод є ефективним, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри регулятора (Джерело: розроблено автором)

Параметр	a_p	a_i	a_d	a_{dd}	b_p	b_i	b_d
Значення	4	0,002	-200	-2000	0,05	0,0005	0

Перемикання між режимами малий передній хід (МПХ), середній передній хід (СПХ), повний передній хід (ППХ) у маневреному режимі двигуна забезпечує управління швидкістю при проходженні каналів та річок.

Повна зупинка двигуна і режим самий малий передній хід (СМПХ) забезпечують безпечну розбіжність суден і прохід портових споруджень й ошвартованих суден, тобто до втримання судна на траєкторії не ставляться.

Механізм управління поздовжньою швидкістю на борту судна полягає в звичайному релейному перемиканні режимів роботи ГД, що змінює частоту обертання гвинта. Але метод на основі простого релейного перемикання буде неефективним, коли задана швидкість перебуває на границі діапазонів попередньо встановлених режимів роботи ГД. У цьому разі для дотримання заданої швидкості режими роботи машини будуть безупинно перемикатися. Цей недолік усувається використанням нечіткого регулятора, який працює у діапазоні заданих швидкостей, функції приналежності (ФП) яких вибираються лінійними трикутними з перетинанням діапазонів у межах 30% (рис. 4). Для режимів роботи машини функції задаються синглтонами (рис. 5).

За структуру нечіткої системи обрано Сугено, яка, на відміну від Мамдані, підтримує синглтонні ФП. На вхід нечіткого регулятора заданої швидкості подаються лінійні функції приналежності (крім ППХ). Нелінійні ФП переважують обчислювальні системи, скорочуючи їх швидкодію. Терм ППХ має сигмоїдальну ФП з областю значень $(-\infty; +\infty)$. Тому відсутня необхідність визначати максимальне значення заданої швидкості.

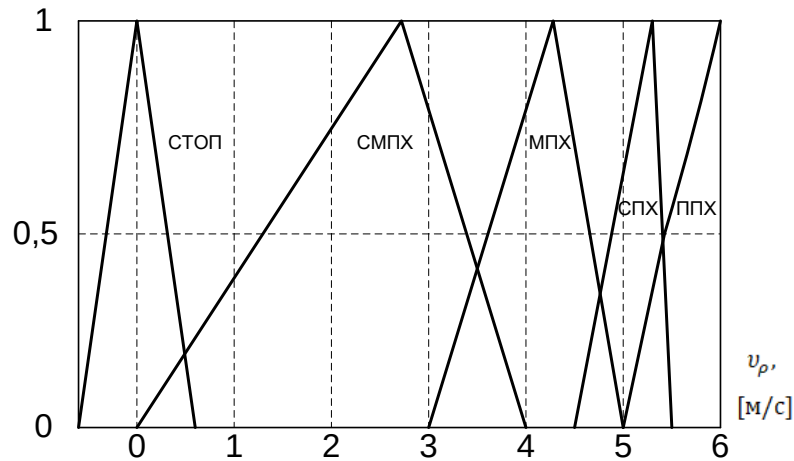


Рисунок 4 – Функції приналежності заданих поздовжніх швидкостей
(Джерело: розроблено автором)

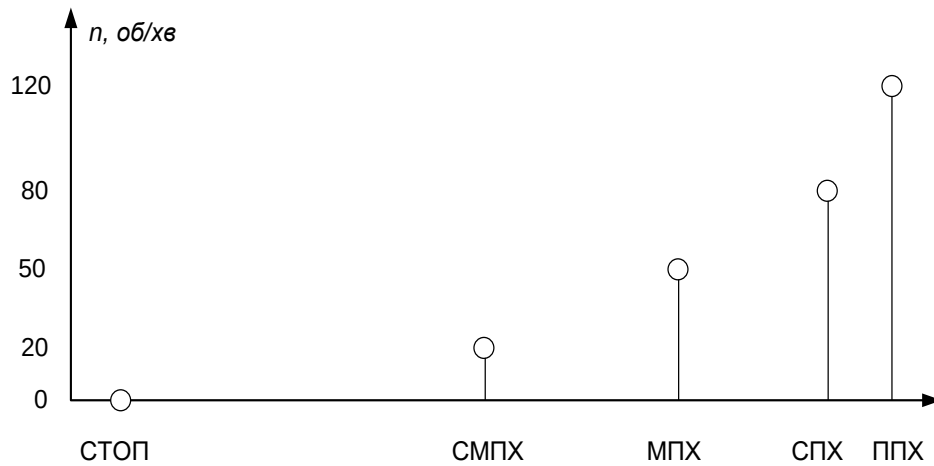


Рис. 5 – Відповідні режими роботи головних двигунів
(Джерело: розроблено автором)

За результатами моделювання (рис. 6) для ділянки акваторії ріки, зображеної на рис. 3, встановлено таке.

- 1) Утримання судна на траєкторії з постійним радіусом кривизни за допомогою регулятора (2) є адекватним з позиції судноводіння.
- 2) Відхилення на ділянках траєкторії з постійним радіусом кривизни не перевищує 10 м.
- 3) При переходах між дугами траєкторії виникають відхилення, які не перевищують 30 м.

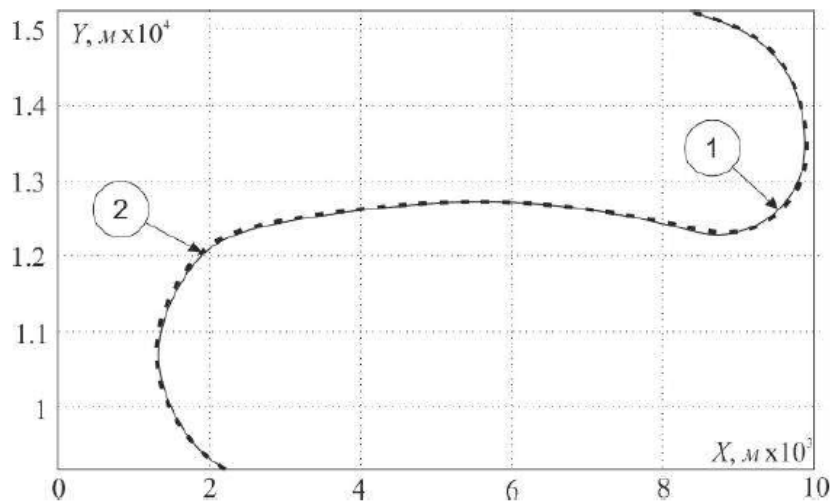


Рисунок 6 – Управління судном на криволінійній траєкторії:
1 – виконана траєкторія; 2 – програмна траєкторія
(Джерело: розроблено автором)

4) Одержані відхилення є допустимою помилкою управління, що обумовлена фізичною неможливістю судна повторити траєкторію, задану дугами окружностей в околиці її вершин.

За контрольну акваторію для моделювання процесів проводки судна до причалу розглянемо конфігурацію умовного порту, зображену на рис. 7, де крива 1 показує типовий трек судна при лоцманській проводці вхідних суден до причалу 3, а крива 2 – траєкторію, задану системою рівнянь (5).

Параметри для даного моделювання вибрані з таблиці 1, а структура й параметри регулятора курсу задані виразами (1-4). Отже, даний регулятор автоматично враховує радіус кривизни траєкторії, незалежно від того, чи він є постійним як у випадку дуг окружності, або змінним як у випадку сигмоїдальних функцій.

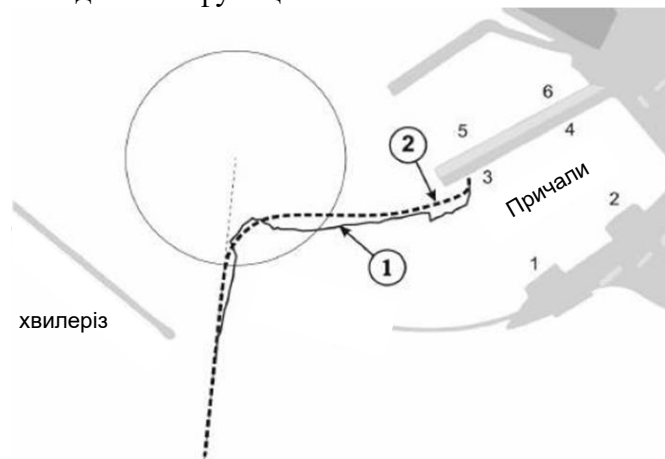


Рисунок 7 – Підхід до умовного порту
(Джерело: розроблено автором)

Регулятор поставив судно до причалу, але при цьому припустив два відхилення від заданої траєкторії (рис. 8). Це пояснюється недостатнім врахуванням зниження керованості судна при зниженні поздовжньої швидкості при завданні траєкторії траєкторними функціями, зміною поздовжньої швидкості залежно від кутової і нестачою ресурсів керованості судна.

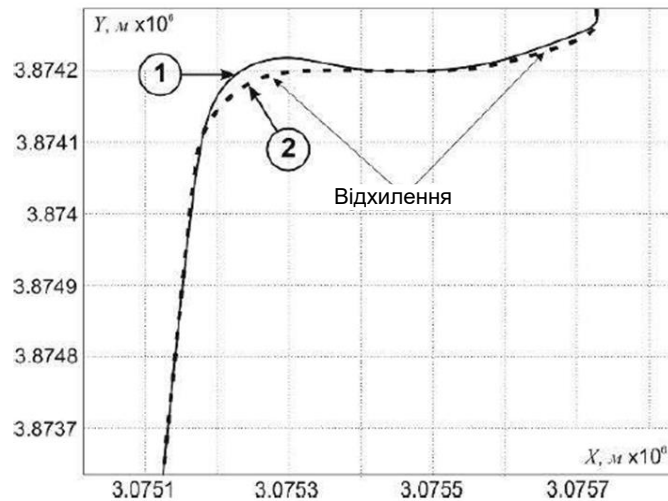


Рисунок 8 – Шлях судна та виниклі відхилення при русі за траєкторією
(Джерело: розроблено автором)

Дана проблема вирішується шляхом урахування у методі управління умов, коли регулятор надає машині необхідні впливи при недостатній ефективності керма. Крім того, для більш пологої й завчасної зміни курсу і кутової швидкості корегуються траєкторні функції. Нарешті, на ділянках з відхиленнями для подолання нестачі ресурсів можливе використання буксирів.

Висновки. На основі теорії автоматичного управління розроблені принципи формування управляючих впливів для кожного з типів траєкторій. Введення додаткового каналу кутового прискорення дозволяє перетворити коливальні перехідні процеси в аперіодичні при управлінні нестійким на курсі судном, що розширює область стійкості системи управління й підвищує якість управління судном.

Запропонований метод управління рухом судна в портовій відрізняється застосуванням апроксимуючої сигмоїдальної траєкторної функції, яка описує режими зміни курсу, швидкості, куту дрейфу судна за певною траєкторією і дозволяє описувати програмні рухи судна гладкими кривими у портовій акваторії.

За результатами моделювання руху судна підтверджено застосовність запропонованих регуляторів при рішенні завдань утримання судна на відповідних типах траєкторій.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO // Accuracy Standards for Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/AccuracyStandardsforNavigation/Pages/Default.aspx>. Res. A.529 (13) Nov. 1983.
2. IMO // Accuracy Standards for Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/AccuracyStandardsforNavigation/Pages/Default.aspx>. Res. A.815 (19) Nov. 1983.
3. IMO / E-Navigation [Internet portal]. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx>.
4. Seignette, R. (2012). Vessel traffic management in the Port of Rotterdam. Port Technology International, 105- 107.
5. Chang, S. J. (2004). Development and Analysis of AIS Applications as an Efficient Tool for Vessel Traffic Service. Paper presented at the OCEANS '04.
6. Høye, G. K., Eriksen, T., Meland, B. J., & Narheim, B. T. (2008). Space-based AIS for global maritime traffic monitoring Acta Astronautica, 62, 240-245.
7. Kao, S.-L., Lee, K.-T., Chang, K.-Y., & Ko, M.-D. (2007). A Fuzzy Logic Method for Collision

Avoidance in Vessel Traffic Service. The Journal of Navigation (60), 17-31.

8. Wawruch, R. (2004). Quality of information about tracked vessel in VTS centre. Paper presented at the 461h International Symposium Electronics in Marine, ELMAR-2004., Zadar. Croatia.

9. Vespe, M., Sciotti, M., Burro, F., Battistello, G., & Sorge, S. (2008). Decision Support Platforms for Satellite-Extended Vessel Traffic Services. Paper presented at the RADAR.

10. Wiersma, E., Jarvis, D., & Granholm, G. (2000). VTS Operator performance and acceptance of a short-term path prediction display in a low density traffic area. Paper presented at the IEA/HFES 2000 Congress.

11. Wiersma, J.W.F. , & Mastenbroek, N. (1998). Measurement of Vessel Traffic Service Operator Performance. AI & Society, 12, 78-86.

12. Nuutinen, M., Savioja, P., & Sonninen, S. (2007). Challenges of developing the complex socio-technical system: Realising the present, acknowledging the past, and envisaging the future of vessel traffic services. Applied Ergonomics, 28, 513-524. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2006.10.004>

Gusak I.L., Yarmak V.L.

PROPOSALS FOR THE DEVELOPMENT OF METHODS OF SHIP TRAFFIC CONTROL IN THE PORT WATER AREA

During the study, the methods of setting the ship's motion trajectory for different navigation areas with their inherent navigation conditions based on the methods of analytical geometry and physical principles of ship manoeuvring are proposed. The mathematical apparatus used for setting trajectory lines has proven to be effective, which facilitates the operation of automatic controllers. For each of the trajectory types, a functional principle of forming control influences and pseudo-controls based on the theory of automatic control has been developed. The controllers are based on the principles of PID control. The introduction of an additional angular acceleration channel in the control of an unstable ship makes it possible to convert oscillatory transients into aperiodic ones. This approach expands the stability range of the control system and significantly improves the quality of control in terms of efficiency and safety due to the possibility of increasing the control system gain. According to the results of modelling the ship's motion on each type of trajectory with the selected controller, the deviations from the given trajectories do not exceed the value permissible according to safety criteria for each of the navigation areas.

Keywords: automation, navigation, knowledge base, navigation safety, danger zone, decision support, manoeuvring, ship route, model, navigational hazard, navigational situation, navigation restrictions, obstacle, port, port area, decision making, programmed course value, safety management system, navigator, navigation, trajectory, ship motion control, formalisation, artificial intelligence.