

УДК 629.5.072.4.001.9

**ANALYSIS OF METHODS FOR PLANNING THE SHIP'S TRAJECTORY**  
**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ СУДЕН****Hatsenko L. / Гаценко Л. В.***PhD / докт. філос.**ORCID: 0000-0003-1210-5726***Cherednyk V. / Чередник В. М.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.**ORCID: 0000-0002-2165-5394***Fuklyev O. / Фуклев О. І.***Postgraduate student / аспірант**ORCID: 0000-0002-9674-3743**National Transport University, 1, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka St.,**Kyiv, Ukraine, 01010**Національний транспортний університет, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1,  
м. Київ, Україна, 01010*

**Анотація.** У роботі проводиться аналіз методів планування траєкторії руху суден. Представленні основні етапи роботи при плануванні траєкторії. Розглянуті вимоги щодо траєкторій, що застосовуються для завдання руху судна.

**Ключові слова:** судноводіння, траєкторія руху, планування.

**Abstract.** The paper analyzes methods for planning the trajectory of vessel movement. The main stages of work in trajectory planning are presented. The requirements for trajectories used for the task of vessel movement are considered.

**Key words:** navigation, trajectory, planning.

**Вступ** Маневрування суден у стиснених водах є одним з найбільш складних видів маневру, оскільки, на відміну від відкритої акваторії, на судно діє значно більша кількість факторів, що вимагає від судноводія їх врахування. Для забезпечення безпеки руху судна ряд функцій судноводія передаються автоматичним системам судноводіння. Одним із найважливіших завдань при побудові систем автоматичного управління судном є прогнозування руху при маневруванні та формування програмних управлінь у заданий проміжок часу. Для цього застосовуються методи та алгоритми сучасної теорії управління із застосуванням ідентифікації моделей та адаптації процесів управління суднами. При адаптивному підході модель об'єкта та процесів управління в тій чи іншій формі однозначно формується за наслідками реального руху [1].

**Основний текст**

Планування траєкторії зводиться до її завдання й побудови в просторі за відомими координатами двох точок ( $A$ ,  $B$ ) (рисунок 1). Якщо рухомий об'єкт

(судно) є локально керованим, то можна з будь-якої точки  $A$  простору в початковий момент часу перевести його в будь-яку іншу – кінцеву точку  $B$  за час  $t_k$ . Для цього необхідно знайти відповідну керуючу функцію та вирішити класичне завдання планування, відоме як «проблема переміщення рояля».

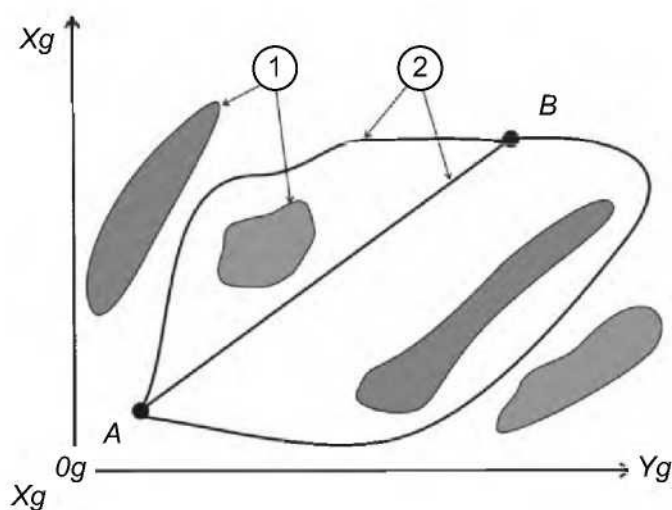
Однак при такому формулюванні, не наклавши обмежень, завдання має множину рішень. Можливі переміщення рухомого об'єкта (рисунок 1) уздовж прямої, що з'єднує початкову й кінцеву точки (прямолінійна траєкторія), або уздовж деякої гладкої кривої, задовольняючи ряд обмежень на початковій й кінцевій ділянках траєкторії (згладжена траєкторія). Отже, при плануванні траєкторій та режимів руху суден виділяють такі етапи:

1) формування послідовності вузлових точок у декартовому просторі, розташованих уздовж планованої траєкторії;

2) завдання обмежень на положення, швидкість та прискорення узагальнених координат рухомого об'єкта у вузлових точках траєкторії;

3) вибір з деякого класу аналітичної функції (апроксимуючої), що проходить через усі вузлові точки та задовольняє заданим обмеженням бажаної траєкторії;

4) завдання режимів руху рухомого об'єкта за спланованою траєкторією.



**Рисунок 1 – Переведення рухомого об'єкта з точки в точку в просторі координат: 1 – навігаційні небезпеки; 2 – можливі траєкторії руху об'єкту**

Авторська розробка

Апроксимація заданої траєкторії в кінематичних параметрах або декартових координатах виконується планувальником. У результаті отримується послідовність точок, через які повинен пройти рухомий об'єкт при русі від початкової до кінцевої точки траєкторії (рисунк 2).

Якщо послідовність заданих точок траєкторії (векторів у просторі кінематичних параметрів) формується без урахувань обмежень динаміки рухомого об'єкта, то при наступному управлінні рухомих об'єктом за спланованою траєкторією можуть виникнути значні відхилення відстеження.

Отже, плануючи траєкторію, необхідно виділити характерні шляхові точки (точки додатку силових впливів), у яких буде проводитися перемикання керуючих функцій при переході з одного прямолінійного або криволінійного відрізка траєкторії на наступний.



**Рисунок 2 – Планувальник траєкторій**

*Авторська розробка*

Планування траєкторії рухомого об'єкта полягає у визначенні необхідної кількості відрізків траєкторії зі значеннями похідних вектора швидкості, моментів перемикання керуючих функцій для забезпечення переходу об'єкта з даного відрізка траєкторії на наступний.

Помилки в управлінні судном – результат неправильної оцінки та урахування судноводієм діючих на судно сил та моментів, а також ступеня їх впливу на параметри руху.

Дослідження [2, 3] свідчать, що траєкторії, застосовувані для завдання руху судна, повинні задовольняти таким вимогам:

1) мати єдині принципи завдання й формування;

2) координати точок траєкторії та їх зміна повинні лежати в межах геометричних і фізичних обмежень маневрування, що враховують можливість гальмування або розгону, або зміни напрямку руху, тобто траєкторія повинна бути фізично реалізованою;

3) характерні точки траєкторії повинні отримуватися нерекурентним способом з відсутністю пошуків рухів типу «блукання». Синтез алгоритмів управління зі зворотним зв'язком може здійснюватися у відхиленнях від програмної траєкторії;

4) допустима траєкторія повинна враховувати динаміку судна й виконавчих пристроїв (гвинт, кермо), тобто мати можливість двічі диференціюватися (неможливо миттєво перекласти кермо на заданий кут або набрати задану частоту обертання гвинта, кутову швидкість обертання). Якщо на малих швидкостях інерційністю органів управління зневажають, то для високих швидкостей прийнятна точність неможлива без урахування даної фізичної особливості;

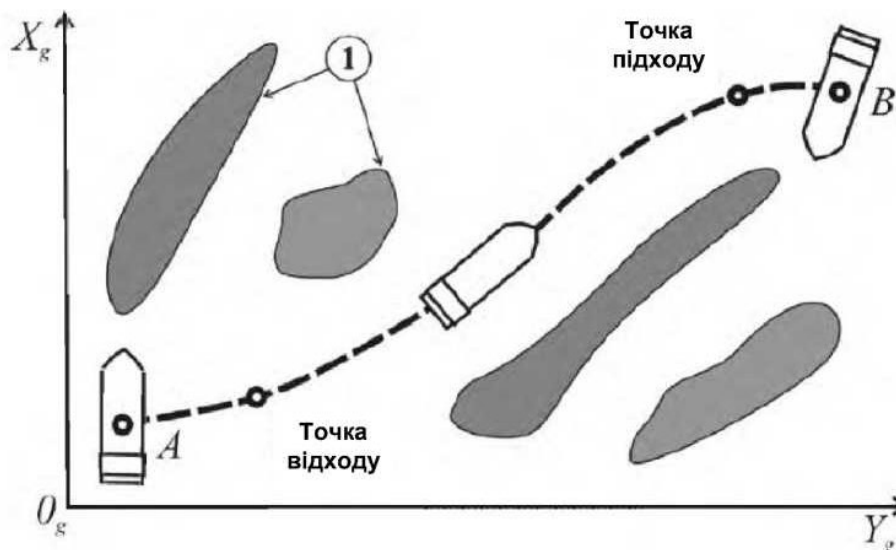
5) необхідно враховувати обмеження на максимальну кривизну траєкторії (мінімальний радіус кривизни траєкторії), що відповідає граничним перекладкам керма; максимальної потужності рушія й підрулюючого обладнання; упору, створюваному буксирами. У роботі [4] пропонується задавати судновій управляючій системі динамічні властивості у вигляді обмеження на кутову швидкість повороту, що дозволяє визначити програмний режим руху судна на ділянках маршруту з постійною кривизною (з постійним прискоренням кутової швидкості):

$$\frac{d\psi}{dt} \leq r_{max}; \quad \frac{d\psi}{dS} \leq \frac{1}{R_{min}} = k_{max}, \quad (1)$$

де  $r_{max}$  – максимальна кутова швидкість судна;  $R_{min}$  – мінімальний радіус циркуляції;  $k_{max}$  – максимально допустиме значення кривизни.

6) при завданні траєкторії відходу від причалу або підходу судна до нього рух у загальному випадку рух повинен бути спрямований від причалу або до

нього (рисунок 3);



**Рисунок 3 – Обмеження щодо положення для траєкторії в просторі кінематичних параметрів**

*Авторська розробка*

7) апроксимуюча траєкторія проходить через усі вузлові точки;

8) апроксимуюча крива не вносить у маршрут додаткових точок перегину;

9) величина апроксимуючої функції повинна приймати нульові значення, коли точка управління рухомим об'єктом перебуває на траєкторії, і зменшується або збільшується, при наближенні / видаленні від траєкторії, оскільки при відстеженні траєкторії потрібно обчислювати відстань від точки управління рухомим об'єктом до траєкторії й похідні від цього відстані;

10) у критеріях безпеки та якості траєкторії повинні враховуватися знання, досвід, навички команди судноводія, накопичені у процесі роботи, місцеві правила, звичаї порту;

11) забезпечення безпеки плавання за поточними навігаційними умовами;

12) алгоритм системи управління повинен забезпечити переміщення об'єкта з початкової точки в задану цільову точку з виконанням таких умов:

$$D_i \geq D_{min}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість найближчих точок, що належать одній або декільком перешкодам;  $D_i$  – поточна найменша відстань від рухомого об'єкта до небезпеки;  $D_{min}$  – допустима найкоротша відстань від точки рухомого об'єкта

до небезпеки.

Для виконання цих суперечливих вимог доцільно скористатися природним поділом рухів судна на прямолінійні й криволінійні, які використовуються в практичному судноводінні. Крім того, такий підхід також спрощує синтез алгоритмів управління судном та відстеження траєкторій за методом зворотних завдань динаміки.

**Висновки.** Реалізація маневру в ручному або автоматичному режимі з метою зміни напрямку руху судна безпечною траєкторією проводиться шляхом переключення керма й полягає в його переміщенні з однієї лінії прямого шляху на іншу або виконанні спеціальних маневрів.

Проблема управління рухом судна за траєкторією у стиснутих водах та на мілководді належить до найбільш актуальних, спрямованих на підвищення безпеки мореплавання та потреби подальшого розвитку та вдосконалення методів її вирішення.

#### Література:

1. Гаценко Л.В., Чередник В.М. Удосконалення методів визначення параметрів контролю та діагностування радіоелектронних систем засобів водного транспорту: монографія. Київ: ДУІТ, 2024. 162 с. ISBN 978-617-566-860-3.
2. Tsou, M.C., Kao, S.L., Su, C.M., Decision support from genetic algorithm for ship collision avoidance route planning and alerts // The Journal of Navigation. 2010. Vol. 63, No. 1. Pp. 1-16.
3. Yodegord, V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models [Text] / Master of Science in Engineering Cybernetics. // Norwegian University of Science and Technology. 2009. 100 p.
4. Perez T., Blanke M. Mathematical Ship Modeling for Control Applications, Technical Report, The University of Newcastle, Australia and Technical University of Denmark, Lyngby, 2005. 22 p.

Тези відправлено: 23.08.2025 р.      © Гаценко Л.В., Чередник В.М., Фуклев О.І.