

УДК 629.12:514.18

**Валерій БОРИСЕНКО**

borisenko.valery@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0857-0708

**Сергій СЛОБОДЯН**

slo71@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2439-074X

**Андрій УСТЕНКО**

austenko0@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0546-7019

м. Миколаїв

## МОДЕЛЮВАННЯ КОРАБЕЛЬНИХ КРИВИХ З КВАДРАТИЧНИМ ЗАКОНОМ РОЗПОДІЛУ КРИВИНИ

*Стаття присвячена розробці методу геометричного моделювання корабельних кривих із використанням їх натуральної параметризації, коли параметром виступає довжина дуги. Для забезпечення розв'язання поставленої задачі застосовується квадратична залежність кривини кривої від її довжини. Визначення невідомих коефіцієнтів квадратичної залежності та довжина модельованої кривої реалізується числовим методом мінімізації відхилення проміжно отриманої кінцевої точки кривої від заданої.*

*Ключові слова: моделювання геометричне, корабельна крива, кривина, розподіл квадратичний, кути загострення, коефіцієнт повноти.*

**Постановка проблеми.** Процес удосконалення суден весь час супроводжується пошуком нових математичних методів моделювання їх зовнішньої форми, особливо підводної частини. Відомо, що зовнішня обшивка корпусу судна описується поверхнею складної геометричної форми. Для її наочного уявлення при проектуванні судна будується теоретичне креслення, на якому корпус судна зображується в трьох взаємопов'язаних проекціях на ортогональній сітці. Перетини поверхні трьома системами ортогональних площин визначають на кресленні сукупність ліній, які називають шпангоутами, ватерлініями і батоксами. Однією з важких і складних проектних робіт є узгодження всіх цих ліній на трьох проекціях теоретичного креслення.

Отже, теоретичне креслення корпусу судна формується трьома сім'ями кривих ліній: шпангоутів, ватерліній і батоксів. У практиці суднобудування ці лінії отримали назву корабельних кривих.

Застосування ЕОМ для розв'язання задач створення нових типів суден вимагає перегляду традиційних методів його проектування. Процес створення обводів судна починається з визначення головних розмірів і коефіцієнтів повноти та підбору відповідного прототипу, зрозуміло, якщо такий існує. Розробка проектів принципово нових типів суден, наприклад, газозовів, суден для перевезення автотранспортних засобів тощо, вимагає застосування нових підходів до побудови корабельних кривих.

На початковій стадії проектування обводи корпусу судна задаються у вигляді деякої характерної поверхні, яка на наступних стадіях проектування піддається певним змінам, обумовленим конструктивними і технологічними доопрацюваннями корпусу судна в процесі його проектування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зараз існує ряд методів аналітичного подання теоретичного креслення, придатних для опису поверхонь корпусу судна [1, 2, 5–7]. В суднобудуванні застосовуються як давно відомі методи опису корабельних кривих [8, 10], так і розвиваються нові підходи до їх моделювання [6].

Засновником теорії проектування суден вважається Фредерік – Хенрік Чапман (1721–1808 рр.) – шведський корабельний інженер, вчений, віце-адмірал, автор багатьох праць з проектування суден і суднобудування, член Стокгольмської академії наук [8].

В царській Росії за ініціативою командувача Чорноморського флоту адмірала О. С. Грейга формулу Чапмана застосовували в першій половині 19 ст. при проектуванні чорноморських кораблів, які будувалися на верфях Миколаєва.

Аналіз літературних джерел показав, що при моделюванні плоских і просторових кривих ліній широко застосовуються лінійні, квадратичні, кубічні графіки розподілу кривини від довжини дуги [3, 4].

**Метою цієї статті** є розробка методу геометричного моделювання корабельних кривих із застосуванням їх натуральної параметризації, коли за параметр приймається довжина дуги кривої. Для замкнення поставленої задачі застосовується квадратичний закон розподілу кривини, невідомі коефіцієнти якого та довжина дуги визначаються шляхом мінімізації відхилення проміжно отриманої кінцевої точки кривої від заданої за умовами задачі кінцевої точки модельованої кривої.

**Основні результати дослідження.** Корабельні криві будемо будувати в прямокутній системі координат  $Oxy$  (рис. 1). На цьому рисунку літерою  $\psi$  позначено кут загострення корабельної кривої, літерою  $G$  – область, обмежену корабельною кривою та осями координат. Розміри  $B$  і  $L$  відповідають напівширині та напівдовжині корпусу судна.

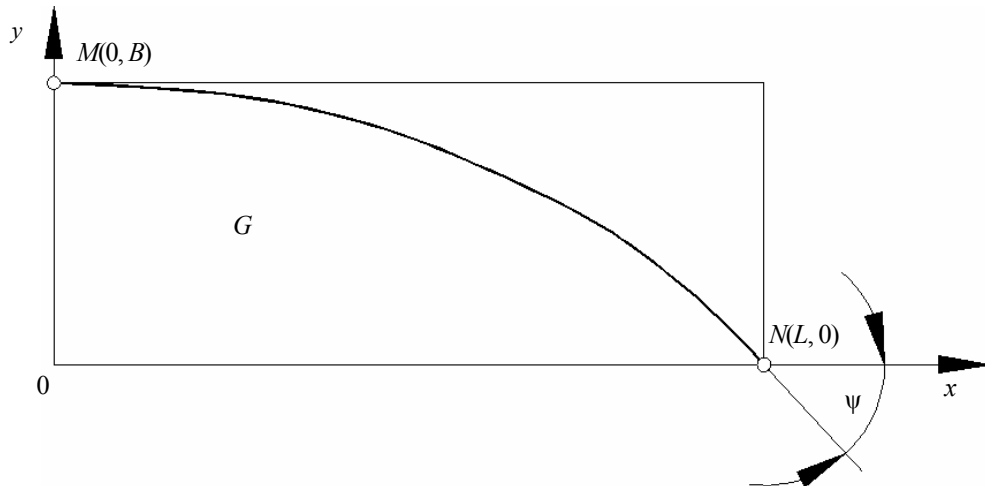


Рис. 1. Приклад корабельної кривої

Площа фігури  $G$ , обмеженої графіком кривої та координатними осями, суттєво залежить від форми корабельної кривої. У суднобудуванні прийнято застосовувати коефіцієнт  $\alpha$ , який називають коефіцієнтом повноти. Цей коефіцієнт визначається як відношення площі фігури, обмеженої графіком функції та координатними осями, до площі обмежуючого прямокутника.

З диференціальної геометрії відомо, що диференціал кута, утвореного між дотичною до кривої та віссю абсцис, визначається добутком диференціала довжини дуги на її кривину

$$d\varphi = k(s)ds,$$

де  $k(s)$  – кривина кривої.

Інтегруванням цього виразу можна визначити залежність розподілу кута нахилу дотичної до кривої від довжини її дуги

$$\varphi(s) = \varphi(0) + \int_0^s k(s) ds, \quad (1)$$

де  $\varphi(0)$  – кут нахилу дотичної в початковій точці кривої, у нашому випадку в точці  $M$  (див. рис. 1).

Для геометричного моделювання корабельних кривих застосуємо рівняння залежності кривини модельованої кривої від довжини її дуги в наступному вигляді:

$$k(s) = as^2 + bs + c, \quad (2)$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – коефіцієнти квадратичної залежності кривини кривої від її довжини.

Проінтегрувавши залежність (1) з урахуванням закону розподілу кривини, взятому у вигляді (2), будемо мати:

$$\varphi(s) = \varphi(0) + \frac{as^3}{3} + \frac{bs^2}{2} + cs. \quad (3)$$

Параметричні рівняння кривої, що генерується на базі квадратичного розподілу кривини, матимуть вигляд:

$$x(s) = x(0) + \int_0^s \cos \left[ \varphi(0) + \frac{as^3}{3} + \frac{bs^2}{2} + cs \right] ds; \quad y(s) = y(0) + \int_0^s \sin \left[ \varphi(0) + \frac{as^3}{3} + \frac{bs^2}{2} + cs \right] ds. \quad (4)$$

Скористатися залежностями (2) – (4) можна за умови, що відомі коефіцієнти  $a$ ,  $b$  і  $c$  квадратичного закону розподілу кривини. Але для того, щоб крива прийшла в задану точку площини, до вказаних коефіцієнтів треба додати ще довжину дуги  $S$ , яка також є величиною невідомою.

Таким чином, маємо чотири невідомих величини, які аналітично визначити неможливо. Тому розглянемо їх знаходження числовим методом.

Записавши вираз (3) до кінцевої точки модельованої корабельної кривої, для якої відомі початковий і кінцевий кути нахилу дотичної (в початковій точці  $M$  цей кут дорівнює нулю градусів, а в кінцевій точці  $N$  – куту загострення  $\psi$ ), матимемо можливість знайти вираз для невідомого коефіцієнта  $a$

$$a = \frac{3}{S^2} \left( \frac{\Delta\varphi}{S} - \frac{bs}{2} - c \right),$$

де  $\Delta\varphi = \varphi(S) - \varphi(0)$ ;  $S$  – довжина дуги корабельної кривої.

Завдяки цим діям кількість невідомих величин зведена до трьох. Коефіцієнти  $b$  і  $c$  та довжину дуги  $S$  визначимо шляхом розв'язання задачі мінімізації відхилення в процесі пошуку проміжно отриманої кінцевої точки від заданої точки  $N$  (див. рис. 1), в якій за функцію цілі можна було б взяти наступну залежність

$$f = \sqrt{(x_N - x_{N'})^2 + (y_N - y_{N'})^2},$$

де  $N'$  – проміжно отримана кінцева точка ватерлінії.

Зазначимо, що в практиці моделювання корабельних кривих, крім кута загострення кривої  $\psi$ , задають також коефіцієнт  $\alpha$ , тобто коефіцієнт повноти модельованої кривої.

З урахуванням цих обставин цільову функцію треба взяти у наступному вигляді

$$f = \sqrt{(x_N - x_{N'})^2 + (y_N - y_{N'})^2} + \xi(\alpha - \alpha')^2. \quad (5)$$

У цьому виразі  $\alpha'$  – проміжно отриманий коефіцієнт повноти,  $\xi$  – експериментальний коефіцієнт.

Для мінімізації функції цілі застосовано високоефективний алгоритм, запропонований Хуком – Дживсом [9]. Варійованими параметрами в задачі мінімізації виступають коефіцієнти  $b$  і  $c$  та довжина дуги  $S$ .

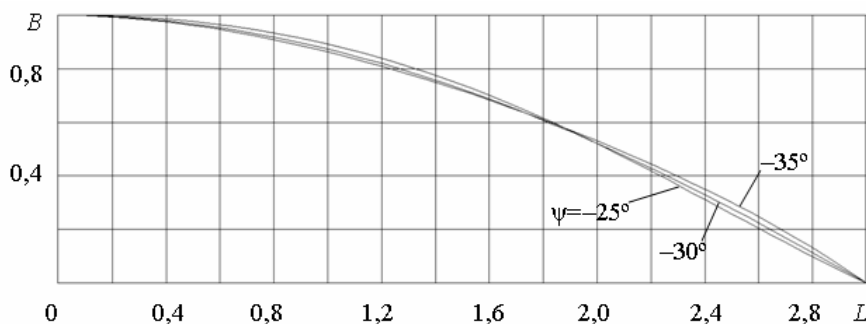


Рис. 2. Вплив кута  $\psi$  на корабельні криві з квадратичним законом розподілу кривини

На рис. 2 наведені результати моделювання трьох корабельних кривих, отриманих за умови варіювання кута загострення  $\psi$  в інтервалі від  $-25^\circ$  до  $-35^\circ$  з кроком  $-5^\circ$ . Коефіцієнт повноти  $\alpha$  дорівнював 0,65.

Вплив коефіцієнта повноти  $\alpha$  на форму корабельних кривих при сталому значенні кута загострення  $\psi = -40^\circ$  продемонстровано на рис. 3. Коефіцієнт повноти  $\alpha$  мав значення 0,65 і 0,70.

Відзначимо, що треба дуже уважно підходити до вибору параметрів таких, як коефіцієнт повноти і кут загострення. Виникають певні труднощі при отриманні результатів, коли один із параметрів варіюється.

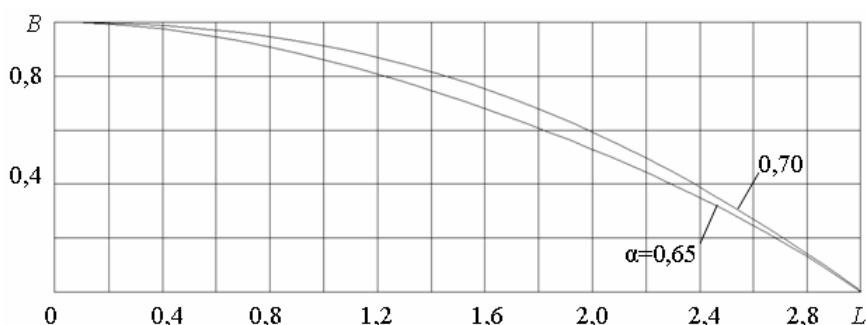


Рис. 3. Вплив коефіцієнта повноти  $\alpha$  на корабельні криві з квадратичним законом розподілу кривини

У той же час, якщо треба змодельовати одну криву (без варіювання параметрів), то результат можна отримати навіть при не дуже вдалому сполученні таких параметрів, як коефіцієнт повноти і кут загострення корабельної кривої.

Так, на рис. 4 показана корабельна крива, яка змодельована при достатньо високому значенні коефіцієнта повноти, рівному 0,75, і доволі малому значенні кута загострення, рівному  $-20^\circ$ .

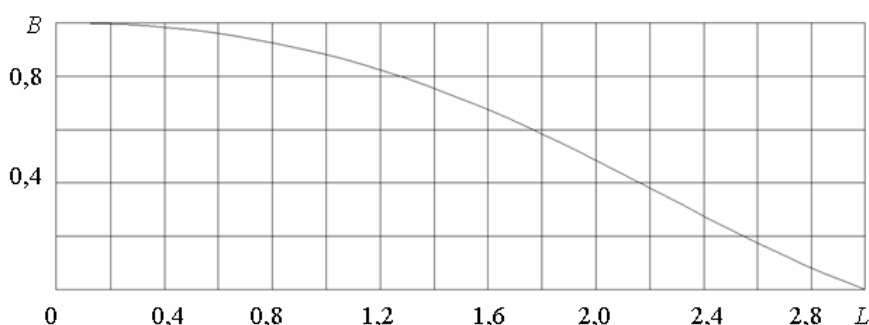


Рис. 4. Корабельна крива, побудована при коефіцієнті повноти  $\alpha=0,75$  і куті загострення  $\psi=-20^\circ$

Ті проблеми, які виявляються при моделюванні корабельних кривих за умови варіювання одного з вказаних параметрів, пояснюються чутливістю оптимізаційної задачі до величини коефіцієнта  $\xi$  у формулі (5).

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Запропонований метод геометричного моделювання корабельних кривих базується на застосуванні параметричних кривих у натуральній параметризації, кривина яких підпорядковується квадратичній залежності від довжини дуги. Проведені розрахунки з візуалізацією отриманих результатів продемонстрували працездатність розробленого методу моделювання корабельних кривих в широкому діапазоні варіювання вихідних даних і забезпеченням заданих кутів загострення кривих і коефіцієнтів повноти.

Подальші дослідження треба спрямувати на розробку заходів, які б надавали можливість забезпечувати узгоджене теоретичне креслення корпусу судна.

### Список використаних джерел

1. Ашик В. В. Проектирование судов : учебник [Текст] / В. В. Ашик. — Л. : Судостроение, 1985. — 320 с.
2. Ашик В. В. Методы построения и согласования судовой поверхности с помощью ЭВМ / В. В. Ашик, А. А. Богданов, И. Б. Мараева, А. Н. Шебалов. — Л. : Судостроение, 1978. — 78 с.
3. Борисенко В. Д. Геометричне моделювання плоских кривих із застосуванням лінійного елемента кривини / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. С. Спіцин // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К. : КНУБА, 2006. — Вип. 76. — С. 43—49.

4. Борисенко В. Д. Геометричне моделювання плоского криволінійного обводу за заданою кривиною / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. Є. Спіцин // Праці ХДУХТ "Геометричне та комп'ютерне моделювання". — Харків : ХДУХТ, 2004. — Вип. 5. — С. 30—34.
5. Бронников А. В. Проектирование судов / А. В. Бронников. — Л. : Судостроение, 1990. — 327 с.
6. Ковалев В. А. Новые методы автоматизации проектирования судовой поверхности [Текст] / В. А. Ковалев. — Л. : Судостроение, 1982. — 212 с.
7. Кротов О. І. Проектування морських транспортних суден : навчальний посібник / О. І. Кротов, В. І. Голіков, О. Ю. Єганов, О. В. Бондаренко. — Миколаїв : УДМУ, 2003. — 156 с.
8. Чапман Ф. Г. Опыт теоретического рассуждения об удобнейшем образовании и надлежащей величине линейных кораблей, а равно фрегатов и других меньших судов [Текст] / Ф. Г. Чапман. — Спб. : Тип. Морского Мин., 1836. — XLII. — 166 с.
9. Hooke R. Direct search solution of numerical and statistical problems / R. Hooke, T. A. Jeeves // Journal of the ACM. — 1961. — Vol. 8, No 2. — P. 212–229.
10. Taylor D. W. On ships forms derived by formula [Text] / D. W. Taylor // Trans. Soc. Naval Archit. and Marine Eng., 1903. — V. XI. — P. 242.

**Valeriy BORISENKO, Sergey SLOBODYAN, Andriy USTENKO**  
 Mykolaiv

### **MODELING OF SHIP CURVES WITH A QUADRATIC LAW OF CURVATURE DISTRIBUTION**

*The article is devoted to the development of the method of geometric modelling of ship curves using natural parameterization, when the parameter is the arc length. To ensure the solution of the problem used a quadratic dependence curvature of the curve of its length. Identifying unknown coefficients and quadratic dependence curve length simulated numerically realized by minimizing the deviation obtained intermediate endpoint from a given curve.*

*Keywords: geometric modelling, ship curve, curvature, quadratic distribution, angle of sharpening, coefficient of completeness.*

**Валерий БОРИСЕНКО, Сергей СЛОБОДЯН, Андрей УСТЕНКО**  
 г. Николаев

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРАБЕЛЬНЫХ КРИВЫХ С КВАДРАТИЧНЫМ ЗАКОНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРИВИЗНЫ**

*Статья посвящена разработке метода геометрического моделирования корабельных кривых с использованием естественной параметризации, когда параметром выступает длина дуги. Для обеспечения решения поставленной задачи применяется квадратичная зависимость кривизны кривой от ее длины. Определение неизвестных коэффициентов квадратичной зависимости и длина моделируемой кривой реализуется численным методом минимизации отклонения промежуточно полученной конечной точки кривой от заданной.*

*Ключевые слова: моделирование геометрическое, корабельная кривая, кривизна, распределение квадратичное, угол заострения, коэффициент полноты.*

Стаття надійшла до редколегії 12.04.2017