

УДК 629.5.01

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.3\(496\).2](https://doi.org/10.15589/znп2024.3(496).2)

PERFORMANCE ANALYSIS OF HALF-TON CLASS YACHTS

АНАЛІЗ ХОДОВОСТІ ЯХТ НАПІВТОННОГО КЛАСУ

Anatoliy Ya. Kazariezov¹

KazariezovAnatoli1950@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8586-5596

Mykola Y. Pashchenko²

vipmkua@gmail.com

ORCID: 0009-0002-0965-0571

Yuriy M. Pashchenko³

yurii.pashchenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8307-0316

А. Я. Казарєзов¹,

д-р. техн. наук, проф.

М. Ю. Пащенко²,**Ю. М. Пащенко³,**

канд. техн. наук, доц.

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*²*Antares Small Research and Production Enterprise, Mykolaiv*²*Мале науково-виробниче підприємство "Антарес", м. Миколаїв*³*Mykolaiv scientific and recent expert-criminalistics center, Mykolaiv*³*Миколаївський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр, м. Миколаїв*

Abstract. Target. The purpose of the study is to improve the process of designing the contours of cruising and racing yachts of the half-ton class at the initial stages of design.

Method. According to the design methods, an analysis of the influence of the contours of the yachts on the running qualities was carried out in order to reduce resistance.

The results. The article examines the outline forms of cruising and racing yachts of the "half-ton" class (with a racing score of IOR = 6.6), which are the best option for a yacht for sea racing.

"Half-tons" are fast-moving, more easily cope with the oncoming wave, have greater options for selecting sails depending on the wind conditions. At the same time, compared to the "one-ton" yacht, the "half-ton" class yacht has a smaller draft, half the displacement and, accordingly, the cost.

As previous studies show, the universal "half-ton" can become a basic model for creating a number of modern, relatively light and inexpensive cruising and racing yachts. When we talk about the versatility of "half-tons", we mean that they can be used in a wide variety of conditions. Experience sailing in shallow areas of sea bays, large rivers and lakes suggests that with a draft of 1.2 m, the yacht can approach unequipped shores. Undoubtedly, for such conditions, it will be convenient to have a variant of a dinghy with two shortened false schools – with a draft of 1.1-1.2 m. For purely marine conditions, a keel variant of a dinghy with a draft of 1.8-2.1 m can be made in the same hull.

In the virtual environment, with the help of the "Bentley Engineering" complex of programs, the formation of the theoretical surface of three variants of yachts was made: with a radial hull, IOR-type hulls and "Sharpie" hulls, the sailing polars of maneuverability were calculated, and the requirements of the classification society for their stability were ensured.

The proposed project of a half-ton class yacht with sharpie-type contours has good running qualities and can be offered for independent construction by amateurs from sheet material.

Scientific novelty. The paper examines the issues of creating a methodology for the development of half-ton cruisers at the initial stage, which is based on the use of mathematical modeling.

Practical significance. The main provisions of the initial design methodology considered in the work can be used in the task of choosing the optimal one from the point of view of economy and efficiency of operation of project tugboats at the stage of initial design.

Key words: half-ton class yacht; initial design; performance; contours of the body; stability; analytical research.

Анотація. Метою дослідження є вдосконалення процесу проектування обводів крейсерсько-перегонових яхт напівтонного класу на початкових стадіях проектування.

Методика. За методами чисельного моделювання проведено аналіз впливу обводів яхт на ходові якості з метою зменшення опору.

Результати. В статті розглядаються форми обводів крейсерсько-перегонових яхт «напівтоного» класу (з перегонним балом IOR = 6,6) які є оптимальним варіантом яхти для морських перегонів.

«Напівтонники» швидкохідні, легше справляються із зустрічною хвилею, мають більші можливості підбору вітрил в залежності від вітрових умов. У той же час, в порівнянні з «однотонником», яхта «напівтоного» класу має меншу осадку, вдвічі меншу водотоннажність і відповідно вартість.

Як показують попередні дослідження, універсальний «напівтонник» може стати базовою моделлю для створення ряду сучасних відносно легких і недорогих крейсерсько-перегонових яхт. Кажучи про універсальність «напівтонників», ми маємо на увазі те, що їх можна використовувати в самих різних умовах. Досвід плавання в мілководних районах морських заток, великих річок і озер підказує, що при осадці 1,2 м яхта може підходити до необладнаних берегів. Для таких умов, безсумнівно, буде зручний варіант яхти з двома укороченими фальшкілями – з осадкою 1,1–1,2 м. Для чисто морських умов в тому ж корпусі може бути зроблений кільовий варіант яхти з осадкою 1,8–2,1 м.

В віртуальному середовищі за допомогою комплексу програм «Bentley Engineering» зроблено формування теоретичної поверхні трьох варіантів яхт: з радіальним корпусом, корпусами типу IOR та «шарпі», розраховані вітрильні поляри ходовості, забезпечені вимоги класифікаційного товариства до їх остійності.

Пропонуємий проект яхти напівтонного класу з обводами типу шарпі має гарні ходові якості і може бути запропонований до самостійної побудови аматорами з листового матеріалу.

Наукова новизна. У роботі розглянуті питання створення методики розробки обводів яхт напівтонного класу на початковому етапі, яка базується на використанні математичного моделювання.

Практична значимість. Основні положення розглянутої в роботі методики початкового проектування можуть бути використані в задачі вибору оптимального з точки зору економічності та ефективності експлуатації проекту яхт.

Ключові слова: яхта напівтонного класу; початкове проектування; ходовість; обводи корпусу; остійність; аналітичне дослідження.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Зниження опору корпусу крейсерсько-перегонових яхт напівтонного класу веде до підвищення їх спортивної ефективності. Але питання вдосконалення обводів яхт, впливу форми корпусу яхти на її опір в сучасній практиці слабо вивчені.

Аналізу проробки форми корпусів яхт напівтонного класу та аналізу їх ходовості на основі використання міжнародних програм передбачування швидкості і присвячена ця робота.

Для досягнення мети задачі виконані дослідження та вибрані найкращі основні розміри яхт на етапі початкового проектування,

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У вітчизняній практиці актуальність теми визначається:

– відсутністю систематичних досліджень, присвячених обґрунтуванню показників крейсерсько-перегонових яхт такого класу, вирішенню завдань визначення головних елементів на початкових стадіях їх проектування;

В дослідженнях і публікаціях останніх років розглядалися лише окремі питання цієї тематики,

У зарубіжній практиці відомі роботи по дослідженню опору яхтових корпусів переважно призначені розробці екстремальних яхт для навколосвітніх перегонів.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Невирішеною частиною проблеми є відсутність систематичних досліджень по створенню проектів яхт такого класу на стадії початкового проектування.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Вдосконалення процесу проектування крейсерсько-перегонових яхт за допомогою варіантних розрахунків за програмами прогнозування швидкості на початкових етапах проектування з максимально можливими ходовими характеристиками.

Методи дослідження. Використовувались методи теорії і проектування суден, обміру яхт та прогнозування швидкості.

Об'єктом дослідження є процес проектування обводів яхт.

Предметом дослідження є максимальна ходовість яхти.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Зараз і в нашій країні з'являється усе більше можливостей доторкнутися до дивного світу спортивного та круїзного яхтінгу. Кінець минулого століття був відзначений технологічною революцією, що торкнулася й створення вітрильних яхт. З'явилися матеріали, що дозволили будувати ULDB (Ultra Light Displacement Boat) — надлегкі вітрильні яхти.

Втім з'ясувалось, що просте зниження ваги корпусу, до якого завжди прагнули конструктори перегонних яхт, не є панацеєю від всіх лих – і зокрема не забезпечує значного підвищення швидкостей, особливо для океанських однокорпусників (рис. 1).



Рис. 1. Яхта «Whirlpool-Europe 2» Катрин Шабо – відомої навколосвітниці

Коли досягнення з технології й матеріалознавства дозволили підняти енергонасиченість (тобто знизити водотоннажність і збільшити площу вітрил) яхт офшорного плавання до рівня олімпійських швертботів, з'явилися і нові форми шпангоутів для океанських перегонових яхт [1].

Побудована в США на верфі “Hunter Marine Corporation” ULDB яхта “Hunter's Child” дизайнера Ларса Бергстрема наочно продемонструвала високу ефективність радіальних шпангоутів. При цьому форма ватерлінії – витягнутий еліпс не змінюється при крені, тобто не залежить від кута крену. Це дає повну відсутність моменту, що приводить (брочінгу), при шквалі і крені відповідно, відмінну стійкість на курсі, що незвичайно для яхт з вузьким плавниковим бульбиком.

Корпус проектується на робочий кут крену до 25° максимум. За межами відповідним цим кутам робочих ватерліній форма перетинів по шпангоутах може бути змінена за вимогами конструктивної доцільності, зазвичай роблять вилицю по всій довжині надводного борту.

Не потрібно пояснювати, що збереження незмінними форми й величини змоченої поверхні при крені дозволяє зменшити опір за рахунок малої перекладки керма.



Рис. 2. Брочінг яхти зі стандартними обводами

На рисунку 3 показані форми й положення ватерліній радіального корпусу при нульовому (а) й робочому крені (б).



Рис. 3. Креніві ватерлінії для радіального корпусу.

На рисунку 4 наведений теоретичний корпус яхти “Hunter's Child”

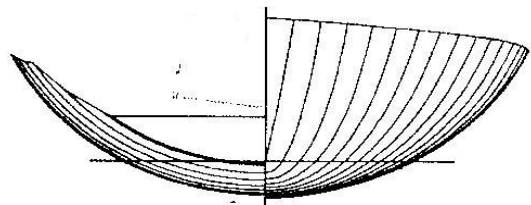


Рис. 4. Проекція “корпус” теоретичного креслення

Дійсно, радіальні корпуси мають трохи більший коефіцієнт залишкового опору $\approx 4.5 \times 10^{-3}$ при числах $Fr = 0,1 - 0,2$ і плавний невеликий ріст його до 7×10^{-3} при $Fr = 0,5$. Для звичайних корпусів крейсерських яхт, аналогічної довжини, цей коефіцієнт міняється від 2×10^{-3} до 11×10^{-3} , причому різкий його ріст починається при $Fr = 0,3$. Даруючи низьким значенням залишкового опору при $Fr = 0,5$, наприклад, опір 60-футового радіального корпусу на швидкості 15 вузлів становить усього близько 930 кг, тоді як у типового IMS-крейсера воно складе 2000 кг [2].

Радіальні корпуса спочатку застосовувалися для створення вітрильних екстремалів, але поступово, завдяки очевидним перевагам, стали всі частіше використовуватися й у серійних виробках. Найбільш широкую популярність, получила серійна First 210 “Spirit” фірми “Beneteau”, нарешті, в легенді європейського вітрильництва- класу “MINI 6.5” практично всі яхти мають радіальні корпуса.

Таким чином, за прототип для моделі з радіальними обводами беремо теоретичне креслення яхти “Hunter's Child” і масштабуємо його для наших розмірів.

Для другої моделі обрана яхта крейсерського яхт-клубу НУК напівтонного класу з традиційним IOR обводами. Вона була побудована зі склопластику аматорами самостійно за проектом яхтового конструктора Ж.М. Фіно і була неодноразовим переможцем Всеукраїнських вітрильних регат [3].

Для третьої моделі обрана яхта спроектована в Студентському КБ «Яхта» НУК з ламаними шпангоутами типу «Шарпі» для побудови аматорами.

Теоретичні креслення моделей представлені на рисунку 5.

Виконані три 3D-моделі поверхонь корпусів яхт в САПР «Maxsurf» та проведені розрахунки

опору для всіх корпусів за методикою професора Геррітсми [4].

Зразок 3D-моделі поверхні корпусу яхти з радіальними обводами наведено на рисунку 6.

Була перевірена остійність яхт за вимогами стандарту ISO 12-217-2 за критерієм STIX (стабільті індекс), що показала відповідність яхт категорії В для внутрішніх морів (рис. 7).

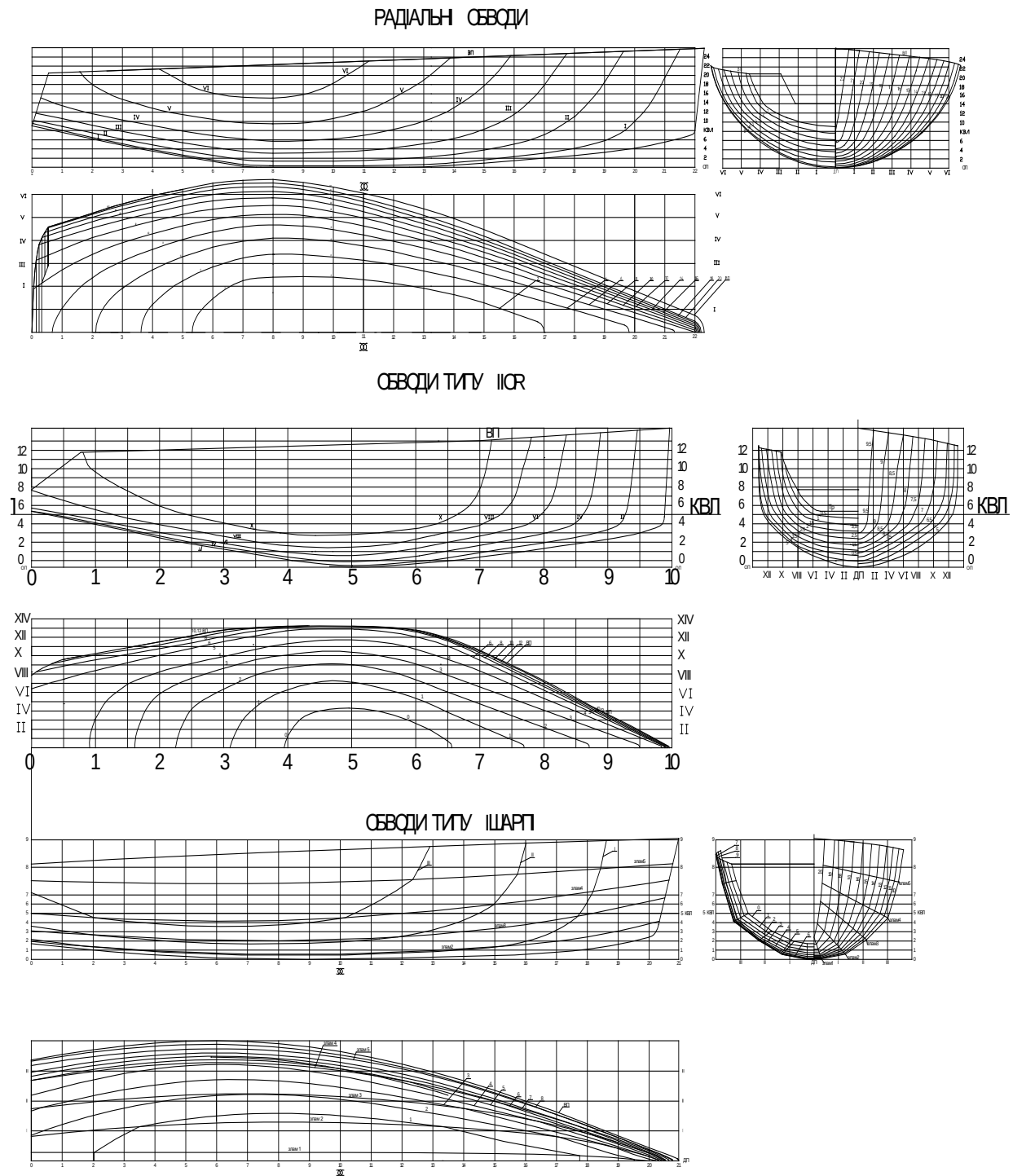


Рис. 5. Теоретичні креслення моделей

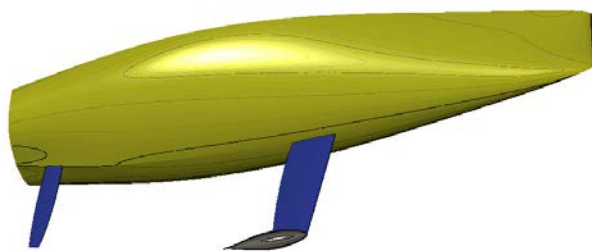


Рис. 6. 3D-модель поверхні корпусу яхти з радіальними обводами

Таблиця 1. Технічні характеристики яхт

Основні технічні характеристики	Рад. корп.	Корп. IOR	Корп. шпінні
Довжина по ватерлінії, м	8,358	7,51	8,33
Ширина по ватерлінії, м	2,186	2,464	2,120
Осадка корпусом, м	0,42	0,535	0,430
Осадка фальшкілем, м	2,100	2,100	2,100
Маса фальшкіля з баластом, кг	800	800	800
Висота надв. борта на міделі, м	1,29	1,294	1,29
Водотоннажність порожньом, т	3,30	3,45	3,41
Площа парусності, кв.м	49	49	49
Коеф. загальної повноти δ	0,356	0,333	0,451
Коеф. повноти площі ВЛ α	0,651	0,685	0,67
Коеф. повноти площі міделя β	0,679	0,682	0,710
Коеф. поздовжньої повноти φ	0,536	0,488	0,66
Момент, дренажний на 1° Rm, тм	0,071	0,069	0,049
Змочена поверхня Ω , кв.м	15,13	14,53	15,0
Абсциса ЦВ LCB, м	-0,43	-0,161	-0,39

Для оцінювання ходових якостей яхт використовуємо Maxsurf VPP (Velocity Prediction Program) – програму для розрахунку експлуатаційних характеристик вітрильних яхт залежно від вітрових режимів.

Грунтуючись на алгоритмі прогнозування швидкісних показників IMS (International Measurement System), VPP вирішує рівняння сил плавучості та опору для корпусу та вітрил і визначає результуючу швидкість і кут крену.

У VPP модуль розрахунку параметрів корпусу виконує функції програми обробки обводів IMS. Це дозволяє проектуванцю завантажити дані проекту Maxsurf і автоматично визначити всі параметри, необхідні для аналізу експлуатаційних показників. Загалом результати VPP дуже близькі за величиною до результатів стандартної програми IMS.

VPP є незамінним інструментом при проектуванні яхт, як для попереднього розрахунку експлуатаційних

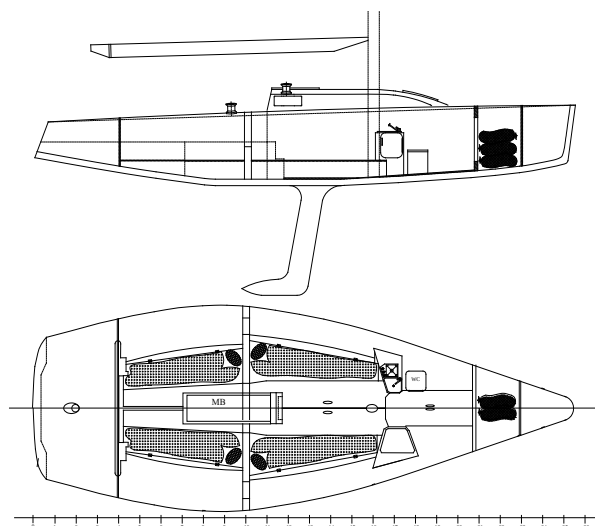


Рис. 7. Загальне розташування яхти

характеристик у процесі проектування, так і для розрахунку полярної діаграми для капітана яхти.

IMS цілком спирається на наукову основу – чисельне моделювання динаміки яхти, на відміну від систем типу IOR, що існували раніше. Наприклад, для розробки використовуваних при обмірі комп'ютерних програм виконані серійні модельні випробування корпусів яхт у дослідних басейнах. Принципова відмінність IMS у тому, що швидкісний потенціал яхти характеризується не тільки перегоновим балом, а полярними діаграмами, що представляють ходові якості у всьому діапазоні курсів та швидкостей вітру. Розрахунок поляр проводиться за результатами обміру з використанням комп'ютерної програми VPP (Velocity Prediction Program).

Система IMS введена з 1985 р. і використовувалася паралельно з міжнародною системою обміру морських перегонів яхт – IOR (International Offshore Rules) до початку 1990-х.

В даний час у світовій практиці стало нормою використання яхтсменами полярних діаграм швидкостей яхти, що дозволяє чисельно оцінити тактичні рішення в гонці й істотно поліпшити спортивні результати.

Полярна діаграма швидкостей яхти – це графічне представлення швидкості яхти в залежності від курсу щодо дійсного вітру і його швидкості. Вона будується у «полярній системі координат»: кут і відстань. Прийнято показувати тільки половину діаграми – для одного з галсів.

Використовуючи полярну діаграму, можна легко визначити швидкість яхти при будь-якій швидкості вітру і курсі щодо вітру, і скласти повне враження про її ходові якості.

На правильно побудованій полярній діаграмі швидкостей яхти курс щодо вітру відкладається як кут

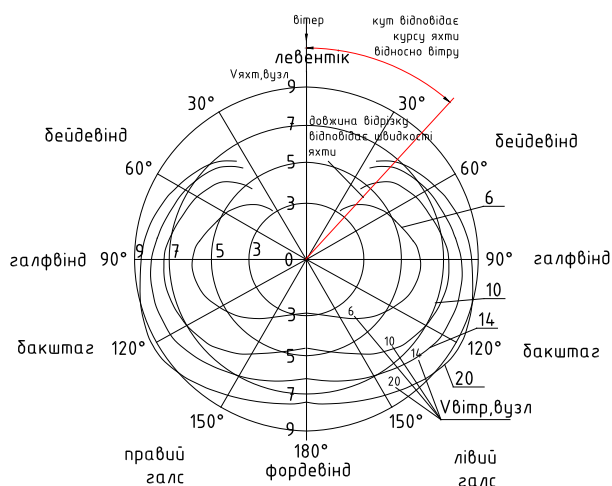


Рис. 8. Принцип побудови полярної діаграми швидкостей яхти

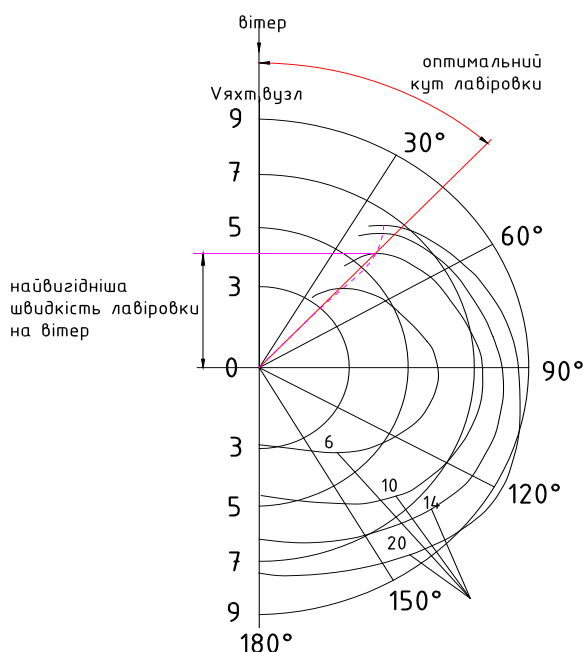


Рис. 9. Оптимальний кут лавіровки

між напрямком руху (тобто вектором швидкості яхти) і напрямком дійсного вітру.

Дійсний вітер відчувається тільки нерухомим спостерігачем. Вимпельний вітер виходить за рахунок накладення на дійсний зустрічного потоку при русі судна, саме його і показує яхтовий анемометр на ходу.

Полярні діаграми швидкостей призначені для:

Проектування яхт. В ньому відбувається зіставлення варіантів проектів перегонових яхт та вирішуються задачі оптимізації;

Обміру яхт. Програма VPP – програма передбачення швидкості застосовується для обмірювання «крейсерсько-переговних» яхт у системі IMS. Основна ідея системи – від "геометричного" обмірювання

перейти до "динамічного": тобто безпосередньо розраховувати ходові якості яхти і виходячи з них зрівнювати шанси на перемогу;

Керування яхтою. У яхтових перегонах полари знайшли застосування як ефективний інструмент для кількісного аналізу прийомів керування судном. Коло розв'язуваних задач дуже широке: у тому числі оцінка варіантів парусності, керування засобами протидії дрейфу і т.і.

Оптимальний курс на лавіровці повинний забезпечувати найбільше просування яхти за генеральним курсом – вісю лавіровки. Швидкість «просування на вітер» знаходиться геометричною побудовою (Рис.8) – ця швидкість називається VMG – velocity made good.

Яхтсменам корисно також спостерігати, як змінюються оптимальні лавіровочні кути в залежності від швидкості вітру (пунктирна лінія на рис. 9).

Починаючи з деякого значення сили вітру приріст швидкості на курсі крутий бейдевінд припиняється через крен, хвилювання і необхідність зменшення парусності.

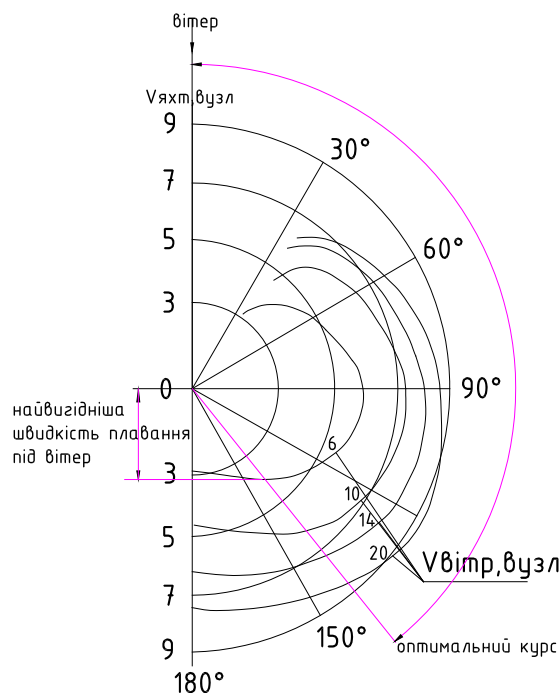


Рис. 10. Оптимальний попутний курс плавання

Полярна діаграма швидкостей яхти дозволяє легко оцінити найкращий спосіб просування по вітру. Як можна помітити (рис. 10), найчастіше курсфордевінд не вигідний: більш правильна тактика проходження ділянки галсами в бакштаг. Особливо значну перевагу цей спосіб має при слабких вітрах.

Причини цього явища, по-перше, в тім, що вимпельний вітер «гаситься» при русі яхти; по-друге, у перекритті передніх вітрил задніми.

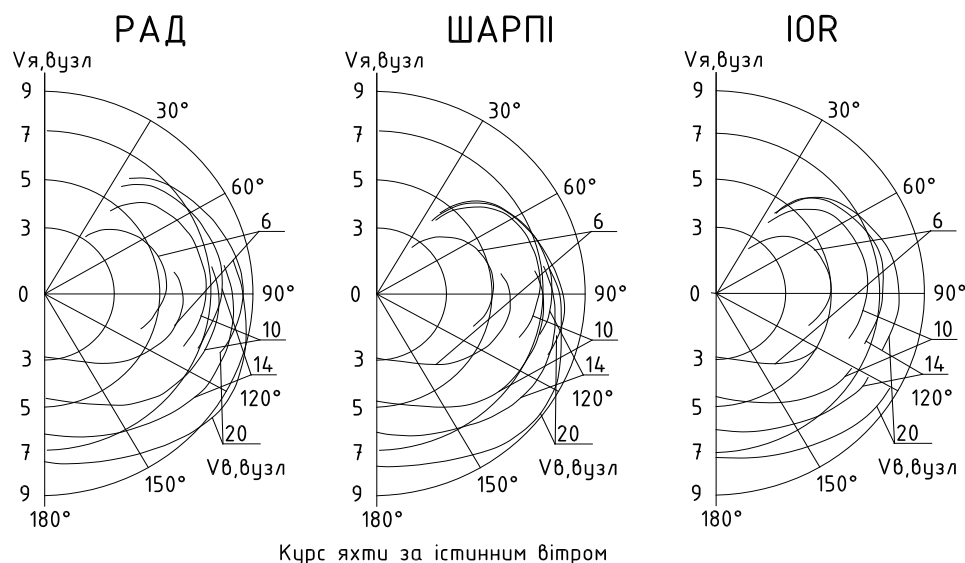


Рис. 11. Полярні діаграми для різних обводів

Таблиця 2. Розрахунки найбільшої швидкості яхти

	Найбільша швидкість плавання, вузл							
	На лавіровці				На попутному курсі			
Швидкість вітру, вузл	6	10	14	20	6	10	14	20
Радіальні обводи	2,92	4,15	4,96	5,26	3,16	5,05	6,48	7,71
Обводи IOR	2,58	3,82	4,33	4,36	3,21	4,01	6,28	7,47
Обводи шарпі	2,58	3,95	4,13	4,22	3,19	5,13	6,42	7,84

При слабких вітрах найбільша швидкість яхти досягається на курсі повний бейдевінд, що зв'язано з максимальним використанням ефекту вимпельного вітру. Це особливо справедливо для яхт, що не мають спінакера. З посиленням вітру яхта розвиває максимальну швидкість на курсі бакштаг.

Розрахунок полярної діаграми виконується в модулі «VPP» системи «Maxsurf», для чого до зроблених тривимірних моделей додаються однакові виступаючі частини – киль та руль.

Для розрахунків за програмою задаємо вхідні дані по корпусу та вітрилам. Дані по вітрильному озброєнню приймаємо однаковими для всіх яхт.

За розрахунками отримуємо три полярних діаграми для різних обводів (рис. 11).

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши розрахунки поляр можна зробити такі висновки.

На попутних курсах:

– при малих швидкостях вітру радіальні яхти та шарпі мають однакову швидкість, а яхти IOR трохи їх випереджають (до 2%);

– при збільшенні сили вітру радіальні яхти та шарпі мають практично однакову швидкість, а яхти IOR мають меншу швидкість (3–20%).

Це можна пояснити тим, що корпуси шарпі проєктувалися переробкою радіальних обводів, а також появою гідродинамічної під'йомною сили на плоских поверхнях вилиць.

На лавіровці:

– во всьому діапазоні швидкостей вітру радіальні корпуси мають суттєву перевагу (11–17%);

– при вітри в 6 і 10 вузлів обводи IOR та шарпі мають близькі результати, але зі збільшенням швидкості обводи IOR мають перевагу над шарпі (до 3%).

Хоча, на перший погляд, розбіжності у цифрах невеликі, достатньо виграти хоча б 1 м. На дистанції в одну милю, це складає лише 0,0005, а багатомильні перегони продовжуються багато днів.

Розглянутий проєкт яхти напівтонного класу з обводами типу шарпі має гарні ходові якості і може бути запропонований до самостійної побудови аматорами з листового матеріалу (АМг, морської фанери, поліетилену), що не потребує гібочного обладнання, наприклад за методом відомого яхтового конструктора Ван-де-Штадта [5].

REFERENCES

- [1] Heeled Hull Form | IOM, RG 65 & Footy – WordPress.com. Retrieved from <https://iomdesign.wordpress.com/heeled-hull-form/>
- [2] Lars Larsson, Rolf E. Eliasson (1994). Principles of Yacht Design. Pr. Adlard Coles Nautical, London, 334 p.

- [3] Pashchenko, Y.M. (2021). Pidvyshchennya khodovyh yakostey peregonovyh yaht kreyserskogo yaht-klubu NUK. [Improving the running qualities of racing yachts of the NUK Cruiser Yacht Club], ZNP NUK № 3 (486), 2021r. p.p. 8-12.
- [4] Gerritsma, J., Keuning, J.A., Versluis, A. (1993). Sailing Yacht Performance in Calm Water and in Waves. Eleventh Chesapeake Sailing Yacht Symposium. pp. 233-246.
- [5] Quick assembly method for steel and aluminium. Retrieved from <https://www.stadtdesign.com>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Heeled Hull Form | IOM, RG 65 & Footy – WordPress.com URL: <https://iomdesign.wordpress.com/heeled-hull-form/>
- [2] Lars Larsson, Rolf E. Eliasson. Principles of Yacht Design. (1994), Pr. Adlard Coles Nautical, London, 1994. 334 p.
- [3] Пащенко Ю.М. (2021). Підвищення ходових якостей перегонових яхт крейсерського яхт-клубу НУК. ЗНП НУК № 3 (486), 2021р. с. 8-12.
- [4] Gerritsma J., Keuning J.A., Versluis A. (1993). Sailing Yacht Performance in Calm Water and in Waves. // Eleventh Chesapeake Sailing Yacht Symposium. pp. 233-246.
- [5] Quick assembly method for steel and aluminium, URL: <https://www.stadtdesign.com>

© Казарєзов А. Я., Пащенко М. Ю., Пащенко Ю. М.
 Дата надходження статті до редакції: 01.07.2024
 Дата затвердження статті до друку: 17.07.2024