

УДК 629.5.01

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.3\(496\).4](https://doi.org/10.15589/znп2024.3(496).4)**METHOD OF SAILING YACHT OPTIMAL HULL FORM SELECTING
ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMUM RESISTANCE OF WATER****МЕТОД ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ ФОРМИ КОРПУСУ ПАРУСНОЇ ЯХТИ
ЗА КРИТЕРІЕМ МІНІМУМУ ОПОРУ ВОДИ****Valeriy O. Nekrasov**

valery.nekrasov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7157-9481

Alina O. Astakhova

alina.astakhova@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8686-439X

В. О. Некрасов,

д-р техн. наук, проф.

А. О. Астахова,

викладач

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. Currently, among the three traditional stages of ship design - conceptual, technical and operational, increased attention is paid to conceptual (research) design. This is explained by the need to previously find the necessary efficiency indicators of the designed vessel, which at the next stages of design become the main goals of implementing the design solution. The methods used to search for a vessel with the required efficiency at the conceptual design stage are the variant or optimization method of selecting its main elements. Due to the fact that at the stage of conceptual design, as a rule, there are no functional relationships between the main elements and performance indicators, these relationships are either modeled, or those obtained as a result of processing statistical data on floating vessels and conducting serial model tests. The purpose of this work is to develop a method for choosing the optimal parameters of the shape of the hull of sailing yachts based on the use of regression equations obtained from the results of serial experimental studies of the propulsion ability of yachts in experimental basins. To realize the goal, the formulation of the optimization problem of choosing the optimal parameters of the shape of the yacht's hull is constructed and the method of its solution is presented. In this problem: the minimum water resistance to the movement of the yacht is chosen as the criterion of optimality, the system of independent variables is constructed in such a way as to fully take into account the features of the hull shape on water resistance, and the system of constraints is designed to identify such a solution area that provides minimum values of water resistance in the entire range of possible yacht speeds, from small to large. The generalized reduced gradient method was chosen as the method for solving the optimization problem. Examples of solving the optimization problem are given, which reveal the specified features of its formulation. The effectiveness of using the proposed optimization problem during the selection of the main elements of yachts at the stages of their conceptual design is shown.

Key words: sailing yacht; the propulsion of the yacht; optimization problem of minimum resistance; the method of choosing the parameters of the body shape.

Анотація. Серед трьох традиційних етапів проектування суден – концептуального, технічного та робочого, підвищена увага у даний час приділяється концептуальному (дослідницькому) проектуванню. Пояснюється це необхідністю попереднього відшукування потрібних показників ефективності спроектованого судна, які на наступних етапах проектування становляться основними цілями реалізації проектного рішення. Методами, за допомогою яких на етапі концептуального проектування здійснюється пошук судна з необхідною ефективністю, є варіантний або оптимізаційний метод вибору його головних елементів. У зв'язку з тим, що на етапі концептуального проектування, як правило, функціональні зв'язки між головними елементами та показниками ефективності відсутні, ці зв'язки або моделюються, або використовуються ті, що отримані в результаті обробки статистичних даних щодо плаваючих суден та проведення серійних модельних випробувань. Метою цієї роботи є складання методу вибору оптимальних параметрів форми корпусу парусних яхт на основі використання регресійних рівнянь, отриманих за результатами серійних експериментальних досліджень ходовості яхт у дослідних басейнах. Для реалізації мети побудовано формулювання оптимізаційної задачі вибору оптимальних параметрів форми корпусу яхти та приведено метод її розв'язання. В цієї задачі: в якості критерія

оптимальності обрано мінімум опору води руху яхти, система незалежних змін побудована таким чином, щоб достатньо повно врахувати особливості впливу форми корпусу на опір води, а система обмежень – щоб виявляти таку область рішень, яка забезпечує мінімальні значення опору води в усьому діапазоні можливих швидкостей руху яхти, від малих до великих. У якості методу розв'язання оптимізаційної задачі обрано метод узагальненого редукованого градієнта. Приведено приклади розв'язання оптимізаційної задачі, які розкривають вказані особливості її формулювання. Показано ефективність використання запропонованої оптимізаційної задачі під час вибору головних елементів яхт на стадіях їх концептуального проектування.

Ключові слова: вітрильна яхта; ходовість яхти; оптимізаційна задача мінімуму опору; метод вибору параметрів форми корпусу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У даний час особлива увага приділяється концептуальному (дослідницькому) проектуванню суден [1]. Пояснюється це необхідністю попереднього визначення потрібних показників ефективності спроектованого судна, які після відповідного вибору головних його елементів повинні бути основними цілями реалізації проектного рішення. У зв'язку з тим, що на цьому етапі проектування, як правило, функціональні зв'язки між головними елементами та показниками ефективності відсутні, ці зв'язки або моделюються, або використовуються ті, що мають місце в результаті обробки статистичних даних щодо плаваючих суден або проведення серійних модельних випробувань.

На цій основі будуються методи, за допомогою яких на етапі концептуального проектування здійснюється пошук судна з необхідною ефективністю. Зазвичай це варіантний або оптимізаційний метод вибору головних елементів судна. Останній має суттєві переваги як більш ефективний в усіх відношеннях.

Центральне місце в проблемах оптимізації головних елементів суден, і, особливо, – парусних яхт, належить розв'язанню проблеми ходовості, тобто визначенню опору середовищ руху яхти, від якого суттєво залежить результат перегонів. При цьому основною частиною опору складає опір води руху корпусу яхти. Останній повинен бути мінімізований за рахунок вибору головних елементів корпусу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для вирішення проблеми визначення опору води руху яхт широко використовуються чисельні параметричні методи моделювання поверхонь їх корпусів та CFD методи гідродинамічного розрахунку опору води руху корпусів [2-5]. При цьому мінімізація опору води здійснюється шляхом формулювання та розв'язання оптимізаційних задач для такої цільової функції на безлічі чисельних моделей корпусів, які генеруються шляхом варіацій параметрів форми корпусів (незалежних змінних) в діапазонах їх можливих значень. Кінцеві значення діапазонів параметрів, що розглядаються, як правило, складають систему обмежень оптимізаційних задач. В областях параметрів, що означені обмеженнями, пошуки локальних та глобального мінімумів цільової функції знаходиться за

допомогою методів узагальненого редукованого градієнту або генетичних алгоритмів [2-5].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

До широкого використання методів чисельної гідродинаміки опір води руху корпусів різної форми визначався на основі серійних випробувань моделей яхт в дослідних басейнах [6-8]. Отримані на цій основі дані потім використовувалися для визначення діючих гідродинамічних сил та моментів для окремо взятих корпусів з певними значеннями параметрів форми. Використання і досі ефективно здійснюється, як при проектуванні яхт, так і в програмі VPP – програмі прогнозування швидкості руху яхт на перегонах [9-11]. Але оптимізаційний метод вибору головних елементів корпусу яхти з мінімальним опором води на концептуальній стадії її проектування, що може бути побудований на безлічі корпусів модельних випробувань яхт в дослідних басейнах, у даний час відсутній.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Вирішення такої проблеми є метою даного дослідження. Вона може бути реалізована за допомогою алгоритму, наведеного в монографії [1] на прикладі мінімізації буксирного опору патрульного катера. У цій оптимізаційній проблемі в якості критерія оптимальності традиційно повинно бути обрано мінімум опору води руху яхти, а система незалежних змін побудована таким чином, щоб достатньо повно врахувати особливості впливу форми корпусу на опір води. Крім того, система обмежень повинна бути не пасивною, як це має місце у вище згаданих оптимізаційних задачах чисельної гідродинаміки, а активною, щоб була можливість виявляти таку область поєднань параметрів форми корпусу, яка забезпечує мінімальні значення опору води в усьому діапазоні можливих швидкостей руху яхти на перегонах.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методами формулювання та розв'язання такої проблеми є методи нелінійного програмування, об'єктом дослідження – опір води руху корпусу яхти, а предметом дослідження – мінімізація опору води.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Формулювання та метод розв'язання оптимізаційної задачі. У якості цільової функції $f(x)$ задачі

оптимізації опору корпусу яхти з виступаючими частинами – кілем і кермом – вибирається залежність буксирного опору, що визначено за даними експериментальних досліджень при ході яхти на тихій воді:

$$f(x) = R_{Full}(x) = R_F + R_R(x) + R_{APP}, \quad (1)$$

де R_F – опір тертя корпусу; R_R – залишковий опір корпусу; R_{APP} – опір виступаючих частин (кіля та керма); x – вектор незалежних змінних оптимізаційної задачі.

У цієї формулі залишковий опір води руху корпусу яхти $R_R(x)$ визначається на основі регресійних залежностей, що отримано в роботах [6–8] в результаті експериментальних випробувань моделей серії I та II – III. Для моделей серії I, яка випробувалась при числах Фруда 0,125 – 0,450 ця залежність представлена у вигляді:

$$R_R = (a_0 + a_1 K_1 + a_2 K_2 + a_3 K_3 + a_4 K_4 + a_5 K_5 + a_6 K_6 + a_7 K_7 + a_8 K_8 + a_9 K_9) g M_c 10^{-3}, \quad (2)$$

де a_i , $i = 0, 1, 2, 3, \dots, 9$, – коефіцієнти, що задані таблицею [6, 10] в залежності від числа Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{g L_{wl}}}$; K_i , $i = 0, 1, 2, 3, \dots, 9$, – перемінні, що визначаються наступними співвідношеннями параметрів форми корпусу яхти:

$$K_1 = C_p; \quad K_2 = LCB; \quad K_3 = B_{wl} / T_c; \quad K_4 = L_{wl} / V_c^{1/3}; \quad K_5 = C_p^2;$$

$$K_6 = C_p L_{wl} / V_c^{1/3}; \quad K_7 = (LCB)^2; \quad K_8 = (L_{wl} / V_c^{1/3})^2;$$

$$K_9 = (L_{wl} / V_c^{1/3})^3;$$

де g – прискорення вільного падіння; V_c и M_c – об'ємна та масова водотоннажність яхти.

Для моделей серії II – III, випробування яких здійснювалось при числах Фруда 0,475 – 0,750, залежність $RR(x)$ надано у виді

$$R_R = (c_0 + c_1 L_1 + c_2 L_2 + c_3 L_3 + c_4 L_4 + c_5 L_5) g M_c 10^{-3}, \quad (3)$$

де c_j , $j = 0, 1, 2, 3, \dots, 5$, – коефіцієнти, що задані таблицею [7, 8, 10] в залежності від числа Фруда; L_j , $j = 0, 1, 2, 3, \dots, 5$, – перемінні, що визначаються наступними співвідношеннями параметрів форми корпусу яхти:

$$L_1 = L_{wl} / B_{wl}; \quad L_2 = A_w / V_c^{2/3}; \quad L_3 = LCB;$$

$$L_4 = (L_{wl} / B_{wl})^2;$$

$$L_5 = (L_{wl} / B_{wl}) (A_w / V_c^{2/3})^3,$$

при цьому A_w – площа діючий ватерлінії.

Діапазони змін параметрів форми корпусів яхт серії I та II–III, які реалізовано при проведенні серійних модельних випробувань, наведено у табл. 1.

Для океанської гоночної яхти YD-40 [10] залежність від швидкості v_s , вузли, опору води руху корпусу без виступаючих частин при куті крену $\theta = 0$ град., яку

отримано при її розрахунку з використанням формул (2) для серії I та (3) для серії II – III, наведено на рис. 1. На цьому ж рисунку показано проекції «Корпус» теоретичних креслень моделей серії I та II – III у відповідних діапазонах чисел Фруда (0,125 – 0,450) та (0,475 – 0,750), в яких було проведено серійні випробування, а також результати випробувань моделі M1 яхти «Esta 105» у дослідному басейні НУК та математичному моделюванню опору руху корпусу моделі M1 у Flow Vision [12]. Головні елементи яхт YD-40 та «Esta 105»-(M1) представлені в табл. 3 стовбцями «YD-40 Initial Data» та «M1 Initial Data».

Таблиця 1. Діапазони змін параметрів форми корпусу яхт серії I та II–III

L_{wl} / B_{wl}	2,76–5,00
$L_{wl} / V_c^{1/3}$	4,34–8,50
B_{wl} / T_c	2,46–19,32
C_p	0,52–0,60
LCB	(-6,00)–0,00 (в % від L_{wl} ; + в ніс від міделів шп.)

Рисунок 1 показує, що яхта «Esta 105»-(M1) при меншій водотоннажності має гіршу ходовість в діапазоні середніх швидкостей руху ніж яхта YD-40. Обумовлено це, в основному, меншою відносною довжиною – 2,648 проти 3,157.

У якості незалежних змін оптимізаційної задачі обираються:

1) габаритні розміри підводної частини корпусу судна, такі як довжина по ватерлінії $L_{wl} = x_1$, ширина по ватерлінії $B_{wl} = x_2$ та осадка $d = T_c = x_3$;

2) параметри форми корпусу у зазначених розмірах, такі як коефіцієнт загальної повноти $C_B = x_4$, коефіцієнт повноти площі міделів-шпангоуту $C_m = x_5$ та відносна відстань центру плавучості від мішеневого перерізу $LCB = x_6$.

Основними обмеженнями оптимізаційної задачі при варіаціях наведених незалежних змін є незмінність водотоннажності V_c та критерію моделювання експерименту – числа Фруда Fr . Таким чином, оптимізаційна задача, що розглядається, представляється у вигляді:

Мінімізувати цільову функцію

$$f(x) = R_{Full}(Fr, V_c, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \quad (4)$$

при обмеженнях

$$[g_1(x) = Fr(x)] = const; \quad [g_2(x) = V_c] = const;$$

$$[g_3(x) = x_1] \geq x_{1min}; \quad [g_4(x) = x_2] \leq x_{2max};$$

$$x_{3min} \leq [g_5(x) = x_3] \leq x_{3max}; \quad x_{4min} \leq [g_6(x) = x_4] \leq x_{4max};$$

$$x_{5min} \leq [g_8(x) = x_5] \leq x_{5max}; \quad x_{6min}(x) \leq [g_8(x) = x_6] \leq x_{6max}. \quad (5)$$

Розв'язання оптимізаційної задачі (4) – (5) виконується методом узагальненого редукованого градієнта [13].

Приклади формулювання та розв'язання оптимізаційних задач. Розглядається рух на тихій воді океанської гоночної яхти YD-40, головні елементи якої вказані у табл. 3 [10].

Оптимізаційна задача мінімізації опору води руху яхти YD-40 формулюється та вирішується для двох варіантів форми її корпусу, які представлені моделями серії I та серії II–III [10]. Критеріями оптимізації являються мінімуми цільових функцій, що задані виразом (1), у яких для того, щоб визначити вплив різних форм корпусу на результати оптимізації окремо розглядаються сили залишкового опору R_R , які визначаються формулами (2) і (3).

Типи оптимізаційних задач, що сформульовані, їх незалежні змінні та обмеження означено у табл. 2.

Результати розв'язання оптимізаційних задач для корпусу серії I при $Fr = 0,350$ та серії II – III при

$Fr = 0,500$ наведено у таблиці 3. На рисунках 2, 3 надано результати розповсюдження рішень, отриманих при вказаних числах Фруда, на весь діапазон чисел Фруда $0,125 - 0,750$, що мав місце при випробуваннях моделей серій I, II – III.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наведені приклади розв'язання оптимізаційних задач мінімізації опору води руху яхти суттєво залежить від відносної довжини яхти Lwl/Bwl . Це відношення має вплив глобального характеру – ходовість яхти змінюється з однаковим знаком у всьому діапазоні швидкостей руху.

ВИСНОВКИ

Основною метою концептуального проектування вітрильних яхт є вибір таких їх головних елементів, які забезпечують найбільшу ефективність проектних

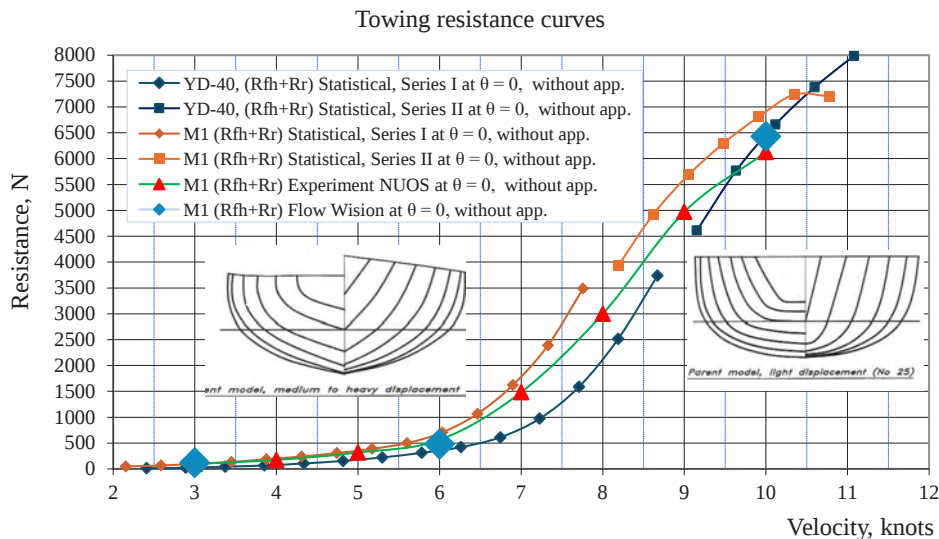


Рис. 1. Криві буксирного опору ($R_F + R_R$) корпусів яхт, який визначено за допомогою регресійних залежностей систематичних модельних випробувань [6, 7, 8] для яхти YD-40 і «Esta 105»-(M1) Statistical, а також за допомогою експерименту у дослідному басейні НУК і математичного моделювання опору у Flow Vision яхти «Esta 105»-(M1) [12]

Таблиця 2. Незалежні змінні, обмеження та типи задач мінімізації опору води руху яхти YD-40 на тихій воді без крену

№	Незалежні змінні		<i>Lwl; Bwl; Tc; C_B; C_M; LCB</i>			
	Типи оптимізаційних задач		Задача оптимізації з корпусом серії I		Задача оптимізації з корпусом серії II&III	
	Обмеження					
1	Constraint of Froude number	<i>Fr</i>	= 0,350		= 0,500	
2	Constraint of displacement	<i>V_с</i> , м³	= 7,632		= 7,632	
3	Constraint of length	<i>Lwl</i> , м	≥ 11,0		≥ 11,0	
4	Constraint of breadth	<i>Bwl</i> , м		≤ 3,168		≤ 3,168
5	Constraint of draft	<i>Tc</i> , м	≥ 0,50	≤ 0,57	≥ 0,50	≤ 0,57
6	Constraint of block coefficient	<i>C_B</i>	≥ 0,40	≤ 0,42266	≥ 0,40	≤ 0,42266
7	Constraint of middle section coefficient	<i>C_M</i>	≥ 0,70	≤ 0,757	≥ 0,70	≤ 0,757
8	Constraint of longitudinal center of buoyancy	<i>LCB</i> , %	≥ -6,00	≤ -3,60	≥ 6,00	≤ -3,60

Таблиця 3. Результати розв’язання оптимізаційних задач мінімізації опору води руху яхти YD-40 для двох форм її корпусу, що визначені серією I при $Fr = 0,350$ та серією II – III при $Fr = 0,500$, а також при постійній водотоннажності, що дорівнює $7,632 \text{ м}^3$

Parameters of yacht hull and appendages			YD-40 Optimal Solution, Hull Series I	YD-40 Optimal Solution, Hull Series II&III	YD-40 Initial Data	M1 Initial Data
Length	L_{wl}	m	11,000	13,995	10,000	8,006
Beam	B_{wl}	m	2,899	2,727	3,168	3,023
Draft	T_c	m	0,570	0,500	0,570	0,520
Trim angle (ve+ at stern)	ψ	deg.	0,000	0,000	0,000	0,000
Bow draft	T_f	m	0,570	0,570	0,570	0,520
Aft draft	T_a	m	0,570	0,570	0,570	0,520
Block coefficient	C_b		0,420	0,400	0,423	0,406
Volume displacement of ship	V_c	m^3	7,632	7,632	7,632	5110
Mass	m_c	kg	7823	7823	7823	5237
Prismatic coefficient	C_p		0,555	0,528	0,558	0,525
Relative longitudinal center of buoyancy	LCB	%	-3,600	-6,000	-3,600	-3,950
Ratio L_{wl}/B_{wl}	L_{wl}/B_{wl}		3,794	5,132	3,157	2,648
Ratio B_{wl}/T_c	B_{wl}/T_c		5,454	5,453	5,558	5,813
Ratio $L_{wl}/(V_c^{1/3})$	$L_{wl}/V_c^{1/3}$		5,587	7,108	5,079	4,648
Middle section area	S_m	m^2	1,251	1,032	1,367	1,217
Middle section area coefficient	C_m		0,757	0,757	0,757	0,774
Waterplane area	S_{wp}	m^2	22,769	27,246	22,610	16,675
Waterplane area coefficient	C_{wp}		0,714	0,714	0,714	0,689
Length of keel (mean chord)	L_k	m	1,450	1,450	1,450	-
Wetted area of keel	S_{wk}	m^2	4,400	4,400	4,400	-
Length of rudder (mean chord)	L_r	m	0,500	0,500	0,500	-
Wetted area of rudder	S_{wr}	m^2	1,300	1,300	1,300	-
Wetted area of appendages	S_{app}	m^2	5,700	5,700	5,700	-
Bilge factor	c		1,040	1,040	1,040	1,040
Wetted area of Hull	S_{wh}	m^2	25,719	29,652	25,220	18,602
Water density	ρ	t/m^3	1025	1025	1025	1025
Cinematic coefficient of water viscosity	ν	m^2/s	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
Heel angle	θ	deg	0	0	0	-
Total draft	T	m	2,050	2,050	2,050	-
Values of Minimal Resistance at $Fr = 0,350$ (Series I) and $Fr = 0,500$ (Series II–III)						
Heel resistance coefficient at $\theta = 13,6 \text{ deg.}$	C_H		0,0199	0,0203	0,0216	-
Residuary Resistance at $Fr = 0,350; \theta = 0$	R_R	N	571	581	612	456
Residuary Resistance at $Fr = 0,500; \theta = 0$	R_R	N	5090	3301	5766	4443
Full Resistance at $Fr = 0,350; \theta = 0$	R_{Full}	N	1148	1361	1139	707
Full Resistance at $Fr = 0,500; \theta = 0$	R_{Full}	N	6083	4805	6780	4925
Froude number	Fr		0,350	0,500	0,350	-
Velocity	V_s	knots	7,074	11,398	6,263	-
Velocity increasing	ΔV_s	%	~ 13	~ 18	-	-
Full Resistance decreasing	ΔR_{Full}	%	~ 10	~ 29	-	-

рішень. Однією із складових такого вибору є визначення параметрів форми корпусу яхти, що мінімізує опір води його руху. Для реалізації такої мети сформульована оптимізаційна задача мінімізації опору, яка використовує природні залежності опору від параметрів форми корпусу яхти, що побудовані в результаті серійних модельних випробувань в дослідних басейнах. Отримані оптимізаційні рішення задач мінімізації

опору води руху яхт показують, що в діапазоні середніх швидкостей ходу опір може бути зменшений на 10% з відповідним зростанням швидкості руху на 13%, а в діапазоні великих швидкостей ходу – на 29% з відповідним зростанням швидкості руху на 18%. Це означає, що запропонована оптимізаційна задача може бути ефективним інструментом концептуально-го проектування яхт розглянутого класу.

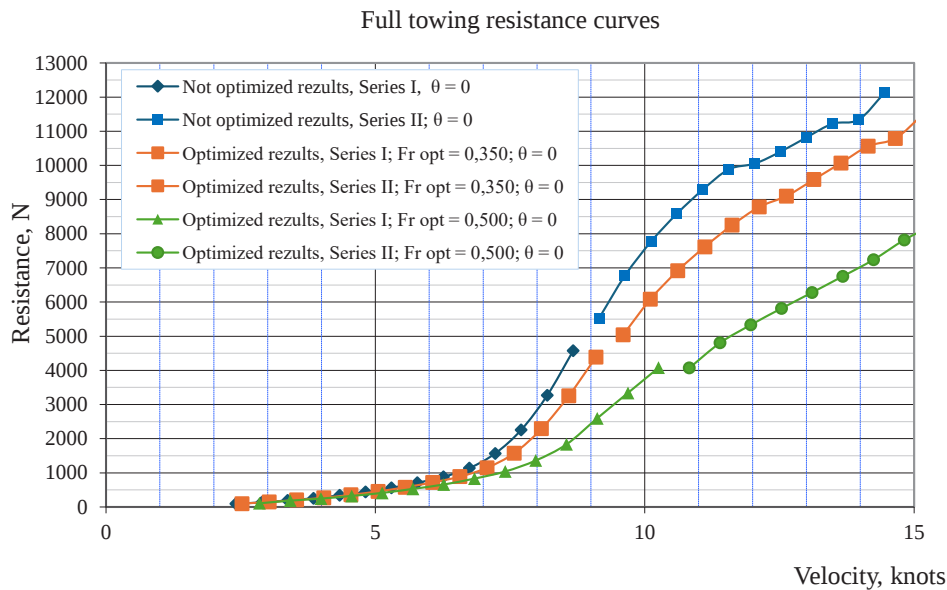


Рис. 2. Залежності від швидкості руху буксирувального опору оригіналу – яхти YD-40 [10], та її оптимізованих варіантів, отриманих при використанні регресійних залежностей (2) – (3) та розв’язанні оптимізаційної задачі (4) – (5) з обмеженнями таблиці 2

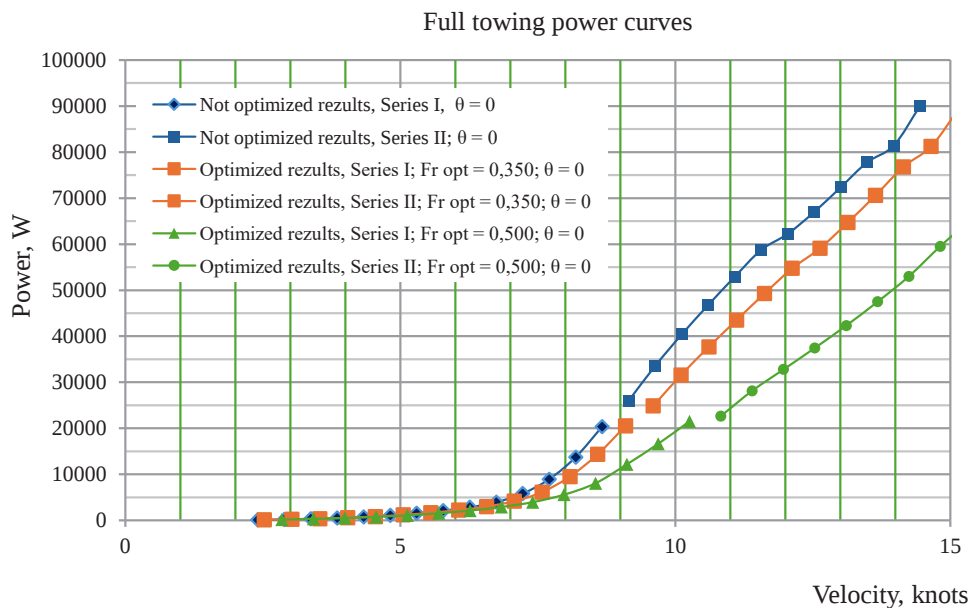


Рис. 3. Залежності від швидкості ходу буксирувальної потужності оригіналу – яхти YD-40 [10], та її оптимізованих варіантів, отриманих при використанні регресійних залежностей (2) – (3) та розв’язанні оптимізаційної задачі (4) – (5) з обмеженнями таблиці 2

REFERENCES

- [1] Nekrasov, V. (2019) Conceptual Designing of Ships. Kyiv-Kherson: Oldi-Plus.
- [2] Fassardi, C., Hochkirch, K. (2006) Sailboat design by response surface optimization. 2nd High Performance Yacht Design Conference. Auckland, 14-16 February. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/242369175>
- [3] Huetz, L., Alessandrini, B. (2011) Systematic Study of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht Hull Using Parametric Design and CFD. Proceedings of the ASME 2011, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Retrieved from: [proceedings/44380/889/347603](https://doi.org/10.1115/1.4438088)
- [4] Harries, S., Abt, C. and Brenner, M. (2015) Upfront CAD - Parametric Modeling Techniques for Shape Optimization, International Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems (EUROGEN 2015), September 2015, Glasgow, UK. Retrieved from: [326158496](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9158-6_32).

- [5] Hasubek, B., Harries, S. (2017) Simulation-driven design of sailing yachts and motorboats. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2017 Nantes, France 15-17 May 2017. Retrieved from: <https://www.semanticscholar.org/paper/06dcc8d091863730f654a7b4902bea94b1fb5b7f>
- [6] Gerritsma, J., Onnink, R., Verluis, A. (1981) Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht hull Series. International Shipbuilding Progress, 28(328): 276-97.
- [7] Gerritsma, J., Keuning, J. A. and Versluis, A. (1991) The Delft Systematic Yacht Hull Series II Experiments. Report Nr. 881-P The Tenth-Chesapeake Sailing Yacht Symp. February 9, 1991.
- [8] Gerritsma, J., Keuning, J. A. and Versluis, A. (1998) Sailing Yacht Performance in Calm Water and in Waves. Ship Hydromechanics Laboratory Delft University of Technology Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands.
- [9] Keuning, J.A., Sonnenberg, U.B. (1998) Approximation of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht based on the 'Delft Systematic Yacht Hull Series'. Report 1175-P Projector. SMO 961128 16 November 1998. Published in: 15th International Symposium on "Yacht Design and Yacht Construction". Amsterdam, 16 November 1998, The Netherlands.
- [10] Sailing Yacht Design: Practice. ed. Claughton, Wellicome and Sheno. Adison Wesley Longman, 1998.
- [11] Larsson, L., Eliasson, R. E. (2000) Principles of Yacht Design. – Bloomsbury Publishing: Adlard Coles Nautical.
- [12] Krotov, A.I., Yastreba, A.P., Astakhova, A.O. (2015) Issledovaniye vliyaniya obvodov kreysersko-gonochnykh yakht na buksirovochnoye soprotivleniye [Study of the influence of the contours of cruising and racing yachts on towing resistance]. Zbirnik nauk. prats' NUK, №4 2015. pp. 63-68.
- [13] Microsoft 365. Excel program. 2020.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Nekrasov, V. (2019) Conceptual Designing of Ships. Kyiv-Kherson: Oldi-Plus.
- [2] Fassardi, C., Hochkirch, K. (2006) Sailboat design by response surface optimization. 2nd High Performance Yacht Design Conference. Auckland, 14-16 February. URL: <https://www.researchgate.net/publication/242369175>
- [3] Huetz, L., Alessandrini, B. (2011) Systematic Study of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht Hull Using Parametric Design and CFD. Proceedings of the ASME 2011, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings/44380/889/347603>
- [4] Harries, S., Abt, C. and Brenner, M. (2015) Upfront CAD - Parametric Modeling Techniques for Shape Optimization, International Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems (EUROGEN 2015), September 2015, Glasgow, UK. URL: <https://www.researchgate.net/publication/326158496>.
- [5] Hasubek, B., Harries, S. (2017) Simulation-driven design of sailing yachts and motorboats. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2017 Nantes, France 15-17 May 2017. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/06dcc8d091863730f654a7b4902bea94b1fb5b7f>
- [6] Gerritsma, J., Onnink, R., Verluis, A. (1981) Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht hull Series. International Shipbuilding Progress, 28(328): 276-97.
- [7] Gerritsma J., Keuning J. A. and Versluis A. (1991) The Delft Systematic Yacht Hull Series II Experiments. Report Nr. 881-P The Tenth-Chesapeake Sailing Yacht Symp. February 9, 1991.
- [8] Gerritsma, J., Keuning, J. A. and Versluis, A. (1998) Sailing Yacht Performance in Calm Water and in Waves. Ship Hydromechanics Laboratory Delft University of Technology Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands.
- [9] Keuning, J.A., Sonnenberg, U.B. (1998) Approximation of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht based on the 'Delft Systematic Yacht Hull Series'. Report 1175-P Projector. SMO 961128 16 November 1998. Published in: 15th International Symposium on "Yacht Design and Yacht Construction". Amsterdam, 16 November 1998, The Netherlands.
- [10] Sailing Yacht Design: Practice. ed. Claughton, Wellicome and Sheno. Adison Wesley Longman, 1998.
- [11] Larsson, L., Eliasson, R.E. (2000) Principles of Yacht Design. – Bloomsbury Publishing: Adlard Coles Nautical.
- [12] Кротов, А.И., Ястреба, А.П., Астахова, А.О. (2015) Исследование влияния обводов крейсерско-гоночных яхт на буксировочное сопротивление. Збірник наук. праць НУК, №4 2015. С.63-68.
- [13] Microsoft 365. Excel program. 2020.

© Некрасов В. О., Астахова А. О.

Дата надходження статті до редакції: 03.06.2024

Дата затвердження статті до друку: 18.06.2024