

NEW MATHEMATICAL MODELS OF THE THRUST COEFFICIENT AND THE TORQUE COEFFICIENT ON THE SHIP'S PROPELLER SHAFT

НОВІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОЕФІЦІЄНТУ УПОРУ І КОЕФІЦІЄНТУ МОМЕНТУ НА ВАЛУ ГРЕБНОГО ГВИНТА СУДНА

O. F. Kryvyi, Dr. Sci., professor, M. V. Miyusov, Dr. Sci., professor,

M. O. Kryvyi, graduate student

О. Ф. Кривий д.ф.-м.н., професор, М. В. Міюсов, д.т.н., професор

М. О. Кривий, аспірант

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

Solving the problems of course stabilization of the ship, dynamic positioning, the ship divergence dynamics, the construction of effective simulators and autopilots are not possible without the use of adequate mathematical models of the dynamics of the ship. The presence of the latter is also a necessary condition for studying various ship maneuvers, in particular, such as circulation, Kempf zigzag, slowing down, acceleration, etc. Improving control methods, including trends towards full autonomy of ships, necessitates constant improvement of mathematical models of the ship's propulsion complex. The general mathematical model of ship dynamics includes mathematical models of inertial and non-inertial forces acting on the ship. The latter include, in particular, hydrodynamic forces on the hull, forces caused by the operation of the ship's rudders and propellers, aerodynamic forces acting on the ship's hull, and forces caused by the ship's sailing rig. Mathematical models for non-inertial forces have an empirical multilevel character, include mathematical models of various quantities and parameters, and are built on the basis of experimental data processing or methods of computational hydrodynamics. Therefore, the improvement and refinement of each such model leads to the improvement of the mathematical model as a whole and is an important scientific and actual practical task. An important task is also to bring the specified mathematical models to a form that is convenient for use. In this work, new adequate, easy-to-use, mathematical models of the thrust coefficient of the propeller and the torque coefficient on the propeller shaft were obtained using regression analysis methods, and their excellent consistency with known mathematical models was shown on specific examples. For the main types of commercial vessels, the numerical values of the coefficients of the models are given, and the values of the propeller advance ratio of the zero thrust and zero torque on the propeller shaft are determined. This made it possible to obtain the condition of normal accident-free operation of the propulsion complex of the ship, which must be satisfied by the speed of the ship and the frequency of rotation of the propeller shaft, at different values of the drift angle and angular speed.

Keywords: mathematical models, ship propellers, propeller thrust coefficients, propeller shaft torque coefficients.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розв'язання задач курсової стабілізації судна, динамічного позиціонування, динаміки розходження суден, побудова ефективних тренажерів і авторульових не можливі без використання адекватних математичних моделей динаміки судна. Наявність останніх є також необхідною умовою для дослідження різних маневрів судна, зокрема, таких як циркуляція,

зигзаг Кемпфа, гальмування, та ін. Вдосконалення методів керування, включаючи тенденції до повної автономії суден, обумовлює необхідність постійного вдосконалення математичних моделей пропульсивного комплексу судна.

Загальна математична модель динаміки судна включає математичні моделі інерційних і неінерційних сил, що діють на судно. До останніх відносяться, зокрема, гідродинамічні сили на корпусі, сили спричинені роботою суднових стерн і гвинтів. Математичні моделі для неінерційних сил носять емпіричний багаторівневий характер, включають в себе математичні моделі різних величин, і будуються на основі обробки експериментальних даних, або методів обчислювальної гідродинаміки. Тому вдосконалення і уточнення кожної такої моделі приводить до поліпшення математичної моделі в цілому і є важливим науковим і актуальним практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Побудові і дослідженню математичних моделей пропульсивного комплексу судна присвячено багато досліджень [1 - 42], які вивчали різні аспекти цієї проблеми. Зокрема, загальні моделі динаміки судна досліджувались і застосовувались в роботах [2, 3 – 5, 10, 15, 21, 24, 33, 36, 37, 41 -45]. Детальний аналіз із цього приводу можна знайти, наприклад, в роботах [3 – 9, 25 - 29]. Стосовно математичних моделей для неінерційних сил, то, зокрема, в роботах [5 – 6, 25 - 27] застосовані методи регресивного аналізу для побудови математичних моделей похідних гідродинамічних сил на корпусі судна. Математичні моделі суднових стерн досліджувались, зокрема, в роботах [2, 8, 29], в роботах [8, 29] наведений детальний аналіз останніх досліджень в цьому напрямку. Побудові математичних моделей суднових гвинтів присвячено також багато досліджень [1, 2, 7, 10, 11 – 14, 16 -20, 28, 30, 32 – 34, 39], зокрема, в роботах [8, 29] можна знайти детальний аналіз із цього приводу. Незважаючи на значний розвиток в останній час досліджень роботи суднових гвинтів і побудови нових математичних моделей їх роботи, намітилось деяке відставання в їх використанні при дослідженні динаміки пропульсивного комплексу судна. Автори нерідко використовують застарілі математичні моделі роботи судових гвинтів, зокрема, як було показано в роботах [8, 29], не враховуючи поперечні сили і моменти, спричинені роботою гвинтів, в загальних математичних моделях руху судна. На наш огляд, це пов'язано також із деякою складністю застосування вказаних моделей, що спричинено досить високими степенями апроксимуючих многочленів, зокрема, для коефіцієнта упору гребного гвинта судна K_P і коефіцієнта моменту на його валу K_Q . Тому приведення математичних моделей для K_P і K_Q до зручного для застосування вигляду, не погіршуючи їх властивостей, є важливою науково – практичною задачею.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціль даної роботи є побудова нових, простих в застосуванні, адекватних моделей коефіцієнту упору гребного гвинта судна K_P та коефіцієнту моменту на валу судового гвинта K_Q , порівняння їх із відомими моделями і визначення числових параметрів моделей для основних типів комерційних суден.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Загальні математичні моделі сил і моменту на гребному гвинті судна

Зазвичай [7, 28], компоненти результуючої сили X_P і Y_P , та величину моменту M_P , викликаних роботою гребних гвинтів судна подають так:

$$X_P = (1 - \zeta_P)T_P = (1 - \zeta_P)\rho n_P^2 D_P^4 K_P, Y_P = \frac{1}{8}\rho \pi v_P^2 D_P^2 \sigma_{yP}, M_P = Y_P L_P, \quad (1)$$

де n_P, D_P – відповідно частота обертання і діаметр гребного гвинта; $L_P = |x_P|$ – відстань від центру тяжіння судна до гвинта; ρ – масова густина морської води. Швидкість натікання потоку на гвинт v_P можна подати через безрозмірні параметри руху судна: кут дрейфу β , величину швидкості руху судна \tilde{v} і величину кутової швидкості $\omega = \frac{\omega_z L}{v}$, наступним чином [7, 28]:

$$v_P = (1 - \psi_P)k_P v, k_P = \sqrt{1 - 2\tilde{x}_P \frac{\omega}{\tilde{v}} \sin \beta + \tilde{x}_P^2 \left(\frac{\omega}{\tilde{v}}\right)^2}. \quad (2)$$

Для безрозмірних коефіцієнтів навантаження по поперечній силі σ_{yP} , засмоктування на гвинті ζ_P і коефіцієнту попутного потоку ψ_P при криволінійному русі можна скористатись відповідно формулами (13), (15) і (18) та (19) із роботи [7].

Визначальним для математичних моделей сил і моментів на гвинті є безрозмірний коефіцієнт упору гребного гвинта K_P , який згідно першої формули із (1), є наступним відношенням:

$$K_P = \frac{T_P}{\rho n_P^2 D_P^4}. \quad (3)$$

Коефіцієнт упору є функцією геометричних і кінематичних характеристик гребного гвинта:

$$K_P = K_P(J_P, a, h, \kappa), \quad (4)$$

де $a = \frac{4A_E}{\pi D_P^2}$ – дискове відношення гвинта, значення якого знаходиться в межах $0.4 \div 1.1$;

$h = \frac{H}{D_P}$ – шагове відношення гребного гвинта, значення якого знаходяться, за звичай, в

межах $0.5 \div 1.6$; κ – число лопатей гребного гвинта; J_P – відносна хода гребного гвинта, яку у випадку криволінійного руху судна можна подати так [7, 28]:

$$J_P = \frac{v_P}{n_P D_P} = \frac{(1 - \psi_P)k_P v_0 \tilde{v}}{n_P D_P}. \quad (5)$$

В таблиці 1 наведені основні геометричні характеристики гвинтів для основних типів комерційних суден.

Таблиця 1. Геометричні характеристики суден і гребних гвинтів

Судно (проект)	РСС Авто Перев.	DTC, Конт.	KCS, Конт.	SR 108 Конт.	KVLCC2 Танкер	VLCC, Танкер ESS0	VLGC, Танкер	LPG, Танкер
№	1	2	3	4	5	6	7	8
L [м]	188.1	355	230	175	320	325	226	147
B [м]	32	51	32.2	25.4	58	53	36.6	25.5
T [м]	9.1	14.5	10.8	8.5	20.8	21.79	11.8	8.8

C_B	0.539	0.661	0.651	0.562	0.8089	0.831	0.72	0.7403
D_P [м]	6.6	8.911	7.9	6.5	9.86	9.1	7.4	5.7
κ	5	5	5	5	4	5	4	4
a	0.83	0.8	0.8	0.844	0.431	0.682	0.42	0.6017
h	1.042	0.959	0.997	0.915	0.721	0.715	0.905	0.7839

Враховуючи, що геометричні параметри a , h , κ для кожного судна є сталими, то очевидно, що основним динамічним параметром для коефіцієнту упору гвинта є відносна хода гребного гвинта. На основі обробки експериментальних даних [7, 22, 28] для серії гвинтів за допомогою регресивного аналізу [5 - 7, 25 - 27] отримано наступне подання:

$$K_P(J_P) = \mu_{30} + \mu_{31}J_P + \mu_{32}J_P^2 + \mu_{33}J_P^3. \quad (6)$$

Значення коефіцієнтів $\mu_{kj} = \mu_{kj}(a, h, \kappa)$ математичної моделі (6) для деяких типів комерційних суден наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Параметри математичних моделей коефіцієнта упору гвинта K_P

Судно (проект)	РСС Авто. Перев.	DTC, Конт.	KCS, Конт.	SR 108 Конт.	KVLCC2 Танкер	VLCC, Танкер ESS0	VLGC, Танкер	LPG, Танкер
№	1	2	3	4	5	6	7	8
μ_{30}	0.5026	0.4555	0.4749	0.4370	0.2923	0.3190	0.3616	0.3367
μ_{31}	-0.2701	-0.2658	-0.2642	-0.2777	-0.2108	-0.2506	-0.1860	-0.2477
μ_{32}	-0.2674	-0.2654	-0.266	-0.2655	-0.2183	-0.26116	-0.2177	-0.2287
μ_{33}	0.0868	0.0849	0.0845	0.0890	0.0520	0.07570	0.0501	0.0723
μ_{20}	0.5159	0.46841	0.4878	0.4506	0.3003	0.33051	0.3692	0.3477
μ_{21}	-0.3854	-0.3785	-0.3764	-0.3955	-0.28094	-0.35113	-0.2525	-0.3437
μ_{22}	-0.0721	-0.0745	-0.0758	-0.0652	-0.0995	-0.0909	-0.1050	-0.066
μ_{10}	0.54199	0.49544	0.51526	0.4742	0.3364	0.36344	0.40729	0.3716
μ_{11}	-0.49358	-0.4903	-0.49006	-0.4933	-0.4301	-0.48734	-0.41003	-0.4428

2. Побудова нових математичних моделей коефіцієнту упору гребного гвинта судна

Математична модель (6) дуже добре описує залежність коефіцієнту K_P від відносної ходи гребного гвинта J_P для основних робочих режимів суднового гвинта, тобто при $0 \leq J_P \leq 1.5$. Але недоліком подання (6) є висока степінь апроксимуючого многочлена, що призводить до складнощів при реалізації загальної моделі руху судна, оскільки у виразі (5) для J_P містяться всі динамічні параметри руху судна: \tilde{v} , β і ω . Тому спробуємо побудувати нові математичні моделі коефіцієнту упору гребного гвинта, які б були зручними при використанні в загальній математичній моделі динаміки судна і не втрачали б свою адекватність. Для цього скориставшись експериментальними даними [22] і методами регресивного аналізу [5, 6, 25 - 27], отримаємо дві нові математичні моделі для коефіцієнту упору гребного гвинта, у вигляді поліномів другої і першої степені:

$$K_P(J_P) = \mu_{20} + \mu_{21}J_P + \mu_{22}J_P^2, \quad (7)$$

$$K_P(J_P) = \mu_{10} + \mu_{11}J_P. \quad (8)$$

Значення коефіцієнтів μ_{kj} для основних типів комерційних суден наведені в таблиці 2. В таблиці 3 наведені кореляційні властивості [6, 25 - 27] математичних моделей (7), (8), а саме значення нормованого R^2 і рівні значимості $\alpha_s(\mu_{kj})$ для кожного коефіцієнту моделей. Зауважимо, що рівень кореляції моделі і значимість її коефіцієнтів вважаються відмінними, якщо $R^2 \rightarrow 1$, $\alpha_s(\mu_{kj}) \rightarrow 0$. Данні наведені в таблиці підтверджують відмінні кореляційні властивості отриманих моделей.

Таблиця 3. Кореляційні властивості математичних моделей (7), (8).

Судно (проект)		РСС Авто.	DTC, Конт.	KCS, Конт.	SR 108 Конт.	KVLCC2 Танкер	VLCC, Танкер ESS0	VLGC Танкер	LPG, Танкер
№		1	2	3	4	5	6	7	8
Модель (7)	R^2	0.999195	0.99922	0.99923	0.99921	0.99961	0.99942	0.99964	0.99931
	$\alpha_s(\mu_{20})$	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\alpha_s(\mu_{21})$	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\alpha_s(\mu_{22})$	10^{-11}	10^{-11}	10^{-11}	10^{-11}	0	10^{-15}	0	10^{-12}
Модель (8)	R^2	0.995715	0.99545	0.99532	0.99631	0.99088	0.9937	0.98892	0.9956
	$\alpha_s(\mu_{10})$	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\alpha_s(\mu_{11})$	0	0	0	0	0	0	0	0

Але, як показує практика, одних лише відмінних кореляційних властивостей не достатньо для отримання адекватних моделей. Тому для порівняння моделей було проведено чисельне моделювання на основі подань (6) – (8) для конкретних типів суден. На рисунках 1-8, для основних типів комерційних суден, характеристики яких наведені в таблиці 2, подані залежності коефіцієнту упору гребного гвинта K_P від відносної ходи гребного гвинта J_P , які отримані за допомогою формул: (6) – точкові лінії чорного кольору, за допомогою, (7) - суцільні лінії червоного кольору і (8) – суцільні лінії синього кольору.

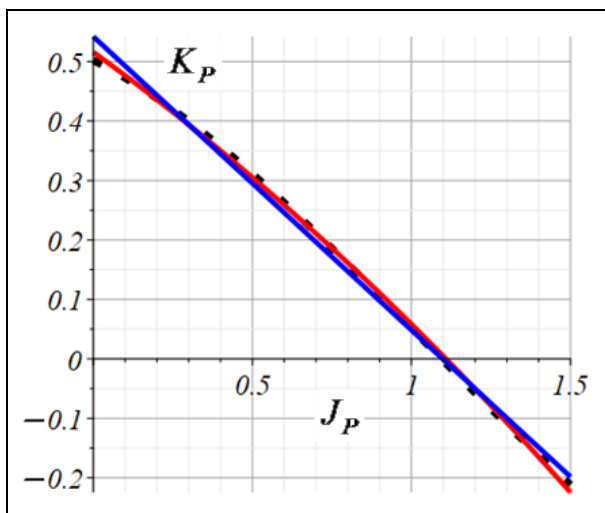


Рис. 1. Коефіцієнт K_P для судна 1

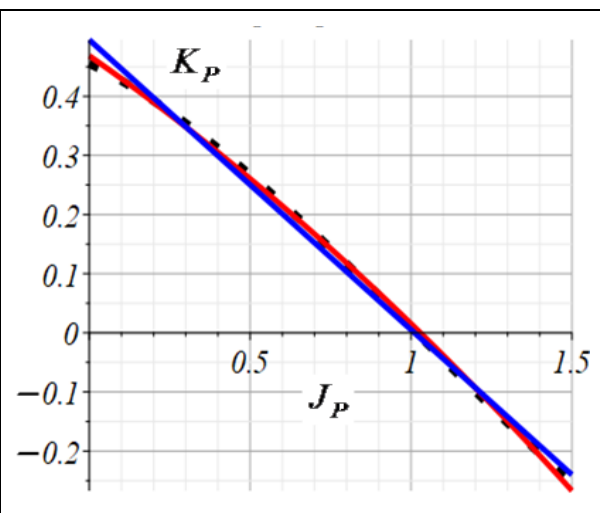


Рис. 2 Коефіцієнт K_P для судна 2

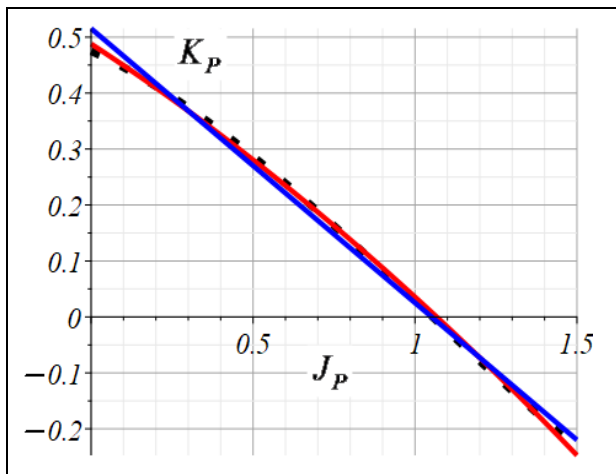


Рис. 3. Коефіцієнт K_p для судна 3

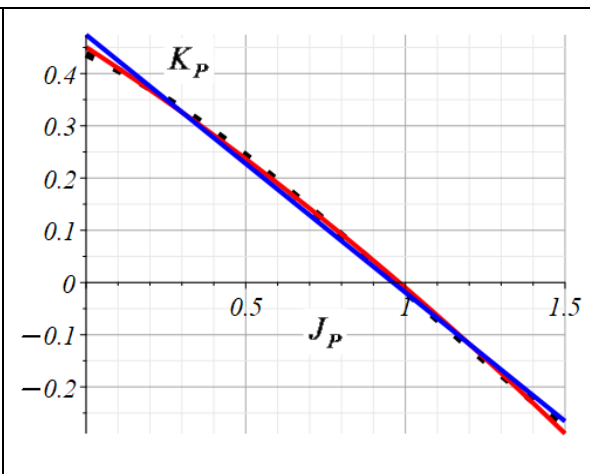


Рис. 4. Коефіцієнт K_p для судна 4

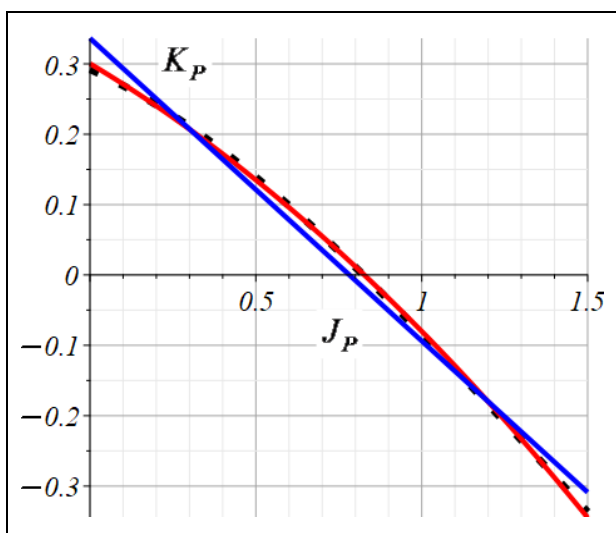


Рис. 5. Коефіцієнт K_p для судна 5

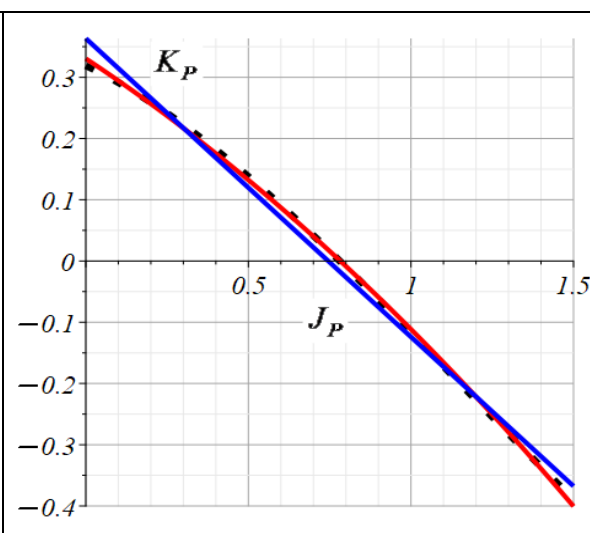


Рис. 6. Коефіцієнт K_p для судна 6

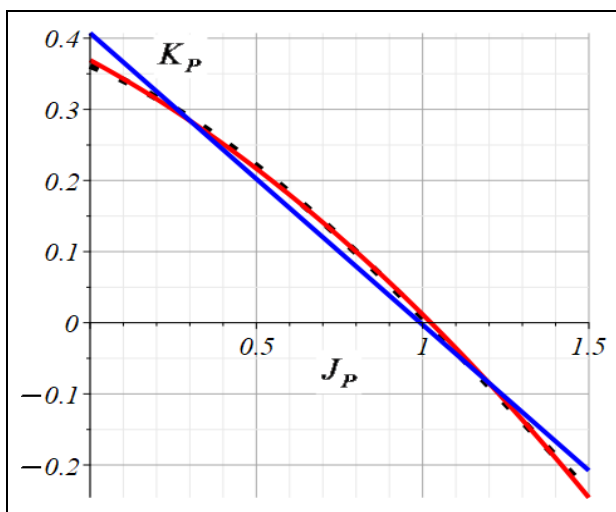


Рис. 7. Коефіцієнт K_p для судна 7

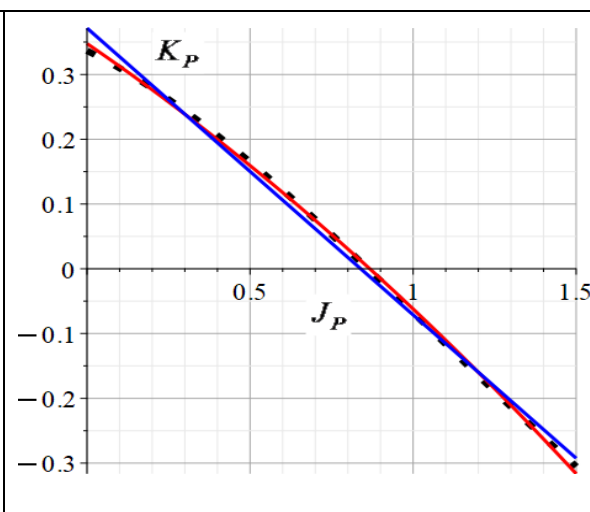


Рис. 8. Коефіцієнт K_p для судна 8

Отримані на рисунках 1-8 залежності показують, що для всіх розглянутих типів суден математичні моделі (7) і (8) добре корелюються із поданням (6), при цьому трохи більше узгоджуються між собою моделі (6) і (7). Тому, на наш погляд, найбільш адекватною і більш прийнятною для застосування є математична модель (7).

3. Побудова нових математичних моделей коефіцієнту моменту на валу гребного гвинта судна

Другою основною характеристикою роботи судових гребних гвинтів є безрозмірний коефіцієнт моменту на валу гребного гвинта, який визначається так [1,2,7, 28]:

$$K_Q = \frac{Q_P}{\rho n_P^2 D_P^5}, \quad (9)$$

де Q_P – момент на валу гребного гвинта судна. Для цього коефіцієнту, який є визначальним для визначення ефективності роботи гребного гвинта, і зокрема, ККД (коефіцієнту корисної дії) методами регресійного аналізу в роботі [7, 28], на основі експериментальних даних [22], отримані наступні подання:

$$K_Q(J_P, a, h, \kappa) = \mu_{30}^* + \mu_{31}^* J_P + \mu_{32}^* J_P^2 + \mu_{33}^* J_P^3. \quad (10)$$

Значення коефіцієнтів математичної моделі (10) для деяких типів комерційних суден наведено в таблиці 4.

Таблиця 4. Параметри математичних моделей коефіцієнта K_Q .

Судно (проект)	РСС Авто.	DTС, Конт.	KCS, Конт.	SR 108 Конт.	KVLCC2 Танкер	VLCC, Танкер ESSO	VLGC, Танкер	LPG, Танкер
№	1	2	3	4	5	6	7	8
μ_{30}^*	0.0775	0.0649	0.0700	0.0601	0.0312	0.0353	0.0459	0.0399
μ_{31}^*	-0.0362	-0.0328	-0.0340	-0.0324	-0.0187	-0.0230	-0.0207	-0.0250
μ_{32}^*	-0.0370	-0.0330	-0.0340	-0.0346	-0.0086	-0.0206	-0.0098	-0.0204
μ_{33}^*	0.0099	0.0079	0.0079	0.0106	-0.0102	-0.0002	-0.0099	0.0015
μ_{20}^*	0.0790	0.0661	0.0713	0.0617	0.0296	0.0353	0.0444	0.0401
μ_{21}^*	-0.0493	-0.0433	-0.0445	-0.0465	-0.0051	-0.0227	-0.0075	-0.0269
μ_{22}^*	-0.0148	-0.0154	-0.0161	-0.0107	-0.0316	-0.0211	-0.0321	-0.0171
μ_{10}^*	0.0844	0.0717	0.0771	0.0656	0.0410	0.0410	0.0560	0.0463
μ_{11}^*	-0.0715	-0.0663	-0.0687	-0.0626	-0.0524	-0.0429	-0.0557	-0.0526

Математична модель (10) також відмінно описує залежність коефіцієнту K_Q від відносної ходи гребного гвинта J_P для основних робочих режимів судового гвинта, тобто при $0 \leq J_P \leq 1.5$, але має ті самі недоліки, що і модель (6). Тому виникає необхідність також вдосконалити це подання, яке проведемо за допомогою регресійного аналізу [5, 6, 25 - 27]. В результаті отримаємо наступні нові моделі для коефіцієнту упору гребного гвинта:

$$K_Q(J_P) = \mu_{20}^* + \mu_{21}^* J_P + \mu_{22}^* J_P^2, \quad (11)$$

$$K_Q(J_P) = \mu_{10}^* + \mu_{11}^* J_P, \tag{12}$$

Значення коефіцієнтів μ_{kj}^* для основних типів комерційних суден наведені в таблиці 4. В таблиці 5 наведені основні кореляційні властивості [6, 25 - 27] математичних моделей (11), (12): значення нормованого R^2 і рівні значимості $\alpha_s(\mu_{kj}^*)$ для кожного коефіцієнту моделей.

Таблиця 5. Кореляційні властивості математичних моделей (11), (12).

Судно (проект)		PCC Авто.	DTC, Конт.	KCS, Конт.	SR 108 Конт.	KVLCC2 Танкер	VLCC, Танкер ESSO	VLGC Танкер	LPG, Танкер
№		1	2	3	4	5	6	7	8
Модель (11)	R^2	0.99954	0.99963	0.99965	0.99925	0.99906	1.00000	0.99921	0.99998
	$\alpha_s(\mu_{20}^*)$	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\alpha_s(\mu_{21}^*)$	0	0	0	0	0.0002	0	10^{-6}	0
	$\alpha_s(\mu_{22}^*)$	0	0	0	10^{-13}	0	0	0	0
Модель (12)	R^2	0.99250	0.99087	0.99068	0.99447	0.94255	0.97570	0.94712	0.98283
	$\alpha_s(\mu_{10}^*)$	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\alpha_s(\mu_{11}^*)$	0	0	0	0	0	0	0	0

Для підтверження адекватності отриманих математичних моделей (11), (12), проведено чисільне моделювання на основі подань (10) – (12). На рисунках 9-16, для основних типів комерційних суден, характеристики яких наведені в таблиці 2, подані залежності коефіцієнту упору гребного гвинта K_Q від відносної ходи гребного гвинта J_P , які отримані за допомогою формул: (10) – точкові лінії чорного кольору, (11) - суцільні лінії червоного кольору і (12) – суцільні лінії синього кольору.

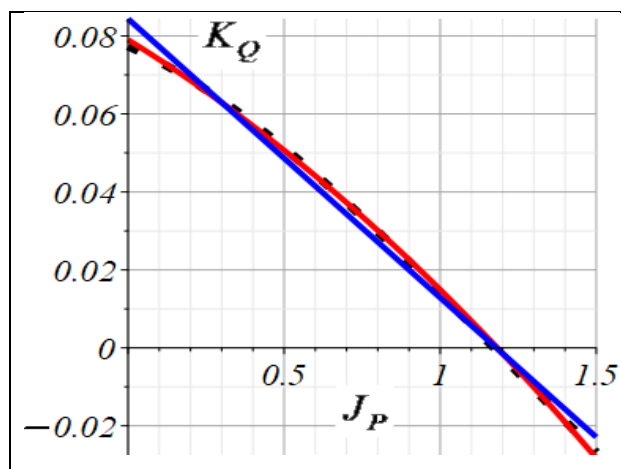


Рис. 9. Коефіцієнт K_Q для судна 1

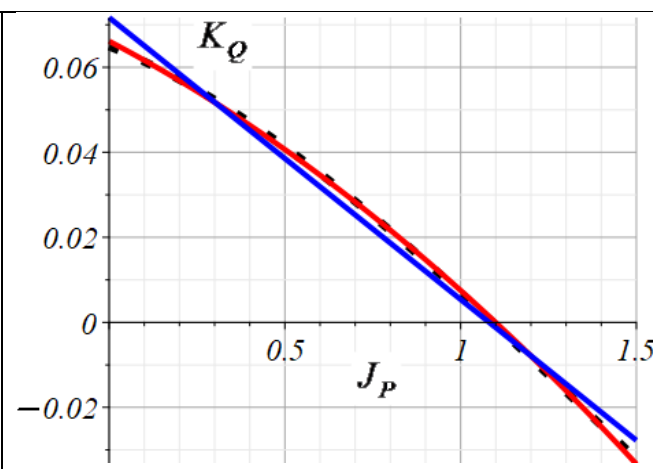
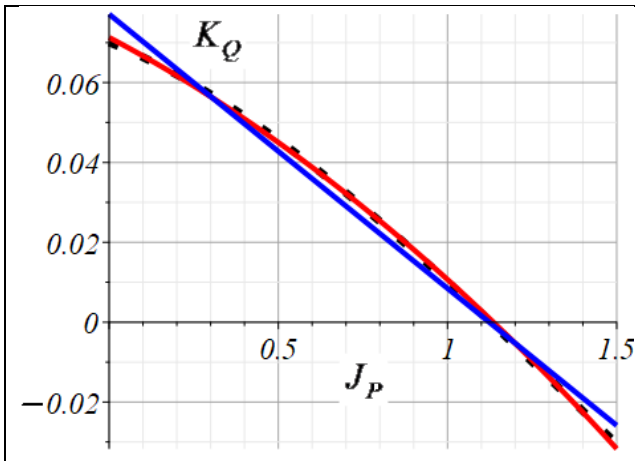
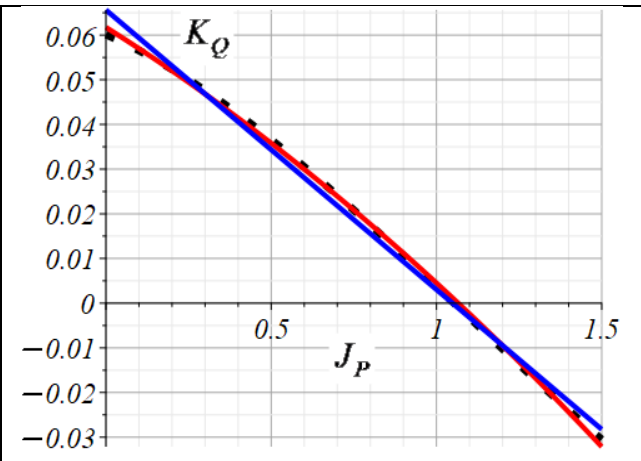
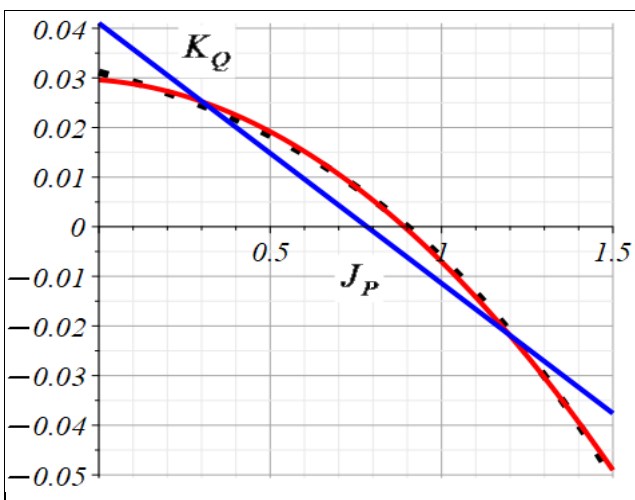
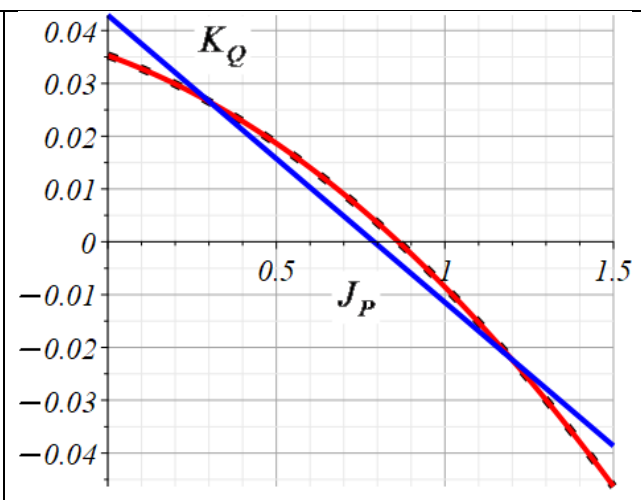
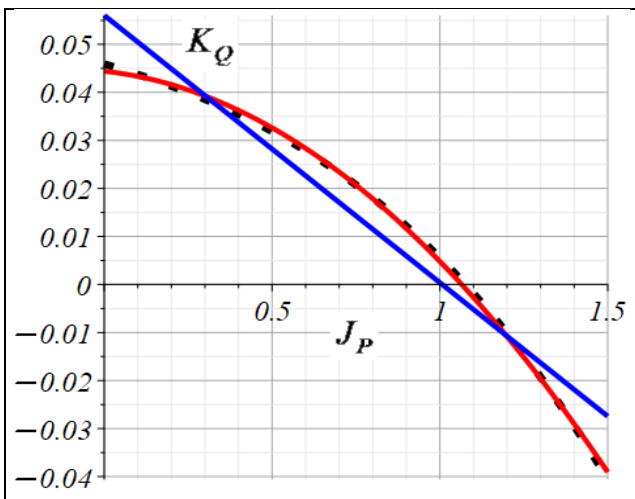
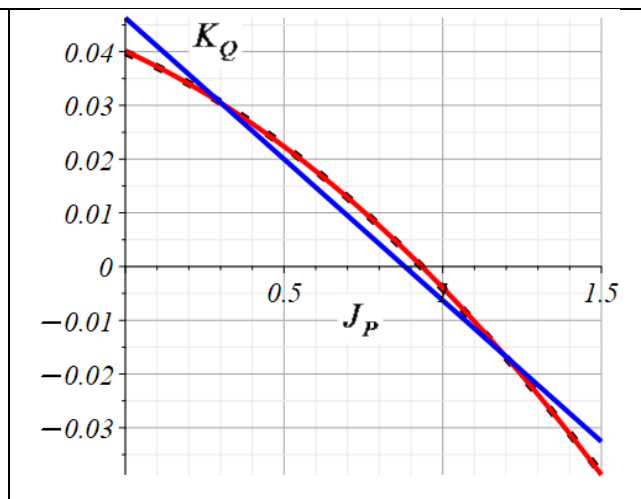


Рис. 10. Коефіцієнт K_Q для судна 2

Рис. 11. Коефіцієнт K_Q для судна 3Рис. 12. Коефіцієнт K_Q для судна 4Рис. 13 Коефіцієнт K_Q для судна 5Рис. 14. Коефіцієнт K_Q для судна 6Рис. 15. Коефіцієнт K_Q для судна 7Рис. 16. Коефіцієнт K_Q для судна 8

Отримані результати підтвержують відмінну узгодженість всіх трьох моделей (10) – (12), це особливо помітно для моделей (10), (11) (точкова чорна лінія і червона суцільна на усіх рисунка). Отже, на наш погляд, найбільш оптимальною для застосування є математична модель (11).

4. Відносна хода нульового упору гребного гвинта і нульового моменту на валу

Отримані вище математичні моделі для коефіцієнтів K_P і K_Q дозволяють, зокрема, визначати межі робочої зони відносної ходи гребного гвинта J_P для кожного типу суден. Ці межі визначаються за допомогою відносної ходи нульового упору гребного гвинта J_1 , при якій коефіцієнт упору гвинта буде нульовим: $K_P(J_1) = 0$, а також відносну ходу нульового моменту на валу гребного гвинта J_2 , при якій коефіцієнт моменту на валу гребного гвинта буде нульовим: $K_Q(J_2) = 0$. Слід зауважити, що при цьому повинні виконуватись умови [1]:

$$h < J_1 < J_2. \quad (13)$$

В таблиці 6 для основних типів комерційних суден наведені значення J_1 і J_2 , які підтверджують виконання умов (13), що також свідчить про адекватність отриманих математичних моделей.

Таблиця 6. Значення J_1 і J_2 .

Судно (проект)	РСС Авто	DTC, Конт.	KCS, Конт.	SR 108 Конт.	KVLCC2 Танкер	VLCC, Танкер ESS0	VLGC, Танкер	LPG, Танкер
№	1	2	3	4	5	6	7	8
h	1.042	0.959	0.997	0.915	0.721	0.715	0.905	0.7839
J_1	1.0944	1.0168	1.0540	0.9692	0.8238	0.7811	1.0169	0.8611
J_2	1.1727	1.0909	1.1273	1.0533	0.8995	0.8623	1.0757	0.9329

При всіх основних режимах руху судна (крім заднього ходу) для нормальної роботи суднової силової установки, відносна хода гребного гвинта, повинна задовольняти умові:

$$0 < J_P < J_1. \quad (14)$$

Отже, при криволінійному русі судна, для штатної роботи пропульсивного комплексу, швидкість судна і частота обертання валу гребного гвинта повинні задовольняти умові:

$$(1 - \psi_P)k_P v < J_1 n_P D_P. \quad (15)$$

Умова (15) є необхідною умовою, якій повинні задовольняти розв'язки загальних моделей пропульсивного комплексу судна.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Методами регресійного аналізу отримані нові адекватні, зручні в застосуванні, математичні моделі коефіцієнту упору гребного гвинта K_P і коефіцієнту моменту на валу гребного гвинта K_Q , показано на конкретних прикладах їх відмінна узгодженість із відомими математичними моделями. Для основних типів комерційних суден наведені числові значення коефіцієнтів моделей, та визначені значення відносної ходи нульового упору і нульового моменту на валу гребного гвинта. Це дало можливість також отримати умову штатної роботи пропульсивного комплексу судна, якій повинні задовольняти швидкість судна і частота обертання валу гребного гвинта, для різних значеннях кута дрейфу і кутової швидкості.

Запропонований підхід і отримані результати можуть бути використані при побудові і дослідженні нових математичних моделей гвинтів із регульованою ходою, а також при побудові загальних моделей динаміки пропульсивного комплексу судна.

ЛІТЕРАТУРА

1. А. М. Басин, И.Я. Миниович, *Теория и расчет гребных винтов*. ГСИСП, Л. 1963.
2. А. Д. Гофман, *Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна*. Справочник, Л.: Судостроение. 1988.
3. О. Ф. Кривий, *Методи математичного моделювання в задачах судноводіння*, ОНМА, Одеса. 2015.
4. А. Ф. Кривой, М. В. Миусов, “Математическая модель плоского движения судна при наличии ветродвижителей”, *Судовождение*, вып. 26, С.110-119, 2016.
5. А. Ф. Кривой, М. В. Миусов, “Математические модели гидродинамических характеристик пропульсивного комплекса судна для произвольных углов дрейфа”, *Судовождение*, вып. 28, С. 88-103, 2018. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.88-102
6. Кривий А. Ф., Миусов М. В., “Нові математичні моделі повздовжніх гідродинамічних сил на корпусі судна”. *Судноводіння*, 2020, 30. С. 88-98 DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.88-98
7. Кривий, М. В. Миусов, М. О. Кривий., “Математичне моделювання роботи суднових гвинтів при різних режимах маневрування.” *Судноводіння*, 2021, 32. С. 71-87 DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.71-87.
8. Кривий О.Ф., Миусов М.В., Кривий М.О. “Математичне моделювання роботи суднових стерн при різних режимах маневрування.” *Судноводіння*, 2023, 34, 93-114, DOI: 10.31653/2306-5761.34.2023.93-114
9. М. В. Миусов, *Режимы работы и автоматизация пропульсивного комплекса теплохода с ветродвижителями*, Одесса: ОГМА, ОКФА, 1996.
10. Р. Я. Першиц, *Управляемость и управление судном*, Л.: Судостроение, 1983.
11. В. К. Турбал, В. С. Шпаков, В. М. Штумпф, *Проектирование обводов и движителей морских транспортных судов*, Л: Судостроение., 1983.
12. Aoki, I., Kijima, K., Furukawa, Y., Nakiri, Y., On the prediction method for maneuverability of a full scale ship, *Journal of the Japan Soc of Nav. Archic. and Ocean Eng.*, 2006, 3, 157-165.
13. Altosole M., U. Campora, M. Figari, M. Laviola, M. Martelli, “A Diesel Engine Modelling Approach for Ship Propulsion Real-Time Simulators”, *J. Mar. Sci. Eng.*, v. 7, 138. 2019. <https://doi.org/10.3390/jmse7050138>
14. Altosole M., Donnarumma S., Spagnolo V., and Vignolo S., "Performance Simulation of Marine Cycloidal Propellers: A Both Theoretical and Heuristic Approach." *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, v. 10, no. 4: 505. <https://doi.org/10.3390/jmse10040505>
15. Erhan Aksu, Ercan Köse, “Evaluation of Mathematical Models for Tankers Maneuvering Motions”, *JEMS Maritime Sci*, v.5 №1, pp. 95-109, 2017. DOI: 10.5505/jems.2017.52523
16. Blanke M., Lindegaard K.-P., Fossen T. I., Dynamic Model for Thrust Generation of Marine Propellers, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 33, Issue 21, 2000, Pages 353-358*, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37100-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37100-8).
17. Bertram, V. *Practical Ship Hydrodynamic*, 2nd ed.; Elsevier Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2012; p. 284.
18. Richard Biven, "Interactive Optimization Programs for Initial Propeller Design" *University of New Orleans Theses and Dissertations*. 1009. 2009. <https://scholarworks.uno.edu/td/1009>
19. Godjevac M, van Beek T, Grimmelijs HT, Tinga T, Stapersma D. “Prediction of fretting motion in a controllable pitch propeller during service”. *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2009;223(4):541-560. doi:10.1243/14750902JEME128
20. Carlton J. Marine propellers and propulsion. UK: Elsevier Science & Technology, 2007.
 21. Inoe S., Hirano M., Kijima K., “Hydrodynamic derivatives on ship maneuvering”, *Int. Shipbuilding Progress*, v. 28, № 321, pp. 67-80, 1981.
 22. Furukawa Y., Ibaragi H., Nakiri Y. and Kijima K., “Shallow water effects on longitudinal components of hydrodynamic derivatives”, *4th MASHCON, Hamburg - Uliczka et al. (eds)-Bundesanstalt für Wasserbau*, 2016. DOI: 10.18451/978-3-939230-38-0_33
 23. Kang D., Nagarajan V., Hasegawa K., et al, “Mathematical model of single-propeller twin-rudder ship”. *J Mar Sci Technol*, v. 13, pp. 207–222, 2008, <https://doi.org/10.1007/s00773-008-0027-0>
 24. Kijima K., “Prediction method for ship maneuvering performance in deep and shallow waters. Presented at the Workshop on Modular Maneuvering Models”, *The Society of Naval Architects and Marine Engineering*, v.47, pp.121-130, 1991.
 25. Kryvyi O. F., Miyusov M. V., “Mathematical model of hydrodynamic characteristics on the ship's hull for any drift angles”, *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Taylor & Francis Group, London, UK., pp. 111-117, 2019.
 26. Kryvyi O. F., Miyusov M. V., “The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi-factor Regression Analysis”, *8 International Maritime Science Conference. IMSC 2019*. Budva, Montenegro, pp.545-555 http://www.imsc2019.ucg.ac.me/IMSC2019_BofP.pdf
 27. Kryvyi O. F., Miyusov M. V., “Construction and Analysis of Mathematical Models of Hydrodynamic Forces and Moment on the Ship's Hull Using Multivariate Regression Analysis,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 15, No. 4, doi:10.12716/1001.15.04.18, pp. 853-864, 2021.
 28. Kryvyi O., Miyusov M., Kryvyi M. “Construction and Analysis of New Mathematical Models of the Operation of Ship Propellers in Different Maneuvering Modes.” *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol.17, №1, pp. 95-102, 2023, DOI 10.12716/1001.17.01.09
 29. Kryvyi O., Miyusov M., Kryvyi M. “Analysis of Known and Construction of New Mathematical Models of Forces on a Ship's Rudder in an Unbounded Flow.” *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol.17, №4, pp. 831-839, 2023, DOI 10.12716/1001.17.04.09
 30. G. Kuiper, *The Wageningen Propeller Series*. MARIN Publication 92-001, 1992.
 31. Lee, H.Y., Shin, S.S., 1998. The prediction of ship's manoeuvring performance in initial design stage, *Practical Design of Ships and Mobile Units*, 633–639.
 32. Malecki, J. “Model of Propeller for the Precision Control of Marine Vehicle.” *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications, Ltd., November 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.180.323>.
 33. Martelli M, Figari M, Altosole M, Vignolo S. “Controllable pitch propeller actuating mechanism, modelling and simulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers“, *Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2014, 228(1):29-43. doi:10.1177/1475090212468254
 34. M.W.C. Osterveld and P. Van Ossanen. “Further computer-analyzed data of the Wageningen b-screw series”, *Int. Ship. Progress*, v. 22, №251, 1975.

35. Report of Research committee on standardization of mathematical model for ship maneuvering predictions (P-29), 2013, Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (in Japanese). http://www.jasnaoe.or.jp/research/pcommittee_end.
36. Shang H., Zhan C., Liu Z., "Numerical Simulation of Ship Maneuvers through Self-Propulsion", *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9):1017, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9091017>
37. Shengke Ni, Zhengjiang Liu, and Yao Cai. "Ship Manoeuvrability-Based Simulation for Ship Navigation in Collision Situations" *J. Mar. Sci. Eng.* 2019, 7, 90; doi:10.3390/jmse7040090
38. S. Sutulo and C. Guedes Soares. Guedes, "Mathematical Models for Simulation of Maneuvering Performance of Ships" *Marine Technology and Engineering*, (Taylor & Francis Group, London), p 661–698, 2011.
39. Tarbiat S., Ghassemi H, Fadavie M., "Numerical Prediction of Hydromechanical Behaviour of Controllable Pitch Propeller", *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2014, Article ID 180725, 7 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/180725>
40. Minh Tran, Jonathan Binns, Shuhong Chai, Alexander L Forrest and Hung Nguyen. "A practical approach to the dynamic modelling of an underwater vehicle propeller in all four quadrants of operation" *J Engineering for the Maritime Environment* 2019, Vol. 233(1) 333–344 <https://doi.org/10.1177/1475090217744906>
41. Yoshimura Y., Masumoto Y., "Hydrodynamic Database and Manoeuvring Prediction Method with Medium High-Speed Merchant Ships and Fishing", *International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM 2012)* pp.494-504.
42. Yasukawa H., Yoshimura Y. "Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions" *J Mar Sci Technol*, v. 20, 37–52pp, 2015. DOI 10.1007/s00773-014-0293-y
43. Yasuo Yoshimura, Masatoshi Kondo, Tomofumi Nakano, et al. "Equivalent Simple Mathematical Model for the Manoeuvrability of Twin-propeller Ships under the same propeller-rps". *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, v.24, №.0, p.157. 2016, <https://doi.org/10.9749/jin.133.28>
44. Wei Zhang, Zao-Jian Zou, "Time domain simulations of the wave-induced motions of ships in maneuvering condition", *J Mar Sci Technol*, 2016, v. 21, pp. 154–166. DOI 10.1007/s00773-015-0340-3
45. Wei Zhang, Zao-Jian Zou, De-Heng Deng, "A study on prediction of ship maneuvering in regular waves" *Ocean Engineering*, v. 137, pp 367-381, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.046>

REFERENCES

1. M. Bassin, I. Ja. Miniovich, *Theory and calculation of propellers*. GSISP, L. 1963.
2. A. D. Gofman, Propulsion and steering complex and ship maneuvering. Handbook. L.: Sudostroyenie.1988.
3. O. F. Kryvyi, *Methods of mathematical modeling in navigation*. ONMA, Odessa, 2015. (in Ukrainian)
4. O. F. Kryvyi, M. V. Miyusov, "Mathematical model of movement of the vessel with auxiliary wind-propulsors", *Shipping & Navigation*, v. 26, pp.110-119, 2016. (in Russian)
5. O. F. Kryvyi, M. V. Miyusov, "Mathematical models of hydrodynamic characteristics of the ship's propulsion complex for any drift angles", *Shipping & Navigation*, v. 28, pp. 88-102, 2018. (in Russian), DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.88-102

6. O. F. Kryvyi, M. V. Miyusov, “New mathematical models of longitudinal hydrodynamic forces on the ship’s hull”, *Shipping & Navigation*, v. 30, pp. 88-89, 2020 (in Ukrainian) DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.88-98
7. O. F. Kryvyi, M. V. Miyusov, M.O. Kryvyi, “Mathematical modeling of the operation of ship’s propellers with different maneuvering modes”, *Shipping & Navigation*, v. 32, pp. 71-87, 2021 (in Ukrainian) DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.71-87
8. O. F. Kryvyi, M. V. Miyusov, M.O. Kryvyi, “Mathematical models of ship’s rudders operation under various maneuvering modes”, *Shipping & Navigation*, v. 34, pp. 93-114, 2023 (in Ukrainian) DOI: 10.31653/2306-5761.34.2023.93-114
9. M. V. Miyusov, Modes of operation and automation of motor vessel propulsion unit with wind propulsors. Odessa, 1996. (in Russian).
10. R. Y. Pershytz, *Dynamic control and handling of the ship*. L: Sudostroenie, 1983. (in Russian)
11. V. K. Turbal, V. S. Shpakov, V. M. Shtumpf, *Desing of merchant ships form and propulsors*. L: Sudostroenie, 1983.
12. Aoki, I., Kijima, K., Furukawa, Y., Nakiri, Y., On the prediction method for maneuverability of a full scale ship, *Journal of the Japan Soc of Nav. Archic. and Ocean Eng.*, 2006, 3, 157-165.
13. Altosole M., Campora U., Figari M., Laviola M., Martelli M., “A Diesel Engine Modelling Approach for Ship Propulsion Real-Time Simulators”, *J. Mar. Sci. Eng.*, v. 7, 138. 2019. <https://doi.org/10.3390/jmse7050138>
14. Altosole M., Donnarumma S., Spagnolo V., and Vignolo S., "Performance Simulation of Marine Cycloidal Propellers: A Both Theoretical and Heuristic Approach." *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, v. 10, no. 4: 505. <https://doi.org/10.3390/jmse10040505>
15. Erhan Aksu, Ercan Köse, “Evaluation of Mathematical Models for Tankers' Maneuvering Motions”, *JEMS Maritime Sci*, v.5 №1, pp. 95-109, 2017. DOI: 10.5505/jems.2017.52523
16. Blanke M., Lindegaard K.-P., Fossen T. I., Dynamic Model for Thrust Generation of Marine Propellers, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 33, Issue 21, 2000, Pages 353-358, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37100-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37100-8).
17. Bertram, V. *Practical Ship Hydrodynamic*, 2nd ed.; Elsevier Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2012; p. 284.
18. Richard Biven, "Interactive Optimization Programs for Initial Propeller Design" *University of New Orleans Theses and Dissertations*. 1009. 2009. <https://scholarworks.uno.edu/td/1009>
19. Godjevac M, van Beek T, Grimmeliu HT, Tinga T, Stapersma D. “Prediction of fretting motion in a controllable pitch propeller during service”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2009;223(4):541-560. doi:10.1243/14750902JEME128
20. Carlton J. *Marine propellers and propulsion*. UK: Elsevier Science & Technology, 2007
21. Inoe S., Hirano M., Kijima K., “Hydrodynamic derivatives on ship maneuvering”, *Int. Shipbuilding Progress*, v. 28, № 321, pp. 67-80, 1981.
22. Furukawa Y., Ibaragi H., Nakiri Y. and Kijima K, “Shallow water effects on longitudinal components of hydrodynamic derivatives”, *4th MASHCON, Hamburg - Uliczka et al. (eds)-Bundesanstalt für Wasserbau*, 2016. DOI: 10.1851/978-3-939230-38-0_33
23. Kang D., Nagarajan V., Hasegawa K., et al “Mathematical model of single-propeller twin-rudder ship”. *J Mar Sci Technol*, v. 13, pp. 207–222, 2008, <https://doi.org/10.1007/s00773-008-0027-0>

24. Kijima K., “Prediction method for ship maneuvering performance in deep and shallow waters. Presented at the Workshop on Modular Maneuvering Models”, *The Society of Naval Architects and Marine Engineering*, v.47, pp.121-130, 1991.
25. Kryvyi O. F., Miyusov M. V., “Mathematical model of hydrodynamic characteristics on the ship's hull for any drift angles”, *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Taylor & Francis Group, London, UK., pp. 111-117, 2019.
26. Kryvyi O. F., Miyusov M. V., “The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi-factor Regression Analysis”, *8 International Maritime Science Conference. IMSC 2019*. Budva, Montenegro, pp.545-555 http://www.imsc2019.ucg.ac.me/IMSC2019_BofP.pdf
27. Kryvyi O. F., Miyusov M. V., “Construction and Analysis of Mathematical Models of Hydrodynamic Forces and Moment on the Ship's Hull Using Multivariate Regression Analysis,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 15, No. 4, doi:10.12716/1001.15.04.18, pp. 853-864, 2021.
28. Kryvyi O., Miyusov M., Kryvyi M. “Construction and Analysis of New Mathematical Models of the Operation of Ship Propellers in Different Maneuvering Modes.” *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol.17, №1, pp. 95-102, 2023, DOI 10.12716/1001.17.01.09
29. Kryvyi O., Miyusov M., Kryvyi M. “Analysis of Known and Construction of New Mathematical Models of Forces on a Ship's Rudder in an Unbounded Flow.” *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol.17, №4, pp. 831-839, 2023, DOI 10.12716/1001.17.04.09
30. G. Kuiper. *The Wageningen Propeller Series*. MARIN Publication 92-001, 1992.
31. Lee, H.Y., Shin, S.S., 1998. The prediction of ship's manoeuvring performance in initial design stage, *Practical Design of Ships and Mobile Units*, 633–639.
32. Malecki, J. “Model of Propeller for the Precision Control of Marine Vehicle.” *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications, Ltd., November 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.180.323>.
33. Martelli M, Figari M, Altosole M, Vignolo S. “Controllable pitch propeller actuating mechanism, modelling and simulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers“, *Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2014, 228(1):29-43. doi:10.1177/1475090212468254
34. M.W.C. Osterveld and P. Van Ossanen. Further computer-analyzed data of the wageningen b-screw series. *Technical report, Netherlands Ship Model Basin*, Wageningen, the Netherlands, 1975.
35. Report of Research committee on standardization of mathematical model for ship maneuvering predictions (P-29), 2013, Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (in Japanese). http://www.jasnaoe.or.jp/research/pcommittee_end
36. Shang H., Zhan C., Liu Z., “Numerical Simulation of Ship Maneuvers through Self-Propulsion”, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (9): 1017, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9091017>
37. Shengke Ni., Zhengjiang Liu, and Yao Cai. "Ship Manoeuvrability-Based Simulation for Ship Navigation in Collision Situations" *J. Mar. Sci. Eng.* 2019, 7, 90; doi:10.3390/jmse7040090
38. S. Sutulo and C. Guedes Soares, “Mathematical Models for Simulation of Maneuvering Performance of Ships” *Marine Technology and Engineering*, (Taylor & Francis Group, London), p 661–698, 2011.

39. Tarbiat S., Ghassemi H, Fadavie M., "Numerical Prediction of Hydromechanical Behaviour of Controllable Pitch Propeller", *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2014, Article ID 180725, 7 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/180725>
40. Minh Tran, Jonathan Binns, Shuhong Chai, Alexander L Forrest and Hung Nguyen. A practical approach to the dynamic modelling of an underwater vehicle propeller in all four quadrants of operation” *J Engineering for the Maritime Environment* 2019, Vol. 233(1) 333–344 <https://doi.org/10.1177/1475090217744906>
41. Y. Yoshimura, Y. Masumoto, “Hydrodynamic Database and Manoeuvring Prediction Method with Medium High-Speed Merchant Ships and Fishing”, *International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM 2012)* pp.494-504.
42. Yasukawa H., Yoshimura Y. “Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions” *J Mar Sci Technol*, v. 20, 37–52pp, 2015. DOI 10.1007/s00773-014-0293-y
43. Yasuo Yoshimura, Masatoshi Kondo, “Tomofumi Nakano, et al. “Equivalent Simple Mathematical Model for the Manoeuvrability of Twin-propeller Ships under the same propeller-rps”. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, v.24, №.0, p.157. 2016, <https://doi.org/10.9749/jin.133.28>
44. Wei Zhang, Zao-Jian Zou, “Time domain simulations of the wave-induced motions of ships in maneuvering condition”, *J Mar Sci Technol*, 2016, v. 21, pp. 154–166. DOI 10.1007/s00773-015-0340-3
45. Wei Zhang, Zao-Jian Zou, De-Heng Deng, “A study on prediction of ship maneuvering in regular waves” *Ocean Engineering*, v. 137, pp 367-381, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.046>