

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Буй Дуй Тхань

УДК 629.5.01: 629.5.022.22

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ АВТОПАСАЖИРСЬКИХ
КАТАМАРАНІВ ПО КОМПЛЕКСНОМУ КРИТЕРІЮ
ЕФЕКТИВНОСТІ**

Спеціальність 05.08.03 – конструювання та будування суден

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Бондаренко Олександр Валентинович,
Національний університет
кораблебудування імені адмірала
Макарова, доцент кафедри теорії та
проекування суден.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дихта Леонід Михайлович,
Чорноморський державний університет
імені Петра Могили,
професор кафедри прикладної та вищої
математики;

кандидат технічних наук
Сьомін Олексій Анатолійович,
ПАТ “Київський суднобудівний -
судноремонтний завод (КССРЗ)”,
начальник групи суднобудування та
судноремонту.

Захист відбудеться 26 січня 2015 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий "25" грудня 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

Л.І. Коростильов

Замовлене. Підписано до друку 23.12.2014. Формат 60×90/16.
Папір офсетний. Друк трафаретний. Гарнітура «Таймс».
Ум. дрку. арк. 1,5. Обл.-вид. арк. 1,0
Наклад 100 прим. Замовлення № 196

Надруковано в друкарні ПП «РАЛ-поліграфія».
54052, Миколаїв, пр. Корабелів, 2/2,
тел. (0512) 67-08-28, ел. пошта: ral.print@gmail.com
Свідоцтво про держ. реєстрацію ДК № 2850 від 15.05.2007 р.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нині у світі використовується значна кількість швидкісних пасажирських суден різних типів, з яких близько 70 % є катамаранами. Це пояснюється тим, що в порівнянні з іншими типами суден катамарани мають кращі характеристики ходовості, місткості, остійності, мореплавності. Останніми роками збільшується кількість проектів і замовлень на побудову відносно великих швидкісних пасажирських та автопасажирських катамаранів.

Проектування швидкісних катамаранів має деякі особливості. У першу чергу це пов'язано зі складністю катамаранів як об'єкта проектування, різноманітням технічних рішень, що приймаються при їх створенні, з невизначеністю економічних та експлуатаційних даних. Важливе значення при розробці проектів швидкісних катамаранів мають питання забезпечення безпеки пасажирів.

Тому вибір проектних характеристик швидкісних автопасажирських катамаранів (АПК) доцільно проводити шляхом розв'язання задачі синтезу в стохастичній постановці з урахуванням ризиків від аварійних ситуацій, що виникають у процесі експлуатації судна.

Проблемі проектування катамаранів присвячено роботи М.Я. Алфер'єва, В.А. Дубровського, О.І. Соломенцева, В.А. Ніколаєва, Н.В. Moraes, I. Grubisic, A.F. Molland та ін. Питання врахування безпеки плавання та ризиків при проектуванні суден розглянуто в наукових працях В.О. Некрасова, Г.В. Єгорова, О.В. Бондаренка. Ці роботи послужили науковим підґрунтям дисертації.

Ретельне вивчення перерахованих публікацій показало відсутність у них урахування ризиків при оцінці ефективності катамаранів на етапі концептуального проектування.

Таким чином, актуальність теми дисертації обумовлена:

- сприятливими умовами для розвитку швидкісних суден, які перевозять пасажирів та автомобілі у В'єтнамі, Україні та інших країнах світу;
- ефективністю експлуатації катамаранів для швидкісних морських перевезень;
- сприятливими тенденціями розвитку світового швидкісного флоту та проектування великих автопасажирських катамаранів;
- відсутністю систематичних досліджень, присвячених формулюванню і розв'язанню задачі визначення проектних характеристик АПК з урахуванням безпеки суден на початкових етапах проектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація включає в себе результати досліджень, які було отримано при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) “Розробка методики визначення параметричної надійності судна на початкових етапах його проектування” № ДР 0111U002319 і “Удосконалення ефективності та надійності малих та швидкісних металевих суден” № ДР 0113U000244 Міністерства освіти і науки України. Також вона була виконана відповідно до державної програми “Розвиток морської економіки і суднобудування В'єтнаму” у рамках НДР “Створення систем автоматизованого проектування сучасних суден В'єтнаму”.

Мета наукового дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення проектування АПК шляхом створення сучасної методики визначення оптимальних проектних характеристик суден такого типу для концептуальної стадії.

Основні задачі наукового дослідження. Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Створити базу даних автопасажирських катамаранів. На основі аналізу цієї бази отримати статистичні залежності, які можна буде використати в математичній моделі та при визначенні діапазону значень обмежень на незалежні змінні.
2. Розробити математичну модель визначення проектних характеристик автопасажирських катамаранів на початкових етапах проектування.
3. Створити модель функціонування автопасажирського катамарана для розрахунку економічних показників за період життєвого циклу судна.
4. Сформулювати задачу оптимізації проектних характеристик АПК та запропонувати практичні методи для її розв'язання.
5. Створити комплекс прикладних програм для автоматизованого проектування АПК. Перевірити працездатність і точність розрахунків цього комплексу при розв'язанні задачі оптимізації проектних характеристик АПК.

Об'єктом дослідження є процес проектування швидкісних автопасажирських катамаранів.

Предмет дослідження – методи вибору оптимальних проектних характеристик автопасажирського катамарана за комплексним критерієм ефективності.

Методи дослідження. Теоретичною, методологічною основою дослідження є теорія корабля і теорія проектування суден. Для визначення діапазону зміни значень незалежних змінних та отримання залежностей для розрахунку проектних характеристик АПК було використано статистичні методи обробки даних. При розробці математичної моделі функціонування і визначенні економічних показників АПК використано теорію ризику, теорію ймовірності та імітаційне моделювання. Вибір оптимальних проектних характеристик АПК є задачею нелінійного програмування з обмеженнями. Для розв'язання цієї задачі застосовано метод штрафних функцій і метод Пауелла. Оцінювання похибки розрахунків розроблених алгоритмів проведено з використанням теорії похибок.

Наукова новизна одержаних результатів. У цій роботі:

- вперше розроблено математичну модель вибору проектних характеристик АПК на початкових етапах проектування, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує вплив ризику на ефективність судна;
- з урахуванням сучасних тенденцій у проектуванні суден удосконалено метод визначення ординат теоретичного креслення з подальшим їх використанням для побудови параметричної 3D-моделі поверхні корпусу катамарана в САД-системах;
- вперше запропоновано визначати параметри діаграми статичної остійності катамарана із застосуванням параметричної моделі поверхні його корпусу, що на відміну від інших методів має високу точність розрахунків;
- вперше в математичну модель вибору головних розмірів швидкісного катамарана введено метод розрахунку ймовірності пошкодження корпусу судна внаслідок слемінгу, що ґрунтується на ймовірності виникнення слемінгу

Ключевые слова: автопасажирский катамаран, проектные характеристики, метод штрафных функций, метод Пауэлла, математическая модель, модель функционирования, эффективность, метод Монте-Карло, теория риска.

THE SUMMARY

Bui Duy Thanh. The improvement of design of ro-pax catamaran by complex efficiency criterion. – Manuscript.

The Dissertation for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on specialty 05.08.03 – design and building of ships. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2014.

The dissertation is devoted to the establishment of modern methods for determining the optimization design characteristics of ro-pax catamaran (RPC). In the dissertation the database of more than 60 projects of RPC, which were built from 1995 to 2014, has been created. On the basis of statistical data processing, the formulas for determining the main characteristics of RPC have been proposed. The mathematical model, which counts the influence of reliability and safety of the ship on the ship's efficiency in the initial stages of design, has been work out. The model of functioning has been developed for determining the economic indicators over the life cycle of ship using the theory of risk. The methods of determining of the design characteristics of RPC has been implemented by using a set of application programs "RoPaxCatamaran".

Keywords: ro-pax catamaran, design characteristics, penalty function method, Powell's method, the mathematical model, the model of functioning, efficiency, the Monte-Carlo method, theory of risk.

2014 г. На основе статистической обработки данных этой базы предложены формулы для определения основных характеристик АПК, которые могут быть рекомендованы для использования в практике исследовательского проектирования, а также при разработке математических моделей АПК.

Сформулирована задача определения проектных характеристик АПК, рассмотрен вопрос выбора независимых переменных, параметров задания на проектирование, системы ограничений и показателя эффективности. Отмечается, что определение проектных характеристик АПК является задачей нелинейного программирования с ограничениями и стохастическими исходными данными. Для решения этой задачи использован метод внешних штрафных функций и метод Пауэлла.

Разработана математическая модель проектирования АПК с учетом показателей надежности и безопасности судна. При этом в модели применен подход, в соответствии с которым, используя ординаты теоретического чертежа судна и 3D-поверхность корпуса, выполняется расчет буксировочного сопротивления по методу Мичелла и расчет остойчивости по теоретическому методу.

На основании обработки чертежей общего расположения и статистических данных по автопассажирским катамаранам усовершенствованы алгоритмы расчета главных размерений, нагрузки масс, центра масс, вместимости. Для расчетов мореходности АПК соискателем применены полуэмпирические зависимости.

Оценка погрешности разработанных алгоритмов математической модели АПК показала, что эти расчеты дают результаты с достаточно высокой точностью (погрешности не превышают 10 %) и их можно применить на начальных этапах проектирования АПК.

Выполнена проверка адекватности математической модели путем сравнения результатов, полученных с помощью разработанной математической модели, с данными технических проектов и реальных АПК.

Разработана модель функционирования АПК для определения экономических показателей за жизненный цикл судна с применением теории риска. Выполнены расчеты вероятности возникновения столкновения, контакта, посадки на мель, повреждения соединительной конструкции из-за слеминга и вероятности гибели судна при возникновении одной из этих аварийных ситуаций. Для расчета значения рисков применен метод Монте-Карло.

Реализована методика определения проектных характеристик АПК с помощью комплекса прикладных программ “RoPaxCatamaran”.

Проверена работоспособность комплекса “RoPaxCatamaran” на примере решения задачи оптимизации проектных характеристик АПК для эксплуатации на линии Фукуок – Кьензанг в Южно-Китайском море.

Проверен расчет рисков судна путем проведения большого количества испытаний с помощью комплекса “RoPaxCatamaran”. После этого была смоделирована аварийная ситуация АПК, в результате которой судно погибло. Расчеты продемонстрировали значительные потери судовладельца при возникновении такой ситуации.

з'єднувальної конструкції та ймовірності того, що динамічні навантаження перевищать несучу здатність пластини обшивки цієї конструкції. Це дало змогу визначити значення ризику від слемінгу, який для швидкісних катамаранів є одним із небезпечних видів аварійного пошкодження;

– вперше розроблено математичну модель функціонування автопассажирського катамарана протягом його життєвого циклу, в якій разом з традиційними економічними показниками визначаються наслідки аварійних ситуацій, що дає змогу оцінити безпеку судна ще на початкових етапах проектування.

Практичне значення одержаних результатів:

– математична модель АПК, яка дозволяє розрахувати геометричні характеристики, отримати ординати теоретичного креслення судна, оцінити ходовість, визначити масу, перевірити остійність і мореплавність АПК;

– комплекс прикладних програм “RoPaxCatamaran”, який призначений для автоматизованого проектування автопассажирських катамаранів.

Упровадження результатів. Розроблена методика вибору проектных характеристик АПК і комплекс прикладних програм “RoPaxCatamaran” упроваджені і використані в порядку дослідної експлуатації в ПАТ “Чорноморсуднопроект”, на підприємстві “189 Company”, кафедрі автоматизованого проектування суден В'єтнамського морського університету і в навчальному процесі на кафедрі теорії і проектування суден НУК.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є закінченим комплексним дослідженням. Усі теоретичні і практичні результати дисертації були отримані претендентом особисто.

У роботах, написаних у співавторстві, претендентові належить: [1, 12] – проведення досліджень, спрямованих на розробку алгоритму прогнозування опору катамаранів, і перевірка його достовірності; [2] – уточнення формул для розрахунку навантаження мас АПК на початкових етапах проектування, перевірка похибки розрахунків; [3] – розробка схеми розрахунку плеча статичної остійності АПК за теоретичним методом; [4] – формули для оцінювання ризику слемінгу швидкісного катамарана; [5] – постановка задачі визначення основних елементів АПК з урахуванням вимог до безпеки; [6] – оцінювання пропульсивних характеристик водометного рушія з метою застосування водомета на АПК; [7, 8, 11] – дослідження методів визначення буксирувального опору швидкісних катамаранів на початкових етапах проектування; [15] – розробка алгоритму визначення координат центру мас АПК на етапі концептуального проектування.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи було представлено в 2012–2014 роках на міжнародних науково-технічних конференціях “Інновації в суднобудуванні та океанотехніці” (4–6 жовтня 2012 р. і 9–11 жовтня 2013 р.) та “Експериментальні методи теорії корабля” (20 вересня 2013 р.), всеукраїнських науково-технічних конференціях з міжнародною участю “Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів й інженерних споруд” (23–25 травня 2012 р., 22–24 травня 2013 р., 21–23 травня 2014 р.), міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні напрями теоретичних і прикладних досліджень 2012” (20–31 березня 2012 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових робіт (з них 6 робіт без співавторів), а саме: 4 у збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових видань, рекомендованих ДАК МОН України; одна стаття в міжнародному науковому журналі Астраханського державного технічного університету (Росія); одна стаття в міжнародному науковому журналі “The Transport Journal” (В'єтнам); одна стаття в міжнародному науковому журналі “Sworld”(Росія); 10 публікацій у збірниках матеріалів українських і міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел зі 141 найменувань, чотирьох додатків на 32 сторінках. Дисертація містить 137 сторінок основного матеріалу, 62 рисунків і 30 таблиць. Повний обсяг роботи становить 184 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні задачі дослідження, показано наукову новизну і практичну значущість роботи.

У **першому розділі** розглянуто основні проблеми проектування і конструктивні особливості автопасажирських катамаранів, їх класифікацію, перспективи розвитку, наведено результати аналізу проектних характеристик реальних побудованих суден такого типу.

Відзначено, що зараз у світовому судноплаванні застосовуються три основні типи швидкісних АПК: катамарани традиційної конструкції, хвилерізні катамарани та катамарани напів-СМПВ (semi-SWATH). У кожного з указаних типів є свої переваги і недоліки, але АПК традиційної конструкції є найбільш поширеними завдяки простоті форми корпусу і, отже, невеликій вартості.

Показано, що швидкісні АПК експлуатуються в перехідному режимі руху. Корпуси цих суден мають велике подовження і характеризуються чотирма типами обводів: круглоскулими (U- і V-подібними), S-подібними з бульбоподібним носом, гостроскулими і гібридними.

Відзначено, що основним чинником підвищення комфортабельності АПК є зниження шкідливого впливу прискорень від хитавиці на самопочуття і здоров'я людей. Радикальнішим способом забезпечення потрібних параметрів хитавиці швидкісних суден може бути використання різних систем активного стримування бортової і кільової хитавиці та мінімізації ризику. На АПК використовуються наступні системи: керовані скулові рулі, крилові системи у формі перевернутих літер “Т” або “П” з регульованою величиною підйомної сили, керовані транцеві плити.

На основі аналізу статистичних даних характеристик більше 60 автопасажирських катамаранів, побудованих з 1995 по 2014 р., отримано регресійні формули, які можуть використовуватися в математичній моделі:

$$L_{OA} = -3 \cdot 10^{-5} P_{PL}^2 + 0,1173 P_{PL} + 44,17; L_{WL} = 0,8514 L_{OA} + 2,302;$$

$$L_{WL} = -4 \cdot 10^{-5} N_{Pax}^2 + 0,0987 N_{Pax} + 17,61; L_{WL} = 0,1581 N_{Car} + 45,184;$$

проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании "2013", 18–29 июня 2013 г. – О. : Куприенко, 2013. – С. 49–53.

17. **Буй, Д. Т.** Модель функционирования автопасажирских катамаранов [Электронный ресурс] / Д. Т. Буй // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю, 21–23 травня 2014 р. – Миколаїв : НУК, 2014. – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/>

АНОТАЦІЯ

Буй Дуї Тхань. Удосконалення проектування автопасажирських катамаранів по комплексному критерію ефективності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 – конструювання та будівництва суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України, Миколаїв, 2014.

Дисертація присвячена питанню вдосконалення процесу проектування автопасажирських катамаранів (АПК) шляхом створення сучасної методики визначення оптимальних проектних характеристик суден такого типу. У дисертації створено базу даних щодо більш ніж 60 проектів АПК, побудованих з 1995 по 2014 р. На основі статистичної обробки даних цієї бази запропоновано формули для визначення основних характеристик АПК. Розроблено математичну модель, яка враховує вплив показників надійності і безпеки судна на його ефективність на початкових етапах проектування. Розроблено модель функціонування АПК для визначення економічних показників за життєвий цикл судна із застосуванням теорії ризику. Реалізовано методику визначення проектних характеристик АПК за допомогою комплексу прикладних програм “RoPaxCatamaran”.

Ключові слова: автопасажирський катамаран, проектні характеристики, метод штрафних функцій, метод Пауелла, математична модель, модель функціонування, ефективність, метод Монте-Карло, теорія ризику.

АННОТАЦИЯ

Буй Дуї Тхань. Усовершенствование проектирования автопасажирских катамаранов по комплексному критерию эффективности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03 – конструирование и постройка судов. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова МОН Украины, Николаев, 2014.

Целью диссертационной работы является совершенствование процесса проектирования автопасажирских катамаранов (АПК) на основе создания современной методики определения оптимальных проектных характеристик судов данного типа.

В диссертации проведен анализ конструктивных особенностей автопасажирских катамаранов и их классификация, рассмотрены перспективы развития, создана база данных по более 60 проектам АПК, построенных с 1995 по

Опубліковані праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

8. **Буй, Д. Т.** The analysis of calculating methods of high-speed catamaran resistance [Text] / D. T. Bui, A. V. Bondarenko // Modern scientific research and their practical application : Research Bulletin SWorld / edited by Alexandr G. Shibaev, Sergiy V. Kuprienko, Alexandra D. Fedorova. – Odessa : Kupriyenko, 2012. – Vol. 9 Transport (J21209), № 2. – P. 26–32.

9. **Буй, Д. Т.** Тенденция развития автопассажирских катамаранов и их перспективы в Украине и во Вьетнаме [Текст] / Д. Т. Буй // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф., 4–6 жовтня 2012 р. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 159–161.

10. **Буй, Д. Т.** Анализ проектных характеристик автопассажирских катамаранов [Текст] / Д. Т. Буй // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю, 23–25 травня 2012 р. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 98–101.

11. **Буй, Д. Т.** Анализ методов расчета сопротивления скоростных катамаранов [Текст] / Д. Т. Буй, А. В. Бондаренко // Сб. науч. трудов SWorld : материалы Междунар. науч.-практ. конф. “Современные направления теоретических и прикладных исследований '2012”, 20–31 марта 2012 г. – О. : Куприенко, 2012. – Вып. 1, т. 1. – С. 23–28.

12. **Буй, Д. Т.** Оценка буксировочного сопротивления многокорпусных судов в задаче синтеза [Текст] / Д. Т. Буй, А. П. Бойко, А. В. Бондаренко // Тезиси докладов 2-й Междунар. науч.-техн. конф. “Экспериментальные методы теории корабля”, 20 сентября 2013 г. – К. : Институт гидромеханики НАН Украины, 2013. – С. 31–32.

13. **Буй, Д. Т.** Интерполяционный метод построения теоретического чертежа скоростных катамаранов [Текст] / Д. Т. Буй // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд : матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю, 22–24 травня 2013 р. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 54–56.

14. **Буй, Д. Т.** Расчет плеч статической остойчивости скоростных автопассажирских катамаранов [Текст] / Д. Т. Буй // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф., 9–11 жовтня 2013 р. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 135–136.

15. **Буй, Д. Т.** Определение координат центра масс скоростных автопассажирских катамаранов на этапе концептуального проектирования [Текст] / Д. Т. Буй, А. В. Бондаренко // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф., 28–30 травня 2013 р. – Херсон : MINTT, 2013. – С. 107–109.

16. **Буй, Д. Т.** Способы определения стоимости скоростных автопассажирских катамаранов на этапе концептуального проектирования [Текст] / Д. Т. Буй // Сб. науч. трудов SWorld : материалы Междунар. науч.-практ. конф. “Современные

$$N_{CR} = \text{round}[0,0024L_{OA}^{2,09}]; N_{CR} = \text{round}[0,0318N_{\text{Pax}}]; S_X = 0,2083L_{WL}^{1,0167};$$

$$DW = 0,0004L_{OA}^{3,144}; DW = 0,0529(L_{WL}Bd)^{1,0255}; P_S = 32,073\left(\frac{v^3 \cdot \Delta^{2/3}}{1000}\right)^{0,75};$$

$$d = 0,0177L_{WL}^{1,2094}; d = 0,3325D^{1,1278}; D = 0,1804L_{WL}^{0,8563}; SFC = 0,0002P_S + 0,1266;$$

$$B = -0,0028L_{WL}^2 + 0,6398L_{WL} - 9,4195,$$

де L_{OA} – довжина найбільша, м; L_{WL} – довжина між перпендикулярами, м; P_{PL} – корисне навантаження; D – висота борту, м; d – осадка, м; B – ширина, м; S_X – горизонтальний кліренс, м; DW – дедвейт, т; N_{Pax} – пасажиромісткість; N_{Car} – кількість автомобілів; N_{CR} – чисельність екіпажу; P_S – потужність головних двигунів, кВт; SFC – витрати палива, т/год.

Було проведено аналітичний огляд робіт з проектування автопассажирських катамаранів. Відзначено, що для проектування АПК необхідно розв’язати низку задач, пов’язаних із забезпеченням надійності і безпеки. Методи для розв’язання цих задач наведено у багатьох окремих наукових публікаціях. Завданням здобувача є оцінка точності цих методів і знаходження найбільш придатного, проведення необхідних операцій для побудови математичної моделі і розв’язання оптимізаційної задачі вибору проектних характеристик автопассажирських катамаранів.

Другий розділ присвячено формулюванню задачі визначення проектних характеристик АПК і методам її розв’язання.

Поставлена в дисертації задача визначення проектних характеристик АПК має наступний вигляд:

$$\text{знайти екстремум цільової функції } f(x, C) \rightarrow \text{extr}$$

$$\text{за умови, що } g(x) \geq 0, h(x) = 0,$$

де $x = (x_1, \dots, x_n) \in X$ – вектор незалежних змінних; X – простір допустимих значень незалежних змінних; $f(x)$ – цільова функція; $C(C_1, \dots, C_m)$ – вектор параметрів завдання на проектування; $g(x) = [g_1(x), \dots, g_p(x)]$ – обмеження у вигляді нерівностей; $h(x) = [h_1(x), \dots, h_q(x)]$ – обмеження у вигляді рівностей.

Для розв’язання цієї задачі необхідно розробити наступні питання:

1. Визначення вектора незалежних змінних x . З урахуванням особливості розрахунку проектних характеристик АПК, за незалежні змінні вибрано наступні величини: $x_1 = L_{WL}/B_X$ – відношення довжини до ширини одного корпусу катамарана; $x_2 = B_X/d$ – відношення ширини одного корпусу до осадки; $x_3 = D/d$ – відношення висоти борту до осадки; $x_4 = L_{WL}/S_X$ – відношення довжини до горизонтального кліренсу; $x_5 = C_B$ – коефіцієнт загальної повноти; $x_6 = V_S$ – експлуатаційна швидкість; $x_7 = N_{\text{Pax}}$ – пасажиромісткість; $x_8 = N_{\text{Car}}$ – кількість автомобілів на судні. При цьому x_1 – x_6 є неперервними, а x_7, x_8 – цілочисловими незалежними величинами.

2. Визначення вектора параметрів завдання на проектування C , до якого відносяться: матеріал корпусу і надбудови, дальність плавання, тип енергетичної

установки АПК, характеристики району експлуатації судна (прогнозований район експлуатації, пасажиропотік, кількість автомобілів, гідрометеорологічні умови), а також додаткові вимоги замовника.

3. Проведення аналізу статистичних даних за проектними характеристиками реальних суден і проектів АПК.

4. Розробка математичної моделі.

5. Розробка моделі функціонування.

6. Формування системи тривіальних і функціональних обмежень. Значення тривіальних обмежень визначаються на основі статистичних даних:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max},$$

де x_i^{\min} , x_i^{\max} – мінімально і максимально допустиме значення i -ої змінної.

Функціональні обмеження характеризуються властивостями судна як інженерної споруди та особливостями процесів його експлуатації:

$$g_j(x, U) \geq A_j \quad (j=1, \dots, m).$$

7. Визначення цільової функції оптимізаційної задачі:

$$F(x, C) = M[P_E] \cdot p \rightarrow \max(\min),$$

де p – імовірність виконання основних задач, яка визначається через імовірність настання поганих погодних умов p_{st} і ймовірність виникнення аварійної ситуації від i -го джерела p_{aci} :

$$p = (1 - p_{st}) \prod_{i=1}^n (1 - p_{aci});$$

$M[P_E]$ – математичне сподівання показника економічної ефективності.

Аналіз робіт, які присвячено оптимізації основних характеристик суден, показав, що якогось єдиного показника економічної ефективності немає. Усі вони можуть бути розподілені на дві групи:

- показники, в основу яких покладено мінімізацію витрат;
- показники, в основу яких покладено максимізацію прибутку.

Показники першої групи часто використовувалися для проектування суден у країнах колишнього Радянського Союзу. Проте нині вони вже стали “застарілими” і “неефективними”. У багатьох наукових публікаціях рекомендується використати показники другої групи, які широко застосовуються в зарубіжному суднобудуванні.

З урахуванням цього за показник ефективності взято одну з наступних величин: чистий прибуток, період окупності, дисконтований період окупності, чисту зведену вартість, внутрішню норму прибутковості тощо.

8. Розробка і реалізація практичних методів розв’язання задачі вибору проектних характеристик автопасажирських катамаранів.

Задача вибору проектних характеристик АПК є задачею умовної оптимізації нелінійного програмування. Для її розв’язання використано метод штрафних функцій і метод Пауелла.

З урахуванням наявності неперервних та цілочислових незалежних змінних, цільова функція оптимізаційної задачі має наступний вигляд:

$$Z = f(x) + r\alpha_i(x^{c,d})_{i \in I} + sQ_j(x^d)_{j \in J},$$

7. На прикладі розв’язання оптимізаційної задачі підтверджено працездатність комплексу “RoPaxCatamaran”.

Достовірність теоретичних і прикладних результатів, висновків дисертаційної роботи забезпечується коректною постановкою задачі, точністю окремих розрахунків математичної моделі, розробленої з урахуванням сучасних тенденцій у проектуванні суден, використанням сучасних методів розв’язання оптимізаційної задачі, близькістю результатів розробленого комплексу “RoPaxCatamaran” зі значеннями реальних автопасажирських катамаранів.

Наукові та практичні результати роботи **впроваджено** у ПАТ “Чорноморсуднопроект”, на підприємстві “189 Company”, кафедрі автоматизованого проектування суден В’єтнамського морського університету і в навчальному процесі Національного університету кораблебудування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Буй, Д. Т.** Расчет буксировочного сопротивления катамаранов в задаче синтеза [Текст] / Д. Т. Буй, А. В. Бондаренко, А. П. Бойко // Судовождение : сб. науч. трудов ОНМА. – О.: ИздатИнформ, 2012. – Вып. 21. – С. 26–37.
2. **Буй, Д. Т.** Расчет нагрузки масс автопассажирских катамаранов на этапе концептуального проектирования [Текст] / Д. Т. Буй, А. В. Бондаренко // Проблемы техники : наук.-вироб. журнал. – О., 2013. – № 2. – С. 132–138.
3. **Буй, Д. Т.** Проверка остойчивости скоростных автопассажирских катамаранов на этапе концептуального проектирования [Текст] / Д.Т. Буй, А.В. Бондаренко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – Херсон, 2013. – №1 (8). – С. 13–20.
4. **Буй, Д. Т.** Оценка риска слеминга соединительной конструкции скоростных автопассажирских катамаранов на начальном этапе проектирования [Текст] / Д. Т. Буй, А. В. Бондаренко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2014. – № 3. – С. 26–30.
5. **Буй, Д. Т.** Решение задачи синтеза скоростных автопассажирских катамаранов с использованием метода Монте-Карло [Текст] / Д. Т. Буй, А. В. Бондаренко // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия : морская техника и технология. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2014. – С. 7–16 [входить до переліку фахових видань ВАК Росії, наукометричної бази РІНЦ].
6. **Буй, Д. Т.** Оценка пропульсивных характеристик водометного движителя скоростных автопассажирских катамаранов [Текст] / Д. Т. Буй, А. В. Бондаренко // Сб. науч. трудов Sworld. – Иваново : Маркова АД, 2014. – Вып. 2, т. 1. – С. 19–23 [входить до наукометричної бази РІНЦ].
7. **Bui, D. T.** The calculation method of towing resistance of catamaran in the preliminary design [Text] / D. T. Bui, A. V. Bondarenko, A. P. Boyko // The transport journal. – Hanoi, 2013. – № 6. – P. 33–35 [міжнародне наукове видання].

незалежних змінних та інших значень, що входять як обмеження до оптимізаційної задачі.

2. Розроблено математичну модель визначення проектних характеристик АПК місткістю до 1200 пасажирів і 300 автомобілів, швидкістю 32–50 вуз, довжиною від 50 до 110 м, яка на відміну від існуючих уперше враховує вплив ризику на ефективність судна. У даній моделі:

а) удосконалено метод визначення ординат теоретичного креслення при відомих значеннях C_B, L_{WL}, B_X, d з подальшим їх використанням для побудови параметричної 3D-моделі поверхні корпусу катамарана в САD-системах. Ці ординати використовуються для проведення розрахунків гідростатики, ходовості та остійності;

б) створено плагін для побудови параметричної 3D-моделі корпусу АПК у САD-системі Rhinoceros мовою програмування Visual Basic;

в) реалізовано теоретичний метод розрахунку складових повного опору автопасажирських катамаранів з використанням припущення тонкості корпусу. При цьому хвильовий опір визначається шляхом обчислення інтеграла Мічелла;

г) уточнено метод розрахунку складових маси АПК, який дає результат з досить високою точністю і може бути використаний на ранніх етапах проектування;

д) уперше запропоновано визначати параметри діаграми статичної остійності катамарана із застосуванням параметричної моделі поверхні його корпусу, що на відміну від інших методів дає більш високу точність розрахунків. Цей метод може застосовуватися при розрахунках остійності інших типів суден таких, як однокорпусні судна, катамарани з малою площею ватерлінії, тримарани тощо;

е) уперше введено метод розрахунку ймовірності пошкодження корпусу судна внаслідок слемінгу, що ґрунтується на ймовірності виникнення слемінгу з'єднувальної конструкції та ймовірності того, що динамічні навантаження перевищать несучу здатність пластини обшивки цієї конструкції. Це дало змогу визначити значення ризику від слемінгу, який для швидкісних катамаранів є одним із найбільш небезпечних видів аварійного пошкодження.

3. Виконано розрахунок ймовірності пошкодження з'єднувальної конструкції АПК. Реалізовано розрахунки ймовірності виникнення аварій судна через зіткнення, контакт, посадку на міліну. Виконано розрахунок ймовірності загибелі судна при затопленні відсіків.

4. Уперше розроблено модель функціонування автопасажирських катамаранів, у якій шляхом імітації виконується моделювання процесу експлуатації упродовж заданого періоду часу та обчислюються показники ефективності основних функціональних операцій судна.

5. Сформульовано задачу оптимізації проектних характеристик АПК як задачу умовної оптимізації нелінійного програмування. Для її розв'язання застосовано метод зовнішніх штрафних функцій і метод прямого пошуку Пауелла.

6. Реалізовано алгоритм розв'язання задачі оптимізації проектних характеристик АПК шляхом створення комплексу прикладних програм "RoPaxCatamaran", який призначено для автоматизованого проектування суден такого типу.

де $x^c \in R^c$ – допустима підмножина неперервних незалежних величин; $x^d \in R^d$ – допустима підмножина цілочислових незалежних змінних; i – індекс обмеження неперервної змінної; j – індекс обмеження цілочислової змінної; I – множина обмежень неперервних змінних, що утворюють допустиму область; J – множина обмежень цілочислових змінних, що утворюють допустиму область; $\alpha_i(x^{c,d})_{i \in I}$ – штрафна функція для всіх незалежних змінних (x^c і x^d); $Q_j(x^d)_{j \in J}$ – штрафна функція для цілочислових змінних; r, s – штрафні коефіцієнти на неперервні і цілочислові змінні відповідно.

Функція $Q_j(x^d)_{j \in J}$ має наступні властивості:

$$Q_j(x^d)_{j \in J} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x^d \in R^d; \\ > 0, & \text{якщо } x^d \notin R^d. \end{cases}$$

Як функцію $Q_j(x^d)_{j \in J}$ доцільно взяти підінтегральну бета-функцію, що має вигляд

$$Q_j(x^d)_{j \in J} = \sum_{j=1}^J [4g_j(x^d)(1-g_j(x^d))]^\beta,$$

де $g_j(x^d) = \frac{x_j^p - z_j^l}{z_j^u - z_j^l}$, а $z_j^l \leq x_j^p$ і $z_j^u \geq x_j^p$ – два цілочислові значення

пасажиromісткості і кількості автомобілів, найближчі до x_j^p ; x_j^p – поточне (розрахункове) значення пасажиromісткості або кількості автомобілів; β – показник степеня бета-функції.

Далі оптимізація виконується методом Пауелла.

Третій розділ присвячено розробці математичної моделі і моделі функціонування автопасажирського катамарана (рис. 1).

Математична модель АПК містить залежності, що забезпечують виконання основних технічних і мореплавних властивостей судна. До складу математичної моделі входять наступні блоки: головні розміри, ординати теоретичного креслення (ТК), ходовість, навантаження мас, центр мас судна, місткість, остійність, періоди хитамиці, комфортність і додатковий опір. Нижче наведено деякі алгоритми цієї моделі.

Вибір головних розмірів виконується в наступній послідовності. При відомих на кожному кроці пошуку значеннях незалежних змінних виконується розрахунок: довжини найбільшої

$$L_{OA} = -3 \cdot 10^{-5} P_{PL}^2 + 0,1173 P_{PL} + 44,17;$$

довжини по ватерлінії

$$L_{WL} = 0,8514 L_{OA} + 2,302;$$

ширини одного корпусу, осадки, об'ємної водотоннажності, горизонтального кліренсу, максимальної ширини катамарана, висоти борту відповідно:

$$B_X = L_{WL} / x_1;$$

$$d = B_X / x_2 ;$$

$$\nabla = 2L_{WL} B_X d C_B ;$$

$$S_X = L_{WL} x_4 ;$$

$$B = B_X + S_X ;$$

$$D = x_3 d .$$

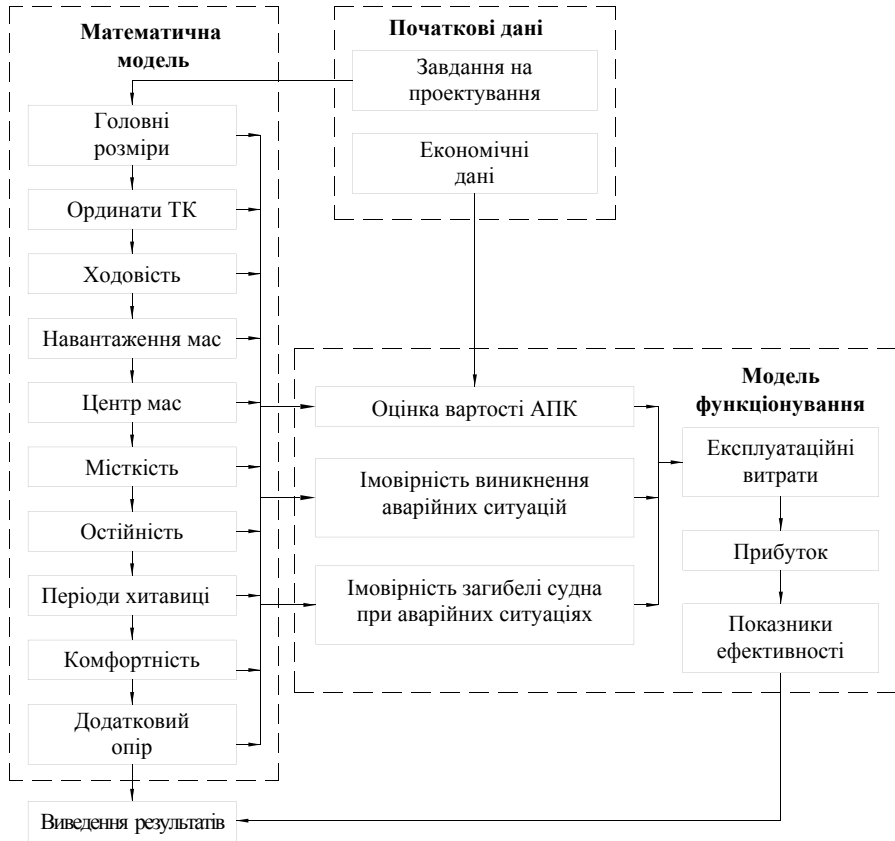


Рисунок 1 – Блок-схема імітаційної моделі проектування АПК

Розрахунок ординат теоретичного креслення АПК виконується інтерполяційним методом на основі серії безрозмірних корпусів при відомих значеннях розмірів і коефіцієнта загальної повноти.

Отримані ординати теоретичного креслення використовуються для побудови 3D-моделі поверхні корпусу катамарана в CAD-системі Rhinoceros (рис. 2). Для цього було створено плагін, який реалізує даний алгоритм мовою програмування Visual Basic.

виникнення аварійної ситуації, по-перше, судно не зможе експлуатуватися в період ремонту і, по-друге, судновласник повинен буде сплатити значну суму за завдання збитків персоналу, матеріальним цінностям і довіллю.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз отриманих результатів

| Найменування показника | Без урахування ризику | З урахуванням ризику |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Довжина найбільша, м | 69,31 | 68,58 |
| Довжина між перпендикулярами, м | 61,31 | 60,70 |
| Ширина, м | 18,32 | 18,83 |
| Ширина одного корпусу, м | 4,65 | 4,67 |
| Горизонтальний кліренс, м | 13,67 | 14,14 |
| Висота борту, м | 4,70 | 4,74 |
| Осадка, м | 2,51 | 2,66 |
| Вертикальний кліренс, м | 1,75 | 1,75 |
| Дедвейт, т | 254 | 247 |
| Повна водотоннажність, т | 719 | 726 |
| Потужність двигунів, кВт | 4×2700 | 4×2700 |
| Тип рушіїв | Водомет | Водомет |
| Паливо, л | 27509 | 27258 |
| Максимальна швидкість, вуз | 36,0 | 36,0 |
| Експлуатаційна швидкість, вуз | 32,3 | 32,0 |
| Чисельність екіпажу, осіб | 17 | 17 |
| Вартість судна, млн дол. США | 15,11 | 15,09 |
| Імовірність виконання завдання | 0,944 | 0,903 |
| Період експлуатації, років | 25 | 25 |
| Прибуток, млн дол. США | 64,5 | 59,1 |

У додатках наведено: статистичні дані щодо проектних характеристик автопасажирських катамаранів, методи визначення буксирувального опору швидкісних катамаранів, програмний код модуля оцінки остійності АПК та акти про впровадження результатів роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено розв'язанню актуального наукового завдання – удосконалення ефективності процесу проектування автопасажирських катамаранів на концептуальній стадії.

Головні наукові і практичні результати роботи:

1. Створено базу даних щодо автопасажирських катамаранів побудованих з 1995 по 2014 р. Шляхом статистичного аналізу даних отримано ряд нових формул для оцінювання проектних характеристик АПК і встановлено діапазони зміни

При цьому похибка розрахунків не перевищує 2 %. Великі значення похибки в діапазоні кутів крену 80...90° пояснюються близькістю плеча статичної остійності до нуля і, як наслідок, втратою точності. Аналогічні результати отримано і для інших корпусів катамаранів.

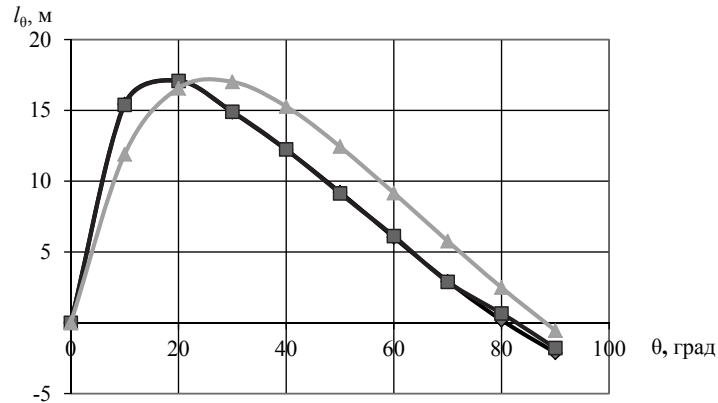


Рисунок 7 – Діаграма порівняльного аналізу плечей статичної остійності:
 —◆— – Hydromax; —■— – теоретичний метод; —▲— – наближений метод

Оцінювання похибки інших розрахунків розроблених алгоритмів також дають результати з досить високою точністю, і їх можна застосувати на початкових етапах проектування АПК. Зокрема, похибки не перевищують: 2,47 % – для розрахунку коефіцієнта загальної повноти; 4,6 % – для розрахунку площі змоченої поверхні; 1,41 % – для розрахунку координат центру величини.

Результати перевірки чутливості математичної моделі до варіацій незалежних змінних свідчать про прийнятну чутливість цільової функції до зміни цих величин, що обумовлює стійкість результатів розв'язання оптимізаційної задачі.

Як приклад, що демонструє можливості програми, було розглянуто задачу оптимізації проектних характеристик АПК, який експлуатується на лінії Фукуок – К'ензанг у Південно-Китайському морі. Початкові дані визначаються на основі морської лінії експлуатації за даними 2014 р. У результаті отримано основні проектні характеристики АПК з наступними економічними показниками: вартість АПК – 18,31 млн. дол. США; ймовірність виконання задачі – 0,943; прибуток судна протягом життєвого циклу – 60,88 млн. дол. США.

Передбачається, що протягом життєвого циклу АПК існує ймовірність виникнення аварійних ситуацій, в результаті яких судно може отримати пошкодження або загинути. Для оцінювання збитків від аварійних ситуацій за допомогою комплексу “RoRaхCatamaran” було виконано пошук розв'язків оптимізаційних задач, показник ефективності яких обчислювався з урахуванням та без урахування ризику. У табл. 2 наведено приклад отриманих результатів.

Як видно з табл. 2, урахування ризику від виникнення аварійних ситуацій приводить до зниження ефективності судна. Це пояснюється тим, що після

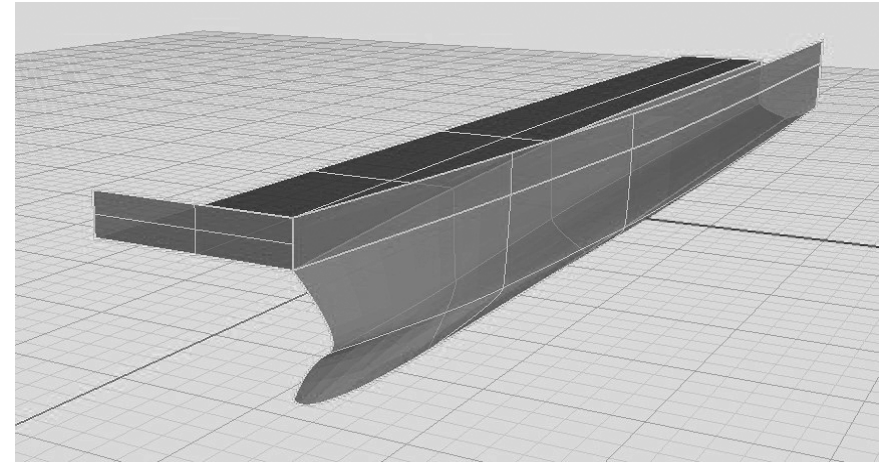


Рисунок 2 – Параметрична модель корпусу автопасажи́рського катамарана в CAD-системі Rhinoceros

Для розрахунку повного опору катамаранів пропонується використати наближений метод, відповідно до якого повний опір судна визначається як сума опорів тертя R_F , хвильового R_W , струминного R_{SP} , виступних частин R_{AP} і повітря R_{AA} :

$$R_T = R_F + R_W + R_{SP} + R_{AP} + R_{AA}.$$

Опори R_F , R_{SP} , R_{AP} і R_{AA} визначаються за відомими методиками теорії корабля.

Повний хвильовий опір R_W визначається за методом Мічелла з використанням ординат теоретичного креслення, отриманих за 3D-моделлю поверхні корпусу катамарана:

$$R_W = 2R_{WH} + R_{Wi},$$

де R_{WH} – хвильовий опір одного корпусу, кН; R_{Wi} – хвильовий опір унаслідок взаємодії корпусів, кН.

Пропульсивний коефіцієнт водометного рушія визначається як пропульсивний коефіцієнт цього рушія у вільній воді (ізолюваний водомет) η_0 , доповнений коефіцієнтом впливу корпусу судна η_{INT} :

$$\eta = \eta_0 \eta_{INT}.$$

Значення η_0 включає в себе дві складові – пропульсивний коефіцієнт ідеального рушія η_I і ККД соплової системи η_{JS} :

$$\eta_0 = \eta_I \eta_{JS}.$$

Значення η_{JS} визначається через ККД насоса η_P і ККД валопроводу η_{duct} :

$$\eta_{JS} = \eta_P \eta_{duct}.$$

Результати проведення розрахунків за цим алгоритмом (рис. 3) показали, що водометний рушія має досить високе значення пропульсивного коефіцієнта при високих швидкостях судна (більше 27 вуз).

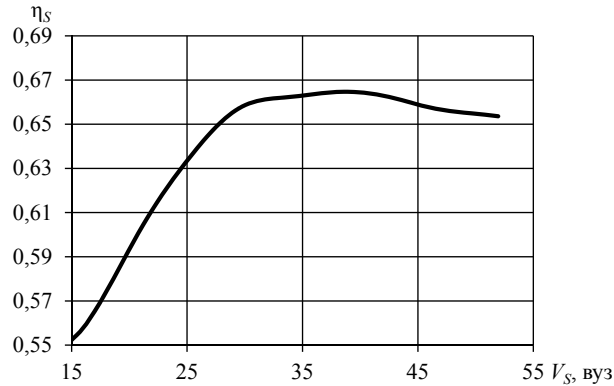


Рисунок 3 – Залежність пропульсивного коефіцієнта водомета від швидкості судна

Рівняння мас катамарана в загальному вигляді записується як

$$\Delta = W_{LS} + DW,$$

де Δ – повна водотоннажність, т; W_{LS} – водотоннажність судна порожнем, т.

На початкових етапах проектування для швидкісних катамаранів водотоннажність порожнем визначають як суму мас конструкції корпусу W_{Hull} , механізмів W_M , устаткування W_{Out} і запасу водотоннажності W_{SM} :

$$W_{LS} = W_{Hull} + W_M + W_{Out} + W_{SM}.$$

Масу корпусу W_{Hull} запропоновано розраховувати як суму мас конструкцій корпусу W_{Str} , надбудови W_{Sup} , пофарбування та ізоляції W_P , неметалевих частин W_N :

$$W_{Hull} = W_{Str} + W_{Sup} + W_P + W_N.$$

Маса конструкцій корпусу катамарана

$$W_{Str} = q_{mat} S_R \text{ т},$$

де q_{mat} – питома маса; S_R – зведена площа.

Формула визначення S_R з урахуванням коефіцієнтів f_{R_1} , f_{R_2} і c_i має вигляд

$$S_R = f_{R_1} f_{R_2} \sum_{i=1}^5 c_i S_i \text{ м}^2,$$

де S_i – площі поверхні днища S_1 , бортів S_2 , палуби S_3 , перебірок S_4 і мосту катамарана S_5 :

$$S_1 = 2\nabla_1^{1/3} (3,51\nabla_1^{1/3} + 0,568L_{WL}) \text{ м}^2;$$

$$S_2 = 2,1(L_{OA} + L_{WL})(D - d) \text{ м}^2;$$

$$S_3 = 2,3L_{OA}B \text{ м}^2;$$

$$S_4 = 1,3N_{WTB}C_M B_X D \text{ м}^2;$$

$$S_5 = 0,92L_{WL}(S_X - 1,4B_X)(1,96 + H_C) \text{ м}^2,$$

∇_1 – об'ємна водотоннажність одного корпусу, м^3 ; N_{WTB} – кількість водонепроникних перебірок катамарана; C_M – коефіцієнт повноти площі мідель-шпангоута; H_C – висота мосту, м.

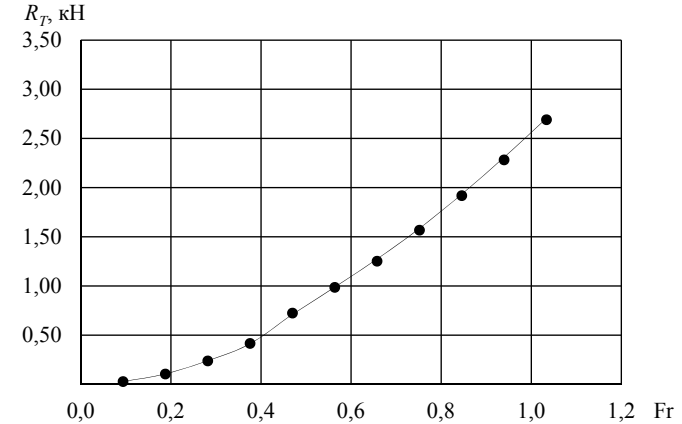


Рисунок 6 – Значення повного опору моделі швидкісного катамарана:
• – отримане за розробленою програмою; — — за програмою Michlet

Результати розрахунку навантаження мас порівнювалися з реальними значеннями АПК. Як видно з табл. 1, прийнятий в дисертації алгоритм розрахунку навантаження мас АПК дає досить точний результат. При цьому похибка розрахунку водотоннажності порожнем не перевищує 4,5 %, а повної водотоннажності – 3,6 %.

Таблиця 1 – Похибка розрахунку навантаження мас АПК

| Назва АПК | Водотоннажність порожнем, т | | | Водотоннажність повна, т | | |
|-----------------|-----------------------------|----------------|----------------|--------------------------|-------------------|----------------|
| | $PLS_{факт}$ | $PLS_{розрах}$ | $\epsilon, \%$ | $\Delta_{факт}$ | $\Delta_{розрах}$ | $\epsilon, \%$ |
| Jade express | 196 | 205 | 4,5 | 250 | 259 | 3,6 |
| Farasa | 473 | 490 | 3,5 | 731 | 748 | 2,3 |
| Turgut 1 | 507 | 487 | 4,0 | 680 | 660 | 3,0 |
| Fair weather | 542 | 564 | 4,0 | 742 | 764 | 2,9 |
| Catlink | 890 | 865 | 2,7 | 1240 | 1215 | 2,0 |
| Auto express 82 | 904 | 884 | 2,3 | 1250 | 1230 | 1,6 |
| Auto express 86 | 980 | 1009 | 2,9 | 1380 | 1409 | 2,1 |
| High speed 4 | 1130 | 1115 | 1,3 | 1600 | 1585 | 0,9 |
| Alaika | 1418 | 1452 | 2,4 | 2218 | 2252 | 1,5 |

Для оцінювання похибки розрахунку остійності АПК було створено декілька 3D-моделей поверхонь корпусів катамаранів. Для кожної з них було виконано розрахунок за розробленою програмою (теоретичний метод) і наближеним методом. Результати порівняння двох методів з даними, отриманими за допомогою системи “Hydromax Pro”, які взято за еталонні значення, наведено на рис. 7.

Діаграма показує, що розроблена програма дає дуже близький результат з еталонними значеннями (на рис. 7 до кута крену 80° точки практично збігаються).

Після розробки математичної моделі і моделі функціонування розв'язання задачі оптимізації проектних характеристик АПК реалізується за допомогою комплексу прикладних програм "RoPaxCatamaran". Комплекс "RoPaxCatamaran" створено здобувачем мовою програмування Pascal і призначено для автоматизованого проектування автопасажирських катамаранів.

У **четвертому розділі** наведено результати перевірки адекватності, чутливості розробленої математичної моделі та приклад розв'язання задачі оптимізації проектних характеристик АПК на основі запропонованої методики.

Виконана шляхом порівняння результатів, отриманих за допомогою розробленої математичної моделі, з даними технічних проектів і реальних АПК перевірка адекватності моделі показала, що в цілому розроблена модель АПК адекватна. При цьому максимальні похибки за проектними характеристиками судна не перевищують 9 %.

Для оцінювання точності результатів математичної моделі було визначено похибки її окремих алгоритмів розрахунку: коефіцієнта загальної повноти, площі змоченої поверхні, аплікати центру величини, ординат ТК, буксирувального опору, навантаження мас, остійності.

Тестові розрахунки буксирувального опору було проведено для моделей швидкісних катамаранів за розробленою програмою, різними практичними методами і програмою Michlet (рис. 5, 6). Порівняльний аналіз результатів цих розрахунків показав, що похибка розрахунку повного опору R_T за розробленою програмою з даними модельних випробувань не перевищує 8,7 % при $Fr \geq 0,4$. При порівнянні цього розрахунку за розробленою програмою зі значеннями, отриманими за допомогою програми Michlet, похибка не перевищує 2 %.

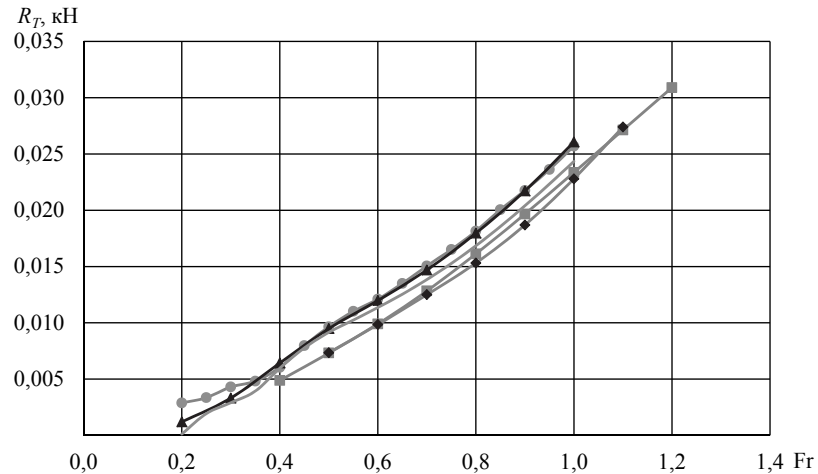


Рисунок 5 – Значення повного опору моделі швидкісного катамарана, отримане за різними методами:

■ – Pham; ● – Michell; ▲ – Insel; ◆ – Schwetz; — – Model test

Інші розділи повної водотоннажності автопасажирського катамарана можна визначити на основі формул, які застосовуються для швидкісних суден з урахуванням кореляційних значень, отриманих шляхом обробки статистичних даних навантаження мас реальних АПК.

Оцінювання остійності катамарана виконується із застосуванням діаграми статичної остійності. Для цього визначаються плечі статичної остійності l_0 за формулою

$$l_0 = l_\phi - z_G \sin \theta,$$

де l_ϕ – плече остійності форми; z_G – аплікати центру маси судна; θ – кут крену.

Значення плеча остійності форми розраховується із застосуванням ординат, отриманих за параметричною 3D-моделлю корпусу:

$$l_\phi = \overline{SB} \sin \theta + \overline{RB} \cos \theta,$$

де \overline{SB} , \overline{RB} – координати центру величини катамарана (КЦВ) при куті крену θ .

При визначенні КЦВ катамарана під похилою ватерлінією можливі два випадки. Перший – коли похила ватерлінія одночасно перетинає два корпуси катамарана. У цьому випадку КЦВ катамарана визначаються за формулами:

$$\overline{SB} = \frac{\overline{SB}_1 \nabla_1 + \overline{SB}_2 \nabla_2}{\nabla_1 + \nabla_2}; \quad \overline{RB} = \frac{(\overline{RB}_1 - b_x) \nabla_1 + (\overline{RB}_2 + b_x) \nabla_2}{\nabla_1 + \nabla_2},$$

де ∇_1 , ∇_2 – відповідно об'ємна водотоннажність першого і другого корпусу катамарана під похилою ватерлінією; \overline{SB}_1 , \overline{RB}_1 – координати центру величини першого корпусу катамарана; \overline{SB}_2 , \overline{RB}_2 – координати центру величини другого корпусу катамарана.

Для другого випадку, коли ватерлінія перетинає тільки один корпус катамарана, розрахунок проводиться за схемою однокорпусного судна.

Для визначення характеристик комфортності розраховується значення MSI (Motion Sickness Incidence) – чисельність людей (у відсотках), у яких проявилася морська хвороба після певного часу перебування на судні і прискорень, що діють на екіпаж, пасажирів та механізми.

За допомогою моделі функціонування автопасажирського катамарана визначаються економічні показники. При цьому одним з важливих показників є прибуток протягом життєвого циклу судна

$$P_{\text{life}} = I - LCC,$$

де I – сукупний прибуток АПК; LCC – вартість життєвого циклу АПК.

Значення LCC може бути визначене за формулою

$$LCC = C_{\text{Inv}} + C_{\text{Oper}} + R + C_{\text{Res}},$$

де C_{Inv} – вартість капіталовкладень, включаючи вартість проектних робіт; C_{Oper} – вартість експлуатації і супроводу; R – витрати на ліквідацію наслідків аварійних ситуацій (ризиків); C_{Res} – залишкова вартість.

Величина C_{Inv} визначається на основі вартості побудови судна, що розраховується з укрупненими нормативами:

$$C_{\text{Build}} = C_{\text{Mat}} + C_{\text{Out}} + C_{\text{Mach}} + C_{\text{Work}},$$

де C_{Mat} , C_{Out} , C_{Mach} , C_{Work} – відповідно вартість матеріалів корпусу, обладнання, механізмів судна та виконання робіт з будівництва.

Величина C_{Oper} включає в себе два елементи – змінні C_{Var} і постійні C_{Fix} експлуатаційні витрати:

$$C_{Oper} = C_{Var} + C_{Fix}.$$

Найбільш складною частиною при розробці моделі функціонування АПК є розрахунок ризиків. Процедура оцінювання ризику R припускає розрахунок двох параметрів – вартості збитку від аварії (відмови) та ймовірності настання цього випадку. З урахуванням можливих наслідків, значення R визначається за формулою

$$R = P_1 C_1 + P_2 C_2 + P_3 C_3,$$

де P_1, P_2, P_3 – ймовірність виникнення небезпек для персоналу, матеріальних цінностей і довкілля; C_1, C_2, C_3 – величина завданих збитків персоналу, матеріальним цінностям і довкіл्लю відповідно.

Типовими випадками, що призводять до аварійних ситуацій, є: зіткнення, посадки на мілину, пожежі/вибухи, перекидання, пошкодження корпусу, затоплення тощо.

У дисертації для визначення величини ризиків розраховується ймовірність виникнення зіткнень, контакту, посадки на мілину, пошкодження корпусу АПК через слемінг та ймовірність загибелі судна в цих ситуаціях.

Ймовірність виникнення зіткнень, контакту, посадки на мілину визначається на основі статистичних даних аварій швидкісних суден.

Ймовірність пошкодження корпусу АПК через слемінг (пошкодження пластини з'єднувальної конструкції АПК, яка знаходиться на i -му перерізі)

$$P_{sl}(x_i) = \exp \left[- \left(\frac{\tilde{h}_{вк}^2(x_i)}{2\sigma_\xi^2(x_i)(1 + \bar{\delta}_2(x_i))^2} + \frac{p_{н.с}}{k_1 k_2 \sigma_\xi^2(x_i)} \right) \right],$$

де $\tilde{h}_{вк}(x_i)$ – ефективний (з урахуванням зміщення від нульової лінії процесу відносних переміщень) вертикальний кліренс; $\sigma_\xi(x_f)$, $\sigma_\xi(x_f)$ – стандарти відносних переміщень і швидкостей на зустрічному хвилюванні; k_1 – коефіцієнт пропорційності між ударним тиском і швидкістю відносних переміщень; k_2 – безрозмірний коефіцієнт, який враховує міру аерації потоку між корпусами за наявності крила; $p_{н.с}$ – несуча здатність пластини мосту; $\bar{\delta}_2(x_i)$ – відносний динамічний підйом при поздовжній хитавиці.

Ймовірність загибелі судна від зіткнення, контакту, посадки на мілину P_F можна визначити за залежністю

$$P_F = 1 - P_L,$$

де P_L – ймовірність того, що судно не потоне при затопленні відсіків.

Значення P_L розраховується наступним чином:

$$P_L = \sum p_i q_i,$$

де i – індекс відсіку або групи відсіків; p_i – ймовірність затоплення тільки даного відсіку або групи відсіків при отриманні пробоїни; q_i – ймовірність виживання судна після затоплення даного відсіку або групи відсіків.

Знаючи ймовірність виникнень аварійних ситуацій та ймовірність загибелі АПК, значення ризику впродовж життєвого циклу можна визначити за схемою, наведеною на рис. 4.

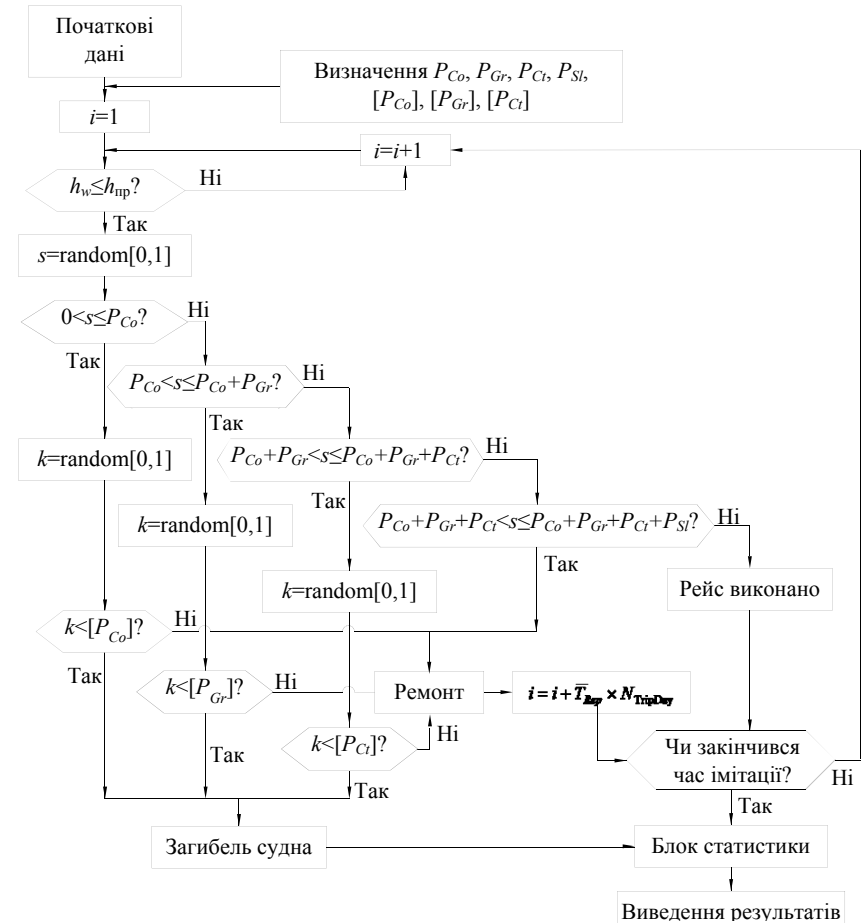


Рисунок 4 – Блок-схема імітації аварійних ситуацій у процесі експлуатації автопасажирського катамарана:

P_{Co}, P_{Gr}, P_{Ci} – відповідно ймовірність виникнення аварії від зіткнення, посадки на мілину, контакту; $[P_{Co}], [P_{Gr}], [P_{Ci}]$ – ймовірність загибелі судна від зіткнення, посадки на мілину, контакту; h_w – висота хвилі, яка визначається за певним законом розподілу; h_{np} – значення максимально допустимої висоти хвилі; i – порядковий номер рейсу; s, k – випадкові величини, $0 \leq s, k \leq 1$