

МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ОТРИМАННЯ ПАРАМЕТРІВ СУДНА З ВІЗУАЛЬНОГО ІНТЕРФЕЙСУ НАВІГАЦІЙНОГО ТРЕНАЖЕРА

У статті запропоновано метод автоматизованого відновлення навігаційних і керуючих параметрів судна на основі аналізу візуального інтерфейсу навігаційного тренажера без звернення до його внутрішніх телеметричних модулів. Актуальність роботи зумовлена тим, що більшість існуючих підходів передбачає використання службових журналів або цифрових потоків даних, доступ до яких визначається архітектурою конкретної програмної платформи. Така залежність обмежує відтворюваність експериментів, ускладнює міжплатформне порівняння результатів і знижує універсальність отриманих висновків.

Запропонований підхід ґрунтується на трактуванні екранного простору як структурованого інформаційного поля, у межах якого локалізуються стабільні зони відображення окремих показників. Після конфігурації цих зон здійснюється автоматизоване перетворення графічних та числових елементів інтерфейсу у синхронізовані часові послідовності параметрів руху. Дискретність реконструкції узгоджується з частотою оновлення індикаторів і за відповідних технічних умов може досягати 10 Гц. Сформований багатовимірний масив даних дозволяє аналізувати траєкторію руху, перехідні режими, часові затримки реакції та взаємозв'язок між керуючими впливами і динамікою судна.

Експериментальна перевірка методу виконана на мостиковому тренажері повного типу. Для курсу середня абсолютна похибка реконструкції не перевищувала 1° , а для частоти обертів рушія залишалася меншою за 2% від номінального значення. Отримані часові ряди зберігають фізичну послідовність процесу маневрування, відтворюють характерні екстремуми та не містять суттєвих фазових спотворень. Результати підтверджують можливість використання візуального шару інтерфейсу як самостійного та універсального джерела експериментальних даних у дослідженнях динаміки руху судна.

Ключові слова: навігаційні тренажери, навігаційні дані, візуальні інтерфейси, аналіз у реальному часі, моделювання руху судна, навігаційні параметри, підтримка прийняття рішень

Постановка проблеми. Попри широке використання суднових тренажерів у дослідженнях динаміки руху, отримання параметрів симуляції залишається залежним від внутрішньої архітектури програмної системи. Доступ до телеметричних потоків і службових журналів або обмежений, або прив'язаний до конкретної платформи. Унаслідок цього виникає методологічна проблема: результати експериментів не є повністю відтворюваними поза межами конкретного тренажера, а порівняння сценаріїв між різними системами ускладнюється.

Водночас екранний інтерфейс тренажера містить повний набір параметрів, необхідних для прийняття навігаційних рішень. Це дає підстави розглядати його як потенційне альтернативне джерело експериментальних даних.

Задачею дослідження є розроблення способу реконструкції навігаційних і керуючих параметрів руху судна на основі аналізу візуального інтерфейсу без інтеграції з внутрішніми модулями тренажера.

Аналіз літературних джерел. Навігаційні тренажери у сучасних дослідженнях розглядаються як складні людино-машинні системи, що інтегрують модель руху судна, навігаційне середовище та дії оператора в межах єдиного інтерактивного процесу [1–4]. Такий підхід дозволяє відтворювати сценарії

підвищеної складності в контрольованих умовах і забезпечує широкі можливості для дослідницького аналізу.

Найбільш поширеним напрямом є використання внутрішніх цифрових журналів і телеметричних потоків для післясимуляційного аналізу. У цих роботах параметри руху – курс, швидкість, траєкторія, взаємодія з навігаційними об'єктами – застосовуються для оцінювання якості маневрування та порівняння сценаріїв [5–8]. Такий підхід забезпечує високу деталізацію даних, проте прив'язаний до архітектури конкретного тренажера і формату його внутрішніх записів.

Окремий напрям досліджень зосереджений на аналізі дій оператора в тренажерному середовищі. У центрі уваги перебувають часові характеристики реакції, послідовність керуючих дій, дотримання процедур і якість прийняття рішень у змодельованих навігаційних ситуаціях [9–11]. Для кількісного оцінювання використовуються поведінкові маркери, аналіз не технічних навичок, фіксація візуальної уваги та показники когнітивного навантаження, отримані під час роботи у мостиковому тренажері. У такому підході динаміка руху судна здебільшого розглядається як відображення поведінки оператора – як результат його реакції, інтерпретації ситуації та вибору керуючих впливів – тоді як сама траєкторія рідко виступає самостійним об'єктом кількісного аналізу.

Дослідження, присвячені математичному та фізичному моделюванню руху судна, орієнтовані на уточнення гідродинамічних характеристик, впливу вітру, хвилювання та течій [12–14]. У таких роботах формуються системи рівнянь руху з урахуванням зовнішніх збурень та взаємодії сил, виконується ідентифікація гідродинамічних коефіцієнтів і калібрування моделей на основі експериментальних або чисельних даних. Отримані результати використовуються для підвищення точності прогнозування траєкторії та аналізу маневрування, проте формування даних відбувається всередині математичної чи чисельної моделі і не передбачає альтернативного способу їх незалежного відновлення на основі зовнішнього інформаційного поля.

У суміжних галузях активно розвиваються методи аналізу візуальної інформації для реконструкції параметрів технічних процесів за їх екранним відображенням [15–18]. Ці підходи довели свою ефективність у промислових системах моніторингу та керування, зокрема в автоматичному зчитуванні інформації з індикаторів, оцінці стану обладнання та контролі відповідності процедурам. Однак у сфері судових навігаційних тренажерів вони практично не застосовуються для незалежного відновлення навігаційних параметрів у процесі симуляції.

Незважаючи на різноманітність підходів, існуючі дослідження об'єднує спільна методологічна залежність від внутрішньої структури симуляційної системи. Формування даних відбувається або через доступ до службових модулів тренажера, або через інтерпретацію поведінки оператора на основі цих даних. Така модель аналізу передбачає наявність стандартизованих інтерфейсів експорту або спеціалізованих інструментів інтеграції, що обмежує універсальність результатів і ускладнює їх відтворюваність на інших платформах.

Крім того, переважна частина досліджень орієнтована на післясимуляційний аналіз. Динамічні процеси розглядаються ретроспективно, що знижує можливість дослідження реакції системи в умовах змінюваного середовища безпосередньо під час симуляції. Питання реконструкції параметрів руху на основі зовнішнього візуального представлення при цьому практично не розглядається.

Жодне з проаналізованих досліджень не розглядає можливість відновлення параметрів виключно на основі візуального шару інтерфейсу без доступу до внутрішніх даних. Таким чином, у наявних дослідженнях спостерігається методологічний розрив: або використовується прямий доступ до внутрішніх даних тренажера, або аналіз обмежується поведінкою оператора. Питання універсального способу відновлення навігаційних і керуючих параметрів на основі візуального відображення інтерфейсу залишається невирішеним. Відсутність такого підходу ускладнює міжплатформне порівняння результатів та обмежує можливості дослідження динаміки руху судна без інтеграції з програмною архітектурою конкретної системи.

Мета статті – розроблення та перевірка універсального методу отримання навігаційних і керуючих параметрів судна безпосередньо з візуального інтерфейсу навігаційного тренажера без звернення до його внутрішніх програмних модулів.

Викладення основного матеріалу. Після окреслення проблеми доцільно перейти до безпосереднього опису запропонованого підходу. У центрі уваги перебуває інтерфейс навігаційного тренажера як простір, у межах якого відображається стан симуляційної моделі судна та навігаційного середовища. Саме через це візуальне поле оператор взаємодіє із системою, оцінює обстановку та приймає рішення. З дослідницької точки зору воно може бути розглянуте як зовнішній шар представлення внутрішніх процесів моделі.

Під час симуляції оператор одночасно аналізує кілька інформаційних потоків: положення судна на електронній карті, його курс і швидкість, режим роботи рушійної установки, реакцію судна на переключення стерна, зміни навігаційної обстановки. Для людини ці елементи інтегруються у цілісну ситуаційну картину. Для дослідника ж вони можуть бути інтерпретовані як система взаємопов'язаних змінних, що змінюються у часі та підлягають кількісному опису.

Інтерфейс у цьому контексті не є випадковим набором графічних компонентів. Його структура підпорядкована логіці керування судном: ключові показники розташовані у фіксованих зонах, мають сталі формати представлення та оновлюються з певною періодичністю. Така впорядкованість створює передумови для систематичного виділення параметрів без втручання у внутрішню архітектуру тренажера.

У межах дослідження інтерфейс розглядається як зовнішній інформаційний контур симуляційної системи. Його елементи трактуються як носії даних, що допускають локалізацію в межах екранного простору та подальше перетворення у формалізовані змінні. Перехід від візуального сприйняття до математичного опису становить ключовий етап побудови методу.

Метод ґрунтується на припущенні, що візуальне поле тренажера відображає поточний стан його внутрішньої моделі. Зміна курсу, швидкості або положення судна неминуче знаходить відображення на відповідних індикаторах чи картографічному полі. Таким чином, екранне представлення може слугувати каналом спостереження за динамікою системи.

У запропонованому підході тренажер розглядається як замкнена система, для якої доступним є лише вихідний шар відображення. Вхідними впливами виступають дії оператора та зміни навігаційного середовища, тоді як вихід – це сукупність графічних і числових елементів інтерфейсу. Аналіз зосереджено саме на цьому рівні.

Процес отримання параметрів можна описати як послідовність перетворень. Спочатку фіксується екранне зображення з визначеною часовою дискретністю. Далі ідентифікуються інформаційні області, що містять значущі показники. Наступним кроком є інтерпретація візуальних елементів у числові або геометричні значення. Отримані величини синхронізуються та формують послідовності, придатні для подальшого аналізу.

Такий підхід дозволяє розглядати інтерфейс як універсальне джерело даних, не прив'язане до конкретної програмної реалізації тренажера. Водночас слід враховувати, що точність відновлення параметрів залежить від характеристик відображення – роздільної здатності, частоти оновлення інтерфейсу та стабільності графічного представлення.

Мостиковий інтерфейс сучасного навігаційного тренажера відтворює просторову та функціональну логіку реальної ходової рубки. На екрані одночасно відображаються картографічне поле, індикатори курсу та швидкості, координати судна, параметри рушійної установки, положення стерна та інші елементи керування. Така організація забезпечує безперервне представлення поточного стану моделі у процесі симуляції.

З позиції аналізу даних інтерфейс доцільно розглядати як впорядковану сукупність інформаційних зон, локалізованих у межах екранного простору. Частина показників має безпосереднє числове представлення – курс, швидкість, координати, частота обертів рушійної установки, кут переключення стерна. Інші відображаються у вигляді шкал або стрілочних індикаторів, що потребують геометричної інтерпретації. Картографічна область формує просторовий контекст, у якому відображається траєкторія руху та взаємодія судна з навігаційними об'єктами.

Для формалізації інтерфейс можна подати як двовимірний простір з координатами (x, y) , у межах якого кожен елемент займає визначену область Z_i . Нехай $I(x, y, t)$ – функція, що описує

візуальне представлення інтерфейсу у момент часу t . Кожній зоні Z_i відповідає параметр $p_i(t)$, який відображає певний показник стану судна.

Водночас внутрішня модель тренажера описується вектором стану $S(t)$, що включає змінні кінематики, динаміки та взаємодії із середовищем. Інтерфейс не містить повного опису цього вектора, а відображає лише ту його частину, яка необхідна для керування та контролю. Отже, між внутрішнім станом системи та екранним зображенням існує відображення, яке можна інтерпретувати як інформаційну проєкцію.

У межах дослідження розглядається побудова відображення

$$F: I(x, y, t) \rightarrow P(t),$$

де, $P(t)$ є підмножиною внутрішнього стану $S(t)$, що може бути відновлена на основі візуального представлення.

Таке відображення не є взаємно однозначним: частина змінних внутрішньої моделі не має прямого графічного аналога, тоді як окремі елементи інтерфейсу можуть агрегувати декілька параметрів. Тому реконструкція обмежується тими показниками, які мають сталі та однозначно інтерпретовані відображення.

Точність такого відображення залежить від характеристик зображення – роздільної здатності, частоти оновлення інтерфейсу та масштабу відображення. Ці фактори враховуються при виборі дискретності фіксації та способу інтерпретації графічних елементів.

Ефективність реконструкції параметрів безпосередньо залежить від стабільності просторової організації інтерфейсу. У більшості тренажерних систем інформаційні блоки мають фіксоване розташування, що дозволяє розглядати зони Z_i як сталі області екранного простору, пов'язані з конкретними показниками. Така сталість є необхідною умовою коректного зіставлення візуального елемента з параметром $p_i(t)$.

Разом із тим інтерфейс не є абсолютно незмінним. Можливі варіації масштабу картографічного поля, зміни роздільної здатності, графічні особливості окремих сценаріїв або налаштувань відображення. У зв'язку з цим відображення F має зберігати інваріантність щодо подібних перетворень. Це досягається шляхом нормалізації координатного простору та використання відносних характеристик зон – наприклад, їх положення у частках від розмірів екрану, а не в абсолютних піксельних координатах.

Забезпечення інваріантності дозволяє зберігати відповідність між зоною та параметром навіть за змін умов відображення. У результаті метод набуває універсальності та може застосовуватися до різних тренажерних платформ без зміни загальної логіки формалізації.

Окреме значення параметра у момент часу відображає лише поточний стан системи. Проте аналіз маневрування або реакції судна на керуючі впливи потребує розгляду послідовності змін, а не ізольованих значень. Саме на цьому етапі відбувається методологічний перехід – від опису стану до опису процесу.

Послідовність значень дозволяє виявляти затримки реакції, коливальні режими, тенденції до стабілізації або відхилення від заданої траєкторії. У такому поданні інтерфейс стає не лише джерелом фіксації окремих параметрів, а засобом реконструкції логіки керування та розвитку навігаційної ситуації у часі.

Таким чином, формування часової структури даних є не технічним доповненням до формалізації, а її необхідним продовженням.

Після визначення зон Z_i та встановлення відображення F ключовим завданням стає отримання параметрів із заданою часовою дискретністю Δt . Хоча екранне поле відображає безперервний процес, його фіксація здійснюється у дискретні моменти часу, що узгоджуються з частотою оновлення інтерфейсу.

Для кожного параметра формується послідовність $p_i(t_1), p_i(t_2), \dots, p_i(t_k)$, яка відображає еволюцію відповідного показника протягом симуляції. У такому поданні рух судна описується як багатовимірний процес, у якому окремі змінні змінюються узгоджено або з певними затримками.

Особливої уваги потребує синхронізація параметрів у межах єдиного часового масштабу. Курсові зміни, реакція стерна та варіації швидкості повинні аналізуватися в однакових інтервалах спостереження, що дозволяє встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між керуючими діями та реакцією судна.

У результаті формується багатовимірний часовий опис симуляційного процесу, придатний для порівняння сценаріїв, оцінювання стійкості руху та дослідження ефективності керуючих рішень.

Реконструкція параметрів на основі екранного відображення неминуче пов'язана з певним рівнем похибки. На відміну від внутрішніх телеметричних потоків, де значення формуються безпосередньо у моделі, у запропонованому підході вони відновлюються шляхом інтерпретації графічного образу. Тому оцінювання точності є необхідною складовою перевірки працездатності методу.

На точність впливають декілька факторів: роздільна здатність зображення, частота оновлення інтерфейсу, масштаб картографічного поля, а також спосіб графічного представлення окремих індикаторів. Для числових показників ключовим є коректність зчитування символів, тоді як для шкальних або стрілочних елементів – точність визначення їх геометричних характеристик. У картографічній зоні додатковий вплив має масштабування та особливості відображення координатної сітки.

Якщо позначити відновлене значення параметра через $p_i^*(t)$, а його еталонне значення у моделі – через $p_i(t)$, то миттєва різниця між ними описується як

$$\varepsilon_i(t) = p_i^*(t) - p_i(t).$$

Оскільки оцінювання здійснюється на часовому інтервалі, доцільно використовувати інтегральну характеристику похибки. У роботі застосовано середню абсолютну похибку, що визначається як

$$MAE_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N | p_i^*(t_k) - p_i(t_k) |,$$

де N – кількість дискретних моментів спостереження на вибраному інтервалі.

Експериментальна перевірка показала, що для основних навігаційних параметрів – зокрема курсу та частоти обертів рушія – середня абсолютна похибка не перевищує 1° для HDG та становить менш ніж 2% від номінального значення для RPM. Такі значення є достатніми для аналізу динаміки руху, оцінювання маневрування та дослідження перехідних режимів. Часова затримка між відображенням параметра на екрані та його фіксацією не перевищує інтервал дискретизації Δt .

Метод не є універсальним для всіх типів змінних. Він дозволяє відновлювати лише ті параметри, що мають стабільне графічне представлення. Зміна структури інтерфейсу або довільне переміщення інформаційних блоків потребує повторної локалізації зон. Крім того, параметри, що не відображаються на екрані безпосередньо, залишаються поза межами реконструкції.

Разом з тим отримана точність є достатньою для дослідження траєкторії руху, аналізу реакції судна на керуючі впливи та порівняння сценаріїв симуляції без інтеграції з внутрішніми модулями тренажера.

Практична реалізація та експериментальна перевірка методу

Теоретичне обґрунтування підходу потребує підтвердження його працездатності в умовах реальної симуляції. З цією метою було виконано програмну реалізацію методу та проведено серію експериментів на базі навігаційного тренажера мостикового типу. Метою апробації було оцінити можливість стабільного відновлення навігаційних і керуючих параметрів у процесі симуляції без звернення до внутрішніх телеметричних модулів системи.

Експериментальна перевірка передбачала три послідовні етапи: конфігурацію інформаційних зон інтерфейсу, автоматизоване формування часових послідовностей параметрів та їх подальший аналіз. Особлива увага приділялася узгодженості відновлених величин у часі, стабільності їх отримання

при зміні навігаційної обстановки та відповідності еталонним значенням у контрольованому режимі.

У цьому розділі наведено опис програмної реалізації методу, структуру відновлюваних параметрів та результати експериментальної перевірки, що дозволяють оцінити його практичну придатність для аналізу динаміки руху судна.

Експериментальна перевірка методу проводилася на базі навігаційного тренажера мостикового типу, інтерфейс якого наведено на рис. 1. Екран відображає сукупність навігаційних і технічних параметрів, що характеризують поточний стан судна у процесі симуляції.



Рисунок 1 – Інтерфейс навігаційного тренажера, використаний під час експерименту

У верхній частині інтерфейсу представлено основні навігаційні показники, зокрема курс (HDG), курс відносно магнітного меридіана (MAG), курс відносно ґрунту (COG), швидкість (SOG), параметри дрейфу та кутова швидкість повороту (ROT). Центральна область містить кругову шкалу курсового індикатора, що відображає орієнтацію судна у просторі.

У нижній частині інтерфейсу розташовані індикатори частоти обертів рушії (RPM), кута перекладки стерна (Rudder Angle), швидкості зміни курсу (Rate of Turn) та органи керування двигуном. Така структура забезпечує повне відображення стану системи керування рухом судна. Це візуальне поле слугувало джерелом даних для відновлення параметрів у межах запропонованого методу.

Подальший етап експерименту передбачав локалізацію інформаційних зон інтерфейсу та формування шаблону їх обробки.

Після визначення інтерфейсу як джерела даних наступним етапом експерименту стала локалізація інформаційних зон, у межах яких відображаються навігаційні та керуючі параметри. З огляду на фіксовану структуру інтерфейсу більшість показників має стабільне просторове розташування, що дозволяє сформувати набір областей обробки.

У межах експерименту для кожного параметра було визначено окрему зону Z_i , яка охоплює відповідний елемент інтерфейсу. Конфігурація зон виконувалася у напівавтоматичному режимі шляхом виділення відповідних областей екранного простору. Приклад сформованого набору зон наведено на рис. 2. До таких зон належали числові індикатори курсу та швидкості, шкали частоти обертів рушії, індикатор кута стерна та показник швидкості повороту. Для картографічної області

було задано окремий шаблон обробки, орієнтований на визначення положення судна відносно координатної сітки.

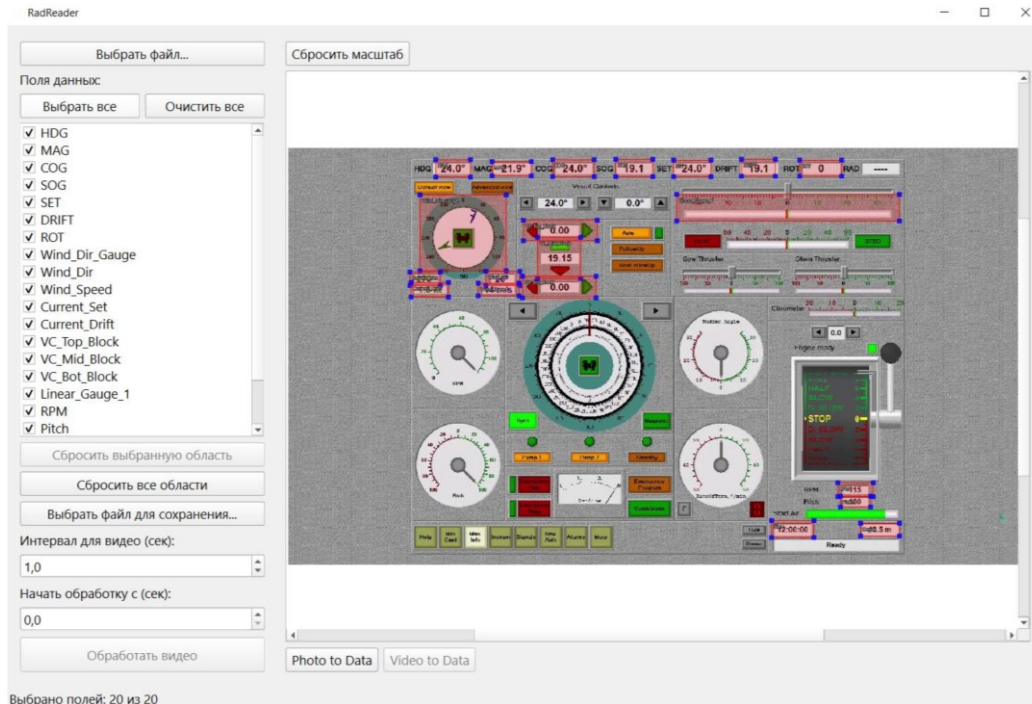


Рисунок 2 – Локалізація інформаційних зон для відновлення навігаційних параметрів

Конфігурація зон здійснювалася один раз для конкретного інтерфейсу та надалі використовувалася у автоматичному режимі. У разі зміни роздільної здатності або масштабу відображення координати зон нормалізувалися відносно розмірів екрану, що забезпечувало збереження їх просторової відповідності.

Локалізація інформаційних зон дозволила перейти від загального зображення інтерфейсу до структурованого набору областей спостереження, у межах яких виконувалося відновлення параметрів у часі.

Після конфігурації інформаційних зон було виконано серію експериментальних запусків у режимі обробки відеопотоку. У наведеному експерименті фіксація параметрів здійснювалася з інтервалом дискретизації $\Delta t = 1$ с, що відповідає частоті 1 Гц та узгоджується з частотою оновлення основних індикаторів інтерфейсу тренажера. Такий інтервал забезпечує достатню деталізацію динаміки руху без надмірного збільшення обсягу даних і зменшує ймовірність появи псевдоколивань, пов'язаних із графічними особливостями відображення.

Разом з тим структура методу та швидкодія обробки зображення допускають підвищення частоти реконструкції до 10 Гц за умови відповідної частоти оновлення інтерфейсу та стабільності візуального представлення параметрів. Збільшення частоти дискретизації не потребує зміни загальної концепції підходу і пов'язане насамперед із технічними характеристиками обчислювального середовища.

Для кожного моменту часу t_k формувався вектор параметрів

$$P(t_k) = \{p_1(t_k), p_2(t_k), \dots, p_n(t_k)\},$$

де компоненти відповідають відновленим навігаційним і керуючим показникам. Набір параметрів, використаний у серії експериментів, наведено в табл. 1 разом із зазначенням типу відображення та призначення кожної змінної в подальшому аналізі.

У результаті обробки формується синхронізована таблиця значень, у якій кожний рядок відповідає дискретному моменту часу, а кожний стовпець – окремому параметру. Така структура дозволяє розглядати процес симуляції як багатовимірний часовий ряд, придатний для аналізу не лише траєкторних змін, а й причинно-наслідкових зв'язків між діями оператора та реакцією судна.

Таблиця 1 – Фрагмент сформованої часової послідовності навігаційних параметрів

HDG, град	COG, град	SOG	SET, град	DRIFT	ROT	Wind_Dir, град	Wind_Speed, м/с	RPM	Depth, м	Time
24.0	24.0	24.3	24.0	24.3	0	34	21	098	8.7	12:00:00
23.8	18.9	23.0	276.2	2.0	0	32	20	098	9.9	12:00:09
24.2	18.5	22.6	278.2	2.3	5	32	20	098	9.7	12:00:19
25.2	18.5	22.3	280.9	2.6	7	31	20	098	10.7	12:00:29
26.1	18.7	22.0	282.4	2.8	9	310	20	098	10.9	12:00:39
27.5	19.9	21.6	283.6	2.9	9	30	20	097	11.3	12:00:49
28.6	20.9	21.3	284.2	2.9	9	30	20	097	10.0	12:00:59
29.5	22.0	21.0	284.1	2.8	8	30	20	097	10.1	12:01:09
30.3	22.8	20.7	284.6	2.8	3	30	20	097	10.8	12:01:19
31.2	23.8	20.4	284.3	2.7	2	290	20	097	8.4	12:01:29
31.8	24.6	20.2	284.1	2.6	0	290	20	096	7.6	12:01:39
32.1	24.9	19.9	283.7	2.6	0	30	20	096	6.7	12:01:49
32.3	25.2	19.7	283.5	2.5	0	30	19	096	8.5	12:01:59
32.5	25.3	19.5	284.1	2.6	0	30	19	096	10.1	12:02:09
32.7	25.5	19.3	284.3	2.5	0	30	19	096	8.5	12:02:19
32.9	25.8	19.1	283.7	2.4	4	30	19	096	6.8	12:02:29
32.9	26.0	18.9	283.2	2.4	2	30	19	096	6.7	12:02:39
32.8	25.9	18.7	282.7	2.3	2	30	19	096	6.4	12:02:49
32.6	25.7	18.5	281.7	2.3	-2	310	19	095	8.4	12:02:59

Отримані масиви даних застосовувалися для оцінювання узгодженості керуючих впливів і динаміки руху. У межах аналізу розглядалися часові зсуви між переключенням стерна та зміною курсу, характер стабілізації після завершення маневру, а також зв'язок між режимом роботи рушійної установки та зміною швидкості. Такий підхід дозволяє перейти від опису окремих станів до інтерпретації процесу керування як динамічної системи з характерними перехідними режимами.

Для подальшої обробки сформовані таблиці експортувалися у стандартний формат, сумісний із середовищами статистичного аналізу та візуалізації. Це забезпечило можливість побудови графіків, узагальненого оцінювання похибок та порівняння різних сценаріїв симуляції в єдиному форматі даних.

Експериментальний аналіз проводився на часовому інтервалі, що відповідає активній фазі маневру, визначеній за характером зміни кутової швидкості повороту. Такий підхід дозволив зосередитися на ділянці, де відбувається взаємодія керуючих впливів і динамічної реакції судна.

На рис. 3 наведено згладжені часові ряди курсу судна (HDG) та кутової швидкості повороту (ROT). Після початку маневру спостерігається зростання ROT, що передують основній зміні курсу. Максимум кутової швидкості досягається раніше, ніж формується основний приріст HDG, що відповідає інерційній природі повороту. Надалі відбувається поступове зменшення ROT і стабілізація курсу на новому рівні. Характер перехідного процесу відображає демпфування коливань без виражених автоколивальних режимів, що підтверджує коректність реконструкції динаміки.

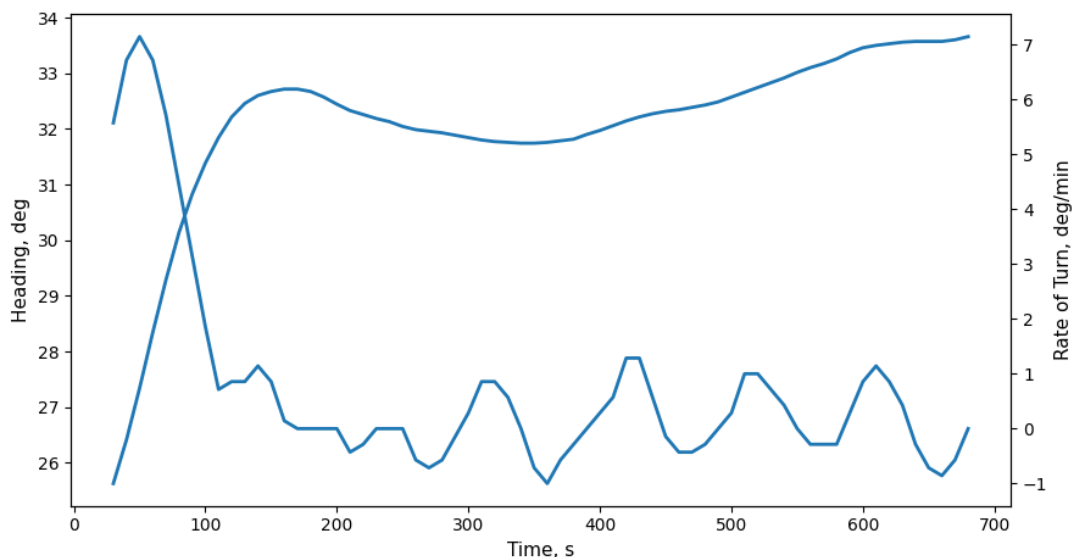


Рисунок 3 – Часові ряди курсу судна (HDG) та кутової швидкості повороту (ROT) на інтервалі маневру

Рис. 4 демонструє зміну частоти обертів рушія на тому самому часовому інтервалі. Відображено поступове зниження RPM без різких стрибків, що узгоджується зі сценарієм переходу до іншого режиму руху. Синхронність змін RPM із динамікою курсу та ROT підтверджує можливість комплексного аналізу кінематичних і енергетичних параметрів на основі сформованих часових послідовностей.

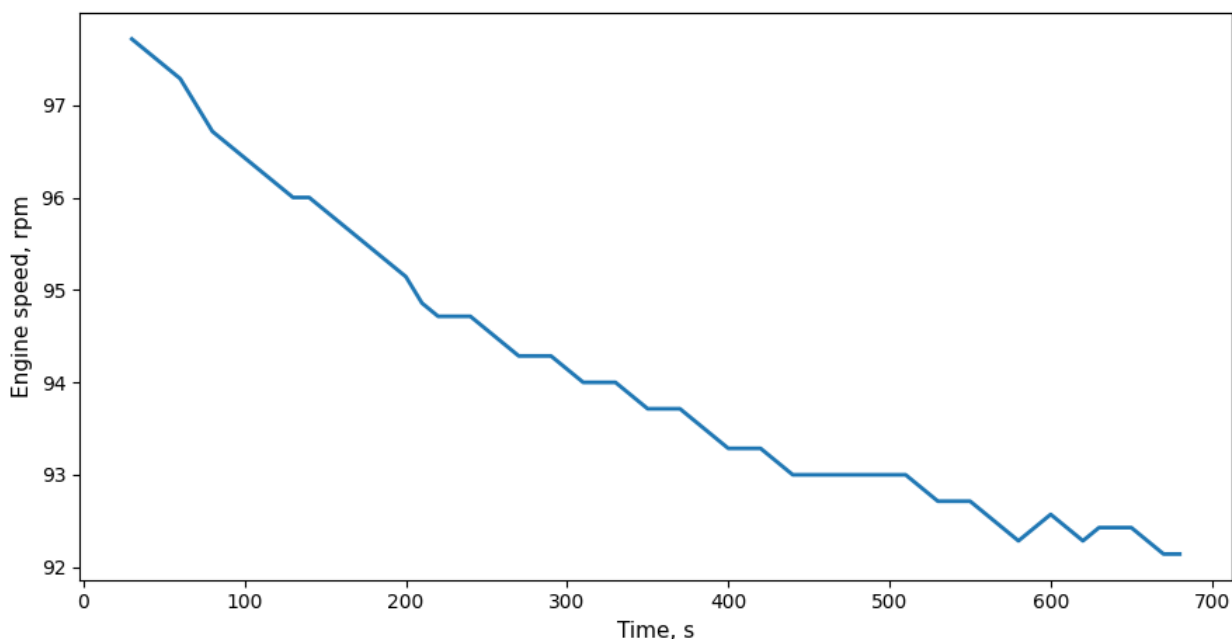


Рисунок 4 – Часовий ряд частоти обертів рушія (RPM) на інтервалі маневру

Кількісний аналіз показав, що характерні екстремуми та точки перегину часових рядів відтворюються стабільно при повторних запусках експерименту. Середній часовий зсув між піком ROT і моментом найбільшої швидкості зміни курсу становив кілька секунд, що відповідає фізичній інерційності моделі судна. Відхилення від еталонних значень залишалися в межах, прийнятних для дослідження маневрених характеристик.

Отримані результати свідчать про те, що реконструкція навігаційних параметрів на основі екранного відображення забезпечує достатню точність для аналізу динаміки керування, дослідження перехідних режимів та порівняння альтернативних сценаріїв руху.

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують можливість реконструкції динаміки руху судна на основі аналізу екранного відображення тренажера без звернення до внутрішніх телеметричних потоків. Часові ряди, сформовані в ході експерименту, дозволяють відтворити не лише послідовність станів, а й характер переходів між ними, що є принципово важливим для дослідження процесів керування.

Порівняння часових рядів курсу та кутової швидкості повороту демонструє збереження фізичної логіки процесу. Пік ROT передує основній зміні HDG, що відповідає інерційній природі маневру. Відсутність фазових спотворень або паразитних коливань свідчить про те, що реконструкція не вносить суттєвих систематичних викривлень у часову структуру сигналу. Це особливо важливо при аналізі перехідних режимів, де навіть незначні часові зсуви можуть змінити інтерпретацію процесу.

Зміна частоти обертів рушія на тому ж інтервалі підтверджує можливість одночасного аналізу кінематичних і енергетичних параметрів. Узгодженість трендів RPM із динамікою повороту відкриває перспективу дослідження взаємозв'язку між режимами роботи рушійної установки та маневреними характеристиками. Таким чином, метод дозволяє перейти від локального аналізу окремого параметра до комплексного розгляду системи «керуючий вплив – реакція судна».

У наявних дослідженнях отримання навігаційних параметрів у тренажерному середовищі зазвичай передбачає використання внутрішніх логів або стандартних телеметричних протоколів. Запропонований підхід відрізняється тим, що спирається виключно на візуально доступну інформацію. Це розширює можливості використання тренажерів як дослідницьких платформ у випадках, коли доступ до внутрішньої архітектури системи обмежений або відсутній.

Методологічно важливим є те, що інтерфейс розглядається як інформаційна проєкція стану системи. Такий погляд дозволяє трактувати екран не як допоміжний засіб відображення, а як структуроване поле даних, придатне для формалізованого аналізу. У цьому контексті тренажерне середовище набуває властивостей експериментальної установки, а процес симуляції – статусу контролюваного експерименту.

Разом із тим результати вказують на межі застосування підходу. Точність реконструкції залежить від стабільності структури інтерфейсу, якості візуалізації та частоти оновлення індикаторів. У випадку динамічної зміни конфігурації екрану або використання адаптивних панелей керування виникає необхідність повторної локалізації зон. Параметри, що не мають прямого графічного відображення, залишаються поза межами відновлення, що обмежує повноту реконструкції внутрішнього стану моделі.

Незважаючи на ці обмеження, проведена апробація показує, що екранне представлення містить достатній обсяг структурованих даних для дослідження маневрених характеристик, аналізу перехідних режимів і порівняння альтернативних сценаріїв керування. Це створює передумови для використання підходу у навчальних дослідженнях, експериментальних роботах та оцінюванні ефективності різних алгоритмів керування.

Висновки. У роботі обґрунтовано та експериментально перевірено можливість отримання навігаційних параметрів на основі аналізу екранного відображення тренажерного інтерфейсу без звернення до внутрішніх телеметричних потоків. Показано, що інтерфейс може розглядатися як структурована інформаційна проєкція стану системи, придатна для формалізованої обробки та формування синхронізованих часових послідовностей.

Розроблено підхід до локалізації інформаційних зон і реконструкції параметрів у дискретні моменти часу, що дозволяє формувати багатовимірний масив даних для аналізу динаміки руху судна. Експериментальна апробація на базі навігаційного тренажера підтвердила збереження фізичної логіки процесу в отриманих часових рядах: взаємозв'язок між кутовою швидкістю повороту, зміною курсу та режимом роботи рушійної установки відтворюється без суттєвих спотворень.

Отримані результати свідчать про можливість використання тренажерних систем як джерела експериментальних даних у дослідницьких цілях навіть за умов обмеженого доступу до внутрішньої архітектури програмного комплексу. Метод забезпечує достатню точність для аналізу перехідних режимів, дослідження маневрених характеристик та порівняння альтернативних сценаріїв керування.

Практичне значення роботи полягає у створенні інструменту, який дозволяє формувати структуровані навігаційні дані з відкритого візуального середовища. Це розширює можливості використання тренажерів у навчальних, наукових та експериментальних задачах без втручання у внутрішні модулі системи.

Подальший розвиток підходу може бути пов'язаний із підвищенням стійкості до змін конфігурації інтерфейсу, розширенням переліку відновлюваних параметрів та інтеграцією отриманих часових масивів із методами статистичного й алгоритмічного аналізу динаміки руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Munim Z. H., Krabbel H., Haavardtun P., Kim T. E., Bustgaard M., Thorvaldsen H. Scenario design, data measurement, and analysis approaches in maritime simulator training: A systematic review // *Methodologies and intelligent systems for technology enhanced learning, workshops – 13th International Conference MIS4TEL 2023 : Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham : Springer, 2023. Vol. 769. DOI: 10.1007/978-3-031-42134-1_4.
2. Sellberg C. Simulators in bridge operations training and assessment: A systematic review and qualitative synthesis // *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2016. DOI: 10.1007/s13437-016-0114-8.
3. Hetherington C., Flin R., Mearns K. Safety in shipping: The human element // *Journal of Safety Research*. 2006. Vol. 37, No. 4. P. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
4. Tusher H. M., Munim Z. H., Nazir S. An evaluation of maritime simulators from technical, instructional, and organizational perspectives: A hybrid multi-criteria decision-making approach // *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2024. Vol. 23. P. 165–194. DOI: 10.1007/s13437-023-00318-1.
5. Frette V., Kleppe G., Christensen K., Garrido P. L. Analysis of ship maneuvering data from simulators // *AIP Conference Proceedings*. 2011. Vol. 1332. P. 276–283. DOI: 10.1063/1.3577668.
6. Li H., Zhao N., Zhou J., Chen X., Wang C. Uncertainty analysis and maneuver simulation of standard ship model // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 7. Article 1230. DOI: 10.3390/jmse12071230.
7. Pires da Silva P. Sensitivity analysis of ship manoeuvring mathematical models // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 2. Article 416. DOI: 10.3390/jmse11020416.
8. He H., Lataire E., Van Zwijnsvoorde T., Delefortrie G. A ship manoeuvring desktop simulator for developing and validating automatic control algorithms // *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023. Vol. 17. P. 607–616. DOI: 10.12716/1001.17.03.12.
9. Saeed F., Bury A., Bonsall S., Riahi R. A proposed evidential reasoning methodology for quantitative assessment of non-technical skills amongst merchant navy deck officers in a ship's bridge simulator environment // *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2018. Vol. 12, No. 3. P. 597–608. DOI: 10.12716/1001.12.03.20.
10. Atik O., Arslan O. Use of eye tracking for assessment of electronic navigation competency in maritime training // *Journal of Eye Movement Research*. 2019. Vol. 12, No. 3. DOI: 10.16910/jemr.12.3.7.
11. Ronca V. et al. Neurophysiological assessment of an innovative maritime emergency training intervention in a full-mission bridge simulator // *Brain Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 9. Article 1319. DOI: 10.3390/brainsci13091319.
12. Yasukawa H., Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions // *Journal of Marine Science and Technology*. 2015. Vol. 20, No. 1. P. 37–52. DOI: 10.1007/s00773-014-0293-y.
13. Lee J., Nam B. W., Lee J.-H., Kim Y. Development of enhanced two-time-scale model for simulation of ship maneuvering in ocean waves // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 7. Article 700. DOI: 10.3390/jmse9070700.
14. Kim D., Tezdogan T., Incecik A. A high-fidelity CFD-based model for the prediction of ship manoeuvrability in currents // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 256. Article 111492. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111492.
15. Smith R. An overview of the Tesseract OCR engine // *Proceedings of the Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)*. 2007. P. 629–633. DOI: 10.1109/ICDAR.2007.4376991.
16. Wuest T., Weimer D., Irgens C., Thoben K.-D. Machine learning in manufacturing: Advantages, challenges, and applications // *Production & Manufacturing Research*. 2016. Vol. 4, No. 1. P. 23–45. DOI: 10.1080/21693277.2016.1192517.

17. Szeliski R. *Computer vision: Algorithms and applications*. London : Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-1-84882-935-0.

18. Rehman M. S., Shafiq M. T., Ullah F. Automated computer vision-based construction progress monitoring: A systematic review // *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 7. Article 1037. DOI: 10.3390/buildings12071037.

REFERENCES

1. Munim, Z. H., Krabbel, H., Haavardtun, P., Kim, T. E., Bustgaard, M., & Thorvaldsen, H. (2023). Scenario design, data measurement, and analysis approaches in maritime simulator training: A systematic review. In Z. Kubincová, F. Caruso, T. E. Kim, M. Ivanova, L. Lancia, & M. A. Pellegrino (Eds.), *Methodologies and intelligent systems for technology enhanced learning, workshops – 13th International Conference MIS4TEL 2023* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 769). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42134-1_4
2. Sellberg, C. (2016). Simulators in bridge operations training and assessment: A systematic review and qualitative synthesis. *WMU Journal of Maritime Affairs*. <https://doi.org/10.1007/s13437-016-0114-8>
3. Hetherington, C., Flin, R., & Mearns, K. (2006). Safety in shipping: The human element. *Journal of Safety Research*, 37(4), 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2006.04.007>
4. Tusher, H. M., Munim, Z. H., & Nazir, S. (2024). An evaluation of maritime simulators from technical, instructional, and organizational perspectives: A hybrid multi-criteria decision-making approach. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 23, 165–194. <https://doi.org/10.1007/s13437-023-00318-1>
5. Frette, V., Kleppe, G., Christensen, K., & Garrido, P. L. (2011). Analysis of ship maneuvering data from simulators. *AIP Conference Proceedings*, 1332, 276–283. <https://doi.org/10.1063/1.3577668>
6. Li, H., Zhao, N., Zhou, J., Chen, X., & Wang, C. (2024). Uncertainty analysis and maneuver simulation of standard ship model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 1230. <https://doi.org/10.3390/jmse12071230>
7. Pires da Silva, P. (2023). Sensitivity analysis of ship manoeuvring mathematical models. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 416. <https://doi.org/10.3390/jmse11020416>
8. He, H., Lataire, E., Van Zwijnsvoorde, T., & Delefortrie, G. (2023). A ship manoeuvring desktop simulator for developing and validating automatic control algorithms. *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 17, 607–616. <https://doi.org/10.12716/1001.17.03.12>
9. Saeed, F., Bury, A., Bonsall, S., & Riahi, R. (2018). A proposed evidential reasoning methodology for quantitative assessment of non-technical skills amongst merchant navy deck officers in a ship's bridge simulator environment. *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 12(3), 597–608. <https://doi.org/10.12716/1001.12.03.20>
10. Atik, O., & Arslan, O. (2019). Use of eye tracking for assessment of electronic navigation competency in maritime training. *Journal of Eye Movement Research*, 12(3). <https://doi.org/10.16910/jemr.12.3.7>
11. Ronca, V., et al. (2023). Neurophysiological assessment of an innovative maritime emergency training intervention in a full-mission bridge simulator. *Brain Sciences*, 13(9), 1319. <https://doi.org/10.3390/brainsci13091319>
12. Yasukawa, H., & Yoshimura, Y. (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1), 37–52. <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>
13. Lee, J., Nam, B. W., Lee, J.-H., & Kim, Y. (2021). Development of enhanced two-time-scale model for simulation of ship maneuvering in ocean waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 700. <https://doi.org/10.3390/jmse9070700>
14. Kim, D., Tezdogan, T., & Incecik, A. (2022). A high-fidelity CFD-based model for the prediction of ship manoeuvrability in currents. *Ocean Engineering*, 256, 111492. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111492>
15. Smith, R. (2007). An overview of the Tesseract OCR engine. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)* (pp. 629–633). <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2007.4376991>
16. Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., & Thoben, K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: Advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, 4(1), 23–45. <https://doi.org/10.1080/21693277.2016.1192517>
17. Szeliski, R. (2010). *Computer vision: Algorithms and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0>
18. Rehman, M. S., Shafiq, M. T., & Ullah, F. (2022). Automated computer vision-based construction progress monitoring: A systematic review. *Buildings*, 12(7), 1037. <https://doi.org/10.3390/buildings12071037>

Kalinichenko Y., Koliesnik O.

METHOD OF AUTOMATED OBTAINING OF VESSEL PARAMETERS FROM THE VISUAL INTERFACE OF THE NAVIGATION SIMULATOR

The article proposes a method for automated reconstruction of navigational and control parameters of a vessel based on the analysis of a navigation simulator's visual interface, without accessing its internal telemetry modules. The relevance of the study arises from the fact that most existing approaches rely on service logs or digital data streams, access to which depends on the architecture of a specific software platform. Such dependence limits experimental reproducibility, complicates cross-platform comparison of results, and reduces the universality of the conclusions obtained.

The proposed approach treats the screen space as a structured information field in which stable zones corresponding to individual indicators are localized. After configuring these zones, graphical and numerical interface elements are automatically transformed into synchronized time series of motion parameters. The reconstruction rate is aligned with the update frequency of interface indicators and, under appropriate technical conditions, can reach up to 10 Hz. The resulting multidimensional dataset enables analysis of vessel trajectory, transient regimes, response delays, and the relationship between control actions and vessel dynamics.

Experimental validation was carried out using a full-mission bridge simulator. For heading, the mean absolute reconstruction error did not exceed 1°, while for propeller shaft revolutions it remained below 2% of the nominal value. The obtained time series preserve the physical sequence of maneuvering processes, reproduce characteristic extrema, and do not exhibit significant phase distortions. The results confirm the feasibility of using the visual interface layer as an independent and universal source of experimental data for studies of ship motion dynamics.

Keywords: navigation simulators; navigational data; visual interfaces; real-time analysis; ship dynamics modeling; navigational parameters; decision support.

Стаття прийнята 19.01.2026