

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ "  
(НУ «ОМА»)

Сікірін Володимир Євгенович



УДК 656.61.052

**ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА  
ЗА МІНІМУМОМ ТРАЄКТОРНОЇ ПОХИБКИ**

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті "Одеська морська академія"  
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,

**Ворохобін Ігор Ігорович**

Національний університет "Одеська морська академія",  
декан факультету морських перевезень та технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,

**Федорович Олег Євгенович**

Національний аерокосмічний університет імені  
М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
завідувач кафедри інформаційних управляючих систем.

кандидат технічних наук,

**Репетей Володимир Дмитрович**

начальник служби безпеки мореплавства філії  
«Дельта-лоцман» державного підприємства  
«Адміністрація морських портів України».

Захист відбудеться 01 листопада 2018 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті "Одеська морська академія" за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зал засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Одеська морська академія" за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 2, та за електронною адресою - <http://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>.

Автореферат розісланий 28 вересня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д. т. н., професор



Нікольський В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з найважливіших проблем мореплавання є підвищення безаварійності судноводіння, збереження людського життя на морі та зниження рейсових витрат.

Плавання суден в стислих водах ускладнюють інтенсивне судноплавство та навігаційні небезпеки, які створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій. При плаванні в стислих районах одним із найбільш актуальних аспектів забезпечення безаварійного судноводіння є вдосконалення методів управління рухом судна, що в першу чергу визначається системою прийняття рішень по управлінню рухом судна. Тому розробка способу оцінки та підвищення ефективності системи прийняття рішень по управлінню рухом судна, чому присвячена дана робота, є актуальним науковим напрямом.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463 / 2008), а також в рамках планів наукових досліджень національного університету "Одеська морська академія" за держбюджетною темою "Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання" (№ ДР 0115U003580, 2016 р.), в якій здобувачу належить виконаний підрозділ.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є забезпечення безаварійного судноводіння в стислих районах судноплавства.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження є припущення про можливість підвищення ефективності управління рухом судна за допомогою комплексного урахування детермінованих та стохастичних чинників.

Головна задача дослідження полягає у створенні алгоритму визначення максимального значення показника ефективного управління рухом, для забезпечення безаварійного судноводіння.

Вирішення головної задачі може бути досягнуто при вирішенні наступних допоміжних завдань:

- аналіз існуючих методів управління рухом судна в стислих районах мореплавання;
- формування математичної моделі показника ефективності системи прийняття рішень з управління рухом судна;
- визначення можливості застосування узагальненого закону Пуассона для формалізації стохастичної складової показника ефективності руху судна;
- формування практичних дій для подальшого підвищення ефективності управління рухом судна.

**Об'єктом дослідження** є процес управління рухом судна.

**Предметом дослідження** є формування траєкторії руху для забезпечення безаварійного судноводіння.

**Методи дослідження.** У дисертаційному дослідженні для рішення поставлених задач були використані наступні методи:

- дедукції при аналізі основних підходів вирішення проблеми безпеки судноводіння;
- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;
- системного аналізу для вибору теми дисертаційної роботи і при формуванні технології наукового дослідження;
- математичного аналізу для одержання рівнянь руху судна і пошуку залежності параметрів руху судна від керуючих впливів;
- теорії вірогідності та математичної статистики для формалізації стохастичної складової показника ефективності системи прийняття рішень з управління рухом судна.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в створенні нового методу для підвищення ефективності системи прийняття рішень по управлінню рухом судна, який відрізняється від існуючих урахуванням детермінованих та стохастичних чинників, що впливають на точність реалізації судном програмної траєкторії безаварійного руху.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблено метод оцінки показника ефективності системи прийняття рішень з управління рухом судна з урахуванням залежності від детермінованих та стохастичних факторів;
- дістало подальшого розвитку модель перетворення системи залежних похибок розподілених по узагальненому закону Пуассона у їх незалежну систему;
- вдосконалено метод максимальної правдоподібності при розподілі похибок навігаційних вимірів по узагальненому закону Пуассона.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що його результати можуть бути впроваджені на судна в процесі експлуатації, а також в судових навігаційних інформаційних системах.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 03.04.2018 р.), крьюінговою компанією «СМА Шипс Україна» для підготовки офіцерів морських суден (акт від 28.03.2018 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі Управління судном в розділах забезпечення маневрування судна (акт від 26.03.2018 р.) та в наукових дослідженнях НУ «ОМА» (акт від 26.03.2018 р.).

**Особистий внесок здобувача** полягає в тому, що ним здійснений інформаційний пошук та аналіз основних напрямків вирішення проблеми підвищення безпеки судноводіння, обґрунтовано методологічне забезпечення дисертаційного дослідження, розроблений метод оцінки і покращення

показника ефективності системи прийняття рішень по управлінню рухом судна і з урахуванням детермінованих та стохастичних факторів, алгоритми оцінки ефективності обсервованих координат при надмірних вимірюваннях отриманих методом найменших квадратів в разі розподілу похибок за узагальненим законом Пуассона, також метод максимальної правдоподібності при розподілі похибок навігаційних вимірів по узагальненому закону Пуассона, впроваджені результати роботи в виробничий процес.

З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті положення, які належать автору особисто: дослідження особливостей узагальненого закону Пуассона і метод розрахунку ефективних координат при надлишкових вимірювань [1], процедура визначення ефективності координат судна при розподілі похибок по закону Пуассона [2], процедура оцінки ефективності обсервованих координат судна [3], аналіз особливості узагальненого закону Пуассона [4], порівняльна характеристика узагальненого закону Пуассона з іншими законами [6], модель формування узагальненого закону Пуассона [8], ортогональний розклад щільності узагальненого закону Пуассона [9], процедура інтегрування в моделі керованого руху судна [10], формування вибірок похибок навігаційних вимірювань при натурних спостереженнях [13], налаштування авторульового для оптимального управління судном [17].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях:

VIII Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)» (Херсон, 24-26 травня 2016 р.), IX Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)» (Херсон, 23-25 травня 2017 р.), XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке» (Харків, 15 вересня 2017 р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.), науково-технічна конференція «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні» (Одеса, 19-20 листоп. 2015 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2016 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листоп. 2017 р.).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 16 наукових праць (з них 7 одноосібно), в тому числі: в зарубіжних наукових профільних виданнях - 3 наукових статей [1-3]; в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України - 6 наукових статей [5-9,16]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 7 доповідей [4,10-15].

**Структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (119 найменувань) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 255 сторінок і містить 50 рисунків і 15 таблиць, зокрема: 191 сторінка основного тексту, 14 сторінок списку використаних джерел, 50 сторінок додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** роботи наведено: актуальність теми дослідження, її зв'язок з науковими програмами, мету, головну та допоміжні задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення результатів роботи.

У **першому розділі** здійснений огляд літературних джерел по вирішенню проблеми дослідження та основних напрямків вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння, а також вибрано напрям дисертаційного дослідження.

Попереднім аналізом встановлено, що основними напрямками рішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння є розробка методів та моделювання управління рухом судна при плаванні в стислих районах, що сприяє їх більш безпечному плаванню, забезпеченню точності контролю місця судна та оцінки безпеки судноводіння.

Центральним напрямом рішення вказаних проблем, є вдосконалення методів управління рухом судна при реалізації програмної траєкторії, а також в ситуаціях небезпечного маневрування. Тому основний напрям дисертаційного дослідження, був присвячений вдосконаленню способів управління руху суден шляхом підвищення ефективності управління, що потребує подальших наукових досліджень, що обумовлює обґрунтування основних напрямів дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** за здійснений вибір теми дисертаційного дослідження методом експертного оцінювання.

Методами системного підходу розроблено технологічну карту дисертаційного дослідження, яка відображає технологію методичного забезпечення коректного рішення задач, поставлених в роботі. Сформульовані робоча гіпотеза і головна задача дисертаційного дослідження, а також визначено його об'єкт та предмет. Були сформульовані три допоміжні задачі для вирішення головної наукової задачі.

У **третьому розділі** розглянуто вибір і розробку математичної моделі показника ефективності системи прийняття рішень з управління рухом судна, що являється першою складовою задачею дисертаційної роботи.

В розділі приведена система прийняття рішень з управління рухом судна  $S_m$ , яка забезпечує реалізацію цільових програм суден, тобто їх рух заданими траєкторіями. Попередній аналіз показав, що система  $S_m$  в силу доцільної поведінки судна і збереження цілісності (попередження руйнування елементів) є системою прийняття рішень, яка має ієрархічну структуру. В

роботі показано, що система  $S_m$  є багаторівневою ієрархічною системою і приведено її стратифікований і багатошаровий опис.

З позицій стратифікованого опису система прийняття рішень  $S_m$  може бути представлена у вигляді ієрархії, що містить три страти. Найбільш узагальнена верхня - третя страта впливає на процес руху судна  $P_t$  щодо програмної траєкторії, входом якого є управлінський вплив судна або, в залежності від специфіки розглянутого окремого завдання, їх швидкості і курси. Також на вхід процесу руху судна  $P_t$  надходять зовнішні збурення  $\psi_t$ , а виходом є поточне значення справжнього стану судна відносно програмного.

Друга страта, що являє собою склад системи прийняття рішень з управління рухом судна  $S_m$ , в загальному випадку містить систему управління рухом судна  $C_C$ , систему навігаційної інформації  $C_I$  і систему забезпечення структурної стійкості  $C_R$ .

Тактичні цілі перерахованих систем наступні. Система управління рухом судна  $C_C$  призначена для компенсації динамічних, навігаційних і ситуаційних збурень. Призначенням системи навігаційної інформації  $C_I$  є мінімізація інформаційних шумів та отримання повної і достовірної інформації про навколишнє оточення з урахуванням обмеження на час вимірювань. Тактична мета системи забезпечення структурної стійкості  $C_R$  полягає в підтримці максимального рівня експлуатаційної надійності при наявності обмежень на вартісні витрати.

Першу страту отримуємо шляхом подальшої декомпозиції систем  $C_C$ ,  $C_I$  і  $C_R$ .

Друга страта системи прийняття рішень з управління рухом судна  $S_m$  є багатошаровою ієрархічною системою, так як на ній формується рішення задачі, яке містить кілька рівнів складності і рішення кожного вищого рівня виробляє параметри для завдання наступного нижнього рівня (рис. 1).

Так, шар найбільшої складності, - третій, вирішує завдання вибору програмної траєкторії руху судна, причому є два основних аспекти цього завдання. По-перше, константи середовища на маршруті переходу (межі навігаційних небезпек, ізобати і т.п.) і детерміновані процеси (течії, припливно-відливні явища) дозволяють сформувати попередню програмну траєкторію на весь перехід судна. По-друге, в процесі реалізації програмної траєкторії можуть виникати ситуаційні збурення, які породжуються небезпечними рухомими оточуючими суднами, що вимагає розрахунку безпечних фрагментів програмної траєкторії з метою компенсації шляхових, або навігаційних збурень. Завдання компенсації ситуаційних збурень в даному дисертаційному дослідженні розглядати не будемо. Тому завданням третього шару є формування програмної траєкторії руху судна

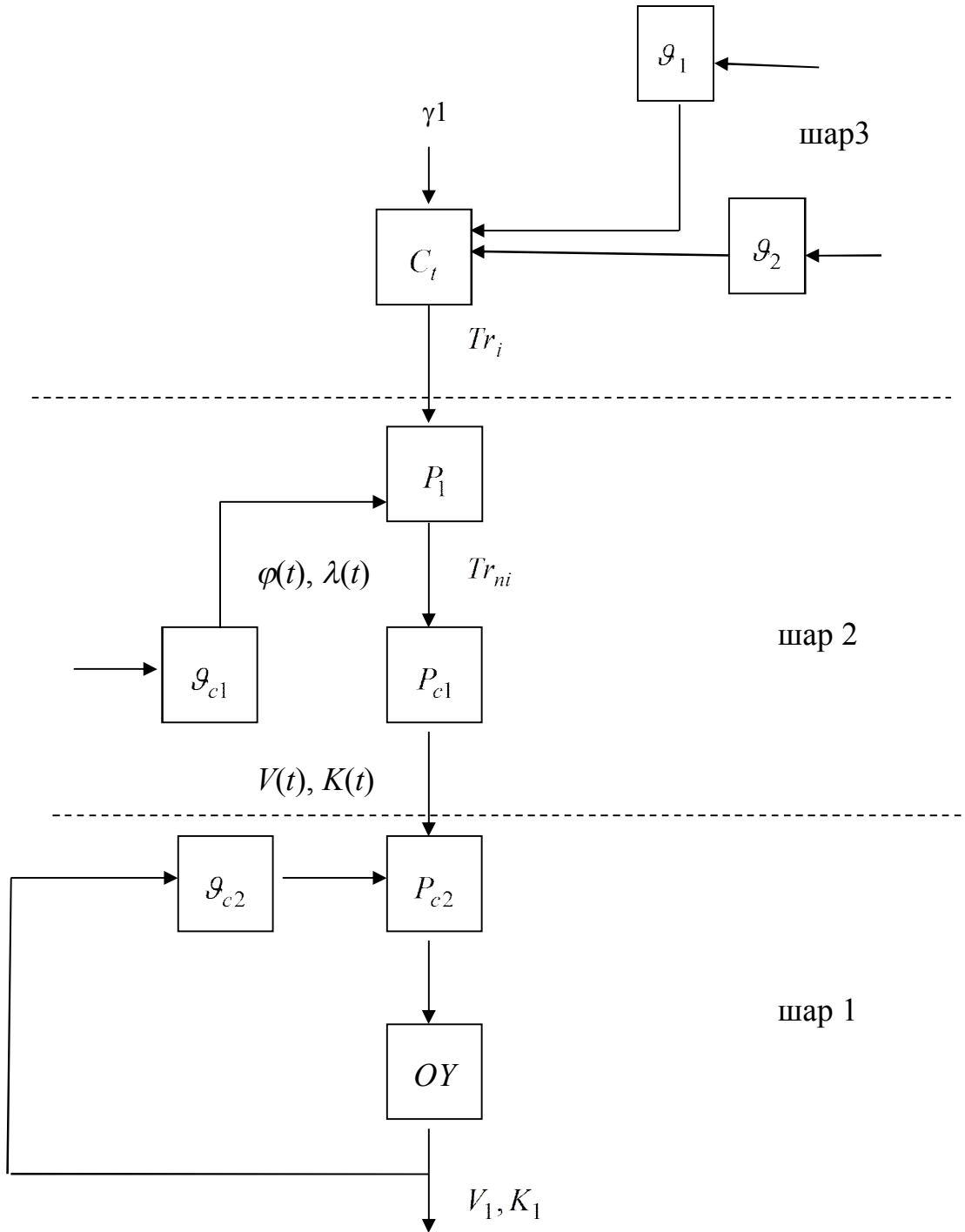


Рис. 1. Багатошаровий опис системи  $S_m$

Отримане рішення задачі програмного руху судна є вихідним для другого шару системи прийняття рішень. На другому шарі проводиться компенсація навігаційних збурень, тобто вирішується завдання проводки судна по заданій програмній траєкторії. З цією метою здійснюється контроль поточного місця судна, і формуються параметри руху (курс і швидкість



судна) для його проведення за програмною траєкторією. При цьому системою навігаційної інформації вимірюються необхідні навігаційні параметри і за результатами вимірювань розраховуються коригувальні значення параметрів руху судна.

Таким чином, система  $S_m$  є складною ієрархічною системою, що містить за функціональною ознакою три страти, а за ознакою декомпозиції розв'язуваної задачі - три шари.

Для оцінки рівня ефективності функціонування системи прийняття рішень з управління рухом судна  $S_m$  необхідно розробити відповідний показник ефективності, що враховує її приведений ієрархічний формальний опис.

В якості стохастичного показника ефективності  $Q_s$  функціонування системи прийняття рішень  $S_m$  з управління рухом судна в роботі вибрана дисперсія модуля векторіальної похибки, яка є сумою дисперсій модулів векторіальної траєкторної похибки  $\eta$  та похибка повороту  $\xi$ , тобто

$$Q_s = D + fD_\xi,$$

де  $f$  - коефіцієнт, менше 1 і враховує співвідношення частот обсервацій і поворотів судна.

Векторіальну похибка  $\eta$  можна представити сумою двох похибок: похибки обсервації  $\chi(t)$  і похибки прогнозу програмних координат  $\theta$  за інтервал часу  $\Delta t$ . Причому похибка прогнозу  $\theta$ , в свою чергу, є сумою похибок обліку впливу зовнішніх збурень  $\nu(t, \Delta t)$  і приладів зчислення  $\varepsilon(t, \Delta t)$ . Отже:

$$D = D_\chi + D_\theta,$$

а стохастичний показник ефективності функціонування системи  $S_m$ :

$$Q_s = D_\chi + D_\theta + fD_\xi.$$

Таким чином, показник  $Q_s$  ефективності функціонування системи  $S_m$  в скалярному виразі відображає точність обсервації, прогнозу і управління судном при повороті, тобто показники системи інформації  $C_I$  і системи управління судном  $C_C$ .

Ще одним важливим аспектом, що характеризує точність утримання системою  $S_m$  судна на програмній траєкторії, є детермінована складова, яка викликана ризиканням судна щодо заданої траєкторії руху. Детерміновану складову показника ефективності функціонування системи  $S_m$  доцільно характеризувати максимальним значенням бокового зміщення (зносу) судна  $d_{\max}$  щодо його програмної траєкторії руху.

Тому в якості показника ефективності  $Q_\Sigma$  функціонування системи  $S_m$ , що враховує, як стохастичну, так і детерміновану складові пропонується сума їх характеристик:

$$Q_\Sigma = Q_s + d_{\max} \text{ або}$$

$$Q_{\Sigma} = D_{\chi} + D_{\theta} + fD_{\xi} + d_{\max}.$$

Вираз для дисперсії  $D_{\xi}$  модуля векторіальної похибки повороту може бути отримано наступним чином. При виконанні повороту судном векторіальна похибка управління судном  $S^{(c)}$  складається із векторіальної похибки  $S^{(\beta)}$ , яка виникає через похибки перекладки пера стерна  $\Delta\beta_k$ , і векторіальної похибки  $S^{(t)}$ , яка виникає через похибки вибору моменту часу початку повороту  $\Delta t_n$ .

Розглянемо векторіальну похибку  $S^{(\beta)}$ , для чого звернемося до рис. 2.

Якщо перекладення стерна проводиться без похибки, то після повороту судно виявиться в точці М на новій ділянці траєкторії, і векторіальна похибка  $S^{(\beta)}$  не виникає. У разі появи похибки  $\Delta\beta_k$  дійсний кут перекладки стерна становить величину  $\beta_k + \Delta\beta_k$ , а судно до кінця маневру виявляється в точці N. При цьому векторіальна похибка  $S^{(\beta)}$  дорівнює за величиною відрізка MN, причому її складові  $S_x^{(\beta)}$  та  $S_y^{(\beta)}$  визначаються виразами:

$$S_x^{(\beta)} = x_N - x_M \quad \text{и} \quad S_y^{(\beta)} = y_N - y_M,$$

де  $x_M$  та  $y_M$  - координати точки М;

$x_N$  та  $y_N$  - координати точки N.

Якщо обертальний рух судна відбувається з постійною кутовою швидкістю, то, як показано в дисертаційній роботі, дисперсія  $D_{\xi}$  оцінюється наступним виразом:

$$D_{\xi} = 2D_{\beta} \left( \frac{V_o}{k_{\omega} \beta_k^2} \right)^2 [1 - \cos(K_o - K_y)] + D_t V_o^2,$$

де  $D_{\beta}$  та  $D_t$  - відповідно дисперсії похибок перекладки пера стерна  $\Delta\beta_k$  та вибору моменту часу початку повороту  $\Delta t_n$ .

Детермінована складова показника ефективності характеризується максимальним значенням бічного зносу судна щодо програмної траєкторії руху. В дисертаційній роботі наведено диференціальне рівняння керованого руху судна по куту рискання:

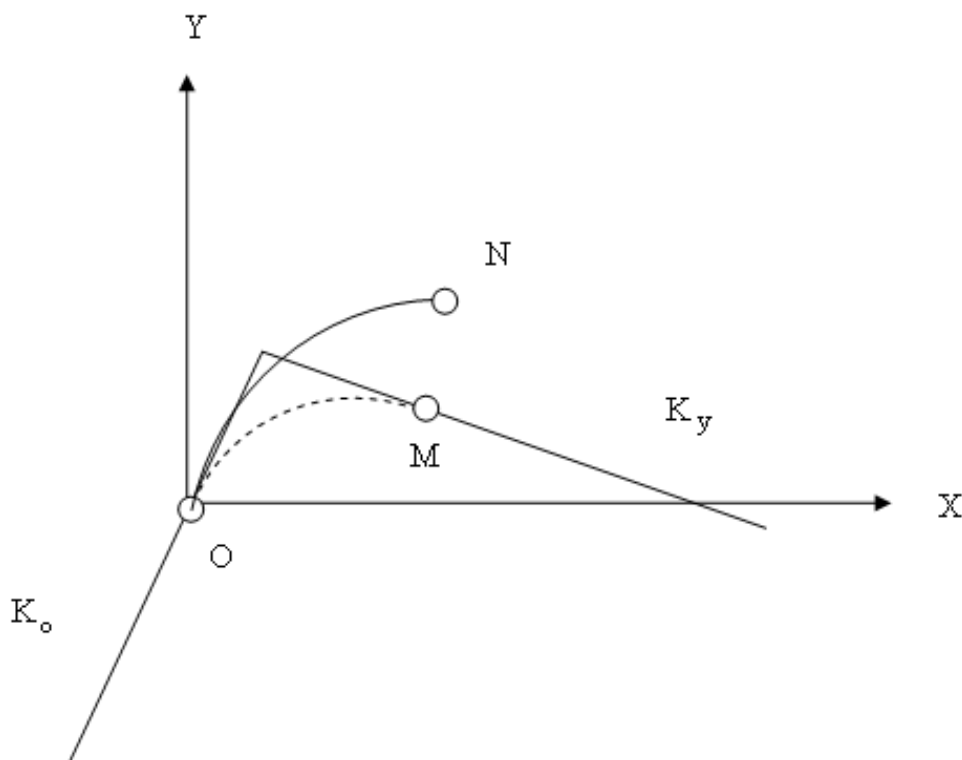


Рис. 2. Виникнення векторіальної похибки  $S^{(\beta)}$

$$I_z \ddot{\psi} + C_1 \dot{\psi} + C_2 \beta = L_c + L_{p0} \sin \omega_p t,$$

де  $I_z$  - момент інерції судна і приєднаних мас води щодо вертикальної осі;

$C_1$  - гідродинамічна характеристика судна;

$C_2$  - гідродинамічна характеристика стерна;

$L_c$  - постійна складова моменту збурення;

$L_{p0}$  та  $\omega_p$  - відповідно амплітудне значення гармонійної складової і кругова частота її зміни.

В дисертації отримано рівняння зміни кута рискання судна при різних алгоритмах управління та показано, що бічне знесення судна залежить від характеристик моментів збурення, а також від частоти власних коливань судна за кутом рискання і його коефіцієнту загасання. В результаті дослідження показано, що при пропорційно-інтегрально-диференційному закону керування судна бічний зніс судна  $d_2$  набуває найменшого значення. У цьому випадку значення бічного зносу судна щодо програмної траєкторії  $d_2$  має тільки гармонійну складову з частотою рискання:

$$d_2 = \psi_{\text{ro1}} \frac{V}{\omega_p} [\cos \alpha - \cos(\omega_p t - \alpha)],$$

$$\text{де } \psi_{\text{ro1}} = \frac{L_{p0}}{I_z \omega_p [(\omega_0^2 - \omega_p^2)^2 + 4v_{\theta 1}^2 \omega_p^2]^{1/2}};$$

$$v_{\theta 1} = \frac{1}{2} \left( \frac{C_1}{I_z} + \frac{C_2}{I_z} \frac{k_2}{k_4} \right) - \text{коефіцієнт загасання};$$

$\omega_0$  - власна частота судна при русанні.

Максимальне значення  $d_{2\max}$  зносу  $d_2$  визначається виразом:

$$d_{2\max} = \frac{L_{po}}{I_z \omega_p [(\omega_0^2 - \omega_p^2)^2 + 4v_{\theta 1}^2 \omega_p^2]^{1/2}} \frac{V}{\omega_p} \left\{ 1 + \frac{(\omega_0^2 - \omega_p^2)}{[(\omega_0^2 - \omega_p^2)^2 + 4v_{\theta 1}^2 \omega_p^2]^{1/2}} \right\}.$$

Таким чином, вираз критерію функціональної ефективності  $Q_\Sigma$  системи прийняття рішень  $S_m$  з управління рухом судна остаточно приймає наступний аналітичний вигляд:

$$Q_\Sigma = D_\chi + D_\theta + 2fD_\beta \left( \frac{V_0}{k_\omega \beta_k^2} \right)^2 [1 - \cos(K_o - K_y)] + D_t V_0^2 + \\ + \frac{L_{po}}{I_z \omega_p [(\omega_0^2 - \omega_p^2)^2 + 4v_{\theta 1}^2 \omega_p^2]^{1/2}} \frac{V}{\omega_p} \left\{ 1 + \frac{(\omega_0^2 - \omega_p^2)}{[(\omega_0^2 - \omega_p^2)^2 + 4v_{\theta 1}^2 \omega_p^2]^{1/2}} \right\}.$$

Матеріали розділу наведено в роботах [1,5,15,16].

У **четвертому розділі** приведені результати аналізу можливості застосування узагальненого закону Пуассона для формалізації стохастичної складової показника ефективності системи прийняття рішень та двовимірної щільності розподілу векторіальної траєкторної похибки, чому присвячені друга складова задача дисертаційного дослідження.

Дослідження здійснено на основі законів розподілу ймовірностей похибок навігаційних вимірювань. Наведено відомості з нормального закону та двох типах змішаних законів. Нормальний закон розподілу є стійким, і застосовується для опису, як незалежних, так і залежних випадкових похибок, проте йому не властиві «обтяжені хвости», які характерні для реальних гістограм похибок навігаційних вимірювань. Змішані закони розподілу позбавлені цього недоліку, - їх відрізняють позитивний ексцес, що свідчить про «тяжкі хвости». Змішані закони не можуть використовуватися, якщо похибки вимірювань є залежними, так як вони не володіють властивістю стійкості або безмежної подільності.

Зазначених двох недоліків позбавлений узагальнений закон Пуассона, модель формування якого базується на припущенні про те, що на точність вимірювання навігаційного параметра впливає нескінченне число факторів, кожен з яких зумовлює появу елементарної похибки  $\zeta_i$ , причому всі похибки  $\zeta_i$  є однаково розподіленими незалежними випадковими величинами з щільністю  $g(\zeta)$ . Однак кількість факторів, одночасно діючих на точність вимірювань, є випадковою величиною, тому що ймовірність наявності кожного з факторів у комплексі умов вимірювання параметра відрізняється від 1. Очевидно, в такому випадку похибка навігаційних вимірювань  $\xi$

дорівнює випадковій сумі елементарних похибок  $\zeta_i$ , тобто  $\xi = \sum_{i=1}^N \zeta_i$ , де  $N$  - випадкова дискретна величина. Причому щільність розподілу буде  $N$  - кратною згорткою щільності  $g(\zeta)$ , таку згортку позначають  $g^{N*}(\zeta)$ .

В цьому разі щільність  $f(\xi)$  визначається узагальненим законом Пуассона:

$$f(\xi) = \exp(-c) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k}{k!} g^{k*}(\xi),$$

де  $c > 0$  - суттєвий параметр розподілу.

Основною і дуже важливою перевагою узагальнених розподілів Пуассона є їх безмежна подільність. Наявність «важкого хвоста» щільності  $f(\xi)$  виражається через характеристичну функцію  $\varphi(t)$  щільності  $g(\zeta)$  наступною умовою:

$$\frac{\frac{\partial^4}{\partial t^4} \varphi(t=0)}{3c \left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varphi(t=0) \right]^2} > 0.$$

Очевидно, за будь-якою симетричною  $g(\zeta)$  щільність  $f(\xi)$  узагальненого закону Пуассона матиме «обтяжений хвіст».

Попередній аналіз показує, що  $k$  - кратна згортка щільності сама з собою існує в явному вигляді для розподілів Гауса, Коші та сімейства щільності Лапласа. Однак узагальнений закон Пуассона, породжений щільністю Коші, не має моментів, тому не може бути використаний в якості розподілу похибок навігаційних вимірювань. Узагальнений закон Пуассона, сформований щільністю Лапласу, не має безперервну першу похідну. Виявляється, що тільки узагальнений закон Пуассона з базовим розподілом Гауса може бути використаний для опису похибок навігаційних вимірювань.

Вирази для щільності нормального закону розподілу і її  $k$  - кратна згортка сама з собою мають відповідно такий вигляд:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right), \quad g^{k*}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi k}\sigma} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2}\right).$$

Отже, щільність  $f_{\Gamma}(\xi)$  узагальненого закону Пуассона з базовим розподілом Гауса виражатися наступним чином:

$$f_{\Gamma}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-c) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2}\right).$$

Характеристична функція, відповідна щільності  $f_{\Gamma}(\xi)$ , має вигляд:

$$\psi(t) = \exp\left\{-c \left[1 - e^{-\frac{t^2}{2}\sigma^2}\right]\right\}.$$

Ступінь «важкості хвостів» узагальненого закону Пуассона:

$$\gamma = 1 + c^{-1}.$$

При цьому вирази для другого і четвертого моментів:

$$\mu_2 = D = c\sigma^2, \quad \mu_4 = 3c\sigma^4(c+1).$$

При надлишкових вимірах навігаційних параметрів для визначення місця судна з мінімальною коваріаційною матрицею необхідно, щоб похибки вимірювань були незалежними. Якщо ж похибки вимірювань залежні, то для стійких і безмежно-подільних розподілів, до яких належить узагальнений закон розподілу Пуассона, систему залежних випадкових величин  $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_i, \dots, \xi_n)$  можна замінити системою незалежних випадкових величин  $\eta = (\eta_1, \dots, \eta_i, \dots, \eta_n)$ , що мають таку ж спільну щільність розподілу. При цьому всі випадкові величини  $\xi_i$  повинні мати однаковий закон розподілу і системи лінійних випадкових величин  $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_i, \dots, \xi_n)$  та  $\eta = (\eta_1, \dots, \eta_i, \dots, \eta_n)$  повинні бути пов'язані лінійним ортогональним перетворенням:

$$\eta = A\xi, \text{ т. е. } \eta_j = \sum_{k=1}^n A_{jk} \xi_k \quad (j = 1, \dots, n),$$

де  $A$  – квадратна матриця з елементами  $A_{jk}$ .

Матриця других моментів  $M$  введеної випадкової величини  $\eta$ , пов'язана з матрицею  $\Lambda$  випадкової величини  $\xi$  співвідношенням:

$$M = A \Lambda A^T,$$

де  $A^T$  - транспонована матриця  $A$ . Будемо розглядати центровані випадкові величини  $\xi_i$  та  $\eta_j$  математичне сподівання яких дорівнює нулю, а їх другі моменти позначимо відповідно через  $\lambda_{ik}$  і  $\mu_{ik}$ , причому:

$$\mu_{ik} = \sum_{r,s=1}^n A_{jr} \lambda_{rs} A_{ks}. \quad (i \neq k)$$

Якщо в якості матриці перетворення  $A$  вибрати ортогональну матрицю, то її елементи можна підібрати таким чином, що матриця других моментів  $M$  буде діагональною. Це означає, що другі змішані моменти  $\mu_{ik} = 0$  при  $i \neq k$  і матриця других моментів  $M$  містить  $n$  діагональних елементів, які є дисперсіями тепер випадкових величин, які вже не корельовано. Тому кожна з випадкових величин  $\xi_i$  виражається лінійною комбінацією незалежних  $\eta_i$ :

$$\xi_j = \sum_{i=1}^n A_{ji} \eta_i.$$

Можливість зазначеної заміни цілком визначається вибором розподілу  $\xi_i$ , який в даному випадку допускає розкладання  $\xi_i$  на складові відповідно при дотриманні правила складання дисперсій, яке в даному випадку має вигляд:

$$\lambda_{jj} = \sum_{i=1}^n A_{ji}^2 \mu_{ii},$$

де  $\lambda_{jj}$  і  $\mu_{ii}$  - дисперсії відповідно випадкових величин  $\xi_i$  та  $\eta_i$ .

У випадку, коли випадкові величини  $\xi_i$  мають щільність узагальненого закону Пуассона  $f_{\Gamma}(\xi)$ , то за умовою вони однаково розподілені, тобто істотний параметр  $c$  повинен бути незмінним, а різноманітність дисперсій  $\lambda_{jj}$  виражається різними параметрами масштабу  $\sigma_j^2$ . Таким чином, характеристичні функції  $\psi_j^{(\xi)}(t)$  випадкових величин  $\xi_j$  мають наступний аналітичний вигляд:

$$\psi_j^{(\xi)}(t) = \exp\left\{-c\left[1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2}\sigma_j^2\right)\right]\right\}.$$

Причому  $\lambda_{jj} = c\sigma_j^2$  та  $c = \frac{\lambda_{jj}}{\sigma_j^2}$ , тобто  $c = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ji}^2 \mu_{ii}}{\sigma_j^2}$ , та для усіх  $\xi_j$  значення  $c$  являються однаковими.

Характеристичні функції для кожної з  $n$  випадкових величин  $\xi_j$  можна представити у вигляді добутку  $n$  співмножників характеристичної функції випадкових величин  $\eta_{ji}$ , тобто:

$$\psi_j^{(\xi)}(t) = \exp\left\{-c\left[1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2}\sigma_j^2\right)\right]\right\} = \exp\left\{-\sum_{i=1}^n c_{ji}\left[1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2}\sigma_j^2\right)\right]\right\}.$$

Отже:

$$\psi_{ji}^{(\eta)}(t) = \exp\left\{-\sum_{i=1}^n c_{ji}\left[1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2}\sigma_j^2\right)\right]\right\}.$$

Таким чином, випадкова похибка  $\xi_j$  розкладається на  $n$  величин  $\eta_{ji}$ , які незалежні, також мають розподіл  $f_{\Gamma}(\xi)$ , але з різними істотними параметрами  $c_{ji}\left(\sum_{i=1}^n c_{ji} = c\right)$  та однаковими масштабними параметрами  $\sigma_j^2$ , причому  $c_{ji} = \frac{A_{ji}^2 \mu_{ii}}{\sigma_j^2}$ , а  $A_{ji}$  - елемент ортогональної матриці перетворення  $A$ .

Таким чином, може бути використаний для опису як незалежних, так і залежних похибок навігаційних вимірювань узагальнений закон Пуассона з щільністю  $f_{\Gamma}(\xi)$ , яка породжується розподілом Гауса, тому з його допомогою можлива формалізація стохастичної складової показника ефективності системи прийняття рішень та двовимірної щільності розподілу векторіальної траєкторної похибки.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [2,3,6,7, 9,11,12,14].

У **п'ятому розділі** розглянуті аналіз та розробка мір подальшого підвищення ефективності управління рухом судна, чому присвячена третя складова задача дисертаційного дослідження.

Перш за все розглянуті питання оцінки ефективності обсервованих координат судна, розрахованих методом найменших квадратів при наявності

надлишкових ліній положення, похибки яких розподілені за узагальненим законом Пуассона. Отримано аналітичний вираз ефективності для розглянутого випадку:

$$e = \frac{1}{c c^{\frac{5}{2}} \frac{\exp(-c)}{\sqrt{2\pi}} \mathfrak{Z}(c)} = \frac{\sqrt{2\pi} \exp(c)}{c^{\frac{7}{2}} \mathfrak{Z}(c)},$$

$$\text{де } \mathfrak{Z}(c) = \int_{R^1} x^2 \frac{\left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right) \right\}^2}{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right)} dx.$$

Для значень істотного параметра  $c$  від 3 до 20 були розраховані значення ефективності  $e$ , а результати розрахунку представлені в табл. 1.

Таблиця 1.

Залежність ефективності  $e$  від істотного параметра  $c$

$c$	2,3	3	5	10	15	20
$e$	1,0	0,7	0,4	0,2	0,133	0,1

З табл. 1 випливає, що з ростом істотного параметра  $c$  ефективність  $e$  зменшується.

З метою мінімізації ковариаційної матриці векторіальної похибки розглянуто розрахунок обсервованих координат методом максимальної правдоподібності в разі надлишкових ліній положення при розподілі їх похибок за узагальненим законом Пуассона.

Система рівнянь правдоподібності для розглянутого випадку приймає вигляд (1). Пропонується розв'язок отриманої нелінійної системи рівнянь методом простої ітерації, причому в якості початкового наближення приймаються  $X = X_0$  і  $Y = Y_0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{30} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{30} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{30} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{30} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i.$$



Одним з ключових елементів сучасних систем управління рухом судна є авторульовий. З появою електронних карт і супутникових навігаційних систем, актуальною стала проблема не тільки автоматичної стабілізації судна на курсі, але і управління судном по заданій траєкторії, що передбачає виконання маневрів курсом в автоматичному режимі. У зв'язку з цим, виникає потреба в розробці алгоритмів оцінки ефективності роботи та адаптації параметрів авторульового в режимі маневрування.

Класичним законом регулювання курсу судна при маневруванні є ПД - закон, налаштування коефіцієнтів якого здійснено відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема алгоритму налаштування ПД регулятора

На рис. 4 наведені графіки перекладань керма і зміни курсу контейнеровоза S-175, розраховані за моделлю NTNU і моделлю Номото з коефіцієнтами  $T_1 = 45$ ,  $T_2 = 13$ ,  $T_3 = 115.6$ ,  $K = 0.04$  для не налаштованого ( $C_p = 1$ ,  $C_d = 1$ ) та налаштованого ( $C_p = 2$ ,  $C_d = 47$ ) ПД регуляторів при повороті судна на  $90^\circ$  зі швидкістю 30 вузлів.

Як видно з графіків, незважаючи на далеко не повну відповідність лінійної моделі Номото динаміці судна при маневруванні, настройка ПД регулятора в офф-лайн режимі за запропонованим алгоритмом дозволяє отримати досить хороші результати.

Для сучасних суден різного призначення розглянуті деякі аспекти вдосконалення процесу їх управління з використанням математичних моделей їх керованого руху і реалізацією їх на сучасних обчислювальних засобах із застосуванням інформаційних технологій.

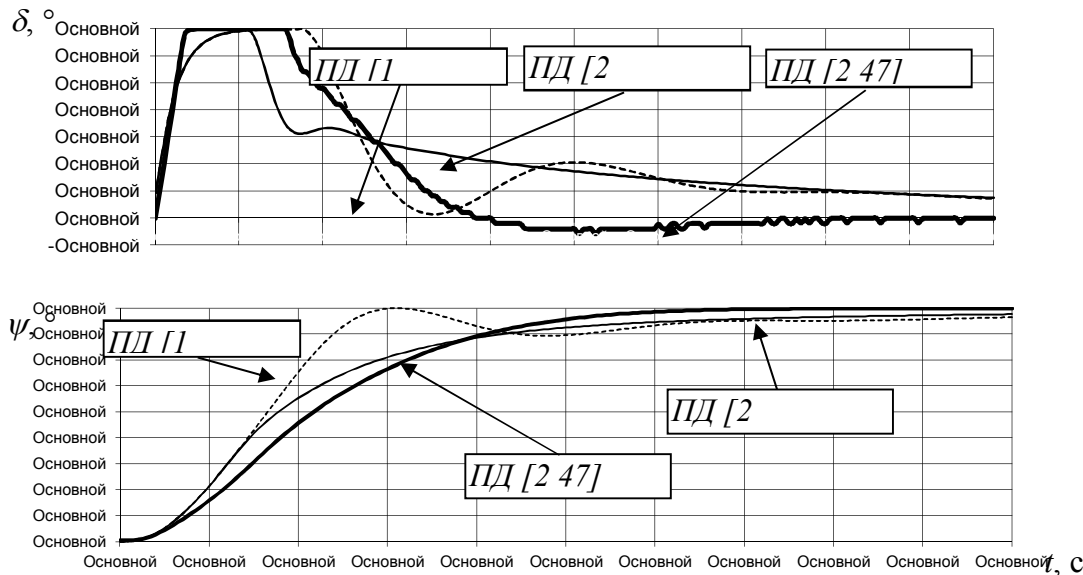


Рис. 4. Графіки перекладань стерна і зміни курсу контейнеровозу

Проведена перевірка статистичних гіпотез розподілу похибок вимірювання навігаційних параметрів, отриманих в натурних спостереженнях протягом рейсу судна. Розглянуто вісім вибірок похибок вимірювання навігаційних параметрів, причому число членів кожної вибірки перевершує 200. В результаті перевірки встановлено, що для опису похибок вибірок можуть бути використані змішані закони обох типів і узагальнений закон Пуассона. Обґрунтовано перевагу застосування узагальненого закону Пуассона.

Таким чином, в розділі розглянуті розробка заходів подальшого підвищення ефективності управління рухом судна. Матеріали розділу опубліковано у роботах [4,8,10,13,17].

## ВИСНОВКИ

Підвищення безпеки судноводіння сприяє зменшенню кількості аварійних випадків, що веде до зниження шкоди людському життю, навколишньому середовищу, майну і виробничим процесам.

В результаті вирішення головної наукової задачі отримано новий метод оцінки та підвищення ефективності управління рухом судна, який відрізняється урахуванням детермінованих та стохастичних чинників, що впливають на точність реалізації судном програмної траєкторії руху.

У дисертаційній роботі:

- розроблено метод оцінки показника ефективності системи прийняття рішень з управління рухом судна і його залежність від детермінованих та стохастичних факторів;

- запропоновано модель перетворення системи залежних похибок розподілених по узагальненому закону Пуассона у їх незалежну систему;

– отримано метод максимальної правдоподібності при розподілі похибок навігаційних вимірів по узагальненому закону Пуассона.

Практична значимість роботи визначається тим, що його результати можуть бути упроваджені на судна в процесі експлуатації, а також в судових навігаційних інформаційних системах.

Якісним показником результатів дисертаційної роботи є можливість підвищення ефективності управління рухом судна та більш точного визначення координат судна методом максимальної правдоподібності при розподілі похибок навігаційних вимірів по узагальненому закону Пуассона.

Достовірність результатів роботи підтверджуються коректною розробкою і застосуванням математичних моделей, а також експериментальними даними, які одержані в натурних спостереженнях.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях/ Астайкин Д.В., Сикирин В.Е., Ворохобин И.И., Алексейчук Б.М. – Saarbrucken, Deutschland/ Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 274 с.

2. Алексейчук Б.М. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных линиях положения, полученная имитационным моделированием / Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е., Астайкин Д.В. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 47 - 51.

3. Ворохобин И.И. Эффективность применения полиномов Эрмита для ортогонального разложения плотностей распределения навигационных погрешностей/ Ворохобин И.И., Сикирин В.Е., Фусар И.Ю.// East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1.- С. 24-30.

4. Астайкин Д.В. Анализ особенностей обобщенного пуассоновского закона и смешанных законов распределения погрешностей навигационных измерений / Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М, Сикирин В.Е. // Развитие науки в XXI веке: Материалы XXVII международной научно-практической конференции, 15 сентября 2017 - Харьков: научно-информационный центр «Знание», 2017. – С. 19 - 24.

5. Сикирин В.Е. Формализация системы принятия решений по управлению движением судна/Сикирин В.Е.// Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 - С. 203-209.

6. Алексейчук Б.М. Сравнительная характеристика смешанных законов распределения погрешностей навигационных измерений с обобщенным пуассоновским законом/Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е.// Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: ОНМА. – С. 3 – 8.

7. Сикирин В.Е. Описание навигационных погрешностей с помощью обобщенного распределения Пуассона./ Сикирин В.Е. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С. 152-157.

8. Алексейчук Б.М. Модели формирования законов распределения погрешностей навигационных измерений/ Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е.// Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: ОНМА. – С. 3 – 11.

9. Тришин Н. В. Интегрирование предиктивной модели движения судна в ЭКНИС / Тришин Н. В., Сикирин В. Е. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 24. – Одесса: «ИздатИнформ», 2014 - С. 164-171.

10. Сикирин В.Е. Выражение для эксцесса обобщенного пуассоновского распределения погрешностей навигационных измерений/ Сикирин В.Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 143–146.

11. Сикирин В.Е. Эффективность обсервованных координат судна при распределении погрешностей линий положения по обобщенному закону Пуассона/Сикирин В.Е.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали ІХ Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 136–139.

12. Алексейчук Б.М. Влияние длительности формирования выборки на закон распределения вероятностей погрешностей навигационных измерений/ Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е., Пасечнюк С.С. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв : МУК, 2017. – С. 23–25.

13. Сикирин В.Е. Анализ возможности использования обобщенного распределения Пуассона для описания случайных погрешностей навигационных измерений/ Сикирин В.Е. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса : ОНМА, 2015. – С. 137-139.

14. Сикирин В.Е. Стратифицированное описание системы управления движением судна / Сикирин В.Е. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса : ОНМА, 2016. – С. 119–120.

15. Сикирин В.Е. Зависимость точности судовождения от закона управления движением судна по курсу/ Сикирин В.Е. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавання, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : ОНМА, 2017. – С. 137-140 .

16. Пипченко А.Д. Поиск оптимального закона в задаче автоматического регулирования курса судна/ Пипченко А.Д., Сикирин В.Е. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2011 - С. 165-174.

## АНОТАЦІЯ

**Сікірін В.Є.** "Оптимізація управління рухом судна за мінімумом траєкторної похибки" – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271-Річковий та морський транспорт). - Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, 2018.

Робота присвячена розробці показника ефективності функціонування системи прийняття рішень по управлінню рухом судна, який відображає точність утримання судна на програмній траєкторії руху з урахуванням впливу істотних стохастичних і детермінованих чинників.

Як стохастичний показник ефективності функціонування системи прийняття рішень вибрана дисперсія модуля векторіальної похибки, а його детермінована складова характеризується максимальним значенням бічного зносу судна щодо програмної траєкторії руху. Одержано аналітичні вирази максимального значення бічного зносу судна при пропорційно-диференціальному і пропорційно-інтегрально-диференціальному управлінні судном.

Досліджені властивості узагальненого закону Пуассона і одержана процедура перетворення системи залежних випадкових величин в систему незалежних тої ж розмірності за допомогою ортогональної матриці. Для узагальненого закону Пуассона за допомогою характеристичних функцій показана можливість розкладання залежних випадкових величин в систему незалежних, і одержано вираз для двовимірної щільності розподілу, що дозволяє сформулювати процедуру розрахунку ефективних оцінок обсервованих координат.

Розглянуто питання оцінки ефективності обсервованих координат судна, розрахованих методом найменших квадратів за наявності надмірних ліній положення, похибки яких розподілені по узагальненому закону Пуассона. У разі надмірних ліній положення запропонований розрахунок обсервованих координат методом максимальної правдоподібності при розподілі їх похибок по узагальненому закону Пуассона.

Для сучасних суден різного призначення розглянуто деякі аспекти вдосконалення процесу їх управління з використанням математичних моделей їх керованого руху і реалізацією їх на сучасних обчислювальних засобах із застосуванням інформаційних технологій. Проведена перевірка статистичних гіпотез розподілу похибок вимірювання навігаційних параметрів, одержаних в натурних спостереженнях на протязі рейсу судна. В результаті перевірки встановлено, що для опису похибок вибірок можуть бути використані змішані закони обох типів і узагальнений закон Пуассона.

**Ключові слова:** безпека судноводіння, управління рухом судна, система прийняття рішень, узагальнений закон Пуассона, метод максимальної правдоподібності.

## АННОТАЦІЯ

**Сикирин В.Е.** Оптимизация управления движения судна по минимуму траекторной погрешности. – Квалификационная научная работа на правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.13 – навигация и управление движением (271 - Речной и морской транспорт). - Национальный Университет "Одесская морская академия", Одесса, 2018 г.

Работа посвящена разработке показателя эффективности функционирования системы принятия решений по управлению движением судна, который отражает точность удержания судна на программной траектории движения с учетом влияния существенных стохастических и детерминированных факторов. Произведено формальное описание системы принятия решений по управлению движением судна, как многоуровневой иерархической решающей системы.

В качестве стохастического показателя эффективности функционирования системы принятия решений выбрана дисперсия модуля векториальной погрешности. Получены аналитические выражения для дисперсий векториальных погрешностей и для стохастического показателя в целом.

Детерминированная составляющая показателя эффективности характеризуется максимальным значением бокового сноса судна относительно программной траектории движения. Показано, что боковой снос судна зависит от характеристик возмущаемого момента, а также от частоты собственных колебаний судна по углу рыскания и его коэффициента затухания. Получены аналитические выражения максимального значения бокового сноса судна при пропорционально-дифференциальном и пропорционально-интегрально-дифференциальном управлением судна.

Исследованы свойства обобщенного закона Пуассона, сформулировано условие наличия «утяжеленного хвоста». Получена процедура преобразования системы зависимых случайных величин в систему независимых той же размерности с помощью ортогональной матрицы, и предложен способ ее формирования. Для обобщенного пуассоновского распределения с помощью характеристических функций показана возможность разложения зависимых случайных величин с помощью ортогональной матрицы в систему независимых, и получено выражение для плотности распределения, позволяющего сформировать процедуру расчета эффективных оценок наблюдаемых координат.

Рассмотрены вопросы оценки эффективности обсервованных координат судна, рассчитанных методом наименьших квадратов при наличии избыточных линий положения, погрешности которых распределены по обобщенному закону Пуассона. Получены аналитические выражения эффективности для рассматриваемого случая.

С целью минимизации ковариационной матрицы векториальной погрешности рассмотрен расчет обсервованных координат методом максимального правдоподобия в случае избыточных линий положения при распределении их погрешностей по обобщенному закону Пуассона. Показано, что нелинейные уравнения правдоподобия могут быть решены численным методом простых итераций.

Для современных судов различного назначения рассмотрены некоторые аспекты совершенствования процесса их управления с использованием математических моделей их управляемого движения и реализацией их на современных вычислительных средствах с применением информационных технологий. Произведена проверка статистических гипотез распределения погрешностей измерения навигационных параметров, полученных в натурных наблюдениях в течении рейса судна. В результате проверки установлено, что для описания погрешностей выборок могут быть использованы смешанные законы обоих типов и обобщенный закон Пуассона. Обосновано преимущество применения обобщенного закона Пуассона.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, управление движением судна, система принятия решений, обобщенный закон Пуассона, метод максимального правдоподобия.

## ANNOTATION

**Sikirin V.E.** Optimization of vessel traffic control by minimizing trajectory error. It is Qualifying scientific labor on rights for a manuscript. Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences (Ph.D.) after specialty 05.22.13 - navigation and traffic control (271-river and marine transport). It is the National University "Odessa marine academy", Odessa, 2018.

The method of choice of index of efficiency of functioning of the system of acceptance of decisions on the traffic control of ship is examined in work, which reflects exactness of withholding of ship on the programmatic trajectory of motion taking into account influencing of substantial stochastic and determined factors. As the stochastic index of efficiency of functioning of the system of acceptance of decisions dispersion of the module of vector's error is chosen, and his determined constituent is characterized by the maximal value of the lateral tearing down of ship in relation to the programmatic trajectory of motion. Analytical expressions

of maximal value of the lateral tearing down of ship at proportionally-differential and proportionally-integrally-differential by the management of ship are got.

Properties of the generalized law Puasson are explored and procedure of transformation of the system of dependent casual sizes in the system of independent to that dimension by an orthogonal matrix is got. For the generalized distributing of Puasson by characteristic functions possibility of decomposition of dependent casual sizes in the system of independent is shown, and expression for the closeness of distributing allowing to form procedure of calculation of effective estimations of coordinates is got.

The questions of estimation of efficiency of coordinates of ship are considered, expected by a least-squares method at presence of surplus lines of position, the errors of which are distributed on the generalized law Puasson. In the case of surplus lines of position the calculation of coordinates is offered by a maximum likelihood method at distributing of their errors on the generalized law Puasson.

For the modern vessels of a different setting some aspects of perfection of process of their management are considered with the use of mathematical models of their guided motion and realization of them on modern computing facilities with the use of information technologies. Verification of statistical hypotheses of distributing of errors of measuring of the navigation parameters got in the model supervisions in the voyage of ship is produced. It is set as a result of verification, that for description of errors of selections the mixed laws of both types and generalized law Puasson can be used.

**Keywords:** safety of navigation, traffic of ship control, system of acceptance



Підп. до друку 26.09.2018. Формат 60x84/16. Папір офсет.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,39.  
Тираж 100 пр. Зам. № И18-09-97

Національний університет «Одеська морська академія»  
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.  
Тел./факс (0482) 34-14-12  
publish-r@onma.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 1292 від 20.03.2003