

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ И НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

(ОНМА)

**Волков Олександр Миколайович**

УДК 656.61.052.484

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ  
СУДЕН ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЕЧНИХ ОБЛАСТЕЙ**

05.22.13 – навігація та управління рухом

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській національній морській академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Цимбал Микола Миколайович**,  
Одеська національна морська академія  
декан судноводійного факультету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Блінцов Володимир Степанович**  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
проректор з наукової роботи.

кандидат технічних наук, доцент  
**Товстокорий Олег Миколайович**  
Херсонська державна морська академія  
завідувач кафедри управління судном та  
безпеки життєдіяльності на морі

Захист відбудеться 23 вересня 2015 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Одеській національній морській академії за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зал засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської національної морської академії за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 2.

Автореферат розісланий 21 серпня 2015 р.

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

Нікольський В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Плавання морських суден в обмежених умовах значною мірою ускладнене інтенсивним судноплавством і навігаційними перешкодами, що створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій. Маневрування в таких районах утруднене і зв'язане з можливими посадками на міліну, особливо за поганих погодних умов.

Безпека судноводіння є важливим фактором мореплавання, оскільки від нього залежить зменшення кількості аварійних випадків і, як наслідок, зниження шкоди людському життю, навколишньому середовищу, майну і виробничим процесам.

Стислі води є складними за своїх умов районами плавання, в яких виникає понад 80 % усіх навігаційних аварій, що свідчить не тільки про складність умов плавання, але й про недосконалість методів судноводіння в таких районах, де визначаючими являються професійні навички судноводіїв.

Чисельні підготовчі курси, тренувальні програми в області судноводіння та управління судном в складних навігаційних випадках не у повному обсязі вирішують питання багатоцільового управління судном.

Незважаючи на зростаюче технічне оснащення суден, специфіка плавання в стислих водах найбільшою мірою визначається впливом людського фактора на безпеку судноводіння.

Тому, заходи, направлені на поліпшення або вдосконалення методів судноводіння в обмежених районах, є актуальним і перспективним науковим напрямком.

**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 Одеської національної морської академії по держбюджетній темі «Совершенствование деятельности операторов в судовой эргатической системе» (№ ДР 0113U000636, 2015 р.), в якій здобувач виконав окремий розділ.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності прийняття рішень для вибору маневру розходження суден шляхом використання безпечних областей цілей.

Гіпотеза дослідження полягає в існуванні маневру безпечного розходження суден при наявності небезпечних цілей і навігаційних перешкод за умов додержання з ними мінімально безпечної відстані.

Головною задачею дослідження є розробка методу вибору безпечного маневру розходження.

Для її рішення були поставлені наступні допоміжні задачі:

- розробка способу перетворення безпечної області судна в простір істинного руху;

- дослідження властивостей віртуальних областей у просторі істинного руху;
- вибір стратегії безпечного розходження суден за допомогою віртуальних областей.

**Об'єктом дослідження** дисертації є процеси маневрування суден.

**Предметом дослідження** є маневр розходження.

**Методи дослідження:**

- дедукції - при аналізі основних підходів рішення проблеми морехідної безпеки;
- системного аналізу – при розробці технології наукового дослідження;
- дослідження операцій - для визначення теми дисертаційної роботи та її методологічного забезпечення;
- об'єктно-орієнтованого підходу - для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі і розкриття елементів системи;
- аналітичної геометрії і лінійної алгебри - для формалізації безпечної області цілі в просторі відносного руху;
- теорії управління судном - для перетворення безпечної області цілі у віртуальну область;

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в створенні нового методу вибору безпечної стратегії розходження в стислих районах, який відрізняється сумісним урахуванням небезпечних цілей і навігаційних перешкод за допомогою віртуальних областей, відображених на електронній карті.

Вперше:

- розроблено спосіб аналітичного опису безпечних областей цілі різної форми, за умови безпечного розходження, які задані в просторі відносного руху;
- створено процедуру відображення безпечної області цілі заданої форми з простору відносного руху в простір істинного руху;
- отримано метод вибору безпечної стратегії розходження за допомогою властивостей віртуальних областей, відображених на електронній карті, який комплексно враховує навколишні цілі і навігаційні перешкоди.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичне значення дисертаційної роботи полягає у тому, що її результати можуть бути використані розробниками в нових поколіннях ЕКНІС, а також дослідження можуть бути застосовані при створенні сучасних морських тренажерів. Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені у виробничу діяльність компанії V. Ships для використання при підготовці судноводіїв компанії (акт впровадження від 25.03.2015 р.), вищого навчального закладу „Институт последипломного образования” „Одесский морской тренажерный центр” для підготовки помічників капітана (акт впровадження від 27.03.2015 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в наукових дослідженнях Одеської національної морської академії (акт впровадження від 07.04.2015 р.), а також в учбовому процесі на кафедрі Судноводіння в розділах забезпечення навігаційної безпеки плавання (акт від 26.03.2015 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі етапи дисертаційної роботи виконані дисертантом самостійно без співавторів: здобувачем проведений інформаційний пошук, забезпечене методологічне обґрунтування, розроблений метод вибору безпечної стратегії розходження судна з небезпечною ціллю шляхом застосування віртуальних областей, відображених на електронній карті, виконане імітаційне моделювання, упроваджені результати роботи у виробничий процес. З наукових робіт, опублікованих в співавторстві, в дисертації використані тільки ті положення, які належать автору особисто: визначення безпечної суднової стохастичної області і її характеристик [5], аналітичний опис безпечної області судна складної форми [6], використання безпечної області судна в процесі судноводіння [7], процедура сумісного урахування небезпечної цілі і навігаційної перешкоди при розходженні за допомогою суднової безпечної області [10] і принцип використання безпечної області в стислих умовах плавання судна [11].

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

- «Суднопластво: перевезення, технічні засоби, безпека», 19-20 листопада 2013 р., ОНМА, м. Одеса;
- «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», 21-23 травня 2014 р., м. Миколаїв;
- «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014)», 27-29 травня. 2014 р., м. Херсон;
- «Морські перевезення та інформаційні технології в суднопластві», 18-19 листопада 2014 р., ОНМА, м. Одеса.

**Публікації.** За результатами проведених досліджень автором опубліковано 11 наукових робіт (з них 6 одноосібно), зокрема: у наукових профільних виданнях, що входять в перелік МОН України - 6 наукових статей [1-6]; у закордонних наукових профільних виданнях - 1 наукова стаття [11]; у збірниках матеріалів наукових конференцій - 4 доповіді [7-10].

**Структура роботи.** Дисертація складається з введення, п'яти глав, висновку, списку використаних літературних джерел (152 найменування) і двох додатків. Загальний об'єм роботи складає 243 сторінки і містить 116 малюнків, зокрема: 156 сторінок основного тексту, 16 сторінок списку використаних джерел, 71 сторінка додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** роботи проведене обґрунтування актуальності теми дисертації, визначено мету та завдання дослідження, показано наукову новизну і практичне значення роботи.

У **першому розділі** здійснено огляд основних напрямків дослідження проблеми забезпечення безпеки судноводіння і вибрано напрям дисертаційного дослідження.

Аналіз літератури по темі дисертаційної роботи показав, що основна увага була приділена проблемі забезпечення безпеки судноводіння шляхом комплексного вирішення питань попередження зіткнень суден в стислих умовах плавання, підвищення точності визначення місця судна та вдосконалення методів управління суднами.

В рішення цих проблем значний внесок зробили багато вітчизняних та іноземних вчених, таких як: Вагущенко Л.Л., Кондрашихін В.Т., Мальцев А.С., Цимбал М.М., Фрейдзон И.Р., Lisowski J., та інші, які показали, що найбільш актуальними є теоретичні та практичні дослідження з проблеми безпечного розходження суден. Аналіз підходів для рішення проблеми безпечного розходження суден показав, що успіх безпечного розходження в значній мірі залежить від урахування крім небезпечної цілі навколишніх суден та навігаційних перешкод. Питання по даній тематиці потребують подальших наукових досліджень.

Такий висновок дав можливість обґрунтувати основні напрями дисертаційного дослідження, яке присвячене проблемі попередження зіткнень суден при наявності в районі плавання декількох суден і навігаційних перешкод шляхом використання безпечних областей, відображених на електронній карті.

У **другому розділі** за допомогою результатів першого розділу обґрунтовано вибір теми дисертаційного дослідження та його методологічного забезпечення.

Методами системного підходу розроблено технологічну карту дисертаційного дослідження, в якій визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані робоча гіпотеза та головна задача дослідження.

Для вирішення головної наукової задачі були сформульовані три складові задачі.

Вирішення першої складової задачі потребує розробки процедур формалізації безпечної області судна вибраної форми в просторі відносного руху за допомогою методів аналітичної геометрії та відображення безпечної області на електронній карті в просторі істинного руху.

Для вирішення другої складової задачі необхідно провести дослідження властивостей віртуальних безпечних областей для урахування навігаційних перешкод та інших суден при виборі маневру розходження з небезпечною ціллю.

Третя складова задача – розробка способу вибору безпечної стратегії розходження за допомогою віртуальних областей, для вирішення якої слід використати методи управління судном.

Вирішення головної задачі дослідження – розробки алгоритму вибору безпечного маневру розходження за допомогою безпечних областей цілей – досягнуто шляхом синтезу рішень складових задач. На його підґрунті було сформульовано наукове положення, яке є узагальненням теоретичних результатів дослідження.

У **третьому розділі** розглянуті процедури формалізації безпечної області в просторі відносного і істинного руху, що необхідно для вирішення першої складової задачі.

При виборі маневру розходження безпечна область  $D_b$  формується відносно цілі, а судно і ціль розглядаються як крапки. При цьому траєкторія маневру розходження судна не повинна потрапляти в безпечну область цілі.

На розміри області  $D_b$  впливають габарити судна і цілі, явище присмоктування, стохастичні характеристики векторіальної похибки положення цілі відносно судна і запас на форс-мажорні обставини, що позбавляють судно можливості керування.

У даній роботі істотним чинником є форма безпечної області цілі і її параметри, як в просторі відносного руху, так і в просторі істинного руху.

Оскільки для розходження судна з ціллю використовується простір відносного руху, то початкові форми безпечних областей цілі задаються саме в просторі відносного руху, причому розглянуті найчастіше використовувані п'ять форм безпечної області цілі  $D_b$ , які позначені:  $D_b^{(Rd)}$  - форма круга з ціллю в центрі;  $D_b^{(El)}$  - форма еліпсу із зміщеною ціллю;  $D_b^{(Rt)}$  - форма прямокутника із зміщеною ціллю;  $D_b^{(Cm)}$  - складна форма;  $D_b^{(RE)}$  - форма півкола - напівеліпс.

Перша область  $D_b^{(Rd)}$  має форму круга з єдиною характеристикою – радіусом  $R_b$ . Друга область  $D_b^{(El)}$ , що має еліптичну форму, характеризується трьома параметрами: напівосями  $a$  і  $b$ , а також зсувом  $\Delta X_b$  обсервованого місця цілі відносно центру області  $D_b$ . Третя область  $D_b^{(Rt)}$  прямокутної форми визначається також трьома параметрами: довжина області від обсервованого місця цілі в носовому напрямі  $l_n$ , в кормовому напрямі -  $l_k$  і ширина області  $b$ .

Четверта область  $D_b^{(Cm)}$  складної форми має чотири параметри: носова  $L_{bn}$  і кормова  $L_{bk}$  частини довжини області, причому  $L_{bn} + L_{bk} = a$ , а також менша  $b_1$  і велика  $b_2$  ширина області (рис. 1). І, нарешті, п'ята область  $D_b^{(RE)}$ , що має форму півкола - напівеліпсу, характеризується двома параметрами: радіусом круга  $R_b$  і більшою напіввіссю еліпса  $a_b$  (рис. 2).

Безпечна область судна  $D_b^{(k)}$  задається в просторі відносного руху певною фігурою, межа якої визначена відносно цілі  $C$  рівнянням  $y = f(x)$  у системі координат  $OXY$  (рис. 3). Покажемо, як в цьому випадку описується межа області  $D_b^{(k)}$  у просторі відносного руху, коли ціль розглядається нерухомою, а судно переміщується з відносною швидкістю  $V_{ot}$ .

Положення цілі  $C$  відносно судна, що знаходиться в крапці  $O_1$ , в просторі відносного руху задається дистанцією  $D_0$  і пеленгом  $\alpha_0$ , а безпечна область  $D_b^{(k)}$  побудована відносно цілі  $C$ , що є початком координат  $OXY$ .

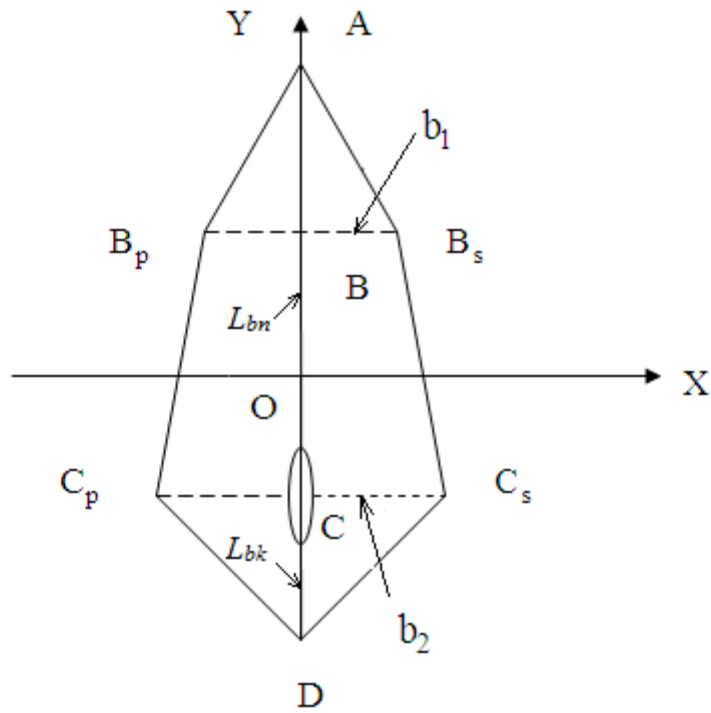


Рисунок 1 – Безпечна область  $D_b^{(Cm)}$  цілі складної форми

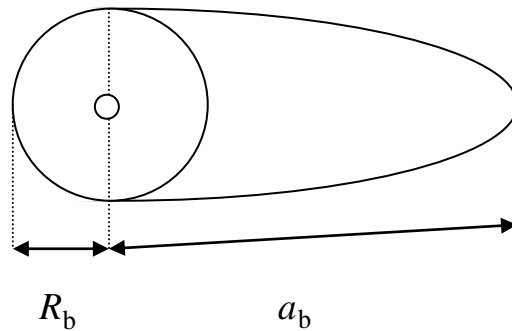


Рисунок 2 – Безпечна область  $D_b^{(RE)}$  цілі форми п'ятого типу

Точка  $M$  в системі координат  $OXY$  характеризується координатами  $x$  і  $y$ , а в системі координат  $O_1, X_1, Y_1$  - координатами  $X_{1f}$  і  $Y_{1f}$ , причому:

$$X_{1f} = X_o + x, \quad Y_{1f} = Y_o + y,$$

де  $X_o = D_o \sin \alpha_o$ ,  $Y_o = D_o \cos \alpha_o$ .

Дані рівняння в загальному вигляді виражають межі безпечної області  $D_b^{(k)}$  цілі в просторі відносного руху залежно від її рівняння щодо цілі  $C$   $y = f(x)$  у системі координат  $OXY$ . Відзначимо, що безпечна область  $D_b^{(k)}$  у просторі відносного руху в системі координат  $O_1, X_1, Y_1$  є нерухомою, як і ціль  $C$ .

Якщо безпечна область цілі має форму круга, то її межа в просторі відносного руху має наступний вигляд:



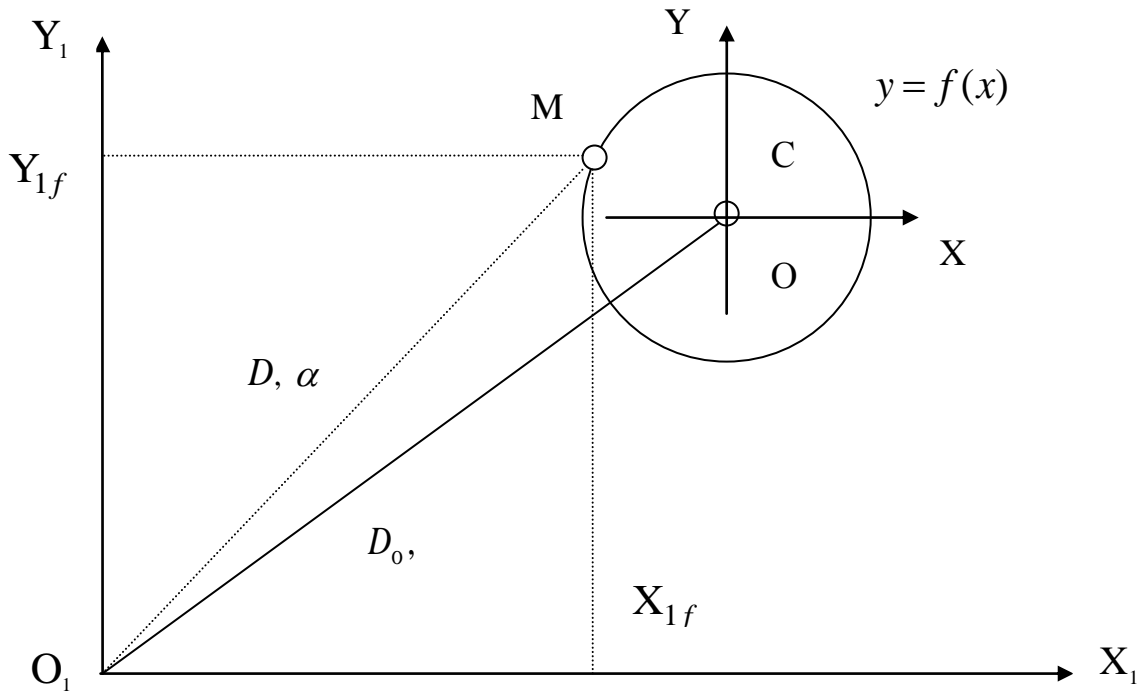


Рисунок 3 – Межі безпечної області цілі в просторі відносного руху

$$\begin{aligned} X_{1f} &= D_o \sin \alpha_o + D_d \sin \varphi, \\ Y_{1f} &= D_o \cos \alpha_o + D_d \cos \varphi, \\ \varphi &\in (0, 360). \end{aligned}$$

Для безпечної області мети  $D_b^{(El)}$ , що має форму еліпса, рівняння її межі в просторі відносного руху виражається таким чином:

$$\begin{aligned} X_{1f} &= D_o \sin \alpha_o + x, \\ Y_{1f} &= D_o \cos \alpha_o + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (x - \Delta X_b)^2}, \end{aligned}$$

$$x \in [-a + \Delta X_b, a + \Delta X_b].$$

У разі реалізації безпечної області цілі прямокутної форми  $D_b^{(Rt)}$  для розрахунку кутових точок межі області слід скористатися наступними формулами:

$$\begin{aligned} \bar{X}_A &= \bar{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K), & \bar{Y}_A &= \bar{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K), \\ \bar{X}_B &= \bar{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K), & \bar{Y}_B &= \bar{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K), \\ \bar{X}_C &= \bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K), & \bar{Y}_C &= \bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K), \\ \bar{X}_D &= \bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K), & \bar{Y}_D &= \bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K), \end{aligned}$$

де  $K$  - курс судна,  $\psi_n = \arctg \frac{b}{2l_n}$ ,  $\psi_k = \arctg \frac{b}{2l_k}$ ,  $D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}$ ,  $D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}$ .

У разі складної форми безпечної області цілі  $D_b^{(Cm)}$  (рис. 1) необхідно скористатися формулою:

$$X_{1f} = X_o + x, \quad Y_{1f} = Y_o + y,$$

у якій величини  $x$  і  $y$  визначаються виразами:

$$y = \begin{cases} -0,5a + \frac{0,25}{0,35}x, \text{ якщо } -0,5a < y < -0,25a; \quad x \in [0, 0,35a]; \\ 1,5a - 5x, \text{ якщо } -0,25a < y < 0,25a; \quad x \in [0,35a, 0,25a]; \\ 0,5a - x, \text{ якщо } 0,25a < y < 0,5a; \quad x \in [0, 0,25a]; \\ 0,5a + x, \text{ якщо } 0,25a < y < 0,5a; \quad x \in [-0,25a, 0]; \\ 1,5a + 5x, \text{ якщо } -0,25a < y < 0,25a; \quad x \in [-0,35a, -0,25a]; \\ -0,5a - \frac{0,25}{0,35}x, \text{ якщо } -0,5a < y < -0,25a; \quad x \in [0, -0,35a]. \end{cases},$$

де кожне з рівнянь відповідає прямолінійній ділянці межі, починаючи з  $DC_s$  (рис. 1).

Для п'ятого типу безпечної області  $D_b^{(RE)}$ , формою якої є півколо - напівеліпс (рис. 2) рівняння межі в просторі відносного руху має наступний вигляд:

$$X_{1f} = D_o \sin \alpha_o + x,$$

$$Y_{1f} = \begin{cases} D_o \cos \alpha_o + \frac{R_b}{a_b} \sqrt{a^2 - x^2}, \quad x \in [-R_b, 0], \\ D_o \cos \alpha_o + \sqrt{R_b^2 - x^2}, \quad x \in [0, a_b]. \end{cases}$$

Розглянемо, як здійснюється перетворення області  $D_b^{(k)}$  з простору відносного руху в простір істинного руху.

Положення цілі відносно судна в просторі відносного руху задається дистанцією  $D_o$  і пеленгом  $\alpha_o$ , а область безпеки судна  $D_b^{(k)}$  побудована відносно цілі  $C$ , що є початком системи координат  $OXY$ .

Напрями в просторі відносного руху визначаються кутами  $\alpha$ , а відстані відрізками  $D$ , причому полярні координати  $\alpha$  і  $D$  кожної точки межі безпечної області цілі в просторі відносного руху виражаються через прямокутні координати  $X_{1f}$  і  $Y_{1f}$  таким чином:

$$D = \sqrt{X_{1f}^2 + Y_{1f}^2}, \quad \alpha = \text{Arctg}\left(\frac{X_{1f}}{Y_{1f}}\right).$$

У просторі істинного руху напрям і дистанція виражаються кутом  $\beta$  і відрізком  $L$ . Наприклад, крапка  $M$ , що належить до межі зони безпеки судна, в просторі відносного руху має полярні координати  $D$  і  $\alpha$ . Ця ж крапка в просторі істинного руху має положення  $M_1$  з полярними координатами  $L$  і  $\beta$ . Центр області безпеки в просторі відносного руху співпадає, як наголошувалося, з ціллю і має координати  $D_0$  і  $\alpha_0$ , а в просторі істинного руху положення центра області характеризується координатами  $L_0$  і  $\beta_0$ .

У дисертаційній роботі одержана залежність істинного напрямку  $\beta$  як функції відносного напрямку  $\alpha$  для різних значень  $p$ , рівних відношенню швидкості судна до швидкості цілі ( $p = V_o / V_c$ ) і відносного ухилення  $\Delta$ :

$$\beta = \alpha + \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - \alpha)], \text{ при } p > 1;$$

$$\beta = 2\alpha + \pi - K_c, \text{ при } p = 1;$$

$$\beta = \alpha + \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - \alpha)], \text{ при } p < 1 \text{ і } \Delta > 0,$$

$$\beta = \alpha + \pi - \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - \alpha)], \text{ при } p < 1 \text{ і } \Delta < 0.$$

Перетворення дистанції  $D$  в просторі відносного руху в дистанцію  $L$  до межі безпечної зони в просторі істинного руху обчислюється з урахуванням інваріантності часу досягнення межі:

$$\frac{D}{V_{ot}} = \frac{L}{V_o}, \quad \text{або} \quad L = \frac{V_o}{V_{ot}} D.$$

Безпечні області цілі кругової форми, межі яких розраховані за допомогою одержаних процедур, в просторі відносного і істинного руху показані на рис. 4.

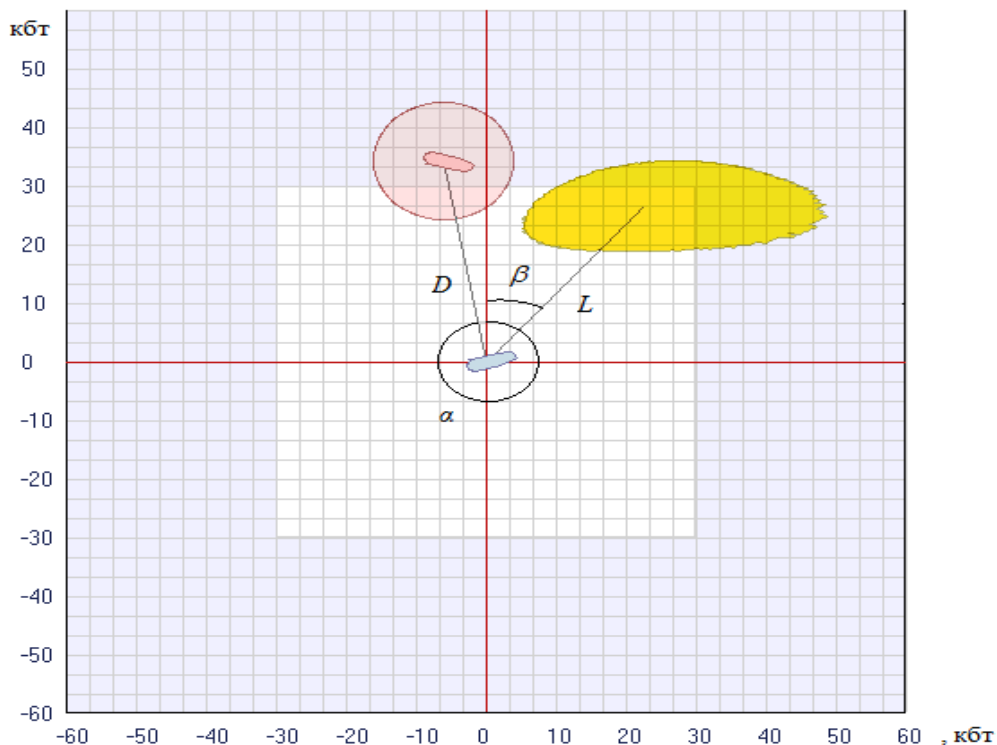


Рисунок 4 – Відображення безпечної області цілі  $D_b^{(Rd)}$  кругової форми

Таким чином, в розділі розглянуті процедури формалізації безпечної області в просторі відносного і істинного руху.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [1, 2, 3, 9].

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню властивостей віртуальних безпечних областей, причому властивості не залежать від форми області і необхідні для вибору стратегії розходження при небезпечному зближенні судна з ціллю, що є змістом другої складової задачі дослідження.

Віртуальною областю  $S_{vr}^{(F)}$  цілі відносно судна являється безпечна область судна, побудована відносно позиції цілі і відображену в просторі істинного руху.

Основна властивість віртуальної області  $S_{vr}^{(F)}$  полягає в наочному представленні небезпеки зближення судна з ціллю. Якщо програмна траєкторія руху судна перетинає область, то при незмінних параметрах руху цілі дистанція найкоротшого зближення судна з ціллю  $D_{min}$  менше гранично-допустимої дистанції  $d$ , тобто  $D_{min} < d$  (рис. 5).

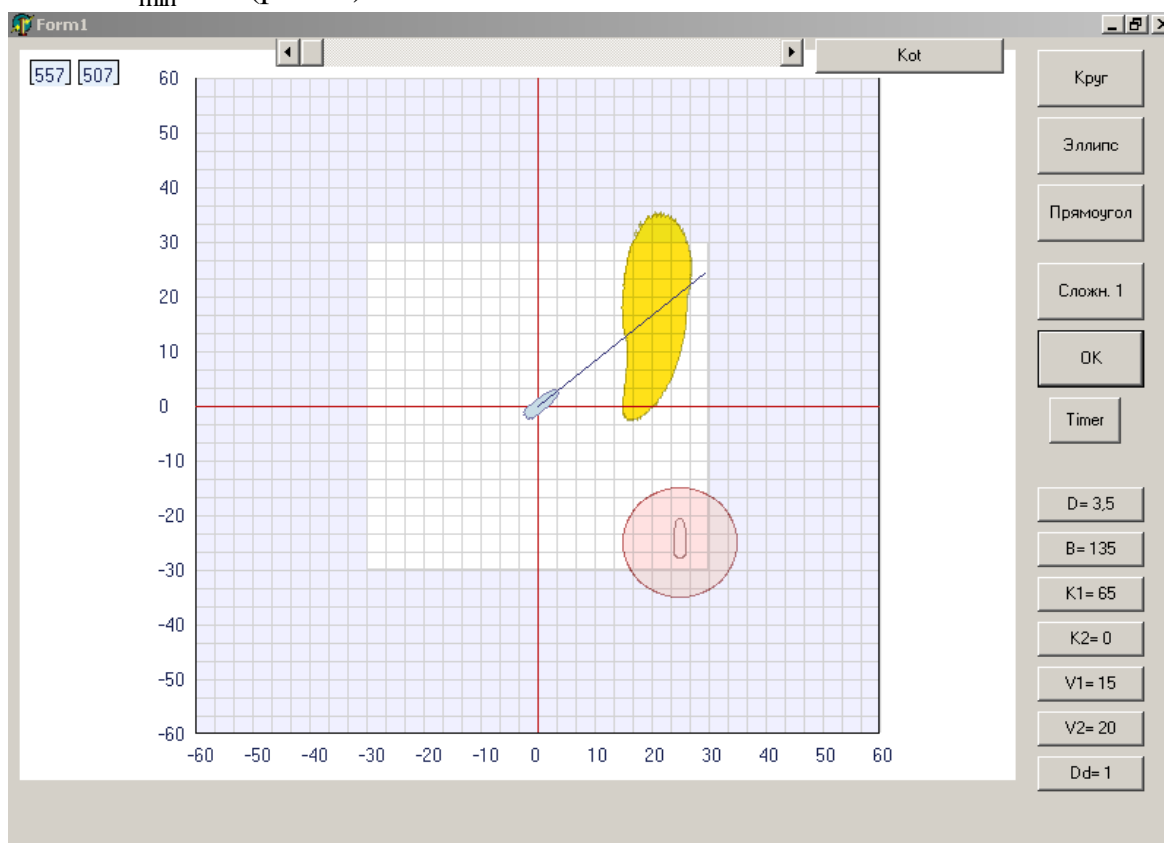


Рисунок 5 – Ситуація небезпечного зближення судна з ціллю.

Судно безпечно зближується з ціллю, якщо його програмна траєкторія руху не перетинає віртуальну область  $S_{vr}^{(F)}$ . У роботі показано, що при  $p = V_o / V_c \geq 1$  зі зменшенням значення  $p$  за інших рівних умов віртуальна область змінює свою форму і положення, при цьому зменшення  $p$  може безпечно зближення трансформувати в небезпечне. Отже, при небезпечному зближенні судна і цілі їх

безпечно розходження можливо зміною значення  $p$  так, щоб програмна траєкторія руху судна не перетинала віртуальну область  $S_{vr}^{(F)}$ .

При швидкостях судна менших швидкості цілі, тобто у випадку  $p < 1$ , безпечна область судна  $D_b^{(F)}$  може відображатися двома віртуальними областями для зустрічних  $S_{vr}^{(Rd)}$  і  $S_{vr1}^{(Rd)}$  попутних курсів (рис. 6).

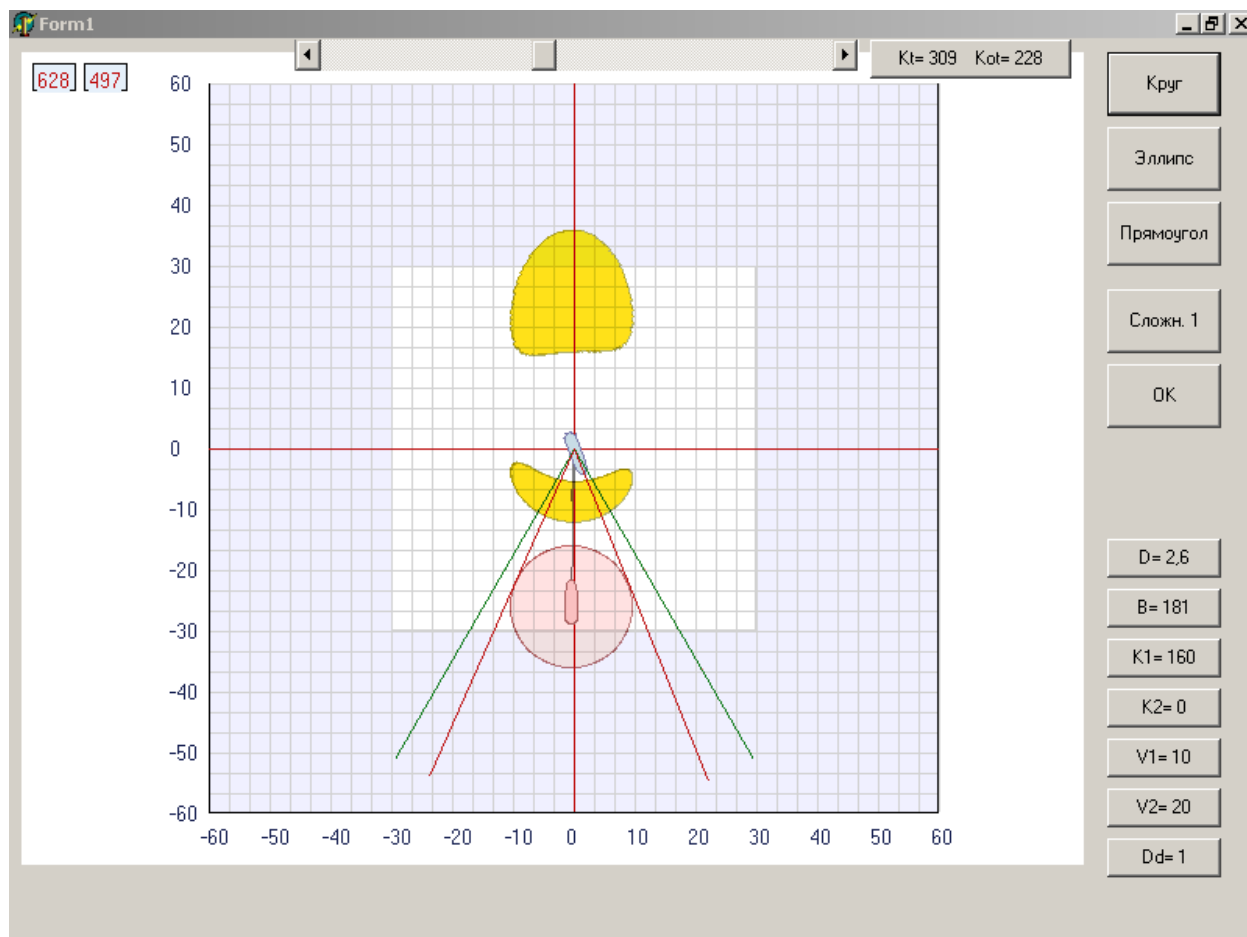


Рисунок 6 – Ситуація відображення віртуальних областей при  $p < 1$

На рис. 7 показана ситуація, коли віртуальні області  $S_{vr}^{(Rd)}$  і  $S_{vr1}^{(Rd)}$  замикаються навколо судна, причому зовнішня межа загальної області на відміну від внутрішньої межі не має розривів.

У даному випадку множина безпечних курсів судна є порожньою, тобто при будь-якому курсі судна при незмінних параметрах руху цілі дистанція найкоротшого зближення буде менше гранично-допустимої дистанції, досягаючи максимального значення при курсах судна відповідних мінімальному і максимальному відносним курсам.

Таким чином, кількість, орієнтація і форма віртуальних областей при відображенні безпечної області з простору відносного руху в простір істинного руху визначальним чином залежить від величини відношення швидкості судна до швидкості цілі. Із зростанням цього відношення збільшується множина безпеч-

них курсів судна, дозволяючи судну розійтися з ціллю на найкоротшій дистанції, яка перевищує гранично-допустиму дистанцію.

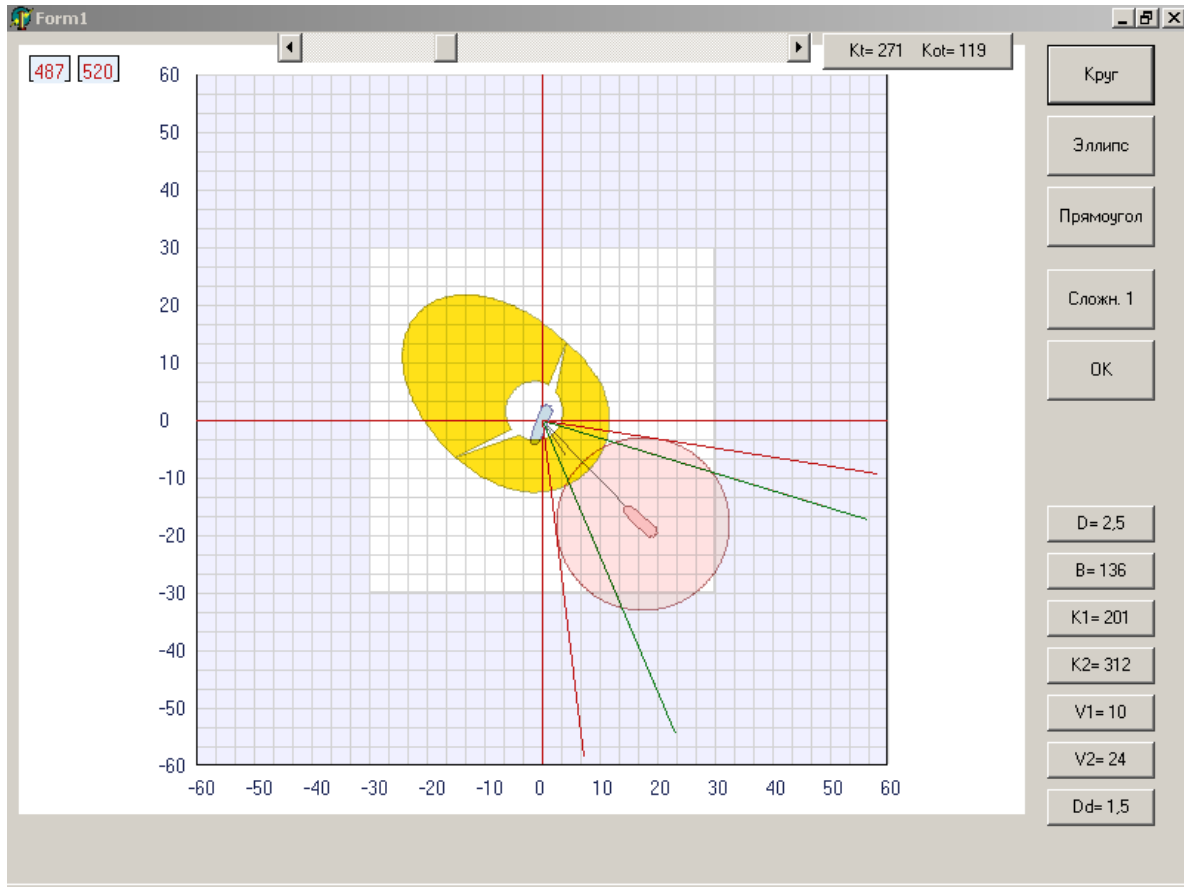


Рисунок 7 – Ситуація відображення охоплюючої віртуальної області

Важливою є наступна закономірність: розходження в заданій дистанції найкоротшого зближення можливе, коли траєкторія судна є дотичною до віртуальної області, а судно і ціль мають незмінні параметри руху. Якщо ж траєкторія руху судна має декілька ділянок і дотичною до віртуальної області є остання ділянка, то властивість розходження в заданій дистанції не матиме місце.

У разі наявності декількох цілей, з якими судно зближується, безпечна область кожної цілі відображається віртуальною областю в простір істинного руху.

Так, на рис. 8 показані три цілі, які зближуються з судном, яке має курс  $68^\circ$ , причому швидкості цілей менше швидкості судна. На рисунку показані безпечні області кожної цілі і відповідні їм віртуальні області.

З рис. 8 видно, що судно небезпечно зближується з ціллю 2, з ціллю 1 судно повинне розійтися на гранично-допустимій дистанції, а зближення з ціллю 3 є безпечним. Вказані висновки зроблені з аналізу положення програмної траєкторії судна відносно віртуальних областей цілей.

Таким чином, у розділі досліджено властивості віртуальних безпечних областей.

Матеріали розділу опубліковані у роботах [4, 5, 11].

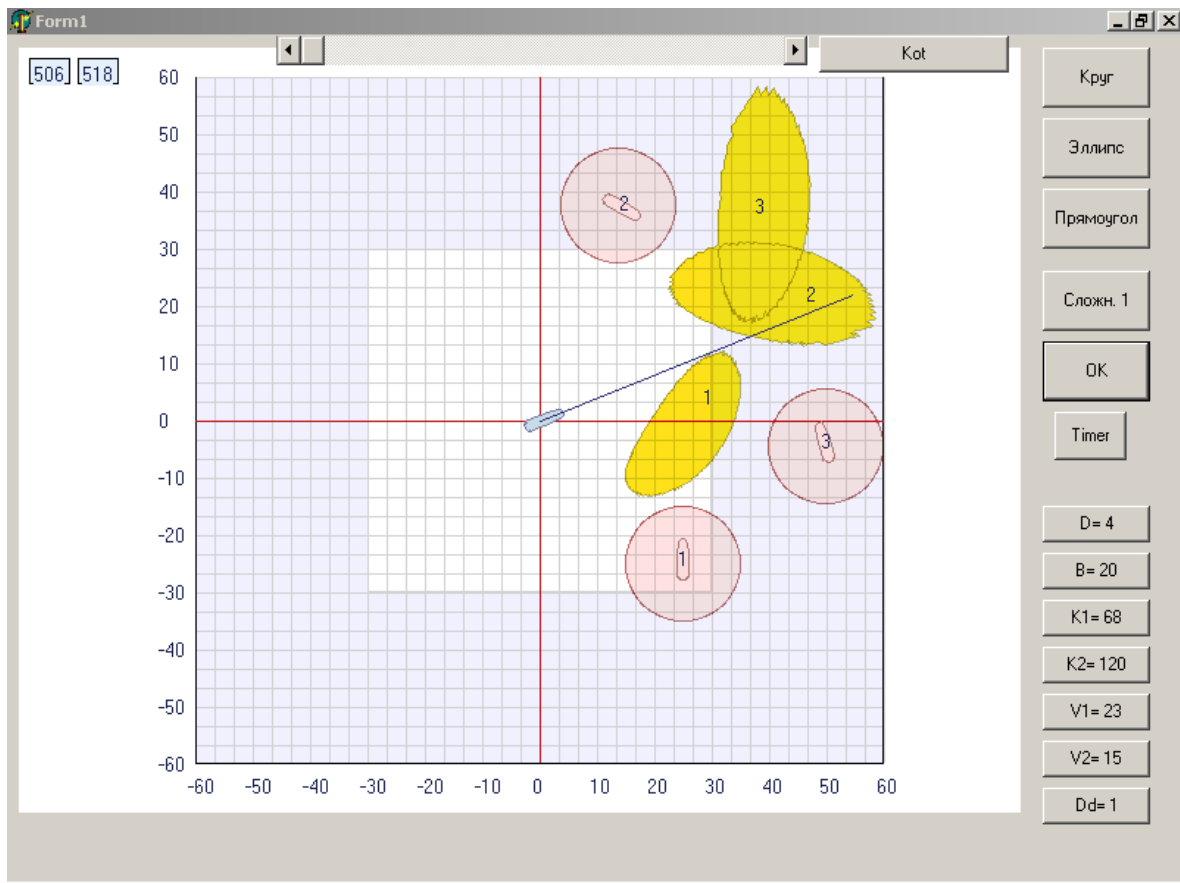


Рисунок 8 – Початкова позиція зближення судна з трьома цілями

У **п'ятому розділі** запропоновано спосіб вибору безпечної стратегії розходження за допомогою віртуальних областей, що є змістом третьої складової задачі дослідження .

Для вибору безпечної стратегії розходження судна з небезпечною ціллю слід враховувати наступні властивості віртуальних областей:

1. Ознакою небезпечного зближення судна з ціллю, коли дистанція найкоротшого зближення судна з ціллю менше заданої гранично-допустимої дистанції зближення, є попадання поточної ділянки програмної траєкторії руху судна у віртуальну область цілі.

2. Рівність дистанції найкоротшого зближення судна з ціллю і заданої гранично-допустимої дистанції зближення зберігається при проходженні судна по дотичній до межі віртуальної області до моменту найкоротшого зближення.

Тому траєкторія розходження судна з небезпечною ціллю з моменту часу його ухилення з програмної траєкторії руху і до моменту часу повернення судна на неї після розходження вибирається з урахуванням вказаних властивостей віртуальних областей.

Таким чином, реалізація способу вибору стратегії розходження передбачає можливість відображення віртуальних областей цілей на електронній карті відповідно поточним значенням параметрів руху судна і цілей. У даному розділі розглянута імітаційна комп'ютерна програма відображення віртуальних областей цілей і, у разі потреби, формування безпечної стратегії розходження судна.

Імітаційна програма містить три модулі:

1. Модуль формування початкової ситуації небезпечного зближення судна з однією або декількома цілями, який передбачає завдання програмної траєкторії судна, яка складається з двох ділянок, формування його початкової позиції і вибір його параметрів руху, а також вибір відносних позицій до п'яти цілей і їх параметрів руху. При цьому відображаються безпечні області цілей в просторі відносного руху і їх віртуальні області. У даному розділі приймаються безпечні області, що мають форму круга, хоча одержані результати справедливі для безпечних областей інших раніше розглянутих форм.

2. Модуль вибору безпечної стратегії розходження за допомогою віртуальних областей цілей, відображених на електронній карті, у разі виникнення ситуації небезпечного зближення.

3. Модуль програвання вибраного безпечного маневру, який підтверджує коректність запропонованого способу формування стратегії розходження.

Розглянемо ситуацію зближення судна з двома небезпечними цілями за відсутності навігаційних перешкод і сформулюємо особливості вибору безпечної стратегії розходження, причому переважною є безпечна стратегія розходження, при якій судно менше ухиляється від програмної стратегії руху.

Спочатку за допомогою імітаційної програми вводиться програмна траєкторія руху судна, що складається з двох ділянок. Потім вибираються позиції і параметри руху двох цілей, як показано на рис. 9.

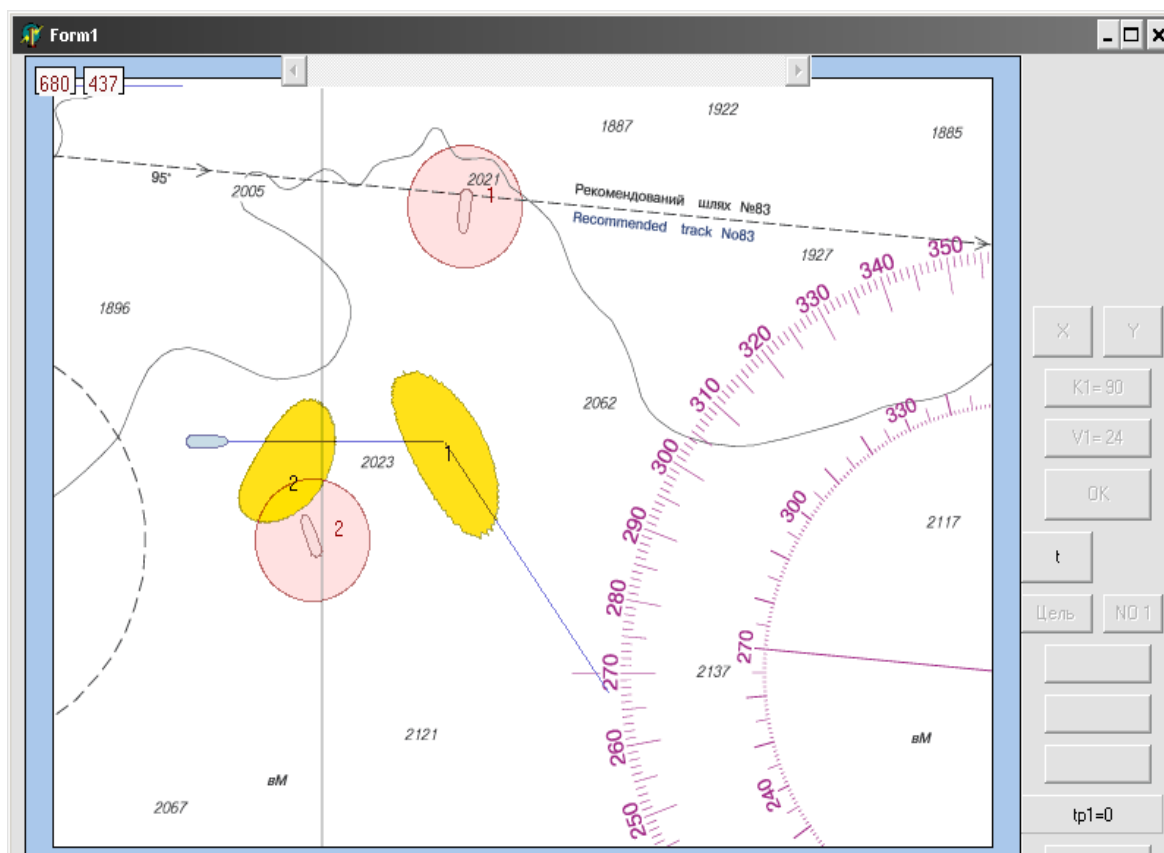


Рисунок 9 – Початок роботи модуля формування стратегії розходження



Аналіз рис. 9 показує, що судно знаходиться за ситуації, коли відбувається його зближення з двома небезпечними цілями, і необхідно ухилитися з програмної траєкторії. При ухиленні вліво існує загроза подальшого зближення з ціллю 1 після ухилення від цілі 2. Тому на 5-й секунді за допомогою лінійки прокрутки міняємо курс судна управо до значення  $151^\circ$ , коли траєкторія ухилення є дотичній до найближчої віртуальної області цілі 2 (рис. 10) і після використання клавіші «t» переміщаємо позицію судна по лінії вибраного курсу до моменту часу найкоротшого зближення з ціллю 2, як показано на рис. 11. У цей момент часу ( $t_2=204$  с) найкоротша дистанція  $D_2=1,02$  милі зрівнюється з гранично-допустимою дистанцією і вибирається другий курс ухилення, який рівний  $113^\circ$ . Судно прямує курсом другого ухилення  $113^\circ$  до моменту часу досягнення програмної траєкторії руху судна. Цей момент часу є моментом часу повороту судна на програмний курс судна.

Надалі розглядалася ситуація, коли, крім двох небезпечних цілей і цілі, що заважає, в районі небезпечного зближення, є три навігаційні перешкоди.

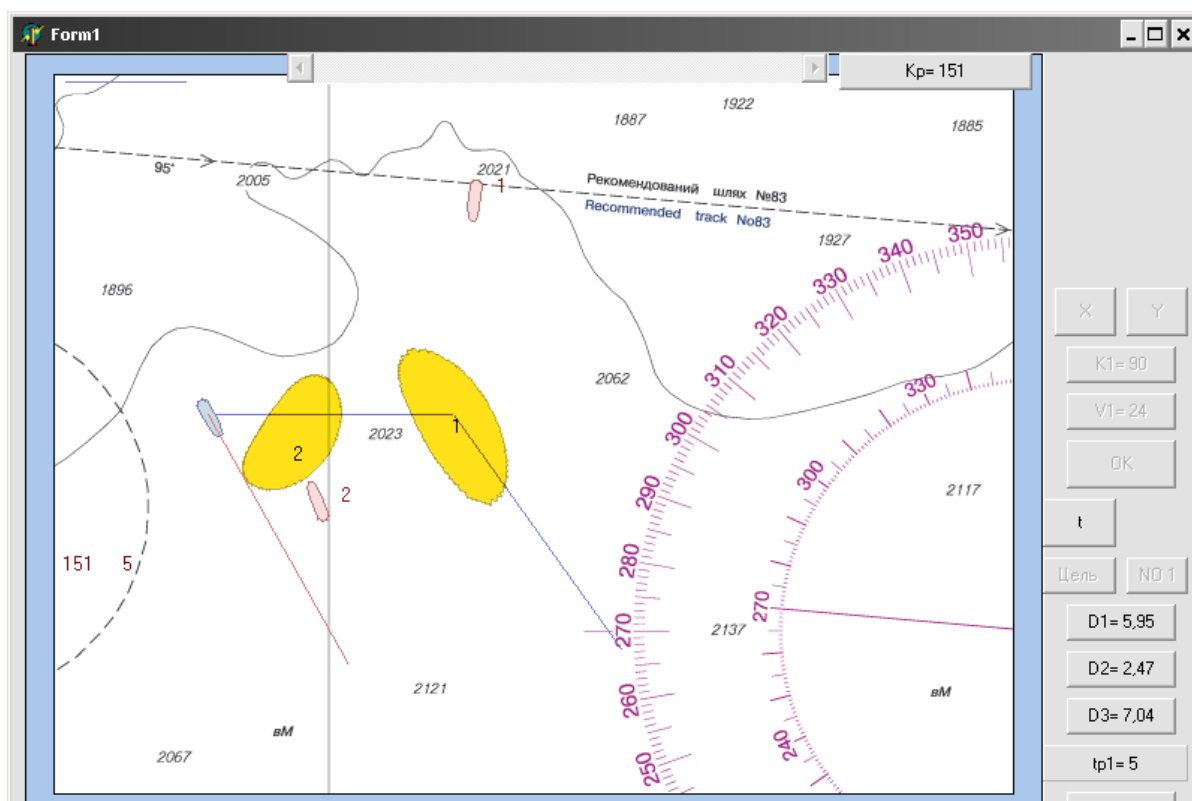


Рисунок 10 – Вибір першого курсу ухилення судна

Така ситуація показана на рис. 12, причому небезпечними є цілі 1 і 2, ціль 3 є тією, що заважає, а навігаційні перешкоди мають форму круга, еліпса і прямокутника. У даному випадку при виборі стратегії розходження необхідно уникати проходження траєкторії ухилення через навігаційні перешкоди. При аналізі початкової ситуації звертаємо увагу, що при ухиленні по дотичній до віртуальної області цілі 2 вліво виникає небезпека попадання на першу навігаційну перешкоду, а при ухиленні управо по дотичній судно чисто проходить відносно

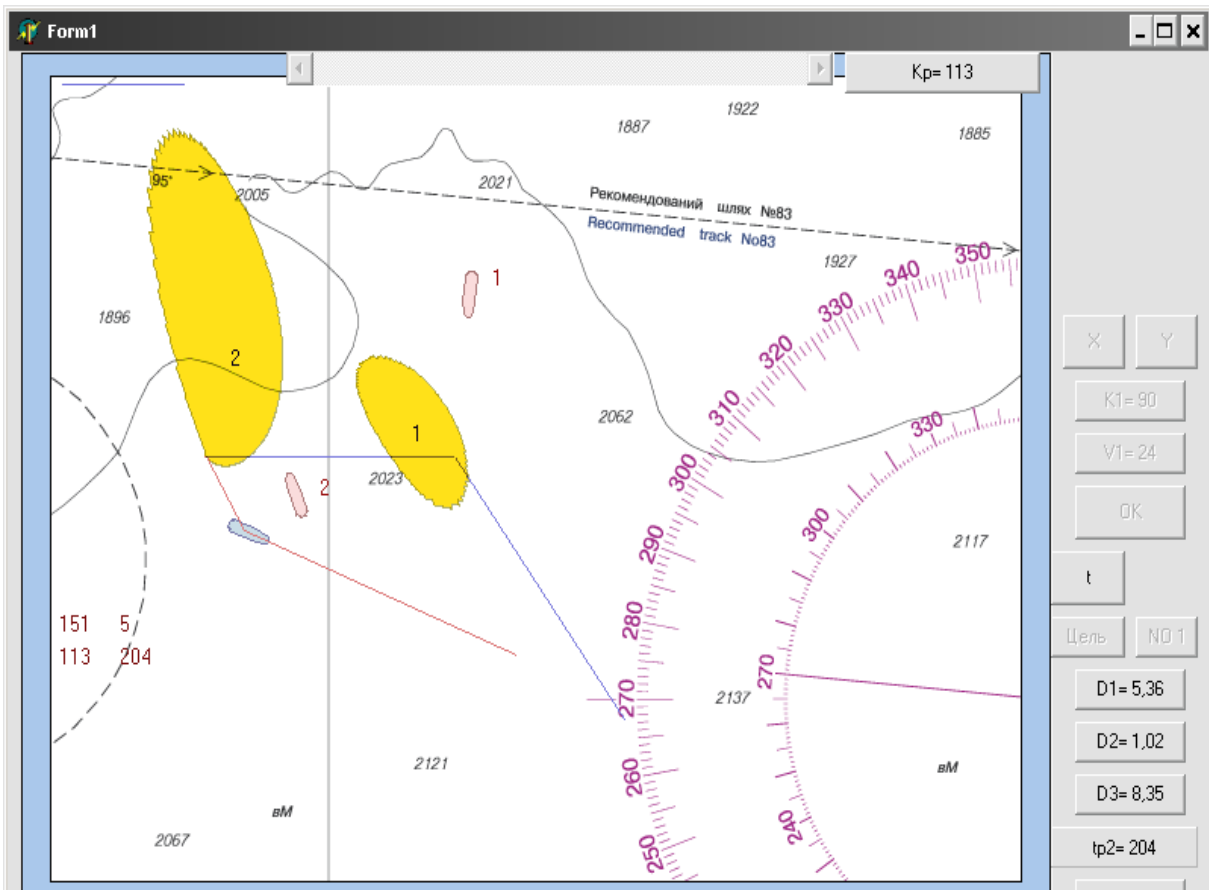


Рисунок 11 – Вибір моменту часу і курсу другого ухилення судна

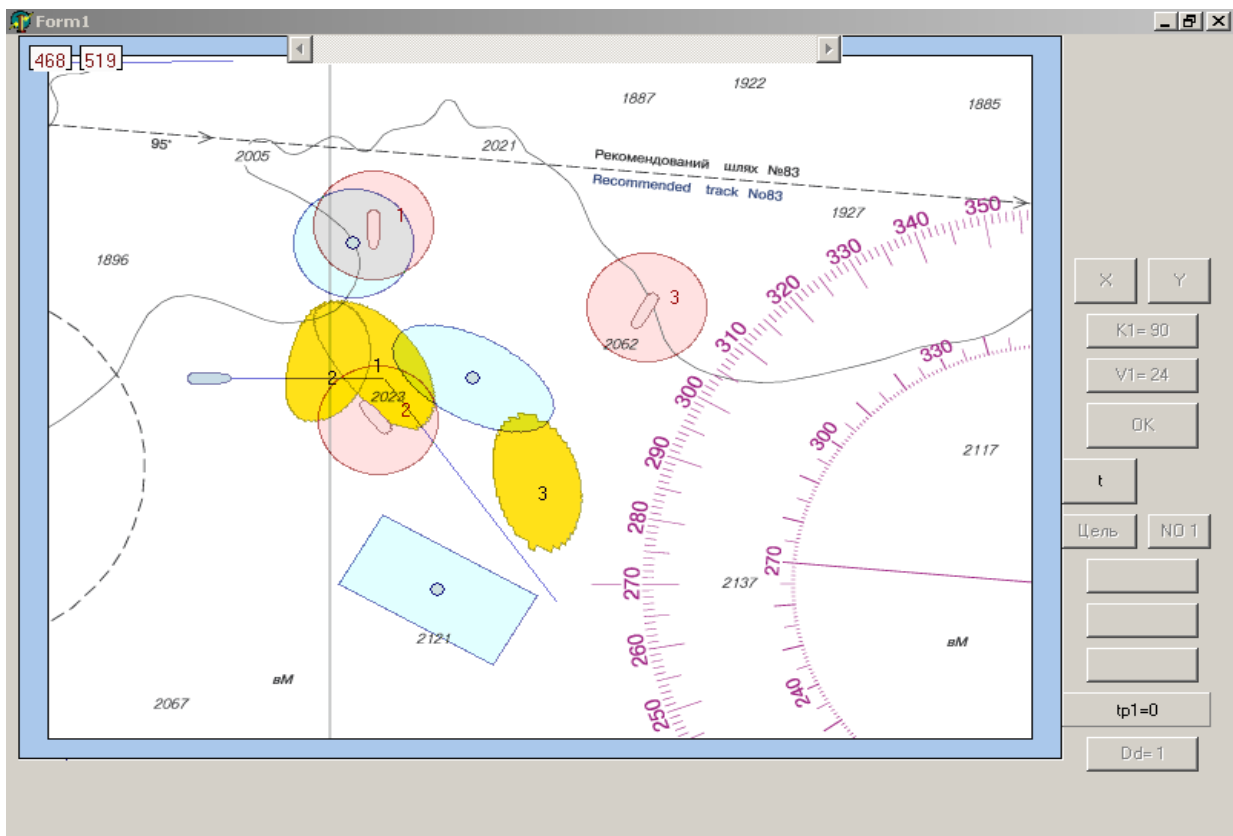


Рисунок 12 – Ситуація зближення за наявності навігаційних перешкод

навігаційних перешкод. Тому у момент часу 5 с вибирається перша ділянка ухилення судна управо на курс  $115^\circ$ , потім у момент часу 274 с судно на другій ділянці ухилення лягає на курс  $126^\circ$ , а досягши програмної траєкторії руху у момент часу 998 с судно повертає на програмний курс  $147^\circ$ , як показано на рис. 13.

У комп'ютерній імітаційній програмі є можливість програвання вибраної стратегії розходження, за допомогою якого проводиться перевірка її коректності.

Таким чином, розглянуто спосіб вибору безпечної стратегії розходження за допомогою віртуальних областей

Матеріали розділу опубліковані в роботах [6, 7, 8, 10].

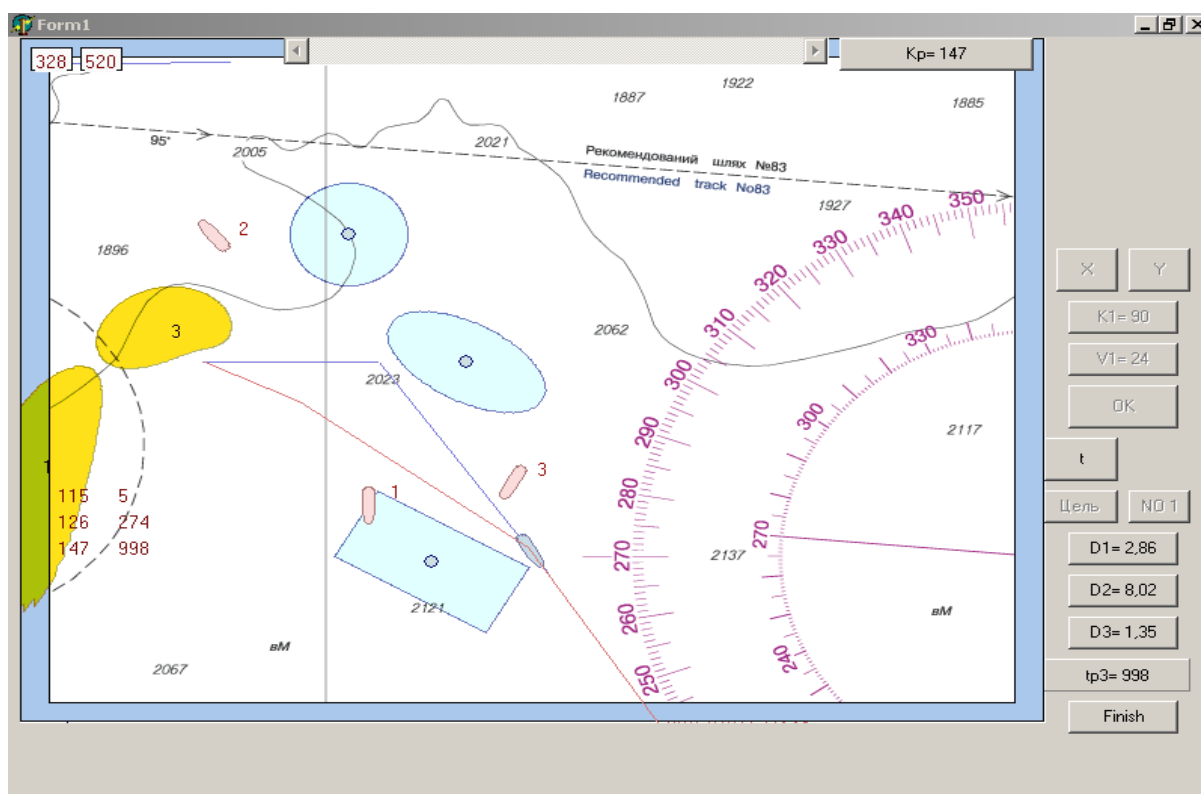


Рисунок 13 – Траєкторія розходження судна

## ВИСНОВКИ

Однією з найважливіших проблем мореплавання є забезпечення безпеки судноводіння, тому, що її успішне вирішення веде до зменшення кількості аварійних випадків і, як наслідок, зниження шкоди людському життю, навколишньому середовищу, майну і виробничим процесам.

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом розробки нового методу вибору безпечної стратегії розходження в стислих районах, який відрізняється сумісним урахуванням небезпечних цілей і навігаційних перешкод за допомогою віртуальних областей, відображених на електронній карті.

У результаті проведеного наукового дослідження:

- вперше розроблено спосіб формалізації безпечних областей цілі різної форми, що враховує умову безпечного розходження, яка задана в просторі відносного руху;
- вперше створено процедуру відображення безпечної області цілі заданої форми з простору відносного руху в простір істинного руху;
- вперше одержано метод вибору безпечної стратегії розходження за допомогою властивостей віртуальних областей, відображених на електронній карті, який комплексно враховує навколишні цілі і навігаційні перешкоди;
- результати дисертаційного дослідження впроваджено в крїїнговій компанії компанії V. Ships, в вищому навчальному закладі „Інститут последипломного образования” „Одесский морской тренажерный центр”, в науково-дослідній діяльності, а також у навчальних програмах судноводіїв з дисциплін кафедри Судноводіння ОНМА, що підтверджується відповідними актами.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Волков А.Н. Отображение зоны безопасности судна на электронной карте/ Волков А.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одеса: «ИздатИнформ», 2013. – С. 40 – 45.
2. Волков А.Н. Формирование безопасной области в судовых системах навигационной информации / Волков А.Н. // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2013, № 4. – С. 52 – 56.
3. Волков А.Н. Отображение прямоугольной безопасной области судна в пространство истинного движения в системах навигационной информации с электронными картами / Волков А.Н. // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2014, № 1 . – С. 100 – 105.
4. Волков А.Н. Применение судовой безопасной области для учета опасной цели и навигационного препятствия / Волков А.Н.// Водный транспорт. – 2014, № 2 (20).– С. 29 – 35.
5. Волков А.Н. Определение размеров безопасной судовой стохастической области / Волков А.Н., Якушев А.О. // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – 2014, № 4 . – С. 86 – 95. *(здобувачу належить аналітичний опис безпечної стохастичної області судна)*.
6. Волков А.Н. Использование безопасной области судна сложной формы для обеспечения безаварийного плавания/ Волков А.Н., Якушев А.О. // Автоматизация судовых технических средств. – 2015, № 20. – С. 30 – 35. *(здобувачу належить методика формалізації межі області складної форми)*.
7. Волков А.Н. Определение размеров безопасной области судна заданной формы и использование ее в процессе судовождения / Волков А.Н., Якушев А.О. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21 – 23 травня 2014 р. – Миколаїв: МУК, 2014. – С. 42 – 47. *(здобувачу належить принцип використання довільної безпечної області )*.
8. Волков А.Н. Использование зоны безопасности судна для совместного учета навигационных опасностей и опасных целей / Волков А.Н. // Судноплавание: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 19 –20 листопада 2013 р. – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 85 – 86.

9. Волков А.Н. Уравнение границ безопасной области цели в исходной системе судовых координат / Волков А.Н. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18 – 19 листопада 2014 р. – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 22 – 24.

10. Волков А.Н. Совместный учет при расхождении опасной цели и навигационного препятствия с помощью судовой безопасной области/ Волков А.Н., Цымбал Н.Н. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27–29 травня 2014 р. – Херсон: ХДМА, 2014. – С. 111 – 114. (*здобувачу належить процедура урахування навігаційних перешкод при розходженні суден*).

11. Волков А.Н. Использование безопасной области судна в процессе судовождения / Волков А.Н., Якушев А.О. // Вестник КамчатГТУ. – 2015, № 31. – С. 7 – 11. (*здобувачу належить принцип використання безпечної області в стислих умовах плавання судна*).

## АНОТАЦІЯ

**Волков О.М.** Вдосконалення методів попередження зіткнення суден шляхом застосування безпечних областей. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом. Одеська національна морська академія, Одеса, 2015 р.

У роботі розроблено спосіб попередження зіткнення суден за допомогою безпечних областей, відображених на електронній карті, який дозволяє сумісне урахування небезпечних суден і навігаційних перешкод при виборі маневру розходження.

Для реалізації розробленого способу передбачено вибір безпечної області судна заданої форми, яка аналітично описана в просторі відносного руху. За допомогою одержаного в роботі алгоритму безпечна область перетворюється у віртуальну область в простір істинного руху і відображається на електронній карті.

Проведено дослідження віртуальних областей залежно від істотних чинників і виявлені властивості віртуальних областей, що дозволяють їх ефективно використовувати на електронній карті для вибору стратегії розходження при зближенні судна з декількома небезпечними цілями, враховуючи навігаційні перешкоди. Здійснено імітаційне моделювання запропонованого способу, яке підтвердило його коректність.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнення суден, безпечні і віртуальні області судна, стратегія розходження, імітаційне моделювання.

## АННОТАЦИЯ

**Волков А.Н.** Совершенствование методов предупреждения столкновения судов путем применения безопасных областей. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.22.13 – навігація и управление движением. Одесская национальная морская академия, Одесса, 2015 г.

В работе разработан способ предупреждения столкновения судов с помощью безопасных областей, отображенных на электронной карте и позволяющих совместный учет опасных судов и навигационных опасностей при выборе маневра расхождения.

Способ обладает наглядностью и простотой построения безопасной стратегии расхождения. Для его реализации предусмотрен выбор безопасной области судна заданной формы, которая аналитически описана в пространстве относительного движения. С помощью полученного в работе алгоритма безопасная область преобразуется в виртуальную область в пространство истинного движения и отображается на электронной карте.

Произведено исследование виртуальных областей в зависимости от существенных параметров и выявлены свойства виртуальных областей, позволяющих их эффективно использовать на электронной карте для выбора стратегии расхождения при сближении судна с несколькими опасными целями, учитывая имеющиеся в районе маневрирования навигационные опасности и мешающие суда.

Разработан способ выбора безопасной стратегии расхождения, который реализован с помощью компьютерной программы, использующей электронную карту. Произведено имитационное моделирование предлагаемого способа, которое подтвердило его корректность.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, предупреждение столкновения судов, безопасные и виртуальные области судна, стратегия расхождения, имитационное моделирование.

## ANNOTATION

Volkov A.N. Perfection of methods of warning of collision of vessels by application of safe regions. - The dissertation is the manuscript. The dissertation is on competition of scientific degree of candidate of engineering sciences. Speciality 05.22.13 – navigation and traffic control. Odessa national maritime academy, Odessa, 2015.

The method of warning of collision of vessels by the safe regions represented on an electronic chart and dangerous vessels and navigation dangers allowing a joint account at the choice of maneuver of divergence is developed in work. For his realization the choice of safe region of ship of the set form which is analytically described in space of relative motion is foreseen. By the algorithm got in work a safe region will be transformed in a virtual region in space of veritable motion and is represented on an electronic chart.

Properties of virtual regions allowing them effectively to use on an electronic chart for the choice of strategy of divergence at rapprochement of ship with a few dangerous aims are exposed, taking into account maneuvering present in a district navigation dangers.

The imitation design of the offered method, which confirmed his correctness, is produced.

**Keywords:** safety of navigator, warning of collision of vessels, safe and virtual regions of ship, strategy of divergence, imitation design.