

УДК 65.011.56

ТЕРЕНТЬЄВ В. А.

Херсонська державна морська академія, Україна

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ЗАГАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИБОРУ КУРСУ УХИЛЕННЯ СУДНА

Анотація. При маневруванні суден, основною причиною аварійності є те, що судноводії не завжди об'єктивно оцінюють ситуацію, що склалася і неправильно приймають рішення по розходженню при ситуації небезпечного зближення і виникнення небезпеки зіткнення. Розглядається автоматизація вибору курсу ухилення, як автоматизації процесу розходження.

Мета. В статті висвітлюються завдання формалізації курсу ухилення, як величини автоматичного керування, та пропонується розробка алгоритму стратегії зміни курсу.

Методика. Провели обробку практичних даних власного судна. Проаналізували існуючі моделі руху судна, а також системи автоматичної стабілізації судна. Для побудови алгоритму провели декомпозицію МПЗЗС–72 відносно приналежності початкової ситуації суден до однієї з областей взаємних обов'язків.

Результат. За результатами дослідження даної теми був розроблений алгоритм загальної стратегії вибору курсу ухилення судна, з урахуванням вимог правил МПЗЗС–72. Розглянуто типи управління автоматичними регуляторами та їх обмеження в початковий та кінцевий моменти повороту судна. Було виявлено, що для побудови моделі інтегрованої системи керування необхідно скласти багаторівневий математичний опис, що включатиме підсистеми різних рівнів.

Наукова новизна. Визначено ефективність використання принципу виконання поворотів методом спостереження за заданим впливом проаналізувавши існуючі моделі руху судна. Запропоновано використання областей допустимих значень курсів під час розробки моделі процесу автоматизації розходження суден.

Практична значимість. Розроблено алгоритм загальної стратегії автоматизації вибору курсу ухилення.

Ключові слова: управління курсом судна; курс ухилення судна; область значень; область взаємних обов'язків.

Вступ. Висока щільність трафіку суден, що працюють в морі, а також у вузкостях і портових водах, високі швидкості, що розвиваються сучасними судами, зробило негативний вплив на безпеку судноплавства. Оскільки скоротився час, наявний у судноводія, на оцінку ситуації зближення суден, вироблення правильного маневру розходження і прийнятті рішення про початок виконання маневру і, як наслідок, неправильний вибір маневру розходження, що вимагає додаткової зміни курсу або зміни швидкості.

При маневруванні суден в групі, основною причиною аварійності є те, що судноводії різних суден, які є учасниками одного і того ж маневру, не завжди об'єктивно оцінюють ситуацію, що склалася і неправильно приймають рішення по розходженню при ситуації небезпечного зближення і виникнення небезпеки зіткнення.

Автоматизація процесу вибору маневру розходження суден, і як частина цього процесу, автоматизація вибору курсу ухилення є актуальною темою дослідження.

Так проведене дослідження маневрування власного судна для запобігання зіткнення зведено в табл. 1. Як видно з табл. 1, у випадках 1, 3, 6, 7, 9 знадобилася велика зміна первісного курсу судна, а повернення на програмну траєкторію зайняло від 40 до 60 хвилин, що в свою чергу впливає на загальну кількість часу, витраченого на виконання маневрів протягом морського переходу та складе час затримки судна в рейсі. Також це вказує на те, що була велика зміна курсу власного судна, що є ознакою несвоєчасності початку маневру або невірної вибору курсу ухилення і як наслідок додаткова зміна курсу у бік збільшення дистанції найкоротшого зближення. Все зазначене вище вказує на невірну оцінку ситуації

зближення суден. У випадках 4, 8, 10 час повернення на програмну траєкторію руху складає від 20 до 40 хвилин, що вказує на несвоєчасність початку маневру, або помилкову оцінку ситуації зближення. У випадках 2 та 5 час повернення на програмну траєкторію складає від 10 до 20 хвилин, що вказує на своєчасність прийняття рішення та початку виконання маневру розходження.

Таблиця 1

Практичні дані маневрів розходження

Block A												Block B				
№	Own Course, °	Own SOG, kn	IMO number / MMSI	Vessel's Name	Ship's Course, °	Ship's SOG, kn	CPA, miles	TCPA, min	BCR, miles	BCT, min	DISTANCE, miles	Decision Action Taken Time, min	Maneuvering Time, min	Avoidance Course, °	Avoidance Speed, kn	Initial Course/Speed Time, min
1	192	18,6	9684213	HOPA	13	13,9	0,027	21:11	-0,45	21:38	24,9	10	6	188	18,6	49
2	227	18,9	311478000	NAVIGATOR OF THE SEA	77	5,5	0,45	13:08	---	---	1,65	12	4	229	18,9	19
3	196	19,4	9521851	SAN	228	3,3	0,008	47:55	0,375	22:35	14,97	18	4	192	19,4	60
4	192	18,3	248895000	ALYARMOUK	352	12	1,03	10:30	0,8	08:54	1,82	3	5,5	188	18,3	21
5	194	18,3	9442641	FLC LONGIVITY	12	12,9	0,669	07:31	-11,6	05:04	3,93	10	4	197	18,3	12
6	180	17,9	---	Ecuadorian coastal fishing boats	---	0,1	0,02	11:58	0,01	10:00	2,2	2	10	190	17,9	45
7	118	12,2	---	Guayaquil coastal fishing boats	195	6,5	0,11	15:02	0,08	15:00	1,6	5	12	135	12,2	45
8	35	19,2	9275024	HSL SHEFFIELD	235	15,6	0,51	26:13	---	---	8,1	5	5	40	19,2	34
9	293	18,9	9395551	SEABOARD PATRIOT	202	17,3	0,7	30:05	0,4	04:48	12,8	10	4	296	18,9	41
10	334	15,5	9759185	DORAJI GAS	5	17,3	0,8	11:28	0,75	10:43	4,3	10	8	334	14,3	25

Автоматизація процесу вибору курсу ухилення не так широко висвітлена в сучасних наукових дослідженнях по судноводінню, хоча пошук шляхів підвищення ефективності маневрування і безпеки судноплавства досліджуються багатьма вченими.

У [1] розглянуто питання синтезу і розрахунку алгоритмів розходження з маневруючими цілями в бортовому контролері. Розроблена математична складова алгоритмів розходження, побудовані області допустимих управлінь при розходженні, синтезовані алгоритми автоматичного розходження.

У статті [2] розглядаються проблемні питання негативного прояву людського чинника на морському транспорті. Наукової гіпотезою в статті виступає зв'язок підвищеної суб'єктивної ентропії особи що приймає рішення і неадекватних рішень, що тягнуть катастрофічні наслідки при управлінні судном. У статті пропонується ряд формальних залежностей заснованих на ентропійному підході, а також математична модель проявів суб'єктивної ентропії.

У наступній статті [3] розглянуто задачу приймального контролю системи автоматичного водіння автомобіля п'ятого рівня при використанні неоднорідних вибірок і при допуску однієї відмови в сумарній вибірці. Показано, що при використанні різних умов експлуатації та випробувань, що поділяються на нормальні і складні умови, необхідний обсяг випробувань при допуску однієї відмови в сумарній неоднорідній вибірці можна визначити, виходячи з біноміальної схеми випробувань Бернуллі (яка була введена для випробувань в однорідних умовах, при використанні однорідної вибірки). При цьому немає необхідності визначати ймовірність зустрічальності умов, значення парціальних ймовірностей успіху, не перевіряються їх роздільні гіпотези. В роботі показано, що використання біноміальної схеми випробувань Бернуллі дозволяє мінімізувати необхідний сумарний обсяг випробувань і при неоднорідних умовах експлуатації, забезпечуючи необхідний рівень надійності прийнятих рішень.

Ситуація небезпечного зближення судна з двома цілями, коли розбіжність з ними загальним маневром неможливо розглянута в [4]. У статті пропонується безпечна розбіжність двома послідовними маневрами: зміною курсу з першої найближчої метою і зміною швидкості з другої. Запропоновано аналітичні вирази та алгоритм розрахунку курсу ухилення,

моменту часу початку зниження швидкості активним гальмуванням і швидкість розходження з другої ціллю.

В роботі [5] досліджуються особливості виникнення інформаційного дисбалансу між членами вахтової служби під час переходу судна та у аварійних ситуаціях, що дозволить наблизитися до вирішення проблеми попередження негативного впливу людського фактору на морському транспорті та поліпшити функціональність Систем Підтримки Прийняття Рішень (далі – СППР) судноводіння, що розробляється.

В роботі [6] запропонована інформаційна технологія оцінки вірогідності прийняття релевантних рішень Особою, що приймає рішення (далі ОПР) – судноводієм, при керуванні судном у реальному часі, що дозволить в складі СППР інтерфейсу користувача, пропонувати найбільш релевантні альтернативи прийняття рішення, у зручному для нього форматі у відповідності до психологічних та ергометричних нормативам роботи в людино-машинних системах.

В роботі [7] розглядається простіша система попередження зіткнення суден, для якої були розроблені алгоритми взаємодії суден, в процесі розходження, у відповідності з вимогами Міжнародних Правил Запобігання Зіткненню Суден у морі (далі – МПЗЗС-72), формалізація якого наведена у [12].

В роботі [8] розглядаються етапи ухвалення рішення по вибору стратегії розходження, що характеризуються загальною вірогідністю відсутності небезпеки зіткнення за умови, що дистанція найкоротшого зближення рівна заданій гранично - допустимій дистанції зближення. Для визначення згаданої вірогідності розглянута похибка дистанції найкоротшого зближення і одержано вираз для щільності її розподілу. З цією метою одержана залежність похибки дистанції найкоротшого зближення від похибок вимірювання дистанції і пеленга.

За допомогою одержаного виразу для щільності розподілу похибки дистанції найкоротшого зближення визначена вірогідність того, що при рівності дистанції найкоротшого зближення з гранично-допустимою дистанцією зближення не виникне зіткнення.

В роботі [9] розглядається процедура оцінки небезпеки зближення судна с ціллю і, у випадку необхідності, вибір судном маневру розходження зміною курсу за допомогою області недопустимих параметрів руху судна. Для ситуації, коли швидкість судна менша за швидкість цілі, то запропонована процедура вибору курсу ухилення судна для попередження зіткнення з ціллю, використовуючи підмножини небезпечних відносних курсів з урахуванням відношення швидкостей судна та ціллю. Запропонований комп'ютерний варіант реалізації розглянутої процедури доцільно використовувати в перспективних навігаційних інформаційних системах.

В роботі [10] розглядається встановлена наявність розподілу суден, які являються суднами-цілями, відносно базового судна, ці судна-цілі можуть бути небезпечні, безпечні, безпечні, які можуть бути небезпечними за певних умов. В свою чергу, небезпечні для розходження, з якими слід виконати маневр стандартного розходження, а також цілі для розходження, з якими потребується маневр екстреного розходження. Доведено, що зазначений розподіл суден можливо провести використовуючи відносність суден-цілей до різних підмножин які залежать від їх відносних параметрів руху до базового судна. Завдяки цьому стало можливим розглядати групу із кількох суден як множину цілей.

В роботі [11] досліджується рішення задачі моделювання та розробки методу оптимального управління вантажними операціями з важкими великогабаритними вантажами на морських судах з урахуванням впливу маси вантажу.

В роботі [12] досліджується маневрування базового (оперуючого) судна у групі суден, при одночасному небезпечному зближенні з декількома суднами, для підвищення безпеки судноводіння. Проведено аналіз зближення суден, при маневруванні у групі, розглянута

взаємодія виникаюча між двома суднами, та роль МПЗС–72, як зовнішнього координатора, при послідовному розходженні базового судна з судном ціллю. Розглянуто одночасне зближення трьох суден. Запропоновано розглядати одночасне зближення декількох суден, як сукупність подій для оцінки, як можливості послідовного розходження і вибору черговості розходження, так і в розробці алгоритму оптимального вибору типу маневру.

Мета. З урахуванням вище зазначеного, автоматизація вибору курсу ухилення, як складової повної автоматизації процесу розходження, залишається актуальною темою наукового дослідження, тому в статті поставлені наступні задачі:

- Розробка алгоритму стратегії зміни курсу.
- Формалізація курсу ухилення як величини автоматичного керування.

Рішення задачі. Ситуаційне збурення ω_j виявляє прийдешню небезпечну позицію завчасно, виходячи з прогнозу зміни відносної позиції пари суден [13–16].

При появі ситуаційного збурення ω_j виникає взаємодія B_z , яке має погоджувати маневри суден, що зближуються і передбачає вироблення узгоджених стратегій кожному з взаємодіючих суден [13–16].

Взаємодія B_z , як механізм узгодження по досягненню спільної мети попередження небезпечного зближення, визначаюча поведінку кожного з суден в процесі розходження.

Таким чином, процес розходження є процесом компенсації ситуаційного збурення, тобто переведення підмножини збурених ситуацій S_ω в підмножину безпечних ситуацій S_s [13–16].

Як показав аналіз МПЗС–72, правила містять дві незалежні системи координації: для хорошої і поганої видимості. У свою чергу, в разі хорошої видимості, підмножина збурених ситуацій S_ω відповідно до Правила 17 можливо декомпонувати на три області взаємних обов'язків $S_{\omega_1} \dots S_{\omega_3}$ [13–16].

З кожної із зазначених областей S_{ω_i} пов'язані різні типи взаємодії, регламентовані МПЗС–72 в частині маневрування при виникненні загрози зіткнення:

1. Перша область S_{ω_1} , для якої пропонується стандартна взаємодія, коли привілейоване судно зобов'язане зберігати параметри руху, а судно мета виконує маневр розходження [13–16].

2. Друга область S_{ω_2} характеризується активізованою взаємодією, коли привілейоване судно отримує право змінювати параметри руху на свій розсуд [13–16].

3. Третя область S_{ω_3} відповідає випадку екстренної взаємодії, коли обидва судна зобов'язані маневрувати для попередження зіткнення [13–16].

Основним принципом координації, який покладено в основу МПЗС–72, є встановлення відносин пріоритету на парі взаємодіючих суден. При цьому взаємини пріоритету можуть бути жорстким, як у першому типі взаємодії (перша область взаємних обов'язків суден), коли жорстко регламентується однозначна поведінка кожного з взаємодіючих суден, або напівжорстке, в другому типі координації, коли однозначно регламентується поведінка тільки судна, позбавленого пріоритету [13–16]. З урахуванням цього в разі екстренної взаємодії характерна відсутність пріоритетів, однак на відміну від першого типу взаємодії є жорстка вимога однозначної активної поведінки обох суден, причому відсутня координація їх дій.

Для встановлення відносин пріоритету в МПЗС–72 введені дві системи, одна з яких призначає пріоритет судам, які взаємодіють в разі обгону (правило 13 МПЗС–72), а друга у всіх інших ситуаціях, причому вона містить сім рівнів, упорядкованих відносин пріоритету: малі судна, судна з механічним двигуном, парусні судна, рибальські судна, судна стисненні осадкою, судна, які обмежені в можливості маневрувати і, нарешті, судна, які не можуть управлятися (правила 9, 10 і 18) [13–16].

У разі якщо судна належать одному рівню, то призначення пріоритетів передбачено тільки для рівнів: суден з механічним двигуном і вітрильних суден (правила 12, 14 і 15), причому тільки в цьому випадку є вимоги і рекомендації по вибору сторони ухилення при розходженні [13–16].

Отже, в залежності від приналежності початкової ситуації суден до однієї з областей взаємних обов'язків, Правилами пропонується тип взаємодії і координації, які в разі потреби визначають ставлення пріоритету і ступінь його жорсткості, враховуючи при цьому приналежність кожного із взаємодіючих суден одному з раніше перерахованих семи рівнів [13–16].

Спираючись на вище зазначене, можна побудувати алгоритм загальної стратегії вибору курсу ухилення (рис. 1) для запобігання зіткнення суден, або небезпечного зближення, яке буде полягати в наступному: власне судно, далі базове судно, з параметрами руху K_c та V_c та судно ціль з параметрами руху K_i та V_i мають також сумісні параметри руху – відстані l_{ij} та пеленгу a_{ij} або параметри відносного руху K_{otij} та V_{otij} . За результатом аналізу ситуації зближення визначається належність маневруючих суден до підмножин збурених ситуацій S_ω або до підмножини безпечних ситуацій S_s . В залежності від належності до певних підмножин буде визначена наявність ситуаційного збурення ω_{ij} та виникнення необхідної взаємодії B_z для переведення в підмножину безпечних ситуацій S_s .

Якщо ситуаційне збурення ω_{ij} існує і виникла необхідність взаємодії B_z , то по-перше необхідно визначити до якої області взаємних обов'язків належить судно $S_{\omega 1}$, $S_{\omega 2}$ або $S_{\omega 3}$. У тому разі коли судно належить до області взаємних обов'язків $S_{\omega 1}$ судно повинно зберігати параметри руху, тобто необхідності в виборі курсу ухилення K_y не виникає. При цьому повинна контролюватися дистанція найкоротшого зближення d_{min} , яка в свою чергу поділяється на гранично-допустиму дистанцію d_{dop} , при досягненні якої судно переходить в область $S_{\omega 2}$, та d_{mindop} , при якій судно переходить в область $S_{\omega 3}$.

Якщо власне (оперуюче) судно повинно поступитися дорогою, то виникає необхідність вибору курсу ухилення K_y .

При знаходженні оперуючого судна в області взаємних обов'язків, судно повинно власним маневром запобігти зіткненню або небезпечному зближенню і виникає необхідність визначення курсу ухилення K_y .

При знаходженні оперуючого судна в області взаємних обов'язків $S_{\omega 3}$, області екстреного маневрування, також виникає необхідність вибору курсу ухилення K_y .

У випадку, знаходження оперуючого судна у області взаємних обов'язків $S_{\omega 2}$, після вибору курсу ухилення K_y необхідно провести аналіз чи є зміна курсу оперуючого судна достатньою, для запобігання зіткненню або небезпечного зближення. Так само, як і у випадку потрапляння оперуючого судна в область взаємних обов'язків $S_{\omega 3}$, коли обидва судна повинні власними маневрами запобігти зіткненню або небезпечному зближенню, виникає необхідність вибору курсу ухилення K_y і аналізу достатності зміни курсу. Курс ухилення K_y , так як ми розглядаємо маневрування двох суден, потребує аналізу на достатність. Якщо зміни курсу судна K_c на K_y достатньо за для запобігання зіткненню або небезпечного зближення, то в додатковій зміні курсу немає необхідності.

У тому випадку коли в результаті маневрування двох суден, зміна поточного курсу судна K_c на курс ухилення K_y є недостатньою для запобігання зіткненню або небезпечного зближення, то виникає необхідність визначення додаткового вибору курсу ухилення $K_{y+1} = K_y + \Delta K_y$. В останньому виразі ΔK_y – деяка величина на яку потрібно змінити початковий курс ухилення K_y , у разі коли зближення суден залишається небезпечним, в кінці маневру.

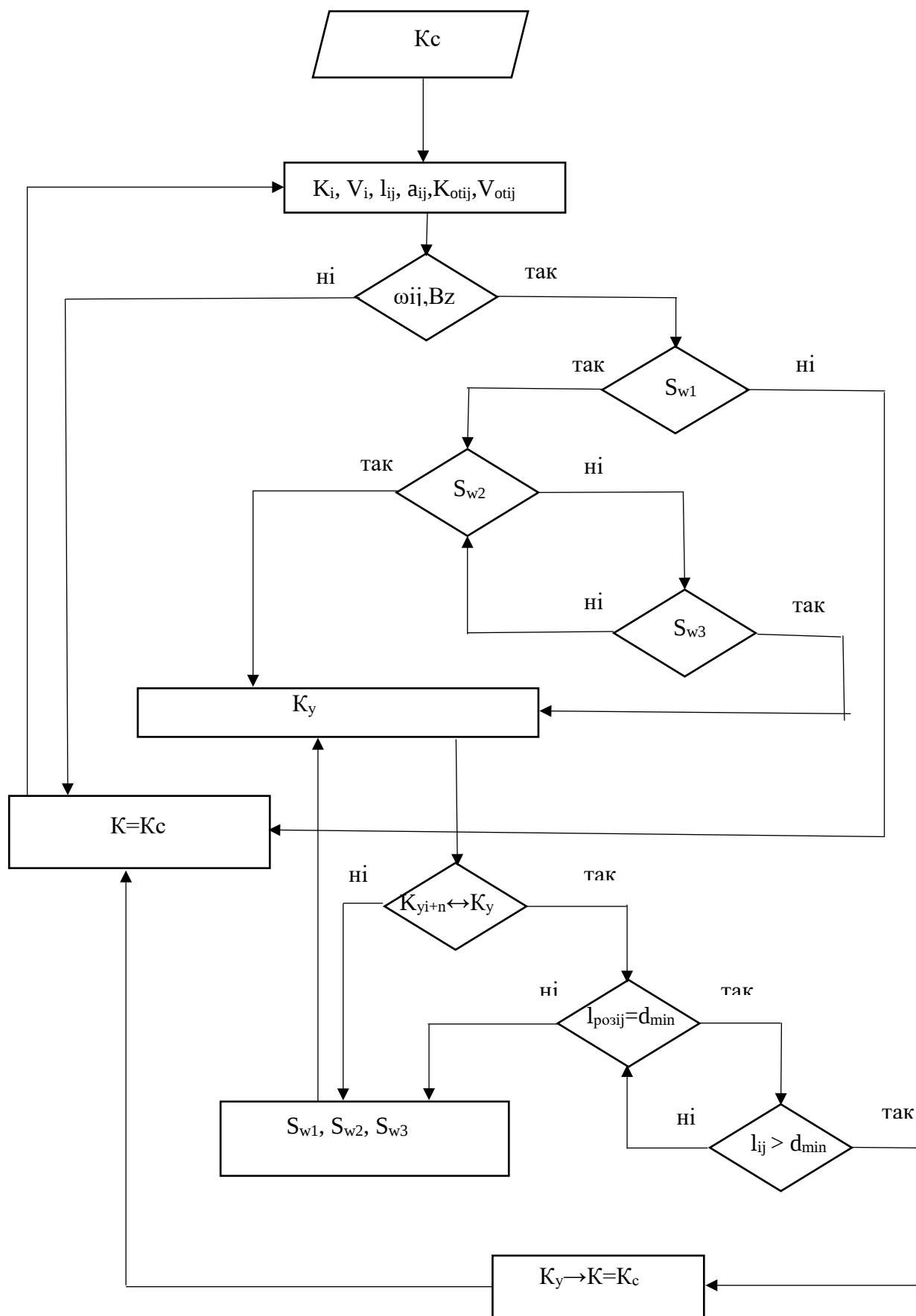


Рис. 1. Алгоритм загальної стратегії вибору курсу ухилення

Цей процес повинен повторюватися до моменту $K_{y_{i+n}} \leftrightarrow K_y$, коли дистанція між власним судном і судном ціллю перестане зменшуватися і буде дорівнювати $l_{розіі} = d_{min}$ та далі судно ціль буде пройдено і оставлене позаду.

Ознакою достатності курсу ухилення K_y буде збільшення дистанції між власним (оперуючим) судном та судном ціллю, тобто буде виконуватися умова, коли дистанція розходження $l_{розіі} = d_{min}$, при цьому кінцем маневру розходження можна вважати момент, коли дистанція, між суднами, почне збільшуватися і $l_{ij} > d_{min}$.

Наступним кроком є повернення до траєкторії програмного руху, тобто новим значенням заданого курсу K_z буде курс K , яким прямувало судно до початку виконання маневру і по досягненню якого задачу можна вважати виконаною.

Побудова моделі полягає в отриманні математичного опису системи, що дозволяє виробляти її аналіз і синтез. Спроби опису Інтегрованої Системи Керування (далі ІСК) однією «загальною моделлю», складеною з моделей всіх підсистем, починаючи з нижніх, неможливо з позиції прийняття рішень з кількох причин. У ряді випадків загальну модель ІСК взагалі неможливо отримати. В інших випадках вона виявляється надзвичайно складною, так як до неї включаються параметри та зв'язки підсистем всіх рівнів. А головне – з такою моделлю дуже важко шукати рішення. Хоча, ніхто не говорить, що загальна модель ІСК взагалі марна. Ефективна модель ІСК – багаторівневий математичний опис, що включає комплекс моделей локальних підсистем різних рівнів, що виділяються в ІСК [17].

Управління надводним судном стосується його переміщення в горизонтальній площині, де будь-який маневр може бути представлений поступальними і обертальними рухами. Зазвичай вони розглядаються в жорсткопов'язаній (IGb) і в незв'язаній ($хоу$) з судном координатних системах [17].

Початок системи координат (рис. 2) пов'язано з Центром Мас судна (ЦМ), а осі орієнтовані по осях симетрії корпусу (нижче корпус вважається симетричним як щодо Діаметральної площини (далі ДП), так і площині мідель-шпангоута). Розташована в ДП вісь спрямована до носа судна і називається поздовжньою. Інша поперечна (бічна) вісь лежить в площині мідель-шпангоута і спрямована в бік правого борта. Вибір координатної системи обумовлений наступним. По-перше, в цій системі вимірюють елементи руху, датчики навігаційної інформації, такі як курс покажчики і лаги. А по-друге, в системі опис динаміки судна виходить найбільш простим, так як її початок знаходиться в ЦМ, а осі збігаються з осями симетрії корпусу IGb [17].

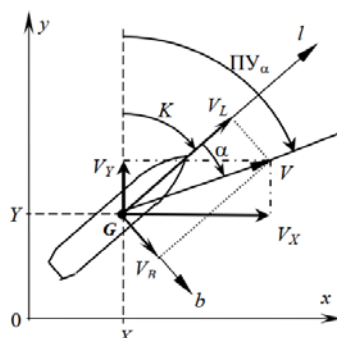


Рис. 2. Параметри руху судна

Система координат $хоу$ (рис. 3) служить для обліку руху судна щодо місцевості. Вона орієнтується по меридіану: вісь $оу$ спрямована на північ, а вісь $ох$ – на схід. Початок системи пов'язується з тією чи іншою точкою поверхні Землі. Переміщення судна може представлятися також і в інших системах координат [17].

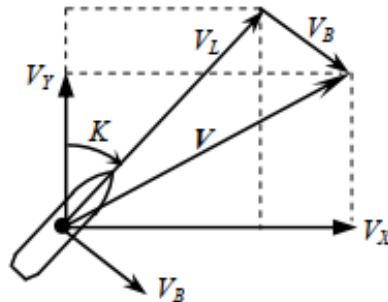


Рис. 3. Параметри судна в системі хоу

При дослідженні руху судна, у системі координат, розглянутого вище, поточний курс судна отримуємо, як суму початкового значення курсу та результату інтегрування кутової швидкості судна [17],

$$K = K_0 + \int \omega \, dt,$$

якщо в цьому виразі, поточний курс судна K замінити на курс ухилення K_u , то можна стверджувати, що курс ухилення K_u буде дорівнювати додаванням до початкового курсу величини ΔK , на яку необхідно змінити поточний курс судна для запобігання зіткнення. В свою чергу поточне значення курсу ухилення буде дорівнювати сумі значення початкового курсу і інтегрованому значенню кутової швидкості судна і лежати в межах від початкового значення K_0 до значення $K_0 + \Delta K$, значення курсу судна, якого необхідно досягти, для запобігання зіткнення або небезпечного зближення.

Завдання управління курсом відноситься до регулювання, що полягає в зміні керованої величини відповідно до функції, що задається. Торкаючись визначення цієї функції для даної задачі, зазначимо таке. Прямолінійні відрізки маршруту характеризуються постійністю курсу. Тобто в цьому випадку задаюча курс судна функція має вигляд [17]

$$K_3(t) = K_C,$$

де K_C – постійне значення.

На повороті, щоб його радіус був R_3 , швидкість повороту повинна бути постійною:

$$\omega_C = V_C / R_3,$$

так само, при автоматизації процесу вибору курсу ухилення, стає питання визначення не тільки курсу ухилення, а також параметрів зміни курсу. Одним з таких параметрів є радіус повороту та швидкість повороту, які повинні бути задані виходячи по-перше з безпечності повороту, для самого судна, і по-друге з ефективності повороту. Тобто виконуючи поворот судно не повинно потрапити в область взаємних обов'язків S_{ω_3} , коли обидва судна повинні власними маневрами запобігти зіткненню або небезпечному зближенню. Параметри повороту мають бути передрозраховані і задані системі вибору курсу ухилення як складової частини системи автоматичного керування рухом судна.

Функції які задають кутову швидкість і курс тут такі [17]:

$$\omega_3(t) = \omega_C, K_3(t) = K_0 + \omega_3(t) \cdot t,$$

де K_0 – курс перед поворотом.

Керуюча функція $\omega_3(t)$ не враховує, що судно в момент початку повороту не може відразу змінити кутову швидкість від нуля до ω_3 , а в його кінці – від ω_3 до нуля, що буде однією з причин помилки управління курсом. У такому випадку, функція, що задає параметри руху судна при виконанні повороту з поточного курсу K_0 на курс ухилення K_y , повинна враховувати маневрові характеристики судна. Така функція буде враховувати час від початку перекладки пера керма, при якому здійснюється кутове прискорення, час при якому кутова швидкість має постійне значення, а також час уповільнення кутової швидкості. Функція, що задає параметри руху судна, при виконанні повороту на курс ухилення, також має запобігати перерегулюванню і «закиду» значення курсу ухилення K_y як параметру, що є задаючим в автоматичному керуванні.

Кутова швидкість $\omega_3(t)$ має бути вибрана так, щоб врахувати кутове прискорення судна на початку повороту і уповільнення в його кінці [17].

За аналогією задачі автоматичного утримання курсу, що задана K_3 , в нашому випадку курс ухилення K_y виконує ті ж самі функції за призначенням, тому можна записати, що

$$K_3(t) = K_y(t),$$

а в виразі

$$\omega_3(t) = f_{\omega}(t), K_3(t) = K_0 + \int \omega_3(t) dt$$

провести відповідні заміни курсу заданого K_3 на курс ухилення K_y , таким чином попередній вираз прийме вигляд:

$$\omega_3(t) = f_{\omega}(t), K_y(t) = K_0 + \int \omega_3(t) dt$$

і задача зміни поточного курсу K на курс ухилення K_y стає задачею забезпечення відповідності поточних значень швидкості повороту і порівняння поточного курсу K і курсу ухилення K_y , функції, що їх задають є: [17]:

$$\omega = \omega_3(t), K = K_y(t).$$

Таким чином, автоматизація вибору курсу ухилення є спорідненою із задачею управління курсом і полягає в регулюванні курсу (зміна поточного курсу K на курс ухилення K_y), і швидкості повороту судна. Відповідно помилка цього управління включає помилку курсу (ψ) і кутової швидкості (ε) [17]:

$$\varepsilon = \omega_3(t) - \omega(t), \psi = K_3(t) - K(t),$$

а так як заданим курсом K_3 є курс ухилення, то відповідно отримаємо:

$$\varepsilon = \omega_3(t) - \omega(t), \psi = K_y(t) - K(t).$$

Мета управління курсом полягає в зведенні цих помилок до нуля.

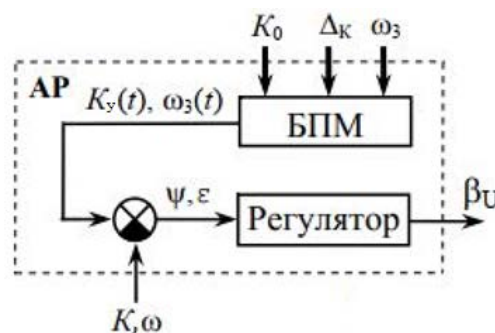


Рис. 4. Блок – схема АР

На рис. 4 представлений АР (автоматичний регулятор), блок програм маневрів (далі БПМ) якого генерує значення [17]:

$$K_3(t), \omega_3(t) = K_3(t),$$

відповідно до яких повинні змінюватися курс і кутова швидкість судна при повороті. Регулятор в залежності від ψ і ε (виробляє сигнал: $\beta_U = f(\psi, \varepsilon)$), що забезпечує поворот відповідно до значень, що задаються функціями.

У деяких АР для поворотів та інших маневрів курсом використовується комбіноване управління $\beta_U = \beta_P + \beta_R$, що включає пряме управління (сигнал, отриманий розрахунковим методом для зміни курсу, як потрібно при маневрі) і сигнал управління по відхиленню $\beta_R = f(\psi, \varepsilon)$ для компенсації похибок прямого управління, викликаних дією збурень. Блок-схема такого АР, в якому передбачено автоматичне виконання поворотів з ω_3 , показана на рис. 5, де ΔK – кут повороту; K_0 – курс до повороту.

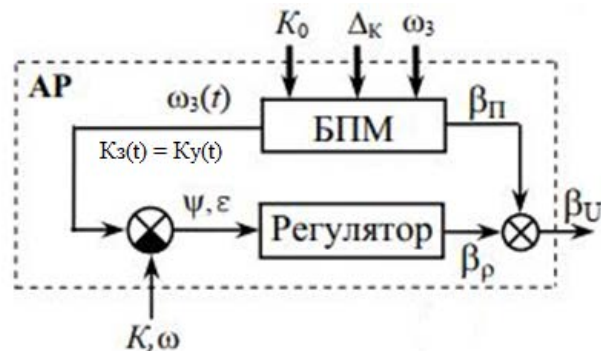


Рис. 5. Блок – схема АР

В даний час є вимога, щоб АР змінювали курс із заданим значенням кутової швидкості (ω_3) або з заданим радіусом (R_3).

Для зміни курсу на необхідний кут ΔK із заданою кутовою швидкістю і з заданим радіусом запропоновано досить багато алгоритмів. З них нижче розглядається алгоритм, який використовує метод спостереження за значеннями курсу, що генеруються для повороту, який відповідає функції, що задає $K_3(t)$ або як в нашому випадку K_y ; і алгоритм, заснований на отриманні по математичній моделі САКК (Системи Автоматичного Керування) сигналу $\beta_P(t)$ прямого управління, що визначає поворот судна.

Поворот стеження за $K_3(t)$, а в нашому випадку K_y . Принцип виконання поворотів методом спостереження за заданою дією в спрощеному вигляді пояснюється рис. 6.

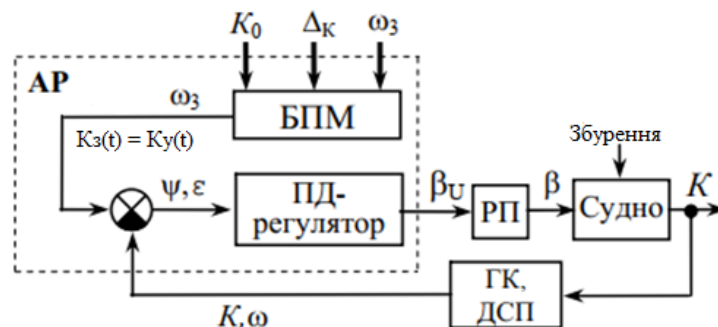


Рис. 6. САКК при поворотах стеженням за $K_3(t)$ та ω_3

Для повороту з ω_3 на кут ΔK зазвичай використовується лінійна задаюча функція [17]:

$$K_3(t) = K_0 + \omega_3 t,$$

де K_0 – початковий курс.

З моменту початку повороту БПМ генерує за вказаною формулою значення, що надходять на порівняння з поточним курсом. Стеження за $K_3(t)$ забезпечує ПД-регулятор, формуючи кладки керма по закону, до досягнення заданого курсу, що в нашому випадку дорівнює курсу ухилення K_u .

Значення кута перекладки керма для зміни курсу і досягнення $K_3 = K_u$

$$\beta = k_1 \psi + k_2 \epsilon$$

повинно враховувати різні значення кутової швидкості на початку повороту і наприкінці, по досягненню заданого курсу ухилення K_u .

Судно не може миттєво змінити кутову швидкість на початку повороту від нуля до ω_3 і в кінці повороту від ω_3 до нуля. Наявність цих стрибків у задаючій функції призводить на початку повороту до надмірної перекладки керма, а в кінці його - до істотного ризику.

Значення курсу K_3 , або як в нашому випадку K_u , повинно бути таким, щоб забезпечити безпечне розходження суден. Існує декілька моделей, запропонованих науковцями [13-16], з визначення безпечного курсу ухилення. Одна з них полягає в використанні небезпечних областей, при знаходженні в яких виникає загроза зіткнення або небезпечного зближення. Відповідно до зазначеного, безпечний курс, курс ухилення K_u , для автоматизації процесу керування, буде поза межами небезпечних областей, значення кордонів яких можуть бути визначені використовуючи вирази наведені нижче.

Так як небезпека зіткнення виникає при зближенні суден, то рівняння кордонів небезпечних областей, при зближенні суден, визначається рівнянням [16]:

$$K_i = \gamma_{ij} + \arcsin \{ \rho_{ij} [\sin (K_j - \gamma_{ij})] \}.$$

Вираз вище характеризує межу між небезпечною і допустимою областями курсів K_i і K_j , а область значень змінної K_j визначається виразом [16]:

$$K_j \in \{S_1 \cup S_2\}.$$

У цьому виразі, області S_1 і S_2 можливих значень курсу K_j аналітично визначаються наступним чином [16]:

$$S_1 = [\gamma_{ij} + 2\pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}), \gamma_{ij} + \arcsin(\rho_{ij}^{-1})],$$

$$S_2 = [\gamma_{ij} + \pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}), \gamma_{ij} + \pi + \arcsin(\rho_{ij}^{-1})].$$

Таким чином значення курсу ухилення K_u , яке в автоматизованій системі буде заданим курсом K_3 , може бути визначене за допомогою наведених виразів і належати до областей можливих значень курсу.

Висновки:

1. Аналіз процесу вибору курсу ухилення показав, що в ході аналізу ситуації зближення суден, виникає питання поділу пари судів на оперуюче судно і судно ціль, а також класифікація ситуації надмірного зближення згідно правил МПЗЗС-72, згідно з якими визначається послідовність виконання маневрів, судами учасниками, для запобігання зіткнення або надмірного зближення.

2. Був проведений аналіз існуючих моделей руху судна, в обраній системі координат, а також систем автоматичної стабілізації судна на курсі, який показав ефективність використання принципу виконання поворотів методом спостереження за заданим впливом.

3. Для подальших розробок алгоритму і формалізації процесу автоматичного вибору курсу ухилення судна пропонується використання даного принципу виконання поворотів.

4. Розроблено алгоритм загальної стратегії автоматизації вибору курсу ухилення, з урахуванням вимог правил МПЗС-72, що дозволяє визначити послідовність виявлення ситуації небезпечного зближення і критерії необхідності зміни курсу з курсу утримання на курс ухилення.

5. Пропонується для подальшої розробки моделі процесу автоматизації розходження суден, в ситуації небезпечного зближення, використати область допустимих значень курсів, для визначення курсу ухилення.

6. Для побудови ефективної моделі ІСК пропонується використати багаторівневий математичний опис, що складався б з підсистеми різних рівнів.

References

1. Zinchenko, S. N., Liashenko, V. G. (2017). Raskhozhdenie s manevriruiushchimi tseliami [Discrepancy with maneuvering targets]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii = Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, № 2 (17), P. 36–43 [in Russian].
2. Nosov, P. S., Voloshynov, S. A., Ben, A. P., Novykov, A. V. (2017). Modeliuvannia intelektualnoi diialnosti osoby shcho pryimaie rishennia v umovakh pozashtatnykh sytuatsii pry upravlinni sudnom [Modeling of intellectual activity of the decision-maker in the conditions of extraordinary situations at management of the vessel]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii = Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, № 2 (17), P. 238–243 [in Ukrainian].
3. Krasnousova, O. Yu. (2020). Probabilistic method of acceptance control of the fifth-level automatic driving system under nonhomogeneous operating conditions. *Elektronika i sistemy upravleniia = Electronics and control systems*. 2020. Vol. 3, No 65. C. 18–21.
4. Piatakov, V. E., Petrichenko, O. A., Kaliuzhnyi, V. V. (2018). Sposob posledovatel'nogo raskhozhdeniia sudna s dvumia opasnymi tseliami [Method of sequential divergence of a vessel with two dangerous targets]. *Avtomatizatsiia sudovykh tekhnicheskikh sredstv = Automation of ship technical equipment: nauchno-tekhnicheskii sbornik NU "Odessaia morskaiia akademiia"*, Vol. 24, P. 81–87 [in Russian].
5. Ben, A. P., Nosov, P. S., Palamarchuk, I. V. (2019). Stvorennia system pidtrymkypriyniattia rishen sudnovodiia z urakhuvanniam liudskoho faktoru pid chas pozashtatnykh umov [Establishment of decision support systems for the driver taking into account the human factor during freelance conditions]. *Materialy XI Mizhnarodnoi naukovo praktychnoi konferentsii "Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti" (MINT-2019)*. Kherson. P. 9–10 [in Ukrainian].

Література

1. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г. Расхождение с маневрирующими целями. *Научный вестник Херсонской державной морской академии*. 2017. № 2 (17). С. 36–43.
2. Носов П. С., Волошинов С. А., Бень А. П., Новиков А. В. Моделирование интеллектуальной деятельности особи что принимает решения в условиях позаштатных ситуаций при управлении судном. *Научный вестник Херсонской державной морской академии*. 2017. № 2 (17). С. 238–243.
3. Krasnousova O. Yu. Probabilistic method of acceptance control of the fifth-level automatic driving system under nonhomogeneous operating conditions. *Электроника и системы управления*. 2020. Vol. 3, No 65. С. 18–21.
4. Пятаков В. Э., Петриченко О. А., Калужный В. В. Способ последовательного расхождения судна с двумя опасными целями. *Автоматизация судовых технических средств: научно-технический сборник НУ "Одесская морская академия"*. Вып. 24. Одесса, 2018. С. 81–87.
5. Бень А. П., Носов П. С., Паламарчук І. В. Створення систем підтримки прийняття рішень судноводія з урахуванням людського фактору під час позаштатних умов. *Матеріали XI Міжнародної науково практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті" (МІНТ-2019)*. Херсон, 2019. С. 9–10.

6. Perederii, V. I., Borchik, E. Iu., Zdrok, E. V. (2019). Informatcionnaia tekhnologiiia otenki veroiatnosti priniatiia relevantnykh reshenii pri upravlenii sudnom v realnom vremeni [Information technology for assessing the probability of making relevant decisions when navigating a ship in real time]. *Materialy XI Mizhnarodnoi naukovo praktychnoi konferentsii "Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti"* (MINT-2019), Kherson, P. 116–119 [in Russian].

7. Petrichenko, E. A., Kozachenko, A. Iu. (2019). Analiz vozmozhnosti razrabotki informatcionnoi sistemi preduprezhdeniia stolknoveniia sudov [Analysis of the possibility of developing an information system for preventing collisions of ships]. *Materialy XI Mizhnarodnoi naukovo praktychnoi konferentsii "Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti"* (MINT-2019), Kherson, 2019. C. 192–195 [in Russian].

8. Burmaka, I. A., Ianchetskii, A. V. (2020). Otenka veroiatnosti stepeni opasnosti sblizhenniia sudov [Assessment of the likelihood of the degree of danger of approaching ships]. *Sudovozhdenie = Navigation: Sb. nauchn. trudov / NU "OMA". Vol. 30.* Odessa: IzdatInform. P. 27–33 [in Russian].

9. Volkov, Ye. L. (2018). Sposib vyboru kursu ukhylennia sudna dlia bezpechnoho rozkhodzhennia [The method of choosing the course of evasion of the vessel for safe separation]. *Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti (MINTT-2018): materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (m. Kherson, 29–31 travnia, 2018 r.). Kherson: Khersonska derzhavna morska akademiia. P. 103–106 [in Ukrainian].

10. Volkov, Y. L. (2019). A study of decomposition of a group of ships for preliminary forecasting of dangerous approaching. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. PC "Technology Center" Ukrainian State University of Railway Transport, No. 3/3 (99), P. 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.165684>.

11. Solovey, O., Ben, A., Dudchenko, S., Nosov, P. (2020). Development of control model for loading operations on Heavy Lift vessels based on inverse algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5/2 (107), P. 48–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214856>.

12. Volkov, Ye. L. (2020). Analiz manevruvannia suden u hrupi pry zblyzhenni dekilka suden [Analysis of maneuvering of vessels in a group when several vessels approach]. *Materialy KhII Mizhnarodnoi naukovo praktychnoi konferentsii "Suchasni informatsiini ta innovatsiini*

6. Передерий В. И., Борчик Е. Ю., Здрок Е. В. Информационная технология оценки вероятности принятия релевантных решений при управлении судном в реальном времени. *Матеріали XI Міжнародної науково практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті"* (МІНТ-2019), Херсон, 2019. С. 116–119.

7. Петриченко Е. А., Козаченко А. Ю. Анализ возможности разработки информационной системы предупреждения столкновения судов. *Матеріали XI Міжнародної науково практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті"* (МІНТ-2019), Херсон, 2019. С. 192–195.

8. Бурмака И. А., Янчецкий А. В. Оценка вероятности степени опасности сближения судов. *Судовождение: Сб. научн. трудов / НУ «ОМА». Вып. 30.* Одесса: ИздатИнформ, 2020. С. 27–33.

9. Волков Є. Л. Спосіб вибору курсу ухилення судна для безпечного розходження. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Херсон, 29–31 травня, 2018 р.). Херсон: Херсонська державна морська академія, 2018. С. 103–106.

10. Volkov Y. L. A study of decomposition of a group of ships for preliminary forecasting of dangerous approaching. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. PC "Technology Center" Ukrainian State University of Railway Transport. 2019. No. 3/3 (99). P. 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.165684>.

11. Solovey O., Ben A., Dudchenko S., Nosov P. Development of control model for loading operations on Heavy Lift vessels based on inverse algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. No. 5/2 (107). P. 48–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214856>.

12. Волков Э. Л. Анализ маневрування суден у групі при зближенні декілька суден. *Матеріали XII Міжнародної науково практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на*

tekhnolohii na transporti" (MINT-2020), Kherson, P. 192–195 [in Ukrainian].

13. Burmaka, I. A., Piatakov, E. N., Bulgakov, A. Iu. (2016). Upravlenie sudami v situatsii opasnogo sblizheniia [Management of ships in a situation of dangerous proximity]. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken (Germaniia). 585 p. [in Russian].

14. Maltcev, A. S., Tiupikov, E. E., Vorokhobin, I. I. (2013). Manevrirovaniye sudov pri raskhozhdenii [Maneuvering vessels when diverging]. Odessa: Morskoi trenazhernyi tcentr. 304 p. [in Russian].

15. Tsybal, N. N., Burmaka, I. A., Tiupikov, E. E. (2007). Gибкие strategii raskhozhdeniia sudov [Flexible ship divergence strategies]. Odessa: KP OGT. 424 p. [in Russian].

16. Piatakov, E. N., Buzhbetckii, R. Iu., Burmaka, I. A., Bulgakov, A. Iu. (2015). Vzaimodeistvie sudov pri raskhozhdenii dlia preduprezhdeniia stolknoveniia [Interaction of vessels in case of divergence to prevent collision]. Kherson: Grin D.S., 2015. 312 s. [in Russian].

17. Vagushchenko, L. L., Tsybal, N. N. (2007). Sistemy avtomaticheskogo upravleniia dvizheniem sudna [Automatic ship traffic control systems. 3rd ed., Rev. and add.]. 3-e izd., pererab. i dop. Odessa: Feniks. 328 p. [in Russian].

транспорті" (МІНТ-2020), Херсон, 2020. С. 192–195.

13. Бурмака І. А., Пятаков Э. Н., Булгаков А. Ю. Управление судами в ситуации опасного сближения. LAP LAMBERT Academic Publishing, Саарбрюккен (Германия), 2016. 585 с.

14. Мальцев А. С., Тюпиков Е. Е., Ворохобин И. И. Маневрирование судов при расхождении. Одесса: Морской тренажерный центр, 2013. 304 с.

15. Цымбал Н. Н., Бурмака И. А., Тюпиков Е. Е. Гибкие стратегии расхождения судов. Одесса: КП ОГТ, 2007. 424 с.

16. Пятаков Э. Н., Бужбецкий Р. Ю., Бурмака И. А., Булгаков А. Ю. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения. Херсон: Гринь Д.С., 2015. 312 с.

17. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.

TERENTYEV VLADYSLAV

Department of Ship Electrical Equipment and
Automatic Devices Operation,
Kherson State Maritime Academy, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9798-678X>
E-mail: terentyevBlackthorn@gmail.com

ТЕРЕНТЬЕВ В. А.

Херсонская государственная морская академия, Украина
**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБЩЕЙ СТРАТЕГИИ
АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА КУРСА**

Аннотация. При маневрировании судов, основной причиной аварийности является то, что судоводители не всегда объективно оценивают ситуацию и неправильно принимают решения по расхождению при ситуации опасного сближения или возникновения опасности столкновения. Рассматривается автоматизация выбора курса уклонения, как автоматизации процесса расхождения.

Цель. В статье освещаются задачи формализации курса уклонения, как величины автоматического управления, и предлагается разработка алгоритма стратегии изменения курса.

Методика. Провели обработку практических данных собственного судна. Проанализировали существующие модели движения судна, а также системы автоматической стабилизации судна. Для построения алгоритма провели декомпозицию МПЗС–72 относительно принадлежности начальной ситуации судов к одной из областей взаимных обязанностей.

Результат. По результатам исследования данной темы был разработан алгоритм общей стратегии выбора курса уклонения судна, с учетом требований правил МППСС–72. Рассмотрены типы управления автоматическими регуляторами и их ограничения в начальный и конечный моменты поворота судна. Было обнаружено, что для построения модели интегрированной системы управления

необходимо составить многоуровневое математическое описание, включающее подсистемы различных уровней.

Научная новизна. Определена эффективность использования принципа выполнения поворотов методом наблюдения за заданным воздействием проанализировав существующие модели движения судна. Предложено использование областей допустимых значений курсов при разработке модели процесса автоматизации расхождения судов.

Практическая значимость. Разработан алгоритм общей стратегии автоматизации выбора курса уклонения.

Ключевые слова: управления курсом судна; курс уклонения судна; область значений; область взаимных обязанностей.

TERENTYEV V. A.

Kherson State Maritime Academy, Ukraine

DEVELOPMENT OF GENERAL STRATEGY ALGORITHM OF COURSE SELECTION AUTOMATION

Annotation. During ships maneuvering, the main cause of accidents is that navigators do not always objectively assess the situation and may make wrong decisions on the identification situation of a dangerous approach and a collision hazard. The automation of the deviation course choice is considered as the automation avoidance process.

Purpose. The article highlights the tasks of formalizing the deviation course as a value of automatic control, and proposes the development of an algorithm for the strategy of changing the course.

Methodology. Conducted processing of practical data of own vessel. The existing models of the ship's movement were analyzed, as well as the systems for the automatic stabilization of the ship. To construct the algorithm, the COLREGs-72 was decomposed with respect to the belonging of the initial situation of the vessels to one of the areas of mutual obligations.

Findings. According to the results of the given theme, an algorithm of the general strategy of choosing the course of evasion of the vessel was developed, considering the requirements of COLREG-72 rules. It was considered the types of control of automatic regulators and their limitations at the initial and final moments of the ship's turn. It was found out. It is necessary to create a multilevel mathematical description, which will include subsystems of different levels, to build a model of an integrated control system.

Originality. It was determined the efficiency of using the principle of execution of ship's turns by the method of observation with a given influence by analyzing the existing models of ship's movement. It was offered to use the range of acceptable values of courses during the development of the model of automation ship avoidance process.

Practical value. An algorithm for the general strategy of automation of the avoidance course selection was developed.

Keywords: ship's course handling; ship's avoidance course; range of values; range of mutual obligations.