

**ВИСШЕ ВОЕННОМОРСКО УЧИЛИЩЕ „НИКОЛА Й. ВАПЦАРОВ“
ФАКУЛТЕТ „НАВИГАЦИОНЕН“**

Катедра „Корабоводене“

БЛАГОВЕСТ ЧАНЕВ БЕЛЕВ

**АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА ПОТОЦИТЕ ИНФОРМАЦИЯ
ПРИ ДВИЖЕНИЕ НА КОРАБА В ДИНАМИЧНА СРЕДА**

Професионално направление:

5.5. Транспорт, корабоплаване и авиация

Докторска програма: „Управление на кораби и корабоводене“

ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД

За придобиване на научна степен

„ДОКТОР НА НАУКИТЕ“

Варна, 2026 г.

Автоматично управление на потоците информация при движение на кораба в динамична среда

Благовест Белев

SCOPUS ID: 6602945721

Web of Science Researcher ID: E-3692-2012

ORCID ID: 0000-0001-9458-6070

DOI: <https://doi.org/10.63662/dissertations/belev-2026>

Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“ – Варна

e-mail: bl.belev@naval-acad.bg

Резюме.

Целта на представеното изследване е да се разработи формален, аналитично обоснован и изчислително ефективен дъщерархичен модел за автоматично управление на курса и скоростта на кораба, който да осигурява безопасно заобикаляне на препятствия, при минимално време за маневра и минимален разход на гориво. Решението на задачата е насочено към класическо разминаване с една или повече подвижни цели, което представлява критична ситуация на море и ангажира пълния човешки и технологичен ресурс на корабния мостик.

За постигане на целите на дисертационния труд са използвани следните научни методи: аналитични и геометрични методи за описание на процесите на разминаване, теорията на относителното движение, оптимизационни методи, методи за аналитична апроксимация на нелинейни функции, метод на сравнителния анализ. В резултат от приложените методи и подходи са създадени формални математически модели, аналитичните зависимости и оптимизационните методи за автоматично управление на курса и скоростта на кораба при избягване на сблъсък, които осигуряват съгласувано постигане на безопасност, минимално време за маневра и минимален разход на гориво, в съответствие с изискванията на COLREG.

Ключови думи: алгоритъм, двуйерархична оптимизация, формален модел, разминаване на кораби, навигационна безопасност.

Automatic control of information flows during a ship's motion in a dynamic environment

Blagovest Belev

SCOPUS ID: 6602945721

Web of Science Researcher ID: E-3692-2012

ORCID ID: 0000-0001-9458-6070

DOI: <https://doi.org/10.63662/dissertations/belev-2026>

Nikola Vaptsarov Naval Academy – Varna

e-mail: bl.belev@naval-acad.bg

Abstract.

The aim of the presented study is to develop a formal, analytically grounded, and computationally efficient bi-level model for the automatic control of a ship's course and speed, ensuring safe obstacle avoidance with minimum maneuvering time and minimum fuel consumption. The solution is focused on classical encounter situations with one or more moving targets, which represent critical situations at sea and require the full engagement of both human and technological resources on the ship's bridge.

To achieve the objectives of the dissertation, the following scientific methods were employed: analytical and geometric methods for describing encounter processes, the theory of relative motion, optimization methods, methods for the analytical approximation of nonlinear functions, and the method of comparative analysis. As a result of the applied methods and approaches, formal mathematical models, analytical relationships, and optimization techniques have been developed for the automatic control of a ship's course and speed in collision avoidance scenarios. These ensure the coordinated achievement of navigational safety, minimum maneuvering time, and minimum fuel consumption in accordance with the requirements of COLREG.

Keywords: algorithm, bi-level optimization, formal model, ship encounters, navigational safety.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременното корабоплаване се характеризира с висока динамика, значително увеличение на трафика и ускорено въвеждане на автоматизирани и автономни системи за управление. То функционира в условията на интензивен трафик, динамична среда и нарастващи изисквания към безопасността, ефективността и оперативната надеждност на навигационните процеси. Морският транспорт, като основен компонент на глобалната икономика, продължава да се развива в посока на автоматизация, дигитализация и внедряване на интелигентни технологии. Това развитие поставя предизвикателства пред традиционните методи за корабоводене, които разчитат в значителна степен на човешкия фактор и неговата способност да взема решения в условия на неопределеност и времеви ограничения. В този контекст безопасното маневриране на кораба, особено при наличие на подвижни или неподвижни препятствия, се превръща в критичен елемент от навигационните процеси. Традиционните методи за ръчно вземане на решения разчитат на субективната оценка на навигатора, на неговия опит и на способността му да реагира своевременно в усложнена среда. Това увеличава вероятността от човешка грешка – фактор, който остава водеща причина за голяма част от морските произшествия.

Един от критичните елементи на управлението на кораба е безопасното избягване на сближение с подвижни и неподвижни препятствия. Въпреки че международните правила за предпазване от сблъскване на море (COLREG) предлагат нормативна рамка за поведение, тяхното практическо приложение изисква значителен опит, концентрация и своевременна реакция. Грешки в преценката или забавени действия често водят до инциденти с икономически, екологични и социални последици. В този контекст автоматизираните и автономни навигационни системи придобиват ключово значение, тъй като

предоставят потенциал за подпомагане или заместване на човешките действия чрез алгоритми, базирани на математически модели и оптимизационни принципи.

Разработването на формални модели за автоматично управление на движението на кораба е стратегически важно за подобряване на безопасността и ефективността на навигационните процеси. Това изисква съчетаване на няколко направления: теория на относителното движение; геометрични методи; оптимизационно моделиране; изчислителна ефективност и съвместимост с нормативната рамка на морското право. Необходим е модел, който не само гарантира безопасно заобикаляне на препятствия, но и отчита експлоатационните параметри на плаването, като времето на маневра, разхода на гориво и отклонението от предварително планирания маршрут.

Особено важно е, че бъдещите автономни морски плавателни средства ще разчитат на решения, които трябва да бъдат вземани в реално време и при наличие на множество едновременно действащи фактори. Това налага разработването на модели, които да бъдат достатъчно точни, но и изчислително леки, за да могат да работят в условията на реално времеви изчисления. Оттук произтича необходимостта от многокритериални оптимизационни подходи, които да позволят едновременното постигане на безопасност и ефективност.

Настоящото изследване се основава на разбирането, че подобряването на безопасността и ефективността на корабоплаването е възможно чрез разработването на формализирани, математически обосновани модели за автоматично управление. Макар през последните десетилетия да са предложени множество алгоритми за избягване на сблъсък, включително в ARPA системи, тяхното приложение в условия на автономна навигация изисква нови методи, които едновременно да бъдат:

- бързи за изчисление;
- адаптивни към динамични препятствия;
- в съответствие с COLREG;

- с възможност за интегриране в реално времеви системи;
- оптимални не само спрямо безопасността, но и спрямо експлоатационни критерии като време и разход на гориво.

Актуалността на изследването се обуславя от:

- нарастващия морски трафик и увеличения риск от сблъскване;
- нуждата от намаляване на човешкия фактор в критични навигационни процеси;
- въвеждането на автономни и полуавтономни кораби;
- стремежа за минимизиране на разхода на гориво и емисиите във въздуха;
- необходимостта от алгоритми за управление, които са съвместими с COLREG и могат да работят в реално време.

Хипотезата, която се защитава в дисертацията, е, че реализирането на формален оптимизационен модел, базиран на теорията на относителното движение, геометрична интерпретация на препятствията и двуйерархична оптимизация на времето и разхода на гориво, позволява автоматично и надеждно изчисляване на оптимален курс и скорост, които осигуряват безопасно и ефективно заобикаляне на препятствия в реално време.

Научната концепция на настоящото изследване се основава на разбирането, че процесът на избягване на сблъсък в морската навигация представлява единен динамичен, геометричен и оптимизационен проблем, който не може да бъде адекватно описан и решен чрез изолирано разглеждане на отделни навигационни параметри или чрез чисто правилно ориентиран подход. В условията на съвременното корабоплаване, характеризиращо се с интензивен трафик, ограничено време за реакция и повишени изисквания към безопасността и ефективността, вземането на навигационни решения следва да бъде формализирано и подчинено на ясно дефинирани математически зависимости.

В рамките на изследването безопасното маневриране на кораба се интерпретира като задача за управление на относителното движение, при

която взаимодействието между собствения кораб и целите в околното пространство се описва чрез геометрични и кинематични зависимости. В тази постановка сближаването, разминаването и заобикалянето на препятствия не се разглеждат като дискретни навигационни събития, а като непрекъснат процес, подлежащ на аналитично описание и оптимизационно управление. Геометричната интерпретация на относителния път и безопасната зона около препятствието позволява формулирането на ясни условия за допустимост на маневрата и създава основа за аналитично определяне на оптимални управленски решения.

Ключов елемент на научната концепция е третирането на безопасността и ефективността като взаимносвързани, но потенциално конфликтни критерии. За разлика от традиционните подходи, при които безопасността доминира без количествено отчитане на експлоатационните последици, в настоящото изследване безопасното избягване на сблъсък се разглежда като необходимо ограничение, в рамките на което се търси оптимално решение по отношение на времето за маневра и разхода на гориво. Това налага използването на многокритериален оптимизационен подход, способен да отчете взаимодействието между навигационните и експлоатационните параметри.

На тази основа се въвежда двуйерархична оптимизационна концепция, при която процесът на управление се разделя на две, логически свързани, нива. Горната йерархична задача е насочена към осигуряване на безопасността чрез оптимално определяне на геометричните параметри на маневрата, като минимизацията на времето за заобикаляне се използва като водещ критерий. Долната йерархична задача е ориентирана към оптимизация на експлоатационните характеристики на движението, като разходът на гориво се минимизира при вече определени допустими граници на маневрата. По този начин се осигурява съгласуваност между безопасното управление и енергийната ефективност на плаването.

Съществен аспект на научната концепция е разглеждането на международните правила за предпазване от сблъскване на море (COLREG) не като алгоритъм за вземане на решения, а като система от ограничения, които дефинират допустимото пространство на управленските решения. Този подход позволява формалното интегриране на нормативната рамка в оптимизационния модел, без да се нарушава неговата аналитична цялост и без да се компрометира възможността за автоматизирано или автономно приложение.

Концепцията предполага, че чрез аналитична апроксимация на нелинейните зависимости и чрез подходящо структуриране на оптимизационната задача може да се постигне изчислителна ефективност, достатъчна за реално времево приложение. По този начин разработеният модел не се ограничава до теоретично описание на навигационния процес, а се ориентира към практическа реализация в автоматизирани и автономни навигационни системи.

В обобщение, научната концепция на дисертационното изследване се състои в разработването на формализиран, аналитично обоснован и йерархично структуриран модел за управление на относителното движение на кораба, който съчетава изискванията за безопасност, нормативна съвместимост и експлоатационна ефективност. Тази концепция създава основа за системно изследване на процеса на избягване на сблъсък и позволява извеждането на нови зависимости и закономерности, приложими както в теорията на корабоводенето, така и в практиката на съвременното и бъдещото автономно корабоплаване.

Методологичната основа на настоящото дисертационно изследване е изградена върху принципите на системния анализ, формалното моделиране и оптимизационния подход към управлението на сложни динамични процеси. Процесът на корабно маневриране при избягване на сблъсък се разглежда като многокомпонентна система, в която взаимодействат геометрични, кинематични, експлоатационни и нормативни фактори. Това налага

използването на методология, способна да обедини тези различни аспекти в единна аналитична рамка.

В изследването е възприет аналитично-формален подход, при който навигационният процес се описва чрез математически зависимости, позволяващи ясно дефиниране на входните параметри, управляемите променливи, ограниченията и целевите функции. Изборът на този подход е мотивиран от необходимостта разработеният модел да бъде не само описателен или симулационен, а обясним, проверим и обобщим, което е съществено изискване за научни изследвания от по-висок ред. За разлика от чисто числените или евристични методи, аналитичното моделиране позволява извеждане на закономерности и зависимости, които могат да бъдат интерпретирани и използвани извън конкретния експериментален сценарий.

Като основа за описване на взаимодействието между собствения кораб и целите в околното пространство е използвана теорията на относителното движение, която предоставя формален апарат за анализ на сближаването, разминаването и заобикалянето на подвижни препятствия. Геометричните методи се прилагат за дефиниране на безопасни зони, относителни траектории и условия за допустимост на маневрата. Този избор позволява процесът на избягване на сблъсък да бъде представен в ясно структурирана форма, независима от субективни интерпретации.

Оптимизационният аспект на методологията е реализиран чрез формулиране на двуйерархична оптимизационна задача, което представлява съзнателен методологичен избор. Вместо използването на едно ниво или агрегирано многокритериално оптимизиране, йерархичният подход позволява ясно разграничаване между стратегическите и тактическите управленски решения. Горната йерархична задача е насочена към гарантиране на безопасността и минимизиране на времето за маневра, докато долната задача оптимизира експлоатационните характеристики при вече зададени допустими граници. Този подход отразява реалната логика на навигационния процес и

осигурява методологична съгласуваност между различните критерии за оптималност.

Съществен елемент на методологията е интегрирането на нормативните изисквания на COLREG в оптимизационния модел под формата на ограничения. По този начин нормативната рамка не се разглежда като набор от евристични правила, а като формализирана част от математическата постановка. Това позволява едновременното спазване на регулаторните изисквания и реализирането на автоматизирано вземане на решения, без необходимост от допълнителни логически или експертни надстройки.

С оглед на практическата приложимост на разработения модел е използвана методология за аналитична апроксимация на нелинейните зависимости, с цел намаляване на изчислителната сложност и осигуряване на възможност за реално времево приложение. Апроксимациите не се използват като средство за опростяване за сметка на точността, а като контролиран метод за постигане на баланс между точност и изчислителна ефективност, като валидността на получените решения се проверява чрез симулационни експерименти.

Верификацията и валидирането на теоретичния модел са осъществени чрез числени и симулационни експерименти, които служат не като основен метод за доказване, а като средство за проверка на аналитичните изводи и за оценка на устойчивостта на решенията при промяна на параметрите. Този подход отразява методологичната позиция, че симулацията допълва, но не замества аналитичното обосноваване на модела.

В обобщение, методологичната основа на изследването се характеризира с комбинирано използване на аналитично моделиране, геометрични методи и йерархична оптимизация, подкрепено от симулационна валидация. Тази методология осигурява необходимата научна строгост, позволява извеждането на обобщени резултати и създава предпоставки за практическо приложение на разработените модели в автоматизирани и автономни навигационни системи.

Научната новост на настоящото дисертационно изследване се изразява в разработването и обосноваването на цялостна научна концепция за управление на процеса на избягване на сблъсък, която интегрира геометричния, динамичния и оптимизационния аспект на навигационното решение в единен формален модел. За разлика от съществуващите подходи, при които безопасността и експлоатационната ефективност се разглеждат отделно или се обединяват чрез агрегирани критерии, в настоящото изследване те са структурирани в йерархично организирана оптимизационна постановка, отразяваща реалната логика на навигационния процес.

Оригиналността на изследването се проявява във формализирането на избягването на сблъсък като двуйерархична оптимизационна задача, при която на горното ниво се осигурява безопасността и минимизацията на времето за маневра, а на долното ниво се оптимизира разходът на гориво при вече зададени допустими геометрични и кинематични ограничения. Този подход позволява аналитично изследване на взаимодействието между навигационните и експлоатационните критерии и извеждане на зависимости, които не могат да бъдат получени чрез класически еднोनивови или чисто симулационни методи.

Допълнителен аспект на научната новост е интерпретирането на COLREG като формализирана система от ограничения, интегрирана директно в оптимизационния модел, а не като набор от евристични правила за вземане на решения. Това създава предпоставки за нормативно съвместимо автоматизирано и автономно управление, без необходимост от допълнителни логически надстройки.

Оригиналността на изследването се допълва от разработването на аналитични апроксимации на нелинейните зависимости, които позволяват реално времево приложение на модела, както и от системното изследване на устойчивостта и границите на валидност на получените решения. В този смисъл дисертационният труд допринася както за развитието на теорията на

корабоводенето и навигационното управление, така и за практическата реализация на интелигентни навигационни системи.

Целта на дисертацията е да се разработи формален, аналитично обоснован и изчислително ефективен двуйерархичен модел за автоматично управление на курса и скоростта на кораба, който да осигурява безопасно заобикаляне на препятствия, при минимално време за маневра и минимален разход на гориво.

За постигане на поставената цел се решават следните **основни научни задачи**:

1. Да се извърши аналитичен и критичен преглед на съществуващите методи за автоматично управление на движението на кораба и алгоритмите за избягване на сблъсък, включително техните ограничения в контекста на автономното корабоводене.

2. Да се формулира теоретична рамка на модела, основана на:

- теорията на относителното движение;
- геометричните зависимости за безопасно разминаване;
- оптимизационните методи за управление.

3. Да се разработи аналитичен модел за избягване на сблъсък, който включва:

- определяне на дължината на относителния път (участъци AB и BC);
- изчисляване на относителната скорост V_i ;
- формиране на целева функция за минимизация на времето.

4. Да се дефинират ограниченията на задачата, които гарантират:

- спазване на безопасната дистанция до целта d ;
- маневриране в съответствие с COLREG;
- технологични граници на променливите.

5. Да се извършат аналитични апроксимации на нелинейните зависимости, позволяващи реално времево решение на задачата.

6. Да се разработи двуйерархична оптимизационна задача, в която:

- горната подзадача минимизира времето за маневра чрез оптимално определяне на ъгъла φ ;

- долната подзадача минимизира разхода на гориво чрез оптимално определяне на скоростта V_m .

7. Да се анализира взаимодействието между двете подзадачи и да се изведе зависимост между оптималните решения на горното и долното йерархично ниво.

8. Да се разработи алгоритъм за практическо приложение на модела в автоматизирани и автономни навигационни системи.

9. Да се валидира моделът чрез симулационни примери, числени експерименти и анализ на параметрите, като се оценят точността, устойчивостта и приложимостта му.

Обект на изследването в настоящата дисертация е навигационният процес при управление на движението на морски кораб в условия на сближаване и взаимодействие с подвижни и неподвижни препятствия, протичащ в динамична и неопределена среда и подчинен на нормативните изисквания за безопасност на корабоплаването.

Предмет на изследването са формалните математически модели, аналитичните зависимости и оптимизационните методи за автоматично управление на курса и скоростта на кораба при избягване на сблъсък, които осигуряват съгласувано постигане на безопасност, минимално време за маневра и минимален разход на гориво, в съответствие с изискванията на COLREG.

В дисертацията са използвани следните **научни методи и подходи**:

- **Аналитични и математически методи** – за формализиране на навигационния процес и извеждане на зависимости между управляемите параметри.

- **Теория на относителното движение** – за описание на взаимодействието между собствения кораб и подвижните или неподвижните препятствия.

- **Геометрични методи** – за дефиниране на относителни траектории, безопасни зони и условия за допустимост на маневрата.

- **Оптимизационни методи**, включително йерархична (двуйерархична) оптимизация – за съгласуване на критериите за безопасност, време и разход на гориво.

- **Методи за аналитична апроксимация на нелинейни функции**, с цел намаляване на изчислителната сложност и осигуряване на реално времево приложение.

- **Симулационни и числени експерименти** – за верификация и валидиране на аналитичните резултати, както и за оценка на устойчивостта на решенията при промяна на параметрите.

- **Сравнителен анализ** – за съпоставка на предложените решения с известни подходи и сценарии от практиката.

Дисертацията се състои от: съдържание, въведение, пет глави, заключение, списък на ползваната литература, списък на съкращенията, списък на публикации по дисертацията и списък на цитирания на публикациите по дисертацията.

Необходимият в процеса на изследването научен апарат за библиографско цитиране е приведен към изискванията на БДС ISO 690: 2021 (Е).

Съдържание

| | |
|---|-----------|
| Резюме | 2 |
| Въведение | 5 |
| Списък на фигурите | 21 |
| Списък на таблиците | 24 |
| Списък на използваните съкращения | 26 |
| | |
| Глава първа. Анализирание на източниците на информация, необходима за управление на движението на кораба | 29 |
| 1.1. Описание на навигационния процес | 29 |
| 1.2. Структура на навигационния процес | 36 |
| 1.3. Зона за навигационна безопасност | 46 |
| 1.4. Анализ на алгоритмите за решаване на навигационни задачи при плаване на кораб между две пристанища | 59 |
| 1.4.1. Алгоритми за оптимизиране на презокеански маршрути (глобални алгоритми) | 61 |
| 1.4.1.1. Вариационно смятане | 62 |
| 1.4.1.2. Динамично програмиране | 63 |
| 1.4.1.3. Изохронен и изопонен метод | 65 |
| 1.4.1.4. Алгоритъм на Дейкстра | 69 |
| 1.4.1.5. Еволюционни алгоритми | 70 |
| 1.4.2. Алгоритми за оптимизиране на крайбрежно плаване (локални алгоритми) | 73 |
| 1.4.3. Анализ на алгоритмите за решаване на задачата за безопасно разминаване с подвижни и неподвижни обекти | 80 |
| 1.5. Йерархична структура на информацията в навигационния процес | 89 |
| 1.6. Оптимизиране на навигационния процес | 93 |
| 1.7. Обобщение и изводи | 99 |

| | |
|--|------------|
| Глава втора. Проектиране и разработване на задачи за автоматично управление на движението на кораба (двуйерархична структура на задачите) | 107 |
| 2.1. Математически теории, описващи движението на кораб при избягване на препятствие | 107 |
| 2.1.1. Теория на относителното движение | 107 |
| 2.1.2. Теоретична рамка на корабната динамика и хидродинамичните ограничения | 108 |
| 2.2. Формализиране на видове управление на кораба | 110 |
| 2.3. Необходимост от разработване на формален модел за избягване на сблъсък с подвижна или неподвижна цел | 111 |
| 2.4. Разработване на формален модел за изменение на курса на кораба при заобикаляне на препятствие | 113 |
| 2.5. Определяне на общата дължина на прехода при движението на кораба | 117 |
| 2.6. Определяне на стойността на относителната скорост между кораба и препятствието | 118 |
| 2.7. Определяне на целевата функция за задачата за отклонение от препятствие | 121 |
| 2.8. Определяне на ограниченията на задачата за заобикаляне на препятствие | 123 |
| 2.9. Аналитично дефиниране на оптимизационната задача за разминаване с препятствие от кораб | 124 |
| 2.10. Апроксимиране на нелинейната оптимизационна задача | 126 |
| 2.11. Разработване на двуйерархична задача за управление на кораба за заобикаляне на препятствие | 128 |
| 2.11.1. Дефиниране на долна оптимизационна подзадача за оптимизиране на разхода на гориво | 129 |

| | |
|---|------------|
| 2.11.2. Алгоритмична последователност за оперативно прилагане на двуйерархичния модел | 133 |
| 2.12. Анализ на COLREG в контекста на разработвания модел за управление на кораба | 137 |
| 2.13. Сравнение с алтернативни подходи за избягване на Опасно сближение | 139 |
| 2.14. Теоретични свойства и съществуване на решение на Оптимизационната задача | 144 |
| 2.14.1. Допустима област и непрекъснатост на целевата функция ... | 145 |
| 2.14.2. Съществуване на решение при двуйерархичната оптимизация | 147 |
| 2.15. Анализ на чувствителност и устойчивост на оптималното решение | 148 |
| 2.15.1. Източници на неопределеност в навигационните данни | 149 |
| 2.15.2. Устойчивост (робастност) на двуйерархичната Оптимизационна структура | 151 |
| 2.16. Обобщение на модела за заобикаляне на множество препятствия | 152 |
| 2.16.1. Формална постановка при множество препятствия | 152 |
| 2.16.2. Предимства на обобщения модел | 155 |
| 2.17. Обобщения и изводи | 155 |
| | |
| Глава трета. Експериментална проверка на двуйерархичен модел за оптимизация на маневрирането на кораб при разминаване с цели на море | 158 |
| 3.1. Описание на експеримента за двуйерархична оптимизация на времето и разхода на гориво при разминаване на модел на собствен кораб с подвижна цел | 159 |

| | |
|--|-----|
| 3.2. Двуйерархична оптимизация на маневрата за разминаване, при задаване на времето за начало на изменение на курса на собствения кораб | 165 |
| 3.2.1. Сценарий 1.: Маневриране на контейнеровоз СК за избягване на опасно сближение с една цел, контейнеровоз с капацитет 7928 TEU, с изпълнение на конвенционално маневриране | 167 |
| 3.2.1.1. Числени симулации и резултати от моделиране | 167 |
| 3.2.2. Сценарий 2.: Маневриране на танкер СК за избягване на опасно сближение на две цели – бълккериър с DW 44 000 MT и контейнеровоз с капацитет 7928 TEU, с изпълнение на конвенционално маневриране | 180 |
| 3.3. Анализ на резултатите при реализиране на сценарий 1 и сценарий 2 | 189 |
| 3.4. Ограничения на разработения двуйерархичен модел и насоки за бъдещи изследвания | 198 |

Глава четвърта. Практическо приложение на двуйерархичния модел в навигационни системи

| | |
|---|-----|
| 4.1. Архитектура на система за подпомагане на навигационните решения, базирана на двуйерархична оптимизация | 202 |
| 4.2. Интеграция на двуйерархичния модел в корабни навигационни системи | 204 |
| 4.3. Приложение на двуйерархичния модел в тренажорни комплекси и обучението на навигационни специалисти | 205 |
| 4.4. Приложение на двуйерархичния оптимизационен модел при реалистична навигационна ситуация (Case study) | 206 |
| 4.4.1. Описание на навигационния казус | 206 |
| 4.4.2. Реализация на казуса в тренажорна среда | 207 |
| 4.4.3. Сравнителен анализ – навигатор срещу двуйерархичен модел | 207 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.4. Интерпретация на резултатите и практическа стойност | 208 |
| 4.5. Съвместимост на двуйерархичния оптимизационен модел с COLREG, STCW и философията на IMO | 209 |
| 4.6. Практически препоръки за внедряване на двуйерархичния оптимизационен модел в системата за управление на безопасността (SMS) | 211 |
| 4.6.1. Примерна процедура за оптимизирано разминаване като част от SMS | 212 |
| 4.6.2. Примерен чеклист за оптимизирано разминаване | 213 |
| 4.6.3. Практическа стойност и ползи от внедряването | 214 |
| Глава пета. Икономическа оценка на ефективността от прилагането на двуйерархичния оптимизационен модел | |
| 5.1. Цел и подход за икономическа оценка | 216 |
| 5.2. Икономически ефект от оптимизацията на единична маневра | 217 |
| 5.2.1. Анализ на резултатите за сценарий 1 (контейнеровоз) | 217 |
| 5.2.2. Анализ на резултатите за сценарий 2 (танкер) | 217 |
| 5.3. Кумулативен икономически ефект при системно приложение .. | 218 |
| 5.3.1. Допускания за експлоатационен сценарий | 218 |
| 5.3.2. Годишен икономически ефект от гориво | 218 |
| 5.4. Допълнителен икономически ефект от оптимизацията на времето | 219 |
| 5.5. Обобщена икономическа оценка и интерпретация | 219 |
| Заключение и приноси на разработения дисертационен труд | |
| Обобщени изводи от проведеното изследване | 221 |
| Основни научни приноси | 224 |
| Научно-приложни приноси | 226 |
| Ползвана литература | 228 |

Списък на фигурите

| | |
|--|----|
| Фигура 1.1. Бариери пред използването на автономните кораби за международни превози | 33 |
| Фигура 1.2. Структура на навигационния процес според Джаковски | 37 |
| Фигура 1.3. Навигационен процес и съставляващите го подпроцеси (Копач и др.) | 40 |
| Фигура 1.4. Схема на условията за плаване на кораба на различни етапи от рейса | 42 |
| Фигура 1.5. Определяне на размера на ЗНБ в канали | 48 |
| Фигура 1.6. Модел на ЗНБ, предложен от Фуджи и Танака | 49 |
| Фигура 1.7. Определяне на границата на ЗНБ | 50 |
| Фигура 1.8. Модел на ЗНБ за открито море | 51 |
| Фигура 1.9. Зависимост на гъстотата на корабния трафик от разстоянието до собствения кораб | 51 |
| Фигура 1.10. Зона на Дейвис | 52 |
| Фигура 1.11. Модел на ЗНБ, предложен от Т. Колдуел | 53 |
| Фигура 1.12. Граница на ЗНБ в зависимост от скоростта на собствения кораб | 55 |
| Фигура 1.13. Област на размиване на границата на ЗНБ | 58 |
| Фигура 1.14. Прилагане на вариационно смятане за оптимален корабен маршрут | 62 |
| Фигура 1.15. Траектория на плаването, изчислена с вариационно смятане, ортодрома и локсодрома | 63 |
| Фигура 1.16. Пример за 2D динамично програмиране | 64 |
| Фигура 1.17. Точки и потенциални пътища, генерирани от изохронния алгоритъм | 66 |

| | |
|--|-----|
| Фигура 1.18. Подобен изохронен метод на Хагивара | 67 |
| Фигура 1.19. Илюстрация на изопонния метод за оптимизация на плаването | 68 |
| Фигура 1.20. Графичен вид на алгоритъма на Дейкстра | 69 |
| Фигура 1.21. Нанасяне на курса на кораба между две навигационни опасности | 77 |
| Фигура 1.22. Очертаване на навигационните опасности, при използване на линейно програмиране | 79 |
| Фигура 1.23. Диаграма на използваните в корабоплаването алгоритми | 88 |
| Фигура 2.1. Геометрична интерпретация на движението при заобикаляне на препятствието от кораба | 115 |
| Фигура 2.2. Векторна зависимост между относителната скорост на препятствието V_i , скоростта на кораба V_m и скоростта на препятствието V_k | 119 |
| Фигура 2.3. Двуйерархична оптимизационна задача, като към позиция на две подзадачи | 130 |
| Фигура 2.4. Алгоритъм за реализация на двуйерархичната оптимизация при решаване на задача за разминаване на кораби | 135 |
| Фигура 3.1. Графично решение на задачата за разминаване на два кораба, представено на маневрен планшет в полярна координатна система | 163 |
| Фигура 3.2. Графично решение на задачата за разминаване на собствения кораб с една или повече цели чрез задаване на отклонение от пътя (ХТЕ) | 164 |
| Фигура 3.3. Сравнение между решенията на двуйерархичната задача за промяната на относителния курс на целта φ и изчислените стойности от навигационния симулатор ... | 176 |

| | |
|--|-----|
| Фигура 3.4. Планшетно решение на задачата за разминаване с начало $3'$ след откриване на целите | 183 |
| Фигура 3.5. Зависимост между началната дистанция до опасната цел и оптималния ъгъл на изменение на курса φ^* при една и две цели, получена като решение на двуйерархичната оптимизационна задача | 192 |
| Фигура 3.6. Парето графика на връзката между времето за маневра и разхода на гориво | 193 |

Списък на таблиците

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Таблица 1.1. | Нива на автономност на корабите, определени от ИМО | 32 |
| Таблица 2.1. | Принцип на създаване на алгоритъм за двуйерархична оптимизация при разминаване на кораби | 134 |
| Таблица 2.2. | Сравнителна таблица на параметрите на използвани методи за оптимизация с предложения подход | 144 |
| Таблица 3.1. | Данни за главния двигател на използваните модели контейнеровоз и танкер | 161 |
| Таблица 3.2. | Характеристики на използваните модели на собствен кораб (СК) контейнеровоз и танкер ... | 162 |
| Таблица 3.3. | Данни за курса и скоростта на собствения кораб и цел, на която се отстъпва път – сценарий 1. ... | 167 |
| Таблица 3.4. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 1.1. – начало на маневрата в третата минута от откриване на целта | 170 |
| Таблица 3.5. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 1.2. – начало на маневрата в шестата минута от откриване на целта | 171 |
| Таблица 3.6. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 1.3. – начало на маневрата в деветата минута от откриване на целта | 172 |
| Таблица 3.7. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 1.4. – начало на маневрата в дванадесетата минута от откриване на целта | 173 |
| Таблица 3.8. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 1.5. – начало на маневрата в четиринадесетата минута от откриване на целта | 174 |
| Таблица 3.9. | Сравнение на получаваните решения на оптимизационната задача и данните на навигационния симулатор | 177 |
| Таблица 3.10. | Сравнение на решенията на двуйерархичната | |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| | оптимизационна задача (2.18) и симулаторните данни – сценарий 1. | 179 |
| Таблица 3.11. | Данни за курса и скоростта на собствения кораб и целите, на които се отстъпва път – сценарий 2. | 182 |
| Таблица 3.12. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 2.1. – начало на маневрата в третата минута от откриване на целите | 184 |
| Таблица 3.13. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 2.2. – начало на маневрата в шестата минута от откриване на целите | 185 |
| Таблица 3.14. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 2.3. – начало на маневрата в деветата минута от откриване на целите | 186 |
| Таблица 3.15. | Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 2.4 – начало на маневрата в дванадесетата минута от откриване на целите | 187 |
| Таблица 3.16. | Сравнение на решенията на двуйерархичната оптимизационна задача (2.18) и симулаторните данни – сценарий 2. | 188 |
| Таблица 3.17. | Сравнителен анализ на резултатите от двуйерархичната оптимизация на сценарий 1. и сценарий 2. | 190 |
| Таблица 3.18. | Чувствителност на горивната функция G към коефициентите α и β | 196 |
| Таблица 3.19. | Обобщение на типовете маневри при двуйерархична оптимизация на маневрата за разминаване | 197 |
| Таблица 6.1. | Изпълнение на задачите пред дисертацията и тяхното позициониране | 223 |

Списък на използваните съкращения

| | |
|--------|--|
| CII | Carbon Intensity Indicator (Индикатор за въглероден интензитет) |
| COLREG | Collision Regulations |
| CRI | Collision Risk Index |
| DRL | Deep Reinforcement Learning (Дълбоко подсилващо обучение) |
| DSS | Decision Support System |
| EBVO | Ellipse-based velocity obstacle |
| ECDIS | Electronic Chart Display and Information System (Електронна картна и информационна система) |
| EEXI | Energy Efficiency Existing Ship Index (Индекс за енергийна ефективност на съществуващите кораби) |
| EMSA | European Maritime Safety Agency (Европейска агенция за морска безопасност) |
| FMM | Fast Marching Method |
| GVO | Generalized Velocity Obstacle (Обобщено подвижно препятствие) |
| IALA | International Association of Light Authority (Международна организация на маячните служби) |
| IMO | International Maritime Organization (Международна морска организация) |
| INS | Integrated Navigation System |
| MAAS | Maritime Autonomous Surface Ships (Морски автономни надводни кораби) |
| MEPC | Maritime Environment Protection Committee (Морски комитет по опазване на околната среда) |
| MPC | Model Predictive Control |
| MSC | Maritime Safety Committee (Морски комитет по безопасност) |

| | |
|------------------|---|
| NFAS | Norwegian Forum for Autonomous Ships (Норвежки форум за автономни кораби) |
| NLVO | Non-linear velocity obstacle |
| ORCA | Optimal Reciprocal Collision Avoidance (Оптимално реципрочно избягване на сблъсък) |
| PVO | Probability velocity obstacle |
| RL | Reinforcement Learning |
| RML | Relative Motion Line |
| ROCs | Remote Operation Centres |
| RVO | Reciprocal Velocity Obstacle (Препятствие с реципрочна скорост) |
| SMS | Safety Management System (Система за управление на безопасността) |
| SOLAS | Safety of Life at Sea (Международна конвенция за опазване на човешкия живот на море) |
| STCW | Standard of Training, Certification and Watchkeeping (Международна конвенция за подготовка и сертифициране на моряците и носене на вахта) |
| VDR | Voyage Data Recorder |
| VO | Velocity Obstacle (Подвижно препятствие) |
| VTs | Vessel Traffic Service (Брегова система за управление на корабния трафик) |
| БЛМ | Бърз линеен метод |
| ГА | Генетични алгоритми |
| ГМ | Геометрични методи |
| ГП | Генетично програмиране |
| Д _{нк} | Дистанция за най-кратко сближение |
| Д _{нкд} | Дистанция за най-кратко сближение – допустима |
| ЕМОМ | Еволюционен многоцелеви оптимизационен метод |

| | |
|--------|---|
| ЕП | Еволюционно програмиране |
| ЕС | Еволюционни стратегии |
| ЗНБ | Зона за навигационна безопасност |
| ИА | Интелигентен алгоритъм |
| ИНС | Интегрирани навигационни системи |
| ИПП | Изкуствено потенциално поле |
| КМ | Кооперативни методи |
| МК | Мравчена колония |
| МППССМ | Международни правила за предпазване на съдовете от сблъскване на море |
| ОП | Обучение чрез подсилване и AI методи |
| ПВМ | Полеви и вариационни методи |
| ПП | Подвижно препятствие |
| РЧ | Рояк частици |
| СК | Системи за квалификация |
| ТИ | Теория на игрите |

Глава първа

АНАЛИЗИРАНЕ НА ИЗТОЧНИЦИТЕ НА ИНФОРМАЦИЯ, НЕОБХОДИМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ДВИЖЕНИЕТО НА КОРАБА

Първа глава от изследването представя задълбочен анализ на съвременния навигационен процес в контекста на нарастващата автоматизация и навлизането на автономните и безекипажни кораби. Разгледани са основните тенденции в развитието на морските надводни автономни кораби (MASS), обхватът на международните и местните регулаторни рамки и предизвикателствата, произтичащи от човешкия фактор, технологичните ограничения и динамиката на корабния трафик. В частта е структуриран навигационният процес на концептуално и процедурно ниво, като са анализирани неговите подпроцеси, информационни зависимости и условията на плаване. Особено внимание е отделено на концепцията за зона за навигационна безопасност (ЗНБ), нейните различни модели и факторите, които определят формата и размера ѝ при различни навигационни ситуации. В заключение са представени основните методи и алгоритми за оптимизация на корабните маршрути – глобални и локални – като основа за автоматизирано вземане на решения в динамична морска среда.

1.1. Описание на навигационния процес

Днес в корабоплаването се извършва истинска революция. Тя се осъществява в научната сфера като цяло, както и във всички кореспондентни клонове на науката. Нейното влияние може да промени както характера на морските превози, така и стратегическото мислене в корабоплаването. Привидно спокойната територия от дневния ред на Международната морска организация се изправя пред предизвикателствата на новото време – постепенната реализация на идеята за конструиране и използване на автономни кораби.

Човешките възприятия за използването на автономни кораби са все още ограничени от традиционните начини за превоз на стоки и хора по море. Показателен е фактът, че корабоплаването е транспортният сектор, в който последно навлиза идеята за автономност на транспортните средства. Традиционният подход при решаването на системни проблеми, както и многобройните регулаторни органи, често са пречка или водят до забавяне на развитието и прилагането на новите технологии в отрасъла. Практиката логично налага въпроса дали днешните моряци и тяхната теоретична и практическа подготовка са достатъчно адекватни на съвременните технологии, използвани в корабоплаването. Тази риторика прозира в студията на ИМО – Procedures for Port State Control (2017), където се дават указания към инспекторите да засилят контрола върху компетентността на моряците от всички нива на отговорност (ИМО 2018).

Въпреки въвеждането на нови технологии чрез съвременните комуникационни средства, ECDIS, интегрираните навигационни системи, които улесняват работата на мостика, навигационните аварии продължават да заемат значително място в морската статистика (МАІВ 2018).

Друг въпрос, който намира естествената си среда в масовата морска общественост, се отнася към мястото на автономните кораби в съвременното корабоплаване. Скептицизмът на повече от половината участници в проведено от автора интервю сред студенти и курсисти от Висшето военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“ показва, че идеята трудно пробива път.

Подобни настроения личат и в коментарите към статия на блогъра Улф Рихтер, публикувана на 1 септември 2018 г. в сайта му wolfstreet.com. В рамките на пет дни, от 1 до 6 септември 2018 г., участвалите осемдесет и двама души в дискусиата показват поляризирани мнения за въвеждането на автономни кораби (Richter 2018).

През последните години се наблюдава повишена активност сред научната общност за изследвания в областта на морските надводни автономни кораби (maritime autonomous surface ships, MASS). На този етап в

публикациите основно се прави анализ на сегашното състояние на корабоплаването и ограниченията пред използването на автономен морски транспорт в международно плаване (UNCTAD 2017). Научни екипи от Китай, Франция, Финландия, Германия, Норвегия, Холандия, Обединеното кралство и т.н. провеждат изследвания в проекти, свързани с МНАК (Porathe et al. 2013; Jokioinen 2016; Tommi, Lauri 2017; Anonymous [no date]; Cancan (Editor) 2017; Vuxbaum 2018; International Shipping Network (Editor) 2016).

Сред тях има някои известни проекти, като кораб Yara Birkeland (Jokioinen 2016), кораб ReVolt (Tommi, Lauri 2017), 24 TEU и 240 TEU каботажни електрически кораби (Anonymous, n.d.), кораб iDolphin (Cancan (Editor) 2017), кораб Aries на компанията COSCO Shipping (Vuxbaum 2018), кораб „Хрьон“ (International Shipping Network (Editor) 2016). Освен това страните изграждат едновременно автономни полигони за изпитване на надводни кораби, за да създадат условия за бъдещи изследвания и изпитания, като изпитателен район Jaakonmeri (DIMECC 2016), изпитателен район Trondheim (NMA 2016), изпитателен район Yamamoreand (WMN 2017), изпитателен район – фиордите на Осло (Offshore Energy 2017), изпитателен район Гренландия (NFAS [no date]), изпитателен район Zhuhai Wanshan (News Sina 2018).

Друга голяма част публикации представят проблемите, по които работят големите консорциуми, като Mitsui O.S.K. Lines; Ltd. – Nippon Yusen Kaisha; Rolls Royce – Kongsberg; Yara; DNV GL. В анализите на първо място се цитират определенията за понятието „кораб“, представени в конвенции и резолюции на ИМО, както и ролята на екипажа, и неговото физическо присъствие на кораба. Предложени са и са приети критериите за автономност, според които е направено разделянето на корабите и принадлежността им към съответното ниво (табл. 1.1) (ИМО 2017; DMA 2017; Decetelaere 2017; Lloyds Register [no date]; Johns 2018).

Таблица 1.1. Нива на автономност на корабите, определени от ИМО

| Категория кораб | | Ниво на автономност | Събиране на информация | Анализ на ситуацията | Решение | Действие |
|----------------------|--------|---------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| Конвенционален кораб | | 0 | Човек | Човек | Човек | Човек |
| | | 1 | Машина/ Човек | Човек | Човек | Човек |
| „Умен“ кораб | | 2 | Машина | Машина/ Човек | Човек | Човек |
| Автономен кораб | Ниво 1 | 3 | Машина | Машина | Машина / Човек | Човек |
| | Ниво 2 | 4 | Машина | Машина | Машина | Машина / Човек |
| | Ниво 3 | 5 | Машина | Машина | Машина | Машина |

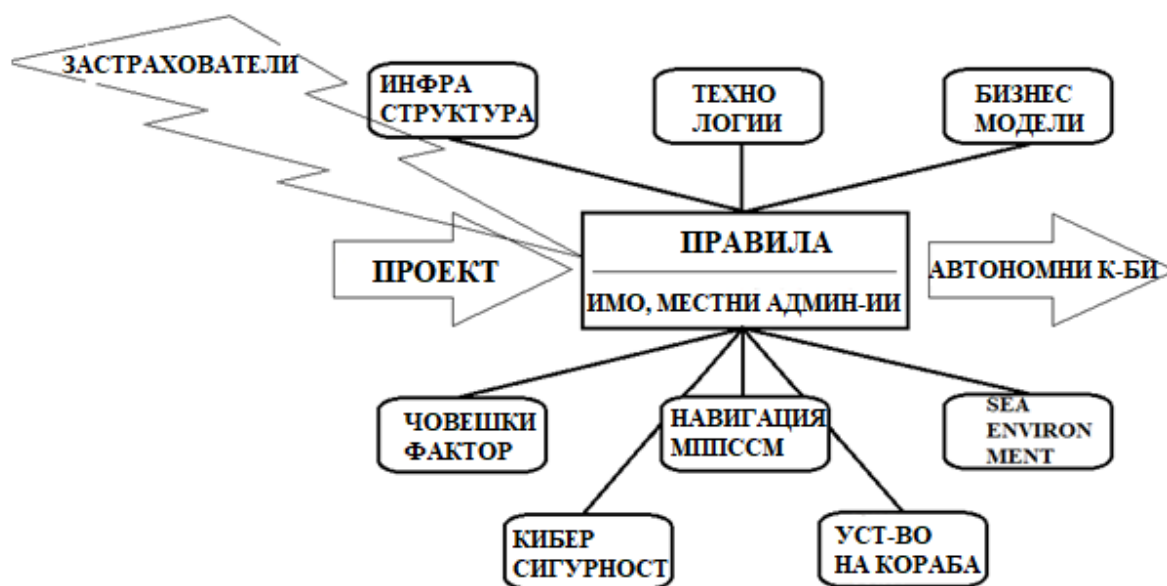
Други автори концентрират вниманието си върху законовите бариери в сега съществуващото местно и международно законодателство. В своята студия „Долу ръцете от палубата“ (All hands off deck?) Люси Карей прави подробен анализ на всички международни документи, приети от ИМО, с акцент върху възможността за редуциране на екипажите и използването на автономни кораби съвместно със сега съществуващите в международно плаване (Carey [no date]). Но тази и другите цитирани публикации като че ли поставят повече въпроси, отколкото дават отговори на проблемите, които вълнуват цялата морска общественост.

Автономните кораби вече са факт. На 3 декември 2018 г. беше извършен демонстрационен преход между финландските пристанища Parainen и Nauva на ферибота Falco (Rolls-Royce 2018). По този начин предвижданият от анализаторите като начален период на експлоатация – 2020 г., беше изпреварен с две години (Carey [no date]; Asia Shipping Media Pte Ltd [no date]).

Бързото развитие на работните проекти изисква бърза реакция от всички заинтересовани страни. Не са малко скептично настроените изследователи (Sriwijaya 2016; McAfee et al. 2012), които поставят като приоритетно

препятствие липсата на промени в законодателството, както и най-важният аргумент от гледна точка на търговската експлоатация на корабите – мнението на застрахователите за нивото на отговорност.

Обстоятелствата, които се определят като настоящи бариери пред използването на автономни кораби в международно плаване, са показани на фигура 1.1.



Фигура 1.1. Бариери пред използването на автономните кораби за международни превози

Фигурата обобщава представената на морската общественост, в това число и всички последователи на разглежданите процеси, база за решаване на съпътстващите автономните кораби открити въпроси. Чрез предложената схема на връзките между отделните компоненти се поставя акцент върху правилата, които трябва основно да се развият в полза на автономните и безекипажните кораби. Международните правила предстои да се създават, развиват и усъвършенстват. Знак за добра воля от страна на ИМО беше даден на 99-ата (16 – 25 май 2018 г.) и стотната (3 – 7 декември 2018 г.) сесия на Комитета по морска безопасност (Maritime Safety Committee, MSC). В дневния ред на двата форума беше включен въпросът за бъдещото внедряване и

използване на морските надводни автономни кораби (Maritime Autonomous Surface Ships, MASS) (MSC 2018).

Международният морски комитет за опазване на околната среда (Maritime Environment Protection Committee, MEPC) също отдели внимание на автономните и безкипажните кораби в своя дневен ред. На 73-тата сесия на Комитета беше преценено да се изчакат решенията на MSC от следващите сесии, за да се синхронизират действията на двата комитета (IMO 2018b). Този факт е показателен за всеобхватната отговорност на международната морска общественост и повишения интерес към опазване на околната среда.

По друг начин обаче стои въпросът за създаване на местни правила за плаване на автономни и безкипажни кораби. Промените в местното законодателство на крайбрежните държави зависят само и единствено от желанието на местните морски администрации. В границите на териториалното море, където се простира тяхната отговорност, може да се установяват правила, непротиворечащи на международните, които да подпомагат и да стимулират процеса. Създаденият на 4 октомври 2016 г. Норвежки форум за автономни кораби (Norwegian Forum for Autonomous Ships, NFAS) е инициран от Норвежката морска администрация, Норвежката брегова администрация, Федерацията на норвежките индустриалци и още други 30 организации, и 110 частни лица (NFAS 2018). Чрез NFAS държавната власт прави възможна реализацията на проекта на компанията YARA, построяването и пускането в експлоатация на автономния кораб YARA Birkeland.

Компанията публикува подробна информация на официалната си интернет страница, откъдето се вижда, че първоначално корабът ще бъде управляван от екипаж, а от средата на 2020 г. ще бъде напълно автономен. Създателите на YARA Birkeland се фокусират върху опазването на околната среда, като за задвижването му ще използват само електрическа енергия. Така проектът ще се превърне в първия, който не произвежда никакви вредни емисии.

От гледна точка на общественото развитие автономните кораби представят редица значителни възможности:

- Опазване на околната среда чрез икономия на гориво и използване на алтернативни източници за задвижване;
- Повишено ниво на безопасност в открито море и пристанищни райони;
- Значително повишаване на икономическия ефект и продуктивността на корабите;
- Оптимизиране на веригата за доставки чрез използване на информационни технологии;
- Подобрена инфраструктура за превози между близки пристанища и места със засилен корабен трафик.

От анализите дотук може да се направи изводът, че процесът на конструиране и последваща експлоатация на автономни и безекипажни кораби е високотехнологичен и екологичен. За успешната реализация са необходими специалисти с адекватно образование, квалификация и умения, които да съответстват на изискванията на времето.

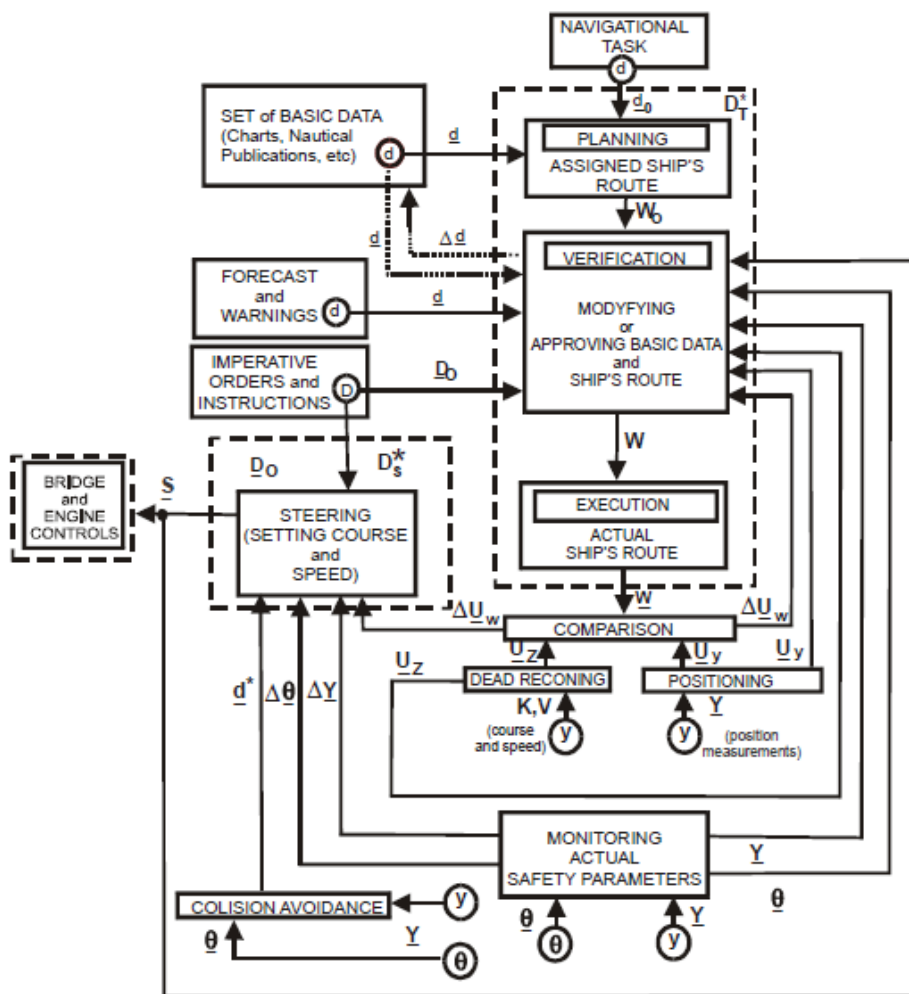
Създаването на безекипажни и автономни кораби цели, на първо място, да реши проблемите с участието на човешкия фактор в процеса на управление на кораба по предварително утвърдения план за преход. Стремещът за минимизиране на човешката намеса в плаването по конкретен маршрут е в основата на определенията за безекипажен и автономен кораб, както и в приетата от някои корабни регистри и Международната морска организация (ИМО) определения за степента на автономност (ИМО 2016; DMA 2016; DNV GL 2018). Общият знаменател, дори и за изложените в табличен вид нива на автономност (табл. 1), е степента на участие на екипаж или брегови център за управление на потоците информация към кораба, изпълнението на обичайни корабни дейности на борда, както и вземането на управленски решения. Друг поглед върху проблема представят Хъл и др. (Hult et al. 2019), които в своята публикация застъпват тезата, че автономността в корабоплаването е останала в Средните векове и с навлизането на технологиите, особено на

комуникационните, в отрасъла автономността вече има други измерения. В своя ежегоден доклад от 2019 г. и предварителния обзор от 2020 г. Европейската агенция за морска безопасност (EMSA) посочва, че 65,8% от инцидентите с кораби в европейски териториални води в периода 2011 – 2018 г. и 2014 – 2020 г. са в резултат от човешки грешки (EMSA 2019; 2021).

Голям брой изследователи считат, че автономността се изразява преди всичко в ненамеса на екипажа и друг управленски персонал в навигационната дейност на кораба. Тъй като навигационният процес е насочен към безопасно плаване по зададен маршрут и разминаване с други кораби от трафика, усилията на изследователите са насочени към създаването на алгоритми за избягване на опасно сближение. Тази тенденция в корабоплавателната наука датира още от втората половина на XX век (Munk 1989) и продължава с множество публикации и до днес. Изследванията в тях са фокусирани върху двата основни навигационни проблема – създаване и плаване по безопасен маршрут и безопасно разминаване с подвижни и неподвижни цели (Grinyak 2016; Lazarowska 2017; Johansen et al. 2016; Zhang, Furusho 2016; Georgieva 2018; Belev et al. 2019).

1.2. Структура на навигационния процес

За да се автоматизира плаването на кораба по зададен маршрут самостоятелно, без екипаж, е необходимо да се опише същността на навигационния процес и да се представи неговата структура. Общото описание на навигационния процес, предложено от Кайтан Джаковски (Jackowski 2001), включва всички функции и процедури, които съставляват термина „навигация“. Към тях авторът причислява управлението на кораба и неговото движение спрямо предварително изготвения и одобрен план за преход. Принципно навигационните функции и процедури следват посочения по-долу модел (фиг. 1.2):



Фигура 1.2. Структура на навигационния процес според Джаковски (Jackowski 2001)

- Планиране на прехода.
- Управление на маневрите на кораба, за да се удържа на планираната линия на курса и да се избегне опасно сближение с подвижни и неподвижни цели.
- Наблюдение на движението по планирания път чрез периодично определяне на мястото на кораба, следването на курса, скоростта и изчисляване на изминатото разстояние.
- Непрекъсната проверка и ако е необходимо, изменение на планирания маршрут, в съответствие с текущите изисквания и променящата се обстановка.

В основата на изпълнението на процедурите е процесът на събиране, обработка и използване на навигационна информация. Тя дава възможност да се извърши адекватен анализ на обстановката и да се вземат решения за изменение на елементите на движение на кораба, ако е необходимо, за да се изпълнят заложените параметри за безопасност.

Основната и присъща на корабоплаването задача по същество е навигационна и цели безопасното преминаване на един кораб по предварително начертан маршрут от точка на тръгване до точка на пристигане. Безопасността на морския преход изисква избягване на навигационни опасности (обикновено препятствия от всякакъв вид) и минимизиране на навигационния риск. Второто изискване се постига чрез избягване или плаване с повишено внимание в райони с неблагоприятни метеорологични условия, натоварен корабен трафик или неспецифични за навигационния процес условия, каквито са районите с пиратски нападения.

Задаването на навигационната задача пред всеки кораб и нейното изпълнение е навигационен процес, който може да се раздели на два етапа: планиране на прехода и изпълнението на плана. И двата етапа са дефинирани чрез характеристиките на кораба и преобладаващите външни условия и обстоятелства.

Копач и колектив в своя публикация (Korasz et al. 2003) представят също виждането си за структурата на навигационния процес. Авторите се базират на регламентите в STCW-78, за да представят навигационната функция като част от предназначението на кораба. Нейното съдържание включва:

- Осигуряване на безопасността на кораба и ефективната му експлоатация на море.
- Оказване на помощ на кораби и/или хора в опасност.
- Подпомагане на изпълнението на основните задачи на кораба.

Навигационната функция е част от навигационния процес, който се състои и от:

- Планиране на прехода.
- Последователност от действия и дейности за изпълнението му.
- Периодичност на мероприятия на мостика по изпълнение на фиксирани процедури, в съответствие с навигационните обстоятелства около кораба.

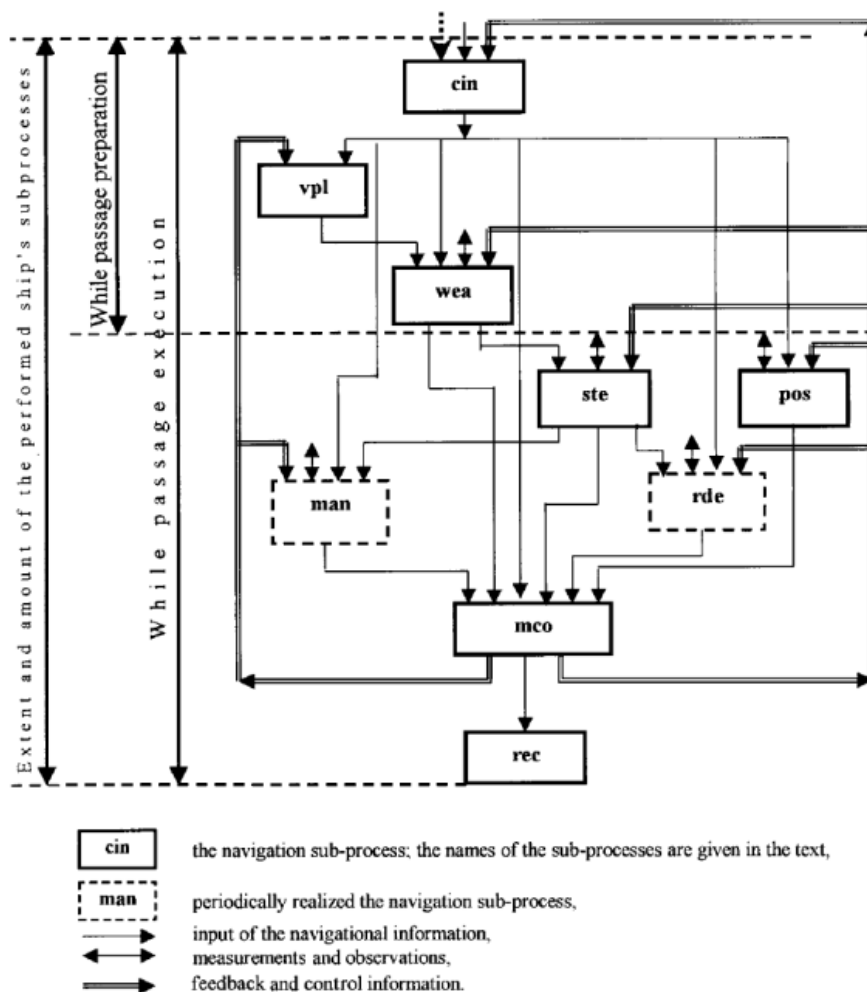
Целта на изградената по-горе структура е да осигури безопасно и ефективно плаване, без ограничение на районите за неговото изпълнение.

Авторите предлагат и допълнително, по-подробно разделяне и описание на структурата на навигационния процес. Според изследването той може да се представи като сбор от следните подпроцеси:

- нав (nav) = навигационен процес;
- кии (cin) = комуникация и информация, насочени към подробно описание и осигуряване на навигационния процес;
- пп (vpl) = планиране на прехода;
- му (wea) = намаляване до минимум на загуби по кораба вследствие на състоянието на метеорологичните условия;
- укк (ste) = управление на кораба на курса
- омк (pos) = определяне на мястото на кораба на курса;
- умк (man) = управление на маневрите на кораба при необходимост;
- осо (rde) = отзоваване на сигнали за опасност и при спешни случаи, ако е необходимо;
- нкнп (mco) = наблюдение и контрол на навигационния процес. Този подпроцес включва наблюдение на навигационната обстановка около кораба, предотвратяване на опасно сближение с подвижни и неподвижни цели, корекции на курса, скоростта и планирания път при необходимост и периодични проверки на навигационното оборудване и системите за безопасност;
- зап (rec) = запис на плаването на кораба и навигационните елементи.

Важно е да се отбележи, че подпроцесът „наблюдение и контрол“ (нкнп) е най-значимият подпроцес по време на изпълнението на плана за преход (ИМО

1999; CFR 2016). Той на практика контролира и управлява всички останали подпроцеси (фиг. 1.3).



Фигура 1.3. Навигационен процес и съставляващите го подпроцеси
(Корacz et al. 2003)

Дотук и Джаковски (Jackowski 2001), и Копач (Корacz et al. 2003) разглеждат и анализират навигационния процес от позицията на плана за преход и елементите, включени в него, според международните документи. Факторите, които определят етапите на плаване, отнесени към безопасността на кораба, очертават друг вид на процеса, с акцент върху навигационните дейности при плаване в различни райони от Световния океан. В монографията „Управление на енергийната ефективност на корабите“ авторът (Белев 2017) анализира навигационния процес от гледна точка на планирането на рейса и

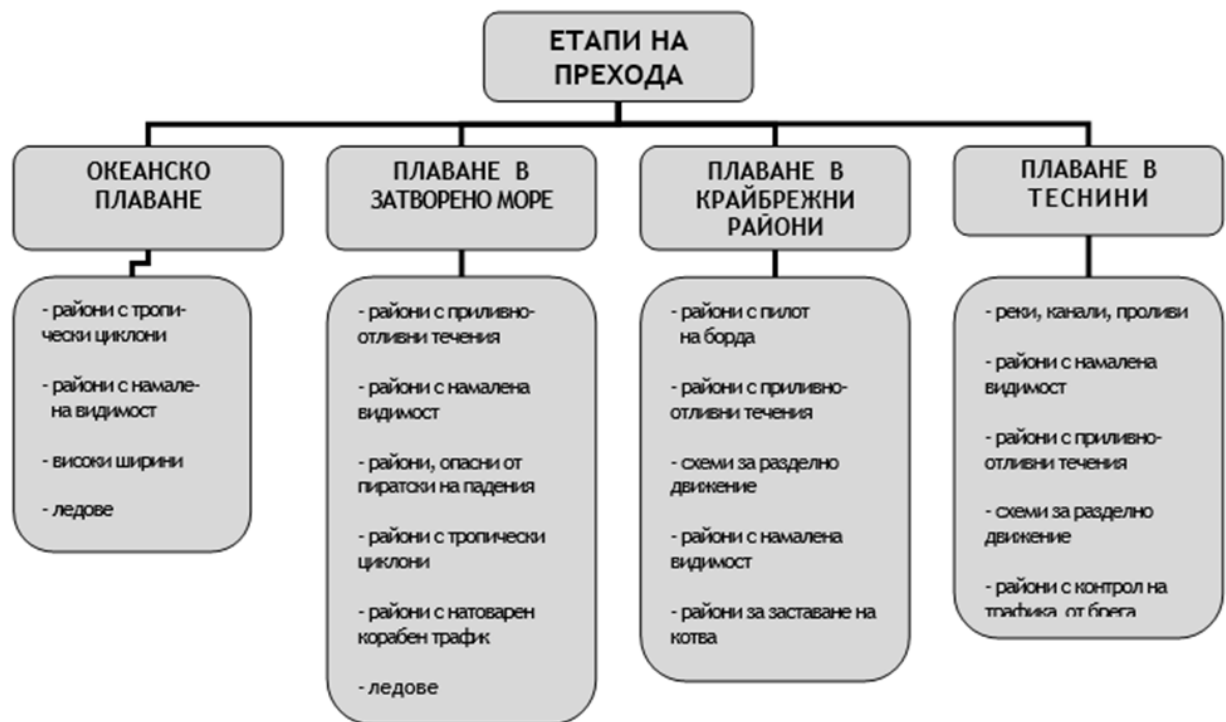
търговско-икономическите и експлоатационните задачи, решавани на кораба. Същността на навигационния процес най-общо се определя от хидрометеорологичните и навигационните фактори, характерни за заобикалящата кораба среда, в която той се движи. Въз основа на така направеното разделяне, плаването може да се структурира по следния начин:

- плаване в спокойни води;
- плаване в щормови условия;
- плаване в ясно време и при добра видимост;
- плаване в намалена видимост – от мъгла, силен дъжд, снеговалеж, пясъчна буря;
- плаване в морета с приливно-отливни явления;
- плаване в ледове.

Изброените по-горе характеристики целят да опишат навигационния процес според хидрометеорологичните условия на средата на плаване на кораба.

Според навигационните фактори, плаването бива:

- в открито море;
- в стеснени райони;
- в райони с разделно движение.



Фигура 1.4. Схема на условията за плаване на кораба на различни етапи от рейса (Белев 2017)

Такава класификация на навигационния процес и съставните подпроцеси определя навигационните задачи за всяко конкретно плаване. По този начин хидрометеорологичните и навигационните фактори подпомагат изпълнението на задачите от екипажа на кораба, както и предприемането на необходимите конкретни мерки за недопускане на навигационни аварии. На фигура 1.4 е показана същността на навигационния процес, според условията на плаване на различни етапи от рейса. В съдържанието на фигурата е акцентирано върху характера на навигационното осигуряване на отделните етапи от плана, според хидрометеорологичните и навигационните фактори, въз основа на които се създават конкретни мероприятия за прехода.

Подобна класификация на факторите, които въздействат върху навигационния процес, предлага и Джаковски (Jackowski 2001). Той ги разделя на три групи – постоянни, динамични и корабни характеристики, които имат въздействие върху маневреността и стабилитета.

Към *постоянните* фактори се числят:

- Формата и видът на бреговата черта, както и дълбочината в района на плаване. Тези фактори касаят крайбрежно плаване, където навигационните опасности се срещат по-често и мястото за маневриране на кораба е недостатъчно.
- Съществуващите системи за определяне на мястото на кораба и системите за комуникация.

Към *динамичните* фактори авторът причислява:

- Преобладаваща метеорологична обстановка в района на плаване.
- Случайна и внезапна промяна в условията на плаване.
- Състояние на корабния трафик.
- Императивни заповеди и изисквания, като инструкции от корабособственика или чартъора, приети сигнали за бедствие, привличане в операции по търсене и спасяване и др.

Третата група фактори включва:

- Характеристики, свързани с маневреността на кораба – максимална и икономична скорост, вид и състояние на винта, способност за завиване, скорост на поворота и др.
- Характеристики, свързани със стабилитета на кораба.

Заслужава да се отбележи, че стабилитетът на кораба и неговото съответствие на условията на плаване са фактори, които привидно нямат отношение към навигационния процес. Но състоянието на кораба е определящо за пригодността му да плава при определени навигационни условия. И обратно, очакваните навигационни условия на плаване поставят изискване пред екипажа за привеждане на устойчивостта на кораба към нормите за безопасност. Изследвания за влиянието на условията на плаване върху стабилитета на кораба, както и загубата на устойчивост, и потенциалните последици върху кораба, трафика и околната среда, са правени от автора и негов докторант. Резултатите са публикувани в поредица от научни

статии, отпечатани в чуждестранни специализирани издания (Andrei et al. 2013; 2014; Andrei, Belev 2013).

Реализацията на навигационния процес се извършва с използването на всички навигационни системи на корабния мостик, надеждно свързани помежду си и със способност за обмен и съхранение на навигационна информация. Необходимото навигационно оборудване се инсталира на всеки кораб, според изискванията на глава пета на Международната конвенция за опазване на човешкия живот на море (Safety of Life at Sea, SOLAS). Трябва да се отбележи, че навигационните системи на борда на съвременните кораби са все по-интегрирани и с възможност да изпълняват и други функции от корабната дейност. Интегрираните навигационни системи (ИНС) вече са неизменна част от оборудването на мостика. Освен изпълнение на обичайните навигационни функции и процеси, те наблюдават и контролират и други процеси извън навигацията.

Развитието на технологиите в корабоплаването от началото на XXI век – процес, част от който е и внедряването, и усъвършенстването на ИНС, заема все по-отговорно място в автоматизирането на процесите от гледна точка на рутинните дейности и осигуряване на многовариантност на решенията, свързани с навигацията на кораба. Цялостен анализ на теоретичното представяне показва, че автоматизирането на процеса по съставяне на план за преход и съпътстващите навигационни дейности, които гарантират безопасното плаване, изисква дискретизация на етапите. На тази база може да се отбележи, че съдържанието на навигационния процес, представено на фигура 3, най-много се доближава до идеята за парцелиране на необходимата информация за цялостното му осигуряване.

Условията на плаване на кораба са изходно начало за всяко изследване, свързано с възможността за автоматизиране на информационните потоци, и това трябва да се подчертае недвусмислено. Нужно е да се вземе предвид участието и на други съдове, каквито изобилстват в определени райони на плаване. Виктор Михайлович Гриняк нарича такава ситуация „колективно

движение на корабите“ (Гриняк 2006; 2015; Гриняк et al. 2015). Идеята, която авторът предлага с въвеждането на термина, е свързана с безопасността на плаване, и то в най-невралгичните точки от Световния океан – крайбрежията и подходите към пристанищата. Тази идея е споделена и от други изследователи, като общият модел на представяне на средата на плаване се основава на Международните правила за предпазване на съдовете от сблъскване на море (МППСС), местните правила за плаване, хидрологичната и метеорологичната обстановка в района, особености в движението на корабния трафик и др. (Tam et al. 2009; Tam, Bucknall 2010; Гаврилов, Семионичев 2012; Рябченко et al. 2010). Гриняк съвсем целенасочено въвежда понятието „колективно движение на корабите“, тъй като акцент в неговите изследвания, както и на другите цитирани автори, е бъдещото съвместно съществуване на конвенционални и автономни кораби.

Съвременната нормативна база определя изключителното право на капитана да взема решения, които касаят кораба, особено неговото движение. В действията си капитанът се ръководи от правилата на компанията корабособственик и от информацията, която постъпва на мостика от различни навигационни средства. Той може да получава разпореждания и съвети от оператор в брегова система за управление на трафика, както и от други участници в движението, но крайното решение за плаването на кораба се взема от капитана. Във връзка с това трябва да се подчертае, че системите за контрол на трафика, като част от формирането на информационния поток в навигационния процес, не трябва да се възприемат като контрол и управление на кораба в класическия смисъл. Задачата им се свежда до общо координиране на трафика чрез предаване на указанията на оператора (диспечера), а начин на изпълнение на тези указания се избира от капитана. От тази гледна точка терминът „система за контрол на трафика“ трябва да се разбира не като система за управление, а като система за осигуряване на информация и поддръжка на вземането на решение.

В представените дотук идеи за описание на навигационния процес, както и съвременните начини за управление на единичен кораб и корабен трафик, като ключова се явява думата „информация“. Източниците на информация, които са елементи от интегрирана навигационна система, осигуряват всичко необходимо за пълното описание на обстановката около кораба. На мостика на конвенционален кораб тази информация подпомага вахтения офицер или капитана при вземането на решение. В случай на частична или пълна автоматизация на навигационния процес, вземането на решение ще зависи от приоритетната информация. За тази цел е необходим алгоритъм, според който да се изгради йерархична структура на постъпващата на мостика информация. Изследванията на този етап не предлагат подобен алгоритъм, за какъвто и да е кораб, според неговото ниво на автономност. Вероятна причина за това е липсата на регулаторни изисквания както от международните конвенции, така и от правилата на класификационните организации. Един от начините за приоритизиране на навигационната информация е създаването на сценарии за решаване на конфликтни ситуации в различните участъци на зоната за навигационна безопасност на един кораб. За тази цел обаче е важно да се обоснове ясно и конкретно идеята за тази зона, нейната форма, размери и фактори, които я определят и регулират. Създаването на реалистични и работещи сценарии изисква прилагането на теорията на игрите към чувствителната зона от корабния трафик и пълното информационно осигуряване на процеса.

1.3. Зона за навигационна безопасност

Редица изследователи в публикациите си, датиращи още от 70-те години на XX век, предлагат идеята за обособяване около кораба на зона, в границите на която навигационната безопасност да бъде гарантирана. Ролята на вахтения офицер или на контролните прибори трябва да бъде насочена към запазване на тази зона чиста от подвижни и неподвижни цели, подводни и надводни опасности. Изследователите наричат това пространство „територия на кораба“

(ship domain). Проектирано върху решаването на въпросите за навигационната безопасност, това пространство може да бъде определено като „зона за навигационна безопасност“. Въвеждането на това понятие в специализираната литература обикновено се свързва с безопасното разминаване на собствения кораб с подвижни цели. Със същата важност и актуалност обаче смисълът му касае осигуряването на безопасно преминаване и покрай неподвижни опасности – надводни или подводни.

Принципите, на които се основава философията на зоната за навигационна безопасност (ЗНБ), са:

- Осигуряване на плаването на кораба в сложни условия, според изискванията на стандартите за точност и оперативност на навигационната информация на ИМО и Международната организация на маячните служби (IALA).

- Осигуряване на безопасна полоса на плаване на кораба в сложни условия, съобразена с линейните му размери и маневрените характеристики, определени от неговата инерция (скорост и маса).

Концепцията за създаване на ЗНБ е реализирана в два варианта, в зависимост от начина за контрол на движението:

- като зона около кораба, при регулиране на движението му с помощта на брегови системи за управление (Vessel Traffic Service, VTS);

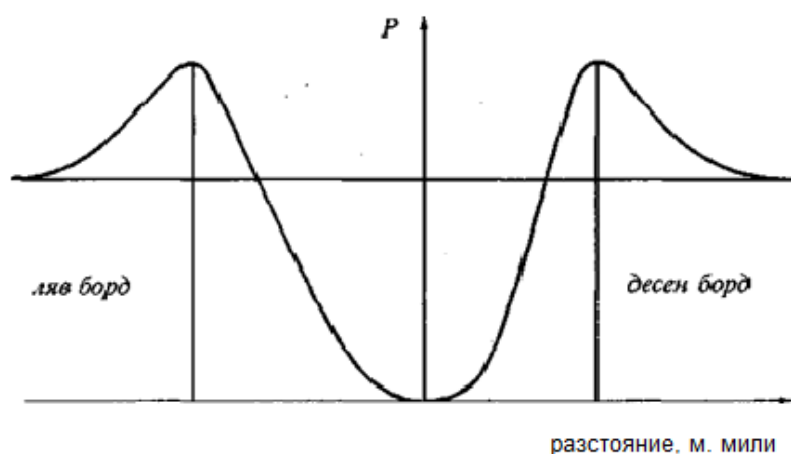
- като зона около кораба, която се следи със собствени навигационни средства, предоставящи директно на вахтения офицер информация за опасност от сблъскване (Белев 1997).

За реализация на първия вариант, контрол на ЗНБ от VTS, се вземат предвид особеностите, при които тя се използва. Размерите на зоната се следят от оператор на бреговата радиолокационна станция, който, освен решението, което трябва да вземе за предотвратяване на опасно сближение, трябва да разполага и с време за предаване на информацията до корабите от трафика. С оглед на това най-удачна е предложената от руския учен С. Г. Погосов форма елипса, ориентирана с голямата си полуос по посока на движението на кораба

(Погосов 1977). Тази идея доразвиват А. Баскин и Г. Москвин, които за улеснение на изчисленията предлагат формата на ЗНБ да бъде правоъгълник със страни, равни на осите на елипсата. Освен това за размерите трябва да се отчита времето от момента на получаването на сигнал за опасност от оператора до момента на подаването от вахтения офицер на команда за маневра на кораба (Баскин, Москвин 1986).

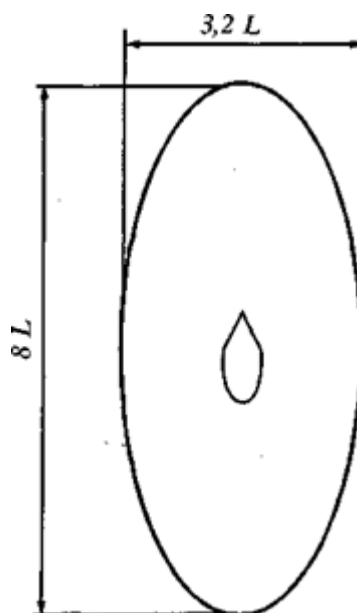
При създаването на ЗНБ около кораба, следена със собствени навигационни средства, освен динамичните характеристики на собствения кораб, се отчитат и елементите на ситуацията по опасно сближение с подвижни и неподвижни цели. В този случай концепцията за ЗНБ е важна и полезна за контролиране и регулиране на корабния трафик. Тя се използва широко при извеждането на критерии за опасно сближение, за оценка на риска, за планиране и създаване на VTS, за избягване на сблъскване и т.н.

За първи път концепцията за създаване на ЗНБ около собствения кораб е представена от Ю. Фуджи и К. Танака през 70-те години на XX в. (Fujii, Tanaka 1971). Учените предлагат модел на базата на изследване на трафика в японски води и определят зоната за навигационна безопасност като разстоянието около кораба, на което вероятността за преминаване на целите достига максимална стойност (фиг. 1.5).



Фигура 1.5. Определяне на размера на ЗНБ в канали (Fujii, Tanaka 1971)

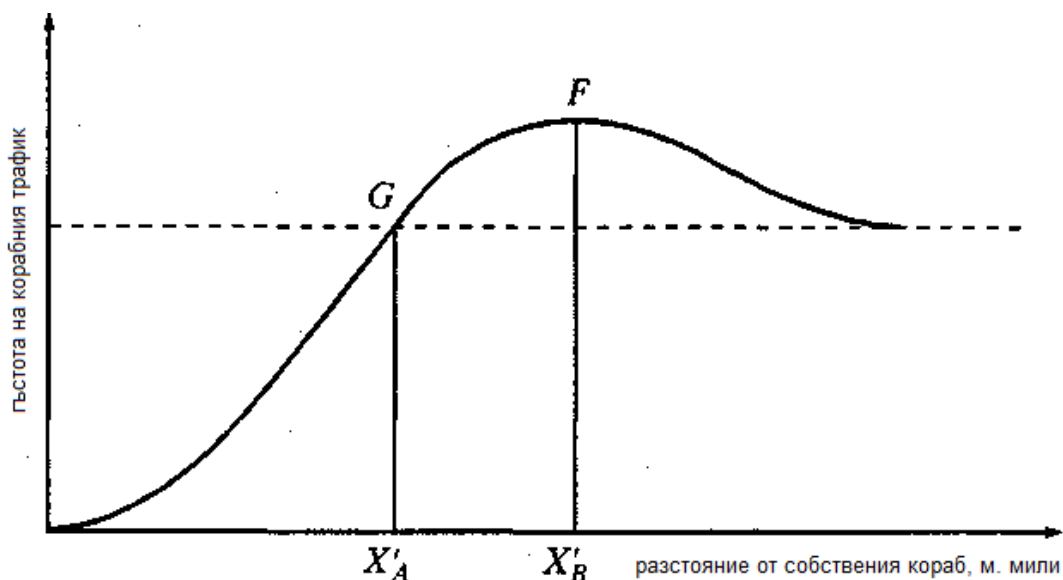
Така формата на ЗНБ се представя като елипса с размери, показани на фигура 1.6 (Fujii, Tanaka 1971).



Фигура 1.6. Модел на ЗНБ, предложен от Фуджи и Танака (Fujii, Tanaka 1971)

По-късно Елизабет Гудуин потвърждава съществуването на ЗНБ и я доразвива за плаване в открито море. Дефинира я като ефективно пространство около кораба, което корабоводителят се стреми да запази чисто от навлизането на други кораби или обекти (Goodwin 1975). Тя използва това определение и за извеждане на количествена оценка на навигационната безопасност.

В публикация на Гудуин по темата размерът на зоната се определя от гъстотата на корабния трафик, независимо от това, че изследванията са направени за открито море. Кривата на разпределение на вероятността за пресичане на пространството около собствения кораб, в зависимост от разстоянието, показва графиката на фиг. 1.7.

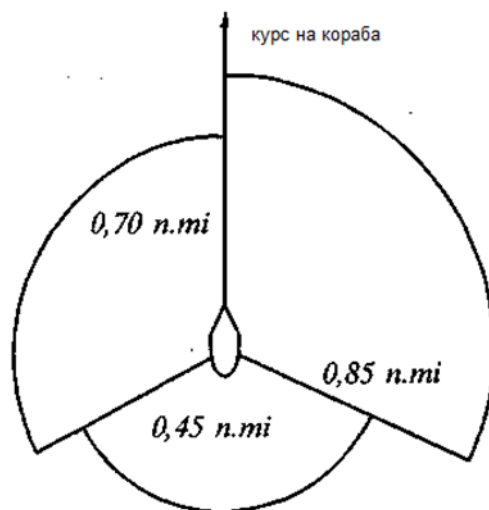


Фигура 1.7. Определяне на границата на ЗНБ (Goodwin 1975)

Според изследванията, границата се определя от т. G, чиято ордината представлява първото достигане на нивото на гъстота на трафика, което впоследствие остава относително постоянно. Размерът и фигурата на зоната се променят и вследствие на действието на допълнителни фактори: размера и скоростта на собствения кораб (Goodwin et al. 1983).

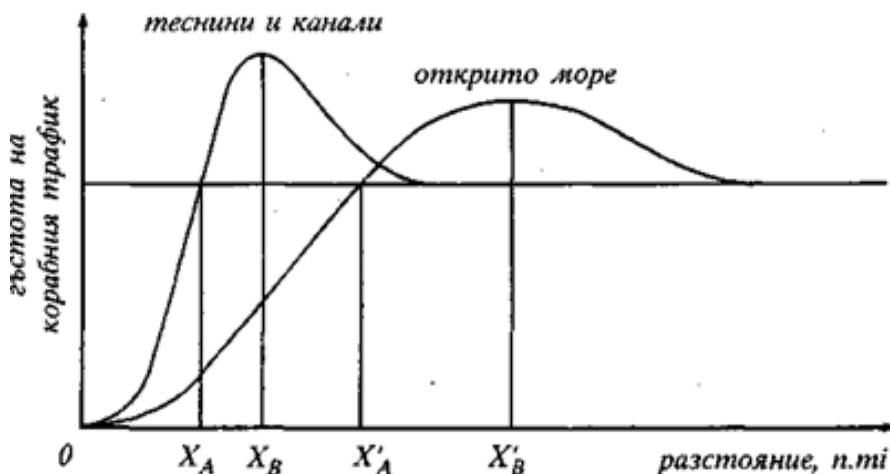
Въз основа на курсовите ъгли на светене на бордовите и кърмовата светлини, границата на зоната е разделена на три сектора (фиг. 1.8).

Фуджи и Танака и Гудуин съпоставят и гъстотата на корабния трафик, и отдалечеността му от собствения кораб – идеите си за ЗНБ извеждат на базата на приблизително еднакви изследвания, които представят в графичен вид. Това, което ги различава, е характерът на районите, за които осъществяват наблюденията и измерванията си: Фуджи и Танака изследват корабния трафик за Токийския залив и пролива Урага, където преобладава движението на малки



Фигура 1.8. Модел на ЗНБ за открито море

кораби и лодки, и обратно, теорията на Гудуин се основава на изследвания в сравнително широката територия на Северно море, в която трафикът на големи и малки кораби е смесен. Тази разлика определя и вида на кривите на графиката, представяща зависимостта между двата основни фактора за формиране на ЗНБ (фиг. 1.9).



Фигура 1.9. Зависимост на гъстотата на корабния трафик от разстоянието до собствения кораб (Белев 2017)

От фигурата се вижда, че особените точки са:

- X_A – разстояние от собствения кораб до границата на зоната за стеснени води, според изследванията на Фуджи и Танака;

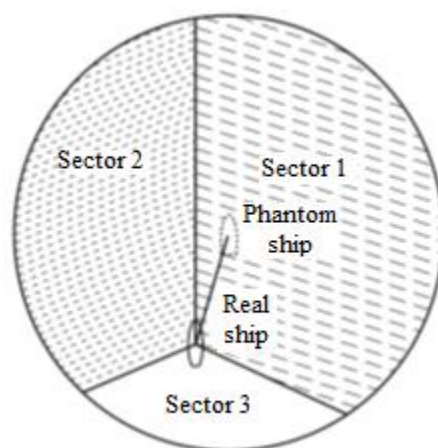
- X_B – разстояние от собствения кораб до границата на зоната при максимална гъстота на корабния трафик за стеснени води (Фуджи и Танака);

- X'_A – разстояние от собствения кораб до границата на зоната за открито море (Гудуин);

- X'_B – разстояние от собствения кораб до границата на зоната, при максимална гъстота на корабния трафик за открито море (Гудуин).

Макар че Фуджи и Танака и Гудуин изследват различни области на плаване, нанесените на графиката точки позволяват да се съпостави размерът на формата на ЗНБ, според теориите им. Видно е, че теорията на Фуджи и Танака изисква по-отдалечени граници за осигуряване на навигационната безопасност на кораба, което за плаване в сложни условия невинаги е възможно. От друга страна, разстоянието от кораба до границите на зоната, обоснована от Гудуин, е по-приемливо от гледна точка на практиката – неговата концепция е по-гъвкава с идеята за трите сектора и по-пригодна, дори в условията на натоварен корабен трафик.

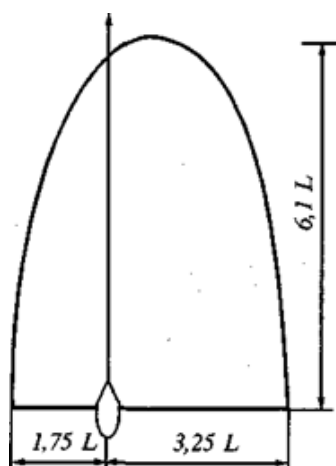
По-късно Дейвис развива идеята на Гудуин за вида на зоната. Той я представя като елипса с изместен център (фиг. 1.10), която е разделена на сектори. Въпреки разликата във формата, смисълът на двете предложения е един и същ (Davis et al. 1980).



Фигура 1.10. Зона на Дейвис (Davis et al. 1980)

Зоната на Дейвис е удобна за построяване на математически модел поради „гладката“ си форма. Освен това Дейвис предвижда увеличаване на размера на зоната, т.нар. *активна зона*, като по този начин се подава сигнал към вахтения офицер за предприемане на маневра при навлизане на цел.

В поредица от публикации Т. Колдуел представя изследванията си за размера и формата на ЗНБ в ситуация на опасно сближаване се кораби при изпреварване в стеснени води (Coldwell 1983). В този аспект, определението му за зоната за навигационна безопасност гласи: ЗНБ е ефективното водно пространство около кораба, което корабоводителят фактически запазва свободно, като има предвид разположението на останалите кораби. Границата на зоната е на разстояние, еквивалентно на максимума ХВ на кривата от графиката (фиг. 1.8). Моделът на зоната е показан на фигура 1.11.



Фигура 1.11. Модел на ЗНБ, предложен от Т. Колдуел (Coldwell 1983)

Друга фигура на зоната за навигационна безопасност предлагат руските учени М. Лесков и Ю. Баранов, в която все пак е запазена идеята за чистото от други цели пространство около кораба (Юдович 1982). Според тях, зоната трябва да позволява на собствения кораб маневра, чрез която да се компенсират опасните действия на другия кораб. Това трябва да се извърши посредством спиране на разстояние, равно на половината дистанция между корабите, след откриване на опасно маневриращата цел. В този случай

достатъчното разстояние за изпълнение на указаните действия се определя като радиус на окръжност около собствения кораб, както следва:

$$R_{03} = a + 2.S_V \quad (1.1)$$

където: a е разстоянието, което гарантира, че с използваната скала на радара ще бъдат определени елементите на движение на другия кораб, приближаващ се към опасната зона;

S_V – дължината на спирачния път на собствения кораб, в зависимост от скоростта.

Разстоянието, което е по-малко от полученото по формула (1.1), се нарича „опасно сближение“ – определение, което отчита надеждната далечина на радиолокационно откриване. Тази далечина задължително се включва в значението на параметъра и позволява да се свърже с критерия „безопасна скорост“ в случаите, когато на кораба се използва радар. Освен това определението „опасно сближение“ дава конкретен отговор и на въпроса за действията в зоната на звуковия контакт.

Същата форма на ЗНБ използва и Х. Хилгерт за дефиниране на понятието „ситуация по опасно сближение“ на море (Hilgert 1983). За изчисляване на радиуса на зоната той предлага формулата:

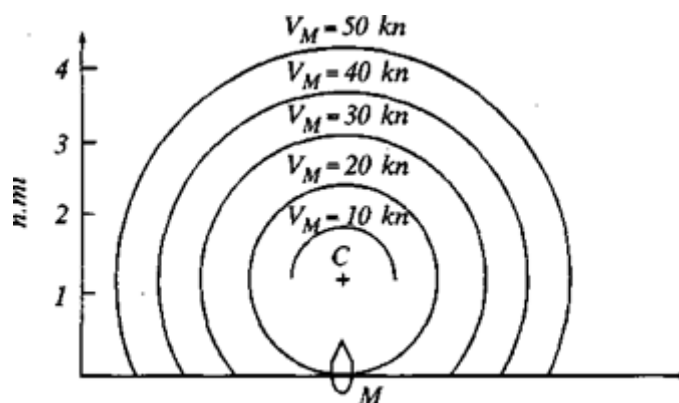
$$r \sim \Delta L + S(V_M) + D(V_K; \Delta t) \quad (1.2)$$

където: ΔL е разстоянието от мястото на радиолокационната антена до носа на кораба; за кораби със задна надстройка: $\Delta L \sim L_K$;

$S(V_M)$ – разстоянието, което собственият кораб изминава по инерция след промяна на хода на машината на стоп;

$D(V_K; \Delta t)$ – разстоянието, което изминава опасно движещата се цел със скорост V_K за времето Δt ;

Δt – време за оценка на ситуацията, за вземане на решение и за подаване на команда до реална промяна на скоростта и на двата кораба.



Фигура 1.12. Граница на ЗНБ, в зависимост от скоростта на собствения кораб (Hilgert 1983)

Центърът на окръжността е в т. С (фиг. 1.12). При графичното изложение Хилгерт приема отдалечението на т. С от мястото на собствения кораб М в началото на маневрата, изчислено за време $D_t = 3 \text{ min}$ и $V_M = 20 \text{ kn}$ (Hilgert 1983).

Зоната на навигационна безопасност на Коли (Colley et al. 1983) е разработена на основата на зоната на Дейвис. Моделът на Коли води началото си от сферата на управление на въздушното движение и се нарича „разстояние до зоната, отнесено към скоростта на изменение на това разстояние“ (range-to-domain over range-rate RDRR). След сравняване на тази величина с критичното ѝ значение за конкретен кораб, може да се определи точката или времето за начало на маневра за отклонение. Тази концепция получава широко разпространение и е възприета и от други автори, например Къртис и др. (Curtis et al. 1987).

Друг интересен начин за представяне на ЗНБ показват Дзю и колектив в публикацията си Domain and Its Model Based on Neural Networks (Zhu et al. 2001). Това е особено представяне на зоната около кораба, като се отчитат субективните особености на всеки корабоводител да възприема обкръжаващата обстановка. Определението му е основано на невронните мрежи, което позволява частично да се отчете влиянието на външната среда, като не се прибегва до сложни математически детерминирани модели за нейното описание. Структурата на невронните мрежи е подбрана така, че да се

работи с безразмерни променливи, като отношението между дължина и ширина на зоната, нормирано разстояние, нормирана далечина на видимост и т.н. Настройваните коефициенти на невронните мрежи също се явяват безразмерни величини.

От изложението дотук е видно, че дефинициите на цитираните автори за зона за навигационна безопасност около собствения кораб са различни. Разлики съществуват не само във формата, но и в случаите на приложение. Основните от тях касаят:

- Районите на приложение – открито море или стеснени води.
- Ситуацията по опасно сближение на собствения кораб с други цели – движение на пресичащи се курсове, изпреварване от страна на собствения кораб или целта.
- Методът, използван за определяне на отдалечеността на границата на зоната от собствения кораб, зависи от гъстотата на корабния трафик и от скоростта на собствения кораб.
- Изходната информация за линейните размери на изследваните кораби – малки или големи, с дължина от 50 м до над 300 м.
- Зависимостта на формата и размера на зоната от видимостта около собствения кораб.

Въпреки различията, единната концепция, използвана при обосноваването на ЗНБ, се отразява в някои общи характеристики на предложените идеи:

- Анализите на всички автори се отнасят към водното пространство около кораба, което трябва да бъде запазено чисто от подвижни и неподвижни потенциално опасни цели.
- Предложенията са съобразени с действията на собствения кораб и с целите според Международните правила за предпазване на съдовете от сблъскване (МППСС-72).
- ЗНБ се формира така, че да може да се наблюдава от един вахтен офицер в ситуация на две сближаващи се цели.

- Формално зоната се дефинира за един кораб, разположен спрямо останалите подвижни и неподвижни цели.

- Използват се едни и същи методи на изследване – симулиране на характерни ситуации и изучаване на натрупан опит от различни райони на плаване.

Ц. Джингсонг, В. Цяолин и В. Фенгчен от Морския университет в Далиан, Китай, анализират факторите, които определят размера и формата на ЗНБ. Проучванията си те базират върху изследванията на Фуджи и Танака, Т. Колдуел и Е. Гудуин, като се опират на зададените елементи на ситуация по опасно сближение – дистанция за най-кратко разминаване, и време за достигане на тази дистанция, ТНК. За оптимална по форма и размер авторите приемат представената от Е. Гудуин зона, отчитайки човешкия фактор и неговите възприятия (Jingsong et al. 1993).

Обобщението на условията за създаване на зоната за навигационна безопасност около собствения кораб прави възможно дефинирането на факторите, определящи нейната форма и размери:

1. Водещ е човешкият фактор – с неговите възприятия, моментно физическо и психическо състояние и ниво на професионална подготовка.

2. Размерите на кораба и по-специално дължината му.

3. Типът на кораба – за товарните кораби зоната е с по-малки размери, а за пътническите – с по-големи.

4. Условията на плаване – районът на плаване, хидрометеорологичните особености, организацията и регулирането на корабния трафик, видимостта и др.

5. Относителната скорост на сближаващите се със собствения кораб цели.

6. Плътноста на корабния трафик в района на плаване.

7. Пеленгът към приближаващата се цел.

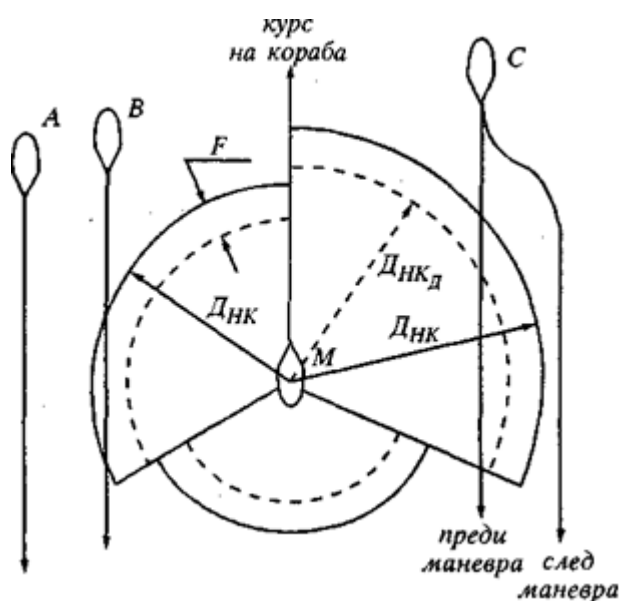
Въз основа на посочените седем фактора може да се направи изводът, че размерът на ЗНБ е динамична величина. Следователно от гледна точка на

нормалната практика е оправдано съществуването на област на размиване на границата на ЗНБ (фиг. 1.13). Тази област се формира, когато действителната дистанция за най-кратко разминаване, $D_{НКД}$ на собствения кораб с дадена цел, е малко по-малка от зададената, $D_{НК}$. Величината F се определя изцяло от субективния фактор, като отношението между $D_{НК}$ (дистанцията за най-кратко сближение), $D_{НКД}$ (дистанция за най-кратко сближение – допустима) и F формира необходимостта от извършване на маневра:

- Ако $D_{НКД} \geq D_{НК}$ (цел А спрямо кораб М), корабът се движи безопасно и не е необходима маневра.

- Ако $D_{НК} > D_{НКД} \geq (D_{НК} - F)$ (цел В спрямо кораб М), корабът не се движи безопасно според правилата, но рискът от сблъскване не е голям; в този случай все още е допустимо и да не се извърши маневра.

- Ако $(D_{НК} - F) > D_{НКД}$ (цел С спрямо кораб М), се създава ситуация на опасно сближение и трябва да се извърши маневра.



Фигура 1.13. Област на размиване на границата на ЗНБ (Белев 1997)

Концепцията за създаване на зона за навигационна безопасност около собствения кораб има практическо приложение за плаването на корабите. Особено актуална е при анализ на плаването в сложни условия, където

посочените седем фактора влияят не само върху собствения кораб, но и помежду си.

Зоната е критичен фактор за разминаване на корабите, затова нейната форма и размерите ѝ занимават изследователите и в по-ново време.

Пиетжиковски и колектив (Pietrzykowski et al. 2012), а по-късно и екип на Виелгош (Wielgosz, Pietrzykowski 2022) разделят пространството около кораба на декларативна зона и ефективна зона. По същество предложението не се различава съществено от разгледаните по-горе фигури – декларативната зона се предлага да бъде с форма на окръжност, а ефективната – с форма на елипса. Но в математическата формулировка на риск-анализа е заложена идеята за безопасно разминаване на безекипажни кораби, а на по-късен етап и автономни кораби. Определянето на пространство около кораба, наречено „минимално допустимо“, и друго – наречено „максимално допустимо“, дава възможност за контрол на риска от опасно сближение.

Определянето на достатъчно разстояние за реакция, предложено от авторите според големината на разминаващите се кораби, е добра предпоставка за безопасно разминаване и на автономни съдове.

Теорията за зона за навигационна безопасност, разгледана в контекста на темата на дисертационния труд, намира място в алгоритмите за решаване на навигационната задача, главно в райони с натоварен корабен трафик. Такива са предимно крайбрежните зони. Рядко обаче оптимизационните алгоритми за разминаване държат сметка за гореизложената теория.

1.4. Анализ на алгоритмите за решаване на навигационни задачи при плаване на кораб между две пристанища

Терминът „алгоритъм“ има широко приложение в различни области на науката. Смесът му се проявява най-добре там, където има изчислителен процес.

Определението за „алгоритъм“ в „Речник на българския език“, т. 1 (А – Б), издание на Българската академия на науките – Институт за български език

„Професор Любомир Андрейчин“ (ИБЕ 2001), гласи: „алгоритъмът е система от правила, които определят последователност от изчислителни операции, прилагането на които води до решението на дадена задача“. В контекста на определението са и представените по-долу алгоритми, създадени през годините на развитие и прилагане на математически теории и похвати за решаването на задачи от навигационния процес. Подредбата им не следва хронологията на тяхното създаване, тъй като нуждата за оптимизиране на конкретни елементи води до конкретна разработка. В същността си те са оптимизационни, като прилаганите критерии имат различен характер.

Класификацията на алгоритмите може да следва различна логика, според целта на използването им. За нуждите на изследването разделянето им се прави според ефекта от тяхното прилагане – глобален или локален. Глобалните алгоритми често се отнасят към планиране на път или планиране на движение (La Valle 2006). Тяхното прилагане се нуждае от натрупване на информация за заобикалящата среда, която се включва впоследствие при планиране на пътя до крайната цел.

Друга тяхна характерна особеност е продължителното време за изчисления. Така този тип алгоритми са неприложими към условия на рязка смяна на околната среда. За глобални се приемат алгоритмите за оптимизиране на презокеански маршрути.

Локалните алгоритми изискват кратко време за изчисления и това ги прави приложими при планиране на маршрут в динамична среда, тъй като те могат да реагират много бързо. Те се нуждаят от по-малко машинна памет, тъй като не е необходима информация за околната среда, която в дадения момент не е покрита от сензорите на кораба. За локални алгоритми се приемат алгоритмите за решаване на конфликтни ситуации между кораби или кораб и неподвижно съоръжение или препятствие в ограничено за маневриране пространство.

Глобалните алгоритми често се наричат предумишлени, докато локалните – реактивни или рефлексни (Borenstein, Koren 1991; Engelhardtsen 2007).

1.4.1. Алгоритми за оптимизиране на презокеански маршрути (глобални алгоритми)

Тези алгоритми намират приложение в работата на компании, които предлагат услугата „водене на кораби по презокеански маршрути“. Същността на работата им е да съветват капитаните на кораби за оптималния маршрут на плаване, за да бъдат избегнати райони с неблагоприятни метеорологични условия. Оптимизирането на прехода, което е същността на споменатата услуга, включва максимална безопасност и комфорт на екипажа, минимален разход на гориво, минимално ходово време или комбинация от тези фактори (Maki et al. 2011). В групата на тези алгоритми се включват:

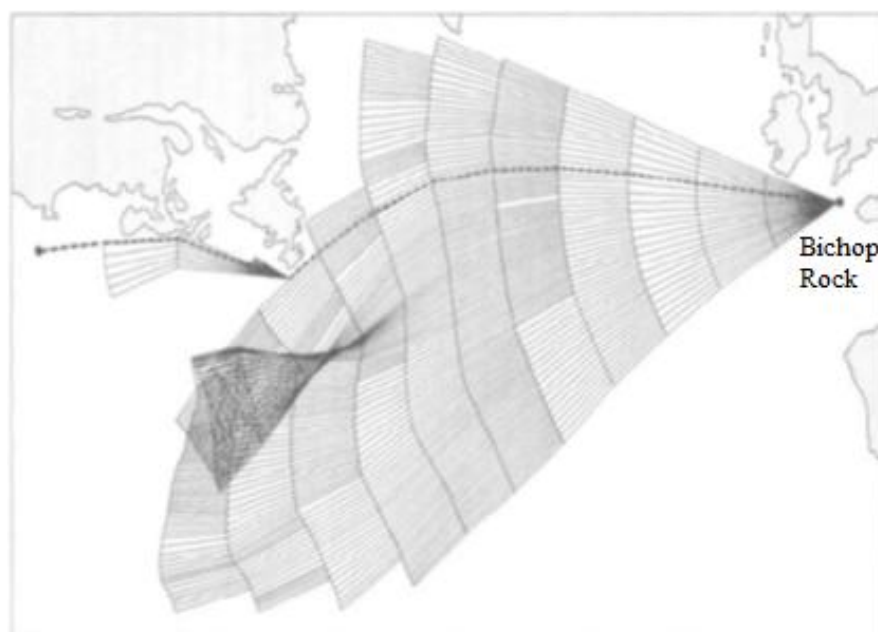
- вариационно смятане;
- динамично програмиране;
- изопонен и изохронен метод;
- алгоритъм на Дейкстра;
- еволюционни алгоритми.

Критериите за оптимизация на плаването на кораба, заложи в посочените по-горе алгоритми, касаят неговата енергийна ефективност, продължителността на плаване и безопасността (Coraddu et al. 2012; 2014; Calvert et al. 1991).

Според Мари и Картейл изброените алгоритми може да бъдат разделени в следните четири категории – изохронни методи, динамично програмиране, прилагане на вариационното смятане и генетични алгоритми (Marie, Courtielle 2009). Независимо от начина на групирането им, алгоритмите са обединени от общите им оптимизационни критерии.

1.4.1.1. Вариационно смятане

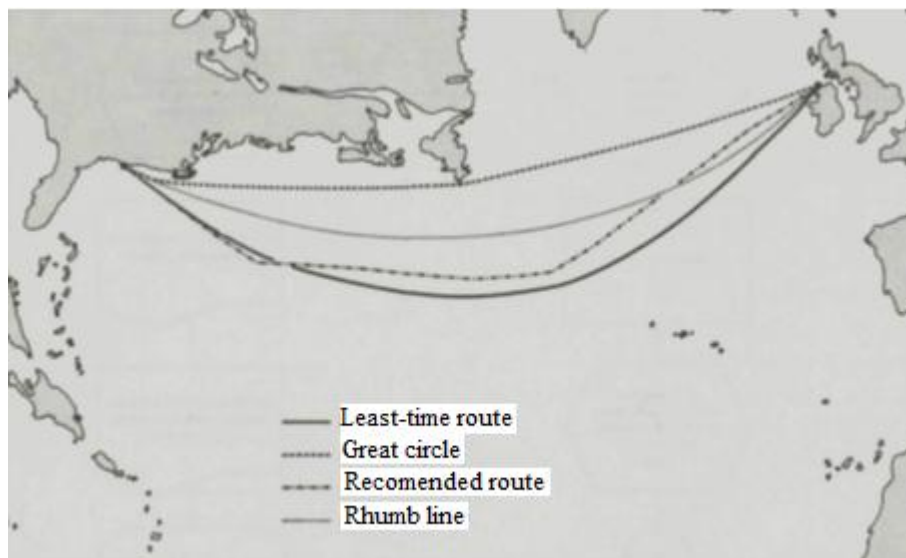
Оптимизационен критерий в алгоритмите, основани на вариационното смятане, е минималното време за плаване на кораба. Оптимизацията се постига чрез вариации на параметрите, които контролират траекторията на движение – време или скорост. В своя докторски тезис Биелсма обосновава теорията за пресмятане на пътя на кораба според условията на плаване (Bijlsma 1975). Неговият алгоритъм използва вариационно смятане, за да предостави относителен минимум на времето за плаване. За целта е необходимо да бъдат доставяни данни за вълнението в района на всеки 12 часа или интерполирани данни за всеки 6 часа. Точките, до които може да се достигне за такъв времеви интервал, определят координатна мрежа (фиг. 1.14).



Фигура 1.14. Прилагане на вариационно смятане за оптимален корабен маршрут (Bijlsma 1975)

Изборът на курс за плаване от началната точка до крайната зависи от големината и направлението на вълните в района на плаване. Оптималният маршрут може да бъде определен чрез прецизиране на градиентите на произволна целева функция, при непрекъснат процес на оптимизация (Walther et al. 2016). Приложението на вариационното смятане се комбинира с плаване по дъга от големия кръг и локсодрома между началната и крайната точка от

плана на кораба (фиг. 1.15) (Marie, Courtielle 2009). Алгоритъмът намира приложение при дълги презокеански преходи и когато продължителността на плаването е повече от 4 – 5 дни. За кратки преходи и плаване в крайбрежни води вариационното смятане не представя ефективни решения поради необходимост от чести промени на курса на кораба.

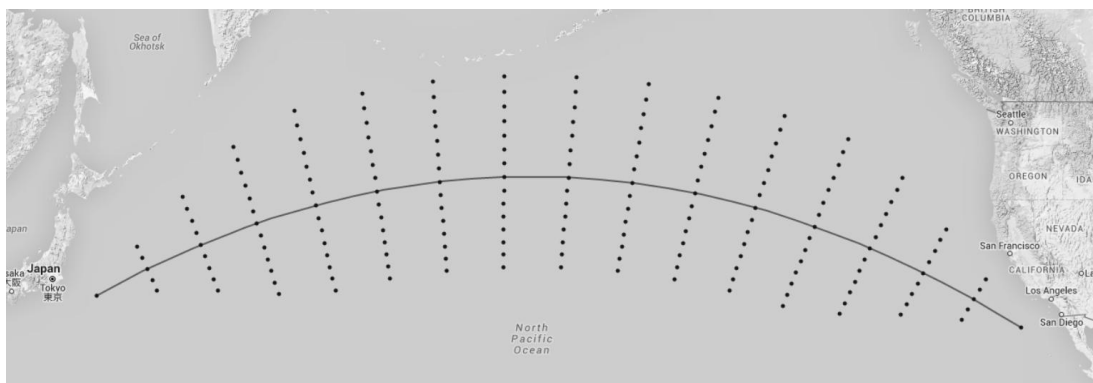


Фигура 1.15. Траектория на плаването, изчислена с вариационно смятане, ортодрома и локсодрома (Marie, Courtielle 2009)

1.4.1.2. Динамично програмиране

Динамичното програмиране за оптимизиране на процеси в корабоводенето е използвано за първи път от Белман, а по-късно и от Зополи. Принципът, който те залагат при решаване на задачата, гласи, че една оптимална политика в хода на реализирането си следва винаги първото решение. Независимо от това, какви са първоначалното състояние и първоначалното решение, останалите решения трябва да са следствие на оптимална политика, произтичаща от първото решение (Bellman 1957; Zoppoli 1972). Приложението на принципа на Белман в корабоводенето се осъществява чрез комбиниране с плаването по ортодрома. По протежение на ортодромичния път се разделя на сегменти/етапи. Всеки сегмент представлява поворотна точка от маршрута, получена чрез построяване на перпендикулярна права към ортодромата (фиг. 1.16). Оптимизационният критерий на

алгоритъма може да използва различни елементи от плаването на кораба. Например, ако се приеме, че скоростта на кораба е постоянна, то променливите параметри ще бъдат курсовете на кораба между отделните поворотни точки, съобразени с хидрометеорологичните условия на плаване. Този алгоритъм се нарича 2D динамично програмиране.



Фигура 1.16. Пример за 2D динамично програмиране (Bellman 1957)

Алгоритъмът 3D динамично програмиране включва още една променлива величина – време. Прилагането му използва динамиката на плаването, като етап на променлива чрез контрол на скоростта на кораба или мощността на главната машина. В този случай всеки етап от рейса е съставен от множество междинни етапи, като всеки от тях е определен от местоположението, т.е. от поворотна точка от мрежата, и от дискретно време. Тъй като пътят на кораба, неговите курсове и поворотни точки от мрежата, е предварително определен върху създадената мрежа, скоростта му остава единствената променлива, която може да се оптимизира.

Трябва да се отбележи, че и 2D динамично програмиране, и 3D динамично програмиране използват предварително създадена мрежа от поворотни точки, която се съхранява в паметта на изчислителната машина. Така се намалява изчислителното време, което, сравнено с други оптимизационни методи, се оказва сериозно предимство (Cui et al. 2016)

Друга разновидност на динамичното програмиране е итеративното динамично програмиране. Алгоритъмът е развит в MATLAB среда от Авголис, като авторът се базира на принципа за оптималност на Белман (Avgouleas

2008). Използването на 2D/3D динамично програмиране изисква фина мрежа от състояния на плаването, казано най-общо, за да се достигне до глобално оптимално решение. Това от своя страна води до увеличаване на времето за изчисления (Shao et al. 2011). Итеративното динамично програмиране взема предвид само една точка от мрежата, а не цялата мрежа от възможни състояния. Едно първоначално допускане за оптимален контрол на целия процес осигурява базата за итеративната процедура на частично постоянен контрол. Според Авголис, прецизният хидродинамичен модел на кораба е също толкова важен, както и математическото моделиране, и разработването на добър оптимизационен алгоритъм. За това той отделя внимание както на оптималната комбинация от курс и скорост на плаване за намаляване на разхода на гориво, така и на корабния хидродинамичен модел, и на модела на вълнението (Avgouleas 2008).

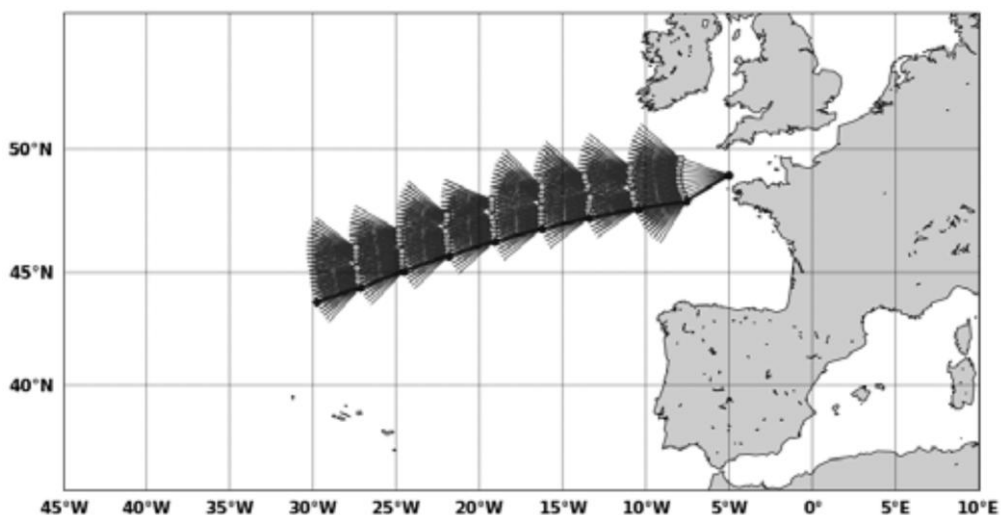
Динамичното програмиране, използвано и в трите представени алгоритъма, намира широко приложение във воденето на кораби по презокеански маршрути. За реализацията им се изисква достатъчно място за маневриране. Макар че в математическите модели на алгоритмите може да се въвеждат граници и размери на острови, съоръжения и други подобни навигационни опасности, динамичното програмиране не намира място в алгоритмите за крайбрежно плаване. В такъв тип плаване променливата скорост на кораба, честата смяна на курса и наличието на повече поворотни точки, отколкото в океанското плаване, се оказват фактор за увеличаване на изчислителното време. Експоненциалното нарастване на този фактор може да се окаже величина, съизмерима с продължителността на прехода (La Valle 2006).

1.4.1.3. Изохронен и изопонен метод

Изохронният метод, развит и предложен от Джеймс (James 1957), е един от първите методи, използвани в системите за водене на кораби по

презокеански маршрути. Оптимизационният критерий е времето за плаване, а целта е да се минимизира разходът на гориво (James 1957; Wang et al. 2017).

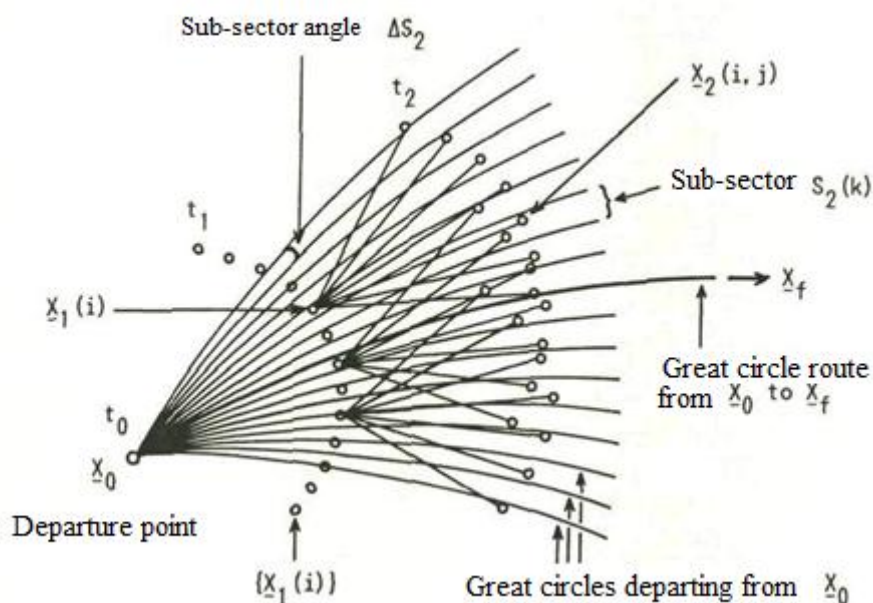
Принципът, заложен в метода, използва плаването по ортодрома, като около нея се създава мрежа от линии, които свързват началната точка с точки, до които може да достигне корабът за определено време. Линията, която свързва крайните дестинации от първия етап, се нарича изохрона. Началният курс на кораба е право напред, към първата изохрона. Към следващата корабът плава на курс, перпендикулярен на първата изохрона, и т.н. (фиг. 1.17). Процесът продължава, докато някоя изохрона съвпадне с крайната точка от плаването. Избира се този маршрут, който определя най-кратко време за плаване.



Фигура 1.17. Точки и потенциални пътища, генерирани от изохронния алгоритъм (James 1957)

През 1989 г. Хагивара представя подобрене на изохронния метод, като доразвива предложението на Джеймс до алгоритъм, подходящ за компютърни изчисления (Hagiwara 1989; Anderson 2015). При този метод се използват няколко модифицирани маршрута за плаване по ортодрома, между началната и крайната точка. Тези маршрути се различават по леко променения начален курс на кораба на всеки от тях (фиг. 1.18). Чрез предложени модифициран изохронен метод Хагивара прави опит да реши основния проблем на базовия

изохронен метод – перпендикулярът към изохроната невинаги е оптималният път.

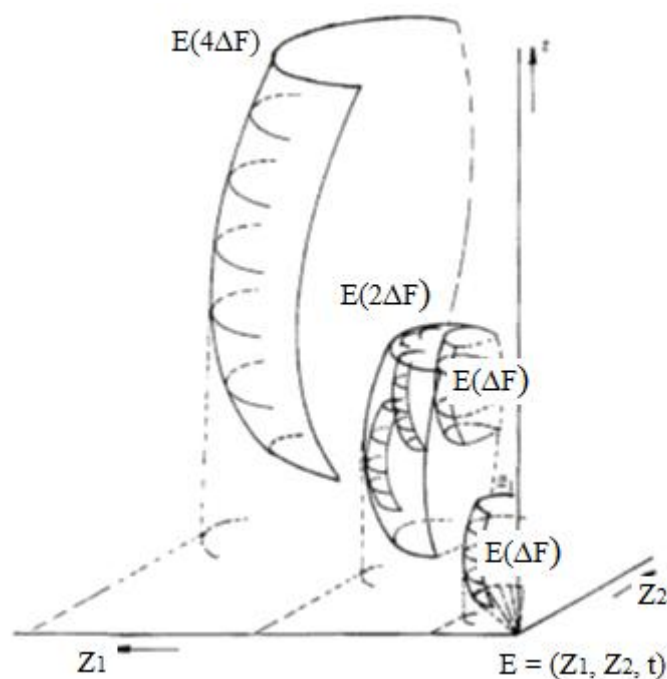


Фигура 1.18. Подобен изохронен метод на Хагивара (Nagiwara 1989)

Лин и колектив (Lin et al. 2013) предлагат 3D модифициран изохронен метод. В него се използва техника с плаваща мрежова система, която създава маршрут, отговарящ на очакваното време за пристигане, с минимална консумация на гориво и минимално време за плаване. Променливите са курсът на кораба и неговата скорост. Така плаващата мрежова система отчита динамично променящите се условия на околната среда. В този случай скоростта на кораба е променлива величина и може да бъде намалявана принудително, според метеорологичната обстановка или по желание от кораба.

Изопонният метод е разширение на изохронния и е развит от Кломпстра и колектив през 1992 г. (Klompstra et al. 1992). Съществената разлика между двата метода се състои в това, че изопонният метод приема разхода на гориво като даденост и изходно начало, вместо индиректен критерий, както е при изохронния метод. При него се определят равнини с еднаква консумация на

гориво (енергийни фронтове). Като резултат се получават триизмерни изопонни линии, при които третата координата се явява времето (фиг. 1.19). Представените на фигурата триизмерни фронтове са получени в опростени условия – еднакви метеорологични условия и липса на океански течения по целия фронт. Различните условия ще доведат до промяна на формата на енергийните фронтове, но процедурата по създаването им е подобна.



Фигура 1.19. Илюстрация на изопонния метод за оптимизация на плаването (Klompstra et al. 1992)

Ако крайната изопона не съвпадне с точката на пристигане на кораба, тя се преизчислява с по-малко количество гориво. Като алтернатива може да се пресметне курсът с най-малка консумация на гориво от всяка от точките на предпоследната изопона до крайната дестинация директно и да се проследи тази, която използва най-малко гориво.

Недостатък на изопонния метод по отношение на неговата универсалност е, че той също не предоставя възможност за използване на данни от бреговата черта или други навигационни опасности. Затова неговото приложение е главно при изчисляване на презокеански маршрути.

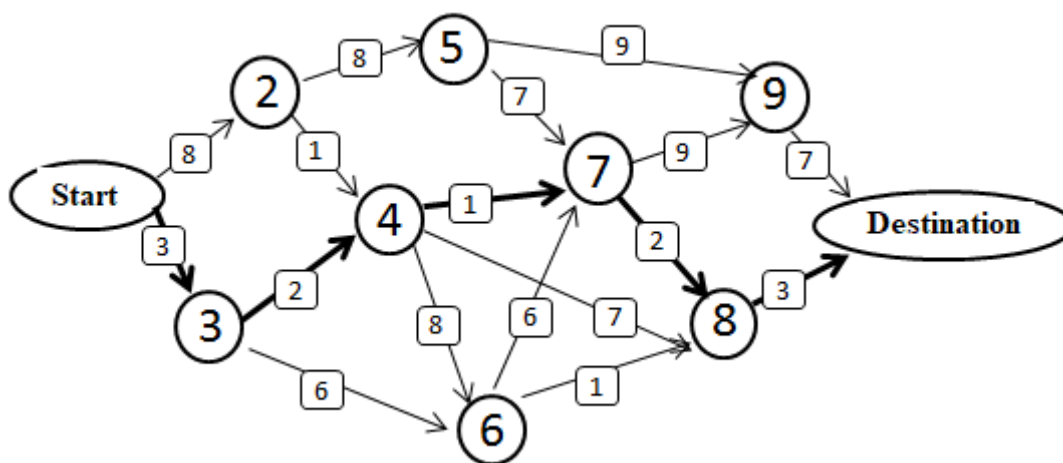
1.4.1.4. Алгоритъм на Дейкстра

В своя алгоритъм Дейкстра прилага теорията на графите. Този алгоритъм представя най-ефективния метод за намиране на най-краткия път от един конкретен връх до всички останали върхове в графа (Dijkstra 1959; Наков, Добриков 2013). Той е базиран на два принципа:

- Подмаршрут в границите на най-краткия маршрут е също и най-краткият подмаршрут.

- За дадено най-кратко разстояние между точките А и Б пътят, който преминава от точка А до точка Б през трета точка В, винаги ще бъде разстояние, по-голямо от директното разстояние между А и Б.

Концепцията на алгоритъма е представена в графичен вид на фигура 1.20. На нея са показани много потенциални маршрути, които свързват началната и крайната точка. Пътят между тях е разделен на подмаршрути, в които всяка точка е свързана със съседните си. На всеки подмаршрут е присъден тегловен коефициент, според оптимизационните критерии – време и разход на гориво, или комбинация от тях. Тези характеристики на алгоритъма на Дейкстра го правят широко приложим в системите за водене на кораби по презокеански маршрути.



Фигура 1.20. Графичен вид на алгоритъма на Дейкстра (Dijkstra 1959)

Във времето редица изследователи използват алгоритъма на Дейкстра за основа на своите разработки. Сен и Пади правят изследвания за намиране на

маршрут в Северния Индийски океан с основен критерий „най-кратко време за плаване“ (Sen, Padhy 2015). Авторите прилагат двумерна мрежа с размери $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, която покрива необходимия район на плаване, в който са определени метеорологичните условия за всяка точка от графа. Теглата на ребрата се определят според времето, необходимо за плаване по всяко едно от тях. Времето зависи от скоростта, която може да бъде намалена според състоянието на метеорологичните условия. Основен недостатък на алгоритъма на Сен и Пади е, че резултантният маршрут не е плавен.

Такашима и колектив (Takashima et al. 2009) също използват алгоритъма на Дейкстра, като го адаптират към крайбрежно плаване и плаване в стеснени райони. Критерий за оптималност е разходът на гориво при постоянни обороти на винта. Скоростта се изчислява според курса на кораба и състоянието на времето, като за целта се използват криви за регулиране на скоростта.

Сен и Пади, както и Такашима и колектив, изследват само една оптимизационна цел – маршрута на кораба. При увеличаване на целите, маршрут и време за плаване, е необходимо да се реши многоцелева оптимизационна задача. Решение предлага Бьотнер, който използва опростен алгоритъм на Дейкстра за случай с две целеви функции (Böttner 2007). Така нареченият имплицитен (изброителен) алгоритъм е разделен на две части – първата намалява размера на мрежата от курсове, а втората намалява изчислителните процедури.

1.4.1.5. Еволюционни алгоритми

Базата за създаване на еволюционните алгоритми е идеята на Чарлз Дарвин, представена в книгата му „Произход на видовете“, както и многобройни изследвания в областта на генетиката с общото наименование „Ню-Дарвинизъм“. Идеята за прилагане на теории от генетиката за автоматично решаване на задачи възниква в началото на ХХ век. Пионерите са Алан Тюринг (генетично или еволюционно търсене), а по-късно и Ханс Бремерман, който прави и първите компютърни експерименти (оптимизация

чрез еволюция и рекомбинация) (Георгиева 2013). Еволюционните алгоритми симулират еволюцията на индивидите чрез процесите „селекция“, „мутация“ и „възпроизвеждане“, базирани на естествения подбор и оцеляване на най-пригодните. От споменатите принципи произхождат следните оптимизационни методи (Garkaz 2011):

- еволюционно програмиране;
- генетични алгоритми;
- еволюционни стратегии;
- генетично програмиране;
- системи за класифициране.

В книгата си „Адаптиране в естествени и изкуствени системи“ (Adaptation in natural and artificial systems) Джон Холанд за първи път предлага използването на еволюционните алгоритми за решаването на оптимизационни задачи (Holland 1992) По-късно, през 1984 г., Шафър използва подклас на еволюционните алгоритми, наречен генетични алгоритми, в който променливите се съхраняват в поредици от цифри с фиксирана дължина, наречени хромозоми (Schaffer 1984). Шафър извършва незначителна модификация на генетичен алгоритъм, използван за оптимизация по един параметър. По тази причина идеята му не получава широка популярност.

В развитието на еволюционните алгоритми за решаване на различни оптимизационни задачи участват автори като Давид Голдберг, който въвежда идеята за превъзходство на видовете за намиране на множество компромисни решения (Goldberg 1989). Книгата на Голдберг, в която той развива идеята си, е вдъхновение за други изследователи, приложили модификации на еволюционните алгоритми – многоцелеви генетичен алгоритъм (Fonseca, Fleming 1993), нишов Парето генетичен алгоритъм (Horn et al. 1994) и генетичен недоминиран подбор (Srinivas, Deb 1994) Всички те се различават по начина, по който целевите функции се присвояват на потенциалните решения.

Приложение на еволюционните алгоритми в планирането на маршрута на кораба предлага Хинентал. Той оптимизира маршрута по време и по консумация на гориво (Hinnenthal 2007). Чрез използване на симплексния метод на Нелдер и Мийд (Nelder, Mead 1965) като сравнение, Хинентал показва, че генетичните алгоритми имат потенциал за приложение в оптимизирането на презокеанските маршрути на корабите. Той отбелязва, че прогнозирането на времето е с определена степен на вероятност и за да се справи с този факт, предлага като входни данни да се използват натрупани с времето прогнози.

Маки и колектив използват реално кодиран генетичен алгоритъм за съставяне на презокеански маршрут (Maki et al. 2011). В допълнение към целевата функция „консумация на гориво“, те добавят и параметричното клатене.

Мари и Кортел също използват многоцелеви генетичен алгоритъм за минимизиране на консумацията на гориво за определено или за оптимално време (Marie, Courtielle 2009). Изследването им се фокусира върху ограничаване на броя на променливите чрез „метод за пространствено и времево генериране на варианти за маршрути, базиран на общ и автоматичен съчетаващ метод“. Така физическите параметри на географската среда, метеорологичните данни и характеристиките на кораба се използват за определен времеви интервал (дискретизация). Методът, основаващ се на сферични ромбове, където два от противоположните върхове са точката на тръгване и точката на пристигане, позволява автоматично свързване и лесна адаптация към променящите се по време на плаването параметри на маршрута.

През последното десетилетие редица автори прилагат мултикритериалния еволюционен алгоритъм за оптимизиране на презокеански маршрути, като увеличават броя на целевите функции. В своите публикации Шлапчинска и Смерчалски използват набор от целеви функции – минимално време за преход, минимален разход на гориво, минимален навигационен риск (Szlapczynska, Smierzchalski 2007; 2009; Szlapczynska 2013;

2015) Шлапчинска (Szlapczynska 2013) използва Парето еволюционен алгоритъм, вместо по-често прилагания мултикритериален еволюционен алгоритъм. Основание за това е, че първият е по-устойчив. Така, вместо Парето алгоритъмът да предложи крайното решение, се дава възможност на вземащия решение, той да избере най-подходящия маршрут от предложените от алгоритъма.

Ченг и Цу използват генетичните алгоритми в комбинация с алгоритъма „мравчена колония“ (Cheng, Tsou 2013). Целта на оптимизация на маршрута е да се намалят времето за плаване и разходът на гориво, като се избягват райони с неблагоприятни метеорологични условия, доколкото е възможно.

Представените дотук алгоритми имат възможност да решават задачата за оптимизиране на пътя на кораба при плаване по презокеански маршрути. Всеки един от тях се нуждае от задаване на целева функция и информация за околната среда, отнесени към тази функция. Подборът на необходимата информация се прави предварително и се съхранява под формата на компютърна памет. От анализа личи, че голяма част от алгоритмите са доста тромави в обработката на информацията и реализацията им изисква продължително изчислително време. По този начин те са непригодни за планиране на крайбрежно плаване или реакция по време на ход на кораба, както и в райони с натоварен трафик.

1.4.2. Алгоритми за оптимизиране на крайбрежно плаване (локални алгоритми)

Локалните алгоритми имат своето развитие в аспект на изготвяне на план за плаване в крайбрежната зона от прехода и за разминаване с други подвижни обекти.

Понятието „крайбрежна зона“ се отнася за район на плаване, който включва териториалното и прилежащото море на крайбрежната държава. В тези зони трафикът обикновено е регулиран от местни правила и система за контрол. Опасност представляват неподвижни обекти, острови, изкуствени

стопански съоръжения и други, отбелязани на навигационните карти, препятствия.

Този тип алгоритми целят да оптимизират времето за плаване в условия на гарантирана безопасност за кораба и околния трафик. Основен белег на плаването в описаните по-горе условия са стесненият участък за маневриране и честите изменения на курса. Заради това алгоритмите се отличават с необходимост от повече информация, която да бъде зададена в базата данни, и динамика на обработката. Към тях се числят:

- бърз линеен метод;
- линейно програмиране;
- еволюционен многоцелеви оптимизационен метод и др.

„Бърз линеен метод“ е числен метод за решаване на задачи при гранични стойности на разпространението на вълни. За първи път е предложен от Джеймс Сетиан за решаване на диференциално уравнение от първи ред, което включва само първа производна на неизвестната функция на n променливи (Sethian 1996; 1999a; 1999b). Идеята на Сетиан възниква като необходимост за решаване на проблеми при разпространение на светлинни вълни и тяхната трансформация при преминаване на гранична среда. Впоследствие тази идея е възприета като удачна за прилагане в изследване на влиянието на средата върху подвижни обекти, в частност морски. Агарвал и Лермюзюио прилагат „бърз линеен метод“ за повишаване на точността при картографирането на архипелага Филипини. Техните изследвания намират отражение върху симулационни изображения на наситена морска среда с острови, елементи на навигационното ограждане, съставни на хидрологичната обстановка на изследвания морски район (Agarwal 2009; Lermusiaux et al. 2010; 2011). Преди това опити за прилагане на „бърз линеен метод“ върху движението на подводни съдове са правени от Петрес и колектив, макар че те работят приоритетно върху използването на анизотропната му версия (Petres et al. 2005; 2007). Авторите излагат като основен приоритет на разработките си осигуряването на безопасен маршрут на средството.

„Бързият линеен метод“ и неговото еволюиране до „бърз линеен квадрат“ намира място в решаването на поредица от проблеми на планирането на пътя или траекторията на роботизирани транспортни средства, главно заради гъвкавостта и лесното приложение (Garrido et al. 2020). Като примери може да се посочат: планиране на движението на роботизирано средство в ограничена и неограничена среда (Garrido et al. 2017); изучаване на маршрута и машинно обучение на изкуствен интелект в преминаването му през такава среда (Gómez et al. 2019; 2017), на безпилотни транспортни средства (Álvarez et al. 2015) и морски съдове (Petres et al. 2005; 2007; Song et al. 2017).

Същността на „бързия линеен метод“ се заключава в следната логика.

Разглежда се двоична мрежа, в която препятствията се оценяват като 0, а свободното за движение пространство – като 1. Тези стойности може да се приемат като скорост на разширяване на вълната върху мрежата. При среща с препятствие скоростта на разширяване на вълната е 0, тъй като вълната не може да премине през препятствието. В свободното пространство скоростта на разширяване на вълната е постоянна и равна на 1. Ако се иска да се изчисли пътят между две точки – p_0 и p_1 , може да се разшири вълна от p_1 , докато достигне p_0 . Поради свойствата на разширяване на вълната, пътят, който следва вълновата граница от целта до точката на източника, винаги ще бъде най-кратката траектория във времето. Тъй като скоростта на разширяване на вълната е постоянна, тази траектория е и най-късото разстояние между двете точки. Вълната произлиза от точката, която е цел на движението. Следователно изчислената траектория ще има само един минимум в целевата точка. И така, като се следва посоката на максималния градиент от началната точка, ще се достигне до целевата точка, като по този начин се получава траекторията на движение. Това решение е уникално и завършено (Valero-Gomez et al. 2013; Gómez et al. 2013).

Основният недостатък на гореописаното приложение на „бърз линеен метод“ е, че така се осигурява изчисляване на най-краткото разстояние между две точки, без да се държи сметка за риска от преминаване покрай

навигационни опасности. Гомез и колектив, като се базират на работата на Ошер и Сетиан, доразвиват „бързия линеен метод“ до „бърз линеен квадрат“. Според тяхното решение, чрез първото разширение на вълната се изчислява решетка, която представлява скоростна диаграма на движение на автономен апарат. На нея е фиксирана максимално разрешената скорост във всяка точка от разчитаната територия на движение. Скоростната диаграма се използва за изчисляване на второто разширение, което формира местоположението на началната точка. В резултат на второто разширение на вълната се изчислява направлението към точката на пристигане. За основа отново се използва посоката на максималния градиент от началната точка. Тази траектория не само осигурява следваща точка, към която е насочено движението, но също и контролна скорост във всяка точка от пътя. По този начин се гарантира безопасно движение и оптимално време за пристигане в назначената точка (Liu, Bucknall 2015; Liu et al. 2017).

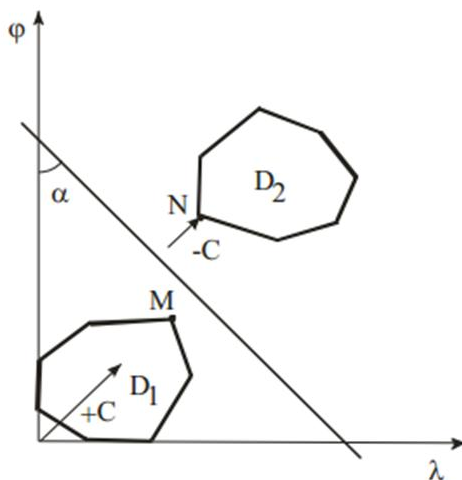
Използването на линейно програмиране за съставяне на алгоритми за плаване на кораб в крайбрежни условия е друг подход в търсенето на безопасен път покрай близки навигационни опасности. Линейното програмиране се занимава със задачи, при които критерият за оптималност и ограничаващите условия се изразяват чрез линейна функция на независими променливи. Математическата формулировка на общата задача е следната: да се намери вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, за който се получава минимална стойност на линейната функция $L(X) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$. Каноничната форма на задачата на линейното програмиране се записва във вида (Василев et al. 1985; Колмогоров 1987; Belev, Svetak 2003):

$$L(X) = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

при следните ограничаващи условия:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i$$

за $i = 1, 2, \dots, m$; $x_j \geq 0$ за $j=1, 2, \dots, n$.



Фигура 1.21. Нанасяне на курса на кораба между две навигационни опасности

Ако неизвестните са две: x_1 и x_2 , то тогава ограничаващите условия определят една права, която разделя равнината на две полуравнини (фиг. 1.21). Точките от едната полуравнина удовлетворяват неравенството $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 < b_i$, а точките от другата полуравнина – неравенството $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 > b_i$.

Равенството $L(X) = c_1x_1 + c_2x_2$, при различни стойности на $L(X) = const$, определя семейство успоредни прави, перпендикулярни на вектор C , с координати (C_1, C_2) . Векторът C се нарича „вектор градиент“ на семейството прави. Посоката му показва посоката на увеличение на стойността на $L(X)$.

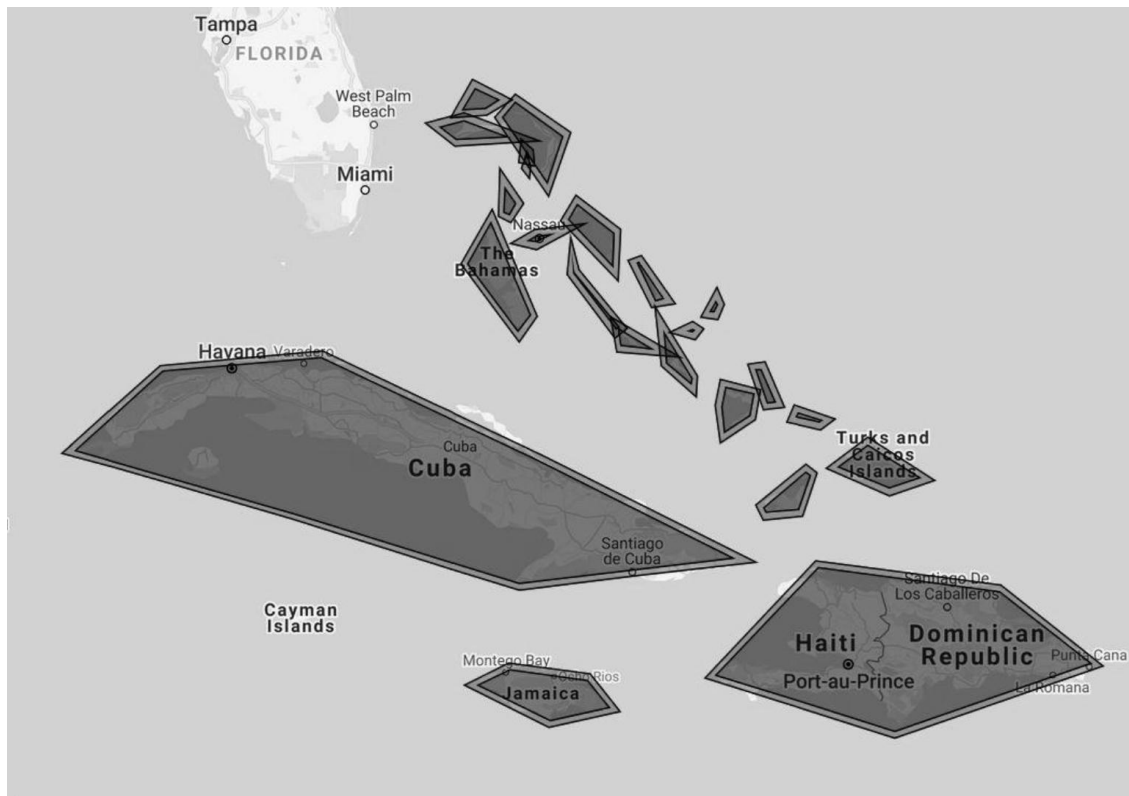
Именно геометричната интерпретация на задачата на линейното програмиране може да бъде използвана в корабоводенето, при съставяне на предварителен план за преход. Същността се заключава в това, че навигационните опасности – острови, плитчини, закотвени технически съоръжения и др., се очертават с гранични прави линии, които са еднозначно определени в географска координатна система φОλ. Правите, отстоящи от навигационните опасности на зададено разстояние, представляват условия за

ограждане на дадена област в координатната система (фиг. 1.22). Алгоритъмът търси минимална и максимална стойност на линейната функция, с която е означена правата от курса на кораба, преминаваща покрай дадената опасност. Максимумът и минимумът показват точките, през които трябва да премине новият курс на кораба на безопасно разстояние.

Теорията на линейното програмиране позволява базисният план да бъде проверяван и заменян с друг, до получаване на оптимален план. Поради линейния характер на математическите зависимости, процесът лесно може да бъде програмиран и автоматизиран чрез създаване на подходящ алгоритъм.

В своя публикация от 2019 г. Шлапчински и Гаеми предлагат използването на еволюционен многоцелеви оптимизационен метод за планиране на пътя на кораба (Szałpczyński, Ghaemi 2019). Целта на авторите е да решат едновременно три задачи:

- Минимизиране на риска от опасно сближение на кораби;
- Минимизиране на разхода на гориво при маневриране за избягване на опасно сближение;
- Минимизиране на изразходваното време за избягване на опасно сближение.



Фигура 1.22. Очертаване на навигационните опасности при използване на линейно програмиране (Димитранов 2020)

Еволюционният метод за оптимизиране на пътя на кораба е разгледан по-горе в дисертацията, като метод от групата на глобалните. С натоварването му с многоцелеви функции, авторите се стремят да компенсират недостатъците на едноцелевата оптимизация, която е разпространена понастоящем (Li, Ma 2016; Tsou 2010; Zitzler et al. 2002). По този начин се предлага алгоритъм, който би намерил място в управлението на автономни кораби от пети тип, според класификацията на ИМО – без екипаж на борда и без управление от брега.

Разгледаните дотук методи за оптимизация на пътя на кораба целят минимизиране на разхода на време за плаване по даден маршрут, минимизиране на разхода на гориво и избягване на опасно сближение с неподвижни обекти (острови, опасни райони, технически съоръжения) при планиране на плаването в крайбрежна зона. Никой от предложените

алгоритми не оптимизира повече от една функция. Литературният анализ показва, че авторите все още се въздържат от многоцелева оптимизация, с много редки изключения, които все още са в етап на идеен проект. Все по-бързото напредване и вече частичната реализация на модели на безкипажен и автономен кораб изисква от научната общественост да търси реализация на многоцелеви оптимизационни модели. Освен това оценката на риска за кораба при прилагане на досега съществуващите алгоритми се извършва от много малко от изследователите (Szlapczyński, Ghaemi 2019; Engelhardtson 2007; Sriwijaya 2016). Тя се явява важен фактор в прилагането на който и да е алгоритъм поради все по-нарастващия корабен трафик и съсредоточаването му в определени части от Световния океан, доказали оптималността си по отношение на веригите за доставка на товари. Тези разсъждения отварят врата за многоцелевата оптимизация, част от която е дуйерархичният модел. Неговото използване ще разшири възможностите за автоматизиране на множество процеси на съвременните кораби и проучванията и реализацията на автономните кораби. Оценката на риска в този процес изисква натрупването на огромен обем статистическа информация в световен мащаб. Засега този процес е локален и единствено един от големите морски застрахователи – Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS), представя обобщена информация за навигационни аварии на море (AGCS [no date]).

1.4.3. Анализ на алгоритмите за решаване на задачата за безопасно разминаване с подвижни и неподвижни обекти

С ежегодното увеличаване на корабния трафик все по-актуален става въпросът за безопасно разминаване на съдовете, особено в контекста на използване на автономни морски транспортни средства. През септември 2015 г. корабният регистър Lloyd's Register of Shipping, Кинетик груп (QinetiQ Group) и Университетът в Саутхемптън публикуваха съвместно изследване: Global Marine Technology Trends 2030, в което темата за интелигентните кораби е посочена като една от осемте ключови морски технологии в бъдещето

(Shenoi et al. 2015). През юни 2017 г. в централата на ИМО в Лондон се проведе 98-ата сесия на Комитета по морска безопасност (MSC). Тази среща представи концепцията за морски автономни надводни кораби (MASS) въз основа на различни наименования, като „безпилотни кораби“, „умни кораби“, „интелигентни кораби“, „кораби с дистанционно управление“, „автономни кораби“ и т.н. Използваната терминология дефинира по такъв начин степента на автономност, че корабите да могат да работят независимо, до различна степен на взаимодействие с хората (MASC [no date]). ИМО препоръчва на корабната индустрия и свързаните с нея изследователски институти да инвестират в съответните изследвания на морските автономни кораби възможно най-рано и да разработят различни нива на интелигентни или автономни кораби (Le Wang et al. 2019).

Интелигентните алгоритми са заложили в идеята за създаване на безпилотни и безекипажни транспортни средства. Способността за автономно избягване на сблъскване е в основата на успешното решаване на всяка транспортна задача, в която участва такова средство. Общите алгоритми за безопасно разминаване включват: метода на изкуственото потенциално поле (artificial potential field – APF) (Mousazadeh et al. 2018; Ou, Guo 2019; Sang et al. 2021; Song et al. 2018; Chen et al. 2021); алгоритъма за подвижно препятствие (velocity obstacles – VO) (Mou et al. 2020; Kuwata et al. 2013; Zhao et al. 2016; Kufalor et al. 2018; Xia et al. 2020) и някои интелигентни алгоритми (Ning et al. 2020; Lyridis 2021; L. Zhang et al. 2021; Wang et al. 2020; 2021).

Основният принцип на метода APF е да трансформира влиянието на целта и препятствието върху движението на автономното средство в изкуствено потенциално поле, като средството се движи от съвместното действие на гравитационната сила на целевата точка и силата на отблъскване на препятствието (Khatib 1986) Често се използва за планиране на пътя в процеса на избягване на опасно сближение, а планираният път е сигурен и безопасен. Основният недостатък на този алгоритъм е, че той може лесно да

попадне в локален оптимум, което да накара автономното средство да остане в локалната оптимална точка, преди да достигне целта.

Интелигентните алгоритми са заимствани най-вече от биониката, като генетичния алгоритъм, алгоритъма на рояка от частици и алгоритъма на мравчените колонии. Те актуализират популацията към оптималното решение чрез колективна итерация и комбинирана с евристична информация, предоставена от оценъчна функция (Mohamed-Seghir et al. 2016). Интелигентните алгоритми се различават по отношение на скоростта на конвергенция и оптимизацията на резултатите (Liu et al. 2021). Повечето от тях обаче изискват голямо количество данни, което обикновено води до висока изчислителна цена на алгоритъма. В морските изследвания интелигентните алгоритми се прилагат главно при планирането на маршрута.

Алгоритъмът на подвижното препятствие за първи път е представен през 1998 г. от Флорини и Шилер (Fiorini, Shiller 1998). Той използва идеята за зона за навигационна безопасност около всеки морски обект, независимо дали е подвижен, или неподвижен. Тази теория е подробно разгледана в точка 1.1.3 на настоящия труд. Впоследствие предложението на Флорини и Шилер е подоброено чрез намиране на решения за по-широкото му приложение: подвижно препятствие във формата на елипса (ellipse-based velocity obstacle – EBVO); нелинейно подвижно препятствие (non-linear velocity obstacle – NLVO); вероятно движение на препятствието (probability velocity obstacle – PVO) (Lee et al. 2017; Large et al. 2005; Coué et al. 2006). В цитираната литература се използва терминът „препятствие“, вместо утвърдения в корабоплаването „цел“, тъй като той е по-общ и не налага уточнения за размера и формата на обекта. По-нататък в дисертационния труд ще бъде използван и този термин, под условието, че двете понятия са синоними.

Алгоритъмът на нелинейното подвижно препятствие се използва основно за решаване на задачата за безопасно разминаване при нелинейно движение на препятствието, т.е. когато съществува неопределеност в процеса на движение на препятствието. Алгоритъмът PVO се използва при решаване

на проблем с неопределеността на движение на препятствието. Още два алгоритъма с подобно приложение са предложени от различни изследователи – „препятствие с реципрочна скорост“ (reciprocal velocity obstacle RVO) и „оптимално реципрочно избягване на сблъсък“ (optimal reciprocal collision avoidance ORCA) (Van den Berg et al. 2011; 2010). Тези алгоритми се използват, когато съществува колебание в движението на собствения кораб и целта за разминаване, например когато и двата обекта предприемат действие за разминаване (Li, Zhang 2022).

За да се приложи алгоритъмът „подвижно препятствие“ (VO) или някой от производните му, ORCA, RVO, GVO (generalized velocity obstacle), PVO, и да се обвърже с правилата за предпазване от сблъскване COLREG, се предполага, че целта също маневрира и следва правилата, както собственият кораб. Базовите изследвания по посочените алгоритми изхождат от тази презумпция (Kuwata et al. 2013; Zhao et al. 2016; Huang et al. 2019; Cho et al. 2020). На практика е известно, че целите често маневрират не според COLREG, и това често компрометира предварителните разчети.

С развитието на изкуствения интелект бяха разработени редица методи за избягване на сблъсък, базирани на дълбоко подсилващо обучение (deep reinforcement learning DRL). Във връзка с това Вей и Куо се концентрират върху изследванията на алгоритми, които използват изкуствен интелект и дълбоко подсилващо обучение, и такива, които използват традиционни методи за автоматизиране на процеси, разгледани по-горе в дисертацията (Wei, Kuo 2022). Приложението на изкуствения интелект следва два вектора на развитие – дълбоко проникващо обучение (deep learning), основано на невронни мрежи, и подсилващо обучение (reinforcement learning), основано на самообучение по метода „проба – грешка“. Литературният обзор и анализът групират изследователите и техните резултати в следните три направления:

- Алгоритми за избягване на опасно сближение на два обекта, които се основават на принципите на генетичния алгоритъм, А-звезда алгоритъм и

алгоритъм за възстановяване на градиенти с множество вариации (Miele, Wang 2005; Phanthong et al. 2014; Cheng et al. 2006).

- Алгоритми за избягване на опасно сближение на два и повече обекта, които плават според изискванията на правилата за предпазване от сблъскване COLREG – подобрен A* алгоритъм, чрез метод за минимално изменение на курса (Liang et al. 2021; Wilson et al. 2003)., метод на размитите множества за оценка на риска от сблъскване (Y.-Y. Chen et al. 2021), метод за предсказване на поведението на модела (Johansen et al. 2016), алгоритъм за многоцелева оптимизация (Hu et al. 2019).

- Алгоритми за избягване на опасно сближение на множество обекти, които плават, според изискванията на правилата за предпазване от сблъскване COLREG, базирани на DRL – алгоритъм, базиран на DRL, опит на експерти и COLREG (Shen et al. 2019; Wang et al. 2022); DRL в непрекъснато за действие пространство (Sawada et al. 2021); използване на алгоритъма на изкуственото потенциално поле (APF) за подобряване на DRL (Li et al. 2021); алгоритъм, който използва дълбока невронна мрежа за анализ на средата на движение и въздействие директно върху перото на руля (Zhao, Roh 2019); алгоритъм на базата на DRL чрез дълбок детерминистичен подход в прилагането на COLREG (Xu et al. 2020).

Представените алгоритми показват нов подход при решаване на задачата за безопасно разминаване на корабите на море, което е фундаментално достижение в развитието на идеята за автономно корабоплаване. Всички те решават проблема с изпълнение на разминаването от гледна точка на COLREG. Процесът на оптимизация на маневрата обаче остава на заден план или изобщо отсъства в голяма част от изследванията. Този факт не отчита слабост на цитираните изследвания, а е констатация, която открива хоризонт за надграждане.

В контекста на заглавието на този параграф трябва да се отдели място и на група алгоритми, базирани на теорията на игрите – една доста широко застъпена теория от математиката, сполучливо предложена за решаване на

задачата за разминаване на кораби. Тези алгоритми са приложими както за кораби с екипаж, така и в управлението на безекипажни и автономни кораби.

Анализът на редица публикации за приложение на теорията на игрите в корабоплаването показва, че най-важният фактор, който трябва да се отчита при описание на процеса на разминаване, е характерът на взаимодействие на корабите. Необходимо е да се вземе предвид принципът на общностния интерес на взаимодействащите кораби, който се изразява в избягване на опасно сближение и спазването на правилата за движение и разминаване COLREG. Не е без значение фактът, че правилата в голямата си част внасят неопределеност на решенията. Освен това COLREG регламентират действия за случаи на бинарно взаимодействие и не разглеждат ситуация за едновременно разминаване на няколко кораба. Важна особеност на алгоритмите, основани на теорията на игрите, е работата в режим „реално време“. Това налага времеви ограничения на изработването и вземането на решение, което изисква прилагането на сценарии за целия преход.

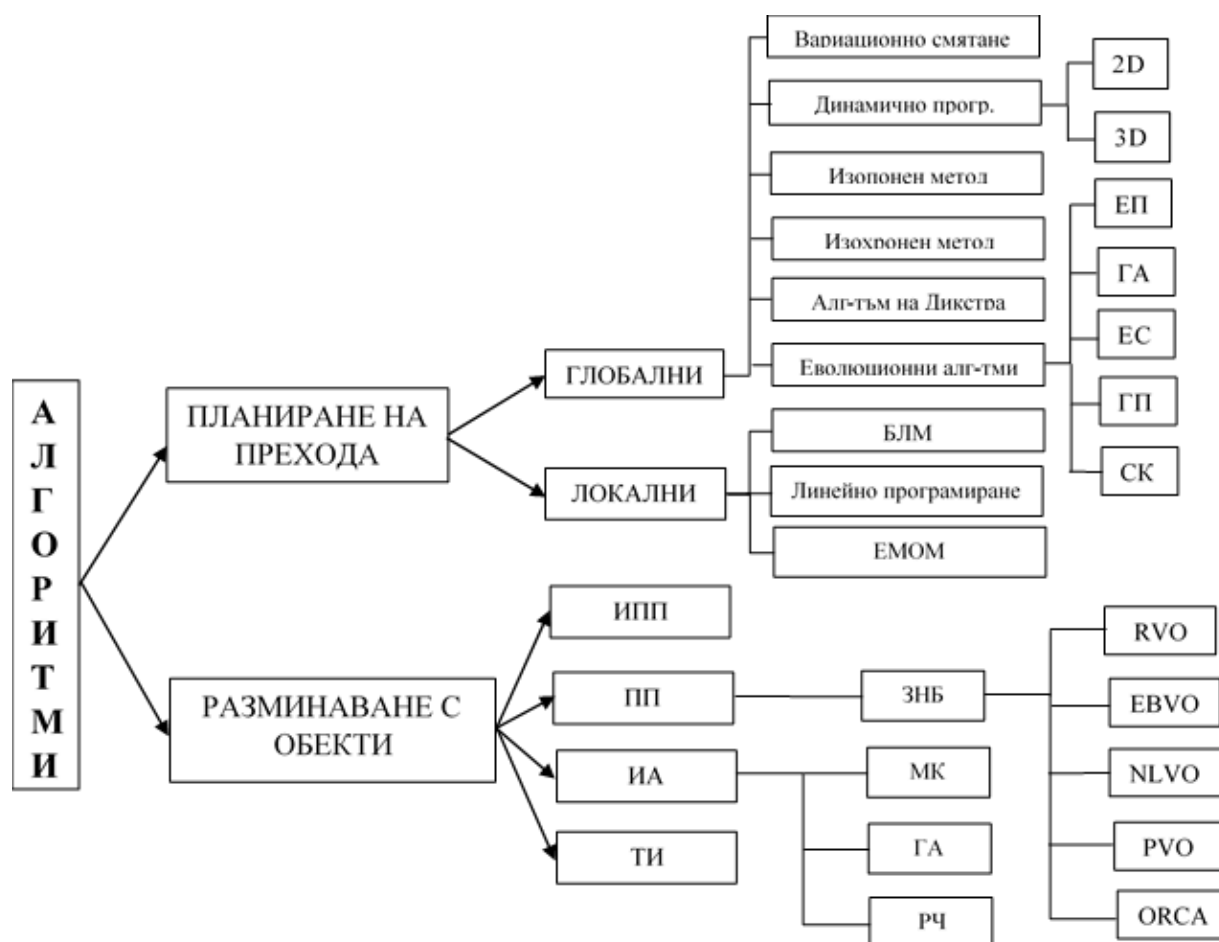
Холандер и Прашкер правят обзор на теоретични модели (алгоритми), които инкорпорират в себе си концепцията за некооперативна игра за решаване на транспортни задачи (Hollander, Prashker 2006). Част от ревизираните публикации включват и решаването на оптимизационна задача с използване на двуйерархична оптимизация: на движението чрез регулиране на светофарните уредби по даден маршрут (Fisk 1984); на търговските интереси на превозвачите и нуждите на пътуващите (Yang, Woo 2000); на стремежа на градската управа да оптимизира транспортните услуги чрез администриране на потоците и желанията на потребителите да използват най-удобното за тях средство за придвижване (Hollander et al. 2006). Авторите на публикациите не разглеждат приложението на теорията на игрите в морския транспорт. Но тъй като изследователската територия все пак е областта на транспорта, предложените приложения на концепцията за некорпоративна игра заслужава внимание.

Идеята за оптимизиране на трафика в градска среда, с използване на теорията на игрите, датира още от 70-те и 80-те години на XX век. Бьорнскау и Елвик в своя публикация за рационалния избор, като част от теорията на игрите, при предотвратяване на транспортни инциденти, правят обстоен анализ на зараждането и развитието на идеята и приложението ѝ в транспортните задачи (Bjornskau, Elvik 1992). В публикация от 2020 г. Куингфенг и колектив правят преглед на приложението на теорията на игрите в процеса на управление на безопасността в корабоплаването (Meng et al. 2020). Изследването им обхваща десетгодишен период, от 2010 до 2019 г., и включва 215 статии, които имат отношение към разглеждания проблем. Авторите представят устойчив и константен интерес на изследователите към приложението на теорията на игрите в корабоплаването. Особено активна е полската школа в лицето на Лисовски, Шлапчински и Шлапчинска, които концентрират своите изследвания конкретно за решаване на задачата за разминаване на кораби с подвижни и неподвижни препятствия. Шлапчински и Шлапчинска разработват алгоритми за планиране на пътя на кораба и по-скоро частично използват теорията на игрите за решаване на конфликтни ситуации, включително и за разминаване (Szłapczyński, Szłapczyńska 2012a; 2012b). Те използват оптимизация само при решаване на задачата за избор на най-кратък маршрут или за избор на най-икономичен път на кораба. Двата автори, заедно или поотделно, не прилагат двуйерархична оптимизация, по-скоро те се концентрират върху приложение на еволюционните алгоритми при планиране на пътя и частично изследват решаването на задачата за разминаване, предимно от гледна точка на безопасността.

Джоузеф Лисовски работи много активно в областта на прилагане на теорията на игрите за решаване на задачата за безопасно разминаване на корабите в различна среда. Той също не прилага оптимизационни методи, което не намалява стойността на изследванията. Подробен преглед на неговите публикации обаче налага впечатлението за упорита повторемост на едни и

същи фигури, формули и изводи, което поставя въпрос за публикационната етика на автора и коректността на рецензентите на изданията (Lisowski 2002; 2006; 2016; 2018; 2020). Коректността на предложените алгоритми, базирани на теорията на игрите, авторът подкрепя със симулационни и натурни изпитания, за които също предлага схеми и снимки. Лисовски, подобно на повечето автори, записали имената си в разглеждания раздел, не предлага оптимизация на процеса по разминаване или на някой от етапите по осъществяването му.

Разгледаните дотук алгоритми, използвани в корабоплаването, показват широка приложимост на различни математически и оптимизационни теории и методи. Редица изследователи са изкушени да търсят приложимост на нестандартни методи, и това дава простор на други, които предлагат обзор на използвани методи, теории, практически резултати. Така се предлагат редица публикации – ревю, които обаче не изчерпват всички статии, книги, студии и учебници по дискутираните въпроси (Meng et al. 2020; Zhang et al. 2018; Lazarowska 2021). Въпреки това представената информация е достатъчно обширна, за да се състави една пътна карта на алгоритмите, които се използват в корабоплаването по двата основни за дисертационния труд критерия – съставяне на план за преход и безопасно разминаване с подвижни и неподвижни препятствия (фиг. 1.23).



Фигура 1.23. Диаграма на използваните в корабоплаването алгоритми

ЕП – еволюционно програмиране; ГА – генетични алгоритми; ЕС – еволюционни стратегии; ГП – генетично програмиране; СК – системи за квалификация; БЛМ – бърз линеен метод; EMOM – еволюционен многоцелеви оптимизационен метод; ЗНБ – зона за навигационна безопасност; МК – мравчена колония; РЧ – рояк частици; ИПП – изкуствено потенциално поле; ПП – подвижно препятствие; ИА – интелигентен алгоритъм; ТИ – теория на игрите; RVO – reciprocal velocity obstacle; EBVO – ellipse-based velocity obstacle; NLVO – non-linear velocity obstacle; PVO – probability velocity obstacle; ORCA – optimal reciprocal collision avoidance.

1.5. Йерархична структура на информацията в навигационния процес

Йерархичната структура на навигационната информация представлява логическа и функционална организация на данните, която осигурява ефективно управление на движението на кораба, независимо от степента на автономност. Тази структура определя начина, по който информацията се събира, обработва, анализира и използва за вземане на решения в реално време. В контекста на съвременните навигационни системи и внедряването на автономни и полуавтономни кораби, правилното изграждане на йерархията на информацията е ключов фактор за безопасността и оптимизацията на морските операции.

Съвременният навигационен процес може да бъде разглеждан като сложна йерархична система за събиране, обработка, анализ и използване на информация с цел управление на корабното движение. Тази структура включва взаимосвързани нива – от първичните сензорни данни до стратегическото вземане на решения и бреговия надзор. Според Чал и колектив, йерархичната контролна архитектура при автономните кораби се изгражда от последователност от контролери, процеси под контрол, информационни канали и обратни връзки, които осигуряват затворен цикъл между наблюдение, действие и реакция. Авторите подчертават, че системата не може да бъде напълно разглеждана като механизъм, отделен от човека, защото тя използва опита на морските специалисти и традиционните оперативни практики, като част от своята логика на управление (Chaal et al. 2020).

Подобен подход следват Аламуш и Юлсер, които представят архитектура на автономната навигационна система, структурирана в няколко слоя: сензорна фузия (процес на обединяване на данни от няколко различни сензора, за да се получи по-точна, надеждна и пълна информация за наблюдаваната среда или обект, отколкото може да се осигури от който и да е отделен сензор самостоятелно); ситуационна осведоменост; вземане на

решения, управление на движението и изпълнение на маневри. Тези подсистеми отразяват функционалната йерархия на информацията – от „суровите“ данни до тяхната интерпретация и действие, което материализира избраното решение. Така се утвърждава разбирането, че всяко ниво добавя стойност чрез обработка и абстракция на информацията, а точността на по-ниските нива предопределя надеждността на решенията на по-високите (Alamouh, Ölçer 2025).

Саймън Блиндхайм и колектив разглеждат управлението на кораба като надзорен контролен процес (supervisory control), при който резултатите от анализ на риска се трансформират в оптимизационна задача, решавана от бордова система. Това осигурява адаптивност и възможност за автономно поведение, но при запазена човешка намеса за безопасност и правна отговорност. Така се оформя информационна двупосочност: от долу нагоре се предават сензорни данни и прогнози, а от горе надолу – управленски решения и корекции (Blindheim, T. A. Johansen, et al. 2023).

Ли и колектив предлагат двустепенен модел на контрол – високо ниво за планиране на траекторията и ниско ниво за реализация чрез задвижващи механизми (Li et al. 2015). Този модел конкретизира връзката между информацията и управлението: първичните данни се интерпретират, превръщат се в управляващи сигнали и се реализират като движение. В същия дух Поточник разглежда разделението между глобално картно планиране и локално MPC управление, като допълва концепцията с нормативната рамка на COLREG (Potočník 2025). Така информационната йерархия се обвързва с регулаторните нива на морската практика.

По-високите слоеве на навигационния процес включват взаимодействието между бордови и брегови системи. Адан и Перера описват рамка от три основни функции – мониторинг, насочване и контрол, които се разпределят между кораба и бреговите центрове (Onshore Operation Centers) (Adnan, Perera 2024). Системата функционира чрез непрекъснат обмен на данни и двупосочна комуникация, което превръща бреговия център във

„върхов слой“ на навигационната информационна йерархия. Сумон и колектив допълват тази перспектива с анализ на опасностите при взаимодействие между брегови оператор и бордови контролери, като подчертават необходимостта от ясни интерфейси и надеждни протоколи за обмен – елементи, които гарантират устойчивост на системата (Sumon et al. 2025).

На концептуално равнище Тао представя йерархична рамка за поведенческо планиране, съчетаваща условни автомати и модел за предсказващо управление (Тао et al. 2025). Тази структура позволява динамично вземане на решения, съобразено с околната среда и правилата за движение по море (COLREG). Информационният поток между високо и ниско ниво осигурява интелигентно поведение и координация между кораби в мрежова среда.

Важен акцент поставят Ли и Юен, които разглеждат човешкия фактор като съществен елемент на йерархията (Li, Yuen 2024). Те доказват, че автономността променя характера на трудовите задачи, изискваните умения и отговорностите на морските специалисти. Въпреки автоматизацията, според тях човекът все още ще има решаваща роля в управлението и решаването на конфликти на море. Бреговите оператори, осъществяващи дистанционен контрол, се превръщат в посредници между технологичните слоеве и управленските решения. Техните подготовка, киберсигурност и дигитална компетентност се явяват човешки слой на информационната йерархия, без който автономната система би останала непълна.

В заключение, Мартели и колектив разширяват йерархичната концепция до равнището на флот и глобална инфраструктура, като описват три нива в бъдещата система за морски трафик: сензорни единици и бордови данни, координация на множество кораби и интегрирана рамка за глобално управление (Martelli et al. 2021). Тази перспектива очертава еволюцията на навигационния процес към единна морска информационна екосистема, в която данните, алгоритмите, човешките оператори и институционалните центрове действат като взаимно свързани звена на една обща йерархия.

Така се очертават четири нива на информационната йерархия в съвременния навигационен процес:

1. *Ниво на първичните данни* – на това ниво се генерира и събира първичната информация от навигационните сензори и системи, включително GPS, жирокомпас, радар, AIS, ехолот, лаг, системи за наблюдение на метеорологични условия, както и данни от системи за мониторинг на енергийна ефективност. Надеждността и точността на това ниво определят качеството на последващите анализи.

2. *Ниво на обработка и интеграция* – събраните данни се филтрират, синхронизират и интегрират в системи, като ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), INS (Integrated Navigation System) и VDR (Voyage Data Recorder). Целта е да се осигури цялостна картина на навигационната среда чрез обединяване на хетерогенни източници на информация.

3. *Ниво на анализ и вземане на решения* – това е ключовото ниво, при което се извършват: оценка на навигационната обстановка, прогнозиране на развитието на трафика и изчисляване на оптимални траектории. Използват се алгоритми за изкуствен интелект, машинно обучение и системи за поддръжка на решения, които позволяват автономно или полуавтономно движение на кораба при сложни ситуации.

4. *Ниво на изпълнение и контрол* – тук се осъществява реализацията на взетите решения чрез системите за управление на курса, скоростта и маневрите. Контролът може да бъде осъществен от екипажа, от брегови контролен център или от бордови автоматизирани системи при автономни кораби.

Взаимодействието между отделните нива на информационната йерархия е двупосочно. От долу нагоре се предават данни, а от горе надолу се спускат управленски решения и команди. Тази обратна връзка е съществена за навигационната устойчивост на системата. Например, при промяна в метеорологичната обстановка или откриване на нова цел от радара,

информацията се предава нагоре, към системата за анализ, където се извършва оценка на риска и евентуално се актуализира курсът на кораба.

Йерархичната комуникация между нивата позволява и въвеждане на приоритетни протоколи за информация, при които жизненоважни сигнали (например: предупреждения за сблъскване, отклонение от курса, повреда в системата) имат предимство при обработка и реакция.

В съвременната морска индустрия йерархичната структура на навигационната информация се разширява отвъд борда на кораба. Бреговите центрове за управление на трафика (VTS), глобалните комуникационни мрежи и системите за наблюдение в реално време стават част от интегрираната йерархия. Това позволява координация на решенията на ниво „флот“, повишава сигурността и дава възможност за дистанционно управление на автономни съдове.

В рамките на концепцията Maritime 4.0, йерархичната организация на информацията се превръща в основен компонент на дигитализацията на морския транспорт. Данните от множество кораби, сензори и спътникови източници се обработват в облачни среди, което създава предпоставки за предсказуемо управление, поддръжка и устойчиво развитие (Sullivan et al. 2020; Sullivan 2021; Razmjooei et al. 2023; De la Peña Zarzuelo et al. 2020).

Въпреки високото ниво на автоматизация, човешкото участие в процеса на анализиране на информацията и вземане на решение остава съществено. Това подкрепя идеята, че бреговите центрове (Remote Operation Centres – ROCs) и операторите в тях са част от йерархичната система на управление и информация. По този начин се демонстрира, че човешкият фактор и бреговият надзор не са „допълнение“, а интегрална част от информационната йерархия в навигационния процес.

1.6. Оптимизиране на навигационния процес

Оптимизацията на навигационния процес представлява един от ключовите елементи на съвременната морска навигация. Тя има за цел

постигане на минимално време на преход, икономия на гориво и енергийни ресурси, както и гарантиране на безопасност и съответствие с Международните правила за предотвратяване на сблъсъци по море (COLREG). Съвременната морска среда е динамична, нелинейна и силно зависима от външни фактори – метеорологични условия, интензивност на трафика, океанографски характеристики и нормативни изисквания. Това налага създаването на оптимизационни модели, които не просто минимизират разходите или времето на преход, а гарантират безопасност, устойчивост и съответствие с международната регулаторна рамка (COLREG, MARPOL, зони за контрол на емисиите и др.). Във връзка с това оптимизацията вече не се разглежда като едномерна задача (например „най-кратък маршрут“), а като многоцелеви процес, който съчетава критерии за време, гориво, емисии, комфорт на плаването, риск от опасно сближение и логистични ограничения. Изследванията през последните десетилетия показват преход от класически аналитични методи към интелигентни, йерархични и обучаващи се архитектури, базирани на еволюционни алгоритми, модели на предсказващо управление, сензорна фузия и интегрирани навигационни системи.

През последните години се развиват многоцелеви оптимизационни техники, които комбинират критерии за време, гориво, безопасност и комфорт (Böttner et al. 2020). Еволюционните методи: генетичен алгоритъм с недоминирано сортиране – версия II (NSGA-II), и многоцелеви еволюционен алгоритъм, базиран на декомпозиция (MOEA/D), осигуряват Парето фронт от решения и позволяват балансиране на противоречиви цели, като намаляване на времето при ограничен разход на гориво. Саймън Блиндхайм и колектив подчертават, че подобни решения се явяват ефективна основа за автоматизирани системи за поддръжка на решенията (Blindheim, T. A. Johansen, et al. 2023).

На по-късен етап във фокуса на изследванията се появява модел на предсказващо управление (Model Predictive Control, MPC), използван както за управление, така и за локална навигационна оптимизация. MPC формулира

проблем на оптимизация в хоризонт напред във времето, като отчита динамичния модел на кораба, ограниченията на кормилната машина и задвижването, както и предвижданото поведение на целите и външните условия. Всяка стъпка от хоризонта се оптимизира, но се реализира само първата управляваща команда. При следващо измерване хоризонтът Fossen се „плъзга“ напред и задачата се решава отново (Fossen 2021; Blindheim, T. A., Johansen, et al. 2023).

Паралелно с това се развиват и методите за обучение с подкрепление (Reinforcement Learning – RL), при които интелигентен агент „учи“ оптимални политики за управление на кораба в симулирана среда чрез награди и наказания. RL е особено обещаващ при сложни, многоагентни сценарии – например при плътни потоци корабен трафик, комбинации от фиксирани и подвижни препятствия, където аналитичното формулиране става трудно. В реални условия RL често се комбинира с MPC или с ограничителни правила (COLREG), за да се гарантират безопасност и предсказуемост на поведението (Vaidheeswaran et al. 2025; Deraj et al. 2023).

Оптимизационните цели в морската навигация се формират на базата на няколко критерия: време, гориво, безопасност и риск от сблъсък (Fossen 2021). Ограниченията произтичат от няколко групи фактори. Първо, динамиката на кораба – максимално допустими ускорения и ъглови скорости; максимален ъгъл на руля; ограничения в тягата; зависимост от газене и натоварване. Второ, батиметрията и географската среда – плитчини; тесни канали; зони с ограничения за газене или скорост; райони с ледови условия. Трето, нормативната рамка, най-вече COLREG, която въвежда твърди ограничения за допустимото поведение при разминаване, пресичане и догонване (правила 13–19) и налага допълнителни условия върху траекториите, генерирани от оптимизиращите алгоритми. Съвременните постановки включват и екологични аспекти – минимизация на емисиите на CO₂ и оптимизация на енергийния профил на задвижващите системи (Alamoush, Ölçer 2025).

С нарастването на сложността на задачите по оптимизация все по-голямо разпространение намират йерархичните и хибридните архитектури. Обичайно навигационният процес се разглежда като система от три основни слоя:

- Стратегически слой – глобално планиране на маршрута (voyage planning). Тук се използват метеорологични и океанографски данни, дългосрочни прогнози, картна информация и лаграно/евклидови методи, графови алгоритми, многоцелеви еволюционни техники. Резултатът е оптимален или набор от оптимални маршрути на макрониво (Potočník 2025; Fossen 2021).

- Тактически слой – управление на разминаването и адаптация към локални условия. На това ниво действат MPC базирани контролери, методи, като: скоростни препятствия (VO), оптимално реципрочно избягване на сблъсък (ORCA), локални A*-варианти и RL-агенти, които гарантират COLREG съобразно поведение и избягване на сблъсък в реално време (Johansen, Utne 2023; Tao et al. 2025; Tao 2025).

- Оперативен слой – непосредствено управление на задвижването и руля, изпълнение на командите, генерирани от тактическото ниво, и поддържане на устойчивостта и маневреността в рамките на допустимите граници (Böttner et al. 2020).

Хибридните архитектури комбинират глобални и локални методи: например глобален маршрут, изчислен чрез метод на бързото преминаване (Fast Marching Method), или многоцелеви еволюционни алгоритми, се използват като референтна траектория, докато локален MPC контролер управлява курса и скоростта, адаптирайки се към текущата трафик обстановка и външни смущения. В автономните кораби (MASS) към тези три слоя често се добавя и надзорен слой, разположен в брегови център за управление (ROC/OCC), който наблюдава и координира флот от кораби и може да се намесва при сложни или извънредни ситуации.

Реалната морска среда е неизбежно свързана с несигурност – метеорологичните прогнози са вероятностни, океанографските полета се променят, траекториите на други кораби не са напълно предвидими, а измерванията от сензорите съдържат шум и грешки. Затова съвременните оптимизационни модели включват робастни (модел, устойчив на неопределеност) и стохастични подходи, които целят да запазят ефективността на решенията дори при отклонения от планираните условия.

Стохастичната оптимизация взема предвид вероятностното разпределение на външните фактори и генерира решения, които са оптимални в среден смисъл или с определено ниво на надеждност. Монте Карло симулации и сценарийно базирани подходи се използват за оценка на качеството на даден маршрут в множество възможни бъдещи реализации на вятър, вълни и течения. Робастният контрол цели ограничаване на най-лошия възможен сценарий, така че системата да остане стабилна и безопасна, при зададен клас смущения (Shapiro et al. 2021).

За да функционират MPC и другите предсказващи алгоритми, е необходима точна оценка на текущото състояние на кораба и околната среда. Това се постига чрез сензорна фузия, често реализирана с Калманови филтри (Kalman Filter, Extended Kalman Filter, Unscented Kalman Filter) или филтър с частици (Particle Filter), които комбинират данни от GNSS, жирокомпас, лаг, ехолот, радар, AIS и други сензори. Получената оценка се използва както от оптимизационния модул, така и от блоковете за диагностика и ранно откриване на аномалии (Johansen, Utne 2023)

Поради динамичния характер на средата, оптимизацията не може да бъде еднократен акт. Затова се прилагат схеми за преоптимизация с „плъзгащ хоризонт“ (receding horizon), при които, при всяко ново обновяване на данните, се пресмята нов оптимален маршрут или локална корекция. По този начин се постига непрекъснато адаптиране към променящите се условия. В допълнение, в условията на Maritime 4.0 на преден план излиза и киберсигурността – GPS spoofing, фалшиви AIS съобщения, атаки срещу комуникационните канали

между кораб и бряг. Това изисква внедряване на механизми за киберустойчивост и интегриране на алгоритми за откриване на аномалии в навигационния процес (Kessler 2019; Dagdilelis et al. 2022).

Въпреки високата степен на автоматизация и внедряването на автономни функции, човешкият фактор остава основополагащ елемент в оптимизираната навигация. Ролята на навигатора и бреговия оператор се трансформира – от директен „оператор“ на системите към надзорник, оценител и мениджър на риска. Човекът ще продължи да играе критична роля в допълването на новите технологии, особено при интерпретацията на резултатите от оптимизационните алгоритми, вземането на решения в извънредни ситуации и носенето на правна отговорност (Li, Yuen 2024).

Бреговите центрове за управление (Remote Operation Centres, Onshore Control Centres) добавят допълнителен надзорен слой към навигационната архитектура. Те разполагат с разширена информационна картина – комбинирани данни за трафика, метеорологичните условия, състоянието на флота и пристанищната инфраструктура (Porathe 2019). Това им позволява да участват в стратегическата оптимизация: корекция на маршрути на множество кораби, координация в претоварени води и подпомагане при аварийни ситуации. В същото време човешкият оператор в бреговия център трябва да притежава високо ниво на дигитална грамотност, познания за алгоритмите, киберсигурността и управление на сложни информационни потоци (Man et al. 2020; Ramos et al. 2019).

Обучението и подготовката на бъдещите навигатори и оператори трябва да отразяват тази промяна – освен класически навигационни знания, се изискват умения за работа с интегрирани системи, разбиране на оптимизационните алгоритми и критично мислене при оценка на автоматично генерираните решения. По този начин човекът се превръща в ключов елемент на йерархията на оптимизирания навигационен процес, който гарантира безопасност, етичност и отговорност (Hildre et al. 2020).

Оптимизирането на навигационния процес е многопластова, динамична и интердисциплинарна задача, която изисква съчетаване на математически строго дефинирани модели, реално времеви данни, интегрирани системи за автоматизация и човешки надзор. Развитието на методологиите – от вариационни и динамично-програмни подходи, през графови и еволюционни алгоритми, до MPC и обучение с подкрепление – демонстрира стремеж към по-интелигентно, адаптивно и рисково-осъзнато управление на корабното движение.

Йерархичните и хибридни архитектури свързват стратегическото планиране, тактическото разминаване и оперативния контрол в единна рамка, която отчита несигурността и позволява непрекъсната преоптимизация. В контекста на Maritime 4.0, оптимизационните алгоритми функционират в киберфизична екосистема, в която корабите, бреговите центрове, пристанищата и логистичните вериги са свързани чрез цифрови платформи и споделени данни.

Въпреки високата степен на автоматизация, човекът остава незаменим участник в системата – като надзорник, интерпретатор и носител на отговорност. Затова бъдещето на оптимизирания навигационен процес се очертава като синергия между алгоритми и човешка преценка, която цели устойчиво, безопасно и ефективно корабоплаване в променящата се глобална морска среда.

1.7. Обобщение и изводи

Анализът на научните източници, разгледани в първа глава, показва, че развитието на навигационните методи и алгоритми за управление на движението на кораба следва няколко ясно изразени, но слабо съгласувани направления. От една страна, значителен обем изследвания са посветени на описанието и моделирането на навигационния процес като последователност от функции и подпроцеси, ориентирани към безопасното изпълнение на плана за преход. От друга страна, редица публикации развиват формални модели за

избягване на опасно сближение чрез въвеждането на зона за навигационна безопасност и критерии за риск. Трета група изследвания се фокусират върху оптимизацията на маршрута и експлоатационните параметри на плаването.

Въпреки значителния напредък във всяко от тези направления, критичният преглед на съществуващите подходи разкрива липсата на единна формална рамка, която да обедини геометричните, динамичните, експлоатационните и оптимизационните аспекти на навигационното решение в условията на реално времево управление. По-голямата част от моделите на зона за навигационна безопасност са разработени с цел оценка на риска или подпомагане на човешкото вземане на решения и в този смисъл остават описателни или полуформални, без директна връзка с оптимизационния процес за управление на курса, скоростта и експлоатационната ефективност на кораба.

Съществуващите алгоритми за избягване на сблъсък в значителна степен използват зоната за навигационна безопасност като статичен или предварително зададен елемент, чиито размери и форма се определят емпирично или въз основа на статистически наблюдения. Те не отчитат ефективни експлоатационни изисквания за управление на кораба. Този подход ограничава възможността за адаптиране на зоната към конкретната динамика на ситуацията, към експлоатационните характеристики на кораба и към времевите ограничения, характерни за реалната навигационна обстановка. В резултат на това зоната за навигационна безопасност често изпълнява ролята на условие за алармиране, но не и на активен елемент в процеса на оптимално експлоатационно управление.

Анализът на глобалните и локалните оптимизационни алгоритми показва, че глобалните методи за планиране на маршрута са ефективни при дългосрочно оптимизиране на плаването, но са неприложими в условията на бързо променяща се навигационна среда и необходимост от незабавна реакция. Локалните алгоритми от своя страна притежават необходимата изчислителна бързина, но често са ориентирани към решаване на единични

конфликтни ситуации, без да отчитат в достатъчна степен експлоатационните критерии като време за маневра и разход на гориво. В много случаи оптималността се търси спрямо един критерий, докато останалите се третират вторично или изобщо не се включват във формалната постановка.

Особено ясно се откроява липсата на йерархично структуриране на навигационните решения, при което безопасността, времето и енергийната ефективност да бъдат разглеждани като взаимносвързани, но различни по приоритет цели. Съществуващите подходи не изпълняват съвместно формализиране на зависимостите между геометрията на маневрата и експлоатационните последици от нейното изпълнение, което води до решения, които са безопасни, но невинаги оптимални от гледна точка на времето или разхода на гориво.

Допълнителен съществен дефицит е начинът, по който международните правила за предпазване от сблъскване на море (COLREG) се интегрират в алгоритмите за управление. В повечето разработки правилата се прилагат като набор от логически условия или евристични ограничения, което затруднява тяхното формално включване в оптимизационен модел и ограничава възможността за аналитичен анализ на получените решения.

На основата на направения критичен анализ може да се формулира следният **научен проблем** – въпреки наличието на разнообразни модели за зона за навигационна безопасност, алгоритми за избягване на сблъсък и оптимизационни методи за управление на движението на кораба, липсва формализиран, аналитично обоснован и изчислително ефективен модел, който да интегрира тези елементи в единна йерархично организирана система за автоматично управление на курса и скоростта в реално време, съвместима с нормативните изисквания и отчитаща експлоатационните критерии на плаването.

Първата глава представя цялостен, задълбочен и многопластов анализ на съвременния навигационен процес, като поставя основите за разработването на алгоритмични решения, необходими за автоматизацията в

корабоплаването. Изводите от анализа могат да бъдат разгледани в четири тематични направления: еволюцията на MASS и регулаторната рамка, структурата на навигационния процес и неговата информационна осигуреност, концепцията за зоната за навигационна безопасност (ЗНБ) и алгоритмите за решаване на навигационни задачи. Всеки от тези компоненти очертава критични зависимости и проблемни полета, които следва да бъдат адресирани както от научната общност, така и от индустрията и международните регулаторни органи.

Анализът на съвременните тенденции убедително показва, че автономните кораби вече не са концепция от бъдещето, а технологична реалност, която постепенно навлиза в морския транспорт. Съществуващите проекти – Yara Birkeland, ReVolt, iDolphin, Aries; автономните полигони – Jaakonmeri, Trondheim, Wanshan и др., демонстрират, че индустрията е готова за трансформация, докато регулаторната среда значително изостава. Това създава регулаторно-технологичен разрыв, който е основна бариера пред широкото въвеждане на MASS в международното корабоплаване.

Друг значим извод е свързан с ролята на човешкия фактор, който остава доминиращ източник на навигационни инциденти, според данните на EMSA. Това подчертава потенциалната добавена стойност на процеса на въвеждане на автономни кораби: намаляване на грешките, произтичащи от умора; недооценка на ситуациите и недостатъчна подготовка на екипажа. В същото време обаче автономните системи създават нови рискове, свързани с технологични откази, киберзаплахи и необходимост от изцяло нов тип компетентности.

Проведеният в България емпиричен анализ сред студенти и курсисти, както и международните наблюдения, показват съществен скептицизъм към MASS. Това е индикатор за необходимост от мащабна подготовка и промяна в обучителните програми, които трябва да развият умения за работа със системи, основани на автономни решения, алгоритми и изкуствен интелект. Във връзка с това първа глава аргументира, че настоящият етап на развитие на

MASS изисква предефиниране на ролята на моряците, като от оператори на корабните системи те трябва да се превърнат в оператори и надзорници на алгоритмични и автоматизирани процеси.

Втората част от първа глава представя обстойно разглеждане на навигационния процес, според различни автори, включително Джаковски и Копач, като очертава неговата многостепенна и многокомпонентна структура. Изводът, който се налага, е, че навигационният процес представлява сложно съчетание от взаимно свързани подпроцеси, всеки от които има специфични информационни изисквания, цели и ограничения.

Сред основните изводи са:

- Навигацията е информационно доминиран процес.

Без адекватно, непрекъснато и надеждно информационно осигуряване нито един от подпроцесите – планиране на прехода, определяне на мястото, наблюдение, управление на курса и маневрите – не може да бъде изпълнен. Съвременните интегрирани навигационни системи не просто подпомагат, а дефинират начина, по който се вземат решения.

- Липсва стандартизирана приоритизация на навигационната информация.

Това е особено критичен проблем в контекста на автономните кораби. Нито международните стандарти, нито класификационните организации предоставят модел за определяне на степента на важност на отделните източници на информация. Това оставя значителна празнина и повдига въпроса: как една автономна система ще знае коя информация е водеща?

- Навигационният процес трябва да бъде дискретизиран и формализиран.

Автоматизацията изисква разчленяване на процеса до ниво на алгоритмични стъпки, което е съществена разлика спрямо традиционното корабоводене, където голяма част от решенията се вземат интуитивно или на базата на натрупан опит.

- Съществува критична зависимост между навигационните и хидрометеорологичните фактори.

Плаването в открито море, стеснени райони, приливни зони, лед, намалена видимост или лоши метеорологични условия изисква различни решения, различна информационна структура и различни алгоритми. Това означава, че автономната система трябва да бъде адаптивна, което значително усложнява разработването на универсален модел.

Зоната за навигационна безопасност е най-критичният елемент от теоретичната рамка за автоматизация на навигацията. Първа глава демонстрира, че въпреки множеството модели (Фуджи и Танака, Гудуин, Дейвис, Колдуел, Лесков и Баранов, Джинксонг и др.), няма единно решение, което да е универсално приложимо.

Изводите по тази част са следните:

- ЗНБ е динамична, а не статична величина.

Седемте идентифицирани фактора (размер на кораба, скорост, плътност на корабния трафик, условия на видимост, човешки фактор, тип на кораба и опит) показват, че зоната непрекъснато се променя. Алгоритмите, които я използват, трябва да бъдат базирани на непрекъснат мониторинг, а не на предварително зададени стойности.

- Човешкият фактор остава водещ при определяне на реалните граници на зоната.

Дори при пълна автоматизация човешката преценка, историческият опит и психофизиологичните възприятия са основата, върху която са изградени всички досегашни модели. Това поставя предизвикателството как тези субективни елементи да бъдат формализирани.

- Нито един модел не отчита в пълна степен хибридна среда, в която ще съжителстват конвенционални и автономни кораби.

Повечето класически модели разглеждат взаимодействия между два кораба, но реалната среда включва десетки подвижни цели, навигационни препятствия, различни типове съдове и различна степен на автоматизация.

- Практическите приложения на ЗНБ в алгоритми за избягване на сблъсък са ограничени.

Повечето оптимизационни методи не интегрират напълно теорията за ЗНБ. Това създава важна празнина между теоретичните изследвания и реалните системи за автономна навигация.

Последната част на първа глава класифицира глобалните и локалните алгоритми, използвани в масовата практика и в научните изследвания.

- Глобалните алгоритми (вариационно смятане, динамично програмиране, изохронни методи, генетични алгоритми) са ефективни при дълги маршрути, но имат ограничена приложимост в динамични условия. Значим извод е, че глобалните алгоритми са неподходящи за стеснени райони поради висока изчислителна сложност, необходимост от предварително зададена информация, неспособност да реагират в реално време.

- Локалните алгоритми са реактивни, бързи и оперативни, но често работят без глобален контекст. Това ги прави подходящи при избягване на сблъсък, но недостатъчни за комплексно управление на маршрута.

- Необходимост от хибриден модел – изводите от анализа показват ясно, че нито глобалните, нито локалните алгоритми са достатъчни сами по себе си. Съвременният корабоплавателен процес изисква интегрирани алгоритми, които да съчетават стратегическо планиране, тактическа оптимизация, оперативни решения в реално време. Това е особено важно за автономните кораби, които трябва да решават навигационни задачи едновременно на стратегическо и тактическо ниво.

И така, първа глава очертава сложната взаимозависимост между информацията, средата, човешкия фактор и алгоритмите, които оформят навигационния процес. Тя доказва, че автоматизацията на корабоплаването е възможна, но изисква:

- ясно дефинирани информационни приоритети;
- формализиране на навигационния процес;
- адаптивни модели на зоната за навигационна безопасност;

- хибридни оптимизационни алгоритми;
- нова парадигма за обучение и подготовка на морските специалисти.

По този начин в първа глава, озаглавена „Анализиране на източниците на информация, необходима за управление на движението на кораба“, се изгражда необходимата теоретична рамка и се мотивира научната необходимост от разработване на нов модел за оценка и приоритизация на навигационната информация, който се разгръща в следващите части на дисертационния труд. Този научен дефицит обуславя необходимостта от разработването на нов подход, при който зоната за навигационна безопасност, геометрията на маневрата и оптимизацията на времето и разходът на гориво да бъдат обединени в последователна теоретична рамка. Именно решаването на този проблем формира научната мотивация и логическия преход към теоретичния модел и оптимизационната постановка, разгледани в следващите глави на дисертационния труд.

Глава втора

ПРОЕКТИРАНЕ И РАЗРАБОТВАНЕ НА ЗАДАЧИ ЗА АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА ДВИЖЕНИЕТО НА КОРАБА (ДВУЙЕРАРХИЧНА СТРУКТУРА НА ЗАДАЧИТЕ)

Втора глава от дисертационния труд представя теоретичната рамка, върху която се основава разработването на модела за автоматично управление на движението на кораба при заобикаляне на препятствие. Теоретичните основи включват концепции от навигацията, оптимизационното моделиране, теорията на относителното движение, алгоритмичните подходи за избягване на сблъсък и съвременните методи за би-нивова оптимизация. Тези теоретични направления формират концептуалната основа за изграждане на аналитичната задача, представена в настоящата глава.

2.1. Математически теории, описващи движението на кораб при избягване на препятствие

2.1.1. Теория на относителното движение

Теорията на относителното движение представлява фундаментален математически апарат, широко използван в корабоплаването, системите ARPA, навигационните радары, автоматизираните системи за избягване на сблъсък и в съвременните алгоритми за автономно корабоводене. Тя позволява сблъсъкът между два подвижни обекта да се анализира в координатната система на единия от тях, като така се опростяват оценяването на риска и изчисляването на маневрата за избягване.

Относителната скорост V_i между собствения кораб и целта се дефинира като векторна разлика между техните абсолютни скорости:

$$\vec{V}_i = \vec{V}_k - \vec{V}_m \quad (2.1)$$

където: V_k е вектор на скоростта на целта;

V_m – вектор на скоростта на собствения кораб.

Векторът на относителната скорост на целта определя начина, по който тя се „движи“ върху екрана на радара – независимо от това, каква е траекторията в абсолютното пространство. Работата в относително движение позволява задачата за избягване на опасно сближение да се формализира геометрично, чрез линиите на относително движение на целите и зони на безопасност, представени в полярна координатна система.

Линията на относително движение (Relative Motion Line, RML) е траекторията на целта върху радарния екран. Тя се приема за праволинейна и равномерна, което е фундаментално допускане в ARPA алгоритмите и в теорията за сближаване. Основните индикатори за риск са минималната дистанция на сближение с целта (CPA) – минималното разстояние между двете траектории, на собствения кораб и целта, при запазване на текущите параметри на движение и времето (TCPA), оставащо до достигане на CPA. Тези величини се изчисляват автоматично от ARPA и са част от критериите, използвани при автоматизираното вземане на решение.

2.1.2. Теоретична рамка на корабната динамика и хидродинамичните ограничения

В моделите за управление на движението на кораба често се прави опростяващото допускане, че той може моментално да изменя своя курс и скорост, съгласно изчисленото оптимално решение. Това е необходимо за аналитичното моделиране и за извеждане на затворени формули, но реалната корабна динамика се характеризира със съществени хидродинамични и инерционни ограничения, които влияят върху възможностите за маневриране. Поради тази причина е необходимо да се очертае теоретичната рамка на динамиката на кораба, за да се подчертае границата между математическия модел и физическата реалност, както и да се демонстрира как аналитичните решения могат да се адаптират или валидират спрямо реалните условия.

Корабът е масивно тяло с голяма водоизместимост и съответно значителна инерция. Това води до две фундаментални ограничения:

- Латентност при промяна на курса – маневрата на промяна на курса изисква време, за да бъде реализирано зададеното от руля отклонение. Дори при максимален ъгъл на руля корабът не завива моментално, а преминава през фази на забавено реагиране. Това поведение често се описва чрез модел на Номото от първи и втори ред.

- Ограничения при промяна на скоростта – промяната на скоростта (ускоряване или намаляване) зависи от характеристиките на главната машина, времето за реакция на управлението, момента на съпротивление на водата и инерцията на движението напред. Основният извод е, че скоростта не може да бъде променена моментално, което също ограничава степента на адаптация на маневрата в реално време.

Движението на кораба се определя от три основни групи хидродинамични сили:

- Пропулсивни сили, генерирани от витлото и управлявани от машината. Те определят силата на напредване, но тя се променя бавно, при увеличаване или намаляване на оборотите.

- Сили от управляващото устройство (рул) – относителното движение между корпуса и руля създава странична сила и моменти, които завъртат кораба. Големината им зависи от скоростта на движение и потока към руля.

- Хидродинамични съпротивления – съпротивлението на корпуса, съпротивлението на вълните и ефектите от странично течение ограничават ускорението и забавянето.

Маневреността на корабите се описва чрез количествени характеристики, като:

- изминато разстояние напред по време на завиване (advance);
- странично изместване (transfer);
- тактически диаметър на циркулацията (Tactical Diameter).

Тези показатели задават физическите граници на възможната траектория при смяна на курса.

Външните условия също въвеждат ограничения. Вятърът създава странично отклонение, което ограничава способността за точно следване на оптимална траектория. Вълнението влияе, като променя реалната скорост на кораба над грунота; предизвиква колебания в курса; влияе на работата на руля. Теченията модифицират относителното движение, което променя условията за избягване на сблъсък.

Аналитичният модел, изложен във втора глава, е построен върху идеализация, която се представя като моментална промяна на управляеми величини. Това позволява изчисляване на оптимални решения в реално време, но изисква следните уточнения:

- Моделът трябва да бъде разглеждан като приемо-предавател на решения, а не като точен симулатор на движението. Изчислената оптимална стратегия служи като насочващ вектор, който може да бъде адаптиран от системата за управление или от вахтения помощник.

- Необходимо е да се въведат „физически ограничения“ върху допустимите промени, например: максимално допустима промяна на курса за единица време; минимален интервал за промяна на скоростта; ограничения на руля (максимален ъгъл и скорост на движение).

- Целта на модела е да оптимизира логиката на решение, а не реалната кинематика.

2.2. Формализиране на видове управление на кораба

Безопасността на плаване на кораба е заложена като критерий при изпълнението на всяка задача на море. Предотвратяването на опасно сближение с подвижен или неподвижен обект изисква изпълнение на маневра в реално време, с изменение на курса, скоростта или и на двата компонента заедно. Такава маневра се изпълнява според няколко критерия: безопасна дистанция на разминаване; най-кратко време за разминаване; най-малък

разход на гориво; минимален риск за кораба и др. Разработването на модели и формализирането на такива модели за управление на кораба са предпоставки за тяхното автоматизирано изпълнение от компютърни средства. Така се създава потенциална възможност за реализиране на автоматично управление на движението на кораба без участието на човек. Това е и в съответствие с тенденциите за прилагане и експлоатация на безекипажно управление на морски съдове, което понастоящем се счита като най-перспективното направление в корабоплаването.

В настоящата глава на дисертационния труд е разработен формален модел за управление на кораб, при сближение с неподвижна или подвижна цел, с която съществува потенциална опасност от сблъсък. Дефинирана е оптимизационна задача, която посочва измененията на курса на кораба за избягване на опасно сближение с целта. Задачата определя количествено измененията в курса и разхода на гориво на кораба. Като целева функция са приложени изискването за минимизиране на времето за разминаване и разходът на гориво при среща с потенциално опасна цел.

2.3. Необходимост от разработване на формален модел за избягване на сблъсък с подвижна или неподвижна цел

Върху проблема за автоматизиране на процеса на управление на кораба са правени изследвания още от средата на миналото столетие. Примери за алгоритми за управление, които може да се прилагат при безекипажно управление на морски съдове, са дадени в монографията на Ла Вале (La Valle 2006). Общо свойство на алгоритмите за управление е, че те реализират три основни функции:

- планиране на курса на текущото плаване;
- избягване на сблъсък с подвижна или неподвижна цел;
- оптимизация на процеси, свързани с управлението и експлоатацията на кораба (Calvert et al. 1991; Coraddu et al. 2014; 2011).

Функцията „планиране на курса на текущото плаване“ при управлението на кораба е особено необходима при извършване на корекции за отклонение от предварително планиран курс, в случаите на маневриране при излизане и влизане в пристанище, при избягване на опасно сближение с цели на море. Последният случай за избягване на сблъсък се разглежда като основно изискване, което е задължително за изпълнение при реализиране на безопасно управление и експлоатация на кораба. Понастоящем, при управлението и експлоатацията на безекипажни кораби, изпълнението на функциите по безопасно разминаване с цели на море е задължително за включване и изпълнение от системата за управление на кораба (Deng et al. 2021). Разработването на количествени методи за планиране на курса на кораба понастоящем е интензивна област на изследване (Xiao et al. 2021).

С увеличаване на интензивността на корабоплаването и съответно на броя на морските транспортни средства безопасността при управление на кораба е основно и първостепенно изискване. Процедури по безопасно управление изискват те да се изпълняват в реално време. Затова и алгоритмите по решаване на съответната оптимизационна задача за управление трябва да позволяват своевременно получаване на решения за определяне на изменението на курса на кораба, на скоростта или и на двете заедно. Един актуален обзор по възможни решения за реализиране на безопасността на управление на движението на кораба е представен от Чен и колектив (P. Chen et al. 2021). За да се намали възможността от допускане на човешка грешка при избягване на сблъсък на кораба с препятствие, се препоръчва в системата за управление на кораба да се въвежда режим за вземане на решения, реализиран като информационен порядък, който ползва световната навигационна система e-Navigation (Gil 2021). Управлението на кораба при избягване на неподвижни цели може да се формализира като оптимизационна задача. Тази задача се решава с различни алгоритми (W. Zhang et al. 2021).

Разработването на методи за безопасно управление на кораба, както и популяризирането на добри практики за това, е важна дейност в активите на

Международната морска организация (ИМО). Разработването на такива модели, съобразени с препоръките на Организацията и на конвенция COLREG, е коментирано и оценено от Л. Сонг и колектив (Song et al. 2019).

Представеният анализ доказва важността на задачата за управление на курса и скоростта на кораба при негово плаване и извършване на маневри. Съответно задачата за избягване на опасно сближение с препятствие е съществен компонент за безопасността и експлоатацията на корабите от световното корабоплаване.

Във втора глава на дисертацията е разработен специфичен количествен модел за планиране на курса на кораба, за да се реализира избягване на опасно сближение с препятствие. Разработен е аналитичен модел, който цели да се оптимизират времето за отклонение на кораба от предварително планирана траектория и разходът на гориво поради разминаване с подвижна или неподвижна цел. Това отклонение е изчислявано да се реализира по оптимален начин, съгласно дефинирана аналитична задача, а изменението на курса на кораба да реализира безопасно заобикаляне на целта. Изследването дефинира оптимизационна задача, решенията на която определят оптимални стойности на изменението на курса на кораба и разхода на гориво при заобикаляне на препятствието.

В тази и следващите глави от дисертацията терминът „разминаване с цели“ ще бъде заменен с термина „заобикаляне на препятствие“, който е по-общ в контекста на изпълнението на задачата за оптимизиране на процеса.

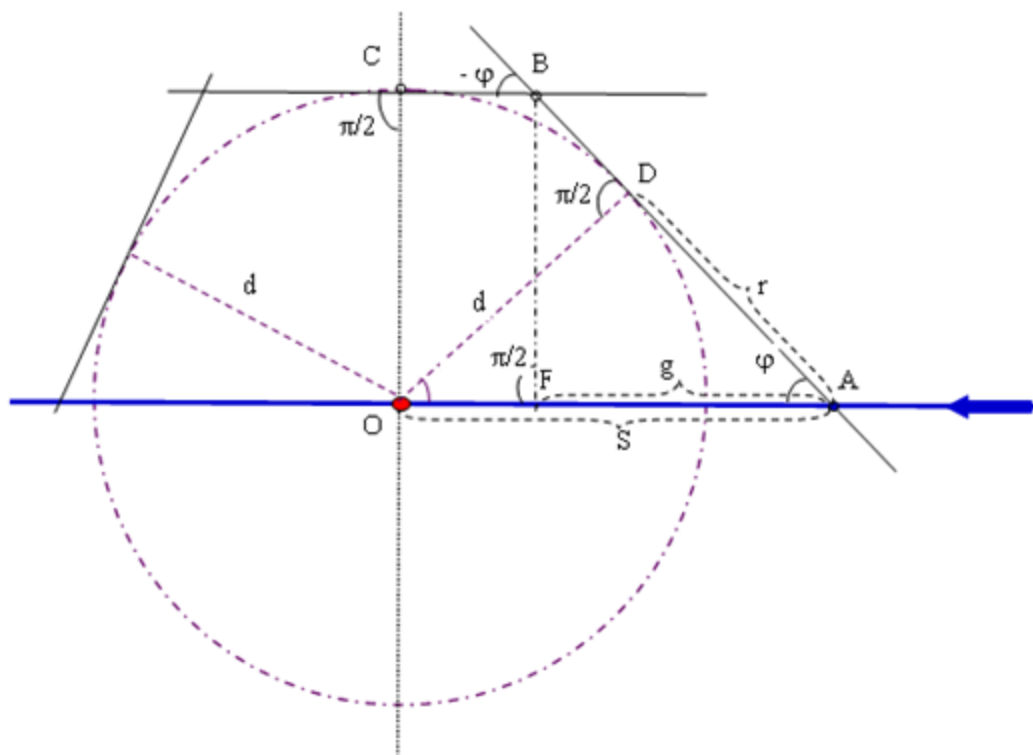
2.4. Разработване на формален модел за изменение на курса на кораба при заобикаляне на препятствие

Задачата за заобикаляне на препятствие изисква изчисляване на нови стойности на курса на кораба, така че да промени текущото направление на своето движение и по-късно да възстанови движението си по планирания път. Тези промени трябва да позволят безопасно плаване на кораба спрямо препятствието. Целта в общия случай също се движи по свой собствен път.

Решаването на задачата за заобикаляне на препятствието следва предварително приетото условие, че всички участници в процеса спазват правилата за движение COLREG. Промените, които трябва да направи собственият кораб при движението си, се избират по начин да се удовлетворят предварително дефинирани цели.

В дисертационната работа е избрана целева функция за оптимизиране на движението на собствения кораб, която да бъде времето, за което се изпълнява маневрата за избягване на опасно сближение с подвижна цел. Изисква се то да има минимална стойност. Като първо управляващо въздействие в този модел е дефинирана разликата между първоначалния относителен курс на целта, изчислен при откриването и захващането ѝ за автоматично следене, и планирания относителен курс на движение, вследствие на изменението на курса на собствения кораб за избягване на опасното сближение. Тази разлика се отбелязва с φ и накратко ще се именува „ъгъл на курса φ “. Другото управляващо въздействие в модела е скоростта на движение на кораба V_m . Тези два типа променливи в управлението на кораба са аргументи и решения на разработвания модел.

Моделът за заобикаляне на препятствие е представен в геометричен вид на фигура 2.1. Схемата изобразява относителното движение на целта така, както се наблюдава на екрана на радиолокационна станция. Собственият кораб е разположен в центъра на фигурата, а целта е вдясно от него, като текущото ѝ място се намира върху линията OA . Безопасното разминаване изисква целта да премине по линията на относително движение около собствения кораб, на зададено безопасно разстояние d . В общия случай целта е подвижна и нейната абсолютна скорост на движение е отбелязана с V_k .



Фигура 2.1. Геометрична интерпретация на движението при заобикаляне на препятствието от кораба

Разработваният сценарий в дисертационната работа и съответните обозначения са, както следва. Когато целта се намира в т. A , собственият кораб започва маневра с изменение на курса надясно. Правилата за безопасно разминаване изискват курсът да се промени така, че маневриращият кораб да се размине с целта на разстояние не по-малко от d . Това изискване геометрично е изобразено с окръжността с център – мястото на собствения кораб (центъра на екрана на радара) т. O , и радиус – зададеното разстояние d . Следователно от геометрични съображения, корабът трябва да измени своя курс, като целта започне да се движи по нов относителен курс по направление AB .

Направлението AB е допирателно към дефинираната окръжност с радиус d . Корабът следва новия курс за заобикаляне на препятствието, докато целта достигне т. B . След това той променя курса си така, че относителното

движение на целта да продължи в посока BC . Този относителен курс също е допирателен към окръжността, дефинираща безопасното разстояние d .

След като целта достигне т. C , приемаме, че корабът се е разминал с нея и трябва да промени курса си, за да се върне на първоначалния си път. В този случай най-бързото завръщане към планирания маршрут ще се извърши с изменение на курса, така че относителният курс на целта да следва симетрично на направленията BC и AB според фигура 2.1. Затова моделът „безопасно разминаване с препятствие“, при удовлетворяване на критерия за най-бързо изпълнение на маневрата, е разработван за направленията AB и BC . Движението по двете направления трябва да се изпълни с относителна скорост на целта, която е векторен сбор между абсолютната скорост на собствения кораб V_m и скоростта на движение на препятствието V_k . Така моделът е разработен за общия случай на нестационарно, движещо се препятствие.

При откриване на препятствието в т. A , радиолокационната система на кораба, която решава задачата за автоматично разминаване ARPA, измерва разстоянието до целта OA . На фигура 2.1 това разстояние е отбелязано с S . За управление на движението на кораба може да се приложат само две управляващи въздействия:

- Да се изменя абсолютната скорост на собствения кораб V_m .
- Да се изменя относителният курс на препятствието, представен като ъгъл φ .
- Да се изменят двете величини заедно.

Практиката е наложила, при разминаване с препятствие, да се променя курсът на кораба, с което изменението на относителния курс на препятствието става по-бързо. Затова фокусът на изследването ще бъде върху такъв сценарий.

Двете променливи (V_m, φ) определят множеството аргументи/решения на оптимизационната задача, която ще дефинира безопасното движение на кораба при избягване на препятствието.

Относителното движение на препятствието спрямо собствения кораб започва да се отчита за изпълнение на първата маневра по направление AB , от

точка A до точка B . Местоположението на точка A , съответно разстоянието AB , не е известно и то се определя вследствие от решаването на оптимизационната задача, която ще се дефинира. Новият курс на маневриращия кораб определя новия относителен курс на препятствието. Разликата между двата относителни курса, стойността на ъгъла φ , се формира между планираното относително направление на движение на кораба OA и новото относително направление на движение AB . Движението по направлението AB трябва да е допирателно към кръга за безопасно разминаване с център т. O и радиус със стойност d . Минимизирането на времето за извършване на маневрата по заобикаляне на препятствието и на разхода на гориво за нея се изпълнява чрез промяна на курса на кораба, посоката на вектор V_m . Неизменно динамиката на процеса води и до промяна на модула на V_m , но този фактор отчитаме и анализираме в експерименталната част на изследването.

2.5. Определяне на общата дължина на прехода при движението на кораба

Минимизирането на времето за маневра зависи от дължината на относителния път, който целта (препятствието) трябва да измине допълнително по направления AB и BC . Следователно е необходимо да се изчисли дължината на всяка отсечка AB и BC . Дължините на тези отсечки трябва да се представят като зависимости спрямо началните параметри на геометричната схема за заобикаляне на препятствието от фигура 2.1:

- разстоянието до препятствието S ;
- зададеното безопасно разстояние d ;
- текущата абсолютна скорост на кораба V_m ;
- абсолютната скорост на движение на препятствието V_k .

В дисертационното изследване тези зависимости се извеждат аналитично, като се прилагат геометрични съображения.

Разглежда се триъгълникът ΔFBA от фигура 2.1. Той е правоъгълен и за него е валидна зависимостта:

$$\sin\varphi = \frac{d}{AB} \text{ или } AB = \frac{d}{\sin\varphi} \quad (2.1)$$

Съответно: $\cos\varphi = \frac{g}{AB}$.

Следователно: $g = AB \cdot \cos\varphi = \frac{d \cdot \cos\varphi}{\sin\varphi}$.

Стойността на отсечката BC е равна на FC , или:

$$BC = OF = S - g \text{ или } BC = S - \frac{d \cdot \cos\varphi}{\sin\varphi} \quad (2.2)$$

Следователно общото разстояние от маневрирането на кораба е сумата на двете отсечки $AB + BC$, чиито дължини аналитично са определени от зависимости (2.1) и (2.2). И така, за общата дължина на маневрата (ОДМ) се получава:

$$\text{ОДМ} = AB + BC = \frac{d}{\sin\varphi} + S - \frac{d \cdot \cos\varphi}{\sin\varphi} (1 - \cos\varphi) \quad (2.3)$$

Общата дължина на маневрата ще се премине с относителна скорост на препятствието, която е векторна разлика между абсолютната скорост на движение на препятствието V_k и скоростта на собствения кораб V_m . Тъй като скоростите са векторни величини, трябва да се отчитат не само абсолютните стойности на скоростите V_m и V_k , но и ъгълът между двата вектора.

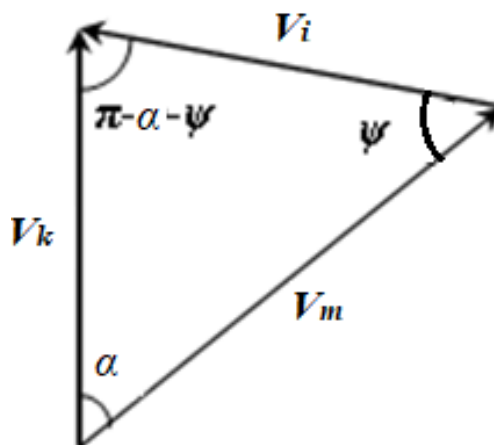
2.6. Определяне на стойността на относителната скорост между кораба и препятствието

Определянето на относителната скорост между кораба V_m и скоростта на препятствието V_k е представено геометрично на фигура 2.2. Ъгълът между тези два вектора в края на маневрата е неизвестният ъгъл φ плюс първоначалният

ъгъл α от фигурата, ъгълът на изменение на относителния курс на целта ($\varphi + \alpha$), който се получава при промяна на текущия курс на кораба, за да се избегне препятствието. Тук трябва да се отбележи, че ъгъл α е скаларна величина, равна на разликата между истинските курсове на целта и собствения кораб в момента на откриване на целта. Относителната скорост е отбелязана с V_i . С тази скорост препятствието ще премине разстоянието, определено с формула (2.3). Тази скорост се определя от векторната разлика:

$$V_i = V_k - V_m \quad (2.4)$$

Аналитичното определяне на стойността на V_i е направено от геометрични съображения, съгласно фигура 2.2:



Фигура 2.2. Векторна зависимост между относителната скорост на препятствието V_i , скоростта на кораба V_m и скоростта на препятствието V_k

Изменението на курса на собствения кораб определя изменението на ъгъл α до нарастване с ъгъл φ . Относителната скорост след маневрата е V_j , скоростта, с която се движи препятствието спрямо кораба. Тази относителна скорост трябва да се представи като аналитична зависимост спрямо двете скорости V_k и V_m , за което се използват същите разсъждения, както за определянето на скоростта V_i .

На следващия етап от решаването на задачата трябва да се изведе аналитична зависимост: $V_i = V_i(V_m, V_k)$. За целта се прилага синусова теорема за скоростния триъгълник от фигура 2.2. От геометрични съображения за фигура 2.2 са валидни равенствата:

$$\frac{V_i}{\alpha} = \frac{V_k}{\psi} = \frac{V_m}{\pi - \alpha - \psi} \quad (2.5)$$

От тези равенства трябва да се определи стойността на неизвестния ъгъл ψ .

Следва аналитично определяне на стойността на ъгъл ψ .

При използване на първи и трети компонент от равенствата (2.5), следва зависимостта:

$$\frac{V_k}{\psi} = \frac{V_m}{\pi - \alpha - \psi}, \text{ или: } \frac{\psi}{V_k} = \frac{\pi - \alpha - \psi}{V_m}.$$

Следователно: $\psi(V_m + V_k) = V_k(\pi - \alpha)$, или:

$$\psi = \frac{V_k(\pi - \alpha)}{(V_m + V_k)} \quad (2.6)$$

От зависимост (2.6) следва, че при зададени стойности на скоростите на препятствието V_k , на собствения кораб V_m и разликата между техните курсове α , стойността на ъгъл ψ е точно количествено определена. Следователно относителната скорост V_i може да се определи аналитично, съгласно формула (2.5).

При използване на първия и втория компонент от равенства (2.5), следва:

$$\frac{V_i}{\alpha} = \frac{V_k}{\psi} \text{ или } V_i = \alpha \frac{V_k}{\psi}.$$

След заместване на ъгъл ψ , съгласно зависимост (2.6), следва аналитична зависимост на относителната скорост V_i спрямо аргументите на задачата за управление V_m и α , и измерената като начално известна стойност на скоростта на движение на целта V_k , или:

$$V_i = \alpha \frac{(V_m + V_k)}{(\pi - \alpha)} \quad (2.7)$$

Зависимостта (2.7) показва, че ако скоростта на кораба V_m нараства, то относителната скорост на движение спрямо препятствието V_i също нараства. Съответно препятствието ще бъде заобиколено с по-голяма скорост и маневрата ще се извърши по-бързо. От тази зависимост се вижда, че ако относителният курс на препятствието се измени с ъгъл φ и стане $(\alpha + \varphi)$, то и относителната скорост V_i също се увеличава до V_j . Такъв случай имаме при решаване на задачата с изменение на курса на собствения кораб, т.е. при изменение на посоката на вектор V_m , без промяна на модула. Но тази зависимост не е пропорционална, тъй като ъгълът φ присъства и в знаменателя на формула (2.7). Следователно изменението на курса на кораба с ъгъл φ не влияе пропорционално на големината на относителната скорост на движение V_i .

2.7. Определяне на целевата функция за задачата за отклонение от препятствие

В дисертационната работа целевата функция, която е разработена за управлението на кораба при отклонение от препятствие, е избрана да минимизира времето за изпълнение на маневрите по безопасно разминаване. Тези маневри включват преминаване на отсечките около окръжността с радиус d , зададеното безопасно разстояние според фигура 2.1. По този начин се търси мултиплициран ефект на общото време на разминаване с препятствия в рамките на определен период от търговската дейност на собствения кораб. Във

връзка с това по-нататък в изследването ще заменим във формула (2.7) скаларната величина α с φ . Тази замяна е оправдана, тъй като разликата в началните курсове на собствения кораб и целта не оказва влияние на решаването на оптимизационната задача.

Времето за изпълнение на маневрите на кораба се определя от разстоянието, което препятствието трябва допълнително да измине по линията на относителния си път, и от относителната скорост, с която се движи около маневриращия кораб. Следователно времето за отклонение от препятствието числено ще се определи от отношението на пътя към скоростта на движение, или:

$$\frac{AB}{V_j} + \frac{BC}{V_i}$$

В това отношение изменението на курса на кораба и оттам – изменението на относителния път на целта, ъгъл φ , влияе на стойността на първоначалната ѝ относителна скорост V_i , съгласно формула (2.7). Допълнително изменението на ъгъла на относителния курс φ влияе и на стойността на разстоянието AB . От геометрични съображения на фигура 2.1 стойността на отсечката BC се определя от отрицателната стойност $-\varphi$ на изменението на относителния курс на препятствието.

Следователно оптимизационната задача за разминаване с препятствие от кораб се дефинира аналитично чрез минимизиране на времето за маневра, която се изпълнява за двете отсечки AB и BC :

$$\min_{\varphi, V_m} \frac{AB}{V_j(\varphi, V_m)} + \frac{BC}{V_i(-\varphi, V_m)},$$

или:

$$\min_{\varphi, V_m} \left(\frac{d}{\sin \varphi} \right) \frac{1}{V_j(\varphi, V_m)} + \left(S - d \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \right) \frac{1}{V_i(-\varphi, V_m)} \quad (2.8)$$

2.8. Определяне на ограниченията на задачата за заобикаляне на препятствие

В участъка на маневрата AB относителното движение на препятствието се определя от ъгъла φ . Този участък на движение трябва да бъде допирателен към кръга с радиус, равен на безопасното разстояние d около препятствието. Тук е прието, че разстоянието d е зададено от съображения за безопасност и нормативни изисквания, наложени от практиката. Тези норми обикновено са публикувани в системата за управление на безопасността на всяка компания. Следователно радиусът d и направлението на движение AB са перпендикулярни в допирната точка D , представени на фигура 2.1. Разстоянието $AD = r$ не е известно. То трябва да се определи като функция на начално зададените параметри S , d и на аргумента на оптимизационната задача, който се явява променливата φ . Тази зависимост се извежда от геометрични съображения, както следва:

- Разглежда се триъгълникът $\triangle ODA$. Той е правоъгълен и при прилагане на Питагоровата теорема, е валидно равенството:

$$d^2 + r^2 = S^2 \text{ или } r = \sqrt{S^2 - d^2} \quad (2.9)$$

- Допълнителна зависимост се използва от триъгълника $\triangle ODA$, откъдето следва, че:

$$\cos\varphi = \frac{r}{S} \text{ или } \cos\varphi = \frac{\sqrt{S^2 - d^2}}{S} \quad (2.10)$$

- При използване на зависимост (2.10), аналитичното условие за перпендикулярност между направлението AB и радиуса d се изразява в изпълнение на неравенството:

$$\cos\varphi \geq \frac{\sqrt{S^2 - d^2}}{S} = \sqrt{1 - \left(\frac{d}{S}\right)^2} \quad (2.11)$$

Съответно неравенство (2.11) трябва да се включи като аналитично ограничение в оптимизационната задача с целева функция (2.8).

2.9. Аналитично дефиниране на оптимизационната задача за разминаване с препятствие от кораб

Оптимизационната задача цели да се минимизира времето за изпълнение на маневрата за избягване на препятствие, като за целта то условно трябва да се движи по участъците AB и BC . За тези два участъка собственият кораб изменя своя курс с различни стойности, които определят ъгъла φ . Затова тук се извежда поотделно времето за преминаване през всеки участък.

- Определяне на времето за преминаване по участъка AB , $time(AB)$.

Времето за преминаване се определя от отношението между дължината на пътя AB и относителната скорост на движение на кораба спрямо препятствието V_j , или:

$$\min_{\varphi, V_m} [time(AB)] = \frac{AB}{V_j}.$$

Като се използват формулите (2.1) и (2.7), се извежда зависимостта:

$$\min_{\varphi, V_m} [time(AB)] = \min_{\varphi, V_m} \left[\frac{\frac{d}{\sin(\varphi)}}{\varphi \frac{(V_m + V_k)}{(\pi - \varphi)}} \right] = \min_{\varphi, V_m} \left[\frac{d \cdot (\pi - \varphi)}{\varphi \cdot (V_m + V_k) \cdot \sin \varphi} \right] \min_{\varphi, V_m} \quad (2.12)$$

- Определяне на времето за преминаване по участъка BC , $time(BC)$.

Времето за преминаване аналогично се определя от отношението на дължина на пътя BC към относителната скорост V_i . Като се приложат зависимостите (2.2) и (2.7), се получава:

$$\min_{\varphi, V_m} [time(BC)] = \min_{\varphi, V_m} \frac{BC}{V_i} = \min_{\varphi, V_m} \frac{\left(S - d \frac{\cos(-\varphi)}{\sin(-\varphi)} \right)}{(-\varphi) \frac{(V_m + V_k)}{(\pi - (-\varphi))}}.$$

След обработване на този израз и като се отчетат тригонометричните равенства $\cos\varphi = \cos(-\varphi)$, $\sin(-\varphi) = -\sin\varphi$, то следва:

$$\min_{\varphi, V_m} \left[- \frac{(S \sin\varphi + d \cos\varphi)(\pi + \varphi)}{\varphi (V_m + V_k) \sin\varphi} \right] \quad (2.13)$$

Формулите (2.12) и (2.13) се използват при аналитичното определяне на целевата функция на оптимизационната задача.

- Дефиниране на оптимизационната задача за разминаване с препятствие от кораб.

Целевата функция на оптимизационната задача съдържа като компоненти аналитичните изрази (2.12) и (2.13), които са изведени като функции на аргументите V_m и φ . Ограниченията на оптимизационната задача се определят от формула (2.11). От технологични съображения стойностите на аргументите на задачата φ, V_m трябва да удовлетворяват ограничения за техните стойности между долна и горна граница. Тези изисквания трябва да се включат допълнително към ограниченията на оптимизационната задача.

Следователно аналитичният вид на оптимизационната задача ще представя минимизирането на времето за промяна на курса на кораба поради допълнителна маневра за преминаване по кратките участъци на заобикаляне на препятствието – участъците AB и BC . Аргументите на оптимизационната задача са: изменението на относителния курс на целта (препятствието) – ъгъл φ , и нейната (неговата) скорост V_m , които са решенията на оптимизационната задача.

Ограниченията, които трябва да се отчетат, са свързани с изискването за допирателност на участъка AB към окръжността, която указва безопасното разстояние, дефинирана като кръг с радиус d около препятствието. Поставят

се допълнителни технологични ограничения за горна и долна граница на аргументите на задачата. Съответно аналитичният вид на оптимизационната задача за преодоляване на препятствие добива вида:

$$\min_{\varphi, V_m} \left[\frac{d(\pi - \varphi)}{\varphi (V_m + V_k) \sin \varphi} - \frac{(S \sin \varphi + d \cos \varphi)(\pi + \varphi)}{\varphi (V_m + V_k) \sin \varphi} \right] \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi &\geq \sqrt{1 - \left(\frac{d}{S}\right)^2} \\ \varphi^- &\leq \varphi \leq \varphi^+ \\ V_m^- &\leq V_m \leq V_m^+ \end{aligned}$$

където означенията $(*)^-$ и $(*)^+$ са приложени за представяне на долната и горната граница на съответните променливи. Задача (2.14) е съществено нелинейна и нейното решаване в този вид може да стане с изчислително трудоемки числени алгоритми. Това изисква време, което за целите на управление на кораб в условия на наличие на препятствие не е допустимо. Затова е целесъобразно да се апроксимира изходната задача (2.14) и да се определи субоптимално решение с малки изчислителни ресурси.

2.10. Апроксимиране на нелинейната оптимизационна задача

Задача (2.14) е съществено нелинейна и нейното решаване ще изисква значително изчислително време. Това не е допустимо при управление на кораба в реално време, при заобикаляне на препятствие и избягване на сблъсък. Практическият подход за прилагане на задача (2.14) е да се направят апроксимации на някои зависимости, където това е допустимо. В дисертационната работа апроксимации са приложени за тригонометричните зависимости $\sin()$ и $\cos()$. Те са развити в степенни редове на Маклорен, като са използвани апроксимиращите зависимости:

$$\sin(x) \approx x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots$$

$$\cos(x) \approx 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots$$

Прилаганите апроксимации в дисертационното изследване използват минимален брой компоненти от тези редове, съответно първа и втора компонента. Тези апроксимации са достатъчно точни за малки стойности на аргумента x . В оптимизационната задача (2.14) са направени заместванията:

$$\sin(\varphi) \approx \varphi \quad \text{и} \quad \cos(\varphi) \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2!}$$

След заместване на тригонометричните функции $\sin(\varphi)$ и $\cos(\varphi)$, задачата добива вида:

$$\min_{x,y} \left[\frac{0.5dx^2 + x(0.5\pi d - S)}{x(y + V_k)} \right] \quad (2.15)$$

$$1 - \frac{x^2}{2} \geq \sqrt{1 - \left(\frac{d}{S}\right)^2}$$

$$x^- \leq x \leq x^+$$

$$y^- \leq y \leq y^+,$$

където са използвани означенията за изменението на относителния курс на целта: $x = \varphi$, и на скоростта на собствения кораб: $y = V_m$. Тези означения са приети, за да се виждат ясно аргументите на оптимизационната задача и за да се направи разлика с изходните данни, които се изискват за дефинирането ѝ.

Формула (2.15) е нелинейна за математическото програмиране. Целевата функция е представена като рационална функция, а едно от ограниченията има квадратична форма. Благоприятно е, че задачата има малка размерност, защото тя съдържа само два аргумента – x и y . Ниската размерност на задачата благоприятства нейното решение да се изпълнява в реално време. От аналитичния запис на формула (2.15) се вижда, че скоростта на кораба $y = V_m$

не участва и не влияе на квадратичното ограничение. Съответно променливата u участва само в знаменателя на целевата функция. Следователно може да се предположи, че оптималното решение за скоростта на кораба u^{opt} ще бъде възможната максимална стойност на скоростта, определена от технологичните ограничения, или $u^{opt} = u^+$. Тези анализи може да се използват за постигане на бързо решаване на оптимизационната задача. В този случай аргументът u ще представлява само изменението на относителния курс на целта $x = \varphi$.

Наличието на аргумент на оптимизационната задача, чиято оптимална стойност лесно се определя, позволява задачата да се усложни, като се добавят нови ограничения или се усложни целевата функция на управлението. В дисертационното изследване е оценено, че задачата може да се усложни, като се въведе нова цел – минимизирането на разхода на гориво по време на изпълнение на маневрата за заобикаляне на препятствие. Включването на нова целева функция в дефинираната задача (2.15) тук е направено чрез прилагане на йерархичен подход при дефиниране на оптимизационната задача. Тя е разработена като двуйерархична задача, като на всяко йерархично ниво се оптимизира различна целева функция.

2.11. Разработване на двуйерархична задача за управление на кораба за заобикаляне на препятствие

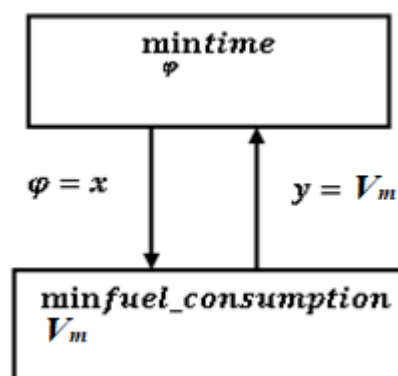
Дефинирането на двуйерархична оптимизационна задача позволява да се свържат взаимно две оптимизационни подзадачи. Такъв йерархичен подход дава възможност да се разшири пространството на изчислявани оптимални решения, което се съставя от решенията на двете подзадачи. Допълнително двуйерархичното моделиране позволява да се отчитат едновременно изискванията на две целеви функции в йерархичен порядък. Множеството от ограничения на двуйерархичната задача е по-голямо и включва ограниченията и на двете подзадачи. Това позволява да се отчитат повече изисквания при дефиниране и решаване на двуйерархичната задача. Тези допълнителни ползи не са възможни за реализиране при дефиниране и решаване на класическа

оптимизационна задача, която е еднонивова. При класическата оптимизация се взема предвид само една целева функция и оптималните решения отчитат относително ограничено множество от условия. При двуйерархичната задача за оптимизация двете подзадачи са взаимосвързани. Това означава, че решенията на горната подзадача променят параметри в целевата функция и/или ограниченията на долната подзадача. Съответно решенията на долната подзадача променят параметри в горната подзадача (Младенов et al. 1989; Стоилова 2010; Stoilov, Stoilova 1999).

За дисертационното изследване тук е избрана задача (2.15), като подзадача от горно йерархично ниво, и нейните решения за изменението на относителния курс φ променят параметри в долната подзадача. Последната тук е дефинирана да минимизира разхода на гориво при извършване на маневрата. Минимизирането на разхода на гориво се извършва чрез удачно изчисляване на скоростта на движение на кораба V_m . Графичната интерпретация на двуйерархичната оптимизация е представена като две взаимосвързани оптимизационни подзадачи, съгласно фигура 2.3.

2.11.1. Дефиниране на долната оптимизационна подзадача за оптимизиране на разхода на гориво

Зададено е долната оптимизационна подзадача да минимизира разхода на гориво. Разходът на гориво от кораба е пропорционален на скоростта, защото по-високата скорост се постига с по-голям разход (Mersin et al. 2017). Освен това, ако стойността на изменението на относителния курс φ е голяма, силата на въздействие на водните маси е голяма и тяхното преодоляване изисква допълнителен разход на гориво, за да се поддържа зададена скорост. Следователно разходът на гориво от кораба е пропорционален на две управляващи променливи – $x = \varphi$ и $y = V_m$.



Фигура 2.3. Двуйерархична оптимизационна задача, като позиция на две подзадачи

Този анализ позволява да се формализира целевата функция на долната оптимизационна задача като пропорционална зависимост:

$$\min_{x,y} G = \lambda xy \quad (2.16)$$

където λ е пропорционален коефициент. Той може да се избере по такъв начин, че стойността на G да представлява обемът на изразходваното гориво. Тъй като изменението на относителния курс φ на целта и скоростта на собствения кораб V_m имат различни дименсии, чрез коефициента λ може да се изведе нова дименсия на целевата функция G , като за случая е удачно това да бъде обемът/количеството на изразходеното гориво. Необходимо и важно е извеждане на аналитична зависимост между аргументите на задачата x и y . В дисертационното изследване тази зависимост е избрана да бъде в линеен вид:

$$\alpha x + \beta y \leq \Delta V \quad (2.17)$$

Физическата интерпретация на тази зависимост показва намалението на скоростта на кораба y не само при промяна на скоростта, но и при промяна на

относителния курс на целта x . Ограничението, което се задава чрез формула (2.17), означава, че това общо намаление на скоростта не трябва да бъде по-малко от предварително дефинирана стойност ΔV . Коефициентите α и β преобразуват съгласувано мерните единици на променливите в неравенството. Така оптимизационната подзадача на долно йерархично ниво минимизира целевата функция (2.16), като удовлетворява ограничение (2.17). Аналогични технологични ограничения за горната и долната граница на стойностите на аргументите на задачата, подобно на горната подзадача, може да се добавят допълнително.

Двуйерархичната оптимизационна задача се съставя като композиция на йерархично свързани две оптимизационни подзадачи. Горната оптимизационна задача изчислява оптималната стойност на аргумента x , при зададена стойност на решението от долната оптимизационна подзадача y , $x^{opt}(y)$. Съответно долната оптимизационна задача изчислява аргумента y , при зададена стойност на решението x , $y^{opt}(x)$. Двуйерархичната задача има вида:

$$\min_x \left[\frac{0.5dx^2 + x(0.5\pi d - S)}{x(y + V_k)} \right] \quad (2.18)$$

$$1 - \frac{x^2}{2} \geq \sqrt{1 - \left(\frac{d}{S}\right)^2}, \quad x^- \leq x \leq x^+$$

където:

$$y = \arg \left\{ \begin{array}{l} \min_y G = \lambda xy \\ \alpha x + \beta y \leq \Delta V \\ y^- \leq y \leq y^+ \end{array} \right\}$$

Крайното оптимално решение на (2.18) съответства на зависимостта $x^{opt}(y^{opt})$, където решението на горната оптимизационна подзадача x^{opt} е определено със стойността на решението на долната подзадача y^{opt} .

Съответно с решението на горната подзадача x^{opt} е намерено решението на долната подзадача $y^{opt}(x^{opt})$.

Разработеният модел се отличава със следните особености:

- Аналитична формулировка – вместо да се разчита на общ числен оптимизатор, са изведени конкретни аналитични зависимости за дължините на участъците от относителния път, относителната скорост и времето на маневрата. Това позволява да се формулира целевата функция в затворен вид.

- Апроксимация чрез редове и опростяване – чрез използване на подходящи разлагания (ред на Маклорен), нелинейните зависимости се приближават с полиноми, което значително намалява изчислителната тежест при решаване на задачата в реално време.

- Двунивно (двуйерархично) оптимизационно формулиране – вместо една комплексна многокритериална функция, задачата е разделена на две последователни подзадачи: горно ниво – минимизация на времето на маневрата чрез избор на оптимален относителен курс, и долно ниво – минимизация на разхода на гориво чрез подбор на оптимална скорост, при условие че безопасността и времето вече са осигурени.

Този подход се различава от класическата многокритериална оптимизация и е подходящ за навигационни задачи, където някои критерии (безопасност, време) имат приоритет пред други (гориво).

- Ограничена изчислителна сложност – чрез аналитичния характер на решенията, броят на аритметичните операции е предварително известен и сравнително малък. Това е съществено предимство спрямо методи като „подсилено обучение“ (Reinforcement Learning, RL) или генетични алгоритми, при които изчислителната цена може да нараства значително с броя на целите.

Изборът на аналитичен, а не чисто числен оптимизационен подход в дисертацията може да бъде обобщен, както следва:

- Практически изисквания за реално време – навигационните решения при ситуации на сближение трябва да се вземат за много кратко време, а не за минути.

- Прозрачност и проверимост – аналитичните формули позволяват по-лесно верифициране, доказване на свойства и проверка за съответствие с COLREG, отколкото „черни кутии“ (например някои числени оптимизатори или RL модели).

- Инженерна реализуемост – простите изчислителни схеми са по-лесни за внедряване в корабни системи с ограничени ресурси (например в съществуващи ECDIS/ARPA платформи или автономни USV).

Следователно, макар разработеният модел да не използва директно общи числени методи, той стъпва върху концепциите на нелинейната оптимизация, но ги адаптира към специфичните нужди на корабоводенето чрез аналитична формулировка и йерархична структура.

2.11.2. Алгоритмична последователност за оперативно прилагане на двуйерархичния модел

Анализът на досегашните изследвания показва, че повечето алгоритми за избягване на сблъсък се фокусират или върху чисто геометрични подходи, или върху изчислително-интензивни методи за машинно обучение, които често остават „черна кутия“ за корабоводителите. Предложеният в настоящата глава двуйерархичен модел преодолява тези ограничения, като разделя задачата на две взаимосвързани нива, съответстващи на приоритетите в реалното корабоводене: първостепенно осигуряване на навигационна безопасност и последваща оптимизация на ресурсите.

В основата на разработения алгоритъм заляга концепцията за двунивово програмиране, произтичащо от теорията на игрите на Стакелберг. В тази парадигма се дефинират две нива на вземане на решения – горно ниво (водещо) и долно ниво (последващо). В навигационния контекст водеща е задачата за минимизиране на времето за маневра и осигуряване на безопасно разстояние на разминаване, докато последователят е задачата за оптимизиране на разхода на гориво чрез прецизно управление на скоростта. Тази йерархия не е случайна. Тя отразява навигационната практика, при която безопасността

никога не може да бъде компрометирана в името на икономията, но икономията трябва да бъде постигната в рамките на безопасното решение (таблица 2.1).

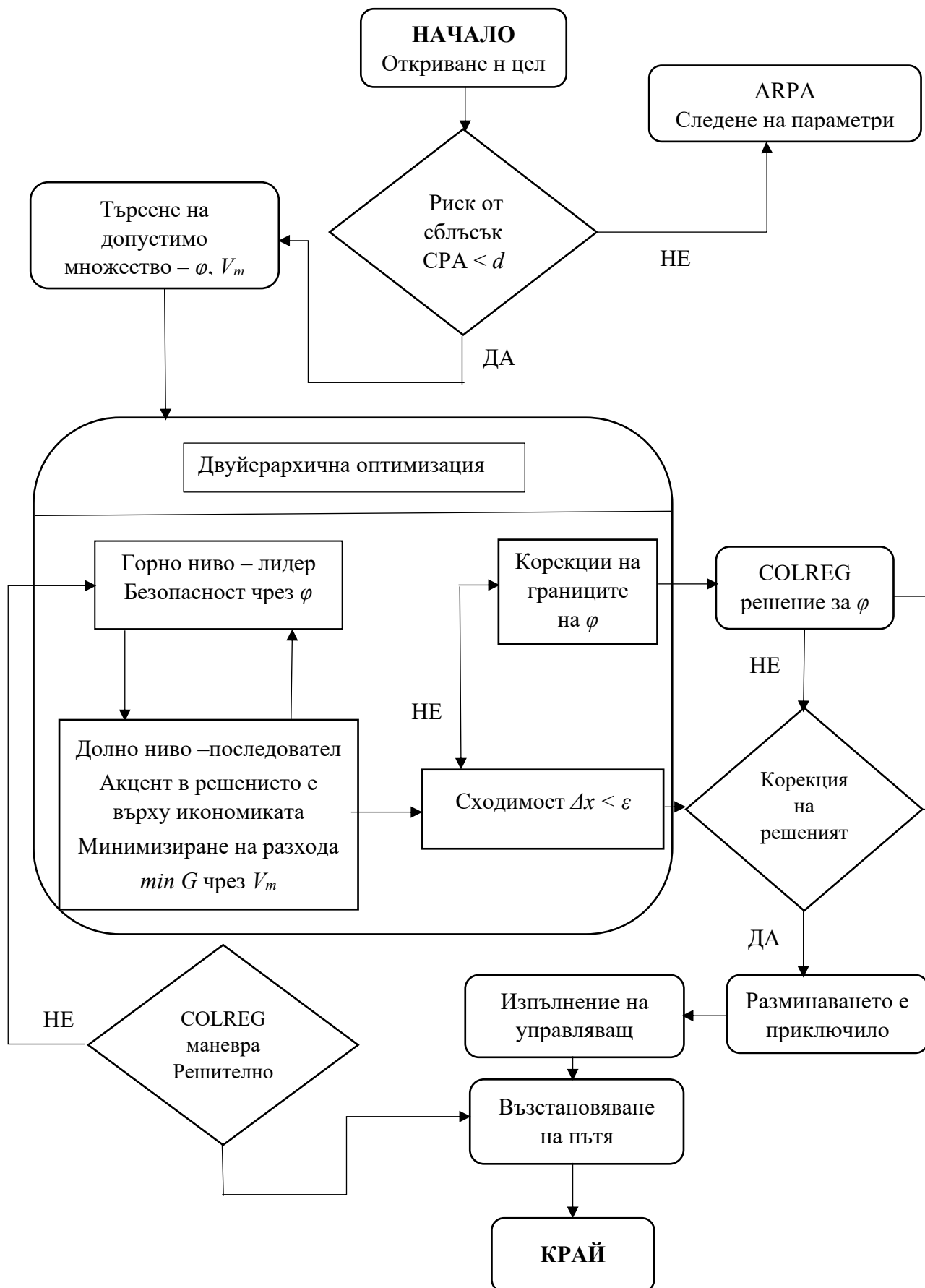
Таблица 2.1. Принцип на създаване на алгоритъм за двуйерархична оптимизация при разминаване на кораби

| Ниво на оптимизация | Роля | Целева функция | Управляващи променливи |
|---------------------|-----------------------------|---|--|
| Горно ниво | Лидер (Безопасност) | Минимизиране на общото време за маневра T_{total} | Изменение на относителния курс φ |
| Долно ниво | Последовател (Икономика) | Минимизиране на разхода на гориво G | Абсолютна скорост на кораба V_m |

Връзката между двете нива е функционална: решението на горното ниво променя параметрите на допустимата област на долното ниво, а оптималният отговор на долното ниво влияе върху стойността на целевата функция на горното ниво. Това създава затворен цикъл на оптимизация, който гарантира, че крайната маневра е не само безопасна, но и енергийно ефективна.

Графичната схема на алгоритъма илюстрира логическата последователност на операциите – от постъпването на сурови данни от сензорите до генерирането на управляващо въздействие към рулевата машина и главния двигател (фиг. 2.4).

Процесът започва с фазата на събиране на данни, където AIS и ARPA информацията се синхронизират. Важно е да се отбележи, че алгоритъмът изисква висока честота на опресняване, тъй като динамиката на навигационната обстановка може да се промени рязко при маневриране на целта. Следва стъпката на оценка на риска, базирана на Collision Risk Index (CRI), който превръща CPA и TCPA в скаларна величина между 0 и 1.



Фигура 2.4. Алгоритъм за реализация на двуйерархичната оптимизация при решаване на задача за разминаване на кораби

Класификацията на ситуацията съгласно COLREG е критичен момент, тъй като тя налага „твърди“ ограничения върху управляващите променливи. Например в ситуация на срещни курсове (правило 14), алгоритъмът автоматично ограничава интервала на φ само до положителни стойности, изключвайки възможността за поворот наляво, което би било несъответствие на правилата.

В същинския оптимизационен блок се извършва итеративното решаване на двете подзадачи. Горното ниво изчислява оптималния относителен курс φ чрез минимизиране на апроксимираната функция на времето. Тъй като апроксимацията намалява изчислителната тежест, този блок може да извършва хиляди симулации за части от секундата, като търси глобалния минимум в рамките на допустимата област. Долното ниво приема този ъгъл като фиксиран параметър и търси най-добрата скорост V_m , която удовлетворява техническите ограничения на двигателя и минимизира разхода.

Сходимостта на алгоритъма се постига, когато измененията в решенията на двете нива Δx станат по-малки от предварително зададена точност ε . Този момент представлява равновесие, при което собственият кораб е намерил траектория, която го разминава безопасно за най-кратко време и с минимален енергиен ресурс.

Въпреки че моделът е дефиниран за два кораба, кораб, който отстъпва път, и кораб, на който се отстъпва път, в реалността навигационната обстановка често включва множество цели. Алгоритъмът е проектиран да се справя с такива ситуации чрез принципа на итеративната редукция. Той идентифицира критичното препятствие (това с най-висок риск) и изчислява маневра спрямо него, като същевременно проверява дали това решение не създава конфликт с останалите обекти.

Ако се открие потенциален конфликт с вторична цел, алгоритъмът добавя нейното безопасно разстояние като допълнително ограничение в горното ниво и преизчислява φ . Този процес продължава, докато се намери „прозорец“ в пространството на курсовете, който удовлетворява изискванията

за безопасност спрямо всички цели едновременно. Така предложеният модел се мащабира ефективно: от проста ситуация „кораб – кораб“ до сложни сценарии в зони с натоварен корабен трафик.

Предложеният двуйерархичен алгоритъм съчетава прецизността на аналитичните методи с гъвкавостта на йерархичната оптимизация. Той е детерминистичен, което означава, че при едни и същи входни данни винаги ще генерира едно и също оптимално решение – свойство, което е от решаващо значение за сертифицирането на автономни системи.

2.12. Анализ на COLREG в контекста на разработвания модел за управление на кораба

Международните правила за предпазване на корабите от сблъскване на море (COLREG) представляват нормативна основа, която определя отговорностите, действията и ограниченията при различни навигационни ситуации. Всеки формален модел за автоматично управление на движението на кораба трябва не само да осигурява безопасност и ефективност, но и да бъде съвместим с COLREG. Това е особено важно при разработването на оптимизационни задачи, при които решенията се вземат автоматично и трябва да отразяват поведението на обучен корабоводител, спазващ нормативните правила.

Разработваният в дисертационното изследване модел може да бъде разгледан в контекста на следните ключови правила от COLREG.

Правило 7: Опасност от сблъскване (Risk of Collision)

Това правило изисква своевременно и категорично определяне на риска от сблъскване чрез използване на всички налични средства. В модела оценката на риска е формализирана чрез:

- Относителното движение на препятствието.
- Оценка на минималната дистанция на сближение d .
- Геометричния модел на допирателни траектории.

- Целевата функция за минимизиране на времето до безопасно разминаване.

По този начин моделът обективно представя изискванията на правило 7 и ги превръща в строго математически критерии.

Правило 8: Действие за избягване на сблъскване (Action to Avoid Collision)

Правило 8 изисква:

- Действията да бъдат навременни.
- Действията да бъдат решителни (substantial).
- Промяната на курса да бъде добре видима и с ясна навигационна цел.
- Маневрата да доведе до явно увеличаване на дистанцията на разминаване.

В модела тези изисквания се изпълняват чрез:

- Минимизиране на времето за маневра ($time(AB) + time(BC)$).
- Аналитично налагане на условието за допирателност към безопасния радиус.
- Ограничението (2.11), което гарантира „съществена промяна“ на траекторията.
- Условието, че маневрата води до безопасен резултат, независимо от скоростта на целта.

Следователно правило 8 е имплицитно вложено в оптимизационната задача.

Правило 15: Ситуации на пресичане (Crossing Situations)

Моделът допуска дефиниране на изменението на относителния курс φ на целта като управляващо въздействие. В контекста на правило 15:

- Когато препятствието е от десния борд на собствения кораб, тогава той е кораб, който отстъпва път (give-way vessel). В този случай φ трябва да бъде положителен, ако приемем за нулева стойност направлението на първоначалната линия на относително движение на целта.

- Когато препятствието е от левия борд на собствения кораб, тогава той може и трябва да запази курса си. В този случай φ може да бъде близък до 0 или отрицателен.

- Ограниченията върху φ в задачата могат да бъдат съобразени с COLREG.

Добавянето на тези ограничения съществува като възможност за разширяване на оптимизационния модел.

Правило 19: Ограничена видимост (Restricted Visibility)

В условия на ограничена видимост:

- V_m, V_k могат да се считат с допълнителни неопределености.
- Безопасният радиус d трябва да бъде увеличен.
- Алгоритъмът за оптимално φ трябва да допуска по-консервативни решения.

Това може да се реализира в модела чрез:

- Задаване на по-голяма долна граница на d .
- Ограничаване на максималната скорост V_m .
- Въвеждане на допълнителни ограничения към (2.14).

Аналитичният модел, разработен в дисертацията, е в пълно съответствие с COLREG. Количествените зависимости за φ , V_m , безопасното разминаване и времето на маневра представляват формално отражение на изискванията на правилата. Това позволява интеграция на модела в съвременни системи за автономно управление, които трябва да гарантират поведение, непротиворечащо на международната нормативна рамка.

2.13. Сравнение с алтернативни подходи за избягване на опасно сближение

От направения анализ в първа глава става ясно, че през последните години в морската навигация са разработени множество алгоритми и математически подходи за избягване на опасно сближение. За да се очертаят

предимствата, ограниченията и специфичната приложимост на предложения оптимизационен модел, е важно да се покаже как той е позициониран в контекста на съществуващите методи. За целта представяме сравнителен анализ между предложената в дисертацията оптимизационна рамка и четири основни групи методи, създадени на базата на анализа в първа глава:

- Геометрични методи (ГМ) за избягване на опасно сближение с подвижни цели (Velocity Obstacles) – заложен е принципът на определяне на област от „забранени скорости“, при които собствената траектория води до сближение. Те третираат задачата за избягване на опасно сближение като проблем на геометрично пресичане на траектории. Предимствата на тази група методи са проста геометрия, бързи изчисления и възможност за разминаване с множество препятствия едновременно. Важен принос на геометричните методи е тяхната изчислителна лекота. Поради малкия брой операции и отсъствието на оптимизационни цикли този тип алгоритми са подходящи за системи в реално време. Именно това ги прави приложими за морската навигация, където решенията трябва да бъдат вземани в рамките на секунди.

Като основни недостатъци може да бъдат посочени: неотчитането на правилата за разминаване на море – COLREG; негарантиране на зададената минимална дистанция на разминаване d ; моделирането на линейни траектории, които често са неприложими за движението на корабите.

- Кооперативни методи (КМ) с множество действащи участници – алгоритми за избягване на сблъсък, при които повече от един участник променя своето движение, така че да се постигне безопасност чрез взаимно и съгласувано действие. Те работят в среда с множество автономни агенти и са основани на идеята за „споделена отговорност“. Най-характерен представител е методът на споделено избягване на опасно сближение – ORCA (Optimal Reciprocal Collision Avoidance). Макар да са ефективни при роботизирани системи, тези методи са несъвместими с нормативните изисквания на COLREG, тъй като предполагат кооперация, каквато реалните кораби не прилагат. Други недостатъци са необходимост от моментални корекции на

пътя и скоростта и липсата на оптимизация на разход на гориво или време за изпълнение на маневрата.

- Полеви и вариационни методи (ПВМ) – глобални методи за планиране на плаването на кораби. Предимствата са в това, че се избират глобални траектории, които пресичат големи водни пространства, и работят добре при отклонение от опасно сближение със статични препятствия. Недостатъците са в това, че: изчислителните процеси са много тежки и не протичат в реално време; трудно приложими са за отклонение от динамични препятствия и интегрирането с COLREG е непряко.

- Обучение чрез подсилване и AI методи (ОП) – тези методи използват обучаем агент, който активно взаимодейства със средата. Предимствата се заключават в това, че те са самообучаващи се, способни са да работят в неопределена среда и са широко приложими в разработваните модели на автономни кораби. Недостатъците им са: разход на огромни ресурси за обучение; липса на гаранция за безопасност при непознати ситуации и често регистрирано неспазване на COLREG.

Изборът на четирите разгледани подхода е мотивиран от тяхната водеща роля в научната литература и от факта, че те представляват основните парадигми за решаване на задачи, свързани с избягване на препятствия и оптимизиране на движението в динамична среда. Всеки от тези методи отразява различна философия за управление на движението, което позволява обективно и многомерно сравнение с разработвания в настоящата дисертация модел.

Първата причина за избора им е, че тези подходи покриват четирите основни класа алгоритми, използвани в съвременните системи за автономно управление:

- Геометрични методи – представени от Velocity Obstacles (VO).
- Кооперативни методи – представени от Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA).

- Полеви и вариационни методи за глобално планиране – представени от Fast Marching Method (FMM).

- Методи на машинното обучение – представени от Reinforcement Learning (RL).

Тази класификация е широко използвана в научните публикации по роботика, автономно управление и морско корабоводене, което позволява получените сравнения да бъдат валидни спрямо утвърдения международен научен контекст.

Втората причина се свързва с различните съвкупности от предимства и ограничения, характерни за всеки от методите. Например VO и ORCA са бързи и изчислително икономични, но не гарантират спазването на COLREG, нито оптимизация на разхода на гориво. FMM генерира глобално оптимални решения, но е изчислително тежък и трудно приложим за динамични препятствия. RL подходите предлагат висока адаптивност, но страдат от липса на теоретични гаранции за безопасност и предсказуемост. Това разнообразие от силни и слаби страни позволява да бъдат подчертани специфичните предимства на разработвания модел за двуйерархична оптимизация, а именно: аналитична строгост, съвместимост с COLREG, възможност за оптимизация на време и гориво и ниска изчислителна сложност, подходяща за управление в реално време.

Третата причина е свързана със стремежа за провеждане на методологично цялостно сравнение, което включва както математическата природа на моделите, така и тяхната практическа приложимост в морската навигация. Чрез включването на тези четири подхода се покриват ключовите критерии за оценка на алгоритми за избягване на сблъсък, а именно:

- Съвместимост с COLREG;
- Изчислителна ефективност;
- Устойчивост при динамични цели;
- Приложимост в условия на реално време;

- Възможност за включване на множество критерии (време, гориво, безопасност);

- Прозрачност на алгоритмичните решения.

Четвъртата причина е свързана с актуалността на въпросните методи. Те са сред най-често използваните и цитирани подходи както в научната литература, така и в индустриалните реализации на автономни системи. Поради това сравнение с тях обезпечава висока научна стойност на анализа и ясно позиционира разработвания модел в контекста на съвременните методи за автоматизирано управление.

В заключение, изборът на VO, ORCA, FMM и RL като базови подходи за сравнение е обоснован чрез тяхната представителност, различна теоретична основа и широко разпространение в практиката. Сравнението с тези методи позволява да бъдат ясно очертани предимствата, приложимостта и научната стойност на разработвания в дисертацията модел.

Таблица 2.2 представя сравнение на базовите качества на четирите групи методи с предложения модел на двуйерархична оптимизация на движението на кораба, при отклонение от подвижна или неподвижна цел.

Таблица 2.2. Сравнителна таблица на параметрите на използвани методи за оптимизация с предложения подход

| Група методи | Геометрия | COLRE G | Реално време | Нелинейна оптимизация | Гориво |
|---------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| ГМ (VO) | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| КМ (ORCA) | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| ПВМ (FMM) | ✓ | ✓* | ✗ | ✓ | ✗ |
| ОП (RL) | ✓ | ✗ (Неясно) | ✗/✓ | ✓ | ✓* (Приблизително) |
| Двуйерархична оптимизация | ✓✓ | ✓✓ | ✓✓ | ✓✓ | ✓✓ |

*Частично.

2.14. Теоретични свойства и съществуване на решение на оптимизационната задача

Оптимизационната задача за управление на движението на кораба при заобикаляне на препятствие, формулирана в раздели 2.9 – 2.11, представлява съществено нелинейна задача с непрекъснати аргументи и нелинейни ограничения. За да бъде моделът не само практически приложим, но и теоретично обоснован, е необходимо да се изследват основните математически свойства на задачата, както и условията за съществуване на оптимално решение. Този анализ е особено важен в контекста на управление на процесите в реално време, където липсата на решение или нестабилното поведение на алгоритъма би довело до недопустими навигационни рискове.

2.14.1. Допустима област и непрекъснатост на целевата функция

Оптимизационната задача (2.14) и нейният апроксимиран вид (2.15) са дефинирани върху компактна допустима област, зададена чрез:

- геометричното ограничение за безопасно разминаване, изразено чрез неравенството (2.11);
- технологични ограничения за минимална и максимална стойност на изменението на относителния курс φ ;
- технологични ограничения за минимална и максимална допустима скорост на собствения кораб V_m .

Нека допустимата област да се означава с множеството:

$$\Omega = \{(\varphi, V_m) \in R \mid \varphi^- \leq \varphi \leq \varphi^+, V_m^- \leq V_m \leq V_m^+, g(\varphi, S, d) \leq 0\},$$

където $g(\cdot)$ представлява геометричното ограничение за допирателност към безопасната зона около собствения кораб.

Поради физическия смисъл на променливите и предварително зададените граници, множеството Ω е затворено и ограничено, а следователно компактно.

Съществуването на оптимално решение на формулираната оптимизационна задача се гарантира от теоремата на Вайерщрас за съществуване на екстремум. Съгласно тази теорема, ако една реална функция е непрекъсната върху непразно, затворено и ограничено множество, то тя достига своя минимум и максимум върху това множество (Stoilov, Stoilova 1999; Bertsekas 1999).

В разглеждания случай целевата функция за минимизиране на времето за маневра е непрекъсната спрямо управляващите променливи, а допустимата област е ограничена от физически, геометрични и технологични ограничения, което я прави компактна. Следователно, на основание на теоремата на Вайерщрас, може да се заключи, че оптимизационната задача притежава поне

едно оптимално решение, което е крайно, физически реализуемо и съвместимо с навигационните ограничения на управляемия обект.

Целевата функция за минимизиране на времето за маневра е получена като сума от рационални функции, които са непрекъснати върху Ω , с изключение на тривиалния случай $V_m = 0$, който е изключен чрез технологичните ограничения. Следователно целевата функция е непрекъсната върху компактна област. От теоремата на Вайерщрас следва, че оптималното решение на задачата съществува.

Физическите ограничения на кораба изключват възможността оптималното решение да изисква безкрайно големи или нереалистични стойности на управляващите променливи, и по-специално:

- Ъгълът на изменение на курса на собствения кораб, релевантен на изменението на относителния курс на целта φ , е ограничен от максималния допустим ъгъл на руля и от изискванията на COLREG за „съществена, но разумна“ маневра.

- Скоростта V_m е ограничена от характеристиките на главната машина и условията на плаване.

Поради тези ограничения оптималното решение е не само математически ограничено, но и физически реализуемо. Това свойство отличава разработвания модел от чисто теоретични оптимизационни постановки, при които оптимумът може да лежи в недопустима или нефизична област.

Поради нелинейния характер на целевата функция и наличието на геометрични ограничения, оптималното решение на задача (2.14) в общия случай не е гарантирано да бъде единствено. Възможно е да съществува малък интервал от стойности на φ , за които времето за маневра има близки минимални стойности.

От практическа гледна точка това не представлява недостатък, тъй като:

- Всички решения в този интервал удовлетворяват изискванията за безопасност.

- Разликите във времето за маневра са пренебрежимо малки.
- Системата за управление може да избере решение с допълнителни критерии, например минимално натоварване на рулевото устройство или по-добра съвместимост с COLREG.

Следователно наличието на множество близки оптимални решения повишава гъвкавостта и адаптивността на модела, вместо да я ограничава.

Апроксимираната оптимизационна задача (2.15) е получена чрез разлагане на тригонометричните функции в ред на Маклорен и запазване на първите членове. Това води до целева функция от рационален тип и квадратично ограничение. Въпреки че задачата остава нелинейна, тя запазва ключовите свойства на изходната постановка:

- непрекъснатост на целевата функция;
- компактност на допустимата област;
- съществуване на оптимално решение.

Допълнително, за малки стойности на φ , което е характерно за реални навигационни маневри, апроксимираната задача е локално еквивалентна на изходната нелинейна задача. Това означава, че оптималното решение на апроксимираната задача представлява субоптимално, но близко до оптималното решение на изходния проблем.

Това свойство е от ключово значение за приложение на модела в реално време, тъй като позволява значително намаляване на изчислителната сложност, без съществена загуба на оптималност.

2.14.2. Съществуване на решение при двуйерархичната оптимизация

Двуйерархичната оптимизационна задача (2.18) представлява композиция от две задачи с непрекъснати целеви функции и компактни допустими области. Горната подзадача гарантира съществуване на оптимално решение за изменението на относителния курс φ . При фиксирана стойност на φ , долната подзадача за минимизиране на разхода на гориво също е

дефинирана върху компактна област и притежава непрекъсната целева функция.

Следователно двуйерархичната задача притежава съвместимо решение, при което решенията на двете подзадачи са взаимно съгласувани. Това осигурява теоретична коректност на йерархичния подход и гарантира, че процесът на оптимизация не води до противоречиви или нефизични резултати.

Проведеният анализ показва, че разработената оптимизационна рамка притежава следните съществени теоретични свойства:

- Съществуване на оптимално решение за еднонивовата и двуйерархичната задача;
- Ограниченост и възможност за физическа реализация на оптималните решения;
- Устойчивост на апроксимираната задача, спрямо изходния нелинеен модел;
- Възможност за практическа интерпретация на оптималните решения в навигационен контекст.

Тези свойства формират стабилна теоретична основа, върху която в следващите глави може да бъде изградено числено решаване на задачата и да се направят симулационен анализ и експериментална верификация на предложения модел.

2.15. Анализ на чувствителност и устойчивост на оптималното решение

Разработеният в настоящата глава формален модел за управление на движението на кораба, при заобикаляне на препятствие, се базира на входни параметри, които в реални навигационни условия не са известни с абсолютна точност. Разстоянието до препятствието, неговата скорост, както и текущата скорост на собствения кораб се определят чрез измервателни и информационни системи (ARPA, AIS, GNSS), които са подложени на шум, закъснения и систематични грешки. Поради това за практическата

приложимост на оптимизационния модел е необходимо да се изследва чувствителността на оптималното решение спрямо измененията на входните параметри и да се оцени неговата устойчивост.

2.15.1. Източници на неопределеност в навигационните данни

Основните параметри, които участват в оптимизационната задача (2.14) и (2.18), могат да бъдат класифицирани, както следва:

- Геометрични параметри – началното разстояние до препятствието S и зададеното безопасно разстояние d ;
- Кинематични параметри – абсолютната скорост на целта (препятствието) V_k и скоростта на собствения кораб V_m ;
- Управляеми променливи – изменението на относителния курс на целта φ и оптималната скорост V_m , получена от долната подзадача.

В реална среда стойностите на S и V_k се измерват с крайна точност, като грешките в ARPA системите обикновено нарастват при малки дистанции, лоши метеорологични условия и при маневриране на целта. Безопасният радиус d , макар и зададен нормативно, често се определя консервативно и подлежи на оперативна корекция от вахтения офицер или автоматизираната система.

Оптималното решение за изменението на относителния курс φ се получава като решение на горната оптимизационна подзадача. Това решение зависи функционално от параметрите S , d , V_k и от допустимите граници на V_m , т.е.:

$$\varphi = f(S, d, V_m, V_k).$$

Чувствителността на решението може да бъде анализирана чрез частните производни:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial d}, \frac{\partial \varphi}{\partial S}, \frac{\partial \varphi}{\partial V_k}$$

От геометричните зависимости, изведени в раздели 2.5 и 2.8, следва, че увеличаването на безопасното разстояние d води до увеличаване на дължината на участъците AB и BC , което изисква по-голямо отклонение на относителния курс. Следователно е валидно неравенството:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial d} > 0$$

Това означава, че моделът реагира монотонно и предсказуемо на увеличаване на изискванията за безопасност, което е важно свойство от гледна точка на практическото управление.

По аналогичен начин, при увеличаване на началното разстояние S , необходимото изменение на курса намалява, което води до:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial S} < 0$$

Това свойство показва, че моделът автоматично генерира по-малко агресивни маневри при по-ранно откриване на препятствието, което съответства на добрите навигационни практики.

Скоростта на целта (препятствието) V_k участва в израза за относителната скорост V_i , определена в раздел 2.6. Нека реалната стойност на скоростта да се различава от измерената с малка грешка ΔV_k . Тогава относителната скорост може да се представи като:

$$V_i = V_i^0 + \Delta V_i$$

където V_i^0 е номиналната стойност, а ΔV_i е поправка от първи ред.

Анализът на формула (2.7) показва, че грешките в скоростта на целта V_k водят до плавни изменения на V_i , които не предизвикват дискретни скокове в целевата функция за време. Това означава, че оптимизационната задача е локално устойчива спрямо малки грешки в оценката на скоростта на целта.

От практическа гледна точка това е критично важно, тъй като гарантира, че алгоритъмът няма да генерира рязко различни решения при малки измервателни флуктуации.

2.15.2. Устойчивост (робустност) на двуйерархичната оптимизационна структура

Особено важен аспект на устойчивостта се проявява в двуйерархичната структура на задача (2.18). Горната подзадача гарантира безопасността и минималното време за маневра, докато долната оптимизира разхода на гориво, при вече осигурено безопасно решение. Това означава, че:

- Малки изменения в параметрите на долната подзадача не компрометират безопасността.

- Дори при субоптимално решение за разхода на гориво, геометричните и времевите ограничения остават изпълнени.

По този начин йерархичният подход осигурява структурна устойчивост, при която критичните критерии (безопасност и време) имат приоритет и са защитени от неопределеност в по-ниското ниво на оптимизация.

Проведеният анализ на чувствителност показва, че разработеният оптимизационен модел притежава следните важни свойства:

- Предсказуема и монотонна реакция спрямо изменения в параметрите на безопасност.

- Локална устойчивост спрямо измервателни грешки в скоростта и положението на препятствието.

- Структурна устойчивост, осигурена от двуйерархичната оптимизационна постановка.

- Отсъствие на резки дискретни промени в оптималното решение, при малки изменения на входните данни.

Тези свойства са от съществено значение за практическото приложение на модела в системи за автоматично и автономно управление на кораби, където

неопределеността е неизбежна, а решенията трябва да бъдат надеждни, устойчиви и съвместими с нормативните изисквания за безопасност.

2.16. Обобщение на модела за заобикаляне на множество препятствия

В реалните навигационни условия корабът рядко се сблъсква с изолирано единично препятствие. В повечето практически сценарии, особено в зони с интензивно корабоплаване, в тясно пространство или при ограничена видимост, собственото плавателно средство взаимодейства едновременно с множество подвижни и неподвижни цели. Това налага разработеният в предходните раздели оптимизационен модел за заобикаляне на единично препятствие да бъде разгледан в по-общ контекст и да се обобщи към случай с множество препятствия.

Целта на настоящия раздел не е да се въведе изцяло нова числено решавана оптимизационна задача, а да се формулира теоретична и методологична рамка, която показва как предложеният аналитичен и двуйерархичен подход може да бъде разширен и приложен при наличие на множество препятствия, без да се нарушават изискванията за безопасност, управление в реално време и съвместимост с COLREG.

2.16.1. Формална постановка при множество препятствия

Нека в навигационната обстановка да присъства множество от N препятствия, означени като:

$$\vartheta = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$$

Всяко препятствие O_i се характеризира със следните параметри:

- текущо относително разстояние S_i ;
- абсолютна скорост $V_{k,i}$;
- относителен курс спрямо собствения кораб;
- индивидуално безопасно разстояние d_i .

За всяко препятствие може да бъде формулирана оптимизационна задача от вида, разгледан в раздели 2.9 – 2.11, която определя оптимално изменение на относителния курс φ_i и оптимална скорост $V_{m,i}$, гарантиращи безопасно заобикаляне на конкретната цел.

Основният проблем при наличие на множество препятствия произтича от факта, че решенията φ_i не са независими – изменението на курса, което е оптимално за едно препятствие, може да доведе до влошаване на ситуацията спрямо друго.

За да се запази аналитичният и реално времеви характер на модела, е целесъобразно да се въведе принципът на редукция към най-опасното препятствие. В този подход се дефинира скаларен показател за опасност R_i , за всяко препятствие O_i , който може да бъде функция на:

- минималната дистанция на сближение (CРА);
- времето до минималната дистанция (ТСРА);
- текущото разстояние S_i ;
- относителната скорост V_o .

Общият вид на показателя може да бъде представен като:

$$R_i = h(S_i, d_i, V_i, ТСРА_i)$$

където функцията $h(\cdot)$ е монотонна по отношение на риска.

Препятствието с максимална стойност на показателя:

$$O_{crit} = \arg \max_{O_i \in \mathcal{O}} R_i$$

се разглежда като критично препятствие, спрямо което се формулира и решава оптимизационната задача. По този начин множеството от препятствия се редуцира до единична оптимизационна задача, като безопасността спрямо

останалите препятствия се осигурява чрез повторна оценка след всяка корекция на курса и скоростта.

Този принцип е в съответствие с практиката на корабоводене и с логиката на ARPA системите, които приоритизират най-опасните цели.

При наличие на множество препятствия управлението на движението на кораба може да се реализира в итеративен режим, при който:

1. Във всеки дискретен момент от време се изчисляват показателите за опасност R_i , за всички препятствия.
2. Определя се критичното препятствие O_{crit} .
3. Решава се оптимизационната задача за единично препятствие.
4. Изпълнява се малка корекция на курса и/или скоростта.
5. Процедурата се повтаря с обновени навигационни данни.

Този подход запазва ниската изчислителна сложност на базовия модел и позволява адаптация към динамично променящата се среда. По същество той реализира квазинепрекъснато управление, при което оптималното решение се обновява в реално време.

В контекста на COLREG, управлението при множество препятствия е особено сложно поради възможни конфликтни изисквания от различни правила (например едновременно пресичане и насрещно движение). Предложеният модел позволява включване на нормативни приоритети чрез:

- ограничаване на допустимия интервал на φ в зависимост от относителното положение на всяко препятствие;
- въвеждане на приоритетни тежести в показателя за опасност R_i ;
- временно изключване на препятствия, спрямо които собственият кораб има право да запази курса си.

Така нормативната логика на COLREG може да бъде интегрирана като допълнителен слой над оптимизационния модел, без да се нарушава неговата аналитична структура.

2.16.2. Предимства на обобщения модел

Обобщаването на модела към множество препятствия запазва основните му предимства:

- аналитичност и прозрачност на решенията;
- ниска изчислителна сложност;
- възможност за реализация в реално време;
- съвместимост с нормативните изисквания за безопасност;
- възможност за мащабиране, при увеличаване на броя на препятствията.

За разлика от глобалните оптимизационни методи, които изискват решаване на сложни многомерни задачи, предложеният подход използва последователна редукция и локална оптимизация, което го прави особено подходящ за бордови системи и автономни плавателни средства.

Настоящият раздел показва, че разработеният в дисертацията оптимизационен модел за заобикаляне на единично препятствие може да бъде естествено и методологично коректно разширен към сценарии с множество подвижни и неподвижни цели. Чрез въвеждане на показател за опасност, редукция към критично препятствие и итеративна реализация в реално време, моделът запазва своята аналитична строгост и практическа приложимост.

Това обобщение демонстрира, че предложеният подход не е ограничен до изолирани ситуации, а представлява обща рамка за управление на движението на кораба в сложна навигационна среда, което е съществено изискване за съвременните и бъдещите системи за автоматично и автономно корабоводене.

2.17. Обобщения и изводи

Втора глава представя цялостната теоретична, методологична и аналитична рамка за разработването на формален модел за автоматично управление на движението на кораба при заобикаляне на препятствие. В резултат на последователно прилагане на принципите от теорията на относителното движение, оптимизационното моделиране и геометричния

анализ, е изградена ясна логическа структура, която обосновава необходимостта и приложимостта на модела.

На първо място, дефинирана е фундаменталната роля на относителното движение и свързаните с него параметри – СРА, ТСРА и относителната скорост V_i , като базови величини, без които не е възможно количественото описание на риска от сблъсък. Върху тях е изградено аналитичното моделиране на заобикалянето, при което траекторията на препятствието се разглежда в относителна координатна система, а безопасното разминаване се формализира чрез геометрични зависимости.

На второ място, аргументирана е необходимостта от разработването на формален оптимизационен модел, който да минимизира времето за изпълнение на маневрата и едновременно да отчита разхода на гориво. Разработени са аналитични зависимости за дължините на участъците на относителното движение (AB и BC), както и точните изрази за относителната скорост като функция на управляемите променливи – изменението на относителния курс φ и скоростта на собствения кораб V_m . Това позволи формулирането на точна целева функция, която да минимизира времето на маневрата.

След това задачата е допълнена с реалистични ограничения, произтичащи от изискванията за безопасно разминаване (геометрично изразени чрез допирателност към окръжност с радиус d), както и технологични ограничения за допустимите стойности на управляващите променливи. Така формулираната оптимизационна задача е съществено нелинейна, което я прави изчислително трудоемка за реално време. Това налага извършването на апроксимации чрез редовете на Маклорен, което води до опростен аналитичен вид на задачата и значително съкращаване на времето за изчисление.

Съществен принос на постигнатото с втора глава е разработването на двуйерархичен модел за оптимизация, който позволява едновременното оптимизиране на две несходими цели – минимизиране на времето за маневра и минимизиране на разхода на гориво. Чрез йерархичната структура се постига

по-широко пространство от решения и по-голяма адаптивност на модела спрямо навигационната ситуация. Горната подзадача оптимизира изменението на относителния курс, докато долната – скоростта на кораба, под условие, че общият разход на гориво се минимизира при спазване на определени ограничения.

В заключение в тази глава от дисертационния труд:

- са създадени математически и теоретични основи за управлението на кораба при наличие на препятствие;

- е дефинирана пълноценна оптимизационна рамка за минимизиране на времето за разминаване;

- са изведени важни зависимости, необходими за формиране на аналитичния модел;

- е предложен модел за намаляване на изчислителната сложност чрез подходящи апроксимации;

- е предложено двуйерархично оптимизационно решение, приложимо в реални навигационни условия и съвместимо с концепциите за автономно корабоводене.

Във втора глава – „Проектиране и разработване на задачи за автоматично управление на движението на кораба (двуйерархична структура на задачите)“, изградената методологична основа позволява в следващите глави да бъде представено числено решаване на модела, както и да се направят анализ на поведението му и оценка на неговата ефективност при различни навигационни сценарии.

Глава трета

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОВЕРКА НА ДВУЙЕРАРХИЧЕН МОДЕЛ
ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ НА МАНЕВРИРАНЕТО НА КОРАБ ПРИ
РАЗМИНАВАНЕ С ЦЕЛИ НА МОРЕ**

Настоящата глава е посветена на експерименталната проверка и валидация на разработения във втора глава двуйерархичен модел за оптимизация на маневрирането на кораб при разминаване с една или повече опасни цели и оптимизиране на разхода на гориво като експлоатационна характеристика на кораба. Основната цел е да се оценят приложимостта, устойчивостта и адекватността на разработения оптимизационен модел в реалистична навигационна среда чрез използване на високореалистични навигационни и машинни симулатори от клас А и В, както и чрез числено решаване на двуйерархичната задача в MATLAB среда.

Експериментите са насочени към анализ на компромиса между два конфликтни критерия – време за изпълнение на маневрата и интегрален разход на гориво, при условие за гарантиране на навигационна безопасност и спазване на изискванията на Международните правила за предпазване от сблъскване на море (COLREG). За целта са разработени и реализирани два основни сценария: разминаване с една подвижна цел – при контейнеровоз, и разминаване с две едновременно опасни цели – при танкер с голямо водоизместване.

Направено е сравнение на получените експериментални резултати от използването на машинните симулатори от клас А и В с аналитичните решения на двуйерархичния модел, реализирани в MATLAB среда. Това сравнение позволява цялостна оценка на точността и практическата приложимост на разработения формален двуйерархичен модел за управлението на кораба с едновременно оптимизиране на две целеви функции.

3.1. Описание на експеримента за двуйерархична оптимизация на времето и разхода на гориво при разминаване на модел на собствен кораб с подвижна цел

Съвременната морска транспортна индустрия се намира в период на безпрецедентна трансформация, продиктувана от необходимостта за постигане на висока енергийна ефективност и декарбонизация на корабните операции. Глобалният фокус върху ограничаването на емисиите от парникови газове, регламентирани от Международната морска организация чрез инициативи като индекса за енергийна ефективност на съществуващите кораби (Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI) и индикатора за въглероден интензитет (Carbon Intensity Indicator, CII), поставя корабособствениците пред сложни предизвикателства. В този контекст оптимизацията на маршрута и скоростта вече не е само въпрос на икономическа целесъобразност, а на оцеляване в условията на строги екологични изисквания и динамично променящи се цени на горивата.

С цел верификация на разработения двуйерархичен оптимизационен модел за избор на оптимални момент и начин на маневриране при разминаване на собствения кораб с подвижна или неподвижна цел, са проведени експерименти в контролирана симулационна среда, в която са комбинирани: навигационен тренажор NTPRO 5000 (Navi-Trainer Professional 5000), производство на Wartsila; корабен машинен симулатор ERS 5000 (Engine Room Simulator 5000), също произведен от Wartsila; и корабен машинен симулатор, производство на норвежката компания Kongsberg.

Изследването е насочено към анализ на компромиса между времето за разминаване с морска цел и разхода на гориво, при запазване на навигационната безопасност и в съответствие с Международните правила за предпазване от сблъскване на море (COLREG). Симулаторите NTPRO 5000 и ERS 5000 са клас А, най-високото и реалистично оборудване за обучение на морски специалисти и възпроизвеждане на околната морска среда.

Симулаторът Kongsberg е клас В. Използван е в експеримента, защото може да се симулира работата на реален главен двигател, с който е задвижван един от моделите на танкер от навигационния симулатор. Същият модел е използван за симулация на навигационната задача..

За симулационен модел на първата задача за разминаване е избран океански контейнеровоз със стандартни експлоатационни данни за клас Panamax, моделно представен в симулационна среда с реалистични хидродинамични и инерционни характеристики в навигационния симулатор NTPRO 5000 и машинния симулатор ERS 5000. Този модел е подходящ, тъй като е заложен в навигационния и инженерния симулатор, с възможност за симултантно управление от мостика и от машината. Освен това моделът е с добри маневрени характеристики и позволява по-разнообразни експериментални маневри.

Друга навигационна задача е симулирана като за собствен кораб е използван модел на танкер под товар с водоизместване 180 000 тона. Този модел е избран заради особеностите на маневриране – дълбоко газене, бавно отработване на отклонението на руля, по-дълго време на завиване и завръщане на първоначалния път. Параметрите на главния двигател, винта и системите за управление на двата модела за собствен кораб са синхронизирани между навигационния и машинния симулатор, което позволява в реално време да се отчитат моментният и интегралният разход на гориво, в зависимост от режима на движение и приложените маневри. За този сценарий са използвани възможностите на машинния симулатор Kongsberg. Данните на корабите са представени в таблиците 3.1 и 3.2.

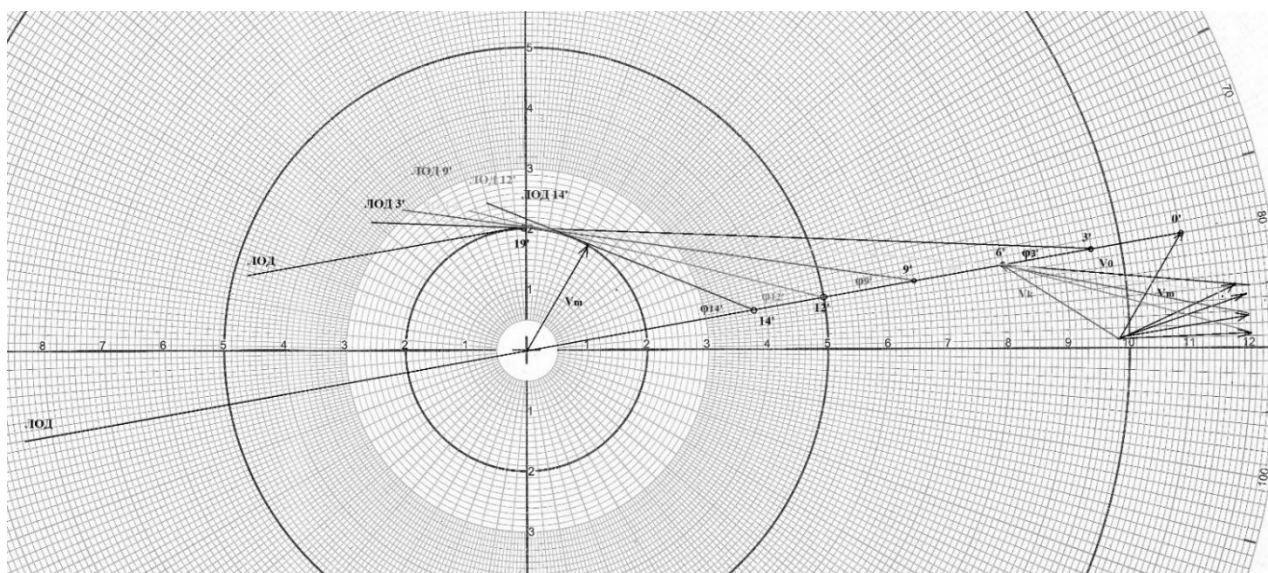
Таблица 3.1. Данни за главния двигател на използваните модели
контейнеровоз и танкер

| № | Параметри на модела главен двигател | Модел на контейнеровоз | Модел на танкер |
|----------|---|--|--|
| 1. | Модел на главен двигател | MAN B&W 11S90ME-C9.2 | MAN B&W 5L90MC |
| 2. | Тип двигател | Двутаков, ME-C9.2, електронно управляван low speed дизел (IMO Tier II) | Двутаков, турбонагнетен, low speed дизел |
| 3. | Брой цилиндри | 11 | 5 |
| 4. | Диаметър на цилиндъра | 900 mm | 900 mm |
| 5. | Ход на буталото | 3260 mm | 2900 mm |
| 6. | Максимална непрекъсната мощност (MCR) | 63 910 kW | 17 400 kW |
| 7. | Обороти на двигателя (при MCR) | 84 rpm | 76 rpm |
| 8. | Специфичен разход на гориво (SFOC) | 157–167 g/kWh | 168 g/kWh |
| 9. | Разход на гориво за час, при 100% натоварване | 10,158 t/h | 3,41 t/h |
| 10. | Разход на гориво за час, при 75% натоварване | 7,62 t/h | 2,2 t/h |

Таблица 3.2. Характеристики на използваните модели на собствен кораб
(СК) контейнеровоз и танкер

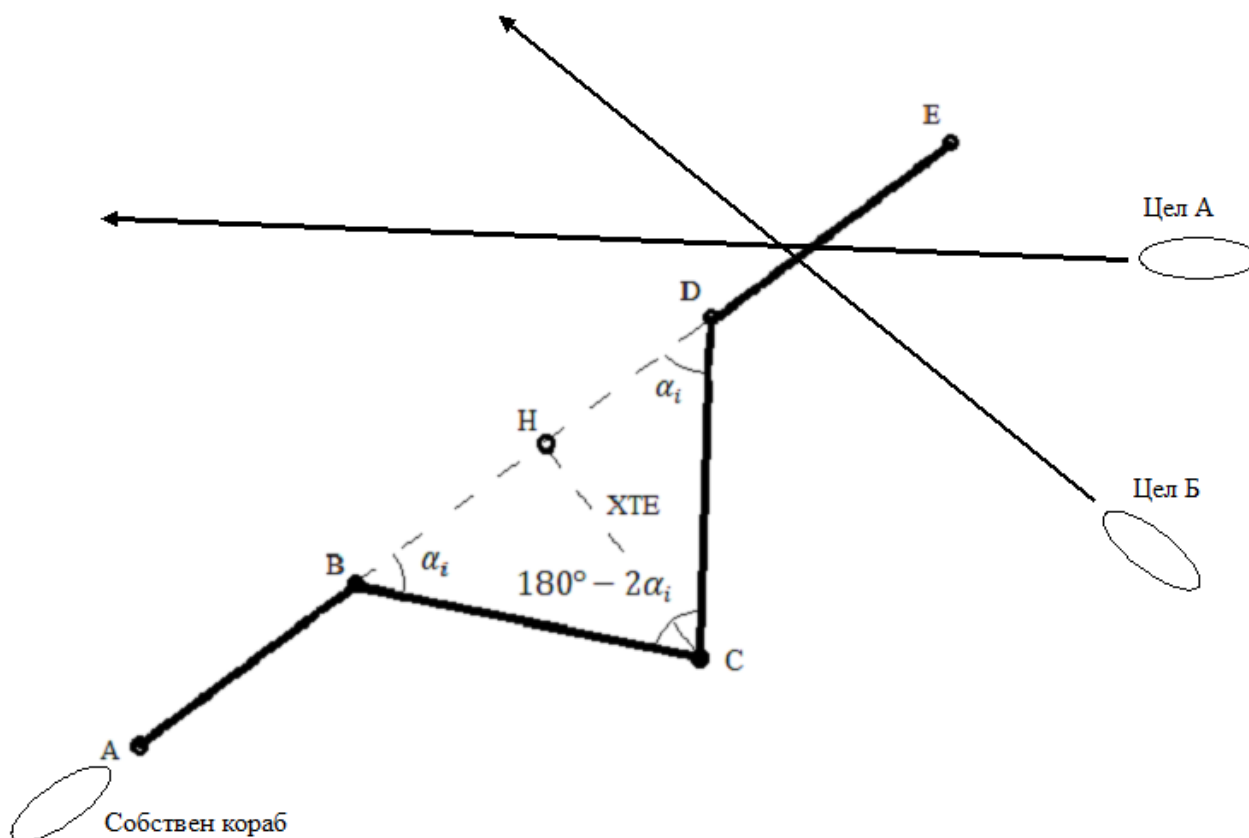
| № | Параметри на кораб | Контейнеровоз | Танкер |
|----|---------------------------------------|---|--|
| 1. | Габаритни размери на модела LxVxD [m] | 366 x 52 x 15 | 280 x 48 x 16 |
| 2. | Водоизместване [MT] | 175 000, натоварен | 184 000, натоварен |
| 3. | Подрулващо устройство на носа | Kawasaki, тип КТ-187В5– 1800 kW, 880 RPM, 6600V; | |
| | Няма | | |
| 4. | Рулева машина | Електрохидравлична, 2-раменна, 4-цилиндрова, тип Rapson slide | Електрохидравлична, двуконтурна |
| 5. | Ъгъл на отклонение на руля | ±35° (оперативно ±30°) | ±35° (ограничен до ±30°) |
| 6. | Време за отклонение 35°–35° | ≤ 28 s | ≤ 28 s |
| 7. | Площ на руля | По-голяма спрямо водоизместимостта – за осигуряване на управляемост при високи скорости | По-малка относителна площ – оптимизирана за устойчивост на курса |
| 8. | Маневрени качества | Висока повратливост, по-малък тактически диаметър, но чувствителен при голямо газене | Висока устойчивост на курса, голям тактически диаметър |

Общият сценарий на експеримента включва разминаване с подвижна цел – друг кораб, с предварително зададени курс и скорост, като относителното движение между обектите води до потенциална опасност от сближаване под минимално допустимата дистанция. Началните условия са дефинирани, така че без предприемане на маневра да се формира рискова ситуация, изискваща навигационно решение от страна на оператора или автоматизиран алгоритъм (фиг. 3.1). Тази ситуация реализира маневрата за заобикаляне на препятствие, въз основа на която е разработена задачата за двуйерархична оптимизация.



Фигура 3.1. Графично решение на задачата за разминаване на два кораба, представено на маневрен планшет в полярна координатна система

Друг сценарий цели да се експериментира графично по-кратка маневра, при която отклонението от началния път е по-кратко, с цел по-бързото завръщане обратно на същия път. Формалният модел е представен на фигура 3.2.



Фигура 3.2. Графично решение на задачата за разминаване на собствения кораб с една или повече цели чрез задаване на отклонение от пътя (ХТЕ)

Целта в този случай е да се оптимизира времето, като се изпълни еднократна кратка маневра за отклонение от следвания от кораба път. Със следващата маневра, която е симетрична по отношение на нормалата към пътя (ХТЕ), се цели да се постигне завръщане, при условията на спазване на зададеното минимално разстояние на разминаване с опасните цели около собствения кораб (СРА). Наред с това е проведен експеримент на машинен симулатор, при изпълнение на същата маневра. По време на маневрата е свалена разходната норма на корабния двигател, като по този начин са

осигурени емпирични данни за сравнение с решенията на разработената двуйерархична задача за оптимизация.

Във всички изследвани сценарии маневрите завършват, когато маневриращият кораб достигне линията на първоначалния път, който е утвърден като безопасен в контекста на изготвянето на плана за плаване между две пристанища. В началото на експеримента на навигационния симулатор се включва секундомер, с който се регистрират етапите на маневрата за избягване на опасно сближение. В отделни таблици са описани етапите на движение на експерименталния модел; времето за изпълнение на всеки от тях и разходът на гориво според данните от машинния симулатор.

Разработени са два основни сценария, като всеки от тях е разделен на подсценарии. Описанието им под формата на данни за изпълнение на етапите на маневрирането е представено в таблици. Изследваните сценарии включват:

- Маневриране на контейнеровоз СК за избягване на опасно сближение с една цел, контейнеровоз с капацитет 7928 TEU, с изпълнение на конвенционално маневриране. Експериментът е проведен на навигационен симулатор NTPRO 5000 и машинен симулатор ERS 5000.

- Маневриране на танкер СК за избягване на опасно сближение с две цели, контейнеровоз с капацитет 7928 TEU и бълккериър с DW 44 000 MT, с изпълнение на конвенционално маневриране. Експериментът е проведен на навигационен симулатор NTPRO 5000 и машинен симулатор Kongsberg.

Подсценариите се различават и включват различно време за начало на маневрата и различен ъгъл на изменение на първоначалния курс на СК.

3.2. Двуйерархична оптимизация на маневрата за разминаване, при задаване на времето за начало на изменение на курса на собствения кораб

Разработеният модел на двуйерархичната оптимизация е реализиран чрез едновременно функциониране на две нива на управление. На горно йерархично ниво приоритетно се решава задача по осигуряване на

безопасност, като се определя допустим интервал за начало на маневра, гарантиращ достигане на минимална безопасна дистанция при разминаване. Това йерархично ниво включва: оценка на относителното движение, времето до най-близка точка на сближаване и динамичните ограничения на кораба, без да се оптимизират икономически показатели. На долно йерархично ниво, под условието за изпълнение на безопасното решение от горно ниво, се решава оптимизационна задача по минимизиране на целева функция, комбинираща общото време за преминаване на сценария и интегралния разход на гориво. Разходът на гориво се изчислява като интеграл на моментния разход във времето, получен директно от машинните симулатори ERS 5000 и Kongsberg, което позволява да се избегнат опростени аналитични зависимости и да се използват реалистични експлоатационни данни.

Разработената и дефинирана във втора глава двуйерархична оптимизационна задача е представена чрез формалните записи (2.18). Сравняват се решенията на тренажора с тези от решенията на двуйерархичната задача. Отработва се случаят на разминаване на собствения кораб с движеща се цел, която априори спазва правилата за движение COLREG в ситуация на опасно сближение. Собственият кораб, който в случая е „кораб, който трябва да отстъпи път“, се движи на постоянен курс и с постоянна скорост, трябва да извърши маневра за недопускане на сближение под зададена безопасна дистанция. Целта не променя курса и скоростта, тъй като, според COLREG, е „кораб, на който се отстъпва път“. Маневрата от страна на собствения кораб за избягване на опасно сближение се извършва с изменение на курса. Този тип маневра е избран, за да се изследва възможността за прилагане на двуйерархична оптимизация към критерия „разход на гориво“ при разминаване и поради възприетото от добрата морска практика правило, че когато СК плава при морски обороти на машината, маневрите се изпълняват с изменение на курса.

3.2.1. Сценарий 1.: Маневриране на контейнеровоз СК за избягване на опасно сближение с една цел, контейнеровоз с капацитет 7928 TEU, с изпълнение на конвенционално маневриране

Постановката и решението на задачата реализират маневрирането, представено на фигура 3.1. Откриването и наблюдението на целта се извършват с радар. След откриването на целта и дистанцията, според условията на сценария (таблица 3.3), тя се захваща за автоматично следене и определяне на нейните елементи на движение с ARPA. Маневрирането на СК следва изчисленията на ARPA.

Първоначалните данни за движението на корабите са дадени в таблица 3.3.

Таблица 3.3. Данни за курса и скоростта на собствения кораб и цел, на която се отстъпва път – сценарий 1.

| № | Параметри | Собствен кораб (ск) | Цел |
|----------|--|---|--|
| 1. | Първоначален курс на движение | 30° | 304° |
| 2. | Скорост на движение | 20 въз | 23 въз |
| 3. | Първоначална позиция на корабите на маневрен планшет | В центъра на планшета/на екрана на радара | Пеленг от ск – 080° Дистанция от ск – 110 кабелта |
| 4. | Елементи на ситуацията СРА и ТСРА | - | СРА = 0 каб ТСРА = 24 минути |
| 5. | Модел на кораб | Контейнеровоз | Контейнеровоз |

3.2.1.1. Числени симулации и резултати от моделиране

За проверка на разработения модел за управлението на кораб при разминаване с подвижна или неподвижна цел е съставена навигационна задача за класическо разминаване на два кораба, единият от които трябва да отстъпи път, според правилата на конвенция COLREG, и са направени числени

симулации с анализ на решенията на разработената двуйерархична задача (2.18). Аргументите на двуйерархичната задача определят като решения оптималните стойности на скоростта на собствения кораб V_m и изменението на относителния курс на целта ϕ при извършване на маневрата за разминаване с нея. Като изходни данни се приемат: скоростта на движение на целта V_k , зададеното разстояние d за безопасно разминаване и стойността S на разстоянието, от което СК започва маневрата. За целите на численото моделиране са извършени решения на двуйерархичната задача (2.18) за различни стойности на разстоянието S между кораба и препятствието.

За илюстрация на решението и вариантите, които произтичат от практиката, е използван маневрен планшет и задачата е представена в полярна координатна система (фиг. 3.1). Изчислените резултати от разработения модел са сравнени с данните, получени от проведения експеримент в симулатор NTPRO 5000 и машинния симулатор ERS 5000. По този начин е направено сравнение за точността и свързаността на резултатите от разработения двуйерархичен оптимизационен модел с резултатите, получени от технологичната система на симулаторите.

В рамките на експеримента са анализирани няколко варианта за начало на маневрата, включително ранно, оптимално и късно реагиране, спрямо подвижната цел. За всеки вариант са регистрирани: времето за завършване на разминаването; траекторията на движение; промените в скоростта и натоварването на двигателя, както и съответният интегрален разход на гориво. Получените резултати показват ясно изразена зависимост между момента на започване на маневрата и икономическите показатели, като прекалено ранните маневри водят до удължаване на пътя и повишен разход, а прекалено късните – до по-резки изменения на режима на работа на двигателя и увеличен моментен разход.

За целите на числената симулация са приложени начални данни за оптимизационната задача (2.18), както следва:

- Избрана серия от разстояния $S = 9,5 \text{ nm}; 8,0 \text{ nm}; 6,5 \text{ nm}; 5,0 \text{ nm}; 3,8 \text{ nm}$, които съответстват на времето за маневра за безопасно разминаване – трета минута (маневра веднага след откриване на целта и определяне на елементите на движението ѝ и елементите на ситуацията); шеста минута; девета минута; дванадесета минута и четиринадесета минута. Този избор определя и подсценариите от 1.1 до 1.5, чиито симулаторни данни са представени в таблици.

- Скорост на движение на целта: $V_k = 23 \text{ kn}$.

- Зададено безопасно разстояние за разминаване: $d = 2 \text{ nm}$.

- Коефициент за намаляване на скоростта на СК вследствие на съпротивлението на водата: $\beta = 0,15$.

- Коефициент на намаление на скоростта на СК вследствие на съпротивлението на водата, при изменение на относителния курс на целта: $\alpha = 0,2$.

Избраните разстояния определят подсценариите на сценарий 1., чиито данни са представени в таблици от 3.4 до 3.8.

Таблица 3.4. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий

1.1. – начало на маневрата в третата минута от откриване на целта

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Разход за периода [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 30 | 20 | 78 | 2,95 | 0,1405 | 0,1475 |
| 2. | 3 | Д-10 | 20 | 78 | 3 | 0,17 | 0,15 |
| 3. | 6 | 45 | 19,8 | 76,4 | 3,08 | 0,056333333 | 0,155555556 |
| 4. | 9 | 50 | 19,8 | 74,2 | 3,1 | 0,155 | 0,156565657 |
| 5. | 12 | 44 | 19,9 | 75,1 | 3,08 | 0,1525 | 0,154773869 |
| 6. | 17 | Л-10 | 17,7 | 76,2 | 3,32 | 0,0485 | 0,187570621 |
| 7. | 18 | 335 | 17,5 | 76,3 | 3 | 0,047666667 | 0,171428571 |
| 8. | 19 | 345 | 18,5 | 75,6 | 3,11 | 0,575666667 | 0,168108108 |
| 9. | 18 | 348 | 19,3 | 73,4 | 3,29 | 0,054 | 0,170466321 |
| 10. | 21 | Д-10 | 18,7 | 71 | 3,21 | 0,1665 | 0,171657754 |
| 11. | 24 | 25 | 19,2 | 75,2 | 3,22 | 0,10667 | 0,167708333 |
| 12. | 32 | 30 | 20 | 78 | – | – | – |
| | Средно | – | 19,2 | – | 3,12 | – | 0,1638 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 1,6733 | 1,801 |

Таблица 3.5. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий

1.2. – начало на маневрата в шестата минута от откриване на целта

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Разход за периода [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 30 | 20,0 | 78 | 3,05 | 0,1525 | 0,1525 |
| 2. | 3 | 30 | 20,0 | 78 | 3,12 | 0,181 | 0,156 |
| 3. | 6 | Д-20° | 20,0 | 78 | 3,18 | 0,0597 | 0,159 |
| 4. | 7 | - | 18,3 | 77,2 | 3,32 | 0,166 | 0,181420765 |
| 5. | 10 | 58 | 20,2 | 76,3 | 3,25 | 0,1625 | 0,160891089 |
| 6. | 13 | Л-20° | 18,6 | 78 | 3,08 | 0,0513 | 0,165591398 |
| 7. | 14 | - | 18,9 | 78,6 | 3,02 | 0,0503 | 0,15978836 |
| 8. | 15 | 335 | 19,8 | 74,1 | 3,35 | 0,6142 | 0,169191919 |
| 9. | 26 | 350 | 19,6 | 72,3 | 3,48 | 0,058 | 0,17755102 |
| 10. | 27 | Д-10° | 19 | 71,8 | 3,55 | 0,1775 | 0,186842105 |
| 11. | 30 | 25 | 19,5 | 76 | 3,41 | 0,1137 | 0,174871795 |
| 12. | 32 | 30 | 20,0 | 79,5 | – | – | – |
| | Средно | – | 19,49 | – | 3,2554 | – | 0,1669 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 1,7867 | 1,8436 |

Таблица 3.6. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий

1.3. – начало на маневрата в деветата минута от откриване на целта

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Разход за периода [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 30 | 20 | 78 | 2,81 | 0,1405 | 0,1405 |
| 2. | 3 | 30 | 20 | 78 | 3,4 | 0,17 | 0,17 |
| 3. | 6 | 30 | 18,6 | 76,4 | 3,38 | 0,056333333 | 0,18172043 |
| 4. | 9 | Д-25° | 19 | 74,2 | 3,1 | 0,155 | 0,163157895 |
| 5. | 11 | 70 | 20 | 75,1 | 3,05 | 0,1525 | 0,1525 |
| 6. | 15 | Л-20° | 18,3 | 77,2 | 2,91 | 0,0485 | 0,159016393 |
| 7. | 17 | - | 18,5 | 78 | 2,86 | 0,047666667 | 0,154594595 |
| 8. | 18 | 335 | 19,5 | 73,6 | 3,14 | 0,575666667 | 0,161025641 |
| 9. | 26 | 350 | 19,3 | 71,4 | 3,24 | 0,054 | 0,167875648 |
| 10. | 27 | Д-10° | 18,7 | 71 | 3,33 | 0,1665 | 0,178074866 |
| 11. | 30 | 25 | 19,2 | 75,2 | 3,2 | 0,10667 | 0,166666667 |
| 12. | 32 | 30 | 20 | 78 | – | – | – |
| | Средно | – | 19,2583 | – | 3,129091 | – | 0,1631 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 1,673337 | 1,7951 |

Таблица 3.7. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий
1.4. – начало на маневрата в дванадесетата минута от откриване на целта

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Разход за периода [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|----------------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1. | 0 | 30 | 20 | 78 | 2,81 | 0,1475 | 0,1405 |
| 2. | 3 | 30 | 20 | 78 | 2,94 | 0,145 | 0,147 |
| 3. | 6 | 30 | 20 | 78 | 3,08 | 0,147 | 0,154 |
| 4. | 9 | 30 | 20 | 78 | 3,1 | 0,13 | 0,155 |
| 5. | 12 | Д-25° | 19,2 | 75,1 | 3,08 | 0,2575 | 0,160416667 |
| 6. | 14 | 83 | 18,3 | 77,2 | 2,97 | 0,0563 | 0,162295082 |
| 7. | 15 | 85 | 18,5 | 78 | 2,8 | 0,0553 | 0,151351351 |
| 8. | 17 | 327 | 19,5 | 73,6 | 3,11 | 0,1783 | 0,159487179 |
| 9. | 24 | 354 | 19,3 | 71,4 | 3,29 | 0,1237 | 0,170466321 |
| 10. | 27 | Д-10 | 18,7 | 71 | 3,33 | 0,095 | 0,178074866 |
| 11. | 29 | 15 | 19,2 | 75,2 | 3,22 | 0,125 | 0,167708333 |
| 12. | 31 | 24 | 19,1 | 76 | 3,54 | 0,186 | 0,185340314 |
| 13. | 34 | 30 | 20 | 78 | – | – | – |
| | Средно | – | 19,19091 | – | 3,106 | – | 0,1609 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 1,6466 | 1,9316 |

Таблица 3.8. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 1.5. – начало на маневрата в четиринадесетата минута от откриване на целта

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Разход за периода [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 30 | 20 | 78 | 2,81 | 0,1405 | 0,1405 |
| 2. | 3 | 30 | 20 | 78 | 2,94 | 0,13 | 0,147 |
| 3. | 6 | 30 | 19,6 | 76,4 | 3,08 | 0,141 | 0,157142857 |
| 4. | 9 | 30 | 19,8 | 74,2 | 3,1 | 0,145 | 0,156565657 |
| 5. | 12 | 30 | 20 | 75,1 | 3,08 | 0,1425 | 0,154 |
| 6. | 14 | Д-30 | 18,7 | 77,2 | 3,15 | 0,0485 | 0,168449198 |
| 7. | 15 | 105 | 17,5 | 78 | 2,8 | 0,0476 | 0,16 |
| 8. | 16 | Л-10 | 18,5 | 73,6 | 3,11 | 0,121 | 0,168108108 |
| 9. | 18 | 310 | 19,3 | 71,4 | 3,29 | 0,254 | 0,170466321 |
| 10. | 21 | Д-10 | 18,7 | 71 | 3,21 | 0,1665 | 0,171657754 |
| 11. | 28 | 25 | 19,2 | 75,2 | 3,22 | 0,10667 | 0,167708333 |
| 12. | 30 | 27 | 19,2 | 76 | 3,54 | 0,21 | 0,184375 |
| 13. | 32 | 30 | 20 | 78 | – | – | – |
| | Средно | – | 19,2692 | – | 3,11 | – | 0,1623 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 1,653 | 1,946 |

Технологичните ограничения за долната и горната граница на изменението на относителния курс на целта φ и скоростта на собствения кораб V_m са, както следва:

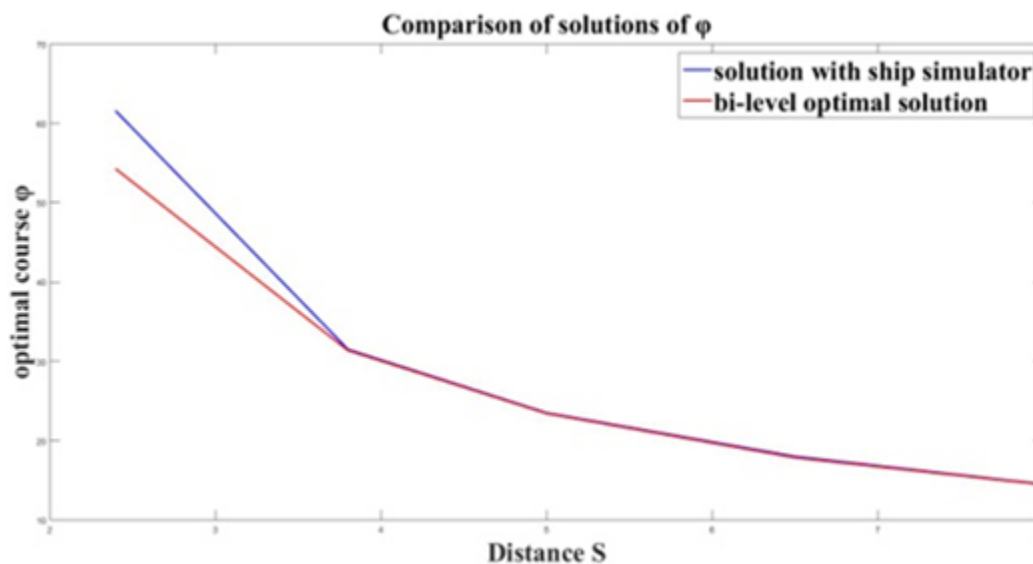
$$0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$$
$$20 \leq V_m \leq 35$$

Освен това задача (2.18) е решена и в среда на програмната система MATLAB. Използвана е разширена библиотека за MATLAB, с наименование YALMIP. От тази библиотека е използвана функцията solvebilevel(), с която се решава дефинираната дъщерархична оптимизационна задача. Числените резултати от решаваните задачи са представени в таблица 3.9. Целта на сравняването на трите решения – планшет, симулатор и MATLAB, е да се докаже съвместимостта на разработения във втора глава дъщерархичен модел и алгоритъм за едновременна оптимизация на времето за маневра и разхода на гориво за този епизод от плаването на собствения кораб.

Изчислени са аргументите на задачата за изменението на относителния курс на целта φ и скоростта на движение на собствения кораб V_m , съгласно (2.18). Видно е от таблицата, че данните от симулатора и изчислените от модела резултати са много близки. Това означава, че корабът открива препятствието на разстояние S и изменението на курса трябва да бъде съгласно изчислените стойности на φ . Зависимостите между разстоянието S и стойността на φ показват, че ако препятствието е близо до кораба, то и изменението на относителния курс на целта φ трябва да е голямо. Разлика между данните на симулатора и на оптимизационния модел се появява при малко и критично разстояние $S = 3,8$ nm. Това разстояние е много близко до изискването за безопасно разстояние $d = 2$ nm. В този случай решението на симулатора изисква по-големи изменения в относителния курс на целта, респективно в курса на собствения кораб, със стойност $\varphi = 51,5^\circ$, в сравнение с изчисленото от оптимизационния модел, което е $\varphi = 44,2^\circ$. Обяснението за

тази, появила се разлика, е, че в този случай собственият кораб трябва да направи остър завой за промяна на своя курс. Тогава съпротивлението на водата е много голямо и затова е необходимо при такива случаи стойността на коефициента за съпротивление α да се увеличи. За да се намали влиянието на появилата се разлика, е необходимо да се направят експерименти за съпротивлението на водата за конкретен корабен модел, за случаите на изменение на курса и скоростта.

Графичната интерпретация и сравнението на получените резултати от двуйерархичната задача (2.18), модела и на навигационния симулатор за стойностите на курса φ са представени на фигура 3.3.



Фигура 3.3. Сравнение между решенията на двуйерархичната задача за промяната на относителния курс на целта φ и изчислените стойности от навигационния симулатор

Таблица 3.9. Сравнение на получаваните решения на оптимизационната задача и данните на навигационния симулатор

| | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|
| Решения, определени от навигационния симулатор, φ (градус) | 14,5° | 18° | 23,5° | 31,5° | 51,5° |
| S разстояние между кораб/препятствие (морски мили) | 9,5 | 8,0 | 6,5 | 5,0 | 3,8 |
| Време за маневра след определяне на ЕДЦ (минути) | 3 | 6 | 9 | 12 | 14 |
| Двуйерархично решение Radian = $180/3,14(^{\circ})$ | 0,2520 rad | 0,3115 rad | 0,4086 rad | 0,5472 rad | 0,7192 rad |
| | 14,4464° | 17,8563° | 23,424° | 31,3678° | 41,21° |
| Скорост на кораба V_m (възли) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |

Видно е, че за разстояния S , които не са близо до зоната за безопасно разминаване с радиус d , решенията от модела и навигационния симулатор са почти еднакви. Разлика се появява за критичното разстояние $S = 3,8$ морски мили, което е много близко до разстоянието $d = 2$. При това, вследствие на острото изменение на относителния курс на целта φ , зависимостта между скоростта на кораба V_m и ъгъла φ трябва да се измени съгласно формула (2.17). В този случай стойностите на коефициентите α и β трябва да се оценяват и измерват допълнително. Алтернативно решение може да бъде с прилагането на нова, нелинейна зависимост за ограничение (2.17).

Съществен резултат при сравнението на резултати от тренажора и решаването на разработената двуйерархична задача е получен при изчисляване на скоростта на кораба. Получените резултати показват, че скоростта трябва да се поддържа на долната граница на изискваните технологични граници. Това се получава като решение на долната оптимизационна подзадача, която цели да се минимизира изразходваното гориво при провеждане на маневрата по отклонението на кораба от планирания маршрут. Така ниско поддържаната скорост за маневрата по разминаване с препятствието ще постигне и минимизиране на разхода на гориво.

В точка 3.2 на трета глава са направени сравнение и съпоставка между стойностите на изменението на относителния курс на целта φ , получени от решаването на двуйерархичната задача, разработена във втора глава, и съответните стойности, реализирани в навигационния и машинния тренажор при изпълнение на експериментите, представени в таблици 3.4 до 3.9.

За всеки подсценарий от сценарий 1. началната дистанция до целта S е фиксирана, а скоростта на собствения кораб V_m е поддържана постоянна, съгласно условията на експеримента. На тази основа, чрез решаване на двуйерархичната оптимизационна задача (2.18), е изчислена оптималната стойност на ъгъла φ , която осигурява минимално време за заобикаляне на препятствието, при спазване на условието за безопасно разминаване.

В таблица 3.9 са представени стойностите на φ , получени от двуйерархичния модел, както и съответните стойности, регистрирани в симулатора. Разликата между тях може да бъде представена чрез величината:

$$\Delta\varphi = \varphi_{sim} - \varphi_{model}$$

Анализът показва, че при по-големи начални дистанции ($S \geq 5 \text{ nm}$) отклонението между моделното и симулаторното решение е малко и остава в рамките на няколко десети от градуса. Това означава, че при ранно начало на маневрата аналитичният модел описва адекватно геометрията на разминаването и динамиката на относителното движение. Резултатите и

сравнителните данни от симулаторното решение и аналитичното решение на задача (2.18) са представени в таблица 3.10.

Таблица 3.10. Сравнение на решенията на двуйерархичната оптимизационна задача (2.18) и симулаторните данни – сценарий 1.

| № | Показател | Подсценарий 1.1. | Подсценарий 1.2. |
|----|--|---------------------|---------------------|
| 1. | Време за начало на маневрата, след определяне на ЕДЦ [min] | 3 | 6 |
| 2. | Начална дистанция до по-опасната цел S [nm] | 9,5 | 8,0 |
| 3. | Решение на навигационния симулатор φ_{sim} [°] | 14,5 | 18,0 |
| 4. | Двуйерархично решение (18) φ_{model} [°] | 14,4464 | 17,8563 |
| 5. | Отклонение $\Delta\varphi$ [°] | 0,0536 | 0,1437 |
| 6. | Интегрален разход на гориво – симулатор (за периода) [t] | 1,8436 | 1,7951 |
| 7. | Оценка по двуйерархичен критерий | Допустимо | Допустимо |

При намаляване на началната дистанция S , се наблюдава нарастване на разликата $\Delta\varphi$. Най-голямо отклонение е регистрирано при $S = 3,8 \text{ nm}$ (начало на маневрата в 14-ата минута), където симулаторът изисква по-голяма стойност на φ , в сравнение с аналитичното решение. Това поведение е логично

и може да се обясни с хидродинамичните и инерционните ограничения на кораба, които не са напълно отразени в идеализирания аналитичен модел.

Получените резултати потвърждават, че разработеният двуйерархичен модел предоставя надеждни и реалистични решения за изменението на курса при достатъчно ранно започване на маневрата, като при критично малки дистанции е необходима корекция или валидация чрез симулатор.

3.2.2. Сценарий 2.: Маневриране на танкер СК за избягване на опасно сближение на две цели – бълккериър с DW 44 000 MT и контейнеровоз с капацитет 7928 TEU, с изпълнение на конвенционално маневриране

Сценарий 2. Представява качествено по-сложна навигационна задача, тъй като собственият кораб е танкер с голямо водоизместване ($\approx 184\ 000$ MT) и с по-лоши маневрени характеристики. При този сценарий съществуват две едновременно опасни цели, с различни елементи на движение – курс и скорост, и различни елементи на ситуацията – CPA и TCPA. Критерият за избор на момент на маневра се определя спрямо по-опасната цел, т.е. тази, която изисква по-голямо изменение на курса на СК. Тази постановка е особено подходяща за проверка на устойчивостта на двуйерархичния подход, тъй като класическите еднокритериални решения (само по време или само по разход на гориво) трудно могат да обхванат подобна ситуация.

Постановката и решението на задачата реализират маневрирането, представено на фигура 3.2. Проверката на решенията на двуйерархичната задача и алгоритъма ще се извърши при използване на същия тип данни, събрани и обработени за сценарий 1., но в сценарий 2. се използват две, опасно движещи се цели. Откриването, наблюдението и автоматичното следене на целите се извършва с ARPA. Условиата на сценария са представени в таблица 3.11.

При сценарий 2. двуйерархичната оптимизация може да бъде интерпретирана по следния начин:

- Горно ниво (безопасност и реализуемост), което включва: избор на момент за начало на маневрата t_0 , гарантиращ безопасно разминаване едновременно и с двете цели; определяне на изменение на курса, което удовлетворява най-строгото ограничение (по-опасната цел).

- Долно ниво (икономичност), което включва минимизация на интегралния разход на гориво, при вече фиксираната безопасна маневра и анализ на влиянието на ранно, оптимално и късно начало на маневрата върху натоварването на главния двигател.

Така двуйерархичният модел естествено се разширява от „една цел“ към „множество цели“, без да е необходимо принципно изменение на математическата структура на задачата.

Началните данни за числената симулация са, както следва:

- Избрана серия от времена за начало на маневрата според по-опасната цел, при критерий „най-голямо изменение на курса на собствения кораб“ – трета минута (маневра веднага след откриване на целта и определяне на елементите на движението ѝ и елементите на ситуацията), шеста минута, девета минута и дванадесета минута. При съвместното движение на корабите съответните разстояния до еталонната цел са съответно: $S = 9,5 \text{ nm}$; $7,2 \text{ nm}$; $5,4 \text{ nm}$; $3,8 \text{ nm}$. Този избор определя и подсценариите – от 2.1 до 2.4, чиито симулаторни данни са представени в таблици.

Таблица 3.11. Данни за курса и скоростта на собствения кораб и целите, на които се отстъпва път – сценарий 2.

| № | Параметри | Собствен кораб (СК) | Цел А | Цел Б |
|----|--|--|--|--|
| 1. | Първоначален курс на движение | 60° | 275° | 295° |
| 2. | Скорост на движение | 15 въз | 11,2 въз | 18 въз |
| 3. | Първоначална позиция на корабите на маневрен планшет | В центъра на планшета/екрана на радара | Пеленг от ск – 074° Дистанция от ск – 110 кабелта | Пеленг от ск – 090° Дистанция от ск – 100 кабелта |
| 4. | Елементи на ситуацията СРА и ТСРА | - | СРА = 0 каб ТСРА = 22 минути | СРА = 4 каб ТСРА = 26 минути |
| 5. | Модел на кораб | Танкер | Бълккериър | Контейнеровоз |

- Зададено безопасно разстояние за разминаване $d = 2 \text{ nm}$.

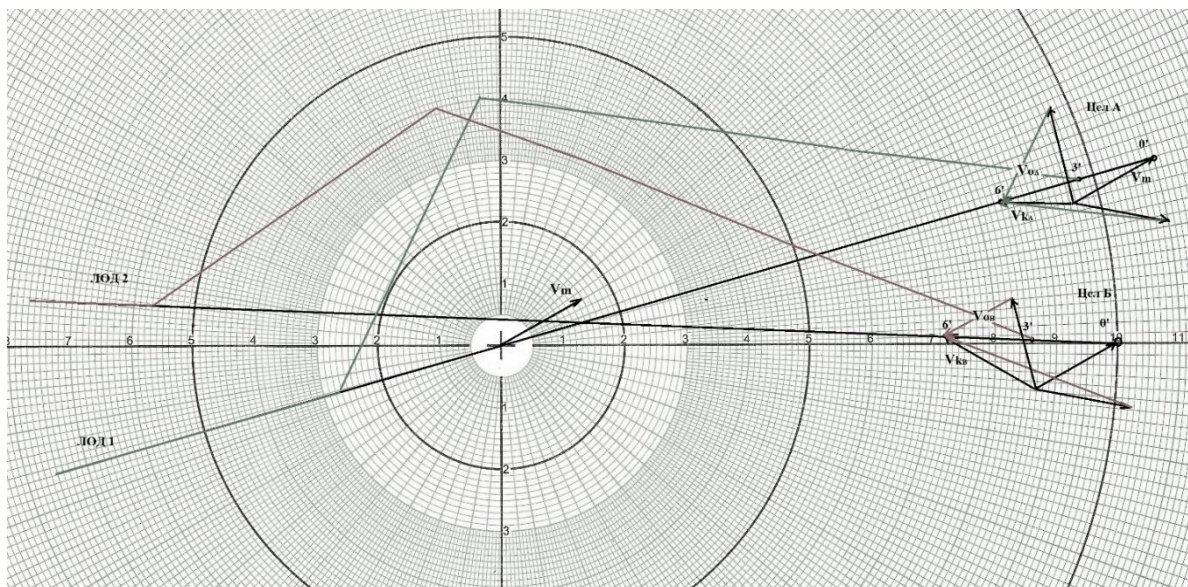
- Стойност на изменението на скоростта на собствения кораб – собственият кораб извършва разминаването само с изменение на курса, според наложената от добрата морска практика маневра.

- Коефициент за намаляване на скоростта на СК вследствие на съпротивлението на водата: $\beta = 0,15$.

- Коефициент на намаление на скоростта на СК вследствие на съпротивлението на водата, при изменение на относителния курс на целта: $\alpha = 0,2$.

Избраните начални времена за маневрата и съответстващите им разстояния определят подсценариите на сценарий 2., чиито данни са

представени в таблици от 3.12 до 3.15. Тъй като за този сценарий се използва друг модел на собствен кораб, за който измерваните параметри на машинния симулатор са по-малко, то и представените данни за разхода на гориво са по-малко от тези в сценарий 1.



Фигура 3.4. Планшетно решение на задачата за разминаване с начало 3' след откриване на целите

На фигура 3.4. е показано планшетното решение на задачата за разминаване. Поради сложност на графичното изображение е демонстрирано относителното движение на цел А и цел Б само при начало на маневра в третата минута след откриването им. За останалите сценарии относителните пътища на целите са аналогични.

Таблица 3.12. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий

2.1. – начало на маневрата в третата минута от откриване на целите

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 60 | 15 | 72 | 2,81 | 0,187333333 |
| 2. | 1:30 | 60 | 15 | 72 | 2,81 | 0,187333333 |
| 3. | 3 | Д-10 | 14,2 | 70,3 | 3,4 | 0,23943662 |
| 4. | 6 | 100 | 14,75 | 70 | 3,38 | 0,229152542 |
| 5. | 8:30 | 100 | 14,6 | 70,2 | 3,02 | 0,206849315 |
| 6. | 13 | 95 | 14,9 | 72,1 | 3,05 | 0,204697987 |
| 7. | 17 | Л-25 | 15,1 | 71,2 | 2,86 | 0,189403974 |
| 8. | 20 | 335 | 14,25 | 71 | 3,14 | 0,220350877 |
| 9. | 29 | Д-8 | 14,08 | 71,1 | 3,24 | 0,230113636 |
| 10. | 31 | 60 | 14,24 | 71,2 | 3,33 | 0,233848315 |
| 11. | 32 | 60 | 15 | 72 | 3,2 | 0,213333333 |
| | Средно | – | 14,647 | – | 3,11 | 0,2169 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 2,3419 |

Таблица 3.13. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий

2.2. – начало на маневрата в шестата минута от откриване на целите

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 60 | 15 | 72 | 2,81 | 0,187333333 |
| 2. | 6 | 60 | 14,98 | 72 | 3,36 | 0,224299065 |
| 3. | 6:30 | Д-15 | 13,94 | 71,3 | 3,14 | 0,225251076 |
| 4. | 7:30 | Л-10 | 13,71 | 70,5 | 3,13 | 0,228300511 |
| 5. | 11 | 110 | 14,04 | 70,2 | 3,25 | 0,231481481 |
| 6. | 12 | 110 | 15 | 71,1 | 2,88 | 0,192 |
| 7. | 13 | 90 | 15,1 | 71,2 | 3,08 | 0,20397351 |
| 8. | 14:40 | 115 | 13,9 | 71,6 | 3,14 | 0,225899281 |
| 9. | 21 | Л-25 | 13,58 | 70 | 3,21 | 0,236377025 |
| 10. | 23 | 340 | 14,5 | 71,2 | 3,31 | 0,228275862 |
| 11. | 28 | Д-20 | 14,24 | 71,2 | 3,33 | 0,233848315 |
| 12. | 32 | 60 | 15 | 72 | 2,9 | 0,193333333 |
| | Средно | – | 14,432 | – | 3,11 | 0,2160 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 2,3415 |

Таблица 3.14. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий

2.3. – начало на маневрата в деветата минута от откриване на целите

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 60 | 15 | 72 | 2,81 | 0,187333333 |
| 2. | 9 | Д-25 | 14,51 | 72 | 3,15 | 0,217091661 |
| 3. | 9:30 | 120 | 13,24 | 71,3 | 2,92 | 0,220543807 |
| 4. | 11 | Д-10 | 13,84 | 70,25 | 3,1 | 0,223988439 |
| 5. | 15 | 125 | 14,61 | 70,9 | 2,87 | 0,196440794 |
| 6. | 19 | Л-25 | 13,45 | 70,1 | 3,06 | 0,227509294 |
| 7. | 21 | 328 | 13,02 | 71,2 | 2,97 | 0,228110599 |
| 8. | 21:40 | Д-10 | 13,63 | 70,6 | 3,02 | 0,221570066 |
| 9. | 26 | 355 | 13,95 | 70 | 3,31 | 0,237275986 |
| 10. | 28 | Д-15 | 13,79 | 71,2 | 2,84 | 0,205946338 |
| 11. | 30 | 60 | 14,36 | 71,4 | 2,7 | 0,188022284 |
| 12. | 32 | 60 | 15 | 72 | 2,9 | 0,193333333 |
| | Средно | – | 14,03 | – | 2,97 | 0,2123 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 2,3372 |

Таблица 3.15. Данни за маневрата на собствения кораб според подсценарий 2.4. – начало на маневрата в дванадесетата минута от откриване на целите

| № | Време на отчет | Курс на СК [°] | Скорост на СК [kn] | Обороти на ГД на СК [r/min] | Моментен разход [t/h] | Моментен разход [t/nm] |
|-----|--------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. | 0 | 60 | 15 | 72 | 2,81 | 0,187333333 |
| 2. | 12 | Д-30 | 14,02 | 71 | 3,03 | 0,216119829 |
| 3. | 14 | 140 | 12,06 | 71,3 | 2,66 | 0,220563847 |
| 4. | 15 | 140 | 12,1 | 70,5 | 2,76 | 0,228099174 |
| 5. | 18 | 155 | 13 | 70,9 | 3 | 0,230769231 |
| 6. | 23 | Л-15 | 14,37 | 70,1 | 3,35 | 0,233124565 |
| 7. | 25 | 25 | 12,95 | 71,2 | 3 | 0,231660232 |
| 8. | 27 | Д-10 | 13,46 | 70,6 | 3,11 | 0,231054978 |
| 9. | 30 | 75 | 14,34 | 70 | 3,35 | 0,233612273 |
| 10. | 31 | Л-15 | 14,6 | 71,6 | 2,81 | 0,192465753 |
| 11. | 32 | 60 | 15 | 72 | 2,7 | 0,18 |
| | Средно | – | 14,03 | – | 2,97 | 0,2168 |
| | Разход за периода | – | – | – | – | 2,3848 |

За аналитичното решение на оптимизационната задача отново е използвана MATLAB среда. Резултатите и сравнителните данни от симулаторното решение и аналитичното решение на задача (2.18) са представени в таблица 3.16.

Таблица 3.16. Сравнение на решенията на двуйерархичната оптимизационна задача (2.18) и симулаторните данни – сценарий 2.

| № | Показател | Подсценарий | Подсценарий | Подсценарий | Подсценарий |
|----|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 |
| 1. | Време за начало на маневрата след определяне на ЕДЦ [min] | 3 | 6 | 9 | 12 |
| 2. | Начална дистанция до опасната цел S [nm] | 9,5 | 7,2 | 5,4 | 3,8 |
| 3. | Минимален ъгъл φ за цел А [°] | ≈ 12 | ≈ 16 | ≈ 22 | ≈ 31 |
| 4. | Минимален ъгъл φ за цел Б [°] | ≈ 9 | ≈ 13 | ≈ 18 | ≈ 27 |
| 5. | Определящ ъгъл $\varphi^* = \max(\varphi_A, \varphi_B)$ – двуйерархично решение [°] | ≈ 12 | ≈ 16 | ≈ 22 | ≈ 31 |
| 6. | Най-неблагоприятно ТСПА (горно ниво) [min] | Високо | Средно | Оптимално | Ниско |
| 7. | Интегрален разход на гориво – симулатор [t] | 2,3419 | 2,3415 | 2,3372 | 2,3848 |
| 8. | Оценка по двуйерархичен критерий | Допустимо | Допустимо | Оптимално | Гранично |

Интегралният разход на гориво, изчислен в таблици 3.11 – 3.14, е взет като критерий за оптималност на разхода, защото се изчислява в размерност „тон изразходвано гориво на миля проплавано разстояние“. Състоятелността на този избор се подкрепя от постановката на задачата – времето за маневрата се разчита от момента на откриване на целта или целите и завършва със завръщането на собствения кораб на първоначалния си път. Така „времето“ и „разходът“ са равнопоставени критерии. От таблица 3.16 се вижда, че при сценарий 2. дуйерархичната оптимизационна задача (2.18) позволява еднозначно да се определи оптимален момент за начало на маневрата, който удовлетворява ограниченията за безопасно разминаване с две опасни цели и води до минимален разход на гориво. Решението, получено при подсценарий 2.3., представлява оптимален компромис между ранно и късно маневриране и потвърждава приложимостта на разработения дуйерархичен модел на управление на кораб в по-сложни навигационни ситуации.

3.3. Анализ на резултатите при реализиране на сценарий 1. и сценарий 2.

Сравнителния анализ на двата сценария ще направим на базата на решенията на използваните симулатори и аналитичното решение в MATLAB среда. Резултатите са представени в таблица 3.17.

Таблица 3.17. Сравнителен анализ на резултатите от двуйерархичната оптимизация на сценарий 1. и сценарий 2.

| № | Показател | Сценарий 1. (контейнеровоз) | Сценарий 2. (танкер) |
|-----|---|---|---|
| 1. | Тип собствен кораб | Контейнеровоз (Panamax) | Танкер >180 000 t |
| 2. | Маневрени качества | Висока повратливост, добра маневреност | Ниска повратливост, голям тактически диаметър |
| 3. | Брой опасни цели | 1 | 2 |
| 4. | Основен управляващ параметър | Изменение на курса на СК и оттам – изменение на относителния курс φ | Изменение на курса на СК и оттам – изменение на относителния курс φ |
| 5. | Зададено безопасно разстояние d [nm] | 2,0 | 2,0 |
| 6. | Диапазон на начални дистанции S [nm] | 8,0 – 2,4 | 9,5 – 3,8 |
| 7. | Критерий за горно ниво на двуйерархична оптимизация | Минимизация на време + безопасност | Минимизация на време + безопасност спрямо най-опасната цел |
| 8. | Критерий за долно ниво на двуйерархична оптимизация | Минимизация на интегрален разход на гориво | Минимизация на интегрален разход на гориво |
| 9. | Оптимален подсценарий | 1.3 ($t_o = 9$ min) | 2.3 ($t_o = 9$ min) |
| 10. | Минимален разход на гориво [t/nm] | 1,7951 | 2,3372 |
| 11. | Поведение при късна маневра | Рязко нарастване на φ | Силно увеличение на разхода |
| 12. | Чувствителност към α и β | Средна | Висока |
| 13. | Област на допустими решения | Тясна | По-широка, но по-чувствителна |
| 14. | Практическа приложимост | Висока | Много висока (критични ситуации) |

С цел да се оценят устойчивостта и приложимостта на разработения двуйерархичен оптимизационен модел, в настоящия подраздел се извършва сравнение между резултатите, получени при сценарий 1. и сценарий 2. Двата сценария се различават съществено както по броя на опасните цели, така и по маневрените характеристики на собствения кораб.

Сценарий 1. представлява класическа задача за разминаване с една подвижна цел при контейнеровоз с добри маневрени характеристики. В този случай двуйерархичната оптимизация показва ясно изразен минимум на интегралния разход на гориво, при междинни стойности на началната дистанция S , като прекалено ранните и прекалено късните маневри водят до влошаване на икономическите показатели.

Сценарий 2. от своя страна поставя значително по-високи изисквания към алгоритъма, тъй като включва разминаване с две едновременно опасни цели и използване на танкер с голямо водоизместване и ограничена маневреност. В този по-сложен сценарий разработеният двуйерархичен модел запазва своята функционалност и позволява еднозначно да се определи зона на оптимален компромис между безопасност и разход на гориво.

Особено съществен резултат е фактът, че и при двата сценария оптималното начало на маневрата се реализира приблизително в деветата минута след определяне на елементите на движението на целите. Това показва, че разработеният модел не е чувствителен към конкретната конфигурация на навигационната ситуация, а улавя фундаменталната зависимост между момента на маневриране, необходимото изменение на курса и енергийната ефективност на кораба.

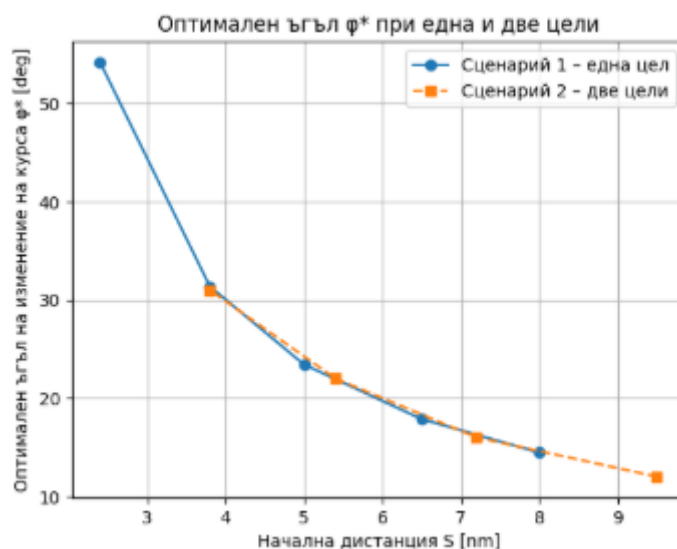
Получените резултати потвърждават, че двуйерархичната оптимизация представлява подходящ и практически приложим инструмент за подпомагане на навигационните решения в сложни и динамични ситуации на море.

От направения анализ следва и още един практически приложим извод, свързан с оптималното отклонение на курса на собствения кораб за безопасно

разминаване. От представената теоретична постановка във втора глава става ясно, че промяната на курса на СК е аргумент във функцията за избор на време за маневриране. Оптималното решение на задача (2.18) показва, че дистанцията до целта, спрямо която ще се извърши маневрата, е около 5 морски мили. Това решение изпълнява всички критерии на навигационната задача:

- безопасност на маневрата за разминаване;
- оптимално време за цялостната маневра до завръщане на първоначалния път на собствения кораб;
- минимален разход на гориво за провеждане на цялата маневра, до нейното приключване на първоначалния път на собствения кораб.

Представянето на решенията на сценарий 1. и сценарий 2. на обща графика дава нагледна представа за оптималността на избора за маневра при разминаване с една или повече цели (фиг. 3.5).



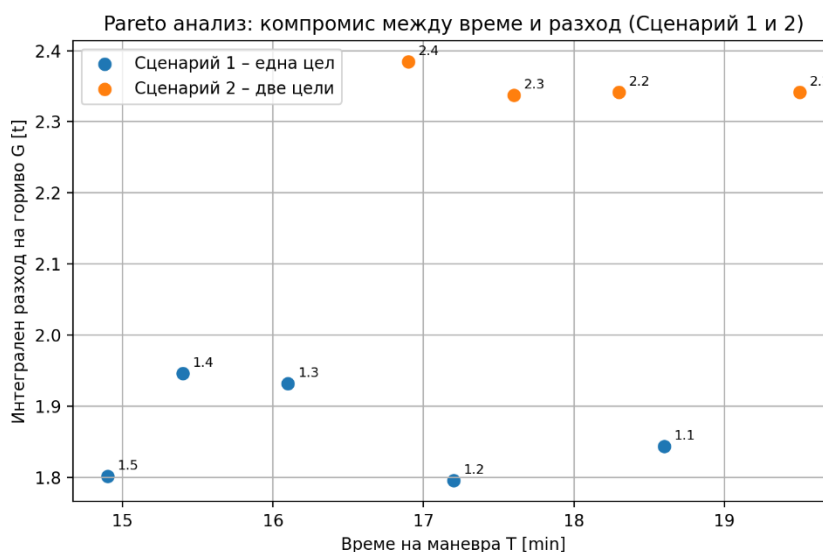
Фигура 3.5. Зависимост между началната дистанция до опасната цел и оптималния ъгъл на изменение на курса ϕ^* при една и две цели, получена като решение на двуйерархичната оптимизационна задача

Кривата на сценарий 2. за разминаване с две цели ясно показва по-консервативния характер на решението, свързано с минималната дистанция до

опасната цел, за предприемане на маневра. Сходството на решенията по двата сценария: около $S \approx 3,8 \text{ nm}$, показва граничен режим, при който броят на целите вече не влияе съществено – доминират кинематичните ограничения за собствения кораб. Фигурата визуално оправдава защо дъщерархичната оптимизация е необходима при усложняване на навигационната среда.

На фигура 3.6 е представена Парето графиката, която представя зависимостта между времето на маневра T и интегралния разход на гориво G . Тази графика изпълнява ключова роля при интерпретацията на резултатите от дъщерархичната оптимизационна задача. Тя позволява едновременното разглеждане на два конфликтни критерия, които поотделно не могат да бъдат оптимизирани без компромис.

В разглежданата задача намаляването на времето за маневра обикновено изисква по-резки изменения на курса и повишено натоварване на корабната енергийна установка, което води до увеличаване на разхода на гориво. От друга страна, прекалено ранното започване на маневрата води до удължаване на траекторията и на времето за движение в режим на маневриране, което също увеличава интегралния разход. В резултат от това в равнината T - G се формира област от допустими решения, в която само част от точките могат да се считат за ефективни в Парето смисъл.



Фигура 3.6. Парето графика на връзката между времето за маневра и разхода на гориво

Всяка точка в Парето графиката съответства на конкретен подсценарий от експериментите и представлява действително реализирано навигационно решение. Дадена точка се счита за Парето оптимална, ако не съществува друга точка, която да има едновременно по-малко време на маневра и по-малък разход на гориво. Всички останали точки са Парето доминирани и представляват неефективни решения.

Анализът на графиката показва, че и при двата сценария Парето оптималните решения се намират в междинната зона между ранните и късните маневри. Това потвърждава аналитичния извод, че минималният разход на гориво не се реализира нито при минимално време, нито при максимална безопасност, а в зона на балансиран компромис. По този начин Парето графиката служи като визуално доказателство за необходимостта от двуйерархичен подход, при който приоритетът на безопасността се съчетава с последваща икономическа оптимизация.

При реализацията на сценарий 1. Парето графиката показва сравнително компактна област от решения, което е характерно за кораб с добри маневрени качества. Парето оптималната точка е ясно изразена и съответства на подсценарий 1.2., при който се наблюдава минимален интегрален разход на гориво, при умерено време на маневра.

При наличие на две опасни цели (сценарий 2.), областта на допустимите решения се измества към по-големи стойности както на времето, така и на разхода. Парето оптималната точка (подсценарий 2.3.) е резултат от по-строги ограничения на горното йерархично ниво и показва цената на допълнителната безопасност при усложнена навигационна обстановка. С цел количествено потвърждение на направените изводи от Парето графиката е направен тест в MATLAB среда за Парето доминиране между всички разглеждани подсценарии. Резултатите от теста показват, че подсценариите 1.2. и 2.3. не са доминирани от нито едно друго решение и следователно са Парето ефективни.

Останалите подсценарии са доминирани поне по един от критериите „време“ или „разход“, което ги определя като неефективни решения.

Този резултат потвърждава, че двуйерархичната оптимизация коректно идентифицира оптималната зона на компромис между безопасност, време и икономичност.

В заключение трябва да бъде анализирано и мястото на коефициентите α и β във формулите (2.16) и (2.17), както и тяхното практическо значение за избор на курс за маневриране на собствения кораб. Смесът на тези коефициенти: коефициентът α отразява съпротивлението на корабния корпус при поворота, а коефициентът β – общото съпротивление, и оттам намаление на скоростта, се проявява в долното оптимизационно ниво на двуйерархичната задача. Те оказват влияние върху разхода на гориво G . Нека функционалната зависимост между G , α и β да изразим чрез конкретизиране на формула (2.17) по следния начин:

$$G(\varphi, V_m) = \alpha|\varphi| + \beta V_m$$

Горното ниво, аналог на безопасност и време, определя допустимото отклонение φ , а долното ниво избира най-икономичното решение в тази допустима област. В таблица 3.18 са представени изчисления за стойността на горивната функция G , при комбинация от различни стойности на α и β .

За представяне на смисъла на коефициентите е избран един конкретен сценарий на стойностите на ъгъла на изменение на относителния курс на целта, респективно изменение на курса на собствения кораб, и стойността на неговата скорост. Тези данни са част от сценарий 1. за маневриране за отклонение от една цел – $\varphi = 0,312 \text{ rad}$, $V_m = 20 \text{ kn}$.

Таблица 3.18. Чувствителност на горивната функция G към
коэффициентите α и β

| № | α | β | G |
|----|----------|---------|-------|
| 1. | 0,15 | 0,15 | 3,046 |
| 2. | 0,20 | 0,15 | 3,062 |
| 3. | 0,25 | 0,15 | 3,078 |
| 4. | 0,20 | 0,10 | 2,062 |
| 5. | 0,20 | 0,15 | 3,062 |
| 6. | 0,20 | 0,20 | 4,062 |

От таблица 3.18 се вижда, че увеличението на коэффициента α , при фиксирана стойност на β , води до умерено нарастване на стойността на горивната функция, като този ефект е пропорционален на оптималния ъгъл на изменение на курса. Това означава, че чувствителността на решението към α нараства при режими, изискващи по-големи ъгли на отклонение, каквито се наблюдават при късно начало на маневрата.

За разлика от това, промяната на коэффициента β , при фиксирана стойност на α , води до значително по-силно изменение на G поради линейната зависимост от скоростта на кораба. Следователно β се явява доминиращ параметър в постановки, при които скоростта е оптимизационна променлива. В случаите, когато скоростта е фиксирана (както при експериментите от сценарий 2.), промяната на β не влияе върху избора на оптимален подсценарий, а само върху абсолютната стойност на оценката за икономичност.

Получените резултати потвърждават, че двуйерархичният модел е относително устойчив спрямо умерени вариации на параметрите α и β , като чувствителността се проявява основно в критични навигационни режими, с големи ъгли на изменение на курса.

Направените анализи в тази точка позволяват обобщено представяне на практическия смисъл на двуйерархичната оптимизация на времето за начало

на маневра и на разхода на гориво по време на маневра. Практическото приложение е дадено в таблица 3.19.

Таблица 3.19. Обобщение на типовете маневри при дъщерархична оптимизация на маневрата за разминаване

| № | Тип маневра | Характеристики | Последици |
|----|-------------|----------------------------------|---------------------------|
| 1. | Ранна | Малък ъгъл φ , дълъг път | ↑ време, ↑ разход |
| 2. | Оптимална | Умерен ъгъл φ | Минимален разход |
| 3. | Късна | Голям ъгъл φ | ↑ моментен разход, ↑ риск |

Получените експериментални резултати за оптималния момент на започване на маневрата могат да бъдат интерпретирани и от гледна точка на навигационната практика и хидродинамиката на кораба. Известно е, че прекалено ранното започване на маневра за разминаване води до значително отклонение от първоначалния път и увеличаване на дължината на прехода, което неминуемо се отразява в повишен интегрален разход на гориво. От друга страна, прекалено късното започване на маневрата изисква по-големи ъгли на отклонение и по-интензивно използване на рулевото устройство, което води до допълнително хидродинамично съпротивление и повишен разход.

В този смисъл наличието на ясно изразен минимум на кривата на интегралния разход на гориво, в зависимост от момента на започване на маневрата, представлява физически и навигационно обоснован резултат. Оптималният интервал, установен експериментално в настоящото изследване, съответства на компромисна зона, при която маневрата е достатъчно ранна, за да бъде ясно изразена и съобразена с изискванията на COLREG, но не толкова ранна, че да води до неоправдано удължаване на пътя и увеличаване на разхода.

Тази интерпретация съответства на утвърдената практика в управлението на корабното движение, според която оптималните маневри за разминаване са „ранни и решителни“, но не максимални по амплитуда, а адаптирани към конкретната навигационна ситуация.

3.4. Ограничения на разработения двуйерархичен модел и насоки за бъдещи изследвания

Въпреки че резултатите, представени в настоящата глава, потвърждават приложимостта и ефективността на двуйерархичната оптимизационна задача при управление на маневри за избягване на сблъсък, следва ясно да се очертаят ограниченията на разработения модел и да се посочат възможните направления за неговото по-нататъшно развитие.

Разработеният модел се базира на идеализирано описание на относителното движение между корабите, като се приема, че скоростите и курсовете на целите остават постоянни по време на маневрата. Това допускане е широко използвано в теорията на корабоводенето и е валидно за кратки времеви интервали, но в реална навигационна обстановка поведението на целите може да бъде повлияно от човешки фактор, правила за разминаване (COLREG) или външни условия.

Друго съществено ограничение произтича от използването на опростени зависимости за разхода на гориво, при които икономичността на маневрата се представя чрез агрегирани или линейни функции на ъгъла на изменение на курса и скоростта на кораба. В действителност хидродинамичното съпротивление и натоварването на главния двигател зависят нелинейно от множество фактори, включително от състоянието на морето, газенето и характеристиките на винто-рулевия комплекс.

Моделът не отчита пряко влиянието на външни въздействия, като вятър, вълнение и течение, които могат да окажат съществено влияние върху реалната траектория на кораба и върху необходимото управление на руля. В симулационна среда тези фактори могат частично да бъдат задавани, но в аналитичния модел те са пренебрегнати с цел запазване на компактна и възможна за интерпретиране математическа структура.

Използваните коефициенти α и β , които описват намаляването на скоростта вследствие на съпротивлението на водата при изменение на курса, са приети като постоянни за дадения корабен модел. Резултатите показват, че

при критично малки дистанции до целта тези коефициенти следва да бъдат калибрирани спрямо конкретния тип кораб, неговото газене и динамични характеристики.

Ограничение представлява и фактът, че човешкият фактор е разгледан само косвено – чрез решенията, взети от операторите в симулатора. Реакционното време, субективната оценка на риска и индивидуалният стил на маневриране не са включени експлицитно в оптимизационната задача, въпреки че те имат съществено значение в реалната навигационна практика.

Въпреки тези ограничения, двуйерархичната оптимизационна рамка демонстрира значителна гъвкавост и предоставя стабилна основа за бъдещи разширения. Като естествени направления за бъдещи изследвания могат да се посочат включването на нелинейни модели за съпротивление и разход на гориво, въвеждането на стохастични елементи при оценката на СРА и ТСРА, както и интеграцията на разработения подход с интелигентни системи за подпомагане на навигационните решения и автономното корабоплаване.

На база на проведените експерименти, числени изчисления и сравнителни анализи в настоящата глава, могат да се формулират следните основни заключения:

1. Двуйерархичната оптимизационна задача осигурява ефективен формализиран подход за вземане на навигационни решения при опасно сближение, като ясно разграничава приоритетите между безопасност и икономичност.

2. Анализите на сценарий 1. и сценарий 2. показват, че оптималният момент за начало на маневрата не съвпада нито с най-ранното, нито с най-късното възможно решение, а се намира в междинна зона, която минимизира интегралния разход на гориво.

3. При усложняване на навигационната обстановка (повече от една опасна цел и по-лоши маневрени характеристики на собствения кораб) двуйерархичният подход запазва своята приложимост и позволява еднозначно определяне на оптимален компромис.

4. Съпоставянето между аналитичните решения и резултатите от навигационния и машинния симулатор потвърждава адекватността на разработения модел и разкрива областите, в които са необходими корекции поради физически и динамични ограничения.

5. Получените резултати показват, че минимизацията на времето за маневра сама по себе си не гарантира минимален разход на гориво, което обосновава необходимостта от многокритериален и двуйерархичен подход при управление на корабното движение.

6. Разработената методика представлява подходяща основа за бъдещо внедряване в системи за подпомагане на навигационните решения и в архитектури за автономно корабоплаване, при условие че бъдат разширени моделите за динамика и външни въздействия.

В резултат на проведените експерименти и извършения сравнителен анализ може да се направи изводът, че разработеният двуйерархичен оптимизационен модел адекватно описва процеса на избор на момент и начин на маневриране при разминаване на кораб с една или повече опасни цели. Моделът демонстрира висока степен на съгласуваност между аналитичните решения, симулаторните резултати и числените решения в MATLAB среда, особено при достатъчно ранно започване на маневрата.

Анализът показва, че оптималното решение се реализира в зона на балансиран компромис между времето за маневра и интегралния разход на гориво, което се потвърждава както от Парето графиките, така и от сравнителните таблици за двата сценария. Получените резултати доказват, че двуйерархичният подход представлява ефективен инструмент за подпомагане на навигационните решения в сложна и динамична морска среда и създава предпоставки за неговото бъдещо приложение в интелигентни навигационни системи и тренажорни комплекси.

В бъдещи изследвания моделът може да бъде разширен в няколко основни направления:

- Включване на едновременно изменение на курса и скоростта като управляващи параметри.

- Въвеждане на нелинейни хидродинамични зависимости за описване на съпротивлението при маневриране.

- Разширяване на двуйерархичния модел към ситуации с повече от две опасни цели.

- Интегриране на модела в системи за подпомагане на навигационните решения (Decision Support Systems) и в тренажорни комплекси.

- Изследване на приложимостта на подхода в контекста на автономното корабоплаване и интелигентните навигационни системи.

Тези направления представляват логично продължение на настоящата работа и подчертават потенциала на двуйерархичната оптимизация като универсален инструмент за управление на сложни навигационни процеси.

Глава четвърта

ПРАКТИЧЕСКО ПРИЛОЖЕНИЕ НА ДВУЙЕРАРХИЧНИЯ МОДЕЛ В НАВИГАЦИОННИ СИСТЕМИ

Четвърта глава е посветена на практическото приложение на разработения двуйерархичен оптимизационен модел в реални навигационни и организационни случаи. Разгледани са архитектурата и възможностите за интеграция на модела в системи за подпомагане на навигационните решения, неговото приложение в навигационни системи на корабен мостик и тренажорни комплекси, както и използването му като инструмент за обучение и оценка на навигационни специалисти. Чрез разработен казус е демонстрирана ефективността на модела при реалистична навигационна ситуация и е показано, че той надгражда решенията на корабоводителя, без да ги заменя. Анализирани са съвместимостта на модела с COLREG, STCW и философията на ИМО, като са формулирани и практически препоръки за неговото внедряване в системата за управление на безопасността (SMS) чрез примерна процедура и чеклист. По този начин се доказва, че двуйерархичният оптимизационен модел представлява не само научнообосновано, но и реално приложимо средство за постигане на по-добър баланс между безопасност, време и разход на гориво.

4.1. Архитектура на система за подпомагане на навигационните решения, базирана на двуйерархична оптимизация

В четвърта глава е изследвана възможността за включване на разработения двуйерархичен модел за управление на кораб в съществуващи системи за управление. Разработеният във втора глава и експериментално верифициран в трета глава двуйерархичен оптимизационен модел не е предназначен да функционира като самостоятелен математически инструмент, а като интегриран модул в система за подпомагане на навигационните решения (Decision Support System, DSS). В този смисъл настоящият подраздел

представя концептуалната архитектура на такава система и мястото на двуйерархичната оптимизация в нея.

Системата за подпомагане на навигационните решения се разглежда като многослойна архитектура, включваща следните основни функционални нива:

- ниво за събиране и предварителна обработка на данни;
- ниво за оценка на навигационната ситуация и безопасността;
- ниво за оптимизационно вземане на решения;
- ниво за визуализация и взаимодействие с корабоводителя.

Входните данни за системата се формират от стандартните навигационни и корабни сензори, включително радар с ARPA функционалност, AIS, GPS/INS, ECDIS, както и данни от корабната енергийна установка (оборот на главния двигател, натоварване, моментен разход на гориво). Тези данни са налични на съвременните корабни навигационни системи и не изискват допълнителни нестандартни измервания.

На нивото за оценка на навигационната ситуация се извършва определяне на елементите на относителното движение на целите (курс, скорост, CPA, TCPA) и идентифициране на опасните цели съгласно правилата на COLREG. Това ниво реализира безопасно-филтриращата функция, която съответства на горното ниво на двуйерархичната оптимизационна задача.

Двуйерархичният оптимизационен модел се разполага на нивото за оптимизационно вземане на решения, където на първото (приоритетно) ниво се определя допустимият интервал за начало и начин на маневра, гарантиращ безопасно разминаване, а на второто ниво – оптималното решение по отношение на интегралния разход на гориво и времето за маневра. По този начин моделът функционира като интелигентен филтър, който предлага само допустими и икономически ефективни маневри.

Ключово предимство на предложената архитектура е, че тя не автоматизира управлението на кораба, а подпомага навигатора чрез

предоставяне на оптимални решения в рамките на действащите правила и добрата морска практика. Това я прави съвместима със съществуващите регулаторни изисквания и философията на човеко-ориентираното управление.

4.2. Интеграция на двуйерархичния модел в корабни навигационни системи

Практическата интеграция на двуйерархичния оптимизационен модел в реална корабна среда изисква неговото адаптиране към съществуващите навигационни системи, без да се нарушава установената организация на работа и отговорностите на навигатора.

Предложеният модел може да бъде реализиран като софтуерен модул, интегриран в ECDIS, или радарна система с възможност за наслагване (overlay) на оптимизационната информация върху стандартното навигационно изображение. В този режим моделът използва входни данни от ARPA и AIS за целите и от навигационните датчици за собствения кораб, като извършва изчисленията в квазиреално време.

Резултатите от двуйерархичната оптимизация могат да бъдат представени на корабоводителя под формата на:

- препоръчителен диапазон за начало на маневрата;
- оптимален ъгъл на изменение на курса;
- очаквано време за завършване на маневрата;
- относителна оценка на разхода на гориво.

Особено важно е, че визуализацията не следва да бъде директивна, а консултативна, като навигаторът запазва пълния контрол върху крайното решение. Това съответства на принципа „подкрепа на вземането на решения, а не заместване на вземането на решения“ (decision support, not decision replacement), който е заложен в съвременните концепции за интелигентни навигационни системи.

Интеграцията на двуйерархичния модел позволява на корабоводителя да оцени не само дали дадена маневра е безопасна, но и каква е цената на тази

маневра от гледна точка на време и енергийна ефективност. По този начин се преодолява ограничението на традиционните навигационни средства, които предоставят информация за риска, но не и за оптималността на решенията.

4.3. Приложение на двуйерархичния модел в тренажорни комплекси и обучението на навигационни специалисти

Едно от най-естествените и практически значими приложения на разработения двуйерархичен оптимизационен модел е неговото внедряване в навигационни и машинни тренажорни комплекси. В тази среда моделът може да бъде използван не само като инструмент за подпомагане на решенията, но и като обективен критерий за оценка на действията на обучаемите.

В тренажорна среда двуйерархичният модел може да функционира паралелно с действията на навигатора, без да влияе върху управлението на кораба. След приключване на сценария, решенията на обучаемия могат да бъдат сравнени с оптималните решения, изчислени от модела, по следните показатели:

- момент на започване на маневрата;
- избран ъгъл на изменение на курса;
- време за завръщане на първоначалния път;
- интегрален разход на гориво за целия маневрен процес.

Този подход позволява обективна и количествена оценка на навигационните решения, което представлява съществено подобрене спрямо традиционните субективни методи за оценяване в обучението. Освен това моделът може да бъде използван за създаване на адаптивни тренировъчни сценарии, при които сложността на задачите се увеличава в зависимост от постигнатото ниво на оптималност на решенията.

Особено ценен е потенциалът на двуйерархичния модел за обучение в ситуации, при които съществува конфликт между безопасност, време и икономичност – ситуации, които в реалната практика са чести, но трудно се

формализират в учебен процес. По този начин моделът допринася не само за повишаване на техническата компетентност на навигационните специалисти, но и за формиране на системно мислене при вземането на решения в сложна морска среда.

4.4. Приложение на двуйерархичния оптимизационен модел при реалистична навигационна ситуация (Case study)

С цел демонстриране на практическата приложимост на разработения двуйерархичен оптимизационен модел и неговата ефективност при реалистични навигационни условия, в настоящия подраздел е разработен и анализиран конкретен казус (case study). Казусът представлява пълна навигационна ситуация за разминаване на собствения кораб с опасна цел, при която решенията, взети от навигатор в тренажорна среда, се сравняват с оптималните решения, генерирани от двуйерархичния модел.

4.4.1. Описание на навигационния казус

Казусът е базиран на сценарий за разминаване на контейнеровоз – собствен кораб, с една подвижна цел в открито море, при условия на ограничено време за реакция и изискване за спазване на минимална безопасна дистанция. Началните условия са избрани така, че да възпроизвеждат типична ситуация от реалната навигационна практика, при която съществува ясно изразен риск от опасно сближение, но без наличие на екстремни или аварийни условия.

Собственият кораб се движи с постоянна скорост и курс, като целта е открита с радар и захваната за автоматично следене чрез ARPA. Навигаторът разполага със стандартната информация, налична на корабния мостик – курс, скорост, CPA, TCPA и визуално изображение на ситуацията. В този контекст навигаторът взема решение за момента и начина на маневриране, без предварително да има информация за оптималното решение, генерирано от модела.

4.4.2. Реализация на казуса в тренажорна среда

Казусът е реализиран на навигационен тренажор от клас А, като действията на корабоводителя са регистрирани по време на целия маневрен процес – от момента на откриване на целта до завръщането на собствения кораб на първоначалния си път. Паралелно с това двуйерархичният оптимизационен модел обработва същите входни данни и изчислява оптималните стойности за:

- началото на маневрата;
- ъгъла на изменение на курса;
- времето за завършване на маневрата;
- интегралния разход на гориво за целия маневрен процес.

Важно е да се подчертае, че моделът не влияе върху действията на навигатора по време на изпълнението на задачата, а функционира изцяло в режим на пасивен анализ. Това позволява обективно сравнение между човешкото решение и оптимизационното решение, без взаимно влияние.

4.4.3. Сравнителен анализ – навигатор срещу двуйерархичен модел

Сравнението между решенията на навигатора и тези, получени от решението на двуйерархичната оптимизационна задача, е извършено по няколко основни показателя: момент на започване на маневрата; величина на отклонението на курса; общо време за маневра; интегрален разход на гориво.

Анализът показва, че навигаторът взема решение, което напълно удовлетворява изискванията за безопасно разминаване и съответства на правилата на COLREG. В същото време решението се характеризира с по-ранно начало на маневрата и по-голямо отклонение от първоначалния път, в сравнение с оптималното решение, генерирано от модела. Това води до увеличаване на времето за маневра и на интегралния разход на гориво.

От своя страна двуйерархичният модел предлага решение, при което маневрата започва в по-късен, но все още безопасен момент, като се постига

по-малък ъгъл на отклонение и по-бързо завръщане на първоначалния курс. В резултат интегралният разход на гориво е по-нисък, без да се компрометира безопасността на плаването.

4.4.4. Интерпретация на резултатите и практическа стойност

Получените резултати ясно показват, че двуйерархичният оптимизационен модел не противоречи на решенията, вземани от опитен навигатор, а ги надгражда, като предоставя количествена оценка на икономическите последствия от различните допустими маневри. В този смисъл моделът може да се разглежда като инструмент за „второ мнение“, който подпомага навигатора при избора между няколко безопасни, но икономически различни решения.

Особено важно е, че моделът не предлага решения, които биха били в конфликт с добрата морска практика или с нормативните изисквания, а работи изцяло в рамките на допустимите навигационни действия. Това го прави подходящ за реално внедряване както в навигационни системи, така и в обучението на навигационни специалисти.

Настоящият казус потвърждава, че двуйерархичната оптимизация представлява ефективен и практически приложим подход за подпомагане на навигационните решения, като позволява постигане на по-добър баланс между безопасност, време и разход на гориво в реални навигационни ситуации.

Практическите резултати от приложението на двуйерархичния оптимизационен модел кореспондират с експертни оценки, натрупани в практиката на корабната експлоатация и управлението на флота. Анализът на реални рейсове показва, че при интензивни маршрути в райони с висока плътност на трафика броят на маневрите за разминаване може да достигне няколко десетки за един рейс, като всяка от тях оказва кумулативно влияние върху общия разход на гориво и времето за преход.

В практиката често се наблюдава тенденция към прекомерно ранни или прекомерно големи маневри с цел „абсолютна безопасност“, което води до

неоптимално използване на енергийния потенциал на кораба. Разработеният двуйерархичен модел формализира този практически опит, като предоставя количествен критерий за разграничаване на достатъчно безопасните, но икономически по-ефективни решения от прекомерно консервативните маневри.

По този начин моделът може да се разглежда като средство за трансфер на експертно знание в структурирана и формализирана форма, подходяща за използване в системи за подпомагане на навигационните решения и в рамките на Системата за управление на безопасността (Safety Management System, SMS).

4.5. Съвместимост на двуйерархичния оптимизационен модел с COLREG, STCW и философията на IMO

Едно от основните изисквания към всяка система за подпомагане на навигационните решения е нейната съвместимост с действащата международна нормативна рамка, регулираща безопасността на корабоплаването. В този контекст настоящият подраздел разглежда съответствието на разработения двуйерархичен оптимизационен модел с Международните правила за предпазване от сблъскване на море (COLREG), Конвенцията за подготовка, освидетелстване и вахтена служба на моряците (STCW), както и с общата философия на Международната морска организация (IMO) относно системите за управление.

Съвместимост с COLREG

Разработеният двуйерархичен оптимизационен модел не въвежда нови правила за движение и не заменя съществуващите предписания на COLREG. Напротив, той използва правилата като твърди ограничения на горното ниво на оптимизационната задача. Идентифицирането на опасните цели, определянето на задълженията на собствения кораб („кораб, който трябва да отстъпи път“, или „кораб, който запазва пътя си“) и допустимите маневри се извършват в пълно съответствие с правилата на Конвенцията.

Моделът предлага решения само в рамките на допустимите действия, предвидени от COLREG, като в изследваните сценарии маневрата се реализира чрез ясно изразено и своевременно изменение на курса – действие, което е в съответствие с правило 8 (Action to avoid collision) и утвърдената добра морска практика. По този начин двуйерархичната оптимизация не интерпретира COLREG, а работи върху тяхната, вече установена, логика.

Съвместимост със STCW-78 и човешкия фактор

Съществен аспект от съвместимостта на модела със STCW е фактът, че той не автоматизира управлението на кораба и не отнема отговорността от навигатора. Напротив, моделът е проектиран като система за подпомагане на решенията, която предоставя на навигатора допълнителна аналитична информация за последиците от различните допустими маневри.

Това съответства пряко на изискванията на STCW за поддържане и развитие на професионалните компетенции на навигационните специалисти, включително способността за оценка на ситуацията, прогнозиране на последиците и вземане на информирани решения. В този смисъл двуйерархичният модел може да бъде използван както в реална експлоатация, така и като обучителен инструмент, подпомагащ развитието на системно мислене и ситуационна осведоменост.

Съответствие с философията на ИМО и човеко-ориентираното управление

Философията на ИМО в областта на морската безопасност все по-ясно се ориентира към концепцията за човеко-ориентирани системи (human-centred systems), при които технологиите подпомагат, а не заменят човешкия фактор. Разработеният двуйерархичен оптимизационен модел напълно съответства на тази философия, тъй като неговата основна функция е да разшири информационната база, върху която навигаторът взема решение, без да налага автоматизирани действия.

Допълнително, моделът е в съзвучие с политиките на ИМО за повишаване на енергийната ефективност и намаляване на емисиите от

корабоплаването, тъй като въвежда икономичността и разхода на гориво като неразделна част от процеса на вземане на навигационни решения. Това представлява практическа реализация на принципа за интегриране на безопасността и устойчивостта в ежедневната навигационна практика.

В обобщение може да се заключи, че разработеният двуйерархичен оптимизационен модел е напълно съвместим с действащата нормативна рамка и философията на международното морско право. Той не противоречи на COLREG, не подкопава ролята на навигатора, както е дефинирана в STCW, и отговаря на стратегическите насоки на ИМО за развитие на интелигентни, човеко-ориентирани и устойчиви навигационни системи. Това го прави подходящ за реално внедряване и за по-нататъшно развитие в контекста на съвременните и бъдещите морски транспортни системи.

4.6. Практически препоръки за внедряване на двуйерархичния оптимизационен модел в системата за управление на безопасността (SMS)

Разработеният и експериментално валидиран двуйерархичен оптимизационен модел създава предпоставки за неговото практическо използване не само като аналитичен инструмент, но и като елемент от организационните и процедурните механизми за управление на безопасността на кораба. В този контекст настоящият подраздел формулира практически препоръки за интегриране на модела в Системата за управление на безопасността (Safety Management System, SMS) и за подпомагане на навигационните решения чрез стандартизирани процедури и чеклисти.

Предложените препоръки не целят въвеждане на задължителни правила или автоматизирани действия, а представляват рамка за подпомагане на навигационния екипаж при вземане на решения в ситуации на разминаване с опасни цели, в съответствие с изискванията на ISM Code, COLREG и принципите на Bridge Resource Management.

4.6.1. Примерна процедура за оптимизирано разминаване като част от SMS

Наименование на процедурата

Procedure for Optimized Collision Avoidance Manoeuvres

Цел на процедурата

Целта на процедурата е да подпомогне навигационния екип при планирането и изпълнението на маневри за разминаване с други кораби, като се осигури:

- спазване на изискванията за навигационна безопасност и COLREG;
- информиран избор между няколко допустими маневри;
- повишаване на енергийната ефективност и оптимизация на времето за маневра.

Обхват

Процедурата се прилага:

- при открито море и крайбрежно плаване;
- при наличие на една или повече опасни подвижни цели;
- при нормални експлоатационни условия.

Процедурата **не се прилага** при аварийни ситуации, загуба на управление, екстремни хидрометеорологични условия или когато капитанът прецени, че са необходими незабавни действия.

Отговорности

- **Капитанът** носи крайната отговорност за вземане на решение и одобрение на маневрата.
- **Вахтеният помощник-капитан** оценява ситуацията, прилага процедурата и изпълнява маневрата.
- **Екипът на мостика** подпомага наблюдението и потвърждава безопасното изпълнение.
- **Оптимизационният модел/DSS (ако е наличен)** предоставя консултативна информация.

Процедурни стъпки

1. Откриване на целта и определяне на елементите на движението (CPA, TCPA).
2. Идентифициране на ролята на собствения кораб, съгласно COLREG.
3. Оценка на допустимите варианти за маневра (изменение на курса).
4. Използване на двуйерархичния оптимизационен модел за:
 - определяне на допустим интервал за начало на маневрата;
 - оценка на препоръчителния ъгъл на отклонение;
 - ориентировъчна оценка на времето и разхода на гориво.
5. Потвърждение на избрания вариант чрез BRM комуникация.
6. Изпълнение на маневрата и непрекъснат мониторинг на ситуацията.
7. Завръщане на кораба на първоначалния път и финална проверка на CPA.

Документация

- Отбелязване на маневрата в навигационния дневник;
- Съхраняване на навигационни данни (radar/ECDIS logs);
- Анализ при near miss или инцидент.

4.6.2. Примерен чеклист за оптимизирано разминаване

(ЗАБЕЛЕЖКА: Този чеклист не е обект на попълване по време на маневра. Той трябва да служи като информационен модел за вземане на решение и оценка на сполучливия завършек на маневрата по разминаване.)

A. Преди маневра (Pre-manoeuvre checklist)

- Целта е идентифицирана и захваната с ARPA.
- CPA и TCPA са потвърдени.
- Ролята на собствения кораб, по COLREG, е ясна.
- Налични са актуални данни за курс и скорост.

- Проверена е възможността за изменение на курса.
- DSS / оптимизационният модел е активен (ако е наличен).

В. По време на маневра (Manoeuvre execution checklist)

- Маневрата е ясна, своевременна и решителна.
- Ъгълът на отклонение е в допустимите граници.
- Скоростта на кораба е стабилна.
- CPA се наблюдава в реално време.
- BRM комуникацията е потвърдена.

С. След маневра (Post-manoeuvre checklist)

- Минималната безопасна дистанция е постигната.
- Корабът се завръща на първоначалния път.
- Няма вторична опасна цел.
- Маневрата е отчетена в дневника.
- Направена е кратка оценка на изпълнението.

4.6.3. Практическа стойност и ползи от внедряването

Включването на подобна процедура и чеклист в SMS позволява стандартизиране на навигационните решения при разминаване, без да се ограничава професионалната преценка на навигатора. Основните ползи от предложените практически препоръки са:

- Повишаване на последователността и проследимостта на решенията.
- Подпомагане на BRM и комуникацията на мостика.
- Намаляване на вероятността от прекалено ранни или прекалено късни маневри.
- Създаване на връзка между безопасност и енергийна ефективност.
- Улесняване на анализи при одити и разследване на near miss събития.

По този начин двуйерархичният оптимизационен модел се превръща от чисто научна разработка в реално приложим инструмент за управление на безопасността и ефективността на корабоплаването.

В четвърта глава е направен анализ за интегриране на разработения двуйерархичен модел за управление на кораб в съществуващата практика на управление. Показана е приложимостта на разработения модел за включване в съществуващи системи за управление, като са анализирани изисквания на различни стандарти за управление с потенциалните решения на двуйерархичната задача. Приложимостта на разработения модел е обоснована както за системи за управление, за подпомагане на вземането на решения, така и за контрол при обучение.

Глава пета

ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА НА ЕФЕКТИВНОСТТА ОТ ПРИЛАГАНЕТО НА ДВУЙЕРАРХИЧНИЯ ОПТИМИЗАЦИОНЕН МОДЕЛ

Пета глава е посветена на икономическата оценка на ефективността от прилагането на разработения двуйерархичен оптимизационен модел при маневри за разминаване на кораби. На базата на експерименталните резултати, получени в трета глава, е извършен количествен анализ на икономическия ефект от оптимизацията на интегралния разход на гориво и времето за маневра както за единични навигационни ситуации, така и при системно приложение в рамките на експлоатационния цикъл на кораба. Разгледани са кумулативните ефекти от множество маневри при интензивни маршрути и е показано, че дори относително малки спестявания при отделна маневра водят до съществен икономически резултат на годишна база. По този начин се доказва икономическата целесъобразност на модела и неговата приложимост като инструмент за подпомагане на управленските решения в съвременното корабоплаване.

5.1. Цел и подход за икономическа оценка

Основната цел на настоящата глава е да се оцени икономическата целесъобразност от прилагането на разработения двуйерархичен оптимизационен модел за оптимизация на маневрите за разминаване на кораб с една или повече опасни цели. За разлика от експерименталния анализ в трета глава, където фокусът е върху единични навигационни ситуации, тук се разглежда кумулативният икономически ефект, който възниква при системно приложение на модела в рамките на експлоатационния цикъл на кораба.

Икономическата оценка е базирана пряко на експерименталните данни, представени в таблици 3.4 – 3.8 (сценарий 1.) и таблици 3.12 – 3.16 (сценарий 2.), където е изчислен интегралният разход на гориво за различни моменти на

начало на маневрата. Тези данни позволяват количествено сравнение между оптималните и неоптималните навигационни решения и служат като основа за оценка на потенциалния икономически ефект.

5.2. Икономически ефект от оптимизацията на единична маневра

5.2.1. Анализ на резултатите за сценарий 1. (контейнеровоз)

От данните в таблица 3.10 е видно, че при сценарий 1. минималният интегрален разход на гориво се реализира при подсценарий 1.3. (начало на маневрата в деветата минута), докато по-ранните и по-късните маневри водят до увеличен разход. Разликата в интегралния разход на гориво между оптималния и най-неблагоприятния подсценарий е от порядъка на:

$$\Delta G_1 \approx 0.15-0.25 [t]$$

Тази разлика представлява допълнителен разход на гориво, който възниква не поради нарушение на безопасността, а вследствие на неоптимален избор на момент и начин на маневриране.

5.2.2. Анализ на резултатите за сценарий 2. (танкер)

Аналогичен анализ на данните от таблица 3.16 показва, че при по-слабоманеврен кораб (танкер с водоизместване над 180 000 t) разликата между оптималното и неоптималното решение е по-силно изразена. При сценарий 2. разликата в интегралния разход на гориво между оптималния подсценарий 2.3. и граничния подсценарий 2.4. достига стойности от порядъка на:

$$\Delta G_2 \approx 0.20-0.30 [t]$$

Това потвърждава извода от трета глава, че икономическият ефект от оптимизацията е по-значим при кораби с ограничени маневрени характеристики.

5.3. Кумулативен икономически ефект при системно приложение

5.3.1. Допускания за експлоатационен сценарий

За оценка на кумулативния икономически ефект разглеждаме сравнително натоварен график на кораб от типа на използваните модели. В този случай се приемат следните консервативни допускания, съобразени с практиката на океанското корабоплаване:

- Среден брой маневри за разминаване с оптимизационен потенциал на рейс:

$$N = 8-12 \text{ (прието: 10);}$$

- Средно спестено гориво на маневра, на база трета глава:

$$\Delta G = 0,08-0,12 \text{ t (прието: 0,10 t);}$$

- Брой рейсове годишно:

$$R = 20-24 \text{ (прието: 22);}$$

- Средна цена на корабно гориво (VLSFO):

$$P_f = 600-700 \text{ USD/t (прието: 650 USD/t).}$$

5.3.2. Годишен икономически ефект от гориво

Спестено гориво на рейс:

$$G_{\text{рейс}} = N \cdot \Delta G = 10 \cdot 0,10 = 1,0 \text{ [t]}$$

Годишно спестено гориво:

$$G_{\text{год}} = 1,0 \cdot 22 = 22 \text{ [t]}$$

Годишен икономически ефект:

$$E_{\text{гор}} = 22 \cdot 650 = 14\,300 \text{ USD/година}$$

Анализът на икономическата ефективност на двуйерархичния оптимизационен модел се подкрепя и от експертни оценки, базирани на реалната експлоатация на океански кораби. Практически наблюдения показват, че при интензивни маршрути броят на маневрите за разминаване с потенциал за оптимизация може да надхвърли 150 – 250 за един рейс, като разликата в разхода на гориво между оптимална и неоптимална маневра може

да варира в широк диапазон, в зависимост от ъгъла на отклонение и момента на започване.

Тези експертни оценки са в пълно съответствие с експерименталните резултати, представени в трета глава, и потвърждават, че дори малки спестявания на гориво при единична маневра, когато се акумулират в рамките на един рейс или година, водят до съществен икономически ефект. Това още веднъж подчертава практическата значимост на системното прилагане на оптимизационния подход.

5.4. Допълнителен икономически ефект от оптимизацията на времето

Освен спестяването на гориво, оптималният избор на момент за маневра води до намаляване на времето за отклонение и по-бързо завръщане на кораба на първоначалния път. От експерименталните данни в трета глава следва, че оптималните маневри водят до съкращаване на времето за маневра със средно:

$$\Delta T = 3-5 \text{ [min]}$$

При приемане на оперативна цена на кораба от порядъка на 1000 – 1500 USD/h (чартърна ставка), годишният икономически ефект от оптимизация на времето може да бъде оценен консервативно на:

$$E_{\text{време}} \approx 15\,000 - 20\,000 \text{ USD/година}$$

5.5. Обобщена икономическа оценка и интерпретация

Комбинирането на икономическия ефект от спестеното гориво и от оптимизацията на времето, общият годишен икономически ефект от прилагането на двуйерархичния оптимизационен модел за един кораб може да бъде оценен в диапазона:

$$E_{\text{общо}} \approx 25\,000 - 35\,000 \text{ USD/кораб/година}$$

Тази стойност следва да се разглежда като консервативна оценка, тъй като не включва вторични ефекти, като:

- подобрене на CII (Carbon Intensity Indicator) рейтинга;

- намаляване на износването на енергийни и рулеви системи;
- по-добра предсказуемост на графиците.

Важно е да се подчертае, че икономическият ефект от единична маневра е относително малък, но при системно приложение и голям брой навигационни ситуации той се акумулира и води до съществен резултат на ниво „рейс“, „година“ и „флот“.

5.6. Значение за корабособственика и оператора

От гледна точка на корабособственика, предложената двуйерархична оптимизация представлява нискорисково и високоефективно средство за повишаване на икономичността на експлоатацията, тъй като не изисква промени в конструкцията на кораба, а използва съществуващите навигационни и машинни данни.

По този начин икономическата оценка допълва експерименталните резултати от трета глава и практическите приложения от четвърта глава, като демонстрира, че разработеният модел е не само научнообоснован и технически приложим, но и икономически оправдан.

В пета глава е направена оценка на потенциалния икономически ефект от прилагането на двуйерархично управление на кораб. Оценката е правена при отчитане на усреднени параметри на експлоатация на кораба: брой курсове, видове срещани сценарии, представени в трета глава. Числените резултати от решенията на двуйерархичната задача показват положителен потенциал, представляващ икономия на финансови ресурси при експлоатацията на кораба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРИНОСИ НА РАЗРАБОТЕНИЯ ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД

Направени са обобщение на основните резултати от проведеното дисертационно изследване, формулиране на научните и научно-приложните приноси, както и анализ на ограниченията и възможните направления за бъдещо развитие на разработения подход. Синтезирани са ключовите изводи от теоретичния анализ, експерименталната проверка, практическото приложение и икономическата оценка на двуйерархичния оптимизационен модел. Очертани са перспективите за разширяване и усъвършенстване на модела в контекста на интелигентните навигационни системи и автономното корабоплаване, като по този начин се затваря логическият цикъл на дисертационния труд и се подчертава неговият принос към теорията и практиката на навигационната оптимизация.

Обобщени изводи от проведеното изследване

Настоящата дисертация е посветена на разработването, експерименталната проверка и практическата оценка на двуйерархичен оптимизационен модел за подпомагане на навигационните решения при разминаване на кораб с една или повече опасни цели. Изследването обхваща целия път от теоретичната постановка на задачата, през експерименталната ѝ проверка в симулационна среда, до формулиране на практически приложими процедури и икономическа оценка на ефекта от прилагането на модела.

В резултат на проведените изследвания е установено, че задачата за разминаване не следва да се разглежда единствено като проблем на навигационната безопасност, а като многокритериална задача, в която безопасността, времето и енергийната ефективност са взаимносвързани и често конфликтни цели. Предложеният двуйерархичен подход позволява ясно

структуриране на тези цели, като на първо ниво се гарантира безопасността на плаването, а на второ ниво се търси оптималност по отношение на икономическите показатели.

Експерименталните резултати от трета глава показват наличие на ясно изразен оптимален интервал за начало на маневрата, при който интегралният разход на гориво достига минимум, без да се компрометира безопасното разминаване. Този резултат е потвърден както за маневрен кораб (контейнеровоз), така и за по-слабоманеврен кораб с голямо водоизместване (танкер), което доказва универсалността на предложения модел.

Практическото приложение, разгледано в четвърта глава, демонстрира възможността за интеграция на модела в системи за подпомагане на навигационните решения, в тренажорни комплекси и в процедурите на системата за управление на безопасността на кораба, без нарушаване на нормативната рамка и без отнемане на отговорността от корабоводителя.

Икономическата оценка в пета глава показва, че дори умерени спестявания на гориво и време при единични маневри водят до съществен кумулативен ефект при системно приложение на модела.

Изведените в началото на дисертацията задачи са изпълнени. В таблица 6.1 е показано къде е позиционирано изпълнението на всяка от тях.

Таблица 6.1. Изпълнение на задачите, поставени в началото на изследването, и тяхното позициониране

| № на задача | Съдържание | Глава от дисертацията |
|--------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 1. | Аналитичен преглед на методите | Първа |
| 2. | Теоретична рамка | Втора |
| 3. | Аналитичен модел | Втора |
| 4. | Ограничения (безопасност, COLREG) | Втора и трета |
| 5. | Аналитични апроксимации | Четвърта |
| 6. | Двуйерархична оптимизация | Втора и трета |
| 7. | Взаимодействие между нивата | Трета, четвърта и пета |
| 8. | Алгоритъм за приложение | Втора и четвърта |
| 9. | Валидация, експерименти, приложимост | Трета, четвърта и пета |

В резултат на проведените теоретични изследвания, числени изчисления и симулационни експерименти са изведени следните научни и научно-приложни приноси.

ОСНОВНИ НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Разработен е двуйерархичен оптимизационен модел за управление на корабни маневри. Моделът формализира едновременното решаване на две взаимно свързани оптимизационни задачи. Горната оптимизационна задача отчита опасно сближение между кораби/препятствия, като нейните решения определят гарантирана безопасност на корабоплаването. Горната оптимизационна задача формализира геометрични и кинематични ограничения. Долната оптимизационна задача определя оптимални експлоатационни характеристики чрез минимизиране на интегралния разход на гориво. Решенията на двете йерархични задачи взаимно си влияят.

(Глава II, раздели 2.8 – 2.10; глава III, раздел 3.1.)

2. Разработеният йерархичен модел е формализиран като двуйерархична оптимизационна задача. Тя едновременно отчита критерий за време на маневра за безопасна дистанция и критерий за енергийна ефективност. Доказано е, че решенията на двуйерархичната задача дават еднакви и съизмерими резултати за време на маневрата с решенията от тренажори. Но икономическите резултати са по-добри, в сравнение с еднокритериалната минимизация на времето на маневра, което води до ефективни икономически показатели.

(Глава II, формули (2.14) – (2.18); таблици 3.9, 3.15 и 3.17.)

3. Разширена е класическата постановка за разминаване с една цел, към случай с две едновременно опасни цели, като е предложен формализиран метод за избор на управляващо решение, определено от най-ограничаващото условие за безопасност.

(Глава III, раздел 3.2; таблици 3.10 – 3.14, и 3.16.)

4. Идентифицирана е Парето оптимална зона на компромис между времето на маневрата и разхода на гориво, която обосновава необходимостта от двуйерархичен оптимизационен подход при навигационни решения.

(Глава III, раздел 3.3; фигура 3.6: „Парето анализ на връзката между времето за маневра и разхода на гориво“; таблици 3.15 и 3.17.)

5. Извършено е сравнение на резултатите от решенията на йерархичната оптимизационна задача с решения, получавани от текущо използвани тренажори за управление на кораб. Експериментално са сравнени и валидирани решенията на разработената оптимизационна задача и тези на навигационен и машинен симулатор. Установено е високо съответствие между моделните и симулаторните резултати при достатъчно ранно маневриране и са идентифицирани ограниченията на модела при критично малки дистанции.

(Таблици 3.4 – 3.8; таблици 3.11 – 3.14, и 3.17.)

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Наред с теоретичните резултати, дисертацията съдържа и съществени научно-приложни приноси:

1. Разработена е практическа методика за избор на оптимален момент за начало на маневра, която подпомага навигатора при вземане на решения, отчитащи едновременно безопасността и енергийната ефективност.

(Таблицы 3.9, 3.15 и 3.17; глава III – анализ на ранна, оптимална и късна маневра.)

2. Показана е практическата приложимост на двуйерархичния модел в тренажорна среда, което позволява използването му в обучението на корабоводители и при анализ на навигационни ситуации с повишен риск.

(Глава III, експериментална постановка; таблицы 3.4 – 3.8 и 3.11 – 3.14.)

3. Формулирани са практически навигационни правила, произтичащи от оптимизационния анализ, които трансформират резултатите от математическия модел в интуитивни и приложими указания за корабоводене.

(Глава III, раздел 3.3; таблицы 3.15 и 3.17; фигура 3.6.)

4. Доказана е приложимостта на йерархичния оптимизационен подход за кораби с различни маневрени характеристики, включително кораби с голямо водоизместване и ограничена повратливост, каквито са танкерите.

(Сценарий 1. и сценарий 2.; таблица 3.16.)

5. Разработеният двуйерархичен оптимизационен модел създава предпоставки за внедряване в системи за подпомагане на навигационните

решения и автономно корабоплаване, като горното йерархично ниво може да се интерпретира като модул за безопасност, а долното – като модул за енергийна оптимизация.

(Глава IV, раздели 4.1 – 4.3; Парето анализ.)

Формулираните научно-приложни приноси показват, че разработеният двуйерархичен оптимизационен модел не остава в рамките на теоретичната разработка, а предлага реални механизми за подпомагане на навигационните и управленските решения в корабната практика. Чрез интеграцията му в навигационни системи, тренажорна подготовка и процедурите на системата за управление на безопасността на корабите се създава устойчива връзка между научния анализ и ежедневната експлоатация на кораба. Това позволява систематизиране и количествено обосноваване на решения, които традиционно се основават на опит и интуиция, и създава предпоставки за повишаване на безопасността, ефективността и икономичността на корабоплаването в дългосрочен план.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

ADNAN, M. and PERERA, L. P. C., 2024. Navigational support framework for maritime autonomous surface ships under onshore operation centers. In: SOARES, C. G. and SANTOS, T. A. (eds.). *Advances in Maritime Technology and Engineering*. Volume 2. Edition 1, pp. 373–383. CRC Press. ISBN 9781032831077. Available from: <https://doi.org/10.1201/9781003508779-41> [Viewed 2026-02-18].

AGARWAL, A., 2009. *Statistical field estimation and scale estimation for complex coastal regions and archipelagos*. SM Thesis. Massachusetts Institute of Technology. Available from: <http://hdl.handle.net/1721.1/49877> [Viewed 2026-02-09].

AGCS, [no date]. Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS). Web Site. *Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS)*. Available from: <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/reports/shipping-safety.html> [Viewed 2023-01-05].

ALAMOUSH, A. S. and ÖLÇER, A. I., 2025. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 13, no. 1, p. 122. ISSN 2077-1312. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse13010122> [Viewed 2026-02-18].

ÁLVAREZ, D.; GÓMEZ, J. V.; GARRIDO, S.; MORENO, L., 2015. 3d robot formations path planning with fast marching square. *Journal of Intelligent & Robotic Systems: with a special section on Unmanned Systems*, vol. 80, pp. 507–523. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0187-1> [Viewed 2026-02-10].

ANDERSON, A., 2015. *Multi-objective optimization of ship routes*. Master's thesis in Complex Adaptive Systems. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.

ANDREI, C. and BELEV, B., 2013. A proposed criterion for the assessment of the parametric rolling of ships in longitudinal waves. *Journal of Maritime Transport and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 4–14. ISSN 2255-758X.

ANDREI, C.; BELEV, B.; LAMBA, M., 2013. Considerations on broaching phenomenon and its influence on loss of ship stability in following seas. In: *Constanta Maritime University Annals*, vol. 20, pp. 13–17. Constanța, Romania. ISBN 978-973-692-354-8.

ANDREI, C.; LAMBA, M.; HANZU-PAZARA, R.; BELEV, B., 2014. Considerations regarding the impact of ship intact stability loss on marine pollution. *Journal of Marine Technology and Environment*, vol. 1, pp. 7–17. ISSN 1844-6116.

ANONYMOUS, [no date]. Battery-Powered, Autonomous Barges Coming to European Ports. Web Site. *Marine professional*. Available from: <https://www.imarest.org/themarineprofessional/item/3988-battery-powered-autonomous-barges-coming-to-european-ports> [Viewed 2023-01-25].

ASIA SHIPPING MEDIA PTE LTD, [no date]. Splash247.com. Web Site. *Splash247.com*. Available from: <https://splash247.com/yara-kongsberg-build-autonomous-zero-emissions-feeder-boxship/> [Viewed 2018-12-05].

AVGOULEAS, K., 2008. *Optimal Ship Routing*. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology. Available from: <http://hdl.handle.net/1721.1/44861> [Viewed 2026-02-07].

BELEV, B. C., 2018. Mathematical Algorithms Application for Improvement of Ships' Energy Efficiency. *Information Technologies and Control*, vol. 4, pp. 2–7. ISSN (print) 1312-2622; EISSN 2367-5357. Available from: <https://doi.org/10.1515/itc-2018-0015>.

BELEV, B. C., 2019. Maritime education development for environment protection behavior in the autonomous ships era. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, vol. 22, issue 1, pp. 21–27. Constanta: MBNA. ISSN 2392-8956; ISSN-L 1454-864X. Available from: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-19-11-003>.

BELEV, B. C., 2022. Purdue Model Implementation in the Shipping Control Systems. In: *10-th International Scientific Conference on Computer Science (COMSCI)*. 30 May – 2 June, Sofia, Bulgaria. ISBN (print) 978-1-6654-9778-7. EISBN 978-1-6654-9777-0. Available from: <https://doi.org/10.1109/COMSCI55378.2022.9912594>.

BELEV, B. and DIMITRANOV, D., 2019. An algorithm for calculation of own ship's course over ground and speed over ground using ARPA, by acquiring a fixed object. In: *Proceedings of ACM International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech'19)*. New York, NY, USA: ACM, pp. 221–225. Available from: <https://doi.org/10.1145/3345252.3345277>.

BELEV, B. and DIMITRANOV, D., 2020. Algorithm for Composing a Ship's Passage Plan. *Constanta Maritime University Annals*, year 20, vol. 29, pp. 8–13. Available from: <https://www.scribd.com/document/813213574/ALGORITHM-FOR-COMPOSING-A-SHIP>.

BELEV, B.; DIMITRANOV, D.; SPASOV, A.; IVANOV, A., 2019. Application of Information Technologies and Algorithms in Ship Passage Planning. *Cybernetics and Information Technologies*, BAS, vol. 19, issue 1, pp. 190–200. Available from: <https://doi.org/10.2478/cait-2019-0011> [Viewed 2021-09-15].

BELEV, B.; STOILOV, T.; STOILOVA, K., 2022. Bi-level optimization of ship transportation by collision avoidance and fuel consumption. In: *8-th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. ISBN (print) 978-1-6654-0710-6. EISBN 978-1-6654-0709-0. Available from: <https://doi.org/10.1109/EEAE53789.2022.9831290>.

BELEV, B. and SVETAK, J., 2003. Working out a preliminary passage program using linear programming. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Traffic Science. Portorož – Nova Gorica, Slovenia, 6–8 November 2003*, p. 600. Ljubljana: University of Ljubljana – Faculty of Maritime Studies and Transport.

BELLMAN, R., 1957. *Dynamic Programming*. Edition 1. New Jersey, USA: Princeton University Press.

BERTSEKAS, D. P., 1999. *Nonlinear Programming*. Edition 2. Athena: Athena Scientific. ISBN 1-886529-00-0.

BIJLSMA, S. J., 1975. *On Minimal-Time Ship Routing*. Phd thesis. Delft University of Technology.

BJORNSKAU, T. and ELVIK, P., 1992. Can road traffic law enforcement permanently reduce the number of accidents? *Accident Analysis & Prevention*, vol. 24, no. 5, pp. 507–520. Available from: [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(92\)90059-r](https://doi.org/10.1016/0001-4575(92)90059-r) [Viewed 2026-02-17].

BLINDHEIM, S.; JOHANSEN, T. A.; UTNE, I., 2023. Risk-based supervisory control for autonomous ship navigation. *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 624–648. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00773-023-00945-6> [Viewed 2026-02-18].

BLINDHEIM, S.; JOHANSEN, T. A.; UTNE, I., 2023. Risk-based supervisory control for autonomous ship navigation. *Safety Science*, vol. 167, p. 106242. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896320318681?via%3Dihub> [Viewed 2026-02-24].

BORENSTEIN, J. and KOREN, Y., 1991. The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE – Journal of Robotics and Automation*,

vol. 7, no. 3, pp. 278–288. Available from: https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp_papers/integrated1/borenstein_VFHisto.pdf [Viewed 2026-02-05].

BÖTTNER, C.; HOPMAN, J.; VAN TERWISGA, T., 2020. Multi-objective voyage optimization for energy efficiency and emissions reduction. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 8, no. 11, p. 873.

BÖTTNER, C.-U., 2007. Weather routing for ships in degraded condition. In: *International Symposium on Safety, Security and Environmental Protection*, Athens: National Technical University Athens.

BUXBAUM, P., 2018. First Ever Container Ship to Receive Cyber Enabled Ship Descriptive. Web Site. *Global Trade Magazine*. Available from: <https://www.lr.org/en/latest-news/first-ever-container-ship-to-receive-cyber-enabled-ship/> [Viewed 2020-01-01].

CALVERT, A.; DEAKINS, E.; MOTTE, R., 1991. A Dynamic System for Fuel Optimization Trans-Ocean. *Journal of Navigation*, vol. 44, no. 2, pp. 233–265. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300009978> [Viewed 2026-02-24].

CANCAN (editor), 2017. The World's First Intelligent Ship Made in China, the Arrival of the Intelligent Ship Era. Web Site. *Wenweipo.com limited*. Available from: <http://news.wenweipo.com/2017/12/05/IN1712050048.htm> [Viewed 2022-12-05].

CAREY, L., [no date]. All hands off deck? The legal barriers to autonomous ships. Web Site. *National University of Singapore*. Available from: <https://law.nus.edu.sg/cml/pdfs/wps/CML-WPS-1706.pdf> [Viewed 2018-02-25].

CFR, 2016. 33. Navigation and Navigable Waters. Web Site. *National archives: Code of Federal Regulations (CFR)*. Available from: http://www.ecfr.gov/cgi-bin/textidx?tpl=/ecfrbrowse/Title33/33tab_02.tpl [Viewed 2016-09-24].

CHAAL, M.; VALDEZ BANDA, O.; GLOMSRUD, J.; BASNET, S.; HIRDARIS, S.; KUJALA, P., 2020. A framework to model the STPA hierarchical control structure of an autonomous ship. *Safety Science*, vol. 132, no. 1, p. 104939. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104939> [Viewed 2026-02-18].

CHEN, P.; LI, M.; MOU, J., 2021. A velocity obstacle-based real-time regional ship collision risk analysis method. *Journal of Marine Science and Engineering*

(*JMSE*), vol. 9, no. 4, p. 428. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse9040428> [Viewed 2026-02-25].

CHEN, Y.-Y.; ELLIS-TIEW, M.; CHEN, W.; WANG, C., 2021. Fuzzy risk evaluation and collision avoidance control of unmanned surface vessels. *Applied Sciences*, vol. 11, no. 14, p. 6338. Available from: <https://doi.org/10.3390/app11146338> [Viewed 2026-02-15].

CHENG, H.-C. and TSOU, M.-C., 2013. An Ant Colony Algorithm for efficient ship routing. *Polish Maritime Research*, vol. 20, no. 3, pp. 28–38. Available from: <https://doi.org/10.2478/pomr-2013-0032> [Viewed 2026-02-09].

CHENG, X.; LIU, Z.; ZHANG, X., 2006. Trajectory Optimization for ship Collision Avoidance System Using Genetic Algorithm. In: *Proceedings of the OCEANS 2006 – Asia Pacific*, pp. 1–5. Singapore. Available from: <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2006.4393976> [Viewed 2026-02-14].

CHO, Y.; HAN, J.; KIM, J., 2020. Efficient COLREG-compliant collision avoidance in multi-ship encounter situations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1899–1911. Available from: <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3029279> [Viewed 2026-02-14].

COLDWELL, T., 1983. Marine Traffic Behavior in Restricted Waters. *Journal of Navigation*, vol. 36, no. 3, pp. 430–444. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300039783> [Viewed 2026-02-04].

COLLEY, B.; CURTIS, R.; STOCKEL, C., 1983. Manoeuvring Times, Domains and Arenas. *Journal of Navigation*, vol. 36, no. 2, pp. 324–328. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300025030> [Viewed 2026-02-04].

CORADDU, A.; GAGGERO, S.; VILLA, D.; FIGARI, M., 2011. A new approach in engine – propeller matching. In: *Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources. Proceedings of the 14th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM)*, vol. 2, pp. 631–637.

CORADDU, A.; FIGARI, M.; SAVIO, S., 2014. Numerical investigation on ship energy efficiency by Monte Carlo simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 228, no. 3, pp. 220–234. Available from: <https://doi.org/10.1177/1475090214524184> [Viewed 2026-02-06].

COUÉ, C.; PRADALIER, C.; LAUGIER, C.; FRAICHARD, T.; BESSIÈRE, P., 2006. Bayesian occupancy filtering for multitarget tracking: An automotive

application. *International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 1, pp. 19–30. Available from: <https://doi.org/10.1177/0278364906061158> [Viewed 2026-02-14].

CUI, T.; TURAN, O.; BOULOUGOURIS, E., 2016. Development of a ship weather routing system for energy efficient shipping. In: *IAME 2016 conference*, Hamburg. Available from: https://strathprints.strath.ac.uk/58696/1/Cui_Turan_Boulougouris_IAME_2016_ship_weather_routing_system_for_energy_efficient_shipping.pdf [Viewed 2026-02-06].

CURTIS, R.; GOODWIN, E.; KONYN, M., 1987. The Automatic Detection of Real-Life Ship Encounters. *Journal of Navigation*, vol. 40, no. 3, pp. 355–365. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300000618> [Viewed 2026-02-04].

DAGDILELIS, V.; BALDUZZI, M.; PAPADOPOULOS, G., 2022. Cybersecurity and resilience of integrated navigation systems in autonomous shipping. *Safety Science*, vol. 146, p. 105548.

DAVIS, P.; DOVE, M.; STOCKEL, C., 1980. A Computer Simulation of Marine Traffic Using Domains and Arenas. *Journal of Navigation*, vol. 33, pp. 215–222. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300035220> [Viewed 2026-02-03].

DE LA PEÑA ZARZUELO, I.; FREIRE-SEOANE, M.; BERMÚDEZ, B., 2020. Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *Journal of Industrial Information Integratio*, vol. 20. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100173> [Viewed 2026-02-19].

DECETELAERE, P., 2017. *The legal challenges of unmanned vessels*. Master Dissertation. University Gent.

DENG, F.; JIN, L.; HOU, X.; WANG, L.; LI, B.; YANG, H., 2021. COLREGs: compliant dynamic obstacle avoidance of USVs based on the dynamic navigation ship domain. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 9, no. 8, p. 837. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse9080837> [Viewed 2026-02-25].

DERAJ, R.; SANJEEV KUMAR, R.; ALAM, M.; SOMAYAJULA, A., 2023. Deep reinforcement learning based controller for ship navigation. *Ocean Engineering*, vol. 273, p. 113937. ISSN 0029-8018. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113937> [Viewed 2026-02-19].

DIJKSTRA, E. W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269–271. Available from: <https://ir.cwi.nl/pub/9256/9256D.pdf> [Viewed 2026-02-08].

DIMECC, 2016. One Sea Ecosystem. Web Site. *DIMECC newsletter*. Available from: <https://www.dimecc.com/dimecc-services/one-sea-ecosystem/> [Viewed 2022-09-30].

DMA, 2016. A pre-analysis on autonomous ships. Web Site. *Danish Maritime Authority (DMA)*. Available from: https://www.dma.dk/Documents/Publikationer/Autonome%20skibe_DTU_rapport_UK.pdf [Viewed 2019-04-09].

DMA, 2017. Analysis of regulatory barriers to the use of autonomous ships, Final report. Web Site. *Danish Maritime Authority (DMA)*. Available from: <https://www.dma.dk/Documents/Publikationer/Analysis%20of%20Regulatory%20Barriers%20to%20the%20Use%20of%20Autonomous%20Ships.pdf> [Viewed 2018-12-12].

DNV GL, 2018. *Autonomous and remotely operated ships*. Det Norske Veritas group. Available from: <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/cg/2018-09/dnvgl-cg-0264.pdf> [Viewed 2019-04-09].

EMSA, 2019. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2019. Web Site. *European Maritime Safety Agency (EMSA)*. Available from: <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/3734-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2019.html> [Viewed 2021-09-30].

EMSA, 2021. *Marine Casualties and Incidents: Preliminary Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2014 – 2019*. Available from: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2021/04/EMSA-Preliminary-Annual-Overview_2021_-04.pdf [Viewed 2021-09-30].

ENGELHARDTSEN, O., 2007. *3D UAV collision avoidance*. Master's thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU).

FIORINI, P. and SHILLER, Z., 1998. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 7, pp. 760–772. Available from: <https://doi.org/10.1177/027836499801700706> [Viewed 2026-02-13].

FISK, C., 1984. Game theory and transportation systems modelling. *Transportation Research*, vol. 18, no. 4–5, pp. 301–313. Available from: [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(84\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0191-2615(84)90013-4) [Viewed 2026-02-17].

FONSECA, C. M. and FLEMING, P. J., 1993. Genetic algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 416–423. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

FOSSEN, T. I., 2021. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Edition 2. Wiley-Blackwell, pp. 1–736. ISBN 978-1-119-57505-4.

FUJII, Y. and TANAKA, K., 1971. Traffic Capacity. *Journal of Navigation*, vol. 24, pp. 543–552. Available from: <https://scihub.st/10.1017/s0373463300022384> [Viewed 2026-02-03].

GARKAZ, M., 2011. The Selection and Optimization of Stock Portfolio using Genetic Algorithm based on Mean-semi Variance Model. In: *International Conference on Portfolio Selection Using Genetic A Economics and Finance Reaserch, IPEDR*, vol. 4, pp. 379–381. Singapore: LACSIT Press.

GARRIDO, S.; MORENO, L.; MARTÍN, F.; ÁLVAREZ, D., 2017. Fast marching subjected to a vector field–path planning method for mars rovers. *Expert Systems with Applications*, vol. 78, pp. 334–346. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.019> [Viewed 2026-02-10].

GARRIDO, S.; ALVAREZ, D.; MORENO, L., 2020. Marine Applications of the Fast Marching Method. *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, no. 2. Available from: <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00002> [Viewed 2026-02-10].

GEORGIEVA, P., 2018. Genetic Fuzzy System for Financial Management. *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 18, no. 2, pp. 20–35.

GIL, M., 2021. A concept of critical safety area applicable for an obstacle-avoidance process for manned and autonomous ships. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 214, p. 107806. ISSN 0951-8320. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107806> [Viewed 2026-02-25].

GOLDBERG, D. E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Tuscaloosa, USA: The University of Alabama. ISBN 0-201-15767-5.

GÓMEZ, J. V.; ALVAREZ, D.; GARRIDO, S.; MORENO, L., 2017. Fast Marching-based globally stable motion learning. *Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, vol. 21, pp. 2785–2798. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00500-015-1981-1> [Viewed 2026-02-10].

GÓMEZ, J. V.; ALVAREZ, D.; GARRIDO, S.; MORENO, L., 2019. Fast methods for Eikonal Equations: An Experimental Survey. *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 39005–39029. ISSN 2169-3536. Available from: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906782> [Viewed 2026-02-10].

GÓMEZ, J. V.; LUMBIER, A.; GARRIDO, S.; MORENO L. E., 2013. Planning robot formations with fast marching square including uncertainty conditions. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 2, pp. 137–152. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.10.009> [Viewed 2026-02-10].

GOODWIN, E. M., 1975. A Statistical Study of Ship Domain. *Journal of Navigation*, vol. 28, pp. 259–273. Available from: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/abs/statistical-study-of-ship-domains/3AB7F5981A738B8DC466D1F6E7FA300A> [Viewed 2026-02-03].

GOODWIN, E. M.; LAMB, W.; KEMP, J., 1983. Quantitative Measurement of Navigation Safety. *Journal of Navigation*, vol. 36, no. 3, pp. 418–429. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300039771> [Viewed 2026-02-03].

GRINYAK, V., 2016. Fuzzy collision avoidance system for ships. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 55, no. 2, pp. 249–259.

HAGIWARA, H., 1989. *Weather routing of (sail-assisted) motor vessels*. Delft, The Netherland: Delft University of Technology.

HILDRE, H. P. et al., 2020. Training requirements for operators of autonomous and remotely operated ships. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 14, no. 1, pp. 33–40.

HILGERT, H., 1983. Defining the Close-Quarters Situation at Sea. *Journal of Navigation*, vol. 36, no. 3, pp. 454–461. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300039801> [Viewed 2026-02-04].

HINNENTHAL, J., 2007. *Robust Pareto-Optimum Routing of Ships utilizing Deterministic and Ensemble Weather Forecasts*. PhD thesis. Berlin: Technischen Universität Berlin.

HOLLAND, J. H., 1992. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. ISBN 978-0262581110.

HOLLANDER, Y. and PRASHKER, J., 2006. The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis. *Transportation*, vol. 33, no. 5, pp.

481–496. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11116-006-0009-1> [Viewed 2026-02-17].

HOLLANDER, Y.; PRASHKER, J.; MAHALEL, D., 2006. Determining the desired amount of parking using game theory. *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 132, no. 1, pp. 53–61. Available from: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2006\)132:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(53)) [Viewed 2026-02-17].

HORN, J.; NAFPLOITIS, N.; GOLDBERG, D., 1994. A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization. In: *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 82–87. Orlando, FL, USA: IEEE. ISBN 0-7803-1899-4. Available from: <https://doi.org/10.1109/ICEC.1994.350037> [Viewed 2026-02-08].

HU, L.; NAEEM, W.; RAJABALLY, E.; WATSON, G.; MILLS, T.; BHUIYAN, Z.; RAEBURN, C.; SALTER, I.; PEKCAN, C., 2019. A multiobjective optimization approach for COLREGs-compliant path planning of autonomous surface vehicles verified on networked bridge simulators. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1167–1179. Available from: <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2902927> [Viewed 2026-02-15].

HUANG, Y.; CHEN, L.; VAN GELDER, P., 2019. Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collisions at sea. *Ocean Engineering*, vol. 173, pp. 142–156. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.053> [Viewed 2026-02-14].

HULT, C.; PRAETORIUS, G.; SANDBERG, C., 2019. On the Future of Maritime Transport – Discussing Terminology and Timeframes. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 13, no. 2, pp. 269–273. Available from: <https://doi.org/10.12716/1001.13.02.01> [Viewed 2019-04-09].

IMO, 1999. Resolution A.893(21): Guidelines for Voyage Planning. Adopted on 25 November 1999. Web Site. *International maritime organization (IMO)*. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.893\(21\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.893(21).pdf) [Viewed 2016-09-24].

IMO, 2016. IMO takes first steps to address autonomous ships. Web Site. *International maritime organization (IMO)*. Available from: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MS-C-99-MASS-scoping.aspx> [Viewed 2018-10-26].

IMO, 2017. International Convention of Standard of Training, Certification and Watchkeeping – 78. Web Site. *International maritime organization (IMO)*.

IMO, 2018a. Procedures for Port State Control, 2017. Web Site. *International maritime organization (IMO)*.

IMO, 2018b. Report of the Marine Environment Protection Committee on its Seventy-Third Session, MEPC 73/19. 22–26 October 2018. Web Site. *International Maritime Organization (IMO)*. Available from: <https://www.transportstyrelsen.se/contentassets/3c05df973bba4e62a52aad59ea6fb76d/73-19.pdf> [Viewed 2019-02-05].

INTERNATIONAL SHIPPING NETWORK (editor), 2016. World's First Unmanned Marine Ship Set to Start. Web Site. *Eworldship Network*. Available from: http://www.eworldship.com/html/2016/NewShipUnderConstruction_1102/121485.html [Viewed 2021-11-02].

JACKOWSKI, K., 2001. A formal description of navigational process. *Annual of Navigation*, vol. 3, pp. 41–74. ISSN 2300-6633. Available from: <https://bibliotekanauki.pl/articles/320952> [Viewed 2026-02-02].

JAMES, R., 1957. *Application of wave forecast to marine navigation*. Washington: US Navy Hydrographic Office. Washington: US Navy Hydrographic Office.

JINGSONG, Z.; ZHAOLIN, W.; FENGCHEN, W., 1993. Comments on Ship Domains. *Journal of Navigation*, vol. 46, no. 3, pp. 422–436. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300011875> [Viewed 2026-02-04].

JOHANSEN, T. A. and UTNE, I. B., 2023. Risk-based supervisory control for autonomous ship navigation. *Ocean Engineering*, vol. 274, pp. 113770. Available from: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://assor.folk.ntnu.no/PhD%20Thesis/Thomas%20Johansen%20PhD_thesis_final.pdf [Viewed 2026-02-24].

JOHANSEN, T. A.; CRISTOFARO, A.; PEREZ, T., 2016. Ship Collision Avoidance Using Scenario-Based Model Predictive Control. *IFAC – Papers Online*, vol. 49, no. 1, pp. 14–21.

JOHNS, M., 2018. *Seafarers and digital disruption*. Hamburg School of Business Administration.

JOKIOINEN, E., 2016. *Remote and Autonomous Ships: The Next Steps. Technical Report*. London, UK: Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA).

KESSLER, G. C., 2019. GPS spoofing and GPS jamming: An overview. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, vol. 2, no. 1, pp. 24–43.

KHATIB, O., 1986. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In: *Autonomous Robot Vehicles*, pp. 396–404. New York, NY, USA: Springer.

KLOMPSTRA, M.; OLSDER, G.; VAN BRUNSCHOT, P., 1992. The Isopone Method in Optimal Control. *Dynamics and Control*, vol. 2, pp. 281–301. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF02169518> [Viewed 2026-02-08].

KOPACZ, Z.; MORGAS, W.; URBANSKI J., 2003. The Ship's Navigation Function, Ship's Navigation Processes, and Ship's Navigational Information. *Journal of Navigation*, vol. 56, no. 1, pp. 101–109. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463302002060> [Viewed 2026-02-02].

KUFOALOR, M.; BREKKE, E.; JOHANSEN, T., 2018. Proactive collision avoidance for ASVs using a dynamic reciprocal velocity obstacles method. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2402–2409. Madrid, Spain. Available from: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594382> [Viewed 2026-02-13].

KUWATA, Y.; WOLF, M.; ZARZHITSKY, D.; HUNTSBERGER, T., 2013. Safe Maritime Autonomous Navigation with COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 110–119. Available from: <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094677> [Viewed 2026-02-13].

LA VALLE, S., 2006. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press.

LARGE, F.; LAUGIER, C.; SHILLER, Z., 2005. Navigation among moving obstacles using the NLVO: Principles and applications to intelligent vehicles. *Autonomous Robots*, vol. 19, no. 2, pp. 159–171. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10514-005-0610-8> [Viewed 2026-02-13].

LAZAROWSKA, A., 2017. A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, vol. 71, no. 1, pp. 469–478.

LAZAROWSKA, A., 2021. Evaluation of a deterministic real-time path planning algorithm for autonomous ships using radar data. In: *25th International*

Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. Procedia Computer Science, vol. 192, pp. 863–872. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.089> [Viewed 2026-02-17].

LE WANG, L.; WU, Q.; LIU, J.; LI, S.; NEGENBORN, R., 2019. State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 7, no. 12, p. 438. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse7120438> [Viewed 2026-02-12].

LEE, B.; JEON, J.; OH, J., 2017. Velocity obstacle based local collision avoidance for a holonomic elliptic robot. *Autonomous Mobile Robot*, vol. 41, no. 6, pp. 1347–1363. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10514-016-9580-2> [Viewed 2026-02-13].

LERMUSIAUX, P. F. J.; XU, J.; CHEN, C.; JAN, S.; CHIU, L.; YANG, Y., 2010. Coupled oceanacoustic prediction of transmission loss in a continental shelfbreak region: predictive skill, uncertainty quantification and dynamical sensitivities. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 895–916. Available from: <https://doi.org/10.1109/JOE.2010.2068611> [Viewed 2026-02-10].

LERMUSIAUX, P. F. J.; HALEY, J.; LESLIE, W.; AGARWAL, A.; LOGOUTOV, O.; BURTON, L., 2011. Multiscale physical and biological dynamics in the Philippines Archipelago: Predictions and processes. *Oceanography*, vol. 24, no. 1, pp. 70–89. Available from: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.05> [Viewed 2026-02-10].

LI, G. Y.; LI, W.; HALSE, K.; HILDRE, H.; ZHANG, H., 2015. Hierarchical control of marine vehicles for autonomous manoeuvring in offshore operations. *Ship Technology Research*, vol. 62, no. 2, pp. 72–80. Available from: <https://doi.org/10.1179/0937725515Z.00000000013> [Viewed 2026-02-18].

LI, L.; WU, D.; HUANG, Y.; YUAN, Z., 2021. A path planning strategy unified with a COLREGS collision avoidance function based on deep reinforcement learning and artificial potential field. *Applied Ocean Research*, vol. 113, no. 27, p. 102759. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102759> [Viewed 2026-02-17].

LI, W. and MA, W., 2016. Simulation on Vessel Intelligent Collision Avoidance Based on Artificial Fish Swarm Algorithm. *Polish Maritime Research*, vol. 23, no. s1, pp. 138–143. Available from: <https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0058> [Viewed 2026-02-11].

LI, X. and YUEN, K. F., 2024. A human-centred review on maritime autonomous surfaces ships: impacts, responses, and future directions. *Transport*

Reviews, vol. 44, no. 4, pp. 791–810. Available from: <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2325453> [Viewed 2026-02-18].

LI, Y. and ZHANG, H., 2022. Collision Avoidance Decision Method for Unmanned Surface Vehicle Based on an Improved Velocity Obstacle Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 8, p. 1047. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse10081047> [Viewed 2026-02-14].

LIANG, C.; ZHANG, X.; WATANABE, Y.; DENG, Y., 2021. Autonomous collision avoidance of unmanned surface vehicles based on improved a star and minimum course alteration algorithms. *Applied Ocean Research*, vol. 113, p. 102755. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102755> [Viewed 2026-02-14].

LIN, Y.-H.; Fang, M.; Yeung, R., 2013. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements. *Applied Ocean Research*, vol. 43, pp. 184–194.

LISOWSKI, J., 2002. Game control of moving objects. In: *15th Triennial World Congress*, vol. 35, no. 1, pp. 373–378. Barcelona, Spain. Available from: <https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.01287> [Viewed 2026-02-17].

LISOWSKI, J., 2006. Game theory methods in control synthesis of marine moving objects – mathematical models and computer support algorithms. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, pp. 21–38. Międzyzdroje, Poland.

LISOWSKI, J., 2016. Analysis of Methods of Determining the Safe Ship Trajectory. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 10, no. 2, pp. 223–228. Available from: <https://doi.org/10.12716/1001.10.02.05> [Viewed 2026-02-17].

LISOWSKI, J., 2018. Cooperative and Non-Cooperative Game Control Strategies of the Ship in Collision Situation. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 12, no. 1, pp. 83–91. Available from: <https://doi.org/10.12716/1001.12.01.09> [Viewed 2026-02-17].

LISOWSKI, J., 2020. Game Control Methods Comparison when Avoiding Collisions with Multiple Objects Using Radar Remote Sensing. *Remote Sensing*, vol. 12, no. 10, p. 1573. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs12101573> [Viewed 2026-02-17].

LIU, X.; YE, X.; WANG, Q.; LI, W.; GAO, H., 2021. Review on the research of local path planning algorithms for unmanned surface vehicles. *Chinese Journal*

of *Ship Research*, vol. 16, no. 1, pp. 1–10. Available from: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02538> [Viewed 2026-02-13].

LIU, Y. and BUCKNALL, R., 2015. Path planning algorithm for unmanned surface vehicle formations in a practical maritime environment. *Ocean Engineering*, vol. 97, pp. 126–144. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.01.008> [Viewed 2026-02-11].

LIU, Y.; BUCKNALL, R.; ZHANG, X., 2017. The fast marching method based intelligent navigation of an unmanned surface vehicle. *Ocean Engineering*, vol. 142, pp. 363–376. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.021> [Viewed 2026-02-11].

LLOYDS REGISTER, [no date]. Tackling an evolving threat. Web Site. Available from: <https://www.lr.org/en/cyber-security/> [Viewed 2018-05-12].

LYRIDIS, D. V., 2021. An improved ant colony optimization algorithm for unmanned surface vehicle local path planning with multimodality constraints. *Ocean Engineering*, vol. 241, no. 1, p. 109890. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109890> [Viewed 2026-02-13].

MAIB, 2018. Marine Accident Investigation Branch (MAIB). Web Site. Available from: <https://www.gov.uk/government/organisations/marine-accident-investigation-branch> [Viewed 2018-10-26].

MAKI, A.; AKIMOTO, Y.; NAGATA, Y.; KOBAYASHI, S.; KOBAYASHI, E.; SHIOTANI, S.; OHSAWA, T.; UMEDA, N., 2011. A new weatherrouting system that accounts for ship stability based on a real-coded genetic algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 311–322.

MAN, Y.; LÜTZHÖFT, M.; COSTA, N.; QVIST, J., 2020. Competence requirements for remote operators of autonomous ships. *Safety Science*, vol. 128, p. 104756.

MARIE, S. and COURTIELLE, E., 2009. Multi-Objective Optimization of Motor Vessel Route. *TransNav – International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 3, no. 2, pp. 133–141.

MARTELLI, M.; VIRDIS, A.; GOTTA, A.; CASSARÀ, P.; DI SUMMA, M., 2021. An Outlook on the Future Marine Traffic Management System for Autonomous Ships. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 157316–157328. ISSN 2169-3536. Available from: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130741> [Viewed 2026-02-18].

MASC, [no date]. Maritime Safety Committee (MASC). 98th Session. Web Site. *International maritime organization (IMO)*. Available from: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MSC/Pages/MSC-98th-session.aspx> [Viewed 2023-03-12].

MCAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E.; DAVENPORT, T.; PATIL, D.; BARTON, D., 2012. “Big data”, The management revolution. *Harvard Bus Rev*, vol. 90 (10), pp. 61–67.

MENG, Q.; TAN, S.; LI, Z; CHEN, B.; SHI, W., 2020. A Review of Game Theory Application Research in Safety Management. In: *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107301–107313. Available from: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999963> [Viewed 2026-02-17].

MERSIN, K.; ALKAN, G.; MISIRLIOĞLU, T., 2017. A new method for calculating fuel consumption and displacement of a ship in maritime transport. *Cogent Engineering*, vol. 4, no. 1. Available from: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1415107> [Viewed 2026-02-26].

MIELE, A. and WANG, T., 2005. Maximin approach to the ship collision avoidance problem via multiple-subarc sequential gradient-restoration algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 124, no. 1, pp. 29–53. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10957-004-6464-y> [Viewed 2026-02-14].

MOHAMED-SEGHIR, M.; KULA, K.; KOUZOU, A., 2016. Artificial intelligence and soft computation methods in automatic collision avoidance algorithms for ships. *Navigation of China*, vol. 39, pp. 35–40.

MOU, J.; LI, M.; HU, W.; ZHANG, X.; GONG, S.; CHEN, P.; HE, Y., 2020. Mechanism of dynamic automatic collision avoidance and the optimal route in multi-ship encounter situations. *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 141–158. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.008> [Viewed 2026-02-13].

MOUSAZADEH, H.; JAFARBIGLU, H.; ABDOLMALEKI, H.; ELHAM, O., 2018. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an Unmanned Surface Vehicle (USV) by algorithms fusion. *Ocean Engineering*, vol. 159, pp. 56–65. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.018> [Viewed 2026-02-12].

MSC, 2018. Maritime Safety Committee (MSC), 100th session, 3–7 December 2018. Web Site. *International Maritime Organization (IMO)*. Available from: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MSC/Pages/MSC-100th-session.aspx> [Viewed 2019-01-07].

MUNK, T., 1989. *Damage prevention and control – obvious areas for marine expert systems*. Lyngby: CAMS'89: Expert Systems and Signal Processing in Marine Automation.

NELDER, A. and MEAD, R., 1965. A simplex method for function minimization. *The computer journal*, vol. 7, no. 4, pp. 308–313.

NEWS SINA, 2018. The World's Largest, Asia's First Unmanned Marine Test Site Officially Opened in Zhu Hai. Web Site. Available from: <https://news.sina.com.cn/o/2018-12-06/doc-ihprknvt2843014.shtml> [Viewed 2022-12-06].

NFAS, [no date]. Test Area Greenland. Web Site. Available from: <http://nfas.autonomous-ship.org/projects-en.html> [Viewed 2022-12-22].

NFAS, 2018. Norwegian Forum for Autonomous Ships (NFAS). Web Site. Available from: <http://nfas.autonomous-ship.org/index-en.html> [Viewed 2018-12-15].

NING, J.; CHEN, H.; LI, T.; LI, W.; LI, C., 2020. COLREGs-Compliant unmanned surface vehicles collision avoidance based on multiobjective genetic algorithm. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 190367–190377. Available from: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030262> [Viewed 2026-02-13].

NMA, 2016. World's First Test Area for Autonomous Ships Opened. Web Site. *Norwegian Maritime Authority (NMA)*. Available from: <https://www.sdir.no/en/news/news-from-the-nma/worlds-first-test-area-for-autonomous-ships-opened/> [Viewed 2022-10-03].

OFFSHORE ENERGY, 2017. Norway Opens New Test Area for Autonomous Ships. Web Site. Available from: <https://worldmaritimenews.com/archives/237297/norway-opens-new-test-area-for-autonomous-ships/> [Viewed 2022-12-07].

OU, W. and GUO, X., 2019. Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on Improved Artificial Potential Field and Ant Colony Optimization. In: *Proceedings of the 2019 International Conference on Computer, Network, Communication and Information Systems (CNCI 2019), Qingdao, China*, pp. 334–347. Dordrecht, The Netherlands: Atlantis Press. ISBN 978-94-6252-713-3. Available from: <https://doi.org/10.2991/cnci-19.2019.49> [Viewed 2026-02-12].

PETRES, C.; PAILHAS, Y.; EVANS, J.; PETILLOT, Y.; LANE, D., 2005. Underwater path planning using fast marching algorithms. In: *Europe Oceans 2005*,

vol. 2, pp. 814–819. Brest, France. ISBN 0-7803-9103-9. Available from: <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2005.1513161> [Viewed 2026-02-10].

PETRES, C.; PAILHAS, Y.; PATRON, P.; PETILLOT, Y.; EVANS, J.; LANE, D., 2007. Path planning for autonomous underwater vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 2, pp. 331–341. Available from: <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.895057> [Viewed 2026-02-10].

PHANTHONG, T.; MAKI, T.; URA, T.; SAKAMAKI, T.; AIYARAK, P., 2014. Application of A* algorithm for real-time path re-planning of an unmanned surface vehicle avoiding underwater obstacles. *Journal of Marine Science and Application*, vol. 13, no. 1, pp. 105–116. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11804-014-1224-3> [Viewed 2026-02-14].

PIETRZYKOWSKI, Z.; WIELGOSZ, M.; SIEMIANOWICZ, M., 2012. Ship domain in the restricted area – simulation research. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 32, no. 104, z. 2, pp. 152–156. ISSN 1733-8670.

PORATHE, T.; BURMEISTER, H.; RØDSETH, Ø., 2013. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks: The Munin Project. In: *12th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, pp. 177–183. Hamburg, Germany: Hamburg Technology University.

PORATHE, T., 2019. Remote supervision of unmanned vessels: Human factors challenges. *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 13, no. 3, pp. 521–528.

POTOČNIK, P., 2025. Model Predictive Control for Autonomous Ship Navigation with COLREG Compliance and Chart-Based Path Planning. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 13, no. 7. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse13071246> [Viewed 2026-02-18].

RAMOS, M. A.; UTNE, I.; MOSLEH, A., 2019. Supervisory risk control for autonomous ships. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 185, pp. 341–352.

RAZMJOOEI, D.; GHOLAMIAN, M.; DARYAEI, A., 2023. Industry 4.0 research in the maritime industry: A bibliometric review. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 30, pp. 100365.

RICHTER, W., 2018. Fully Autonomous Cargo Ships Face Enormous Challenges. Web Site. *Wolf Street Corp.* Available from: <https://wolfstreet.com/2018/09/01/challenges-fully-autonomous-cargo-ships/> [Viewed 2018-10-26].

ROLLS-ROYCE, 2018. *Rolls-Royce & Finferries test world's first fully autonomous ferry*. Web Site. Available from: <https://internetofbusiness.com/rolls-royce-finferries-test-worlds-first-fully-autonomous-ferry/> [Viewed 2018-12-05].

SANG, H.; YOU, Y.; SUN, X.; ZHOU, Y.; LIU, F., 2021. The hybrid path planning algorithm based on improved A* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations. *Ocean Engineering*, vol. 223, no. 3–4, p. 108709. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108709> [Viewed 2026-02-12].

SAWADA, R.; SATO, K.; MAJIMA, T., 2021. Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces. *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 509–524. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00755-0> [Viewed 2026-02-16].

SCHAFFER, J., 1984. *Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms*. Ph. D. Thesis. Nashville, TN: Vanderbilt University.

SEN, D. and PADHY, C., 2015. An Approach for Development of a Ship Routing Algorithm for Application in the North Indian Ocean Region. *Applied Ocean Research*, vol. 50, pp. 173–191.

SETHIAN, J. A., 1999a. Fast Marching Methods. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM Review)*, vol. 41, no. 2, pp. 199–235. Available from: <https://doi.org/10.1137/S0036144598347059> [Viewed 2026-02-09].

SETHIAN, J. A., 1999b. *Level Set Methods and Fast Marching Method*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. ISBN 978-0521645577.

SETHIAN, J. A., 1996. A Fast Marching Level Set Method for monotonically advancing fronts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 93, no. 4, pp. 1591–1595. Available from: <https://doi.org/10.1073/pnas.93.4.1591> [Viewed 2026-02-09].

SHAO, W.; ZHOU, P.; THONG, S., 2011. Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing. *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 17, pp. 239–251. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00773-011-0152-z> [Viewed 2026-02-07].

SHAPIRO, A.; DENTCHEVA, D.; RUSZCZYŃSKI, A., 2021. *Lectures on Stochastic Programming: Modeling and Theory*. Edition 2. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).

SHEN, H.; HASHIMOTO, H.; MATSUDA, A.; TANIGUCHI, Y.; TERADA, D.; GUO, C., 2019. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning. *Applied Ocean Research*, vol. 86, pp. 268–288. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.02.020> [Viewed 2026-02-16].

SHENOI, A.; BOWKER, J.; DZIELENDZIAK, A.; LIDTKE, A.; ZHU, G.; CHENG, F.; ARGYOS, D.; FANG, I.; GONZALEZ, J.; JOHNSON, S., 2015. *Global Marine Technology Trends 2030*. Southampton, UK: University of Southampton. Available from: <https://eprints.soton.ac.uk/388628/1/GMTT2030.pdf> [Viewed 2026-02-12].

SONG, A. L.; SU, B.; DONG, C.; SHEN, D.; XIANG, E.; MAO, F., 2018. A two-level dynamic obstacle avoidance algorithm for unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, vol. 170, pp. 351–360. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.008> [Viewed 2026-02-12].

SONG, L.; CHEN, Z.; DONG, Z.; XIANG, Z.; MAO, Y.; SU, Y.; HU, K., 2019. Collision avoidance planning for unmanned surface vehicle based on eccentric expansion. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, pp. 1–9. Available from: <https://doi.org/10.1177/1729881419851945> [Viewed 2026-02-25].

SONG, R.; LIU, Y.; BUCKNALL, R., 2017. A multi-layered fast marching method for unmanned surface vehicle path planning in a time-variant maritime environment. *Ocean Engineering*, vol. 129, pp. 301–317. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.009> [Viewed 2026-02-10].

SRINIVAS, N. and DEB, K., 1994. Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms. *Evolutionary Computation Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 221–248. Available from: <https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221> [Viewed 2026-02-08].

SRIWIJAYA, R., 2016. *Autonomous Ships and Entry Barriers in the Merchant Shipping Market*. MAR 8096 – Dissertation. Newcastle University.

STOILOV, T. and STOILOVA, K., 1999. *Noniterative coordination in multilevel systems*. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publisher. ISBN 0-7923-5879-1.

STOYANOV, R. and BELEV, B., 2019. Using theory of Games When Choosing the Optimal Strategy for Improving the Energy Efficiency Ships. In: *8-th International Maritime Science Conference*. Budva, Montenegro, 11 – 12 April 2019, pp. 33–37. ISBN 978-86-80031-64-4. ISSN 1847-1498.

SULLIVAN, B. P.; DESAI, S.; SOLE, J.; ROSSI, M.; RAMUNDO, L.; TERZI, S., 2020. Maritime 4.0 – Opportunities in Digitalization and Advanced Manufacturing for Vessel Development. *Procedia Manufacturing*, vol. 42, pp. 246–253. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.078> [Viewed 2026-02-19].

SULLIVAN, B. P., 2021. Defining Maritime 4.0: Reconciling principles, elements and visions. *IET Computing and Informatics in Marine Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 45–60. Available from: <https://doi.org/10.1049/cim2.12012> [Viewed 2026-02-19].

SUMON, M. M. A.; KIM, H.; ROKSETH, B., 2025. Hazard analysis of autonomous vessel operation during the interaction and execution between remote operation centre controller and onboard controllers. *Journal of Shipping and Trade*, vol. 10, no. 25. Available from: <https://doi.org/10.1186/s41072-025-00214-2> [Viewed 2026-02-18].

SZLAPCZYNSKA, J. and SMIERZCHALSKI, R., 2007. Adopted Isochrone Method Improving Ship Safety in Weather Routing with Evolutionary Approach. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 635–645. Available from: <https://doi.org/10.1142/S0218539307002842> [Viewed 2026-02-09].

SZLAPCZYNSKA, J. and SMIERZCHALSKI, R., 2009. Multicriteria Optimization in Weather Routing. *TransNav – International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 3, no. 4, pp. 393–400. Available from: <https://doi.org/10.1201/9780203869345.ch74> [Viewed 2026-02-09].

SZLAPCZYNSKA, J., 2013. Multicriteria Evolutionary Weather Routing Algorithm in Practice. *TransNav – International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 7, no. 1, pp. 61–65. Available from: <https://doi.org/10.12716/1001.07.01.07> [Viewed 2026-02-09].

SZLAPCZYNSKA, J., 2015. Multi-objective Weather Routing with Customised Criteria and Constraints. *Journal of Navigation*, vol. 68, no. 2, pp. 338–354. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463314000691> [Viewed 2026-02-09].

SZŁAPCZYŃSKI, R. and GHAEMI, H., 2019. Framework of an Evolutionary Multi-Objective Optimisation Method for Planning a Safe Trajectory for a Marine Autonomous Surface Ship. *Polish Maritime Research*, vol. 26, no. 4, pp. 69–79. Available from: <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0068> [Viewed 2026-02-11].

SZŁAPCZYŃSKI, R. and SZŁAPCZYŃSKA, J., 2012a. Customized crossover in evolutionary sets of safe ship trajectories. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 22, no. 4, pp. 999–1009. ISSN 1641-876X. Available from: <https://doi.org/10.2478/v10006-012-0074-x> [Viewed 2026-02-17].

SZŁAPCZYŃSKI, R. and SZŁAPCZYŃSKA, J., 2012b. On evolutionary computing in multi-ship trajectory planning. *International Journal of Speech Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 155–174. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10489-011-0319-7> [Viewed 2026-02-17].

TAKASHIMA, K.; MEZAOUI, B.; SHOJI, R., 2009. On the Fuel Saving Operation for Coastal Merchant Ships using Weather Routing. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 3, no. 4, pp. 401–406.

TAM, C. and BUCKNALL, R., 2010. Collision risk assessment for ships. *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 257–270.

TAM, C.; BUCKNALL, R.; GREIG, A., 2009. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters. *Journal of Navigation*, vol. 62, no. 3, pp. 455–476.

TAO, L., 2025. Hierarchical behavior planning framework for networked autonomous vessels. *Applied Ocean Research*, vol. 142, p. 103679.

TAO, W.; WANG, L.; TAN, J.; ZHU, M.; WEN, Y., 2025. Hierarchical Behavior Planning Framework for Networked MSV Systems in Inland Waterway Traffic Separation Schemes. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 13, no. 3, p. 547. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse13030547> [Viewed 2026-02-18].

TOMMI, A. and LAURI, H., 2017. *Challenges of Unmanned Vessels*. Ph.D. Thesis. Vaasa, Finland: Novia University of Applied Sciences.

TSOU, M. C., 2010. Integration of a geographic information system and evolutionary computation for automatic routing in coastal navigation. *Journal of Navigation*, vol. 63, pp. 323–341. ISSN 0373-4633 [Viewed 2026-02-11].

UNCTAD, 2017. *Review of Maritime Transport 2017*. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). United Nation Publication. ISBN 978-92-1-112922-9.

VAIDHEESWARAN, V.; JAYAKODY, D.; MULAY, S.; LO, A.; ALAM, M.; SPADON, G., 2025. Goal-Conditioned Reinforcement Learning for Data-Driven

Maritime Navigation. *Machine Learning: arXiv:2509.01838*, Available from: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.01838> [Viewed 2026-02-19].

VALERO-GOMEZ, A.; GÓMEZ, J.; GARRIDO S.; MORENO, L., 2013. Fast Marching Methods in Path Planning. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 20, no. 4, pp. 111–120. Available from: https://www.researchgate.net/publication/236143229_Fast_Marching_Methods_in_Path_Planning [Viewed 2026-02-10].

VAN DEN BERG, J.; GUY, S.; LIN, M.; MANOCHA, D., 2010. Optimal reciprocal collision avoidance for multi-agent navigation. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, AK, USA.

VAN DEN BERG, J.; GUY, S.; LIN, M.; MANOCHA, D., 2011. Reciprocal n-body collision avoidance. In: *Robotics Research*, vol. 70, pp. 3–19. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19457-3_1 [Viewed 2026-02-14].

WALTHER, L.; RIZVANOLLI, A.; WENDEBOURG, M.; JAHN, C., 2016. Modeling and Optimization Algorithms in Ship Weather Routing. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, vol. 4, pp. 031–045.

WANG, H.; MAO, W.; ERIKSSON, L., 2017. Benchmark study of five optimization algorithms for weather routing. In: *Proceedings of the ASME 2017 – 36th International Conference on Ocean*. Trondheim, Norway: Offshore and Arctic Engineering OMAE2017.

WANG, H.; FU, Z.; ZHOU, J.; FU, M.; RUAN, L., 2021. Cooperative collision avoidance for unmanned surface vehicles based on improved genetic algorithm. *Ocean Engineering*, vol. 222, no. 4, p. 108612. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108612> [Viewed 2026-02-13].

WANG, L.; ZHANG, Z.; ZHU, Q.; MA, S., 2020. Ship route planning based on double-cycling genetic algorithm considering ship maneuverability constraint. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 190746–190759. Available from: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031739> [Viewed 2026-02-13].

WANG, W.; HUANG, L.; LIU, K.; WU, X.; WANG, J., 2022. A COLREGs-Compliant Collision Avoidance Decision Approach Based on Deep Reinforcement Learning. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 10, no. 7, pp. 944. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse10070944> [Viewed 2026-02-16].

WEI, G. and KUO, W., 2022. COLREGs-Compliant Multi-Ship Collision Avoidance Based on Multi-Agent Reinforcement Learning Technique. *Journal of*

Marine Science and Engineering (JMSE), vol. 10, pp. 1431. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse10101431> [Viewed 2026-02-14].

WIELGOSZ, M. and PIETRZYKOWSKI, Z., 2022. The ship domain in navigational safety assessment. *PLoS ONE*, vol. 17, no. 4, p. e0265681. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265681> [Viewed 2026-02-04].

WILSON, P. A.; HARRIS, C.; HONG, X., 2003. A line of sight counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance. *Journal of Navigation*, vol. 56, no. 1, pp. 111–121. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463302002163> [Viewed 2026-02-15].

WMN, 2017. Norway Sets Up Second Test Area for Unmanned Ships. Web Site. *World Maritime News (WMN)*. Available from: <https://worldmaritimenews.com/archives/231317/norway-sets-up-second-test-area-for-unmanned-ships/> [Viewed 2022-10-02].

XIA, G.; HAN, Z.; ZHAO, B.; WANG, X., 2020. Local path planning for unmanned surface vehicle collision avoidance based on modified quantum particle swarm optimization. *Complexity*, pp. 15. Available from: <https://doi.org/10.1155/2020/3095426> [Viewed 2026-02-13].

XIAO, G.; XIAO, G.; REN, B.; TONG, C.; HONG, X., 2021. A quantitative evaluation method for obstacle avoidance performance of unmanned ship. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 9, no. 10. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse9101127> [Viewed 2026-02-25].

XU, X.; LU, Y.; LIU, X.; ZHANG, W., 2020. Intelligent collision avoidance algorithms for USVs via deep reinforcement learning under COLREGs. *Ocean Engineering*, vol. 217, no. 3, p. 107704. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107704> [Viewed 2026-02-17].

YANG, H. and WOO, K., 2000. Competition and equilibria of private toll roads in a traffic network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1733, no. 1, pp. 15–22. Available from: <https://doi.org/10.3141/1733-03> [Viewed 2026-02-17].

ZHANG, H.; LIN, W.; CHEN, A., 2018. Path Planning for the Mobile Robot: A Review. *Symmetry*, vol. 10, no. 10, p. 450. Available from: <https://doi.org/10.3390/sym10100450> [Viewed 2026-02-17].

ZHANG, L.; MOU, J.; CHEN, P.; LI, M., 2021. Path planning for autonomous ships: A hybrid approach based on improved APF and modified VO methods.

Journal of Marine Science and Engineering (JMSE), vol. 9, no. 7, p. 761. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse9070761> [Viewed 2026-02-13].

ZHANG, R. and FURUSHO, M., 2016. Constructing a decision-support system for safe ship-navigation using a Bayesian network. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, pp. 616–628. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-40247-5_62 [Viewed 2021-09-15].

ZHANG, W.; YAN, C.; LYU, H.; WANG, P; XUE, Z.; LI, Z.; XIAO, B., 2021. COLREGS-based path planning for ships at sea using velocity obstacles. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32613–32626. ISSN 2169-3536. Available from: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060150> [Viewed 2026-02-25].

ZHAO, L. and ROH, M.-I., 2019. COLREGs-compliant multiship collision avoidance based on deep reinforcement learning. *Ocean Engineering*, vol. 191, no. 1, p. 106436. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106436> [Viewed 2026-02-17].

ZHAO, Y.; LI, W.; SHI, P., 2016. A Real-time Collision Avoidance Learning System for Unmanned Surface Vessels. *Neurocomputing*, vol. 182, pp. 255–266. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.028> [Viewed 2026-02-13].

ZHU, X.; XU, H.; LIN, J., 2001. Domain and Its Model Based on Neural Networks. *Journal of Navigation*, vol. 54, no. 1, pp. 97–103. Available from: <https://doi.org/10.1017/S0373463300001247> [Viewed 2026-02-04].

ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L., 2002. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. In: *Evolutionary Methods for Design, Optimization, and Control with Applications to Industrial Problems*, pp. 95–100. Available from: <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-004284029> [Viewed 2026-02-11].

ZOPPOLI, R., 1972. Minimum-time routing as an n-stage decision process. *Journal of applied Meteorology*, vol. 11, pp. 429–435.

БАСКИН, А. and МОСКВИН, Г., 1986. *Береговые системы управления движением судов*. Москва: „Транспорт“.

БЕЛЕВ, Б., 1997. Зона за навигационна безопасност на кораба при плаване в особени обстоятелства. В: *Юбилейна научна сесия: 35 години ТУ – Варна*, vol. 3, с. 254–260.

БЕЛЕВ, Б., 2017. *Управление на енергийната ефективност на корабите*. Варна: „Ларго сити“. ISBN 978-619-7026-18-4.

ВАСИЛЕВ, Н.; ЦАНОВ, Л.; МИТОВ, Б.; ЧУКОВА, С., 1985. *Приложна математика*. София: ВИ.

ГАВРИЛОВ, В. and СЕМИОНИЧЕВ, Д., 2012. Выявления опасностей объектов водного транспорта методом формализованной оценки безопасности. *Журнал университета водных коммуникаций*, бр. 4, pp. 124–131.

ГЕОРГИЕВА, П., 2013. Генетичните алгоритми като средство за решаване на оптимизационни задачи. *Компютърни науки и комуникации. Електронно списание на Центъра по информатика и технически науки на Бургаския свободен университет*, бр. 2, № 3. ISSN 1314-7846.

ГРИНЯК, В. М., 2006. Информационные технологии обеспечения безопасности на морских акваториях в ограниченных водах. В: *54-ая региональная научно-техническая конференция творческой молодёжи Дальнего Востока*, с. 119–123. Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского.

ГРИНЯК, В. М., 2015. *Математические модели и методы обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов*. Владивосток: Владивостокского государственного университета экономики и сервиса.

ГРИНЯК, В. М.; ГЕРАСИМЕНКО, Л.; ДЕВЯТИСИЛЬНЫЙ, А., 2015. Многоуровневая модель идентификации опасных ситуаций береговыми системами управления движением судов. *Навигация и гидрография*, бр. 40, с. 29–37.

ДИМИТРАНОВ, Д., 2020. *Оценка на ефективността на моделите за оптимизиране на плана за преход на кораба за повишаване на енергийната му ефективност*. Варна: Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“.

ИБЕ, 2001. *Речник на българския език. Т. 1 (А – Б)*. Изд. 2. Доп. и прераб. София: Институт за български език „Професор Любомир Андрейчин“ (ИБЕ) – АИ „Проф. Марин Дринов“, ЕТ „ЕМАС“. ISBN 954-430-593-9.

КОЛМОГОРОВ, А. Н., 1987. *Теория информации и теория алгоритмов*. Москва: „Наука“.

МЛАДЕНОВ, Д.; СТОИЛОВА, К.; СТОИЛОВ, Т., 1989. *Теория и практика на йерархичните системи*. 1. София: Българска академия на науките.

НАКОВ, П. and ДОБРИКОВ, П., 2013. *Програмиране=++Алгоритми*. София: ТопТeam Co. ISBN 954-8905-06-X.

ПОГОСОВ, С. Г., 1977. *Использование РЛС в судовождении*. Москва: „Транспорт“.

РЯБЧЕНКО, Р.; ШУТОВ, В.; МЕНЬШИКОВ, В., 2010. Идентификация промахов, обеспечивающая безопасность плавания в стесненных водах. *Эксплуатация морского транспорта*, бр. 3, с. 38–40.

СТОИЛОВА, К., 2010. *Неутеративна координация с предсказване*. София: Академично издателство „Марин Дринов“.

ЮДОВИЧ, А. Б., 1982. *Предотвращение навигационных аварии морских судов*. Москва: „Транспорт“. ISBN 9785277001721.