

ПРОБЛЕМА МОДЕЛЮВАННЯ МАНЕВРУВАННЯ АГЕНТІВ В ЗАДАЧАХ ПЕРЕСЛІДУВАННЯ/УТІКАННЯ НА ПЛОЩИНІ

Досліджується проблема моделювання процесів маневрування агентів, вирішувана в рамках задач переслідування/утікання на площині. Виконується огляд сучасного стану вирішення цієї проблеми в рамках рішення задач навігації на морі та обґрунтовується її новизна для задач мультиагентного переслідування/утікання на площині. Виконується уточнення постановки задачі переслідування/утікання агентів за рахунок формалізації задачі їх маневрування. Пропонуються методи маневрування та демонструються приклади маневрування агентів, виконувани засобами мультиагентної системи «Навігація».

Вступ

Проблема запобігання зіткненню суден у морі, також відома як проблема безпечного розходження суден, не нова і загальновідома [1, 2]. Її вирішенню присвячено багато досліджень та напрацьовано значні результати, найбільш вагомими з яких покладені в основу створення Міжнародних правил попередження зіткнення суден у морі (МППЗС-72) [3]. Разом з тим, використання МППЗС-72 для прийняття рішень щодо необхідного маневрування має певні недоліки [4]:

- МППЗС-72 регламентують правила прийняття рішень виключно для випадку, коли вирішується задача безпечного розходження двох суден;

- в МППЗС-72 присутні багато нечітко визначених параметрів, на базі яких передбачається приймання рішень щодо безпечного розходження суден, що в результаті ускладнює формалізацію процесу моделювання маневрування.

Так, в більшості випадків у розходженні приймають участь двоє суден, чим і пояснюється бінарний характер координат МППЗС-72, що регламентують безпечне розходження двох суден, які небезпечно зближуються. Однак в обмежених умовах руху з високою інтенсивністю судноплавства виникають ситуації небезпечного зближення декількох (більше двох) суден, причому в районі виконання маневрування знаходяться інші судна, які заважають здійсненню потрібного маневру. В таких ситуаціях вибір безпечного маневру розходження стає досить складним, більш того, при цьому вимоги МППЗС-72 для

деяких суден, що виконують маневри розходження, стають суперечними і їх коректне врахування в таких ситуаціях стає неможливим.

Зазначимо, що відомі дослідження щодо моделювання маневрування суден для уникнення зіткнень здійснюються в рамках вирішення загальної задачі безпечного розходження суден у морі, яка за своїми властивостями суттєво відрізняється (та є менш складною) від вирішуваної нами задачі переслідування/утікання. Разом з тим, слід зауважити, що і в нашому випадку вирішення проблеми моделювання процесів маневрування суден (агентів) також має відповідати вимогам МППЗС-72, оскільки ми передбачаємо, що агенти діють на площині, яка змістовно інтерпретується як море. Зауважимо, що нам невідомі інші дослідження щодо мультиагентного моделювання процесів маневрування суден, здійснювані в рамках вирішення задачі переслідування/утікання агентів.

Виходячи з цього, коротко розглянемо сучасний стан досліджень щодо вирішення задач моделювання процесів маневрування суден у рамках рішення загальної задачі безпечного розходження суден у морі. З аналізу літературних джерел випливає, що на сьогодні ця задача, зокрема, досліджується з позицій:

- теорії диференційних ігор (див., наприклад, [5, 6]);
- мультиагентного моделювання (див., наприклад, [7–9, 11]);
- імітаційного моделювання (див., наприклад, [4, 12–15]).

В рамках досліджень, що ґрунтуються на положеннях теорії диференційних ігор, виконується пошук оптимальних траєкторій руху судна, що гарантують йому уникнення зіткнень з іншими судами. При цьому використовуються різні підходи. Наприклад, в [5] пропонується дискретизація фазового простору станів динамічної системи (у якості якої виступає досліджуване судно) прямокутною решіткою графа, який визначає переходи між вузлами, що задовольняють всім вимогам задачі управління у вигляді безпечно-гарантованої траєкторії руху судна. Мета даного підходу – знаходження дерева найкоротшого шляху, що відповідає доцільній безпечно-гарантованій траєкторії руху судна. В свою чергу, в [6] розглядається задача визначення таких змін курсу і/або швидкості судна, які забезпечують мінімальні відхилення від запланованої траєкторії руху при збереженні заданого рівня безпеки руху. Ця задача вирішується для небезпечних та потенційно небезпечних суден, щодо яких формується багатокрокова стратегія розходження на весь прогностичний період їх знаходження в зоні небезпеки, з подальшою корекцією стратегії у випадку, якщо поточний розвиток ситуації буде відрізнятися від прогнозованого. При цьому, в процесі формування стратегії розходження враховуються вимоги МППЗС-72.

Хоча в цілому названі підходи за-слуговують уваги, в них є певні недоліки. По-перше, вони орієнтовані на аналіз стану окремого судна, а не сукупності суден, як має бути при розгляді дійсно динамічної системи. По-друге, вони орієнтовані на планування стратегії руху судна заздалегідь, а не ad hoc. По-третє, ці дослідження виконуються на теоретичному рівні, далекому від реалізаційного рівня.

В рамках досліджень, що засновані на мультиагентному підході, виконується спроба розгляду можливості моделювання агентами врахування множини правил, що регламентують доцільні дії агентів у відповідності до вимог МППЗС-72. При цьому, для формалізації знань агентів щодо можливих дій в [7, 8] пропонується використання нечітких множин. Водночас, наприклад, в [11] для моделювання дій агентів

розглядається можливість використання методів позиційно-цільового управління.

Відзначимо, що в відомих дослідженнях можливість використання мультиагентного підходу для рішення задачі уникнення зіткнень суден розглядається тільки на концептуальному рівні.

У свою чергу, в рамках досліджень, що ґрунтуються на імітаційному моделюванні, отримано найбільш значні практичні результати (в порівнянні з іншими двома напрямками досліджень). В рамках таких досліджень виконується побудова і аналіз адекватності імітаційних моделей розходження суден шляхом маневрування (з урахуванням вимог МППЗС-72), та створюються відповідні системи імітаційного моделювання. Наприклад, в [13] наведено посилання на систему імітаційного моделювання МАНЕВРИ-12И процесу розходження судна (режим доступу: <http://www.nav-eks.org.ua/Nayka-2013.html>), побудовану на основі однієї з запропонованих імітаційних моделей. Засобами цієї системи забезпечується моделювання процесу розходження досліджуваного судна з іншими потенційно-небезпечними суднами, що здійснюється шляхом попереднього розрахунку безпечного маршруту руху судна та відтворення цього руху в режимі моделювання. Виходячи з аналізу роботи системи МАНЕВРИ-12И можна стверджувати, що виконуваний її засобами процес імітаційного моделювання має наступні недоліки:

1) виконується моделювання процесів маневрування тільки одного судна, а інші судна виконують свій запланований прямолінійний рух без необхідного маневрування і можуть зіткнутися (це спостерігається навіть на авторських прикладах роботи системи);

2) процес моделювання доцільного маневрування судна виконується заздалегідь, а не в процесі руху судна, що принципово унеможливує постановку задачі маневрування для декількох суден, оскільки заздалегідь неможливо адекватно врахувати наслідки змін напрямів руху суден в результаті таких маневрів.

Таким чином, можна зробити наступні загальні висновки щодо запропоно-

ваних рішень з моделювання процесів маневрування. Всі судна (за виключенням одного судна, що маневрує) рухаються прямолінійно за своїм запланованим курсом та з постійною швидкістю. Судно, що маневрує, після завершення маневрування повертається до свого початкового курсу і далі рухається таким же чином, як і інші судна. Всі ці обставини суттєво спрощують задачу моделювання процесів маневрування суден і принципово відрізняють її від задачі маневрування, вирішуваної в рамках рішення досліджуваної задачі переслідування/утікання агентів, де агенти у кожний момент часу можуть змінювати як свій курс, так і швидкість.

В цілому, можна визначити наступні відмінні особливості вирішуваної нами задачі маневрування:

- стан навколишнього середовища динамічно змінюється кожну мить і, як наслідок, кожний рухомий агент має динамічно формувати власну модель навколишнього середовища в кожний момент часу;
- дії жодного з рухомих агентів у наступний момент часу неможливо наперед передбачити;
- жодний з рухомих агентів не має заздалегідь сформованого плану дій; кожний з них має визначати доцільну наступну дію у реальному масштабі часу, виходячи з оцінки стану навколишнього середовища;
- вирішення задачі маневрування не має суперечити вирішенню центральної задачі моделювання – задачі переслідування/утікання.

Виходячи з цього, стають очевидними актуальність та наукова новизна задачі розробки методів моделювання маневрування для множини агентів у рамках вирішення загальної задачі переслідування/утікання.

1. Постановка задачі переслідування на площині з урахуванням маневрування агентів, виконаного з метою уникнення зіткнень

Уточнимо постановку задачі переслідування на площині [16] з урахуванням

вимог щодо маневрування агентів. Нехай на площині задано випуклу множину S , яка відповідає динамічному середовищу, в межах якого діють агенти-утікачі множини $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ та агенти-переслідувачі множини $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$. На множинах E , P задано множину груп $Gr = \{Gr_1, Gr_2, \dots, Gr_n\}$; $n = \text{card}(GR) = \text{card}(E)$ таких, що кожна $Gr_k \in Gr$ містить деяку кількість $P_i (P_i \in P)$ і одного $E_j (E_j \in E)$, та завжди правильно, що $\text{card}(Gr_k) \geq 2$, $Gr_k \cap Gr_{k+1} = \{\emptyset\}$ і $Gr_1 \cup Gr_2 \cup \dots \cup Gr_n = P \cup E$.

Будь-який i -ий агент починає рух у момент часу $t = 0$, має поточні координати в ортогональній системі координат і переміщується в S , використовуючи при цьому відповідну оптимальну стратегію [17]. Параметри, що характеризують стан i -ого агента множин P , E в момент часу $t \geq 0$ однозначно описуються кортежем $\langle id_i, prop_i, \{x_i, y_i\}, v_i, \alpha_i \rangle$, де id_i – унікальний ідентифікатор агента; $prop_i$ – перелік властивостей (розмір, клас, належність) агента; $\{x_i, y_i\}$ – поточні координати агента; v_i – швидкість руху агента; α_i – кут руху агента в ортогональній системі координат.

Кожний агент-переслідувач $P_i \in Gr_k$ у момент часу $t \geq 0$ знає положення всіх переслідувачів, що належать множині P , включаючи себе, положення $E_j \in Gr_k$, швидкість та напрям його руху, а також положення, швидкість та напрям руху інших утікачів, що належать множині E , в цей же момент часу t , однак йому невідомі майбутні маневри таких агентів-утікачів та інших агентів-переслідувачів.

У свою чергу, в кожний момент часу $t \geq 0$ утікачу $E_j \in Gr_k$ відомо своє положення, але він знає положення тільки тих переслідувачів $P_i \in P$ та інших утікачів, що належать множині E , які знаходяться в його зоні спостереження. Нагадаємо, що під зоною спостереження $ZS_j \subseteq S$ утікача E_j розуміється квадрат, сторона якого дорівнює деякому додатно-

му числу, що змістовно інтерпретується як подвійне значення простору видимості в один бік, а центр квадрату задається поточними координатами $\{x_j, y_j\}$ утікача E_j .

В утікача $E_j \in Gr_k$ можуть бути два можливих стани щодо обізнаності про його переслідувачів: 1) коли він знає, хто саме його переслідує; 2) коли він не знає своїх переслідувачів. У першому випадку утікач $E_j \in Gr_k$ реагує (тобто запобігає захопленню) тільки на переслідувачів $P_i \in Gr_k$, а з іншими агентами тільки уникає зіткнення. В другому випадку утікач $E_j \in Gr_k$ аналізує всіх можливих переслідувачів $P_i \in P$, які знаходяться в його зоні спостереження, але реагує тільки на тих з них, хто гіпотетично може виступати як його переслідувачі, тобто може входити до складу групи Gr_k , а з іншими агентами, як і у першому випадку, тільки уникає зіткнення.

Кожний агент $P_i \in P$ та $E_j \in E$ уникає зіткнення з іншими агентами. Відзначимо, що для аналізу ситуацій зіткнень агентів ми використовуємо поняття «зона зіткнення». Нагадаємо, що зона зіткнення ZZ_j геометрично збігається з зоною захоплення, під якою розуміється квадрат, сторона якого залежить від геометричних розмірів об'єкта, що відповідає E_j , а центр квадрата задається поточними координатами $\{x_j, y_j\}$ агента E_j , що в цілому забезпечує запобігання зіткненню об'єктів, що відповідають агентам P_i та E_j . У випадку, коли P_i та E_j належать одній і тій же групі Gr_k , зона зіткнення розглядається як зона захоплення, і якщо зони захоплення P_i та E_j перетинаються, то це означає, що P_i наздогнав E_j . Для уникнення зіткнень агенти використовують спеціальні методи маневрування. Зазначимо, що на початку процесу переслідування/утікання агенти розташовані на площині таким чином, що їх зони зіткнення не перетинаються.

З проведеного аналізу ситуацій, що можуть призвести до зіткнень агентів, випливає, що існують три різні випадки, які

передбачають необхідність виконання маневрування агентами (де \tilde{t} – момент початку маневрування).

Випадок 1. Коли два рухомі агенти (якщо вони в кожний наступний момент часу $t_1 > \tilde{t}$ будуть рухатись за своїми поточними курсами руху та швидкостями) потенційно можуть зіткнутися в момент часу t_2 і їх зони зіткнення в даний момент часу \tilde{t} не перетинаються.

Випадок 2. Коли рухомий агент (якщо він в кожний наступний момент часу $t_1 > \tilde{t}$ буде рухатись за своїми поточними курсом руху та швидкістю) потенційно може зіткнутися в момент часу t_2 з нерухомим агентом і зони їх зіткнення в даний момент часу \tilde{t} не перетинаються.

Випадок 3. Коли рухомий агент в даний момент часу \tilde{t} опинився в зоні зіткнення іншого рухомого або нерухомого агента.

Формалізуємо поняття «потенційно може зіткнутися», що використовується в описах випадків 1 та 2. Припустимо, що агент a_i , який може належати як множині P , так і множині E , рухається прямолінійно та з постійною швидкістю. Припустимо, що в зоні спостереження ZS_i агента a_i знаходиться множина $M_1 \subseteq (P \cup E) \setminus a_i$ агентів, які або рухаються прямолінійно та з постійною швидкістю у попутному напрямку з агентом a_i (тобто їх шляхи перетинаються), або не рухаються, але шлях агента a_i проходить через зону зіткнення таких нерухомих агентів. Розглянемо загальний випадок, коли множина M_1 не містить жодного агента, який є або переслідувачем агента a_i (якщо a_i – утікач), або утікачем, щодо якого агент a_i є переслідувачем (якщо, що відносно саме таких агентів агент a_i не маневрує, а виконує або утікання, або переслідування). Введемо поняття «найближчий агент», під яким будемо розуміти рухомого агента, який рухається в попутному напрямку з агентом a_i таким чином, що точка перетину шляхів цих двох агентів розташована найближче до агента a_i , ніж всі інші подібні точки, побудовані

для інших рухомих агентів, що належать множині M_1 ; або *нерухомого агента*, шлях агента a_i до зони зіткнення якого є найменшим у порівнянні з іншими нерухомими агентами, що належать множині M_1 .

Тоді будемо говорити, що агенти a_i та $a_j \in M_1$ *потенційно можуть зіткнутися в момент часу t_2* , якщо агент a_j є найближчим агентом рухомого агента a_i .

Виходячи з цього, виконаємо загальну формалізацію вищенаведених випадків: агенти a_i та $a_j \in M_1$ потенційно можуть зіткнутися в момент часу t_2 , якщо $ZZ_i^{t_2} \cap ZZ_j^{t_2} \neq \{\emptyset\}$, де $ZZ_i^{t_2}, ZZ_j^{t_2}$ – зони зіткнення агентів a_i та a_j , побудовані в точках, в яких агенти опиняться в момент часу t_2 (для випадку 3 $t_2 = \tilde{t} + t_0$, де t_0 – проміжок часу до зіткнення).

Зазначимо, що визначення часу \tilde{t} як часу початку маневрування, в МППЗС-72 не наводиться. Водночас, в спеціальній літературі (див., наприклад, [2]) такий *рекомендований* час для рухомих суден визначається виходячи з «доброї морської практики» і дорівнює $\Delta t = t_2 - \tilde{t} = 12$ хвилинам до моменту можливого зіткнення (що відповідає випадку 1). Ми вважаємо, що для загальності постановки доцільно поширити цю рекомендацію і на випадок виконання маневрування рухомим судном відносно нерухомого судна (що відповідає випадку 2).

Процеси виконання маневрування суден регламентуються правилами 8, 14 ÷ 17 МППЗС-72 [3]. Коротко прокоментуємо сутність цих правил.

Правило 8 регламентує загальні дії суден задля запобігання зіткненню.

Правило 14 регламентує дії двох суден в умовах, коли вони зближуються на протилежних або майже протилежних курсах таким чином, що можуть зіткнутися. В таких випадках кожному з цих суден рекомендується змінити курс руху праворуч з тим, щоби кожне судно пройшло у іншого з лівого борту.

Правило 15 регламентує дії двох суден в умовах, коли вони рухаються курсами,

що перетинаються, таким чином, що існує загроза зіткнення суден. В таких випадках судно, що має інше судно з правої сторони, має уступити шлях іншому судну таким чином, щоб запобігти перетину курсу такому судну по носу. Тобто судно, яке має маневрувати, має забезпечити проходження іншого судна за його поточним курсом та вибрати такий курс на період маневрування, який унеможливить зіткнення (для цього знизити швидкість руху (якщо необхідно, до повної зупинки) або змінити курс з тим, щоб пройти позаду іншого судна).

Правило 16 регламентує поведінку судна, що має уступити шлях іншому судну, і вимагає його своєчасних та рішучих (помітних) дій.

Правило 17 регламентує поведінку судна, якому уступає шлях інше судно. При цьому можуть виникати 2 варіанти дій: 1) якщо судно, яке має уступити шлях, діє у відповідності до вимог правила 16, то судно, якому уступають шлях, має рухатись за своїми поточними швидкістю та курсом; 2) в супротивному випадку судно, якому мають уступати шлях, має прийняти всі можливі заходи щодо запобігання зіткненню.

Визначимо загальні вимоги до методів маневрування, які формалізуватимуть поведінку агентів у випадках 1÷3 (див. вище) та враховуватимуть наведені правила.

Випадок 1. Метод маневрування має враховувати вимоги правил 8, 14 – 16. Даний метод має дозволяти в реальному масштабі часу визначати множину рухомих агентів, розташованих праворуч відносно аналізованого агента в його зоні спостереження, та своєчасно виявляти найближчого агента, відносно якого аналізований агент має виконати відповідні дії, регламентовані правилами 8, 14 – 16.

Випадок 2. Метод маневрування також має враховувати вимоги правил 8, 14 – 16. Даний метод має дозволяти в реальному масштабі часу визначати множину нерухомих агентів, розташованих по курсу руху аналізованого рухомого агента в його зоні спостереження, та формувати аналізованому агенту доцільний курс його подальшого руху з метою запобігання зіткнен-

ня з такими нерухомими агентами.

Випадок 3. Метод маневрування має враховувати вимоги правил 8, 14 – 17. Даний метод стосується дій агентів у аварійних ситуаціях, коли в результаті виконання маневру рухомий агент опинився в зоні зіткнення іншого рухомого або нерухомого агента. Цей метод маневрування має забезпечувати агенту вибір мінімального маневру з метою безаварійного виходу з зони зіткнення іншого агента. В загальному випадку такий мінімальний маневр передбачає вибір такого кута подальшого руху агента, який буде відповідати мінімальному куту відхилення від поточного напрямку руху агента.

Таким чином, для вирішення загальної задачі маневрування агентів нам необхідно розробити сукупність вищезазначених методів. Разом з тим, очевидно, що для рішення цієї задачі для загального випадку необхідно упорядкувати послідовність виконання цих методів.

2. Визначення послідовності виконання методів маневрування

Для визначення порядку виконання методів маневрування дослідимо послідовність аналізу деяким рухомим агентом a_i свого стану в довільний момент часу t .

Ясно, що якщо агент $a_i \in P$, то в кожний момент часу t його основною задачею є формування оптимальної стратегії переслідування відповідного утікача. Якщо ж агент $a_i \in E$, то в кожний момент часу t його основною задачею є формування оптимальної стратегії втечі від вірогідного переслідувача. В обох випадках вирішенням цих задач є визначення доцільних кута α_i та швидкості v_i руху в момент часу t_1 , що є наступним за моментом часу t . Очевидно, що якщо агент a_i в момент часу t не виявив необхідності виконання маневрування, далі він буде рухатись за своєю оптимальною стратегією. З цього випливає, що вирішення задачі визначення доцільних кута та швидкості руху, що узгоджуються з відповідними оптимальними стратегіями агента, має передувати вирішенню задач маневрування.

Припустимо, що в результаті аналізу свого стану в момент часу \tilde{t} агент a_i з'ясував необхідність виконання маневрування, що передбачає зміну прийнятих значень α_i та/або v_i . При цьому в загальному випадку (див. п. 1 статті) момент часу \tilde{t} визначається як $\tilde{t} = t_2 - \Delta t$, де Δt лежить у проміжку $t_0 < \Delta t \leq 12$ хвилин, а t_0 – проміжок часу до зіткнення у випадку 3. Дійсно, оскільки агент a_i діє у складному динамічному середовищі, змінюваному в кожний момент часу, рішення щодо маневрування далеко не завжди може бути їм прийнято заздалегідь, а фактично приймається в оперативному режимі в момент часу, що належить проміжку Δt .

Як ми показали в п.1 статті, можливі три випадки, коли агент має виконати відповідне маневрування. При цьому очевидно, що якщо порівнювати випадки 1 і 2, то найпершою дією при визначенні необхідності маневрування має бути аналіз випадку 1, як можливості зіткнення з іншим рухомим агентом (як показано в п.1 статті, оцінюваний час Δt до моменту можливого зіткнення у випадках 1 і 2 збігається). Ясно, що нерухомий агент за цей же час не змінить своєї поведінки на відміну від рухомого агента, який, як наслідок, є більш небезпечним, і тому саме на його дії агента a_i необхідно реагувати в першу чергу. В процесі динамічних дій агентів (у тому числі і внаслідок виконання маневрування) можуть виникати аварійні ситуації, коли агент a_i опиняється в межах зони зіткнення деякого іншого агента. Ясно, що при цьому буде мати місце випадок 3, а обробка інших випадків має ігноруватися.

З цього випливає, що доцільна послідовність виконання методів маневрування має бути наступною: 1) маневрування за випадком 1; 2) маневрування за випадком 3; 3) маневрування за випадком 2 (з наступною перевіркою необхідності маневрування за випадком 3). Відповідна діаграма діяльності, що формалізує процес аналізу рухомим агентом a_i необхідності маневрування в кожний момент часу t , показана на рис. 1.

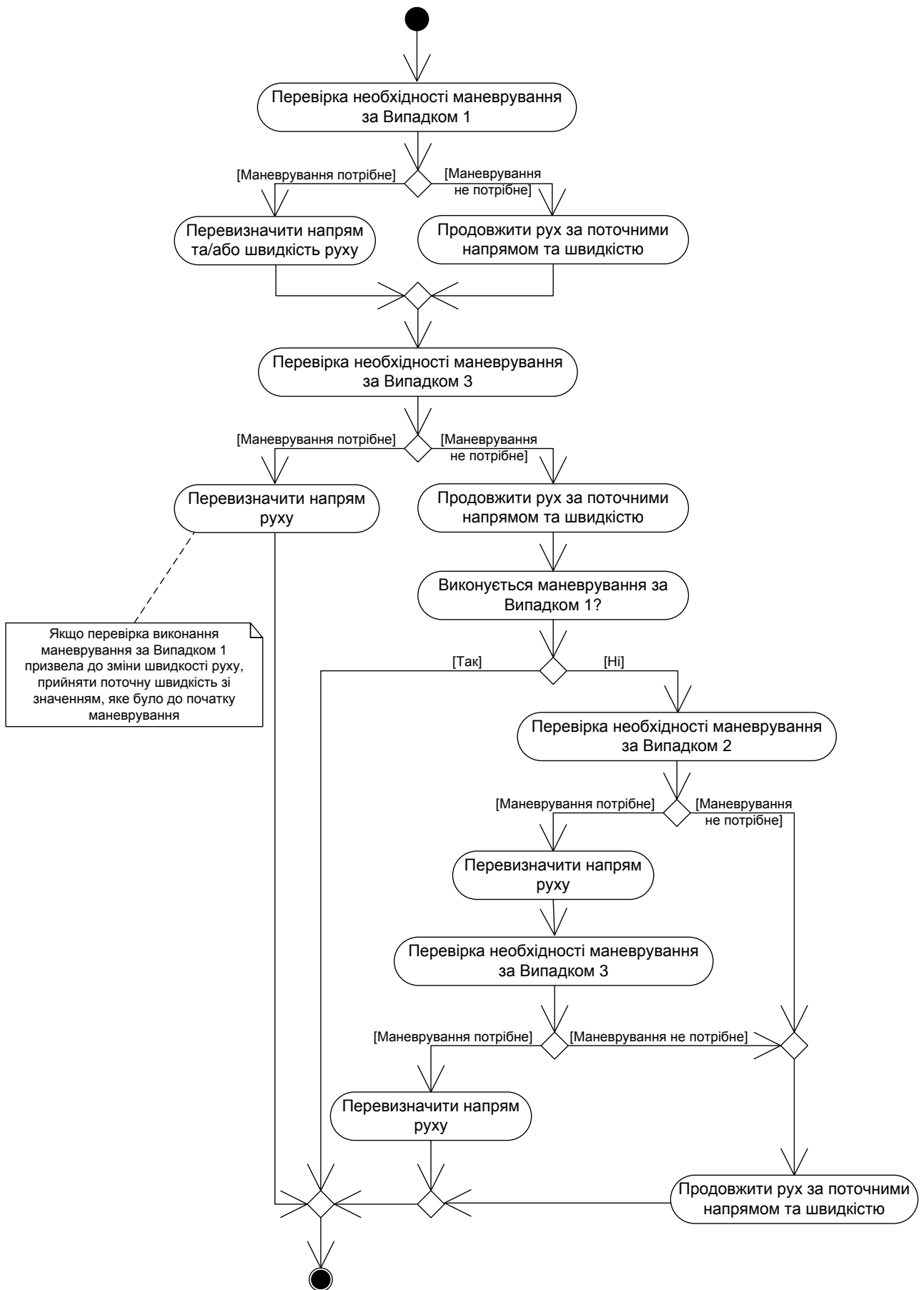


Рис. 1. Діаграма діяльності довільного рухомого агента a_i щодо необхідності маневрування

Як впливає з діаграми діяльності, в будь-якому випадку при виконанні маневрування агент a_i прийме рішення, яке забезпечить йому уникнення від зіткнень. Так, якщо агент a_i розпізнав необхідність маневрування за випадком 1 і прийняв відповідні рішення щодо зміни напрямку та/або швидкості руху, це рішення далі перевіряється в процесі вирішення задачі щодо необхідності маневрування за випадком 3. Якщо випадок 3 має місце, то агент a_i прийме рішення щодо аварійного маневрування, змінюючи відповідно до поточної ситуації напрям i , можливо, швидкість руху. В супротивному випадку агент a_i буде рухатись за напрямом та з швидкістю, прийнятими при аналізі випадку 1.

Зазначимо, що випадок 2 аналізується тільки в ситуації, коли не мали місця випадки 1 та 3. Таке обмеження не впливає на ефективність вирішення задачі маневрування в цілому, оскільки в найгіршому випадку обробка ситуації щодо зіткнення з нерухомими агентами (що відповідає випадку 2) виконується до аналізу випадку 2 (при обробці випадку 3). Одночас, після обробки випадку 2, як впливає з діаграми діяльності, виконується додатковий аналіз ситуації, в яку потрапив агент після маневрування, шляхом аналізу випадку 3.

3. Методи маневрування агентів

3.1. Метод маневрування агента відносно рухомих агентів. Даний метод призначений для обробки ситуацій, що відповідають випадку 1 (див. п. 1 статті). Сутність методу полягає у наступному. Кожний рухомий агент a_i в кожний момент часу свого руху виконує аналіз станів всіх інших рухомих агентів, які потрапили в його зону спостереження $ZS_i \subseteq S$, та визначає їх підмножину, яка включає агентів, що знаходяться праворуч відносно агента a_i (визначення «праворуч» відбувається шляхом обрахунку різниці β

між кутом напрямку руху агента a_i та кутом, утвореним лінією, проведеною від точки розташування агента a_i до точки розташування аналізованого агента в ортогональній системі координат; такому визначенню відповідають ситуації, коли різниця кутів β лежить у проміжку $0^\circ \leq \beta < 180^\circ$). З цієї підмножини він вибирає агентів, з якими (за умови збереження їх поточних швидкості та напрямку руху) можливе його зіткнення. З вибраних агентів він далі розглядає тільки тих, які одночасно не виступають як переслідувачі аналізованого агента (якщо a_i – утікач), або не є утікачем щодо якого агент a_i виступає як переслідувач. З агентів, що залишились для розгляду, агент a_i вибирає одного *найближчого агента* (див. п. 1 статті) a_j . Якщо проміжок часу Δt до моменту ймовірного зіткнення агентів a_i та a_j дорівнює або менше 12 хвилин (в програмній реалізації – відповідного часового проміжку, визначеного з урахуванням екранних координат та показників таймеру), виконується перевірка близькості їх розташування. Якщо в даний час t зони зіткнення агентів перетинаються ($ZZ_i^t \cap ZZ_j^t \neq \{\emptyset\}$), виконується зменшення швидкості руху агента a_i (до 0.5 вузла) та кута його руху (на 15°). В супротивному випадку – відбувається зменшення кута руху агента a_i (на 15°), тобто він повертає праворуч.

3.2. Метод маневрування агента відносно нерухомих агентів. Даний метод призначений для обробки ситуацій, що відповідають випадку 2 (див. п. 1 статті). Сутність методу полягає у тому, що кожний рухомий агент a_i у кожний момент часу свого руху (за умови, що не мають місця випадки 1 та 3 – див. п. п. 1, 2 статті) визначає множину M_n^i нерухомих агентів, які потрапили в його *сектор перегляду*. Під сектором перегляду розу-

міється прямокутник¹, побудований від точки розташування агента a_i у напрямку його поточного руху, з діагоналлю, довжина якої дорівнює відстані, яку агент a_i пройде з поточною швидкістю за 12 хвилин (в програмній реалізації – відповідного часового проміжку, визначеного з урахуванням екранних координат та показників таймеру). Далі агент a_i визначає множину A_n^i кутів, які існують між точкою розташування агента a_i та вершинами квадратів, що відповідають зонам зіткнення агентів $a_j \in M_n^i$. З множини A_n^i вибираються мінімальний α_i^{\min} та максимальний α_i^{\max} елементи, з якими порівнюється поточний кут α_i руху агента a_i . Якщо $\alpha_i^{\min} < \alpha_i < \alpha_i^{\max}$, то як кут подальшого руху агента a_i вибирається значення α_i^{\min} або α_i^{\max} , найближче до α_i . В супротивному випадку агент a_i продовжує рух за поточним напрямом.

3.3. Метод аварійного маневрування. Даний метод призначений для обробки ситуацій, що відповідають випадку 3 (див. п.1 статті). Сутність методу полягає у тому, що кожний рухомий агент a_i у кожний момент часу свого руху перевіряє, чи існує деякий інший агент a_j , в зону зіткнення якого агент a_i потрапив у даний момент часу t , тобто чи виконується умова, що $\{x_i, y_i\} \in ZZ_j$. Якщо така умова не виконується, агент a_i далі діє у відповідності з діаграмою діяльності (див. рис. 1). В супротивному випадку агент a_i визначає, чи є агент a_j нерухомим або рухомим.

¹ Ситуації, коли сектор перегляду звужується (це відбувається у випадках, коли агент рухається у напрямках, близьких до кутів, кратних 90°) обробляються особливо: якщо кут руху агента (відносно октанта, в якому він рухається) менше 15° або більше 75° , менша сторона прямокутника визначається в результаті поділу більшої сторони на 2.5.

3.3.1. Якщо агент a_j є нерухомим, то агент a_i визначає кут β_i свого розташування відносно розташування агента a_j (див. рис. 2) та порівнює² значення кутів α_i та β_i . У випадку, якщо $\alpha_i > \beta_i$, то агент a_i визначає октант, в якому він має далі рухатись, шляхом збільшення на одиницю значення октанту, в якому він рухається в поточний момент часу (ясно, що якщо він перебуває в IV октанті, то далі він має рухатись в I октанті) та визначає кут γ_i подальшого руху як кут від точки свого поточного розташування до вершини зони зіткнення агента a_j , що розташована у визначеному октанті (див. рис. 2). Якщо $\alpha_i \leq \beta_i$, дії агента подібні вищевикладеним за винятком того, що він має не збільшити, а зменшити значення октанта на одиницю.

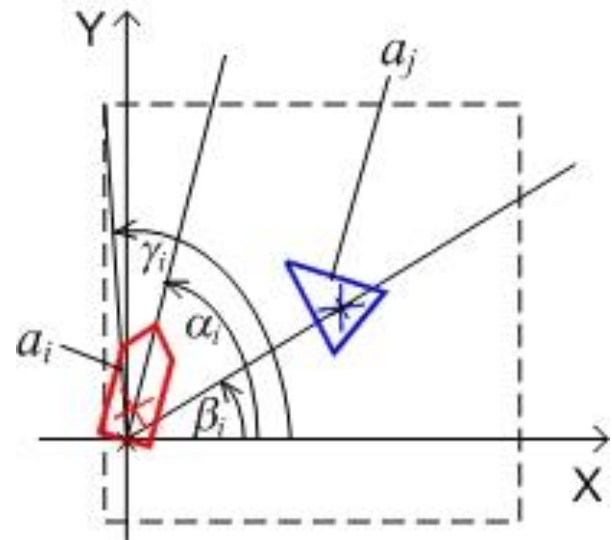


Рис. 2. Приклад

3.3.2. Якщо агент a_j є рухомим, то агент a_i перевіряє, чи знаходиться агент a_j праворуч від нього. Якщо ні, то агент a_i виконує маневрування у відповідності до метода, викладеного в п. 3.3.1. В супротивному випадку агент a_i перевіряє, чи перетинається його поточний напрям руху з поточним напрямом руху агента a_j (в

² Випадок, коли кути α_i та β_i розташовані відповідно у I та IV октантах (або навпаки) обробляється особливо.

цих перевірок використовуються алгоритми, розроблені для метода маневрування, викладеного в п. 3.1). Якщо ні, то агент a_i виконує маневрування у відповідності до метода, викладеного в п. 3.3.1. В супротивному випадку агент a_i вибирає напрям подальшого руху таким чином, щоби пройти позаду агента a_j .

4. Приклади виконання маневрування агентами

Для демонстрації роботи запропонованих методів маневрування розглянемо приклади (див. рис. 3–5) роботи МАС Навігація 2.5 [18], кожний з яких характеризує особливості виконання методів у різних ситуаціях. Дані рисунки містять упорядковану за часом послідовність фрагментів копій екранів, які наочно демонструють дії агентів при виконанні процесів маневрування. На рисунках використано наступні умовні позначення: агента, який маневрує, обведено кружком з суцільною лінією; агента, відносно якого маневрують, обведено кружком зі штриховою лінією; для ідентифікації агентів їх пронумеровано. Крім того, засобами МАС Навігація 2.5 штриховими лініями відображено шляхи, пройдені агентами, та штрих-пунктирними лініями – майбутні курси руху агентів (якщо агенти в цей момент часу не перебувають у стані маневрування).

Приклад 1 (див. рис. 3, а)–ж)) відповідає ситуації, коли агент використовує метод маневрування відносно рухомих агентів (див. п. 3.1). На рис. 3, а) показано ситуацію зближення агента 1 та агентів 2 і 3, які розташовані праворуч відносно агента 1 (де агент 2 є утікачем, а агент 3 – його переслідувачем). На рис. 3, б) агент 1 почав маневрування відносно агента 2, агенти 2 і 3 не змінюють напрямів свого руху. На рис. 3, в) агент 1 продовжує виконання маневрування відносно агента 2. На рис. 3, г) агент 1 завершив маневрування відносно агента 2 та розпочав маневрування відносно агента 3. Крім того, в межах аналізованої зони перегляду з'явилися агенти 4 і 5, що зближуються, причому агент 5 розташований праворуч

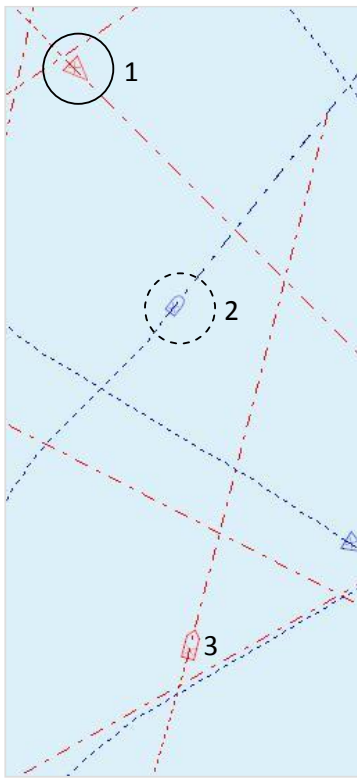
відносно агента 4. На рис. 3, д) агент 1 продовжує маневрування відносно агента 3; агенти 4 і 5 зближуються без виконання маневрування. І, нарешті, на рис.3, ж) агент 1 завершив маневрування і продовжує рух у відповідності до власної оптимальної стратегії, а агент 4 почав виконувати маневрування відносно агента 5.

Як впливає з наведеного прикладу, агенти 1 та 4 при виконанні маневрувань діють в точності у відповідності до вимог правил 15 та 16 МППЗС-72.

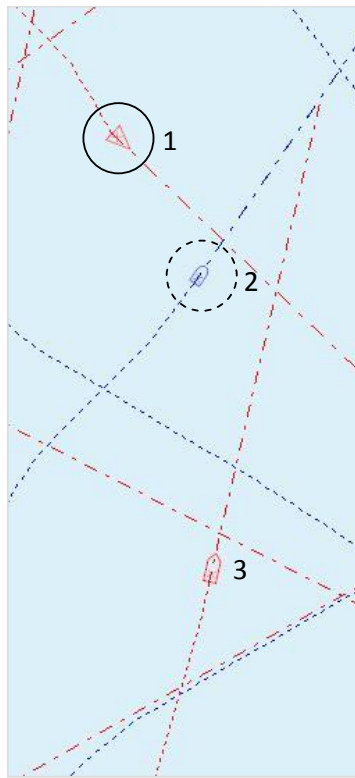
Приклад 2 (див. рис. 4, а)–ж)) відповідає ситуації, коли агент використовує метод маневрування відносно нерухомих агентів (див. п. 3.2). На рис. 4, а) показано ситуацію зближення рухомого агента 1 з нерухомим агентом 2. Агент 1 є переслідувачем нерухомого агента 3 (вже затриманого іншими переслідувачами). На рис. 4, б) агент 1 розпочав, а на рис. 4, в) продовжив маневрування відносно нерухомого агента 2. На рис. 4, г) агент 1 завершив маневрування відносно агента 2. З рисунку також видно, що агент 1 за мить до цього виконав маневр для обходу агента 4 та розпочав рух у напрямку «свого» утікача. Однак, як впливає з рис. 4, д), агент 1 змінив характер своїх дій, розпізнавши необхідність виконання обходу нерухомого агента 4, та продовжив виконання маневрування відносно нього. На рис.4, ж) показано, що агент 1 завершив маневрування відносно нерухомих агентів, та почав рух у напрямку «свого» утікача.

Як впливає з наведеного прикладу, агент 1 при виконанні маневрувань діє у відповідності до вимог правил 8, 14 – 16 МППЗС-72, здійснюючи безаварійні маневри. При цьому агент 1 повертає праворуч відносно нерухомих агентів, що, зокрема, повністю узгоджується з вимогами правила 14 МППЗС-72.

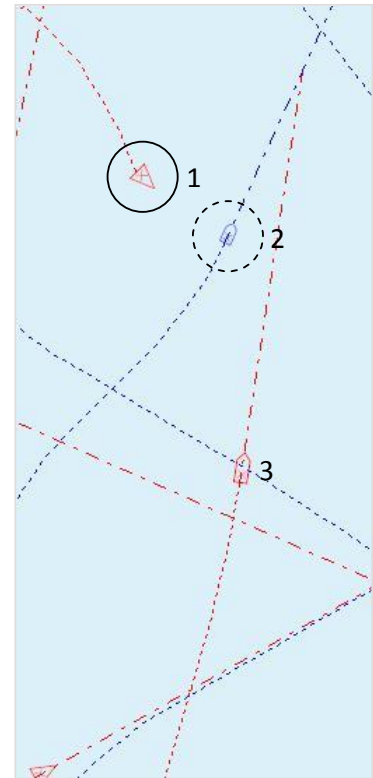
Приклад 3 (див. рис. 5, а)–ж)) відповідає ситуації, коли агент використовує метод аварійного маневрування відносно як рухомих, так і нерухомих агентів (див. п.3.3). На рис. 5, а) зображено ситуацію, коли агент 1, потрапивши в зону зіткнення рухомого агента 2, розпочав аварійне маневрування. При цьому, аварійне маневрування виконують як агент 1, так і агент 2.



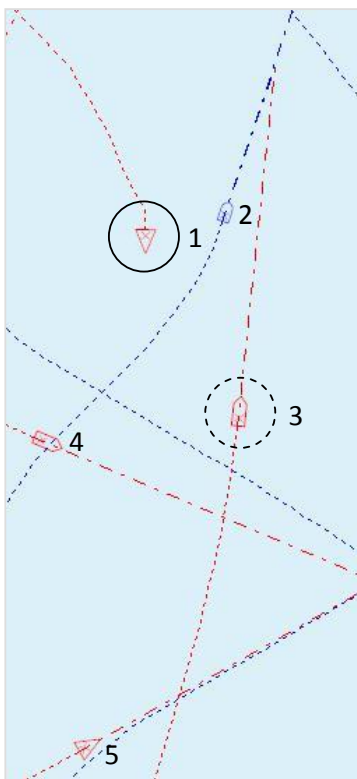
а)



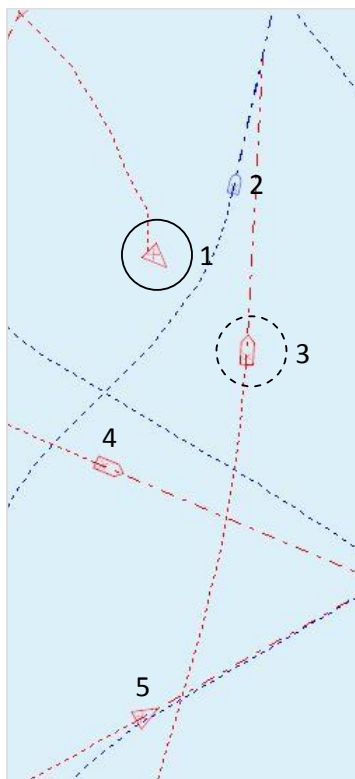
б)



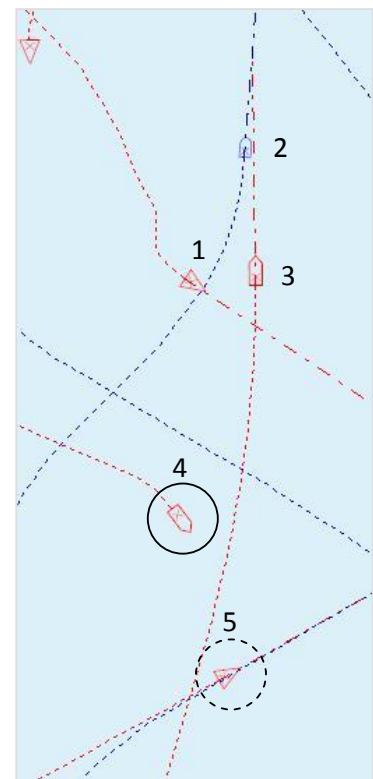
в)



г)



д)



ж)

Рис. 3. Приклад виконання маневрувань агентами відносно рухомих агентів (відповідає випадку 1)

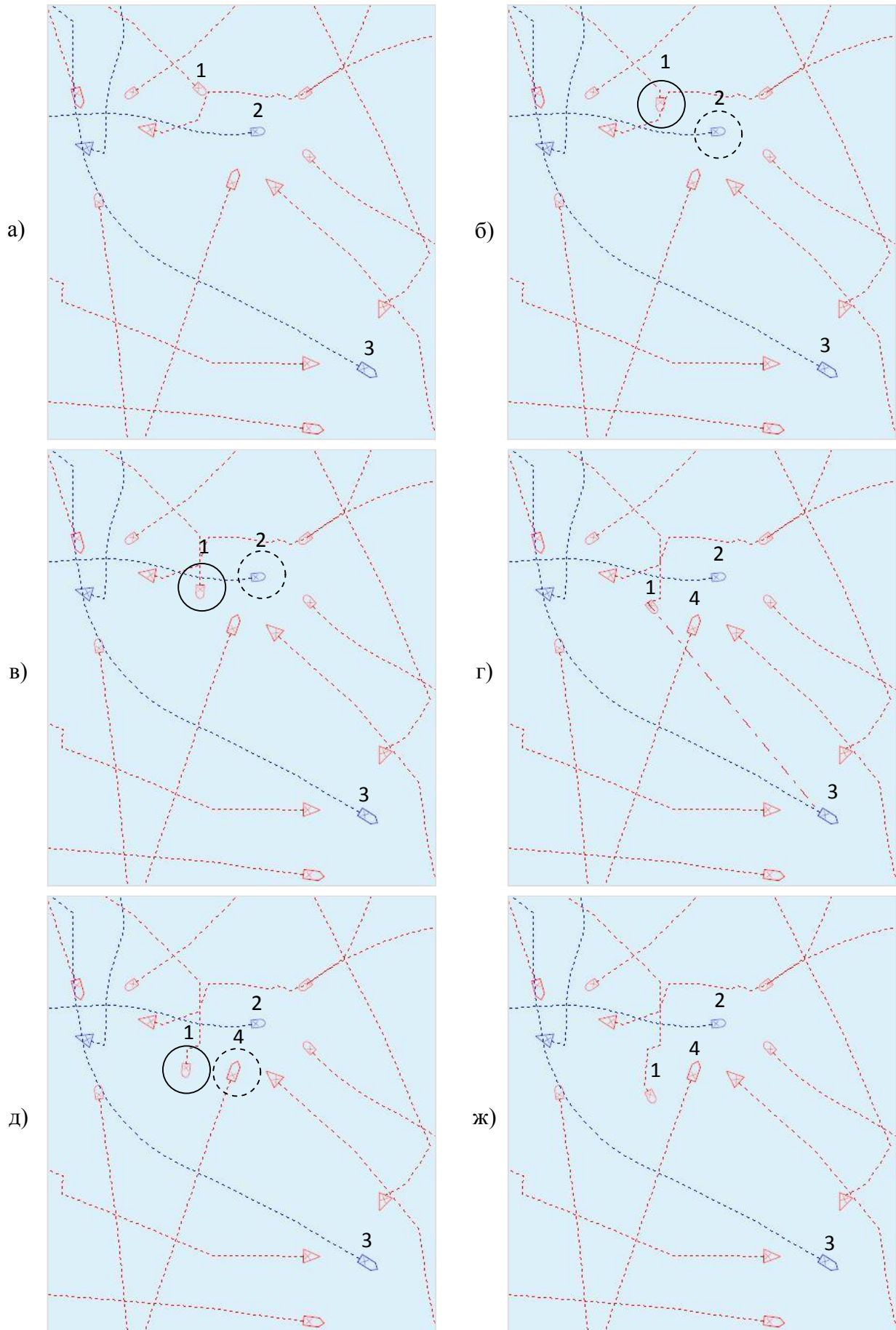
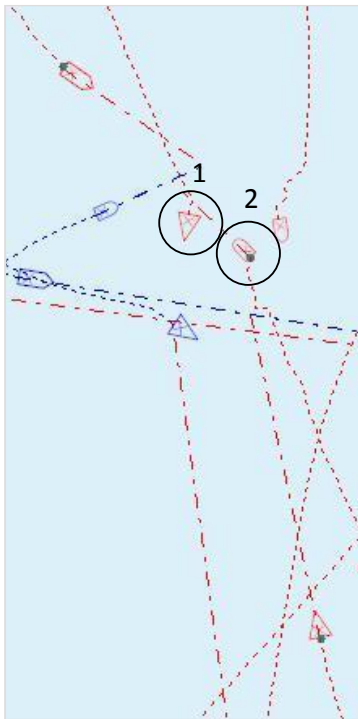
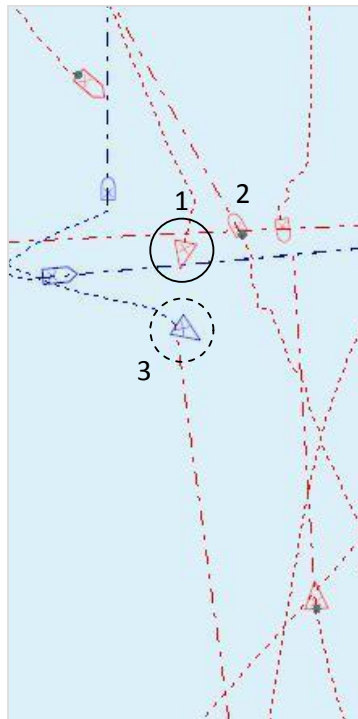


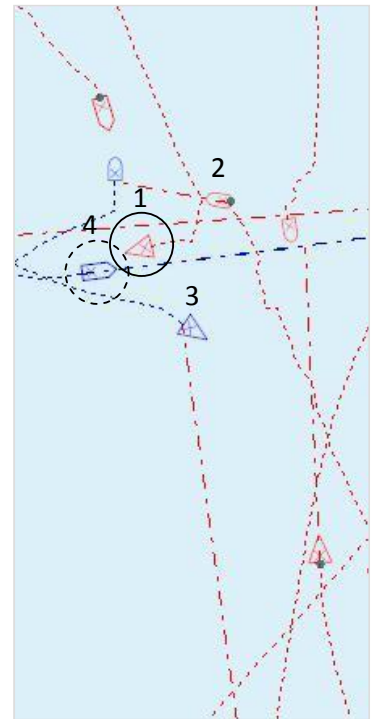
Рис. 4. Приклад виконання маневрувань агентом відносно нерухомих агентів (відповідає випадку 2)



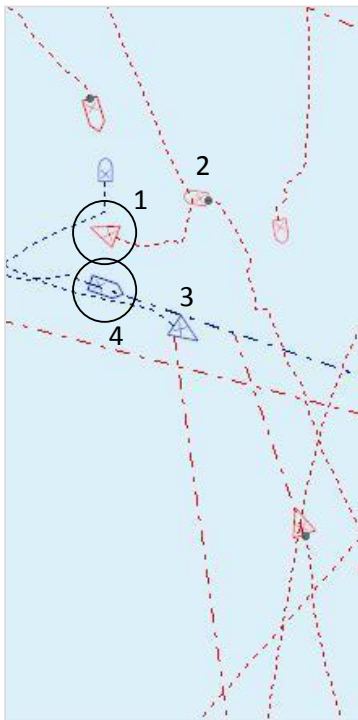
а)



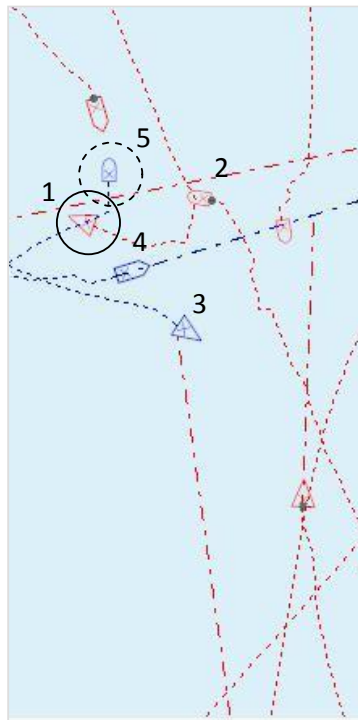
б)



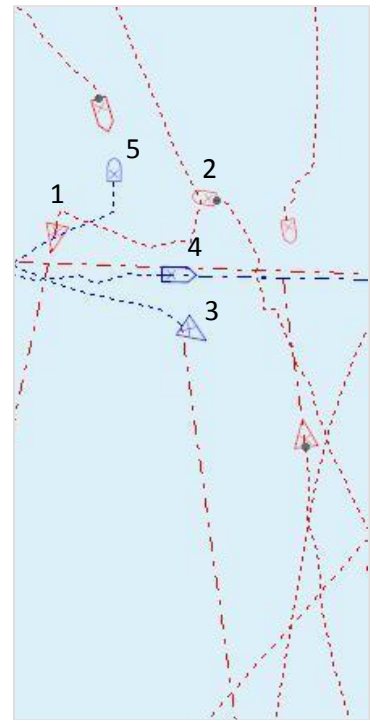
в)



г)



д)



ж)

Рис. 5. Приклад виконання маневрування агентом відносно рухомих та нерухомих агентів (відповідає випадку 3)

На рис. 5, б) агент 1 завершив процес аварійного маневрування відносно агента 2 та розпочав аварійне маневрування відносно нерухомого агента 3. На рис. 5, в) видно, що агент 1, завершивши ухилення від агента 3, потрапив у зону зіткнення рухомого агента 4. Як наслідок, як впливає з рис. 5, г), і агент 1, і агент 4 одночасно виконують аварійне маневрування. В результаті його виконання агент 1 потрапив в межі зони зіткнення нерухомого агента 5 (див. рис. 5, д)) і для уникнення зіткнення з останнім вимушений здійснити аварійне маневрування. На рис. 5, ж) агент 1 завершив процес аварійного маневрування і продовжив подальший рух у відповідності до власної оптимальної стратегії.

Як впливає з наведеного прикладу, всі агенти, що виконували аварійне маневрування, діяли у відповідності до вимог правил 8, 14 – 17 МППЗС-72. Так, наприклад, на рис. 5, а) та в) показані ситуації, коли агенти мають діяти у відповідності до вимог правила 14 (агенти зближуються на протилежних або майже протилежних курсах). Як впливає з рис. 5, б) та 5, г), виконані дії агентів повністю узгоджуються з вимогами цього правила: у всіх цих випадках агенти змінили курс праворуч і кожний з них пройшов у іншого з лівого борту. Крім того, на рис. 5, б) показано ситуацію виконання правила 17, а на рис. 5, д) – правила 15. Всі маневри, виконані агентами, відповідають також вимогам правил 8 та 16.

Висновки

Узагальнюючи вищевикладене, можна стверджувати, що розроблені методи маневрування відповідають вимогам відповідних правил МППЗС-72 та дозволяють адекватно поточним ситуаціям моделювати поведінку агентів з уникнення зіткнень в обставинах динамічно змінюваного оточуючого середовища.

1. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л. Поддержка решений по расхождению с судами. – Одесса: Феникс. – 2010. – 229 с.
2. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении. – Одесса: Морской тренажерный центр. – 2002. – 208 с.
3. Коккрофт А.Н., Ламеер Дж.Н.Ф. Руководство по Правилам предупреждения столкновения (МППСС-72). – СПб: ООО «МОРСАР». – 2005. – 320 с.
4. Северин В.В. Снижение аварийности от столкновения судов путем повышения эффективности выбранных маневров расхождения // Судовождение. – 2012. – Вып. 21. – С. 215–219.
5. Баранов Г.Л., Тарасюк В.И. Безкоаліційні диференціально-ігрові задачі термінального управління в зонах оптимізації навігаційного обслуговування об'єктів водного транспорту // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2011. – Вып. 4(20). – С. 10–15.
6. Астреин В.В. Системы предупреждения столкновения судов, тенденции развития (к 40-летию МППСС-72) // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2012. – № 1. – С. 7–17.
7. Бень А.П. Использование теоретико-игровой модели для представления и анализа навигационных ситуаций в системе поддержки принятия решений судоводителя // Искусственный интеллект. – 2010. – № 3. – С. 439–443.
8. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л. Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов // Судовождение. – 2008. – Вып. 15. – С. 35–43.
9. Шерстюк В.Г., Бень А.П. Гибридная интеллектуальная СППР для управления судном // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 490–499.
10. Шерстюк В.Г. Динамическая сценарно-прецедентная интеллектуальная система для управления подвижными объектами // Искусственный интеллект. – 2011. – № 4. – С. 362–373.
11. Шерстюк В.Г. Принципы интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению движением судна // Вестник ХНТУ. – 2009. – № 3(36). – С. 133–141.
12. Бень А.П. Формализация правил МППСС-72 в системе поддержки принятия решений судоводителя // Искусственный интеллект. – 2011. – № 3. – С. 327–331.
13. Вагущенко Л.Л. Алгоритм выработки рекомендаций по расхождению с судами // Судовождение. – 2012. – Вып. 21. – С. 42–50.
14. Вагущенко Л.Л. Планирование расхождения с судами // Судовождение. – 2010. – Вып. 18. – С. 28–37.
15. Тюпиков Е.Е. Имитационное моделирование процесса расхождения судов маневром изменения скорости // Судовождение. –

2011. – Вып. 20. – С. 233–237.

16. Яловець А.Л. До постановки задачі переслідування на площині // Проблеми програмування. – 2013. – № 2. – С. 95–100.
17. Яловець А.Л. Про один метод переслідування на площині // Проблеми програмування. – 2013. – № 3. – С. 117–124.
18. Яловець А.Л., Кондращенко В.Я., Арістов В.В. Свідоцтво №57880 про реєстрацію авторського права на твір «Комп’ютерна програма – “Мультиагентна система “Навігація”, версія 2.5” (“МАС Навігація 2.5”)». – Державна служба інтелектуальної власності України, 26.12.2014 р.

Одержано 15.01.2015

Про автора:

Яловець Андрій Леонідович,
доктор технічних наук,
заступник директора інституту.

Місце роботи автора:

Інститут програмних систем НАН України
03187, Київ-187,
Проспект Академіка Глушкова, 40.
Тел.: (044) 526 1538.
E-mail: yal@isofts.kiev.ua