

УДК 656.7.022

А. С. ПАЛЬОНІЙ, О. О. ПРОЗЕРСЬКИЙ

Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Україна

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРІШЕННЯ АВІАДИСПЕТЧЕРАМИ КОНФЛІКТІВ МІЖ ПОВІТРЯНИМИ СУДНАМИ З ПОЗИЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ

Запропонований підхід до моделювання помилок авіадиспетчерів за результатами вирішення конфліктів між повітряними суднами з позиції забезпечення безпеки польотів, який базується на використанні математичного апарату темпоральної логіки. Часова логіка застосовується для формалізації внутрішньої структури оцінюючих агентів, з яких складається мультиагентна експертна система оцінки дій авіадиспетчерів. Цей модуль входить до складу системи підтримки прийняття рішень інструктора тренажеру, що дозволяє автоматизувати функції інструктора з оцінки дій авіадиспетчерів. Запропоновано спосіб визначення значень кількісних показників ефективності дій авіадиспетчерів за критерієм забезпечення безпеки польотів при вирішенні конфліктів між повітряними суднами.

Ключові слова: авіадиспетчер, конфліктні ситуації між повітряними суднами, моделі помилок, мультиагентні системи, система підтримки прийняття рішень, темпоральна логіка.

Вступ

Оцінка рівня існуючих знань, навичок та вмій (ЗНВ) авіадиспетчерів передбачає отримання об'єктивних і обґрунтованих даних про результати їх діяльності на тренажерах управління повітряним рухом (УПР) і робочих місцях. Існуючому підходу до оцінки результатів діяльності авіадиспетчерів, заснованому на спостереженнях і суб'єктивних висновках інструкторів (експертів), властивий ряд недоліків. До головних з них відносяться такі, як можлива неповнота реєстрації дій авіадиспетчерів, суб'єктивно залежна ступінь декомпозиції діяльності диспетчерів, суб'єктивний аналіз дій авіадиспетчерів та їх оцінка. Таким чином, оцінка результатів дій авіадиспетчерів залежить від кількості осіб експертного складу, що залучений до оцінювання, від рівня їх компетентності, уважності і моральних якостей. Застосування моделей і алгоритмів автоматизованої реєстрації, класифікації, аналізу і оцінки дій авіадиспетчерів та їх комплексна реалізація у складі системи підтримки прийняття рішення (СППР) для інструктора тренажеру (експерта), дозволило б позбавити існуючу методіку оцінювання ЗНВ авіадиспетчерів від вищезазначених недоліків.

Автоматизований аналіз і оцінка дій авіадиспетчерів здійснюється із застосуванням мультиагентної експертної системи, що складається з сукупності взаємодіючих оцінюючих агентів на основі логічних схем. Кожний з агентів в цій системі – незалежна програмна сутність, що здійснює оцінку дій диспетчера за певним критерієм, та наділена функцією цілеспрямування, що знаходить вираз у послідовній

активації агентів в залежності від поточного результату оцінки кожним з агентів. Формально всі логічні схеми зводяться до формування висновків щодо правильності/неправильності дій авіадиспетчера як результату зіставлення цих дій з моделлю помилок за відповідним критерієм. Загалом для оцінки діяльності авіадиспетчера з вирішення проблемних ситуацій застосовуються такі критерії оцінки, як критерій «безпомилковості виявлення проблемної ситуації», критерій «своєчасності реагування на проблемну ситуацію», критерій «безпомилковості розташування за пріоритетами вирішення проблемних ситуацій», критерій «оптимальності обраної стратегії керування для вирішення проблемної ситуації», а також критерії, за якими оцінюється результативність вирішення проблем у повітряному русі за показниками забезпечення безпеки і економічності польотів та ефективності взаємодії [1, 2].

У більшості сучасних підходів до моделювання, заснованих на агентах, агенти розглядаються як *раціональні і автономні* утворення. Раціональний агент повинен відповідати таким характеристикам, як внутрішнє подання навколишнього середовища, повне сприйняття історії (перцептивної послідовності), дії, які агент може виконувати тощо. Оскільки мультиагентні системи часто використовуються для вирішення розподілених обчислювальних проблем, то раціональність поведінки індивідуальних агентів є їх найважливішою характеристикою для забезпечення високої ефективності обчислювальних алгоритмів [3 – 5]. Характеристика та семантика моделей агентів у мультиагентній системі можуть бути формалізовані, використовуючи математичний апа-

рат темпоральної логіки [6]. Будь-які події та дії в системі обслуговування повітряного руху відбуваються у часі, тому *часова логіка* є домінуючою при формалізації внутрішньої структури оцінюючих агентів, з яких складається мультиагентна система, у вигляді відповідних правил оцінки. Часова структура, що розглядається, уявляє собою просту лінійну модель дискретного часу, що відповідає плину реального часу, на протязі якого виникають події у повітряному русі та виконуються відповідні дії з боку авіадиспетчера.

Таким чином, метою даного дослідження є забезпечення достовірності і обґрунтованості оцінок діяльності авіадиспетчерів за рахунок розробки моделей автоматизованого оцінювання результатів їх дій з позиції забезпечення безпеки польотів при вирішенні конфліктів між повітряними суднами (ПС).

Постановка завдання дослідження

Моделювання помилок авіадиспетчерів проводиться у сфері їх діяльності з попередження зіткнень ПС у повітряному просторі. Забезпечення інтервалів між ПС – основна функція авіадиспетчера, при виконанні якої допускається найбільша кількість помилок. Згідно світової авіаційної статистики, помилка авіадиспетчера стає причиною понад 60% авіаційних пригод, в яких брали участь два або більше ПС.

Конфлікти між ПС розглядаються в наших моделях на трьох послідовних стадіях розвитку:

1. Потенційно-конфліктна ситуація (ПКС) – це таке взаємне розташування ПС і взаємозв'язок траєкторій їх польоту, яке через деякий час обов'язково призведе до конфліктної ситуації (небезпечному зближенню ПС) без втручання авіадиспетчера. При цьому відсутність факту порушення інтервалів між ПС визначається умовою:

$$(HD \geq \text{Sep.Min}) \text{ OR } (VD \geq \text{Sep.Min}), \quad (1)$$

де HD і VD – фактична горизонтальна і вертикальна відстань між ПС відповідно;

Sep.Min – мінімально дозволений інтервал ешелонування між ПС.

2. Конфліктна ситуація (КС) – це зближення ПС на інтервали менше за нормативні, коли вже має місце порушення інтервалів ешелонування між ПС, але ще відсутнє небезпечне зближення ПС. Така ситуація описується умовою:

$$\begin{aligned} &[(\frac{1}{2}\text{Sep.Min} \leq HD < \text{Sep.Min}) \text{ AND} \\ &\text{AND } (VD < \frac{1}{2}\text{Sep.Min})] \text{ OR} \\ &\text{OR } [(HD < \frac{1}{2}\text{Sep.Min}) \text{ AND} \\ &\text{AND } (\frac{1}{2}\text{Sep.Min} \leq VD < \text{Sep.Min})], \end{aligned} \quad (2)$$

де $\frac{1}{2}\text{Sep.Min}$ – половина від встановленого інтерва-

лу ешелонування між ПС.

3. Небезпечне зближення ПС (НЗ) – це незаплановане завданням на політ зближення ПС на інтервали менше половини від встановлених Правилами обслуговування повітряного руху з використанням систем спостереження. При НЗ виникає можливість зіткнення ПС, особливо між тими ПС, які не обладнані TCAS. Ситуація розглядається як *серйозне* порушення норм ешелонування ПС, коли виконується умова:

$$(HD < \frac{1}{2}\text{Sep.Min}) \text{ AND } (VD < \frac{1}{2}\text{Sep.Min}), \quad (3)$$

де HD і VD – фактична горизонтальна і вертикальна відстань між ПС відповідно;

$\frac{1}{2}\text{Sep.Min}$ – половина від встановленого інтервалу ешелонування між ПС.

Побудова моделей помилок

Ключовим показником успішності вирішення проблем у повітряному русі є показник *забезпечення безпеки польотів* (RS) як результат застосування обраної стратегії керування. За критерієм ефективності вирішення проблемних ситуацій диспетчером з позиції забезпечення безпеки польотів оцінюються фактичні *результати* вирішення проблемної (конфліктної) ситуації авіадиспетчером (наприклад, рішення ПКС з різними наслідками).

Під вирішенням ПКС мається на увазі не доведення потенційно-конфліктної ситуації до конфліктної. Під вирішенням КС слід розуміти відновлення безпечних інтервалів ешелонування диспетчером УПР до моменту спрацювання на борту TCAS RA. Крім того, вирішення авіадиспетчером ПКС/КС вважається *безпечним* у випадку успішного вирішення поточної ПКС/КС без ускладнення повітряної обстановки, тобто без створення вторинної ПКС/КС. Отже до безпечних варіантів рішення ПКС відносяться наслідки вирішення ПКС/КС, що наведені у табл. 1.

В ситуаціях, у яких диспетчер мав справу з ПКС, а згодом з КС (внаслідок невирішення ПКС), визначається припущення диспетчером УПР помилок обох класів – помилки невирішення ПКС та помилки вирішення/невирішення КС з *відповідними наслідками*. Отже диспетчер може припустити одразу дві помилки з вирішення одного конфлікту, що відповідають етапам його розвитку (ПКС-КС). При цьому пріоритет в оцінці ступеню важливості помилок повинен віддаватися безпосереднім результатам вирішення конфлікту, а вже у другу чергу враховувати наслідки його вирішення (створення / нестворення вторинних ПКС/КС).

До небезпечних/умовно-небезпечних варіантів рішень поточної ПКС з утворенням або без утво-

рення вторинних ПКС/КС, можна віднести такі, що наведені у табл. 2.

Результати дій авіадиспетчерів з вирішення ПКС знаходять вираз у вигляді різних станів s-пар ПКС, що класифікуються на потенційно-конфліктні та неконфліктні, тобто псевдо-конфліктні (конфліктні на думку диспетчера, що не відповідає реальній ситуації). Бульові змінні «Р» виражають стан, у якому знаходиться кожна s-а пара ПКС з р-пар:

$$\begin{cases} P[s] = \text{true}, \\ P[s] = \text{false}, \end{cases} \quad s \in [1, p]. \quad (4)$$

Аналогічним чином, класифікуються пари ПС на ті, що дійсно знаходяться у конфліктній ситуації

(з порушенням мінімумів ешелонування ПС), та ті, які перебувають у конфліктній ситуації на думку диспетчера (псевдо-конфліктні пари). Таким чином, бульові змінні «С» виражають стан, у якому знаходиться кожна s-а пара ПКС з р-пар:

$$\begin{cases} C[s] = \text{true}, \\ C[s] = \text{false}, \end{cases} \quad s \in [1, p]. \quad (5)$$

В наведених моделях термін «результат» використовується по відношенню до подій, пов'язаних з самим фактом вирішення /невирішення поточної ПКС/КС, а термін «наслідки» має відношення до створення / відсутності створення небажаних подій (нових ПКС/КС) внаслідок рішення поточних проблем у повітряному русі.

Таблиця 1

Модель можливих варіантів ефективного рішення ПКС/КС

Позначення	Опис безпечних рішень в термінах події
S_e^1	Дії диспетчера вирішили ПКС без ускладнення повітряної обстановки (без створення нової ПКС)
S_e^2	Дії диспетчера вирішили КС (відновили безпечні інтервали між ПС) без створення нової ПКС
S_e^3	Дії диспетчера вирішили КС (відновили безпечні інтервали між ПС) без створення вторинної КС
S_e^4	Дії диспетчера вирішили поточну ПКС, що призвело до появи додаткової ПКС у складній повітряній обстановці (вимушене рішення)
S_e^5	Дії диспетчера вирішили поточну КС, що призвело до появи додаткової ПКС у складній повітряній обстановці (вимушене рішення)

Таблиця 2

Модель можливих варіантів небезпечного (неефективного) рішення поточної ПКС/КС

Позначення	Опис небезпечних рішень в термінах події
S_{ie}^1	Дії диспетчера УПР вирішили поточну ПКС з непримусовим створенням нової (незапланованої) ПКС
S_{ie}^2	Дії диспетчера УПР вирішили поточну ПКС з непримусовим створенням вторинної КС між іншою парою ПС
S_{ie}^3	Дії диспетчера УПР не вирішили поточну ПКС, створивши нову ПКС між іншою парою ПС
S_{ie}^4	Дії диспетчера УПР не вирішили поточну ПКС, створивши при цьому вторинну КС між іншою парою ПС
S_{ie}^5	Дії диспетчера УПР не вирішили поточну ПКС без створення нової ПКС/КС (без наслідків)
S_{ie}^6	Дії диспетчера відновили безпечне ешелонування між ПС (вирішили КС), створивши при цьому нову ПКС
S_{ie}^7	Дії диспетчера відновили безпечне ешелонування між ПС, створивши при цьому вторинну КС
S_{ie}^8	Дії диспетчера не вирішили КС, створивши при цьому нову ПКС
S_{ie}^9	Дії диспетчера не вирішили КС, створивши при цьому вторинну КС
S_{ie}^{10}	Дії диспетчера не вирішили КС, без створення при цьому нової ПКС/КС (без наслідків)
S_{ie}^{11}	Дії диспетчера УПР по відношенню до неконфліктної пари ПС створили реальну ПКС на «пустому місті», тобто привели до появи «незапланованого» потенційного конфлікту з цією ж чи іншою парою ПС
S_{ie}^{12}	Дії диспетчера УПР по відношенню до неконфліктної пари ПС створили КС з цією ж чи іншою парою ПС

У відповідності з табл. 2, набір можливих негативних подій-наслідків складатиме (6-11):

$$A_S^{ПКС \rightarrow ПКС} = \{S_{ie}^1 \vee S_{ie}^3\}, \quad (6)$$

$$A_S^{ПКС \rightarrow КС} = \{S_{ie}^2 \vee S_{ie}^4\}, \quad (7)$$

$$A_S^{КС \rightarrow ПКС} = \{S_{ie}^6 \vee S_{ie}^8\}, \quad (8)$$

$$A_S^{КС \rightarrow КС} = \{S_{ie}^7 \vee S_{ie}^9\}, \quad (9)$$

$$A_S^{Н \rightarrow ПКС/КС} = \{S_{ie}^{11} \vee S_{ie}^{12}\}, \quad (10)$$

$$A_S^{ПКС/КС \rightarrow Н} = \{S_{ie}^5 \vee S_{ie}^{10}\}. \quad (11)$$

Крім того, процедура з рішення ПКС, що була реалізована по відношенню до псевдо-конфліктної пари ПС, може мати нейтральний ефект $A_S^{Н \rightarrow Н} = \{S_n\}$, не впливаючи суттєво на повітряну обстановку, а отже і на безпеку польотів. Оскільки, у даному випадку, вплив на повітряну обстановку, внаслідок припущеної диспетчером помилки у ідентифікації ПКС, відсутній, то така ситуація не розглядається як помилка за цим критерієм. Однак такі випадки, як правило, мають негативний вплив на завантаженість диспетчерів і пілотів ПС, а також призводять до перевитрат авіапалива під час виконання зайвих маневрів. Такий вплив оцінюється за відповідними критеріями оцінки, що визначають якість УПР під час вирішення ПКС з позицій ефективності і економічності керування.

Негативні події-наслідки рішення ПКС можливо представити у вигляді дерев рішень, що вихляють у майбутнє (рис. 1).

Таким чином, усі можливі наслідки рішення ПКС з позиції забезпечення безпеки польотів, для їх однозначної інтерпретації, можливо представити у вигляді «категорій ефективності»:

1. **Ефективне** рішення (S_e^1, S_e^2, S_e^3) ПКС/КС передбачає вирішення поточної ПКС без наслідків, тобто без утворення нових потенційно-конфліктуючих (конфліктуючих) пар ПС.

2. **Рациональне** рішення (S_e^4, S_e^5) має місце у випадку вирішення поточної ПКС/КС з примусовим створенням додаткових ПКС. При чому, таке рішення є єдино можливим в умовах дії об'єктивних обмежень поточної обстановки. Особливість даного типу рішення – ефективний тип рішення не може бути отриманий, тому оцінка ефективності дій диспетчера повинна враховувати рівнозначність обох типів рішення.

3. **Нерациональне** рішення ПКС (S_{ie}^1, S_{ie}^2) та КС (S_{ie}^6, S_{ie}^7) має місце при вирішенні поточної

ПКС/КС з *непримусовим* створенням додаткової ПКС/КС, при цьому диспетчер мав альтернативні безконфліктні варіанти вирішення ПКС/КС, які не ускладнюють повітряну обстановку.

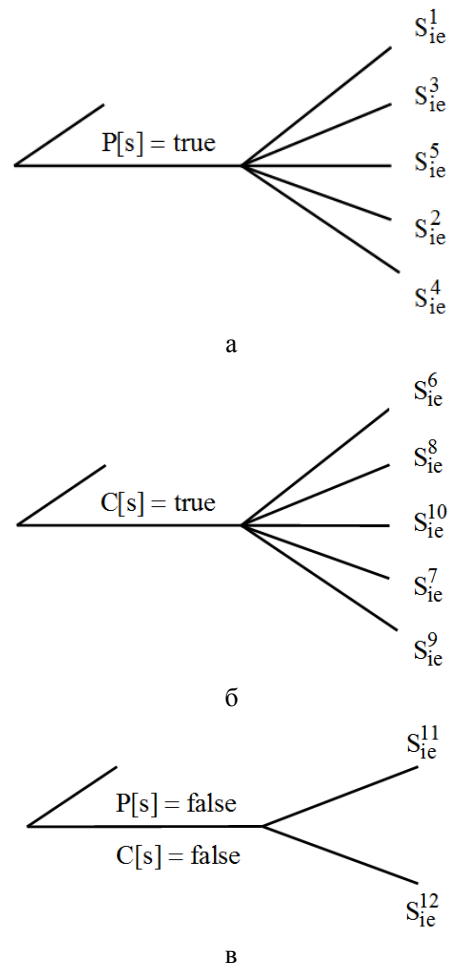


Рис. 1. Схематичне подання дерев рішень в залежності від стану конфліктності пар ПС: а – при наявності ПКС; б – при наявності КС; в – при відсутності ПКС/КС

4. **Потенційно-небезпечне** рішення (S_{ie}^{11}, S_{ie}^{12}) має місце, коли неконфліктна пара ПС керувалась як конфліктна, що призвело до утворення ПКС/КС між цією ж чи іншою парою ПС. Потенційна небезпека створеної ПКС складається з непрогнозованості наслідків з позиції безпеки польотів, що пов'язане з питанням: чи зможе диспетчер правильно і своєчасно ідентифікувати створену ПКС та встигнути її вирішити. Головним в даній ситуації є те, що початкові дії диспетчера не були пов'язані з вирішенням дійсної ПКС, а навпаки, – саме вони привели до появи реальної ПКС (КС). Таким чином, такий тип рішення призводить до безпідставного ускладнення повітряної обстановки та появи додаткових ризиків виникнення небезпечних зближень ПС.

5. **Небезпечне** рішення ($S_{ie}^3, S_{ie}^4, S_{ie}^5$) уявляє собою рішення, що призвело до переростання ПКС в дійсно конфліктну ситуацію, тобто до порушення встановлених мінімумів ешелонування ПС. Така ситуація стосується і невіршення групового конфлікту, коли вирішується конфлікт лише між однією парою ПС, а між іншими парами відбувається порушення інтервалів.

6. **Катастрофічне** рішення ($S_{ie}^8, S_{ie}^9, S_{ie}^{10}$) розглядається у випадку невіршення конфліктної ситуації диспетчером УПР до моменту спрацювання TCAS RA на борту ПС.

7. **Нейтральне** рішення (S_n) уявляє собою рішення, що було прийнято неадекватно ситуації, але не призвело до появи будь-яких негативних наслідків. В контексті, що розглядається, дії авіадиспетчера, які були виконані по відношенню до псевдоконфліктної пари ПС, не стали причиною створення реальної ПКС/КС.

У випадках, коли диспетчер має справу з вторинними ПКС/КС, викликані його власними діями, аналіз якості їх рішення здійснюється згідно цієї ж моделі. При цьому циклічно активується процедура оцінки наслідків вирішення незапланованих ПКС (КС) до завершення ефекту «доміно». «Точкою входу» в процедуру оцінки може бути не ПКС, а саме КС, коли ПС виконує раптові неочікувані маневри і відбувається непрогнозоване порушення інтервалів між ПС. Ефект розповсюджується на первинні (поточні) і вторинні (наслідкові) ПКС. При такому ва-

ріанті подій, оцінці підлягає лише результат реалізації управляючих дій диспетчера у відповідь на порушення норм ешелонування ПС відповідно етапу розвитку КС.

У випадку існування групового конфлікту, визначаються результати вирішення ПКС/КС між усіма парами ПС у складі конфлікту, що перебувають у транзитивному відношенні, згідно наведеної моделі. Помилки з невіршення ПКС/КС між однією, двома або декількома парами ПС у груповому конфлікті трактується як одна помилка з невіршення відповідної групової ПКС/КС. В якості цієї помилки виступає найбільш вагома помилка з позиції наслідків вирішення/невіршення ПКС/КС між однією з пар ПС у груповому конфлікті.

Застосування темпоральної логіки

Для моделювання помилок авіадиспетчера з ефективності вирішення ПКС застосовується *модальна темпоральна логіка* (BPTL – Branching-Time Propositional Temporal logic), що дозволяє виразити послідовність виникнення подій у часі, абстрагуючись від деталей, які супроводжують ці події.

До базових темпоральних формул, що застосовуються у наведених нижче моделях відносяться: $\circ F$ – F істинно після наступного переходу ($F \wedge \circ G \implies F.G$ – означає, що F істинно зараз, а G істинно відразу ж після наступного переходу); $\diamond F$ – F істинно зараз (now) та через деякий час у майбутньому (sometime in the future); $\neg F$ – не F; $F \wedge G$ – F та G; $F \vee G$ – F або G.

Таблиця 3

Позначення можливих подій під час вирішення ПКС/КС

Позначення	Опис подій
<i>1. Диспетчером застосований метод щодо вирішення конфлікту</i>	
A_S^1	Диспетчер виконав дії щодо рішення існуючої ПКС між s-ю парою ПС
A_S^2	Диспетчер виконав дії щодо рішення існуючої КС між s-ю парою ПС
A_S^3	Диспетчер виконав дії щодо «рішення» псевдо конфлікту між s-ю парою ПС
<i>2. Диспетчером обраний ефективний метод ешелонування ПС</i>	
M_S	Диспетчер обрав метод ешелонування ПС, який був здатний вирішити ПКС/КС між s-ю парою ПС
<i>3. Результати рішення диспетчером поточної ПКС/КС</i>	
R_S^1	Дії диспетчера не вирішили поточну ПКС (відбулося порушення мінімумів ешелонування)
R_S^2	Дії диспетчера не вирішили поточну КС (конфлікт не вирішений до отримання пілотом TCAS RA)
<i>4. Наслідки рішення диспетчером поточної ПКС/КС</i>	
B_S^1	Дії диспетчера створили вторинну (незаплановану) ПКС
B_S^2	Дії диспетчера створили вторинну КС

Типові помилки авіадиспетчера з вирішення ПКС/КС за різними наслідками можливо формалізувати наступним чином:

1. Авіадиспетчер виконав дії щодо рішення s-ї ПКС (A_S^1), застосувавши метод ешелонування, який здатен вирішити ПКС (M_S); результатом його дій стало вирішення поточної ПКС ($\neg R_S^1$) з негативними наслідками – непримусове створення нової (незапланованої) ПКС (B_S^1):

$$S_{ie}^1 = \diamond((A_S^1 \wedge M_S) \cdot \neg R_S^1 \cdot B_S^1). \quad (12)$$

2. Аналогічно формулюється судження про успішне вирішення s-ї ПКС зі створенням відразу конфліктної ситуації між іншою парою ПС (B_S^2):

$$S_{ie}^2 = \diamond((A_S^1 \wedge M_S) \cdot \neg R_S^1 \cdot B_S^2). \quad (13)$$

3. Авіадиспетчер виконав дії щодо рішення s-ї ПКС (A_S^1), застосувавши метод ешелонування, який був здатен вирішити ПКС (M_S). В результаті ПКС не була вирішена (відбулося порушення нормативних інтервалів між ПС) (R_S^1) з непримусовим створенням незапланованої ПКС між іншою парою ПС (B_S^1):

$$S_{ie}^3 = \diamond((A_S^1 \wedge M_S) \cdot R_S^1 \cdot B_S^1). \quad (14)$$

4. Авіадиспетчер виконав дії, які не вирішили s-у ПКС, створивши при цьому КС між іншою парою ПС:

$$S_{ie}^4 = \diamond((A_S^1 \wedge M_S) \cdot R_S^1 \cdot B_S^2). \quad (15)$$

5. Авіадиспетчер виконав дії, які не вирішили s-у ПКС, не створивши при цьому нової ПКС або КС, тобто без наслідків:

$$S_{ie}^5 = \diamond((A_S^1 \wedge M_S) \cdot R_S^1 \cdot \neg(B_S^1 \wedge B_S^2)). \quad (16)$$

6. Авіадиспетчер виконав дії по відношенню до КС (A_S^2), які дозволили відновили безпечно ешелонування між ПС, тобто вирішити s-у КС до TCAS RA, створивши при цьому нову ПКС між іншою парою ПС (B_S^1):

$$S_{ie}^6 = \diamond((A_S^2 \wedge M_S) \cdot \neg R_S^2 \cdot B_S^1). \quad (17)$$

7. Авіадиспетчер виконав дії по відношенню до КС між s-ю парою ПС, результатом яких стало вирішення поточної КС зі створенням нової КС між іншою парою ПС (B_S^2):

$$S_{ie}^7 = \diamond((A_S^2 \wedge M_S) \cdot \neg R_S^2 \cdot B_S^2). \quad (18)$$

8. Авіадиспетчер виконав дії з рішення s-ї КС, які не тільки не вирішили КС, а і створили при цьому ПКС між іншою парою ПС:

$$S_{ie}^8 = \diamond((A_S^2 \wedge M_S) \cdot R_S^2 \cdot B_S^1). \quad (19)$$

9. Авіадиспетчер виконав дії з рішення s-ї КС, які її не вирішили, а призвели до появи КС між іншою парою ПС:

$$S_{ie}^9 = \diamond((A_S^2 \wedge M_S) \cdot R_S^2 \cdot B_S^2). \quad (20)$$

10. Авіадиспетчер виконав дії, які не вирішили s-у КС і не створили при цьому ПКС/КС між іншою парою ПС:

$$S_{ie}^{10} = \diamond((A_S^2 \wedge M_S) \cdot R_S^2 \cdot \neg(B_S^1 \wedge B_S^2)). \quad (21)$$

11. Авіадиспетчер виконав дії по відношенню до неконфліктної пари ПС (A_S^3), які створили реальну ПКС з цією ж чи іншою парою ПС (B_S^1):

$$S_{ie}^{11} = \diamond(A_S^3 \cdot B_S^1). \quad (22)$$

12. Авіадиспетчер виконав дії по відношенню до неконфліктної пари ПС (A_S^3), які створили КС з цією ж чи іншою парою ПС (B_S^2):

$$S_{ie}^{12} = \diamond(A_S^3 \cdot B_S^2). \quad (23)$$

Кількісна оцінка результатів дій авіадиспетчерів

В результаті аналізу наслідків застосування авіадиспетчером УПР обраної стратегії керування за показником забезпечення *безпеки польотів*, формуються функції часткових критеріїв оцінки $F(RS_k^s)$, що характеризують кількісні показники успішності вирішення ПКС/КС між s-ю конфліктною парою ПС виконанням k-ї процедури:

$$F(RS_k^s) = \begin{cases} 1 - \text{при небезбечному вирішенні} \\ \quad \text{ПКС / КС } (RS_k^{s(F)}), \\ 0 - \text{при безбечному вирішенні} \\ \quad \text{ПКС / КС } (RS_k^{s(T)}). \end{cases} \quad (24)$$

Для визначення кількісного показника за критерієм ефективності застосування обраної стратегії керування при вирішенні ПКС/КС з позиції забезпечення безпеки польотів (RS_k^s) застосовується на-

ступна формула:

$$RS_k^p = 1 - [(RS_k^{ПКС(F)} \cdot w_i^{RS} \cdot f(h_s^{макс})) + (RS_k^{КС(F)} \cdot w_i^{RS} \cdot f(h_s^{макс}))], \quad (25)$$

де $RS_k^{ПКС(F)}$ – значення кількісного показника за критерієм результативності застосування авіадиспетчером обраної стратегії керування за показником забезпечення безпеки польотів, що відповідає помилковому (небезпечному) вирішенню потенційно-конфліктної ситуації (ПКС) за безпосередніми результатами і наслідками;

$RS_k^{КС(F)}$ – значення кількісного показника за цим же критерієм, що відповідає неефективному вирішенню/невирішенню конфліктної ситуації (КС) авіадиспетчером;

w_i^{RS} – коефіцієнти важливості помилки і-го типу $0 \leq w_i^{RS} \leq 1$;

$h_s^{макс}$ – змінна, що визначає статус ПС, які приймали участь у s-у конфлікті ($h_s = 1, 2$ для ПС в аварійному стані; $h_s = 1, 1$ для ПС, що виконували політ як літерний рейс; $h_s = 1, 0$ для ПС без особливого статусу) – за основу береться статус того ПС, що приймав участь у конфлікті, у якого h_s має максимальне значення.

Вагові коефіцієнти важливості помилок за даним критерієм відбивають ступінь небезпечності результатів рішення (не вирішення) ПКС/КС авіадиспетчером. Кількісні значення цих коефіцієнтів були отримані шляхом експертного опитування інструкторського складу ТЦ ОПР КЛА НАУ з застосуванням методу попарних порівнянь.

Висновок

Таким чином, за допомогою темпоральної логіки можливо представити дії авіадиспетчера, їх безпосередні результати і вторинні наслідки з вирішення ПКС/КС (12 – 23), описати послідовність їх появи та взаємозв'язок між собою у часовому вимірі. Застосування такого підходу до моделювання помилок диспетчера УПР дозволяє реалізувати міркування, що враховують хід процесу припущення помилок, спосіб його переходу до ситуації, яка спостерігається. Це дозволяє побудувати ефективний механізм ідентифікації помилок авіадиспетчера, який акцентує увагу на джерелах проблемних ситуацій, характеру їх розвитку з часом та взаємозв'язках небезпечних подій у повітряному русі.

Література

1. Неделько, С. Н. Разработка системы критериев оценки для автоматизированного анализа действий авиадиспетчеров на тренажерах обслуживания воздушного движения [Текст] / С. Н. Неделько, В. А. Григорьевский, А. С. Паленный // *Научові праці академії*. – Кіровоград: Вид-во ДЛАУ. – 2005. – Вип. 5. – С. 260-266.
2. Паленный, А. С. Применение мультиагентного подхода для реализации автоматизированного анализа действий авиадиспетчеров на комплексных тренажерах обслуживания воздушного движения [Текст] / А.С. Паленный // *Научові праці академії*. – Кіровоград: Вид-во ДЛАУ. – 2007. – Вип. 7. – С. 145-156.
3. Stroeve, S. H. Literature survey of safety modelling and analysis of organizational processes [Text] / S. H. Stroeve, A. Sharpanskykh, H. A. P. Blom. – NLR-CR-2007-156, NLR Amsterdam, 2007. – 87 p.
4. Modelling of human performance-related hazards in ATM [Text] / T. Bosse, A. Sharpanskykh, J. Treur, H. A. P. Blom, S. H. Stroeve // *Proc. 3rd Int. Air Transport and Operations Symposium (ATOS2012), Delft, The Netherlands, 2012. – 12 p.*
5. Agent-based modelling of hazards in ATM [Text] / T. Bosse, A. Sharpanskykh, J. Treur, H. A. P. Blom, S. H. Stroeve // *Proc. 2nd SESAR Innovation Days, Braunschweig, Germany, 2012. – 8 p.*
6. DESIRE: Modeling Multi-Agent Systems in a Compositional Formal Framework [Text] / F. M. T. Brazier, B. M. Dunin-Keplicz, N. R. Jennings, J. Treur // *International Journal of Cooperative Information Systems. Special issue on Formal Methods in Cooperative Information Systems: Multi-Agent Systems, 1997. – 29 p.*

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ
АВИАДИСПЕТЧЕРАМИ КОНФЛИКТОВ МЕЖДУ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ
С ПОЗИЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ**

А. С. Паленный, А. А. Пирозерский

Предложен подход к моделированию ошибок авиадиспетчеров по результатам решения конфликтов между воздушными судами с позиции обеспечения безопасности полетов, основанный на использовании математического аппарата темпоральной логики. Временная логика применяется для формализации внутренней структуры оценивающих агентов, из которых состоит мультиагентная экспертная система оценки действий авиадиспетчеров. Этот модуль входит в состав системы поддержки принятия решений инструктора тренажера, позволяющей автоматизировать функции инструктора по оценке действий авиадиспетчеров. Предложен способ определения значений количественных показателей эффективности действий авиадиспетчеров по критерию обеспечения безопасности полетов при решении конфликтов между воздушными судами.

Ключевые слова: авиадиспетчер, конфликтные ситуации между воздушными судами, модели ошибок, мультиагентные системы, система поддержки принятия решений, темпоральная логика.

**DEVELOPMENT OF MODELS TO ASSESS AIR TRAFFIC CONTROLLER
SAFE PERFORMANCE IN AIRCRAFT CONFLICT RESOLUTION**

A. S. Palennyj, A. A. Pirozersky

An approach based on temporal logic for modeling air traffic controller errors in safe conflict resolution is offered. Temporal logic applies to formalize internal structure of agents in multi-agent system for performance assessment of air traffic controllers. This module is a part of the decision support system for trainer which allows automating tasks of analysis and assessment acts of air traffic controllers. Method for determining the values of quantitative indicators of efficiency of air traffic controllers in safe conflict resolution is offered.

Key words: air traffic controller, aircraft conflicts, models of errors, multi-agent systems, decision support system, temporal logic.

Пальоний Андрій Сергійович – викладач каф. обслуговування повітряного руху, Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кіровоград, Україна, e-mail: andreypalen@gmail.com.

Пірозерський Олександр Олександрович – курсант, Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кіровоград, Україна, e-mail: j737green737@gmail.com.