

Контроль космічного та повітряного простору

УДК 004.8:621.3

doi: 10.26906/SUNZ.2020.3.013

А. В. Колесник¹, В. М. Павленко², В. А. Затхей³

¹ Льотна академія НАУ, Кропивницький, Україна

² Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

³ Харківський національний економічний університет імені Саймона Кузнеця, Харків, Україна

МЕТОД РОЗРОБКИ МОДЕЛЕЙ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗНАТЬ ПРО АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ ДЛЯ СППР АВІАДИСПЕТЧЕРА

Анотація. Предметом вивчення в статті є дослідження можливості застосування апарату байєсівських мереж для побудови моделей розвитку аварійних ситуацій на повітряному судні. **Метою** є розробка моделей представлення знань про аварійні ситуації в польоті для її подальшого застосування при розробці СППР авіадиспетчера. **Завдання:** визначення і аналіз чинників, що впливають на процес прийняття рішення щодо можливості продовження польоту у випадку виникнення особливого випадку в польоті на прикладі відмови двигуна; аналіз чинників, що впливають на визначення рівня ризику (потенційного збитку) при виконанні вимушеної посадки; побудова ймовірнісних моделей визначення можливості продовження польоту та визначення потенційного збитку альтернатив завершення польоту на основі мережі Байєса. Використовуваними **методами** є: методи аналізу і синтезу складних інформаційних систем, методи імітаційно-статистичного моделювання. Отримані такі **результати**. Визначено множини факторів, що впливають на процес прийняття рішення у випадку виникнення такого особливого випадку як відмова двигуна на повітряному судні. Побудовано ймовірнісну модель, що відображає процес прийняття рішення щодо визначення можливості продовження польоту при відмові двигуна на повітряному судні в польоті. Побудовано ймовірнісні моделі визначення потенційного збитку для випадку виконання вимушеної посадки на аеродромі та майданчику. Обґрунтовано вибір програмного засобу, а саме системи ймовірнісного програмування Figafo, для реалізації розроблених байєсівських моделей. **Висновки.** Напрямок подальших досліджень є розробка методу автоматизованого вироблення рішень при виникненні особливих випадків в польоті з використанням побудованих ймовірнісних моделей для його використання при побудові СППР авіадиспетчера

Ключові слова: відмова двигуна, особливий випадок в польоті, потенційний збиток, вимушена посадка, авіадиспетчер.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Значну роль в забезпеченні безпеки авіаційних перевезень займає диспетчер управління повітряним рухом, від професіоналізму якого залежить життя багатьох сотень людей. В зв'язку з тим, що авіаперевезення вважаються найбільш безпечним, швидким та комфортним видом перевезень, це призводить до постійного збільшення кількості пасажирів і, відповідно, підвищення кількості повітряних суден у повітряному просторі. Диспетчеру доводиться працювати в умовах невеликих інтервалів між літаками, їх високих швидкостях та висотах, високої щільності руху, різноманітності повітряних суден та різних метеоумов. При цьому навантаження на кожного з авіадиспетчерів значно збільшується. Це обумовлено роботою в умовах великого інформаційного навантаження, постійно змінюваної повітряної обстановки, відповідальністю за життя багатьох людей, необхідністю вирішувати нестандартні задачі і, головне, дефіцитом часу на прийняття рішення.

Одним з важливих факторів, що впливає на ступінь навантаженості авіадиспетчерів є рівень автоматизації процесу управління повітряним рухом. Для забезпечення підтримки операторської діяльно-

сті, якісного прогнозування та своєчасної видачі правильних рекомендацій застосовують системи підтримки прийняття рішень (СППР), що являють собою інтерактивні системи, які використовують обладнання, програмне забезпечення, дані, базу моделей і роботу оператора з метою підтримки всіх стадій прийняття рішень. При цьому особливу увагу необхідно приділити підтримці діяльності оператора у випадку виникнення особливих випадків в польоті. Для вирішення цієї задачі важливим кроком є розробка моделей представлення знань про аварійні ситуації, що можуть виникати в польоті.

Особливістю задачі управління повітряним рухом є прийняття рішень в умовах відсутності, нестачі або неточності інформації на поточний момент часу, тобто вона відноситься до класу задач, що слабо формалізуються. Для проектування СППР використовують різні методи. Одним з ефективних підходів, що дозволяє подолати проблему невизначеності є клас ймовірнісних методів, що ґрунтуються на байєсівському підході [1]. Ймовірнісні міркування дозволяють поєднувати знання щодо предметної області з ймовірнісними законами, і таким чином враховувати фактори, що напряму не спостерігаються, але є важливими при прийнятті рішення. Незважаючи на те, що застосування мереж Байєса для побудови моделей при створенні комп'ютерних

систем та засобів, що навчаються, в різних областях здійснюється з 90-х років минулого сторіччя, активне використання байєсівських методів спостерігається лише останнє десятиліття. Це обумовлено рядом факторів, а саме: значним ускладненням математичного апарату при збільшенні моделі, високим вхідним рівнем ймовірнісних знань експерта, що розв'язує проблему, недостатньою виразністю відомих ймовірнісних моделей, рішення для яких доведені, складністю програмування алгоритмів ймовірнісного висновку, високою складністю валідації та верифікації програмної реалізації розроблених алгоритмів. Стрімкий розвиток обчислювальної техніки сприяв тому, що байєсівські методи знову набули широкої популярності і активно використовуються при побудові систем підтримки прийняття рішень у різних предметних областях.

Мета статті - розробка ймовірнісних моделей представлення знань про аварійні ситуації в польоті з використанням байєсівських мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [2] пропонується СППР авіадиспетчера, в якій застосовуються нейронні мережі для визначення рівня потенційного збитку при виборі певної альтернативи завершення польоту. Однак на відміну від запропонованої моделі на основі нейромережі, що відноситься до класу "чорних скриньок" застосування байєсівських мереж при побудові моделей дозволить отримати зрозуміле пояснення одержаних висновків і має логічну інтерпретацію.

Основна частина

Під особливим випадком в польоті розуміють ситуацію, що виникає у випадку відмови функціональних систем повітряного судна чи потрапляння його в умови, коли дії екіпажу будуть відрізнятись від встановленого режиму польоту і внаслідок якої виникає загроза безпеці повітряного судна і людям, що знаходяться в ньому [3]. В даній статті розглянемо такий особливий випадок в польоті як відмова двигуна на повітряному судні.

Виникнення такого особливого випадку в польоті, як відмова двигуна може бути пов'язано з наступними типами відмов [3]:

- нестійка робота двигуна, яка може бути спричинена зменшенням тяги, підвищенням температури мастила, зниженням тиску мастила;
- зупинка двигуна, обумовлена повною витратою палива, відмовою системи подачі палива, низькою якістю, забрудненням палива;
- руйнування лопаток компресора двигуна внаслідок попадання птахів, каміння та інших предметів;
- пожежа двигуна, яка може бути спричинена витоком палива, помпажем та іншими причинами;
- нелокалізоване руйнування двигуна;
- інші причини.

Точне та правильне визначення типу відмови двигуна може бути здійснено по багатьом ознакам, як по прямим так і другорядним. Найбільш характерними ознаками відмови двигуна є: зниження тиску мастила та палива, зниження обертів, поява тряски

двигуна, зміна звуку, крен у сторону двигуна, який відмовив тощо. Оцінка стану та контролю працездатності двигуна здійснюється по вбудованим приладам контролю, світовою та звуковою сигналізацією.

У випадку виникнення відмови двигуна екіпаж повітряного судна діє згідно керівних документів, а саме: Керівництва з льотної експлуатації для певного типу повітряного судна і Настановою з виконання польотів у цивільній авіації. Командир ПС повинен прийняти відповідне рішення щодо можливості подальшого продовження польоту.

Основними факторами, що впливають на визначення можливості продовження польоту у випадку відмови двигуна є тип ПС (кількість двигунів ($N_{\text{дв.ПС}}$), кількість двигунів, що відмовили ($N_{\text{відм.дв.}}$), тип відмови.

На основі вказаних факторів побудуємо причинно - наслідкову ймовірнісну модель визначення можливості продовження польоту у вигляді мережі Байєса.

Побудову мережі будемо здійснювати за наступними принципами:

- кореневими вершинами мережі є типи відмов двигуна на повітряному судні, а саме: зупинка двигуна (ЗД), пожежа двигуна (ПД), нестійка робота двигуна (НРД), руйнування гвинта (РГ), а також фактори, що відносяться безпосередньо до повітряного судна, а саме: кількість двигунів ПС (КД) та кількість робочих двигунів (КРД);

- листком мережі є вершина, що позначає рішення, яке може бути прийняте внаслідок реалізації ситуації відмови двигуна.

Додатково необхідно визначити кількість можливих значень для всіх вершин мережі:

- для вершин, що відображають типи відмов двигуна таких термів буде два ("*відмова проявилась*" і "*відмова не проявилась*");

- для вершини, що відображає кількість двигунів ПС (КД) та кількість робочих двигунів таких термів чотири ("*1*", "*2*", "*3*", "*4*");

- для вершини, що відображає прийняте рішення щодо можливості продовження польоту (МПП) буде два терми: "*Продовження польоту*", "*Вимушена посадка*".

Графова модель представлена на рис. 1.

У випадку прийняття рішення виконання вимушеної посадки множиною доступних альтернатив є наступні: посадка на найближчому аеродромі і посадка на майданчик.

Розглянемо чинники, які впливають на наслідки виконання посадки для кожної з вказаних альтернатив. Для випадку посадки на аеродромі на потенційні наслідки (збиток) будуть впливати наступні чинники:

- технічна придатність аеродрому;
- тип аеродрому;
- метеомінімум аеродрому;
- придатність аеродрому за метеоумовами;
- досвід КПС.
- можливий злив пального для забезпечення необхідної посадкової маси.

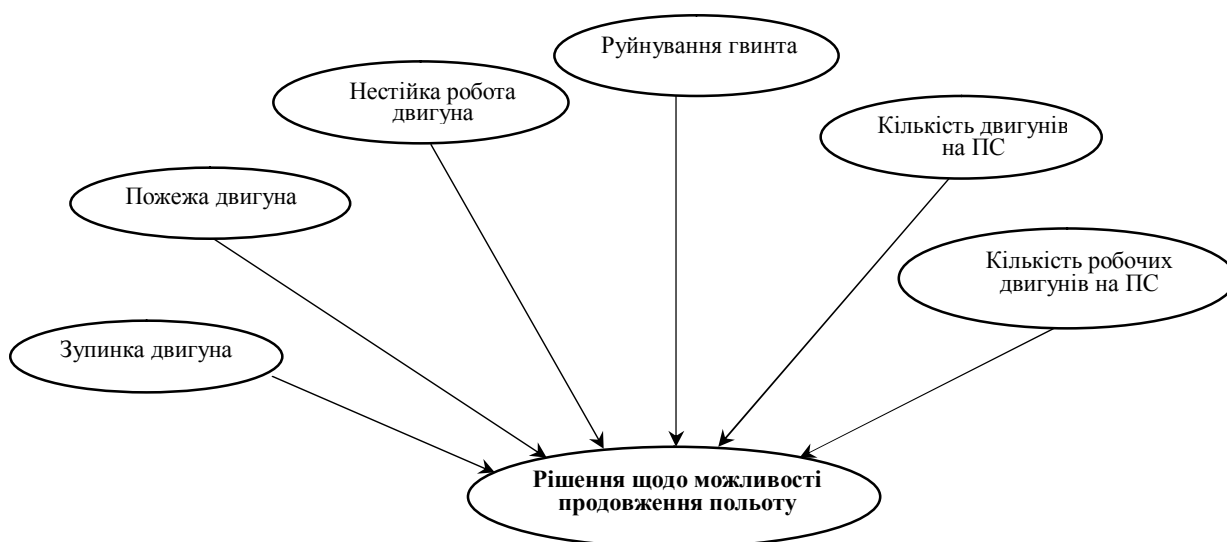


Рис. 1. Модель визначення можливості продовження польоту

Розглянемо більш детально вказані чинники. *Технічну придатність аеродрому* (ТПА) визначають: стан поверхні злітно-посадкової смуги (ЗПС), відповідність довжини ЗПС необхідній довжині для даного типу повітряного судна, оснащення та справність радіотехнічних засобів посадки, наявність ремонтних робіт на ЗПС та можливість її звільнення.

В залежності від типу аеродрому поверхня ЗПС може бути штучною або ґрунтовою або мати обидва типи ЗПС. Умови гальмування ПС на покриттях штучної ЗПС характеризується величиною коефіцієнта зчеплення, товщиною і видом атмосферних опадів (сніг, вода, ожеледиця) [4].

При відхиленні від нормативних умов посадка на штучну злітно-посадкову смугу забороняється [4]. Ґрунтові аеродрому в непогоду "розкисають", що унеможливує їх експлуатацію. Можливість експлуатації ґрунтової ЗПС залежить від міцності ґрунту, міцності й товщини снігу, значення яких залежать від типу ПС [5].

Необхідна для посадки довжина ЗПС залежить від таких чинників:

- тактико-технічних характеристик ПС (типу двигуна, посадкової маси);
- метеоумов (температура повітря, параметри вітру, видимість);
- характеристик ЗПС (нахил, стан поверхні);
- розташування аеродрому (висота над рівнем моря).

Розглянемо випадки, коли потрібна довжина ЗПС для посадки L_n збільшується відносно стандартної L_{cm} [4]:

- збільшення посадкової маси ПС M_{noc} на 1 тону відносно нормативної $L_{норм, noc}$ – збільшення на 100 м;

- збільшення температури повітря $t_{нов}$ на 1°C відносно стандартної ($t_{нов, cm} = 15^\circ\text{C}$) – збільшення на 1%;

- наявність вітру попутного напрямку зі швидкістю $V_{віт} = 1\text{ м/с}$ – збільшення на 30 м;
- фактичній видимості рівній або меншій за 1000 м – збільшення на 15%;
- мокра ЗПС – збільшення на 15%;
- L_n збільшується на 3% на кожний 1% нахилу $N_{ЗПС}$ смуги вниз у напрямку магнітного шляхового кута посадки ($MШК_{noc}$);
- висоті аеродрому $H_{аер}$ над рівнем моря ($H_{рм} = 0$) 1 м – збільшення на 0,00233%.

У випадку, якщо на ЗПС виконуються довготривалі ремонтні роботи використання її для посадки неможливе. При короточасних роботах на ЗПС, наприклад, очищення штучних покриттів від пилу, бруду і сторонніх предметів, необхідно розрахувати, чи встигне звільнитися ЗПС до приземлення ПС. Якщо час, необхідний на звільнення ЗПС не перевищує часу, необхідного для польоту повітряного судна до аеродрому ($t_{пол} < t_{зв, ЗПС}$), то даний аеродром може використовуватись для вимушеної посадки ПС.

Захід на посадку аварійного ПС рекомендується проводити за посадочним радіолокатором, або за посадочним радіолокатором з контролем по привідним радіостанціям (за умови справності даного устаткування) [1-3].

При відмові на аеродромі всіх РГЗ посадки в позаштатних польотних ситуаціях виконують візуальний захід на посадку [6].

Тип аеродрому. На складність виконання посадки впливає і тип аеродрому. Так за особливостями географічного розташування аеродрому державної авіації України поділяються на [7]:

- аеродрому, розташовані на місцевості з пересіченим рельєфом та відносними перевищеннями 500 м і більше у радіусі 25 км від контрольної точки аеродрому аеродрому;
- гірські аеродрому - розташовані на висоті 1000 м і більше над рівнем моря;

- гідроаеродроми - спеціально обладнані ділянки на водній поверхні для забезпечення зльоту та посадки амфібійних повітряних суден.

Польоти в гірській місцевості вважають одними з найбільш складних видів польотів і навіть найменша помилка може призвести до авіаційної події. Екіпаж повинен чітко володіти маршрутом, враховувати наявність перешкод різного типу, недопускати зниження нижче мінімально допустимої висоти, враховувати погодні умови: знижений атмосферний тиск, температуру, стоковий вітер, а також зони нестійкої роботи засобів зв'язку та РТЗ.

Метеомінімум аеродрому. Для забезпечення необхідного мінімуму аеродрому відповідний напрямок ЗПС повинен бути обладнаний радіосвітлотехнічним обладнанням (РСТО) у стаціонарному або рухомому варіанті відповідно до складу радіотехнічного обладнання аеродрому державної авіації України [6].

В залежності від складу радіотехнічного обладнання аеродрому поділяють на категоризовані (1, 2, 3 категорія) та некатегоризовані, обладнані засобами посадки.

Придатність аеродрому за погодними умовами. Аеродромом, придатний за погодними умовами (weather-permissible aerodrome) згідно [7] вважається аеродром, на якому протягом передбачуваного часу використання, фактична погода або прогнози, або їх комбінації вказують на те, що погодні умови будуть на рівні або вищі від необхідного експлуатаційного мінімуму, та повідомлення про стан поверхні злітно-посадкової смуги вказує на можливість безпечної посадки.

Метеомінімум в авіації – це мінімальні значення висоти нижньої межі хмар $h_{НМХ}$ і горизонтальної видимості V , при яких можливе виконання злетів, посадок і польотів за маршрутом. Встановлюється окремо для аеродрому, для типу повітряного судна і для пілотів [3]. Для аеродрому метеомінімум може встановлюватися окремо для різних злітно-посадочних смуг і для різних схем заходу на посадку. Для аеродрому і для типу повітряного судна можуть бути одночасно встановлені різні метеомінімуму в залежності від справності або несправності використовуваних систем забезпечення польотів (світлосигнальні прилади та апаратуру зв'язку, радіомаяки, навігаційні прилади тощо).

Отже при оцінці придатності аеродрому за погодними умовами необхідно провести оцінку наступних факторів:

- наявності небезпечних метеорологічних явищ (НМЯ) $k_{НМЯ}$;
- відповідність висоти нижньої межі хмарності $h_{НМХ}$ і видимості V встановленим мінімумам;
- відповідність фактичних: попутної, зустрічної і бокової складових вітру установленим гранично допустимим;
- стану поверхні злітно-посадкової смуги.

До небезпечних метеоявищ, що впливають на можливість безпечного виконання посадки, відносять наступні [4]: гроза, град, сильна бовтанка, си-

льний зсув вітру, сильне обмерзання, смерч, буревій, сильна пильна буря, сильні зливові опади. Встановлений мінімум командира повітряного судна залежить від класу командира.

При виникненні позаштатних польотних ситуацій посадка в умовах, нижчих за метеорологічний мінімум, дозволяється [4].

Досвід екіпажу. Професійні компетенції, досвід, спеціальні знання, вміння, навички взаємодії з машиною, висока відповідальність є тими необхідними якостями, завдяки яким пілот може успішно виконувати програму польоту. Вказані якості дозволяють пілоту контролювати технічний стан кожного вузла машини, вчасно побачити, відчути неполадки в системах ПС, вжити своєчасні заходи по перевірці їх стану, виключити можливі несвоєчасні дії колег по екіпажу і не пропустити їх можливі помилки, парирувати небезпечні ситуації, що, в свою чергу, дозволить зменшити виникнення інцидентів у повітрі.

В залежності від спеціальності, рівня підготовки, досвіду роботи особам льотного складу в встановленому порядку надається клас і видається відповідне свідоцтво, що підтверджує відповідний рівень професійної підготовки. Присвоєння класу здійснюється в залежності від кількості годин нальоту, куди, у тому числі, входять кількість годин: самостійного нальоту, польоти по приладам та польоти вночі.

Злив пального. Повітряному судну в аварійній ситуації може знадобитися злити пальне для забезпечення необхідної посадкової маси. При визначенні зони зливання палива необхідно уникати густонаселених районів, а також районів, в яких по метеозведенням наявні або очікуються грози. Маршрут польоту по можливості необхідно прокладати відсторонь міст та селищ, бажано над водним простором.

Зливати паливо можуть не всі типи ПС. Більш ймовірно таку можливість мають великі ПС, наприклад Boeing-767 [4].

Враховуючи описані вище фактори побудуємо модель визначення потенційного збитку для посадки на аеродромі у вигляді мережі Байєса (рис. 2).

Визначимо кількість можливих термів для всіх вершин мереж.

Для вершин *Відповідність довжини ЗПС (ВДЗПС), Працездатність засобів посадки (ПЗП), Наявність небезпечних метеоявищ (НМЯ), Відповідність складових вітру (ВСВ), Технічна придатність аеродрому посадки (ТПА), Придатність аеродрому за метеоумовами (ПАМ), Злив пального (ЗП)* таких термів два: "true" і "false".

Вершина *Мінімум аеродрому (МА)* згідно класифікації [6] має 4 терми: "1", "2", "3", "б/к". Вершина *Тип аеродрому (ТА)* згідно класифікації [7] має 3 терми: "рівнинний", "гірський", "гідроаеродром". Вершина *Тип поверхні (ТП)* має два терми: "грунтова", "штучна". Вершина *Досвід пілота (ДП)* має 3 терми, згідно рівнів класності, що надаються пілоту: "1", "2", "3".

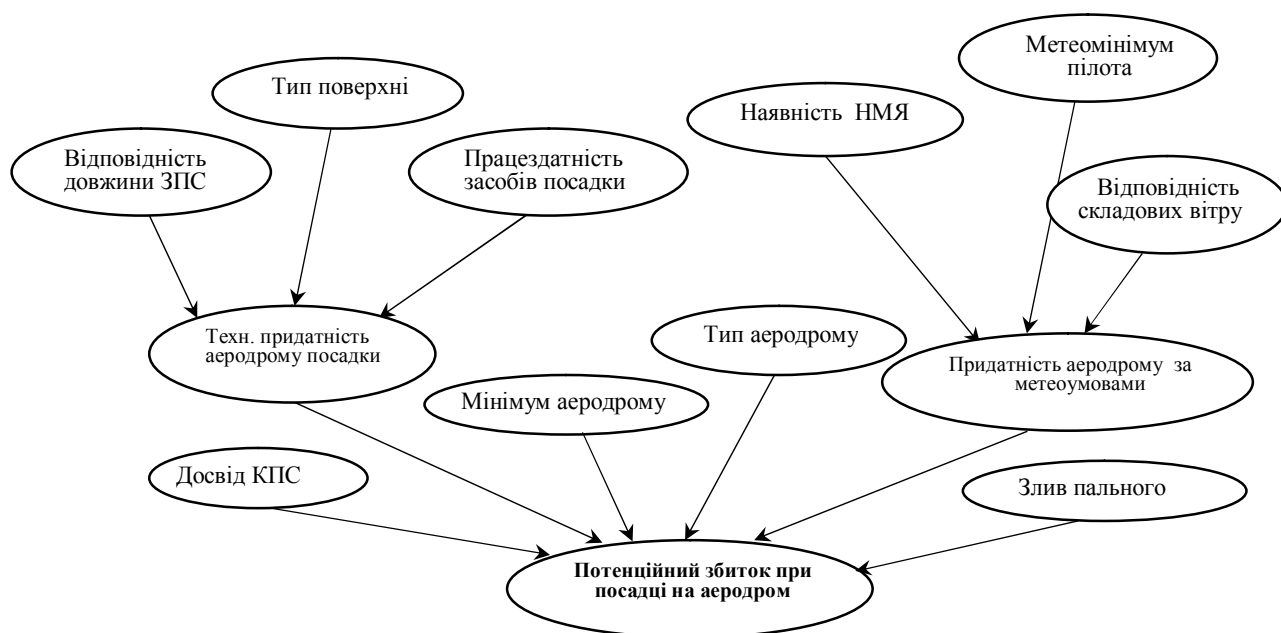


Рис. 2. Модель визначення потенційного збитку при посадці на аеродром

Вершина - листок *Потенційний збиток при посадці на аеродром (ПЗаер)* буде мати п'ять термів: "А", "В", "С", "D", "Е", які визначені згідно шкали ІСАО [8], наведені в табл. 1.

Таблиця 1. –Шкала серйозності наслідків

Шкала ІКАО		Авіаційні подія
Серйозність події	Ступінь	
катастрофічна	А	авіаційна катастрофа
небезпечна	В	авіаційна подія
значна	С	серйозний інцидент
незначна	D	інцидент
наднизька	Е	подія, що підлягає розслідуванню

Далі розглянемо випадок посадки на майданчик.

Для випадку посадки на майданчик на потенційні наслідки (збиток) будуть впливати наступні чинники:

- трудомісткість приземлення;
- складність проведення пошуково-рятувальних робіт;
- тип поверхні майданчика;
- досвід екіпажу;
- придатність майданчика за метеоумовами;
- можливий злив пального для забезпечення необхідної посадкової маси.

Трудомісткість приземлення залежить від типу майданчика (попередньо визначений або підібраний з повітря), а також проінформованості пілота ПС щодо місця посадки.

В зоні УПР передбачаються попередньо визначені майданчики, відомі КПС з вільними від висотних перешкод підходами, з рівнинною поверхнею

без штучних перешкод, на значній відстані від населених пунктів, з розміром, що забезпечує посадочну дистанцію для будь-якого типу ПС. Інформацію щодо характеристики аеродрому посадки або попередньо визначених майданчиків для виконання вимушеної посадки пілот зазвичай отримує зі збірника аеронавігаційної інформації, який знаходиться на борту ПС [5]. Рекомендації щодо підбору майданчика з повітря містяться в РЛЕ для кожного типу літака. Найменш трудомісткою є посадка на аеродромі, найбільш трудомісткою – на майданчику, підбраному з повітря.

Складність проведення пошуково-рятувальних робіт визначається точністю визначення місця посадки, відстанню до найближчої бази пошуково-рятувальних сил, які розміщені тільки на великих аеродромах, наявністю під'їздів для прибуття пошуково-рятувальних сил на місце посадки.

На попередньо визначених майданчиках точність визначення місця приземлення ПС значно зростає, до того ж, подібні майданчики підбираються обов'язково з наявністю під'їздів і з близьким розташуванням бази пошуково-рятувальних сил [5].

Тип поверхні майданчика. Підстилаюча поверхня майданчиків з точки зору особливості виконання вимушеної посадки розділяється на п'ять видів [2], саме: рівнинна, лісна, горна, водна, пустельна.

Рекомендованими місцями підбору майданчиків для літаків з колесним шасі є: луг з невисокою рослинністю, оброблювані землі після косовиці злаків (стерня), засіяне люцерною або конюшиною поле, висохлі озеро а пустельній місцевості, річкові коси, замерзлі озера, ставки, річки. Також при підборі майданчика з повітря слід уникати таких місць, як ділянки луку з яскраво-зеленою густою рослинністю, поливні поля люцерни, піщані коси після спадання паводкової води або випадання опадів, полою на річках і озерах, солончаки після опадів. Влітку і восени за станом ґрунту слід віддавати перевагу

ділянкам з невисокою рослинністю, полям зі скоше-ним травостоем. Особливу увагу звертати на одно-рідний фон забарвлення майданчиків: якщо виділя-ються плями з густо зеленим забарвленням, це вка-зує на різке зниження поверхні майданчика і зни-ження міцності ґрунту.

Досвід пілота, придатність майданчика за метеоумовами, можливий злив пального для забезпе-чення необхідної посадкової маси описані вище при описі попередньої моделі.

Побудуємо модель визначення потенційного збитку для посадки на майданчик вигляді мережі Байєса (рис. 3). Визначимо кількість можливих тер-мів для всіх вершин побудованої мережі. Так для вершин *Трудомісткість приземлення* (ТП), *Придат-*

ність майданчика за метеоумовами (ПММУ), *Інфо-рмованість пілота* (ІП), *Злив пального* (ЗП), *Наяв-ність НМЯ* (НМЯ), *Метеомінімум для посад-ки* (ММП), *Відповідність складових вітру* (ВСВ) тер-мів буде два: "true" і "false". Вершина *Досвід піло-та* (ДП) має 3 терми, згідно рівнів класності, що надаються пілоту: "1", "2", "3". Вершина *Тип поверх-ні майданчика* (ТПМ) має п'ять термів: "рівнинна", "лісна", "горна", "водна", "пустельна". Вершина *Тип майданчика* (ТМ) має два терми "Майданчик, піді-браний з повітря" і "Визначений майданчик".

Відповідно вершина - листок *Потенційний зби-ток при посадці на майданчик* (ПЗмайд) буде мати п'ять термів: "A", "B", "C", "D", "E", аналогічні табл. 1.

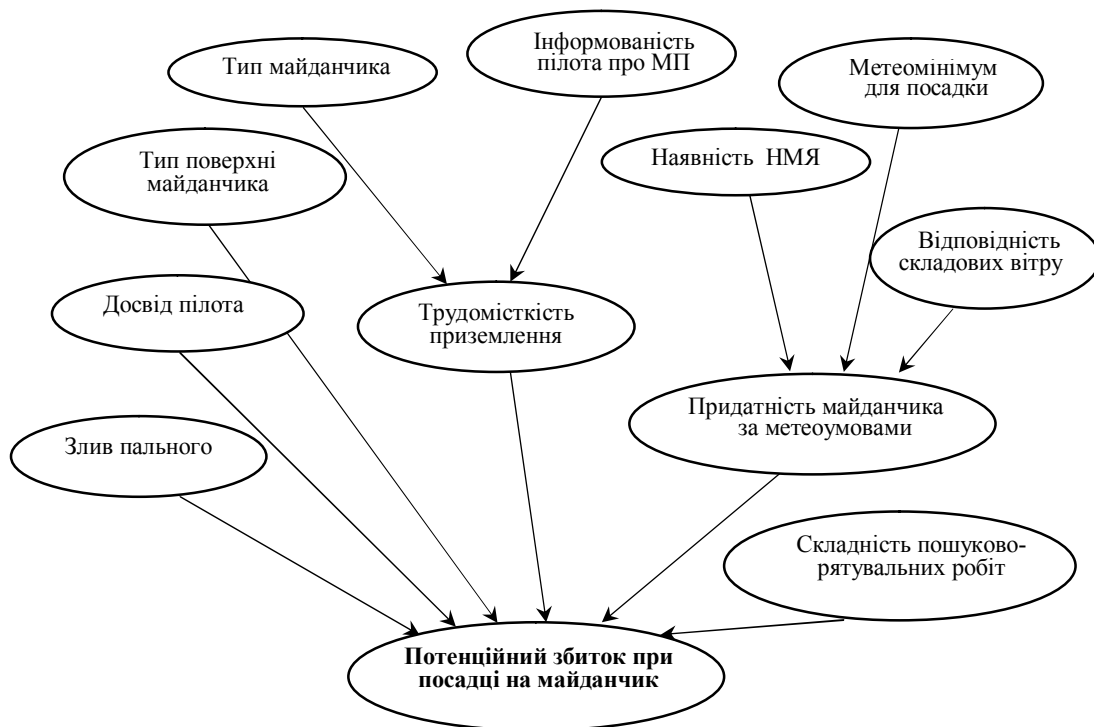


Рис. 3. Модель визначення потенційного збитку при посадці на майданчик

Далі розглянемо логічну схему байєсівського підходу та порядок задання вершин мережі [9, 10]. Нехай в моделі представлення знань існує *s*-мірний вектор параметрів

$$\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)^T$$

і задачею експерта є визначення найкращої, в деякому сенсі, статистичної оцінки даного параметра $\hat{\Theta}$ по вхідним *k*-мірним спостереженням

$$\bar{X}_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(k)})^T, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Байєсівський підхід використовується як один зі способів формалізації наступного твердження: ступінь нашої розумної впевненості щодо деякого твердження (наприклад числового значення параметру, що цікавить експерта) збільшується і корегується по мірі зростання і поповнення інформації

стосовного явища або предметної області, що досліджується [10].

Можливою формою інтерпретації вказаного вище твердження є наступна: зі збільшенням об'єму вибірки *n*, на основі якої будується оцінка $\hat{\Theta}_n$, збільшується міра інформації, якою ми володіємо про неї і наше заключення стає більш ближчим до істини (в сенсі сходимості ймовірностей $\hat{\Theta}_n$ до $\hat{\Theta}$). Безпосередньо байєсівський спосіб операціоналізації передбачає дві особливості: вираження "ступеню нашої розумної впевненості" в справедливості деякого твердження у вигляді ймовірностей, а також застосування одночасно інформації двох типів: апіорної і інформації, що міститься в статистичних даних [1, 8].

Апіорна інформація представляється у вигляді деякого апіорного розподілу ймовірностей невідомого параметру, що аналізується і який описує сту-

пінь впевненості експерта, що цей параметр прийме певне значення ще до початку отримання вихідних статистичних даних. По мірі надходження статистичних даних цей розподіл уточнюється (перераховується), переходячи від апіорного до апостеріорного розподілу, використовуючи при цьому формулу Байєса:

$$P(A_i \setminus B) = \frac{P(A_i) \cdot P(B \setminus A_i)}{\sum_{j=1}^N P(A_j) P(B \setminus A_j)}. \quad (1)$$

При цьому передбачається, що подія B має ненульову ймовірність ($P(B) > 0$), а A_1, A_2, \dots, A_N складають повну систему подій.

Оцінка значення параметрів згідно байєсівського методу представляє собою послідовність наступних кроків:

1. Отримання апіорних відомостей щодо параметру Θ (апіорний розподіл $p(\Theta)$).

2. Отримання вихідних статистичних даних

$$X_1, X_2, \dots, X_N.$$

3. Розрахунок функції правдоподібності

$$L(X_1, X_2, \dots, X_N / \Theta).$$

4. Розрахунок апостеріорного розподілу параметру Θ :

$$\hat{p}(\Theta / X_1, X_2, \dots, X_N).$$

5. Отримання заключення щодо значення параметру Θ (точкова або інтервальна оцінка).

Отримання апіорних відомостей базується на використанні попереднього досвіду. Апіорний параметр представляється у вигляді деякої функції $p(\Theta)$, яка у випадку дискретного параметру задається у вигляді ймовірності, а у випадку неперервного параметру – функцією щільності розподілу в точці Θ .

Вихідні дані X_1, X_2, \dots, X_N породжуються згідно закону розподілу ймовірності $f(X/\Theta)$ і є функцією щільності ймовірності випадкової величини $\zeta = (\zeta^{(1)}, \zeta^{(2)}, \dots, \zeta^{(k)})^T$ в точці X для неперервних параметрів і ймовірністю для дискретної ζ .

Функція правдоподібності визначається згідно виразу:

$$\begin{aligned} L(X_1, X_2, \dots, X_N / \Theta) &= \\ &= f(X_1 / \Theta) \cdot f(X_2 / \Theta) \cdot \dots \cdot f(X_N / \Theta). \end{aligned} \quad (2)$$

Апостеріорний розподіл розраховується за допомогою формули Байєса (1) і має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{p}(\Theta / X_1, X_2, \dots, X_N) &= \\ &= \frac{p(\Theta) \cdot L(X_1, X_2, \dots, X_N / \Theta)}{\int L(X_1, X_2, \dots, X_N / \Theta) \cdot p(\Theta) d\Theta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для визначення точкових і інтервальних оцінок використовують апостеріорний розподіл

$$\hat{p}(\Theta / X_1, X_2, \dots, X_N).$$

Для точкових оцінок користуються середнім або модою:

$$\begin{aligned} \hat{\Theta}_{сер} &= \mathbf{E}(\Theta / X_1, X_2, \dots, X_N) = \\ &= \int \Theta \cdot \hat{p}(\Theta / X_1, X_2, \dots, X_N) d\Theta. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\hat{\Theta}_{мод} = \arg \max_{\Theta} \hat{p}(\Theta / X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (5)$$

При побудові байєсівського довірчого інтервалу за виразом (3) розраховують функцію $\hat{p}(\Theta / X_1, X_2, \dots, X_N)$ апостеріорного закону розподілу параметру Θ , а потім визначають 2 точки цього закону (права і ліва межа інтервалу):

$$100 \cdot \frac{P_0 + 1}{2} \quad \text{і} \quad 100 \cdot \frac{1 - P_0}{2},$$

де P_0 – задана довірна ймовірність.

Реалізацію запропонованих моделей доцільно виконувати за допомогою технології ймовірнісного програмування. Ймовірнісне програмування – це результативний прогресивний підхід, який володіє великою виразною міццю, за рахунок використання мов програмування, повних за Т'юрингом. Йому властиві:

- знижений рівень вхідних знань, завдяки застосуванню базових розповсюджених мов програмування;
- автоматизація алгоритмів ймовірнісного висновку;
- можливість включати написаний код в код будь яких додатків, що розробляються.

На даний час існує та розробляється велика кількість систем ймовірнісного програмування, в тому числі і для роботи з мережами Байєса. Серед множини програмних засобів, які дозволяють реалізувати такі мережі слід відмітити Figaro - систему ймовірнісного програмування, з відкритим вихідним кодом, яка розробляється з 2009 року. Реалізована у вигляді бібліотеки на мові Scala.

Завдяки застосуванню Scala, Figaro відповідно отримує ряд переваг, одні з яких пов'язані з застосуванням мови загального призначення, а інші - з специфікою самої мови Scala. Серед таких переваг є наступні [11]:

- завдяки реалізації бібліотек на Scala його можна застосовувати в програмах, що написані на мовах Scala, Java, що спрощує його інтеграцію з додатками.
- Scala - сучасна прогресивна мова програмування, що володіє безліччю корисних засобів для організації програм, тобто користуючись Figaro, всі ці засоби є в розпорядженні користувача.
- наявність повного набору алгоритмів ймовірнісного висновку.

По суті, створення ймовірнісної моделі представляє собою процес написання програми, що

пов'язує всі елементи, враховані в моделі на об'єктній або функціональній мовах програмування з використанням ймовірнісного та детермінованого зв'язків.

Висновки і напрямки подальших досліджень

В статті проведено аналіз такого особливого випадку в польоті як відмова двигуна на повітряному судні.

Визначено основні типи відмов, а також фактори, що впливають на процес прийняття рішення щодо можливості продовження польоту в таких випадках.

Побудовано ймовірнісну модель визначення можливості продовження польоту на основі байєсівської мережі з описанням термів використаних вершин, визначених в результаті проведеного аналізу.

Побудовано байєсівські моделі визначення ризику (потенційного збитку) для використання при виборі альтернативи завершення польоту (посадка на майданчик або посадка на аеродром) у випадку виконання вимушеної посадки. Для визначення рівня потенційного збитку використано шкалу серйозності наслідків ІКАО.

Описана логічна схема байєсівського підходу та порядок завдання вершин такої мережі.

Обґрунтовано вибір програмного засобу, а саме системи ймовірнісного програмування Figaro для програмної реалізації розроблених байєсівських моделей.

Напрямок подальших досліджень є розробка методу автоматизованого вироблення рішень при виникненні особливих випадків в польоті з використанням побудованих ймовірнісних моделей для його використання при розробці СППР авіадиспетчера.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Згуровський М.З., Бідюк П.І., Терентьев О.М., Просьянкіна-Жарова Т.І. Байєсівські мережі в системах підтримки прийняття рішень. – Київ: ТОВ "Видавниче підприємство "Едельвейс", 2015. – 300с.
2. Сікірда Ю.В. Моделювання систем підтримки прийняття рішень авіадиспетчера в позаштатних льотних ситуаціях. Автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.06 / Ю.В.Сікірда. — К., 2004. — 19 с.
3. Положення про організацію роботи об'єктів обслуговування повітряного руху Украероруху: наказ Украероруху від 12.03.2008 №64 (з поправками №1-№10). – К.: Украерорух, 2008. – 52 с.
4. Богаткін О.Г. Авіаційна метеорологія. Підручник. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2005. – 328 с.
5. Правила визначення придатності до експлуатації аеродромів та злітно-посадкових майданчиків державної авіації України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1571-14#Text>
6. Авіаційні Правила України "Обслуговування повітряного руху". – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0727-19#Text>.
7. Інструкція з експлуатації аеродромів державної авіації України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1229-13#Text>.
8. ICAO Doc 9859 AN/474 Safety Management Manual (SMM). Third edition. ICAO. 2013. 254 p.
9. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускнуої здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
10. Айвазян С.А. Баесовский подход в эконометрическом анализе. / Прикладная эконометрика. – №1(9). – 2008. – С.93-130.
11. Пфедфер Ави Вероятностное программирование на практике / Пер. с англ. Слинкин А.А. – М.: ДМК Прес, 2017. – 462 с.

Received (Надійшла) 12.06.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2020

Development of models of representation of knowledge about emergency situations for the DSS of an air traffic controller

A. Kolesnyk, V. Pavlenko, V. Zatkhei

Abstract. The **object of study** in the paper is to investigate the possibility of applying Bayesian networks apparatus for constructing models of emergency on the aircraft. **The goal is** to develop models for representing knowledge about emergency situations in flight for their further use in the development of the DSS of an air traffic controller. **The tasks are:** determination and analysis of factors that affect the decision-making process about the possibility of continuing the flight in the event of a special case in flight using the example of engine failure; analysis of factors that affect the determination of the level of risk (potential damage) when performing an emergency landing; construction of probabilistic models for determining the possibility of continuing the flight and determining the potential damage of alternatives to the completion of the flight using the Bayesian network. **The methods used are:** methods of analysis and synthesis of complex information systems, methods of simulation and statistical modeling. **The following results were obtained.** Many factors have been identified that influence the decision-making process in the event of such a special case as engine failure on an aircraft. A probabilistic model has been built that shows the decision-making process to determine the possibility of continuing the flight in case of engine failure on the aircraft in flight. Probabilistic models for determining the potential damage for the case of an emergency landing at the airfield and site have been built. The choice of a software tool, namely the Figaro probabilistic programming system, for the implementation of the developed Bayesian models is substantiated. **Conclusions.** The direction of **further research** is the development of a method for automated decision making in case of special cases in flight using the constructed probabilistic models for its use in building the DSS of an air traffic controller.

Keywords: engine failure, special case in flight, potential damage, emergency landing, air traffic controller.