

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

БЛАГАЯ ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 629.735.072.4:656.7.071.7:510.589 (043.3)

**МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ПЛОТ-ЛІТАК
ПРИ УПРАВЛІННІ РУХОМ НА ЕТАПІ ПОСАДКИ**

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі аеронавігаційних систем факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник
Павлова Світлана Вадимівна,
Національний авіаційний університет,
завідувачка кафедри авіоніки факультету
аеронавігації, електроніки
та телекомунікацій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бідюк Петро Іванович,
Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри математичних методів
системного аналізу;
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Шепетуха Юрій Михайлович,
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем НАН
та МОН України, відділ інтелектуального
управління, старший науковий співробітник

Захист відбудеться «23» вересня 2021 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, ауд. 1.334.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: Україна, 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «19» серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук



Н. С. Кузьменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. На сучасному етапі розвитку науки і техніки створюють великомасштабні технічні комплекси з різними типами автоматизованих виробництв. Усі ці системи є ергатичними (людино-машинними системами (ЛМС)) і побудовані на основі взаємодії автоматизованих систем управління різних рівнів з людиною-оператором (Л-О). Тобто, під час створення таких систем необхідно врахувати людський чинник, який має підвищувати ефективність роботи як людини, так і системи загалом, шляхом взаємодії між людиною та технічними засобами. Звідси і виникає актуальна проблема дослідження взаємодії людини з машиною в єдиній системі та можливостей Л-О не тільки як ланки ергатичної системи, а як активного суб'єкта діяльності. Розвиток ергатичних систем вимагає дослідження проблеми відображення та обробки інформації в умовах дедалі складніших завдань управління та інтенсивності їх вирішення. Для сьогодення є актуальним використовувати не лише психофізіологічні можливості оператора за візуальним сприйняттям інформації, а і ефективно залучати розумові здібності людини. Високий розвиток автоматизації методів обробки польотної інформації, методів розпізнання та класифікації зображень не може перевершити за своєю надійністю людину, оскільки сьогодні найбільш адаптивним пристроєм, що розпізнає, здатним приймати оптимальні рішення за наявності різного виду завдань, залишається людина. Аналіз і синтез систем, що містять у своєму складі оператора, вимагає знання його характеристик, якостей, властивостей та обмежень, які накладаються через його участь у роботі системи. Для вирішення проблем проєктування автоматизованих систем використовується кілька десятків методологічних підходів до людини і техніки, у яких пропонуються різні варіанти оптимізації взаємодії Л-О та автоматизованої системи, організації процесів управління, вибору ролі Л-О, розподілу функцій між автоматикою та людиною. Отже, постає завдання формалізованого опису діяльності Л-О, розробки математичної моделі функціонування ергатичної системи «пілот-літак» на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка на відміну від існуючих розрізнених моделей має формалізувати та об'єднувати модельні уявлення станів Л-О і технічної частини системи в рамках єдиної моделі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках концепцій ІКАО з проблем людського чинника: «орієнтована на людину автоматизація», «ситуаційна обізнаність», «контроль за помилками» та має зв'язок з такими держбюджетними науково-дослідними роботами: «Методологія ситуаційного колективного управління пілотованими і безпілотними літальними апаратами в єдиному

повітряному просторі» (987-ДБ15 номер держреєстрації 0218U003279); «Розробка комплексу оцінювання та прогнозування ситуацій в соціотехнічних аеронавігаційних системах за умов ризику та невизначеності» (870-ДБ-13 НДЧ номер держреєстрації 0113U000089), у яких дисертант був безпосереднім виконавцем у розв'язанні задач аналізу діяльності операторів аеронавігаційної системи та шляхів підвищення надійності їх діяльності.

Мета дослідження: розробка математичних моделей функціонування ергатичної системи «пілот–літак» на етапі посадки.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати існуючі теоретичні підходи до формалізації процесів функціонування ергатичної системи «людина–оператор–машина»;
- розробити математичну модель діяльності ергатичної системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування;
- розробити стохастичну математичну модель детермінованих станів інтелектуальної діяльності пілота при пілотуванні літаком;
- провести широке моделювання з метою верифікації розроблених моделей;
- удосконалити математичну модель «Узагальнена робоча характеристика Л–О».

Об'єкт дослідження – процеси функціонування ергатичної системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку.

Предмет дослідження – математичні моделі процесів функціонування ергатичної системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку.

Методи дослідження: теоретико-множинні та теоретико-експериментальні – для розробки математичних моделей інтелектуальної діяльності; теорії ймовірностей, випадкових процесів та математичної статистики – для оброблення експериментальних даних; експертного оцінювання – для обробки експертних даних; дослідження операцій, теорії графів – для побудови моделей поведінки операторів в очікуваних і неочікуваних умовах експлуатації ПК; методи математичного та комп'ютерного моделювання для діагностики операторів та визначення ефективності процесу керування при заході на посадку.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

- уперше розроблено стохастичну математичну модель діяльності ергатичної системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка на відміну від існуючих розрізаних моделей об'єднує модельні уявлення станів людини-оператора і технічної частини системи в єдину модель;

– уперше розроблено стохастичну математичну модель детермінованих станів інтелектуальної діяльності пілота при пілотуванні літаком, яка на відміну від існуючих моделей дозволяє формалізувати процеси сприйняття інформації, її опрацювання та прийняття рішення з управління як стани системи масового обслуговування;

– удосконалено математичну модель «Узагальнена робоча характеристика людини-оператора» за рахунок введення нового базису – операторів діяльності людини-оператора – як системи масового обслуговування, яка дозволяє досліджувати системні характеристики операторської діяльності в системі «пілот–літак» на етапі заходу на посадку.

Практичне значення одержаних результатів полягає в такому:

- по-перше, розроблені математичні моделі дають змогу підвищити безпеку польотів шляхом моделювання позаштатних ситуацій, виявлення критичних параметрів діяльності ергатичної системи «пілот–літак» та розробки ефективних заходів щодо підвищення безпеки польотів;

- по-друге, розроблені математичні моделі дозволяють проводити оцінювання готовності пілота до дій у позаштатних ситуаціях у польоті та розробляти заходи щодо удосконалення методології навчання пілотів та підвищення їх кваліфікації;

- по-третє, розроблені моделі дають можливість: обґрунтувати доцільність використання отриманих даних при розробці методик підвищення безпеки польотів на етапі заходу на посадку під час взаємодії пілота та засобів відображення інформації; у технологічному процесі розробки та модернізації інформаційних інтерфейсів пілота для режимів заходу на посадку; для програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем.

Результати роботи впроваджені: у навчальний процес Національного авіаційного університету – розроблене математичне та програмне забезпечення використано під час проведення практичних та лабораторних робіт з математичного аналізу програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем; стохастичну математичну модель діяльності ергатичної системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування на АНТК «Антонова» впроваджено в технологічний процес розробки та модернізації інформаційних інтерфейсів пілота для режимів заходу на посадку літаків Ан-148-201, Ан-158-100; в Авіакомпанії ДП «Укрерорух» впроваджено при розробці методики підвищення безпеки польотів на етапі заходу на посадку під час взаємодії пілота та диспетчера. Отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму «Модель діяльності людини-оператора як системи масового обслуговування» («Модель Л-О як СМО»).

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Роботи [9–15, 17–20, 22] виконані без співавторів. Деякі роботи виконані у співавторстві з науковим керівником та іншими науковцями. Зокрема, здобувачеві належать: аналіз існуючих концепцій дослідження впливу людського чинника на безпеку авіації [1], вибір математичної моделі діяльності Л-О в авіаційній системі [3], визначення контрольованих параметрів для моделі Л-О при директорному керуванні [4], визначення надійності операторів аеронавігаційної системи (АНС) [16], аналіз оптимальної аналітичної моделі Л-О [21], розроблено функціональну схему інтелектуальної діяльності людини-оператора сучасної АНС [23], досліджено та порівняно системи посадки пілотованих та безпілотних повітряних суден [25], досліджено та порівняно особливості керування Л-О пілотованими та безпілотними повітряними суднами [26], проведено аналіз впливу людини на функціонування авіаційної ергатичної системи [2], аналіз статистичних помилок Л-О сучасної АНС [5], досліджено методику обробки статистичних даних про помилки операторів АНС [6], досліджено інформаційну надійність оператора при взаємодії з засоби відображення інформації (ЗВІ) [7], досліджено модель Л-О при взаємодії з ЗВІ [8], аналіз проблем сучасних злітно-посадкових смуг під час посадки [24], досліджено методи підвищення точності операторів у сучасній авіаційній системі [9], досліджено фізіологічні особливості сприйняття Л-О інформації в сучасній АНС [27].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень доповідалися й обговорювалися на міжнародних науково-технічних конгресах, конференціях, семінарах, серед яких: Науково-методична конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2011); XII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, НАУ, 2012); Міжнародна науково-практична конференція «Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем» (Кіровоград, КЛА, 2012); Науково-методична конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2012); XI Міжнародна науково-технічна конференція «AVIA-2013» (Київ, НАУ, 2013); XV Міжнародна науково-практична конференція «Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики» (Київ, 2013); Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, 2013); II Міжнародна науково-практична конференція «Статистичні методи обробки сигналів і даних» (Київ, НАУ,

2013); XIV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, НАУ, 2014); літня школа молодих учених та студентів «Авіакосмічні технології та системи» (Житомир, ЖВІ ім. С. П. Корольова, 2014); Науково-методична конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2014); 2015 IEEE 3rd International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (Kyiv, NAU, 2015); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, НАУ, 2015); XII Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2015» (Київ, НАУ, 2015); MRW 2016 MICON 2016 IRS 2016 (Krakow, Poland, 2016); 2016 IEEE 4rd International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)» (Kyiv, NAU, 2016); Науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2016); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2017» (Київ, НАУ, 2017); Науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2018); 2019 IEEE 5rd International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (Kyiv, NAU, 2019); XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2019» (Київ, НАУ, 2019).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 27-и друкованих наукових працях: п'яти наукових статтях у фахових виданнях, чотирьох працях міжнародних конференцій, які входять до наукометричної бази Scopus, а також 18-и тезах наукових конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 166 сторінок. Обсяг основної частини дисертації — 123 сторінки. Робота містить 30 рисунків та 7 таблиць. Список використаних літературних джерел складається зі 146 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначені мета, завдання та методологічна основа досліджень. Розглянуто наукову новизну та практичне значення роботи. Показано як здійснювались апробація та впровадження результатів.

У **першому розділі** проаналізовано існуючі підходи до формалізації процесів, які відбуваються в системі «пілот–літак». Проведений аналіз моделей діяльності Л-О показав, що існуючі моделі не повною мірою

відображають стохастичні характеристики станів системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку. За результатами дослідження було виявлено, що системні моделі «пілот–літак», які б за рахунок об'єднання модельних уявлень станів Л-О і технічної частини ергатичної системи в єдину модель забезпечували би опис як людини, так і технічної частини системи в рамках єдиного підходу формалізації, відсутні. Було виявлено, що найефективнішим підходом щодо формалізації процесів, які відбуваються в системі Л-О–літак на режимі заходу на посадку, є підхід з позицій теорії масового обслуговування.

У **другому розділі** визначено, що автоматизація процесу управління сучасним ЛА є наслідком зростання складності авіаційної техніки. Людина є суб'єктом управління і саме від її успішної діяльності залежить якість функціонування системи загалом. Для визначення параметрів, на основі яких відбувається управління ЛА в директорному режимі на етапі заходу на посадку, використано метод експертних оцінок. Після проведеного дослідження виявлено п'ять основних параметрів польоту, які використовуються для керування ЛА при заході на посадку в директорному режимі. Тому під час створення математичної моделі системи «пілот–літак» потрібно враховувати швидкість та висоту польоту, кути крену, курсу, тангажа (табл. 1). Вся інформація про політ розділена між різними приладами, тому для оцінювання умов польоту її потрібно інтегрувати.

Таблиця 1

Основні параметри польоту в режимі заходу на посадку

Параметр	Швидкість V	Висота H	Тангаж ϑ	Крен γ	Рискання ψ
	V	H	КПП		НПП
Пілотажні прилади	Варіометр	Висото-мір	Авіагоризонт		Показник курсу (гіроскоп)
Рульові поверхні	РУД (руль управління двигунами)	РУД+ Руль висоти	Руль висоти	Елерони	Руль напрямлення РН (педалі)
Керуюча дія (відхилення органу управління)	δ_p^V	δ_b^H	δ_b^ϑ	δ_e^γ	δ_n^ψ

Третій розділ присвячено побудові математичної моделі «пілот–літак» як системи масового обслуговування. Як модельний підхід до побудови моделі Л-О як невід'ємної складової ергатичної системи «пілот–літак» застосовано підходи теорії масового обслуговування.

Перехід системи з одного стану в інший залежить від контролю переходу системи з одного стану в інший, для технічної складової підсистеми – ЛА від одного параметра до іншого (від зміни швидкості, висоти, тангажа та ін.), для Л-О за діями з управління. Процес пілотування неминує супроводжується випадковими збуреннями у зовнішньому середовищі (турбулентність атмосфери, метеорологічні умови тощо), випадковими помилками, відхиленнями від заданого режиму (зміна параметрів польоту, вихід з ладу або відмова систем управління), на які доводиться вводити корекцію. Під час заходу на посадку в директорному режимі управління літак як підсистема $S^{ЛА}$, враховуючи визначені контрольовані параметри, може знаходитися в одному з 32 станів. Під дією випадкових процесів (зовнішні та внутрішні збурення), які відбуваються в якісь випадкові моменти часу, система $S^{ЛА}$ (літак) може переходити із стану в стан (перескакувати). Перехід ЛА зі стану $S_i^{ЛА}$ у стан $S_j^{ЛА}$ під дією випадкових зовнішніх та внутрішніх збурень відбувається з інтенсивностями $\lambda_{i,j}^{ЛА}$. Перехід зі стану $S_j^{ЛА}$ у стан $S_i^{ЛА}$ відбувається під дією інтенсивності переходу $\mu_{j,i}^{ЛА}$. Відповідно, у підсистемі Л-О перехід зі стану $S_i^{Л-О}$ в стан $S_j^{Л-О}$ відбувається з інтенсивністю переходу $\lambda_{i,j}^{Л-О}$, а зі стану $S_j^{Л-О}$ до стану $S_i^{Л-О}$ з інтенсивністю $\mu_{j,i}^{Л-О}$. Переходи між станами S_i^ξ , де $i = \overline{1,32}$, відбуваються при зміні одного з параметрів польоту або в разі їх компенсації з відповідними інтенсивностями. Побудовано графи станів підсистем Л-О та ЛА, що містять усі можливі стани $S_1^\xi, S_2^\xi, S_3^\xi, \dots, S_{32}^\xi$, бо $\xi \in$ як множині ЛА, так і Л-О та переходи між ними (рис. 1). Структура графів підсистем ЛА та Л-О є ідентичною. А побудувавши графи станів системи (рис. 1), стало можливим знайти всі ймовірності станів як функції часу. Для цього складено систему рівнянь Колмогорова, де невідомими функціями є ймовірності станів кожної з підсистем. Як основні змінні, в термінах яких описано стани систем $S^{ЛА}$ та $S^{Л-О}$, використаємо відповідно ймовірності $p_i^{ЛА}(t)$ та $p_i^{Л-О}(t)$ знаходження цих систем у момент часу t в одному зі станів $S_i^{ЛА}$ та $S_i^{Л-О}$, $i = \overline{1,32}$ відповідно. За інтервал часу τ ці ймовірності зміняться та набудуть значення:

$$p_i^\xi(t + \tau) = (1 - \lambda_i^\xi(t)\tau) p_i^\xi(t) + \sum_{j=1}^{32} \lambda_{ji}^\xi(t) p_j^\xi(t)\tau, \xi \in (\text{ЛА}, \text{Л-О}).$$

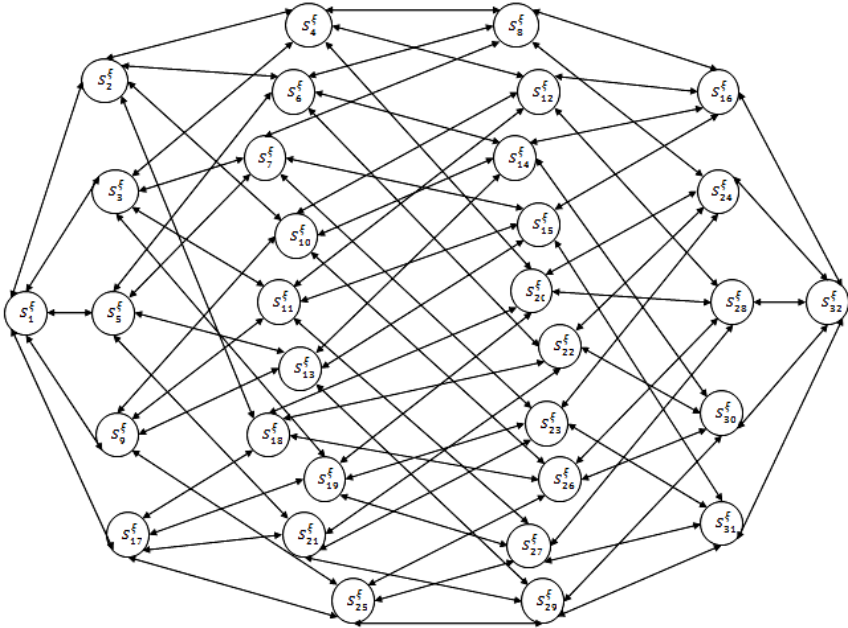


Рис. 1. Графи станів підсистем ЛА та Л-О $\xi \in \{\text{ЛА}, \text{Л-О}\}$

Коли підсистема S^ξ знаходиться в будь-якому стані S_i^ξ , з якого є безпосередній перехід в інший стан S_j^ξ (стрілка, що надходить із S_i^ξ у S_j^ξ на графі станів (рис. 2)), то на підсистему, поки вона знаходиться в стані S_i^ξ , діє найпростіший потік подій, що переводить її по стрілці $S_i^\xi \rightarrow S_j^\xi$.

Характеристикою потоку подій є інтенсивність потоку подій або щільність імовірності переходу $\lambda_{i,j}^\xi$ – середнє число подій, які відбуваються за одиницю часу і переводять систему зі стану S_i^ξ в стан S_j^ξ . Інтенсивність потоку керуючих дій Л-О на коригування параметра позначимо як $\mu_{j,i}^{\text{Л-О}}$. Ця інтенсивність переводить підсистему зі стану $S_j^{\text{Л-О}}$ у стан $S_i^{\text{Л-О}}$ по стрілці $S_j^{\text{Л-О}} \rightarrow S_i^{\text{Л-О}}$ (рис. 1).

Беремо ймовірністю i -го стану ймовірність $p_i^\xi(t)$ того, що в момент t система S^ξ буде знаходитися в стані S_i^ξ . Для будь-якого моменту сума всіх імовірностей дорівнює одиниці: $\sum_{i=1}^n p_i^\xi(t) = 1$. Коли система S_i^ξ має

32 стани, потрібно скласти систему з 32 рівнянь для ймовірностей станів з 32 невідомими функціями $p_1^\xi, p_2^\xi, \dots, p_{32}^\xi$. Коли Δt спрямуємо до нуля – зліва отримаємо в границі похідну функції $p_1^\xi(t)$. Таким чином, відкидаючи аргумент t у функціях P_1, P_2 (він більше не потрібен), отримано диференціальне рівняння для $P_1^\xi(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1^\xi}{dt} = & \lambda_{2,1}^\xi P_2 + \lambda_{3,1}^\xi P_3 + \lambda_{5,1}^\xi P_5 + \lambda_{9,1}^\xi P_9 + \lambda_{17,1}^\xi P_{17} - \\ & - \mu_{1,2}^\xi P_1 - \mu_{1,3}^\xi P_1 - \mu_{1,5}^\xi P_1 - \mu_{1,9}^\xi P_1 - \mu_{1,17}^\xi P_1. \end{aligned}$$

Аналогічно записано ще 31 диференціальне рівняння для ймовірностей станів $S_1^\xi, S_2^\xi, \dots, S_{32}^\xi$, де $\xi \in (\text{ЛА}, \text{Л-О})$ і таким чином отримано дві системи диференціальних рівнянь для ймовірностей станів підсистем ЛА $S^{\text{ЛА}}$ та Л-О $S^{\text{Л-О}}$. Для отримання розрахункових числових значень моделі системи «пілот–літак» побудовано структурну схему ЛМС «пілот–літак» та функціональні зв'язки між підсистемами ЛА $S^{\text{ЛА}}$ та Л-О $S^{\text{Л-О}}$.

Структурну схему моделі «пілот–літак» показано на рис. 2, де обидві підсистеми – це графи з 32-а станами, що є топологічно ідентичними та мають однозначні функціональні відображення як станів, так і інтенсивностей переходу зі стану в стан. Таким чином, система «пілот–літак» як СМО має дві підсистеми. Нехай у початковий момент часу t_0 система «пілот–літак» знаходиться в станах S_1^ξ – коли літак на глісаді і немає відхилень від потрібних параметрів. На систему «пілот–літак» у випадкові моменти часу діють випадкові зовнішні збурення (вітер, відмова обладнання, опади тощо), що впливає на перехід ЛА з одного стану в інший з розрахунковими – ідеальними інтенсивностями $\lambda_{i,j}^{\text{ЛА}}, \mu_{j,i}^{\text{ЛА}}$.

Початкові умови – коли всі параметри в нормі — це стан підсистеми $S_i^{\text{ЛА}}$. Під дією збурень відбувається відхилення параметра літака від попереднього значення, та ЛА переходить у стан $S_j^{\text{ЛА}}$. У випадковий момент часу під дією випадкових впливів параметри літака відхиляються від заданих (потрібних) параметрів і підсистема $S^{\text{ЛА}}$ переходить з інтенсивністю $\lambda_{i,j}^{\text{ЛА}}$, що є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом, зі стану $S_i^{\text{ЛА}}$ в один зі станів $S_j^{\text{ЛА}}$. При переході $S^{\text{ЛА}}$ зі стану $S_i^{\text{ЛА}}$ у стан $S_j^{\text{ЛА}}$ у підсистемі $S^{\text{Л-О}}$ також відбувається перехід зі стану $S_i^{\text{Л-О}}$ в стан $S_j^{\text{Л-О}}$ з інтенсивністю $\lambda_{i,j}^{\text{Л-О}}$.

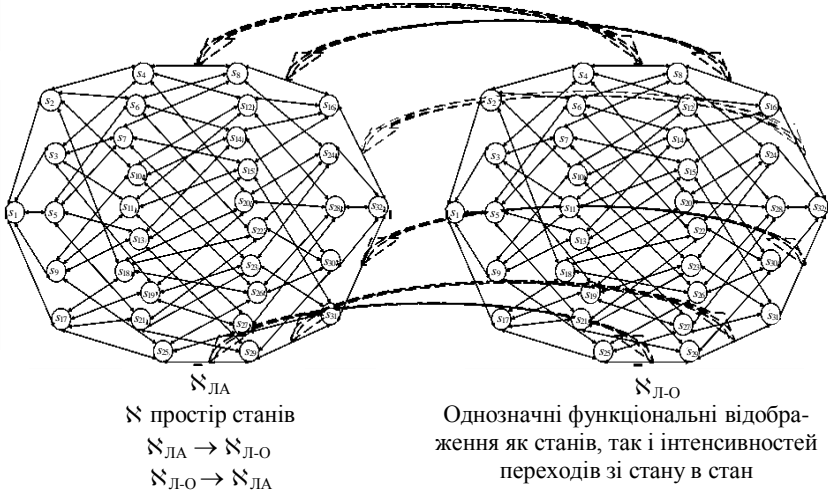


Рис. 2. Структурна схема моделі «пілот–літак»

Інтенсивність переходу зі стану $s_j^{\text{Л-О}}$ у стан $s_i^{\text{Л-О}}$ для підсистеми Л-О визначається як $\lambda_{i,j}^{\text{Л-О}} = \frac{1}{t_\Sigma}$, для якої має враховуватися дві складові часу:

$$T_\Sigma = T_{i,j \text{ штат}}^{\text{Л-О}} + T_{i,j \text{ нештат}}^{\text{Л-О}},$$

де $T_{i,j \text{ штат}}^{\text{Л-О}}$ – час, необхідний пілоту для зчитування інформації про поточний стан літака з приладів, опрацювання цієї інформації та прийняття рішення про управління; $T_{i,j \text{ нештат}}^{\text{Л-О}}$ – час, необхідний пілоту для виявлення і подолання нештатної ситуації, що призводить до зменшення інтенсивності $\lambda_{i,j}^{\text{Л-О}}$.

Для моделі Л-О, що розглядається, в процесі пілотування в директорному режимі при заході на посадку пілот спостерігає за п'ятьма основними контрольованими параметрами. Інтенсивності переходів системи $s^{\text{Л-О}}$ зі стану $s_i^{\text{Л-О}}$ у стан $s_j^{\text{Л-О}}$ визначаються як

$$\lambda_{i,j}^{\text{Л-О}} = \frac{1}{T_{i,j \text{ штат}}^{\text{Л-О}}};$$

$$T_{i,j \text{ штат}}^{\text{Л-О}} = \sum_{k=1}^N (T_\phi + T_{\text{п}} + T_{\text{о}} + T_{\text{у}}) + T_{\text{п.п}},$$

де T_ϕ – загальний час (фіксації погляду), що витратив пілот при зчитуванні інформації з пілотажно-навігаційних приладів; $T_{\text{п}}$ – частка

тривалості перерви фіксації погляду (переведення погляду з приладу на прилад); T_o – час на обробку інформації; T_y – час на уточнення зчитаної інформації; $T_{п.р}$ – час прийняття рішення на керування, $N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ – кількість контрольованих параметрів.

Прийнявши рішення про необхідність вироблення управляючих впливів для подолання виявлених відхилень поточних параметрів літака від потрібних, пілот здійснює управління для компенсації відхилення поточного параметра. В результаті цих дій літак починає повертатися до потрібного значення параметра і підсистема $S^{ЛА}$ переходить з інтенсивністю $\mu_{j,i}^{ЛА}$ зі стану $S_j^{ЛА}$ у стан $S_i^{ЛА}$:

$$\mu_{j,i}^{ЛА} = \frac{1}{T_{\Sigma}^{ЛА}},$$

де $T_{\Sigma}^{ЛА} = T_{j,i}^{ЛА} + T_{j,i}^{Л-О} + T_{j,i}^{упр}$; $T_{j,i}^{ЛА}$ – час перехідного процесу ЛА, пов'язаний з його інерційністю; $T_{j,i}^{упр}$ – час, необхідний пілоту на здійснення управління ЛА після зчитування та обробки інформації пілотом, що безпосередньо пов'язана з операторською діяльністю людини.

Якщо в автоматичному режимі САУ контролює параметри польоту і управляє важелями управління та директорними стрілками приладів, то пілот у директорному режимі слідкує саме за показаннями цих директорних стрілок та інших пілотажних приладів. Тому в складовій моделі «пілот–літак» технічна система оперує параметрами польоту ($V H \vartheta \gamma \psi$), а пілот – саме показниками приладів (КПП, НПП, вказівники швидкості та висоти). У разі відхилення параметрів польоту від заданих пілот рухає відповідний орган керування для компенсації цих відхилень. Літак переходить реагуючи на управляючі впливи переходом із стану $S_j^{ЛА}$

у стан $S_i^{ЛА}$ під дією інтенсивності переходу $\mu_{j,i}^{ЛА}$. Пілот контролює за приладами результат здійснених керуючих впливів і система $S^{Л-О}$ з інтенсивністю $\mu_{j,i}^{Л-О}$ переходить зі стану $S_j^{Л-О}$ у стан $S_i^{Л-О}$:

$$\mu_{j,i}^{Л-О} = \frac{1}{T_{\Sigma}^{упр}};$$

$$T_{\Sigma}^{упр} = T_{j,i}^{ЛА} + T_{j,i}^{Л-О} + T_{j,i}^{упр},$$

де $T_{j,i}^{Л-О}$ – час, необхідний пілоту на зчитування інформації з приладів та обробку цієї інформації.

Таким чином підсистеми $S^{Л-О}$ та $S^{Л\Lambda}$ пов'язані між собою однозначними функціональними відображеннями станів та інтенсивностей переходу зі стану в стан, що реалізовано у створеній функціональній схемі ЛМС моделі «пілот–літак» як СМО, у якій враховані як часові затримки технічної складової системи, так і часові затримки Л-О (рис. 3).

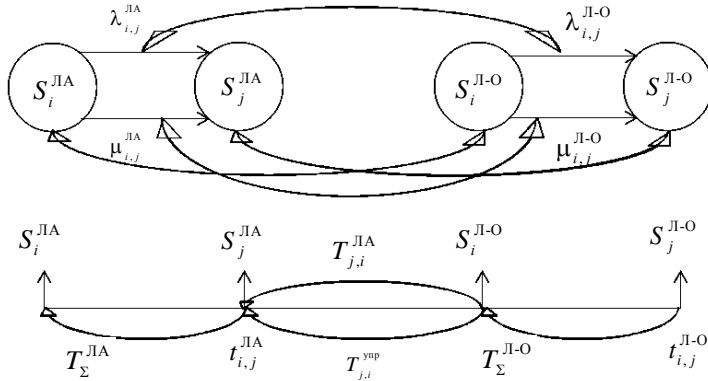


Рис. 3. Функціональна схема ЛМС моделі «пілот–літак» (Л-О–Л\Lambda) як СМО

У розглянутій системі «пілот–літак» у директорному режимі заходу на посадку Л-О–пілот виконує роботу сенсомоторного слідкування при зчитуванні інформації з пілотажних приладів, де є свої правила перенесення поглядів між різними приладами при зчитуванні інформації і у випадкові моменти часу змінюється операційний склад зорового контролю параметрів польоту. Кількість перенесень погляду від приладу до приладу протягом хвилини становить 20–50 ($T_{п} = 1,7$ с). Середня тривалість фіксації погляду на пілотажних приладах $T_{\phi} = 1,5$ с. Додатна тривалість контролю основного пілотажного приладу 80%. Прилади, які постійно контролюються пілотом – це КПП та НПП. Кожний цикл перенесення погляду за приладами розпочинається та завершується на КПП.

Наприклад, коли система $S^{Л\Lambda}$ при відхиленні параметра курсу ψ переходить зі стану $S_1^{Л\Lambda}$ у стан $S_{21}^{Л\Lambda}$, відбувається така схема перенесення погляду пілота за приладами:

$$T_{S_1 \rightarrow S_2}^{Л-О} = T_{\text{КПП}} \xrightarrow{+1} T_{\text{НПП}} \xrightarrow{+2} T_{\text{КПП}} \xrightarrow{+3} T_V \xrightarrow{+4} T_H \xrightarrow{+5} T_{\text{КПП}}.$$

Відповідно для цього випадку $T_{\Phi} = 6 \cdot 1,5 = 9$ с, $T_{\Pi} = 5 \cdot 1,7 = 8,5$ с. Кількість перенесень погляду відповідає кількості складових у рівнянні: 6 приладів – 6 складових і відповідно між ними 5 перенесень погляду пілота. Тому час контролю пілотованих приладів залежить від кількості приладів, що контролюються за кожне коло перенесення погляду.

Наприклад, для наведеного вище прикладу час дорівнюватиме:

$$T_{S_1 \rightarrow S_2}^{Л-О} = 17,5 \text{ с}, \lambda_{1,2} = \frac{1}{T_{S_1 \rightarrow S_2}^{Л-О}} = 0,0571.$$

Виходячи з вищезазначеного, отримано всі інтенсивності переходів зі стану в стан для системи $S^{Л-О}$ для штатного режиму. Відповідно до рис. 1 та даних табл. 1 вихідними параметрами, які характеризують рух літака, є $VH \vartheta \gamma \psi$, а вхідними по керуючих діях Л-О є $\delta_p^V \delta_b^H \delta_b^{\vartheta} \delta_e^{\gamma} \delta_n^{\psi}$ та інтенсивності мають такі значення:

$$\begin{aligned} \mu_{\vartheta} &= \mu_{5,1}^{ЛА} = \mu_{6,2}^{ЛА} = \mu_{7,3}^{ЛА} = \mu_{8,4}^{ЛА} = \mu_{13,9}^{ЛА} = \mu_{14,10}^{ЛА} = \mu_{15,11}^{ЛА} = \mu_{16,12}^{ЛА} = \mu_{21,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{22,18}^{ЛА} = \mu_{23,19}^{ЛА} = \mu_{24,20}^{ЛА} = \mu_{29,25}^{ЛА} = \mu_{30,26}^{ЛА} = \mu_{31,27}^{ЛА} = \mu_{32,28}^{ЛА} = \frac{1}{T_{\Pi\Pi}^{\vartheta} \cdot K_{\vartheta}}, \end{aligned}$$

де $T_{\Pi\Pi}^{\vartheta} = 0,5$ с при відхиленні $\Delta\vartheta = 1^\circ$;

$$\begin{aligned} \mu_H &= \mu_{9,1}^{ЛА} = \mu_{10,2}^{ЛА} = \mu_{11,3}^{ЛА} = \mu_{12,4}^{ЛА} = \mu_{13,5}^{ЛА} = \mu_{14,6}^{ЛА} = \mu_{15,7}^{ЛА} = \mu_{16,8}^{ЛА} = \mu_{25,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{26,18}^{ЛА} = \mu_{27,19}^{ЛА} = \mu_{28,20}^{ЛА} = \mu_{29,21}^{ЛА} = \mu_{30,22}^{ЛА} = \mu_{31,23}^{ЛА} = \mu_{32,24}^{ЛА} = \frac{1}{T_{\Pi\Pi}^H \cdot K_H}, \end{aligned}$$

де $T_{\Pi\Pi}^H = 0,1$ с при відхиленні $\Delta H = 1$ м;

$$\begin{aligned} \mu_V &= \mu_{17,1}^{ЛА} = \mu_{18,2}^{ЛА} = \mu_{19,3}^{ЛА} = \mu_{20,4}^{ЛА} = \mu_{21,5}^{ЛА} = \mu_{22,6}^{ЛА} = \mu_{23,7}^{ЛА} = \mu_{24,8}^{ЛА} = \mu_{25,9}^{ЛА} = \\ &= \mu_{26,10}^{ЛА} = \mu_{27,11}^{ЛА} = \mu_{28,12}^{ЛА} = \mu_{29,13}^{ЛА} = \mu_{30,14}^{ЛА} = \mu_{31,15}^{ЛА} = \mu_{32,16}^{ЛА} = \frac{1}{T_{\Pi\Pi}^V \cdot K_V}, \end{aligned}$$

де $T_{\Pi\Pi}^V = 2$ с при відхиленні $\Delta V = 1$ м/с;

$$\begin{aligned} \mu_{\psi} &= \mu_{2,1}^{ЛА} = \mu_{4,3}^{ЛА} = \mu_{6,5}^{ЛА} = \mu_{8,7}^{ЛА} = \mu_{10,9}^{ЛА} = \mu_{12,11}^{ЛА} = \mu_{14,13}^{ЛА} = \mu_{16,15}^{ЛА} = \mu_{18,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{20,19}^{ЛА} = \mu_{22,21}^{ЛА} = \mu_{24,23}^{ЛА} = \mu_{26,25}^{ЛА} = \mu_{28,27}^{ЛА} = \mu_{30,29}^{ЛА} = \mu_{32,31}^{ЛА} = \frac{1}{T_{\Pi\Pi}^{\psi} \cdot K_{\psi}}, \end{aligned}$$

де $T_{\Pi\Pi}^{\psi} = 1,0$ с при відхиленні $\Delta\psi = 1^\circ$;

$$\begin{aligned} \mu_{\gamma} &= \mu_{3,1}^{ЛА} = \mu_{4,2}^{ЛА} = \mu_{7,5}^{ЛА} = \mu_{8,6}^{ЛА} = \mu_{11,9}^{ЛА} = \mu_{12,10}^{ЛА} = \mu_{15,13}^{ЛА} = \mu_{16,14}^{ЛА} = \mu_{19,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{20,13}^{ЛА} = \mu_{23,21}^{ЛА} = \mu_{24,22}^{ЛА} = \mu_{27,25}^{ЛА} = \mu_{28,26}^{ЛА} = \mu_{31,29}^{ЛА} = \mu_{32,30}^{ЛА} = \frac{1}{T_{\Pi\Pi}^{\gamma} \cdot K_{\gamma}}, \end{aligned}$$

де $T_{\Pi\Pi}^{\gamma} = 0,35$ с при відхиленні $\Delta\gamma = 1^\circ$. $\Omega \in \{V, H, \vartheta, \gamma, \psi\}$.

Тут $K_s, K_H, K_V, K_\psi, K_\gamma$ – коефіцієнти, що залежать від величини відхилення відповідних параметрів та інерційності літака (коефіцієнти зміни параметрів на найменше одиничне ступеневе відхилення). Для розрахунку було використано час $T_{\text{пн}}^\Omega$ – час перехідного процесу ЛА при подоланні відповідних нормативних відхилень параметрів від потрібних значень.

Для верифікації отриманої моделі «пілот–літак» як системи масового обслуговування в роботі було реалізовано програмний комплекс в інтегрованому середовищі для інженерних та математичних розрахунків MatLab. Код програми «Модель діяльності Л-О як СМО» розпочинається з введення вхідних даних моделі, отриманих експериментальним шляхом інтенсивностей переходів системи зі стану в стан для моделі Л-О та вхідних даних для моделі ЛА: параметри польоту, ймовірності станів системи «пілот–літак» (ймовірності станів Л-О та ЛА в системі «пілот–літак»). Для розв’язку рівнянь системи Колмогорова було використано чисельний метод розв’язання диференціальних рівнянь – метод Рунге-Кутта 4-го порядку. В результаті роботи програми розраховується сукупність значень ймовірностей станів, тобто ймовірностей $p_i^\xi(t)$ того, що в момент часу t система «пілот–літак» буде знаходитися в стані S_i^ξ ($i = 1\text{ф} \dots 32$) та побудовано графіки відповідних перехідних процесів.

У **четвертому розділі** за допомогою узагальненої робочої характеристики удосконалено математичну модель «Узагальнена робоча характеристика Л-О» за рахунок введення нового базису – операторів діяльності Л-О – як системи масового обслуговування, що дає можливість досліджувати системні характеристики операторської діяльності в системі «пілот–літак» на етапі заходу на посадку.

Аналіз помилкових дій пілота показав, що основні порушення в роботі ЕС «пілот–літак» припадають на його психічну (інтелектуальну) діяльність. В основі лежить рефлексна та евристична діяльність мозку, яка загалом являє собою реакцію на подразники внутрішнього та зовнішнього середовищ (рис. 4).

Процес опрацювання Л-О зчитаної інформації безпосередньо пов’язаний з інтелектуальною діяльністю людини – розумовою роботою з вирішення завдань управління літаком з елементами невизначеності. Основу інтелектуальної діяльності людини складає рефлексорна (безумовна та умовна) та евристична діяльність людського мозку, що загалом є реакцією на зовнішні та внутрішні роздратування. Інтелектуальна діяльність пілота за рівнями свідомості представлена в узагальненій функціональній моделі інтелектуальної діяльності Л-О-пілота (рис. 5).

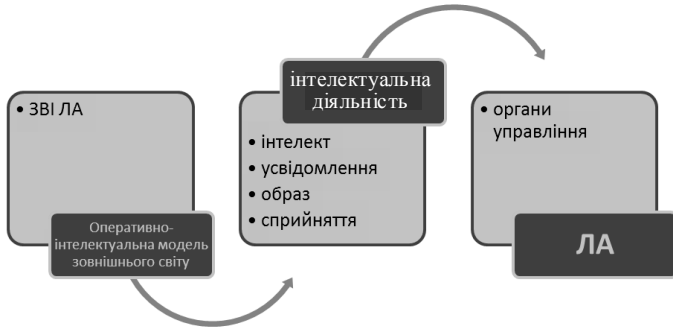


Рис. 4. Структура інтелектуальної діяльності пілота під час управління ЛА

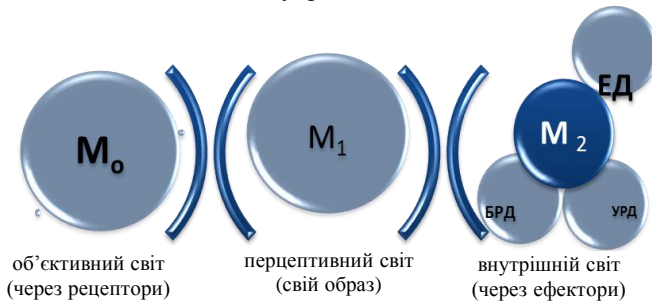


Рис. 5. Функціональна модель інтелектуальної діяльності Л-О-пілота

Розгляд розробленої функціональної моделі інтелектуальної діяльності пілота показує, що всі перелічені інтелектуальні операції укладаються в традиційні етапи операторської діяльності Л-О-пілота з управління ЛА, тобто відповідають структурі інтелектуальної діяльності пілота під час управління ЛА (див. рис. 4). Процес діяльності пілота при управлінні ЛА складається з: етапу сприйняття – це етап безпосереднього сприйняття і попередньої обробки інформації (відповідає безумовній рефлексорній діяльності (БРД)); етапу створення образу – це етап логічної обробки інформації і формування завдань управління ЛА (відповідає умовній рефлексорній діяльності (УРД)); етапу інтелекту – етап розв'язання інтелектуальної задачі управління ЛА і вибору алгоритму діяльності (відповідає евристичній діяльності (ЕД)); етапу усвідомлення – етап дії, спрямованої на реалізацію обраного алгоритму управління ЛА.

У процесі пілотування в директорному режимі діяльність пілота розглядається як операторська діяльність типу сенсомоторного

слідкування, що виражена через інерційність пілота $\lambda_{i,j}^{л-о}$. Аналіз інтелектуальної діяльності пілота показав, що діяльність пілота можна представити також як систему масового обслуговування $S^{о.д}$ з трьома станами (рис. 5): $S_1^{о.д}$ – зчитування інформації (показників) з приладу, що відповідає рівню БРД; $S_2^{о.д}$ – опрацювання зчитаної інформації, що відповідає рівню (УРД); $S_3^{о.д}$ – прийняття рішення з управління, що відповідає рівню ЕД. На рис. 6 зображено граф станів операторної діяльності пілота під час пілотування літаком у директорному режимі.

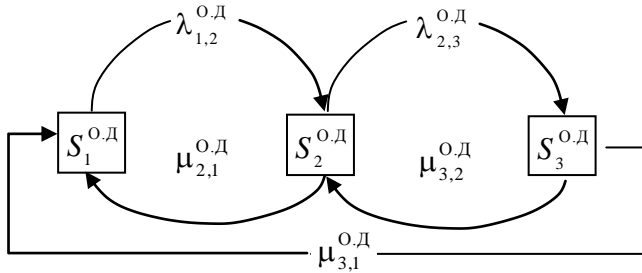


Рис. 6. Граф станів операторної діяльності пілота під час пілотування літаком у директорному режимі

Запишемо для графа станів операторної діяльності пілота (рис. 6) рівняння Колмогорова:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1^{о.д}}{dt} &= -\lambda_{12}^{о.д} p_1^{о.д} + \mu_{21}^{о.д} p_2^{о.д} + \mu_{31}^{о.д} p_3^{о.д}; \\ \frac{dp_2^{о.д}}{dt} &= -(\lambda_{23}^{о.д} + \mu_{21}^{о.д}) p_2^{о.д} + \lambda_{12}^{о.д} p_1^{о.д} + \mu_{32}^{о.д} p_3^{о.д}; \\ \frac{dp_3^{о.д}}{dt} &= -(\mu_{32}^{о.д} + \mu_{31}^{о.д}) p_3^{о.д} + \mu_{23}^{о.д} p_2^{о.д}. \end{aligned} \quad (1)$$

Отримана модель (1) дозволяє визначити час $T_{i,j}^{л-о}$, необхідний пілоту для зчитування, обробки та прийняття рішення з управління, урахуваючи особливості інтелектуальної діяльності людини, як час перехідного процесу системи $S^{о.д}$ (коли вона перейшла до стану $S_3^{о.д}$ ($p_3^{о.д} = 1$), тобто пілот прийняв рішення з управління) як розв'язок системи рівнянь (1) з початковими умовами: $p_1^{о.д} = 1$, $p_2^{о.д} = 0$, $p_3^{о.д} = 0$.

Дослідження довели, що передатна функція $W_{\text{Л-О}}(p)$ Л-О різна для різних об'єктів управління $W(p)$, а також для різних видів вхідного сигналу $u(t)$. Помилка сенсомоторного слідкування, ремнанта $n(t)$ та передатна функція $W_{\text{Л-О}}(p)$, яка описує модель сенсомоторної діяльності, функціонально залежать як від властивостей об'єкта управління, так і від властивостей сигналу $u(t)$, який обробляється людиною. Цю залежність відображають узагальненою математичною моделлю.

Складовими моделі є оператори:

$$(R_{\text{Л-О}}, Q_{\text{Л-О}}, \varepsilon),$$

де $Q_{\text{Л-О}}$ — передатна функція Л-О, яка є описанням діяльності Л-О з точністю ε інформації, описаною оператором $R_{\text{Л-О}}$, при керуючому впливі. В класичному використанні оператори функціональних перетворень обираються у класі лінійних операторів, які мають найбільше поширення в практиці експлуатація ЕС управління, у яких Л-О виконує свої функції в режимі компенсаторного стеження. В нашому випадку параметрам узагальненої робочої характеристики (УРХ) відповідають параметри розроблених вище математичних моделей у формі СМО:

- $Q_{\text{Л-О}}$ — обробка людиною пілотажної інформації $\lambda_{i,j}^{\text{Л-О}}$ відповідає БРД;
- $R_{\text{Л-О}}$ — характеристика індикаторного сигналу ЗВІ $\mu_{j,i}^{\text{ЛА}}$ відповідає УРД;
- ε — точність виконання Л-О обробки $Q_{\text{Л-О}}$ сигналу $R_{\text{Л-О}}$ відповідає ЕД.

Q -характеристика формується в процесі сприйняття. Саме сприйняття є нижчим рівнем інтелектуальної діяльності (відповідає БРД рис. 5). Через рецептори аналізаторів саме через рівень сприйняття від ЗВІ надається оперативно-інформаційна модель зовнішнього світу, яка і сприймається за допомогою рецепторів різних аналізаторів (див. рис. 4). Ця характеристика являє собою залежність часу збереження Л-О квазістійкого функціонального стану від параметрів $K = \lambda_{i,j}^{\text{Л-О}}$, $K = \lambda_{j,i}^{\text{Л-О}}$ оператора функціональних перетворень $Q_{\text{Л-О}}$. При цьому $R_{\text{Л-О}} = \text{const}$; $\varepsilon = \text{const}$. За результатами моделювання системи «пілот–літак» було визначено час перехідного процесу для кожної ймовірності станів системи «пілот–літак» та розраховано їх математичні сподівання. За результатами експериментів побудована поверхня функції $M_t = t(K, K_1)$, зображена на рис. 7, а.

Згідно з рис. 7 максимальне значення математичного сподівання часу переходу системи «пілót–літак» зі стану в стан M_i розміщене в області $0,015 \leq K \leq 0,025$ і має тенденцію до збільшення зі збільшенням K_1 . Звідси область параметрів $0,015 \leq K \leq 0,025$; $0,08 \leq K_1 \leq 0,1$ є більш кращою, оскільки функція $M_i = t(K, K_1)$ тут майже інваріантна до зміни параметрів K, K_1 . Що якісніше для сприйняття представлена інформація на ЗВІ, то точніше Л-О сприймає її.

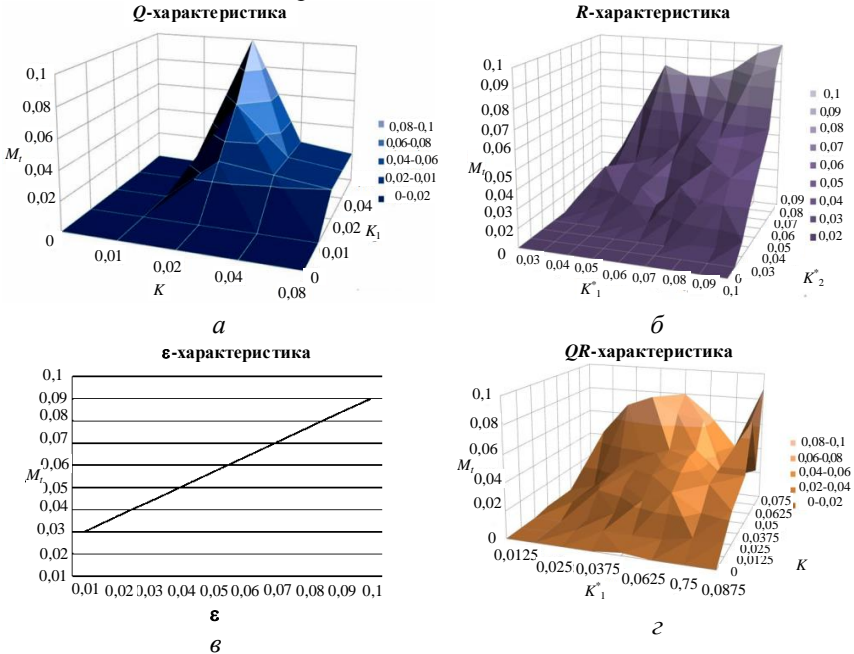


Рис. 7. Експериментально побудована:
 а – Q-характеристика; б – R-характеристика;
 в – ε-характеристика; г) – QR-характеристика

R-характеристиці відповідає етап логічної обробки інформації і формування завдань управління ЛА. Відображає залежність часу збереження Л-О квазістійкого функціонального стану від коефіцієнтів $K_1^* = \mu_{j,i}^{Л\Lambda}$, $K_2^* = \lambda_{i,j}^{Л-О}$ оператора $E(p)$ вхідного сигналу системи. При цьому $R_{Л-О} = \text{const}$; $\varepsilon = \text{const}$. За результатами експериментів побудована поверхня функції $M_i = t(K_1^*, K_2^*)$, зображена на рис. 7, б. Із наведеної

залежності зрозуміло, що вона має монотонний характер і зі збільшенням коефіцієнтів K_1^* , K_2^* значення математичного сподівання часу переходу системи «пілот–літак» зі стану в стан M_t збереження Л-О квазістійкого функціонального стану під час роботи збільшується.

ε -характеристика (точність виконання операції) відображає залежність часу існування квазістійкого функціонального стану Л-О від допустимої точності виконання їм перетворень $Q_{Л-О}$ вхідного сигналу (точності опису діяльності людини–оператором $Q_{Л-О}$ на інтервалі часу $[0, t]$). При цьому $Q_{Л-О} = \text{const}$, $R_{Л-О} = \text{const}$. За результатами експериментів побудована залежність $M_t = t(\varepsilon)$, зображена на рис. 7, в.

QR -характеристика відбувається на рівні усвідомлення, який є найвищим в інтелектуальній діяльності людини. Усвідомлення об'єднує попередні три рівні, тому і вплив треба провадити через сприйняття, образи, інтелект (див. рис. 4, 5). Залежить від коефіцієнтів $K = \lambda_{i,j}^{Л-О}$ оператора $Q_{Л-О}$ і коефіцієнта $K_1^* = \mu_{j,i}^{Л-А}$ оператора, що спостерігає за сигналом $R_{Л-О}$. При цьому $\varepsilon = \text{const}$. За результатами експериментів побудована поверхня функції $M_t = t(K, K_1^*)$, зображена на рис. 7, з робочої точки на характеристиці при високому і гострому максимумі час t . Для більш прийнятних умов роботи всієї системи необхідно налаштувати (якщо це можливо) параметри індикаторних пристроїв ЗВІ та тренованості оператора (K, K_1^*) так, щоб Л-О працювала не на критичному максимумі, а на максимумі більш спокійному, менш критичному до зміни параметрів системи. Також цей максимум повинен відповідати умові існування цілісної системи. Тому час безвідмовного здійснення перетворень повинен бути не менше часу, необхідного для вирішення завдання, поставленого перед системою. Час t фіксувався до першої помилки оператора, тобто до моменту порушення рівноваги при заданій ε .

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційного дослідження викладені у висновках, які зводяться до таких положень.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, яке полягає в розробці математичних моделей функціонування ергатичної системи «пілот–літак» на етапі посадки.

1. Аналіз існуючих підходів до формалізації процесів, які відбуваються в системі Л-О–літак, показав, що існуючі моделі не повною мірою відображають стохастичні характеристики станів системи Л-О–літак на етапі заходу на посадку. Визначено, що найефективнішим підходом щодо

формалізації процесів є підхід з позицій теорії масового обслуговування. В результаті проведеного аналізу виявлено суперечності між необхідністю більш повного опису функціонування ергатичної системи «пілот–літак» для режиму заходу на посадку, який би з єдиних системних позицій дозволив би враховувати як функціонування технічної складової системи, так і діяльність Л-О та відсутність таких математичних моделей.

2. Аналіз помилкових дій пілота показав, що основні порушення в роботі ЕС Л-О–ЛА припадають на його психічну діяльність. Дослідження особливостей діяльності Л-О при керуванні сучасним літаком дало змогу зробити висновок щодо виникнення у пілотів окрім емоційної ще й операційної напруженості. В результаті ускладнення авіаційної техніки та автоматизації на борту літака у пілота кардинально змінилася виконавча функція – більшу частину часу лише спостерігає за зміною параметрів на директорних приладах і лише за потреби бере керування літаком на себе. За результатами обробки проведеного в дисертації експертного опитування визначено, що найбільш інформативними параметрами руху літака при заході на посадку у директорному режимі для пілота є: швидкість та висота польоту, кути крену, курсу, тангажа.

3. Уперше розроблено стохастичну математичну модель діяльності ергатичної системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка на відміну від існуючих розрізаних моделей об'єднує модельні уявлення станів Л-О і технічної частини системи в єдину модель.

4. З метою верифікації розробленої моделі було проведено широке моделювання за різних початкових умов та різних польотних ситуацій. Результати широкого моделювання показали, що параметри, отримані за моделлю, відповідають параметрам польоту, отриманим з системи реєстрації параметрів літака на режимі заходу на посадку.

5. Уперше розроблено стохастичну математичну модель детермінованих станів інтелектуальної діяльності пілота під час пілотування літаком, яка на відміну від існуючих моделей дозволяє формалізувати процеси сприйняття інформації, її опрацювання та прийняття рішення з керування як стани системи масового обслуговування.

6. Удосконалено математичну модель «Узагальнена робоча характеристика Л-О», за рахунок введення нового базису – операторів діяльності Л-О – як системи масового обслуговування, що дає змогу досліджувати системні характеристики операторської діяльності в системі «пілот–літак» на етапі заходу на посадку. В області суттєвого зменшення числових значень коефіцієнтів спостерігається зменшення УРХ, що відповідає погіршенню роботи ергатичної системи «пілот–літак» з відновлення заданих параметрів польоту, що своєю чергою, свідчить про необхідність внесення коригування в методики підготовки пілотів по відпрацюванню нештатних та аварійних ситуацій.

Результати роботи становлять практичне значення та можуть використовуватися: при розробці методики підвищення безпеки польотів на етапі посадки при взаємодії пілота та диспетчера шляхом моделювання позаштатних ситуацій, виявлення критичних параметрів діяльності ергатичної системи «пілот-літак»; в технологічному процесі розробки та модернізації інформаційних інтерфейсів пілота для режимів заходу на посадку; для програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем; для проведення оцінки готовності пілота до дій в позаштатних ситуаціях в польоті та розроблення заходів щодо удосконалення методології навчання пілотів та підвищення їх кваліфікації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ **Фахові видання**

1. Благая Л. В., Павлова С. В. Аналіз людського фактора під час керування сучасним повітряним кораблем. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2012. № 4 (53). С. 20–25.
2. Blahaia L., S. Polishchuk. Concept of automated control system with analyzing condition of the ergatic component. *Proceedings of the National Aviation University*. 2014. №3 (60). С. 49–53.
3. Благая Л. В., Павлова С. В. Математичні моделі діяльності людини-оператора в авіаційних ергатичних системах. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*: зб. наук. пр. / наук. ред. О. Г. Байбуз. Д. : ЛІРА– 2014. Т. 18. С. 12–20.
4. Благая Л. В., Павлова С. В. Визначення контрольованих параметрів для моделі людини-оператора при директорному керуванні. *Вісник інженерної академії*. 2015. № 2. С. 115–119.
5. Blahaia L. V., Kozhokhina O. V., Gribov O. V. Error Statistics Processing of an Aviation Operator for Reliability Prediction. *Electronics and control systems*. № 1 (47), 2016. P. 127–131.

Публікації, що додатково відображають результати дисертаційного дослідження

6. Blahaia L. V., Gribov O. V., Kozhokhina O. V. Processing Statistical Data about UAV Operator Errors. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments*: 2015 IEEE 3rd International Conference, October 13-15, 2015. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2015. P. 120–123.
7. Blahaia L., Kozhokhina O. Informational reliability of radar system operator. MRW 2016 MICON 2016 IRS 2016 May 9–12, Krakow (Poland), 2016. P. 5.13.
8. Blahaia L. V. Model of Side-looking Airborne Radar Controller Activity. *Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*: 2016 IEEE 4th International Conference, October 17–19, 2016. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2016. P. 63–66.

9. Blahaja L. A. Study on Unmanned Aerial System Vulnerabilities for Durability Enhancement / *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments*: 2019 IEEE 5th International Conference, October 22–24, 2019. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2019. P. 40–43.

10. Благая Л. В. Інформаційна взаємодія людини з авіаційною соціотехнічною системою. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: науково-методична конференція, 21–23 листопада 2011 р.: тези доп. К., 2011. С. 58.

11. Благая Л. В. Людський фактор в системі управління повітряним рухом. Політ. Сучасні проблеми науки: XII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 4–5 квітня 2012 р.: тези доп. К., 2012. С. 28.

12. Благая Л. В. Застосування принципу активного оператора при вирішенні проблеми людського фактора в авіації при керуванні сучасним повітряним кораблем. *Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем*: Міжнародна науково-практична конференція, 15–16 листопада 2012 р.: тези доп. Кіровоград (Україна), 2012. С. 190–191.

13. Благая Л. В. Математичні моделі людини-оператора. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: науково-методична конференція, 28–30 листопада 2012 р.: тези доп. К., 2012. С. 9.

14. Благая Л. В. Характеристики людини-оператора як елемента авіаційної соціотехнічної системи. АВІА–2013: XI Міжнародна науково-технічна конференція 21–23 травня 2013 р.: тези доп. К., 2013. С. 8.61–8.64.

15. Благая Л. В. Узагальнена робоча характеристика як модель людини-оператора. *Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики*: XV міжнар. наук.-практ. конф., жовтень 2013 р.: тези доп. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2013. С. 69–71.

16. Благая Л. В. Обробка робочих інструкцій органів ОВД Украєро-руху с целью підвищення надійності операторів АНС. *Статистичні методи обробки сигналів і даних*: II Міжнародна науково-практична конференція, 16–17 жовтня 2013 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2013. С. 91–93.

17. Благая Л.В. Директорне керування у вирішенні проблеми людського фактора. *Проблеми навігації і управління рухом*: Всеукраїнська науково-практична конференція, 18–20 листопада 2013 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2013. С. 9.

18. Благая Л. В. Дослідження функціональних можливостей людини-оператора при керуванні сучасним літком. *Авіакосмічні технології та*

системи: літня школа молодих учених та студентів, 23–27 червня 2014 р.: тези доп. Київ, Житомир: НАУ, 2014.

19. Благая Л. В. Формування оперативного образу польоту за різних режимів керування. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: науково-технічна конференція, 17–19 листопада 2014 р.: тези доп. К., 2014. С. 7.

20. Благая Л. В. Математичне моделювання системи «пілот–літак» на основі СМО. АВІА–2015: XII Міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2015. С. 7.50–7.53.

21. Благая Л. В. Аналіз оптимальної аналітичної моделі человека-оператора. АВІА–2015: XII Міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2015. С. 7.78–7.82.

22. Благая Л. В. Критерії стійкості та керованості як кількісна оцінка характеристик ЛА. *Проблеми навігації і управління рухом*: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів, 23–25 листопада 2015 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2015. С. 6.

23. Благая Л. В. Особливості інтелектуальної діяльності людини-оператора сучасної аеронавігаційної системи. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: науково-технічна конференція, 21–23 листопада 2016 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2016. С. 6.

24. Blahaia L., Blizhnikova K., Orel I. Solution of the problem of capacity in modern airports with the introduction of circular runways. АВІА-2017: XIII Міжнародна науково-технічна конференція, 19–21 квітня 2017 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2017. С. 12.65–12.68.

25. Благая Л., Дерій І., Пілунський С. Актуальність дослідження автоматичних систем посадки БПЛА. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: науково-технічна конференція, 21–23 листопада 2018 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2018. С. 16.

26. Благая Л., Сорока І., Дроженець Д. Особливості діяльності людини оператора при керуванні БПЛА. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: науково-технічна конференція, 21–23 листопада 2018 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2018. С. 17.

27. Blahaia L. V., Kozhokhina O. V., Herasymenko T. S. Informational needs in the maintenance of the unmanned aerial vehicle. АВІА-2019: XIV Міжнародна науково-технічна конференція, 23–25 квітня 2019 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2019. С. 16.31–16.33.

АНОТАЦІЯ

Благая Л. В. Модель функціонування системи «пілот–літак» при управлінні рухом на етапі посадки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – «Навігація та управління рухом» – Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Розроблено стохастичну математичну модель діяльності ергатичної системи «пілот–літак» на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка об'єднує модельні уявлення станів людини-оператора і технічної частини системи в єдину модель. Результати розробленого програмного забезпечення показали, що параметри, отримані за моделлю, відповідають параметрам польоту, отриманим з системи реєстрації параметрів літака на режимі заходу на посадку.

Результати удосконалення математичної моделі «Узагальнена робоча характеристика людини-оператора» дали змогу досліджувати системні характеристики операторської діяльності в системі «пілот–літак» на етапі заходу на посадку та, відповідно до отриманих висновків вносити коригування в методики підготовки пілотів з відпрацювання нештатних та аварійних ситуацій.

Ключові слова: математична модель, управління рухом, людина-оператор, ергатична система, етап посадки.

ANNOTATION

Blahaia L. V. Function model of the pilot-aircraft system during traffic control at the landing phase. – Manuscript.

Thesis for a degree of candidate of engineering science in the speciality 05.22.13 'Navigation and motion control' – National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

A stochastic mathematical model of the activity of the 'pilot-aircraft' ergatic system at the landing phase as a queuing system has been developed. This model combines model representations of human operator states and the technical part of the system into a single model.

The results of the developed software showed that the parameters obtained from the model correspond to the flight parameters obtained from the flight data recorder system during the landing phase.

The results of the mathematical model improving 'Generalized operating characteristic of human operator' allow investigating the system characteristics of operator activities in the 'pilot-aircraft' system at the landing stage and, according to the conclusions obtained, make adjustments to the methods of pilots training for practising emergencies.

Keywords: mathematical model, motion control, human operator, ergatic system, landing phase.

Підп. до друку 16.08.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 139-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03058. Київ-58, проспект Любомира Гузара, 1
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002