

Національний авіаційний університет  
Міністерство освіти і науки України

Національний авіаційний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Благая Людмила Володимирівна**

УДК 629.735.072.4:656.7.071.7:510.589 (043.5)

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **Модель функціонування системи пілот-літак при управлінні рухом на етапі посадки**

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Л.В. Благая

Науковий керівник Павлова Світлана Вадимівна, доктор технічних наук, доцент,  
старший науковий співробітник, завідувач кафедри авіоніки НАУ

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Благая Л.В.* Модель функціонування системи пілот-літак при управлінні рухом на етапі посадки. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 «Навігація та управління рухом» – Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота спрямована на розв'язання актуальної науково-технічної задачі – розробки стохастичної математичної моделі функціонування ергатичної системи «пілот-літак» на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка на відміну від існуючих розрізнених моделей формалізує та об'єднує модельні уявлення станів людини-оператора і технічної частини системи в рамках єдиної моделі.

Проведений аналіз публікацій показує велику кількість існуючих теоретичних підходів до формалізації процесів функціонування ергатичної системи «людина-оператор-машина». Сучасні підходи до формалізації процесів, які відбуваються в системі «людина-оператор-літак» показують, що існуючі моделі не в повному обсязі показують стохастичні характеристики станів цієї системи на етапі заходу на посадку. Відсутні системні моделі «пілот-літак», які шляхом об'єднання модельних уявлень станів людини-оператора і технічної частини ергатичної системи в єдину модель, забезпечували б опис як людини, так і технічної частини системи в рамках єдиного підходу формалізації.

Найбільш ефективним підходом щодо формалізації процесів, які відбуваються в системі «людина-оператор-літак» на режимі заходу на посадку, є підхід з позицій теорії масового обслуговування.

В результаті проведеного аналізу виявлено суперечність 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 людини-оператора та відсутність таких математичних моделей.

В результаті ускладнення авіаційної техніки та автоматизації на борту літака у пілота кардинально змінилася виконавча функція – замість активного управління він перетворився на «спостерігача-контролера», який більшу частину часу лише спостерігає за зміною параметрів на директорних приладах і лише за потреби бере керування літаком на себе. Орієнтована на людину автоматика для авіаційної системи повинна розроблятися і функціонувати таким чином, щоб до якоїсь міри дистанціювати людину-оператора від виконання конкретних операцій по експлуатації системи, тобто оператор в процесі експлуатації повинен займатися виконанням лише необхідних і важливих завдань.

Необхідність автоматизації процесу управління літаком на етапі заходу на посадку пояснюється зниженням імовірності неправильних рішень, дій, реакцій через помилки обробки інформації та підвищенням точності керування.

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, тангажу.

Розроблена з єдиних модельних уявлень математична модель діяльності ергатичної системи «пілот-літак» підтвердила гіпотезу про те, що модель ергатичної системи повинна мати у своєму складі зв'язок між складовою моделі людини-оператора та складовою моделі літального апарату у вигляді інтенсивностей переходу зі стану в стан, що характеризує реакцію пілота на зміну стану літального апарату, та зв'язок, що характеризує його реакцію на сигнал пілота, що керує.

З метою верифікації розробленої моделі було проведено широке моделювання при різних початкових умовах за різних польотних ситуацій. Результати широкого моделювання «Моделі діяльності людини-оператора як системи масового обслуговування» показали, що параметри отримані за моделлю, відповідають параметрам польоту, отриманих з системи реєстрації параметрів літака на режимі заходу на посадку.

Завдяки удосконаленню математичної моделі «Узагальнена робоча характеристика людини-оператора» шляхом введення нового базису – операторів діяльності людини-оператора – як системи масового обслуговування, виявилось можливим встановлювати взаємозв'язок між вихідними реакціями людини (результатами його діяльності) і вхідними впливами.

У дисертаційній роботі вперше розроблено стохастичну математичну модель діяльності ергатичної системи пілот-літак на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка на відміну від наявних розрізнених моделей об'єднує модельні уявлення станів людини-оператора і технічної частини системи в єдину модель. Вперше розроблено стохастичну математичну модель детермінованих станів інтелектуальної діяльності пілота при пілотуванні літаком, яка на відміну від наявних моделей дозволяє формалізувати процеси сприйняття інформації, її опрацювання та прийняття рішення по керуванню як стани системи масового обслуговування.

Удосконалено математичну модель «Узагальнена робоча характеристика людини-оператора», шляхом 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 розроблених математичних моделей дозволяє підвищити безпеку польотів шляхом моделювання позаштатних ситуацій, виявлення критичних параметрів діяльності ергатичної системи «пілот-літак», розробляти ефективні заходи щодо підвищення безпеки польотів. Розроблені математичні моделі дозволяють проводити оцінку готовності пілота до дій в позаштатних ситуаціях в польоті та розробляти заходи щодо удосконалення методології навчання пілотів та підвищення їх кваліфікації. Розроблені моделі дозволяють: обґрунтовувати доцільність використання отриманих даних при розробці методик підвищення безпеки польотів на етапі заходу на посадку при взаємодії пілота та засобів відображення інформації; в технологічному процесі

розробки та модернізації інформаційних інтерфейсів пілота для режимів заходу на посадку; для програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем.

Результати досліджень впроваджено в розробках: в Державному підприємстві «Антонов», в Авіакомпанії «Укрерорух» Державного підприємства обслуговування повітряного руху України, навчальному процесі Національного авіаційного університету, що підтверджено відповідними актами впровадження.

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

### **Список публікацій здобувача**

#### *Статті у наукових фахових виданнях України*

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.

#### *Матеріали конференцій, які включено до наукометричних баз Scopus*

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. 124–127.

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 4rd 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 5rd International Conference, October 22–24, 2019. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2019. P. 40–43.

#### *Матеріали конференцій*

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 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. Обработка рабочих инструкций органов ОВД Украеро-руху с целью повышения надежности операторов 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. Анализ оптимальной аналитической модели 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. ABIA-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. ABIA-2019: XIV Міжнародна науково-технічна конференція, 23–25 квітня 2019 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2019. С. 16.31–16.33.



**Blahaia L.V.** Function model of the pilot-aircraft system during traffic control at the landing phase. - Qualification scientific work on the rights of a 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.

The thesis focuses on solving the scientific and technical problem of the development of a stochastic mathematical function model of the pilot-aircraft system during traffic control at the landing phase on the basis of a queuing system. Developed model in contrast to the existing models, formalizes and combines peculiar properties of human factors and technical issues of the system in a single model.

The literature review shows a large number of existing theoretical approaches to formalizing the functioning processes of the 'human-operator-machine' ergatic system.

Current approaches to formalizing processes that occur in the 'human-operator-aircraft' system showed that the existing models do not fully reflect the stochastic characteristics of the states of this system at the approach phase.

There are no systematic models of 'pilot-aircraft', which by combining model representations of the human operator and the technical part of the ergatic system into a single model and describe them within a single formalized approach.

An approach from the perspective of queuing theory is the most effective for formalizing processes in the 'human-operator-aircraft' system during the landing phase.

The results of the analysis found a contradiction between the lack of such mathematical models and the necessity for a deeper description of the operation of 'pilot aircraft' system for the approach phase, which from a single system position would take into account the functioning of the technical component of the system and the human operator.

As a result of the complication of aviation equipment and automation on-board, the pilot's executive function has changed dramatically. Instead of active control, the pilot currently becomes an 'observer-controller', who most of the time only observes changes in control devices and takes control of the aircraft only when necessary.

Human-centred automation for aviation systems should be designed and operated in that way so the human operator would only perform necessary and important tasks during flight.

The need to automate the aircraft control process at the landing phase is explained by a decrease in the probability of incorrect decisions, actions, reactions due to information processing errors and an increase in control accuracy.

According to the results of the expert survey conducted in the thesis, it was found that the most informative parameters of the aircraft movement during landing in the director mode for the pilot are speed and altitude, roll, course, and pitch angles.

Developed from unified model representations, the mathematical model of the 'pilot-plane' ergatic system confirmed the hypothesis that the model of the ergatic system should include a connection between the component of the human operator model and a component of the aircraft model in the form of transition intensities, a state that characterizes the pilot's response to a change in the state of the aircraft, and a relationship that characterizes its response to the pilot's control signal.

To verify the developed model, extensive modelling was performed under different initial conditions under different flight situations. The results of extensive modelling of 'Models of human operator act as a queuing system' showed that the parameters obtained from the model correspond to the flight parameters obtained from the flight data recorder system during the landing phase.

Due to the improvement of the mathematical model 'Generalized performance of a human operator' by introducing a new basis that human operators act as a queuing system, it became possible to establish a relationship between the initial reactions of a human (the results of his activity) and input influences.

In the thesis, for the first time, a stochastic mathematical model of the activity of the 'pilot-aircraft' ergatic system at the landing phase as a queuing system was developed, in contrast to the existing disparate models, it combines model representatives of the human operator states and technical part of the system into a single model. For the first time, a stochastic mathematical model of the deterministic states of the pilot's intellectual activity during aircraft piloting was developed, which, in

contrast to the existing models, allows to formalize the processes of information perception, processing and decision-making on control as a state of the queuing system.

The mathematical model 'Generalized performance of a human operator' was improved by introducing a new basis that is that human operators act as a queuing system, which allows investigating the system characteristics of operator activity in the 'pilot-aircraft' system at the landing phase.

The practical value of the developed mathematical models makes it possible to improve flight safety by simulating emergencies, identifying critical parameters of the 'pilot-aircraft' ergatic system, and developing effective measures to improve flight safety. The developed mathematical models make it possible to assess the readiness of a pilot to act in emergencies in flight and to develop measures to improve the methodology for training pilots and improving their qualifications. The developed models allow to substantiate the expediency of using the obtained data in the development of methods for improving the safety of flights at the stage of a landing when the pilot interacts with the means of displaying information; in the technological process of development and modernization of pilot information interfaces for landing phases; for software design of intelligent systems.

The research results were implemented in the developments of the next institutions ANTONOV COMPANY, UkSATSE, in the educational process of the National Aviation University, which is confirmed by the relevant acts of implementation.

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

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА З АВІАЦІЙНОЮ ЛЮДИНО-МАШИННОЮ СИСТЕМОЮ:.....	23
1.1 Аналіз стану проблеми інформаційної взаємодії пілота з літаком .....	23
1.2 Дослідження діяльності людини-оператора при управлінні сучасним літаком.....	28
1.2.1 Особливості діяльності людини-оператора при управлінні сучасним літаком.....	28
1.2.2 Характеристики діяльності людини-оператора в системі «пілот- літак».....	30
1.3 Аналіз моделей обробки інформації людиною-оператором.....	34
Висновки до розділу 1.....	46
РОЗДІЛ 2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА ПРИ УПРАВЛІННІ СУЧАСНИМ ЛІТАКОМ.....	48
2.1 Особливості функціонування системи «пілот-літак».....	48
2.1.1 Узагальнена структура людино-машинної системи «пілот-літак».....	48
2.1.2 Функціональна схема зв'язку пілота і літака при заході літака на посадку.....	50
2.2 Визначення контрольованих параметрів для моделі оцінки ефективності.....	53
2.3 Операційний склад зорового контролю параметрів польоту в директорному режимі управління.....	59
Висновки до розділу 2.....	60
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ЛЮДИНО-МАШИННОЇ СИСТЕМИ «ПІЛОТ-ЛІТАК» .....	63

3.1 Побудова математичної моделі «пілот-літак», як система масового обслуговування.....	63
3.2.Складові моделі системи «пілот-літак».....	65
3.3. Логіко-структурна схема людино-машинної системи «пілот-літак».....	74
3.4 Програмна реалізація математичної моделі.....	83
Висновки до розділу 3.....	93
<b>РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА – ПІЛОТА В КОНТУРІ «ПІЛОТ-ЛІТАК» ЗА ДОПОМОГОЮ УЗАГАЛЬНЕНОЇ РОБОЧОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....</b>	
4.1 Узагальнена робоча характеристика людини-оператора в контурі «пілот-літак».....	95
4.2 Дослідження функціональних можливостей людини-оператора.....	108
4.3 Побудова математичної моделі операторської діяльності людини-оператора.....	111
4.3.1. Структурно-логічна діяльність людини-оператора.....	111
4.3.2. Граф станів операторської діяльності.....	120
4.4. Експериментальне отримання узагальненої робочої характеристики за допомогою розробленої моделі системи масового обслуговування.....	122
Висновки до розділу 4.....	128
ВИСНОВКИ.....	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	134
Додаток А. Акти впровадження результатів наукових досліджень.....	149
Додаток Б. Математична модель складових системи «пілот-літак».....	152
Додаток В. Код програми «Модель діяльності людини-оператора як система масового обслуговування».....	154

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АНС – аеронавігаційна система
- АСУ – автоматизована система управління
- БРД – безумовно-рефлексна діяльність
- ЗВІ – засоби відображення інформації
- ЕД – евристична діяльність
- ЕС – ергатична система
- ІЗ – інформаційне забезпечення
- КПП – командно-пілотажний пристрій
- ЛМС – людино-машинна система
- ЛА – літальний апарат
- Л-О – людина-оператор
- ЛФ – людський фактор
- НПП – навігаційно-пілотажний пристрій
- ОПР – обслуговування повітряного руху
- ПК – повітряний корабель
- ПМУ – прості метеорологічні умови
- ПР – прийняття рішень
- САУ – система автоматичного управління
- СМО – система масового обслуговування
- СМУ – складні метеорологічні умови
- УПР – управління повітряним рухом
- УРД – умовно-рефлексна діяльність
- УРХ – узагальнена робоча характеристика
- IATA – Міжнародна асоціація повітряного транспорту (International Air Transport Association)
- ICAO – Міжнародна організація цивільної авіації (International Civil Aviation Organization)

## ВСТУП

### Обґрунтування вибору теми дослідження

В середині минулого століття причини авіаційних подій, так чи інакше були пов'язані з технічним станом літака і становили приблизно 50%, а решта 50% припадали на всі інші причини, які прийнято узагальнено називати людським фактором. На початку ХХІ ст. це співвідношення значно збільшилося і можна прогнозувати, що з часом частка технічних причин ще більш скоротиться і практично всі 100% пригод можуть бути обумовлені людським фактором [49, 102, 144]. Іншими словами, традиційний підхід, завдяки якому вдалося мінімізувати вплив технічних відмов на безпеку польотів і скоротити аварійність до деякого відносно низького рівня, вже вичерпав себе і подальше підвищення рівня безпеки польотів можливо тільки при кардинально новому врахуванні впливу людського фактору. Сьогодні йде формування сучасного підходу, що заснований на повноцінному врахуванні людського фактору, який повинен призвести до того, що всі люди, що працюють в авіаційно-транспортному комплексі, – і, звичайно, пілоти і диспетчери – повинні діяти як елементи складної цілісної системи. Запровадження цього підходу направлено на досягнення принципово нового рівня безпеки польотів.

Складність об'єктів управління безперервно зростає. На сучасному етапі розвитку науки і техніки створюють великомасштабні технічні комплекси з різними типами автоматизованих виробництв. Всі ці системи є ергатичними (людино-машинними) по своїй суті і побудовані на основі взаємодії автоматизованих систем управління різних рівнів, використанні комп'ютерів, відеотерміналів, типізації програмного та технічного обслуговування, побудові баз даних з людиною-оператором (Л-О). Тобто при створенні таких систем необхідно врахування людського фактору, який має підвищувати ефективність роботи як людини, так і системи в цілому, 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 задач управління та інтенсивності їх рішення. Для сьогодення є актуальним використовувати не лише психофізіологічні можливості оператора по візуальному сприйняттю інформації, а і ефективно залучати розумові здібності людини. В зв'язку з чим виникає задача автоматизації інтелектуальної підтримки прийняття рішення Л-О в системі управління.

Високий розвиток автоматизації методів обробки польотної інформації, методів розпізнання та класифікації зображень, не може перевершити по своїй надійності людину, так як сьогодні найбільш адаптивним пристроєм, що розпізнає, здатним приймати оптимальні рішення при наявності різного виду завод залишається людина. Частина функцій управління в сучасних умовах покладено на комп'ютер, однак це не виключає оператора із вирішення задач управління, а звільняє його лише для вирішення найскладніших, які не піддаються автоматизації. Саме тому роль людини-оператора в сучасних ергатичних системах не спрощується, а навпаки стає більш складною.

Аналіз і синтез систем, що містять в своєму складі оператора, вимагає знання його характеристик, якостей, властивостей та обмежень, які накладаються через його участь в роботі системи.

Проблемою вирішення людського фактору займалися досить давно. Для вирішення проблем проектування автоматизованих систем використовується кілька десятків методологічних підходів до людини і техніки, в яких пропонуються різні варіанти оптимізації взаємодії Л-О та автоматизованої системи, організації процесів управління, вибору ролі Л-О, розподілу функцій між автоматикою та людиною. Як висновок, виникає завдання формалізованого опису діяльності людини-оператора, розробки математичних моделей, структурних рішень та алгоритмів, які призначені для інтелектуалізації прийняття рішення в автоматизованих системах управління збором та обробкою стохастичної польотної інформації, методів та пристроїв для оцінки



працездатності людини з метою підвищення надійності операторської діяльності і як наслідок безпеки польотів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в рамках концепцій ІСАО з проблем людського фактору [34, 35, 114-117]: «орієнтована на людину автоматизація», «ситуаційна обізнаність», «контроль за помилками» та має зв'язок з наступними держбюджетними науково-дослідними роботами:

- «Методологія ситуаційного колективного управління пілотованими і безпілотними літальними апаратами в єдиному повітряному просторі» (987-ДБ15 № держреєстрації 0218U003279 );
- «Розробка комплексу оцінювання та прогнозування ситуацій в соціотехнічних аеронавігаційних системах за умов ризику та невизначеності» (870-ДБ-13 НДЧ № держреєстрації 0113U000089).

Роль автора в зазначених науково-дослідних роботах, у яких дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає у розв'язанні задач аналізу діяльності операторів аеронавігаційної системи та шляхів підвищення надійності їх діяльності.

**Мета і завдання дослідження:** розробка математичних моделей функціонування ергатичної системи пілот-літак на етапі посадки.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Провести аналіз існуючих теоретичних підходів 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.
- Удосконалити математичну модель «Узагальнена робоча характеристика людини-оператора».
- Провести широке моделювання з метою верифікації розроблених моделей.

**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 ймовірності, 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 управління на етапі посадки.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У процесі дисертаційних досліджень отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено стохастичну математичну модель діяльності ергатичної системи пілот-літак на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка на відміну від існуючих розрізнених моделей об'єднує модельні уявлення станів людини-оператора і технічної частини системи в єдину модель.

2. Вперше 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 по керуванню як стани системи масового обслуговування.

3. 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 тому, що розроблені математичні моделі дозволяють підвищувати безпеку польотів шляхом моделювання позаштатних ситуацій, виявлення критичних параметрів діяльності ергатичної системи пілот-літак та розробки ефективних заходів щодо підвищення безпеки польотів; проводити оцінку готовності пілота до дій в позаштатних ситуаціях в польоті та розробляти заходи щодо удосконалення методології навчання пілотів та підвищення їх кваліфікації; обґрунтовувати доцільність використання отриманих даних при розробці методик підвищення безпеки польотів на етапі заходу на посадку при взаємодії пілота та засобів відображення інформації; можуть бути використані в технологічному процесі розробки та модернізації інформаційних інтерфейсів пілота для режимів заходу на посадку, а також для програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем.

Результати роботи впроваджені: у навчальний процес Національного авіаційного університету – розроблене математичне та програмне забезпечення використано при проведенні 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, дані, отримані завдяки моделюванню використовуються для програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем; в Авіакомпанії «Украерорух» Державного підприємства обслуговування повітряного руху України впроваджено при розробці методик проведення оцінки готовності пілота до дій в позаштатних ситуаціях в польоті та розроблення заходів щодо удосконалення методології навчання пілотів та підвищення їх кваліфікації.

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 [7–12, 14–17, 19] виконані без співавторів. Деякі роботи виконані у співавторстві з науковим керівником та іншими науковцями. Зокрема, здобувачу належать: аналіз існуючих концепцій дослідження впливу людського фактору на безпеку авіації [4], вибір математичної моделі діяльності Л-О в авіаційній системі [5], визначення контрольованих параметрів для моделі Л-О при директорному керуванні [6], визначення надійності операторів АНС [13], аналіз оптимальної аналітичної моделі Л-О [18], розроблено функціональну схему інтелектуальної діяльності людини-оператора сучасної АНС [20], досліджено та порівняно системи посадки пілотованих та безпілотних повітряних суден [21], досліджено та порівняно особливості керування Л-О пілотованими та безпілотними повітряними суднами [22], проведено аналіз впливу людини на функціонування авіаційної ергатичної системи [122], аналіз статистичних помилок Л-О сучасної АНС [123], досліджено методику обробки статистичних даних про помилки операторів АНС [124], досліджено інформаційну надійність оператора при взаємодії з ЗВІ [125], досліджено модель Л-О при взаємодії з ЗВІ [126], аналіз проблем сучасних злітно-посадкових смуг при посадці [127], досліджено методи підвищення точності операторів в сучасній авіаційній системі [128], досліджено фізіологічні особливості сприйняття Л-О інформації в сучасній АНС [129].

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень доповідалися і 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 «АВІА-2013» (Київ, НАУ, 2013);
- 15 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);
- Друга 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 3<sup>rd</sup> 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 «АВІА–2015» (Київ, НАУ, 2015);
- MRW 2016 MICON 2016 IRS 2016 (Krakow, Poland, 2016);
- 2016 IEEE 4<sup>rd</sup> 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 5<sup>rd</sup> 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-ти друкованих наукових працях: 5-ти наукових статтях у фахових виданнях, 4-х працях міжнародних конференцій, які входять до наукометричної бази Scopus, а також 18 тезах наукових конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3-х додатків. Загальний обсяг дисертації складає 166 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 123 сторінки. Робота містить 30 рисунків та 7 таблиць. Список використаних літературних джерел складається з 146 найменувань.

## РОЗДІЛ 1

# СТАН ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА З АВІАЦІЙНОЮ ЛЮДИНО-МАШИННОЮ СИСТЕМОЮ

### 1.1 Аналіз стану проблеми інформаційної взаємодії пілота з літаком

В системі управління сучасним ЛА операторська діяльність – одна з найскладніших та специфічних із всіх існуючих в сучасних умовах. З розвитком авіації, розширенням застосування літальних апаратів збільшується ступінь складності вирішуваних Л-О задач. Перехід на реактивну техніку пов'язаний із значним збільшенням тяги двигунів та питомої ваги на крило. При цьому значно знизився ефект «відчуття літака», що відіграє значущу роль в просторовому орієнтуванні пілота. Польоти в складних метеорологічних умовах додали складності при керуванні польотом як операторам на борту, так і на землі. Здійснення просторового орієнтування в приладовому польоті на рівні мовних та розумових процесів збільшує завантаженість Л-О та суттєво збільшує можливість виникнення ілюзій при оцінюванні просторового положення літака.

Освоєння польотів на великих висотах (в умовах значного ступеня розрідження атмосфери), збільшення дальності польотів (великий запас палива на борту), створення літаків із змінною геометрією крила призводять до того, що для пілота стає недостатнім мати сталі навички керування літаком. Відтепер його навички мають бути достатньо гнучкими, так як в залежності від щільності атмосфери, від ваги літака та ступеня стріловидності крила суттєво змінюється реакція літака у відповідь на дію пілота.

За рахунок збільшення кількості систем обладнання літака збільшилася кількість параметрів, що контролює Л-О на борту. Кількість так званих точок звернення, тобто тих елементів обладнання, до яких пілоту з тою чи іншою періодичністю потрібно звертатися, за останні кілька десятиріч збільшилася в середньому в 10 разів. Збільшення кількості елементів обладнання кабіни літака також призводить до завантаженості уваги пілота, зниженню його резервних можливостей.

Перехід до польотів на надзвукових швидкостях супроводжується збільшенням швидкоплинності подій польоту. Кількість робочих операцій, що виконує пілот за одиницю часу, збільшилася в порівнянні з періодом польотів на гвинтомоторних літаках в 7 разів [89]. В деяких випадках потік інформації, що надходить до пілота, може перевищувати можливості її обробки. Це викликає виникнення небезпечних ситуацій, пов'язаних з пропуском пілотом окремих керуючих дій.

В деяких випадках ступінь складності виконуваного пілотного завдання такий, що пілот змушений мобілізувати всі свої резерви для того, щоб виконати його з достатньо високою якістю. Дослідження розвитку ПК з 1996р. по 2020рр. показало збільшення їх технічних характеристик більше, як в 2 рази, в той час як психофізіологічні характеристики людини протягом тисячоліть залишаються практично незмінними [36] .

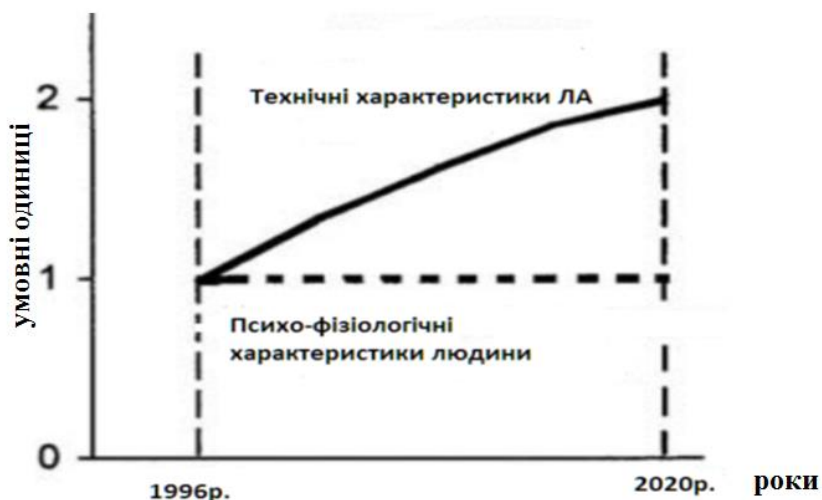


Рис. 1.1 Графік порівняння технічних характеристик ЛА та психофізіологічних можливостей людини

Зростання складності авіаційної техніки призвело до необхідності автоматизації як на борту літака, так і процесів що відбуваються у системі управління повітряним рухом. Сучасні автоматизовані системи, що застосовуються в авіації, стали новим природнім етапом розвитку технічних засобів, що використовувалися в цій галузі.



Управління польотом сучасного літака здійснюється пілотом, а також спеціальними автоматичними системами, які полегшують процес пілотування та покращують якість керування. Основою автоматизації є автопілот, який дозволяє автоматизувати всі етапи польоту. Більш поглиблений розвиток автоматизації отримали системи автоматичного управління та більш складні структуровані комплекси: пілотажні та навігаційні. Ці системи виконують стабілізацію літака в просторі та на маршруті, реалізують програмне керування на різних етапах польоту. Сьогодні автоматизовані і такі, найбільш складні, етапи польоту, як захід на посадку, посадка та зліт.



Рис.1.2 Діаграма-статистика ІАТА авіаційних подій [146]

Але не дивлячись на автоматизацію ПК авіаційні події (АП) з вини ЛФ становлять до 87% згідно аналізу, що проведений ІСАО та ІАТА [144-146], з яких 67% становлять саме людські помилки членів екіпажу при керуванні ПК, а 33% - безпосередньо порушення.

Грунтовне дослідження світової авіаційної спільноти з авіаційної безпеки свідчить про те, що на етапі посадки АП та інцидентів в 15-20 разів більше, ніж в середньому протягом усього польоту, що становить більше як 40-50% від загальної кількості випадків.

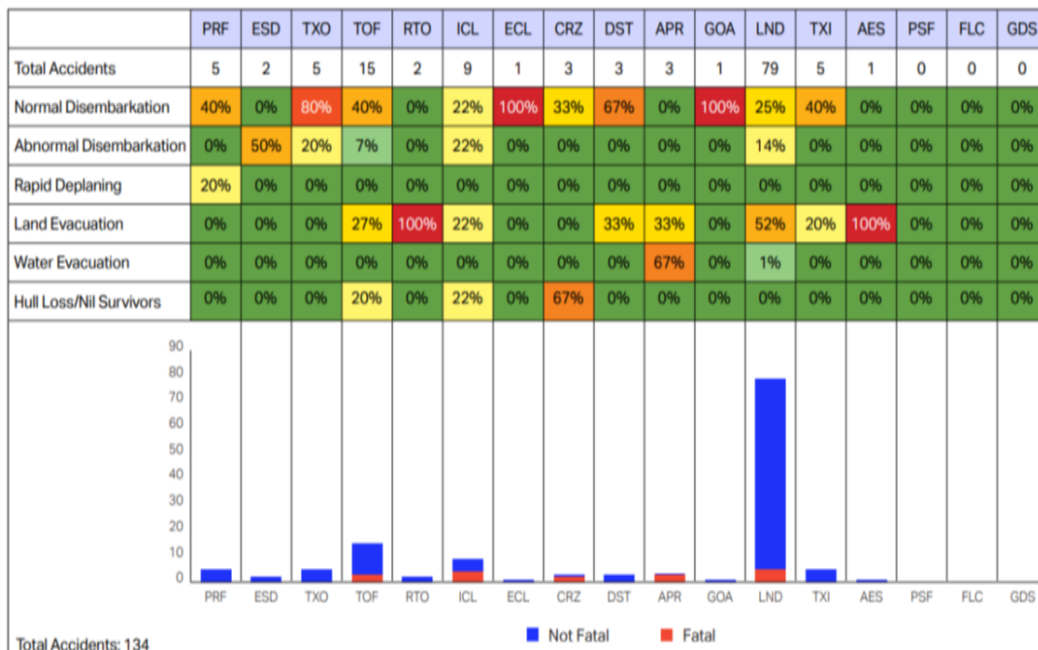


Рис.1.3 Діаграма-статистика причин помилок людини-оператора згідно ІАТА [145, 146]

Таблиця 1.1.

### Статистика ІАТА [146]

Cabin End States per Phase of Flight (2017-2019)



Ще в 1996 році Всесвітній фонд безпеки польотів створив Цільову групу з розробки загальносвітових рекомендацій щодо зниження кількості авіаційних подій при заході на посадку і посадки. Була ретельно вивчена п'ятнадцятирічна

статистика кількості надзвичайних подій, яка показала: кожен рік при заході на посадку та посадці в світі відбувається в середньому 17 авіаційних подій повітряних суден польотною вагою 5700 кг і більше.

Як показала статистика, при заході на посадку відбувається 12% авіакатастроф, під час самої посадки – 16%, при приземленні (тобто до посадки, до того, як шасі літака торкнулося ЗПС) – 25%.

Бортові автоматизовані системи керування літаком забезпечують однаковість пілотування на всіх режимах польоту, а також покращують характеристики стійкості та керованості літака. Вони суттєво спрощують пілоту процес виконання польоту. Однак при цьому пілот втрачає практичні навички самостійного розв'язання завдання. Це може призвести до тяжких наслідків при виникненні аварійних чи позаштатних ситуацій. Тобто стрімке удосконалення бортових автоматизованих систем керування не знизило кількості льотних пригод, що виникають внаслідок помилкових дій екіпажу [29, 115].

При виробленні стратегії керування літаком пілот аналізує поточну ситуацію. Для цього пілоту необхідно обробляти значний обсяг інформації про ситуацію, що склалася, та на підставі цього виробляти відповідні керуючі впливи. У процесі керування між інформацією, яку одержує пілот, і його відповідними діями існує закономірний зв'язок, який може бути охарактеризовано часом реакції пілота і точністю його дій. Час відповідної реакції чи час виконання однієї логічної закінченої операції керування складається з часу зорового пошуку, часу прийому інформації, часу прийняття рішення, часу моторного акту, часу контролю результату дії. Як випливає з літературних джерел приблизна кількісна оцінка часу переходу від сприйняття інформації від одного приладу до дії дорівнює 6-12с. [30, 31, 90, 114].

У загальному випадку активність людини визначена його людською природою, тим, що людина в процесі роботи обов'язково має на увазі кінцеву мету своїх взаємодій з машиною; тим, що він не просто переробляє інформацію, приймає рішення, маніпулює органами керування, але обов'язково діє, має своє особисте відношення до виконуваних дій, активно прагне до мети. Тому

відповідно до принципу активного оператора [47], при визначенні ролі людини в ергатичній системі дуже важливо, щоб він не був просто додатком машини, а здійснював активні функції. Це викликано тим, що при пасивній позиції оператора його перехід до активних дій вимагає значної витрати сил, однак ефективність його роботи при цьому може виявитися невисокою. При активній же позиції оператора, ефективність його діяльності досягає більш високого значення, а його психофізіологічні витрати виявляються меншими. Тобто людина повинна бути включена в контур управління для забезпечення функціональної сумісності з ЛА. Урахування принципу активного оператора направлено на компенсацію (зменшення) часу необхідного Л-О на виконання дій по виробленню керування. Особливо це важливо при виникненні нестандартної ситуації у польоті.

Автоматизація борту сучасних літаків призводить до суттєвого підвищення складності систем керування повітряним кораблем. При опануванні нової бортової автоматизованої системи керування екіпажу літака надаються їй загальна структура, призначення, можливості та рекомендації щодо дій при відмовах, які траплялися при випробуваннях чи при експлуатації. Пілоти, як правило, не уявляють, як функціонують різні блоки системи за різних умов польоту [89]. Внаслідок цього пілот не приймає прямої, безпосередньої, участі в виробленні керуючих впливів, а лише контролює правильність роботи та справність автоматики за показниками спеціальних дисплеїв, він не слідкує за реальними умовами польоту. Через це часто пілот втрачає навички по відбиванню складних відхилень і це призводить до негативних наслідків при відмовах [29, 115].

## **1.2. Дослідження діяльності людини-оператора при управлінні сучасним літаком**

### **1.2.1 Особливості діяльності людини-оператора при управлінні сучасним літаком**

В період сучасного розвитку науки та техніки є характерним для багатьох професій зниження затрат фізичної енергії, зростання ролі інтелектуальної

діяльності та підвищення рівня нервово-психічного напруження. Все більшого розповсюдження набуває операторська діяльність, характерними рисами якої є:

- Здійснення діяльності на фоні нервово – психічного напруження, розвиток якого тісно пов'язаний як із усвідомленням високої соціальної значимості вирішуваних завдань, так і з високим ступенем складності здійснюваної роботи;
- Надвеликий обсяг інформації, що підлягає аналізу;
- Готовність перейти від режиму слідкування до активного керування системою;
- Необхідність прийняття та реалізації рішення в умовах визначеного та лімітованого відрізка часу.

Операторська діяльність при керуванні ЛА – одна з найскладніших та специфічних із всіх існуючих в сучасних умовах. Для більшості наземних професій характерним є те, що виконавець сам обирає найбільш прийнятний для нього (оптимальний) темп виконання робочих операцій. Пілот у польотній ситуації практично не може ні прискорити, ні затримати розвиток подій – пілот виконує дії в нав'язаному йому темпі. Крім того швидкість виконання операцій наближається до гранично можливої. Ці обставини створюють у Л-О не тільки емоційну, а також і операційну напруженість.

З неоднорідністю повітряного простору пов'язана наявність постійних збурюючих впливів на положення літака. Можливі різні зміщення літака пілот повинен повсякчас корегувати великою кількістю узгоджених рухів руками та ногами. Суворі послідовність та швидкоплинність подій польоту вимагає, аби рухи пілота були швидкими та точними. Працю пілота характеризує висока насиченість робочого часу виконуваними операціями. В окремих випадках пілот може виконувати до 200 переносів погляду за одну хвилину та виконувати до 100 робочих рухів. В більшості випадків ці операції накладаються одна на одну в часі.

Насиченість робочого часу вимагає швидкого переключення уваги та здатності до широкого розподілу уваги в процесі роботи. Як будь-який оператор, що працює в режимі слідкування, пілот проводить співставлення, порівняння

інформації про поточний та заданий режим роботи. Причому він перевіряє дані про поточний режим порівнюючи їх із своїми уявленнями, заснованими на знаннях і досвіді. Він переводить погляд на те місце на приладі, де за його уявленням і досвідом має бути показник стрілки приладу. Тут прогнозування відбувається ні рівні відчуттів та сприйняття.

Впровадження новітніх технологій в процес керування літаком призводить до зниження надійності Л-О пілота. При використанні комплексних приладів виявляються пропуски значимих показників інших приладів через підвищену концентрацію уваги на комплексних приладах. Використання директорних приладів, знижуючи відчуття безпосередньої участі пілота в польоті, призводить до відокремлення пілота від керованого ним літака. Це призводить до зниження його пильності. Тривале використання системи автоматичного керування польотом знімає з пілота задачу аналізу інформації на етапах збору та обробки, що призводить до зниження ефективності виконання функції резервування. При виникненні відмов в роботі тих чи інших систем літака різко збільшується час виявлення та впізнання пілотом виду відмови, що призводить до затримки в виконанні їм адекватних ситуації дій.

Сучасні польоти не є повністю автоматизованими і людина залишається безпосереднім учасником польоту. Для забезпечення високої надійності виконуваних Л-О функцій контролю та резервування потрібно кількісно оцінювати ступінь надійності кожного з елементів системи «людина – машина» та більш раціонально розподіляти функції між пілотом та технічними системами на різних етапах польотного завдання з метою підвищення надійності роботи системи «пілот – літак» в цілому.

### **1.2.2 Характеристики діяльності людини-оператора в системі «пілот-літак»**

Введення нових інформаційних технологій, комп'ютеризація праці та життя людини спричинили собою зміну традиційних уявлень про професіоналізм. В авіації є гостра проблема підбору надійного персоналу, який забезпечує високу

точність і безпомилковість виконання трудових операцій у технологічному процесі.

Можливості Л-О, як і його обмеження, впливають із фізіологічних і психологічних якостей людини і особливостей виконуваної діяльності. В авіаційній галузі впродовж всієї історії її існування проводиться величезна робота із зменшення впливу людського фактору [117, 144], але повністю уникнути його не вдається, як не вдається створити абсолютно надійну складну технічну систему. Нерідко деякі властивості людини та зовнішні обставини не дозволяють отримати необхідну продуктивність та якість праці.

Людина є ключовим елементом при створенні та використанні систем, процесів, технологій авіаційного призначення. При цьому незмінно постає проблема забезпечення максимально можливої безпеки польотів. Кожні три із чотирьох авіаційних подій є результатом збоїв у працездатності людини [4].

Основними етапами діяльності Л-О при взаємодії з машиною є [111]: вибір і прийом інформації; переробка інформації; прийняття рішення; виконання фізичних дій на основі прийнятих рішень; перевірка результатів шляхом прийняття нової інформації.

Людина як керуюча система володіє певними характеристиками. Навіть для техніки, експлуатованої без участі людини (наприклад, прилади, що встановлюються на борту ракети), необхідно враховувати вплив людини на етапах виготовлення, настройки та контролю її працездатності.

Л-О як система складається з трьох блоків (рис. 1.4): приймаючий пристрій (органи відчуття – зір, слух, дотик, смак, нюх); система, що приймає рішення (центральна нервова система); вихідний пристрій (органи руху, мови). Кожен з блоків системи Л-О характеризується такими найважливішими параметрами: часом реакції, швидкістю переробки інформації, надійністю прийняття рішення, зором, слухом, тактильною чутливістю, антропометричними даними людини.



Рис. 1.4 Функціональна схема зв'язку системи пілот-ПК

Загальний час сенсомоторної реакції – це виконання певного руху (наприклад, поворот керма) у відповідь на сигнал, що раптово виник з максимально швидкою для людини реакцією. Час сенсомоторної реакції складається з двох складових [27, 28]: латентного періоду реакції і тривалості моторної дії. Латентний період реакції (час від моменту появи сигналу до початку відповідної дії) визначається органом почуття, на який діє подразник.

У таблиці 1.2 наведені середні величини латентного періоду при впливі зовнішніх подразників середньої інтенсивності на різні аналізатори.

Таблиця 1.2

**Середні величини латентного періоду**

<b>Аналізатор (якість сигнал-подразник)</b>	<b>Латентний період, с.</b>
Тактильний (торкання)	0,09 – 0,22
Слуховий (звук)	0,12 – 0,18
Зоровий (світло)	0,15 – 0,22
Нюховий (запах)	0,31 – 0,39
Температурний (тепло – холод)	0,28 – 1,6
Больовий	0,13 – 0,89
Вестибулярний	0,4 – 0,8

З великої кількості показників якості роботи Л-О в ергатичній системі «пілот-літак» найбільш часто використовують [77] :

- швидкодію;



- напруженість;
- економічність;
- надійність.

Швидкодія оператора характеризується тривалістю робочого циклу при припущенні, що в середньому початок робіт запізнюється щодо моменту видачі завдання на 0,2 с, при середній продуктивності оператора. Швидкодію конкретного оператора може бути визначено з використанням тренажера або хронометрування на реальному робочому місці. Пропускна здатність або швидкість переробки інформації людиною-оператором вимірюється в бітах в секунду (біт / с). Як система людина володіє наступними характеристиками:

- максимальна пропускна здатність - не більше 40 біт / с;
- номінальна пропускна здатність - 6 біт / с;
- мінімальна пропускна здатність - не менше 2 біт / с.

Мінімальна пропускна здатність характеризується тим, що низький темп надходження інформації негативно впливає на ймовірність прийняття правильного рішення (аж до засипання оператора). Не дарма робота пілотів вважається однією з найважчих. Їм доводиться працювати на нижній і верхній межі пропускної здатності, плюс висока ціна помилки.

Низький темп подачі вхідної інформації (порівняний із сигналами, що заважають) проявляється в падінні активності Л-О, висока ступінь подачі вхідної інформації – до різкого зростання помилок і відмови Л-О від виконання завдання. Пропускна здатність залежить також від умов роботи і від того, наскільки повно відповідають ці умови психофізіологічним і антропометричним характеристикам людського організму.

Напруженість роботи оператора визначається ступенем функціонального напруження його організму, нервового або фізичного в реальних і екстремальних умовах.

Економічність оператора визначається як відношення кількісного результату його роботи до витрат на підготовку і підтримання кваліфікації оператора.

Надійність оператора характеризує його властивість виконувати задані функції протягом певного часу при заданих умовах роботи. Показники надійності ЛМС повинні враховувати властивості і людини, і машини. Однак якщо методи оцінки надійності машин досить добре розроблені, то розрахунок надійності Л-О представляє відомі труднощі і складає в даний час одну з актуальних проблем у вирішенні проблеми безпеки польотів.

Одним з важливих напрямків, по якому йде вирішення проблеми ефективності професійної діяльності на авіаційному транспорті, є проведення профвідбору на основі аналізу професійно важливих якостей, необхідних оператору. Проте, встановлено, що близько 40% операторів, які допустили аварійні інциденти в роботі, володіли високим рівнем розвитку професійних якостей. При цьому основна увага при профвідборі направлена на вивчення психофізіологічних якостей оператора. Якісний персонал повинен відрізнятися безвідмовністю, безпомилковістю і своєчасністю дій.

### **1.3 Аналіз моделей обробки інформації людиною-оператором**

Різноманітність існуючих математичних моделей взаємодії людини з технічними засобами в АСК УПР пояснюється великою кількістю завдань, що постають перед оператором та необхідністю аналізу операторської діяльності з різних точок зору.

Для моделювання складних видів взаємодії Л-О з різними засобами відображення інформації використовують математичні імовірнісні моделі методів теорії інформації, теорії масового обслуговування, теорії автоматичного управління.

Застосування методів теорії інформації [31, 113] засноване на представленні Л-О як каналу зв'язку, завданням якого є передача інформації з засобів відображення на органи керування. При цьому під інформацією розуміються будь-які зміни в керованому процесі або умовах зовнішнього середовища, що надходять до оператора від засобів відображення інформації або безпосередньо сприймаються оператором, а також команди та вказівки про необхідність

здійснення тих чи інших впливів на процес керування. Основним поняттям теорії інформації є кількість інформації.

В теорії інформації розглядаються лише стаціонарні процеси, статистичні характеристики яких з часом не змінюються. Характеристики ж Л-О зважаючи на його навченість, стомлюваність, дію зовнішніх та внутрішніх факторів безперервно змінюються в часі. В теорії інформації не враховується смислова сторона інформації, її цінність та значимість. На діяльність же оператора впливають не тільки статистичні характеристики сигналів, але і їх зміст і значення для оператора. Не враховується тимчасова невизначеність сигналів. Для людини ж має велике значення не тільки те, які сигнали і з якою ймовірністю до неї надходять, але і час їх надходження. Це є джерелом додаткової невизначеності, яка при аналізі діяльності не враховується. Наявність цих труднощів накладає істотні обмеження на застосування теорії інформації в моделюванні діяльності Л-О.

Застосування теорії масового обслуговування дозволяє вирішити багато питань організації діяльності Л-О. До їх числа належить визначення необхідного числа операторів, визначення вимог до рівня підготовленості оператора (навченості, швидкості реакцій, об'єму пам'яті та ін.), визначення допустимої щільності потоку сигналів, що надходять до оператора, рішення завдань організації взаємодії операторів. Представляється можливість обчислення ймовірностей різних станів системи "людина – машина".

Особливостями застосування методів теорії масового обслуговування для побудови моделей діяльності оператора є: введення цілого ряду обмежень щодо виду вхідного потоку заявок і закону розподілу часу обслуговування (вхідний потік на практиці часто відрізняється від найпростішого, а закон розподілу часу обслуговування – від експоненціального); не враховується якісна, змістовна сторона обслуговування (для оцінки якості обслуговування необхідно додатково застосовувати інші методи).

Для створення моделі Л-О за допомогою математичних методів теорії масового обслуговування необхідно щоб інформація, яка надходить до оператора,

допускала інтерпретацію її в термінах вхідного потоку замовлень; вхідний потік і час обслуговування повинні підкорятися певним законам розподілу; вхідний потік повинен бути однорідним, в іншому випадку має бути можливий поділ його на однорідні групи (по терміновості, важливості, витратам на обслуговування і т. п.); для відображення динамічного характеру процесу обслуговування повинна бути встановлена система критеріальних тимчасових функцій, що дозволяє оцінити ефективність СМО (системи масового обслуговування) на нестационарних режимах роботи. При дотриманні цих умов можливе застосування методів теорії масового обслуговування для аналізу діяльності оператора в системі управління ПК.

З позицій теорії автоматичного управління Л-О розглядається як елемент слідкуючої системи, якою представляється в даному випадку система "людина - машина". На роботу системи впливають динамічні зв'язки елементів системи один з одним і з Л-О. Процес аналізу системи складається з етапів:

- встановлення критерію поведінки замкнутої системи і визначення її передавальної функції; знаходження такої передавальної функції оператора, яка дозволила б отримати необхідну функцію всієї системи;
- проведення системи заходів (відбір, тренування операторів, відповідне оформлення технічної частини ЛМС), що забезпечують необхідну функцію оператора.

При вирішенні цих завдань враховуються наступні психофізіологічні особливості людини: обмеженість смуги пропускання, одноканальність, недостатня точність роботи, нестабільність коефіцієнта підсилення, внесення перешкод і т. п. Врахувати всі ці особливості не є можливим на практиці, тому використовують лише спрощені моделі діяльності оператора.

Застосування розглянутих математичних методів для побудови моделей операторської діяльності, дозволяє встановити взаємозв'язок між вихідними реакціями людини (результатами його діяльності) і вхідними впливами. Встановлення такого взаємозв'язку має особливо велике значення при інженерному проектуванні, використанні для планування та обробки результатів

експериментальних досліджень; для побудови рівнянь, які описують співвідношення між змінними, досліджуваними в експерименті. Між інформацією, що впливає на оператора, та його відповідними керуючими впливами, встановлюються різноманітні, але закономірні відношення у вигляді лінійної залежності. Для оцінки пропускної здатності Л-О використовуються теоретико-інформаційні моделі [31, 113], створені на основі методів теорії інформації. При подальших дослідженнях [104] виявлено, що лінійний зв'язок зберігається лише в обмеженій області експериментальних умов. В цій праці для оцінки пропускної здатності оператора застосовують апарат лінгвістичної змінної. Недоліками вищезазначених моделей є умови рівномірної появи, складності та однорідності вхідних сигналів, а також постійність характеристик оператора (без врахування досвіду, самопочуття та ін.).

Деякі автори [106] описують систему «людина-машина», як одноканальну систему до складу якої входять наступні елементарні етапи управління: прийом, переробка інформації, прийняття рішення, і як результат керуючий вплив. За даними досліджень [92, 109] найбільшу кількість помилок (81%), пілот допускає на етапі прийому інформації. Тому моделювання розумової діяльності Л-О на етапі отримання інформації та, як наслідок, прийняття керуючого рішення, є головним завданням при проектуванні й експлуатації автоматизованих систем.

Дослідження закономірностей поведінки Л-О при прийнятті рішення (ПР) описано в роботах [88, 111]. Для кількісного аналізу процесів ПР при оперативному керуванні застосовують математичний апарат теорії масового обслуговування, який розвинутий для випадків паралельної обробки сигналів (замовлень) Л-О [31].

Ще в 60-х рр. ХХ ст. [137, 138] були створені найпростіші моделі роботи Л-О при «ручному управлінні». Згодом вони були удосконалені за допомогою математичних методів теорії автоматичного керування у вигляді передатних функцій [120]. Сутність методу полягає в тому, що характеристики Л-О, яка входить до складу системи, описуються за допомогою лінійної передатної функції. Реакція оператора, яка не відповідає цій передатній функції,

представлена у вигляді завади. Передатна функція Л-О в замкненій системі керування:

$$W_{\text{л-о}}(S) = \frac{K_{\text{л-о}} e^{-\tau_{\text{л-о}} s} (\tau_1 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1.1)$$

де  $\tau_{\text{л-о}}$  – час затримки, який дорівнює 0,1-0,25с;  $T_1$  та  $T_2$  – сталі часу, які характеризують інерційність дій Л-О,  $T_1$  в межах 10-20с визначає інтегруючі якості Л-О (за експериментальними даними [36, 75]),  $T_2=0,1-0,2$ с відображає затримку рухової (м'язової) системи Л-О;  $\tau_1 \leq 1$  – стала часу, яка характеризує прогностичну здатність, тобто залежить від тренуваності, навченості, ступеня стомлюваності Л-О та характеризує здатність пілота реагувати на швидкість вхідного сигналу;  $K_{\text{л-о}}$  – коефіцієнт передачі Л-О лежить в межах від 10 до 100 і залежить від градієнта відхилення керованої величини на відхилення органу керування.

Найпростішим режимом управління літаком є такий, коли відсутні інтегрування та диференціювання сигналу, тобто  $T_1 = \tau_1 = 1$ , і при цьому Л-О реалізує передатну функцію підсилювальної ланки з затримкою:

$$W_{\text{л-о}}(S) = \frac{K_{\text{л-о}} e^{-\tau_{\text{л-о}} s}}{T_1 s + 1} \quad (1.2)$$

Л-О здатна змінювати свої характеристики при керуванні об'єктами із змінними динамічними властивостями. Адаптованість Л-О до ПК досить обмежена саме внаслідок динамічних властивостей останнього. Для покращення динамічних та статичних властивостей літака використовують різноманітні автоматичні пристрої. Лінійна безперервна модель не враховує здатності Л-О виконувати керування при зникненні вхідного сигналу, а також дискретний характер керування, який виникає при спостереженні за більш високочастотними сигналами. Робота оператора більше відповідає функціонуванню імпульсного (дискретного) ланцюга, аніж безперервного. Дослідження доводять, що Л-О при керуванні виконує вибірку візуальної вхідної інформації з інтервалом

дискретності  $T_0 \cong 0,3-0,5\text{с}$  та на основі відновленого безперервного сигналу відтворює керуючий вплив.

Дискретна передатна функція моделі Л-О має вигляд:

$$W_{\text{л-о}}(S) = \frac{K_{\text{л-о}} e^{-\tau_{\text{л-о}} S} (\tau_1 S + 1)}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1.3)$$

де  $d = e^{-T_0/T_2}$ ;  $\bar{\tau} = \frac{\tau_n}{T_0}$ ; Z – z-перетворення.

Зі зменшенням інтервалу дискретності дискретна модель буде наближатися до неперервної моделі Л-О  $W_{\text{л-о}}(S)$ .

За допомогою вищезазначених способів описання діяльності Л-О можливо охарактеризувати лише сприйняття, обробку інформації та керуючий вплив. А увагу слід приділити якраз вивченню динамічних якостей людини-оператора як нелінійної системи із змінними параметрами. Результатами дослідження діяльності Л-О є створення адекватного опису в формі математичних моделей динаміки його поведінки. Математичну модель можливо отримати лише на основі використання експериментальних даних [137], вивчивши реакцію живої людини на той чи інший вплив. Реакція на один і той самий одиничний вплив за різних зовнішніх умов може бути різноманітною. Дослідженнями реакції людини на періодичний сигнал [120] встановлено, що при початковому відставанні за фазою від вхідного сигналу людина швидко пристосовується та практично ліквідує цю затримку за невеликої частоти повторення.

При тривалому спостереженні вхідного сигналу  $x(t)$  на екрані та виміру параметрів для різних частот було отримано передатну функцію Л-О як функцію часу, а саме

$$W_{\text{л-о}}(S, t) = \frac{K_{\text{л-о}}(t) e^{-s[\bar{\tau}_{\text{л-о}}(t)]} (\tau_1(t) S + 1)}{(T_1(t) S + 1)(T_2(t) S + 1)} \quad (1.4)$$

В літературних джерелах [37, 38] розроблено математичну модель Л-О використовуючи ряд ортогональних G-функціоналів Вінера [32]. Відмінністю даного підходу є те, що сумісна обробка вхідного сигналу та сигналу реакції Л-О

на основі багаторазової взаємної кореляції дозволяє визначити ядра G-функціоналів Вінера, які і являють його динамічні характеристики, причому ядро першого порядку описує лінійні динамічні властивості Л-О як нелінійної системи.

Існуючі кібернетичні моделі діяльності Л-О розглядаються як такі собі «чорні скрині», які мають лише входи і виходи, всередині яких відбуваються всі процеси. Прикладом може слугувати кібернетична модель Дж.Бойда [130]. Тут не існує безпосереднього моделювання фізичних процесів, які створює Л-О при керуючих впливах. Л-О розглянуто як «чорну скриньку», на вхід якої подається випадковий процес зі спектральною щільністю  $S_x(\omega) = \frac{c^2}{2\pi}$  та кореляційною функцією  $R_x(\tau) = c^2\delta(\tau)$ , тобто до Л-О подається «білий» Гаусов процес  $x(t)$ , а виходом  $y(t)$  буде реакція Л-О у вигляді випадкового процесу. Тоді модель Л-О представлена у вигляді ряду:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n[k_n, x(t)] \quad (1.5)$$

де  $G_n[k_n, x(t)]$  - ортогональні G-функціонали Вінера, такі, що  $\overline{G_n \times G_m} = 0$ , при  $m \neq n$ . Риска над добутком означає усереднення за часом,  $k_n$  - ядра функціоналів.

Застосовуючи для опису динамічних властивостей Л-О ряд із ортогональних G-функціоналів Вінера, було отримано в якості лінійного наближення передатні функції виду:

$$W_1'(S) = K_{л-о}' e^{-\tau_{л-о}' s} \frac{\tau_1' s + 1}{T_1'^2 s^2 + 2\xi_1' T_1' s + 1} \quad (1.6)$$

$$W_1''(S) = K_{л-о}'' e^{-\tau_{л-о}'' s} \frac{\tau_1'' s + 1}{T_1''^2 s^2 + 2\xi_1'' T_1'' s + 1} \quad (1.7)$$

$$W_{л-о}(S) = \frac{K_{л-о} e^{-\tau s} (\tau_1 s + 1)}{T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1} \quad (1.8)$$

де коефіцієнти можуть змінюватися в залежності від стану людини (втома, стрес, перенавантаження та ін.) [6].

$$K_{л-о} = 0,25 \div 0,33, \tau = 0,16 \div 0,22, \tau_1 = 0,2 \div 0,3, T_1 = 0,27 \div 0,4.$$



Коефіцієнт  $\xi_1 = 0,6$ , який характеризує коливальність, відрізняє цю модель від попередніх. Крім того, вираховуючи ядра функціоналу вище першого порядку можливо описати динамічні властивості Л-О. Практично доцільно використовувати розглянуті методи комплексно в залежності від тих умов, в яких працює оператор.

Головним недоліком вищезазначених моделей є лише приблизне оцінювання діяльності Л-О, оскільки ці методи не дозволяють враховувати цілий ряд особливостей діяльності оператора, а при врахуванні, призводять до суттєвого ускладнення моделі. При цьому, найчастіше, аналітичний розв'язок стає достатньо ускладненим і пов'язаним з великими теоретичними та обчислювальними труднощами.

В [48, 84] замість передатної функції математичні моделі представлені у вигляді узагальненої робочої характеристики (УРХ). УРХ являє собою сукупність початкових моментів  $s$ -го порядку випадкової величини, яка характеризує час і якість роботи Л-О в конкретній задачі керування, у вигляді функції характерних параметрів.

В [38] наведено набір методик та математичних моделей для описання та оцінки ефективності, якості та надійності функціонування систем керування під загальною назвою «узагальнений структурний метод». Тут функціонування Л-О описано за допомогою функціонально-семантичних мереж. Функціональні мережі описують послідовність виконання операцій при жорсткому логічному зв'язку при виконанні окремих операцій. Семантичні мережі описують характер логічних зв'язків (відношень) між окремими елементами, які складають мережу, без стійкої фіксації послідовності виконання операцій. Введення Л-О в функціональну мережу дозволяє мати справу не лише з алгоритмічними, а і з евристичними видами діяльності людини в системі керування [78]. Саме до останніх належить процес прийняття рішення Л-О, який неможливо описати за допомогою аналітичних методів. Для вирішення цих завдань використовують методи ситуаційного управління [93], які враховують закони людського мислення, розробки спеціальної мови для описання, узагальнення та класифікації ситуацій, а

також для формування рішень по керуванню. За допомогою запропонованої методики та розробленої мови ситуаційного керування, можливо описати діяльність людини-оператора та оцінити її ефективність математичним моделюванням на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ).

Найбільше моделей обробки інформації людиною представлені у вигляді стохастичних моделей авторами Р. Аткинсоним, Г. Бауером, Р. Бушем, Ф. Мостеллером, У. Естесом, Е. Кротерсом, А. П. Свиридовим [97].

Згідно з цими імовірнісним уявленнями модель, наведена у праці [1], має такий вигляд:

$$P(x_n = 1) = (1 - c)^{(n-1)}(1 - g) \quad (1.9)$$

Де  $P(x_n=1)$  – імовірність помилки в  $n$ -й пробі;  $c$  – випадкова величина;  $n$  – номер проби;  $c$  – імовірність стану  $\bar{c}$ ;  $g$  – імовірність правильного відгуку в тому випадку, коли випробуваний перебуває в стані  $\bar{c}$ .

Також доволі відомими є моделі окремих сенсорних ланок: зорової (іконічна пам'ять) та слухової (ехоїчна пам'ять). Інформація по сприйняттю сенсорів зберігається дуже короткий час: для зору 1-2с, для слуху – 2-8с.

Для зорового сприйняття людиною це

$$\dot{R} = \frac{9 \text{ букв}}{0,05\text{с}} = 180 \text{ букв}^{**} / \text{с} \quad (1.10)$$

для слухового – максимальна кількість, яку переробляє людина становить 3–4 слова за секунду (С. І. Архангельський [1]). За даними [68], максимальна швидкість мовних м'язів близько 5 складів, введення 9 букв у зоровий реєстр 0,05 с, у слуховий – 1–2 с, у перебігу цього часу необхідно враховувати і одночасне згасання раніше введеної її частини за цей час.

Г. Ебінгауз запропонував моделі на основі статистичного оброблення експериментального матеріалу, де в якості кількісного опису були використані, отримані ним «криві забування». Але їх вигляд складний щодо підбору, якщо не ґрунтується на означених міркуваннях щодо процесу оброблення інформації

пам'яттю. Модель Г.Ебінгауза, що ґрунтується на апроксимації емпіричних даних показовою функцією вигляду [131]:

$$b = \frac{100k}{(\lg\tau)^e + k} \quad (1.11)$$

Де  $\tau, k$  – константи моделі.

А. Щукаревим і Т. Робертсоном уперше були запропоновані емпіричні моделі для визначення кількісної залежності між кількістю повторень і обсягом (або якістю) засвоєної інформації [121].

$$y = y_\infty + b \exp(-cx) \quad (1.12)$$

Де  $y$  - засвоєння,  $x$  – вправи ( $y$  відповідних одиницях);  $c, b$  – деякі числові коефіцієнти;  $y_\infty$  – межа засвоєння (при  $x \rightarrow \infty$ ).

Запропонована за аналогією з автокаталітичною мономолекулярною реакцією формула Т. Робертсона фактично надає обернену функцію:

$$y = y_\infty \frac{\exp(by_\infty x)}{c + \exp(by_\infty x)} \quad (1.13)$$

де  $b$  – константа навчається і завдання;  $c$  – стала інтегрування.

Також емпіричні моделі обробки інформації Л-О в залежності від виду були запропоновані у вигляді експоненційної функції І. М. Шпільрейна, А. Швейцера, К. Халла; гіперболи Р. С. Гаряєва, П. Л. Жетт; параболи Г.Вудроу [142].

Формалізація функціональних залежностей між змінними характеристик, які самі по собі безпосередньо не спостерігаються (сила навиків, величина потреби, значущість стимулу та ін.) та отриманням інформації виражено у формальних моделях. Процес обробки інформації, що пов'язаний із резервами людської пам'яті та асоціативним сприйняттям, описано експериментально рівнянням Г. Н. Вострова та Ю. В. Рубльова [95], але кількісних розрахунків і числових значень окремих величин та коефіцієнтів автори не наводять:

$$I(\lambda_1, \lambda_2, \tau) = A_0(1 - e^{-\lambda_1 \tau})e^{-\lambda_2 \tau} \quad (1.14)$$

де  $I$  – функція, що визначає обсяг інформації, що зберігається в пам'яті людини;  $\lambda_1, \lambda_2$  – параметри, що залежать від кількості та якості асоціативних зв'язків і статистичних характеристик забування, властивих конкретній групі людей.

Процес навчання передбачає значне накопичення дослідних даних, які в залежності між змінними, що характеризують умови приймання та оброблення інформації з подальшими математичними перетвореннями був трансформований в напрям створення моделей, що спираються на певні гіпотези. Л. Терстон створив модель, яка ґрунтується на положенні, що всі дії того, хто навчається, на шляху до поставленої мети діляться на дії, які ведуть до успіху і дії, що призводять до помилки [143]:

– приросту ймовірності успіху  $\frac{ds}{d\tau} = ap = \frac{as}{s+l}$

– приросту ймовірності зменшення помилок  $\frac{dl}{d\tau} = -aq = -\frac{al}{s+l}$

Трудність або складність завдання враховується параметром  $m = sl$ . Тут  $s$  і  $l$  – відповідно успішні та помилкові дії;  $p$  – імовірність успіху;  $q = 1 - p = l / (s + l)$  – імовірність невдачі;  $\alpha$  – константа швидкості навчання.

Недоліком моделей, що спираються на певні гіпотези, є штучність вихідних гіпотез, недостатня експериментальна апробація результатів та відсутність ґрунтування на істотних складових процесу навчання.

Для сьогодення актуальним є використання методів машинної реалізації математичних моделей, які використовують для дослідження характеристик функціонування ергатичних систем [4]. Для реалізації математичної моделі Л-О на ЕОМ потрібно побудувати відповідний моделюючий алгоритм. При імітаційному моделюванні алгоритм, що реалізовує модель, відтворює процес функціонування системи в часі, при чому імітуються елементарні явища, які складають процес, із збереженням їх логічної структури та послідовності протікання в часі. Найголовніша перевага імітаційного моделювання перед існуючими аналітичними методами полягає в можливості вирішення складних завдань, які до появи ЕОМ вирішити було не можливо. Імітаційні моделі досить

просто враховують такі фактори, як наявність дискретних і безперервних елементів, не лінійність характеристик елементів, численні випадкові події, які при аналітичному моделюванні викликають досить суттєві труднощі.

Квазілінійна модель операторської діяльності при виконанні сенсомоторного слідкування у вигляді передатної функції має наступний вигляд:

$$W_{л-о}(p) = e^{-\tau p} \frac{k(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \quad (1.15)$$

де  $\frac{k(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)}$  – оператор, що «характеризує» адаптивні властивості Л-О;

$e^{-\tau p}$  – оператор внутрішніх «затримок» реакції Л-О;

$\frac{1}{(T_3 p + 1)}$  – оператор, що «описує» властивості нервово-м'язової системи Л-О.

Дана модель дозволяє достовірно описати закон перетворення сигналів Л-О в ЕС:

$$y = W_{л-о}(p)u + n(t), \quad (1.16)$$

де  $y$  – математичний опис керуючих дій Л-О, які він виробляє в результаті цілеспрямованої обробки інформації  $u$ . Функція  $n(t)$  є випадковою і називається «ремнантною». Амплітуда та характеристики ремнанти  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  залежать від вхідного сигналу.

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

$$\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle, \quad (1.17)$$

де  $Q_{л-о}$  – передатна функція Л-О, яка є описанням діяльності Л-О з точністю  $\varepsilon$  інформації, яка описана оператором  $R_{л-о}$ , при керуючому впливі. При цьому в системному сенсі точність  $\varepsilon$  «поглинає» ремнанту  $n(t)$ :  $\varepsilon \geq n(t)$ .

## **Висновки до розділу 1**

1. В результаті проведеного аналізу виявлено протиріччя 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 відсутністю таких математичних моделей.
2. Аналіз існуючих підходів до формалізації процесів, які відбуваються в системі Л-О-літак показав, що існуючі моделі не в повному обсязі відображають стохастичні характеристики станів системи Л-О-літак на етапі заходу на посадку.
3. Відсутні системні моделі пілот-літак, які за рахунок об'єднання модельних уявлення 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.
4. Найбільш ефективним підходом щодо формалізації процесів, які відбуваються в системі Л-О-літак на режимі заходу на посадку, є підхід з позицій теорії масового обслуговування.

### Список публікацій здобувача за матеріалами першого розділу

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. Błahaia 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. 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.

5. 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.

6. 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.

## РОЗДІЛ 2

### ЗАКОНОМІРНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА ПРИ УПРАВЛІННІ СУЧАСНИМ ЛІТАКОМ

#### 2.1 Особливості функціонування системи «пілот-літак»

Автоматизація процесу управління сучасним ЛА є наслідком зростання складності авіаційної техніки та збільшення інтенсивності повітряного руху [43, 76]. Сучасні САУ включають в себе в меншій кількості підсистеми автоматичного управління, які утворені із суто технічних складових, а в більшості – підсистеми, в яких Л-О відведена керівна роль. Людина є суб'єктом управління і саме від її успішної діяльності залежить якість функціонування системи в цілому. В неавтоматизованих системах керування Л-О відведена роль безпосереднього керування процесом, в автоматизованих системах управління (АСУ) – визначена контролююча роль, в залежності від ступеня автоматизації, під яким розуміють об'єм функцій керування покладених саме на оператора.

##### 2.1.1 Узагальнена структура людино-машинної системи «пілот-літак»

Одним з основних елементів людино-машинної системи є людина-оператор. Характеристики технічних складових системи закладаються ще під час проектування та підтримуються на достатньому рівні під час експлуатації, а значить досить добре відомі, а от характеристики людини-оператора як елемента системи управління відомі недостатньо, тому що мають ряд специфічних особливостей і погано формалізуються [66]. Для деяких досить простих ЛМС отримані математичні моделі людини-оператора, які дозволяють більш обмежено проводити аналіз і синтез систем. Проте ці моделі не завжди зручні для фахівців. Більш зручними характеристиками, що описують ланку людина-оператор, є характеристики, які враховують складність вхідного сигналу для обробки Л-О через час, точність і розмір зусиль, які на його обробку витрачає Л-О. Тут складність – суб'єктивна міра, оцінювана людиною-оператором як труднощі при роботі з сигналом.

Для існуючих математичних моделей людини-оператора притаманне лише врахування деяких з вищезазначених характеристик. Але якщо людино-машинну



систему можливо описати звичайними диференціальними рівняннями, то цей опис виявився можливим за допомогою узагальненої робочої характеристики (УРХ) людини-оператора [84].

Оскільки людина-оператор, будучи ланкою системи управління, отримує інформацію (за допомогою індикаторів) і видає її в систему (за допомогою органів управління), то під терміном людина-оператор слід розуміти сукупність індикатор – людина-оператор – датчик реакції. Структура цієї ланки приведена на рис.2.1. Тут у якості датчика реакції може виступати важіль, пов'язаний безпосередньо з керуючим органом, кнопка або ручка потенціометра, що видає сигнал в автоматичний пристрій, що приводить в дію керуючий орган об'єкта.

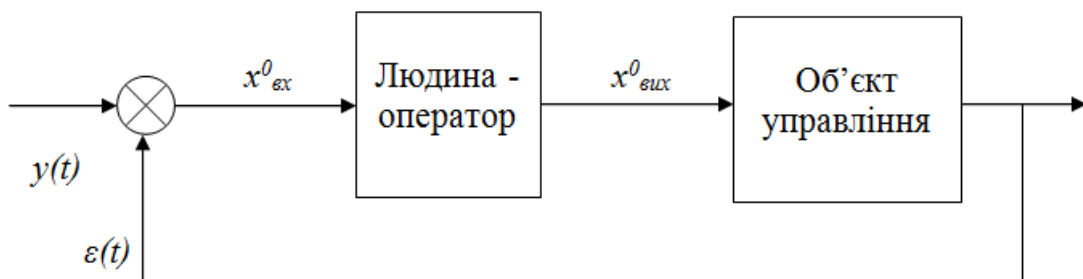


Рис. 2.1 Структурна схема людино-машинної системи «пілот-літак»

На рис.2.2 під  $\chi_{вх}^0$ ,  $\chi_{вих}^0$  розуміються вхідний і вихідний сигнали відповідно для ланки людина-оператор.

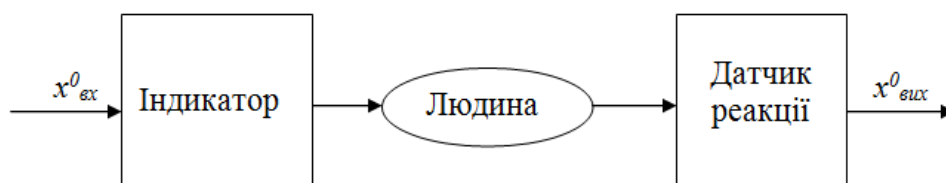


Рис. 2.2 Структурна схема ланки Л-О людино-машинної системи «пілот-літак»

Для подібних структурних схем отримано достатню кількість математичних моделей людини, тобто достатня кількість математичних співвідношень між  $\chi_{вх}^0$ ,  $\chi_{вих}^0$ . Вище зазначалося, що навіть при одних і тих самих вхідних для системи сигналах, але різних об'єктах, описи ланки людина-оператор змінюється. Інакше, датчик реакцій – це пристрій, який фіксує вихідну реакцію людини і кодує її в сигнал, зручний для введення його в наступні ланки системи.

## **2.1.2 Функціональна схема зв'язку пілота і літака при заході літака на посадку**

Кожен з режимів польоту ЛА характеризується набором параметрів. До них відносяться кути тангажа, крену, курсу, атаки і нахилу траєкторії, відповідні кутові швидкості, висота і швидкість польоту і інші. Основним завданням систем управління польотом ПК є стабілізація заданого режиму або його зміна за певною програмою [39].

Для пілотованих ЛА розрізняють такі види управління польотом [2]: штурвальне (ручне), напівавтоматичне (директорне) і автоматичне.

Останнім часом спостерігається прагнення розмежувати поняття "автопілот" і "САУ". Під автопілотом розуміють систему управління кутовими рухами, іноді зі стабілізацією висоти польоту, а якщо система управління вирішує складніші задачі, то її відносять до САУ [24].

Між цими крайніми по ступеню автоматизації режимами можливо відокремити проміжні напівавтоматичні режими управління [73]:

- директорне управління (ДУ);
- суміщене управління (СУ);
- комбіноване управління (КУ).

Напівавтоматичне управління (рис. 2.3) здійснюється при безпосередній участі пілота. Такий режим управління ще називають директорним або командним. У цьому випадку автоматизуються математичні і логічні операції, за допомогою яких визначається положення органів управління, що забезпечують заданий режим польоту. При напівавтоматичному управлінні пілот є елементом замкнутого контуру управління та його роль зводиться до виконання команд, які формуються в обчислювальній пристрої (ОП) і в командно-пілотажному приладі (КПП). При директорному управлінні вихідна інформація, яка необхідна пілоту, виводиться з обчислювача на командні (директорні) прилади у вигляді відхилень командних індексів та стрілок. Безпосереднє управління літаком виконується в режимі ручного (штурвального) управління, керуючись безпосередньо впливом на органи управління, зрушуючи командні стрілки з

центром прибору, витримуючи цим самим задану автоматикою траєкторію руху літака. Автоматичні засоби при цьому можуть реалізовувати задачі поліпшення стійкості і управління літаком.

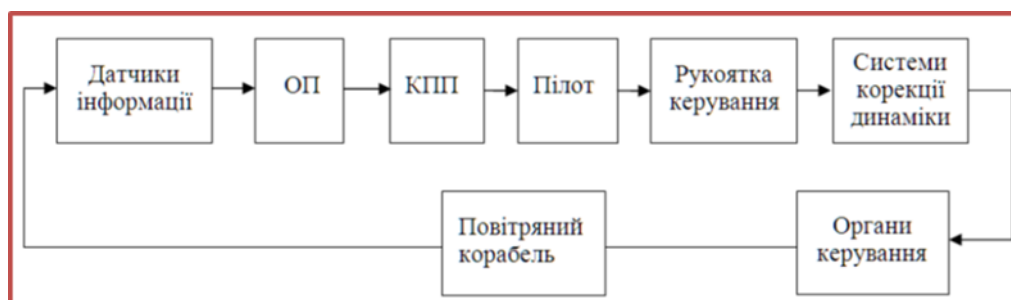


Рис. 2.3 Структурна схема напіваавтоматичного (директорного) управління

При сумісному управлінні виконується чергування режимів директорного управління з ручним (штурвальним) впливом на рульові поверхні і автоматичного управління на окремих ділянках траєкторії польоту літака, коли пілот перериває вплив на органи управління.

При комбінованому управлінні можливо відокремити одночасне управління літаком пілотом і автоматикою у відповідності з певною логікою взаємодії директорного і автоматичного управління.

Автоматичний і напіваавтоматичний режими управління при заході на посадку у зв'язку з роботою системи майже не відрізняються один від одного, але в першому випадку команди, що виробляються обчислювачем, виконуються автопілотом, а в другому випадку – пілотом.

Системи управління, що передбачають участь людини у передачі сигналів у замкнених контурах управління і містять пристрої для формування законів управління, називають напіваавтоматичними системами управління [23].

Напіваавтоматичні системи управління застосовуються в тих випадках, коли участь людини в замкнутій системі як її ланки забезпечує більшу точність і безпеку управління, ніж це може забезпечити автоматична система. У напіваавтоматичних системах людина і керований ним об'єкт утворюють єдину систему, звану "людина – машина". Оптимальна взаємодія людини і машини можлива в тому випадку, якщо машина сконструйована з урахуванням можливостей людини, а людина добре знає динамічні характеристики машини. На

рис. 2.3 показана структурна схема напівавтоматичної системи, що включає людину (оператора) з його органами сприйняття (рецепторами), центральною нервовою системою (ЦНС) і руховими органами (ефекторами) і керований об'єкт (машина), в якості якого взятий літак з його приладами і регулюючими органами (рулями).

Системи напівавтоматичного (директорного) управління розроблені для підвищення безпеки польотів. Їх застосування дозволяє пілоту позбутися необхідності зіставляти та аналізувати велику і різноманітну інформацію про політ при заході на посадку. Усе це відбувається в спеціальних обчислювачах. Від пілота вимагається лише керувати літаком так, щоб рухливі стрілки пілотажного приладу утримувалися весь час у необхідному положенні [25].

На даний час для задання посадкових траєкторій застосовуються радіотехнічні системи, до складу яких входять встановлені на землі радіомаяки, що задають посадочні траєкторії, і бортові радіоприймальні пристрої, що сприймають сигнали радіомаяків. Бортові радіоприймачі визначають відхилення літака від рівно сигнальної зони глісадного радіомаяка (глісади зниження) і відхилення від рівно сигнальної зони курсового радіомаяка (курсолової лінії). Директорне управління за сигналами радіомаяків починається після входу літака в зону їх дії (зазвичай на дальності 30-45 км від посадкової смуги) і триває до тієї висоти, на якій пілот може перейти до візуального пілотування.

Автоматичний захід на посадку в значній мірі розвантажує екіпаж від пілотування літака, але вимагає підвищеної уваги і контролю над роботою автоматичної бортової системи управління (АБСУ), а також постійної готовності до відмов системи [55].

У процесі передпосадкової підготовки до заходу в автоматичному режимі пілот, крім звичайних операцій, повинен акцентувати увагу екіпажу на наступних факторах [41]:

- особливості автоматичного заходу на даному аеродромі;
- правильність установки частот, посадкового курсу на навігаційному приладі;
- ймовірність переходу на дублюючу систему і зміна при цьому мінімуму погоди;

- готовність до відходу на друге коло при виході параметрів польоту за рамки обмежень Керівництва з льотної експлуатації;
- порядок переходу від автоматичного режиму до штурвальному і назад;
- розподіл уваги екіпажу при контролі над параметрами заходу.

Значна частина уваги екіпажу при заході на посадку в автоматичному режимі йде на контроль підключення і функціонування АБСУ. Необхідно уникати такого стану речей, коли етапи перевірки та підключення автоматики збігаються або з етапами випуску шасі і механізації, або зі зміною параметрів польоту, щоб увага екіпажу у відповідальний момент не роздвоювалася [58].

У практиці заходів бувають випадки самовільного відключення будь-якого каналу АБСУ. Екіпаж повинен вміти швидко відновити роботу каналу, не відволікаючи при цьому уваги від витримування параметрів польоту.

У будь-якому випадку, коли відключення каналу АБСУ відволікає екіпаж від пілотування, треба бути готовим до переходу на штурвальне пілотування. При цьому обов'язковою є гучна доповідь про відключення АБСУ.

Незалежно від режиму пілотування увага екіпажу повинна бути сконцентрована на сталості параметрів заходу: приладової швидкості, вертикальної швидкості, режимі роботи двигунів. Сталість параметрів польоту свідчить про його стабільність, а значить, нижче ВІР екіпажу не доведеться виправляти відхилення, і він зможе провести нормальну посадку.

## **2.2 Визначення контрольованих параметрів для моделі оцінки ефективності**

Експертні опитування льотного складу (в кількості 38 експертів) з різних авіакомпаній (Аеросвіт, Wizz Air Ukraina, Air Ukraina, Львівські авіалінії, Antonov Airlines) дозволили одержати вихідні дані для математичної моделі, призначеної для оцінки ефективності пілотування в директорному режимі при заході на посадку сучасного літака.

Метод експертних оцінок визначається як «сукупність емпіричних процедур, спрямованих на оцінку об'єкта за певною шкалою шляхом його пред'явлення експертам і подальшої реєстрації їх оціночних суджень» [52].

Експертні оцінки - це якісні (кількісні) та/або порядкові характеристики процесів, явищ, що не піддаються безпосередньому виміру, що ґрунтуються на судженнях фахівців [56].

Експерт – компетентний фахівець, що робить експертизу, подає свій висновок по якомусь питанню. Експерт здатний синтезувати інформацію, об'єднувати спеціальні знання і досвід, методи дослідження зі знанням особливостей досліджуваного об'єкта і давати об'єктивні кваліфіковані оцінки.

Найбільш розроблений метод експертних оцінок для економічних проблем, задач прогнозування у футурології, проблем дослідження операцій.

Що ж стосується задачі вибору найбільш важливих контрольованих параметрів польоту в директорному режимі керування ЛА при заході на посадку, то такі дослідження практично не проводилися.

Для визначення параметрів, на основі яких відбувається керування ЛА в директорному режимі на етапі заходу на посадку використаний метод експертних оцінок, розроблений стосовно до задачі синтезу узагальненого критерію якості технічних ергатичних систем керування [84]. Експеримент проводився в два етапи відповідно до даної методики.

На першому етапі було здійснено підбір 38 фахівців-експертів – досвідчених пілотів з загальним нальотом до 1250 год. з різних авіакомпаній України. Їм було запропоновано спеціальні опитувальні анкети, в яких було описано конкретний режим польоту – захід на посадку в директорному режимі, для якого проводилося опитування, вказувалася мета проведення експертних оцінок. Перед експертами ставилася задача перелічити ті параметри польоту, які використовуються при пілотуванні за директорними вказівниками на приладах при заході на посадку від входу в глісаду (дальність до ЗПС  $D=12\text{км}$ ) до остаточного приземлення при простих метеоумовах (ПМУ) та складних метеоумовах (СМУ).

На другому етапі дані були оброблені з урахуванням числа голосів, поданих за кожний параметр. У результаті було відібрано 16 параметрів:  $v$  – швидкість

польоту,  $V_y$  – швидкість приладова,  $H_b$  – висота барометрична,  $H_g$  – висота географічна,  $\alpha$  – кут атаки,  $\beta$  – кут ковзання,  $\gamma$  – кут крену,  $\theta$  – кут нахилу траєкторії,  $n_y$  – вертикальне перевантаження,  $e_G$  – відхилення від глісади,  $e_K$  – відхилення від курсу,  $\psi$  – кут курсу (рискання),  $\Psi$  – шляховий кут,  $n_x$  – подовжнє перевантаження,  $T_4$  – паливний параметр,  $\vartheta$  – кут тангажа.

Після цього експертам пред'являлася анкета, в якій у довільному порядку вертикально були перераховані параметри, виділені на першому етапі, горизонтально – важливі контрольні точки польоту на етапі заходу на посадку до повного приземлення (8 основних: 600м; 200м; 50м; 20м; «вирівнювання» – «вир.»; «витримування» – «витр.»; «торкання» – «торк.»; «пробіжка» – «проб.»). Важливість пілотованого параметру оцінювалася за такими критеріями: 5 – дуже важливий, 4 – важливий, 3 – необхідний, 2 – необов'язковий, 1 – зайвий. В кожній контрольній точці експерт оцінював важливість даного параметру пілотування в директорному режимі і свою оцінку заносив до таблиці. Їм дозволялося оцінювати на власний розсуд важливість параметрів і приписувати параметрам оцінки, виходячи з отриманого досвіду під час роботи з показниками директорних стрілок на приладах. Приклад анкети наведено в таблиці 2.1.

Отримані результати оцінки осереднювались за формулою [84]:

$$I(\lambda_1, \lambda_2, \tau) = A_0(1 - e^{\lambda_1 \tau})e^{\lambda_2 \tau} \quad (2.1)$$

де  $k_{ij}$  – ваговий коефіцієнт, розрахований для  $j$ -го параметра, виходячи з оцінки, даної йому експертом;

$f_{ij}$  – оцінка, що надана  $i$ -м експертом  $j$ -му параметру;

$r$  – кількість експертів;

$q$  – кількість параметрів.

Для збільшення точності і вірогідності процедури одержання експертних оцінок розрахунків вагових коефіцієнтів проводився з урахуванням різномірності в складі експертів.

Приклад зведеної анкети опитувального листа

	ПМУ								СМУ							
	600	200	50	20	Вир.	Витр.	Торк.	Проб.	600	200	50	20	Вир.	Витр.	Торк.	Проб.
$v$	5	4	5	3	4	2	4	5	4	4	5	5	5	3	4	5
$V_y$	3	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4	2	1	1	1	1
$H_b$	3	5	4	4	2	1	1	1	4	4	4	4	1	1	1	1
$H_z$	3	2	2	2	1	1	1	1	4	3	2	1	1	1	1	1
$\alpha$	1	3	3	2	1	1	4	1	1	3	3	2	1	1	2	1
$\beta$	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1
$\gamma$	4	3	3	3	3	2	2	1	4	4	3	3	3	3	2	1
$\theta$	3	3	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1	1	1	1	1
$\vartheta$	3	4	4	4	3	3	2	2	4	4	4	4	4	3	2	2
$e_{\Gamma}$	2	3	4	1	1	1	1	1	4	4	3	1	1	1	1	1
$e_K$	4	4	3	1	1	1	1	1	4	4	3	1	1	1	1	1
$\Psi$	4	5	3	2	1	1	1	1	4	4	3	3	1	1	1	1
$\psi$	4	5	4	3	3	3	1	1	5	4	4	4	4	2	1	1
$n_x$	4	3	4	3	2	2	2	1	3	4	4	3	2	2	2	2
$T_4$	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
$n_y$	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3	1

Масив вихідних даних експертних оцінок можна представити у вигляді  $(r \times q)$ -матриці:

$$A = \left\| \kappa_{ij} \right\| = \begin{pmatrix} \kappa_{11} & \kappa_{12} & \dots & \kappa_{1j} & \dots & \kappa_{1q} \\ \kappa_{21} & \kappa_{22} & \dots & \kappa_{2j} & \dots & \kappa_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \kappa_{i1} & \kappa_{i2} & \dots & \kappa_{ij} & \dots & \kappa_{iq} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \kappa_{r1} & \kappa_{r2} & \dots & \kappa_{rj} & \dots & \kappa_{rq} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

де  $\kappa_{ij}$  – оцінка, дана  $i$ -м експертом  $j$ -му параметру.

На першій ітерації вироблялося просте осереднення. У матричному виді:

$$\Gamma^I = \frac{1}{r} EA = \left\| \kappa_1^I \quad \kappa_2^I \quad \dots \quad \kappa_j^I \quad \dots \quad \kappa_q^I \right\| \quad (2.3)$$

Далі вводилася міра

$$\delta_{ij}^H = \left| \kappa_j^I - \kappa_{ij} \right|, \quad i \in [1, r], \quad j \in [1, q] \quad (2.4)$$

і розраховувалися коефіцієнти компетентності експертів на другій ітерації

$$\kappa_{ij}^{II} = \frac{r}{\delta_{ij}^H \sum_{s=1}^r \frac{1}{\delta_{sj}^H}}, \quad i \in [1, r], \quad j \in [1, q] \quad (2.5)$$



Потім утворюється матриця:

$$B^H = \left\| b_{ij}^H \right\| = \begin{pmatrix} b_{11}^H & b_{12}^H & \dots & b_{1j}^H & \dots & b_{1q}^H \\ b_{21}^H & b_{22}^H & \dots & b_{2j}^H & \dots & b_{2q}^H \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{i1}^H & b_{i2}^H & \dots & b_{ij}^H & \dots & b_{iq}^H \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{r1}^H & b_{r2}^H & \dots & b_{rj}^H & \dots & b_{rq}^H \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

елементи якої склалися за правилом

$$b_{ij}^H = K_{ij}^H \kappa_{ij}^H \quad (2.7)$$

Далі вироблялося осереднення на другій ітерації

$$\Gamma^H = \frac{1}{r} E B^H = \left\| \kappa_1^H \quad \kappa_2^H \quad \dots \quad \kappa_j^H \quad \dots \quad \kappa_q^H \right\| \quad (2.8)$$

Процес третьої ітерації починався з устанавлення міри

$$\delta_{ij}^{III} = \left| \kappa_j^H - \kappa_{ij}^H \right|, \quad i \in [1, r], \quad j \in [1, q] \quad (2.9)$$

Ітераційна процедура

$$\Gamma^{(g)} = \frac{1}{r} E B^{(g)} = \left\| \kappa_1^{(g)} \quad \kappa_2^{(g)} \quad \dots \quad \kappa_j^{(g)} \quad \dots \quad \kappa_q^{(g)} \right\|, \quad g \in [1, h], \quad B^I = A \quad (2.10)$$

продовжувалася доти, доки не буде виконуватися умова

$$\left| \kappa_j^{(h)} - \kappa_j^{(h-1)} \right| \leq \phi_j, \quad \forall j \in [1, q], \quad (2.11)$$

де  $\phi_j$  – задане мале число розмірності  $\kappa_j$ . При розрахунку, як умову було задано  $\Delta \leq 0,001$ .

В результаті ітераційної процедури (2.2 – 2.11) була отримана матриця коефіцієнтів:

$$\Gamma^{(h)} = \left\| \kappa_1^{(h)} \quad \kappa_2^{(h)} \quad \dots \quad \kappa_j^{(h)} \quad \dots \quad \kappa_q^{(h)} \right\|, \quad (2.12)$$

які в сукупності представляють оцінки параметрів, визначені з урахуванням різної компетентності експертів. Результати обробки експертних оцінок представлені на рис.2.4 та рис.2.5. Після проведеного дослідження виявлено 5 основних параметрів польоту, які використовуються для управління ЛА при заході на посадку в директорному режимі. Тобто Л-О пілот при заході на посадку в директорному режимі більшу частину часу приділяє саме вищезазначеним параметрам на пілотажних приладах.

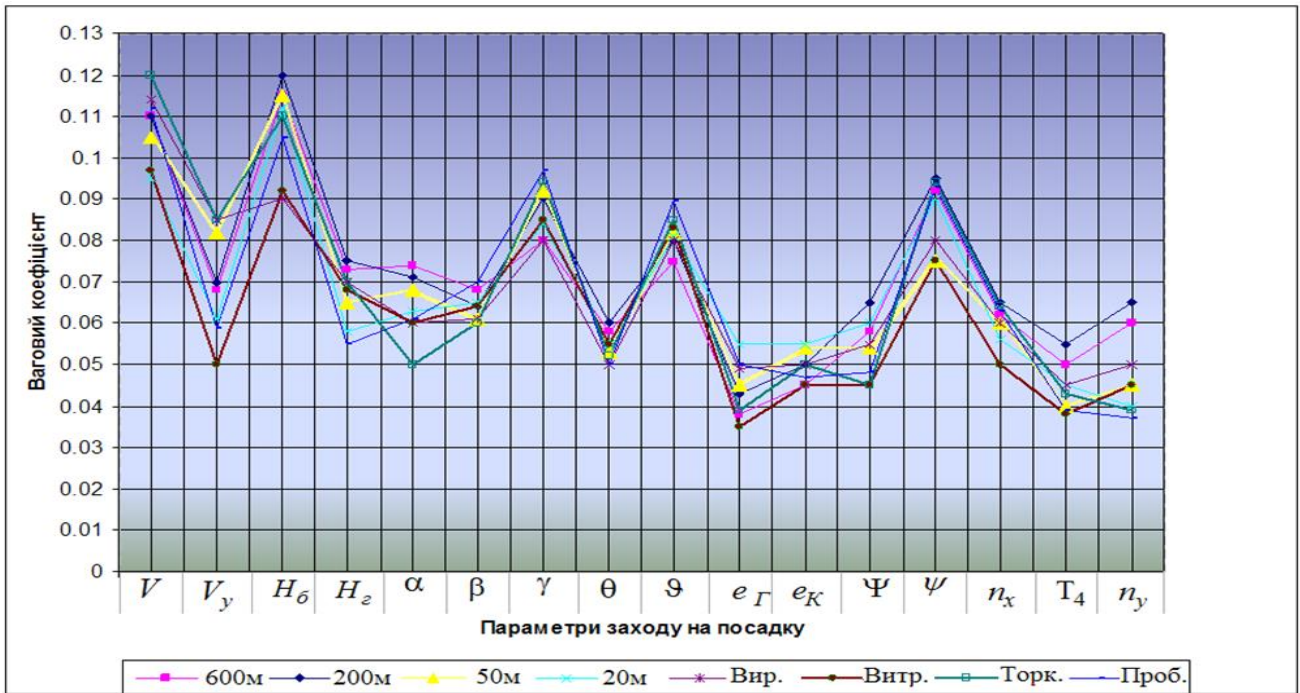


Рис. 2.4 Вагові коефіцієнти експертних оцінок параметрів заходу на посадку в директорному режимі (ПМУ)

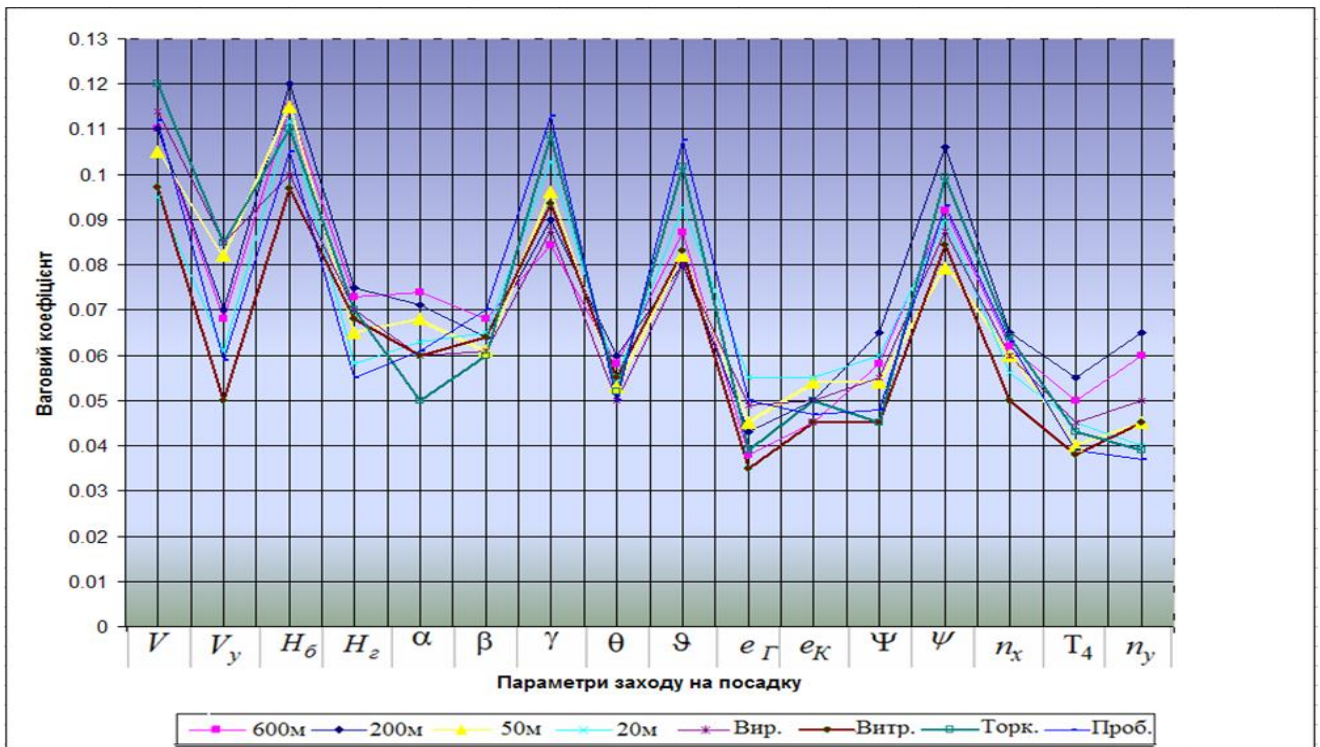


Рис. 2.5 Вагові коефіцієнти експертних оцінок параметрів заходу на посадку в директорному режимі (СМУ)

Тому при створенні математичної моделі системи «пілот-літак» потрібно враховувати швидкість та висоту польоту, кути крену, курсу, тангажа.

## **2.3 Операційний склад зорового контролю параметрів польоту в директорному режимі управління**

В результаті пілотування літак переміщується у трьох вимірному просторі. Його просторове положення характеризується за допомогою трьох осей, які проходять через його центр маси: подовжньої, нормальної та поперекової. При обертанні літака навколо поперекової вісі подовжня вісь утворює з площиною горизонту кут тангажа. Кут, що утворений поперековою віссю та площиною горизонту, називається кутом крену. Управління кутовими координатами літака відбувається за допомогою аеродинамічних рулів. Динамічний тиск повітря на керуючі поверхні рулів створює моменти сил, які змушують літак обертатися навколо свого центру мас. За допомогою руля висоти літак управляється в подовжньому каналі (вгору–вниз). Поперековими рухами керуються елерони, літак управляється в боковому каналі (вліво–вправо). Таким чином, відхилення руля висоти змінює кут тангажа та висоту, відхилення елеронів – кут крену.

Безпосереднє пілотування – витримування заданого режиму польоту або встановлення нового, відбувається за допомогою пілотажно–навігаційних приладів, основними з яких є: авіагоризонт (КПП), варіометр, висотомір, показник курсу (НПП) та показник швидкості.

Командно – пілотажний прилад КПП призначено для вказування кутів тангажа та крену. За його допомогою можливо управління літаком як в подовжньому так і в боковому каналах. Також авіагоризонт одночасно є основним приладом, який показує положення літака відносно поверхні землі, тобто приладом для здійснення просторового орієнтування.

Для більш уточненого управління літаком в подовжньому каналі існує варіометр, прилад що показує швидкість підйому та зниження літака. Висотомір показує висоту польоту над земною поверхнею. Для управління літаком в боковому каналі використовують показник крену на авіагоризонті та курсові прилади, які вказують магнітний курс польоту.

Сукупність всіх приладів надає точну та повну інформацію про положення літака відносно земних координат в кожний момент часу та про динаміку його

руху в повітряному просторі. Але на кожному окремому приладі відображається інформація про один або кілька параметрів в абстрактно знаковій формі. Вся інформація про політ розділена між різними приладами, тому для оцінки умов польоту її потрібно інтегрувати.

В якості основних контрольованих параметрів при директорному керуванні літаком в режимі заходу на посадку було обрано 5 основних параметрів:  $V$  швидкість,  $H$  висота,  $\vartheta$  тангаж,  $\gamma$  крен,  $\psi$  ристання (курс) (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

**Основні контрольовані параметри при директорному управлінні літаком в режимі заходу на посадку**

Параметр	$V$ швидкість	$H$ висота	$\vartheta$ тангаж	$\gamma$ крен	$\psi$ ристання
	$V$	$H$	КПП		НПП
Пілотажні прилади	Варіометр	Висотомір	Авіагоризонт		Показник курсу (гіроскоп)
Рульові поверхні	РУД (руль управління двигунами)	РУД+ Руль висоти	Руль висоти	Елерони	Руль направлення РН (педалі)
Керуюча дія (відхилення органу управління)	$\delta_p^V$	$\delta_B^H$	$\delta_B^\vartheta$	$\delta_e^\gamma$	$\delta_H^\psi$

**Висновки до розділу 2**

1. Аналіз помилкових дій пілота показує, що основні порушення в роботі ЕС «Л-О-ЛА» припадають на його психічну діяльність. Як свідчить модель нервово-психічної напруженості оператора на кожному з рівнів відбувається процес затримки, що й призводить до збільшення загального часу прийняття рішення людиною.

2. Так як людський організм являє собою надійну біосоціальну систему, якій притаманні необмежені можливості пристосування до навколишнього середовища, то виділяють структурні та функціональні резерви людського організму і саме вони являють собою можливість зміни функціональної активності структурних елементів організму, їх можливості взаємодії між собою, використовувані організмом для досягнення результату діяльності людини, для адаптації до фізичних, психоемоційних навантажень і впливу на організм різних факторів зовнішнього середовища.

3. Дослідження особливостей діяльності Л-О при управлінні сучасним літаком дозволило зробити висновок щодо виникнення у пілотів окрім емоційної ще й операційної напруженості. Відповідно психічному стану пілотів висувають вимоги емоційної стійкості, тобто можливості не знижуючи працездатності в умовах емоційного перевантаження мати змогу виконувати завдання в нав'язаному темпі.

4. В результаті ускладнення авіаційної техніки та автоматизації на борту літака у пілота кардинально змінилася виконавча функція – замість активного управління він перетворився на «спостерігача-контролера», який більшу частину часу лише спостерігає за зміною параметрів на директорних приладах і лише за потреби бере керування літаком на себе.

5. Орієнтована на людину автоматика для авіаційної системи повинна розроблятися і функціонувати таким чином, щоб у деякій мірі дистанціювати людину-оператора від виконання конкретних операцій по експлуатації системи, тобто оператор в процесі експлуатації повинен займатися виконанням лише необхідних і важливих завдань.

6. Необхідність автоматизації процесу керування літаком на етапі заходу на посадку пояснюється зниженням імовірності невірних рішень, дій, реакцій через помилки обробки інформації та підвищенням точності керування.

7. За результатами обробки проведеного в дисертації експертного опитування 38 пілотів авіакомпаній Аеросвіт, Wizz Air Ukraine, Air Ukraine, Львівські авіалінії, Antonov Airlines 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.

#### Список публікацій здобувача за матеріалами другого розділу

1. Благая Л. В., Павлова С. В. Визначення контрольованих параметрів для моделі людини-оператора при директорному керуванні. Вісник інженерної академії. 2015. № 2. С. 115–119.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

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

**РОЗДІЛ 3**  
**СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ЛЮДИНО-МАШИННОЇ СИСТЕМИ**  
**«ПІЛОТ-ЛІТАК»**

**3.1 Побудова математичної моделі «пілот-літак», як система масового обслуговування**

Діяльність Л-О (пілота) при управлінні літаком здійснюється у випадкові моменти часу коли пілот зчитує інформацію з індикаторних приладів, оцінює відхилення від норми пілотованих параметрів та приймає відповідні рішення про подальші керуючі дії.

З позицій теорії ймовірності на всьому інтервалі спостереження діяльність Л-О може розглядатися як робота багатоканальної ланки, де доля інтервалу спостереження відповідає діяльності Л-О як одноканальної ланки.

Виходячи з вище викладеного в якості модельного підходу до побудови моделі Л-О як невід'ємної складової ергатичної системи «пілот-літак» будемо застосовувати підходи теорії масового обслуговування.

Найбільш розповсюдженою математичною моделлю дослідження задач теорії масового обслуговування є модель марківських випадкових процесів з безперервним часом (безперервний ланцюг Маркова) [69]. Марківський випадковий процес  $S(t)$  з множиною дискретних станів, по-перше має властивість незалежності процесу  $S$  в майбутньому ( $S(t_0+h)$ ;  $h>0$ ) від значень процесу  $S$  в минулому (від  $S(t_0-h)$ ;  $h>0$ ). По друге, залежить лише від теперішнього стану (від  $S(t_0)$ ). По третє, оскільки переходи з одного стану в інший можливі в будь-який момент часу, ймовірність переходу із  $S_i$  -го стану в  $S_j$  -й стан саме в момент часу  $t$  не може бути задана, бо така ймовірність дорівнює нулю. Замість цього можливо визначити ймовірність переходу процесу із  $S_i$  -го стану в момент часу  $t$  в  $S_j$  -й стан для моменту часу  $t + \tau$ ;  $0 \leq \tau \leq h$  при малому  $h$ , із точністю до величин другого порядку малості виразом

$$P(S(t + \tau) = S_j / S(t) = S_i) = \lambda_i(t) \beta_{ij}(t) h \text{ для усіх } i, j \in N, i \neq j, \quad (3.1)$$

а ймовірність того, що процес у момент  $t + \tau$  залишиться в  $S_i$  -му стані задати виразом

$$P(S(t + \tau) = S_i / S(t) = S_i) = 1 - \lambda_i(t)h \text{ для усіх } i \in N, \quad (3.2)$$

де  $\lambda_i(t)$  – «миттєва інтенсивність» виходу процесу  $S$  із  $S_{i,j}$  -го стану в момент часу  $t$ ;  $\lambda_{i,j} = \lambda_i \beta_{ij}$  – «миттєва інтенсивність» переходу процесу  $S$  із стану  $S_i$  в стан  $S_j$ ;

$$\sum \beta_{ij} = 1; i, j \in N, i \neq j; \lambda_i, \beta_{ij} \geq 0.$$

Перехід системи з одного стану в інший залежить від контролю переходу системи із одного стану в інший, для технічної складової підсистеми – ЛА від одного параметру до іншого (від зміни швидкості, висоти, тангажа та ін.), для Л-О за діями по управлінню.

Виходячи з теорії графів [107, 110] – графи системи «пілот-літак», де всі можливі стани  $n$  (так як 2 стани системи, 5 параметрів польоту, то  $n=2^5=32$  (табл.2.2)) системи  $S^\xi$  (або літака ЛА – технічної підсистеми  $S^{ЛА}$ , або пілота – підсистеми Л-О  $S^{Л-О}$ ) позначаються кругами з позначенням станів:  $S_1^\xi, S_2^\xi, \dots, S_{32}^\xi$ , де  $\xi \in (ЛА, Л-О)$ , а можливі переходи із стану в стан – стрілками, що з'єднують ці стани. Стрілка, що направлена з  $S_i^\xi$  в  $S_j^\xi$  означає перехід системи із одного стану в інший при спостереженні системою за поточним параметром польоту. Стрілка, що направлена в зворотному напрямку означає керуючу дію технічної системи (або Л-О) на усунення даного відхилення. Розглядаючи процес пілотування літака як марківський випадковий процес з дискретними станами та неперервним часом, моделі Л-О та літака зручно представляти у вигляді орієнтовних графів станів (рис. 3.1), де кружками позначено стани  $S_1^\xi, S_2^\xi, S_3^\xi, \dots, S_{32}^\xi$  систем  $S^{ЛА}$  та  $S^{Л-О}$ , а стрілками – можливі переходи однієї з підсистем зі стану в стан.

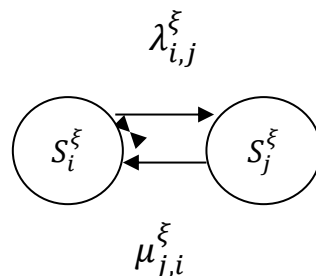


Рис. 3.1 Схематичне зображення переходу системи із одного стану в інший стан

Позначимо  $P_i(t)$  - імовірність того, що в момент часу  $t$  система  $S^\xi$  буде знаходитися в стані  $S_i^\xi$  ( $i = 1, 2, \dots, 32$ ).



Визначимо імовірності  $P_1^\xi(t), P_2^\xi(t), \dots, P_{32}^\xi(t)$  для будь-якого  $t$ .

Очевидно, що  $\sum_{i=0}^n P_i^\xi(t) = 1$ .

Для процесу з безперервним часом розглядають щільності імовірностей переходу.

$\lambda_{i,j}^\xi$ - що є лімітом відношення імовірностей переходу системи за час  $\Delta t$  зі стану  $S_i^\xi$  в стан  $S_j^\xi$  до довжини відрізка  $\Delta t$ :

$$\lambda_{ij}^\xi(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{ij}^\xi(t, \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Таким чином, стан процесу  $S$  визначається ймовірностями  $p_i(t) = P(S(t) = S_i, i \in N$ , де  $p_i$  підпорядковані умові  $\sum_{i \in N} p_i = 1$  для всіх  $t \in T$  оскільки всі стани несумісні та утворюють повну групу,  $N$  – кількість станів процесу  $S$ .

Розглянемо систему пілот-літак з позицій теорії масового обслуговування. Процес пілотування неминуче супроводжується випадковими збуреннями у зовнішньому середовищі (турбулентність атмосфери, метеорологічні умови та інше), випадковими помилками, відхиленнями від заданого режиму (зміна параметрів польоту, вихід зі строю або відмова систем управління), на які доводиться вводити корекцію.

З урахуванням властивостей марківського процесу та імовірнісного характеру процесу пілотування розглянемо процес пілотування літаком як марківський випадковий процес з дискретними станами та безперервним часом, тобто як безперервний ланцюг Маркова, оскільки перехід системи «пілот-літак» від стану до стану відбувається не в фіксовані, а в випадкові моменти часу. Модель системи буде складатися з моделі пілота як марківського безперервного ланцюга та моделі літака також як марківського безперервного ланцюга.

### 3.2 Складові моделі системи «пілот-літак»

Для визначення складових моделі «пілот-літак» розглянемо процес пілотування більш докладно. Напівавтоматичне управління здійснюється при

безпосередній участі пілота (Л-О). В цьому випадку автоматизуються математичні і логічні операції завдяки яким визначається положення органів управління, що забезпечують заданий режим польоту.

Під час заходу на посадку в директорному режимі управління літак як підсистема  $S^{ЛА}$  враховуючи визначені контрольовані параметри (табл.2.2) може знаходитися в одному з 32 станів (табл.3.1):

$S_1^{ЛА}$  – літак знаходиться на глісаді без відхилень будь-яких параметрів, тобто витримує заданий режим польоту;

$S_2^{ЛА}, S_3^{ЛА}, S_5^{ЛА}, S_9^{ЛА}, S_{17}^{ЛА}$  – літак відхилився від глісади (заданого режиму польоту) при відхиленні одного з контрольованих параметрів від заданого значення (відповідно  $(\psi), (\gamma), (\vartheta), (V), (H)$ );

$S_4^{ЛА}, S_6^{ЛА}, S_7^{ЛА}, S_{10}^{ЛА}, S_{11}^{ЛА}, S_{13}^{ЛА}, S_{18}^{ЛА}, S_{19}^{ЛА}, S_{21}^{ЛА}, S_{25}^{ЛА}$  – літак відхилився від глісади (заданого режиму польоту) при відхиленні двох з контрольованих параметрів від заданих значень (відповідно  $(\gamma, \psi), (\vartheta, \psi), (\vartheta, \gamma), (H, \psi), (H, \gamma), (H, \vartheta), (V, \psi), (V, \gamma), (V, \vartheta), (V, H)$ );

$S_8^{ЛА}, S_{12}^{ЛА}, S_{14}^{ЛА}, S_{15}^{ЛА}, S_{20}^{ЛА}, S_{22}^{ЛА}, S_{23}^{ЛА}, S_{26}^{ЛА}, S_{27}^{ЛА}, S_{29}^{ЛА}$  – літак відхилився від глісади (заданого режиму польоту) при відхиленні трьох контрольованих параметрів від заданих значень (відповідно  $(\vartheta, \gamma, H), (H, \gamma, \psi), (H, \vartheta, \psi), (H, \vartheta, \gamma), (V, \gamma, \psi), (V, \vartheta, \psi), (V, \vartheta, \gamma), (V, H, \psi), (V, H, \gamma), (V, H, \vartheta)$ );

$S_{16}^{ЛА}, S_{24}^{ЛА}, S_{28}^{ЛА}, S_{30}^{ЛА}, S_{31}^{ЛА}$  – літак відхилився від глісади (заданого режиму польоту) при відхиленні чотирьох контрольованих параметрів від заданих значень (відповідно  $(H, \vartheta, \gamma, \psi), (V, \vartheta, \gamma, \psi), (V, H, \gamma, \psi), (V, H, \vartheta, \psi), (V, H, \vartheta, \gamma)$ );

$S_{32}^{ЛА}$  – літак відхилився від глісади при відхиленні всіх п'яти контрольованих параметрів від заданих значень (відповідно  $(V, H, \vartheta, \gamma, \psi)$ ).

Зведена таблиця даних підсистеми ЛА

Таблиця 3.1

ВІДХИЛЕННЯ ПАРАМЕТРУ ВІД НОРМИ	СТАН Л-А	V ШВИДКІСТЬ	H ВИСОТА	$\vartheta$ ТАНГЛАЗ	$\gamma$ КРЕН	$\psi$ РИСКАННЯ	КЕРУЮЧА ДІЯ ПЛОТА	ВІДХИЛЕННЯ ПАРАМЕТРУ ВІД НОРМИ	СТАН Л-А	V ШВИДКІСТЬ	H ВИСОТА	$\vartheta$ ТАНГЛАЗ	$\gamma$ КРЕН	$\psi$ РИСКАННЯ	КЕРУЮЧА ДІЯ ПЛОТА
V H $\vartheta$ $\gamma$ $\psi$	S <sub>32</sub>	0	0	0	0	0	$\delta_p^V \delta_B^H \delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma \delta_H^\psi$	H $\vartheta$ $\gamma$ $\psi$	S <sub>16</sub>	1	0	0	0	0	$\delta_B^H \delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma \delta_H^\psi$
V H $\vartheta$ $\gamma$	S <sub>31</sub>	0	0	0	0	1	$\delta_p^V \delta_B^H \delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma$	H $\vartheta$ $\gamma$	S <sub>15</sub>	1	0	0	0	1	$\delta_B^H \delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma$
V H $\vartheta$ $\psi$	S <sub>30</sub>	0	0	0	1	0	$\delta_p^V \delta_B^H \delta_B^\vartheta \delta_H^\psi$	H $\vartheta$ $\psi$	S <sub>14</sub>	1	0	0	1	0	$\delta_B^H \delta_B^\vartheta \delta_H^\psi$
V H $\vartheta$	S <sub>29</sub>	0	0	0	1	1	$\delta_p^V \delta_B^H \delta_B^\vartheta$	H $\vartheta$	S <sub>13</sub>	1	0	0	1	1	$\delta_B^H \delta_B^\vartheta$
V H $\gamma$ $\psi$	S <sub>28</sub>	0	0	1	0	0	$\delta_p^V \delta_B^H \delta_e^\gamma \delta_H^\psi$	H $\gamma$ $\psi$	S <sub>12</sub>	1	0	1	0	0	$\delta_B^H \delta_e^\gamma \delta_H^\psi$
V H $\gamma$	S <sub>27</sub>	0	0	1	0	1	$\delta_p^V \delta_B^H \delta_e^\gamma$	H $\gamma$	S <sub>11</sub>	1	0	1	0	1	$\delta_B^H \delta_e^\gamma$
V H $\psi$	S <sub>26</sub>	0	0	1	1	0	$\delta_p^V \delta_B^H \delta_H^\psi$	H $\psi$	S <sub>10</sub>	1	0	1	1	0	$\delta_B^H \delta_H^\psi$
V H	S <sub>25</sub>	0	0	1	1	1	$\delta_p^V \delta_B^H$	H	S <sub>9</sub>	1	0	1	1	1	$\delta_B^H$
V $\vartheta$ $\gamma$ $\psi$	S <sub>24</sub>	0	1	0	0	0	$\delta_p^V \delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma \delta_H^\psi$	$\vartheta$ $\gamma$ $\psi$	S <sub>8</sub>	1	1	0	0	0	$\delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma \delta_H^\psi$
V $\vartheta$ $\gamma$	S <sub>23</sub>	0	1	0	0	1	$\delta_p^V \delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma$	$\vartheta$ $\gamma$	S <sub>7</sub>	1	1	0	0	1	$\delta_B^\vartheta \delta_e^\gamma$
V $\vartheta$ $\psi$	S <sub>22</sub>	0	1	0	1	0	$\delta_p^V \delta_B^\vartheta \delta_H^\psi$	$\vartheta$ $\psi$	S <sub>6</sub>	1	1	0	1	0	$\delta_B^\vartheta \delta_H^\psi$
V $\vartheta$	S <sub>21</sub>	0	1	0	1	1	$\delta_p^V \delta_B^\vartheta$	$\vartheta$	S <sub>5</sub>	1	1	0	1	1	$\delta_B^\vartheta$
V $\gamma$ $\psi$	S <sub>20</sub>	0	1	1	0	0	$\delta_p^V \delta_e^\gamma \delta_H^\psi$	$\gamma$ $\psi$	S <sub>4</sub>	1	1	1	0	0	$\delta_e^\gamma \delta_H^\psi$
V $\gamma$	S <sub>19</sub>	0	1	1	0	1	$\delta_p^V \delta_e^\gamma$	$\gamma$	S <sub>3</sub>	1	1	1	0	1	$\delta_e^\gamma$
V $\psi$	S <sub>18</sub>	0	1	1	1	0	$\delta_p^V \delta_H^\psi$	$\psi$	S <sub>2</sub>	1	1	1	1	0	$\delta_H^\psi$
V	S <sub>17</sub>	0	1	1	1	1	$\delta_p^V$	Всі в нормі	S <sub>1</sub>	1	1	1	1	1	

Враховуючи стани системи  $S^{ЛА}$  визначимо стани системи  $S^{Л-О}$  (Л-О).

Очевидно, що система  $S^{Л-О}$  також може знаходитися в 32 станах.

$S_1^{Л-О}$  – пілот не виявив відхилення показників приладів від заданого режиму польоту – всі показники в нормі;

$S_2^{Л-О}, S_3^{Л-О}, S_5^{Л-О}, S_9^{Л-О}, S_{17}^{Л-О}$  – при спостереженні за показниками приладів пілот виявив відхилення одного з контрольованих параметрів від заданого значення (відповідно  $(\psi), (\gamma), (\vartheta), (V), (H)$ );

$S_4^{Л-О}, S_6^{Л-О}, S_7^{Л-О}, S_{10}^{Л-О}, S_{11}^{Л-О}, S_{13}^{Л-О}, S_{18}^{Л-О}, S_{19}^{Л-О}, S_{21}^{Л-О}, S_{25}^{Л-О}$  – при спостереженні за показниками приладів пілот виявив відхилення двох з контрольованих параметрів від заданого значення (відповідно  $(\gamma, \psi), (\vartheta, \psi), (\vartheta, \gamma), (H, \psi), (H, \gamma), (H, \vartheta), (V, \psi), (V, \gamma), (V, \vartheta), (V, H)$ );

$S_8^{Л-О}, S_{12}^{Л-О}, S_{14}^{Л-О}, S_{15}^{Л-О}, S_{20}^{Л-О}, S_{22}^{Л-О}, S_{23}^{Л-О}, S_{26}^{Л-О}, S_{27}^{Л-О}, S_{29}^{Л-О}$  – при спостереженні за показниками приладів пілот виявив відхилення трьох з контрольованих параметрів від заданого значення (відповідно  $(\vartheta, \gamma, H), (H, \gamma, \psi), (H, \vartheta, \psi), (H, \vartheta, \gamma), (V, \gamma, \psi), (V, \vartheta, \psi), (V, \vartheta, \gamma), (V, H, \psi), (V, H, \gamma), (V, H, \vartheta)$ );

$S_{16}^{Л-О}, S_{24}^{Л-О}, S_{28}^{Л-О}, S_{30}^{Л-О}, S_{31}^{Л-О}$  – при спостереженні за показниками приладів пілот виявив відхилення чотирьох з контрольованих параметрів від заданого значення (відповідно  $(H, \vartheta, \gamma, \psi), (V, \vartheta, \gamma, \psi), (V, H, \gamma, \psi), (V, H, \vartheta, \psi), (V, H, \vartheta, \gamma)$ );

$S_{32}^{Л-О}$  – при спостереженні за показниками приладів пілот виявив відхилення всіх п'яти контрольованих параметрів від заданого значення (відповідно  $(V, H, \vartheta, \gamma, \psi)$ ).

Основною задачею при управлінні ЛА є стабілізація заданого режиму польоту. Всі сучасні ЛА оснащені директорними приладами і пілотування в більшості випадків відбувається в напівавтоматичному режимі. Для нього характерними є менша завантаженість Л-О інформацією і як наслідок – більш

надійна робота екіпажу літака. В цьому режимі Л-О є елементом замкнутого контуру управління і його роль зведена до виконання команд показників директорних приладів.

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 із стану  $S_i^{ЛА}$  в стан  $S_j^{ЛА}$  під дією випадкових зовнішніх та внутрішніх збурень відбувається з інтенсивностями  $\lambda_{i,j}^{ЛА}$ . Перехід із стану  $S_j^{ЛА}$  в стан  $S_i^{ЛА}$  відбувається під дією інтенсивності переходу  $\mu_{j,i}^{ЛА}$ . Відповідно, у підсистемі Л-О перехід із стану  $S_i^{Л-О}$  в стан  $S_j^{Л-О}$  відбувається з інтенсивністю переходу  $\lambda_{i,j}^{Л-О}$ , а зі стану  $S_i^{Л-О}$  до стану  $S_i^{Л-О}$  з інтенсивністю  $\mu_{j,i}^{Л-О}$ . Переходи між станами  $S_i^\xi$ , де  $i = \overline{1,32}$  відбуваються при зміні одного з параметрів польоту або при їх компенсації з відповідними інтенсивностями. Побудуємо графи станів підсистем Л-О та ЛА, що містять усі можливі стани  $S_1^\xi, S_2^\xi, S_3^\xi, \dots, S_{32}^\xi$  та переходи між ними (рис.3.2). Як видно з рисунку 3.2 структура графів підсистем ЛА та Л-О є ідентичною. Треба зауважити, що побудувавши графи станів системи (рис.3.2), стало можливим знайти всі ймовірності станів як функції часу. Для цього потрібно скласти систему рівнянь Колмогорова – де невідомими функціями є ймовірності станів кожної з підсистем.

В якості основних змінних, в термінах яких будемо описувати стани систем  $S^{ЛА}$  та  $S^{Л-О}$  використаємо відповідно ймовірності  $p_i^{ЛА}(t)$  та  $p_i^{Л-О}(t)$  знаходження цих систем в момент часу  $t$  в одному зі станів  $S_i^{ЛА}$  та  $S_i^{Л-О}$ ,  $i = \overline{1,32}$  відповідно. За інтервал часу  $\tau$  ці ймовірності зміняться та приймуть значення

$$p_i^\xi(t + \tau) = (1 - \lambda_i^\xi(t)\tau)p_i^\xi(t) + \sum_{j=1}^{32} \lambda_{ji}^\xi(t)p_j^\xi(t)\tau, \quad \xi \in (ЛА, Л-О). \quad (3.4)$$

Позначив для наочності  $\lambda_i^\xi = \sum \lambda_{ij}^\xi$  та  $\lambda_{ji}^\xi = \mu_{ji}^\xi$ , при  $\tau \rightarrow 0$  отримаємо системи диференційних рівнянь, що описують динаміку зміни у часі ймовірностей (рівняння Колмагорова)

$$\frac{dp_i^\xi}{dt} = - \sum_j^{32} \lambda_{ij}^\xi p_i^\xi + \sum_{j=1}^{32} \mu_{ji}^\xi p_j^\xi \quad (3.5)$$

Всі переходи системи S з одного стану в інший відбуваються під дією якихось потоків подій. Потік подій – це послідовність однорідних подій, які слідують одна за одною в якісь випадкові моменти часу. Якщо всі потоки подій, що переводять систему S із стану в стан – найпростіші, то процес, що протікає в системі, буде марковським.

Коли підсистема  $S^\xi$  знаходиться в будь-якому стані  $S_i^\xi$  з якого є безпосередній перехід в інший стан  $S_j^\xi$  (стрілка, що надходить із  $S_i^\xi$  в  $S_j^\xi$  на графі станів (рис.3.2)), то на підсистему, поки вона знаходиться в стані  $S_i^\xi$  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 ймовірності переходу  $\lambda_{i,j}^\xi$  – середнє число подій, які відбуваються за одиницю часу і переводять систему із стану  $S_i^\xi$  в стан  $S_j^\xi$

Інтенсивність потоку керуючих дій Л–О на корегування параметру позначемо як  $\mu_{j,i}^{L-0}$ . Ця інтенсивність переводить підсистему із стану  $S_j^{L-0}$  в стан  $S_i^{L-0}$  по стрілці  $S_j^{L-0} \rightarrow S_i^{L-0}$  (рис.3.2).

Приймаємо ймовірністю і-го стану ймовірність  $p_i^\xi(t)$  того, що в момент t система  $S^\xi$  буде знаходитися в стані  $S_i^\xi$ . Для будь-якого моменту сума всіх ймовірностей дорівнює одиниці:  $\sum_{i=1}^n p_i^\xi(t) = 1$ . Коли система  $S^\xi$  має 32 стани, потрібно скласти систему з 32 рівнянь для ймовірностей станів з 32 невідомими функціями  $p_1^\xi, p_2^\xi, \dots, p_{32}^\xi$ .

Ймовірність стану  $p_1^\xi(t)$  – це ймовірність того, що в момент t система буде в стані  $S_1^\xi$ . Якщо у t мале прирощення  $\Delta t$  та знайдемо  $p_1^\xi(t + \Delta t)$  – ймовірність того, що в момент  $t + \Delta t$  система буде в стані  $S_1^\xi$ .

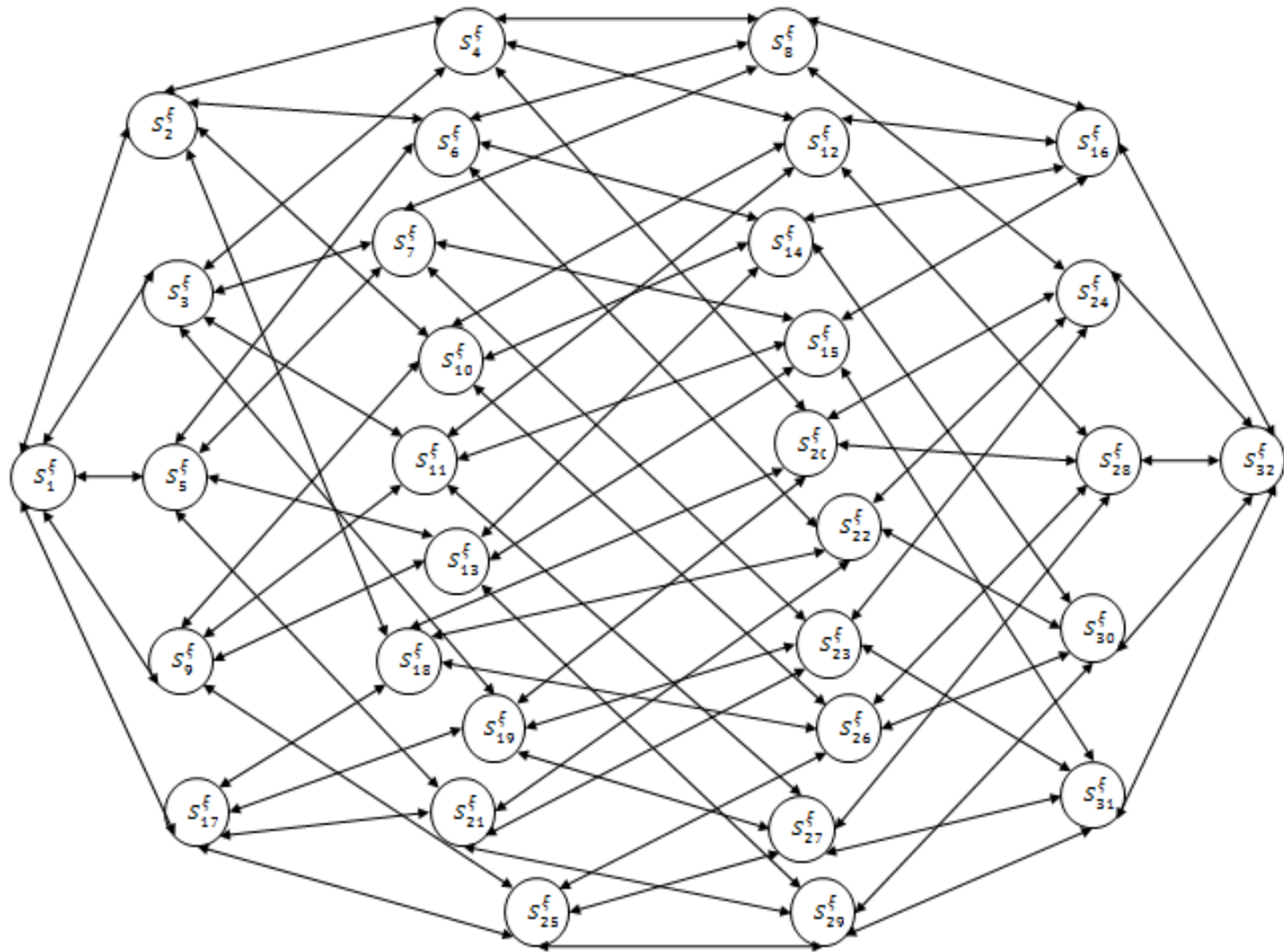


Рис.3.2 Графи станів підсистем ЛА та Л-О

Це може відбутися в двох випадках: якщо в момент часу  $t$  система вже була в стані  $S_1^\xi$ , а за час  $\Delta t$  не вийшла з нього або в момент часу  $t$  система вже була в стані  $S_2^\xi$ , а за час  $\Delta t$  перейшла з нього в  $S_1^\xi$ .

Ймовірність того, що в момент часу  $t$  система була в стані  $S_1^\xi$  дорівнює  $p_1^\xi(t)$ . Цю ймовірність помножимо на ймовірність того, що знаходячись в момент часу  $t$  в стані  $S_1^\xi$  система за час  $\Delta t$  не перейде з нього ні в  $S_2^\xi$ , ні в  $S_3^\xi$ , ні в  $S_5^\xi$ , ні в  $S_9^\xi$ , ні в  $S_{17}^\xi$ . Сумарний потік подій, що виводить систему зі стану  $S_1$  буде найпростішим з інтенсивністю  $\mu_{1,2}^\xi + \mu_{1,3}^\xi + \mu_{1,5}^\xi + \mu_{1,9}^\xi + \mu_{1,17}^\xi$ .

Тому ймовірність того, що за час  $\Delta t$  система вийде зі стану  $S_1$  дорівнює  $(\mu_{1,2}^\xi + \mu_{1,3}^\xi + \mu_{1,5}^\xi + \mu_{1,9}^\xi + \mu_{1,17}^\xi) \Delta t$ , а ймовірність того, що не вийде  $1 - (\mu_{1,2}^\xi + \mu_{1,3}^\xi + \mu_{1,5}^\xi + \mu_{1,9}^\xi + \mu_{1,17}^\xi) \Delta t$ . Звідси знаходимо ймовірність першого випадку:

$$p_1(t) \left[ 1 - (\mu_{1,2}^\xi + \mu_{1,3}^\xi + \mu_{1,5}^\xi + \mu_{1,9}^\xi + \mu_{1,17}^\xi) \Delta t \right]. \quad (3.6)$$

Ймовірність другого випадку дорівнює тому, що в момент  $t$  система буде в стані  $S_2^\xi$ , а за час  $\Delta t$  перейде з нього в стан  $S_2^\xi$ , тобто вона дорівнює:

$$\left( \lambda_{2,1}^\xi P_2(t) + \lambda_{3,1}^\xi P_3(t) + \lambda_{5,1}^\xi P_5(t) + \lambda_{9,1}^\xi P_9(t) + \lambda_{17,1}^\xi P_{17}(t) \right) \Delta t. \quad (3.7)$$

За правилом додавання ймовірностей додавши ймовірності обох варіантів отримано:

$$P_1^\xi(t + \Delta t) = p_1^\xi(t) \left[ 1 - (\mu_{1,2}^\xi + \mu_{1,3}^\xi + \mu_{1,5}^\xi + \mu_{1,9}^\xi + \mu_{1,17}^\xi) \Delta t \right] + \quad (3.8)$$

$$+ \left( \lambda_{2,1}^\xi P_2(t) + \lambda_{3,1}^\xi P_3(t) + \lambda_{5,1}^\xi P_5(t) + \lambda_{9,1}^\xi P_9(t) + \lambda_{17,1}^\xi P_{17}(t) \right) \Delta t$$

Розкриваючи квадратні дужки, перенесено  $p_1^\xi(t)$  в ліву частину та розділено обидві частини на  $\Delta t$ :



$$\begin{aligned} & \frac{P_1^\xi(t + \Delta t) - P_1^\xi(t)}{\Delta t} = \\ & = \left( \lambda_{2,1}^\xi P_2(t) + \lambda_{3,1}^\xi P_3(t) + \lambda_{5,1}^\xi P_5(t) + \lambda_{9,1}^\xi P_9(t) + \lambda_{17,1}^\xi P_{17}(t) \right) - \\ & \quad - \left( \mu_{1,2}^\xi + \mu_{1,3}^\xi + \mu_{1,5}^\xi + \mu_{1,9}^\xi + \mu_{1,17}^\xi \right) p_1^\xi(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Коли  $\Delta t$  спрямуємо до нуля – зліва отримаємо в преділі 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  $P_1^\xi(t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{dP_1^\xi}{dt} = & \lambda_{2,1}^\xi P_2 + \lambda_{3,1}^\xi P_3 + \lambda_{5,1}^\xi P_5 + \lambda_{9,1}^\xi P_9 + \lambda_{17,1}^\xi P_{17} - \mu_{1,2}^\xi P_1 - \mu_{1,3}^\xi P_1 \\ & - \mu_{1,5}^\xi P_1 - \mu_{1,9}^\xi P_1 - \mu_{1,17}^\xi P_1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Аналогічно запишемо ще 31 диференційне 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 отримаємо дві системи диференційних рівнянь для ймовірностей станів підсистем ЛА  $S^{\text{ЛА}}$  та Л-О  $S^{\text{Л-О}}$  (додаток 2). Правило складання рівнянь Колмогорова: в лівій частині кожного з них стоїть похідна ймовірності якогось  $i$ -го стану, в правій – сума добутків всіх станів, з яких надходять стрілки в даний стан, на інтенсивності відповідних потоків подій, мінус сумарна інтенсивність всіх потоків, що виводять систему з даного стану, помножена на ймовірність даного ( $i$ -го) стану.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_1^\xi}{dt} &= \lambda_{2,1}^\xi P_2 + \lambda_{3,1}^\xi P_3 + \lambda_{5,1}^\xi P_5 + \lambda_{9,1}^\xi P_9 + \lambda_{17,1}^\xi P_{17} - \\ & \quad - \mu_{1,2}^\xi P_1 - \mu_{1,3}^\xi P_1 - \mu_{1,5}^\xi P_1 - \mu_{1,9}^\xi P_1 - \mu_{1,17}^\xi P_1 \\ \frac{dP_2^\xi}{dt} &= \lambda_{1,2}^\xi P_1 + \lambda_{4,2}^\xi P_4 + \lambda_{6,2}^\xi P_6 + \lambda_{10,2}^\xi P_{10} + \lambda_{18,2}^\xi P_{18} - \\ & \quad - \left( \mu_{2,1}^\xi + \mu_{2,4}^\xi + \mu_{2,6}^\xi + \mu_{2,10}^\xi + \mu_{2,18}^\xi \right) P_2 \\ & \quad \vdots \\ \frac{dP_{32}^\xi}{dt} &= \lambda_{30,32}^\xi P_{30} + \lambda_{28,32}^\xi P_{28} + \lambda_{16,32}^\xi P_{16} + \lambda_{31,32}^\xi P_{31} + \lambda_{24,32}^\xi P_{24} - \\ & \quad - \left( \mu_{32,30}^\xi + \mu_{32,28}^\xi + \mu_{32,16}^\xi + \mu_{32,31}^\xi + \mu_{32,24}^\xi \right) P_{32} \end{aligned} \right. \quad (3.11)$$

### 3.3 Логіко-структурна схема людино-машинної системи «пілот-літак»

Для отримання розрахункових числових значень моделі системи «пілот-літак» розглянемо структурну схему ЛМС «пілот-літак» та функціональні зв'язки між підсистемами ЛА  $S^{ЛА}$  та Л-О  $S^{Л-О}$ . Структурна схема моделі «пілот-літак» представлена на рис.3.3, де обидві підсистеми – це графи з 32-ма станами, що є топологічно ідентичними, та мають однозначні функціональні відображення як станів, так і інтенсивностей переходу із стану в стан.

Система «пілот-літак» як СМО має дві підсистеми. Нехай в початковий момент часу  $t_0$  система «пілот-літак» знаходиться в станах  $S_1^\xi$  – коли літак на глісаді і немає відхилень від потрібних параметрів.

На систему «пілот-літак» діють у випадкові моменти часу випадкові зовнішні збурення (вітер, відмова обладнання, опади та ін.), що впливає на перехід ЛА з одного стану в інший з розрахунковими – ідеальними інтенсивностями  $\lambda_{i,j}^{ЛА}, \mu_{j,i}^{ЛА}$ . Початкові умови – коли всі параметри в нормі – це стан підсистеми  $S_i^{ЛА}$ . Під дією збурень відбувається відхилення параметру літака від попереднього значення та ЛА переходить в стан  $S_j^{ЛА}$ .

В випадковий момент часу під дією випадкових впливів параметри літака відхиляються від заданих (потрібних) параметрів і підсистема  $S^{ЛА}$  переходить з інтенсивністю  $\lambda_{i,j}^{ЛА}$ , що є випадковою величиною, що розподілена за нормальним законом. Зі стану  $S_1^{ЛА}$  в один зі станів  $S_j^{ЛА}$ , де  $j \in \{2,3,5,9,17\}$ , що відповідають стану ЛА, коли тільки один з параметрів відхилився від потрібного значення.

В подальші випадкові моменти часу  $t_2, t_3, \dots, t_{32}$  літак під дією випадкових зовнішніх та внутрішніх збурень може переходити з відповідною інтенсивністю  $\lambda_{i,j}^{ЛА}$  з поточного стану  $S_i^{ЛА}$  в новий стан  $S_j^{ЛА}$ , з двома відхиленнями контрольованих параметрів ( $j \in \{4,6,7,10,11,13,18,19,21,25\}$ ), з трьома відхиленнями контрольованих параметрів  $j \in \{8,12,14,15,20,22,23,26,27,29\}$ , з

чотирма відхиленнями контрольованих параметрів  $j \in \{16,24,28,30,31\}$  та з п'ятью відхиленнями контрольованих параметрів  $j \in \{32\}$ .

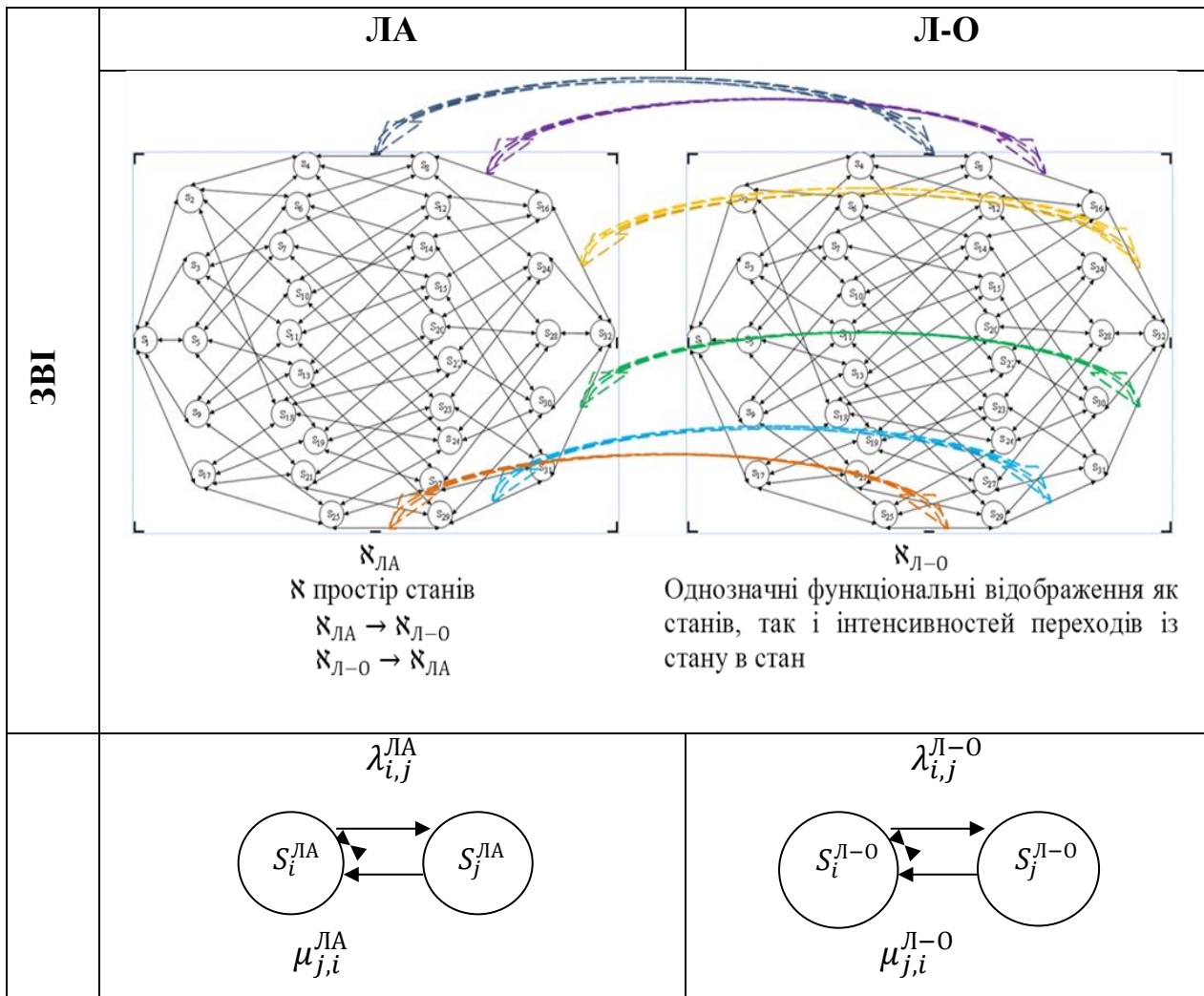


Рис.3.3 Структурна схема моделі «пілот-літак»

При переході  $S^{ЛА}$  зі стану  $S_i^{ЛА}$  в стан  $S_j^{ЛА}$  в підсистемі  $S^{Л-О}$  також відбувається перехід зі стану  $S_i^{Л-О}$  в стан  $S_j^{Л-О}$  з інтенсивністю  $\lambda_{i,j}^{Л-О}$ . Інтенсивність переходу із стану  $S_j^{Л-О}$  в стан  $S_i^{Л-О}$  для підсистеми Л-О визначається, як  $\lambda_{i,j}^{Л-О} = \frac{1}{t_{\Sigma}}$ , для якої має враховуватися дві складові часу – перша, це час, коли стан системи з відхиленнями параметрів в межах норми позначено як штатний та друга складова – це час додатковий, який необхідно витратити пілоту для виявлення нештатної ситуації (коли відхилення параметру виходить за межі встановлених норм).

$$T_{\Sigma} = T_{i,j\text{штат.}}^{Л-0} + T_{i,j\text{нештат.}}^{Л-0},$$

де  $T_{i,j\text{штат.}}^{Л-0}$  – час, необхідний пілоту для зчитування інформації про поточний стан літака з приладів, опрацювання цієї інформації та прийняття рішення про управління;

$T_{i,j\text{нештат.}}^{Л-0}$  – час, необхідний пілоту для виявлення і подолання нештатної ситуації, що призводить до зменшення інтенсивності  $\lambda_{i,j}^{Л-0}$ .

Для моделі Л-О, що розглядається, в процесі пілотування в директорному режимі при заході на посадку пілот спостерігає за 5 основними контрольованими параметрами. Інтенсивності переходів системи  $S^{Л-0}$  із стану  $S_i^{Л-0}$  в стан  $S_j^{Л-0}$  визначаються як

$$\lambda_{i,j}^{Л-0} = \frac{1}{T_{i,j\text{штат.}}^{Л-0}}, \quad (3.12)$$

$$T_{i,j\text{штат.}}^{Л-0} = \sum_{k=1}^N (T_{\phi} + T_n + T_o + T_y) + T_{п.р.}, \quad (3.13)$$

де  $T_{\phi}$  – загальний час (фіксації погляду), що витратив пілот при зчитуванні інформації з пілотажно-навігаційних приладів;  $T_n$  – доля 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 керуючих впливів для подолання виявлених відхилень поточних параметрів літака від потрібних, пілот здійснює управління для компенсації відхилення поточного параметру.

В результаті цих дій літак починає повертатися до потрібного значення параметру і підсистема  $S^{ЛА}$  переходить з інтенсивністю  $\mu_{j,i}^{ЛА}$  зі стану  $S_j^{ЛА}$  в стан  $S_i^{ЛА}$ .

$$\mu_{j,i}^{ЛА} = \frac{1}{T_{\Sigma}^{ЛА}}, \quad (3.14)$$

де  $T_{\Sigma}^{ЛА} = T_{j,i}^{ЛА} + T_{j,i}^{Л-0} + T_{j,i}^{\text{упр.}}$

де  $T_{j,i}^{ЛА}$  – 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 в директорному режимі слідкує саме за показаннями цих директорних стрілок та інших пілотажних приладів (рис.3.5). 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).

При відхиленні параметрів польоту від заданих, пілот рухає відповідний орган керування для компенсації цих відхилень. Літак переходить реагуючи на управляючі впливи переходом із стану  $S_j^{ЛА}$  в стан  $S_i^{ЛА}$  під дією інтенсивності переходу  $\mu_{j,i}^{ЛА}$ . Пілот контролює по приладах результат здійснених керуючих впливів і система  $S^{Л-О}$  з інтенсивністю  $\mu_{j,i}^{Л-О}$  переходить зі стану  $S_j^{Л-О}$  в стан  $S_i^{Л-О}$ .

$$\mu_{j,i}^{Л-О} = \frac{1}{T_{\Sigma}^{упр.}}, \quad (3.15)$$

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

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

Таким чином підсистема  $S^{Л-О}$  та  $S^{ЛА}$  зв'язані між собою однозначними функціональними відображеннями станів і інтенсивностей переходу зі стану в стан.

Виходячи з вищезазначеного створено функціональну схему ЛМС моделі «пілот-літак» як СМО, в якій враховані як часові затримки технічної складової системи, так і часові затримки Л-О (рис.3.4) та структурну схему моделі «пілот-

літак» (рис.3.3), яка однозначно відображає як простори станів Л-А та ЛО, так і інтенсивності переходів всієї системи із стану в стан.

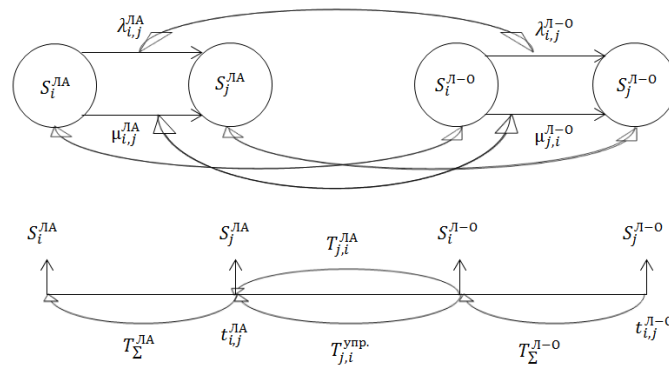


Рис. 3.4 Функціональна схема людино-машинної системи моделі пілот-літак (Л-О–ЛА) як СМО

Для визначення конкретних числових значень інтенсивностей переходів системи  $S$  зі стану в стан  $\lambda_{ij}^\xi$  та  $\mu_{ji}^\xi$  для підсистеми ЛА та підсистеми Л-О потрібно представити структуру ЛМС як СМО. В розглянутій системі «пілот-літак» в директорному режимі заходу на посадку Л-О-пілот виконує роботу сенсомоторного слідкування при зчитуванні інформації з пілотажних приладів, де є свої правила переносу поглядів між різними приладами при зчитуванні інформації і у випадкові моменти часу змінюється операційний склад зорового контролю параметрів польоту (рис.3.5).



а)

б)

Рис.3.5 Схеми а) порядок переносу погляду Л-О при зчитуванні інформації з пілотажних приладів; б) порядок автоматичного зчитування інформації САУ з пілотажних приладів

НПП – навігаційно–пілотажний прилад для спостереження за курсом  $\psi$

КПП – командно–пілотажний прилад для спостереження за тангажем  $\vartheta$ , креном  $\gamma$

Вказівник швидкості – прилад для спостереження за швидкістю  $V$

Вказівник висоти – прилад для спостереження за висотою  $H$

1, 2, 3, 4, 5 – порядок переходів системи з одного стану в інший або переносів погляду Л–О.

Кількість переносів погляду від приладу до приладу протягом хвилини [89] становить 20 – 50 (в середньому 35 переносів за хвилину що становить  $T_{\Pi} = 1,7$  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 переносу погляду по приладам розпочинається та закінчується на КПП.

Наприклад, коли система  $S^{LA}$  при відхиленні параметру курсу  $\psi$  переходить із стану  $S_1^{LA}$  в стан  $S_{21}^{LA}$  відбувається наступна схема переносу погляду пілота по приладах (рис. 3.5):  $T_{S_1 \rightarrow S_2}^{L-O} = T_{КПП} \xrightarrow{+1} T_{НПП} \xrightarrow{+2} T_{КПП} \xrightarrow{+3} T_V \xrightarrow{+4} T_H \xrightarrow{+5} T_{КПП}$

Відповідно для цього випадку  $T_{\Phi} = 6 \cdot 1,5 = 9$  с,  $T_{\Pi} = 5 \cdot 1,7 = 8,5$  с.

Кількість переносів погляду відповідає кількості складових у рівнянні: 6 приладів – 6 складових і відповідно між ними 5 переносів погляду пілота. Тому час контролю пілотованих приладів залежить від кількості приладів, що контролюються за кожне коло переносу погляду. Таким чином можливо отримати всі значення  $T_{i,j}^{L-O}$  (с). Наприклад, для наведеного вище прикладу, час буде

дорівнювати:  $T_{S_1 \rightarrow S_2}^{L-O} = 17,5$ с,  $\lambda_{1,2} = \frac{1}{T_{S_1 \rightarrow S_2}^{L-O}} = 0,0571$ .

Виходячи з вищезазначеного отримаємо всі інтенсивності переходів із стану в стан для системи  $S^{L-O}$  для штатного режиму та дані зведено до табл.3.2.

$$\lambda_{3,7}^{L-O} = \lambda_{4,8}^{L-O} = \lambda_{5,7}^{L-O} = \lambda_{6,8}^{L-O} = \lambda_{11,15}^{L-O} = \lambda_{13,15}^{L-O} = \lambda_{19,23}^{L-O} = \lambda_{21,23}^{L-O} = 0,10638298 ,$$

$$\lambda_{1,2}^{J-O} = \lambda_{1,3}^{J-O} = \lambda_{1,5}^{J-O} = \lambda_{1,9}^{J-O} = \lambda_{1,17}^{J-O} = \lambda_{10,26}^{J-O} = \lambda_{12,28}^{J-O} = \lambda_{14,30}^{J-O} =$$

$$= \lambda_{18,26}^{J-O} = \lambda_{20,28}^{J-O} = \lambda_{22,30}^{J-O} = \lambda_{25,26}^{J-O} = \lambda_{27,28}^{J-O} = \lambda_{29,30}^{J-O} = 0,05714286$$

$$\lambda_{2,10}^{J-O} = \lambda_{2,18}^{J-O} = \lambda_{4,12}^{J-O} = \lambda_{4,20}^{J-O} = \lambda_{6,14}^{J-O} = \lambda_{6,22}^{J-O} = \lambda_{10,14}^{J-O} =$$

$$= \lambda_{11,27}^{J-O} = \lambda_{13,14}^{J-O} = \lambda_{18,20}^{J-O} = \lambda_{18,22}^{J-O} = \lambda_{25,27}^{J-O} = \lambda_{25,29}^{J-O} = 0,06993007$$

$$\lambda_{2,4}^{J-O} = \lambda_{2,6}^{J-O} = \lambda_{3,4}^{J-O} = \lambda_{3,11}^{J-O} = \lambda_{3,19}^{J-O} = \lambda_{5,6}^{J-O} =$$

$$= \lambda_{5,13}^{J-O} = \lambda_{5,21}^{J-O} = \lambda_{9,11}^{J-O} = \lambda_{9,13}^{J-O} = \lambda_{17,19}^{J-O} = \lambda_{17,21}^{J-O} = 0,12658228$$

$$\lambda_{12,16}^{J-O} = \lambda_{14,16}^{J-O} = \lambda_{20,24}^{J-O} = \lambda_{22,24}^{J-O} = \lambda_{27,31}^{J-O} = \lambda_{29,31}^{J-O} = 0,06329114,$$

$$\lambda_{9,10}^{J-O} = \lambda_{9,25}^{J-O} = \lambda_{10,12}^{J-O} = \lambda_{11,12}^{J-O} = \lambda_{13,29}^{J-O} = \lambda_{17,18}^{J-O} =$$

$$= \lambda_{17,25}^{J-O} = \lambda_{19,20}^{J-O} = \lambda_{19,27}^{J-O} = \lambda_{21,22}^{J-O} = \lambda_{21,29}^{J-O} = 0,09009009, \quad \lambda_{28,32}^{J-O} = \lambda_{30,32}^{J-O} = 0,04504505$$

$$\lambda_{8,16}^{J-O} = \lambda_{15,16}^{J-O} = \lambda_{15,31}^{J-O} = \lambda_{23,24}^{J-O} = \lambda_{23,31}^{J-O} = 0,07092199, \quad \lambda_{26,28}^{J-O} = \lambda_{26,30}^{J-O} = 0,04830918$$

$$\lambda_{7,8}^{J-O} = \lambda_{7,15}^{J-O} = \lambda_{7,23}^{J-O} = 0,09174312, \quad \lambda_{16,32}^{J-O} = \lambda_{24,32}^{J-O} = \lambda_{31,32}^{J-O} = 0,04878049, \quad \lambda_{8,24}^{J-O} = 0,05780347$$

Виходячи з (3.15) отримуємо

$$\mu_{7,3}^{J-O} = \mu_{7,5}^{J-O} = \mu_{8,4}^{J-O} = \mu_{8,6}^{J-O} = \mu_{15,11}^{J-O} = \mu_{15,13}^{J-O} = \mu_{23,19}^{J-O} = \mu_{23,21}^{J-O} = 0,09638298$$

$$\mu_{2,1}^{J-O} = \mu_{3,1}^{J-O} = \mu_{5,1}^{J-O} = \mu_{9,1}^{J-O} = \mu_{17,1}^{J-O} = \mu_{26,10}^{J-O} = \mu_{28,12}^{J-O} = \mu_{30,14}^{J-O} =$$

$$= \mu_{26,18}^{J-O} = \mu_{28,20}^{J-O} = \mu_{30,22}^{J-O} = \mu_{26,25}^{J-O} = \mu_{28,27}^{J-O} = \mu_{30,29}^{J-O} = 0,046714286$$

$$\mu_{10,2}^{J-O} = \mu_{18,2}^{J-O} = \mu_{12,4}^{J-O} = \mu_{20,4}^{J-O} = \mu_{14,6}^{J-O} = \mu_{22,6}^{J-O} = \mu_{14,10}^{J-O} =$$

$$\mu_{27,11}^{J-O} = \mu_{14,13}^{J-O} = \mu_{20,18}^{J-O} = \mu_{22,18}^{J-O} = \mu_{27,25}^{J-O} = \mu_{29,25}^{J-O} = 0,04563007$$

$$\mu_{4,2}^{J-O} = \mu_{6,2}^{J-O} = \mu_{4,3}^{J-O} = \mu_{11,3}^{J-O} = \mu_{19,3}^{J-O} = \mu_{6,5}^{J-O} = \mu_{13,5}^{J-O} =$$

$$= \mu_{21,5}^{J-O} = \mu_{11,9}^{J-O} = \mu_{13,9}^{J-O} = \mu_{19,17}^{J-O} = \mu_{21,17}^{J-O} = 0,09658228, \quad \mu_{32,28}^{J-O} = \mu_{32,30}^{J-O} = 0,03904505$$

$$\mu_{16,12}^{J-O} = \mu_{16,14}^{J-O} = \mu_{24,20}^{J-O} = \mu_{24,22}^{J-O} = \mu_{31,27}^{J-O} = \mu_{31,29}^{J-O} = 0,5219114$$

$$\mu_{16,8}^{J-O} = \mu_{16,15}^{J-O} = \mu_{24,23}^{J-O} = \mu_{31,15}^{J-O} = \mu_{31,23}^{J-O} = 0,06882199 \quad \mu_{8,7}^{J-O} = \lambda_{15,7}^{J-O} = \lambda_{23,7}^{J-O} = 0,07534312$$

$$\mu_{10,9}^{J-O} = \mu_{25,9}^{J-O} = \mu_{12,10}^{J-O} = \mu_{12,11}^{J-O} = \mu_{29,13}^{J-O} = \mu_{18,17}^{J-O} = \mu_{20,19}^{J-O} = \mu_{27,19}^{J-O} = \mu_{22,21}^{J-O} = \mu_{29,21}^{J-O} =$$

$$= \mu_{25,17}^{J-O} = 0,07909009$$

$$\mu_{32,16}^{J-O} = \mu_{32,24}^{J-O} = \mu_{32,31}^{J-O} = 0,03648049, \quad \mu_{28,26}^{J-O} = \mu_{30,26}^{J-O} = 0,04420918, \quad \mu_{24,8}^{J-O} = 0,04780347$$



Відповідно до даних табл.3.1 та рис.3.2 вихідними параметрами, які характеризують рух літака є  $V, H, \vartheta, \gamma, \psi$ , а вхідними по керуючим діям Л–О є  $\delta_p^V$

$\delta_B^H, \delta_B^\vartheta, \delta_\epsilon^\gamma, \delta_H^\psi$  та інтенсивності мають наступні значення:

$$\begin{aligned} \mu_\vartheta &= \mu_{5,1}^{ЛА} = \mu_{6,2}^{ЛА} = \mu_{7,3}^{ЛА} = \mu_{8,4}^{ЛА} = \mu_{13,9}^{ЛА} = \mu_{14,10}^{ЛА} = \mu_{15,11}^{ЛА} = \mu_{16,12}^{ЛА} = \mu_{21,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{22,18}^{ЛА} = \mu_{23,19}^{ЛА} = \mu_{24,20}^{ЛА} = \mu_{29,25}^{ЛА} = \mu_{30,26}^{ЛА} = \mu_{31,27}^{ЛА} = \mu_{32,28}^{ЛА} = \frac{1}{T_{ПП}^\vartheta \cdot K_\vartheta}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де  $T_{ПП}^\vartheta = 0,5c$  при відхиленні  $\Delta\vartheta = 1^\circ$

$$\begin{aligned} \mu_H &= \mu_{9,1}^{ЛА} = \mu_{10,2}^{ЛА} = \mu_{11,3}^{ЛА} = \mu_{12,4}^{ЛА} = \mu_{13,5}^{ЛА} = \mu_{14,6}^{ЛА} = \mu_{15,7}^{ЛА} = \mu_{16,8}^{ЛА} = \mu_{25,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{26,18}^{ЛА} = \mu_{27,19}^{ЛА} = \mu_{28,20}^{ЛА} = \mu_{29,21}^{ЛА} = \mu_{30,22}^{ЛА} = \mu_{31,23}^{ЛА} = \mu_{32,24}^{ЛА} = \frac{1}{T_{ПП}^H \cdot K_H}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

де  $T_{ПП}^H = 0,1c$  при відхиленні  $\Delta H = 1m$

$$\begin{aligned} \mu_V &= \mu_{17,1}^{ЛА} = \mu_{18,2}^{ЛА} = \mu_{19,3}^{ЛА} = \mu_{20,4}^{ЛА} = \mu_{21,5}^{ЛА} = \mu_{22,6}^{ЛА} = \mu_{23,7}^{ЛА} = \mu_{24,8}^{ЛА} = \mu_{25,9}^{ЛА} = \\ &= \mu_{26,10}^{ЛА} = \mu_{27,11}^{ЛА} = \mu_{28,12}^{ЛА} = \mu_{29,13}^{ЛА} = \mu_{30,14}^{ЛА} = \mu_{31,15}^{ЛА} = \mu_{32,16}^{ЛА} = \frac{1}{T_{ПП}^V \cdot K_V}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

де  $T_{ПП}^V = 2c$  при відхиленні  $\Delta V = 1 \frac{m}{c}$

$$\begin{aligned} \mu_\psi &= \mu_{2,1}^{ЛА} = \mu_{4,3}^{ЛА} = \mu_{6,5}^{ЛА} = \mu_{8,7}^{ЛА} = \mu_{10,9}^{ЛА} = \mu_{12,11}^{ЛА} = \mu_{14,13}^{ЛА} = \mu_{16,15}^{ЛА} = \mu_{18,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{20,19}^{ЛА} = \mu_{22,21}^{ЛА} = \mu_{24,23}^{ЛА} = \mu_{26,25}^{ЛА} = \mu_{28,27}^{ЛА} = \mu_{30,29}^{ЛА} = \mu_{32,31}^{ЛА} = \frac{1}{T_{ПП}^\psi \cdot K_\psi}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

де  $T_{ПП}^\psi = 1,0c$  при відхиленні  $\Delta\psi = 1^\circ$

$$\begin{aligned} \mu_\gamma &= \mu_{3,1}^{ЛА} = \mu_{4,2}^{ЛА} = \mu_{7,5}^{ЛА} = \mu_{8,6}^{ЛА} = \mu_{11,9}^{ЛА} = \mu_{12,10}^{ЛА} = \mu_{15,13}^{ЛА} = \mu_{16,14}^{ЛА} = \mu_{19,17}^{ЛА} = \\ &= \mu_{20,13}^{ЛА} = \mu_{23,21}^{ЛА} = \mu_{24,22}^{ЛА} = \mu_{27,25}^{ЛА} = \mu_{28,26}^{ЛА} = \mu_{31,29}^{ЛА} = \mu_{32,30}^{ЛА} = \frac{1}{T_{ПП}^\gamma \cdot K_\gamma}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

де  $T_{ПП}^\gamma = 0,35c$  при відхиленні  $\Delta\gamma = 1^\circ$

де  $K_\vartheta, K_H, K_V, K_\psi, K_\gamma$  – коефіцієнти, що залежать від величини відхилення відповідних параметрів та інерційності літака (коефіцієнти зміни параметрів на найменше одиничне ступеневе відхилення). Для розрахунку було використано час  $T_{пп}^\Omega$  - час перехідного процесу ЛА при подоланні відповідних нормативних відхилень параметрів від потрібних значень [2, 25], де  $\Omega \in \{V, H, \vartheta, \gamma, \psi\}$ .

Таблиця інтенсивностей переходу  $S_i^{L-O}$  в стан  $S_j^{L-O}$ 

порядок зчитування інформації з пілотажних приладів	Час $T_{пп}$	Знаєння інтенсивнос- ті $\lambda_{j\mu}^{L-O}$	Число значення інтенсив- ності $\lambda_{j\mu}^{L-O}$
$T3$	7,9 с	$\lambda_{2,4}^{L-O}, \lambda_{2,6}^{L-O}, \lambda_{3,4}^{L-O}, \lambda_{3,11}^{L-O}, \lambda_{3,19}^{L-O}, \lambda_{5,6}^{L-O},$ $\lambda_{5,13}^{L-O}, \lambda_{5,21}^{L-O}, \lambda_{9,11}^{L-O}, \lambda_{9,13}^{L-O}, \lambda_{17,19}^{L-O}, \lambda_{17,21}^{L-O}$	0,12658228
$T3 + КПП$	9,4 с	$\lambda_{3,7}^{L-O}, \lambda_{5,7}^{L-O}, \lambda_{4,8}^{L-O}, \lambda_{6,8}^{L-O}, \lambda_{11,15}^{L-O},$ $\lambda_{13,15}^{L-O}, \lambda_{19,23}^{L-O}, \lambda_{21,23}^{L-O}$	0,10638298
$T3 + 2КПП$	10,9 с	$\lambda_{7,8}^{L-O}, \lambda_{7,15}^{L-O}, \lambda_{7,23}^{L-O}$	0,09174312
$T4$	11,1 с	$\lambda_{9,10}^{L-O}, \lambda_{9,25}^{L-O}, \lambda_{10,12}^{L-O}, \lambda_{11,12}^{L-O}, \lambda_{13,29}^{L-O}, \lambda_{17,18}^{L-O},$ $\lambda_{17,25}^{L-O}, \lambda_{19,20}^{L-O}, \lambda_{19,27}^{L-O}, \lambda_{21,22}^{L-O}, \lambda_{21,29}^{L-O}$	0,09009009
$T4 + 2КПП$	14,1 с	$\lambda_{8,16}^{L-O}, \lambda_{15,16}^{L-O}, \lambda_{23,24}^{L-O}, \lambda_{15,31}^{L-O}, \lambda_{23,31}^{L-O}$	0,07092199
$T5$	14,3 с	$\lambda_{2,10}^{L-O}, \lambda_{2,18}^{L-O}, \lambda_{4,12}^{L-O}, \lambda_{4,20}^{L-O}, \lambda_{6,14}^{L-O}, \lambda_{6,22}^{L-O}, \lambda_{10,14}^{L-O},$ $\lambda_{11,27}^{L-O}, \lambda_{13,14}^{L-O}, \lambda_{18,20}^{L-O}, \lambda_{18,22}^{L-O}, \lambda_{25,27}^{L-O}, \lambda_{25,29}^{L-O}$	0,06993007
$T5 + КПП$	15,8 с	$\lambda_{12,16}^{L-O}, \lambda_{14,16}^{L-O}, \lambda_{20,24}^{L-O}, \lambda_{22,24}^{L-O}, \lambda_{27,31}^{L-O}, \lambda_{29,31}^{L-O}$	0,06329114
$T5 + 2КПП$	17,3 с	$\lambda_{8,24}^{L-O}$	0,05780347
$T6$	17,5 с	$\lambda_{1,2}^{L-O}, \lambda_{1,3}^{L-O}, \lambda_{1,5}^{L-O}, \lambda_{1,9}^{L-O}, \lambda_{1,17}^{L-O}, \lambda_{10,26}^{L-O}, \lambda_{12,28}^{L-O},$ $\lambda_{14,30}^{L-O}, \lambda_{18,26}^{L-O}, \lambda_{20,28}^{L-O}, \lambda_{22,30}^{L-O}, \lambda_{25,26}^{L-O}, \lambda_{27,28}^{L-O}, \lambda_{29,30}^{L-O}$	0,05714286
$T6 + 2КПП$	20,5 с	$\lambda_{16,32}^{L-O}, \lambda_{24,32}^{L-O}, \lambda_{31,32}^{L-O}$	0,04878049
$T7$	20,7 с	$\lambda_{26,28}^{L-O}, \lambda_{26,30}^{L-O}$	0,04830918
$T7 + КПП$	22,2 с	$\lambda_{28,32}^{L-O}, \lambda_{30,32}^{L-O}$	0,04504505

### 3.4. Програмна реалізація математичної моделі

Для верифікації отриманої моделі «пілот-літак» як системи масового обслуговування в дисертаційній роботі було реалізовано програмний комплекс в інтегрованому середовищі для інженерних та математичних розрахунків MatLab.

Код програми «Модель діяльності Л-О як СМО» реалізованої в MatLab (додаток 3) розпочинається з введення вхідних даних моделі, отриманих експериментальним шляхом інтенсивностей переходів системи із 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»), інтенсивності переходів системи пілот-літак.

Для розв'язку рівнянь системи Колмогорова було використано чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь – метод Рунге-Кутта 4 порядку.

Нехай на відрізку  $[a,b]$  потрібно знайти чисельний розв'язок диференціального рівняння:

$$y' = f(x, y) \text{ з початковою умовою } y(x_0) = y_0. \quad (3.21)$$

Розіб'ємо відрізок  $[a,b]$  на  $n$  рівних частин точками

$$x_i = x_0 + ih \quad (i = 0, 2, \dots, n), \text{ де } h = \frac{(b-a)}{n}. \quad (3.22)$$

В методі Рунге-Кутта послідовні значення  $y_i$  шуканої функції  $y$  визначаються по формулі:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y \quad (3.23)$$

Якщо розкласти функцію  $y$  в ряд Тейлора та обмежитись членами до  $h^4$  включно, то приріст функції  $\Delta y$  можна представити у наступному вигляді:

$$\Delta y = y(x+h) - y(x) = hy'(x) + \frac{h^2}{2}y''(x) + \frac{h^3}{6}y'''(x) + \frac{h^4}{24}y^{IV}(x) \quad (3.24)$$

Замість безпосередніх розрахунків, які фігурують у формулі (3.21), в методі Рунге-Кутта визначаються чотири числа:

$$\begin{cases} k_1 = hf(x, y) \\ k_2 = hf\left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 = hf\left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 = hf(x + h, y + k_3) \end{cases} \quad (3.25)$$

Якщо числам  $k_1, k_2, k_3, k_4$  надати відповідно вагу  $\frac{1}{6}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{6}$ , то середньозважене цих чисел з точністю до четвертого степеня відповідно дорівнюють  $\Delta y$ , яке визначається по формулі (3.21):

$$\Delta y = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.26)$$

Таким чином для кожної пари поточних значень  $x_i$  і  $y_i$  за формулами (3.22) визначаються значення:

$$\begin{cases} k_1^{(i)} = hf(x_i, y_i) \\ k_2^{(i)} = hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1^{(i)}}{2}\right) \\ k_3^{(i)} = hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_2^{(i)}}{2}\right) \\ k_4^{(i)} = hf(x_i + h, y_i + k_3^{(i)}) \end{cases} \quad (3.27)$$

Потім, за формулою (3.23) знаходиться:

$$\Delta y_i = \frac{1}{6}(k_1^{(i)} + 2k_2^{(i)} + 2k_3^{(i)} + k_4^{(i)}) \quad (3.28)$$

Після чого наступне наближення обчислюють по формулі:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \quad (3.29)$$

Наприкінці програми відбувається створення нового вікна з підвікнами для виводу вихідних графіків функцій ймовірностей станів (в одному із 32 можливих станів знаходження системи).

При моделюванні відпрацьовувались такі зміни параметрів системи «пілот-літак»: зміни  $\lambda_{i,j}^{LA}$  моделювались для різних величин внутрішніх та зовнішніх збурень, що діють на літак в польоті – вітер, опади, попадання птахів і т.д., відмови бортового обладнання, відхилення контрольованих параметрів за межі

норми; зміни  $\mu_{j,i}^{LA}$  моделювались виходячи з конструктивних особливостей автоматики на борту літака; зміни  $\lambda_{i,j}^{L-O}$  в діапазоні від 0,01 до 0,1 моделювались виходячи з професійної тренуваності та начичок пілота, де 0,01 – найбільш досвідчений та натренований, 0,1 – що має мало досвіду; зміни  $\mu_{j,i}^{L-O}$  – залежить від фізіологічного стану Л-О, часу на опрацювання та кількості контрольованих параметрів.

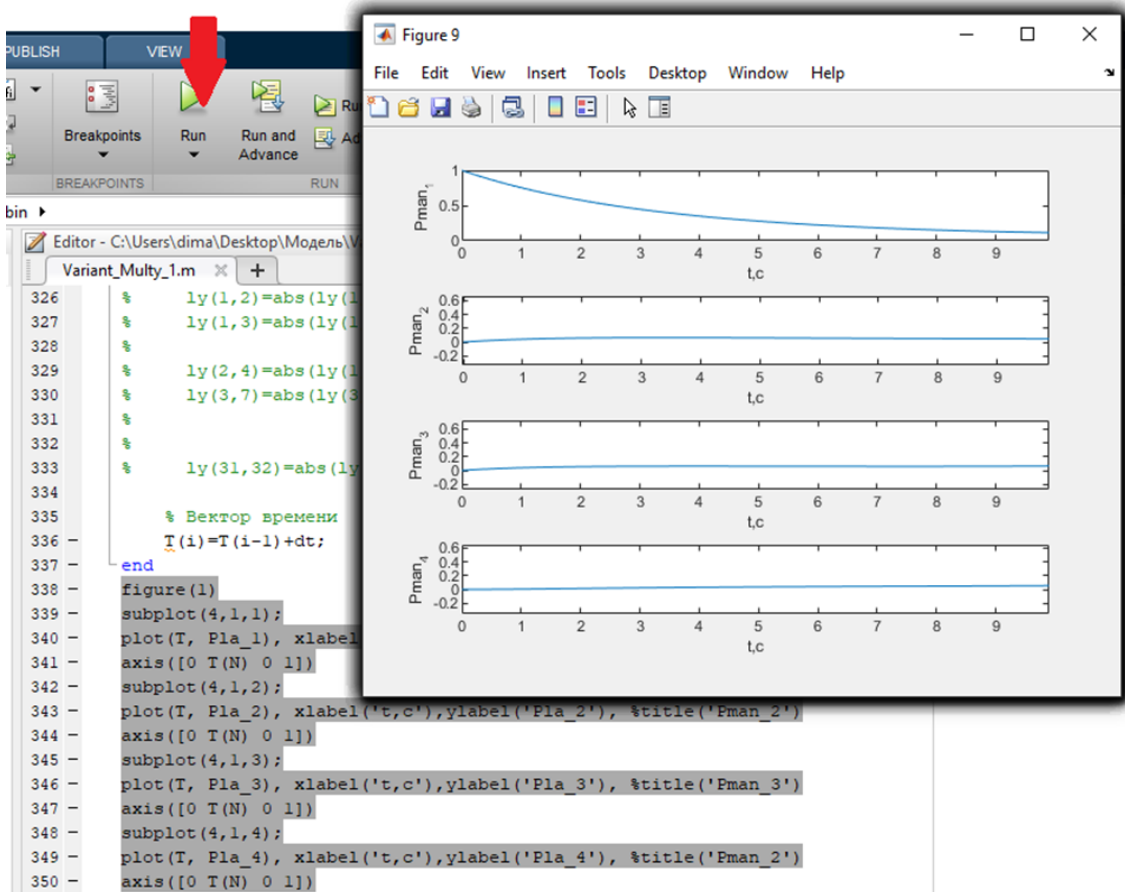


Рис.3.6 Приклад програмної реалізації моделі Л-О як СМО

В результаті роботи програми розраховується сукупність значень імовірностей станів, тобто імовірностей  $p_i^\xi(t)$  того, що в момент  $t$  система «пілот-літак» буде знаходитися в стані  $S_i^\xi$  ( $i=1...32$ ) та будуються графіки відповідних перехідних процесів (приклад декількох графіків наведено на рис.3.7), ортимані дані зведено до таблиці 3.3.

Зведена таблиця вихідних даних результатів моделювання

Таблиця 3.3

Задані дані		Pman1		Pman2		PIA1		PIA2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda$	імовірність	Час	значення	Час	значення	Час	значення	Час	значення
0.9	0.05714286	80	0.939966293918683	83	0.0599471532099448	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.8	0.05714286	64	0.930035725421342	65	0.0696816227376405	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.7	0.05714286	71	0.920008659275603	72	0.0797099161673079	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.6	0.05714286	85	0.910018045442720	86	0.0897831406606638	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.5	0.05714286	85	0.890163276790500	85	0.109836723209500	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.4	0.05714286	112	0.870143611543499	112	0.129856388456500	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.3	0.05714286	123	0.830060169830982	123	0.169939830169017	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.2	0.05714286	178	0.770044969899915	179	0.229756186688952	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.1	0.05714286	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.01	0.05714286	418	0.139963176031815	420	0.859916734071853	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.005	0.05714286	328	0.0699810569959021	330	0.929889112269601	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.0001	0.05714286	451	0.0543058695511485	452	0.948938759058585	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.00001	0.05714286	533	0.0438406729503892	535	0.969583739587383	292	0.630025376600929	293	0.369875022354237
0.9	0.10638298	52	0.890291080140934	52	0.109708919859066	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.8	0.10638298	63	0.880188762151826	63	0.119811237848174	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.7	0.10638298	57	0.860243268005934	57	0.139756731994066	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.6	0.10638298	63	0.840349291369271	63	0.159650708630729	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.5	0.10638298	84	0.819976294037949	85	0.179745672832860	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.4	0.10638298	86	0.780381944207618	86	0.219618055792381	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.3	0.10638298	110	0.730198221502263	110	0.269801778497737	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.2	0.10638298	176	0.649960751965051	178	0.349869274803487	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.1	0.10638298	225	0.480001006218504	226	0.519905397588134	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.01	0.10638298	229	0.0799674497914797	231	0.919894726938966	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.005	0.10638298	199	0.0400037337970187	222	0.939829968295574	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.0001	0.10638298	257	0.0314059585858578	265	0.954567848698979	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.00001	0.10638298	296	0.0273904857573763	299	0.965788759753221	225	0.480001006218504	225	0.519998993781497
0.9	0.06993007	48	0.920228606914108	48	0.0797713930858922	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.8	0.06993007	52	0.910746979667323	52	0.0892530203326769	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.7	0.06993007	59	0.900453081523202	59	0.0995469184767983	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.6	0.06993007	75	0.890324055675306	75	0.109675944324694	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.5	0.06993007	83	0.870165985530524	83	0.129834014469476	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.4	0.06993007	137	0.849968410107745	139	0.149919431524641	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.3	0.06993007	179	0.809975434125171	182	0.189918855384788	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.2	0.06993007	244	0.739973335797986	248	0.259927204807254	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.1	0.06993007	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.01	0.06993007	399	0.119978930799099	401	0.879939381842125	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.005	0.06993007	306	0.0599982756828705	308	0.939901237207567	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.0001	0.06993007	421	0.0457568597957463	436	0.946578456242765	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.00001	0.06993007	457	0.0414478796707034	471	0.951687957995798	249	0.580087241806317	249	0.419912758193682
0.9	0.12658228	46	0.869997306463420	47	0.129315075382888	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.8	0.12658228	58	0.860006179231774	59	0.139680469404892	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.7	0.12658228	57	0.840106697452060	57	0.159893302547940	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.6	0.12658228	67	0.820099437763170	67	0.179900562236830	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.5	0.12658228	73	0.790417636368035	73	0.209582363631965	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.4	0.12658228	82	0.750117310900589	82	0.249882689099412	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.3	0.12658228	124	0.699965257744349	125	0.299894019812587	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.2	0.12658228	168	0.610010400999189	169	0.389911457759014	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.1	0.12658228	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.01	0.12658228	228	0.0699886991555869	230	0.929923746098088	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.005	0.12658228	306	0.0599982756828705	308	0.939901237207567	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.0001	0.12658228	344	0.046096689686868	347	0.949948474747469	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.00001	0.12658228	371	0.041559058678678	366	0.953948470484746	253	0.439971530727618	256	0.559937488011750
0.9	0.6329114	28	0.580548370238426	28	0.419451629761574	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.8	0.6329114	29	0.550955330081715	29	0.449044669918285	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.7	0.6329114	34	0.520487614311373	34	0.479512385688627	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.6	0.6329114	34	0.480322337072879	34	0.519677662927121	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.5	0.6329114	49	0.439965900541308	50	0.559878337892143	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.4	0.6329114	38	0.380398422918928	38	0.619601577081072	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.3	0.6329114	55	0.319950098221346	56	0.679898411184835	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.2	0.6329114	84	0.239960190368134	95	0.759946058823571	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.1	0.6329114	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.01	0.6329114	17	0.0101826789457349	17	0.989817321054265	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.005	0.6329114	22	0.0093958595875875	23	0.989913418765759	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.0001	0.6329114	15	0.0091589857895985	15	0.992559857585755	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.00001	0.6329114	31	0.0094849589575944	32	0.994768794694361	42	0.130421752693059	42	0.869578247306941
0.9	0.09009009	46	0.900671608271374	46	0.0993283917286262	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.8	0.09009009	51	0.890286575881380	51	0.109713424118620	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.7	0.09009009	62	0.880127017400299	62	0.119872982599701	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.6	0.09009009	65	0.860503076981335	65	0.139496923018664	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.5	0.09009009	79	0.839953992061431	80	0.159610860615709	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.4	0.09009009	99	0.810246240683640	99	0.189753759316360	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.3	0.09009009	113	0.760129935699876	113	0.239870064300125	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.2	0.09009009	147	0.680067179122090	147	0.319932820877911	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.1	0.09009009	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.01	0.09009009	231	0.0900291322429111	232	0.909871970151970	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.005	0.09009009	315	0.0499641280630056	319	0.949937720442396	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.0001	0.09009009	326	0.0041675464848488	331	0.953505859765786	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.00001	0.09009009	347	0.0038474663604890	348	0.96374679816476 7	234	0.520054752613487	234	0.479945247386513
0.9	0.07092199	49	0.920068379616718	49	0.0799316203832819	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.8	0.07092199	53	0.910525763111324	53	0.0894742368886765	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.7	0.07092199	60	0.900015854270661	61	0.0993683470699277	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.6	0.07092199	78	0.890035166987520	79	0.109679249553005	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.5	0.07092199	87	0.870194942724631	87	0.129805057275369	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.4	0.07092199	95	0.840279700987648	95	0.159720299012353	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.3	0.07092199	121	0.800125717480199	119	0.199874282519801	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.2	0.07092199	165	0.730055147067893	165	0.269944852932106	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.1	0.07092199	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.01	0.07092199	436	0.119970420620744	439	0.879942759303493	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827



Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.005	0.07092199	318	0.0599769531500695	320	0.939934099716205	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.0001	0.07092199	421	0.0543686496846321	419	0.946487648768766	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.00001	0.07092199	487	0.0519848474675985	485	0.951590875758037	276	0.579954623858775	278	0.419872267976827
0.9	0.09174312	47	0.900057421095000	47	0.0999425789050004	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.8	0.09174312	53	0.890145303194595	53	0.109854696805405	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.7	0.09174312	66	0.879975159824627	67	0.119696268031578	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.6	0.09174312	68	0.860255536624750	68	0.139744463375251	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.5	0.09174312	86	0.840228463162501	86	0.159771536837498	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.4	0.09174312	110	0.810096109032934	110	0.189903890967066	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.3	0.09174312	123	0.759963267409163	124	0.239807770736863	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.2	0.09174312	164	0.680038489472649	165	0.319801165591235	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.1	0.09174312	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.01	0.09174312	243	0.0900129387875418	244	0.909902880935719	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.005	0.09174312	439	0.0509518982308846	357	0.949939794906686	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.0001	0.09174312	511	0.0391509175087135	479	0.951548994878599	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.00001	0.09174312	566	0.0355865978290840	516	0.957240857845875	301	0.519964961726384	304	0.479946665839198
0.9	0.04878049	49	0.940660784409991	49	0.0593392155900091	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.8	0.04878049	68	0.940054812452822	68	0.0599451875471786	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.7	0.04878049	69	0.930151504771416	69	0.0698484952285839	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.6	0.04878049	80	0.920191990996595	80	0.0798080090034047	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.5	0.04878049	79	0.899952149468950	80	0.0994354686872625	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.4	0.04878049	143	0.889990996851220	145	0.109893767412950	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.3	0.04878049	126	0.849969332524797	127	0.149675939503500	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.2	0.04878049	212	0.799971093678735	213	0.199930626388389	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.1	0.04878049	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.01	0.04878049	479	0.159963720987405	481	0.839917179261853	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.005	0.04878049	366	0.0799828922434751	643	0.909945611491163	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.0001	0.04878049	516	0.0648596739856958	518	0.924956748590745	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.00001	0.04878049	537	0.0614387091586755	583	0.931058583490457	384	0.669972783911673	387	0.329932305999073
0.9	0.04830918	48	0.940275653643408	48	0.0597243463565918	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179

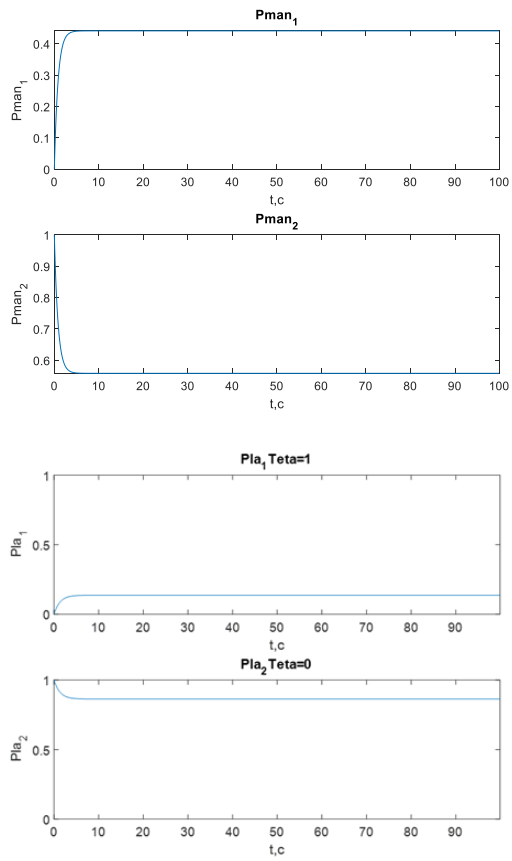
Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.8	0.04830918	66	0.940086719956210	66	0.0599132800437901	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.7	0.04830918	68	0.930339150836769	68	0.0696608491632315	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.6	0.04830918	78	0.920176607244969	78	0.079823392755030	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.5	0.04830918	111	0.910049297139160	112	0.0898495412482344	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.4	0.04830918	132	0.890048592418254	133	0.109853103044464	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.3	0.04830918	184	0.859992813857919	186	0.139917454910505	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.2	0.04830918	200	0.800040645923634	201	0.199825097751963	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.1	0.04830918	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.01	0.04830918	806	0.169951597855842	818	0.829943495115714	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.005	0.04830918	359	0.0799531965932566	604	0.909943250120344	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.0001	0.04830918	476	0.0726576875895906	473	0.914468476576480	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.00001	0.04830918	587	0.0694602760286761	593	0.918548759583676	340	0.670011265393955	341	0.329925616742179
0.9	0.04504505	62	0.950102731570566	62	0.0498972684294341	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.8	0.04504505	57	0.939950462853758	58	0.0594795857342196	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.7	0.04504505	61	0.930517021778024	61	0.930517021778024	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.6	0.04504505	69	0.920181469404032	69	0.0798185305959677	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.5	0.04504505	87	0.909955026510211	88	0.0896416217819902	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.4	0.04504505	103	0.890136180415120	103	0.109863819584879	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.3	0.04504505	130	0.860075461747741	130	0.139924538252260	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.2	0.04504505	198	0.810022391966953	199	0.189826805787113	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.1	0.04504505	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.01	0.04504505	846	0.179956743350947	857	0.819942364828205	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.005	0.04504505	461	0.0899714658943148	463	0.909929308318348	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.0001	0.04504505	583	0.0693589407584085	578	0.935340897603098	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.00001	0.04504505	638	0.0632689670698696	646	0.941580476048976	295	0.680044554440895	296	0.319819155199216
0.9	0.05780347	47	0.930496884248136	47	0.0695031157518643	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.8	0.05780347	67	0.930108220769702	67	0.0698917792302982	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.7	0.05780347	71	0.920008659275603	72	0.0797099161673079	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.6	0.05780347	90	0.909988494342841	91	0.0898708645810383	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.5	0.05780347	88	0.890293903689324	88	0.109706096310675	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610

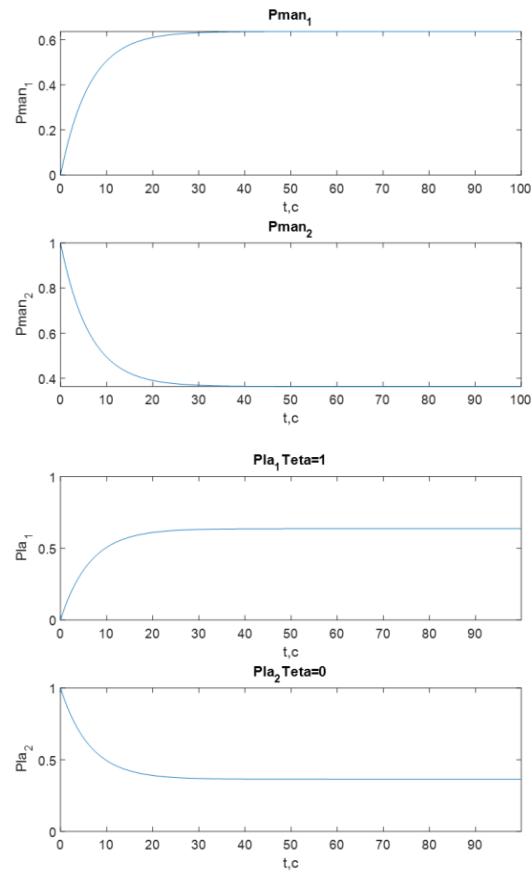
*Закінчення таблиці 3.3*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.4	0.05780347	118	0.870104593816747	118	0.129895406183253	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.3	0.05780347	128	0.830248876795024	128	0.169751123204976	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.2	0.05780347	189	0.770066856922348	189	0.229933143077652	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.1	0.05780347	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.01	0.05780347	439	0.139993186662048	441	0.859905562529830	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.005	0.05780347	336	0.0699665783485049	338	0.929912630931010	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.0001	0.05780347	465	0.0629509864096940	470	0.931586907608976	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610
0.00001	0.05780347	496	0.0581309518735096	497	0.939508974187694	324	0.629979051597416	326	0.369904450971610

$\lambda=0.005$



$\lambda=0.01$



$\lambda=0.1$

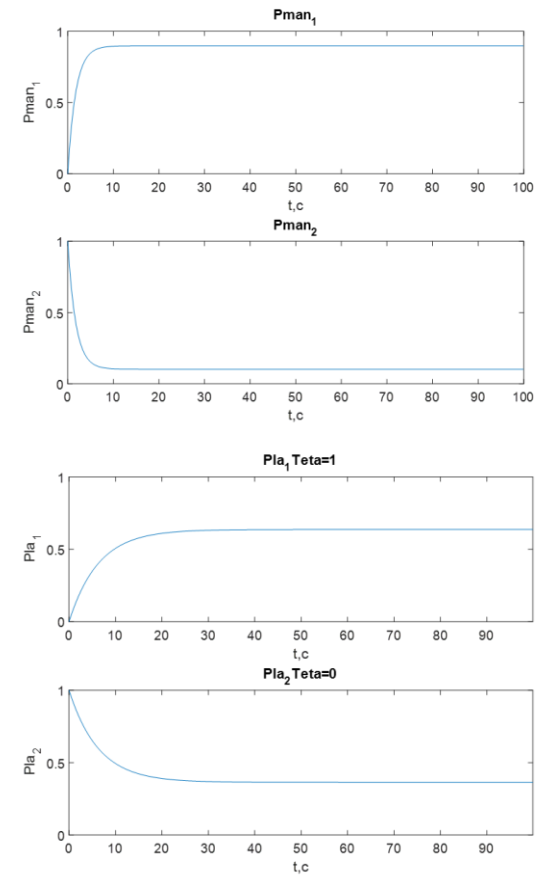


Рис. 3.7 Приклади, побудованих графіків перехідних процесів імовірностей системи «пілот-літак»

### **Висновки до 3 розділу**

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

2. В роботі було підтверджено гіпотезу про те, що модель ергатичної системи пілот-літак повинна мати в своєму складі зв'язок між складовою моделі Л-О та складовою моделі ЛА у вигляді інтенсивностей переходу із стану в стан, що характеризує реакцію пілота на зміну стану ЛА, та зв'язок, що характеризує реакцію ЛА на управляючий сигнал пілота.

3. З метою верифікації розробленої моделі було проведено широке моделювання при різних початкових умовах, та різних польотних ситуацій.

4. Результати широкого моделювання «Моделі діяльності людини-оператора як системи масового обслуговування» («Модель ЛО як СМО») показали, що параметри отримані за моделлю, відповідають параметрам польота, отриманих з системи реєстрації параметрів літака на режимі заходу на посадку.

#### Список публікацій здобувача за матеріалами третього розділу

1. 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.

2. Błahaia L. V. Model of Side-looking Airborne Radar Controller Activity. Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC): 2016 IEEE 4rd International Conference, October 17–19, 2016. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2016. P. 63–66.

3. 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 2012 р.: тези доп. К., 2012. С. 9.

4. 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.

5. Благая Л. В. Анализ оптимальной аналитической модели человека-оператора. АВІА–2015: XII міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2015. С. 7.78–7.82.

6. 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.

## РОЗДІЛ 4

### ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА – ПІЛОТА В КОНТУРІ «ПІЛОТ-ЛІТАК» ЗА ДОПОМОГОЮ УЗАГАЛЬНЕНОЇ РОБОЧОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### 4.1 Узагальнена робоча характеристика людини-оператора в контурі «пілот-літак»

Трудова діяльність людини в системах управління включає складні рухові процеси, процеси, пов'язані з розумовими актами з пізнання та оцінювання ситуацій, прийняття рішення з керування. Оскільки людина є ланкою системи, оскільки дослідження систем з людиною в контурі управління повинно здійснюватися як єдине ціле. Іншими словами, опис ланок системи (для аналізу і синтезу їх в цілому) має описуватися на одній формальній мові.

Отримати математичну модель Л-О при роботі його в контурі технічної ЕС надзвичайно складно навіть для окремих завдань (приклад пілот-літак). Це пояснюється неадекватністю поведінки людини при однакових умовах, залежністю його характеристик від часу і безлічі психологічних факторів, врахувати які не завжди є можливим.

В ергатичних система Л-О є невід'ємною частиною замкненої системи керування. Для аналізу та синтезу таких систем з наперед заданими властивостями необхідно мати дані про характеристики Л-О як ланки такої замкненої системи керування.

Якщо є система, яка має об'єкт з пристроєм керування та яка досліджується в класі деякої математичної моделі  $M_i$ :

$$M_i = \langle A_i, P_i, y_i = f_i(x_i) \rangle, \quad (4.1)$$

Тоді, для того щоб було можливим розглядати людину-оператора як невід'ємну частину всієї системи, на нього повинна розповсюджуватися дія математичної моделі  $M_i$  (4.1), тобто опис Л-О як ланки системи управління повинен надаватися в класі математичних моделей, які не знаходяться в

протиріччі і які сумісні з математичною моделлю всієї системи. Основу для єдиного функціонального опису складових частин системи і Л-О в тому числі складає математична модель всієї системи. В першу чергу вибір  $M_i$  залежить від мети дослідження. Далі залежить від складу елементів, що комплектують систему, і необхідного ступеня деталізації їх математичних моделей.

Таким чином, коли обрана математична модель системи (4.1), то тим самим задається базис системи  $A_i, P_i$ , над яким визначено відношення  $y = f(x)$ , тобто визначено базис множин  $X, Y$  та мова описання співвідношень  $y = f(x)$ , яка використовується для опису математичної моделі  $M_i$ . Даний базис і слугує основою для опису Л-О як ланки системи керування «індикаторний пристрій – Л-О – пристрій зв'язку людини-оператора з машиною». При такому підході Л-О розглядають разом з тими пристроями, які перекоднують (перекладають) інформацію з мови математичної моделі  $M_i$  на мову, «зрозумілу» людині-оператору, і навпаки, з «людської мови» на мову всієї системи  $M_i$ .

Таким чином, на Л-О, працюючого в системі, яка описується математичною моделлю  $M_i$ , мають поширюватися всі правила описання відношень між входом та виходом Л-О, які притаманні даній моделі. Цим і визначені вимоги до опису Л-О, які продиктовані принципом функціонального єднання замкненої системи керування.

Людина, як і все живе в світі, існує не абстрактною, а в часі і в просторі. І цей тісний зв'язок Л-О з часом і простором має враховуватися при створенні математичної моделі Л-О, яка в свою чергу не суперечить моделі  $M_i$ . Існування (функціонування) Л-О як ланки замкненої системи керування має співвідноситися до вектору незалежних змінних  $\tau = (t, \beta_1, \dots, \beta_n)$ , що розглядається в деякому просторі  $T \cap B$ . Де  $t$  – час,  $\beta$  – незалежні змінні в просторі  $B$ .

Зв'язок описання відношень між входом та виходом Л-О на мові математичної моделі  $M_i$  з вектором  $\tau$  є основною характерною рисою Л-О як



елемента системи  $M_i$ . При цьому головним є саме зв'язок опису зовнішньої поведінки людини в системі з параметрами простору і часу. Формалізація цього зв'язку і є основною характеристикою Л-О як ланки замкненої системи керування.

На мові основної математичної моделі  $M_i$  для системи, що представлена вище, означає, що операторська діяльність Л-О в першу чергу характеризується на тій самій мові  $M_i$  оператором відношень  $Q_{л-о}$ , що здійснюється людиною як ланкою даної системи, між індикаторними змінними  $x_i$  та вихідними змінними  $x_{л-о}$ , які вводяться Л-О в систему:

$$x_{л-о} = Q_{л-о}x_i, \quad (4.2)$$

Другою важливою характеристикою операторської діяльності є характеристика властивостей індикаторного сигналу  $x_i$ , який пред'явлений Л-О. На мові математичної моделі  $M_i$  його теж можливо описати оператором відношень  $R_{л-о}$  між деяким опорним для всіх систем сигналом  $\psi_{оп}$  та індикаторним сигналом  $x_i$ :

$$x_i = R_{л-о}\psi_{оп}, \quad (4.3)$$

Так як оператори  $R_{л-о}, Q_{л-о}$  характеризують операторську діяльність людини-оператора, то вони, по своїй суті, в загальному випадку є просторово-динамічними операторами.

Третьою характеристикою операторської діяльності людини-оператора є допустима математичною моделлю  $M_i$  точність  $\varepsilon$  виконання відносин  $Q_{л-о}$  над сигналом  $x_i$ , що характеризується оператором  $R_{л-о}$ . Фактично це основна кваліфікаційна характеристика людини. Таким чином, точнісний параметр  $\varepsilon$  разом з операторами відношень  $R_{л-о}, Q_{л-о}$  є основною характеристикою операторської діяльності Л-О.

Таким чином, до людини-оператора як елемента замкненої цілеспрямованої системи висуваються вимоги здійснювати операторську діяльність, яка характеризується трійкою:

$$\langle R_{L-O}, Q_{L-O}, \varepsilon \rangle, \quad (4.4)$$

Людина-оператор, як живий організм, існує в часі і просторі і його операторська діяльність, що визначається цією трійкою, також пов'язана з часом і простором, на яких і можливе здійснення «операторського життя» Л-О як ланки замкненої системи і яке визначається поняттям узагальненої робочої характеристики людини. Вона співвідносить час і простір існування «операторського життя»  $\langle R_{L-O}, Q_{L-O}, \varepsilon \rangle$  з кожною точкою  $\langle R_{L-O}, Q_{L-O}, \varepsilon \rangle$  функціональних просторів  $(M_{R_{L-O}}, M_{Q_{L-O}}, M_{\varepsilon})$  математичної моделі  $M_i$ .

Квазістійким функціональним станом людини-оператора в області  $D$  простору  $T \cap B$  незалежних змінних  $\tau = (t, \beta_1, \dots, \beta_n)$  називають такий його стан при роботі в замкненій системі керування при фіксованих значеннях оператора відношення  $R_{L-O}$ ,  $\varepsilon$  та фіксованій інструкції, що регламентує роботу Л-О, при якому стає можливим скласти єдиний для всіх під областей  $D_i \subseteq D$  оператор відношень  $Q_{L-O}$ , що пов'язує сигнали  $x_{L-O}$  та  $x_i$  з точністю  $\varepsilon$ . При цьому  $Q_{L-O}$  називають квазіоператором функціональних перетворень, що виконуються Л-О в замкненій системі керування.

Параметр  $\tau$ , що визначає область існування квазіоператора  $Q_{L-O}$ , є  $(n+1)$ -компонентною випадковою величиною. Повною характеристикою системи  $(n+1)$  випадкових величин  $t, \beta_1, \dots, \beta_n$  слугує закон щільності розподілу ймовірності  $f(t, \beta_1, \dots, \beta_n)$ . Однак у зв'язку з великою складністю отримання такої повної вичерпної характеристики, якою є закон щільності розподілу системи випадкових величин, можливо обмежитися лише його числовими характеристиками. Це є можливим, якщо відомий приблизний тип закону розподілу. Тому можливо з високим ступенем достовірності зазначити, що система випадкових величин  $\tau$  підпорядкована закону, близькому до нормального.

Тоді мінімальне число характеристик, за допомогою яких може бути охарактеризована система  $(n+1)$  випадкових величин  $(t, \beta_1, \dots, \beta_n)$ , визначається математичними очікуваннями  $m_t, m_{\beta_1}, \dots, m_{\beta_n}$ , що характеризують середні значення параметра часу  $t$  та просторових параметрів  $\beta$ , що задають середню тривалість операторського життя Л-О в системі;  $(n+1)$  дисперсія цих же параметрів  $D_i, i = 1, \dots, n+1$ ;  $(n+1)n$  кореляційними моментами  $k_{ij}, i \neq j; i, j = 1, \dots, n+1$ , які характеризують попарну кореляцію всіх параметрів  $t, \beta_1, \dots, \beta_n$ .

Всі числові характеристики дисперсії та кореляційних моментів представлені у вигляді кореляційної матриці

$$\|k_{ij}\| = \begin{vmatrix} k_{11} & & k_{1(n+1)} \\ & k_{22} & \\ k_{(n+1)1} & & k_{(n+1)(n+1)} \end{vmatrix} \quad (4.5)$$

У випадку, якщо випадкові величини  $t, \beta, \dots$  не корельовано, всі елементи кореляційної матриці, окрім діагональних, дорівнюють нулю:

$$\|k_{ij}\| = \begin{vmatrix} D_1 & & 0 \\ & D_2 & \\ 0 & & D_{(n+1)} \end{vmatrix} \quad (4.6)$$

Таким чином, кожному конкретному типу і складу операторської діяльності  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  співставленні повністю визначений закон ймовірності розподілу  $f(t, \beta)$  або повністю визначений набір числових характеристик  $\langle m, \|k_{ij}\| \rangle$  випадкових величин  $(t, \beta_1, \dots, \beta_n)$ . Тоді якщо задати множину  $M_m \cap M_k$  значень математичних очікувань та кореляційних моментів, то можливо дати визначення узагальненої робочої характеристики людини-оператора.

Узагальненою робочою характеристикою Л-О як ланки системи керування називають оператор  $W^i$  відображення точок простору  $(M_R \cap M_Q \cap M_\varepsilon)$  в точки простору  $(M_m \cap M_k)$ .

Для  $W$  має обиратися відповідна математична модель з базисом, що не суперечить базису математичної моделі ергатичної системи. Дане зауваження автоматично виконується в силу використання  $M_R, M_Q, M_\varepsilon$ . Зрозуміло, що оператор відображення  $W$  може бути практично задано у вигляді функцій, таблиць, графіків, описів та ін..

Індекс  $i$  оператора  $W^i$  УРХ відображає той факт, що УРХ відноситься до класу прескриптивних систем, для яких  $M_i$  є основною математичною моделлю.

Відповідно, для кожного типу математичних систем мають бути свої УРХ Л-О:

$$(m, \|k_{ij}\|) = W^i(R_{Л-О}, Q_{Л-О}, \varepsilon) \quad (4.7)$$

Навіть в одному класі математичних моделей  $M_i$  оператор відображення  $W^i$  суттєво залежить від інформаційної панелі та панелі вводу керуючих впливів, з якими безпосередньо взаємодіє Л-О. Іншими словами, УРХ Л-О порівнюються не лише конкретним математичним моделям, а і конкретним панелям керування.

Узагальнена робоча характеристика Л-О по своїй суті являється універсальною – якщо робота, яку необхідно виконати людині-оператору, визначається трійкою  $\langle R_{Л-О}, Q_{Л-О}, \varepsilon \rangle$ , то узагальнена робоча характеристика може вказати на середньо очікувану можливу область  $z$  простору  $D$  незалежних змінних  $t$  та її дисперсійні границі, в середині яких людина принципово може виконувати роботу  $\langle R_{Л-О}, Q_{Л-О}, \varepsilon \rangle$  (рис. 4.1).

Звичайно, що розмір області може служити деякою мірою, яка характеризує складність та важкість даного складу операторської діяльності для людини-оператора. І дійсно, чим складніша робота, тим менше часу на меншому просторі  $\beta$  він може виконувати її безпомилково. Легку роботу безпомилково можна виконувати дуже довго й на великому просторі.

Узагальнена робоча характеристика саме й вказує на розмір області  $z$  й можливі випадкові її варіації.

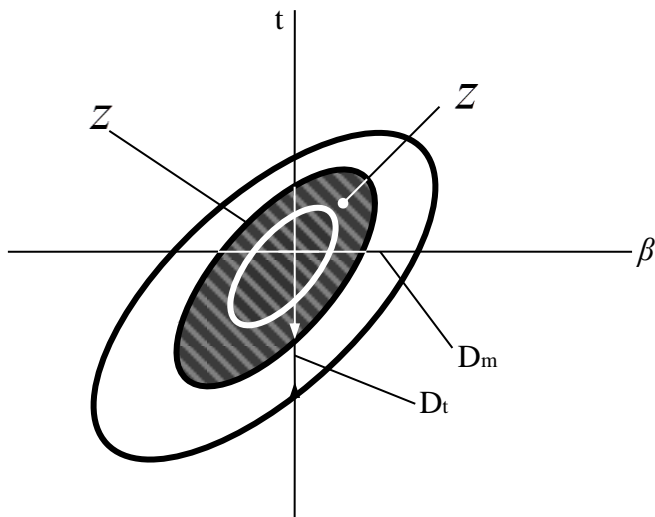


Рис. 4.1 Дисперсійні границі  
 можливості виконання Л-О  
 роботи  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$

У першому наближенні часто лише достатньо оцінити розмір тільки області  $z$ . Оскільки  $z$  представляє собою лінійну множину, то характеристикою, що відображає його «протяжність» та узагальнені питання довжини, може служити звичайне поняття *міри по Лебегу* лінійної множини.

Визначенням міри по Лебегу для множини  $z$  слугує вираз  $mz$ . Тоді можна стверджувати, що якщо мається дві складові операторської діяльності Л-О  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon_1 \rangle$  та  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon_2 \rangle$  яким відповідні дві різні величини  $mz_1$  та  $mz_2$  такі, що

$$mz_1 > mz_2, \tag{4.8}$$

то це означає, що операторська діяльність  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon_1 \rangle$  краща для Л-О, ніж робота  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon_2 \rangle$  (рис. 4.2).

Таким чином, величина, протилежна мірі області  $mz$ , слугує мірою *важкості* операторської діяльності, якій відповідна дана область  $z$ . Тоді, якщо постулювати визначення, що чим складніша робота, тим вона й напруженіша, то величина, обернена мірі області  $z$ , є мірою напруженості роботи людини-оператора.

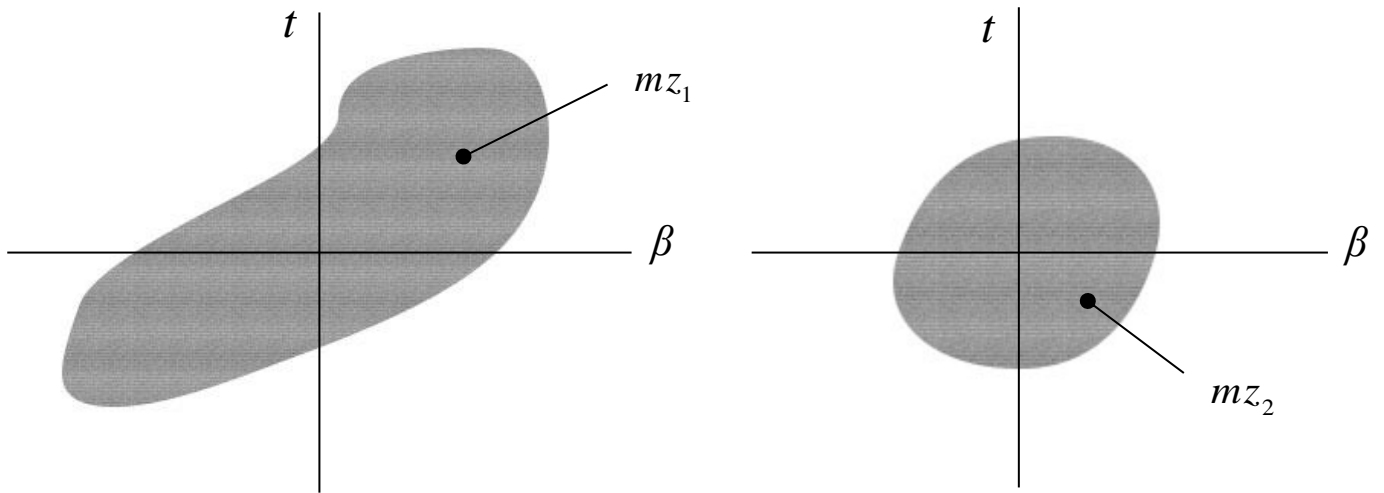


Рис.4.2 Графік порівняння різних типів операторської діяльності відповідно до складності

*Напруженість роботи людини-оператора (N), виконуючого операторську діяльність  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$ , будемо розуміти як міру складності в виконанні ним функціональних перетворювань  $Q_{л-о}$  з точністю  $\varepsilon$  над індикаторним сигналом, характеризуючим оператором  $R_{л-о}$  й оцінювати величини, оберненої міри по Лебегу області  $z$ :*

$$N = \frac{1}{mz}, \quad (4.9)$$

Таким чином, міра N напруженості операторської діяльності Л-О і є тою мірою «дії» людини-оператора в системі управління, яку він відповідно принципу найменшої взаємодії спрямовує мінімізувати в процесі своєї діяльності. При цьому при визначенні складу операторської діяльності  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  опорний сигнал  $\psi_{оп}$ , необхідний для визначення  $R_{л-о}$ , для кожного типу математичної моделі є незмінним і обирається один раз і назавжди.

В іншому випадку один і той же індикаторний сигнал мав би різне математичне уявлення.

Якщо узагальнені робочі характеристики Л-О яким-небудь чином вже побудовані, то це дозволяє отримати практично важливі дані про властивості різних по своєму складу операторських дій людини-оператора.

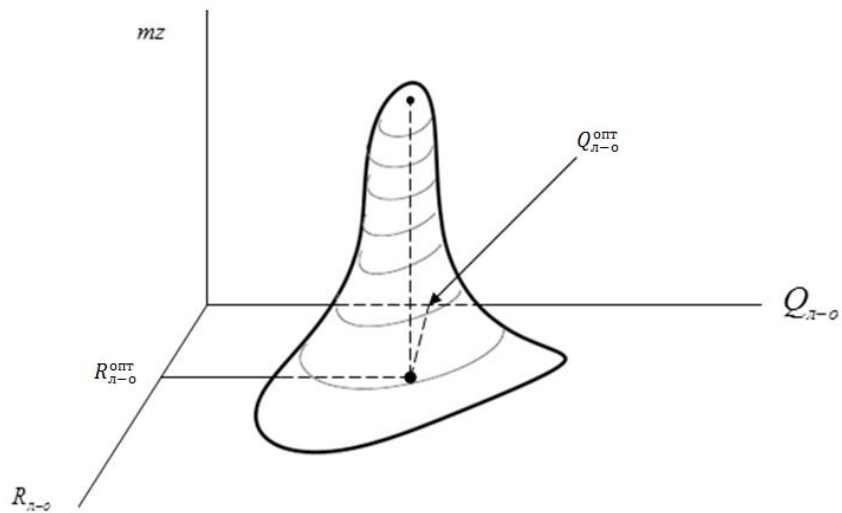


Рис. 4.3 УРХ оптимальної QR-характеристики

При наявності такої узагальненої характеристики, яка відносно показана на рис. 4.3, її зріз  $mzi = const$  повністю дає спектр рівноцінно складних з точки зору Л-О складових його операторської діяльності ( рис. 4.4, а –  $\varepsilon = const$ , б –  $R_{л-о} = const$ ).

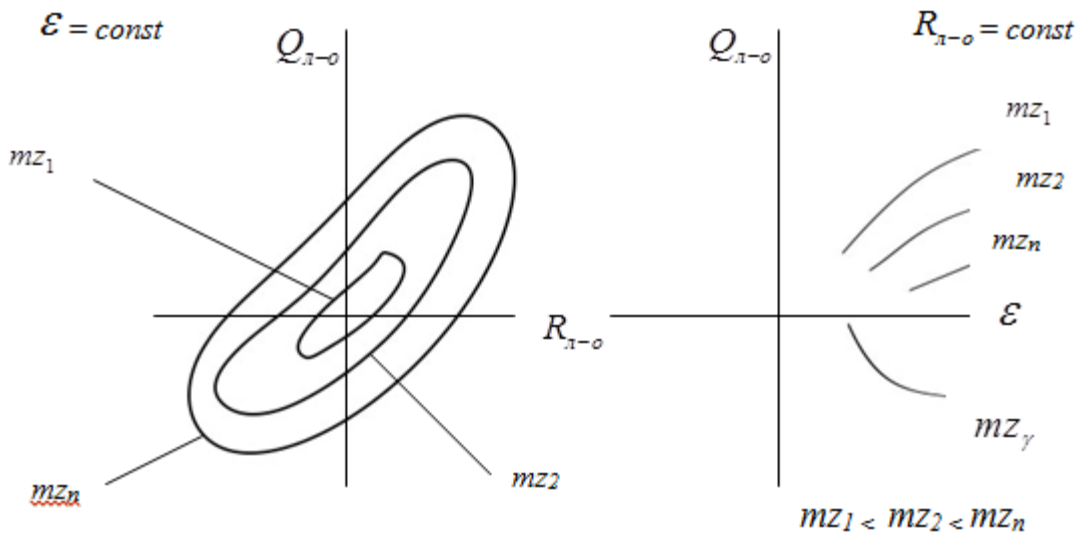


Рис.4.4 Зріз складових операторської діяльності Л-О

Узагальнена робоча характеристика задає також оптимальний спектр, що відповідає мінімальній нарузі роботи людини-оператора – це можуть бути локальні або глобальні оптимуми і мається лише єдиний оптимальний склад операторської діяльності  $R_{л-о}^{опт}$  та  $Q_{л-о}^{опт}$ .

Універсальність узагальненої робочої характеристики проявляється також у тому, що вона дозволяє оцінити надійність виконання людиною відповідної йому діяльності  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  в замкнутій системі управління.

Надійність функціонування людини-оператора в системі управління визначається, *по-перше*, складом операторської діяльності  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  і, *по-друге*, обмежена часом  $t^*$  і довжиною  $\beta^*$  існування операторської діяльності  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  (рис.4.5).

Звідси надійність виконання людиною операторської діяльності  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  в замкнутій системі управління - це імовірність існування «квазістійкого» функціонального стану людини-оператора, що характеризується квазіоператором  $Q_{л-о}$  функціональних перетворень протягом часу  $t$  не менше  $t^*$  й на просторі «довжиною» не менше  $\beta^*$ .

Визначений вище тип надійності являється *основним*. Однак можна дати й більш уточнений тип поняття надійності виконання людиною операторської діяльності, як імовірність існування квазіоператора функціональних перетворювань  $Q_{л-о}$  в деякій обмеженій області  $D$  простору незалежних змінних  $(t, \beta)$ . Даний тип надійності функціонування людини-оператора фактично визначає ступінь використання операторських здібностей Л-О і називається жорсткою надійністю.

Виходячи з теорії випадкових процесів визначення межі випадку жорсткої надійності функціонування людини-оператора на області  $D$ , яка представляє собою точку  $t^*, \beta^*$ , означає можливість того, що людина-оператора може виконувати роботу безпомилково точно в проміжок часу  $t^*$  й на просторі  $\beta^*$  (не більше, не менше), тобто фактично працювати як автомат, як машина, розрахована точно на  $t^*$  і  $\beta^*$ . Із теорії імовірності відомо, що ймовірність такої події для випадкових величин дорівнює 0. Це означає, що все ж таки цей випадок, тобто така діяльність людини-оператора можлива, однак імовірність її дорівнює нулю. По визначенню випадкових величин із того, що подія  $t = t^*$  має ймовірність,



що дорівнює нулю, слід зазначити, що частота прояву такого типу операторської діяльності дорівнює нулю.

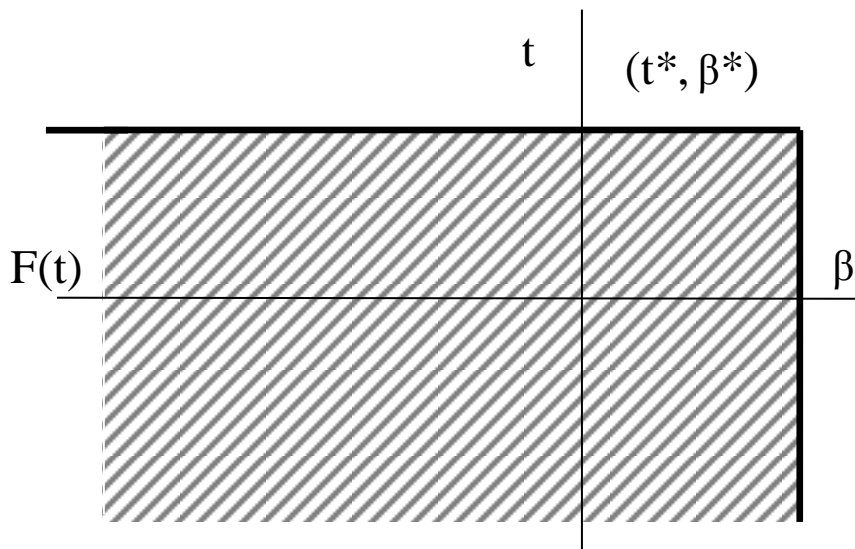


Рис.4.5 Графік імовірність існування «квазістійкого» функціонального стану людини-оператора

Це дозволяє зробити майже тривіальний висновок: людина не може працювати, як автомат, як машина.

В загальному випадку квазілінійна модель операторської діяльності при виконанні сенсомоторного слідування у вигляді передатної функції має наступний вигляд:

$$W_{л-о}(p) = e^{-\tau p} \frac{k(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}, \quad (4.10)$$

де  $\frac{k(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)}$  – оператор, що «характеризує» адаптивні властивості Л-О;

$e^{-\tau p}$  – оператор внутрішніх «затримок» реакції Л-О;

$\frac{1}{(T_3 p + 1)}$  – оператор, що «описує» властивості нервово-м'язової системи Л-О.

Дана модель дозволяє достовірно описати закон перетворення сигналів Л-О в ЕС:

$$y = W_{л-о}(p)u + n(t), \quad (4.11)$$

де  $y$  – математичний опис керуючих дій Л-О, які він виробляє в результаті цілеспрямованої обробки інформації. Функція  $n(t)$  є випадковою і називається «ремнантною». Амплітуда та характеристики ремнанти  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$  залежать від вхідного сигналу.

Передатна функція  $W_{л-о}(p)$  Л-О різна для різних об'єктів керування  $W(p)$ , а також для різних видів вхідного сигналу  $u(t)$ . Помилка сенсомоторного слідкування, ремнанта  $n(t)$  та передатна функція  $W_{л-о}(p)$ , яка описує модель сенсомоторної діяльності, функціонально залежать як від властивостей об'єкта керування, так і від властивостей сигналу  $u(t)$ , який обробляється людиною. Цю залежність відображають узагальненою математичною моделлю. Складовими моделі є оператори:

$$\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle, \quad (4.12)$$

де  $Q_{л-о}$  – передатна функція Л-О, яка є описанням діяльності Л-О з точністю  $\varepsilon$  інформації, яка описана оператором  $R_{л-о}$ , при керуючому впливі. При цьому в системному сенсі точність  $\varepsilon$  «поглинає» ремнанту  $n(t)$ :  $\varepsilon \geq n(t)$ .

Стійкий функціональний стан Л-О це такий стан при якому на деякому інтервалі часу  $m(\tau) = f_m(R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon)$ , при якому при фіксованих  $R_{л-о}$  та  $\varepsilon$  Л-О зберігає можливість виконувати передбачувані йому в ЕС дії  $Q_{л-о}$  на будь-якому інтервалі часу  $t$ . При цьому оператор  $Q_{л-о}$  називають оператором функціональних перетворень, які виконує Л-О над інформацією  $R_{л-о}$ . Тоді УРХ операторської діяльності Л-О в ЕС називається оператор відношень  $N(R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon, \xi) = \frac{K_N(\xi)}{[m(\tau)]}$  в  $t$ , тобто функції  $t = f(R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon)$ .

Час існування стійкого функціонального стану Л-О є випадковою величиною в зв'язку з психологічними властивостями людини. В багатьох ЕС ця випадкова величина підпорядкована нормальному закону, що дозволяє

характеризувати її за допомогою: математичного очікування  $m(\tau)$  та дисперсії  $D(\tau)$ :

$$m(\tau) = f_m(R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon) \quad (4.13)$$

$$D(\tau) = f_D(R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon) \quad (4.14)$$

В цих операторах відображені системні характеристики операторської діяльності: напруженість, складність, надійність.

УРХ дає інформацію про середню тривалість інтервалу існування стійкого функціонального стану Л-О, який виконує доцільну діяльність в ЕС. Чим меншою є напруженість діяльності людини, тим більш тривалий час Л-О може безпомилково виконувати її, тобто тим більше  $m(t)$ , що характеризує інтервал існування стійкого функціонального стану Л-О, який виконує визначену операторську діяльність  $\langle R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon \rangle$ . Тоді для одного і того ж типу робочого місця Л-О, яке має однакові засоби відображення інформації, менш напруженою буде та операторська діяльність, у якої  $m(t)$ , більше. Це дозволяє відтворювати напруженість у вигляді:

$$N(R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon, \xi) = \frac{K_N(\xi)}{[m(t)]}, \quad (4.15)$$

де  $K_N(\xi)$  – характеристика робочого місця оператора;  $\xi$  – параметри робочого місця.

Складність операторської діяльності є обернено пропорційною часу безпомилкового її виконання в замкненій ЕС і може бути описана за допомогою формули:

$$S(R_{л-о}, Q_{л-о}, \varepsilon, \xi) = \frac{K_S(\xi)}{[m(t)]} \quad (4.16)$$

Надійність операторської діяльності безпосередньо буде отримано з УРХ при фіксації потрібної тривалості виконання операторської діяльності  $t_{пот}$  як ймовірність того, що час існування стійкого стану Л-О буде не меншим  $t_{пот}$ :

$$p_{л-о}^{\xi} = p(t \geq t_{пот}) \quad (4.17)$$

## 4.2 Дослідження функціональних можливостей Л-О

Праця Л-О в системі УПР протікає на тлі підвищеного ризику для життя і великої особистої відповідальності за якість і безпеку польоту, при цьому організм піддається несприятливому впливу комплексу факторів польоту. Льотна діяльність неможлива без наявності у Л-О професійно-значущих психічних, фізіологічних і фізичних якостей [26]. Експлуатація сучасних високоманеврових літальних апаратів вимагає істотних нервово – психічних витрат, які перевищують психофізіологічні можливості людини. Таким чином, для виконання своїх обов'язків Л-О необхідна постійна увага медичної служби та посадових осіб до питань профілактики захворювань і функціональних порушень. Рання діагностика втоми і перевтоми, тривожних і домінантних станів, порушень особистісної мотивації, астенизації та інших функціональних розладів, сприяють попередженню більш серйозних порушень в організмі і профілактиці розвитку професійної патології у льотчика [118].

Людський організм являє собою надійну біосоціальну систему, якій притаманні необмежені можливості пристосування до навколишнього середовища [26]. Людина може адаптуватися до значних фізичних навантажень, умов зміненого газового середовища, високій і низькій температурі, підвищеній вологості, зниження та підвищення освітленості. Адаптаційні резерви у загальному вигляді являють собою можливості клітин, органів, систем органів і цілісного організму протистояти впливу різного виду навантажень, адаптуватися до цих навантажень, мінімізуючи їх вплив на організм і забезпечуючи належний рівень ефективності діяльності людини. Виділяються структурні (морфологічні) і функціональні резерви.

Під структурними резервами розуміються особливості будови окремих складових елементів організму (клітин, тканин, органів і систем органів), які проявляються в розвитку і міцності м'язової і кісткової тканини, в особливостях будови міофібрил і м'язових волокон, в міцності зв'язкового і рухливості

суглобового апаратів, в характері васкуляризації скелетних і серцевого м'язів, у розвитку міжнейронних зв'язків, які, в свою чергу, створюють істотний вплив на функціональні можливості організму. Структурними резервами організму виступають парність ряду органів, що забезпечує дуальне заміщення функцій (нирки, легені, вуха, очі, залози внутрішньої секреції). Кожен з цих органів, при виході з ладу свого «напарника», може сам забезпечити нормальне функціонування організму в звичайних умовах, а в ряді випадків і при функціональних навантаженнях. До глибоких і потужних структурних резервів організму відносять резистентність його клітин і тканин до різних внутрішніх змін умов їх функціонування.

Функціональні резерви являють собою можливість зміни функціональної активності структурних елементів організму, їх можливості взаємодії між собою, використовувані організмом для досягнення результату діяльності людини, для адаптації до фізичних, психоемоційних навантажень і впливу на організм різних факторів зовнішнього середовища. Ці можливості виявляються в зміні інтенсивності та швидкості протікання енергетичних і пластичних процесів обміну на клітинному і тканинному рівнях, у зміні інтенсивності та швидкості протікання фізіологічних процесів на рівні органів, систем органів і організму в цілому, у збільшенні фізичних (сила, швидкість, витривалість) і поліпшенні психічних (усвідомлення мети, готовності боротися за її досягнення) якостей, в здатності до вироблення нових і вдосконаленню вже наявних рухових і тактильних навичок.

Функціональні резерви організму включають в себе три відносно самостійних види резервів: біохімічні, фізіологічні та психологічні (психічні). Біохімічні резерви – це можливості збільшення швидкості протікання та обсягу біохімічних процесів, пов'язаних з економічністю та інтенсивністю енергетичного та пластичного обмінів та їх регуляцією.

Фізіологічні резерви являють собою можливості органів і систем органів змінювати свою функціональну активність і взаємодію між собою з метою досягнення оптимального для даних в конкретних умовах рівня функціонування організму та ефективності діяльності.

Психологічні (психічні) резерви можуть бути представлені як можливості психіки, пов'язані з проявом таких якостей, як пам'ять, увага, мислення, емоції, з мотивацією діяльності людини і визначають тактику поведінки та особливості психологічної та соціальної адаптації.

Функціональний стан організму Л-О – це комплекс характеристик, функцій і якостей людини, які прямо або побічно обумовлюють його трудову діяльність, це фоновая активність нервової системи, в умовах якої реалізуються поведінкові акти. Цей стан залежить від особливостей і характеру виконуваної діяльності; значимість мотивів, які спонукають до діяльності; величини сенсорного навантаження; вихідного рівня активності нервової системи; індивідуальних особливостей ЦНС (темпераменту); швидкості і точності рухових реакцій; факторів зовнішнього середовища.

Виділяють три групи функціонального стану організму:

- Нормальний, під яким розуміється стан, що забезпечує успішність виконання завдання з необхідною якістю в заданий час і з ціною діяльності в рамках фізіологічних і психологічних резервів організму;
- Прикордонний, при якому є неузгодженість між якістю і фізіологічною ціною діяльності;
- Патологічний стан, при якому не забезпечується необхідна ефективність роботи, і ціна діяльності перевищує можливості організму.

Актуальними для сьогодення є дослідження особливостей фізіологічного стану пілотів за допомогою таких методик:

- Методики варіаційної кардіоінтервалометрії (компонент нейрофізіологічного моніторингу – включає методи математичного аналізу ритму серця з виявленням

«вартості» адаптації організму) для оцінки функціонального стану вегетативної нервової системи обстежуваної особи за параметрами ритму його серцевої діяльності, а також для оцінки загального функціонального стану Л-О. Тому, аналізуючи ритм серця, можна оцінити якість роботи механізмів пристосування (адаптації) і рівень напруги цих систем, необхідний для збереження гомеостазу в існуючих умовах.;

– Дослідження простої зорово – моторної реакції для експрес-оцінки рівня активації центральної нервової системи (аналізу рівня і стабільності сенсомоторних реакцій людини у відповідь на світлові подразники);

– Дослідження складної зорово – моторної реакції з вибором з двох альтернатив для оцінки рівня операторської працездатності та визначення основних властивостей нервових процесів (сили процесу збудження, сили процесу гальмування, рухливості нервових процесів).

### **4.3 Побудова математичної моделі операторської діяльності людини-оператора**

Завданням математичного опису дій людини є найбільш повна формалізація та врахування в моделі переваг людини. Для системи  $S^{L-O}$  при визначенні інтенсивностей переходу із стану в стан необхідно враховувати інерційність Л-О, яка пояснюється необхідністю узагальнення інформації, яка сприймається людиною в ЗВІ.

#### **4.3.1 Структурно-логічна діяльність людини-оператора**

Проблеми проектування сучасних авіаційних систем керування ЛА є надзвичайно багатоплановими та суттєво залежать від ергономічного аспекта [54], тобто від того, наскільки правильно та безпомилково враховується так званий «людський фактор». Врахування людського фактору стосовно систем «пілот-ЛА» означає застосування сумісності ЛО-пілота з ЛА-літаком з точки зору інформаційного, енергетичного, біотехнічного, просторово-антропометричного та

техніко-естетичного відношення, іншими словами, приведена до співпадіння властивостей ЛА, як об'єкта керування з психофізіологічними можливостями Л-О у всіх умовах експлуатації, включаючи політ при наявності технічних відмов та несприятливих факторів оточуючого середовища.

Аналіз помилкових дій пілота показує, що основні порушення в роботі ЕС «Л-О – ЛА» припадають на його психічну (інтелектуальну) діяльність [46, 50, 51, 53], яка включає в себе процеси, які проходять в центральній нервовій системі і які пов'язані із сприйняттям, обробкою інформації та прийняттям рішення. В основі лежить рефлексна та евристична діяльність мозку, яка в загальному випадку представляє собою реакцію на подразники внутрішнього та зовнішнього середовища. З метою формалізації процесу діяльності пілота при управлінні ЛА розглянемо структуру на рис. 4.6

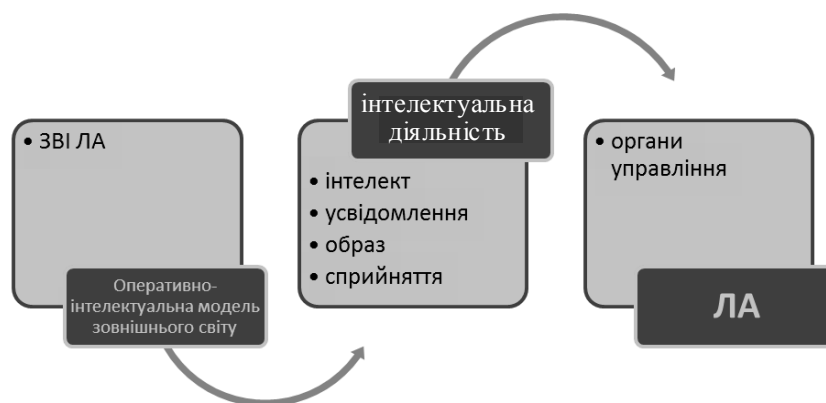


Рис. 4.6 Структура інтелектуальної діяльності пілота при управлінні ЛА

Як свідчить модель нервово-психічної напруженості оператора (рис. 4.7) на кожному з цих рівнів відбувається процес затримки, що й призводить до збільшення загального часу прийняття рішення людиною [94, 101].



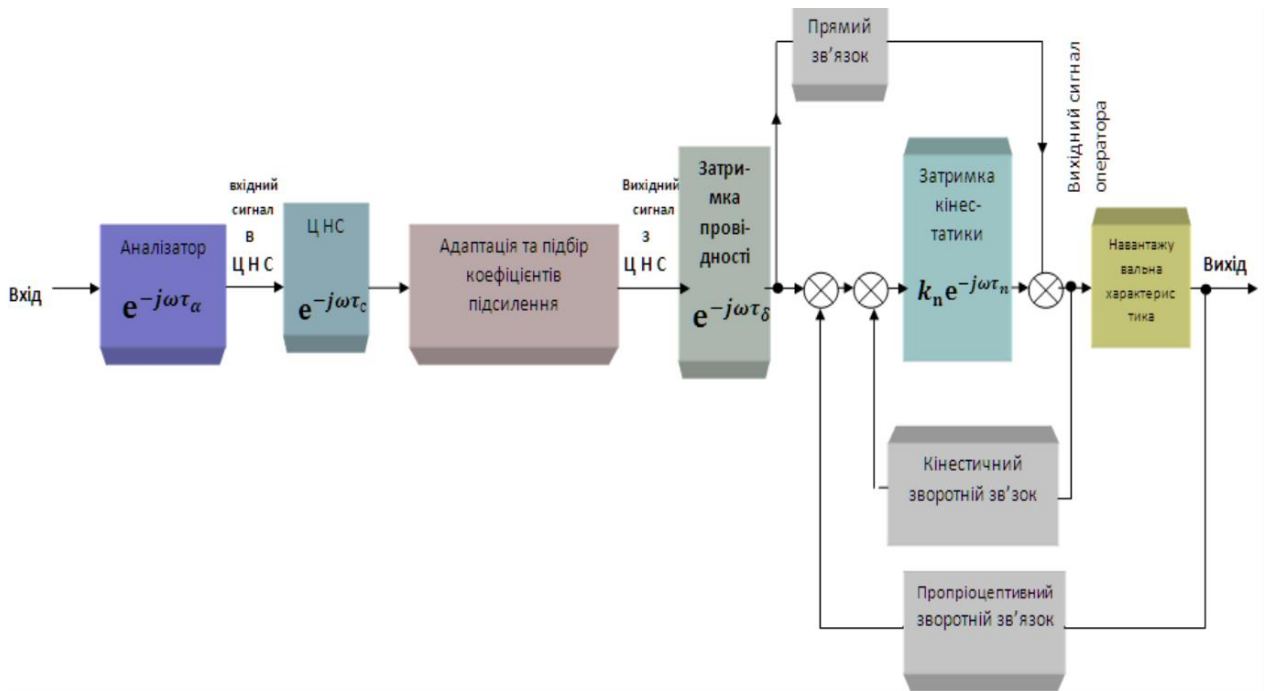


Рис. 4.7 Модель нервово-психічної напруженості оператора  
 Постійні часу:  $0.35c > \tau_\alpha > 0.07c$ ,  $0.11c > \tau_c > 0.05c$ ,  $0.02c > \tau_\delta > 0.05c$ ,  $\tau_n = 0,14c$

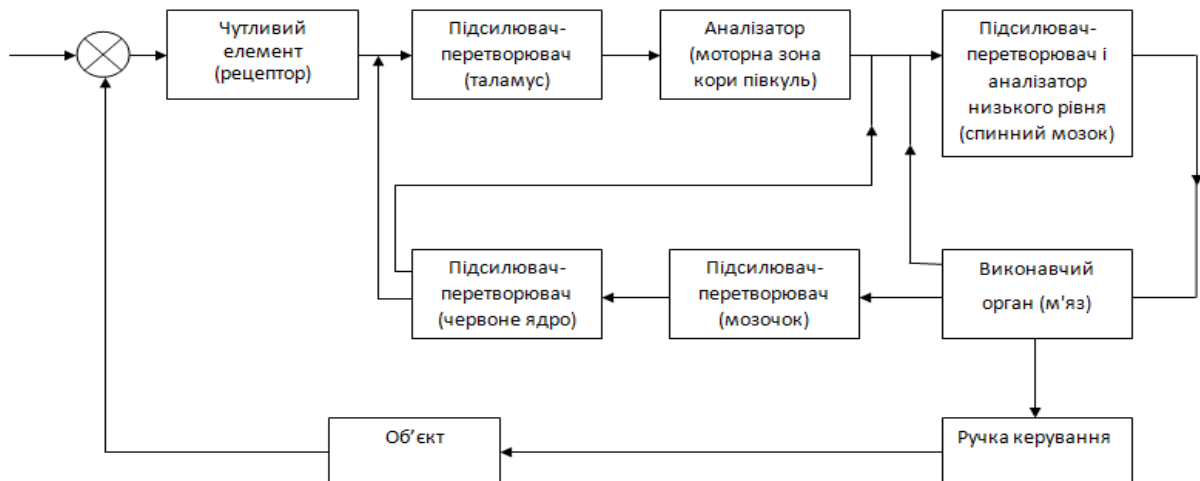


Рис. 4.8 Структурна схема нервово-психічної регуляції людини в найпростішому контурі управління об'єктом

### Особливості інтелектуальної діяльності людини-оператора при управлінні сучасним літаком

Для більшості наземних професій характерним є той факт, що оператор сам підбирає собі найбільш прийнятний для нього (оптимальний) темп виконання робочих операцій. Пілот в більшості польотних ситуацій практично не має можливості ані пришвидшити, ані знизити розвиток подій. При обов'язковості та суворій послідовності виконуваних робочих операцій темп їх виконання пілотом

диктується ходом розвитку польоту, тобто в більшості випадків пілот змушений виконувати всі ці дії в нав'язаному йому обставинами темпі [57]. Окрім того швидкість виконання пілотом цих операцій може наближатися до гранично можливої. Ці обставини створюють передумову для виникнення у пілотів наряду з емоційною ще й операційну напруженість. Відповідно психічному стану пілотів висувають вимоги емоційної стійкості, тобто можливості не знижуючи працездатності в умовах емоційного перевантаження мати змогу виконувати завдання в нав'язаному темпі.

З неоднорідністю повітряного простору пов'язана наявність постійних впливів, що виводять з рівноваги літак. Пілот повинен повсякчас виконувати дії, направлені на корекцію положення літака.

Підйомна сила, що забезпечує стійкість літака в повітрі, пов'язана зі швидкістю прямолінійного переміщення літака (за рахунок тяги двигунів) і залежить від профіля площини літака (профіль змінюється за рахунок зміни положення закриток та рулів висоти). Необхідною умовою забезпечення стійкості літака є постійне врахування співвідношення тяги двигуна та положення рулів висоти. Для просторового утримання літака в горизонтальному польоті пілот має виконувати велику кількість узгоджених рухів руками та ногами. Сувору послідовність та швидкоплинність подій польоту вимагає щоб рухи пілота були точними та швидкими. Тому однією із особливостей льотної праці є складність керуючих рухів Л-О. Дослідженнями встановлено [72, 103], що в окремих випадках пілот може виконувати до 200 переносів погляду за одну хвилину та виконувати до 100 робочих рухів.

Робота пілота вимагає суміщення в часі не тільки виконання окремих автоматизованих операцій, а і виконання дій, кожна з яких направлена на досягнення усвідомлюваної цілі:

- Визначення та корекція положення літака в просторі (в трьох площинах);
- Оцінка повітряної ситуації;

- Постійний контроль за режимом роботи двигуна;
- Систематичний контроль за роботою та своєчасне виявлення відмов та несправностей в роботі різноманітних систем літака;
- Виконання роботи зі спеціальним обладнанням.

Можливість виконання сумісних операцій та дій, одночасний контроль за ходом двох та більше процесів забезпечуються як за рахунок автоматизації дій пілота [67, 87, 105] – в результаті формування навиків, так і за рахунок раціональної організації уваги Л-О. Формування навиків можливо спостерігати лише при автоматичному виконанні дії без контролювання свідомості. А свідомість фіксує лише кінцевий результат дії.

Ще однією відмінністю льотної праці є використання механізмів передбачення та прогнозування. Як і будь-який оператор, що працює в режимі слідкування, пілот проводить зіставлення, порівняння інформації про поточний та заданий режим роботи системи. Причому до даних про режим роботи він звертається не після того, коли їх отримає в поточний момент, а, навпаки, перевіряє співпадіння даних про реальний режим польоту зі своїми знаннями та вміннями. Наприклад, при переносі погляду на циферблат будь-якого приладу пілот не відшуковує стрілку по всьому циферблату, він направляє свій погляд в той сектор циферблату, в якому при даному режимі польоту стрілка має знаходитися. Саме тут прогнозування відбувається на рівні відчуття та сприйняття.

Представлення про просторове положення літака або режиму польоту, що формується на основі інформації, що сприймається, досвіді польотів та теоретичних знань вкладається в поняття «образ польоту». Формування такого представлення дозволяє пілоту «спостерігати» положення свого літака як би з боку. Періодично пілот відтворює порівняння: співпадає чи ні, інформація, що надходить до нього, зі складеним ним самим «образом польоту».

Діяльність пілота полягає в зіставленні інформації, що надходить до нього про поточний режим польоту (інформаційна модель) зі знаннями про показники, що відповідають даному режиму польоту (концептуальна модель). Формування та широке використання в роботі механізмів прогнозування та передбачення (механізмів антиципації) – якості, які вкрай необхідні пілоту.

Візуальне орієнтування пілот виконує не безперервно, а дискретно, переключуючи свою увагу на процес керування літаком та вирішення інших задач. Однак уявлення про положення літака в просторі в нього не втрачається, воно зберігається за рахунок інших аналізаторів і формується в так зване «відчуття літака», здатність оцінювати положення літака без допомоги зору, за рахунок так званої акцелераційної чуттєвості (сприйняття прискорень роботою вестибулярного апарату та апаратів пропріоцепції (відчуття пози свого тіла – м'язів та сухожилів), інтероцепції (внутрішня середа організму, його вегетативні органи та рецептори шкіри)).

Процес просторового орієнтування в польоті відрізняється від орієнтування в наземних умовах не тільки за своїм характером орієнтування, а і за рівнем контролю. В наземних умовах контроль відбувається на рівні відчуттів, в візуальному польоті – на рівні сприйняття. При польоті в СМУ (при відсутності позакабінних орієнтирів) пілот змушений уявляти собі положення літака на основі приладової інформації. Саме тут можливе виникнення розбіжностей між інформацією, що надходить від каналів акцелераційної чуттєвості та інформацією, яка отримана від зорового аналізатора. При візуальному польоті це питання вирішується за допомогою зорового аналізатора, а при польоті за приладами виникають протиріччя між цими даними. В цьому випадку процес просторового орієнтування перетворюється в інтелектуальний процес оцінки положення літака у просторі. Корегування відбувається на рівні мовних та розумових процесів. Це вимагає відволікання уваги пілота від інших видів діяльності, а в деяких випадках цей процес закінчується формуванням хибного

уявлення про положення літака (появу ілюзій просторового положення) і як наслідок скоєння помилок.

Складність процесів орієнтування пілота в польоті доповнюється високими вимогами до функціонування пам'яті та мислення пілота. З одного боку пілоту потрібно використання великої кількості показників, які мають змінні значення, що потребує розвиненої «оперативної» пам'яті, з іншого – потрібно користуватися інструкціями, що потребує розвиненої «довготривалої» пам'яті. Найчастіше жорсткий ліміт часу не дозволяє пілоту відкладати ПР і він змушений приймати рішення в умовах неповної інформації, використовуючи «оперативне» мислення. В той же час польотні ситуації не завжди бувають типовими і лише при глибокому розумінні механізмів роботи різноманітних систем літака та принципів дії багаточисельних приладів пілот може правильно оцінити ситуацію та прийняти правильне рішення.

Отже, нарівні з розвитком оперативної пам'яті та оперативного мислення льотна праця вимагає дотримання запам'ятовування інструкцій та високої готовності пам'яті, глибокого розуміння сутності швидкоплинних процесів.

Виходячи з усього вищезазначеного інтелектуальна діяльність пілота за рівнями свідомості представлена в узагальненій функціональній моделі інтелектуальної діяльності Л-О-пілота (рис.4.9)

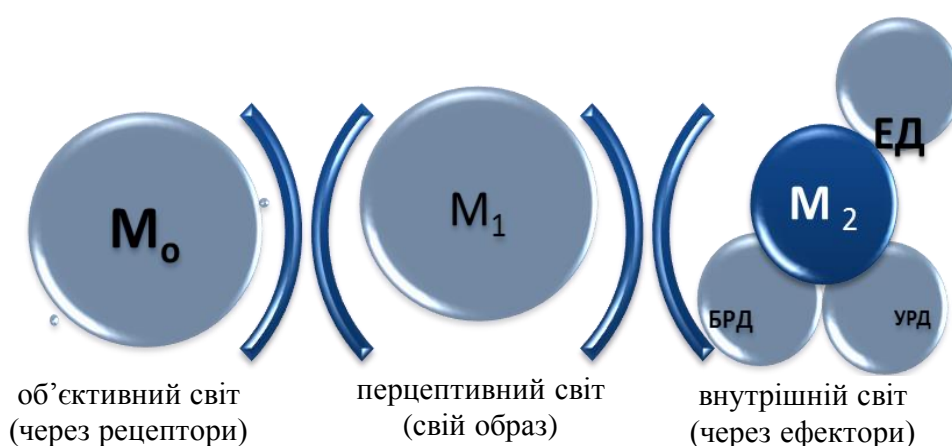


Рис. 4.9 Узагальнена функціональна модель інтелектуальної діяльності Л-О-пілота

Процес опрацювання Л-О зчитаної інформації безпосередньо пов'язаний з інтелектуальною діяльністю людини – розумовою роботою по вирішенню задач управління літаком з елементами невизначеності. Основу інтелектуальної діяльності людини складає рефлекторна (безумовна та умовна) та евристична діяльність людського мозку, що в загальному випадку є реакцією на зовнішні та внутрішні роздратування.

Найнижчий рівень інтелектуальної діяльності представляє сукупність вроджених реакцій по сприйняттю і переробці інформації, а також виконавчої діяльності і є безумовно-рефлекторним, основною одиницею якого є образ (фрейм). Саме фрейм являє собою базові поняття, твердження, стереотипні процедури, що представляються у виді образів, на основі яких утворюються безумовні рефлекси. Безумовна рефлекторна діяльність (БРД) є нижчим рівнем, відіграє інформаційно-виконавчу роль і служить для зв'язку з зовнішнім світом і з більш високими інтелектуальними рівнями та виконує три основні функції: є джерелом образної інформації; формує форми поведінки; саме на ньому виконується вся інтелектуальна діяльність.

Основним робочим рівнем інтелектуальної діяльності пілота по управлінню літаком є саме умовно-рефлексна діяльність (УРД), завдяки якій відбувається моделювання реального світу через організацію тимчасових зв'язків та реакції на майбутні події. Для виконання цих функцій спочатку використовується природна мова образів через яку людина, використовуючи мовні можливості може передавати інформацію.

Найвищим рівнем інтелектуальної діяльності є евристична діяльність (ЕД), в якій і відбувається цільне сприйняття проблем і ситуацій, завдяки використанню символічної мови спілкування, що синтезується з природної мови та мови образів.

Інформація з ЗВІ ЛА є об'єктивним світом  $M_0$  для пілота і відповідає стану  $S^{ЛА}$ . Л-О із загального об'єктивного світу задач  $M_0$  в процесі інтелектуальної діяльності сприймає більш просту модель – так званий світ перцептивних задач

$M_1$ . З однієї сторони це обумовлено обмеженими можливостями рецепторів, а з іншої виборчою здатністю людського мозку. Крім цього в модель інтелектуального світу пілота входить його внутрішній світ  $M_2$ . При цьому внутрішній світ утворюється:

- з “природжених” безумовно-рефлексних задач БРД, які описуються мовою фреймів;

- з накопичених у результаті досвіду діяльності людини умовно-рефлексних задач УРД, які описуються природною мовою;

- зі знову сформованих творчих, евристичних задач, які описуються символічною мовою (ЕД).

В узагальненій моделі діяльності Л-О-пілота можна мовою операцій формалізувати розумовий і сенсомоторний процеси операторської діяльності пілота по управлінню ЛА із ЗВІ для різних способів кодування:

- операція сприйняття й обробки інформації, що дозволяє сформувати з об'єктивного світу задач  $M_0$  перцептивний світ задач  $M_1$ ;
- операція формування і структуризації з перцептивного світу задач  $M_1$  світу безумовно рефлексних задач БРД;
- операція формування і структуризації зі світу БРД світу умовно-рефлексних задач УРД;
- операція формування і структуризації зі світів БРД і УРД світу евристичних задач ЕД;
- операція формування зі світу евристичних задач ЕД задуму рішення задачі управління ЛА;
- операція формування зі світу УРД альтернатив реалізації побудованого задуму управління ЛА і вибору однієї з них;
- операція формування зі світу безумовно-рефлексних задач БРД алгоритму реалізації обраної альтернативи діяльності Л-О-пілотом по управлінню ЛА;

- операція реалізації побудованого алгоритму рішення задачі управління ЛА Л-О-пілотом.

Розгляд розробленої функціональної моделі інтелектуальної діяльності пілота показує, що всі перераховані інтелектуальні операції укладаються в традиційні етапи операторської діяльності Л-О-пілота по управлінню ЛА, тобто відповідають структурі інтелектуальної діяльності пілота при управлінні ЛА (рис.4.6). Процес діяльності пілота при управлінні ЛА складається з:

1. етапу сприйняття – це етап безпосереднього сприйняття і попередньої обробки інформації (відповідає БРД);
2. етапу створення образу – це етап логічної обробки інформації і формування задач управління ЛА (відповідає УРД);
3. етапу інтелекту – етап рішення інтелектуальної задачі управління ЛА і вибору алгоритму діяльності (відповідає ЕД);
4. етапу усвідомлення – етап дії, спрямованої на реалізацію обраного алгоритму управління ЛА.

#### 4.3.2. Граф станів операторської діяльності

В 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:  $S_1^{О.Д.}$  – зчитування інформації (показників) з приладу, що відповідає рівню БРД (рис.4.9);  $S_2^{О.Д.}$  – опрацювання зчитаної інформації що відповідає рівню УРД (рис.4.9);  $S_3^{О.Д.}$  – прийняття рішення по управлінню, що відповідає рівню ЕД (рис.4.9). На рис. 4.10 представлено граф станів операторної діяльності пілота при пілотуванні літаком в директорному режимі.



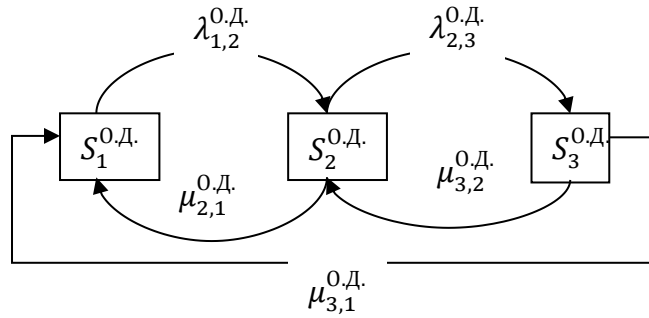


Рис. 4.10 Граф станів операторної діяльності пілота при пілотуванні літаком в директорному режимі

Запишемо для графу станів операторної діяльності пілота (рис. 4.10) рівняння Колмагорова:

$$\begin{aligned} \frac{dp_1^{O.D.}}{dt} &= -\lambda_{12}^{O.D.} p_1^{O.D.} + \mu_{21}^{O.D.} p_2^{O.D.} + \mu_{31}^{O.D.} p_3^{O.D.} \\ \frac{dp_2^{O.D.}}{dt} &= -(\lambda_{23}^{O.D.} + \mu_{21}^{O.D.}) p_2^{O.D.} + \lambda_{12}^{O.D.} p_1^{O.D.} + \mu_{32}^{O.D.} p_3^{O.D.} \\ \frac{dp_3^{O.D.}}{dt} &= -(\mu_{32}^{O.D.} + \mu_{31}^{O.D.}) p_3^{O.D.} + \mu_{23}^{O.D.} p_2^{O.D.} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Інтенсивності  $\lambda_{i,j}^{O.D.}$  та  $\mu_{j,i}^{O.D.}$  переходу із стану в стан залежать від часу, що витрачає пілот на здійснення операцій по зчитуванню інформації, її опрацюванню та прийняттю рішень:

$$\lambda_{1,2}^{O.D.} = \frac{1}{T_\Phi} N = \frac{1}{T_\Phi + T_\Pi}; \quad (4.19)$$

$$\lambda_{2,3}^{O.D.} = \frac{1}{T_\Pi} (N - 1) = \frac{1}{T_0}; \quad (4.20)$$

$\mu_{21}^{O.D.} = \frac{1}{T_y}$  – інтенсивність, що пов’язана з часом на уточнення інформації, що була зчитана з пілотажно-навігаційних приладів (відповідає етапу безпосереднього сприйняття через органи чуття і попередньої обробки інформації (БРД));

$\lambda_{12}^{O.D.}$  – інтенсивність сприйняття інформації людиною (БРД);

$\mu_{32}^{O.D.} = \frac{1}{T_{ло}}$  – інтенсивність, що пов’язана з часом на повернення до обробки інформації ( $T_{ло}$  – час логічної обробки інформації людиною), що була зчитана з ПНП (відповідає етапу логічної обробки інформації і формуванню задач управління ЛА (УРД));

$\mu_{31}^{O.D.}$  – інтенсивність, що пов’язана з часом прийняття рішення по управлінню (відповідає етапу рішення інтелектуальної задачі управління ЛА і вибору алгоритму діяльності (ЕД) та етапу дії, спрямованої на реалізацію обраного алгоритму управління ЛА).

$$\mu_{31}^{O.D.} = \mu_{32}^{O.D.} + \mu_{21}^{O.D.} \quad (4.21)$$

Отримана модель (3.14) дозволяє визначити час  $T_{ij}^{L-O}$  необхідний пілоту для зчитування, обробки та прийняття рішення по управлінню з урахуванням особливостей інтелектуальної діяльності людини, як час перехідного процесу системи  $S^{O.D.}$ , (коли вона перейшла до стану  $S_3^{O.D.}$  ( $p_3^{O.D.} = 1$ ), тобто пілот прийняв рішення по управлінню) як розв’язок системи рівнянь (4.18), з початковими умовами:  $p_1^{O.D.} = 1$ ,  $p_2^{O.D.} = 0$ ,  $p_3^{O.D.} = 0$ . Кількість контрольованих приладів та відповідну кількість переносів погляду з приладу на прилад для кожного зі станів системи  $S^{L-O}$  визначаємо за схемами рис.3.5 [102].

#### **4.4 Експериментальне отримання узагальненої робочої характеристики за допомогою розробленої моделі системи масового обслуговування**

В класичному використанні оператори функціональних перетворень обираються у класі лінійних операторів, які мають найбільше поширення в практиці експлуатація ЕС управління, в яких Л-О виконує свої функції в режимі компенсаторного стеження. Де параметрам УРХ відповідають параметри розроблених вище математичних моделей у формі СМО:

$Q_{л-о}$  – обробка людиною пілотажної інформації  $\lambda_{i,j}^{L-O}$  відповідає БРД;

$R_{л-о}$  – характеристика індикаторного сигналу ЗВІ  $\mu_{j,i}^{лА}$  відповідає УРД;

$\varepsilon$  – точність виконання Л-О обробки  $Q_{л-о}$  сигналу  $R_{л-о}$  відповідає ЕД.

**Q - характеристика** формується в процесі сприйняття. Саме сприйняття є нижчим рівнем інтелектуальної діяльності (відповідає БРД рис.4.9) та характеризується здатністю відображення дійсності не у вигляді окремих форм предметів, як при відчутті, а у формі відображення речей за рахунок інтеграції властивостей, що впливають, у єдиний цілісний образ речі. Через рецептори аналізаторів саме через рівень сприйняття від ЗВІ надається оперативно-інформаційна модель зовнішнього світу, яка і сприймається за допомогою рецепторів різних аналізаторів (рис.4.6).

Ця характеристика являє собою залежність значення математичного очікування часу збереження Л-О-пілотом квазістійкого функціонального стану від параметрів  $K = \lambda_{i,j}^{л-о}$ ,  $K_1 = \mu_{j,i}^{л-о}$  (рис.3.4) оператора функціональних перетворень  $Q_{л-о}$ . При цьому  $R_{л-о} = Const$ ;  $\varepsilon = Const$ . За результатами моделювання системи «пілот-літак» було визначено час перехідного процесу для кожної ймовірності станів системи «пілот-літак» та розраховано їх математичні очікування.

За результатами експериментів побудована поверхня функції  $Mt = t(K, K_1)$ , зображена на рис.4.10.

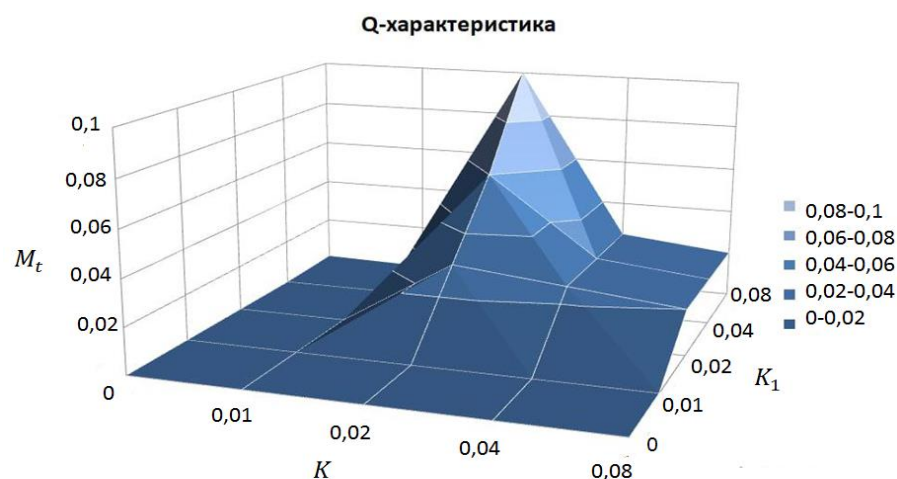


Рис.4.11. Експериментально побудована Q - характеристика

Згідно з рисунком максимальне значення математичного очікування часу переходу системи «пілот-літак» із стану в стан  $Mt$  розміщене в області  $0,015 \leq K \leq 0,025$  і має тенденцію до збільшення зі збільшенням  $K_1$ . Слід зазначити, що екстремуми функції  $Mt = t(K, K_1)$  в обраній області різко виражені.

Цей факт вказує на те, що функція  $Mt = t(K, K_1)$  в області  $0,01 \leq K \leq 0,1$  чутлива до зміни параметрів  $K, K_1$ , таким чином при можливій зміні параметрів  $K, K_1$ , час квазістійкого функціонального стану Л-О значно зменшується. Звідси область параметрів  $0,015 \leq K \leq 0,025$ ;  $0,08 \leq K_1 \leq 0,1$  є більш кращою, оскільки функція  $Mt = t(K, K_1)$  тут майже інваріантна до зміни параметрів  $K, K_1$ .

Чим якісніше для сприйняття предатавлена інформація на ЗВІ, тим точніше Л-О сприймає її.

**Р** – **характеристиці** відповідає образ, на етапі якого формується оперативний образ ситуації, що виникає. Під оперативним образом розуміють психічну одиницю, отриману шляхом зведення розрізненої інформації від рецепторів (відповідає УРД рис.4.9), це етап логічної обробки інформації і формування задач управління ЛА.

**R** - характеристика відображає залежність значення математичного очікування часу збереження Л-О квазістійкого функціонального стану від коефіцієнтів  $K_1^* = \mu_{j,i}^{ЛА}, K_2^* = \lambda_{i,j}^{Л-О}$  (рис.3.4) оператора  $E(p)$  вхідного сигналу системи. При цьому  $Q_{Л-О} = Const$ ;  $\varepsilon = Const$ . Експериментальні залежності отримані для наступної пари операторів функціональних перетворень  $Q_{Л-О}$  і спостерігаючого сигналу  $R_{Л-О}$ .

За результатами експериментів побудована поверхня функції  $Mt = t(K_1^*, K_2^*)$ , зображена на рис.4.12.

Із наведеної залежності зрозуміло, що вона має монотонний характер і зі збільшенням коефіцієнтів  $K_1^*, K_2^*$  значення математичного очікування часу переходу системи «пілот-літак» із стану в стан  $Mt$  збереження Л-О квазістійкого функціонального стану при роботі збільшується. Це можна підтвердити тим, що зі

збільшенням коефіцієнтів  $K_1^*, K_2^*$  перехідні процеси на виході перетворювача набувають більш плавний характер.

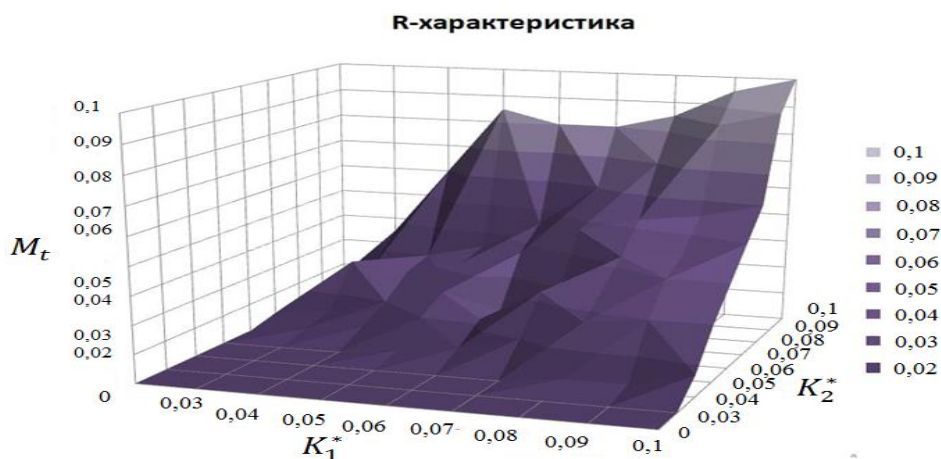


Рис. 4.12 Експериментально отримана R – характеристика

$\varepsilon$  – характеристика (точність виконання операції) формується на рівні інтелекту, де відбувається порівняння, запам'ятовування, сортування образів. Існує деякий набір основних прийомів пілотування, викладених в інструкціях. Для досвідченого пілота вирішення конкретної оперативної задачі зведено до знаходження модифікації одного з основних прийомів пілотування, який точно відтворює умови даного становища і лише в деяких випадках він зіштовхується з проблемою. Процес тренування можливо трактувати як виробку (засвоєння) основних прийомів, навчання, як складових найвищого рівня інтелектуальної діяльності та знаходження відповідних прийомів пілотування. По мірі тренувань пілот відносить операційно-інформаційну модель до різних класів, що занесені в сховище довготривалої пам'яті, за різними прийомами пілотування.

Ця характеристика відображає залежність значення математичного очікування часу існування квазістійкого функціонального стану Л-О від допустимої точності виконання їм перетворень  $Q_{л-0}$  вхідного сигналу (точності опису діяльності людини оператором  $Q_{л-0}$  на інтервалі часу  $[0, t]$ ).

При цьому  $Q_{л-0} = Const$ ,  $R_{л-0} = Const$ .

За результатами експериментів побудована залежність  $Mt = t(\varepsilon)$ , зображена на рис.4.13. З наведеної залежності виходить, що вона має лінійний

характер і зі збільшенням точності  $\varepsilon$  максимальне значення математичного очікування часу переходу системи «пілот-літак» із стану в стан  $M_t$  збільшується.

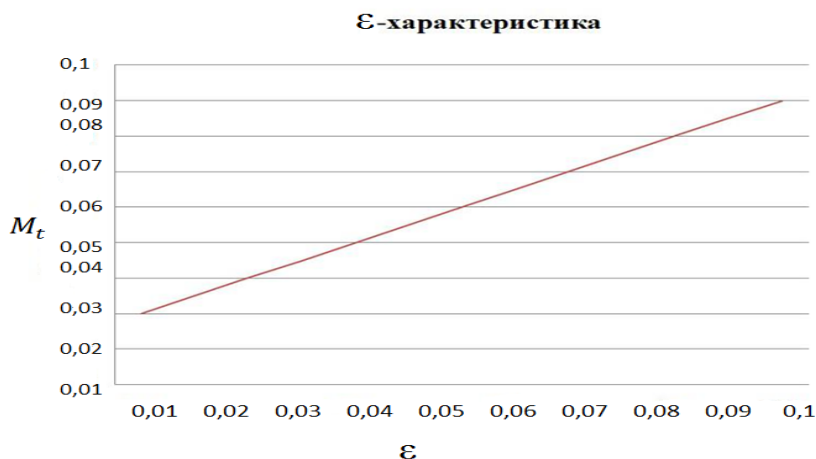


Рис. 4.13 Експериментально отримана  $\varepsilon$ - характеристика

**QR-характеристика** відбувається на рівні усвідомлення, який є найвищим в інтелектуальній діяльності людини. Він охоплює рівні БРД, УРД, ЕД, і є механізмом управління та налаштування на рішення оперативних задач польоту. Цьому рівню належать воля, цілеспрямованість, прийняття рішення. Формалізація цього рівня достатньо утруднена в зв'язку з його індивідуальністю в кожній окремій людини. Але усвідомлення об'єднує попередні три рівня, тому і вплив треба провадити через сприйняття, образи, інтелект (рис.4.6, рис.4.9). Рівень усвідомлення є коригуючою та керуючою ланкою на всіх рівнях психічної діяльності. Він є продуктом праці, тому лише накопичивши достатній досвід пілот починає обізнано управляти літаком, набуваючи такі складові як воля, цілеспрямованість, усвідомлення необхідної поведінки.

Залежить від коефіцієнтів  $K = \lambda_{i,j}^{l-0}$  оператора  $Q_{l-0}$  і коефіцієнта  $K_1^* = \mu_{j,i}^{lA}$  оператора, що спостерігає за сигналом  $R_{l-0}$ . При цьому  $\varepsilon = Const$ . За результатами експериментів побудована поверхня функції  $M_t = t(K, K_1^*)$ , зображена на рис.4.14.

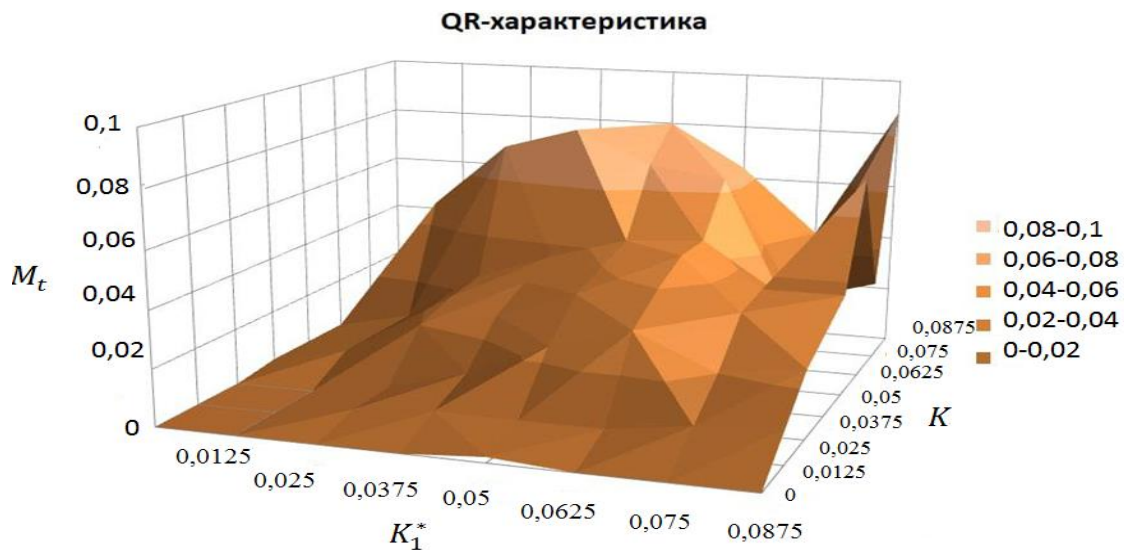


Рис.4.14 Експериментально отримана QR - характеристика

Відповідно до рис.4.10. ця залежність досить складна і має дуже виражені екстремуми. Це твердження вказує на необхідність уважного підходу до питання організації операторської діяльності людини. Таким чином до вибору його робочої точки на характеристиці при високому і гострому максимумі значення математичного очікування часу  $M_t$  дуже залежить від коливань параметрів  $K, K_1^*$ . Це означає, що час функціонування всієї системи із заданою якістю дуже критичний до зміни відповідного параметра. 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. Таким чином час безвідмовного здійснення перетворень  $t$  повинен бути не менше часу, необхідного для рішення задачі поставленої перед системою. Час  $t$  фіксувався до першої помилки оператора, тобто до моменту порушення рівноваги при заданій  $\varepsilon$ .

Провівши ряд досліджень за допомогою створеного програмного комплексу для моделювання системи «пілот-літак» як СМО, отримано наступну УРХ з підібраними коефіцієнтами параметрами  $K, K_1^*$  таким чином, що Л-О має

можливість виконувати свою діяльність безвідмовно потрібну кількість часу безпомилково при заданій інтенсивності надходження інформації.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Удосконалено математичну модель «Узагальнена робоча характеристика Л-О», за рахунок введення нового базису – операторів діяльності Л-О – як системи масового обслуговування, що дозволяє досліджувати системні характеристики операторської діяльності в системі «пілот-літак» на етапі заходу на посадку.

2. Аналіз помилкових дій пілота показує, що основні порушення в роботі ЕС «Л-О-ЛА» припадають на його психічну діяльність. Як свідчить модель нервово-психічної напруженості оператора на кожному з рівнів відбувається процес затримки, що й призводить до збільшення загального часу прийняття рішення людиною.

3. Так як людський організм являє собою надійну біосоціальну систему, якій притаманні необмежені можливості пристосування до навколишнього середовища, то виділяють структурні та функціональні резерви людського організму і саме вони являють собою можливість зміни функціональної активності структурних елементів організму, їх можливості взаємодії між собою, використовувані організмом для досягнення результату діяльності людини, для адаптації до фізичних, психоемоційних навантажень і впливу на організм різних факторів зовнішнього середовища. У пілотів окрім емоційної виникає ще й операційна напруженість. Відповідно інтелектуальному стану пілотів висувають вимоги емоційної стійкості, тобто можливості не знижуючи працездатності в умовах емоційного перевантаження, мати змогу виконувати завдання в нав'язаному темпі.

4. 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 по керуванню як стани системи масового обслуговування.

5. Максимальне значення УРХ математичного очікування часу переходу системи «пілот-літак» із стану в стан  $M_t$  збереження людиною квазістійкого функціонального стану при обробці інформації  $Q$  – характеристики (функціональні перетворення над вхідним сигналом) досягається при параметрах  $0,015 \leq K \leq 0,025$  і має тенденцію до збільшення зі збільшенням  $K_1$ .

6. Значення УРХ залежності математичного очікування часу переходу системи «пілот-літак» із стану в стан  $M_t$  збереження Л-О квазістійкого функціонального стану по надходженню інформації із ЗВІ  $R$  - характеристики (складність вхідного сигналу) від коефіцієнтів  $K_1^*, K_2^*$  оператора вхідного сигналу системи, має монотонний характер і зі збільшенням коефіцієнтів  $K_1^*, K_2^*$  час збереження Л-О квазістійкого функціонального стану при роботі збільшується. Це підтверджується тим, що зі збільшенням коефіцієнтів  $K_1^*, K_2^*$  перехідні процеси на виході перетворювача набувають більш плавний характер.

7. Значення УРХ залежності математичного очікування часу переходу системи «пілот-літак» із стану в стан  $M_t$  існування квазістійкого функціонального стану людини-оператора від допустимої точності виконання їм перетворень вхідного сигналу  $\varepsilon$  – характеристики (точність виконання людиною перетворень над вхідним сигналом) має лінійний характер і зі збільшенням точності  $\varepsilon$  час безпомилкової роботи збільшується.

8. Максимальне значення УРХ  $QR$  - характеристики (складності виконання людиною перетворень над складним вхідним сигналом) має дуже виражені екстремуми. Таким чином час безвідмовного здійснення перетворень повинен бути не менше часу, необхідного для рішення задачі поставленої перед системою.

9. В області суттєвого зменшення числових значень коефіцієнтів спостерігається зменшення УРХ, що відповідає погіршенню роботи ергатичної системи «пілот-літак» по відновленню заданих параметрів польоту, що в свою чергу свідчить про необхідність внесення корегування в методики підготовки пілотів по відпрацюванню нештатних та аварійних ситуацій.

#### Список публікацій здобувача за матеріалами четверього розділу

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Благая Л. В. Анализ оптимальной аналитической модели человека-оператора. АВІА–2015: XII міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2015. С. 7.78–7.82.

6. Благая Л. В. Обработка рабочих инструкций органов ОВД Украеро-руху с целью повышения надежности операторов 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.

7. 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.

8. 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.

9. Blahaia L. V. Model of Side-looking Airborne Radar Controller Activity. Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC): 2016 IEEE 4rd International Conference, October 17–19, 2016. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2016. P. 63–66.

## ВИСНОВКИ

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 в повному обсязі відображають стохастичні характеристики станів системи Л-О-літак на етапі заходу на посадку. Визначено, що найбільш ефективним підходом щодо формалізації процесів, є підхід з позицій теорії масового обслуговування. В результаті проведеного аналізу виявлено протиріччя 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 відсутністю 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 дозволило 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. Вперше розроблено стохастичну математичну модель діяльності ергатичної системи пілот-літак на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування, яка на відміну від існуючих розрізнених 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 при різних початкових умовах, та різних польотних ситуацій. Результати широкого моделювання показали, що параметри отримані за моделлю, відповідають параметрам польота, отриманих з системи реєстрації параметрів літака на режимі заходу на посадку.

5. Вперше 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 по керуванню 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 дозволяє 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 по відновленню заданих параметрів польоту, що в свою чергу свідчить про необхідність внесення корегування в методики підготовки пілотів по відпрацюванню нештатних та аварійних ситуацій.

Результати роботи представляють практичне значення та можуть використовуватися:

–при розробці методик підвищення безпеки польотів на етапі заходу на посадку 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Асафьев Ю. В., Бубнов Г. П. Модель принятия решений при УВД в районной системе – Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1982, № 2, с. 63–71.
2. Асланян А. Э. Системы автоматического управления полетом летательных аппаратов. Часть 1. – К.: КВВАИУ, 1984. – 436 с.
3. Аткинсон Р., Бауэр Г., Кротерс Э. Введение в математическую теорию обучения / Пер. с англ.; под ред. д-ра псих. наук О. К. Тихомирова. – М.: Мир, 1969. – С. 486.
4. 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.
5. 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.
6. Благая Л. В., Павлова С. В. Визначення контрольованих параметрів для моделі людини-оператора при директорному керуванні. Вісник інженерної академії. 2015. № 2. С. 115–119.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. 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 2012 р.: тези доп. К., 2012. С. 9.

11. 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.

12. 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.

13. Благая Л. В. Обработка рабочих инструкций органов ОВД Украеро-руху с целью повышения надежности операторов 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Благая Л. В. Анализ оптимальной аналитической модели человека-оператора. АВІА–2015: XII міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2015. С. 7.78–7.82.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. Блейклок Дж. Г. Автоматическое управление самолётами и ракетами: пер. с англ / Дж. Г. Блейклок; Ред. Н. Т. Кузовкин. – М.: Машиностроение, 1969. - 286 с



24. Боднер В. А., Козлов М.С. Стабилизация летательных аппаратов и автопилоты. / Боднер Василий Афанасьевич. – М.: Оборонгиз, 1961. – 508 с.
25. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
26. Бойко И.М., Маруняк С.В., Мосягин И.Г. Психологические особенности летчиков истребительной авиации Европейского Севера России // Экология человека. 2009. № 2. С. 28–31.
27. Бондарев Э. В. Изменение скорости переработки информации у летного состава в процессе выполнения длительных полетов / Э. В. Бондарев, Г. И. Гурвич, Т. Т. Джамгаров и др. // Проблемы инженерной психологии. – М. : Наука, 1967. – С. 82–85.
28. Бочарова С. П. Память как процесс переработки информации / С. П. Бочарова // Дис. д-ра. псих. наук. Харьков : 1975. 344 с.
29. Бюшгенс Г.С. Полная автоматизация управления самолётами к XXI веку //Техника воздушного флота. — 1993. — № 1.
30. Венда В. Ф. Видеотерминалы в информационном взаимодействии (инженерно-психологические аспекты).– М., 1980. – 200 с.
31. Венда В.Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации/ В.Ф. Венда – М.: Машиностроение, 1982. – 396 с.
32. Винер Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов. – М.: ИЛ, 1961. – 158 с.
33. Галактионов А.И. Основы инженерно-психологического проектирования АСУ ТП/ А.И. Галактионов. – М.: Энергия, 1978. – 208 с.
34. Глобальный аэронавигационный план применительно к системам CNS/ATM / Circ. ICAO 9750-AN/963. – Канада, Монреаль: ICAO, 2002. – 325 с.
35. Глобальный аэронавигационный план применительно к системам CNS/ATM // Циркуляр ИКАО 9750 – AN/963. – 2007. – 139 с.

36. . Горячкина Т.Г. Оценка и оптимизация функционального состояния человека-оператора: библиографический указатель отечественных патентов, 1990 – 2004 гг./ Т.Г. Горячкина, В.И. Евдокимов, П.М. Шалимов; ред. В.П. Пласичук, И.Г. Леонтьева; Гос. Науч.-исслед.испыт. ин-т военной медицины Минобороны РФ, Рос. Нац.б-ка. – СПб. : СпецЛит, 2005. – 127 с. – (Полезная библиография; вып. 4).
37. Громов Ю. Ю. Системы автоматического управления с запаздыванием / Ю. Ю. Громов, Н. А. Земской, А. В. Лагутин, О. Г. Иванова, В. М. Тютюнник. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 76 с.
38. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем/ А.И. Губинский. – Л.: Наука, – 1982. – 268 с.
39. Гуськов Ю. П. Управление полетом самолетов / Гуськов Ю. П., Загайнов Г. И. – М.: Машиностроение, 1992. – 213 с.
40. Давидсон Б.Х., Суханов В.Л., Трофимов С.А. Управление самолётом в перспективной системе аэронавигации // Российско-европейский семинар ASTEC'07 «Концепции и технологии ОрВД». — М.:ЦАГИ, 2007. — С. 6.
41. Денисов В. Г. Эксплуатация авиационного оборудования и безопасность полетов / [Денисов В. Г., Кудаев А. С., Козарук В. В. и др.]. – М.: Транспорт, 1979. – 240 с.
42. Егоров А.С. Психофизиология умственного труда /А.С.Егоров, В.П.Загрядский. – Л.: Наука, 1973. – 272 с.
43. Жидовинов А. Ф. Перспективы использования новых методов взаимодействия «человек–машина» в АС УВД, моделирующих комплексах и диспетчерских тренажерах УВД / А. Ф. Жидовинов, А. Н. Петров, В. Н. Туркин. – В кн.: Авиационные автоматизированные комплексы управления и моделирования. – К. : КИИГА, 1980, с. 34–39.
44. Жулев В.И., Иванов В.С. Безопасность полетов летательный аппаратов. М.: «Транспорт», 1986. – 222с.

45. Забродин Ю.М. Процессы принятия решения на сенсорно-перцептивном уровне//Проблемы принятия решения/ Под ред. П.К.Анохина, В.Ф. Рубахина. – М.: Наука, 1976. – с.33-55.
46. Завалова Н.Д., Ломов Б.Ф., Пономаренко В.А. Образ в системе психической регуляции деятельности. –М.: Наука, 1986, -176 с.
47. Завалова Н.Д. Пономаренко В.А., Ломов Б.Ф. Принцип активного оператора в инженерной психологии. – В кн.: Инженерная психология. – М.:Наука, 1977, С. 119-133.
48. Зараковский Г. М. Закономерности функционирования эргатических систем / Г. М. Зараковский, В. В. Павлов. – М. : Радио и связь, 1987. – 232 с.
49. Иванов-Муромский К.Л. Психофизиология оператора в системах человек-машина./Под ред. К.Л. Иванова-Муромского. – Киев: Наук. думка, 1980. – 344 с.
50. Изюмова С. А. Свойства активированности и процессы переработки и хранения информации у человека / С. А. Изюмова. – В кн.: психофизиологические исследования интеллектуальной саморегуляции и активности. – М., 1980, с. 148–162.
51. Изюмова С. Л. О физиологической природе связей между эмоциональной устойчивостью и свойствами нервной системы человека / С. Л. Изюмова, Н. Л. Аминов. – Вопр. психол., 1978, № 5, с. 128-133.
52. Карпов А.В. и др. Психология труда для студентов вузов / под ред. проф. А.В. Карпова. – М.: Изд-во ВЛАДОСС-ПРЕСС, 2005. – 350 с.
53. Клацки Р. Память человека, структура и процессы / Р. Клацки / Пер. с англ. Т. Сидоровой. – М. : Мир, 1978. 320 с.
54. Кондратенков В.А. Эргономический аспект безопасности полетов. – Киев.:Киевское ВВАИУ, 1989. – 140с.
55. Красовский А. А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / Красовский А. А., Вавилов Ю. А., Сучков А. И. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986. – 250с.

56. Корнилова Т.М. Краткий словарь современных понятий и терминов. – 3-е изд., дораб. и доп./ Н.Т.Бунимович, Г.Г.Жаркова, Т.М.Корнилова и др. Сост., общ.ред. В.А.Макаренко. – М.: Республика, 2000. – 670 с.
57. Крыжановский Г. А. Эффективность адаптации в сложных системах управления / Г. А. Крыжановский. – В кн.: Теория адаптивных систем и ее применения. М.–Л. : АН СССР, 1983, с. 276.
58. Кузнецов С. В. Автопилоты самолетов и вертолетов ГА / Кузнецов Сергей Викторович. – М.: МИИГА, 1988. – 104с.
59. Кузнецов С. В. Системы автоматического управления полетом самолетов ГА. М.: МИИГА, 1989. – 76 с.
60. Кузнецов С. В. Системы директорного и автоматического управления заходом на посадку / Кузнецов Сергей Викторович. – М.: МИИГА, 1990. – 96 с.
61. Кулик Н.С., Харченко В.П., Луцкий М.Г. и др.; Энциклопедия безопасности авиации // Под ред. Н.С.Кулика. – К.: Техніка, 2008. – 1000 с.; ил. – Библиогр.: с. 977-999.
62. Кучерявый А.А. Бортовые информационные системы: Курс лекций / Под ред. В.А. Мишина и Г.И. Ключева. - 2-е изд. перераб. и доп. - Ульяновск: УлГТУ, 2004. - 504 с.
63. Лебедев А.Н. Психофизиологические закономерности восприятия и памяти / Под ред. д-ра биол. наук А. Н. Лебедева. – М. : Наука, 1985, 225 с.
64. Лейченко С.Д. Человеческий фактор в авиации: монография в 2-х книгах / С.Д. Лейченко, А.В. Малышевский, Н.Ф. Михайлик. – Кн. 1. – Кировоград: ИМЕКС, 2006. – 512 с.
65. Лейченко С.Д. Человеческий фактор в авиации: монография в 2-х книгах / С.Д. Лейченко, А.В. Малышевский, Н.Ф. Михайлик. – Кн. 2. – СПб. – Кировоград: КОД, 2006. – 480 с.
66. Леонова А. Б. Функциональные состояния человека в трудовой деятельности / А. Б. Леонова, В. И. Медведев. – М. : Изд-во МГУ, 1981.

67. Линдсей П. Переработка информации у человека / П. Линдсей, Д. Норман // Пер с англ.; под ред. А.Р. Лурия. – М. : Мир, 1974. – 552 с.
68. Ломов Б.Ф. Основы инженерной психологии: Учеб. пособие / под ред. Б. Ф. Ломова. – М. : Высш. шк., 1977. – 335 с.
69. Майн Х. Марковские процессы принятия решений / Х. Майн, С. Осаки. – М. : Наука, 1977, 175 с.
70. Медведев В. И. Теоретические и прикладные проблемы физиологии труда: ее задачи и перспективы / В. И. Медведев. – Физиология человека, 1981. – Т. 7, № 3. – С. 391–399.
71. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). – Издание третье – 2007. – 139 с.
72. Меньшов А. И. Космическая эргономика / А. И. Меньшов. – Л. : Наука, 1971. – 296 с.
73. Михалев И. А. Системы автоматического и директорного управления самолетом / / Михалев И. А., Окаемов Б. Н., Павлина И. Г. и др. – М.: Машиностроение, 1974. – 232 с.
74. Национальный план для систем CNS/АТМ: Инструкт. материал. Циркуляр 278-AN164. – Монреаль, 2000. – 174 с.
75. Николаев В. И. Определение времени, затрачиваемого оператором на решение задач по управлению судовой энергетической установкой / В. И. Николаев // Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1965. № 4. – С. 130–145.
76. Новиков П. П. Принятие решений человеком в авиационных системах управления / А. В. Никонов. – М. : Возд. транспорт, 1980. – 348 с.
77. Новикова Н.М. Автоматизация исследований психофизиологических характеристик человека-оператора// Изв. высш. учебн. заведений. Электроника. – 2002. №3. – С.74-77.

78. Новикова Н.М. Непараметрическая модель работы человека-оператора при обнаружении сигнала//Высокие технологии в технике, медицине и образовании: Сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 1995. – С.113-116.
79. Новикова Н.М. Статистическая модель распознавания изображений // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: Сб. научн. тр. – Воронеж: ВГТУ, 1999 – С.14-18.
80. Организация взаимодействия человека с техническими средствами АСУ: в 7 т. – М.: Высшая школа, 1990. – Т.1. – 448 с.
81. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: учеб. Ч.2. Экспертные оценки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 486 с.
82. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений. – М. : КноРус, 2011. – 568 с.
83. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 206 с.
84. Павлов В.В. Технические эргатические системы / [В. В. Павлов, А. Н. Воронин, В. Н. Голего, А. М. Мелешев, О. С. Яковлев]; под ред. Павлова В. В. – Киев: Вища школа, 1977. – 344 с.
85. Павлов В.В. Эргономические вопросы создания и эксплуатации авиационных элек-трифицированных и пилотажно-навигацион-ных комплексов воздушных су-дов [учебное пособие] / В.В.Павлов, А.В.Скрипец. – К.:КМУГА, 2000. – 460 с.
86. Павлова С.В. Аналіз сучасного рівня розвитку систем керування літальних апаратів / С.В. Павлова, А.В. Скрипець, В.І. Чепіженко // Автошляховик України. – 2001. – №4. – С. 58–60.
87. Подласый И. П. Вероятные закономерности освоения начальной информации / И. П. Подласый // Радянська школа, 1971. № 12. – С. 16–24.

88. Поліщук С.Т. Методика прогнозування ймовірності виконання завдання людиною-оператором за критерієм ліміту часу / С.Т. Поліщук// Вісник НАУ. – 2009. №3. – С.87-90.
89. Пономаренко В.А., Лапа В.В. Профессия – летчик: Психологические аспекты / Под ред. Ю.П. Доброленского. – М.: Воениздат, 1985. – 136 с
90. Пономаренко В.А., Малинин И.Д. Некоторые эргономические аспекты построения интегральных автоматизированных систем индикации и управления в современной авиации. // Проблемы безопасности полетов. – 1985. – №12. – С. 35 – 38.
91. Пономаренко В.А. Проблемы человеческого фактора в авиации с учетом рыночной экономики // Инновационные подходы и технологии повышения надежности экипажей вертолетов: Материалы метод. семинара. – М., 2001. – С. 4-17.
92. Попов В.А. Человек-оператор в космическом полете /Е.В.Хрунов, Л.С.Хачатурьянц, В.А.Попов, Е.А.Иванов; Под ред. В.А.Попова. – М.: Машиностроение, 1974. – 399 с.
93. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 284 с.
94. Прокофьев В. А. Исследование временных затрат оператора при решении задач с использованием различных устройств ввода / В. А. Прокофьев, Н. И. Турченков. – В кн.: Принятие решений в системах УВД. – М. : МГУ, 1977. – С. 171–172.
95. Рублев Ю.В., Востров Г.Н. Математические основы логической структуры курса//Вестник высшей школы 1970.№ 9. С. 27-31.
96. Рождественская В. И. Индивидуальные различия работоспособности / В. И. Рождественская. – М. : Педагогика, 1980. 152 с.
97. Свиридов А. П. Основы статистической теории обучения и контроля знаний / А. П. Свиридов // Метод. пособие. – М. : Высш. шк., 1981. – 262 с.

98. Серегин Г.Н. Авиационные тренажеры – реальный путь к повышению безопасности полетов // Журнал «Право и безопасность». – Декабрь 2006. - №3-4(20-21)
99. Советов Б.Я. Моделирование систем /Б.Я. Советов, С.Я. Яковлев. – М.: Высшая школа, 1998. – 319 с.
100. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников «Соглашения о ГА и об использовании воздушного пространства» в 2004 г. и за период 2000-2004 г.г. Доклад Межгосударственного авиационного комитета. – М.: МАК, 2005. – 15 с.
101. Сперлинг Дж. Информация, получаемая при коротких зрительных предъявлениях / Дж. Сперлинг // Инженерная психология за рубежом [Сб. статей] / Пер. с англ.; под ред. А. Н. Леонтьева. – М. : Прогресс, 1967. – С. 7–68.
102. Сперлинг Дж. Модель зрительной памяти / Дж. Сперлинг // Инженерная психология. – С. 69–94.
103. Стрелков Ю. К. Послеобраз и модель сенсорного звена зрительной системы / Ю. К. Стрелков // Вопросы психологии. 1971. № 2. – С. 57–65.
104. Тарарака В.Д. Методика оценки эффективности взаимодействия оператора с техническими средствами отображения информации / В.Д. Тарарака// Кибернетика и вычислительная техника. – 1986. – Вып.72. – С.71-76.
105. Трошихин В. А. Функциональная подвижность нервных процессов и профессиональный отбор / В. А. Трошихин, С. И. Молдавская, Н. В. Кольченко. – К. : Наук. думка, 1978.
106. Уикенс К. Переработка информации, принятие решений и познавательные процессы/К. Уикенс./Человеческий фактор. М.: Мир, 1991. – Т.1. – 206-267 с.
107. Уилсон Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон // Пер с англ. – М. : Мир, 1977.
108. Уинстон П. Искусственный интеллект / П. Уинстон. – М. : Мир, 1980. – 519 с.



109. Фиттс П., Петтерсон Дж. Пропускная способность дискретных двигательных реакций// Инженерная психология за рубежом. / Под ред.. Б.Ф.Ломова. – М., 1967. – с.408-425
110. Фрэнк Г. Сети, связи и потоки / Г. Фрэнк, И. Фриш. – М. : Связь, 1978. – 448 с.
111. Харченко В.П., Шмельова Т.Ф., Сікірда Ю.В.; Прийняття рішень оператором аеронавігаційної системи: монографія / В.П. Харченко, Т.Ф. Шмельова, Ю.В. Сікірда. – Кіровоград: КЛА НАУ, 2012. – 292 с.
112. Хилгард Э. Методы и причины анализа процесса научения / Э. Хилгард // Экспериментальная психология / Под ред. С. С. Стивенса. – М. : Изд-во иностр. лит. – Т. 2. 1963. – С. 11–65.
113. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы / И.Е.Цибулевский. М.: - Наука. – 1981. – 288 с.
114. Циркуляр ИКАО №234-AN/142. Человеческий фактор. Эксплуатационные последствия автоматизации в оборудованных передовой техникой кабинах экипажа. – Монреаль, 1992. – Сб.№5. – 54 с.
115. Циркуляр ИКАО №238-AN/143. Человеческий фактор. Эргономика. – Монреаль, 1992. – Сб.№6. – 56 с.
116. Человеческий фактор в системах CNS/АТМ. Разработка ориентированной на человека автоматики и передовой техники для будущих аэронавигационных систем: сб. материалов по человеческому фактору № 11 / Circ. ICAO 249-AN/149. – Канада, Монреаль: ICAO, 1994. – 71 с.
117. Человеческий фактор в системе мер безопасности гражданской авиации AN/765 (Издание 2002г). [Электронный ресурс]: <http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/>
118. Шакула А.В., Мельник С.Г. Профилактическая направленность мероприятий по восстановлению профессионального здоровья летного состава // Воен.- мед. журн. – 2003. - № 5. – С. 41-44.

119. Швец В.А. Анализ состояния аварийности гражданских воздушных судов Украины за период 1998-2007 гг. / В.А. Швец, О.Н. Алексеев. – К.: Госавиаадминистрация, 2008. □ 83 с.
120. Шеридан Т.Б., Феррел У.Р. Системы человек-машина /Т.Б. Шеридан, У.Р. Феррел/ Пер. с англ. А.А. Кобринского; Под ред. К.В. Фролова – М.: Машиностроение, 1980. – 343 с.
121. Щукарев А. Н. Учение об энергии и энтропии в элементарном изложении / А. Н. Щукарев. – М., 1912.
122. 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.
123. 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.
124. 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. 124–127.
125. 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.
126. Blahaia L. V. Model of Side-looking Airborne Radar Controller Activity. Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC): 2016 IEEE 4rd International Conference, October 17–19, 2016. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2016. P. 63–66.
127. Blahaja L. A. Study on Unmanned Aerial System Vulnerabilities for Durability Enhancement / Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments: 2019 IEEE 5rd International Conference, October 22–24, 2019. Kyiv, Ukraine Section SP/AES Joint Chapter National Aviation University, 2019. P. 40–43.

128. Blahaia L., Blizhnikova K., Orel I. Solution of the problem of capacity in modern airports with the introduction of circular runways. ABIA-2017: XIII міжнародна науково-технічна конференція, 19–21 квітня 2017 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2017. С. 12.65–12.68.
129. Blahaia L. V., Kozhokhina O. V., Herasymenko T. S. Informational needs in the maintenance of the unmanned aerial vehicle. ABIA-2019: XIV Міжнародна науково-технічна конференція, 23–25 квітня 2019 р.: тези доп. Київ: НАУ, 2019. С. 16.31–16.33.
130. Boyd J.R. Organic Design for Command and Control / J.R. Boyd. – USA, Atlanta, Georgia, 2005. – 40 p.
131. Ebbinghaus H. Uber das Gedachtnis:Untersuchunger zur experimentellen Psychologie / H. Ebbinghaus. – Leipzig: Dunker and Humbolt, 1885.
132. ESSAR 1. Safety oversight in ATM. – Brussels: Eurocontrol, 2004. – 24 p.
133. ESSAR 2. Reporting and assessment of safety occurences in ATM. – Brussels: Eurocon-trol, 2000. – 17 p.
134. ESSAR 3. Use of safety management sys-tems by ATM service providers. – Brussels: Eu-rocontrol, 2000. – 17 p.
135. ESSAR 4. Risk assessment and migration in ATM. – Brussels: Eurocontrol, 2001. – 22 p.
136. ESSAR 5. ATM services' personnel. – Brussels: Eurocontrol, 2002. – 24 p.
137. McRuer D.T., Jex H.R. A review of quasi-linear pilot models // IEEE Trans. Human Factors in Electronics, HFE-8. – 1967. – №3. – P.231-249.
138. Mc Ruer P.T., Krendel E.S. Dinamic Response of Human Operators// Wright Air Development Center Technikal Report. 1957. P.56-524.
139. Perr T.S. In Search of the Future of Air Traffic Control // IEEE Spectrum. — 1997. — V. 34, N. 8. — P. 18–35.

140. Pupkov K.A., Ustyuzhanin A.D. Learning and Adaptation in Man-Machine systems. Intelligent systems// Proceeding of the Fifth International Symposium. – M., 2002. – P.106-111.

141. Pupkov K.A. The optimization between Human and techniques in Man-Machine systems//Preprints of the IFAC-IFORS Symposium. 1974. – P.419-426

142. Singer R. N. Motor learning and human performance – an application to physical education skills – New York; London, 1975.

143. Whelan J. W. Digital voice processing overview – Proceeding IEEE National Aerospace and Electronics Conference, NAECON'79, Dayton :(USA), 1979. – P. 1304–1311.

144. Дос 9806-AN/763 Основные принципы учета человеческого фактора в руководстве по проведению проверок безопасности полетов. [Электронный ресурс]: Издание первое, 2002 г. Дос 9806-AN/763 (Издание 2002 г). Режим доступа: <http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/>

145. Safety Report 2018 [Электронный ресурс] Issued April 2019 Edition 55, Effective April 1, 2019. Режим доступа: <https://libraryonline.erau.edu/online-full-text/iata-safety-reports/IATA-Safety-Report-2018.pdf>

146. Safety Report 2019 [Электронный ресурс] Issued April 2020 Edition 56, Effective April 1, 2020. Режим доступа: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/5640.pdf>

Додаток А  
Акти впровадження результатів наукових досліджень

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
**АНТОНОВ**<sup>®</sup>

вул. Академіка Туполєва, 1, м.Київ,  
03062 Україна  
Факс: 38(044) 454-79-66  
Тел: 38(044) 454-31-49  
E-mail: [info@antonov.com](mailto:info@antonov.com)  
Код ЄДРПОУ 14307529



COMPANY  
**ANTONOV**<sup>®</sup>

вул. Akademika Tupoleva, 1, Kyiv,  
03062 Ukraine  
Fax: 38(044) 454-79-66  
Phone: 38(044) 454-31-49  
E-mail: [info@antonov.com](mailto:info@antonov.com)

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**  
результатів дисертаційної роботи

складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Благої Людмили Володимирівни «Модель функціонування системи пілот-літак при управлінні рухом на етапі посадки» використовується з метою удосконалення діючих та розроблення нових автоматизованих систем управління в частині підсистеми людини-оператора, як невід'ємної складової будь-якої автоматизованої системи управління.

**Вид результату, що впроваджено:**

Параметрично і функціонально пов'язані математичні моделі функціонування ергатичної моделі пілот-літак: стохастична математична модель діяльності ергатичної системи пілот-літак на етапі заходу на посадку як системи масового обслуговування та стохастична математична модель детермінованих станів інтелектуальної діяльності пілота при пілотуванні літаком.

**Ефект від впровадження:**

- розроблені моделі дозволяють обґрунтувати доцільність використання отриманих даних при розробці методик підвищення безпеки польотів на етапі заходу на посадку при взаємодії пілота та засобів відображення інформації;
- моделі функціонування впроваджено в технологічний процес розробки та модернізації інформаційних інтерфейсів пілота на борту літака;
- дані, отримані завдяки моделюванню використовуються для програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем.

Т.в.о. директора АТП ДП «Антонів»



Верстюк О.О.

Виконавець  
Executor

тел.  
phone

018444 \* ЛІИ



## Продовж. дод. А

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційної роботи

Даним актом підтверджується те, що результати дисертаційної роботи Благої Людмили Володимирівни «Модель функціонування системи пілот-літак при управлінні рухом на етапі посадки» впроваджені в Авіакомпанії «Украерорух» Державного підприємства обслуговування повітряного руху України.

#### 1. Вид результату, що впроваджено:

- 1.1. Стохастична математична модель безпосередньої взаємодії пілота з літаком на етапі заходу на посадку в складних умовах польоту, що спрямована на реалізацію граничних гарантованих динамічних характеристик процесу управління літаком.
- 1.2. Стохастична математична модель детермінованих станів інтелектуальної діяльності пілота при пілотуванні літаком та коректного врахування жорсткого реального масштабу часу при гострому його браку при прийнятті та виконанні рішень по забезпеченню безпеки системно-керованого польоту.
- 1.3. Технічне програмне рішення щодо практичної реалізації віртуальних концептуальних рішень управління літаком у комп'ютерно-комунікаційному середовищі в складних умовах (Рішення Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір – комп'ютерна програма «Модель діяльності людини-оператора як система масового обслуговування» №101621 від 04.01.2021р.).

#### 2. Ефект від впровадження розроблених математичних моделей:

- 2.1. Підвищення безпеки польотів шляхом моделювання позаштатних ситуацій, виявлення критичних параметрів діяльності ергатичної системи пілот-літак та розробки ефективних заходів щодо підвищення безпеки польотів на етапі заходу на посадку при взаємодії пілота та диспетчера.
- 2.2. Проведення оцінки готовності пілота до дій в позаштатних ситуаціях в польоті та розроблення заходів щодо удосконалення методології навчання пілотів та підвищення їх кваліфікації.

ДИРЕКТОР АВІАКОМПАНІЇ  
«УКРАЕРОРУХ»  
Д. Ю. ЗІАТДІНОВ



Закінч. дод. А

ПОГОДЖЕНО  
Проректор з навчальної роботи  
Національного авіаційного університету  
А.В. Полухін

«17» 05 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи  
Національного авіаційного університету  
С.О. Романенко

«17» 05 2021 р.

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ  
результатів науково-дослідної роботи  
в навчальний процес

Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися: декан факультету аеронавігації, телекомунікацій та телекомунікацій Завгородній С.О., завідувач кафедри аеронавігаційних систем Ларін В.Ю., склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи Благої Людмили Володимирівни впроваджено у науково-навчальний процес Національного авіаційного університету, кафедри аеронавігаційних систем.

Найменування об'єкту впровадження	Форма впровадження
Курси лекцій та циклів лабораторних робіт з дисциплін кафедри аеронавігаційних систем	Матеріали дисертаційної роботи з питань розробки стохастичних математичних моделей впроваджено в навчальний процес при підготовці курсів лекцій та циклів лабораторних робіт з дисциплін «Теорія управління динамічними системами»: теми «Аналіз математичних моделей діяльності людини в автоматизованих системах управління», «Процес створення математичної моделі», «Застосування математичного моделювання для опису динамічних процесів», «Створення моделей СМО», з дисципліни «Можливості та обмеження людини (Людські чинники)»: теми «Зв'язок в людино-машинній системі між всіма складовими», «Дослідження діяльності людини-оператора в аеронавігаційній системі». Впровадження зазначених науково-навчальних матеріалів дозволило перейти до поглибленого вивчення студентами вищезазначеної дисципліни.
НДР №0113U000089 «Розробка комплексу оцінювання та прогнозування ситуації в соціотехнічних аеронавігаційних системах за умов ризику та невизначеності»	Звіт про науково-дослідну роботу №0113U000089 «Розробка комплексу оцінювання та прогнозування ситуації в соціотехнічних аеронавігаційних системах за умов ризику та невизначеності» в частині розробки моделі діяльності людини-оператора в авіаційній соціотехнічній системі, визначення статистичних помилок людини-оператора аеронавігаційної системи, визначення інформаційної взаємодії людини-оператора з технічними засобами по обміну інформацією.

Завідувач кафедри аеронавігаційних систем

В.Ю. Ларін

Декан ФАЕТ

С.О. Завгородній

**Додаток Б**  
**Математична модель складових системи «пілот-літак»**

$$\frac{dP_1^\xi}{dt} = \lambda_{2,1}^\xi P_2 + \lambda_{3,1}^\xi P_3 + \lambda_{5,1}^\xi P_5 + \lambda_{9,1}^\xi P_9 + \lambda_{17,1}^\xi P_{17} - \left( \mu_{1,2}^\xi + \mu_{1,3}^\xi + \mu_{1,5}^\xi + \mu_{1,9}^\xi + \mu_{1,17}^\xi \right) P_1$$

$$\frac{dP_2^\xi}{dt} = \lambda_{1,2}^\xi P_1 + \lambda_{4,2}^\xi P_4 + \lambda_{6,2}^\xi P_6 + \lambda_{10,2}^\xi P_{10} + \lambda_{18,2}^\xi P_{18} - \left( \mu_{2,1}^\xi + \mu_{2,4}^\xi + \mu_{2,6}^\xi + \mu_{2,10}^\xi + \mu_{2,18}^\xi \right) P_2$$

$$\frac{dP_3^{JA}}{dt} = \lambda_{1,3}^{JA} P_1 + \lambda_{7,3}^{JA} P_7 + \lambda_{19,3}^{JA} P_{19} + \lambda_{11,3}^{JA} P_{11} + \lambda_{4,3}^{JA} P_4 - \left( \mu_{3,1}^\xi + \mu_{3,7}^\xi + \mu_{3,19}^\xi + \mu_{3,11}^\xi + \mu_{3,4}^\xi \right) P_3$$

$$\frac{dP_4^\xi}{dt} = \lambda_{3,4}^\xi P_3 + \lambda_{8,4}^\xi P_4 + \lambda_{20,4}^\xi P_{20} + \lambda_{12,4}^\xi P_{12} + \lambda_{2,4}^\xi P_2 - \left( \mu_{4,3}^\xi + \mu_{4,8}^\xi + \mu_{4,20}^\xi + \mu_{4,12}^\xi + \mu_{4,2}^\xi \right) P_4$$

$$\frac{dP_5^\xi}{dt} = \lambda_{1,5}^\xi P_1 + \lambda_{7,5}^\xi P_7 + \lambda_{6,5}^\xi P_6 + \lambda_{13,5}^\xi P_{13} + \lambda_{21,5}^\xi P_{21} - \left( \mu_{5,1}^\xi + \mu_{5,7}^\xi + \mu_{5,6}^\xi + \mu_{5,13}^\xi + \mu_{5,21}^\xi \right) P_5$$

$$\frac{dP_6^\xi}{dt} = \lambda_{8,6}^\xi P_8 + \lambda_{5,6}^\xi P_5 + \lambda_{22,6}^\xi P_{22} + \lambda_{14,6}^\xi P_{14} + \lambda_{2,6}^\xi P_2 - \left( \mu_{6,8}^\xi + \mu_{6,5}^\xi + \mu_{6,22}^\xi + \mu_{6,14}^\xi + \mu_{6,2}^\xi \right) P_6$$

$$\frac{dP_7^\xi}{dt} = \lambda_{5,7}^\xi P_5 + \lambda_{23,7}^\xi P_{23} + \lambda_{15,7}^\xi P_{15} + \lambda_{8,7}^\xi P_8 + \lambda_{3,7}^\xi P_3 - \left( \mu_{7,5}^\xi + \mu_{7,23}^\xi + \mu_{7,15}^\xi + \mu_{7,8}^\xi + \mu_{7,3}^\xi \right) P_7$$

$$\frac{dP_8^\xi}{dt} = \lambda_{7,8}^\xi P_7 + \lambda_{16,8}^\xi P_{16} + \lambda_{24,8}^\xi P_{24} + \lambda_{6,8}^\xi P_6 + \lambda_{4,8}^\xi P_4 - \left( \mu_{8,7}^\xi + \mu_{8,16}^\xi + \mu_{8,24}^\xi + \mu_{8,6}^\xi + \mu_{8,4}^\xi \right) P_8$$

$$\frac{dP_9^\xi}{dt} = \lambda_{1,9}^\xi P_1 + \lambda_{13,9}^\xi P_{13} + \lambda_{10,9}^\xi P_{10} + \lambda_{11,9}^\xi P_{11} + \lambda_{25,9}^\xi P_{25} - \left( \mu_{9,1}^\xi + \mu_{9,13}^\xi + \mu_{9,10}^\xi + \mu_{9,11}^\xi + \mu_{9,25}^\xi \right) P_9$$

$$\frac{dP_{10}^\xi}{dt} = \lambda_{26,10}^\xi P_{26} + \lambda_{9,10}^\xi P_9 + \lambda_{2,10}^\xi P_2 + \lambda_{12,10}^\xi P_{12} + \lambda_{14,10}^\xi P_{14} - \left( \mu_{10,26}^\xi + \mu_{10,9}^\xi + \mu_{10,2}^\xi + \mu_{10,12}^\xi + \mu_{10,14}^\xi \right) P_{10}$$

$$\frac{dP_{11}^\xi}{dt} = \lambda_{27,11}^\xi P_{27} + \lambda_{9,11}^\xi P_9 + \lambda_{3,11}^\xi P_3 + \lambda_{12,11}^\xi P_{12} + \lambda_{15,11}^\xi P_{15} - \left( \mu_{11,27}^\xi + \mu_{11,9}^\xi + \mu_{11,3}^\xi + \mu_{11,12}^\xi + \mu_{11,15}^\xi \right) P_{11}$$

$$\frac{dP_{12}^\xi}{dt} = \lambda_{4,12}^\xi P_4 + \lambda_{28,12}^\xi P_{28} + \lambda_{10,12}^\xi P_{10} + \lambda_{11,12}^\xi P_{11} + \lambda_{16,12}^\xi P_{16} - \left( \mu_{12,4}^\xi + \mu_{12,28}^\xi + \mu_{12,10}^\xi + \mu_{12,11}^\xi + \mu_{12,16}^\xi \right) P_{12}$$

$$\frac{dP_{13}^\xi}{dt} = \lambda_{5,13}^\xi P_5 + \lambda_{9,13}^\xi P_9 + \lambda_{29,13}^\xi P_{29} + \lambda_{14,13}^\xi P_{14} + \lambda_{15,13}^\xi P_{15} - \left( \mu_{13,5}^\xi + \mu_{13,9}^\xi + \mu_{13,29}^\xi + \mu_{13,14}^\xi + \mu_{13,15}^\xi \right) P_{13}$$

$$\frac{dP_{14}^\xi}{dt} = \lambda_{16,14}^\xi P_{16} + \lambda_{30,14}^\xi P_{30} + \lambda_{10,14}^\xi P_{10} + \lambda_{6,14}^\xi P_6 + \lambda_{13,14}^\xi P_{13} - \left( \mu_{14,16}^\xi + \mu_{14,30}^\xi + \mu_{14,10}^\xi + \mu_{14,6}^\xi + \mu_{14,13}^\xi \right) P_{14}$$

$$\frac{dP_{15}^\xi}{dt} = \lambda_{16,15}^\xi P_{16} + \lambda_{31,15}^\xi P_{31} + \lambda_{11,15}^\xi P_{11} + \lambda_{7,15}^\xi P_7 + \lambda_{13,15}^\xi P_{13} - \left( \mu_{15,16}^\xi + \mu_{15,31}^\xi + \mu_{15,11}^\xi + \mu_{15,7}^\xi + \mu_{15,13}^\xi \right) P_{15}$$

$$\frac{dP_{16}^\xi}{dt} = \lambda_{32,16}^\xi P_{32} + \lambda_{8,16}^\xi P_8 + \lambda_{12,16}^\xi P_{12} + \lambda_{14,16}^\xi P_{14} + \lambda_{15,16}^\xi P_{15} - \left( \mu_{16,32}^\xi + \mu_{16,8}^\xi + \mu_{16,12}^\xi + \mu_{16,14}^\xi + \mu_{16,15}^\xi \right) P_{16}$$



## Закінч. дод. Б

$$\begin{aligned} \frac{dP_{18}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{17,18}^{\xi} P_{17} + \lambda_{26,18}^{\xi} P_{26} + \lambda_{22,18}^{\xi} P_{22} + \lambda_{20,18}^{\xi} P_{20} + \lambda_{2,18}^{\xi} P_2 - \left( \mu_{18,17}^{\xi} + \mu_{18,26}^{\xi} + \mu_{18,22}^{\xi} + \mu_{18,20}^{\xi} + \mu_{18,2}^{\xi} \right) P_{18} \\ \frac{dP_{19}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{23,19}^{\xi} P_{23} + \lambda_{27,19}^{\xi} P_{27} + \lambda_{17,19}^{\xi} P_{17} + \lambda_{3,19}^{\xi} P_3 + \lambda_{20,19}^{\xi} P_{20} - \left( \mu_{19,23}^{\xi} + \mu_{19,27}^{\xi} + \mu_{19,17}^{\xi} + \mu_{19,3}^{\xi} + \mu_{19,20}^{\xi} \right) P_{19} \\ \frac{dP_{20}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{24,20}^{\xi} P_{24} + \lambda_{19,20}^{\xi} P_{19} + \lambda_{28,20}^{\xi} P_{28} + \lambda_{18,20}^{\xi} P_{18} + \lambda_{4,20}^{\xi} P_4 - \left( \mu_{20,24}^{\xi} + \mu_{20,19}^{\xi} + \mu_{20,28}^{\xi} + \mu_{20,18}^{\xi} + \mu_{20,4}^{\xi} \right) P_{20} \\ \frac{dP_{21}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{17,21}^{\xi} P_{17} + \lambda_{5,21}^{\xi} P_5 + \lambda_{22,21}^{\xi} P_{22} + \lambda_{23,21}^{\xi} P_{23} + \lambda_{29,21}^{\xi} P_{29} - \left( \mu_{21,17}^{\xi} + \mu_{21,5}^{\xi} + \mu_{21,22}^{\xi} + \mu_{21,23}^{\xi} + \mu_{21,29}^{\xi} \right) P_{21} \\ \frac{dP_{22}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{30,22}^{\xi} P_{30} + \lambda_{21,22}^{\xi} P_{21} + \lambda_{6,22}^{\xi} P_6 + \lambda_{18,22}^{\xi} P_{18} + \lambda_{24,22}^{\xi} P_{24} - \left( \mu_{22,30}^{\xi} + \mu_{22,21}^{\xi} + \mu_{22,6}^{\xi} + \mu_{22,18}^{\xi} + \mu_{22,24}^{\xi} \right) P_{22} \\ \frac{dP_{23}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{31,23}^{\xi} P_{31} + \lambda_{21,23}^{\xi} P_{21} + \lambda_{7,23}^{\xi} P_7 + \lambda_{19,23}^{\xi} P_{19} + \lambda_{24,23}^{\xi} P_{24} - \left( \mu_{23,31}^{\xi} + \mu_{23,21}^{\xi} + \mu_{23,7}^{\xi} + \mu_{23,19}^{\xi} + \mu_{23,24}^{\xi} \right) P_{23} \\ \frac{dP_{24}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{32,24}^{\xi} P_{32} + \lambda_{23,24}^{\xi} P_{23} + \lambda_{22,24}^{\xi} P_{22} + \lambda_{8,24}^{\xi} P_8 + \lambda_{20,24}^{\xi} P_{20} - \left( \mu_{24,32}^{\xi} + \mu_{24,23}^{\xi} + \mu_{24,22}^{\xi} + \mu_{24,8}^{\xi} + \mu_{24,20}^{\xi} \right) P_{24} \\ \frac{dP_{25}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{9,25}^{\xi} P_9 + \lambda_{17,25}^{\xi} P_{17} + \lambda_{26,25}^{\xi} P_{26} + \lambda_{27,25}^{\xi} P_{27} + \lambda_{29,25}^{\xi} P_{29} - \left( \mu_{25,9}^{\xi} + \mu_{25,17}^{\xi} + \mu_{25,26}^{\xi} + \mu_{25,27}^{\xi} + \mu_{25,29}^{\xi} \right) P_{25} \\ \frac{dP_{26}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{25,26}^{\xi} P_{25} + \lambda_{10,26}^{\xi} P_{10} + \lambda_{18,26}^{\xi} P_{18} + \lambda_{28,26}^{\xi} P_{28} + \lambda_{30,26}^{\xi} P_{30} - \left( \mu_{26,25}^{\xi} + \mu_{26,10}^{\xi} + \mu_{26,18}^{\xi} + \mu_{26,28}^{\xi} + \mu_{26,30}^{\xi} \right) P_{26} \\ \frac{dP_{27}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{25,27}^{\xi} P_{25} + \lambda_{11,27}^{\xi} P_{11} + \lambda_{19,27}^{\xi} P_{19} + \lambda_{31,27}^{\xi} P_{31} + \lambda_{28,27}^{\xi} P_{28} - \left( \mu_{27,25}^{\xi} + \mu_{27,11}^{\xi} + \mu_{27,19}^{\xi} + \mu_{27,31}^{\xi} + \mu_{27,28}^{\xi} \right) P_{27} \\ \frac{dP_{28}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{32,28}^{\xi} P_{32} + \lambda_{26,28}^{\xi} P_{26} + \lambda_{27,28}^{\xi} P_{27} + \lambda_{12,28}^{\xi} P_{12} + \lambda_{20,28}^{\xi} P_{20} - \left( \mu_{28,32}^{\xi} + \mu_{28,26}^{\xi} + \mu_{28,27}^{\xi} + \mu_{28,12}^{\xi} + \mu_{28,20}^{\xi} \right) P_{28} \\ \frac{dP_{29}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{31,29}^{\xi} P_{31} + \lambda_{30,29}^{\xi} P_{30} + \lambda_{25,29}^{\xi} P_{25} + \lambda_{21,29}^{\xi} P_{21} + \lambda_{13,29}^{\xi} P_{13} - \left( \mu_{29,31}^{\xi} + \mu_{29,30}^{\xi} + \mu_{29,25}^{\xi} + \mu_{29,21}^{\xi} + \mu_{29,13}^{\xi} \right) P_{29} \\ \frac{dP_{30}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{26,30}^{\xi} P_{26} + \lambda_{14,30}^{\xi} P_{14} + \lambda_{22,30}^{\xi} P_{22} + \lambda_{29,30}^{\xi} P_{29} + \lambda_{32,30}^{\xi} P_{32} - \left( \mu_{30,26}^{\xi} + \mu_{30,14}^{\xi} + \mu_{30,22}^{\xi} + \mu_{30,29}^{\xi} + \mu_{30,32}^{\xi} \right) P_{30} \\ \frac{dP_{31}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{32,31}^{\xi} P_{32} + \lambda_{27,31}^{\xi} P_{27} + \lambda_{29,31}^{\xi} P_{29} + \lambda_{15,31}^{\xi} P_{15} + \lambda_{23,31}^{\xi} P_{23} - \left( \mu_{31,32}^{\xi} + \mu_{31,27}^{\xi} + \mu_{31,29}^{\xi} + \mu_{31,15}^{\xi} + \mu_{31,23}^{\xi} \right) P_{31} \\ \frac{dP_{32}^{\xi}}{dt} &= \lambda_{30,32}^{\xi} P_{30} + \lambda_{28,32}^{\xi} P_{28} + \lambda_{16,32}^{\xi} P_{16} + \lambda_{31,32}^{\xi} P_{31} + \lambda_{24,32}^{\xi} P_{24} - \left( \mu_{32,30}^{\xi} + \mu_{32,28}^{\xi} + \mu_{32,16}^{\xi} + \mu_{32,31}^{\xi} + \mu_{32,24}^{\xi} \right) P_{32} \end{aligned}$$

**Додаток В**  
**Код програми «Модель діяльності людини-оператора як система масового обслуговування»**

```
clc
clear
% Інтенсивності переходов для моделі ч-о
ly(3,7)=0.10638298;ly(4,8)=0.10638298;ly(5,7)=0.10638298;ly(6,8)=0.10638298;ly(11,
15)=0.10638298;ly(13,15)=0.10638298;ly(19,23)=0.10638298;ly(21,23)=0.10638298;
ly(1,2)=0.05714286;ly(1,3)=0.05714286;ly(1,5)=0.05714286;ly(1,9)=0.05714286;ly(1,1
7)=0.05714286;ly(10,26)=0.05714286;ly(12,28)=0.05714286;ly(14,30)=0.05714286;
ly(18,26)=0.05714286;ly(20,28)=0.05714286;ly(22,30)=0.05714286;ly(25,26)=0.0571428
6;ly(27,28)=0.05714286;ly(29,30)=0.05714286;
ly(2,10)=0.06993007;ly(2,18)=0.06993007;ly(4,12)=0.06993007;ly(4,20)=0.06993007;ly
(6,14)=0.06993007;ly(6,22)=0.06993007;ly(10,14)=0.06993007;
ly(11,27)=0.06993007;ly(13,14)=0.06993007;ly(18,20)=0.06993007;ly(18,22)=0.0699300
7;ly(25,27)=0.06993007;ly(25,29)=0.06993007;
ly(2,4)=0.12658228;ly(2,6)=0.12658228;ly(3,4)=0.12658228;ly(3,11)=0.12658228;ly(3,
19)=0.12658228;ly(5,6)=0.12658228;
ly(5,13)=0.12658228;ly(5,21)=0.12658228;ly(9,11)=0.12658228;ly(9,13)=0.12658228;ly
(17,19)=0.12658228;ly(17,21)=0.12658228;
ly(12,16)=0.6329114;ly(14,16)=0.6329114;ly(20,24)=0.6329114;ly(22,24)=0.6329114;ly
(27,31)=0.6329114;ly(29,31)=0.6329114;
ly(9,10)=0.09009009;ly(9,25)=0.09009009;ly(10,12)=0.09009009;ly(11,12)=0.09009009;
ly(13,29)=0.09009009;ly(17,18)=0.09009009;
ly(17,25)=0.09009009;ly(19,20)=0.09009009;ly(19,27)=0.09009009;ly(21,22)=0.0900900
9;ly(21,29)=0.09009009;
ly(8,16)=0.07092199;ly(15,16)=0.07092199;ly(15,31)=0.07092199;ly(23,24)=0.07092199
;ly(23,31)=0.07092199;
ly(7,8)=0.09174312;ly(7,15)=0.09174312;ly(7,23)=0.09174312;
ly(16,32)=0.04878049;ly(24,32)=0.04878049;ly(31,32)=0.04878049;
ly(26,28)=0.04830918;ly(26,30)=0.04830918;
ly(28,32)=0.04504505;ly(30,32)=0.04504505;
ly(8,24)=0.05780347;
ly(7,3)=0.10638298;ly(7,5)=0.10638298;ly(8,4)=0.10638298;ly(8,6)=0.10638298;ly(15,
11)=0.10638298;ly(15,13)=0.10638298;ly(23,19)=0.10638298;ly(23,21)=0.10638298;
ly(2,1)=0.05714286;ly(3,1)=0.05714286;ly(5,1)=0.05714286;ly(9,1)=0.05714286;ly(17,
1)=0.05714286;ly(26,10)=0.05714286;ly(28,12)=0.05714286;ly(30,14)=0.05714286;
ly(26,18)=0.05714286;ly(28,20)=0.05714286;ly(30,22)=0.05714286;ly(26,25)=0.0571428
6;ly(28,27)=0.05714286;ly(30,29)=0.05714286;
ly(10,2)=0.06993007;ly(18,2)=0.06993007;ly(12,4)=0.06993007;ly(20,4)=0.06993007;ly
(14,6)=0.06993007;ly(22,6)=0.06993007;ly(14,10)=0.06993007;
ly(27,11)=0.06993007;ly(14,13)=0.06993007;ly(20,18)=0.06993007;ly(22,18)=0.0699300
7;ly(27,25)=0.06993007;ly(29,25)=0.06993007;
ly(4,2)=0.12658228;ly(6,2)=0.12658228;ly(4,3)=0.12658228;ly(11,3)=0.12658228;ly(19
,3)=0.12658228;ly(6,5)=0.12658228;
ly(13,5)=0.12658228;ly(21,5)=0.12658228;ly(11,9)=0.12658228;ly(13,9)=0.12658228;ly
(19,17)=0.12658228;ly(21,17)=0.12658228;
ly(16,12)=0.6329114;ly(16,14)=0.6329114;ly(24,20)=0.6329114;ly(24,22)=0.6329114;ly
(31,27)=0.6329114;ly(31,29)=0.6329114;
ly(10,9)=0.09009009;ly(25,9)=0.09009009;ly(12,10)=0.09009009;ly(12,11)=0.09009009;
ly(29,13)=0.09009009;ly(18,17)=0.09009009;
ly(25,17)=0.09009009;ly(20,19)=0.09009009;ly(27,19)=0.09009009;ly(22,21)=0.0900900
9;ly(29,21)=0.09009009;
ly(16,8)=0.07092199;ly(16,15)=0.07092199;ly(31,15)=0.07092199;ly(24,23)=0.07092199
;ly(31,23)=0.07092199;
ly(8,7)=0.09174312;ly(15,7)=0.09174312;ly(23,7)=0.09174312;
ly(32,16)=0.04878049;ly(32,24)=0.04878049;ly(32,31)=0.04878049;
ly(28,26)=0.04830918;ly(30,26)=0.04830918;
ly(32,28)=0.04504505;ly(32,30)=0.04504505;
```

## Продовж. дод. В

```
ly(24,8)=0.05780347;
% Интенсивности переходов для модели ЛА
T_teta=0.5;T_H=0.1;T_V=0.2;T_phi=1.0;T_gamma=0.35;
% Начальные условия
Pman_1(1)=1; Pman_2(1)=0; Pman_3(1)=0; Pman_4(1)=0; Pman_5(1)=0; Pman_6(1)=0;
Pman_7(1)=0; Pman_8(1)=0; Pman_9(1)=0; Pman_10(1)=0; Pman_11(1)=0; Pman_12(1)=0;
Pman_13(1)=0; Pman_14(1)=0; Pman_15(1)=0; Pman_16(1)=0; Pman_17(1)=0;
Pman_18(1)=0;
Pman_19(1)=0; Pman_20(1)=0; Pman_21(1)=0; Pman_22(1)=0; Pman_23(1)=0;
Pman_24(1)=0;
Pman_25(1)=0; Pman_26(1)=0; Pman_27(1)=0; Pman_28(1)=0; Pman_29(1)=0;
Pman_30(1)=0;
Pman_31(1)=0; Pman_32(1)=0;
dt=0.1;
Pla_SET1=1; Pla_SET2=0; Pla_SET3=0; Pla_SET4=0; Pla_SET5=0; Pla_SET6=0; Pla_SET7=0;
Pla_SET8=0; Pla_SET9=0; Pla_SET10=0; Pla_SET11=0; Pla_SET12=0; Pla_SET13=0;
Pla_SET14=0;
Pla_SET15=0; Pla_SET16=0; Pla_SET17=0; Pla_SET18=0; Pla_SET19=0; Pla_SET20=0;
Pla_SET21=0;
Pla_SET22=0; Pla_SET23=0; Pla_SET24=0; Pla_SET25=0; Pla_SET26=0; Pla_SET27=0;
Pla_SET28=0;
Pla_SET29=0; Pla_SET30=0; Pla_SET31=0; Pla_SET32=0;
    Pla_1(1)=0; Pla_2(1)=1; Pla_3(1)=0; Pla_4(1)=0; Pla_5(1)=0; Pla_6(1)=0;
    Pla_7(1)=0; Pla_8(1)=0; Pla_9(1)=0; Pla_10(1)=0; Pla_11(1)=0; Pla_12(1)=0;
    Pla_13(1)=0; Pla_14(1)=0; Pla_15(1)=0; Pla_16(1)=0; Pla_17(1)=0; Pla_18(1)=0;
    Pla_19(1)=0; Pla_20(1)=0; Pla_21(1)=0; Pla_22(1)=0; Pla_23(1)=0; Pla_24(1)=0;
    Pla_25(1)=0; Pla_26(1)=0; Pla_27(1)=0; Pla_28(1)=0; Pla_29(1)=0; Pla_30(1)=0;
    Pla_31(1)=0; Pla_32(1)=0;
    T(1)=0;
mu(1,2)=rand(1);mu(1,3)=rand(1);mu(1,5)=rand(1);mu(1,9)=rand(1);mu(1,17)=rand(1);
mu(2,4)=rand(1);mu(2,6)=rand(1);mu(2,10)=rand(1);mu(2,18)=rand(1);
mu(3,4)=rand(1);mu(3,7)=rand(1);mu(3,11)=rand(1);mu(3,19)=rand(1);
mu(5,6)=rand(1);mu(5,7)=rand(1);mu(5,13)=rand(1);mu(5,21)=rand(1);
mu(9,10)=rand(1);mu(9,11)=rand(1);mu(9,13)=rand(1);mu(9,25)=rand(1);
mu(17,18)=rand(1);mu(17,19)=rand(1);mu(17,21)=rand(1);mu(17,25)=rand(1);
mu(4,8)=rand(1);mu(4,12)=rand(1);mu(4,20)=rand(1);
mu(6,8)=rand(1);mu(6,14)=rand(1);mu(6,22)=rand(1);
mu(7,8)=rand(1);mu(7,15)=rand(1);mu(7,23)=rand(1);
mu(10,12)=rand(1);mu(10,14)=rand(1);mu(10,26)=rand(1);
mu(11,12)=rand(1);mu(11,15)=rand(1);mu(11,27)=rand(1);
mu(13,14)=rand(1);mu(13,15)=rand(1);mu(13,29)=rand(1);
mu(18,20)=rand(1);mu(18,22)=rand(1);mu(18,26)=rand(1);
mu(19,20)=rand(1);mu(19,23)=rand(1);mu(19,27)=rand(1);
mu(21,22)=rand(1);mu(21,23)=rand(1);mu(21,29)=rand(1);
mu(25,26)=rand(1);mu(25,27)=rand(1);mu(25,29)=rand(1);
mu(8,16)=rand(1);mu(8,24)=rand(1);
mu(12,16)=rand(1);mu(12,28)=rand(1);
mu(14,16)=rand(1);mu(14,30)=rand(1);
mu(15,16)=rand(1);mu(15,31)=rand(1);
mu(20,24)=rand(1);mu(20,28)=rand(1);
mu(22,24)=rand(1);mu(22,30)=rand(1);
mu(23,24)=rand(1);mu(23,31)=rand(1);
mu(26,28)=rand(1);mu(26,30)=rand(1);
mu(27,28)=rand(1);mu(27,31)=rand(1);
mu(29,30)=rand(1);mu(29,31)=rand(1);
mu(16,32)=rand(1);
mu(24,32)=rand(1);
mu(28,32)=rand(1);
mu(30,32)=rand(1);
```

## Продовж. дод. В

```

mu(31,32)=rand(1);
K_teta=randi([1,7],1,1);
K_H=randi([1,30],1,1);
K_V=randi([1,50],1,1);
K_phi=randi([1,20],1,1);
K_gamma=randi([1,30],1,1);
% mu(2,1)=1/(T_teta*K_teta);

% Уравнения Колмагорова
N=100;
for i=2:N
    % Модель ч-о
    Pman_1(i)= Pman_1(i-1)+dt*(ly(2,1)*Pman_2(i-1)+ly(3,1)*Pman_3(i-1)+ly(5,1)*Pman_5(i-1)+ly(9,1)*Pman_9(i-1)+ly(17,1)*Pman_17(i-1)...
        -(ly(1,2)+ly(1,3)+ly(1,5)+ly(1,9)+ly(1,17))*Pman_1(i-1));
    Pman_2(i)= Pman_2(i-1)+dt*(ly(1,2)*Pman_1(i-1)+ly(4,2)*Pman_4(i-1)+ly(6,2)*Pman_6(i-1)+ly(10,2)*Pman_10(i-1)+ly(18,2)*Pman_18(i-1)...
        -(ly(2,1)+ly(2,4)+ly(2,6)+ly(2,10)+ly(2,18))*Pman_2(i-1));
    Pman_3(i)= Pman_3(i-1)+dt*(ly(1,3)*Pman_1(i-1)+ly(4,3)*Pman_4(i-1)+ly(7,3)*Pman_7(i-1)+ly(11,3)*Pman_11(i-1)+ly(19,3)*Pman_19(i-1)...
        -(ly(3,1)+ly(3,4)+ly(3,7)+ly(3,11)+ly(3,19))*Pman_3(i-1));
    Pman_4(i)= Pman_4(i-1)+dt*(ly(2,4)*Pman_2(i-1)+ly(3,4)*Pman_3(i-1)+ly(8,4)*Pman_8(i-1)+ly(12,4)*Pman_12(i-1)+ly(20,4)*Pman_20(i-1)...
        -(ly(4,2)+ly(4,3)+ly(4,8)+ly(4,12)+ly(4,20))*Pman_4(i-1));
    Pman_5(i)= Pman_5(i-1)+dt*(ly(1,5)*Pman_1(i-1)+ly(6,5)*Pman_6(i-1)+ly(7,5)*Pman_7(i-1)+ly(13,5)*Pman_13(i-1)+ly(21,5)*Pman_21(i-1)...
        -(ly(5,1)+ly(5,6)+ly(5,7)+ly(5,13)+ly(5,21))*Pman_5(i-1));
    Pman_6(i)= Pman_6(i-1)+dt*(ly(2,6)*Pman_2(i-1)+ly(5,6)*Pman_5(i-1)+ly(8,6)*Pman_8(i-1)+ly(14,6)*Pman_14(i-1)+ly(22,6)*Pman_22(i-1)...
        -(ly(6,2)+ly(6,5)+ly(6,8)+ly(6,14)+ly(6,22))*Pman_6(i-1));
    Pman_7(i)= Pman_7(i-1)+dt*(ly(3,7)*Pman_3(i-1)+ly(5,7)*Pman_5(i-1)+ly(8,7)*Pman_8(i-1)+ly(15,7)*Pman_15(i-1)+ly(23,7)*Pman_23(i-1)...
        -(ly(7,3)+ly(7,5)+ly(7,8)+ly(7,15)+ly(7,23))*Pman_7(i-1));
    Pman_8(i)= Pman_8(i-1)+dt*(ly(4,8)*Pman_4(i-1)+ly(6,8)*Pman_6(i-1)+ly(7,8)*Pman_7(i-1)+ly(16,8)*Pman_16(i-1)+ly(24,8)*Pman_24(i-1)...
        -(ly(8,4)+ly(8,6)+ly(8,7)+ly(8,16)+ly(8,24))*Pman_8(i-1));
    Pman_9(i)= Pman_9(i-1)+dt*(ly(1,9)*Pman_1(i-1)+ly(10,9)*Pman_10(i-1)+ly(11,9)*Pman_11(i-1)+ly(13,9)*Pman_13(i-1)+ly(25,9)*Pman_25(i-1)...
        -(ly(9,1)+ly(9,10)+ly(9,11)+ly(9,13)+ly(9,25))*Pman_9(i-1));
    Pman_10(i)= Pman_10(i-1)+dt*(ly(2,10)*Pman_2(i-1)+ly(9,10)*Pman_9(i-1)+ly(12,10)*Pman_12(i-1)+ly(14,10)*Pman_14(i-1)+ly(26,10)*Pman_26(i-1)...
        -(ly(10,2)+ly(10,9)+ly(10,12)+ly(10,14)+ly(10,26))*Pman_10(i-1));
    Pman_11(i)= Pman_11(i-1)+dt*(ly(3,11)*Pman_3(i-1)+ly(9,11)*Pman_9(i-1)+ly(12,11)*Pman_12(i-1)+ly(15,11)*Pman_15(i-1)+ly(27,11)*Pman_27(i-1)...
        -(ly(11,3)+ly(11,9)+ly(11,12)+ly(11,15)+ly(11,27))*Pman_11(i-1));
    Pman_12(i)= Pman_12(i-1)+dt*(ly(4,12)*Pman_4(i-1)+ly(10,12)*Pman_10(i-1)+ly(11,12)*Pman_11(i-1)+ly(16,12)*Pman_16(i-1)+ly(28,12)*Pman_28(i-1)...
        -(ly(12,4)+ly(12,10)+ly(12,11)+ly(12,16)+ly(12,28))*Pman_12(i-1));
    Pman_13(i)= Pman_13(i-1)+dt*(ly(5,13)*Pman_5(i-1)+ly(9,13)*Pman_9(i-1)+ly(14,13)*Pman_14(i-1)+ly(15,13)*Pman_15(i-1)+ly(29,13)*Pman_29(i-1)...
        -(ly(13,5)+ly(13,9)+ly(13,14)+ly(13,15)+ly(13,29))*Pman_13(i-1));
    Pman_14(i)= Pman_14(i-1)+dt*(ly(6,14)*Pman_6(i-1)+ly(10,14)*Pman_10(i-1)+ly(13,14)*Pman_13(i-1)+ly(16,14)*Pman_16(i-1)+ly(30,14)*Pman_30(i-1)...
        -(ly(14,6)+ly(14,10)+ly(14,13)+ly(14,16)+ly(14,30))*Pman_14(i-1));
    Pman_15(i)= Pman_15(i-1)+dt*(ly(7,15)*Pman_7(i-1)+ly(11,15)*Pman_11(i-1)+ly(13,15)*Pman_13(i-1)+ly(16,15)*Pman_16(i-1)+ly(31,15)*Pman_31(i-1)...
        -(ly(15,7)+ly(15,11)+ly(15,13)+ly(15,16)+ly(15,31))*Pman_15(i-1));
    Pman_16(i)= Pman_16(i-1)+dt*(ly(8,16)*Pman_8(i-1)+ly(12,16)*Pman_12(i-1)+ly(14,16)*Pman_14(i-1)+ly(15,16)*Pman_15(i-1)+ly(32,16)*Pman_32(i-1)...

```

Продовж. дод. В

```

- (ly(16,8)+ly(16,12)+ly(16,14)+ly(16,15)+ly(16,32))*Pman_16(i-1));
Pman_17(i)= Pman_17(i-1)+dt*(ly(1,17)*Pman_1(i-1)+ly(18,17)*Pman_18(i-
1)+ly(19,17)*Pman_19(i-1)+ly(21,17)*Pman_21(i-1)+ly(25,17)*Pman_25(i-1)...
- (ly(17,1)+ly(17,18)+ly(17,19)+ly(17,21)+ly(17,25))*Pman_17(i-1));
Pman_18(i)= Pman_18(i-1)+dt*(ly(2,18)*Pman_2(i-1)+ly(17,18)*Pman_17(i-
1)+ly(20,18)*Pman_20(i-1)+ly(22,18)*Pman_22(i-1)+ly(26,18)*Pman_26(i-1)...
- (ly(18,2)+ly(18,17)+ly(18,20)+ly(18,22)+ly(18,26))*Pman_18(i-1));
Pman_19(i)= Pman_19(i-1)+dt*(ly(3,19)*Pman_3(i-1)+ly(17,19)*Pman_17(i-
1)+ly(20,19)*Pman_20(i-1)+ly(23,19)*Pman_23(i-1)+ly(27,19)*Pman_27(i-1)...
- (ly(19,3)+ly(19,17)+ly(19,20)+ly(19,23)+ly(19,27))*Pman_19(i-1));
Pman_20(i)= Pman_20(i-1)+dt*(ly(4,20)*Pman_4(i-1)+ly(18,20)*Pman_18(i-
1)+ly(19,20)*Pman_19(i-1)+ly(24,20)*Pman_24(i-1)+ly(28,20)*Pman_28(i-1)...
- (ly(20,4)+ly(20,18)+ly(20,19)+ly(20,24)+ly(20,28))*Pman_20(i-1));
Pman_21(i)= Pman_21(i-1)+dt*(ly(5,21)*Pman_5(i-1)+ly(17,21)*Pman_17(i-
1)+ly(22,21)*Pman_22(i-1)+ly(23,21)*Pman_2(i-1)+ly(29,21)*Pman_29(i-1)...
- (ly(21,5)+ly(21,17)+ly(21,22)+ly(21,23)+ly(21,29))*Pman_13(i-1));
Pman_22(i)= Pman_22(i-1)+dt*(ly(6,22)*Pman_6(i-1)+ly(18,22)*Pman_18(i-
1)+ly(21,22)*Pman_21(i-1)+ly(24,22)*Pman_24(i-1)+ly(30,22)*Pman_30(i-1)...
- (ly(22,6)+ly(22,18)+ly(22,21)+ly(22,24)+ly(22,30))*Pman_22(i-1));
Pman_23(i)= Pman_23(i-1)+dt*(ly(7,23)*Pman_7(i-1)+ly(19,23)*Pman_19(i-
1)+ly(21,23)*Pman_21(i-1)+ly(24,23)*Pman_24(i-1)+ly(31,23)*Pman_31(i-1)...
- (ly(23,7)+ly(23,19)+ly(23,21)+ly(23,24)+ly(23,31))*Pman_15(i-1));
Pman_24(i)= Pman_24(i-1)+dt*(ly(8,24)*Pman_8(i-1)+ly(20,24)*Pman_20(i-
1)+ly(22,24)*Pman_22(i-1)+ly(23,24)*Pman_23(i-1)+ly(32,24)*Pman_32(i-1)...
- (ly(24,8)+ly(24,20)+ly(24,22)+ly(24,23)+ly(24,32))*Pman_24(i-1));
Pman_25(i)= Pman_25(i-1)+dt*(ly(9,25)*Pman_9(i-1)+ly(17,25)*Pman_17(i-
1)+ly(26,25)*Pman_26(i-1)+ly(27,25)*Pman_27(i-1)+ly(29,25)*Pman_29(i-1)...
- (ly(25,9)+ly(25,17)+ly(25,26)+ly(25,27)+ly(25,29))*Pman_25(i-1));
Pman_26(i)= Pman_26(i-1)+dt*(ly(10,26)*Pman_10(i-1)+ly(18,26)*Pman_18(i-
1)+ly(25,26)*Pman_25(i-1)+ly(28,26)*Pman_28(i-1)+ly(30,26)*Pman_30(i-1)...
- (ly(26,10)+ly(26,18)+ly(26,25)+ly(26,28)+ly(26,30))*Pman_26(i-1));
Pman_27(i)= Pman_27(i-1)+dt*(ly(11,27)*Pman_11(i-1)+ly(19,27)*Pman_19(i-
1)+ly(25,27)*Pman_25(i-1)+ly(28,27)*Pman_28(i-1)+ly(31,27)*Pman_31(i-1)...
- (ly(27,11)+ly(27,19)+ly(27,25)+ly(27,28)+ly(27,31))*Pman_27(i-1));
Pman_28(i)= Pman_28(i-1)+dt*(ly(12,28)*Pman_12(i-1)+ly(20,28)*Pman_20(i-
1)+ly(26,28)*Pman_26(i-1)+ly(27,28)*Pman_27(i-1)+ly(32,28)*Pman_32(i-1)-
(ly(28,12)+ly(28,20)+ly(28,26)+ly(28,27)+ly(28,32))*Pman_28(i-1));
Pman_29(i)= Pman_29(i-1)+dt*(ly(13,29)*Pman_13(i-1)+ly(21,29)*Pman_21(i-
1)+ly(25,29)*Pman_25(i-1)+ly(30,29)*Pman_30(i-1)+ly(31,29)*Pman_31(i-1)...
- (ly(29,13)+ly(29,21)+ly(29,25)+ly(29,30)+ly(29,31))*Pman_29(i-1));
Pman_30(i)= Pman_30(i-1)+dt*(ly(14,30)*Pman_14(i-1)+ly(22,30)*Pman_22(i-
1)+ly(26,30)*Pman_26(i-1)+ly(29,30)*Pman_29(i-1)+ly(32,30)*Pman_32(i-1)...
- (ly(30,14)+ly(30,22)+ly(30,26)+ly(30,29)+ly(30,32))*Pman_30(i-1));
Pman_31(i)= Pman_31(i-1)+dt*(ly(15,31)*Pman_15(i-1)+ly(23,31)*Pman_23(i-
1)+ly(27,31)*Pman_27(i-1)+ly(29,31)*Pman_29(i-1)+ly(32,31)*Pman_32(i-1)...
- (ly(31,15)+ly(31,23)+ly(31,27)+ly(31,29)+ly(31,32))*Pman_30(i-1));
Pman_32(i)= Pman_32(i-1)+dt*(ly(16,32)*Pman_16(i-1)+ly(24,32)*Pman_24(i-
1)+ly(28,32)*Pman_28(i-1)+ly(30,32)*Pman_30(i-1)+ly(31,32)*Pman_31(i-1)...
- (ly(32,16)+ly(32,24)+ly(32,28)+ly(32,30)+ly(32,31))*Pman_32(i-1));
% Модель ЛА
mu(2,1)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_2(i)*ly(1,2);
mu(3,1)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_3(i)*ly(1,3);
mu(5,1)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_5(i)*ly(1,5);
mu(9,1)=1/(T_H*K_H)+Pman_9(i)*ly(1,9);
mu(17,1)=1/(T_V*K_V)+Pman_17(i)*ly(1,17);
mu(4,2)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_4(i)*ly(2,4);
mu(4,3)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_4(i)*ly(3,4);
mu(6,2)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_6(i)*ly(2,6);
mu(6,5)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_6(i)*ly(5,6);

```

## Продовж. дод. В

```

mu(7,3)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_7(i)*ly(3,7);
mu(7,5)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_7(i)*ly(5,7);
mu(10,2)=1/(T_H*K_H)+Pman_10(i)*ly(2,10);
mu(10,9)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_10(i)*ly(9,10);
mu(11,3)=1/(T_H*K_H)+Pman_11(i)*ly(3,11);
mu(11,9)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_11(i)*ly(9,11);
mu(13,5)=1/(T_H*K_H)+Pman_13(i)*ly(5,13);
mu(13,9)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_13(i)*ly(9,13);
mu(18,2)=1/(T_V*K_V)+Pman_18(i)*ly(2,18);
mu(18,17)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_18(i)*ly(17,18);
mu(19,3)=1/(T_V*K_V)+Pman_19(i)*ly(3,19);
mu(19,17)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_19(i)*ly(17,19);
mu(21,5)=1/(T_V*K_V)+Pman_21(i)*ly(5,21);
mu(21,17)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_21(i)*ly(17,21);
mu(25,9)=1/(T_V*K_V)+Pman_25(i)*ly(9,25);
mu(25,17)=1/(T_H*K_H)+Pman_25(i)*ly(17,25);
mu(8,4)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_8(i)*ly(4,8);
mu(8,6)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_8(i)*ly(6,8);
mu(8,7)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_8(i)*ly(7,8);
mu(12,4)=1/(T_H*K_H)+Pman_12(i)*ly(4,12);
mu(12,10)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_12(i)*ly(10,12);
mu(12,11)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_12(i)*ly(11,12);
mu(14,6)=1/(T_H*K_H)+Pman_14(i)*ly(6,14);
mu(14,10)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_14(i)*ly(10,14);
mu(14,13)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_14(i)*ly(13,14);
mu(15,7)=1/(T_H*K_H)+Pman_15(i)*ly(7,15);
mu(15,11)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_15(i)*ly(11,15);
mu(15,13)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_15(i)*ly(13,15);
mu(20,4)=1/(T_V*K_V)+Pman_20(i)*ly(4,20);
mu(20,18)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_20(i)*ly(18,20);
mu(20,19)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_20(i)*ly(19,20);
mu(22,6)=1/(T_V*K_V)+Pman_22(i)*ly(6,22);
mu(22,18)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_22(i)*ly(18,22);
mu(22,21)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_22(i)*ly(21,22);
mu(23,7)=1/(T_V*K_V)+Pman_23(i)*ly(7,23);
mu(23,19)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_23(i)*ly(19,23);
mu(23,21)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_23(i)*ly(21,23);
mu(26,10)=1/(T_V*K_V)+Pman_26(i)*ly(10,26);
mu(26,18)=1/(T_H*K_H)+Pman_26(i)*ly(18,26);
mu(26,25)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_26(i)*ly(25,26);
mu(27,11)=1/(T_V*K_V)+Pman_27(i)*ly(11,27);
mu(27,19)=1/(T_H*K_H)+Pman_27(i)*ly(19,27);
mu(27,25)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_27(i)*ly(25,27);
mu(29,13)=1/(T_V*K_V)+Pman_29(i)*ly(13,29);
mu(29,21)=1/(T_H*K_H)+Pman_29(i)*ly(21,29);
mu(29,25)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_29(i)*ly(25,29);
mu(16,8)=1/(T_H*K_H)+Pman_16(i)*ly(8,16);
mu(16,12)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_16(i)*ly(12,16);
mu(16,14)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_16(i)*ly(14,16);
mu(16,15)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_16(i)*ly(15,16);
mu(24,8)=1/(T_V*K_V)+Pman_24(i)*ly(8,24);
mu(24,20)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_24(i)*ly(20,24);
mu(24,22)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_24(i)*ly(22,24);
mu(24,23)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_24(i)*ly(23,24);
mu(28,12)=1/(T_V*K_V)+Pman_28(i)*ly(12,28);
mu(28,20)=1/(T_H*K_H)+Pman_28(i)*ly(20,28);
mu(28,26)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_28(i)*ly(26,28);
mu(28,27)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_28(i)*ly(27,28);
mu(30,14)=1/(T_V*K_V)+Pman_30(i)*ly(14,30);

```

## Продовж. дод. В

```

mu(30,22)=1/(T_H*K_H)+Pman_30(i)*ly(22,30);
mu(30,26)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_30(i)*ly(26,30);
mu(30,29)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_30(i)*ly(29,30);
mu(31,15)=1/(T_V*K_V)+Pman_31(i)*ly(15,31);
mu(31,23)=1/(T_H*K_H)+Pman_31(i)*ly(23,31);
mu(31,27)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_31(i)*ly(27,32);
mu(31,29)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_31(i)*ly(29,31);
mu(32,16)=1/(T_V*K_V)+Pman_32(i)*ly(16,32);
mu(32,24)=1/(T_H*K_H)+Pman_32(i)*ly(24,32);
mu(32,28)=1/(T_teta*K_teta)+Pman_32(i)*ly(28,32);
mu(32,30)=1/(T_gamma*K_gamma)+Pman_32(i)*ly(30,32);
mu(32,31)=1/(T_phi*K_phi)+Pman_32(i)*ly(31,32);
Pla_1(i)= Pla_1(i-1)+dt*(mu(2,1)*Pla_2(i-1)+mu(3,1)*Pla_3(i-
1)+mu(5,1)*Pla_5(i-1)+mu(9,1)*Pla_9(i-1)+mu(17,1)*Pla_17(i-1)...
-(mu(1,2)+mu(1,3)+mu(1,5)+mu(1,9)+mu(1,17))*Pla_1(i-1));
Pla_2(i)= Pla_2(i-1)+dt*(mu(1,2)*Pla_1(i-1)+mu(4,2)*Pla_4(i-
1)+mu(6,2)*Pla_6(i-1)+mu(10,2)*Pla_10(i-1)+mu(18,2)*Pla_18(i-1)...
-(mu(2,1)+mu(2,4)+mu(2,6)+mu(2,10)+mu(2,18))*Pla_2(i-1));
Pla_3(i)= Pla_3(i-1)+dt*(mu(1,3)*Pla_1(i-1)+mu(4,3)*Pla_4(i-
1)+mu(7,3)*Pla_7(i-1)+mu(11,3)*Pla_11(i-1)+mu(19,3)*Pla_19(i-1)...
-(mu(3,1)+mu(3,4)+mu(3,7)+mu(3,11)+mu(3,19))*Pla_3(i-1));
Pla_4(i)= Pla_4(i-1)+dt*(mu(2,4)*Pla_2(i-1)+mu(3,4)*Pla_3(i-
1)+mu(8,4)*Pla_8(i-1)+mu(12,4)*Pla_12(i-1)+mu(20,4)*Pla_20(i-1)...
-(mu(4,2)+mu(4,3)+mu(4,8)+mu(4,12)+mu(4,20))*Pla_4(i-1));
Pla_5(i)= Pla_5(i-1)+dt*(mu(1,5)*Pla_1(i-1)+mu(6,5)*Pla_6(i-
1)+mu(7,5)*Pla_7(i-1)+mu(13,5)*Pla_13(i-1)+mu(21,5)*Pla_21(i-1)...
-(mu(5,1)+mu(5,6)+mu(5,7)+mu(5,13)+mu(5,21))*Pla_5(i-1));
Pla_6(i)= Pla_6(i-1)+dt*(mu(2,6)*Pla_2(i-1)+mu(5,6)*Pla_5(i-
1)+mu(8,6)*Pla_8(i-1)+mu(14,6)*Pla_14(i-1)+mu(22,6)*Pla_22(i-1)...
-(mu(6,2)+mu(6,5)+mu(6,8)+mu(6,14)+mu(6,22))*Pla_6(i-1));
Pla_7(i)= Pla_7(i-1)+dt*(mu(3,7)*Pla_3(i-1)+mu(5,7)*Pla_5(i-
1)+mu(8,7)*Pla_8(i-1)+mu(15,7)*Pla_15(i-1)+mu(23,7)*Pla_23(i-1)...
-(mu(7,3)+mu(7,5)+mu(7,8)+mu(7,15)+mu(7,23))*Pla_7(i-1));
Pla_8(i)= Pla_8(i-1)+dt*(mu(4,8)*Pla_4(i-1)+mu(6,8)*Pla_6(i-
1)+mu(7,8)*Pla_7(i-1)+mu(16,8)*Pla_16(i-1)+mu(24,8)*Pla_24(i-1)...
-(mu(8,4)+mu(8,6)+mu(8,7)+mu(8,16)+mu(8,24))*Pla_8(i-1));
Pla_9(i)= Pla_9(i-1)+dt*(mu(1,9)*Pla_1(i-1)+mu(10,9)*Pla_10(i-
1)+mu(11,9)*Pla_11(i-1)+mu(13,9)*Pla_13(i-1)+mu(25,9)*Pla_25(i-1)...
-(mu(9,1)+mu(9,10)+mu(9,11)+mu(9,13)+mu(9,25))*Pla_9(i-1));
Pla_10(i)= Pla_10(i-1)+dt*(mu(2,10)*Pla_2(i-1)+mu(9,10)*Pla_9(i-
1)+mu(12,10)*Pla_12(i-1)+mu(14,10)*Pla_14(i-1)+mu(26,10)*Pla_26(i-1)...
-(mu(10,2)+mu(10,9)+mu(10,12)+mu(10,14)+mu(10,26))*Pla_10(i-1));
Pla_11(i)= Pla_11(i-1)+dt*(mu(3,11)*Pla_3(i-1)+mu(9,11)*Pla_9(i-
1)+mu(12,11)*Pla_12(i-1)+mu(15,11)*Pla_15(i-1)+mu(27,11)*Pla_27(i-1)...
-(mu(11,3)+mu(11,9)+mu(11,12)+mu(11,15)+mu(11,27))*Pla_11(i-1));
Pla_12(i)= Pla_12(i-1)+dt*(mu(4,12)*Pla_4(i-1)+mu(10,12)*Pla_10(i-
1)+mu(11,12)*Pla_11(i-1)+mu(16,12)*Pla_16(i-1)+mu(28,12)*Pla_28(i-1)...
-(mu(12,4)+mu(12,10)+mu(12,11)+mu(12,16)+mu(12,28))*Pla_12(i-1));
Pla_13(i)= Pla_13(i-1)+dt*(mu(5,13)*Pla_5(i-1)+mu(9,13)*Pla_9(i-
1)+mu(14,13)*Pla_14(i-1)+mu(15,13)*Pla_15(i-1)+mu(29,13)*Pla_29(i-1)...
-(mu(13,5)+mu(13,9)+mu(13,14)+mu(13,15)+mu(13,29))*Pla_13(i-1));
Pla_14(i)= Pla_14(i-1)+dt*(mu(6,14)*Pla_6(i-1)+mu(10,14)*Pla_10(i-
1)+mu(13,14)*Pla_13(i-1)+mu(16,14)*Pla_16(i-1)+mu(30,14)*Pla_30(i-1)...
-(mu(14,6)+mu(14,10)+mu(14,13)+mu(14,16)+mu(14,30))*Pla_14(i-1));
Pla_15(i)= Pla_15(i-1)+dt*(mu(7,15)*Pla_7(i-1)+mu(11,15)*Pla_11(i-
1)+mu(13,15)*Pla_13(i-1)+mu(16,15)*Pla_16(i-1)+mu(31,15)*Pla_31(i-1)...
-(mu(15,7)+mu(15,11)+mu(15,13)+mu(15,16)+mu(15,31))*Pla_15(i-1));
Pla_16(i)= Pla_16(i-1)+dt*(mu(8,16)*Pla_8(i-1)+mu(12,16)*Pla_12(i-
1)+mu(14,16)*Pla_14(i-1)+mu(15,16)*Pla_15(i-1)+mu(32,16)*Pla_32(i-1)...

```

## Продовж. дод. В

```

- (mu(16,8)+mu(16,12)+mu(16,14)+mu(16,15)+mu(16,32))*Pla_16(i-1));
Pla_17(i)= Pla_17(i-1)+dt*(mu(1,17)*Pla_1(i-1)+mu(18,17)*Pla_18(i-
1)+mu(19,17)*Pla_19(i-1)+mu(21,17)*Pla_21(i-1)+mu(25,17)*Pla_25(i-1)...
- (mu(17,1)+mu(17,18)+mu(17,19)+mu(17,21)+mu(17,25))*Pla_17(i-1));
Pla_18(i)= Pla_18(i-1)+dt*(mu(2,18)*Pla_2(i-1)+mu(17,18)*Pla_17(i-
1)+mu(20,18)*Pla_20(i-1)+mu(22,18)*Pla_22(i-1)+mu(26,18)*Pla_26(i-1)...
- (mu(18,2)+mu(18,17)+mu(18,20)+mu(18,22)+mu(18,26))*Pla_18(i-1));
Pla_19(i)= Pla_19(i-1)+dt*(mu(3,19)*Pla_3(i-1)+mu(17,19)*Pla_17(i-
1)+mu(20,19)*Pla_20(i-1)+mu(23,19)*Pla_23(i-1)+mu(27,19)*Pla_27(i-1)...
- (mu(19,3)+mu(19,17)+mu(19,20)+mu(19,23)+mu(19,27))*Pla_19(i-1));
Pla_20(i)= Pla_20(i-1)+dt*(mu(4,20)*Pla_4(i-1)+mu(18,20)*Pla_18(i-
1)+mu(19,20)*Pla_19(i-1)+mu(24,20)*Pla_24(i-1)+mu(28,20)*Pla_28(i-1)...
- (mu(20,4)+mu(20,18)+mu(20,19)+mu(20,24)+mu(20,28))*Pla_20(i-1));
Pla_21(i)= Pla_21(i-1)+dt*(mu(5,21)*Pla_5(i-1)+mu(17,21)*Pla_17(i-
1)+mu(22,21)*Pla_22(i-1)+mu(23,21)*Pla_2(i-1)+mu(29,21)*Pla_29(i-1)...
- (mu(21,5)+mu(21,17)+mu(21,22)+mu(21,23)+mu(21,29))*Pla_13(i-1));
Pla_22(i)= Pla_22(i-1)+dt*(mu(6,22)*Pla_6(i-1)+mu(18,22)*Pla_18(i-
1)+mu(21,22)*Pla_21(i-1)+mu(24,22)*Pla_24(i-1)+mu(30,22)*Pla_30(i-1)...
- (mu(22,6)+mu(22,18)+mu(22,21)+mu(22,24)+mu(22,30))*Pla_22(i-1));
Pla_23(i)= Pla_23(i-1)+dt*(mu(7,23)*Pla_7(i-1)+mu(19,23)*Pla_19(i-
1)+mu(21,23)*Pla_21(i-1)+mu(24,23)*Pla_24(i-1)+mu(31,23)*Pla_31(i-1)...
- (mu(23,7)+mu(23,19)+mu(23,21)+mu(23,24)+mu(23,31))*Pla_15(i-1));
Pla_24(i)= Pla_24(i-1)+dt*(mu(8,24)*Pla_8(i-1)+mu(20,24)*Pla_20(i-
1)+mu(22,24)*Pla_22(i-1)+mu(23,24)*Pla_23(i-1)+mu(32,24)*Pla_32(i-1)...
- (mu(24,8)+mu(24,20)+mu(24,22)+mu(24,23)+mu(24,32))*Pla_24(i-1));
Pla_25(i)= Pla_25(i-1)+dt*(mu(9,25)*Pla_9(i-1)+mu(17,25)*Pla_17(i-
1)+mu(26,25)*Pla_26(i-1)+mu(27,25)*Pla_27(i-1)+mu(29,25)*Pla_29(i-1)...
- (mu(25,9)+mu(25,17)+mu(25,26)+mu(25,27)+mu(25,29))*Pla_25(i-1));
Pla_26(i)= Pla_26(i-1)+dt*(mu(10,26)*Pla_10(i-1)+mu(18,26)*Pla_18(i-
1)+mu(25,26)*Pla_25(i-1)+mu(28,26)*Pla_28(i-1)+mu(30,26)*Pla_30(i-1)...
- (mu(26,10)+mu(26,18)+mu(26,25)+mu(26,28)+mu(26,30))*Pla_26(i-1));
Pla_27(i)= Pla_27(i-1)+dt*(mu(11,27)*Pla_11(i-1)+mu(19,27)*Pla_19(i-
1)+mu(25,27)*Pla_25(i-1)+mu(28,27)*Pla_28(i-1)+mu(31,27)*Pla_31(i-1)...
- (mu(27,11)+mu(27,19)+mu(27,25)+mu(27,28)+mu(27,31))*Pla_27(i-1));
Pla_28(i)= Pla_28(i-1)+dt*(mu(12,28)*Pla_12(i-1)+mu(20,28)*Pla_20(i-
1)+mu(26,28)*Pla_26(i-1)+mu(27,28)*Pla_27(i-1)+mu(32,28)*Pla_32(i-1)...
- (mu(28,12)+mu(28,20)+mu(28,26)+mu(28,27)+mu(28,32))*Pla_28(i-1));
Pla_29(i)= Pla_29(i-1)+dt*(mu(13,29)*Pla_13(i-1)+mu(21,29)*Pla_21(i-
1)+mu(25,29)*Pla_25(i-1)+mu(30,29)*Pla_30(i-1)+mu(31,29)*Pla_31(i-1)...
- (mu(29,13)+mu(29,21)+mu(29,25)+mu(29,30)+mu(29,31))*Pla_29(i-1));
Pla_30(i)= Pla_30(i-1)+dt*(mu(14,30)*Pla_14(i-1)+mu(22,30)*Pla_22(i-
1)+mu(26,30)*Pla_26(i-1)+mu(29,30)*Pla_29(i-1)+mu(32,30)*Pla_32(i-1)...
- (mu(30,14)+mu(30,22)+mu(30,26)+mu(30,29)+mu(30,32))*Pla_30(i-1));
Pla_31(i)= Pla_31(i-1)+dt*(mu(15,31)*Pla_15(i-1)+mu(23,31)*Pla_23(i-
1)+mu(27,31)*Pla_27(i-1)+mu(29,31)*Pla_29(i-1)+mu(32,31)*Pla_32(i-1)...
- (mu(31,15)+mu(31,23)+mu(31,27)+mu(31,29)+mu(31,32))*Pla_31(i-1));
Pla_32(i)= Pla_32(i-1)+dt*(mu(16,32)*Pla_16(i-1)+mu(24,32)*Pla_24(i-
1)+mu(28,32)*Pla_28(i-1)+mu(30,32)*Pla_30(i-1)+mu(31,32)*Pla_31(i-1)...
- (mu(32,16)+mu(32,24)+mu(32,28)+mu(32,30)+mu(32,31))*Pla_32(i-1));
%
% dP_1=Pla_SET1-Pla_1(i)
% dP_2=Pla_SET2-Pla_2(i)
% dP_3=Pla_SET3-Pla_3(i)
% dP_4=Pla_SET4-Pla_4(i)
% dP_5=Pla_SET5-Pla_5(i)
% dP_6=Pla_SET6-Pla_6(i)
% dP_7=Pla_SET7-Pla_7(i)
% dP_8=Pla_SET8-Pla_8(i)
% dP_9=Pla_SET9-Pla_9(i)

```



Продовж. дод. В

```

% dP_10=Pla_SET10-Pla_10(i)
% dP_11=Pla_SET11-Pla_11(i)
% dP_12=Pla_SET12-Pla_12(i)
% dP_13=Pla_SET13-Pla_13(i)
% dP_14=Pla_SET14-Pla_14(i)
% dP_15=Pla_SET15-Pla_15(i)
% dP_16=Pla_SET16-Pla_16(i)
% dP_17=Pla_SET17-Pla_17(i)
% dP_18=Pla_SET18-Pla_18(i)
% dP_19=Pla_SET19-Pla_19(i)
% dP_20=Pla_SET20-Pla_20(i)
% dP_21=Pla_SET21-Pla_21(i)
% dP_22=Pla_SET22-Pla_22(i)
% dP_23=Pla_SET23-Pla_23(i)
% dP_24=Pla_SET24-Pla_24(i)
% dP_25=Pla_SET25-Pla_25(i)
% dP_26=Pla_SET26-Pla_26(i)
% dP_27=Pla_SET27-Pla_27(i)
% dP_28=Pla_SET28-Pla_28(i)
% dP_29=Pla_SET29-Pla_29(i)
% dP_30=Pla_SET30-Pla_30(i)
% dP_31=Pla_SET31-Pla_31(i)
% dP_32=Pla_SET32-Pla_32(i)
% % Обратная связь
% ly(1,2)=abs(ly(1,2)*dP_1);
% ly(1,3)=abs(ly(1,3)*dP_1);
% ly(1,5)=abs(ly(1,5)*dP_1);
% ly(1,9)=abs(ly(1,9)*dP_1);
% ly(1,17)=abs(ly(1,17)*dP_1);
% ly(2,4)=abs(ly(2,4)*dP_2);
% ly(3,4)=abs(ly(3,4)*dP_3);
% ly(2,6)=abs(ly(2,6)*dP_2);
% ly(5,6)=abs(ly(5,6)*dP_5);
% ly(3,7)=abs(ly(3,7)*dP_3);
% ly(5,7)=abs(ly(5,7)*dP_5);
% ly(2,10)=abs(ly(2,10)*dP_2);
% ly(9,10)=abs(ly(9,10)*dP_9);
% ly(3,11)=abs(ly(3,11)*dP_3);
% ly(9,11)=abs(ly(9,11)*dP_9);
% ly(5,13)=abs(ly(5,13)*dP_5);
% ly(9,13)=abs(ly(9,13)*dP_9);
% ly(2,18)=abs(ly(2,18)*dP_2);
% ly(17,18)=abs(ly(17,18)*dP_17);
% ly(3,19)=abs(ly(3,19)*dP_3);
% ly(17,19)=abs(ly(17,19)*dP_17);
% ly(5,21)=abs(ly(5,21)*dP_5);
% ly(17,21)=abs(ly(17,21)*dP_17);
% ly(9,25)=abs(ly(9,25)*dP_9);
% ly(17,25)=abs(ly(17,25)*dP_17);
% ly(4,8)=abs(ly(4,8)*dP_4);
% ly(6,8)=abs(ly(6,8)*dP_6);
% ly(7,8)=abs(ly(7,8)*dP_7);
% ly(4,12)=abs(ly(4,12)*dP_4);
% ly(10,12)=abs(ly(10,12)*dP_10);
% ly(11,12)=abs(ly(11,12)*dP_11);
% ly(6,14)=abs(ly(6,14)*dP_6);
% ly(10,14)=abs(ly(10,14)*dP_10);
% ly(13,14)=abs(ly(13,14)*dP_13);
% ly(7,15)=abs(ly(7,15)*dP_7);

```

## Продовж. дод. В

```

% ly(11,15)=abs(ly(11,15)*dP_11);
% ly(13,15)=abs(ly(13,15)*dP_13);
% ly(4,20)=abs(ly(4,20)*dP_4);
% ly(18,20)=abs(ly(18,20)*dP_18);
% ly(19,20)=abs(ly(19,20)*dP_19);
% ly(6,22)=abs(ly(6,22)*dP_6);
% ly(18,22)=abs(ly(18,22)*dP_18);
% ly(21,22)=abs(ly(21,22)*dP_21);
% ly(7,23)=abs(ly(7,23)*dP_7);
% ly(19,23)=abs(ly(19,23)*dP_19);
% ly(21,23)=abs(ly(21,23)*dP_21);
% ly(10,26)=abs(ly(10,26)*dP_10);
% ly(18,26)=abs(ly(18,26)*dP_18);
% ly(25,26)=abs(ly(25,26)*dP_25);
% ly(11,27)=abs(ly(11,27)*dP_11);
% ly(19,27)=abs(ly(19,27)*dP_19);
% ly(25,27)=abs(ly(25,27)*dP_25);
% ly(13,29)=abs(ly(13,29)*dP_13);
% ly(21,29)=abs(ly(21,29)*dP_21);
% ly(25,29)=abs(ly(25,29)*dP_25);
% ly(8,16)=abs(ly(8,16)*dP_8);
% ly(12,16)=abs(ly(12,16)*dP_12);
% ly(14,16)=abs(ly(14,16)*dP_14);
% ly(15,16)=abs(ly(15,16)*dP_15);
% ly(8,24)=abs(ly(8,24)*dP_8);
% ly(20,24)=abs(ly(20,24)*dP_16);
% ly(22,24)=abs(ly(22,24)*dP_22);
% ly(23,24)=abs(ly(23,24)*dP_23);
% ly(12,28)=abs(ly(21,28)*dP_12);
% ly(20,28)=abs(ly(21,28)*dP_20);
% ly(26,28)=abs(ly(21,28)*dP_26);
% ly(27,28)=abs(ly(21,28)*dP_27);
% ly(14,30)=abs(ly(14,30)*dP_14);
% ly(22,30)=abs(ly(22,30)*dP_22);
% ly(26,30)=abs(ly(26,30)*dP_26);
% ly(29,30)=abs(ly(29,30)*dP_29);
% ly(15,31)=abs(ly(15,31)*dP_15);
% ly(23,31)=abs(ly(23,31)*dP_23);
% ly(27,31)=abs(ly(27,31)*dP_27);
% ly(29,31)=abs(ly(29,31)*dP_29);
% ly(16,32)=abs(ly(16,32)*dP_16);
% ly(24,32)=abs(ly(24,32)*dP_24);
% ly(26,32)=abs(ly(26,32)*dP_26);
% ly(28,32)=abs(ly(28,32)*dP_28);
% ly(31,32)=abs(ly(31,32)*dP_31);
% Вектор времени
    T(i)=T(i-1)+dt;
end
figure(1)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pla_1), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_1'), %title('Pman_1')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pla_2), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_2'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pla_3), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_3'), %title('Pman_3')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);

```

## Продовж. дод. В

```
plot(T, Pla_4), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_4'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(2)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pla_5), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_5'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pla_6), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_6'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pla_7), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_7'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pla_8), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_8'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(3)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pla_9), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_9'), %title('Pman_1')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pla_10), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_10'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pla_11), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_11'), %title('Pman_3')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pla_4), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_12'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(4)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pla_13), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_13'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pla_14), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_14'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pla_15), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_15'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pla_16), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_16'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(5)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pla_17), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_17'), %title('Pman_1')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pla_18), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_18'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pla_19), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_19'), %title('Pman_3')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pla_20), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_20'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(6)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pla_21), xlabel('t,c'),ylabel('Pla_21'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
```



## Продовж. дод. В

```
subplot(4,1,4);
plot(T, Pman_8), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_8'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])

figure(11)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pman_9), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_9'), %title('Pman_1')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pman_10), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_10'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pman_11), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_11'), %title('Pman_3')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pman_4), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_12'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(12)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pman_13), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_13'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pman_14), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_14'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pman_15), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_15'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pman_16), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_16'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(13)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pman_17), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_17'), %title('Pman_1')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pman_18), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_18'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pman_19), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_19'), %title('Pman_3')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pman_20), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_20'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(14)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pman_21), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_21'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pman_22), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_22'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pman_23), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_23'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pman_24), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_24'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(15)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pman_25), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_25'), %title('Pman_1')
```

## Продовж. дод. В

```
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pman_26), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_26'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pman_27), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_27'), %title('Pman_3')
axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pman_28), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_28'), %title('Pman_2')
axis([0 T(N) 0 1])
figure(16)
subplot(4,1,1);
plot(T, Pman_29), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_29'), %title('Pman_2')
% axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,2);
plot(T, Pman_30), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_30'), %title('Pman_2')
% axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,3);
plot(T, Pman_31), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_31'), %title('Pman_2')
% axis([0 T(N) 0 1])
subplot(4,1,4);
plot(T, Pman_32), xlabel('t,c'),ylabel('Pman_32'), %title('Pman_2')
% axis([0 T(N) 0 1])
```