

ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА  
УПРАВЛІННЯ МІНІСТЕРСТВА ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ  
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЦЕНТР УПРАВЛІННЯ ТА ВИПРОБУВАНЬ  
КОСМІЧНИХ ЗАСОБІВ  
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНСТВО УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Мамчур Юлій Валерійович**

УДК 629.735.051:681.004.383(045)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ЗВОРОТНІ ЗАДАЧІ ДИНАМІКИ В ТРЕНАЖЕРНОМУ КОМПЛЕКСІ  
ДИСТАНЦІЙНО ПІЛІТОВАНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ  
ЕКОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

Спеціальність 05.07.14 - авіаційно-космічні тренажери

Галузь знань – 07 Авіаційна та ракетно-космічна техніка (технічні)

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

Мамчур Ю.В.

Науковий керівник – Машков Олег Альбертович, доктор технічних наук,  
професор, Заслужений діяч науки і техніки України

Київ - 2019

## АНОТАЦІЯ

*Мамчур Ю.В.* Зворотні задачі динаміки в тренажерному комплексі дистанційно пілотованого літального апарату екологічного спостереження. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.14 – «Авіаційно-космічні тренажери» (07 Авіаційна та ракетно-космічна техніка, технічні науки). – Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ. – Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Київ, 2019.

У сучасних умовах особливе місце серед робототехнічних систем займають дистанційно пілотовані літальні апарати (ДПЛА). В результаті стрімкого розвитку безпілотної авіації, в розробку і серійне виробництво безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різного класу і призначення вже залучені півсотні країн світу. Причому «безпілотники» стали активно застосовуватися, особливо в задачах екологічного моніторингу навколишнього середовища. На сьогоднішній день в нашій країні створюється чимало безпілотних авіаційних комплексів різного призначення, в тому числі для екологічного моніторингу. Управління польотами ДПЛА полягає в передачі від групи керівництва польотами умов польоту, команд та інформації операторам і спрямовано на своєчасне і безпечне виконання ними польотних завдань. Управління ДПЛА здійснюють особи-оператори. Групи керівництва польотами постійно контролюють дотримання операторами ДПЛА, що керують заданими режимами польоту і виконання поданих команд.

У теперішній час проблема підвищення ефективності навчання пілотів є актуальною. Це пов'язано з постійним ускладненням процесу управління літальними апаратами, в тому числі і безпілотними. Аналіз літератури свідчить, що при стрімкому розширенні поля діяльності безпілотних

літальних апаратів має місце гостра нестача кваліфікованих операторів як самого апарату, так і цільової апаратури. При наявності високого попиту на БПЛА у світі фактично відсутня розвинена система підготовки фахівців-операторів та не налагоджено виробництво відповідних тренажерів та іншого обладнання.

Найбільш повний і глибокий психологічний аналіз особливостей операторської діяльності на тренажерах представлено в ряді фундаментальних робіт В.М. Азарскова, Г.Л. Баранова, В.Ф. Венди, В.Г. Денисова, В.П. Зинченка, В.В. Козака, О.В. Коломійцева, В.О. Кондратенкова, О.А. Кононова, Б.Ф. Ломова, О.А. Машкова, Е.А. Милеряна, В.А. Тарана, О.О. Терешкина, В.А. Пономаренка, В.Є. Саваневича, В.М. Сінеглозова, В.М. Тупкала, Ю.Г. Фокина, В.І. Христича та ін. Аналіз літератури показав, що на сьогоднішній день напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики визначення стану навколишнього середовища при проведенні екологічного моніторингу з використанням аерокосмічних технологій. Це підтверджується проведеними дослідженнями і працями в області застосування аерокосмічних технологій для завдань екології та природокористування таких вчених, як Азаров С.І., Аверин Г.В., Белявський Г.О., Богомья В.І., Бондар О.І., Бугор А.Н., Бусигин Б.С., Ващенко В.М., Волошин В.І., Гершензон В.Е., Гонин Г.Б., Горбулін В.П., Драновский В.І., Ємець М.А., Лялько В.І., Машков О.А., Мокин В.Б., Мосов С.П., Нестеренко О.П., Пашков Д. П., Петрук В.Г., Попов М.О., Присяжний В.І., Ребрин Ю.К., Рудько Г.І., Соколов Ю.М., Станкевич С.А., Тарарико О.Г., Федоровський О.Д., Фролов В.Ф., Ходоровский А.Я., Чумаченко С.М., Шапар А.Г., Шмандий В.М., Шматков Г.Г., Яцків Я.С. та інші.

Незважаючи на чисельні досягнення в даній сфері залишається невирішеним ряд важливих комплексних прикладних задач стосовно вибору ефективних методів синтезу тренажерів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу, формуванню вимог до апаратного та

програмного забезпечення тренажних комплексів, систем візуалізації зовнішньої обстановки та моделювання нештатних (аварійних) ситуацій.

Саме тому, актуальним є наукове завдання, яке полягає в удосконаленні інформаційного та програмного забезпечення спеціального тренажерного комплексу дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

Тема дисертаційної роботи та отримані результати відповідають тематиці наукових досліджень за напрямком авіаційно-космічних тренажерів екологічного спостереження, що виконувалися у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління згідно з планом науково-дослідних робіт: «Розробка нормативно-методичного документа – рубрикатора завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГІС» (0118U005461). В даній роботі автором запропоновано методику проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури із застосуванням спеціалізованого тренажеру дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності процесу підготовки оператора дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження за рахунок удосконалення інформаційного та програмного забезпечення спеціального тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому.

1. Вперше розроблено методи створення спеціалізованих підсистем управління тренажних комплексів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу, які враховують критерії ефективності навчання та дозволяє підвищити ефективність підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження.

2. Вперше розроблено модель контуру керування спеціалізованого тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу, яка заснована на

використанні зворотних задач динаміки та дозволяє описати процеси траєкторного управління та стабілізації літального апарату.

3. Удосконалено методика проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури із застосуванням спеціалізованого тренажеру дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу, яка на відміну від відомих враховує технологію інтелектуального розвантаження оператора тренажера та надає можливість проведення екологічного спостереження декількох об'єктів в одному польоті за рахунок застосування алгоритмів системи директорного керування на тренажері.

4. Набуло подальшого розвитку застосування методів імітаційного моделювання та оцінювання ефективності підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження, що дозволяє покращити якість підготовки оператора та його дій у нештатних ситуаціях на тренажерному комплексі екологічного моніторингу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що в роботі запропоновано методи, моделі, алгоритми, що дозволяють синтезувати апаратне та програмне забезпечення спеціалізованих тренажерів ДПЛА екологічного моніторингу та підвищити ефективність навчання операторів за рахунок навчання різним навичкам оператора управління ДПЛА з урахуванням особливостей об'єкта моніторингу та індивідуальних особливостей пілотів в нештатних (аварійних) ситуаціях. Це забезпечує ефективність усунення нештатних ситуацій та дозволяє підвищити достовірність прийняття рішень оператором ДПЛА на 12–20 %. За результатами моделювання на основі використання тренажерного комплексу ДПЛА досягнуто підвищення показників функціональної стійкості, що забезпечує усунення нештатних ситуацій та дозволяє говорити про підвищення достовірності прийняття рішень пілотом ДПЛА на 22–35 % за рахунок використання системи підтримки прийняття рішень в процесі

функціонування під час пошуку рішень в нештатних ситуаціях виникнення збоїв та некоректностей в розподілених базах знань.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє знизити обчислювальну складність та покращує можливості спеціалізованого тренажерного комплексу в порівнянні з існуючими тренажерами ДПЛА.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у Національному центрі управління та випробувань космічних засобів (акт від 04.12.2018 р.), Льотній академії Національного авіаційного університету, м. Кропивницький (акт від 22.01.2019 р.), Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 20.12.2018 р.), а також у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління Мінприроди України, м. Київ (акт від 26.12. 2018 р.).

Дисертаційну роботу присвячено удосконаленню інформаційного та програмного забезпечення тренажерного комплексу дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Запропоновано методики, моделі, алгоритми, що дозволяють підвищити ефективність навчання пілотів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

Розроблено два алгоритму оптимізації навчальних планів навчання пілотів ДПЛА екологічного спостереження на тренажері, перший з яких заснований на розрахунку коефіцієнта важливості за результатами аналізу екологічної безпеки, а другий - на використанні функціоналу ефективності одиничного тренінгу;

Розроблено алгоритм ідентифікації персональних показників швидкості освоєння простого і складного навичок, показників ступеня, який змінюється в залежності від індивідуальних особливостей учня при освоєння простого і складного навичок на підставі генетичного алгоритму.

Розроблені автором алгоритми придбання і поповнення знань в спеціальній базі знань тренажера ДПЛА екологічного спостереження, дозволяють реалізувати безпосереднє придбання знань в базі знань, а також

їх поповнення за допомогою реалізованої в алгоритмі стратегії розбиття на ступені і інтерактивної інтерпретації знань.

Розроблено методикау автоматизованого формування навчально-тренувальних операцій. Технологічне рішення даної задачі дозволяє сформувати навчально-тренувальні операції для пілотів ДПЛА з урахуванням його поточного рівня освоєння операційних функцій екологічного моніторингу, індивідуальних особливостей по сприйняттю інформації.

Проведено обґрунтування і розроблена узагальнена структурна модель автоматизованої системи управління тренажером ДПЛА. Відмінною особливістю є наявність в ній спеціальної бази знань конкретної предметної області, яка є для формування моделі управління процесом навчання операторів ДПЛА екологічного спостереження вироблення (вибору) впливу на оператора з метою доведення існуючого у нього рівня освоєння операційних функцій до необхідного.

Розроблено науково-методичний апарат синтезу тренажерного контура керування дистанційно пілотованого літального апарату на основі вирішення зворотних задач динаміки. При синтезі тренажерного комплексу ДПЛА враховано особливості екологічного моніторингу. Здійснено оцінювання якості процесу керування та ефективності алгоритму стабілізації ДПЛА на програмній траєкторії на основі вирішення зворотних задач динаміки.

Наукові результати досліджень є внеском в теорію створення тренажерних комплексів дистанційно пілотованих літальних апаратів.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка алгоритмічного та програмного забезпечення тренажерного комплексу для відпрацювання дій оператора в умовах аварійних та катастрофічних екологічних та техногенних ситуацій.

**Ключові слова:** авіаційно-космічні тренажери, дистанційно пілотований літальний апарат, екологічне спостереження, ефективність навчання, зворотні задачі динаміки, зворотні задачі динаміки, оператор тренажерного комплексу, тренажерний комплекс.

## ANNOTATION

Y. Mamchur. Inverse problems of dynamics in the training complex of a remotely piloted aircraft for environmental monitoring. - Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation for the degree of Ph.D. in Engineering Science, specialty 05.07.14 - «Aerospace Simulators» (07 Aeronautical, Rocket and Space Equipment, Engineering Sciences). - State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Kiev. - State Space Agency of Ukraine. National Space Facilities Control and Test Center, Kiev, 2019.

In modern conditions, a special place among robotic systems is occupied by remotely piloted air vehicles (RPAV). As a result of the rapid development of unmanned aircraft, fifty countries have already involved in the development and mass production of unmanned aerial vehicles (UAVs) of different classes and assignment. Moreover, "drones" have become actively used, especially in the tasks of ecological monitoring of the environment. Nowadays, many unmanned aerial vehicles are being created in our country for various purposes, including for environmental monitoring. RPAV flight control includes transferring flight conditions, commands and information to operators from the flight control team and is aimed at timely and safe execution of their flight tasks. Control of the RPAV is carried out by operators. Flight control teams constantly monitor the compliance of the RPAV operators with the specified flight modes and execution of the submitted commands.

Currently, the problem of improving pilot training is an urgent one. This is due to the constant complication of the process of aircraft control, including drones. The analysis of the literature shows that with the rapid expansion of the field of activity of unmanned aerial vehicles there is an acute shortage of qualified operators of both the apparatus and the specific equipment. In the presence of high demand for UAVs in the world, there is actually no developed system of training of experts-operators and the production of appropriate simulators and other equipment is not set up.



The most complete and in-depth psychological analysis of the features of the operator's activity on simulators is presented in a number of fundamental works by V.Azarskova, G.Baranova, V.Wendy, V.Denisova, V.Zinchenko, V.Kozak, O.Kolomiytsev, V.Kondratenkov, O.Kononov, B.Lomov, O.Mashkov, E.Milleryan, V.Taran, O.Tereshkin, V.Ponomarenko, V.Savanevich, V.Sineglazov, V.Tupkalo, Yu.Fokin, V.Khristych, etc. The analysis of the literature showed that today different methods, mechanisms, principles and methodology of determining the state of the environment have been developed when conducting environmental monitoring using aerospace technologies. This is confirmed by the researches and works in the field of application of aerospace technologies for the tasks of ecology and nature management of such scientists as Azarov S., Averin G., Belyavsky G., Bogomya V., Bondar O., Bugor A., Busygin B., Vashchenko V., Voloshin V., Gershenzon V., Gonin G., Gorbulin V., Dranovskiy V., Yemets M., Lyalko V., Mashkov O., Mokin V., Mosov S., Nesterenko O., Pashkov D., Petruk V., Popov M., Prisyazhniy V., Rebryn Y., Rudko G., Sokolov Y., Stankevich S., Tarariko O., Fedorovsky O., Frolov V., Khodorovskiy A., Chumachenko S., Shapar A., Shmandiy V., Shmatkov G., Yatskiv J., and other.

In spite of numerous achievements in this field, a number of important complex application tasks, regarding the choice of effective methods of simulators synthesis of remotely piloted air vehicles of ecological monitoring still remain unresolved, as well as formation of requirements for hardware and software of training complexes, systems of visualization of external situations and modeling of abnormal (emergency) situations.

For this reason, a scientific task is urgent, which is to improve the information and software support of a special training complex of remotely piloted aircraft of environmental monitoring.

The theme of the dissertation and the obtained results correspond to the subject of scientific researches in the field of aerospace simulators of ecological monitoring, performed in the State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management in accordance with the plan of scientific and research works:

“Development of a regulatory and methodological document - a list of classification headings in the field of ecological monitoring by means of ERS and GIS” using space (0118U005461). In this work the author proposes a method of conducting ecological monitoring of critical infrastructure objects with the use of a specialized simulator of remotely piloted aircraft of environmental monitoring.

The purpose of the dissertation is to increase the efficiency of the process of operator training of remotely piloted aircraft of environmental monitoring by improving the information and software support of RPAV special training complex of environmental monitoring.

The scientific novelty of the obtained results is as follows.

1. Methods for the creation of specialized subsystems for training complexes of remotely piloted aircraft of environmental monitoring control have been developed for the first time. The criteria of training effectiveness were taken into account, which all owed to increase the efficiency of operator training.

2. For the first time, a model of control loop for a specialized training complex of environmental monitoring drones, which is based on the use of inverse dynamics problems and allows to describe the processes of trajectory control and stabilization of the aircraft was developed.

3. Methodology of ecological monitoring of critical infrastructure objects with the use of specialized simulator of remotely piloted air vehicles of environmental monitoring was improved. This methodology, unlike the known ones, takes into account the technology of intelligent unloading of the simulator operator and provides the possibility of conducting ecological monitoring of several objects during one flight by applying the algorithms of the director control system on the simulator.

4. The use of simulation modeling methods and evaluation of the training effectiveness of operators of remotely piloted aircraft of environmental surveillance has been further developed, which allows to improve the quality of training of the operator and his actions at emergency situations at the training complex of environmental monitoring.

The practical significance of the obtained results is that the paper proposes methods, models, algorithms that allow to synthesize the hardware and software of specialized UAV simulators of environmental training and to increase the efficiency of training of operators by training different skills of UAV operator with regard to the features of object monitoring and individual characteristics of pilots in emergency (emergency) situations. This ensures that emergency situations are eliminated efficiently and improves the decision-making reliability of UAV operators by 12-20%. According to the results of simulation based on the use of the UAV training complex, the increase of the indicators of functional stability is achieved, which ensures elimination of abnormal situations and allows to speak about the increase of the decision-making reliability of the UAV pilot by 22-35% due to the use of the decision support system in the process of finding decisions in abnormal situations of failures and incorrectness in distributed knowledge bases.

The proposed scientific-methodical device allows to reduce computational complexity and improves the possibilities of specialized training complex in comparison with the existing UAV simulators.

The results of the dissertation were implemented at the National Space Facilities Control and Test Center (Act dated 04.12.2018), Flight Academy of National Aviation University, Kropyvnytskyi (Act dated 22.01.2019), Research and Production Implementation Company "Geotechnology", Kyiv (Act dated 20.12.2018), as well as of the State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management of the Ministry of Nature of Ukraine, Kyiv (Act dated 26.12.2018).

The dissertation is devoted to improvement of information and software support of training complex of remotely piloted air vehicles of environmental monitoring. Methods, models, algorithms, which allow to increase the effectiveness of training of pilots of remotely piloted air vehicles of environmental monitoring are offered.

In the development of the concepts of the algorithmic approach - inverse dynamics problems for functionally stable onboard control complexes, an

analytical expression is obtained for the control force. An analytical expression is obtained for assessing the quality of the control process in emergency situations by an algorithm based on solving an inverse dynamic problem. The structures of the simulator control algorithm with specified dynamic properties based on the solution of inverse problems of dynamics are proposed and substantiated. The control algorithm is obtained in a stochastic formulation with RPAV stabilization on an operational-programmable trajectory (for environmental monitoring) based on solving the inverse problem of dynamics, which ensure minimum dispersion of the output coordinates. Structural diagrams of the pitch, roll, yaw angle control system are proposed.

A method for the synthesis of algorithms of director control systems is proposed for the operator of environmental surveillance of the RPAV when solving problems of monitoring several objects.

The scientific and methodological apparatus for the synthesis of a simulation control loop of a remotely piloted air vehicle based on the solution of inverse dynamics problems is developed. The features of environmental monitoring have been taken into account in the synthesis of the UAV training complex. The quality of the control process and the efficiency of the UAV stabilization algorithm on the program trajectory were evaluated based on solving inverse dynamics problems.

The scientific results of the researches are a contribution to the theory of creation of training complexes of remotely piloted air vehicles.

A promising direction for further research is the development of algorithmic and software support for training complex to work out the actions of the operator in the event of emergency, catastrophe, environmental and man-made situations.

**Key words:** aerospace simulators, remotely piloted air vehicle, environmental monitoring, training efficiency, inverse dynamics problems, inverse dynamics tasks, operator of a training complex, training complex.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В. Напрями удосконалення системи екологічного моніторингу з застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, 2018. № 2 (21). С.22–29.

2. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Обґрунтування напрямків розробки тренажерів підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу / Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2018. Том 3. № 49. С. 16–21.

3. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Застосування концепції оберненої задачі динаміки для синтезу програмного керування рухом в імітаторі динаміки польоту тренажера дистанційно пілотованого літального апарату / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. К.: НАН України, 2018. Вип. 82. С. 154–166.

4. Машков О.А., Дурняк Б.В., **Мамчур Ю.В.**, Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарата на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (стохастична постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. К.: НАН України, 2018. Вип. 83. С. 146–153.

5. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В. Нігородова С.А. Технологія синтезу системи керування дистанційно пілотованого літального апарата з заданими динамічними властивостями / Стандартизація, сертифікація, якість. Науково-технічний журнал. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. № 1 (113). С. 54–66.

6. Машков О.А., Триснюк В.М., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В., Нігородова С.А., Триснюк Т.В.. Технологія синтезу алгоритму керування для

забезпечення стабілізації дистанційно пілотованого літального апарату для оперативно-програмованої траєкторії / Математичне моделювання в економіці: міжнародний науковий журнал. К.: НАН України, № 1 (14). С.33–47.

7. Машков О.А., Триснюк В.М., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу / Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: науково-технічний журнал. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. № 1 (19). С.69–78.

8. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Формалізація задачі підготовки на тренажері оператора керування безпілотним літальним апаратом екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки / Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій». К.: ПВНЗ «Університет новітніх технологій», 2018. Вип. 2 (6). С. 24–30.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

9. **Мамчур Ю.В.** Проблеми розвитку державної системи моніторингу навколишнього природного середовища з використанням аерокосмічних та геоінформаційних технологій / Сучасні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу: Матеріали доповідей науково-практичного семінару. Київ, 27 листопада 2017 р. К.: ДЕА, 2017. С. 8–9.

10. **Мамчур Ю.В.** Проблемні питання створення тренажера оператора дистанційно пілотованого літального апарата екологічного моніторингу / Матеріали науково-технічної конференції “Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу”. Київ, 24–25 квітня 2018 р. К.: ДЕА, 2017. С. 37–38.

11. **Мамчур Ю.В.** Обоснование синергетической схемы управления группой дистанционно пилотируемых летательных аппаратов / Збірка наукових праць. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.

Залізний Порт, Херсонської обл., 21–25 травня 2018 р. Херсон: ХНТУ, 2018. С. 181–190.

12. **Мамчур Ю.В.** Застосування комп'ютерних та інформаційних технологій в тренажерних комплексах екологічного моніторингу з застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». Львів, 14 вересня 2018 р. Львів: ЛДУБЖД, 2018. С.181.

13. **Мамчур Ю.В.** Сучасні проблеми управління екологічною безпекою з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Проблеми екологічної безпеки. Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції. Кременчук, 4–7 жовтня 2018 р. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018. С.65.

14. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Напрями удосконалення технічних засобів інструментальних психофізіологічних досліджень для оцінки достовірності інформації / Інтелектуальні власність і право на шляху до сталого розвитку України: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 19 квітня 2019 року. К. С. 265–268.

15. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В. Нігородова С.А. Технології конструктивного спілкування пілота оператора дистанційно пілотованого літального апарату та системи підтримки прийняття рішень в умовах впливу стрес-факторів екстремальної екологічної ситуації / Авіаційна та екстремальна психологія у контексті технологічних досягнень: XI міжнародна науково-практична конференція. Збірник наукових праць. Київ, 23 – 24 квітня 2019 року. К. «Альфа-ПК», 2019. С. 183–189.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

16. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Аналитическая оценка качества процесса управления на тренажерах дистанционно пилотируемого

летательного аппарата с алгоритмом на основе решения обратных задач динамики / Аерокосмічні технології. Науково-технічний журнал. К.: НЦУВКЗ, 2017. Вип. 2 (02). С. 59–62.

17. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Загроза національній безпеці: екологічний тероризм, як сучасний виклик суспільству / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки. К.: АНБ, 2018. № 1 (17). С. 8–21.

18. Машков О.А. **Мамчур Ю.В.** Загроза національної безпеки: аерокосмічний тероризм, як новий виклик безпеці суспільства / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки. К.: АНБ, 2018. № 2 (18). С. 8–28.

19. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас. С.В. Методологія протидії екологічним загрозам, ризикам та екологічному тероризму: системний підхід / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки. К.: АНБ, 2018. № 3–4 (19–20). С. 8–31.



## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ANNOTATION	8
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА	13
ЗМІСТ	17
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ ТРЕНАЖЕРНИХ КОМПЛЕКСІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	28
1.1. Аналіз структури тренажерного комплексу та його алгоритмічного забезпечення при управлінні польотом безпілотного літального апарата екологічного спостереження	28
1.2. Особливості вимог до тренажерного комплексу управління пльотом ДПЛА екологічного моніторингу	42
1.3. Критерії ефективності навчання на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу	47
1.4. Шляхи та напрямки підвищення якості підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу	51
1.5. Постанова наукового завдання	59
Висновки по розділу 1	61
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА НАУКОВО-МЕТОДИЧНОГО АПАРАТУ СИНТЕЗУ ТРЕНАЖЕРНОГО КОНТУРА КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНОГО АПАРАТУ НА ОСНОВІ ВИРІШЕННЯ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ	63
2.1. Врахування особливостей ДПЛА при синтезі тренажерного комплексу екологічного моніторингу	63

2.2. Синтез математичних моделей дистанційно пілотованих літальних апаратів та особливості визначення їх параметрів	67
2.3. Синтез системи стабілізації руху ДПЛА на програмних траєкторіях	88
2.4 Використання методу зворотних задач динаміки для синтезу тренажерного комплексу дистанційно пілотованого літального апарату екологічного моніторингу	91
2.5. Оцінювання якості процесу керування з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки	106
2.6. Синтез програмного комплексу тренажера ДПЛА із заданими динамічними властивостями	110
2.7. Оцінка ефективності алгоритму стабілізації ДПЛА на програмній траєкторії з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки	122
Висновки по розділу 2	139
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ТРЕНАЖЕРІ ДПЛА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ	142
3.1. Технологія інтелектуального розвантаження оператора тренажера ДПЛА при проведенні екологічного спостереження об'єктів критичної інфраструктури	142
3.2. Формалізація задачі побудови оператором оптимальних маршрутів руху ДПЛА для проведення екологічного спостереження декількох об'єктів в одному польоті	150
3.3. Синтез алгоритмів системи директорного керування для оператора ДПЛА екологічного спостереження	151
3.4. Реалізація алгоритму системи директорного керування на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу	158
Висновки по розділу 3	177

РОЗДІЛ 4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ ДПЛА ЕКОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ	183
4.1. Розробка моделі тренажерного комплексу для професійної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження	183
4.2. Склад тренажерного комплексу для професійної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження	198
4.3. Проведення імітаційного моделювання та оцінювання якості підготовки оператора ДПЛА на тренажерному комплексі екологічного спостереження	203
4.4. Розробка науково-методичного апарату підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження до дій в нештатних ситуаціях	210
4.5. Оцінювання ефективності прийнятого рішення і часу реакції оператора дистанційно пілотованого літального апарату при виникненні нештатної ситуації	220
Висновки по розділу 4	229
ВИСНОВКИ	233
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	236
ДОДАТОК А – Акти впровадження	251
ДОДАТОК Б – Автономні тренажери підготовки операторів безпілотних літальних апаратів	257
ДОДАТОК В – Програмний комплекс розробки маршруту і польотних завдань на тренажері ДПЛА екологічного спостереження	270
ДОДАТОК Г – Завдання екологічного моніторингу для відпрацювання на спеціалізованих тренажерах ДПЛА екологічного спостереження	287
ДОДАТОК Д – Рубрикатор завдань у сфері екологічного спостереження за допомогою ДПЛА	291
ДОДАТОК Е – Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію матеріалів дисертації	308

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АРМ – автоматизоване робоче місце

БАК – безпілотний авіаційний комплекс

БАС – безпілотна авіаційна система

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ВЦЗ – виконання цільової завдання

ГІС – геоінформаційна система

ГКП – група керівництва польотами

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі

ДПЛА – дистанційно пілотований літальний апарат

ЕОМ – електронно обчислювальна машина

ЗСДО – задача спостереження декількох об'єктів

КП – керівник польотом

НС – нештатна ситуація

ОПР – особа, яка приймає рішення

ПЯ – показник якості

ЦКРС – цифрова карта району спостереження

ЧКЕ – частковий критерій ефективності

## ВСТУП

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

У сучасних умовах особливе місце серед робототехнічних систем займають дистанційно пілотовані літальні апарати (ДПЛА). Результат стрімкого розвитку безпілотної авіації – це залучення півсотні країн світу в розробку і серійне виробництво безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різного класу і призначення. Причому «безпілотники» стали активно застосовуватися, особливо в задачах екологічного моніторингу навколишнього середовища. На сьогоднішній день в нашій країні створюється чимало безпілотних авіаційних комплексів різного призначення, в тому числі для екологічного моніторингу. Управління польотами ДПЛА полягає в передачі від групи керівництва польотами умов польоту, команд та інформації операторам і спрямовано на своєчасне і безпечне виконання ними польотних завдань. Управління ДПЛА здійснюють особи-оператори. Групи керівництва польотами постійно контролюють якість роботи операторів БПЛА, що керують заданими режимами польоту і виконання поданих команд.

У теперішній час проблема підвищення ефективності навчання пілотів (операторів БПЛА) є актуальною. Це пов'язано з постійним ускладненням процесу управління літальними апаратами, в тому числі і безпілотними. Аналіз літератури свідчить, що при стрімкому розширенні поля діяльності безпілотних літальних апаратів має місце гостра нестача кваліфікованих операторів. При наявності високого попиту на БПЛА у світі фактично відсутня розвинена система підготовки фахівців-операторів, як самого апарату, так і цільової апаратури. Але не налагоджено виробництво відповідного обладнання тренажерів.

Найбільш повний і глибокий психологічний аналіз особливостей операторської діяльності на тренажерах представлено в ряді фундаментальних робіт В.М. Азарскова, Г.Л. Баранова, В.Ф. Венди,

В.Г. Денисова, В.П. Зинченка, В.В. Козака, О.В. Коломійцева, В.О. Кондратенкова, О.А. Кононова, Б.Ф. Ломова, О.А. Машкова, Е.А. Милеряна, В.А. Тарана, О.О. Терешкина, В.А. Пономаренка, В.Є. Саваневича, В.М. Сінеглазова, В.М. Тупкала, Ю.Г. Фокина, В.І. Христича та ін. Аналіз літератури показав, що на сьогоднішній день напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики визначення стану навколишнього середовища при проведенні екологічного моніторингу з використанням аерокосмічних технологій. Це підтверджується проведеними дослідженнями і працями в області застосування аерокосмічних технологій для завдань екології та природокористування таких вчених, як Азаров С.І., Аверин Г.В., Белявський Г.О., Богомья В.І., Бондар О.І., Бугор А.Н., Бусигин Б.С., Ващенко В.М., Волошин В.І., Гершензон В.Е., Гонин Г.Б., Горбулін В.П., Драновский В.І., Ємець М.А., Лялько В.І., Машков О.А., Мокин В.Б., Мосов С.П., Нестеренко О.П., Пашков Д.П., Петрук В.Г., Попов М.О., Присяжний В.І., Ребрин Ю.К., Рудько Г.І., Соколов Ю.М., Станкевич С.А., Тарарико О.Г., Федоровський О.Д., Фролов В.Ф., Ходоровский А.Я., Чумаченко С.М., Шапар А.Г., Шмандий В.М., Шматков Г.Г., Яцків Я.С. та інші.

Незважаючи на чисельні досягнення в даній сфері залишається невирішеним ряд важливих комплексних прикладних задач стосовно вибору ефективних методів синтезу тренажерів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу, формуванню вимог до апаратного та програмного забезпечення тренажних комплексів, систем візуалізації зовнішньої обстановки та моделювання нештатних (аварійних) ситуацій.

Саме тому, актуальним є наукове завдання, яке полягає в удосконаленні інформаційного та програмного забезпечення спеціального тренажерного комплексу дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи та отримані результати відповідають тематиці

наукових досліджень за напрямком авіаційно-космічних тренажерів екологічного спостереження, що виконувалися у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління згідно з планом науково-дослідних робіт: «Розробка нормативно-методичного документа – рубрикатора завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГІС» (0118U005461). В даній роботі автором запропоновано методику проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури із застосуванням спеціалізованого тренажеру дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертації є підвищення ефективності процесу підготовки оператора дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження за рахунок удосконалення інформаційного та програмного забезпечення спеціального тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу.

Поставлена мета дисертаційного дослідження досягається вирішенням наступних *наукових завдань*:

1. Проведення аналізу створення спеціалізованих тренажерних комплексів щодо підвищення ефективності підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження.

2. Розроблення методів створення спеціалізованих підсистем управління тренажерних комплексів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

3. Розроблення моделі контуру керування спеціалізованого тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу, яка заснована на використанні зворотних задач динаміки.

4. Розроблення методики проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури із застосуванням спеціалізованого тренажеру дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

5. Розроблення методики проведення навчання оператора ДПЛА екологічного спостереження об'єктів критичної інфраструктури на

спеціальному тренажерному комплексу дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

6. Розроблення науково-практичних рекомендацій, які базуються на результатах імітаційного моделювання та оцінювання ефективності підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження.

*Об'єкт дослідження* – процес навчання пілотів на тренажері дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження.

*Предмет дослідження* – моделі та методи інформаційного та програмного забезпечення спеціалізованих тренажерів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження.

*Методи дослідження.* Для вирішення поставлених завдань у дисертації були застосовані: теорія автоматичного та ергатичного керування, системного аналізу для визначення структури тренажерного комплексу екологічного моніторингу; методи математичного моделювання і функціонального аналізу; методи вирішення зворотних задач динаміки для синтезу алгоритмічного забезпечення моделюючого тренажерного комплексу. Також використовувались теорія матриць, інтегрального числення та методи імітаційного моделювання з використанням комп'ютерної програми Matlab для оцінки ефективності підготовки операторів тренажерного комплексу.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в розкритті особливостей та закономірностей синтезу спеціалізованих підсистем управління навчанням оператора тренажерного комплексу дистанційно пілотованого літального апарату екологічного моніторингу за рахунок вирішення зворотних задач динаміки. При цьому:

1. Вперше розроблено методи створення спеціалізованих підсистем управління тренажерних комплексів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу, які враховують критерії ефективності



навчання та дозволяє підвищити ефективність підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження.

2. Вперше розроблено модель контуру керування спеціалізованого тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу, яка заснована на використанні зворотних задач динаміки та дозволяє описати процеси траєкторного управління та стабілізації літального апарату.

3. Удосконалено методика проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури із застосуванням спеціалізованого тренажеру дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу, яка на відміну від відомих враховує технологію інтелектуального розвантаження оператора тренажера та надає можливість проведення екологічного спостереження декількох об'єктів в одному польоті за рахунок застосування алгоритмів системи директорного керування на тренажері;

4. Набуло подальшого розвитку застосування методів імітаційного моделювання та оцінювання ефективності підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження, що дозволяє покращити якість підготовки оператора та його дій у нештатних ситуаціях на тренажерному комплексі екологічного моніторингу.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що в роботі запропоновано методи, моделі, алгоритми, що дозволяють синтезувати апаратне та програмне забезпечення спеціалізованих тренажерів ДПЛА екологічного моніторингу та підвищити ефективність навчання операторів за рахунок навчання різним навичкам оператора управління ДПЛА з урахуванням особливостей об'єкта моніторингу та індивідуальних особливостей пілотів в нештатних (аварійних) ситуаціях.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє знизити обчислювальну складність та покращує можливості спеціалізованого тренажерного комплексу в порівнянні з існуючими тренажерами ДПЛА.

**Впровадження отриманих результатів.** Результати дисертаційної роботи впроваджені у Національному центрі управління та випробувань космічних засобів (акт від 04.12.2018 р.), Льотній академії Національного авіаційного університету, м. Кропивницький(акт від 22.01. 2019 р.), Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 20.12. 2018 р.), а також у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління Мінприроди України, м. Київ (акт від 26.12. 2018 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи, що опубліковані в [1 – 8], отримані здобувачем особисто. У роботах, виконаних у співавторстві авторові належить: в [1] теоретичне обґрунтування застосування методів зворотних задач динаміки в тренажерному комплексі ДПЛА; в [2] запропоновано напрямки розробки тренажерів підготовки операторів ДПЛА екологічного моніторингу; в [3] запропоновано модель контуру керування спеціалізованого тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу, яка заснована на використанні зворотних задач динаміки; в [4] представлено аналітичні розрахунки алгоритму програмного керування на тренажері ДПЛА на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки як в детермінованій, так й стохастичній постановці; в [5] розроблено методи створення спеціалізованих підсистем управління тренажерних комплексів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу; в [6] удосконалено методику проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури із застосуванням спеціалізованого тренажеру ДПЛА екологічного моніторингу на основі технології інтелектуального розвантаження оператора тренажера; в [7] отримано результати розрахунків, що підтвердили ефективність процесу управління на тренажерах дистанційно пілотованих літальних апаратів з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки у [8] формалізовано задачу підготовки на тренажері оператора ДПЛА екологічного моніторингу та запропоновано критерії ефективності навчання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на семи наукових конференціях та семінарах: Науково-практичний семінар «Сучасні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу», Київ, ДЕА, 27 листопада 2017 р.; Науково-технічна конференція «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» м. Київ, ДЕА, 24–25 квітня 2018 р.; Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту», с. Залізний Порт, Херсонська обл., ХНТУ, 21 – 25 травня 2018 р.; III міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи», Львів, ЛДУБЖД, 14 вересня 2018 р.; XVI міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екологічної безпеки», Кременчук, КрНУ, 4 – 7 жовтня 2018 р.; II міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні власність і право на шляху до сталого розвитку України», Київ, КПВП, 19 квітня 2019 р. XI міжнародна науково-практична конференція «Авіаційна та екстремальна психологія у контексті технологічних досягнень», Київ, НАУ, 23 – 24 квітня 2019 року.

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 19 наукових праць. Основні наукові положення викладено в 8 наукових статтях [1 – 8], які опубліковані у спеціалізованих фахових виданнях. За матеріалами виступів на науково-технічних конференціях опубліковано 7 тез доповідей [9 – 15]. Додатково результати досліджень відображені в статтях [16 – 19].

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи 312 сторінок, у тому числі: 224 сторінки друкованого тексту (180 сторінок основного тексту, 44 окремих сторінок з рисунками і таблицями), анотація на 12 сторінках, список використаних джерел на 15 сторінках (133 найменувань), додатки на 61 сторінці.

## РОЗДІЛ 1

### **АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ ТРЕНАЖЕРНИХ КОМПЛЕКСІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

#### **1.1. Аналіз структури тренажерного комплексу та його алгоритмічного забезпечення при управлінні польотом безпілотною літальною апарату екологічного спостереження**

У теперішній час проблема підвищення ефективності навчання пілотів є актуальною. Це пов'язано з постійним ускладненням процесу управління літальними апаратами, в тому числі і безпілотними. При цьому у стрімкому розширенні поля діяльності безпілотних літальних апаратів має місце гостра нестача кваліфікованих операторів як самого апарату, так і цільової апаратури. При наявності високого попиту на БПЛА у світі фактично відсутня розвинена система підготовки фахівців-операторів та не налагоджено виробництво відповідних тренажерів та іншого обладнання [111, 113].

Ще у 1999 році за результатами аналізу застосування безпілотників в операції “Союзницька сила” на території колишньої Югославії, командування організації збройних сил НАТО прийшло до висновку про необхідність термінового розроблення методик і програм підготовки фахівців. Все це виявилось неприйнятним для експлуатантів. По-перше, були потрібні чималі додаткові витрати – на вартість навчання, проїзд групи фахівців в навчальний центр компанії, організацію їх проживання, відрядження. По-друге, самі запити замовника обмежувалися обсягами наявної інфраструктури навчального центру компанії-розробника. Потрібно було збільшувати окремий штат фахівців-інструкторів, знімати з роботи найбільш досвідчених операторів з тим, щоб залучити їх у якості позаштатних викладачів з підготовки операторів ДПЛА.

Завдяки величезним фінансовим ресурсам і багатому досвіду експлуатації БПЛА різних типів [115, 117, 119, 124, 131], накопиченому Міноборони США, процес переведення підготовки операторів безпілотників на новий організаційний і технологічний рівень пішов стрімкими темпами.

У квітні 2011-го компанія L-3 LinkSimulation & Training і Університет штату Північна Дакота підписали угоду про створення спільного навчально-тренувального центру для підготовки операторів різних БПЛА. Центр вирішили розмістити на військово-повітряній базі ВПС США в Гранд-Форксе. Основні теоретичні та практичні курси, що викладаються спрямовані на навчання фахівців для обслуговування безпілотних авіаційних систем (БАС) на базі БПЛА MQ-1 “Предейтор” і MQ-9 “Ріпер”. Центр матиме статус цивільної установи – першої на території США, що дозволяє готувати фахівців для БПЛА типів MQ-1 і MQ-9. Для підготовки військових операторів на тренажерах центру встановлять спеціальну програму навчання операторів наведення БПЛА.

Компанія L-3 Link Simulation & Training на сьогодні є одним з найбільших розробників і виробників комплексних тренажерів, які необхідні в ЗС США. Такі тренажери передбачають підготовку операторів-пілотів і операторів цільового навантаження якоїсь однієї безпілотної авіаційної системи (БАС) або одного типу БПЛА. Йдеться про тренажер для тренування операторів БПЛА “Предейтор” (Predator Mission Aircrew Training System), до складу якого входять обладнання реального наземного пункту управління БПЛА виробництва компанії General Atomics і відповідна апаратна і програмна частина розробки компанії L-3 Link Simulation & Training, включаючи унікальну систему візуалізації, що дозволяє з високою точністю імітувати географічні та кліматичні особливості основних районів світу. База даних ділянок місцевості постійно поповнюється.

В основу системи візуалізації даного тренажера покладено розробку компанії, яка має назву – Physics Based Environment Generator HD – один з продуктів в лінійці HD World. Нововведення дозволяє з високою точністю і

деталізацією генерувати різну підстилаючу поверхню, включаючи міську забудову, об'єкти на ній і навіть імітувати різноманітні, характерні для конкретної ділянки місцевості погодні умови. Поставка першого такого тренажера ВПС США відбулася в 2005 році, після чого розробник вніс в апаратну і програмну частини тренажера зміни, що дозволили готувати на ньому ще й операторів БПЛА "Ріпер". На сьогодні компанія поставила ВПС США вже 26 таких тренажерів.

В процес масової підготовки операторів безпілотників активно включилася і Академія ВПС США в Колорадо-Спрінгс, штат Колорадо. Американські експерти і журналісти, які пишуть на авіаційну тематику відзначають: останнім часом серед слухачів академії спостерігається цікава тенденція – все більше американців, які навчаються у військово-навчальних закладах висловлюють активне прагнення вчитися не на льотчика-винищувача, що був елітою ВПС США протягом багатьох десятиліть і вважався блакитною мрією американських хлопчаків, а на оператора «повітряного робота». За даними "Форкаст", ринок БПЛА буде невпинно зростати. Незалежно від того, скільки систем вже побудовано, оператори хочуть більше. "Форкаст" оцінює обсяг світового ринку БПЛА протягом наступних десяти років в 70,9 мільярда доларів. Раніше контракти з БПЛА на мільйони доларів вважалися великою рідкістю. В даний час укладаються угоди на мільярди і вони збільшуються. Продажі продовжують рости в Азії навіть у той час, коли покупки з боку США сповільнилися. Разом з тим до 2021 року США витратять 13,7 мільярда доларів на придбання БПЛА. Із загального обсягу 70,9 мільярда доларів ринок розвідувальних БЛА протягом наступних десяти років складе 39,2 мільярда доларів, а решта 28,7 мільярда будуть спрямовані на дослідження і розроблення та, можливо, два-три мільярди доларів – на послуги за контрактами на поставки безпілотників.

Сполучені Штати залишаються найбільшим покупцем в цій сфері, але і витрати в інших регіонах світу будуть швидко рости. Витрати США на науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи у цієї галузі складуть

11,6 мільярда доларів у розглянутий період – близько 40 відсотків світового обсягу. Європа і Азія витратять на ці цілі 8 мільярдів доларів і 7,1 мільярда доларів відповідно. На американські компанії буде припадати 41 відсоток або 16,5 мільярда доларів продукції ринку, і цей показник може вирости ще більше в перспективі.

Європа планує витратити 5,7 мільярда на закупівлю безпілотників. Європейські уряди працюють над власними програмами БПЛА, але недолік фінансування перешкоджає необхідним дослідженням. І незважаючи на появу в цей період нових європейських безпілотних систем, держави Європи будуть як і раніше активно закуповувати неєвропейські БПЛА. Азія витратить 14,3 мільярда доларів на безпілотні літальні апарати у розглянутий період. При цьому на Китай може припадати близько 60 відсотків цих витрат. Пекін стане купувати лише деякі зарубіжні системи, тоді як більшість своїх потреб забезпечить, спираючись на розроблення вітчизняних компаній. За прогнозами “Форкаст” цивільний сегмент БПЛА також буде зростати.

Зусиллями вітчизняних розробників вже створені макетні і дослідні зразки міні-БПЛА, БПЛА ближньої дії і БПЛА малої дальності, ведуться роботи зі створення БПЛА середнього і великого класів. Дані БПЛА здатні нести корисне навантаження різного призначення і масогабаритних показників. Крім цього опрацьовується питання створення лінійки БПЛА з вертикальними зльотом і посадкою від міні до БПЛА середнього і великого класів. Певні науково-технічні напрацювання в даній області мають й українські організації. З урахуванням науково-технічного потенціалу та напрацювань українських організацій можливо розглядати БПЛА як ефективні комплекси та системи вирішення питань екологічної безпеки та збалансованого розвитку.

Відомо, що ключовим елементом безпілотного авіаційного комплексу з застосуванням дистанційно пілотованого літального апарату (ДПЛА) є оператор безпілотного літального апарату. У ВПС США, Ізраїлю, Німеччини, Росії та інших країн оператор управління БПЛА [128] сьогодні це перш за все

офіцер, який має льотну підготовку. Майбутніх фахівців даного профілю відбирають з числа льотчиків (штурманів) винищувачів, транспортних літаків або вертольотів. Всі вони призначаються на посади операторів управління безпілотними літальними апаратами терміном в середньому на 2–3 роки. В даний час приблизно 80% майбутніх операторів безпілотних літальних апаратів, наприклад, ВПС США – це льотчики тактичних винищувачів, інші – пілоти (штурмани) військово-транспортних і інших типів літаків (вертольотів). У ВПС США відбір кандидатів на посади операторів (осіб, які безпосередньо здійснюють пілотування) безпілотних літальних апаратів проводиться з військовослужбовців третьої категорії. До першої категорії належать військовослужбовці льотного складу авіації ВПС (всіх родів авіації), що мають досвід льотної роботи, в тому числі в бойових умовах. Як правило, в цю категорію входять військовослужбовці, які призначаються на посади операторів безпілотних літальних апаратів терміном на 3–4 роки. Друге джерело комплектування операторів безпілотних літальних апаратів – випускники академії ВПС і курсів позавійськової підготовки офіцерів при цивільних вищих навчальних закладах. До третьої категорії належать військовослужбовці, які раніше не були пов'язані з пілотуванням літальних апаратів (офіцери бойового управління, тилу і ін.). У зв'язку з тим, що рівні підготовки зазначених категорій військовослужбовців, які плануються до призначення на посади операторів безпілотних літальних апаратів, різні, то відрізняються і програми їх навчання. При цьому загальна тривалість навчання офіцерів, які не мали льотну підготовку, становить 10 місяців, мають її – 6 місяців.

У Китайській Народній Республіці, наприклад, теоретичне навчання офіцерів на БАК СН-4 здійснюється протягом одного місяця, практичне – протягом 4–6 місяців на території замовника. У Збройних силах Республіка Беларусь за період 2008–2010 рр. керуванням застосування і розвитку БАК створена система підготовки фахівців із застосування підрозділів БАК, що дозволило вже в 2009 році зробити перший набір курсантів в вищій



навчальний заклад – “Військову академію Республіки Білорусь”. Далі підготовка операторів БПЛА за таким же навчальним планом здійснюється в навчальному закладі «Білоруської державної академії авіації». Паралельно на курсах цього вузу готують операторів БПЛА з теоретичною підготовкою протягом 1,5–2 місяців, практичної – до 1 місяця.

На жаль, “безпіотною” справою в Україні поки займаються фахівці в основному нельотних професій. Але ж навіть в словосполученні безпілотна авіація ключовим є слово «авіація», яке походить від латинського слова avis, тобто птах. Особливу важливість мають питання впровадження ДПЛА в сферу екології та природокористування. Тому виникає необхідність розроблення методології тренажної підготовки та розроблення тренажерів ДПЛА екологічного моніторингу.

В результаті стрімкого розвитку безпіотної авіації, в розроблення і серійне виробництво безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різного класу [118, 125] і призначення вже залучені півсотні країн світу, причому «безпілотники» стали активно витіснити пілотовану авіацію [133], особливо в тих сферах, де людський фактор відіграє, за певних обставин, суттєву роль в зниженні бойового потенціалу комплексу озброєння та ефективності його застосування. На сьогоднішній день в нашій країні створюється чимало БАК різного призначення, в тому числі для екологічного спостереження. Управління польотами БПЛА [122-124] полягає в передачі від групи керівництва польотами (ГКП) БПЛА умов польоту, команд та інформації операторам і направлено на своєчасне і безпечне виконання ними польотних завдань. Управління БПЛА здійснюють оператори. ГКП БПЛА постійно контролюють дотримання операторами заданого режиму польоту і виконання поданих команд. Відповідно до Авіаційних правил організації та виконання польотів державних БПЛА, управління польотами БПЛА здійснюється при стійкому двосторонньому зв’язку оператора з ГКП БПЛА і, як правило, при безперервному радіолокаційному контролі в межі зони виявлення радіолокаційною станцією. Всі вищевикладені схеми зв’язку існують при

проведенні планових польотів на штатних аеродромах (майданчиках) і відображені в інструкції з виконання польотів для конкретного аеродрому. Однак, у випадках, коли управління польотами БПЛА здійснюється поза пунктом дислокації підрозділів БАК, виникає певна складність в організації зв'язку між керівником польотів (КП), вищим командним пунктом. На сьогоднішній день цей зв'язок здійснюється за допомогою мобільних мереж, які не є штатними засобами зв'язку. Крім того, не передбачені способи резервування даного виду зв'язку, а це в першу чергу впливає на безпеку повітряного руху. Проаналізувавши всі способи застосування БАК поза аеродромом постійної дислокації в інтересах екологічного моніторингу, з урахуванням типу БАК і віддаленості його від вищого командного пункту, а також існуючі засоби зв'язку (короткохвильовий, ультракороткохвильовий діапазони, засоби прив'язки до опорних вузлів зв'язку) і перспективні засоби, що надходять на озброєння у війська зв'язку, можна прийти до висновку, що для виконання всіх вимог, що пред'являються до системи зв'язку, яка є підсистемою управління, слід використовувати комплекс засобів. А з огляду на те, що терміни на виконання завдання обмежені за часом, комплекс повинен бути мобільним. У разі, коли технічні характеристики мобільного комплексу засобів зв'язку не дозволять виконати поставлені завдання, можуть надаватися допоміжні засоби, рухомі вузли зв'язку, які в своєму складі мають радіостанції ультракоротких хвильових і коротких хвильових діапазонів, з тією лише особливістю, що ці радіостанції малопотужні і не дозволять вести переговори при видаленні від командних пунктів (КП) на великі відстані. При цьому передбачено супутниковий зв'язок, аналогова і дискретна передача інформації, апаратура шифрування. Всі ці засоби об'єднуються в одну загальну мережу і можуть управлятися програмно. Для підготовки фахівців та тренування управління такими мобільними комплексами екологічного спостереження доцільне створення та використання відповідних тренажерних комплексів.

Метою навчання на тренажері є підвищення якості управління ДПЛА екологічного спостереження за рахунок оптимізації навчального плану з оволодіння одиничними навичками, що дає можливість знизити аварійність через “людський фактор”. Додатково, ефективність навчання на тренажері можна підвищити, враховуючи індивідуальні особливості кожного з операторів, які включають в себе наступні параметри: швидкість засвоєння інформації, рівень засвоєння попередніх навичок. Дуже важливим фактором є рівень знань пілотів-операторів, з яким вони приступають до навчання на тренажері. Основну частину навчального часу необхідно приділити тим навичкам, які в більшій мірі впливають на аварійність ДПЛА через “людський фактор” і наносять максимальний збиток і навколишньому середовищу при їх неправильному виконанні. Тому більша частина всього навчального часу повинна виділятися на вивчення і відпрацювання тих навичок, які пов’язані з аварійністю. Решта навчального часу розподіляється між навичками на підставі врахування індивідуальних особливостей.

На першому етапі потрібно розрахувати коефіцієнт важливості кожної навички на основі кількості аварій, що сталися з причини його виконання. Від величини отриманого коефіцієнта залежить виділений час на відпрацювання даної навички.

На другому етапі виконується оптимізація навчального плану за критерієм можливого завданого збитку (сумарною кількістю помилок при виконанні одиничного тренінгу).

Тому, весь час навчання, певне в навчальному плані, розбивається на дві частини. Одна з цих частин (більша частина) розподіляється відповідно до експертних оцінок  $t_{1e}, t_{2e} \dots t_{ne}$  між тренінгами. Решта (менша частина) будуть розподілені у відповідності з наступним алгоритмом:

1. Визначаємо важливі вправи (навички) за якими розглядаємо час навчання згідно зі статистикою аварійності при їх виконанні (алгоритм розрахунку коефіцієнта важливості). Таким чином формується план навчання.

2. Визначаємо час, який буде витрачено на кожну навичку при теоретичному навчанні.

3. Визначаємо час, який буде витрачено на кожну навичку при тренажерному навчанні; час, витрачений на навичку  $n$  при практичному (тренажерному) навчанні; час, витрачений на навчання за кожною складовою даної навички (отримуємо з поточного плану навчання);  $k$  – кількість складових частин  $n$ -го навичку;  $n$ -номер навички.

4. Визначаємо кількість теоретичної інформації, яку пілоти сприймають при читанні електронних підручників, за кожною навичкою: номер навички; кількість теоретичної інформації, яку пілоти сприймають при читанні; час, витрачений на навичку  $n$  при теоретичному навчанні; швидкість сприйняття інформації.

5. Визначаємо щільність інформації (відношення кількості інформації до часу, відведеного на її вивчення), сприйнятої на тренажері, час, витрачений на навичку  $n$  при практичному (тренажерному) навчанні.

6. Визначаємо коефіцієнти важливості при уникненні аварій за навичками (коефіцієнти важливості), коефіцієнт важливості за  $n$ -ою навичкою; кількість аварій за  $m$ -ою причиною. Кількість аварій і причини, які їх викликали, дізнаємося з статистики аварійності.

7. Визначаємо кількість інформації відповідно до коефіцієнтів важливості навичок; кількість інформації, перерозподіленої, згідно важливості навичок; кількість теоретичної інформації  $n$ -ої навички, яку пілоти сприймають при читанні.

8. З огляду на вихідні щільності потоків інформації, визначимо час навчання за кожною навичкою.

Оптимізувати навчальний план будемо за допомогою введення коефіцієнтів важливості, згідно зі завданнями екологічного моніторингу.

*Оптимізація навчального плану за критерієм завданих екологічних збитків.* Нехай збиток від невиконання тренінгу –  $S$ . Загальний оптимальний план тренінгів, що забезпечує максимальну ефективність від усієї множини

пройдених тренінгів, будемо будувати за таким способом. Умовно розділимо функціонал ефективності за кожним видом одиничного тренінгу на рівні за часом відрізки.

Потім, враховуючи той факт, що питома вартість хвилини для різних тренінгів може відрізнятися (наприклад, використовуються тренажери різної вартості), побудуємо послідовність відрізків, починаючи з відрізка, що має найбільше співвідношення “ефективність – вартість” і до відрізка з найменшою величиною цього значення. Якщо вартість хвилини тренінгів збігається, то ранжування відбудеться просто за величиною питомої ефективності  $dS/dt$ . Відзначимо, що при обліку питомої вартості тренінгу виникає величина, альтернативна  $T_{max}$ , а саме оптимальний час  $T$ , при якому питома ефективність  $dS/dt$  стає рівною питомої вартості тренінгу.

Навчати далі сенс є, якщо час  $T_{max}$  ще не досягнуто, проте навчання далі є умовно збитковим. Далі приступаємо до процедури обмеження цієї множини за критерієм максимально допустимої тривалості навчальних курсів або за максимально допустимою загальною вартістю навчання.

*Оптимізація навчального плану за критерієм успішності навчання.* Відомо, що рівень освоєння будь-якого досвіду, природно, поступово зростає і досягає свого максимуму при збільшенні часу навчання. Недоліком загальноприйнятого підходу до складання навчальних планів і, зокрема, до планування навчання на тренажері, є їх розрахунок на “середньостатистичного оператора”. Однак навіть при незмінному складі навичок має сенс індивідуалізувати розподіл часу на їх освоєння з урахуванням здатності кожного оператора пілота і складності самих навичок. Ця здатність, перш за все, залежить від якості навчання або “успішності” на попередніх етапах і від ступеня деградації вміння з часом (здатності пам’ятати або забувати засвоєне).

При паралельному освоєнні простих і складних навичок сумарний час  $T$  на черговому етапі навчання обмежений. Тому при плануванні тренажних

дій доводиться жертвувати одними навичками на догоду іншим, а це в значній мірі залежить від індивідуальних особливостей оператора.

Тому необхідно вивчити ці здібності, а саме сформувані математичну модель якості навчання і далі – оцінити параметри цієї моделі для кожної індивідуальної групи. Для цього пропонується рішення оберненої задачі оптимізації. Отримані оцінки дозволять поставити і вирішити пряму задачу оптимального гнучкого планування навчання, що має забезпечити позитивний ефект, а її реалізація можлива в тренажерному комплексі.

При цих припущеннях потрібно провести оцінювання швидкості освоєння простих і складних навичок і коефіцієнтів взаємозв'язку за результатами тестування, а також здійснити оптимальне планування індивідуального навчання пілотів на новому етапі.

В якості методів ідентифікації великого поширення набули інтелектуальні методи. Алгоритми методу групового обліку аргументів (МГУА) реалізують принцип самоорганізації моделей і відтворюють схему масової селекції. МГУА фактично є методом пошуку закономірностей з автоматичним вибором структури і параметрів моделі, тобто реалізує як параметричну, так і структурну ідентифікацію, що є його основною перевагою. Метод ефективний в умовах малого обсягу експериментальних даних і високого рівня шумів. Недоліком МГУА є те, що принцип свободи вибору, який реалізується при визначенні параметрів методу, призводить до його неадекватного застосування. Алгоритм МГУА відносять до еволюційних алгоритмів, загальним для яких є те, що вони моделюють процес біологічної еволюції: мутації структури і параметрів, їх схрещування (розмноження) і правил відбору. Це дозволяє виявляти їх сприятливі варіації, за допомогою яких будується послідовність поліпшених рішень. Еволюційні алгоритми (послідовний перебір і випадковий пошук) є методами глобальної оптимізації, які доцільно використовувати при параметричній ідентифікації складних об'єктів (процесів). Серед еволюційних алгоритмів найбільшого поширення набули генетичні алгоритми (ГА), що представляють собою

адаптивні методи пошуку, засновані на механізмах природного добору і успадкування на рівні генів.

В них використовується еволюційний принцип виживання найбільш пристосованих осіб (генів): розмноження найбільш пристосованих до зовнішнього середовища генів, а також виробництво генів з характеристиками, які були відсутні у генів попередніх поколінь. При цьому, основними операторами генетичних алгоритмів є кросинговер, мутація, вибір батьків і селекція. До переваг генетичних алгоритмів відносять здатність знаходження глобального екстремуму, високу швидкодію при багатопроцесорній обробці і продуктивність. До недоліків – потреба у великому об'ємі пам'яті. Для параметричної ідентифікації важливим є питання вибору типу базисних функцій. У МГУА, наприклад, в якості базисних функцій використовуються, як правило, поліноми Колмогорова-Габора. Розвитком поліноміального представлення функцій є нейронні мережі (НМ) – обчислювальні структури, що моделюють процеси мозку і складаються з безлічі однакових елементів – штучних нейронів. Обґрунтуванням ефективності використання нейронної мережі є доказ можливості представлення функції декількох змінних через суперпозицію функцій однієї змінної, а також операцій їх додавання і множення. Таким чином, нейронна мережа є універсальними та ефективними засобами.

Архітектура нейронної мережі залежить від конкретної розв'язуваної задачі і характеризується кількістю шарів нейронної мережі, кількістю нейронів в кожному шарі і їх функціями активації, алгоритмами навчання мережі і т.д. Архітектура багатшарової нейронної мережі прямого поширення складається з послідовно з'єднаних шарів, де нейрон кожного шару своїми входами пов'язаний з усіма нейронами попереднього шару, а виходами – наступного. Навчаються багатшарові нейронні мережі за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки, який є різновидом градієнтного спуску з метою мінімізації сумарної помилки мережі. Нейронна мережа з радіальними базисними функціями (РБФ) – це двошарова мережа

без зворотних зв'язків, яка містить прихований (шаблонний) шар радіально симетричних нейронів і вихідний лінійний шар.

Навчання нейронної мережі з РБФ відбувається в два етапи. На першому етапі визначаються центри і відхилення для радіальних елементів, на другому – оптимізуються параметри лінійного вихідного шару. Перевагою мереж з РБФ є те, що вони моделюють довільну нелінійну функцію за допомогою всього одного проміжного шару, тим самим, знімаючи проблему вибору числа шарів. Крім того, параметри лінійної комбінації в вихідному шарі можна оптимізувати за допомогою методів лінійної оптимізації, які швидко сходяться. Поряд з нейронними мережами широке поширення також отримали системи з нечіткою логікою, які дозволяють побудувати модель об'єкта, які ґрунтуються на нечітких припущеннях і правилах. Для усунення недоліків НМ і систем з нечіткою логікою запропоновані гібридні НМ, варіантом яких є адаптивна нейронна система нечіткого виведення (Anfis - Adaptive neuro-fuzzy inference system).

Алгоритм оптимізації тренажної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження з використанням генетичних алгоритмів відповідно до виразу здійснюється наступним чином:

Крок 1. Визначення цільової функції (критерію структурної оптимізації). Виконується визначення структурних характеристик моделі: типу базисних функцій, кількості нейронів в прихованому шарі, типу функцій активації (приналежності) прихованого шару, а також типу алгоритму параметричної оптимізації.

Крок 2. Формування початкових умов. Ці умови розглядаються як є вектор з елементами у вигляді структурних характеристик. На цьому етапі здійснюється настройка опцій генетичного алгоритму: умови зупинки, розміру популяції, а також формування генетичних операторів (мутації, відбору, кросинговеру, міграції та ін.).

Крок 3. Обчислення значення цільової функції для початкових умов. За допомогою алгоритмів локальної оптимізації, базисних функцій



визначаються значення виходу моделі об'єкту управління, за якими обчислюється значення критерію структурної оптимізації (цільової функції).

Крок 4. Чи виконується умова зупинки алгоритму? Якщо так, то здійснюється перехід до кроку 8, інакше – перехід до кроку 5. При цьому, умови зупинки генетичного алгоритму наступні: число поколінь досягає заданого значення; –перебільшено заданий час роботи алгоритму; – значення цільової функції кращої поточної популяції досягає екстремуму; – немає поліпшення цільової функції в послідовності наступних один за одним поколінь, довжина якої задана на кроці 2; – немає поліпшення для цільової функції протягом заданого інтервалу часу.

Крок 5. Формування нових умов відбувається за допомогою генетичних операторів, налаштованих на кроці 2. Спочатку відбувається відбір батьків, потім схрещування і імовірна мутація нащадків. Тут також встановлюється частка мігруючих особин з однієї популяції в іншу.

Крок 6. Обчислення значення цільової функції для нових особин відбувається аналогічно обчисленням на кроці 3.

Крок 7. Відбір особин з найкращими значеннями цільової функції. У нову популяцію особини відбираються в залежності від значень їх функцій придатності (цільових функцій). Далі виконується перехід до кроку 4.

Крок 8. Формування моделі оптимальної структури тренажерного комплексу. За допомогою генетичного алгоритму визначаються значення кращих структурних характеристик, відповідних екстремуму цільової функції.

У подальшому розглядається процедура ідентифікації нелінійних систем з дискретним часом на основі нейронних мереж з одним прихованим шаром. Розроблено рекурсивні алгоритми отримання оцінки невідомих параметрів для моделі нейронної мережі, засновані на використанні помилки прогнозування. Показано, що класичний алгоритм зворотного поширення є окремим випадком нових підпрограм помилок прогнозування і випробування

моделі достовірності, який вводиться як засіб вимірювання якості відповідності.

Проведемо необхідну оцінку параметрів при вирішенні оберненої задачі параметричної оптимізації в наступному вигляді – за даними тестування визначимо показники швидкості освоєння навичок на кожному етапі навчання.

*Алгоритм оптимізації навчального плану за критерієм успішності*

Для оптимізації індивідуальних планів навчання з метою спрощення рішення задачі критерій має бути поданий у вигляді трьох додатків для кожної з навчальних груп (сильна, середня, слабка) і проводити оптимізацію окремо.

## **1.2. Особливості вимог до тренажерного комплексу управління польотом ДПЛА екологічного моніторингу**

Аналіз недоліків існуючих і використовуваних в даний час тренажерів ДПЛА [111, 116, 120, 121] показав, що організувати на їх основі повномасштабне автоматизоване освоєння пілотами-операторами ДПЛА екологічного спостереження відповідно до інструкцій неможливо. Створення автоматизованих систем управління освоєнням завдань екологічного моніторингу на основі спеціальної бази знань предметної області дозволить подолати основні недоліки існуючих ДПЛА і забезпечить ведення процесу екологічного моніторингу з урахуванням завдань моніторингу та забезпечення екологічної безпеки. При цьому система навчання на тренажері повинна мати можливість ефективної роботи зі знаннями предметної екологічної та природоохоронної галузі. Так як база знань займає центральне місце в тренажері, то для її створення необхідно відповісти на важливі питання. В першу чергу потрібно визначити алгоритми формування бази знань і методику її використання в процесі автоматизованого освоєння

пілотами управління ДПЛА екологічного спостереження. Виділимо вісім основних типів знань:

1. Базові елементи. Вони подаються у вигляді фактів і не вимагають обговорення.

2. Твердження про визначення. Вони ґрунтуються на базових елементах і заздалегідь розглядаються як достовірні.

3. Концепції. Вони визначають собою перегрупування або узагальнення базових елементів.

4. Відносини. Вони висловлюють елементарні властивості базових елементів і концепцій.

5. Теореми і правила перезапису. Вони є окремими випадками правил з цілком певними властивостями. Теореми не мають користі без правил їх використання.

6. Алгоритми. Використання алгоритмів обмежена окремими випадками, більша частина яких має справу з обробленням числової інформації.

7. Стратегії і евристика. Це правила поведінки, які дозволяють в даній конкретній ситуації прийняти рішення про необхідні дії.

8. Мета знання. Воно являє собою знання того, що відомо, будь-яке знання про знання. Воно є фундаментальним поняттям для систем, які вміють на основі бази знань робити висновки, структурувати її, абстрагувати, узагальнювати, а також вирішувати, в яких випадках вона може бути корисна.

Базові елементи, твердження та визначення, концепції і відносини відносять до початкових знань про елементи предметної області. Знання подібного виду можуть бути представлені у формі статичних фреймів, предикатів, правил продукції. Такі знання зручно представляти у формі динамічних фреймів, скриптів, семантичних мереж. Стратегії, евристика і мета знання також можна представити у формі динамічних фреймів, скриптів і семантичних мереж. Сучасна практика формального представлення знань

допускає використання змішаних форм: продукційно-фреймових, фрейм-структур або мережі фреймів. Такий підхід дозволяє ефективно поєднувати переваги різних форм представлення знань в тренажері. Таким чином, в структурі бази знань тренажера можна виділити основний зміст, а саме факти і правила. До складу фактів входять опису об'єктів (понять), їх ознак і відповідні числові ознаки. Правила є шляхи винесення суджень на основі фактів для вирішення конкретної проблеми.

Одним із шляхів підвищення якості навчання управління ДПЛА екологічного спостереження на тренажері є підвищення ефективності управління процесом автоматизованого освоєння завдань моніторингу шляхом розроблення алгоритмічного забезпечення спеціальної бази знань тренажера ДПЛА екологічного моніторингу. Для вирішення цього завдання необхідно:

- розроблення алгоритмів придбання і поповнення знань в спеціальній базі знань тренажера ДПЛА екологічного моніторингу;

- розроблення методики автоматизованого формування навчально-тренувальних операцій, що забезпечує підвищення дидактичного потенціалу спеціальної бази знань тренажеру;

- формування узагальненої структурної моделі автоматизованої системи управління освоєнням, як основи для створення спеціалізованого тренажера ДПЛА екологічного моніторингу. Структуру бази знань можна уявити як бази правил і бази даних.

У базі даних зберігається фактографічна інформація про об'єкт і дані, які відносяться до даної предметної області (завдання екологічного моніторингу, інформація про об'єкти моніторингу та навколишнє середовище).

Крім знань про предметну область в базі знань можуть зберігатися і такі знання як окремі системи, знання про користувача, цілі та інша інформація. Такі знання як правило містяться на другому рівні уявлення у вигляді блоків або органічних частин бази правил. У тренажерах ДПЛА

екологічного моніторингу, що працюють в реальному часі, здійснюється рівень метазнань (знання системи про себе, її структуру і про принципи функціонування), який використовується для того щоб більш раціонально оперувати процесами в базі знань, зменшити області пошуку рішення задачі, скоротити час оброблення даних.

Особливості набуття знань в автоматизованій системі управління тренажера ДПЛА екологічного моніторингу.

В літературі використовується досить багато різновидів поняття “отримання” знань інтелектуальною системою [16, 45, 89, 121]. Поряд з терміном “отримання” широко використовуються й інші терміни, наприклад: “придбання”, “витяг”, “видобуток”, “формування”, “поповнення”. В англійській літературі використовуються в основному два терміни: acquisition (придбання) і elicitation (витяг).

Найбільш широку трактовку має термін “придбання знань”. Як показано в [102], придбання знань характеризується наступними аспектами: етапом придбання знань; моделлю придбання знань; номенклатурою придбання знань; рівнем знань; засобами налагодження знань. Для наповнення бази знань тренажера ДПЛА можна запропонувати наступну послідовність роботи з текстовими джерелами: – складання списку базової літератури для ознайомлення з предметною областю; – вибір тексту для здобуття знань; – швидке прочитання тексту; – уважне прочитання тексту з виписуванням ключових слів і виразів; – визначення зв’язків між ключовими словами, розроблення макроструктури тексту в формі графа (гіпертексту) або реферату; – формування моделі знань. Характер джерел впливає на розуміння тексту. Найпростіше працювати з підручниками, в яких знання добре структуровані, а суб’єктивні чинники мінімальні. Складніше обробляти технічні описи, інструкції та настанови.

Виявлення структури понять при придбанні знань в автоматизованій системі управління тренажером ДПЛА.

Придбанням знань називається підхід, при якому посередником між джерелом знань і базою знань є комп'ютерна система [15]. Цей підхід реалізується при використанні в системі моделі знань у вигляді неоднорідної семантичної мережі.

У тренажері ДПЛА неоднорідна семантична мережа будується за допомогою інтерактивного інтерпретатора знань програмного забезпечення тренажера. Об'єктами інтерпретації є імена предметів і процесів, їх властивості, області значень властивостей і відносини на безлічі предметів і процесів. В програмному забезпеченні тренажера використовується стратегія прямого придбання знань від експерта (інструктора). Ця стратегія спрямована на виявлення структури понять предметної області.

В тренажері ДПЛА можливі два варіанти придбання знань: безпосереднє вилучення знань і пряме їх придбання за допомогою стратегії розбиття на ступені і інтерактивного інтерпретатора знань, що дозволяє придбати знання при недостатньому рівні кваліфікації експерта (інструктора).

#### Поповнення знань в автоматизованій системі управління ДПЛА екологічного моніторингу.

Поповнення бази знань здійснюється різними методами при спілкуванні з зовнішнім середовищем, при постановці нових завдань і при досягненні нових цілей. В даний час основним методом є прямий діалог з експертом (інструктором).

Якщо поставити перед собою завдання – розроблення тренажера ДПЛА екологічного моніторингу як високоінтелектуальної автоматизованої навчальної системи, що базується на всеосяжній моделі представлення предметної області, то для досягнення практичних результатів потрібно визначити структуру та функції моделі автоматизованої системи управління тренажера.

Узагальнена структурна модель автоматизованої системи управління тренажера ДПЛА.

Аналіз функціональної діяльності оператора тренажера ДПЛА дозволяє виділити п'ять основних функціональних компонентів діяльності навчаемого, тісно взаємодіючих між собою: – гностичний (аналіз цілей, змісту, методів навчання); – проектувальний (перспективне планування курсу); – конструктивний (оперативне планування занять); – організаційний (організація навчального процесу); – комунікативний (інформаційну взаємодію між навчаючим і учнем).

Процес навчання на тренажері включає засвоєння змісту освіти (знань, умінь, навчального матеріалу) оператором і управління цими процесами засвоєння. Управління (контроль за діяльністю оператора) може здійснюватися як безпосередньо інструктором в контакті з оператором-пілотом, так і опосередковано – через програмно-апаратну систему автоматизованого навчання, методичний посібник.

База знань в даній моделі служить для формування моделі управління процесом освоєння управління ДПЛА екологічного спостереження і вироблення (вибору) впливу з метою приведення процесу тренування до необхідного виду.

### **1.3. Критерії ефективності навчання на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу**

Для завдання організації навчального процесу на спеціалізованому тренажері ДПЛА екологічного моніторингу необхідно розбити все поле професійної діяльності пілота на окремі епізоди (поодинокі тренінги), поведінка в яких призводить або не призводить до небажаних наслідків. Головною функцією комп'ютерної програми-оптимізатора плану тренажерної підготовки є оцінка якості освоєння на поточному кроці і розподіл часу для паралельного освоєння навичок в майбутньому, а також

розбиття учнів за здібностями на три групи – сильні, середні і слабкі. Ефективність використання тренажерів вважається загальноновизнаною, однак практично відсутні обґрунтовані методики оцінки ефективності тренінгу.

Підвищення ефективності навчання на тренажері можна досягти за рахунок формування навчальних планів, підвищуючи час навчання одиничним навичкам.

Для кількісної оцінки пілота і ризику виникнення нештатної (аварійної) ситуації доцільне ввести поняття ймовірності вчинення ним помилки при навчанні на тренажері. Призначення тренажера при такому підході – максимально знизити ймовірність здійснення оператором ДПЛА помилки за кожним епізодом або за темою з усією безліччю дій в полі професійної діяльності екологічного моніторингу.

Система проходження одиничних тренінгів може бути організована за таким способом. Кожен той, якого навчають відпрацьовує тренінг на тренажері. Поодинокі тренінги формуються в групи, а групи – в послідовний цикл. Поодинокі тренінги проводяться послідовно, після кожного одиничного тренінгу може проводитися короткий аналіз скоєних дій, правильних або неправильних, шляхом включення «прокрутки» еталонного сценарію одиничного тренінгу спільно з системою підказок. Одночасно з послідовним проведенням тренінгу йде фіксація зроблених помилок. При наявності хоча б однієї помилки або затримки з виконанням правильних дій більш відведеного часу тренінг вважається не виконаним.

Одним з підходів до формування критерію, що визначає ефективність навчання на тренажері, є надання кожному одиничному тренінгу деякого чисельного значення, наприклад, середнього збитку при здійсненні оператором помилки за темою одиничного тренінгу і відповідного йому одиничного досвіду на реальному польоті ДПЛА.

В якості критерію ефективності одиничного тренінгу може бути використана умова, що враховує успішність операторів-пілотів на тренажері. Дослідження показує, що при навчанні на тренажері застосування критерію



виду максимуму сумарної успішності не дає можливості виключити неприпустимо низьких оцінок. Застосування гарантійного мультиплікативного критерію забезпечить більш високу якість навчання без сильного зниження окремих оцінок, хоча воно ускладнює процес вирішення поставленого завдання.

Метою підвищення ефективності навчання на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу є оволодіння пілотами усіма необхідними навичками, що забезпечують мінімізацію часу навчання (опрацювання відповідних навиків) та максимізацію ефективності виконання польотного завдання за фіксований проміжок часу навчання. Досягнення поставленої мети можливе забезпечити за рахунок створення автоматизованої системи управління навчанням управління ДПЛА екологічного спостереження і оптимізації навчального плану шляхом визначення необхідного часу відпрацювання одиничних навичок.

Таким чином при використанні тренажерів при навчанні операторів ДПЛА екологічного спостереження практично відсутні обґрунтовані методики оцінки ефективності використання тренажерів.

Це обумовлено, перш за все, відсутністю спеціальної бази знань, що дозволяє автоматизувати процес освоєння ДПЛА екологічного спостереження. У свою чергу формування спеціальної бази знань для автоматизованої системи управління освоєнням ДПЛА екологічного спостереження неможливо через недосконалість існуючого алгоритмічного забезпечення. Відсутність конструктивного і науково обґрунтованого підходу до оцінки ефективності тренінгів, і, отже, до проектування тренажерів ДПЛА екологічного спостереження, є перешкодою до створення автоматизованих систем управління навчанням операторів. Недоліком загальноприйнятого підходу до складання навчальних планів і, зокрема, до планування навчання на тренажері, є їх розрахунок на “середньостатистичного оператора”. Однак навіть при незмінному складі тренінгів або навичок має сенс

індивідуалізувати розподіл часу на їх освоєння з урахуванням складності самих навичок для кожного оператора.

Ця здатність, перш за все, залежить від якості навчання або “успішності” на попередніх етапах і від ступеня деградації вміння з часом (здатності пам’ятати або забувати засвоєне). Основним підходом до вирішення завдання підвищення ефективності навчання на тренажері є побудова автоматизованої системи управління навчанням та розробка оптимізатора навчального плану відповідно до обраних критеріїв, що дозволяють врахувати екологічну безпеку, аварійність, можливий збиток і успішність навчання. На підставі вищевикладеного, доцільне визначити, що методологія підвищення ефективності навчання пілотів на тренажері, повинна передбачати наступні завдання:

- розробка автоматизованої системи управління навчанням оператора ДПЛА екологічного спостереження;
- оптимізація навчальних планів відповідно до завдань екологічного моніторингу;
- оптимізація навчальних планів відповідно до індивідуальних якостей оператора.

Відмінною особливістю запропонованої методології є розроблення автоматизованої системи управління навчанням управління ДПЛА екологічного спостереження, що служить для формування моделі управління процесом навчання і вироблення (вибору) впливу з метою приведення процесу навчання до необхідного виду на підставі формування та використання бази знань. Це дозволяє автоматизувати процес освоєння ДПЛА екологічного спостереження. Автоматизована система управління навчанням управління ДПЛА екологічного спостереження служить для формування моделі управління процесом навчання, оптимізації навчальних планів навчання на тренажері.

У цій системі кожен оператор за каналом зв’язку повідомляє результати виконання чергового завдання екологічного моніторингу (якість

виконання оцінюється часом безпомилкового рішення). Залежно від результатів оптимізатор плану призначає новий тип завдання, в тому числі час його освоєння кожним оператором з урахуванням заданого загального часу на навчання.

#### **1.4. Шляхи та напрямки підвищення якості підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу**

Видами льотної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження є: техніка пілотування, навігаційна підготовка, застосування спеціальної апаратури та льотно-тактична підготовка. Методика льотної підготовки – це організація, обсяг, зміст і послідовність підготовки операторів ДПЛА до виконання завдань екологічного моніторингу – організація, обсяг, зміст, послідовність підготовки та вдосконалення навичок операторів безпілотних літальних апаратів. Існуючі методики льотної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження підлягають творчій переробці з урахуванням особливостей і специфіки безпілотної авіації екологічного спостереження.

Підготовка пілотів на авіаційному тренажері екологічного моніторингу це один з найважливіших елементів забезпечення безпечної експлуатації ДПЛА. Вона дозволяє мінімізувати негативний вплив від людського фактору, тобто звести до мінімуму можливість помилкових дій оператора ДПЛА екологічного спостереження. Тренажерна підготовка є специфічним етапом професійної підготовки майбутніх операторів ДПЛА екологічного спостереження. У загальному випадку тренажер ДПЛА є спеціалізований комплекс технічних засобів, що моделюють процес пілотування в наземних умовах з високим рівнем схожості. Тренажер є універсальним засобом наземної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження і служить для вирішення наступних завдань:

– ознайомлення з діяльністю органів управління ДПЛА і його систем;

- відпрацювання навичок з оцінювання ситуації та прийняття рішення в особливих випадках і при виконанні моніторингових завдань;
- відпрацювання навичок дій в особливих випадках в польоті;
- відпрацювання дій органами моніторингу за елементами польотних завдань;
- автоматизована постановка завдань на льотну зміну;
- самостійна підготовка операторів ДПЛА;
- груповий контроль готовності до виконання завдання екологічного моніторингу;
- аналізування індивідуальних польотів і в складі льотної групи.

Ефективність підготовки операторів авіаційних тренажерів екологічного моніторингу визначається наступними положеннями:

- на тренажері простіше і безпечніше, ніж в польоті, відпрацьовувати більшість операцій, багаторазово їх повторюючи;
- на тренажері безпечно відпрацьовувати дії операторів ДПЛА при моделюванні аварійних ситуацій, які неможливо, або небезпечно створювати в реальному польоті;
- експлуатація тренажера набагато економніше, ніж в реальному польоті ДПЛА.

Підготовка на тренажерах екологічного моніторингу дає широкі можливості в дослідженні нових прогресивних методів і прийомів навчання, дозволяє робити аналіз допущених помилок в техніці пілотування і експлуатації систем ДПЛА екологічного спостереження. Існуюча модель тренажерної підготовки передбачає першочергове вирішення завдання формування автоматизованих сенсомоторних дій рефлексорного рівня. Рефлексологічний підхід при підготовці майбутніх пілотів літальних апаратів практикувався довгий час і був заснований на використанні ЛА з простим управлінням. В міру ускладнення систем управління ДПЛА екологічного спостереження підвищуються роль і значення інтелектуальних професійно

важливих якостей операторів, що вимагає відповідних коректив їх професійної підготовки.

Варто підкреслити досить важливий факт, встановлений останніми дослідженнями в області льотної діяльності: навик, в тому числі автоматизований, в екстремальних умовах польоту не може забезпечити надійність професійної діяльності льотного складу. Звідки виникає необхідність прогнозувати розвиток ситуації в залежності від прийнятого рішення. Таким чином, для аналізу екстремальної ситуації, а відповідно, і для розумового відтворення гіпотези прийнятого рішення, автоматизованого досвіду недостатньо. Навчання на авіаційному тренажері значно економить час навчання, а також дозволить майбутньому оператору ДПЛА екологічного спостереження впевненіше себе почувати в керуванні реальним ДПЛА. Переваги навчання на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу також полягає й у скороченні часу навчання.

Актуальність розробки комп'ютерних тренажерів ДПЛА екологічного моніторингу полягає в двох тенденціях останніх років. По-перше, має місце потреба якісного вдосконалення підготовки оператора ДПЛА екологічного спостереження, що викликана постійним ускладненням систем спостереження ДПЛА і появою нових екологічно небезпечних джерел та об'єктів. По-друге, інформаційні технології надають можливість для створення нових підходів і відповідно систем навчання на тренажері, які перевищують за ефективністю всі відомі. Діяльність операторів ДПЛА екологічного спостереження пов'язана зі сприйняттям великої кількості інформації, частину рішень доводиться приймати в умовах підвищеного ризику екологічної безпеки [112, 114] протягом короткого проміжку часу. В авіації велика відповідальність покладається на пілотів в процесі виконання їх функціональної діяльності. Тому при підготовці операторів ДПЛА екологічного спостереження необхідно чітко формувати знання і навички для управління ДПЛА, як в аварійних, так і нормальних умовах. Тренажер ДПЛА екологічного спостереження допомагає операторам не

тільки швидко реагувати на ситуацію, що виникла, а й оперативно приймати рішення і реалізувати його. В основі навчання з використанням тренажера ДПЛА екологічного спостереження має лежати формування у оператора повної орієнтації в цілях, умовах вибору і виконання професійного завдання та вирішування виникаючих проблем.

Для навчання операторів ДПЛА екологічного спостереження потрібно задіяти сучасні методики і технології, закладені у навчальному тренажері. Використання тренажера для підтримки кваліфікації оператора ДПЛА екологічного спостереження на необхідному рівні сприяє своєчасній необхідності підвищення професійного рівня. В процесі розроблення таких тренажерів основна складність полягає у відповідній мобільності технології тренажерного навчання, в якій кожен елемент системи повинен бути змодельований на високому рівні. Дійсно, маючи в своєму активі сучасні математичні моделі процесів і не вирішивши проблеми їх зв'язку з оператором ДПЛА в режимі реального часу, неможливо домогтися ефективного формування навичок управління. У той же час, маючи і моделі і потужну програмно-апаратну тренажерну платформу, але, не маючи адекватної методики комп'ютерного навчання, не можна розраховувати на закріплення і перенесення отриманих навичок і умінь в реальну практику.

Разом з тим існує певний розрив між розробками в області моделювання динамічних процесів, створенням призначених для користувача інтерфейсів і засобів підтримки інструктування з одного боку і, когнітивними дослідженнями механізмів формування та перенесення навичок з іншого.

Під когнітивним підходом до дослідження людино-машинної взаємодії розуміють установку на виявлення механізмів сприйняття і розшифровки інформації, яку людина отримує від технічної системи, а також перероблення цієї інформації в процес прийняття рішень. У цих умовах теоретично обґрунтована постановка і вирішення завдання типового пілотування, оптимально поєднує стандартні й унікальні компоненти системи. Тому питання створення методології комп'ютерного навчання пілотів,

виявляються досить актуальними. Щоб створити якісно нові системи підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження потрібно вивчити методи досліджень, що засновані на використанні апарату математичного моделювання процесів і апаратів, теорії автоматичного управління, теорії штучного інтелекту, методів когнітивного інжинірингу та статистичного оброблення даних.

На тренажерах ДПЛА екологічного моніторингу доцільно відпрацьовувати визначені завдання у відповідності до Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища, затвердженої Постановою Верховної Ради України. Такими завданнями визначено наступні.

### *1. Спостереження за атмосферним повітрям:*

– викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря (динаміка викидів забруднюючих речовин стаціонарними та рухомими джерелами, основні забруднювачі атмосферного повітря (за галузями економіки).

– транскордонне забруднення атмосферного повітря;

– якість атмосферного повітря в населених пунктах;

– стан радіаційного забруднення атмосферного повітря;

– використання озоноруйнівних речовин та їх вплив на довкілля;

– вплив забруднюючих речовин на здоров'я людини та біорізноманіття;

– моніторинг заходів, спрямованих на поліпшення стану атмосферного повітря.

### *2. Спостереження за зміною клімату:*

– оцінка антропогенних викидів та абсорбції парникових газів;

– моніторинг скорочення антропогенних викидів парникових газів та адаптації до змін клімату.

### *3. Спостереження за водними ресурсами:*

– моніторинг водних ресурсів та їх використання;

– моніторинг водозабезпеченості територій та регіонів;

– моніторинг стану та забруднення поверхневих вод;

- моніторинг скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти та очистка стічних вод;
- моніторинг транскордонного забруднення поверхневих вод;
- моніторинг якості поверхневих вод (оцінювання якості вод за гідрохімічними показниками, гідробіологічне оцінювання якості вод та стан гідробіоценозів, мікробіологічне оцінювання якості вод з огляду на епідемічну ситуацію);
- радіаційний стан поверхневих вод;
- моніторинг якості питної води та її вплив на здоров'я населення;
- екологічний стан Чорного та Азовського морів;
- моніторинг заходів щодо поліпшення стану водних об'єктів.

*4. Спостереження за збереженням біологічного та ландшафтного різноманіття, природно-заповідного фонду та національної екологічної мережі:*

- моніторинг заходів щодо збереження біологічного та ландшафтного різноманіття;
- моніторинг національної екомережі;
- моніторинг природних територій та об'єктів;
- моніторинг об'єктів природно-заповідного фонду;
- моніторинг водно-болотних угідь міжнародного значення;
- моніторинг біосферних резерватів та об'єктів всесвітньої природної спадщини;
- моніторинг за станом охорони, використання та відтворення рослинного світу;
- моніторинг лісових ресурсів;
- моніторинг за станом використання недеревних природних рослинних ресурсів;
- моніторинг за охороною та відтворенням видів рослин, занесених до червоної книги України та тих, що підпадають під дію міжнародних договорів.



- моніторинг адвентивних видів рослин;
- моніторинг стану зелених насаджень;
- моніторинг заходів щодо збереження рослинного світу;
- моніторинг за охороною, використанням та відтворенням тваринного світу;
- моніторинг тваринного світу (стан і ведення мисливського та рибного господарств; охорона та відтворення видів тварин, занесених до червоної книги України, та тих, що підпадають під дію міжнародних договорів; інвазійні види тварин; заходи щодо збереження тваринного світу);
- моніторинг стану рекреаційних ресурсів та розвиток курортних зон.

#### *5. Спостереження за земельними ресурсами та ґрунтами:*

- моніторинг структури та використання земельних ресурсів (структура та динаміка змін земельного фонду; господарська освоєність земельних угідь);
- моніторинг основних чинників антропогенного впливу на земельні ресурси (стан і якість ґрунтів; деградація земель);
- моніторинг використання та охорони земель.

#### *6. Спостереження за погодженням та збереженням надр:*

- моніторинг мінерально-сировинної бази (стан та використання мінерально-сировинної бази);
- моніторинг геологічного середовища (підземні води: ресурси, використання, якість; екзогенні геологічні процеси);
- геологічний контроль за вивченням та використанням надр.

#### *7. Спостереження за поводженням з відходами:*

- моніторинг утворення та накопичення відходів;
- моніторинг поводження з відходами (збирання, зберігання, утилізація та видалення);
- моніторинг використання відходів як вторинної сировини;
- моніторинг транскордонного перевезення небезпечних

відходів.

*8. Спостереження за станом екологічної безпеки:*

- моніторинг об'єктів, що становлять підвищену екологічну небезпеку;
- моніторинг стану радіаційного забруднення території України;
- моніторинг техногенно небезпечних об'єктів та об'єктів

критичної інфраструктури.

*9. Спостереження за впливом промисловості на довкілля:*

- моніторинг впливу на довкілля (гірничодобувна промисловість; металургійна промисловість; харчова промисловість);
- моніторинг заходів з екологізації промислового виробництва.

*10. Спостереження за впливом сільського господарства на довкілля:*

- моніторинг впливу на довкілля (внесення мінеральних і органічних добрив на оброблювані землі; використання пестицидів);
- моніторинг зрошення та осушення земель;
- моніторинг тенденцій у тваринництві;
- моніторинг органічного сільського господарства.

*11. Спостереження за впливом енергетичного комплексу на довкілля:*

- моніторинг енергетики та її вплив на довкілля (структура виробництва та використання енергії; ефективність енергоспоживання та енергозбереження);
- моніторинг впливу енергетичної галузі на довкілля;
- моніторинг використання відновлюваних джерел енергії та розвиток альтернативної енергетики.

*12. Спостереження за впливом транспорту на довкілля.*

*13. Спостереження за збалансованим виробництвом та споживанням.*

*14. Спостереження за проведенням природоохоронних дій.*

Проведений аналіз завдань екологічного моніторингу дозволяє

визначити наступні типи перспективних спеціалізованих тренажерів ДПЛА екологічного спостереження. В подальшому може бути запропонований комплексний тренажер екологічного моніторингу з можливістю комплексного відпрацювання всіх завдань спеціалізованих тренажерів.

1. Спеціалізований тренажер моніторингу навколишнього природного середовища.

2. Спеціалізований тренажер моніторингу техногенно небезпечних об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури.

3. Спеціалізований тренажер моніторингу та попередження надзвичайних ситуацій.

4. Спеціалізований тренажер моніторингу об'єктів природно-заповідного фонду України.

5. Спеціалізований тренажер моніторингу підземних об'єктів (трубопроводів та земельних провалин).

6. Спеціалізований тренажер моніторингу стану водної поверхні.

### **1.5. Постанова наукового завдання**

Підготовка кваліфікованих фахівців (пілотів-операторів ДПЛА екологічного моніторингу) – це основне завдання тренажерного комплексу. Застосування комп'ютерних технологій в сфері тренажерної підготовки [128, 130] має підвищити якість навчання пілотів-операторів, а особливо при підготовці фахівців в галузі екологічного моніторингу навколишнього природного середовища та техногенно небезпечних об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури.

Високі вимоги, що пред'являються до тренажерної підготовки пілотів ДПЛА екологічного спостереження, визначаються необхідністю наявності у фахівців великої теоретичної і практичної бази, широкого кругозору, ерудованості, здатності якісно засвоювати великий обсяг інформації.

Останнім часом чимала роль в тренажерній підготовці відводиться комп'ютерним технологіям, так як з їх допомогою можна по-новому представити зміст навчального матеріалу і організувати його вивчення. При цьому інформаційні технології виступають як нові інтерактивні засоби тренажерного навчання, що володіють цілим рядом дидактичних переваг і дозволяють якісно змінити методи, форми і зміст навчання.

Програму тренажерної підготовки потрібно розробляти як систему, що складається з двох основних блоків: навчального блоку, призначеного для видачі теоретичного матеріалу та контролюючого (тестового) завдання.

Зміст комп'ютерної навчальної програми тренажера повинен відповідати польотним завданням ДПЛА екологічного спостереження; при необхідності програма повинна містити матеріали 3-D візуалізації місцевості спостереження, матеріали щодо особливостей застосування бортової апаратури спостереження, телекомунікаційної апаратури, дій в нештатних (аварійних) ситуаціях.

Навчальний блок повинен дозволяти оператору можливість самостійно вибирати програму тренажерної підготовки. Тренажер повинен мати зручний для пілота-оператора інтерфейс. До вимог, що пред'являються до контролюючого блоку програмного забезпечення, відносяться: зміст кожного польотного завдання повинен бути логічно коректним; порядок формування нештатних (аварійних) ситуацій в польоті та роботі бортового обладнання. В разі неправильних дій пілота-оператора ДПЛА повинна бути передбачена підказка на виконання "правильних" дій. При завершенні польоту на тренажері повинен проводитися аналіз правильності дій пілота-оператора і автоматичний розрахунок підсумкової оцінки; перегляд статистики дій пілота-оператора ДПЛА екологічного спостереження. Таким чином, виходячи з представлених вимог, тренажер може не тільки підвищити якість і ефективність навчання оператора ДПЛА екологічного спостереження, але і допомогти формувати професійну компетенцію фахівця за рахунок

удосконалення інформаційного та програмного забезпечення спеціального тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу.

## **Висновки по розділу 1**

1. Визначено, що підготовка пілотів на авіаційному тренажері екологічного моніторингу це один з найважливіших елементів забезпечення безпечної експлуатації ДПЛА. Вона дозволяє мінімізувати негативний вплив від людського фактору, тобто звести до мінімуму можливість помилкових дій оператора ДПЛА екологічного моніторингу. Тренажерна підготовка є специфічним етапом професійної підготовки майбутніх операторів ДПЛА екологічного спостереження.

2. Визначені завдання екологічного моніторингу і типи перспективних спеціалізованих тренажерів ДПЛА екологічного моніторингу.

Обґрунтовано необхідність підвищення ефективності навчання на тренажері пілотів ДПЛА екологічного спостереження.

3. Розроблено новий підхід до навчання пілотів ДПЛА екологічного спостереження на тренажері, який складається в розробці автоматизованої системи управління навчанням управління ДПЛА і оптимізації навчальних планів відповідно до завдань екологічного спостереження і обліку: рівня початкової підготовки та індивідуальних якостей пілота.

4. Розроблено два алгоритми оптимізації навчальних планів навчання пілотів ДПЛА екологічного спостереження на тренажері, перший з яких заснований на розрахунку коефіцієнта важливості за результатами аналізу екологічної безпеки, а другий – на використанні функціоналу ефективності одиничного тренінгу.

6. Підготовка на тренажерах екологічного моніторингу дає широкі можливості в дослідженні нових прогресивних методів і прийомів навчання, дозволяє робити аналіз допущених помилок в техніці пілотування і експлуатації систем ДПЛА екологічного моніторингу. Існуюча модель

тренажерної підготовки передбачає першочергове вирішення завдання формування автоматизованих сенсомоторних дій рефлексорного рівня. В міру ускладнення систем управління ДПЛА екологічного спостереження підвищуються роль і значення інтелектуальних професійно важливих якостей операторів, що вимагає відповідних коректив їх професійної підготовки.

7. Розроблено алгоритм ідентифікації персональних показників швидкості освоєння простих і складних навичок, показників ступеня, який змінюється в залежності від індивідуальних особливостей учня при освоєнні простих і складних навичок на підставі генетичного алгоритму.

Розроблені автором алгоритми придбання і поповнення знань в спеціальній базі знань спеціалізованого тренажера ДПЛА екологічного моніторингу, дозволяють реалізувати безпосереднє придбання знань в базі знань, а також їх поповнення за допомогою реалізованої в алгоритмі стратегії розбиття на ступені і інтерактивної інтерпретації знань.

8. Розроблено методику автоматизованого формування навчально-тренувальних операцій. Технологічне рішення даної задачі дозволяє сформувати навчально-тренувальні операції для пілотів ДПЛА з урахуванням його поточного рівня освоєння операційних функцій екологічного моніторингу, індивідуальних особливостей щодо сприйняття інформації.

9. Проведено обґрунтування і розроблена узагальнена структурна модель автоматизованої системи управління тренажером ДПЛА. Відмінною особливістю якої є наявність в ній спеціальної бази знань конкретної предметної області, яка є для формування моделі управління процесом навчання операторів ДПЛА екологічного спостереження вироблення (вибору) впливу на оператора з метою доведення існуючого у нього рівня освоєння операційних функцій до необхідного.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА НАУКОВО-МЕТОДИЧНОГО АПАРАТУ СИНТЕЗУ ТРЕНАЖЕРНОГО КОНТУРА КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНОГО АПАРАТУ НА ОСНОВІ ВИРІШЕННЯ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ

#### 2.1. Врахування особливостей ДПЛА при синтезі тренажерного комплексу екологічного моніторингу

При визначенні характерних властивостей тренажерного комплексу, що впливає на вирішення поставленого завдання доцільно врахувати особливості призначення та застосування саме дистанційно пілотованих літальних апаратів. Це визначається тим, що апаратура тренажера (тренажерних комплексів) повинна відповідати функційному призначенню ДПЛА.

Якщо говорити про потребу в ДПЛА і БПЛА, для забезпечення екологічного моніторингу, то їх типи будуть обумовлені завданнями забезпечення екологічної безпеки та збалансованого природокористування України. З урахуванням думки ряду вітчизняних фахівців системі попередження надзвичайних ситуацій та екологічного моніторингу доцільно мати тренажери ДПЛА і БПЛА наступних типів (рис.2.1):

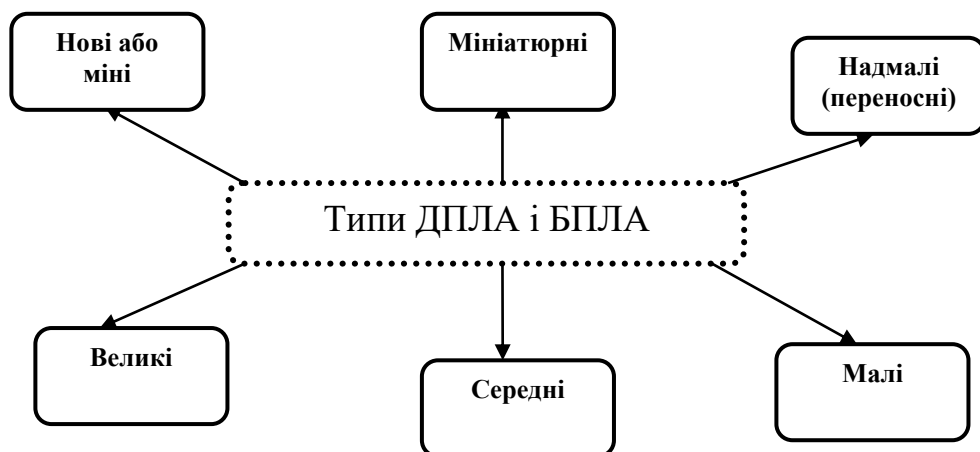


Рис. 2.1. Характеристика типів тренажерів ДПЛА та БПЛА

1. Мініатюрні ДПЛА і БПЛА. ДПЛА і БПЛА даного класу знайдуть застосування для ведення моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, техногенно небезпечних об'єктів. Сучасний рівень розвитку інформаційних технологій дозволяє мати такі апарати (розміром не більше 150 мм).

2. Надмалі (переносні) ДПЛА і БПЛА. Їх завдання забезпечення моніторинговою інформацією окремих організацій, груп спеціального призначення, інших підрозділів, що виконують завдання забезпечення екологічної безпеки (наприклад, також об'єкти критичної інфраструктури, техногенно небезпечні об'єкти, об'єкти природно-заповідного фонду, рятувальні операції). Їх приналежність визначає злітна маса – 2–10 кг, корисне навантаження – 0,5–2 кг, тривалість польоту – до 1 години.

3. Малі ДПЛА і БПЛА. Для них властивий ширший круг завдань, що покладаються. Перш за все, це ведення моніторингу лісових масивів, морських районів, гірської місцевості, підземних об'єктів, трубопроводів, шляхопроводів, тощо. ДПЛА даного класу мають масу 10–60 кг, корисне навантаження 15–30 кг, радіус дії – до 60 км., тривалості польоту 4–5 годин. Характеристики ДПЛА цього класу вже дозволяють встановлювати на ньому РЛС міліметрового діапазону. Запуск подібних ДПЛА вимагає наявності пускової установки (як правило, розміщеній на транспортній базі – автомобілі підвищеної прохідності, бронетранспортері). Весь комплекс ДПЛА (включаючи апаратуру управління, обслуговування, передстартової підготовки) повинен розміщуватися на 1–2 легких машинах.

4. Середні ДПЛА і БПЛА. Головною вимогою до середніх ДПЛА є їх універсальність, тобто здатність застосування в інтересах відповідних міністерств. Вони комплектуються різним корисним обладнанням і, відповідно, можуть виконувати широкий спектр завдань залежно від комплектації. Окрім завдань, властивих БПЛА легших класів, середні “безпілотними” можуть виконувати завдання екологічного моніторингу та природокористування на відстані до 100 км. Їх маса може досягати 250 кг,



корисне навантаження – до 60 кг, швидкість не менше 200 км/ч, тривалість польоту – до 6 годин.

5. Великі ДПЛА і БПЛА. ДПЛА і БПЛА даного класу необхідні для ведення екологічного моніторингу, коли потрібні велика дальність і тривалість польоту, а також, у ряді випадків, і висота. Прикладом можуть стати такі американські розробки, як RQ-4A Global Hawk і RQ-1A Predator. Вони вже свої переваги в ході локальних воєн і військових конфліктів сучасності.

Усі визначені особливості створення та застосування ДПЛА потрібно враховувати при синтезі структури тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу.

Завдання екологічного спостереження можуть бути покладено на один або декілька (групу) ДПЛА. Кількість ДПЛА в групі визначається виходячи із специфіки поставлених завдань. Так для екологічного спостереження заданого району потрібне декілька ДПЛА; для екологічного спостереження техногенно небезпечного об'єкту може вистачити й одного ДПЛА; для вирішення завдання екологічного моніторингу об'єктів природно-заповідного фонду доцільно збільшувати число ДПЛА в групі [127]; для моніторингу забруднення водної поверхні достатньо декілька ДПЛА; для завдань попередження та управління боротьбою зі стихійним лихом у якості ретрансляторів також доцільно застосовувати декілька ДПЛА. При цьому слід зазначити, що розроблення льотних (аеродинамічних) способів застосування групи і одиночних ДПЛА екологічного спостереження залежно від завдань і умов застосування є перспективним напрямом наукових досліджень та тренажерної підготовки.

Апаратура тренажерного комплексу повинна дозволяти відпрацьовувати дії щодо застосування спеціальної апаратури (системи моніторингу) самого ДПЛА екологічного спостереження. При цьому необхідно враховувати наступні функціональні особливості апаратури ДПЛА екологічного спостереження.

В якості бортової апаратури ДПЛА можуть використовуватися: цифрові камери видимого і інфрачервоного спектрального діапазонів; станція радіолокації з синтезованою апертурою; бортова апаратура передачі даних за захищеним радіоканалом на наземні приймальні пункти; бортовий накопичувач моніторингової (отриманої) інформації; апаратура захищеного каналу керування літаком; апаратура системи управління повітряним рухом.

При цьому апаратура тренажерного комплексу ДПЛА повинна забезпечувати відпрацьовування оператором наступних дій:

- забезпечення застосування ДПЛА екологічного спостереження в простих і складних метеорологічних умовах;
- ручний зліт і посадка (приземлення) ДПЛА (штатний або аварійний режим за командою з пункту управління);
- керування польотом літака за заданою програмою екологічного спостереження з можливістю зміни польотного завдання під час виконання польотного завдання;
- забезпечення безпеки повітряного руху та безпеки об'єктів спостереження;
- можливість тренування дій в умовах виникнення надзвичайних ситуацій.

Проведений аналіз свідчить, що сьогодні на державні ДПЛА і БПЛА можуть бути покладені наступні завдання в інтересах національної безпеки, які також потрібно відпрацьовувати на спеціалізованих тренажерах ДПЛА:

- підготовка даних, що стосуються терористичних груп при плануванні антитерористичних операцій; як приклад можливої перспективної системи може розглядатися система “високоточна зброя” (можливе застосування – боротьба з терористами);
- забезпечення заходів щодо контролю за судноплавством і недопущення браконьєрства і терористичних акцій в морській зоні.

Необхідність створення спеціалізованого комплексного тренажера ДПЛА екологічного моніторингу визначається тим, що для нових комплексів

безпілотних апаратів пропонується разом з контуром автономного управління побудувати контур ручного дистанційного керування. Сьогодні для практичної реалізації принципу ручного управління на ДПЛА пропонується наступне технічне рішення. У передній частині ДПЛА розміщується телекамера (радіолокаційна, тепловізійна апаратура) для огляду місцевості. Відеоінформація стискається в спеціальному бортовому пристрої (апаратура відеозображень). З виходу цього спеціального пристрою сигнал відповідного зображення передається через ретранслятори на наземний пункт управління. Розрахунки свідчать, що ретранслятори можуть бути розташовані на відповідній відстані один від одного. У якості ретрансляторів можуть розглядуватися інші літаки, аерозонди. В пункті управління отриманий сигнал перетворюється до первинного вигляду (зображення місцевості). Це зображення бачить “пілот на землі”, – “людина-оператор”. Людина-оператор, за аналогією з “льотчиком в кабіні”, відхилюючи ручку управління, формує відповідний сигнал, який у зворотному напрямку через ретранслятори передається у систему управління ДПЛА. Управління полягає в “візуальному наведенні” літака на об’єкт спостереження та включення апаратури спостереження. При цьому людина-оператор знаходиться на пункті управління (на землі) на значній відстані від району спостереження.

Процедура управління дистанційно пілотованим літальним апаратом як об’єктом управління може бути представлена наступним чином (рис. 2.2).

## **2.2. Синтез математичних моделей дистанційно пілотованих літальних апаратів та особливості визначення їх параметрів**

На основі вимог, пред’явлених до дистанційно пілотованих літальних апаратів за ефективністю та вартістю їх створення і використання, формується математична модель, яка враховує фізичні властивості реального об’єкта управління.

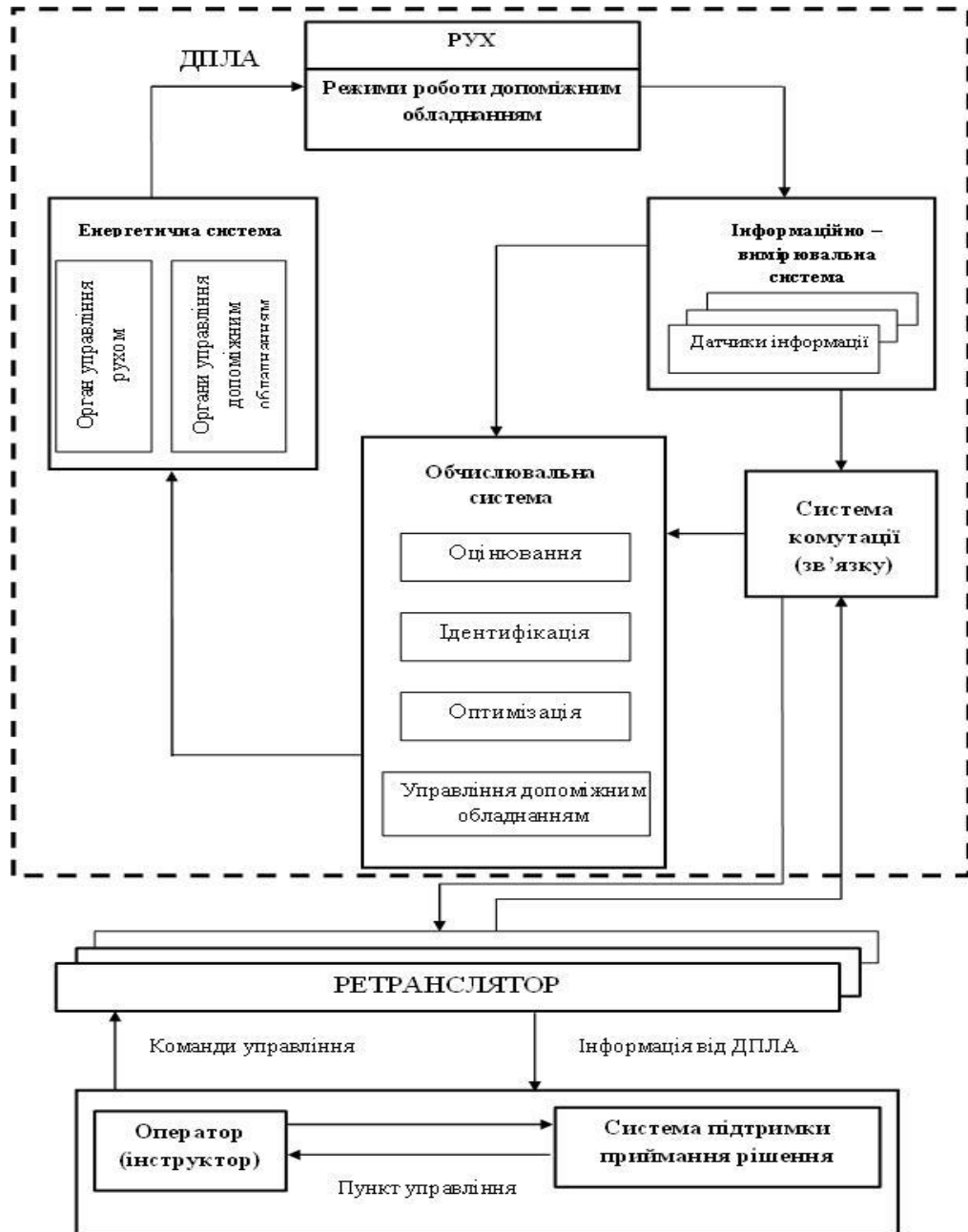


Рис.2.2. Структура системи управління ДПЛА

На прикладі цієї моделі розробляються закони управління (на всіх етапах застосування ДПЛА). Для забезпечення достовірності (співпадіння) результатів, отриманих за допомогою моделі та на реальному об'єкті, до самої моделі пред'являються вимоги забезпечити фізичне співпадіння характеристик математичної моделі  $X_m(t)$  і реального об'єкта управління  $X(t)$ , тобто забезпечити  $|X(t) - X_m(t)| \rightarrow 0$ .

На прикладі цієї моделі розробляються закони управління (на всіх етапах застосування ДПЛА).

Практика підтверджує, що успіх розробки тієї чи іншої системи управління реальним об'єктом багато в чому залежить від достовірності вибору його математичної моделі та ефективності застосованих методів дослідження.

При формуванні в тренажері ДПЛА загальної структури моделі бортових інформаційно-керуючих комплексів доцільно враховувати, що функціонально ДПЛА складається з п'яти наступних частин:

Об'єкт управління (розглядається просторовий рух та режими роботи спеціального обладнання).

Інформаційно-вимірювальна система (датчики первинної інформації).

Обчислювальна система (виконання процедур оцінювання, ідентифікації, оптимізації, керування спеціальним обладнанням).

Енергетична система (органи керування рухом, органи керування спеціальним обладнанням).

Система комутації (зв'язку) для передачі та прийому інформації на пункти управління за допомогою ретрансляторів.

Положення літака у просторі характеризується вектором стану  $X$  ( $X^T = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ ) або  $X \in R^n$ . Розмірність цього вектору  $n$  визначається вимогами до деталізації математичного опису ДПЛА та може досягати декілька сотень параметрів. Однак не всі вони беруть участь у формуванні управління, виводяться на прилади або використовуються в інших підсистемах літака. Тому на практиці у ролі вихідного сигналу беруть вектор вимірювання  $Z$  ( $Z \in R^m$ ) – вихід інформаційно-вимірювальної системи. Зазвичай вектор  $Z$  має меншу розмірність, ніж  $X$ , і, крім того, у загальному випадку параметри першого можуть не співпадати з параметрами другого, а представляють різні функції від них. Тому виникає задача відновлення вектору  $X$  за вектором  $Z$ . Вона може бути розв'язана відомими методами оптимальної оцінки стану. При цьому, рішення потребує точного знання параметрів математичної моделі ДПЛА, що вирішується методом поточної ідентифікації. Всі ці три завдання (оцінювання, ідентифікація, оптимізація) вирішуються за

допомогою програм у тренажерній обчислювальній системі. Сформований таким чином сигнал керування  $U$  поступає на вхід енергетичної системи, включаючи в себе силову установку та рульові приводи. На виході системи утворюється вхідний сигнал  $Y$ , який є відхиленням рульових поверхонь або інших органів управління ДПЛА. Таким чином замикається контур автоматичного управління ДПЛА на тренажері.

Управління ДПЛА здійснюється оператором (інструктором) на основі отримання інформації від датчиків інформації про стан ДПЛА за порядком: датчики інформації, система комутації (зв'язку), ретранслятор, КП.

$$Z \rightarrow Z_k \rightarrow Z_p$$

Формування вектору керування (впливу на роботу ДПЛА) здійснюється у зворотному напрямку і оператор-інструктор, ретранслятор, система комутації, обчислювальна система, енергетична система

$$(U_n \rightarrow U_p \rightarrow U_c \rightarrow U \rightarrow Y)$$

### ***Способи опису математичних моделей ДПЛА.***

Математичні моделі ДПЛА як динамічної системи зазвичай задаються у вигляді систем різного роду рівнянь: диференціальних, інтегро-диференціальних, стохастичних. Розглянемо найбільш поширені з них.

1. Детермінована управляюча система, яка описується векторним диференціальним рівнянням у формі Коши

Загальна форма моделі має вигляд:

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad (2.1)$$

де  $x$  – вектор стану системи, розмірності  $n$ ;  $u$  – вектор керування, розмірності  $m$ ;  $t$  – безперервний час;  $f$  – векторна функція вказаних аргументів.

Це – найбільш загальна форма опису поведінки складних динамічних систем. Зокрема, математична модель просторового руху ДПЛА подається саме в такому вигляді.

2. Детермінована лінійна управляюча система

Загальна форма моделі має вигляд:

$$\dot{x} = A x + B u, \quad (2.2)$$

де  $A$  – матриця стану системи, розміром  $(n \times n)$ ;

$B$  – матриця ефективності керування, розміром  $(n \times m)$ .

Загальний розв’язок цього рівняння знаходимо за формулою Коши

$$x(t) = e^{At}x_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau, \quad (2.3)$$

де  $e^{At} = E + At + A^2 \frac{t^2}{2} + \dots$  – матрична експонента, розміром  $(n \times n)$ ;

$x_0 = x(0)$  – вектор початкових умов;  $E$  – одинична матриця.

3. Стохастична управляюча система, яка описується рівнянням Ланжевена

$$\dot{x} = f(x, u, t) + g(x, t) \zeta(t), \quad (2.4)$$

де  $g(x, t)$  – матрична функція, розміром  $(n \times q)$ ;  $\zeta(t)$  –  $q$  мірний випадковий процес типу білого шуму з нульовим математичним очікуванням  $M[\zeta(t)] = 0$  і коваріаційною матрицею типу  $M[\zeta(t_1) \zeta^T(t_2)] = S \delta(t_2 - t_1)$ ;  $S$  – матриця інтенсивності або матриця спектральної щільності.

Відзначимо, що такий опис системи з білим шумом завдає безліч неприємностей при моделюванні, так як білий шум має безкінечну дисперсію для своїх компонентів. Однак для практичних задач зовсім не обов’язкова таке суворе трактування стохастичних рівнянь з білим шумом. Справа в тому, що замість білого шуму, якого в природі не існує, в обчислювальній системі тренажера ДПЛА доцільно розглядати широкосмуговий шум (з інтервалом кореляції  $\tau_{max}$ , набагато меншим усіх характерних сталих часу даної динамічної системи). Такий широкосмуговий шум (вже з обмеженими дисперсіями) називається практично білим шумом.

4. Лінійна стохастична управляюча система у формі Ланжевена

$$\dot{x} = Ax + Bu + H \zeta(t), \quad (2.5)$$

де  $\zeta(t)$  – практично білий шум;  $H$  – матриця коефіцієнтів, розміром  $(n \times q)$ .

5) Детермінована лінійна управляюча система з дискретним часом

Якщо в моделі (2.2) і у формулі Коши (2.3) перейти до дискретного часу  $t = kT_0$ , то можна отримати аналог моделі (2), але з дискретним часом

$$x[k] = \Phi x[k-1] + Du[k-1], \quad (2.6)$$

де  $x[k]$  – решітчаста векторна функція стану;  $u[k]$  – решітчаста векторна функція входу;  $\Phi = e^{AT_0}$  – дискретний аналог матричної експоненти – матриця стану дискретної системи;  $D = \Phi \cdot B \cdot T_0$  – матриця ефективності управління дискретною системою.

### б) Стохастична лінійна управляюча система з дискретним часом

Ця система відрізняється від системи (б) лише наявністю адитивного випадкового члена

$$x[k] = \Phi x[k-1] + Du[k-1] + w[k],$$

де  $w[k]$  – випадкова решітчаста функція типу практичний білий шум:  $M[w[k]] = 0$ ,  $M[w[k] * [k-i]] = 0$   $i=1,2$ .

Процес  $x[k]$  при заданому  $u$  в цьому випадку може розглядатись як Марківський випадковий процес, тобто який не залежить від попередньої зміни вектору стану  $X$ , а знаходиться тільки значенням координат вектора  $X$  в даний конкретний момент часу. Тобто,  $X[k+1]$  залежить тільки від  $x[k]$  і не залежить від  $X[k-1]$ ,  $X[k-2]$ ,  $X[k-3]$ , і т. п.

### ***Опис математичних моделей ДПЛА***

#### 1. Математична модель ДПЛА як об'єкта управління.

Перед тим як записати рівняння руху літака у формі 1, необхідно визначити фізичний зміст вектору стану та вектору управління літака.

Для ДПЛА (у загальному випадку) у ролі органів керування можуть використовуватись (рис.2.3):

- диференціальний стабілізатор. Може працювати в режимі руля висоти (синхронне відхилення) і в режимі елеронів (диференціальне відхилення);
- руль напрямку;
- флаперони (закрилки) – можуть працювати як закрилки (синхронне відхилення), і як елерони (диференціальне відхилення);
- управляючі носики – відхиляються синхронно і використовуються у злітно-посадочних режимах для підвищення підйомної сили;



– орган керування тягою двигуна.

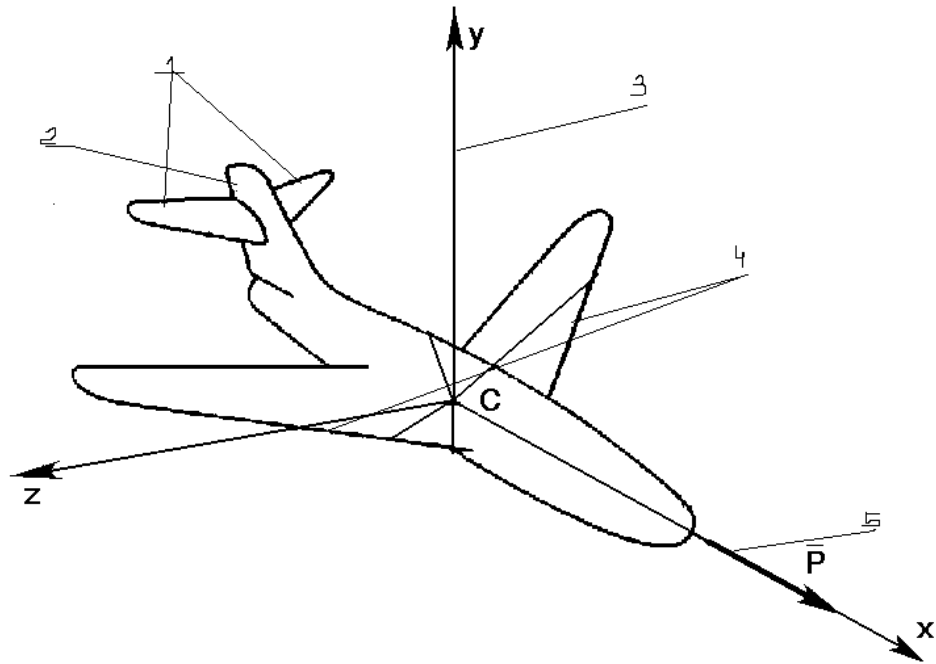


Рис. 2.3. Органи керування ДПЛА

На інших типах ДПЛА можуть застосовуватися й інші види органів управління: звичайні елерони, передкрилки, закрилки, інтерцертори, елерони і т. п. Але можливо й зменшення кількості органів керування.

Всі вони разом функційно складають вектор керування літака  $u$ , розмірності  $m$ , який через вищезазначені причини для кожного виду ДПЛА буде свій.

Координати вектору стану ДПЛА  $X$  визначають його ДПЛА у просторі. Це положення визначає рух ДПЛА як центру мас, так і навколо нього. Цей рух розглядається у визначеній системі координат.

### ***Системи координат***

В програмному забезпеченні тренажера ДПЛА можливе використання наступних прямокутних систем координат.

#### 1. Нормальна земна система координат ( $O_oX_gY_gZ_g$ ):

Початок  $O_o$  знаходиться на поверхні Землі в конкретній точці. Осі  $O_oX_g$  та  $O_oZ_g$  розташовані в горизонтальній площині, а вісь  $O_oY_g$  направлена по вертикалі (яка співпадає з напрямком сили тяжіння).

#### 2. Нормальна система координат $Ox_gY_gZ_g$ :

Початок  $O$  знаходиться в центрі мас ДПЛА, а осі  $OX_g$ ,  $OY_g$ ,  $OZ_g$  паралельні відповідним осям нормальної земної системи координат. Відносне положення цих систем координат визначається вектором  $r$  між їх початками. Проекція вектору  $r$  на вісь  $OY_g$  називається геометричною висотою польоту  $H$ .

### 3. Зв'язана система координат $OXYZ$ :

Початок  $O$  знаходиться в центрі мас ДПЛА. Вісь  $OX$  направлена вздовж ДПЛА вперед, зазвичай по головній осі інерції літака, і називається поздовжньою віссю. Вісь  $OY$  лежить у площині симетрії літака та направлена вгору і називається нормальною віссю. Вісь  $OZ$  направлена вправо за рухом літака і називається поперечною віссю (рис.2.4).

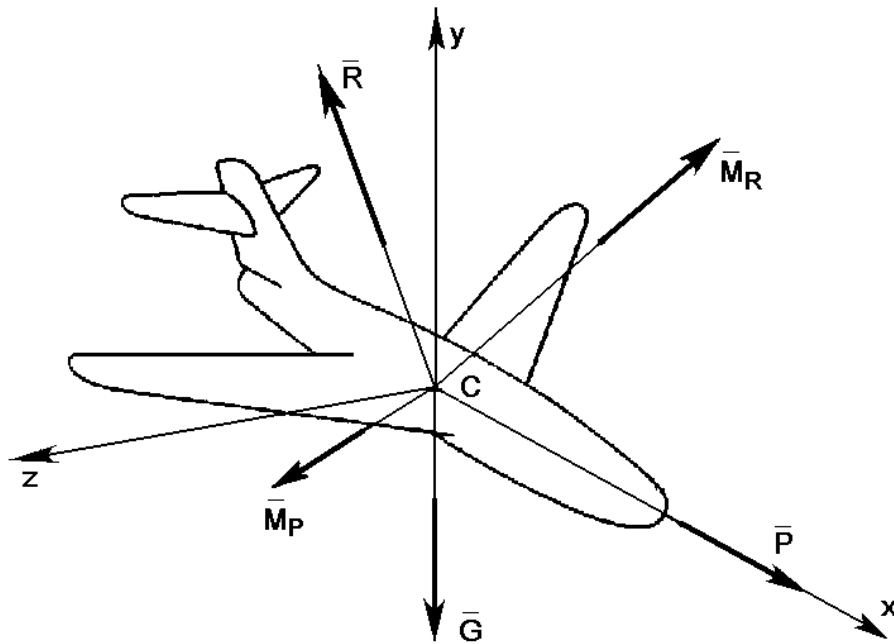


Рис. 2.4. Зв'язана система координат  $OXYZ$

Окреме положення осей зв'язаної та нормальної системи координат визначається кутами Ейлера, які в динамічному польоті називаються кутами тангажу  $\nu$ , крену  $\gamma$ , ролання  $\psi$ . Ці кути визначають матрицю перетворення однієї системи координат в іншу (матриця направляючих косинусів)

$$D^{C_g H} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\nu & \sin\gamma \sin\psi - \cos\gamma \cos\psi \sin\nu & \cos\gamma \sin\psi + \sin\gamma \cos\psi \sin\nu \\ \sin\nu & \cos\gamma \cos\nu & -\sin\lambda \cos\nu \\ -\sin\psi \cos\nu & \sin\gamma \cos\psi + \cos\gamma \sin\psi \sin\nu & \cos\gamma \cos\psi - \sin\gamma \sin\psi \sin\nu \end{bmatrix}$$

#### 4. Швидкісна система координат $OX_aY_aZ_a$ :

Початок  $O$  знаходиться у центрі мас ДПЛА. Вісь  $OX_a$  направлена вздовж вектору повітряної швидкості ДПЛА ( $v$ ) і називається віссю швидкості. Вісь  $OY_a$  лежить у площині симетрії, направлена вгору і називається віссю підйомної сили. Вісь  $OZ_a$  направлена вправо і називається бічною. Відносне кутове положення зв'язаної та швидкісної СК визначається кутами атаки  $\alpha$  і ковзання  $\beta$ :

$\alpha$  – кут між проекцією вектору повітряної швидкості на площину симетрії і поздовжньою віссю  $OX$ ;

$\beta$  – кут між вектором повітряної швидкості та площиною симетрії ДПЛА.

Матриця переходу від зв'язаної до швидкісної СК має такий вигляд:

$$D_c^{cs} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

#### 5. Траєкторна система координат $OX_kY_kZ_k$ :

Початок знаходиться в центрі мас ДПЛА.  $OX_k$  направлена вздовж вектора земної швидкості ДПЛА ( $V_k = V +$  швидкість вітру). Вісь  $OZ_k$  лежить у горизонтальній площині. Вісь  $OY_k$  направлена вгору. Відносне положення траєкторної та нормальної СК визначається кутом шляху  $\Psi$  та кутом нахилу траєкторії  $\Theta$ :

$\Theta$  – кут між віссю  $OX_k$  та горизонтальною площиною;

$\Psi$  – кут між віссю  $OX_g$  та вертикальною площиною, яка проходить через вісь  $OX_k$ .

Матриця переходу від траєкторної до нормальної СК має вигляд:

$$D_H^T = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\sin \theta \cos \psi & \sin \psi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$$

#### ***Рівняння просторового руху стану***

Рух ДПЛА як твердого тіла може бути описаний двома векторними рівняннями:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{F}; \quad \frac{d\bar{k}}{dt} = \bar{M},$$

Тут  $\bar{X}$  і  $\bar{K}$  – головний вектор і головний момент кількості руху відносно центру мас;  $\bar{F}$  і  $\bar{M}$  – головний вектор і головний момент вищих сил, діючих на літак.

Перше рівняння характеризує рух центру мас, а друге – навколо нього. Дані рівняння зазвичай записують у проєкціях на осі відповідних систем координат: перше – в траєкторній системі координат, друге – у зв'язаній. Відзначимо, що за відсутності вітру траєкторна СК співпадає зі швидкісною. Тож, просторовий рух літака описується наступною системою координат:

$$mV = F_{xk},$$

$$mV\theta = F_{yk},$$

$$-mV \cos\theta\psi = F_{zk},$$

$$x_c = V \cos\theta \cos\Psi,$$

$$H = V \sin\theta,$$

$$Z_c = -V \cos\theta \sin\Psi,$$

$$J_x w_x - J_{xy}(w_y - w_x w_z) + (J_z - J_y)w_y w_z = M_{R_x},$$

$$J_x w_y - J_{xy}(w_x + w_x w_z) + (J_x - J_z)w_x w_z = M_{R_y},$$

$$J_z w_z - J_{xy}(w_x^2 - w_y^2) + (J_y - J_x)w_x w_y = M_{R_z},$$

$$\psi = \frac{1}{\cos\upsilon} (w_y \cos\gamma - w_z \sin\gamma) \upsilon = w_y \sin\gamma + w_z \cos\gamma = w_x - \operatorname{tg}V(w_y \cos\gamma - w_z \sin\gamma),$$

$$\sin\alpha = \frac{1}{\cos\beta} \{[\sin\upsilon \sin\gamma \cos(\Psi - \psi) + \sin\gamma \sin(\Psi - \psi)]\cos\theta - \sin\theta \cos\upsilon \cos\gamma\},$$

$$\sin\beta = [\sin\upsilon \sin\gamma \cos(\Psi - \psi) - \cos\gamma \sin(\Psi - \psi)]\cos\theta - \sin\theta \cos\upsilon \sin\gamma,$$

$$\sin\gamma_a = \frac{1}{\cos\theta} [\cos\alpha \sin\beta \sin\upsilon - \cos\upsilon (\sin\alpha \sin\beta \cos\gamma_2 - \cos\beta \sin\gamma)],$$

$\gamma_a$  – швидкісний кут крену,

$$F_{xk} = P \cos(\alpha + \varphi_p) \cos\beta - x_a - mg \sin\theta;$$

$$F_{yk} = P[\sin(\alpha + \varphi_p) \cos\gamma_a + \cos(\alpha + \varphi_p) \sin\beta \sin\gamma_a] + Y_a \cos\gamma_a - Z_a \sin\gamma_a - mg \cos\theta$$

$$F_{zk} = P[\sin(\alpha + \varphi_p) \sin\gamma_a - \cos(\alpha + \varphi_p) \sin\beta \cos\gamma_a] + Y_a \sin\gamma_a + Z_a \cos\gamma_a$$

Аеродинамічні сили, які діють на ДПЛА, визначаються його конфігурацією та характером обтікання його повітряним потоком. Так, у швидкісній системі координат три сили знаходяться наступним чином:

$$x_a = c_{x_a} \frac{\rho V^2}{2} S; \quad Y_a = C_{y_a} \frac{\rho V^2}{2} S; \quad Z_a = C_{z_a} \frac{\rho V^2}{2} S.$$

Тут  $S$  – площа крила літака;  $\frac{\rho V^2}{2} = q$  – швидкісний напір;  $C_i$  – аеродинамічні коефіцієнти (безрозмірні).

Проекції сумарного моменту на осі зв'язаної системи координат мають вигляд:

$$M_{R_x} = m_x \frac{\rho V^2}{2} S \ell; \quad M_{R_y} = m_y \frac{\rho V^2}{2} S \ell;$$

$$M_{R_z} = m_z \frac{\rho V^2}{2} S * b_a.$$

Тут  $\ell$  - розмах крила;  $b_a$  - середня аеродинамічна хорда.

Таким чином маємо систему диференційованих рівнянь у формі Коши (відносно перших похідних). Відомо, що такі системи розв'язуються досить легко на сучасних ЕОМ методом числового інтегрування. Однак існує ряд проблем у створенні таких математичних моделей і в тому числі задання аеродинамічних коефіцієнтів:  $C_{x_{a1}}, C_{y_{a1}}, C_{z_a}, m_{x1}, m_{y1}, m_z$ .

### ***Особливості завдання аеродинамічних коефіцієнтів літака***

Коефіцієнти  $C_i$  та  $m_i$  аеродинамічних сил і моментів, які входять у математичну модель ДПЛА як об'єкта управління в загальному випадку залежать від конфігурації ДПЛА (компоновки ЛА, положення рульових органів) та умов польоту.

$$C_i = f_i(\alpha, \beta, \delta_i, M, R_e \dots)$$

$$m_i = \varphi_i(\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \omega_x, \omega_y, \omega_z, M, R_e, \dots)$$

Тут  $M = V/a$  – число Маха;  $a$  – швидкість звуку;  $R_e = V_{ba}/\nu$  – число Рейнольда;  $\nu$  – кінетичний коефіцієнт густини повітря.

Визначення цих залежностей складає основу такої науки, як аеродинаміка літака.

У практиці аеродинамічного розрахунку ЛА для коефіцієнтів  $C_i$  та  $m_i$  зазвичай використовують залежність лише від частини вказаних параметрів, а саме:

$$C_x = C_{x_0} + C_x^\alpha * \alpha + C_x^\beta * \beta - \text{коефіцієнт лобового опору,}$$

$$C_y = C_{y_0} + C_y^\alpha * \alpha + C_y^{\delta_b} * \delta_b - \text{коефіцієнт підйомної сили,}$$

$$C_z = C_z^\beta * \beta + C_z^{\delta_n} * \delta_n - \text{коефіцієнт бічної сили,}$$

$$m_x = m_x^{\bar{\omega}_x} \bar{\omega}_x + m_x^\beta \beta + m_x^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y + m_x^{\delta_\delta} \delta_\delta - \text{коефіцієнт моменту крену ЛА,}$$

$$m_y = m_y^\beta \beta + m_y^{\dot{\beta}} \dot{\beta} + m_y^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y + m_y^{\varpi_x} \varpi_x + m_y^{\delta_n} \delta_n - \text{коефіцієнт рискання ЛА,}$$

$$m_z = m_{z_0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + m_z^{\varpi_z} \varpi_z + m_z^{\delta_\delta} \delta_\delta - \text{коефіцієнт моменту тангажу ЛА.}$$

Тут  $C_x^\alpha = \frac{vC_x}{v\alpha}$  ... – відповідні часткові похідні;

$$\varpi_x = \omega_x \frac{\ell}{2V}; \quad \varpi_y = \omega_y \frac{\ell}{2V}; \quad \varpi_z = \omega_z \frac{\ell_a}{V};$$

$$\dot{\alpha} = \alpha \frac{\ell_a}{V}; \quad \dot{\beta} = \beta \frac{\ell}{2V} - \text{безрозмірні кутові швидкості;}$$

$\delta_\delta, \delta_\delta, \delta_n$  – відхилення руля висоти, елеронів, і руля напрямку відповідно.

### ***Особливості використання в тренажері математичної моделі стандартної атмосфери.***

Аеродинамічні характеристики літака залежать від багатьох параметрів, які можна умовно поділити на дві групи. Перша – параметри самого літака та динаміки його руху. Друга – параметри оточуючого середовища – температура  $t^\circ$ , швидкість звуку  $a$ , густина повітря  $\rho$ , тиск  $P$ . Параметри першої групи при математичному моделюванні визначаються із рівнянь руху ДПЛА. Другі параметри змінюються випадково в широких межах в залежності від пори року, географічних та кліматичних особливостей окремих районів, погодних умов і т.п. Тому виникає потреба у використанні у програмному забезпеченні тренажера усередненої моделі

атмосфери, в якій прийнята постійна залежність змін фізичних параметрів повітряного середовища від геометричної висоти. Така модель атмосфери отримала назву стандартна (вона затверджена міжнародними організаціями і зафіксована у спеціальних документах) [12, 40].

У стандарті за початок відліку взятий середній рівень над рівнем моря  $H_0=0$ . На цій висоті встановлені наступні стандартні параметри атмосфери:

тиск повітря	$P_0=101325 \text{ Па}$ ,
температура повітря	$T_0=288,15 \text{ К}$ ,
густина повітря	$\rho_0=1,225 \text{ кг/м}^3$ ,
швидкість звуку	$a_0=340,294 \text{ м/с}$ ,
в'язкість (динамічна)	$\mu_0=17,894 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,
прискорення вільного падіння	$g_0=9,80665 \text{ м/с}^2$ .

Розглянемо рівняння, необхідні для визначення змін основних параметрів атмосфери з геометричною вихідною  $h$ .

$$g = g_0 \left( \frac{R}{R+h} \right)^2, \quad R = 6356,766 \text{ м} - \text{радіус Землі}$$

Температура (К):

$$T = \begin{cases} 301.15 - 6.5(h+2) & h < 11 \text{ км} \\ 216.65 & 11 < h < 20 \text{ км} \\ 216.65 + (h-20) & 20 < h < 32 \text{ км} \end{cases}$$

Тиск (Па):

$$P = \begin{cases} P_0 \left( 1 - \frac{6.5}{288.15} h + \frac{90}{6.5 \cdot R} \right), & h < 11 \text{ км} \\ P_{11} \exp \left[ -\frac{90}{RT} (h-11) \right], & 11 \text{ км} < h < 20 \text{ км} \\ P_{20} \left( 1 + \frac{1}{216.65} (h-20) \right) - \frac{90}{R}, & 20 \text{ км} < h < 32 \text{ км} \end{cases}$$

$$\text{швидкість звуку (м/с): } a = \sqrt{1.4 RT};$$

$$\text{динамічна в'язкість (Па} \cdot \text{с): } \mu = \mu_0 (T/T_0)^{0.75};$$

$$\text{кінетична в'язкість } \nu = \mu/\rho;$$

$$\text{густина повітря } \rho = \frac{P}{RT}.$$

Таким чином, задавши геометричну висоту польоту (яка виходить з рівнянь динаміки літака), можна знайти за представленими формулами параметри стандартної атмосфери, а також поточні значення аеродинамічних характеристик ДПЛА.

***Особливості використання в тренажері математичної моделі турбулентної атмосфери.***

Вітер, турбулентність атмосфери суттєво впливають на динаміку польоту ДПЛА. Тому при математичному моделюванні процесів функціонування ДПЛА та його підсистем цей вплив в тренажерному комплексі повинен враховуватись. Математична модель вітру визначається насамперед її призначенням. Так, в навігаційних задачах моделі вітру вважаються детермінованими та квазістаціонарними (коли швидкість вітру вважається постійною протягом інтервалу часу керування). У задачах управління зазвичай використовують стохастичні моделі турбулентної атмосфери.

Найбільш поширеною є наступна модель (модель Драйдена):

$$S_x(\omega) = \frac{2L\delta_e^2}{\pi V} * \frac{1}{1 + \omega^2 \frac{L^2}{V^2}};$$

$$S_{y,z}(\omega) = \frac{L\delta_e^2}{\pi V} * \frac{1 + 3\omega^2 \frac{L^2}{V^2}}{(1 + \omega^2 \frac{L^2}{V^2})}.$$

Тут  $L$  масштаб турбулентності;  $L=100-1000$  м. У практичних розрахунках зазвичай беруть  $L=300$ м.

$\delta_e$  – швидкість випадкових поривів вітру:

$\delta_e < 0,5$  м/с – спокійна атмосфера;

$\delta_e = 0,5 \div 2,5$  м/с – середня турбулентність;

$\delta_e > 2,5$  м/с – сильна турбулентність.

Випадковий процес  $U_{xa}$  еквівалентний білому шуму одиничної інтенсивності, профільованому аперіодичною ланкою зі сталою часу  $L/V$  і коефіцієнтом посилення  $\sqrt{\frac{2L\delta_e^2}{\pi V}}$ . Випадкові процеси  $U_{ya}$  і  $U_{za}$  можуть бути



представлені у вигляді білого шуму та формуючого фільтра з трьох ланок: двох однакових аперіодичних з зі сталою часу  $L/V$  і форсеуючої ланки першого порядку зі сталою  $\sqrt{3} L/V$ . тобто як показано на рис. 2.5 (а,б)

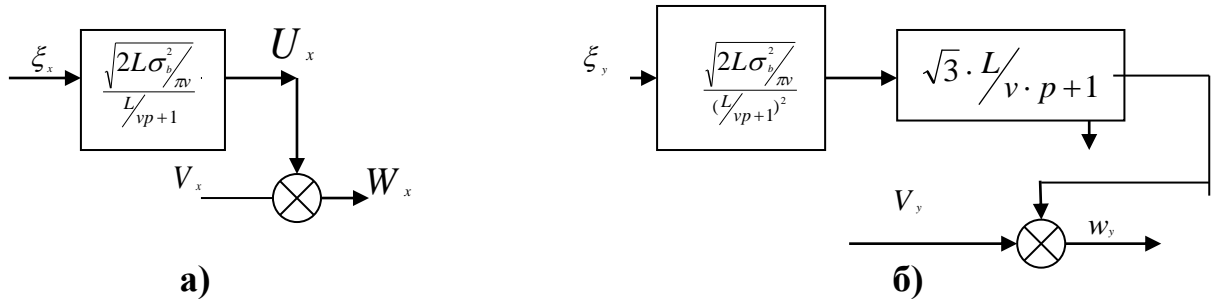


Рис. 2.5. Формуючий фільтр білого шуму

При моделюванні турбулентної атмосфери в тренажері виникає проблема створення генератора білого шуму (випадковий процес з нульовим математичним очікуванням і кореляційною функцією, пропорційній  $\delta$ -функції).

Спектральна площина білого шуму у всьому діапазоні частот постійна, що в реальних умовах неможливо. Тому при моделюванні використовують поняття практично білого шуму, спектральна густина якого постійна у смузі пропускання системи, де  $\omega_{\Pi}$  – гранична частота смуги пропускання системи ( $\omega_{\Pi}$  – це частота на якій потужність сигналу дорівнює половині потужності нульової гармонії).

Такий випадковий процес моделюється за допомогою стандартних програм GAVSS та RANDV. Підпрограма GAVSS генерує нормально розподілені випадкові числа з заданим математичним очікуванням  $m_y$  і середньоквадратичним відхиленням  $\delta_y$ . Ця послідовність чисел виходить за допомогою формули (отриманої експериментально)

$$y = \frac{\sum_{i=1}^K x_i - \frac{K}{2}}{\sqrt{K/12}}, \quad (2.7)$$

де  $x_i$  – рівномірно розподілене випадкове число в діапазоні  $[0;1]$ ;  $K$  – число використовуваних значень  $x_i$

Послідовність чисел у апроксимує точний нормальний розподіл, коли  $K$  прагне до  $\infty$ . Але на практиці обмежуються  $K=12$ , тоді

$$y = \sum_{i=1}^{12} x_i - G$$

Остаточний перехід до потрібного середнього і стандартного відхилення отримуємо з формули:

$$y = y * \delta + m_y ,$$

де  $\delta$  – потрібне стандартне відхилення;  $m_y$  – потрібне математичне очікування.

Для обчислення рівномірно розподілених випадкових чисел  $x_i$  між 0 і 1 використовують так званий метод залишку степенів. Суть його в наступному:

$$\begin{cases} Z_i = Z_{i-1} * 65539 \\ X_i = Z_i * 0.4656613 * 10^{-9} \end{cases}$$

Тут дані числа знайдені експериментально, при цьому  $Z_0$  – будь-яке непарне число з кількістю цифр не більше 9.

### ***Особливості використання в тренажері математичних моделей датчиків інформації.***

Одним із найважливіших питань, виникаючих при аналізуванні та синтезі авіаційних тренажерних систем, є питання моделювання виміру вектору стану об'єкта управління, тобто питання урахування динаміки вимірювальної системи літака, або іншими словами математичних моделей датчиків інформації: датчиків, кутів, швидкості, прискорення, вимірювачів температури, інформаційних параметрів.

В тренажерних комплексах всі реальні виміри моделюються з деякими погрішностями, які можна умовно поділити на три групи: динамічні, статистичні і випадкові. Перші обумовлені генерацією вимірювальних пристроїв; другі – методичними, інструментальними і т.п. погрішностями вимірів, які мають постійний характер; треті пов'язані з впливом великої кількості збурених факторів. Звичайно, повна математична модель вимірювача повинна враховувати усі ці похибки.

Найбільш загальною формою представлення оператора датчика є наступна:

$$\begin{cases} T^2 \ddot{z} + 2T\zeta \dot{z} + \bar{z} = x + \varpi \\ z = \bar{z} + v_1 + v_2 \end{cases} \quad (2.8)$$

Тут  $x$  – вимірюваний сигнал;  $\bar{z}$  – допоміжна змінна, яка враховує динамічну помилку датчика;  $v_1$  – стала (повільно-змінна) похибка датчика;  $v_2$  – флуктуаційна (випадкова) складова похибки датчика (адитивна);  $\varpi$  – мультиплікативна випадкова складова помилки датчика.

Відзначимо, що реальні датчики є нелінійними ланками, які мають зону невразливості та область насиченості. У лінійній моделі датчика його зона невразливості враховується постійною помилкою  $v_1$ . Складові  $v_2$  та  $\varpi$  являють собою стаціонарні випадкові процеси типу «білий шум», які характеризуються своїми інтенсивностями  $R$  і  $Q$  відповідно. У більшості випадків вважається, що шуми  $v_2$  та  $\varpi$  некорельовані.

Структурна схема одного датчика може бути представлена наступним чином (рис.2.6).

Прийнята лінійна модель датчика характеризується чотирма параметрами: сталою часу  $T$  або власною частотою  $\Omega = 1/T$ ; коефіцієнтом згасання  $\zeta$ ; зоною невразливості або середньою величиною сталої похибки  $v_1 = a$ ; інтенсивністю  $R$  флуктуаційної складової похибки  $v_2$ , звичайно залежить від діапазону вимірюваних величин.

Відзначимо, що мультиплікативна складова похибки  $\varpi$  визначається зовнішніми впливами на датчик і тому до характеристик датчика не має ніякого відношення.

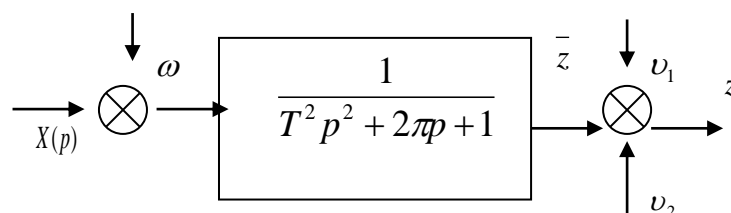


Рис.2.6. Структурна схема датчика початкової інформації

Наведемо значення вказаних параметрів для датчиків (табл.2.1), які складають основу інформаційної частини контурів управління сучасних ДПЛА. Тут  $x_{max}$  – діапазон вимірювання відповідного датчика.

Таблиця 2.1

Значення параметрів для датчиків

Тип датчика	$T, c$	$\xi$	$a$	$R$
Акселерометри	0,001-0,025	$\geq 0,3$	$10^{-3}-10^{-4}$ м/с <sup>2</sup>	0,1% $x_{max}$
Датчики кутових швидкостей	0,005-0,025	$\geq 0,4$	$10^{-2}-10^{-1}$ град/с	0,02% $x_{max}$
Датчики кутів	0,005-0,06	0,005-0,03	0,15-0,3 град	5% $x_{max}$

Таким чином, математичне моделювання процесу вимірювання можливе при визначенні характеристик відповідних датчиків і наявності програми-генератора «білого шуму», формуванні інтенсивності  $R$ .

***Особливості використання в тренажері математичної моделі електроприводів органів керування.***

Електропривід є найбільш поширеним виконавчим пристроєм в системах управління ДПЛА. До основних переваг такого приводу відносяться висока швидкодія, мала вага та габарити. У досліджах зазвичай використовують спрощення – часто лінійне – моделі приводу другого або третього порядку. Вхідним сигналом є сигнал управління  $U(t)$ , який виробляється обчислювальним пристроєм, а вихідним – кут відхилення руля (управляючої поверхні)  $\delta(t)$ . Можливість приблизної заміни повної нелінійної моделі лінійною невисокого порядку на наступних припущеннях. Електропривод є спостережною системою, тому у випадку великого коефіцієнта посилення  $K$  розімкнутої системи (добротності привода) статистична характеристика замкнутої системи близька до лінійної.

Таким чином, найбільш застосована модель електропривода описується наступною функцією:

$$\Phi(p) = \frac{k}{(T_{2p} + 1)(T_{2p}^2 + 2\xi_2 T_{2p} + 1)} \quad (2.9)$$

Параметри  $k$ ,  $T_1$ ,  $\xi_2$ ,  $T_2$  у виразі (2.9), отримані за умови максимального наближення перехідної функції даної спрощеної моделі до перехідної функції повної моделі, залишаються практично сталими при малих вхідних сигналах  $U$ .

Але при збільшенні  $U$ , коли переміщення золотника гідроприводу почне виходити за межі лінійної зони, параметри лінеаризованої моделі почнуть змінюватись згідно таблиці 2.2:

Таблиця 2.2

Параметри моделі електроприводу ДПЛА

$U, B$	$k, B^{-1}$	$T_1, c$	$T_2, c$	$\xi$
1,5	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0,8
3	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0,79
12	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,92
24	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	1,0

За даними таблиці 2.2 можна побудувати математичну модель електроприводу ДПЛА і врахувати її у повній моделі ДПЛА як об'єкта управління.

### ***Особливості використання в тренажері математичної моделі льотчика-оператора.***

Повна математична модель ДПЛА повинна враховувати в контурі керування дії льотчика-оператора. На сьогоднішній день, найбільше поширення мають два підходи врахування льотчика-оператора, який бере участь у процесі керування ДПЛА на тренажері:

1. Створення математичної моделі льотчика у вигляді деякої системи рівнянь і внесення її в контур керування ДПЛА.

2. Розробка та використання деяких оцінок, критеріїв оцінки якості управління з точки зору льотчика-оператора тренажеру ДПЛА. У якості таких оцінок (експертні оцінки) найбільш поширеними стали наступні:

А. Області оптимальних оцінок власної частоти  $\omega_2$  і відносного коефіцієнту згасання  $\zeta_2$  короткоперіодичних коливань літака (зазвичай за вертикальним перевантаженням). Ці області складаються за так званими шкалами Купера – Харнера, які виходять на основі оцінок пілотами літаків з різними  $\omega_a$  та  $\zeta_a$ . До недоліків таких оцінок слід віднести той факт, що вони у більшості своїй носять суб'єктивний характер, не є безпосередньо зрозумілими льотчику, не дозволяють оцінити вплив перевірки приводів на якість управління, застосовані для досліду лише короткоперіодичного руху ДПЛА (другого порядку).

Б.  $C^*$  – критерій (широко розповсюджений у зарубіжній практиці).  $C^*$  – це верхня і нижня помилкові перехідних процесів, побудованих для різних  $\omega_a$  та  $\zeta_a$ , взятих у межі області їх допустимих значень. Тобто, система управління повинна будуватися таким чином, щоб перехідні процеси за координатами керування лежали всередині області згинаючих  $C^*$  – критеріях. У такого критерія, на відміну від першого, зникає обмеження по частоті перехідних процесів, за порядком моделі об'єкта, він зручніший для моделювання та виборі параметрів системи управління. Однак, є приклади, коли спостерігається невідповідність оцінки літака пілотом з оцінками, отриманими з  $C^*$  – критерію і, крім того, такі критерії також безпосередньо зрозумілі льотчику.

В. Критерії стійкості та керування, які задаються у нормативних документах, які визначають вимоги до конкретних типів літаків. Так у якості основних характеристик управління є:

а)  $x_{\sigma}^{m_n}, P_{\sigma}^{n_y}$  – розхід штурвала (ручки) і зусилля при створенні одиничного перевантаження;

б)  $t_{сер}$  – час спрацювання – час досягнення 0,95 від установленого (заданого) значення перевантаження;

в)  $\delta$  – величина пере регулювання по перевантаженню;

г)  $\delta_n$  – амплітуда остаточних коливань за перевантаженням.

На відміну від інших критеріїв, ці безпосередньо зрозумілі оператору ДПЛА і подані їх номінальні значення для різних видів ДПЛА.

Слід зазначити, що в наш час застосовуються усі ці три підходи оцінки літака як об'єкта керування з точки зору пілота, все залежить від тих вимог і умов які пред'являються до створюваної системи управління.

Для льотчика, який здійснив керування повздовжнім рухом ДПЛА в стаціонарному режимі в умовах рішення задачі компенсаційного слідкування, часто використовується передаточна функція вигляду:

$$W_{\wedge}(p) = \frac{K e^{p\tau} (\alpha \tau_1 p + 1)}{(\tau_2 p + 1)(\tau_1 p + 1)},$$

де  $K$  – регулюючий оператором коефіцієнт передачі;  $\tau$  – час чистого запізнювання;  $\tau_1, \tau_2$  – сталі часу, які характеризують передачу сигналів до оператора;  $\alpha$  – коефіцієнт, який враховує навички, досвід оператора.

Узагальнені (усереднені) значення даних параметрів для пілота наведені у таблиці 2.3:

Таблиця 2.3

Узагальнені значення параметрів для пілота

Частота сигналу, Гц	Параметри				
	$\tau_1, c$	$\tau_2, c$	$\tau, c$	$\alpha$	$K$
0,16	25,0	0,67	0,15	0,08	100
0,32	9,1	0,22	0,20	0,055	40
0,48	5,0	0,09	0,25	0,067	15

З таблиці видно, що параметри передаточної функції не є постійними і змінюються зі зміною частоти сигналів за якими спостерігає оператором ДПЛА.

Відомі й більш складні моделі, які описують діяльність оператора з урахуванням психофізичних особливостей, таких властивостей, як нелінійність, адитивність і т.п. У нових умовах поведінка моделі може навіть

якісно відрізнятись від поведінки оператора тренажеру ДПЛА. Тому такий підхід до опису та дослідження ергатичних систем може застосовуватись для попередніх оцінок та етапі синтезу (розроблення) тренажеру ДПЛА екологічного моніторингу.

### **2.3. Синтез системи стабілізації руху ДПЛА на програмних траєкторіях**

Режими стабілізації руху ДПЛА на програмних траєкторіях є одними з найпоширеніших у наш час. Питання реалізації законів управління для таких режимів досить добре відоме та опрацьоване. Це пов'язано насамперед з наявністю потужних обчислювальних методів синтезу: принципу максимуму Л.С. Понтрягіна, динамічного програмування Р. Беллмана, аналітичного конструювання А.М. Лєтова, Р. Калмана, О.А. Красовського та інших. Однак, більш повне впровадження цих методів стримується деякими труднощами, пов'язаними з необхідністю поєднання якостей теоретика, інженера та програміста при створенні тренажерів ДПЛА. Останнім часом сформовано конкретні шляхи подолання вказаних проблем, пов'язані з подальшою універсалізацією (наближенням до користувача) мов програмування та діалогових засобів спілкування з ЕОМ і, нарешті, розробленням та впровадженням пакетів прикладних програм та систем автоматизованого проектування. В залежності від поставлених завдань дані пакети можуть створюватись різних типів і різного рівня складності. Однак, їх відмінною рисою повинна залишатись простота роботи з ними через ЕОМ на доступній розробнику тренажеру мові.

Пропонується використовувати методику синтезу та сам пакет прикладних програм з розрахунку системи автоматичної стабілізації ДПЛА на базі методів аналітичного конструювання оптимальних регуляторів за критерієм «узагальненої роботи» О.А. Красовського.



Розглядається математична модель ДПЛА, як динамічного об'єкту, лінеаризованого відносно програмної траєкторії польоту:

$$\Delta \dot{x} = a\Delta x + b\Delta U,$$

де  $\Delta X = X - X_{зад}$ ,  $\Delta U = U - U_{зад}$  – відхилення (вектори) фазових координат об'єкта від деяких програмних значень  $X_{зад}$ ,  $U_{зад}$ ;

$a$ ,  $b$  – матриці стану ( $n \times n$ ) та ефективність управління ( $n \times m$ ) відповідно.

Доведено, що управління  $\Delta U$ , які дають мінімум функціоналу загальної роботи:

$$I \int_a^{\infty} (x^T \beta x + \Delta U^T K^{-2} \Delta U + \Delta U_{omm} K^{-2} \Delta U_{omm}) dt$$

Мають вигляд:

$$\Delta U = -k^2 \epsilon^T \Gamma \Delta x,$$

де  $\Gamma$  – симетрична матриця оптимальних управлінь – рішення матричного рівня Ляпунова

$$\Gamma a + a^T \Gamma = -\beta$$

Одним з недоліків даного методу оптимізації є напіввизначеність формування функціоналу якості  $I$  (матриця  $K^{-2}$  визначається після рішення рівняння Ляпунова), і невизначеність критеріїв задання матриці  $\beta$ . Це призводить до необхідності організації ітераційного процесу синтезу з вибором даних коефіцієнтів та багаторазовим рішенням рівняння Ляпунова.

Даний алгоритм реалізований у програмі CONTROL. При реалізації даного алгоритму основні обчислювальні труднощі виникають при багаторазовому рішенні матричного рівняння Ляпунова.

#### Алгоритми рішення рівняння Ляпунова

На даний момент існує досить велика кількість числових алгоритмів рішення матричного рівняння Ляпунова. Всі вони за принципом організації обчислювальних процедур можуть бути умовно розбиті на два великих класи: прямі та ітераційні. Перші пропонують перетворення початкового рівняння в систему звичайних алгебраїчних рівнянь та розв'язок її будь-яким

відомим методом. Другі основані на організації рішення рівняння методом ітераційного наближення до істинного значення. Розглянемо два найбільш ефективних алгоритми з цих класів.

*Алгоритм 1.*

Початкове рівняння  $\Gamma a + a^T \Gamma = -\beta$  зводиться до вигляду  $Ax = -\beta$ , де  $\beta$  – вектор-стовпчик, складений зі стовпчиків матриці  $\beta$  без повторюваних елементів, розмірності  $\frac{1}{2} n(n+1)$ ;  $x$  – шуканий вектор-стовпчик, складений аналогічно з елементів матриці  $\Gamma$ ;  $A$  – квадратна матриця  $\frac{1}{2} n(n+1) \times \frac{1}{2} n(n+1)$ , яка формується з елементів матриці  $a$  за наступними правилами:

$$A_{\nu\mu} = \begin{cases} 2a_{lk} & , i=k, i=j; \\ 2a_{ji} & , i=k, i \neq j, i=l; \\ 0 & , i=k, i \neq j, i \neq l; \\ a_{ii} + a_{kk} & , i \neq k, i=j, k=l; \\ a_{lk} & , i \neq k, i \neq j, k \neq l; \\ a_{jk} & , i \neq k, i \neq j, i=l; \\ a_{ii} & , i \neq l, i \neq k, k \neq l, k=j; \\ 0 & , i \neq j, i \neq l, l \neq k, k \neq j; \\ \nu = (i-1)n - \frac{1}{2}i(i-1) + k; & i=1.2\dots n; k=i, i+1, \dots n \\ \mu = (j-1)n - \frac{1}{2}j(j-1) + l; & j=1.2\dots n; l=j, j+1, \dots n \end{cases}$$

Даний алгоритм реалізований у програмі KAOUS.

*Алгоритм 2.*

Відомо [6, 39], що у випадку стійкої матриці  $a$ , рішення матричного рівняння Ляпунова може бути представлено у вигляді наступного інтеграла:

$$\Gamma = \int_a^{\infty} e^{a^T t} * B * e^{at} dt,$$

де  $e^{at}$  – матрична експонента, розмірності  $(n \times n)$  (програма KVADR).

Для знаходження цього інтеграла пропонується [7, 109] наступна ітераційна процедура:

$$\Gamma_{K+1} = (cT)^{2^K} \Gamma_R C^{2^K} + \Gamma_K,$$

де  $C = e^{a\Delta t}$ ,  $\Delta t$  – шаг чисельного інтегрування;

$$G_0 = \int_0^{\Delta t} e^{a^T \tau} * B * e^{a\tau} dt \text{ – початкове наближення.}$$

Даний алгоритм реалізований в програмі WESOV.

Результати порівняльного дослідження даних алгоритмів показують, що перший кращий для об'єктів невеликої розмірності ( $n \leq 5$ ) у зв'язку з різким зростанням об'єму потрібної пам'яті ЕОМ і погіршенням точності. Другий – більш ефективний для об'єктів високої розмірності. Тут він більш точний і потребує менше пам'яті.

#### Опис пакету прикладних програм.

Пакет прикладних програм, які реалізує поставлену задачу, написаний алгоритмічною мовою Сі+ і включає в себе управляючу головну програму CONTROL і ряд підпрограм.

Підпрограми: DEMOS – підпрограма перетворення масивів для програм, де вони описані різною розмірністю; HPCG – стандартна програма розв'язку диференціальних рівнянь з системи математичного забезпечення (СМЗ) ЕОМ; PRAV, OBR – підпрограма формування правих частин диференціальних рівнянь і виведення результатів до друку; KAOVS, WESOV – підпрограми розв'язку рівнянь Лопухова прямим та ітераційним методами; KVADR – підпрограма знаходження матричної експоненти; MINV – стандартна програма звертання матриці з СМЗ ЕОМ.

### **2.4. Використання методу зворотних задач динаміки для синтезу тренажерного комплексу дистанційно пілотованого літального апарату екологічного моніторингу**

У зв'язку з ускладненням об'єктів керування з'явилося багато задач, в яких потрібно спочатку розрахувати бажаний закон зміни керованого процесу (програмний рух), а потім побудувати закон керування, що забезпечує точне або наближене здійснення цього процесу в умовах можливого виникнення нештатних ситуацій. Складність рішення цієї задачі

на практиці визначається наступними трьома факторами: [9, 20, 21, 45-49, 102, 103].

1. Реальний рух в початковий момент може суттєво відрізнятися від програмного. Це пов'язано з наявними початковими збуреннями, виникненням нештатної ситуації.

2. Дійсні значення параметрів об'єкта керування із-за параметричних збурень відрізняються від їх оцінок, які використовуються при побудові рівняння.

3. Мають місце постійно діючі збурення.

Тому, якщо система керування не здатна парировати вплив перерахованих факторів, автоматично пристосовуючись до існуючих зовнішніх умов, і внутрішнім – викликаним відмовами бортового обладнання то реальний рух може суттєво відрізнятися від програмного. Мета керування (рух за програмною траєкторією), очевидно, не буде досягнута. Таким чином, виникає задача побудови системи керування програмним рухом, яка забезпечує здійснення програмної траєкторії із заданою точністю за наявності різного роду збурень.

Дослідження показують, що застосування законів керування на основі рішення зворотної задачі динаміки дозволяє понизити рівень випадкових складових в координатах стану. Подібні закони керування виявляються ефективними при побудові тренажерних комплексів ДПЛА екологічного моніторингу.

*Формалізація задачі здійснення заданої траєкторії руху ДПЛА екологічного спостереження*

Розглянемо керований об'єкт, стан якого у момент часу  $t$  описується вектор-функцією  $X(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]$ . Компоненти  $X_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  створюють фазові координати, а  $n$ -вимірний евклідовий простір  $R^n$  точок  $X$  – простір станів.

Динаміка руху керованого об'єкта за часом описується матричним диференціальним рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F[X(t), U(t), Z(t)] + P(t); \\ X(t_0) &= X_0, \quad t \in [t_0, t_T], \end{aligned} \quad (2.10)$$

де  $U(t)$  –  $m$ -вимірний вектор керуючих впливів;  $Z(t)$  –  $r$ -вимірний вектор параметрів об'єкта;

$$\Xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_r(t)]$$

$P(t)$  –  $n$ -вимірний вектор зовнішніх збурень;  $X_0$  – початковий стан;  $T = t_T - t_0$  – час руху об'єкта.

На керування і стан об'єкта задані обмеження

$$X(t) \in Q_X; \quad U(t) \in Q_U.$$

На інтервалах часу  $[t_0, t_T]$  функція керування  $U(t)$  кусочно-неперервна і може в ізольованих точках мати розриви першого роду.

Вважаємо, що значення параметра  $\xi_i$  не відомо, причому відома тільки обмежена множина  $Q_\xi = \{\Xi\}$  допустимих значень параметра  $\xi_i$ . Крім того вважаються невідомими як зовнішні збурення, що постійно діють  $P(t)$ , так і їх імовірнісні властивості. Це пов'язано з тим, що збурення розглядаються як неспостережувані і невимірювані. Щодо збурень  $P(t)$  відомо, що  $P(t) \in Q_p$  при всіх  $t \in [t_0, t_T]$  де  $Q_p$  – задана фізична множина.

Метою керування є забезпечення руху об'єкта за заданою штатною траєкторією руху шляхом відповідного вибору  $U(t) \in Q_u$ .

Під програмою руху об'єкта розуміємо бажаний закон зміни за часом стану  $X(t)$ , що заздалегідь має запропоновані властивості (рух за відсутності відмов). Якщо цей закон є вирішенням рівняння при деякому допустимому  $U(t) \in Q_u$ , називатимемо його програмним рухом і позначати  $X_n(t)$ ,  $t \in [t_0, t_T]$ . Допустиме керування, що породжує  $X_n(t)$  будемо називати програмним керуванням  $U_n(t)$  [9].

Дана задача сформульована Е.А. Барбашиним [9] і названа задачею здійснення заданої траєкторії. Програмний рух можна побудувати виходячи з різних міркувань. Програмне керування  $U_n(t)$  і породжуване ним  $X_p(t)$  називатимемо оптимальними і позначати відповідно  $U_n^0(t)$ ,  $X_n^0(t)$  якщо вони доставляють мінімум заданому функціоналу якості

$$J[U_n^0(\cdot), X_n^0(\cdot)] = \min J[U_n(\cdot), X_n(\cdot)].$$

Залежно від умов функціонування об'єкта і вимог, що пред'являються до системи керування, можна виділити три основні задачі моделювання на тренажері руху ДПЛА (рис. 2.7) [9, 45]: задача стабілізації програмного руху; задача термінального керування; задача адаптивного стеження.

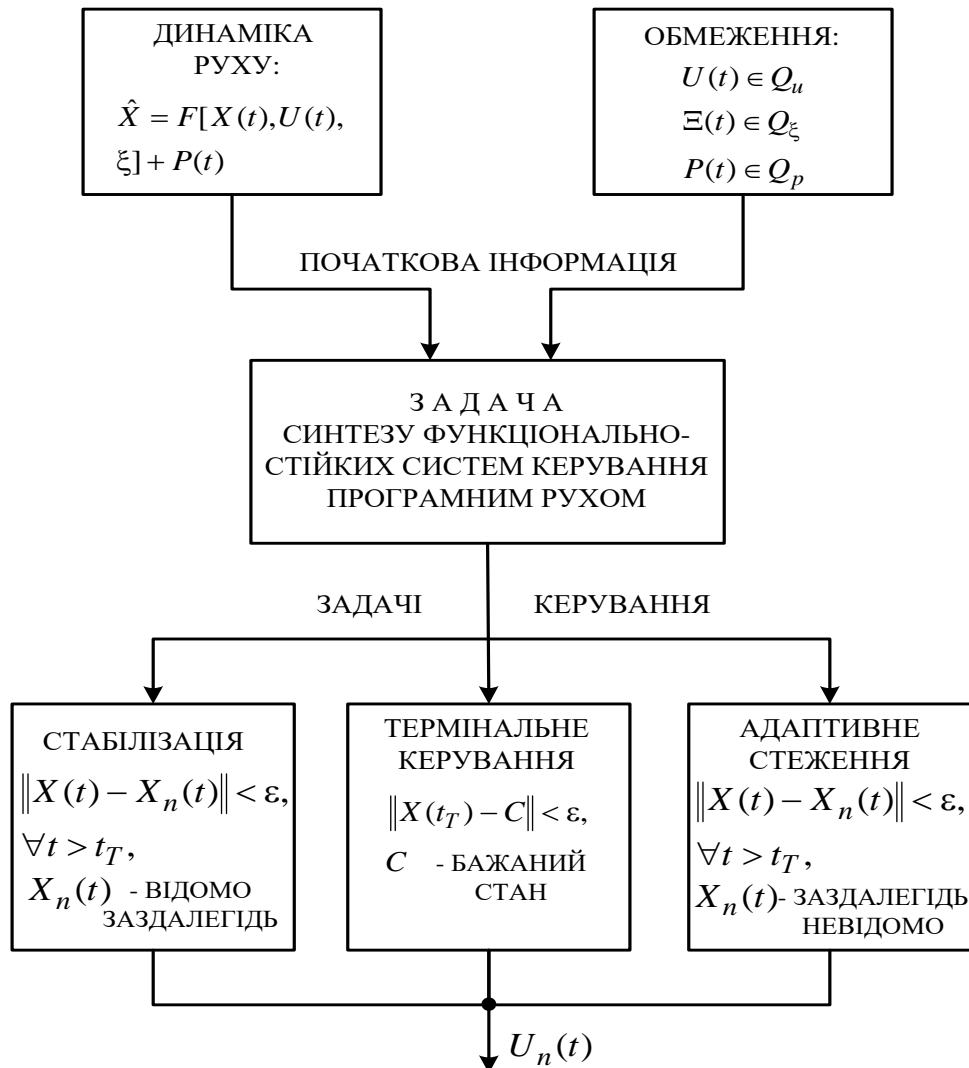


Рис. 2.7. Характеристика завдань моделювання на тренажері руху ДПЛА

### *Задача стабілізації програмного руху в тренажері*

Задача стабілізації програмного руху при неповній інформації формулюється наступним чином. Нехай задано заздалегідь розрахований програмний рух  $X_n(t)$ ,  $t \in [t_0, \infty]$ , причому  $X_n(t_0) = X_0$ , і позитивне число  $\varepsilon$ , що визначає необхідну точність його здійснення.

Потрібно визначити закон керування  $U_n(t)$ , що гарантує при будь-яких  $\Xi \in Q_\xi$  і  $P(t) \in Q_p$   $\varepsilon$  – близькість реального і програмного руху, починаючи з деякого кінцевого моменту часу  $t_n > t_0$

$$X(t) - X_n^0(t) < \varepsilon, \quad \forall t \geq t_n \quad (2.11)$$

а також що задовольняє конструктивним обмеженням  $X(t) \in Q_x$ ,  $U(t) \in Q_U$

Тут  $\|X\| = \left( \sum_{i=1}^n X_i^2 \right)^{1/2}$  – евклідова норма вектору  $X$ ;  $t_n$  – момент

закінчення перехідного процесу, починаючи з якого рух  $X(t)$  під дією шуканого керування  $U_n(t)$  знаходиться в області  $X_n(t)$ .

### *Задача термінального керування в тренажері*

Ця задача характеризується тим, що повинні бути заздалегідь задані наступні величини:

$t_T$  – кінцевий момент часу керування;  $C \in Q_x$  – бажаний стан об'єкта у момент часу  $t_T$ ;  $\varepsilon$  – позитивне число.

Потрібно визначити закон керування  $U_n(t)$ , що гарантує для будь-яких  $\Xi \in Q_\xi$  і  $P(t) \in Q_p$  попадання в бажаний стан з точністю  $\varepsilon$  тобто

$$\|X(t_T) - C\| < \varepsilon \quad (2.12)$$

при дотриманні конструктивних обмежень.

### *Задача адаптивного стеження в тренажері*

Задача адаптивного стеження формулюється так само, як і задача стабілізації програмного руху. Єдина відмінність полягає в тому, що в даному випадку програмний рух об'єкта  $X_n(t)$  заздалегідь невідомо, а відомості про нього поступають в процесі руху. [45,102].

Викладається методика синтезу функціонально-стійких систем керування програмним рухом, яка базується на ідеях методу, розробленого Петровим Б.М. [102], Поповим Є.П., Крутько П.Д. [103].

*Особливості застосування методу зворотних задач динаміки для багатовимірних систем.*

Слід зазначити, труднощі практичного застосування існуючих методів. Так, наприклад, задача аналітичного конструювання регуляторів для лінійної системи п'ятого порядку, вирішувана на основі матричного рівняння Ріккати, вимагає до декількох хвилин часу (залежно від ступеню інтеграції і параметрів моделі об'єкта) та не можуть застосовуватися у системах реального часу, наприклад у тренажерній техніці. Крім того, при цьому необхідно враховувати, що отримувані, в даному випадку, алгоритми керування є найбільш ефективними тільки для даних конкретних значень параметрів об'єкта, початкових умов і заданих заздалегідь збурень [53, 93].

На основі цієї методики вирішуються задачі синтезу алгоритмів керування у тренажерних комплексах ДПЛА екологічного моніторингу. Проблематику конструювання алгоритмів керування рухом при виникненні нештатних ситуацій, в умовах невизначеності доцільно розглядати з позицій зворотних задач динаміки.

У прямій постановці задача синтезу алгоритмів адаптивних систем керування програмним рухом зводиться до визначення законів формування керуючих функцій  $U_n^0$  (наприклад, переміщення керуючих механізмів системи, відхилення рульових органів) за умови досягнення деяких показників, що побічно характеризують якість процесу керування  $J$  (рис. 2.8).

У зворотній постановці (рис. 2.8) задача визначення  $U_n^0$  розглядається в два етапи. На першому етапі визначаються керуючі сили  $F$ , що надають системі необхідний рух. Ці сили можуть відповідати реальним фізичним силам і моментам, які необхідно прикласти до об'єкта керування для



забезпечення оптимального програмного руху  $X_n^0(t)$ . На другому етапі розглядаються питання практичної реалізації необхідних сил і визначаються керуючі функції  $U_n^0(t)$ .

Суттєво при цьому, що така постановка завдання відкриває можливості побудови систем керування на основі конструктивних схем, принципово відмінних від звичайних [45-49].

Зазвичай, запропоновані ідеї розглядаються на прикладах систем з однією мірою свободи. Це обмежує можливість застосування методу вирішення зворотних задач в тих випадках, коли необхідно одночасно керувати всіма або декількома фазовими координатами  $n$ -вимірному об'єкта.

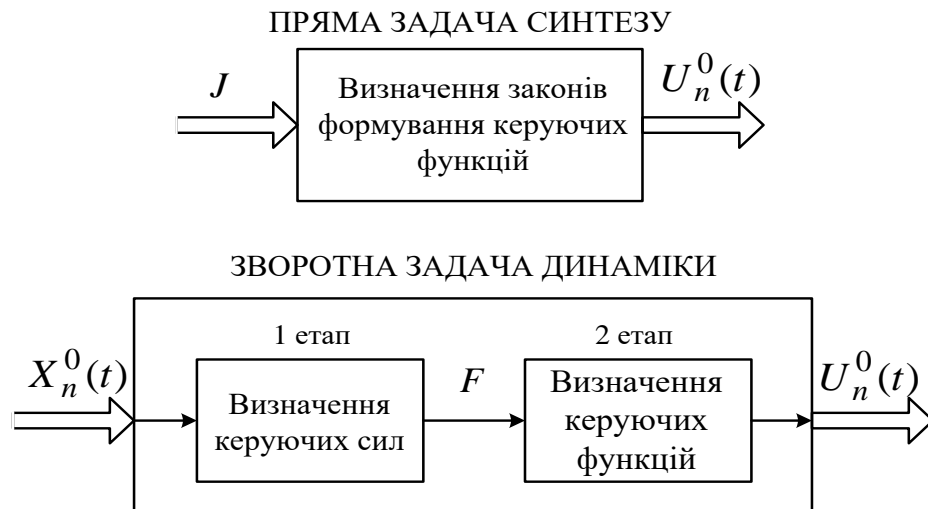


Рис. 2.8. Структурна схема постановки задачі синтезу

Розглянемо особливості застосування методу зворотних задач для ДПЛА об'єкта, що описується матричним рівнянням в операторній формі [45-49]

$$A(p)X = B(p)U, \quad (2.13)$$

де

$$A(p) = \{a_{ij}(p)\}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (2.14)$$

$$X^T = [X_1 \dots X_n], \quad (2.15)$$

$$B(p) = \{b_{ij}(p)\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (2.16)$$

$$U^T = [U_1 \dots U_r]. \quad (2.17)$$

Відомо, що таке керування може бути представлено у формі Коші.

Побудуємо алгоритм керування при якому рух об'єкта з точки  $X(0)$  у початку координат здійснюється за траєкторією

$$X_n(t) = \begin{bmatrix} C_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{1k}e^{\lambda_k t} \\ C_{21}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{2k}e^{\lambda_k t} \\ \dots \\ C_{n1}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{nk}e^{\lambda_k t} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

або в матричній формі

$$X_n(t) = Ce^{\Lambda t}, \quad (2.19)$$

де

$$C = \{C_{ij}\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (2.20)$$

$$[e^{\Lambda t}]^T = [e^{\lambda_1 t} e^{\lambda_2 t} \dots e^{\lambda_k t}], \quad (2.21)$$

де  $\lambda_l, l = \overline{1, k}$  – різні дійсні або комплексно зв'язані числа, що задовольняють умові  $\operatorname{Re} \lambda_l < 0$ .

Постійні коефіцієнти  $C_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}$  однозначно визначаються початковими значеннями фазових координат і їх  $(k-1)$  похідної.

За умови у виборі довільним чином прийнятних значень параметрів  $C_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}, \lambda_l, l = \overline{1, k}$  отримаємо різноманіття різних програмних рухів. Застосування вибору довільним чином може бути використане для виділення тих програмних рухів  $X_n(t)$ , які є рішенням рівняння (2.13) і задовольняють різним обмеженням (наприклад, конструктивним обмеженням або обмеженням на безпеку руху)

$$X(0) = \begin{bmatrix} C_{11} + C_{12} + \dots + C_{1k} \\ C_{21} + C_{22} + \dots + C_{2k} \\ \dots \\ C_{n1} + C_{n2} + \dots + C_{nk} \end{bmatrix},$$

$$\dot{X}(0) = \begin{bmatrix} C_{11}\lambda_1 + C_{12}\lambda_2 + \dots + C_{1k}\lambda_k \\ C_{21}\lambda_1 + C_{22}\lambda_2 + \dots + C_{2k}\lambda_k \\ \dots \\ C_{n1}\lambda_1 + C_{n2}\lambda_2 + \dots + C_{nk}\lambda_k \end{bmatrix},$$

$$X^{(k-1)}(0) = \begin{bmatrix} C_{11}\lambda_1^{k-1} + C_{12}\lambda_2^{k-1} + \dots + C_{1k}\lambda_k^{k-1} \\ C_{21}\lambda_1^{k-1} + C_{22}\lambda_2^{k-1} + \dots + C_{2k}\lambda_k^{k-1} \\ \dots \\ C_{n1}\lambda_1^{k-1} + C_{n2}\lambda_2^{k-1} + \dots + C_{nk}\lambda_k^{k-1} \end{bmatrix},$$

Керуючу силу, що реалізовує траєкторію  $X_n(t)$  позначимо  $f_n[t]$ .

Шукатимемо таку траєкторію у вигляді

$$f_n[t] = A(p) X_n(t). \quad (2.22)$$

Для отримання програмного закону зміни керуючої сили підставимо вираз (2.18) в (2.22).

$$f_n(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) + \dots + a_{1n}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) \\ a_{21}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) + \dots + a_{2n}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) \\ \dots \\ a_{n1}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) + \dots + a_{nn}(p)(c_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_k t}) \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Крім того, вважаємо, що

$$A(p) = \{a_{ij}(p)\} = \{m_{ij}p^2 + r_{ij}p + h_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (2.24)$$

Підставляючи вираз (2.24) у вираз (2.23) можна отримати такий вираз керуючої сили в матричній формі

$$f_n[t] = (MCA_d^2 + RCA_d + HC)e^{\lambda t}, \quad (2.25)$$

де

$$M = \{m_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, n}; \quad C = \{c_{ij}\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k};$$

$$A_d = \text{diag}\{\lambda_i\}, \quad i = \overline{1, k};$$

$$R = \{r_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, n};$$

$$[e^{\lambda t}]^T = \{e^{\lambda_i t}\} \quad i = \overline{1, k}.$$

Для того, щоб траєкторія  $X_n(t)$  починалася в точці

$$X_n(0) = \begin{bmatrix} X_{10} & \dot{X}_{10} & \ddot{X}_{10} \dots X_{10}^{(k-1)} \\ X_{20} & \dot{X}_{20} & \ddot{X}_{20} \dots X_{20}^{(k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \dots \\ X_{n0} & \dot{X}_{n0} & \ddot{X}_{n0} \dots X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix},$$

елементи матриці  $C = \{c_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$  треба визначити в результаті рішення  $n$  систем  $k$  алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} C_{11} + C_{12} + \dots + C_{1k} = X_{10} \\ C_{11} \lambda_1 + C_{12} \lambda_2 + \dots + C_{1k} \lambda_k = \dot{X}_{10} \\ \dots \dots \dots \\ C_{11} \lambda_1^{(k-1)} + C_{12} \lambda_2^{(k-1)} + \dots + C_{1k} \lambda_k^{(k-1)} = X_{10}^{(k-1)} \\ \dots \dots \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{n1} + C_{n2} + \dots + C_{nk} = X_{n0} \\ C_{n1} \lambda_1 + C_{n2} \lambda_2 + \dots + C_{nk} \lambda_k = \dot{X}_{n0} \\ \dots \dots \dots \\ C_{n1} \lambda_1^{(k-1)} + C_{n2} \lambda_2^{(k-1)} + \dots + C_{nk} \lambda_k^{(k-1)} = X_{n0}^{(k-1)} \\ \dots \dots \dots \end{cases}$$

Або в матричній формі

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \dots \\ C_{1k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{10} \\ \dot{X}_{10} \\ \dots \\ X_{10}^{(k-1)} \end{bmatrix}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_{n1} \\ C_{n2} \\ \dots \\ C_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{n0} \\ \dot{X}_{n0} \\ \dots \\ X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix}$$

Рішення цих матричних рівнянь має вигляд:

$$[C_{11} \dots C_{1k}]^T = \Phi^{-1} [X_{10} \ \dot{X}_{10} \dots X_{10}^{(k-1)}]^T, \quad (2.26)$$

$$[C_{n1} \dots C_{nk}]^T = \Phi^{-1} [X_{n0} \ \dot{X}_{n0} \dots X_{n0}^{(k-1)}]^T, \quad (2.27)$$

де

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Слід враховувати, що  $\Delta = \Phi$  є визначником Вандермонда, який можна записати у вигляді

$$\prod_{1 \leq i < j \leq k} (\lambda_j - \lambda_i)$$

Цей визначник може дорівнювати нулю і лише у тому випадку, коли  $\lambda_j = \lambda_i$ ,  $j \neq i$ .

Оскільки величини  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, k}$  вибрані різними, то в нашому випадку визначник Вандермонда не дорівнює нулю, і, отже існує зворотна матриця  $\Phi^{-1}$ .

Підставивши вираз (2.28) у вирази (2.26), (2.27) знаходимо

$$C = \begin{bmatrix} X_{10} & \dot{X}_{10} & \dots & X_{10}^{(k-1)} \\ X_{20} & \dot{X}_{20} & \dots & X_{20}^{(k-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n0} & \dot{X}_{n0} & \dots & X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix} = \Phi^{-1} = X(0)\Phi^{-1T}. \quad (2.29)$$

Вираз для вектора керуючої сили може бути знайдений шляхом підстановки виразу (2.29) у вираз (2.29). Маємо:

$$f_n[t] = \{M(X(0)[\Phi^{-1}]^T)\Lambda_d^2 + R(X(0)[\Phi^{-1}]^T)\Lambda_d + H(X(0)[\Phi^{-1}]^T)\}e^{\Lambda t}. \quad (2.30)$$

Аналізуючи отриманий вираз (2.30) вважаємо, що для отримання потрібної керуючої сили [45] необхідно заздалегідь:

описати об'єкт керування, шляхом задання елементів матриць  $M$ ,  $R$ ,  $H$ ;

задати початкові умови за кожною керованою координатою і їх перших  $(k-1)$  похідних;

задати програмну траєкторію руху, шляхом відповідного вибору елементів  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

Відшукуванням виразу для керуючої сили закінчується перший етап вирішення поставленого завдання.

Розглянемо тепер інший етап, пов'язаний з реалізацією програми зміни сили. Задача практичної реалізації алгоритму керування силою  $f_n$  полягає у визначенні вектору керуючих функцій  $U_n$  тобто величин відхилень органів керування за допомогою яких створюється сила  $f_n[X_n, U_n]$ . Очевидно, що вирішення цієї задачі визначається структурою і параметрами об'єкта керування і вимірюваною інформацією.

За суттю, побудова алгоритмів керування рухом за призначеною траєкторією  $X_n$  має два аспекти. Перший з них пов'язаний з безпосереднім формуванням вектора потрібної керуючої сили  $f_n[X_n(t)]$ , а другий – з обчисленням значень елементів вектору керуючої функції  $U_n(t)$ , які забезпечують створення необхідної сили  $f_n(t)$ . Розрахункові співвідношення за допомогою яких обчислюються  $f_n[X_n(t)]$  і  $U_n(t)$  складають зміст алгоритму керування рухом.

Вважаємо, при цьому, що об'єкт керування (2.10) має властивості керованості, сила  $f_n$  однозначно визначається величиною вектору керування  $U^T = (U_1 \dots U_r)$ . Тому, для кожного моменту часу  $t$  і відповідного йому стану  $X(t)$  можна вказати таке  $U_n(t)$  при якому

$$f(X, U_n) = f_n[t]. \quad (2.31)$$

Керування (2.31) може бути вирішене відносно  $U_n$  або аналітично (окремий випадок), або алгоритмічно (найбільш загальний випадок).

Розглянемо другий шлях вирішення рівняння (2.31), який представляє найбільший інтерес з погляду практичної реалізації в програмному середовищі тренажера.

Нехай  $f(X, U)$  така, що

$$U_i \cdot f(X, U_i, U_j) > 0,$$

$$U_j = \text{const}; \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i \neq j.$$

Шукатимемо вирішення рівняння (2.31) у вигляді:

$$\dot{U}_n = \rho \Delta f(t), \quad (2.32)$$

де

$$\rho^T = \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_r),$$

$$\Delta f(t) = f_n(t) - f(X, U).$$

Такий підхід до визначення керуючих функцій базується на результатах досліджень проведених в роботах [45-49, 102, 103].

Вибір алгоритму (2.32) визначається в першу чергу властивостями функцій  $f(X, U)$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = U_n(t).$$

Структурно алгоритм (2.32) може бути представлений у вигляді замкнутої системи, схема якої приведена на рис. 2.9.

Ця схема відповідає алгоритмічному вирішенню рівняння  $f(X, U) = f_n(t)$ , програмне значення керуючої сили визначається співвідношенням (2.30).

Слід враховувати, що навіть якщо програмне керування побудоване як функція часу, практична користь від його застосування невелика: різного роду збурення, а також невизначеність властивостей і умов функціонування об'єкта у тому числі і при нештатних ситуаціях завадять реалізації програмного руху  $X_n(t)$  при використанні  $U_n(t)$ . Так, якщо в об'єкті (2.10) керованому за заздалегідь певною програмою  $U_n(t)$  виникнуть в деякий момент  $t = t(\cdot)$  непередбачені збурення  $\Delta X(t(\cdot))$  вектору стану  $X(t)$ , то програмне керування  $U_n(t)$  "поведе" об'єкт, починаючи з моменту  $t = t(\cdot)$  в стан  $X(t_T)$ , взагалі кажучи, відмінне (і, можливо, дуже суттєво) від запропонованого стану  $X_n(t_T)$ . У цьому випадку керування повинно формуватися з урахуванням додаткової інформації, що надходить в систему

керування в процесі руху. Цій вимозі відповідає керування зі зворотним зв'язком.

Алгоритм керування із зворотним зв'язком може бути отриманий за допомогою виразу (2.25). Представимо програмний рух у вигляді

$$X_n(t) = Ce^{\Lambda t}, \quad (2.33)$$

де  $C = \{c_{ij}\}$ ,  $ij = \overline{1, n}$  – квадратна матриця розмірності  $n \times n$ .

Слід зазначити, що у даному випадку матриця  $C$  видозмінена в порівнянні з виразом (2.18) – зведена до квадратної. В багатьох практичних випадках таке представлення програмного руху можливе і допустимо [20, 21, 102, 103]. Тоді за умови виконання рівності  $X(t) = X_n(t)$  маємо

$$X(t) = Ce^{\Lambda t}.$$

Звідки слідує

$$e^{\Lambda t} = e^{-1} X(t), \quad \text{де } C \neq 0. \quad (2.34)$$

Тоді закон керування силою (2.25) з урахуванням виразу (2.34) може бути представлений у вигляді

$$f_n[X(t)] = (MC\Lambda^2 + RC\Lambda + HC)[C^{-1}X(t)]. \quad (2.35)$$

У кожен момент часу  $f_n(t)$  формується за вимірюваннями поточного стану системи, тобто на основі зворотного зв'язку. Характерним при цьому є те, що коефіцієнти алгоритму керування силою визначаються початковими умовами.



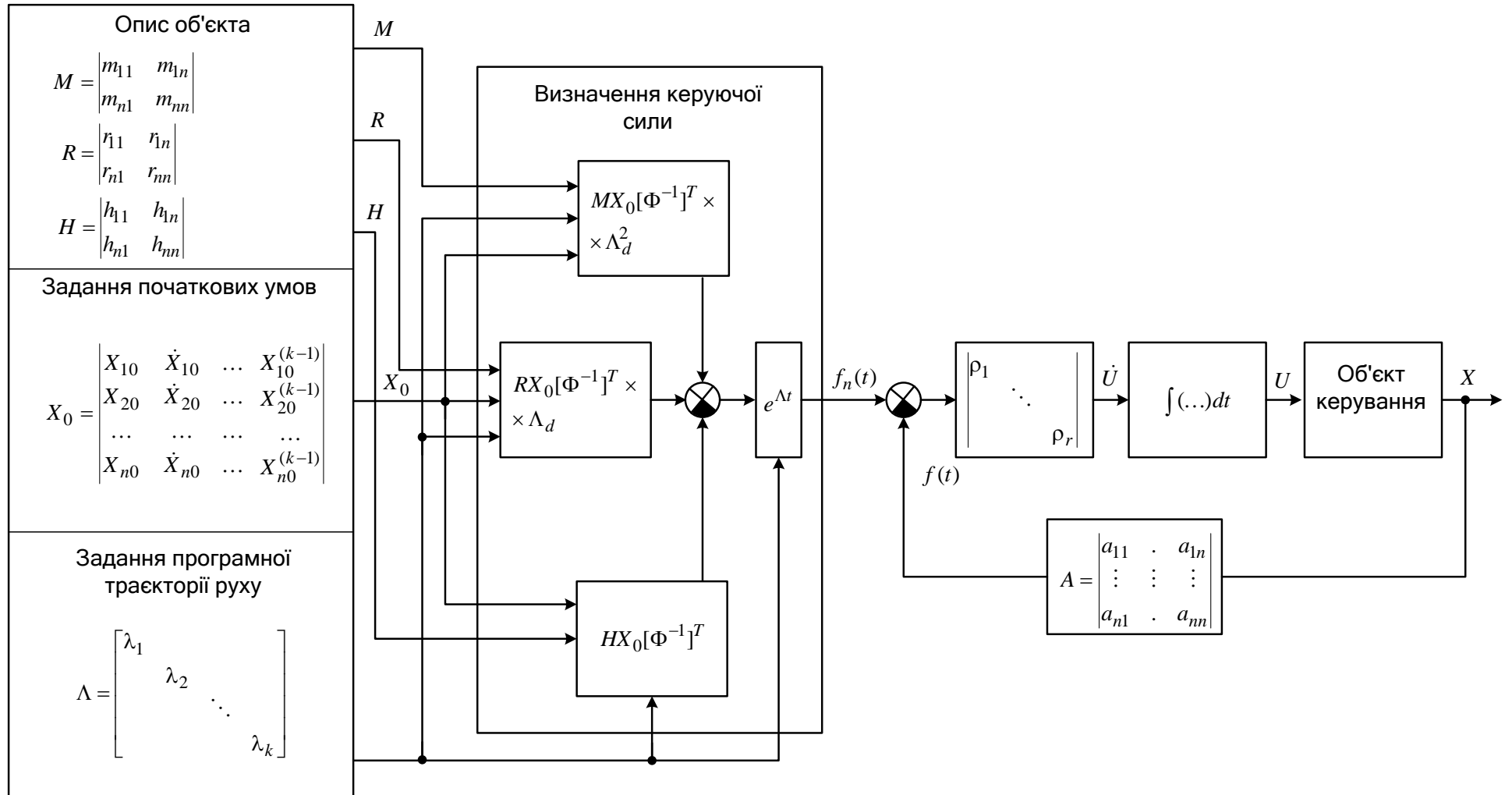


Рис. 2.9. Структурна схема алгоритму

Структурна схема алгоритму керування, побудованого відповідно до (2.35), приведена на рис. 2.10.

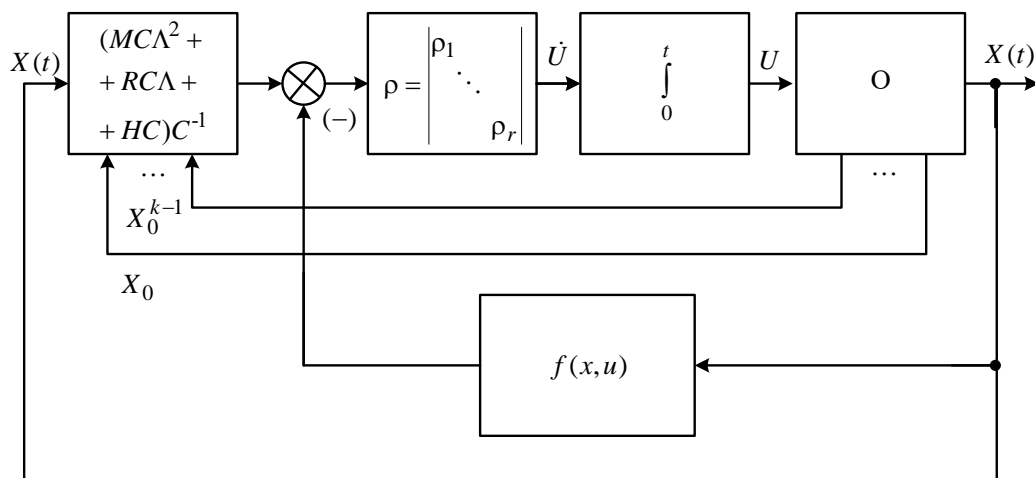


Рис.2.10. Структурна схема алгоритму керування

Таким чином запропоновано метод зворотних задач динаміки для синтезу тренажерного комплексу дистанційно пілотованого літального апарату екологічного моніторингу.

## 2.5. Оцінювання якості процесу керування з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки

Оцінимо стійкість і максимальний час перехідного процесу в автоматичній системі при нештатних ситуаціях з алгоритмом керування на основі вирішення зворотних задач динаміки [20, 21].

Розглянемо клас керованих динамічних систем, що описуються наступним матричним диференціальним рівнянням

$$\dot{X}(t) = F[X(t), U(t), \Xi] + P(t). \quad (2.36)$$

Вважаємо, що програмний рух є асимптотично стійким. Нехай даний клас керованих динамічних систем задовольняє таким умовам.

1. Рівняння (2.36) вирішуване щодо керування на підпросторі  $R$ , тобто існує підпростір  $R \in R^m \times R^n$  і єдина функція  $U: R \times \Xi \rightarrow R^m$  такі, що для будь-якої пари точок  $\{X, Z\} \in R$  і точки  $\{\xi\} \in \Xi$  виконана тотожність

$$Z \equiv F[X, U(x, z, \xi), \xi]. \quad (2.37)$$

Умову (2.37) гарантує існування і єдність ідеального програмного закону керування вигляду  $U_n = U_n(X_n, \dot{X}_n, \Xi)$ , що забезпечує точне здійснення програмного руху за умови  $X_n(t_0) = X_0$ ;  $P(t) = 0$ ;  $(X_n(t), \dot{X}_n(t)) \in R \quad \forall t \in [t_0, t_T]$ .

2. Початкові збурення і постійно діючі зовнішні збурення обумовлені обмеженнями вигляду

$$\begin{aligned} \|X(t_0) - X_n(t_0)\| &< \delta_0; \\ \|P(t)\| &< C_p, \end{aligned}$$

де  $\delta_0, C_p$  – деякі позитивні параметри.

3. Є така Гурвіцева матриця  $\Gamma$  розмірності з простими власними числами  $\gamma_i, i = \overline{1, n}$  – коренями характеристичного рівняння системи

$$\dot{X} = \Gamma X, \quad X(t_0) = X_0,$$

яка задовольняє умові

$$(X, \dot{X}_n(t) + \Gamma(X - X_n(t))) \in R \quad (2.38)$$

для будь-якого  $X \in R^n, \forall t > t_0$

Покажемо, що закон керування

$$U(t, X) = U[X, \dot{X}_n + \Gamma(X - X_n), \Xi] \quad (2.39)$$

при  $t \in [t, \infty]$  забезпечує асимптотичну стійкість програмного руху  $X_n(t)$  в цілому, тобто будь-який збурений рух  $X(t)$  при будь-яких  $X(t_0) \in R$  асимптотично зближується з  $X_n(t)$ .

З виразів (2.36), (2.37), (2.38) знаходимо

$$F[X(t), U(t), \Xi] = \dot{X} - \dot{X}_n(t) + \Gamma(X - X_n(t)), \quad (2.40)$$

звідки безпосередньо слідує

$$\dot{X} - \dot{X}_n(t) = \Gamma(X - X_0). \quad (2.41)$$

При цьому слід враховувати, що за допомогою відповідного вибору матриці  $\Gamma$  можна забезпечити будь-який запропонований характер загасання перехідного процесу в процесі керування. Оскільки за умовою (2.38) матриця

$\Gamma$  вибрана з простими власними числами, то існують позитивні числа  $C$  і  $\gamma$  такі, що

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \gamma_i &< -\gamma, \\ \|X(t) - X_n(t)\| &< C \|X(t_0) - X_n(t_0)\| e^{-\gamma(t-t_0)}, \\ \forall t &> t_0. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Звідки безпосередньо слідує асимптотична стійкість програмного руху в цілому.

*Аналітична оцінка максимального часу перехідного процесу*

Випадок 1. Зовнішні впливи відсутні  $\pi(t) = 0$ .

Нехай потрібно синтезувати закон керування, що гарантує для будь-яких  $\xi \in \mathcal{E}$ ,  $\pi(t) \in \mathcal{Q}_\pi$ ,  $\varepsilon$  – близькість реального і програмного рухів, починаючи з деякого кінцевого моменту часу  $t_n > t_0$ , тобто

$$\|X(t) - X_n(t)\| < \varepsilon \quad \forall t \geq t_n. \quad (2.43)$$

Вираз (2.43) з урахуванням виразу (2.42) може бути представлений у вигляді

$$C \|X(t_0) - X_n(t_0)\| e^{-\gamma(t_n-t_0)} \leq \varepsilon, \quad (2.44)$$

звідки слідує

$$\gamma(t_n - t_0) \leq \ln \frac{C}{\varepsilon} \|X(t_0) - X_n(t_0)\|. \quad (2.45)$$

Позначимо  $T_n = t_n - t_0$  – час перехідного процесу в системі.

Час перехідного процесу  $T_n$  може бути оцінено за допомогою виразу (2.45)

$$T_n \leq \gamma^{-1} \ln \frac{C \|X(t_0) - X_n(t_0)\|}{\varepsilon}. \quad (2.46)$$

Випадок 2. Мають місце зовнішні збурення  $\pi(t) \neq 0$ .

Нехай об'єкт керування описується рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F[X(t), U(t), \xi] + \pi(t), \\ X(t_0) &= X_0, \quad t \in [t_0, t_n]. \end{aligned}$$

Крім того

$$X \in \mathcal{Q}_X, \quad \dot{X}_n(t) + \Gamma(X - X_n) \in \mathcal{Q}_X.$$

Керування  $U$  вибрано у вигляді

$$U(t, X) = U[X, \dot{X}_n + \Gamma(X - X_n), \zeta]$$

Рівняння замкнутої системи має вигляд

$$\dot{X}(t) - \dot{X}_n(t) = \Gamma[X(t) - X_n(t)] + \pi(t).$$

Припустимо, що  $X_n(t)$  і  $\dot{X}_n(t)$  лежать на множинах  $Q_X$  і  $Q_{\dot{X}}$  із запасами відповідно  $\delta_1$  і  $\delta_2$ , причому

$$\begin{aligned} \delta_1 &> C\|X_0 - X_n(t_0)\|, \\ \delta_2 &> C\|X_0 - X_n(t_0)\| \cdot \|\Gamma\| \end{aligned} \quad (2.47)$$

або з урахуванням  $\Gamma \neq \mathbf{0}$

$$\delta_1 - C\|X_0 - X_n(t_0)\| > 0, \quad (2.48)$$

$$\delta_2 \|\Gamma\|^{-1} - C\|X_0 - X_n(t_0)\| > 0. \quad (2.49)$$

Введемо позначення

$$X = \min[\delta_1 - C\|X_0 - X_n(t_0)\|, \delta_2 \|\Gamma\|^{-1} - C\|X_0 - X_n(t_0)\|], \quad (2.50)$$

$$C\gamma^{-1}C_\pi < \min(x, \varepsilon), \quad (2.51)$$

$$\varepsilon > \|X(t) - X_n(t)\|. \quad (2.52)$$

З урахуванням прийнятих позначень може бути отримана така умова

$$\|X(t) - X_n(t)\| \leq \|e^{r(t-t_0)}\| \cdot \|X_0 - X_n(t_0)\| + C\gamma^{-1}C_\pi. \quad (2.53)$$

Звідки з урахуванням (2.52) слідує

$$C\|X_0 - X_n(t_0)\|e^{-\gamma(t-t_0)} + C\gamma^{-1}C_\pi < \varepsilon.$$

Вирішуючи отриману нерівність відносно  $t = t_n$  знаходимо  $\varepsilon - C\gamma^{-1}C_\pi > C\|X_0 - X_n(t_0)\|e^{-\gamma(t_n-t_0)}$ .

$$t_n \leq t_0 + \gamma^{-1} \ln \frac{C\|X_0 - X_n(t_0)\|}{\varepsilon - C\gamma^{-1}C_\pi}. \quad (2.54)$$

Час перехідного процесу

$$T_n \leq \gamma^{-1} \ln \frac{C\|X_0 - X_n(t_0)\|}{\varepsilon - C\gamma^{-1}C_\pi}. \quad (2.55)$$

Порівнюючи вираз (2.55) з виразом (2.46) можна зробити висновок про те, що за наявності зовнішніх збурень час перехідного процесу збільшується

$$T_n(C_\pi \neq 0) = T_n(C_\pi = 0) + \gamma^{-1} \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon - C\gamma^{-1}C_\pi}. \quad (2.56)$$

При великих збуреннях (збільшення  $C_\pi$ ) значно зростає час перехідного процесу. Для зменшення часу перехідного процесу в системі необхідно збільшувати  $\gamma$  шляхом відповідного вибору керування. Коефіцієнти системи керування визначаються початковими параметрами руху об'єкта, а також параметрами заданої програмної траєкторії. Це дозволяє змінювати параметри програмної траєкторії в процесі руху об'єкта.

## 2.6. Синтез програмного комплексу тренажера ДПЛА із заданими динамічними властивостями

У роботах [102, 103] показується, що шляхом відповідного вибору величин  $\lambda_j$  у виразі

$$X_i(t) = \sum_{j=1}^k C_j e^{\lambda_j t}$$

виявляється можливим синтезувати систему з необхідним спектром. При цьому для отримання прийняттого динамічного процесу в системі потрібно здійснювати “підбір” коефіцієнтів  $\lambda_j$ . При збільшенні розмірності об'єкта, а також числа коефіцієнтів  $\lambda_j$  тобто збільшенні  $j$  і  $k$  відповідно зростають труднощі підбору  $\lambda_j$ ,  $j = \overline{1, k}$ . Тому пропонується можливим застосування іншого підходу до синтезу функціонально-стійкої системи із заданими динамічними властивостями [7].

Нехай при  $t = 0$  стан об'єкта  $X(0) = X_0$ . Потрібно синтезувати керування, що надаватиме об'єкту такий рух, в результаті якого стан  $X$  змінюватиметься в часі згідно із законом  $X(t) = X_n(t)$ , причому

$$X_n(t) - X^*(t) = C \exp(-\eta_0 t) \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.57)$$

де  $X^*(t)$  – бажаний закон зміни координати при встановленні програмного руху  $X_n(t)$ ;  $C$ ,  $\varphi$  – коефіцієнти, що визначаються на основі початкових умов;  $\eta$  – характеристика загасання;  $\omega$  – кутова частота коливань.

Перехідний процес в системі може характеризуватися і іншими параметрами:  $\zeta$  – відносний коефіцієнт загасання;  $T_0$  – постійна часу;  $\Omega_0$  – характеристика стійкості руху;  $T_\kappa$  – період коливань.

Між вказаними характеристиками існують такі залежності

$$\Omega_0 = \frac{1}{T_0}, \quad \zeta = \frac{\eta_0}{\Omega_0} = \eta_0 T_0, \quad T_\kappa = \frac{2\pi}{\omega}, \quad \omega = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{T_0}, \quad \eta_0 = \frac{\zeta}{T_0}.$$

Дослідження показують, що максимальні похибки в системі, що не перевищують 5% мають перехідні процеси з  $\zeta=0,7-0,9$ , а час, за який відбувається практично повне загасання приблизно дорівнює  $3T_0$ . При цьому постійна часу  $T_0$  визначає тільки масштаб процесу за віссю часу  $t$  коефіцієнт загасання визначає характер перехідного процесу.

Змінюючи параметри  $\eta_0$ ,  $\omega$  в виразі (2.57) можна задавати потрібну якість динамічного процесу.

Диференціюючи вираз (2.57) за часом знаходимо

$$\dot{X}^*(t) = C \exp(-\eta_0 t) [\eta_0 \sin(\omega t + \varphi) - \omega \cos(\omega t + \varphi)] + \dot{X}_n(t).$$

У свою чергу, диференціюючи цей вираз за часом, маємо

$$\ddot{X}^*(t) = C \exp(\eta_0 t) [2\eta_0 \omega \cos(\omega t + \varphi) + (\omega^2 - \eta_0^2) \sin(\omega t + \varphi)] + \ddot{X}_n(t). \quad (2.58)$$

Рівняння (2.58) визначає програму зміни прискорення координати  $X$ . Очевидно, шукане керування  $U_n(t)$  повинно бути таким, щоб рівняння руху об'єкта співпадало з диференціальним рівнянням (2.58).

Для отримання закону керування зворотним зв'язком із виразів (2.57), (2.58), приймаючи  $X^*(t) = X(t)$ , виключаємо

$$e^{-\eta t}; \quad \sin(\omega t + \varphi); \quad \cos(\omega t + \varphi).$$

Отримаємо

$$\ddot{X}^*(t) = \ddot{X}_n(t) + 2\eta_0 [\dot{X}_n(t) - X(t)] + (\omega^2 - \eta_0^2) [X_n(t) - X(t)] \quad (2.59)$$

Якщо в кожний момент часу  $t > 0$  за допомогою органу керування створюється прискорення  $\ddot{X}(t)$ , то об'єкт буде здійснювати предписаний рух. Потрібна величина керування  $U_n(t)$  задовольняє рівнянню

$$\ddot{X}^*(t) = \frac{dF(X(t), U_n(t))}{dt} = \ddot{X}_n(t) + 2\eta_0[\dot{X}_n(t) - \dot{X}(t)] + (\omega^2 + \eta_0^2)[X_n(t) - X(t)]. \quad (2.60)$$

Отримати точне рішення рівняння (2.60) відносно  $U_n$  в загальному випадку не виявляється можливим. Рівняння (2.60) доцільно вирішувати алгоритмічно, причому за такою схемою, яка виключила б необхідність обчислення фактичного значення  $F(X(t), U_n(t))$ .

Рівняння (2.60) може бути вирішено за допомогою такого алгоритму, побудованого за схемою такої системи

$$\dot{U}_n(t) = K(\ddot{X}(t) - \ddot{X}(t)), \quad (2.61)$$

або з урахуванням виразу (2.60)

$$\begin{aligned} \dot{U}_n(t) = & K(\ddot{X}_n(t) - \ddot{X}(t)) + 2\eta_0(\dot{X}_n(t) - \dot{X}(t)) + \\ & + (\omega^2 + \eta_0^2)(X_n(t) - X(t)) \end{aligned} \quad (2.62)$$

причому  $\eta_0 = \frac{\xi}{T_0}$ ,  $\omega^2 + \eta_0^2 = T_0^{-2}$ .

Структурна схема цього алгоритму приведена на рис. 2.11.

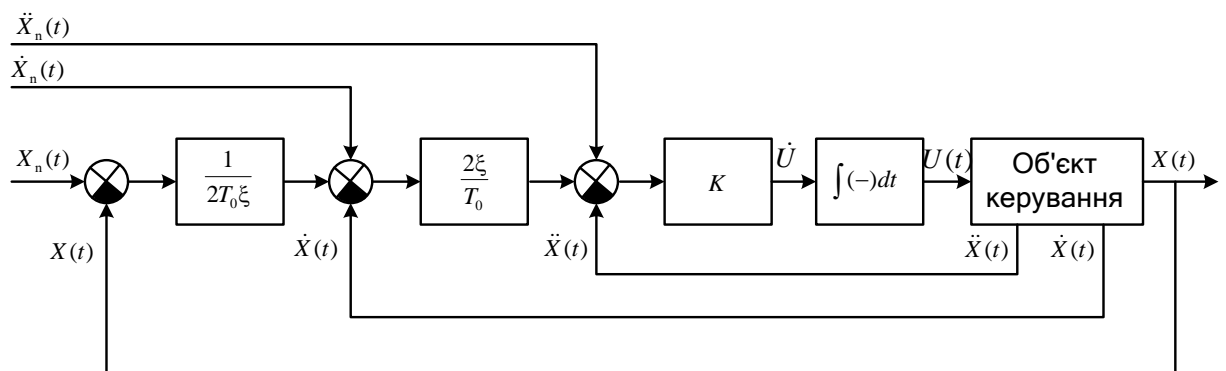


Рис. 2.11. Структурна схема управління на основі зворотних задач динаміки

Передаточна функція зовнішнього контуру системи керування визначається виразом



$$W_X(p) = \frac{X(p)}{X_n(p)} = \frac{p^2 + 2\eta_0 p + (\omega^2 + \eta_0^2)}{p^2 + (2\eta_0 + \frac{1}{KW_0(p)})p + (\omega^2 + \eta_0^2)}, \quad (2.63)$$

де  $W_0(p) = \frac{X(p)}{U(p)}$  – передаточна функція об'єкта керування.

Для стійкості системи керування необхідно, щоб знак коефіцієнта  $K$  збігався із знаком часткової похідної  $F(X(t), U(t))$  за змінною,  $U(t)$ , тобто

$$\text{sign}K = \text{sign} \frac{\partial F}{\partial U}.$$

Розглянемо особливості побудови алгоритму керування в поздовжньому русі кутом тангажу на основі рішення зворотної задачі динаміки.

Використаємо рівняння поздовжнього руху літального апарату в загальному вигляді

$$m\dot{V}(t) = P \cos \alpha - X - G \sin \theta, \quad (2.64)$$

$$mV\dot{\theta}(t) = P \sin \alpha + Y - G \cos \theta, \quad (2.65)$$

$$I_Z \dot{\omega}_Z(t) = M_Z(\delta_B, \omega_Z, \alpha, \dots), \quad (2.66)$$

$$\dot{H}(t) = V \sin \theta, \quad (2.67)$$

$$\dot{\gamma}(t) = \omega_Y \sin \gamma + \omega_Z \cos \gamma, \quad (2.68)$$

$$\theta = \vartheta - \alpha, \quad (2.69)$$

де  $V, H$  – швидкість і висота польоту;  $\alpha, \vartheta, \theta, \gamma$  – кути атаки, тангажу, нахилу траєкторії, крену;  $I_Z$  – момент інерції відносно осі  $OZ$ ;  $\omega_Z, \omega_Y$  – кутові швидкості обертання відносно осі  $OZ$ , осі  $OY$  відповідно;  $m, G$  – маса і вага літального апарату;  $M_Z$  – керуючий момент;  $\delta_B$  – відхилення руля висоти.

В роботі [68, 69] пропонується методика побудови алгоритму керування кутом тангажу  $\vartheta$  на основі рішення зворотних задач динаміки в передбаченні, що  $\vartheta_n = \text{const}$ . Проте на практиці має науковий і практичний інтерес випадок, коли  $\vartheta_n(t) = \text{var}$ . При цьому необхідно, щоб процес встановлення назначеного кутового положення підкорявся кінематичному закону

$$\mathcal{G}_n(t) - \mathcal{G}^*(t) = C_g \exp(-rt). \quad (2.70)$$

Стала  $C_g$  визначається з умови  $\mathcal{G}^*(0) = \mathcal{G}_0$  і дорівнює  $C_g = \mathcal{G}_n(0) - \mathcal{G}_0$ . Відомо, що для керування кутовим положенням літального апарату за тангажем необхідно відповідним чином керувати кутовою швидкістю  $\omega_z$ .

З рівняння (2.68) знаходимо

$$\omega_z = [\dot{\mathcal{G}}(t) - \omega_y \sin \gamma](\cos \gamma)^{-1}. \quad (2.71)$$

Диференціюючи вираз (2.70) за часом, маємо

$$\dot{\mathcal{G}}^*(t) = r C_g \exp(-rt) + \dot{\mathcal{G}}_n(t). \quad (2.72)$$

Підставляючи в вираз (2.70) замість  $\dot{\mathcal{G}}(t)$  вираз  $\dot{\mathcal{G}}^*(t)$  з (2.72), отримаємо

$$\omega_z^*(t) = [r C_g \exp(-rt) + \dot{\mathcal{G}}_n(t) - \omega_y \sin \gamma](\cos \gamma)^{-1}. \quad (2.73)$$

Враховуючи, що  $C_g \exp(-rt) = \mathcal{G}^*(t) - \mathcal{G}_0$  із виразу (2.73) при  $\mathcal{G}^* = \mathcal{G}$  знаходимо шукане розрахункове співвідношення

$$\omega_z^*(\mathcal{G}) = [r(\mathcal{G}_n - \mathcal{G}) + \dot{\mathcal{G}}_n - \omega_y \sin \gamma](\cos \gamma)^{-1}. \quad (2.74)$$

Таким чином, програмне значення кутової швидкості тангажу формується за схемою зі зворотним зв'язком. Причому величина  $\omega_z^*(\mathcal{G})$  у даному випадку безпосередньо визначається поточним значенням неузгодження  $\Delta \mathcal{G} = \mathcal{G}_n - \mathcal{G}$  заданою кутовою швидкістю.  $\dot{\mathcal{G}}_n$  при цьому передбачається, що кут крену  $\gamma$  і кутова швидкість  $\omega_y$ , що характеризують боковий рух літального апарату, є відомими параметрами і вимірюються відповідними вимірювачами.

Функціональна схема керування кутом тангажу представлена на рис. 2.12.

Розглянемо особливості побудови алгоритму керування кутовою швидкістю  $\omega_z$  на основі запропонованої методики.

Нехай в початковий момент часу  $t = 0$ ,  $\omega_z(0) = \omega_{z0}$ . Синтезуємо керування при якому ЛА набуває обертальний рух відносно осі  $OZ$  з кутовою швидкістю  $\omega_{zn}(t) = \omega_z^*(t)$ .

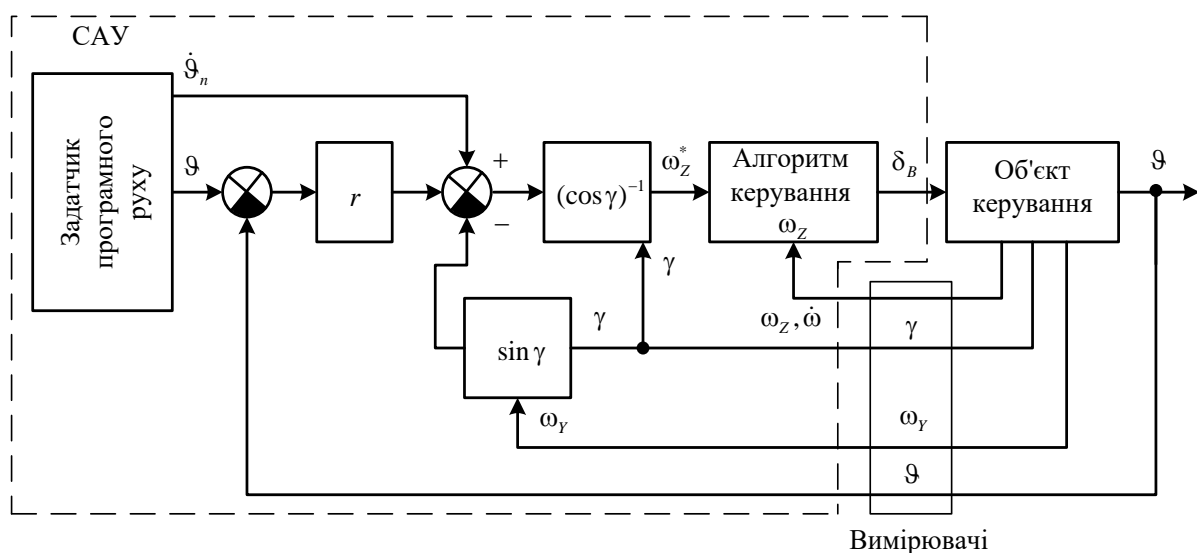


Рис. 2.12. Функціональна схема керування кутом тангажу на основі зворотної задачі динаміки

Задача, що розглядається може бути зведена до визначення моменту  $M_Z$  під дією якого здійснюється обертання апарату. Керуючий момент відшукується у відповідності з законом зміни кутової швидкості

$$\omega_Z^*(t) - \omega_Z^{**}(t) = C_\omega \exp(-\lambda t), \quad (2.75)$$

де  $\omega_Z^{**}$  величина, що характеризує бажаний процес зміни кутової швидкості при установці назначеного режиму обертального руху.

Стала  $C_\omega = \omega_Z^*(0) - \omega_Z^{**}(0)$  вибирається із умови  $\omega_Z^*(0) = \omega_{Z0}$ .

Параметр  $\lambda$  характеризує інтенсивність затухання відхилень

$$\Delta\omega_Z = \omega_Z^* - \omega_Z^{**}. \quad (2.76)$$

Диференціювавши вираз (2.75) за  $t$  маємо

$$\omega_Z^{**}(t) + \lambda\omega_Z^{**}(t) = \lambda\omega_Z^*(t) + \dot{\omega}_Z^*(t). \quad (2.77)$$

Шуканий керуючий момент повинен бути таким, щоб рівняння обертального руху ДПЛА співпало з диференціальним рівнянням (2.77).

Практично ідеальний збіг рівнянь неможливий, тому що при синтезі алгоритму можливо лише забезпечити наближення (з визначеною ступеню) рівняння керуючого процесу  $\omega_Z^{**}$  до моделі визначеної траєкторії  $\omega_Z^*$ . Для

визначення шуканого керування скористаємося рівнянням (2.66), яке представимо у такому вигляді

$$\dot{\omega}_Z(t) = I_Z^{-1} M_Z(\delta_B, \omega_Z, \alpha, \dots) = \varepsilon_Z(\delta_B, \omega_Z, \alpha, \dots). \quad (2.78)$$

Отже, замість моменту  $M_Z$  можна розглядати прискорення  $\varepsilon_Z(\delta_B, \omega_Z, \alpha, \dots)$  обертального руху, так як між  $M_Z$  і  $\varepsilon_Z$  існує однозначна залежність.

Прийmemo в якості керуючого параметру (в контурі керування  $\omega_Z$ ) прискорення  $\varepsilon_Z$ .

Позначимо через  $\varepsilon_Z^{**}(t) = \dot{\omega}_Z^{**}(t)$  керуюче прискорення при якому реалізується кінематичний закон зміни кутової швидкості (2.77).

Це прискорення визначається з урахуванням (2.77)

$$\varepsilon_Z^{**}(t) = \lambda C_\omega \exp(-\lambda t) + \dot{\omega}_Z^*. \quad (2.79)$$

Вираз (2.79) визначає програму зміни керуючого прискорення. На його основі отримаємо закон керування зі зворотним зв'язком.

З виразу (2.77) випливає, що

$$\varepsilon_Z^{**}(t) = \dot{\omega}_Z^{**}(t) = \lambda(\omega_Z^*(t) - \omega_Z^{**}(t)) + \dot{\omega}_Z^*(t).$$

Приймаючи  $\omega_Z^{**}(t) = \omega_Z(t)$  – поточне значення кутової швидкості  $\omega_Z$ .

Таким чином, якщо в кожний момент часу  $t > 0$  з допомогою руля висоти створюється прискорення  $\varepsilon_Z^*$ , то ДПЛА буде здійснювати програмний рух, що визначається кінематичним законом. При цьому потрібна величина кута відхилення руля висоти задовольняє рівнянню

$$\varepsilon_Z(\delta_{Bn}, \omega_Z, \dots) = I_Z^{-1} M(\delta_{Bn}, \omega_Z, \dots) = \lambda(\omega_Z^* - \omega_Z) + \dot{\omega}_Z^*. \quad (2.80)$$

У загальному випадку (без припущень і наближень) отримати точне рішення рівняння (2.80) не представляється можливим оскільки зазвичай не має точних теоретичних залежностей моменту  $M_Z^*$  від параметрів руху. Це пов'язано з необхідністю ідентифікації коефіцієнтів  $m_Z^{\delta_B}$ ,  $m_Z^{\omega_Z}$ , ..., т.п., що складно технічно і теоретично. Рівняння (2.80) може бути вирішено алгоритмічно. Причому при цьому не вимагається обчислень фактичного

значення моменту (або прискорення) в залежності від положення руля висоти.

Пропонується такий алгоритм рішення рівняння (2.80)

$$\dot{\delta}_B(t) = K_{\varepsilon Z}(\varepsilon_Z^{**} - \dot{\omega}_Z) = K_{\varepsilon Z}(\dot{\omega}_Z^* - \dot{\omega}_Z + \lambda(\dot{\omega}_Z^* - \dot{\omega}_Z)). \quad (2.81)$$

Структурна схема цього алгоритму приведена на рис. 2.13.

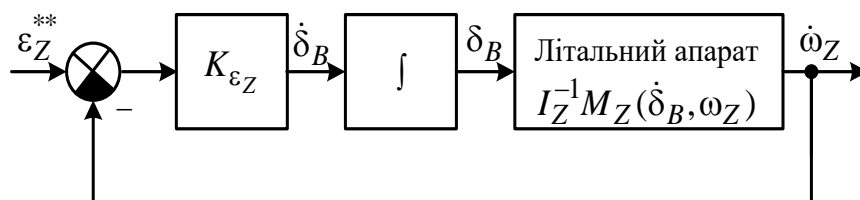


Рис. 2.13. Керування за кутовим прискоренням на основі зворотної задачі динаміки

Очевидно, такий алгоритм цілковито узгоджується з оцінкою асимптотичної стійкості руху об'єкта. Особливість розглядуваного алгоритму полягає у наступному. Для функціонування алгоритму не потрібно обчислювати  $M_Z$ . Ця особливість є наслідком того, що в якості робочої інформації використовується прискорення обертального руху. Така особливість цілковито узгоджується з положенням про те, що використання прискорень в законах керування надає автоматичним системам властивості адаптивності і параметричної варіантності. Ця обставина має суттєве значення для проектування програмного комплексу тренажера ДПЛА.

При цьому формування потрібної швидкості відхилень руля висоти  $\dot{\delta}_B$  здійснюється безпосередньо за змінами. Для стійкості системи необхідно щоб знак коефіцієнта  $K_{\varepsilon Z}$  співпадав зі знаком часткової похідної моменту  $M_Z$  за змінною  $\delta_B$ , тобто

$$\text{sign} K_{\varepsilon Z} = \text{sign} \left( \frac{\partial M_Z}{\partial \delta_B} \right)$$

Якщо  $m_Z^{\delta_B} < 0$ , тоді і  $K_{\varepsilon_Z} < 0$ . Величина  $K_{\varepsilon_Z}$  визначає швидкодію контуру прискорення. При  $K_{\varepsilon_Z} \rightarrow \infty$  теоретично має місце ідеальне виконання умови  $\omega_Z(t) = \omega_Z^*(t)$ . При великих  $|K_{\varepsilon_Z}|$  будуть надмірно проявлятися похибки вимірювання.

Величина  $K_{\varepsilon_Z}$  може бути визначена таким чином

$$K_{\varepsilon_Z} = \frac{5\lambda + m_Z^{\omega_\varepsilon}}{m_Z^{\delta_B}}; \quad T_{\omega_Z} = 5T_{\varepsilon_Z}; \quad \lambda = \frac{1}{T_{\omega_Z}}.$$

Структурна схема системи керування кутовою швидкістю обертання літального апарату відносно осі  $OZ$  приведена на рис. 2.14.

Структурна схема системи автоматичного керування кутом тангажу приведена на рис. 2.15.

Для аналізу динаміки керуючого процесу скористаємося таким рівнянням

$$I_Z \dot{\omega}_Z = \frac{\rho V^2}{2} S b_A (m_Z^{\omega_Z} \omega_Z + m_Z^{\delta_B} \delta_B + \Delta M_Z). \quad (2.82)$$

Тут доданок  $\Delta M_Z$  представляє ту частину моменту  $M_Z$ , яка обумовлена зміною інших параметрів руху, наприклад кута атаки  $\alpha$ , швидкості його зміни  $\dot{\alpha}$  і ін. Для стійких контурів керування зазвичай величина  $\Delta M_Z$  обмежена, і більш того є зникаючою функцією.

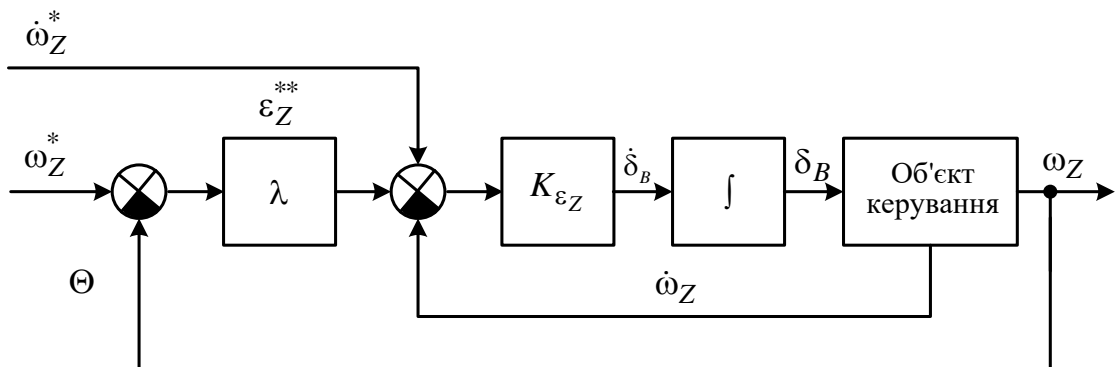


Рис. 2.14. Структурна схема керування кутовою швидкістю обертання ЛА

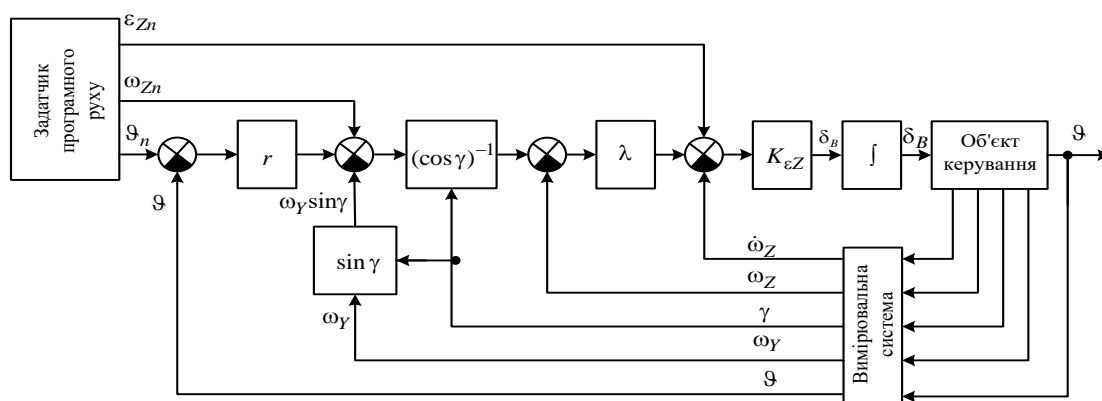


Рис. 2.15. Структурна схема системи автоматичного керування кутом тангажу

Нехтуючи величиною  $\Delta M_Z$  представимо вираз (2.82) в операторній формі:

$$[I_Z p^2 - M_Z^{\omega_Z} p] \vartheta(p) = M_Z^{\delta_B} \delta_B(p). \quad (2.83)$$

Звідки безпосередньо слідує

$$\delta_B(p) = \vartheta(p) \frac{I_Z p^2 - M_Z^{\omega_Z} p}{M_Z^{\delta_B}}. \quad (2.84)$$

Підставляючи вираз (2.84) в (2.83), маємо

$$p^2 \frac{\vartheta(p)}{\vartheta_n(p)} \frac{(I_Z p^2 - M_Z^{\omega_Z})}{M_Z^{\delta_B}} = K_{\varepsilon Z} \left[ 1 - \frac{\vartheta(p)}{\vartheta_n(p)} \right] \left[ \frac{1}{T_0^2} + \frac{2\xi}{T_0} p + p^2 \right]. \quad (2.85)$$

Позначимо  $\frac{\vartheta(p)}{\vartheta_n(p)} = W_\vartheta$  – передаточна функція контуру програмного

керування кутом тангажу. З виразу (2.85) знаходимо

$$W_X = \frac{\frac{1}{T_0^2} + \frac{2\xi}{T_0} p + p^2}{T_0^{-2} + 2\xi T_0^{-1} p_0 \left( 1 - \frac{M_Z^{\omega_Z}}{M_Z^{\delta_B} K_{\varepsilon Z}} \right) + \frac{I_Z}{M_Z^{\delta_B} K_{\varepsilon Z}} p^3}. \quad (2.86)$$

Звідки слідує, що при  $|K_{\varepsilon Z}| \rightarrow \infty$ ,  $W_x \rightarrow 1$  має місце виконання умови  $\vartheta_n(t) = \vartheta(t)$ , тобто точне відстежування об'єктом заданого значення кута тангажу.

Аналіз отриманого виразу (2.86) дозволяє зробити висновок, що для забезпечення стійкості системи необхідно і достатньо виконання такої умови

$$K_{\varepsilon Z} < \frac{M_Z^{\omega Z}}{M_Z^{\delta B}} + \frac{I_Z}{2M_Z^{\delta B} T_0 \xi}. \quad (2.87)$$

При формуванні структури системи керування за каналом кута тангажу у відповідності з (2.82) необхідно здійснювати вимірювання кутового прискорення  $\ddot{\vartheta}(t)$ . На практиці це може бути пов'язано з різного роду труднощами, які обумовлюються великими похибками вимірювачів (особливо при зв'язаному поздовжньому і боковому рухах літального апарату). Причому, саме похибки вимірювання  $\ddot{\vartheta}(t)$  мають найбільш суттєвий вплив на якість процесу керування.

З метою виключення необхідності вимірювання величини  $\ddot{\vartheta}(t)$  пропонується використовувати такі залежності

$$\dot{\vartheta}(t) = \omega_c \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma. \quad (2.88)$$

Диференціюючи цей вираз за часом, знаходимо

$$\begin{aligned} \ddot{\vartheta}(t) &= \dot{\omega}_y \sin \gamma + \omega_y \cos \gamma \dot{\gamma} + \dot{\omega}_z \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma \dot{\gamma} = \\ &= \dot{\omega}_y \sin \gamma + \dot{\omega}_z \cos \gamma + \dot{\gamma}(\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma). \end{aligned} \quad (2.89)$$

Враховуємо

$$\dot{\gamma}(t) = \omega_x \operatorname{tg} \vartheta (\omega_x \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \quad (2.90)$$

Вираз (2.89) з урахуванням виразу (2.90) приймає вигляд

$$\begin{aligned} \ddot{\vartheta}(t) &= \dot{\omega}_y \sin \gamma + \dot{\omega}_z \cos \gamma + [\omega_z \operatorname{tg} \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \\ &- \omega_z \sin \gamma)] (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma). \end{aligned}, \quad (2.91)$$

Структура системи керування кутом тангажу літального апарату з врахуванням виразів (2.89) и (2.91) буде мати вигляд, представлений на рис. 2.16.



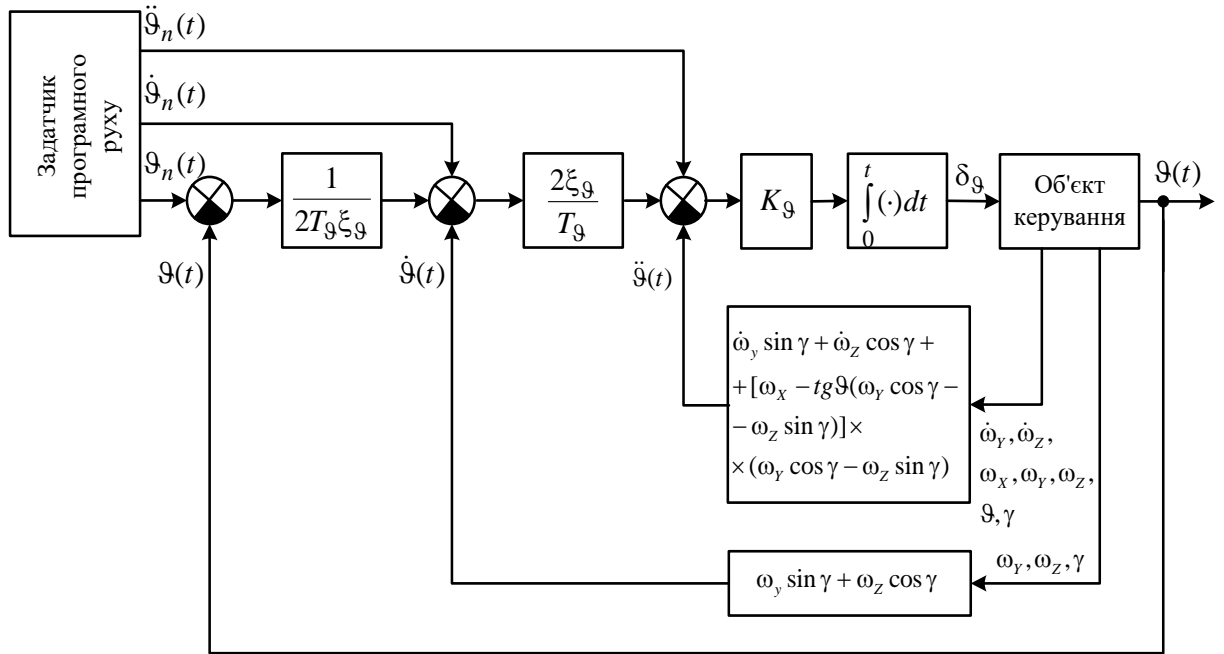


Рис. 2.16. Структурна схема керування кутом тангажу в тренажері ДПЛА

Аналогічно, може бути отримана структура системи керування кутами крену  $\gamma$ , рискання  $\psi$ . При цьому пропонується використовувати такі співвідношення

$$\ddot{\gamma}(t) = \dot{\omega}_x - \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\cos^2 \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \dot{\vartheta} + tg \vartheta \times \\ \times \left[ \begin{array}{l} \dot{\omega}_y \cos \gamma - \dot{\omega}_z \sin \gamma - (\omega_y \sin \gamma - \omega_z \cos \gamma) \times \\ \times (\omega_z - tg \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma)) \end{array} \right] \end{array} \right\}; \quad (2.92)$$

$$\dot{\psi}(t) = (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) (\cos \vartheta)^{-1}; \quad (2.93)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \left\{ \begin{array}{l} [\dot{\omega}_y \cos \gamma - \dot{\omega}_z \sin \gamma] \cos \vartheta + [\omega_x - tg \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma)] \times \\ \times [\omega_y \sin \gamma (\cos \gamma - \cos \gamma \vartheta) - \omega_z (\cos \gamma \cos \vartheta + \sin^2 \gamma)] \end{array} \right\} \times \cos^{-2} \vartheta, \quad (2.94)$$

$$\dot{\delta}_{\gamma} = K_{\gamma} [\ddot{\gamma}_n - \ddot{\gamma} + 2\xi_{\gamma} T_{0\gamma}^{-1} (\dot{\gamma}_n - \dot{\gamma}) + T_{0\gamma}^{-2} (\gamma_n - \gamma)]; \quad (2.95)$$

$$\dot{\delta}_{\psi} = K_{\psi} [\ddot{\psi}_n - \ddot{\psi} + 2\xi_{\psi} T_{0\psi}^{-1} (\dot{\psi}_n - \dot{\psi}) + T_{0\psi}^{-2} (\psi_n - \psi)]. \quad (2.96)$$

Структурні схеми системи керування кутами  $\gamma$ ,  $\psi$  приведені відповідно на рис. 2.17, 2.18.

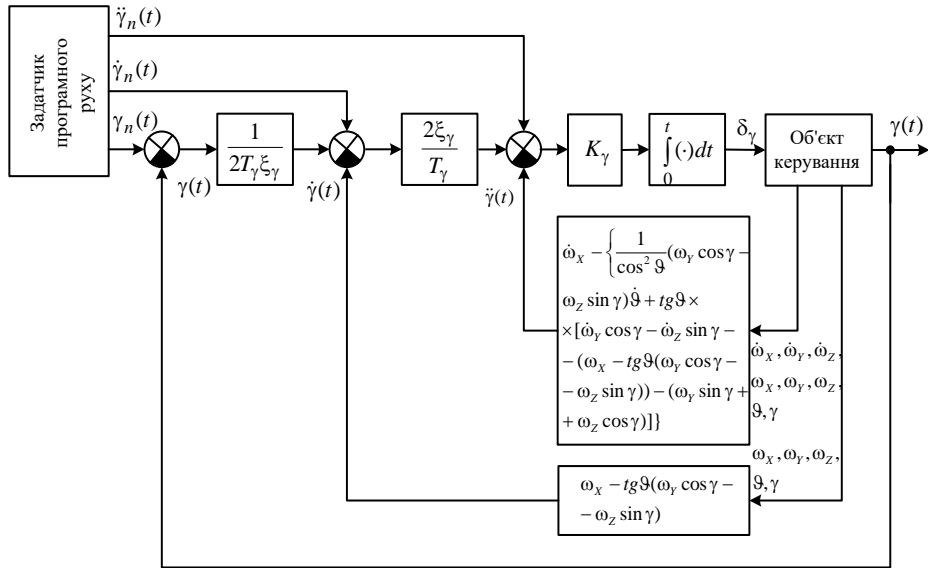


Рис. 2.17. Структурна схема системи керування кутом крену ДПЛА

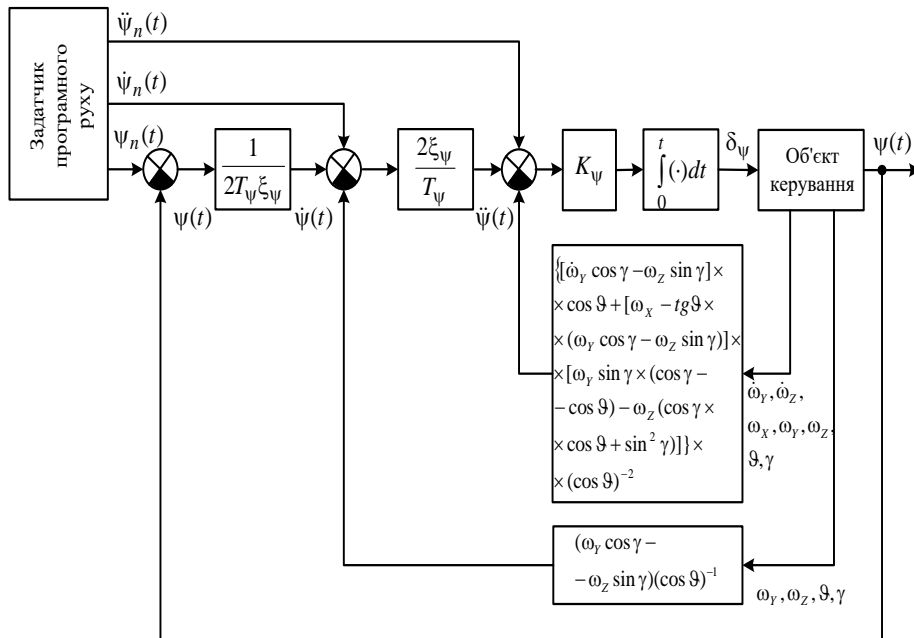


Рис. 2.18. Структурна схема керування кутом ристання ДПЛА

Таким чином запроновано та обґрунтовано структурні схеми керування кутом тангажу, крену та ристання в тренажері ДПЛА.

### 2.7. Оцінка ефективності алгоритму стабілізації ДПЛА на програмній траєкторії з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки

Розглянемо алгоритм керування ДПЛА, який забезпечує стабілізацію

об'єкта керування на програмній траєкторії з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки.

Початкове рівняння керованого детермінованого руху ДПЛА має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX(t) + BU(t), \quad Z(t) = HX(t), \\ U(x) &= CZ(t) = CHX(t). \end{aligned} \quad (2.97)$$

Нехай програмна траєкторія руху  $X^*(t)$  задана диференціальним рівнянням

$$\dot{X}^*(t) = GX^*(t), \quad X^*(0) = X_0. \quad (2.98)$$

Умовимося, що характер зміни функцій  $\{X_i(t)\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  відповідає бажаному руху при  $X(t) \rightarrow O_{(n)}$ . Функції  $\{X_i^*\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  можуть бути назначені з урахуванням фізичного змісту задачі і визначені не тільки у вигляді рішень диференціального рівняння (2.98), але і у вигляді аналітичних залежностей.

Потрібно знайти матрицю  $C$ , розмірності  $(m, k)$  закону керування в результаті наближення траєкторії  $X(t) \rightarrow X^*(t)$ . Ступінь наближення може характеризуватися функціоналом

$$J(c) = \int_0^T [X(t) - X^*(t)]^T V [X(t) - X^*(t)] dt. \quad (2.99)$$

Передбачається при цьому, що структура матриці  $V$  у (2.99) відповідає структурі математичної моделі керованої системи, так що мінімізація функціоналу  $J(c)$  забезпечує наближення  $X(t) \rightarrow X^*(t)$ . Найчастіше матриця  $V$  вибирається діагональною, елементи якої зворотно пропорційні квадратам максимально допустимих відхилень поточних координат  $X_i(t)$  від еталонних координат  $X_i^*(t)$ , тобто

$$V = \text{diag} \{ [X_i(t) - X_i^*(t)]_{\max}^{-2} \}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.100)$$

Отже, розглядаємо задачу визначення оптимальних параметрів  $\{c_{ij}\}$  закону керування, при яких досягається мінімум  $J(c)$ .

Для вирішення даної задачі перетворимо початкові рівняння (2.97). З цією метою введемо  $k$  векторів

$$\begin{aligned} c_1^T &= [c_{11} \ c_{21} \ \dots \ c_{m1}] \\ c_2^T &= [c_{12} \ c_{22} \ \dots \ c_{m2}] \\ &\dots\dots\dots \\ c_k^T &= [c_{1k} \ c_{2k} \ \dots \ c_{mk}] \end{aligned} \quad (2.101)$$

утворених із стовпців матриці  $C$ . Крім того, з рядків матриці  $H$  визначимо також  $k$  векторів

$$\begin{aligned} h_1^T &= [h_{11} \ h_{12} \ \dots \ h_{1n}] \\ h_2^T &= [h_{21} \ h_{22} \ \dots \ h_{2n}] \\ &\dots\dots\dots \\ h_k^T &= [h_{k1} \ h_{k2} \ \dots \ h_{kn}] \end{aligned} \quad (2.102)$$

З урахуванням прийнятих позначень (2.101) (2.102)

$$CH = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_k] \begin{bmatrix} h_1^T \\ h_2^T \\ \dots \\ h_k^T \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^k c_i h_i^T. \quad (2.103)$$

Таким чином, рівняння системи (2.97) можна представити у вигляді

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) = F(X, U), \quad (2.104)$$

$$U = \left( \sum_{i=1}^k c_i h_i^T \right) X = G(X, C). \quad (2.105)$$

Приймаючи  $C = C^0 + \delta$ , введемо  $(n, m)$  – матриці чутливості

$$\psi_i(t, C^0) = \left[ \frac{\partial X(t, C)}{\partial C_i} \right]_{\delta=0}, \quad i = \overline{1, k} \quad (2.106)$$

вектору стану керованої системи за відношенням до змін її параметрів.

Крім того, введемо  $(m, m)$  – матриці

$$\theta_i(t, C^0) = \left[ \frac{\partial U(t, C)}{\partial C} \right]_{\delta=0}, \quad i = \overline{1, k} \quad (2.107)$$

чутливості керуючих функцій

Знайдемо співвідношення для визначення  $\psi_i$ ,  $\theta_i$ . З урахуванням (2.104), (2.105) маємо,

$$\frac{\partial \dot{X}(t, C)}{\partial C_i} = F_X \frac{\partial X(t, C)}{\partial C_i} + F_U \frac{\partial U(t, C)}{\partial C_i} \quad (2.108)$$

$$\frac{\partial U(t, C)}{\partial C_i} = G_X \frac{\partial X(t, C)}{\partial C_i} + G_{C_i}(x, C) \quad (2.109)$$

де

$$F_X \triangleq \frac{\partial F(x, u)}{\partial X}, \quad F_U \triangleq \frac{\partial F(x, u)}{\partial U},$$

$$G_X \triangleq \frac{\partial G(x, C)}{\partial X}, \quad G_{C_i} \triangleq \frac{\partial G(x, C)}{\partial C_i}.$$

Відповідно до (2.104), (2.105) часткові похідні рівні

$$F_X = A, \quad F_U = B, \quad G_X = \sum_{i=1}^k c_i h_i^T, \quad G_{C_i} = h_i^T X(t, C). \quad (2.110)$$

Підставляючи (2.110) в (2.108) і (2.109), отримаємо

$$\frac{\partial X(t, C)}{\partial C_i} = A \frac{\partial X(t, C)}{\partial C_i} + B \frac{\partial U(t, C)}{\partial C_i}, \quad (2.111)$$

$$\frac{\partial U(t, C)}{\partial C_i} = \left( \sum_{i=1}^k c_i h_i^T \right) \frac{\partial X(t, C)}{\partial C_i} + h_i^T X(t, C). \quad (2.112)$$

Приймаючи  $\delta = 0$  з урахуванням (2.106), (2.107), отримаємо рівняння для функцій чутливості

$$\frac{d\psi_i(t, C)}{dt} = A\psi_i(t, C^0) + B\theta_i(t, C^0), \quad (2.113)$$

$$\theta_i(t, C^0) = \left( \sum_{i=1}^k c_i h_i^T \right) \psi_i(t, C^0) + h_i^T X(t, C^0), \quad (2.114)$$

$$\psi_i(0, C^0) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (2.115)$$

Вектор-функція  $X(t, C^0)$ , що входить в (2.114) визначається з урахуванням (2.97) в результаті інтегрування рівняння

$$\frac{dX(t, C^0)}{dt} = (A + BC^0H)X(t, C^0), \quad (2.116)$$

$$X(0, C^0) = X_0. \quad (2.117)$$

Підставляючи (2.114) в (2.113), маємо

$$\frac{d\psi_i(t, C^0)}{dt} = (A + BC^0H)\psi_i(t, C^0) + B[h_i^T X(t, C^0)]. \quad (2.118)$$

Таким чином, для визначення функцій чутливості замкнутої системи слід інтегрувати  $k$  матричних рівнянь (2.118) і одне векторне рівняння (2.116). Далі вважаючи відомими  $\psi_i(t, C^0)$  і  $X(t, C^0)$ , представимо вектор стану  $X(t, C) = X(t, C^0 + \delta)$  наближеним виразом

$$X(t, C) = X(t, C^0) + \sum_{i=1}^k \psi_i(t, C^0) \delta_i \quad (2.119)$$

яке встановлює явну залежність  $X(t, C)$  від параметрів закону керування.

Підставляючи (2.119) в (2.99) мінімізуючий функціонал якості представимо у вигляді

$$I(\delta) = \int_0^T \sum_{i=1}^k \psi_i(t, C^0) \delta_i - \Delta(t, C^0)]^T V [\sum_{i=1}^k \psi_i(t, C^0) \delta_i - \Delta(t, C^0)] dt, \quad (2.120)$$

де вектор-функція

$$\Delta(t, C^0) \triangleq X^*(t) - X(t, C) \quad (2.121)$$

характеризує відхилення фактичної траєкторії руху від призначеної.

Отже, задача наближення  $X(t, C^0) \rightarrow X^*(t)$  зведена до відшукування векторів  $\delta_\mu$ , які мінімізують функціонал (2.120). Мінімум  $I(\delta)$  досягається при таких значеннях  $I(\delta_\mu^0)$  які задовольняють системі векторних рівнянь

$$\frac{\partial I(\delta)}{\partial \delta_\mu} = 0, \quad \delta_\mu^T = [\delta_{C1\mu} \delta_{C2\mu} \dots \delta_{Cn\mu}], \quad \mu = 1, 2, \dots, k. \quad (2.122)$$

Щоб отримати ці рівняння в явній формі, виконаємо диференціювання (2.120) по вектору  $\delta_\mu$ .

Тоді отримуємо

$$\int_0^T \psi_i^T(t, C^0) V [\sum_{\mu=1}^k \psi_\mu(t, C^0) \delta_\mu - \Delta(t, C^0)] dt = 0. \quad (2.123)$$

Вводячи позначення

$$P_{i\mu}(C^0, T) \triangleq \int_0^T \psi_i^T(t, C) V \psi_\mu(t, C^0) dt, \quad (2.124)$$

$$\gamma_i(C^0, T) \triangleq \int_0^T \psi_i^T(t, C^0) V \Delta(t, C^0) dt, \quad (2.125)$$

рівняння (2.123) в матричній формі прийме вигляд

$$\begin{bmatrix} p_{11}(C^0, T) \dots p_{1k}(C^0, T) \\ \dots \\ p_{k1}(C^0, T) \dots p_{kk}(C^0, T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1^0 \\ \dots \\ \delta_k^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1(C^0, T) \\ \dots \\ \gamma_k(C^0, T) \end{bmatrix}, \quad (2.126)$$

або в загальному вигляді

$$P(C^0, T)\delta_C^0 = \gamma(C^0, T). \quad (2.127)$$

Вектор  $\delta_C^0$  може бути визначений з виразу (2.127)

$$\delta_C^0 = P^{-1}(C^0, T)\gamma(C^0, T). \quad (2.128)$$

Вектор  $\delta_C^0$  досягає локальний мінімум функціоналу  $I(\delta) = I(C^0 + \delta)$  при заданому значенні  $C^0$ . Якщо скільки завгодно високий ступінь наближення

$$\min_{\delta^s} I(C^s + \delta^s) \rightarrow \min_C I(C)$$

можна отримати багатократним вирішенням рівняння

$$P(C^s, T)\delta_C^s = \gamma(C^s, T), \quad (2.129)$$

формуємо кожного разу знову для обчисленого значення матриці  $C^{s+1} = C^s + \delta^s$ ,  $s = 0, 1, \dots$ . На цьому і засновано алгоритм пошуку оптимальних параметрів закону управління.

Блок-схема алгоритму стабілізації ДПЛА на програмній траєкторії з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки (детермінований підхід) показана на рис. 2.19.

Структура алгоритму складається з послідовності приписів.

Припис 1. Інтегрувати (на один шаг) диференціальне рівняння замкнутої системи

$$\frac{dX(t, C^s)}{dt} = (A + BC^sH)X(t, C^sH)X((t, C^s), \quad X((0, C^s) + X_0$$

при даному значенні  $C^s$ .

Припис 2. Інтегрувати диференціальне рівняння еталонного руху

$$\frac{dX^*(t)}{dt} = \Gamma X^*, \quad X^*(0) = X_0$$

і обчислити вектор-функцію

$$\Delta(t, C^s) = X^*(t) - X(t, C^s)$$

на поточному шагу інтегрування.

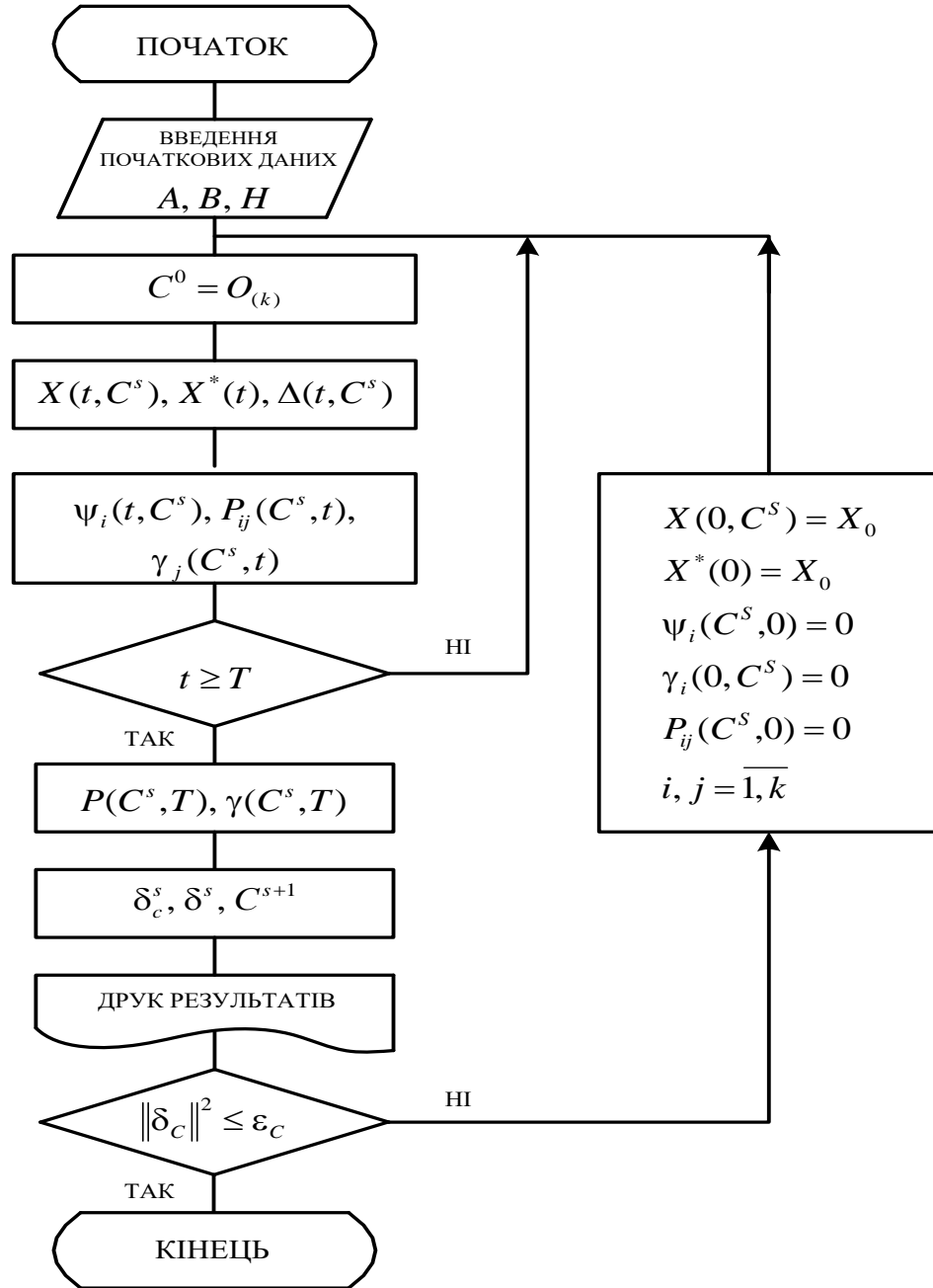


Рис. 2.19. Блок схема алгоритму стабілізації ДПЛА на програмній траєкторії з алгоритмом на основі вирішення зворотних задач динаміки (детермінований підхід)

Припис 3. Інтегрувати (на один шаг) систему матричних диференціальних рівнянь чутливості

$$\frac{d\psi_i(t, C^s)}{dt} = [A + BC^sH]\psi_i(t, C^s) + B[h_i^T X(t, C^s)]$$



$$\psi_i(0, C^s) = 0, \quad i = \overline{1, k}.$$

Припис 4. Інтегрувати (на один шаг) вирази

$$\frac{dP_{ij}(C^s, t)}{dt} = \psi_i^T(t, C^s) V \psi_j(t, C^s); \quad P_{ij}(C^s, 0) = O_i;$$

$$\frac{d\gamma(C^s, t)}{dt} = \psi_i^T(t, C^s) V \Delta(t, C^s); \quad \gamma_i(C^s, 0) = O_i, \quad i, j = \overline{1, k}$$

Припис 5. Виконати порівняння

$$\begin{array}{l} \text{якщо} \\ t - T \end{array} \left\{ \begin{array}{l} < 0 & \text{то продовжити інтегрування – перейти до припису 1;} \\ \geq 0 & \text{то закінчити інтегрування – перейти до припису 6.} \end{array} \right.$$

Припис 6. Сформувати  $(m_k, m_k)$  – матрицю

$$P(C^s, T) = \{P_{ij}(C^s, T)\}$$

і  $m_k$  мірний вектор

$$\gamma(C^s, T) = \{\gamma_i(C^s, T)\}.$$

Припис 7. Обчислити вектор-поправку параметрів

$$\delta_C^s = P^{-1}(C^s, T) \gamma(C^s, T).$$

Припис 8. Сформувати матрицю

$$\delta^s = [\delta_1^s \ \delta_2^s \ \dots \ \delta_k^s]$$

з компонентів вектору

$$\delta_C^s = \left\{ (\delta_1^s)^T \ (\delta_2^s)^T \ \dots \ (\delta_k^s)^T \right\}^T$$

і обчислити нове значення

$$C^{s+1} = C^s + \delta^s$$

матриці шуканих параметрів закону керування.

Припис 9. Вивести результати рахунку на друк

$$C^s, \delta^s, I(C^s), s \dots$$

Припис 10. Перевірити ознаку закінчення процесу оптимізації – обчислити квадрат довжини вектору

$$\|\delta_C^s\| = (\delta_C^s)^T (\delta_C^s),$$

– виконати порівняння:

$$\text{якщо } \left\{ \begin{array}{l} > 0 \\ \|\delta_C^s\| - \varepsilon_C \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{то провести черговий цикл обчислень перейти до} \\ \text{припису 11;} \\ \\ \leq 0 \quad \text{то рахунок закінчено.} \end{array}$$

Припис 11. Відновити початкові умови:

$$\begin{aligned} X(0, C^s) = X_0, \quad \psi_i(0, C^s) = 0, \quad P_{ij}(C^s, 0) = 0, \\ X^*(0) = X_0, \quad \gamma_i(C^s, 0) = 0, \quad i, j = \overline{1, k} \end{aligned}$$

Припис 12. Перейти до припису 1 на повторення циклу обчислень при черговому значенні.

Особливості отримання розрахункових співвідношень для алгоритму оптимізації і ефективність його роботи досліджуємо для ДПЛА, що описується матричним диференціальним рівнянням (лінеаризація поздовжнього руху – рівняння 2.64, 2.66, 2.68)

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0,3 & -3 & -0,1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 & 1 & 4 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}. \quad (2.130)$$

В даному випадку згідно позначенням (2.97) маємо

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0,3 & -3 & -0,1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 4 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вважаємо, що вимірюванню доступні дві перші фазові координати  $X_1$ ,  $X_2$  вектору стану. Тоді,  $k = 2$ , матриця

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

і закон керування має вигляд:

$$U(x) = CH x(t) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \\ C_{31} & C_{32} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad (2.131)$$

Для побудови алгоритму оптимізації введемо вектори

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ C_{31} \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} C_{12} \\ C_{22} \\ C_{32} \end{bmatrix}, \quad h_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad h_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

отже справедливі уявлення  $C=[C_1 \ C_2]$ ,  $H^T = [h_1^T \ h_2^T]$ .

Параметри  $C_{\nu\mu}$ ,  $\nu=1,2,3$ ;  $\mu=1,2$  будемо визначати за умовою, щоб траєкторія замкнутої системи (2.130), (2.131) в найбільш можливому ступені наближалася до траєкторії руху еталонної системи

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -3 & -3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$$

$$X_{\nu}^*(0) = X_{\nu}(0), \quad \nu=1,2,3 \quad (2.132)$$

$$X_{\nu}^*(0) = X_{\nu}(0), \quad \nu=1,2,3. \quad (2.132)$$

Відповідно до (2.98) матриця

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -3 & -3 \end{bmatrix}.$$

Перехідні процеси, що характеризують вільний рух еталонної системи (2.132), практично закінчуються за час  $T = 6 \text{ с}$ . Ця величина  $T$  приймається як верхня межа інтегрування у функціоналі, що мінімізується.

Як міру близькості  $X(t)$  і  $X^*(t)$  приймаємо функціонал (2.99), у якого матриця

$$V = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матриці функцій чутливості будуть дорівнювати

$$\Psi_1(t, C) = \left[ \frac{\partial X(t, C)}{\partial C_1} \right]_{\delta_0} = \begin{bmatrix} \Psi_{11}^1 & \Psi_{21}^1 & \Psi_{31}^1 \\ \Psi_{11}^2 & \Psi_{21}^2 & \Psi_{31}^2 \\ \Psi_{11}^3 & \Psi_{21}^3 & \Psi_{31}^3 \end{bmatrix},$$

$$C_1^T = [C_{11} \ C_{21} \ C_{31}],$$

$$\Psi_2(t, C) = \left[ \frac{\partial X(t, C)}{\partial C_2} \right]_{\delta_0} = \begin{bmatrix} \Psi_{12}^1 & \Psi_{22}^1 & \Psi_{32}^1 \\ \Psi_{12}^2 & \Psi_{22}^2 & \Psi_{32}^2 \\ \Psi_{12}^3 & \Psi_{22}^3 & \Psi_{32}^3 \end{bmatrix},$$

$$C_2^T = [C_{12} \quad C_{22} \quad C_{32}].$$

Верхній індекс  $\nu$  функцій чутливості  $\psi_{i\mu}^\nu$  указує номер координати, а нижній  $i\mu$  – номер параметра.

Наприклад  $\psi_{22}^1$  характеризує чутливість координати  $X_1$  по відношенню до зміни параметра  $C_{22}$ .

З урахуванням цього, для даної задачі

$$h_1^T X(t) = X_1(t); \quad h_2^T X(t) = X_2(t),$$

диференціальні рівняння (2.118) для матриць чутливості мають вигляд

$$\frac{d\psi_\mu(t, C^s)}{dt} = (A + BC^s H)\psi_\mu(t, C^s) + BX_\mu(t, C^s), \quad \mu = 1, 2. \quad (2.133)$$

При цьому вектор-функція  $X(t, C^s)$  є вирішення диференціального рівняння замкнутої системи

$$\frac{dX(t, C^s)}{dt} = (A + BC^s H)X(t, C^s), \quad X(0, C^s) = X_0 \quad (2.134)$$

Вектори  $\delta_1^s$ ,  $\delta_2^s$ , мінімізуючи функціонал  $I(\delta)$ , визначаються із системи рівнянь

$$P_{i1}(C^s, T)\delta_1^s + P_{i2}(C^s, T)\delta_2^s = \gamma_i(C^s, T), \quad i = 1, 2.$$

Вхідні в цю систему матриці  $P_{ij}$  і вектори  $\gamma_i$  визначаються згідно (2.124) (2.125).

Послідовно задаючись значеннями параметра циклу наближення  $s = 0, 1, 2, 3, \dots$  обчислюємо значення  $I(C^s)$ . Результати обчислень показані на рис. 2.20.

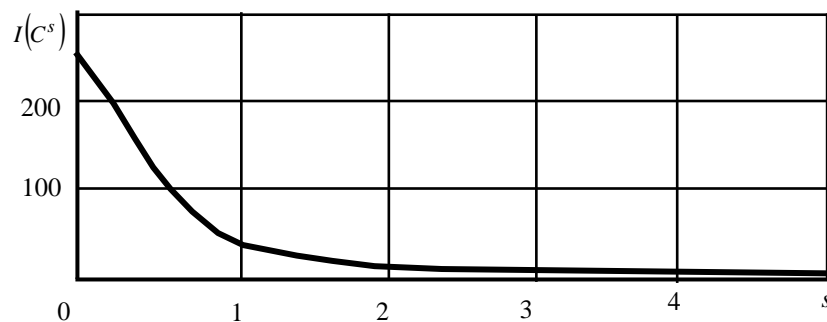


Рис. 2.20. Графік процесу оптимізації функціоналу

Можна бачити, що процес оптимізації має високу швидкість збіжності. Практично за 3 цикли наближення досягається стає значення функціонала, що мінімізується, тобто  $I(C^s) = I(C^*)$ .

Оптимальні значення параметрів, знайдені в результаті рішення даної задачі, дорівнюють

$$C = \begin{bmatrix} 0,386 & 6,308 \\ 0,009 & 1,666 \\ -0,197 & -3,672 \end{bmatrix}.$$

На закінчення слід зазначити, що достатня точність наближення  $C^s \rightarrow C^*$  може бути отримана в результаті виконання невеликого числа циклів обчислень (не більше десяти), що свідчить про високу ефективність алгоритму.

Розглянемо алгоритм стабілізації ДПЛА на програмній траєкторії в умовах впливу турбулентної атмосфери (стохастична постановка зворотної задачі динаміки).

Представимо рівняння руху багатовимірної керованої системи у вигляді

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + G\xi(t), \quad (2.135)$$

де  $U(t)$  –  $m$ -вимірний вектор керуючих функцій;  $\xi(t)$  –  $r$ -вимірний вектор випадкових збурень.

Вважаємо матриці  $A$ ,  $B$ ,  $G$  заданими. Відносно вектор-функції, припускається, що вона має такі властивості

$$M[\xi(t)] = 0, \quad M[\xi(t)\xi^T(t-\tau)] = P_\xi(t)\delta(t-\tau). \quad (2.136)$$

Матриця  $P_\xi$  розмірності  $(r, r)$  характеризує інтенсивність випадкових збурень і вважається відомою.

Рівняння вимірника має вигляд

$$Z(t) = HX(t) + \eta(t), \quad (2.137)$$

де  $\eta = (\eta_1 \dots \eta_k)^T$  – вектор випадкових похибок, що має такі властивості

$$M[\eta(t)] = 0, \quad M[\eta(t)\eta^T(t-\tau)] = P_\eta(t)\delta(t-\tau). \quad (2.138)$$

Матриця  $P_\eta$  розмірності  $(k, k)$  характеризує інтенсивність завади  $\eta(t)$ .

Вважаємо також, що процеси  $\xi(t)$  і  $\eta(t)$  статистично незалежні. Це допущення відповідає багатьом прикладним задачам.

Рівняння (2.135) розглядатимемо як модель збуреного руху. У такому випадку задача керування полягає в тому щоб утримувати систему в області початку координат

$$X(t) \rightarrow O_{(n)}.$$

Розрізнятимемо два режими керування:

- збурений за математичним очікуванням при  $M[X(t)] \neq O_{(n)}$ ,
- незбурений, у випадку  $M[X(t)] = O_{(n)}$ .

Практично режим керування можна вважати збуреним, якщо значення  $M[X(t)]$  суттєво перевищують прийнятний рівень випадкових складових координат вектору стану. Якщо має місце зворотне співвідношення, то режим керування можна вважати незбуреним.

Для забезпечення високої якості роботи система повинна мати різні динамічні характеристики, відповідні різним режимам її функціонування.

Для збуреного режиму закон керування слід синтезувати з умови здійснення призначеної траєкторії руху з точки  $M[X(0)]$  у початок координат.

У незбуреному режимі закон керування повинен забезпечувати рух керованого об'єкта в можливо меншій області початку координат.

Таким чином, параметри закону керування слід визначати за різними критеріями. Розглянемо ці питання.

Закон керування рухом даної системи приймаємо у вигляді

$$\begin{aligned} U &= CZ(t) = CHX(t) + C\eta(t), \\ M[\eta(t)] &= 0, \\ M[\eta(t)\eta^T(t)] &= P_{\eta(+)}\delta(t - \tau). \end{aligned} \quad (2.139)$$

Матриця параметрів  $C = \{C_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, k}$  підлягає визначенню.

Для збуреного за математичним очікуванням  $M[X(t)]$  режиму керування параметри  $\{C_{ij}\}$  визначаються в результаті оптимізації детермінованої системи

$$\begin{aligned} \dot{M}[X(t)] &= AM[X(t)] + BM[U(t)]; \\ M[U(t)] &= CHM[X(t)]. \end{aligned} \quad (2.140)$$

Для незбуреного (за математичним очікуванням) режиму параметри закону керування визначаються з умови, щоб дисперсії координат стану були мінімальними в кожний момент часу.

Початковою, в цьому випадку, є система стохастичних рівнянь

$$\frac{d \overset{\circ}{X}(t)}{dt} = A \overset{\circ}{X}(t) + B \overset{\circ}{U}(t) + G \xi(t); \quad (2.141)$$

$$\overset{\circ}{U}(t) = CH \overset{\circ}{X}(t) + G \eta(t). \quad (2.142)$$

Тут

$$\overset{\circ}{X}(t) = X(t) - m_X(t),$$

$$\overset{\circ}{U}(t) = U(t) - m_U(t).$$

Матричне диференціальне рівняння для матриці других центральних моментів вектору стану

$$\begin{aligned} \dot{D}(t) &= AD(t) + D(t)A^T + BCHD(t) + \\ &+ D(t)H^T C^T B^T + BCP_{\eta} C^T B^T + GP_{\xi}(t)G^T. \end{aligned} \quad (2.143)$$

Для стохастичної системи (2.141), (2.142) мінімум дисперсії вихідних координат досягається в тому, випадку, коли для кожного  $t > 0$  похідна  $\dot{D}(t, C)$  приймає екстремальне значення в просторі параметрів  $C_j$ . Це у свою чергу має місце, якщо  $C_j$  задовольняють системі рівнянь

$$\frac{\partial D(t, C)}{\partial C_j} = 0, \quad j = \overline{1, k}.$$

Параметри, що задовольняють цій умові  $|C_1^{\sigma} \dots C_k^{\sigma}| = C_{\sigma}^T$  називатимемо оптимальними.

Оптимальні значення елементів матриці параметрів закону керування задовольняють умовам

$$\frac{d}{dt}[d_{ii}(t, C)] = \min_C [d_{ii}(t, C)], \quad i = \overline{1, n}$$

Щоб знайти необхідні розрахункові співвідношення для  $C_\sigma$  слід виконати диференціювання  $d_{ii}(t, C)$  за  $C_{ij}$ .

Диференціювання діагональних елементів матриці  $D(t)$  зручно проводити, якщо ввести такі позначення

$$B = \begin{bmatrix} b_1^T \\ \vdots \\ b_n^T \end{bmatrix}; \quad C = [c_1, c_2, \dots, c_k],$$

$$H = \begin{bmatrix} h_1^T \\ \vdots \\ h_k^T \end{bmatrix}; \quad D = [d_1, d_2, \dots, d_k].$$

З урахуванням введених позначень діагональні елементи матриці  $D(t, C)$  можна диференціювати за векторами  $C_i$ , що дає систему векторних рівнянь

$$\frac{d}{dC_i} (e_i^T D e_i) = 0, \quad i = \overline{1, k} \quad (2.144)$$

де

$$e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \dots, e_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Вирішуючи рівняння (2.144) можна отримати

$$B C_\sigma P_\eta(t) + D_d(t) \cdot H^T = 0.$$

Матриця  $D_\sigma(t)$ , що входить у цей вираз визначається з диференціального рівняння (2.143) при оптимальному значенні  $C = C_\sigma$ , яке дорівнює

$$\sigma_0(t) = -(B^T B)^{-1} B^T D_\sigma(t) H^T P_\eta^{-1}(t). \quad (2.145)$$

Очевидно, що для незбуреного (за математичним очікуванням) режиму керування параметри залежать від часу. Це обумовлено двома причинами. Одна з них полягає в тому, що інтенсивність  $P_\eta(t)$  похибок вимірювання не постійна. Друга причина полягає в тому, що навіть при стаціонарному



випадковому процесі  $\eta(t)$  вектор  $C_\sigma = C_\sigma(t)$ , оскільки матриця  $D_\sigma(t)$  інших центральних моментів в перехідному процесі змінюється в часі.

Диференціальне рівняння для  $D_\sigma(t)$  можна отримати із загального рівняння (2.143), якщо підставити в нього вираз (2.145)  $C_\sigma(t)$

$$\dot{D}_\sigma(t) = AD_\sigma(t) + D_\sigma(t)A^T = RQ_\sigma(t)R^T + GP_\xi(t)G^T, \quad (2.146)$$

де позначено

$$R = B(B^T B)^{-1} B^T; \quad Q_\sigma(t) = D_\sigma(t)H^T P_\eta^{-1}(t)H D_\sigma(t);$$

$$R = R^T; \quad Q_\sigma(t) = Q_\sigma^T(t).$$

Рішення  $D_\sigma(t)$  матричного рівняння (2.146) використовується при обчисленні  $C_\sigma(t)$  за формулою (2.145). В якості початкової умови  $D_\sigma(0)$  для рівняння (2.146) можна приймати деяке апріорне значення, виходячи з допустимого рівня шумів проектованої системи, тобто питання це вирішується з урахуванням особливостей проектованої системи і умов її функціонування.

Проте, при виконанні обчислювальних процедур, можна як початкові умови прийняти  $D_\sigma(0) = 0$ . Зазвичай в практиці приймається, що випадкова функція  $\zeta(t)$  стаціонарна, тобто  $\sigma_\zeta(t) = const$ , похибки вимірювання  $\eta_i(t)$  також є стаціонарними випадковими функціями  $P_n = const$ . Стале значення  $D_\sigma(\infty) = const$ , отже згідно (2.145) оптимальне значення  $C_\sigma(\infty) = const$ .

Оцінимо ефективність алгоритму керування на основі вирішення зворотного задачі динаміки для стохастичної багатовимірної автоматичної системи.

Розглянемо лінеаризовану систему

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0,3 & -3 & -0,1 \end{bmatrix} \cdot X(t) + \begin{bmatrix} 2 & 1 & 4 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot U(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \xi(t).$$

Рівняння вимірника має вигляд

$$Z(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot X(t) + \eta(t).$$

Характеристики випадкових функцій мають вигляд

$$\sigma_{\xi}^2 = 0,01; \quad P_{\eta} = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}.$$

Для збуреного (за математичним очікуванням) режиму параметри закону керування визначені з умови наближення  $X(t)$  до вектору стану  $Y(t)$  системи

$$\dot{Y}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -3 & -3 \end{bmatrix} \cdot Y(t).$$

Як міра наближення  $X(t) \rightarrow Y(t)$  прийнятий функціонал

$$J(c) = \int_0^T [X(t, c) - Y(t)]^T V [X(t, c) - Y(t)] dt,$$

$$V = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Оптимальні параметри для збуреного режиму дорівнюють

$$\{C_{ij}^*\} = \begin{bmatrix} 0,386 & 6,308 \\ 0,009 & 1,666 \\ -0,197 & -3,672 \end{bmatrix}.$$

На рис. 2.21 приведені залежності середньоквадратичних значень  $\sigma_{ij}^{\min}(t)$ , які отримані для закону керування

$$U(x) = C_{\sigma} Z,$$

синтезованого з умови реалізації мінімальних дисперсій в кожен момент часу.

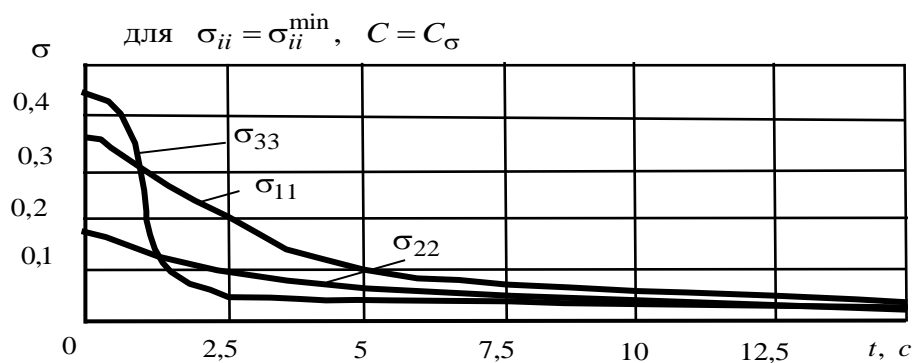


Рис. 2.21. Графік зміни середньоквадратичних значень для закону керування  $\sigma_{ij}^{\min}(t)$

Ці дані відповідають тому випадку, коли початкове значення  $D_e(0)$  у рівнянні (2.146) прийнято рівним сталому значенню матриці  $D(t)$ , отриманої для системи з параметрами  $C = C^*$ . Оптимальні значення параметрів  $C_{ij}^\sigma$  змінюються в процесі керування, тобто є функцією часу (рис. 2.22).

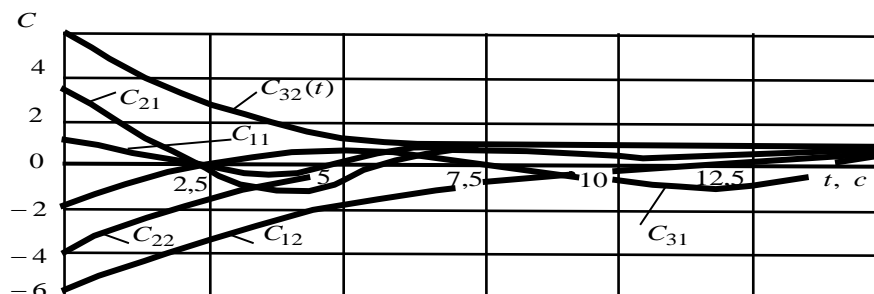


Рис. 2.22. Графік оптимальних значень параметрів  $C_{ij}^\sigma$  в процесі керування

У сталому режимі

$$\{C_{ij}^\sigma(\infty)\} = \begin{bmatrix} 0,845 & -0,116 \\ 0,557 & -0,077 \\ -0,786 & 0,199 \end{bmatrix}.$$

Траєкторія руху ДПЛА в тренажерному комплексі формується з двох контурів: внутрішнього – контури управління кутами тангажу, крену, ролування і зовнішнього – контуру управління положенням центра мас ДПЛА. Зовнішній контур визначає траєкторію руху ДПЛА, внутрішній контур забезпечує виконання команд зовнішнього контуру.

Таким чином отримано аналітичний вираз оцінювання якості процесу керування при нештатних ситуаціях на основі рішення зворотної задачі динаміки, запропоновано і обґрунтовані структури керування на тренажері із заданими динамічними властивостями для вирішення зворотних задач динаміки.

## Висновки по розділу 2

1. При визначенні характерних властивостей тренажерного комплексу, що впливає на вирішення поставленого завдання, доцільно врахувати

особливості призначення та застосування саме дистанційно пілотованих літальних апаратів. Це визначається тим, що апаратура тренажера (тренажерних комплексів) повинна відповідати функціональному призначенню ДПЛА. При цьому тенденції створення, розвитку та удосконалення тренажерних комплексів повинні відслідковувати тенденції напрямків застосування ДПЛА в сучасних умовах.

2. Апаратура тренажерного комплексу ДПЛА повинна забезпечувати відпрацьовування оператором наступних дій: забезпечення застосування ДПЛА екологічного спостереження в простих і складних метеорологічних умовах; ручний зліт і посадка (приземлення) ДПЛА (штатний або аварійний режим за командою з пункту управління); керування польотом літака за заданою програмою екологічного моніторингу з можливістю зміни польотного завдання під час виконання польотного завдання; забезпечення безпеки повітряного руху та безпеки об'єктів спостереження; можливість тренування діям в умовах виникнення надзвичайних ситуацій.

3. Проведений аналіз свідчить, що сьогодні на українські ДПЛА і БПЛА можуть бути покладені наступні завдання в інтересах національної безпеки, які потрібно відпрацьовувати на спеціалізованих тренажерах ДПЛА: підготовка даних, що стосуються терористичних груп при плануванні антитерористичних операцій (як приклад можливої перспективної системи може розглядатися система “високоточна зброя” (можливе застосування – боротьба з терористами); забезпечення заходів щодо контролю за судноплавством і недопущення браконьєрства і терористичних акцій в морській зоні.

4. Здійснено синтез математичних моделей дистанційно пілотованих літальних апаратів та визначено особливості їх параметрів. Для синтезу комплексного тренажера ДПЛА екологічного моніторингу запропонована технологія врахування аеродинамічних характеристик літака, яка передбачає три етапу: перший – врахування характеристик (параметрів) самого літака (модель датчиків первинної інформації, електроприводів органів керування)

та динаміки його руху; другий – врахування параметрів оточуючого середовища: температура, густина повітря, тиск, турбулентна атмосфера (модель Драйдена); третій – врахування особливостей льотчика-оператора ДПЛА.

5. Для синтезу тренажерного комплексу дистанційно пілотованого літального апарату екологічного моніторингу запропоновано застосувати метод зворотних задач динаміки, який передбачає послідовне виконання наступних процедур: завдання бажаної траєкторії руху ДПЛА  $X_n^0(t)$ , визначення потрібних керуючих сил  $F$  для реалізації цієї траєкторії руху та визначення керуючих функцій (відхилення органів керування) для створення таких сил  $U_n^0(t)$ . Цю технологію застосовано для синтезу програмного комплексу тренажера ДПЛА із заданими динамічними властивостями.

6. У розвитку концепцій алгоритмічного підходу – зворотних задач динаміки для функціонально-стійких бортових інформаційно-керуючих комплексів, отримано аналітичний вираз для керуючої сили. Отримано аналітичний вираз оцінювання якості процесу керування при нештатних ситуаціях з алгоритмом на основі рішення зворотної задачі динаміки, запропоновано і обґрунтовані структури алгоритму керування на тренажері із заданими динамічними властивостями на основі вирішення зворотних задач динаміки. Отримано алгоритм керування в стохастичній постановці при стабілізації ДПЛА на оперативно програмованій траєкторії (потрібної траєкторії для здійснення екологічного моніторингу) на основі рішення зворотної задачі динаміки, що забезпечує мінімум дисперсії вихідних координат. Структурна схема алгоритму представлено на рис. 2.9. Структурні схеми системи керування кутами тангажу, крену, ристання представлено на рис. 2.16 – 2.18.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ТРЕНАЖЕРІ ДПЛА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

#### 3.1. Технологія інтелектуального розвантаження оператора тренажера ДПЛА при проведенні екологічного спостереження об'єктів критичної інфраструктури

Інтелектуальне розвантаження оператора тренажера ДПЛА здійснюється шляхом підтримки прийняття рішень при проведенні екологічного спостереження об'єктів щодо завдань екологічного моніторингу. Ці рішення стосуються як вибору траєкторії руху, так й порядку застосування спеціалізованого обладнання екологічного моніторингу.

Відомо, що “підтримка прийняття рішення” не є новим терміном у світовій науці. Під ним розуміється реалізація останніх досягнень інформатики, а також програмного забезпечення з імітації розумових процесів людського мозку. Однак перш ніж стати предметом тренажерних моніторингових екологічних розробок, проблема створення системи підтримки прийняття рішення пройшла майже 30-річний шлях розвитку в рамках фундаментальних міждисциплінарних досліджень з використанням досягнень математики, логіки, психології, лінгвістики й інших наук.

Термін “підтримка прийняття рішення” в США запропонував ще у 1956 році професор Массачусетського технологічного інституту Дж. Маккарті на зустрічі в Дартмутському коледжі (штат Нью-Гемпшир) видатних американських фахівців в галузі наук, пов'язаних з теорією і практикою дослідження обчислювальних процесів. У 60-і роки питаннями підтримки прийняття рішення займалися відомі в США центри науки, провідними з яких стали Массачусетський технологічний інститут і університети - Карнегі-Меллонський і Стенфордський.

До галузі підтримки прийняття рішення в даний час прийнято відносити ряд проблем, пов'язаних з рішенням машинними засобами неформально-логічних евристичних задач, з переробкою символічної інформації.

На відміну від звичайних інформаційно-пошукових систем в експертній передбачено пояснення вироблених рекомендацій і надається пропозиція альтернативних рішень у процесі діалогу з оператором. Діалог ведеться на близькій до суспільної професійній мові фахівця-оператора без участі програміста.

Основною проблемою при реалізації експертних систем є створення нового типу програмного забезпечення, що включає дві основні підсистеми бази знань і механізм формування логічних висновків.

Створення підсистеми бази знань (Knowledge base) – ключова задача нових програмних засобів щодо представлення неформального людського досвіду у формалізованому виді. Вона визначає структуру експертної системи. Перехід від бази даних інформаційних систем, що беруть участь, до баз знань майбутніх автоматизованих комплексів являє собою одну з основних проблем при створенні перспективних засобів підтримки прийняття рішення.

Вже впроваджено експертні системи забезпечувального характеру, які дозволяють аналізувати в реальному масштабі часу обстановку, що значною мірою піддається формалізації: побудовані на базах знань комплекси автоматизованого контролю складних технічних систем, засоби дешифрування даних розвідки, системи накопичення даних і синтезу обстановки і т.п.

Основними тенденціями, що характеризують кількісні і якісні сторони діяльності оператора ДПЛА екологічного моніторингу в реальному польоті є: ріст числа операцій з органами керування літаком і спеціальним обладнанням; зниження працездатності на найбільш складних етапах екологічного моніторингу; збільшення потоку інформації, що підлягає обробці (аналізу); скорочення часу на прийняття рішень (слід швидше

аналізувати ситуацію, що створилася, і миттєво приймати рішення, що відповідає її розвитку).

Аналіз можливих механізмів прийняття рішень оператором тренажера ДПЛА екологічного моніторингу передбачає вибір відповідного функціоналу якості. Відомо, що про пошук найкращого (оптимального) рішення можна говорити тільки в сенсі цілком визначеного конкретного виду цього функціонала. При цьому спектр можливих видів і форм побудови функціонала практично безмежний.

Фактично для класу розглядаємих завдань екологічного спостереження, з урахуванням об'єкта дослідження і застосовуваних методів дослідження, більше підійшла б назва “теорія вибору”, введена Айзерманом. Але так уже вийшло, що за ним закріпилася назва “теорія прийняття рішень”.

При вивченні процесу прийняття рішень спостерігається два полярних підходи: раціональний і психологічний [22, 24, 27].

Перший бере свій початок від дослідження операцій і практично не враховує психологічних, особистісних характеристик і можливостей особи, яка приймає рішення (ОПР), – оператор тренажера. Другий вивчає, як вибирає рішення ОПР, які його можливості й особливості при цьому, навіть якщо він діє не зовсім раціонально. Обидва підходи важливі, їхнє зближення – залог прогресу у вивченні процесів прийняття рішень.

Сучасна теорія прийняття рішень займає проміжне положення між цими підходами – у ній використовуються обидва початки. Розроблювальні процедури ухвалення рішення допомагають ОПР здійснювати вибір, забезпечуючи логічність, несуперечність, ефективність вибору.

Для всіх альтернативних рішень припускають наявність деякої кількості показників якості (ПЯ), що іноді називають функціями корисності, критеріями ефективності, критеріальними оцінками та ін.

Пошук ефективного рішення має на увазі прагнення в пошуку екстремуму (для визначеності до мінімізації) значень ПЯ. До такої схеми



можна привести абсолютну більшість задач прийняття рішень при екологічному спостереженні.

Ефективна альтернатива не може бути поліпшена по жодному з ПЯ без погіршення тих ПЯ, що залишилися. Для випадку з двома ПЯ  $R_1$  і  $R_2$ , при прийнятих допущеннях парето-область являє собою граничну ділянку  $a$ , в компактної множини можливих альтернатив  $X$  (рис.3.1).

Власне принципові особливості багатокритеріальної оптимізації виявляються у виборі методів виділення ефективного рішення  $X^*$  в середині області  $X_e$ .

Потужність множини ефективних альтернатив  $|X_e|$  залежить від конфігурації  $X$

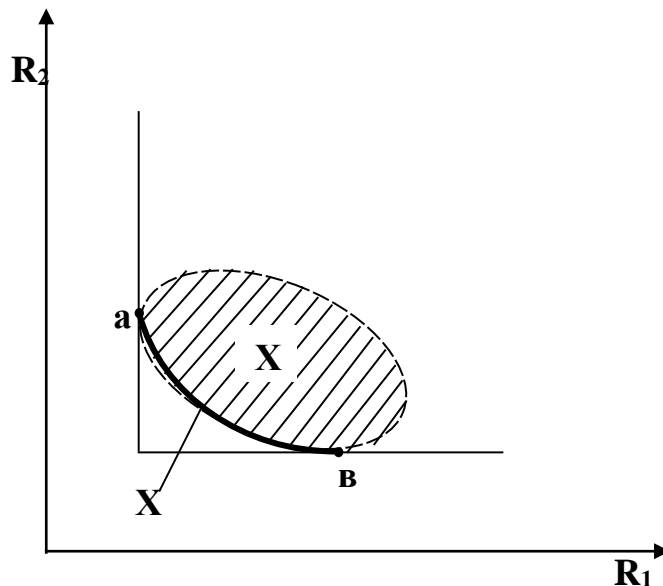


Рис.3.1. Гранична ділянка  $a$ , в компактної множини можливих альтернатив  $X$

$$|X_e| = N \cdot \sum_{l=0}^{N-1} (-1)^l \cdot \frac{\binom{l}{N-1}}{(l+1)^m},$$

де  $N = |X|$  – потужність множини аналізованих альтернатив,  $m$  – число критеріальних показників,  $\binom{l}{N-1}$  – число сполучень з  $N-1$  за  $l$ .

Виділяють два основних підходи до рішення багатокритеріальних задач [40-44].

Перший підхід спрямований на виділення звужувальної послідовності підмножин альтернатив, що спираються на принцип Парето або лексикографічні методи [37, 38]. Як правило, отут виникають труднощі великої розмірності множини Парето і його подальшого звуження домагаються інтуїтивно обґрунтованими (але недостатньо доказовими) методами, що мають меншу переконливість, чим сам принцип Парето.

Другий підхід заснований на побудові результуючого відношення переваги за всією множиною  $X$ . Цей підхід має на увазі введення згортки приватних цільових функцій. Вирішальне значення тут має обґрунтованість форми згортки. Ефективні рішення знаходяться в результаті встановлення порядку на множині альтернатив  $X$  за допомогою цільової функції  $F=F(\lambda, R(x))$ , де  $\lambda$  –  $K$ -мірний вектор вагових коефіцієнтів,  $R(x)$ ,  $K$ -мірна вектор-функція ПЯ.

Для порівнянності ПЯ різної природи часткові ПЯ  $R_j(x)$ ,  $j=\overline{1, K}$  звичайно нормалізують. Існує багато способів нормалізації, досить загальні вираження представлені в [37,38]:

– при відомому  $\max_{x \in X} R_j(x)$

$$R_j^*(x) = R_j(x) / \max_{x \in X} R_j(x) \quad (3.1)$$

$$R_j^*(x) = [\max_{x \in X} R_j(x) - R_j(x)] / \max_{x \in X} R_j(x) \quad (3.2)$$

– якщо відомий і  $\min_{x \in X} R_j(x)$

$$R_j^*(x) = [\max_{x \in X} R_j(x) - R_j(x)] / [\max_{x \in X} R_j(x) - \min_{x \in X} R_j(x)] \quad (3.3)$$

$$R_j^*(x) = [R_j(x) - \min_{x \in X} R_j(x)] / [\max_{x \in X} R_j(x) - \min_{x \in X} R_j(x)] \quad (3.4)$$

Вирази (3.1-3.4) використовуються для детермінованих значень ПЯ. При стохастичному характері ПЯ використовуються відповідні характеристики закону розподілу (для нормального закону – нормалізація осереднення:

$$R_j^*(x) = [R_j(x) - \overline{R_j(x)}] / \sigma_{f_j(x)},$$

де  $\overline{R_j(x)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_j(x_j)$ ;  $n$  – число альтернатив (потужність множини  $X$ );

$$\sigma_{f_j(x)}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [R_j(x) - \overline{R_j(x)}]^2.$$

Для оцінки якості нормалізації вводиться показник  $\eta$ , що має смисл повноти використання діапазону зміни ПЯ

$$\eta_j = 1 + \min_{x \in X} R_j^*(x) - \max_{x \in X} R_j^*(x), J = \overline{1, K},$$

де  $R_j^*(x)$  - нормалізований  $j$ -й ПЯ для альтернативи  $X$ .

При більш повному використанні діапазону значення  $\eta$  буде ближче до 1,  $\eta \in [0;1]$

Зручна геометрична інтерпретація (рис. 3.2) процедури відшукування ефективного альтернативного рішення виходить при введенні плоскої  $K$ -мірної полярної

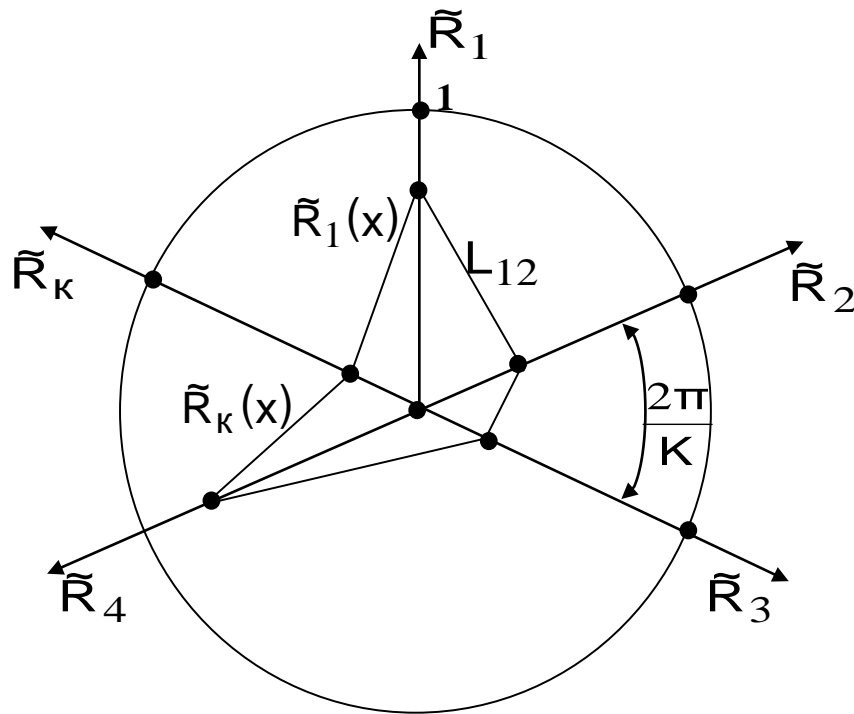


Рис. 3.2.  $K$ -мірна полярна система координат

системи координат. Кут між вісями складає  $\frac{2\pi}{K}$ . На  $j$  осі відкладається зважене нормалізоване значення ПЯ  $\tilde{R}_j$ . При прагненні до мінімізації ПЯ ідеальній гіпотетичній альтернативі буде відповідати точка – початок

координат. Ефективній альтернативі буде відповідати багатокутник найменшої площі  $S(x)$  або периметра  $P(x)$ :

$$x^* = \arg \min_{x \in X} S(x), x^* = \arg \min_{x \in X} P(x)$$

Сторона  $l_{ij}$  багатокутника визначиться по теоремі косинусів:

$$l_{ij} = \left[ \tilde{R}_j^2 + \tilde{R}_i^2 - 2\tilde{R}_j \cdot \tilde{R}_i \cdot \cos \frac{2\pi}{K} \right]^{1/2},$$

тоді периметр

$$P(x) = l_{1K} + \sum_{i=1}^{K-1} l_{i,i+1}$$

Можна ввести поняття погодженості значень ПЯ, вважаючи (при виборі ефективної альтернативи із Парето-оптимальної множини) більш прийнятною альтернативу з меншим зміщенням центра ваги багатокутника від початку координат. Інакше, ми прагнемо вибрати з ефективної Парето-множини альтернативи – багатокутників найбільш наближених до правильного багатокутника. Тоді погодженість значень ПЯ можна визначити:

$$K_c(X) = 1 - \frac{1}{K} \left\{ \sum_{i=1}^K \cos \left[ \frac{2\pi}{K} (i-2) \right] \cdot \sum_{j=1}^L \tilde{R}_j \cdot \tilde{R}_{L-j} \right\}^{1/2} \quad (3.5)$$

У (3.5) можна помітити, що  $K_c$  визначається величиною оцінки кореляції ПЯ. При  $\tilde{R}_j = const$ ,  $J = 1, K$  – (бажаний варіант):

$$K_c(X) = 1 - \frac{(const)^2}{K} \sum_{i=1}^K \cos \frac{2\pi}{K} (i-2) \equiv 1.$$

Представлена інтерпретація дозволяє організувати пошук ефективних альтернатив шляхом послідовного зменшення радіуса окружності  $\rho$  в який вписаний багатокутник. Нехай  $x_\rho \in X$  не порожня підмножина альтернатив, що задовольняють умові  $x_\rho = \{x \in X \mid \tilde{R}_j \leq 1, J = \overline{1, K}\}$ .

Послідовне звуження окружності дозволить проводити відсікання підмножини ефективних альтернатив. Рішення при цьому визначиться як

$$X^* = \arg \min_{x \in X} \rho.$$

Таким чином, ефективні альтернативи будуть представлені багатокутниками, що лежать у кулі мінімально можливого радіуса. Фактично, пошук рішення буде зводитися до мінімаксної процедури пошуку

$$\rho = \min_{x \in X} \max_{j=1, K} \tilde{R}_j$$

Забезпечення однакових мінімальних зважених відносних втрат за всіма критеріями одночасно [39] може бути здійснено з використанням функції відносних втрат

$$\omega_v(s) = \frac{R_v(s) - R_v^o}{R_v^m - R_v^o}, \quad v = \overline{1, M},$$

де  $R^m$  и  $R^o$  максимальне і мінімальне значення ПЯ.

Для того, щоб при заданому  $\bar{\lambda}_v$  варіант рішення  $s'$  з  $\omega_v(s') \neq 0$  був ефективним, необхідно і достатньо, щоб він був єдиним рішенням системи нерівностей  $\lambda_v \omega_v(s) \leq R'_v$  при мінімальному  $R'_v$  при якій ця система ще сумісна (з точністю до малого  $\epsilon$ ).

У [30, 32, 39] показано, що при введенні деякої системи аксіом завжди існує єдина, з точністю до лінійного перетворення, функція корисності, що враховує всю повноту зв'язків між ПЯ.

$$F = \sum_{i=1}^K \tilde{R}_i + \lambda \sum_{i=1}^K \sum_{j>i} \tilde{R}_i \cdot \tilde{R}_j + \lambda^{K-1} \tilde{R}_1 \cdot \tilde{R}_2 \cdot \dots \cdot \tilde{R}_K, \quad (3.7)$$

де  $\lambda = const > -1$ ;  $\tilde{R}_j(x) \geq 0$ ,  $J = \overline{1, K}$ ,  $x \in X$  – зважені нормалізовані значення ПЯ,

$$\lambda_j - \text{вага } j\text{-го ПЯ}; \quad \sum_{j=1}^K \lambda_j = 1.$$

Частковим випадком функції (3.7) є адитивна цільова функція

$$F = \sum_{j=1}^K \tilde{R}_j(x), \quad x \in X. \quad (3.8)$$

Цільову функцію вигляду (3.8) доцільне застосовувати в умовах незалежності за корисністю ПЯ, що реально має місце в умовах з екологічного спостереження.

### **3.2. Формалізація задачі побудови оператором оптимальних маршрутів руху ДПЛА для проведення екологічного спостереження декількох об'єктів в одному польоті**

Основним бажаним результатом екологічного спостереження на тренажері ДПЛА є здійснення спостереження визначених декількох об'єктів спостереження з максимальною достовірністю.

Сутність завдання спостереження декількох об'єктів (об'єктів критичної інфраструктури) може бути формалізовано наступним чином: з наявної сукупності об'єктів спостереження (цілей) необхідно виділити послідовність (відповідно маршрут обстеження) з максимальною достовірністю отримання моніторингової інформації за мінімальний час, з мінімальними витратами, з безпекою для навколишнього середовища. Таким чином, ця задача істотно і принципово багатокритеріальна.

Одним з підходів щодо вирішення цієї задачі є однокритеріальна постановка. Цей підхід передбачає переклад частини критеріїв у розряд обмежень: “достовірність здійснення спостереження не нижче заданої”, чітке призначення умов застосування ДПЛА (висота, дальність, кути пілотування), призначення фіксованих пар “засоби спостереження–об'єкт” і т.п. Проведений аналіз свідчить, що схема: “виділяємо головне, інше в обмеження” є негнучкою, не показує різноманіття бажань оператора тренажера, відтінків його переваг. Чіткі вимоги виконання обмежень можуть відвести від прийнятних рішень, що вимагають їх незначного порушення, на яке безумовно пішов би кваліфікований оператор тренажера ДПЛА.

Правомочність вибору набору часткових критеріїв ефективності (ЧКЕ) підтверджується тим, що вона повною мірою відповідає вимогам, пропонованим до структури критеріїв у багатокритеріальній задачі прийняття рішень.

Приведену структуру критеріїв можна було б залишити без змін, якби вирішувалося завдання спостереження одного об'єкта. Досвід експертів щодо

виявлення переваг при рішенні задачі спостереження декільких об'єктів (ЗСДО) на конкретних прикладах засвідчив, що сукупність критеріїв “ефективність” і “вартість” екологічного спостереження доцільно представляти об'єднаним критерієм. Надалі ми збережемо за цим об'єднаним критерієм назву “результат” (щоб не користуватися громіздкими визначеннями типу сукупний результат), оскільки саме такий семантичний зміст у цей узагальнений критерій вкладає оператор тренажера ДПЛА екологічного спостереження.

Необхідність згортки критеріїв  $R^1$  і  $R^2$  з'являється тому, що при моніторингу декількох об'єктів необхідно порівнювати узагальнений результат, отриманий групою ДПЛА екологічного спостереження. Якщо брати тільки результат, без розгляду факторів, що залишилися,  $R^3$  і  $R^4$ , то різні альтернативи повинні бути порівнянні.

Для репрезентативності вибірки критеріїв пропонується (узагальнений) критерій “результат” повинний містити в собі поняття як ефективності, так і економічності виконання завдань екологічного спостереження. При цьому чисельне значення критерію “вартість” вже не буде звично зрозумілим ОПР, як наприклад чисельне значення в сенсі визначення економічного показника, кошторису. Але ця обставина, хоча і є бажаною, не є принциповою. Суттєвим повинно бути таке формальне представлення критерію, щоб видавані їм чисельні порівняльні оцінки варіантів збігалися з думкою ОПР за шкалою порядку – ”гірше”.

### **3.3. Синтез алгоритмів системи директорного керування для оператора ДПЛА екологічного спостереження**

Рішення ЗСДО у цілому передбачає необхідність рішення приватних задач. Блокова структура математичної моделі легко дозволяє декомпонувати загальну модель ЗСДО для відпрацювання її елементів. Розглянемо конкретні методи рішення основних приватних задач.

*Вибір маршруту польоту ДПЛА екологічного спостереження при різномірному комплекті апаратури спостереження.*

Завдання вибору маршруту треба розуміти в широкому змісті, не тільки як визначення траєкторії польоту ДПЛА, але і виділення з загальної групи цілей об'єктів моніторингу, котрі будуть обстежені, визначення способу обльоту кожного з об'єктів, визначення безпеки цього маршруту і можливості ефективного застосування моніторингової апаратури.

Як зміниться алгоритм вибору маршруту при наявності на борту ДПЛА різномірної моніторингової апаратури? Якщо об'єкти моніторингу призначені заздалегідь, на траєкторії польоту ДПЛА фіксуються проміжні точки польоту, обов'язкові для застосування спеціальної апаратури.

При побудові загального алгоритму, що враховує можливості застосування декількох різномірних типів систем спостереження (моніторингове обладнання) з істотно різними фізичними характеристиками (теле-, тепло-, радіо-, спектро- візирне обладнання) задача суттєво ускладнюється.

Застосування деяких типів апаратури спостереження викликає необхідність утримання ДПЛА на практично прямолінійній траєкторії (неприпустимі енергетичні маневри і вихід за межі зони огляду об'єкта спостереження).

Стосовно до вибору маршруту польоту, нас, насамперед, будуть цікавити взаємні розташування об'єкта спостереження та ДПЛА, а також обмеження, що накладаються на політ ЛА після застосування апаратури спостереження.

При виборі маршруту варто розрізняти дві ситуації.

1. Об'єкти критичної інфраструктури, призначені для моніторингу, виділені заздалегідь та визначена відповідна апаратуру спостереження.

2. Для об'єктів спостереження заздалегідь не визначено апаратуру спостереження і вибір пар “апаратура спостереження” – “об'єкт” відбувається оперативно в ході вибору маршруту.



Завдання вибору маршруту треба розуміти в широкому змісті, не тільки як визначення траєкторії польоту ДПЛА, але і виділення з загальної групи об'єктів моніторингу тих, які будуть спостережені, визначення способу обльоту (вид маневру) кожного з об'єктів, визначення реалізації цього маршруту і можливості ефективного і безпечного застосування апаратури спостереження.

У цьому випадку на електронній мапі місцевості (імітатор візуальної обстановки) фіксуються проміжні точки польоту (об'єкти), обов'язкові для застосування апаратури моніторингового спостереження.

Щодо визначеного для спостереження об'єкту, за напрямком польоту, виділяється зона підготовки апаратури до включення, що буде “обов'язковою для відвідування” у ході польоту при реалізації програмного маршруту польоту (визначено на основі вирішення зворотних задач динаміки).

Математичне рішення задачі у випадку коли об'єкти моніторингу заздалегідь не визначені вимагає вибору оптимального варіанта з усієї сукупності можливих варіантів – траєкторій обльоту об'єкта.

Для контролю дієвості розроблених траєкторій обльоту об'єкта пропонується алгоритм прямого перебору варіантів, що полягає в наступному.

1. Формуються всі можливі (припустимі) варіанти  $H_i$  обльоту об'єкту спостереження.

2. Для кожного варіанта визначається відповідна апаратура екологічного моніторингу  $G_l = \{g_1, g_2, \dots, g_l\}$ ,  $l$  – число систем спостереження. Для варіанта  $H_i$  не обов'язково всі  $l$  призначених систем. З деякого номера  $k$  призначення можуть бути фіктивними  $g_j = \theta$ ,  $J = \overline{k, l}$ .

3. Кожне призначення з  $G(l) \times H(q)$  оцінюється значенням функціонала ефективності  $f_{q,i}$ , Матриця  $F$  є матриця оцінок конкретного варіанта польоту ДПЛА з конкретним призначенням засобів моніторингу на визначені об'єкти моніторингу цілі  $F = \{f_{i,j}\}_{q \times i}$ .

4. Екстремальний елемент матриці  $F$  своїми індексами визначить варіант польоту об'єкту моніторингу, що рекомендується:

$$\text{extr } f = \max / \min (f_{ij}), \quad I = 1, q, J = 1, l$$

Загальне число оцінюваних варіантів буде визначатися добутком загальної кількості варіантів польоту на кількість елементарних розбивок апаратури спостереження  $q \cdot l$ . Це число буде визначати безліч оцінюваних варіантів – кількість елементів  $f_{ij}$  матриці  $F$ .

Метод формування траєкторії польоту припускає попереднє, до того як буде сформований маршрут польоту, визначення об'єктів спостереження за яким буде застосована апаратура спостереження. Далі формується маршрут польоту до об'єкта моніторингу та його польоту. Таке рішення не є оптимальним у строгому змісті, але проведений порівняльний аналіз вибору маршрутів спостереження типових груп об'єктів моніторингу показав цілком прийнятну працездатність методу і його безумовну перевагу в необхідному обсязі обчислень на тренажері ДПЛА [40-44].

Переваги запропонованого методу формування траєкторії польоту на тренажері обумовлена наступними обставинами.

Призначення траєкторії польоту здійснюється з розумінням “результат”. Засоби спостереження (апаратура моніторингу) призначаються для здійснення екологічного моніторингу найбільш критичних (екологічно небезпечних) об'єктів, а при відносній рівноцінності об'єктів за найбільш зручним щодо використання моніторингового обладнання.

Можливі розходження у формуванні маршрутів польоту як правило не приводять до істотних відхилень величини критеріальної функції від оптимуму. При компактному розташуванні об'єктів моніторингу, тобто коли середня відстань між об'єктами в кілька разів менше довжини зони можливих зон спостереження апаратури, практично весь маршрут польоту ДПЛА може бути розміщений усередині зони визначеного польоту і вибір

шляху в цьому випадку суттєво спрощується, тому що при цьому практично не зустрічаються заборонені для польоту зони.

Програмний комплекс розробки маршруту і польотних завдань на тренажері ДПЛА наведено у Додатку В.

Після того як завершено процес виділення об'єктів, призначених для моніторингу, і за ними розподілений комплект апаратури спостереження необхідне здійснити синтез програмного (директорного) траєкторного керування ДПЛА у фазовому просторі. Результатом рішення задачі спостереження декількох об'єктів (ЗСДО) на тренажері є директорне керування ДПЛА в одній з двох форм:

1. На програмному дисплеї імітатора візуальної обстановки тренажера відображаються положення органів керування: програмні та реальні. При тренуванні на тренажері завдання оператора полягає у відхиленні органів керування (кермо) ДПЛА таким чином, щоб усунути (ліквідувати) різницю в положеннях програмного та реального органів керування. Включення бортового обладнання моніторингу у визначений час здійснюється натисканням на кнопку включення відповідної апаратури за відповідним сигналом.

Цю форму директорного керування ДПЛА доцільне застосовувати на начальному етапі (первинна підготовка) підготовки оператора ДПЛА екологічного спостереження.

2. В імітаторі пілотажно-навігаційної системи тренажера відображаються задані (програмні) параметри траєкторії руху та час включення (застосування) моніторингової апаратури. Форма візуалізації може відповідати візуалізації директорного керування в пілотажно-навігаційних комплексах сучасних літальних апаратів. При тренуванні на тренажері завдання оператора полягає у відхиленні органів керування (кермо) ДПЛА таким чином, щоб усунути (ліквідувати) різницю в положеннях програмного та реального положень (відхилень) траєкторних параметрів руху. Включення бортового обладнання моніторингу у визначений час також

здійснюється натисканням на кнопку включення відповідної апаратури за відповідним сигналом.

Цю форму директорного керування ДПЛА доцільне застосовувати на етапі удосконалення навичків оператора ДПЛА екологічного спостереження.

Програмне керування, яке представлено в іміторі пілотажно-навігаційного обладнання, сформовано у вигляді директорних сигналів для льотчика.

Загальновідомі способи застосування ДПЛА при здійсненні моніторингу екологічних об'єктів з горизонтального польоту, з пікірування, з кабрирування, з розвороту і деякі інші.

Вибір траєкторії спостереження декількох об'єктів доцільно проводити одночасно з вибором вертикального профілю польоту. Для оперативного синтезу профілю траєкторії спостереження обраних об'єктів використаний метод зворотних задач динаміки з послідовною деформацією траєкторії ДПЛА. Суть методу полягає в наступному.

Припустимо, що мається деяка опорна траєкторія польоту ДПЛА, побудована виходячи з яких-небудь (доцільних, розумових) припущень.

Траєкторія може бути прийнята в якості опорної, якщо вона задовольняє заданим вимогам (ДПЛА в стані відробити цю траєкторію без порушення безпеки польоту, припустимих перевантажень), безпеки і забезпечення умов застосування апаратури спостереження.

Приймаючи в увагу складність визначення чисельних значень приватних критеріїв, можна обмежитися спрощеним розрахунком критеріїв “результат” і “безпека”.

Траєкторію можна вважати реалізованою  $T \in T_{оп}$ , якщо мається можливість рішення термінальної задачі щодо переведення ДПЛА з положення  $T_i$  в положення  $T_{i+1}$  з керуваннями в межах припустимих. З огляду на кількість фазових координат, за якими варто забезпечити рішення термінальної задачі, синтез керувань представляє самостійну задачу. Цьому питанню присвячена безліч робіт як у загальній постановці рішення задач

керування кінцевим станом динамічних систем, так і в спеціальній постановці, наприклад переведення ЛА і повітряно-космічних літальних апаратів у заданий кінцевий стан [44-44, 105-108].

Траєкторію польоту ДПЛА екологічного спостереження визначає матриця термінальних умов  $T$ :

$$T = (T_1, \dots, T_n) = \begin{pmatrix} V_1, \dots & \dots & V_n \\ \theta_1, \dots & \dots & \theta_n \\ \varphi_1, \dots & \dots & \varphi_n \\ X_1, \dots & \dots & X_n \\ H_1, \dots & \dots & H_n \\ Z_1, \dots & \dots & Z_n \end{pmatrix}.$$

Кожний стовпець цієї матриці може розглядатися як вектор термінальних умов у 6-ти мірному фазовому просторі. Цей вектор визначає необхідне положення ДПЛА в момент застосування апаратури спостереження (початку включення) апаратури моніторингу.

У перелік варійованих параметрів можна було б включити і швидкість ДПЛА в момент спостереження, але аналіз безлічі проведених реалізацій при моделюванні різноманітних ситуацій показав недоцільність спеціального керування швидкістю на траєкторії екологічного спостереження.

З огляду на вищесказане, синтез просторової траєкторії екологічного моніторингу і керувань ДПЛА можна здійснювати за наступною схемою.

1. Для кожної апаратури спостереження, призначеної для спостереження  $i$ -го об'єкту, визначаємо балістичне віднесення  $A_i$  (задача балістики) і визначаємо дозволені умови застосування, – припустимий діапазон зміни складових вектора  $T$ :

$$\forall_i : A_i = A_i(V_i, \theta_i, H_i, CP_i), T_{i\text{дон}} \in \{T_{i\text{min}}, T_{i\text{max}}\}.$$

Тут у першому наближенні беремо  $V=V_T$ ,  $\theta=0$ ,  $H=H_T$  (індекс “ $T$ ”- поточне значення).

2. Визначаємо перше наближення матриці  $T$ .  $T_i = (V_i, \theta_i, X_i, H_i, Z_i, \dots)^T$ .  $i$ -й стовпець: – швидкість ( $V_i=V_T$ ), висота ( $H_i=H_T$ ), – кут нахилу траєкторії  $\theta=0$

кут курсу  $\varphi = \varphi_{i,i+1}$  кут курсу ребра з'єднуючого суміжні цілі  $(i,i+1)$  у маршруті екологічного спостереження, координати положення  $X_i = X_{ui} - A_i \sin \varphi_i, \varepsilon_i = \varepsilon_{ui} - A_i \cos \varphi_i$ .

3. За сукупністю координат  $X_i, \varepsilon_i, i = 1, n$ , будуємо горизонтальний сплайн і на підставі аналізу сплайн-траєкторії одержуємо  $n_{\text{гориз.}}$  при  $n_{\text{гориз.}} > n_{\text{у доп}}$  траєкторію вважаємо нереалізованою. Формується ознака заборони на цей маршрут і повторюється процедура вибору маршруту.

4. Робимо варіації висоти  $H_i$  і кута нахилу траєкторії  $\theta_i$  (деформації) з метою пошуку екстремуму обраного показника якості  $F = \text{extr} \left( \sum_{i=1}^n F_i(H_i, \theta_i) \right)$ .

5. Для змінених  $H_i$  и  $\theta_i$  визначаємо,  $A_i = A_i(V_i, \theta_i, H_i, СП_i)$

6. Визначаємо дальність застосування засобів спостереження:  $D_i = \sqrt{x_i^2 + z_i^2}$ ;  $x_i$  і  $z_i$  визначаються як у п. 2 (з новим  $A_i$ ).

7. За сукупністю координат  $D_i, H_i, i = \overline{1, n}$ , будуємо вертикальний сплайн і на підставі аналізу сплайна одержуємо  $n_{\text{у верт.}}$ . При  $(n_{\text{у верт.}} + n_{\text{у горизонт.}}) > n_{\text{у доп.}}$ , траєкторія нереалізована.

8. Формуємо матрицю  $T(T_i \in T_{i \text{ доп.}})$ . Розглядаючи кожен вектор  $T_i$  як термінальну крапку в 6-ти мірному просторі, здійснюємо синтез керувань ДПЛА.

У п. 4 пошук екстремума  $F$  можна проводити будь-як способом, але в силу щодо невеликого числа об'єктів моніторингу,  $n=3..6$ , допустимо метод повного перебору.

### 3.4. Реалізація алгоритму системи директорного керування на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу

Підсумком рішення задачі спостереження декільких об'єктів є формування сигналів керування ДПЛА з метою забезпечення його виведення

в точки фазового простору, де може бути успішно застосована апаратура екологічного моніторингу за кожним з визначених об'єктів екологічного спостереження. Після того як сформована  $6 \times n$  матриця термінальних умов  $T$ , кожний з векторів  $T_i$  розглядається як задані координати, які необхідно відпрацювати на тренажері ДПЛА екологічного спостереження.

Задача відноситься до класу задач керування кінцевим станом. Звичайно такі задачі розглядаються у варіаційній постановці з вимогою досягнення граничних (крайових, термінальних) умов, задоволення обмежень, що накладаються, і досягнення деякому функціоналу якості процесу екстремального значення.

В принципі, розглянутий підхід до рішення задачі екологічного спостереження декільких об'єктів не критичний до способу формування керувань, та й допускає застосування кожного з працездатних і прийнятних для практичної реалізації існуючих методів. Проте, нами був розроблений новий спеціальний метод зустрічних рухів [68, 69, 71, 73, 74], більш придатний до реалізації у програмному забезпеченні тренажера ДПЛА екологічного моніторингу.

Цей метод дозволяє одержати квазіоптимальне за швидкістю рішення поставленої задачі. Використання його при гарантованому виконанні граничних умов, якщо вони досяжні в межах припустимих, керувань, дозволяє знайти рішення задачі з порівняно малими обчислювальними витратами. При цьому передбачається, що на фазові координати і керування накладені обмеження, а визначення керувань проводиться в класі кусочно-постійних функцій.

До переваг методу можна віднести.

Задача керування ставиться в не оптимізаційній (у глобальному змісті) постановці, що дозволяє здійснювати покроковий пошук керувань зручний для роботи в системах реального часу.

Суть методу полягає у наступному.

Розглядається динамічна система руху літального апарата (ДПЛА) виду:

$$\dot{y} = f(y, u) \quad (3.10)$$

де  $y = \{V, \theta, x, h, z\}^T$ ;  $z, h, z$  – координати положення ДПЛА;  $\theta, \varphi$  кути нахилу траєкторії і шляхи,  $V$  – модуль вектора швидкості.

Задано граничні умови:  $y_0 = y(t_0)$  – вектор початкових умов,  $y_K = y(t_K)$  – вектор кінцевого стану, у загальному випадку  $t$  не фіксовано. Потрібно синтезувати керування  $u$ , що переводять систему з  $y_0$  в  $y_K$ , у межах припустимої області  $y_0, y, u \in N(y, u)$ .

Суть рішення задачі складається в організації покрокового зустрічного руху системи: з  $y_0$  в прямому часі з керуваннями  $u^+, y^+ = y(y_0, u^+, \Delta t)$ ,  $\Delta t$  – інтервал часу руху на одному кроці; з  $y_K$  – у зворотному часі  $y^- = y(y_K, u^-, -\Delta t)$ . Задача, таким чином, зводиться до вироблення керувань, що забезпечують зустріч в деякий момент часу  $t_B : y^+(t_B) = y^-(t_B)$ .

Запишемо систему (3.10) у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} y_1 = V = g(n_x - \sin \theta); y_2 = \theta = g(n_y \cos \gamma - \cos \theta) / V; \varphi = -gn_y \sin \gamma / (V \cos \theta); \\ y_4 = \dot{x} = V \cos \theta \cos \varphi; y_5 = \dot{h} = V \sin \theta; y_6 = \dot{z} = -V \cos \theta \sin \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

де  $n_x, n_y$  – подовжнє і нормальне перевантаження,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\gamma$  – крен.

Виберемо як керування вектор  $u = \{n_x, n_y, \sin \gamma, n_y \cos \gamma\}^T$ . Оскільки  $\Delta t$  передбачається малим, то рішення системи (3.11) на одному кроці можна представити в лінеаризованому виді:

$$y(t + \Delta t) = A + B \cdot u \quad (3.12)$$

Для одержання рішення системи (3.11) у виді (3.12) скористаємося розкладанням у ряд виду:

$$\begin{aligned} y_i(t + \Delta t) &= y_i(t) + \dot{y}_i(t) \Delta t, \quad i = 1, 2, 3; \\ y_j(t + \Delta t) &= y_j(t) + \dot{y}_j(t) \Delta t + 0,5 \ddot{y}_j(t) \Delta t^2, \quad j = 4, 5, 6. \end{aligned}$$

Тоді:



$$A = \begin{pmatrix} V - g \sin \theta \Delta t \\ \theta - g \cos \theta \Delta t / V \\ \varphi \\ x + V \cos \theta \cos \varphi \Delta t \\ h + V \sin \theta \Delta t - 0,5 g \Delta t^2 \\ z - V \cos \theta \sin \varphi \Delta t \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} g \Delta t & \cdot & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & 0 & \cdot & g \Delta t / V \\ 0 & \cdot & g \Delta t / (V \cos \theta) & \cdot & 0 \\ 0,5 g \cos \theta \cos \varphi \Delta t^2 & \cdot & 0,5 g \sin \varphi \Delta t^2 & \cdot & -0,5 g \cos \varphi \sin \theta \Delta t^2 \\ 0,5 g \sin \theta \Delta t^2 & \cdot & 0 & \cdot & 0,5 g \cos \theta \Delta t^2 \\ -0,5 g \cos \theta \sin \varphi \Delta t^2 & \cdot & 0,5 g \cos \varphi \Delta t^2 & \cdot & 0,5 g \sin \theta \sin \varphi \Delta t^2 \end{pmatrix},$$

Позначимо:

$$\left. \begin{aligned} y^+(t + \Delta t) &= A(y^+(t), \Delta t) + B(y^+(t), \Delta t)u^+ = A^+ + B^+u^+, \\ y^-(t - \Delta t) &= A(y^-(t), -\Delta t) + B(y^-(t), -\Delta t)u^- = A^- + B^-u^-. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

У (3.13)  $t = t_o + K\Delta t$  у прямому й  $\tau = t_k - K\Delta t$  у зворотному рухах. Введемо нев'язання  $p(u^+, u^-) = (y^+ - y^-)^T \cdot (y^+ - y^-)$ . Оскільки складові вектора в різні за фізичним змістом і значенням, у загальному випадку нев'язання  $p(u^+, u^-)$  зручно представити в нормованому виді

$$p(u^+, u^-) = (y^+ - y^-)^T \cdot \text{diag}(\eta) \cdot (y^+ - y^-),$$

де  $\eta$ -вектор нормувальних коефіцієнтів.

Уведемо розширений вектор керувань  $U = \{u^+, u^-\}^T$ . Тоді (3.13) можна переписати у виді

$$y^+ = A^+ + B1^+U^+, \quad y^- = A^- + B1^-U^-,$$

де  $B1^+$ ,  $B1^-$  розширені шляхом додавання нульових елементів до розмірності  $6 \times 6$  матриці

$$B1^+ = \begin{bmatrix} B^+ & \vdots & 0 \\ \vdots & & \end{bmatrix}, \quad B1^- = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & B^- \\ \vdots & & \end{bmatrix}$$

Позначивши  $C = A^+ - A^-$ ,  $D = B1^+ - B1^-$ , одержимо

$$\rho(U) = (C + DU)^T (C + DU) = C^T C + U^T D^T C + C^T D U + U^T D^T D U.$$

При відсутності обмежень на керування  $U$ , пошук  $U = \operatorname{argmin} \rho(U)$  може бути здійснений з необхідної умови екстремума  $\partial \rho / \partial U = 2D^T C + 2D^T D U = 0$ . Тоді

$$U = -(D^T D)^{-1} D^T C \quad (3.14)$$

Рішення системи (3.14) можна здійснювати будь-як відомими методами (Гаусса, Зейделя, Холецкого, методом релаксації, ...). Але аналіз структури матриці  $D^T D$  дозволяє спростити процедуру пошуку.

Так, розіб'ємо  $D^T D$  на блоки:

$$D^T D = \begin{vmatrix} G & Q \\ \dots & \dots \\ R & S \end{vmatrix}$$

де  $G, Q, R, S$  -  $3 \times 3$  квадратні матриці,  $R^T = Q$ , а  $G$  і  $S$  є діагональними,

$$G = (g\Delta t)^2 \operatorname{diag}\{1, 2, 5; (V^+ \cos \theta^+)^2 + 0, 25; (V^+)^2 + 0, 25\}$$

$$S = (g\Delta t)^2 \operatorname{diag}\{1, 2, 5; (V^- \cos \theta^-)^2 + 0, 25; (V^-)^2 + 0, 25\}.$$

Скориставшись формулою Фробеніуса для зворотності блокових матриць, одержимо

$$(D^T D)^{-1} = \begin{vmatrix} G^{-1} + C^{-1} Q H^{-1} Q^T G^{-1} & -G^{-1} Q H^{-1} \\ \dots & \dots \\ -H^{-1} Q^T G^{-1} & H^{-1} \end{vmatrix},$$

де  $H = S - Q^T G^{-1} Q$ .

Оскільки процедура – одержання  $G^{-1}$  утрудненень не викликає, застосування приведеної формули дозволяє звести зворотність матриці 6-го порядку  $D^T D$  до зворотності матриці 3-го порядку  $H$  та нескладним операціям добутку і додавання матриць  $3 \times 3$ . При цьому скорочуються обчислювальні витрати, що суттєво для бортових алгоритмів.

У загальному випадку на кожному кроці синтезу  $U$  необхідно спільно вирішувати систему

$$\left. \begin{array}{l} u^+ \in N(y^+, u^+), \\ u^- \in N(y^-, u^-), \\ U = \arg \min p(U). \end{array} \right\} \quad (3.15)$$

Спосіб рішення системи (3.15) залежить від конкретного виду задачі. У залежності від конкретних додатків задача може бути вирішена в різних інтерпретаціях.

1. Отримана розрахункова ділянка зворотного руху  $y(t) \rightarrow y(t - k\Delta t)$ ,  $k=1,2,\dots,N$  запам'ятовується (апроксимується) і розглядається в якості опорного при наступному відпрацьовуванні.

2. Здійснюється розрахунок у прискореному часі до моменту часу  $T$  усієї траєкторії, запам'ятовування керуючих функцій і їхнє наступне відпрацьовування.

3. При наявності труднощів, зв'язаних з необхідністю запам'ятовування траєкторії, досягнуту точку зустрічі вважати початковою, а кінцеву залишити без змін.

4. Яри наявності резерву часу доцільно проводити грубі прогони за збільшеними значеннями інтервалів  $\Delta t$  для перевірки реалізуємості траєкторії за припустимими керуваннями.

5. При різномірному характері складових вектора фазових координат  $u$  (лінійні координати, кутові величини, швидкості й ін.) у згортці  $p$  складові  $u$  варто використовувати з ваговими або нормованими коефіцієнтами.

6. При малих еволюціях керувань процес відпрацьовування опорної траєкторії відбувається більш точно (плавно). З цією же метою, при зворотному русі, можливе застосування інтервалу прогнозу меншого значення, чим при прямому прогнозі.

У розглянутій постановці задача є квазіоптимальною за критерієм мінімуму часу процесу.

Для дослідження працездатності створеної системи підтримки прийняття рішень оператора тренажера ДПЛА екологічного моніторингу була прийнята блокова структура моделі. Кожний із блоків моделює одну з

функцій та властивостей ДПЛА екологічного спостереження (аеродинаміка, динаміка руху, зовнішнє середовище, робота апаратури спостереження), бере участь у алгоритмічному процесі та вирішує відносно самостійну часткову задачу.

В якості окремих блоків-підпрограм були створені алгоритми, які вирішують наступні часткові задачі: балістика; відпрацювання апаратури спостереження та оцінка достовірності результатів екологічного моніторингу; визначення об'єктів моніторингу та відповідної апаратури спостереження; вибір маршруту польоту ДПЛА; синтез керувань ДПЛА, визначення термінальних умов у точках застосування апаратури спостереження.

Зазначені вище блоки використовувалися при безпосередньому моделюванні процесу ухвалення рішення на екологічний моніторинг при рішенні ЗСДО. Крім того, були розроблені програмні продукти, використання яких передбачається на стадії попередньої підготовки: рішення задачі кластеризації об'єктів спостереження; розподіл апаратури спостереження за визначеними об'єктами; рішення задачі вибору маршруту польоту ДПЛА; ухвалення рішення на застосування апаратури спостереження.

З використанням перерахованих вище блоків формувалася загальна математична модель з метою дослідження працездатності системи підтримки прийняття рішень оператору тренажера ДПЛА екологічного моніторингу на типових тестових прикладах (дослідження впливу окремих факторів на точнісні характеристики та на ефективність застосування ДПЛА екологічного спостереження).

При моделюванні передбачалася наявність прямолінійної ділянки довжиною  $L=V\cdot\tau$ ,  $V$  – повітряна швидкість ЛА,  $\tau \in [0.5\text{с}, 3\text{с}]$ . Ця ділянка польоту з  $\gamma=0$  і, бажано, з  $\beta_a=0$ , що необхідно для завершення перехідних процесів і здійснення застосування апаратури спостереження в сталому режимі. При моніторинзі об'єктів на значній відстані  $\tau$  бралася 3 с. При

неможливості реалізації такої траєкторії  $\tau$  зменшувалося з кроком 0.5 с з наступною перевіркою на реалізуємість. При  $\tau < 0.5$  с здійснення моніторингу вважалося неможливим (недостатня достовірність спостереження).

*Особливості відпрацювання та тренажері ДПЛА завдань для здійснення екологічного моніторингу навколишнього середовища.*

При синтезі тренажера ДПЛА екологічного моніторингу доцільне врахувати та реалізувати в програмному забезпеченні тренажера особливості відпрацювання специфічних завдань екологічного моніторингу (нештатних, аварійних ситуацій). Такими завданнями є попередження та моніторинг пожеж, хімічних та радіаційних забруднень, вибухів, прояв екологічного тероризму тощо. Тому у тренажері ДПЛА екологічного моніторингу доцільно передбачити можливість відпрацювання дій оператора з контролю пожеженобезпечної ситуації. При створенні програмного забезпечення спеціалізованого тренажеру потрібно враховувати особливості реальної обстановки в імітаторі візуальної обстановки тренажеру.

Також спостереження за родовищами торфу через тепловізор (на борту ДПЛА) дозволить контролювати зростання температур, щоб підвищити рівень готовності і швидкість реагування на виникаючі пожежі. При цьому враховуємо, що тільки телевізійне спостереження (відеокамера) з повітря про стан торфовища дозволяє судити лише за наявністю диму, що для швидкого реагування недостатньо (є дим – вже почалася пожежа).

На спеціалізованому тренажері ДПЛА також необхідно передбачити можливість тренування з контролю за станом газо-нафтопроводів, транзиту нафти і газу в країни західної Європи. Це край важливе завдання, тому, що надаючи послуги транзиту, наша країна так само забезпечує якість і безпеку цих послуг. Тому виникає необхідність в контролі цілісності і справності магістралі. Масштаби нафтопроводу не дозволяють здійснювати піший обхід, а місця його розташування часто також виключають можливість використання автомобіля. Використання ДПЛА є одним з найбільш вдалих рішень для здійснення цього завдання. А установка на ДПЛА тепловізорної

камери дозволить виявляти неоднорідності і витік в трубах. Існуючі зразки тепловізорів мають невеликі габарити і вагу, що означає можливість оснащення ними ДПЛА. Всі вони мають зовнішній вихід для запису інформації. Єдиною невирішеною завданням є формування каналу зв'язку для передачі відеоінформації з ДПЛА. Можливо здійснити передачу даних на вільному діапазоні частот 2,3-2,5 ГГц. Це дозволить здійснити зв'язок на відстань до 30 км в радіусі прямої видимості. Однак, з огляду на те, що інформація у нас буде надходити з висоти ДПЛА, то дальність зв'язку збільшується до 50 км. Однак передача відеоданих вимагає великої швидкості, яку не завжди можливо забезпечити. Тому перед передачею даних з тепловізора відеозображення треба піддати стисненню. Для того, щоб не втратити в якості зображення, слід застосовувати технологію зменшення розкадровки. Цього буде достатньо для об'єктивного спостереження і не накладе завищених вимог по швидкості передачі даних. Для здійснення стиснення потрібне оснащення ДПЛА аналоговоцифровим перетворювачем, який перетворює сигнал від тепловізора в інформацію, готову до оброблення. А так само необхідний процесор для здійснення процесів перетворення цієї інформації.

У складі пропонованої системи телевізійного і тепловізійного каналу збору інформації доцільно застосувати наступну апаратуру спостереження: а) тепловізор і відеокамера; б) бортовий блок обробки і зберігання польотної інформації; в) блок цільового навантаження; г) бортовий блок прийому-передачі; д) блок прийому-передачі наземний, а також обладнання диспетчера.

Наступний фактор, який потрібно враховувати в тренажері ДПЛА екологічного моніторингу, це протидія в умовах екологічного тероризму. У сучасному світі тероризм є одним з найбільш небезпечних явищ. Він став головним викликом всьому людству, з ним доводиться рахуватися в тій чи іншій мірі. Тероризм і екстремізм загрожують безпеці більшості країн, тягнуть за собою величезні політичні, економічні і навіть людські втрати. До

одного з найбільш небезпечних видів терористичної діяльності відносять ядерний тероризм. Його суть заключається в проведенні різного роду диверсій на небезпечних, з точки зору екології, об'єктах, до яких відносять всі типи електростанцій, виробництва ядерного паливного циклу і ядерних боєприпасів, хімічні, нафтохімічні і нафтопереробні, металургійні, біотехнічні підприємства, сховища їх сировини і продукції; нафто-, газо- та аміакопроводи, а також військові об'єкти, що містять радіоактивні і отруйні речовини, їх сховища. Одними з найбільш небезпечних об'єктів, з точки зору наслідків проведення терористичних актів, є атомні електростанції. Тому пропонується використовувати безпілотні авіаційні комплекси здатні виконувати різні завдання на різних етапах загрози.

Регулярний повітряний моніторинг із застосуванням ДПЛА дозволить контролювати проведення робіт на території техногенно небезпечних об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури, виявляти перебування сторонніх осіб і транспортних засобів в особливих зонах охорони, дистанційно здійснювати радіаційну розвідку місцевості. Основні об'єкти, за якими може здійснюватися спостереження за допомогою ДПЛА: територія техногенно небезпечних об'єктів; житлові селища; транспортні комунікації; технологічні комунікації та інженерні мережі та ін.

До стандартного компонування об'єктів критичної інфраструктури (техногенно небезпечних об'єктів) можна віднести: промисловий майданчик; склад палива; гідротехнічні об'єкти; електричні розподільні пристрої; будівельно-монтажна база; санітарно-захисна зона; транспортні комунікації (автомобільні дороги (зовнішні і внутрішні), залізниці (зовнішні і внутрішні)); технологічні комунікації та інженерні мережі (лінії електропередач, газопровід, теплотраси, каналізаційні мережі, мережі господарсько-питного та протипожежного водопроводу).

Для тренування виконання моніторингових завдань пропонується використовувати тренажери ДПЛА різних типів: літакового і вертолітного (коптери). Це пов'язано з тим, що для моніторингу об'єктів критичної

інфраструктури (техногенно небезпечних об'єктів), які видаленні до 15 км найбільш доцільно застосовувати ДПЛА літакового типу, а для оперативного моніторингу на відстані до 5 км – ДПЛА вертолітного типу (коптери). На тренажері відпрацьовуються дії оператора щодо управління польотом ДПЛА та управління роботою апаратури спостереження. В реальному польоті моніторингові дані спостереження з борта ДПЛА передаються в режимі реального часу на наземну станцію управління.

Крім стандартного цільового навантаження на ДПЛА може бути встановлена додаткова спеціальна апаратура, наприклад:

- апаратура радіаційної розвідки, що вимірює рівень радіаційного випромінювання в районах спостереження;
- система оповіщення, яка в разі виникнення надзвичайної ситуації радіаційного характеру, щоб уникнути ризику знаходження людей на зараженій території, дозволить в найкоротші терміни попередити населення про небезпеку і передати рекомендації щодо прийняття евакуаційних заходів.

На тренажері ДПЛА відпрацьовуються наступні способи проведення екологічного моніторингу. Моделюється візуальне спостереження (телекамера на борту ДПЛА) що дозволяє обстежити великі ділянки місцевості, аналізувати отримані розвіддані в польоті і повідомляти їх на землю. Повітряне фотографування (за командами оператора тренажера ДПЛА) – це фотографування місцевості з безпілотного апарату за допомогою спеціальної фотографічної апаратури. В результаті повітряного фотографування виходить аерознімок, який дає можливість отримати найбільш точні і докладні відомості про місцевість і об'єкти на ній.

Повітряна радіаційна розвідка місцевості виконується з використанням дозиметричних приладів, встановлених на борту ДПЛА. Радіаційна обстановка визначається при польоті за заданим маршрутом, уздовж доріг або на окремих ділянках місцевості.

При вирішенні завдань пошуку окремих об'єктів спостереження за допомогою ДПЛА використовуються наступні способи. При виході на заданий



район спостереження проводиться відшукування місця потрібного об'єкту щодо характерних орієнтирів. Пошук об'єкту з невідомими координатами здійснюється переглядом місцевості одиночними ДПЛА або групою по одному маршруту.

При візуальному виявленню наземних об'єктів за допомогою ДПЛА потрібно враховувати фактори (об'єктивні та суб'єктивні), що впливають на умови візуального спостереження.

До об'єктивних факторів, які враховуються на тренажері ДПЛА, відносяться: геометричні (форма і розмір об'єкта); астрономічні (час року і доби); метеорологічні (прозорість атмосфери, характер хмарності); фотометричні (колір і відбивна здатність об'єкту і навколишньої місцевості, фон); топографічні (рельєф місцевості, природні та штучні перешкоди); технічні (можливості цільового навантаження); тактичні (рухливість, особливості функціонування, розташування на місцевості і властивості маскування об'єкта).

До суб'єктивних факторів, які враховуються на тренажері ДПЛА, відносяться: психофізіологічні властивості зору оператора ДПЛА, морально-психологічна підготовка, знання і досвід операторів.

При обиранні і оптимізації траєкторії польоту на тренажері ДПЛА доцільне враховувати, що одним з головних завдань щодо забезпечення моніторингу техногенно небезпечних об'єктів (об'єктів критичної інфраструктури) при польоті ДПЛА і вироблення пропозицій для прийняття рішень на польоті, є вибір найкращої траєкторії польоту на виконання екологічного моніторингу. Характер траєкторії польоту визначається метою поставленого завдання екологічного моніторингу, тактичним радіусом дії ДПЛА, і можливістю керування ДПЛА та апаратурою спостереження під час польоту. Політ на виконання екологічного моніторингу в усіх випадках повинен виконуватися за оптимальною (найвигіднішою траєкторією). До основних, визначальних факторів, що вимагає обов'язкового обліку при виборі на тренажері траєкторії ДПЛА екологічного спостереження:

- характер поставленого моніторингового завдання;
- можливості ДПЛА за дальністю;
- метеорологічні умови і умови взаємного освітлення на період виконання поставленого завдання;
- напрямки виходу на об'єкт спостереження, майданчики приземлення і умови виявлення об'єктів моніторингу;
- рельєф місцевості і характер підстилаючої поверхні;
- можливості спеціальної апаратури спостереження.

Розглянуті вимоги до маршруту та профілю польоту дозволяють в процесі оцінки обстановки і вироблення пропозицій для прийняття рішень на виконання польоту намітити кілька варіантів можливих траєкторій польоту. Найбільш ефективним маневром пошуку об'єкту спостереження є політ за оптимальним маршрутом через ділянки передбачуваного розташування об'єкта. У процесі підготовки до польоту на тренажері на основі аналізу місцевості в імітаторі візуальної обстановки в заданому районі складається схема ділянок, де місце знаходження об'єкта спостереження є найбільш вірогідним. На цій схемі в районі пошуку намічається лінія заданого шляху, визначаються етапи польоту за криволінійною траєкторією вздовж доріг або мережі ділянок ймовірного розташування об'єкту спостереження і вихід на наступні етапи прямолінійного польоту.

*Перспективи відпрацювання на тренажері польоту групи ДПЛА екологічного спостереження.*

Нові ДПЛА екологічного спостереження будуть здатні діяти групою і спостережати весь район екологічного моніторингу. В рамках перспективних проектів будуть створюватися апарати, які зможуть виконувати групові польоти. ДПЛА будуть оснащуватися різними типами допоміжного обладнання, яке буде задіяно для виконання конкретного завдання групою. Платформою для запуску таких апаратів стануть великі літаки (аеростати). ДПЛА зможуть ідентифікувати об'єкти спостереження за важливістю, аналізувати яка складається метеорологічна та екологічна, безпекова у землі і

в повітрі обстановка. Це дасть додаткові можливості – дозволить апарату при проведенні екологічного моніторингу стати розумним спостерігачем.

Перевагою такої системи є можливість доступу до ДПЛА, здатних діяти самостійно за програмою при мінімальному зв'язку з “базою”. В даний час розробляються повністю автономно взаємодіючі між собою безпілотні літальні апарати (БПЛА) на основі так званої технології “рою”. Дана технологія реалізована в проекті LowCost UAV Swarm Technology (LOCUST) – “сарана”. БПЛА в рамках програми LOCUST є повністю автономними, в порівнянні з дистанційно керованими БПЛА. Окремими БПЛА управляє штучний інтелект, а “роєм” апаратів в цілому – один оператор. Технологія “роїв” дозволить різні за можливостями ДПЛА екологічного спостереження інтегрувати в єдину і стійку до зовнішніх впливів систему екологічного моніторингу. Базовою моделлю проекту “сарана” є малорозмірний одноразовий БПЛА Coyote, який несе 2,27 кг корисного навантаження при загальній злітній масі до 6,4 кг. На робочих висотах 150–365 м апарат може діяти на дальність 35 км протягом 1,5 год з максимальною швидкістю до 157 км/ч. Передбачається, що після пуску групи ДПЛА вони встановлюють зв'язок один з одним і оперативно взаємодіють між собою в польоті. Оператор буде стежити та при необхідності коригувати, при необхідності, дії групи БПЛА.

*Тенденції побудови автоматизованої системи синергетичного управління польотом дистанційно пілотованими літальними апаратами за гомеостазісним критерієм.*

У теперішній час з'явилися багатофункціональні індикатори (рис. 3.3), як новий технологічний засіб побудови систем відображення інформації.

Незважаючи на отримані позитивні результати підходу до вирішення проблеми синтезу адекватних систем автоматизованого управління (ергетичних систем управління) проведені дослідження чітко показали характерні обмеження цього підходу.

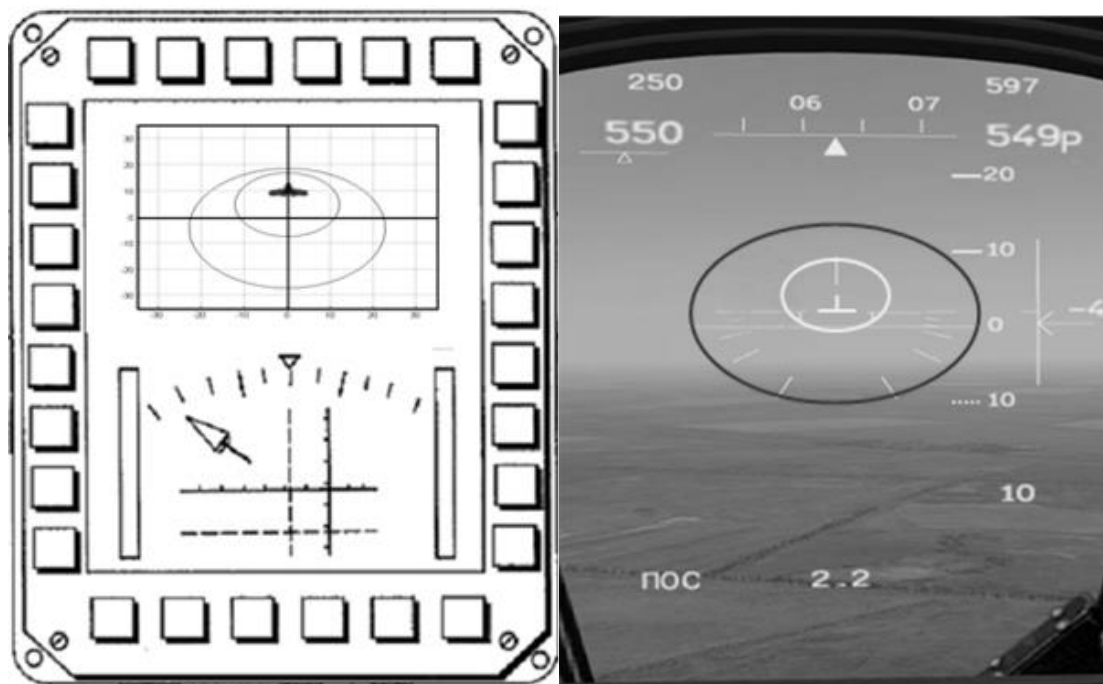


Рис.3.3. Формування інтерфейсу льотчика-оператора з застосуванням багатфункціональних індикаторов

Технічне вдосконалення засобів взаємодії з людиною дозволяє розширити можливості тренажера ДПЛА, але виявляється неприйнятним в разі, коли спостерігається значний розрив між динамічними властивостями реального об'єкта управління (в даному випадку – ДПЛА) і психофізіологічних обмежень оператора тренажера.

В такому випадку традиційний показник операційної напруженості функціонування людини є невизначеним.

$$J_{\bar{A}I} = \min S \left( \frac{\Delta I(L)}{\Delta t} \right). \quad (3.16)$$

Це визначається тим, що кількість інформації, яку “переробляє” оператор за одиницю часу  $\frac{\Delta I(L)}{\Delta t}$  неможливо визначити, тому що оператор має психофізіологічні обмеження.

Подолати цю невідповідність можливо перекладом фазових координат об'єкта управління в новий базис  $\{X, Y, Z\}$  для забезпечення інформаційного узгодження оператора і об'єкта управління за допомогою перетворення

$$X = X(u, \vartheta); \quad Y = Y(u, \vartheta); \quad Z = Z(u, \vartheta), \quad (3.17)$$

де  $X, Y, Z$  – значення відповідних осей координат;  $u, \vartheta$  – криволінійні координати.

Вираз фазової точки руху об'єкта управління у вигляді зміни виду характеристичних поверхонь в просторі  $u, \vartheta$  (рис. 3.4) дозволяє узгодити можливості людини і технічних пристроїв системи управління лише у відносно невеликому діапазоні умов, але явно недостатньому для реалізації управління таким об'єктом як ДПЛА.

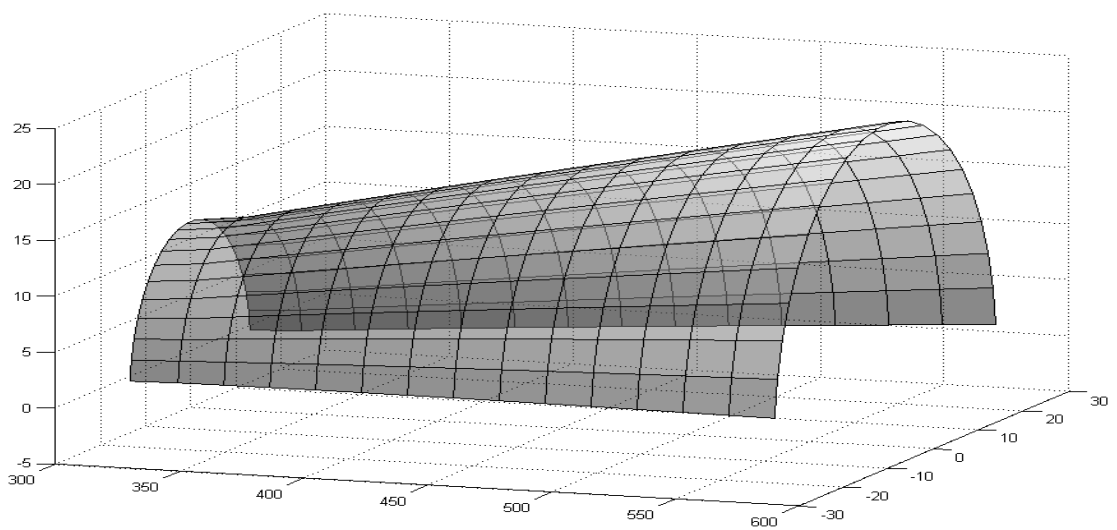


Рис. 3.4. Характеристична поверхня  $(V, \dot{\theta}, \dot{\psi}) = f(\alpha, \gamma)$ .

Таким чином, вдосконалення технічної частини тренажера без зміни самого принципу формування управління є несистемним шляхом вирішення проблематики побудови систем управління об'єктами ДПЛА на тренажері.

Системне рішення буде полягати в реалізації нових підходів до формування управління ДПЛА на тренажері, з метою максимально узгодити потреби оператора з можливостями об'єкта управління – ДПЛА.

Для цього пропонується застосувати системотехнічний принцип реалізації управління елементами ДПЛА. Схемотехнічними рішеннями можливо забезпечити зниження психофізіологічної напруженості

функціонування оператора при управлінні ДПЛА екологічного спостереження в рамках двох напрямків.

Перший напрямок зниження психофізіологічної напруженості оператора на тренажері ДПЛА полягає в реалізації схеми розподілу функцій управління між людиною і технічними пристроями, при якій оператор здійснює управління траєкторним рухом (рух центру мас), а автоматика ДПЛА реалізує всі функції стабілізації та керування апаратурою екологічного моніторингу (див. рис. 3.5, 3.6).

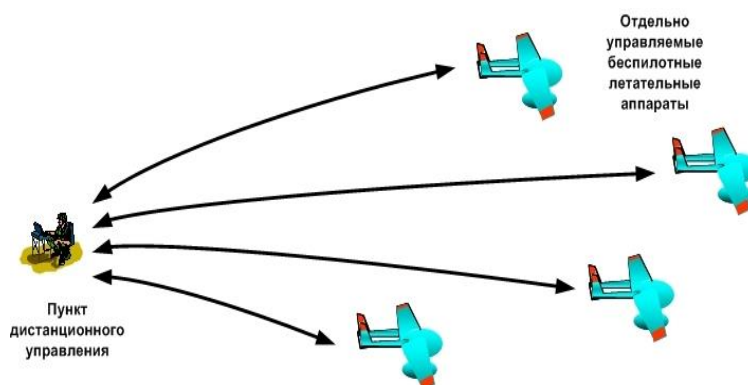


Рис. 3.5. Схема управління польотом групи ДПЛА екологічного спостереження

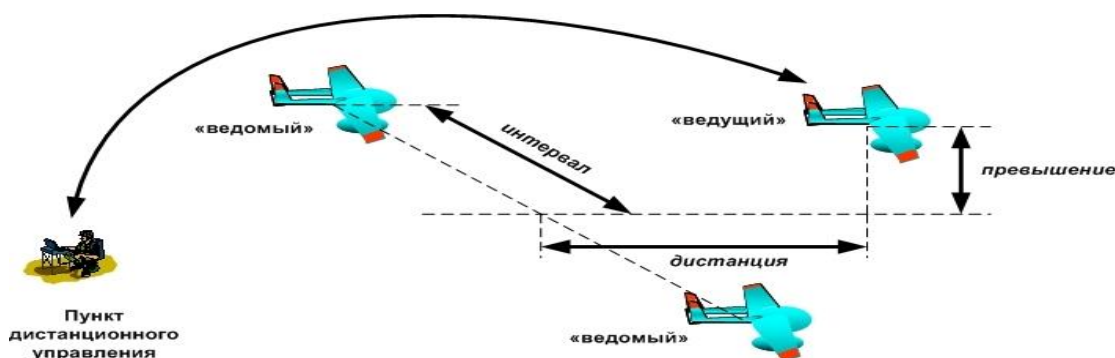


Рис.3.6. Організація управління польотом групи ДПЛА екологічного спостереження

Інформаційна напруженість функціонування оператора (операторів) в цьому випадку характеризується залежністю

$$\rho^{\text{bn}}(x, u, t) = \sum_{j=1}^M \left( \frac{\tau_{ij}(u, t)}{N_j} \cdot \sum_{i=1}^M \lambda_{ij}(x, t) \right), \quad (3.18)$$

де  $M$  – кількість груп ДПЛА з однаковими функціональними властивостями (наприклад, групи візуального, хімічного, тепловізійного спостереження тощо);  $N_j$  – кількість елементів в  $j$ -ій групі  $\left( \sum_{j=1}^M N_j = N \right)$ ;  $\lambda_{ij}(x, t)$  – інтенсивності потоків запитів на заміну установок управління від кожного  $i$ -ого елементу групи ДПЛА –  $j$ -ої групи;  $\tau_{ij}(u, t)$  – середній час обслуговування оператором запиту  $i$ -ого елементу групи ДПЛА  $j$ -ої групи.

Другий напрямок полягає в реалізації схеми розподілу функцій управління ДПЛА на тренажері і узгодження характеристик людини-оператора і технічних пристроїв тренажера, при якій оператор здійснює управління макрооб'єктами (головним ДПЛА), а автоматика ДПЛА реалізує всі функції екологічного моніторингу (рис. 3.7, 3.8).



Рис. 3.7. Оператор ДПЛА екологічного спостереження

Тому виконання на тренажері завдань екологічного моніторингу групою ДПЛА можна формалізувати наступним чином. Нехай замкнутий контур управління описується системою рівнянь

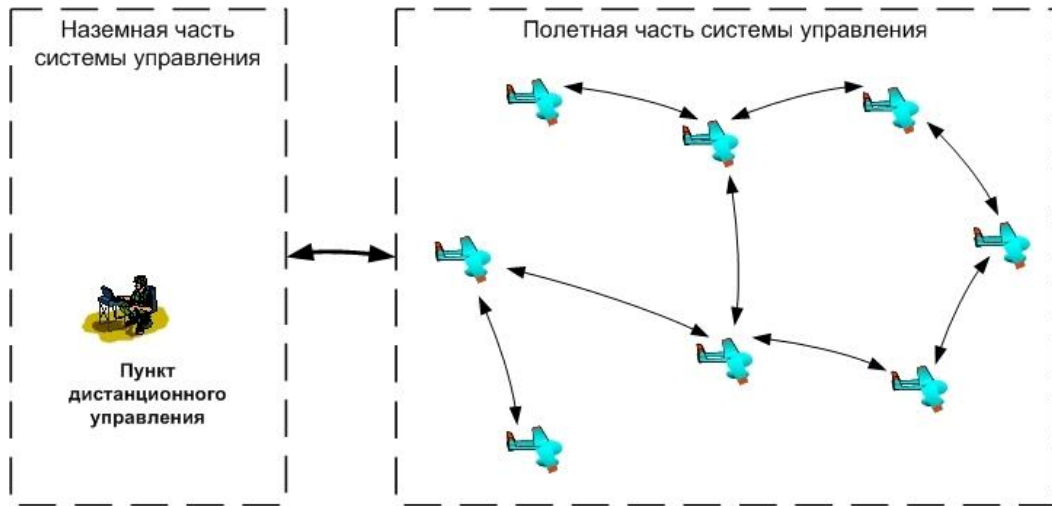


Рис. 3.8. Пропонуєма схема управління групою ДПЛА екологічного спостереження

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F(X, U, a, \xi, t) \\ Y(t) = H(X, \eta, t) \\ U_o(t) = g_o(Y, t) \\ U(t) = f(X, Y, U_o, t) \end{cases}, \quad (3.19)$$

де  $X(t)$  –  $n$ -мірний вектор стану системи;  $U(t)$  –  $m$ -мірний вектор управління головним ДПЛА;  $Y(t)$  –  $l$ -мірний вектор вимірювань;  $U_o(t)$  –  $m_o$ -мірний вектор дій (керувань) оператора,  $m \gg m_o$ ,  $n \gg m_o$ ;  $F(\dots)$  – багатовимірна нелінійна функція, яка визначає динамічні властивості головного ДПЛА;  $H(\dots)$  – нелінійна функція, яка визначає властивості інформаційно вимірювальної підсистеми;  $g_o(\dots)$  – нелінійна функція, яка визначає інформаційний інтерфейс оператора;  $f(\dots)$  – алгоритм формування управління групою ДПЛА;  $a$  – відомі параметри головного ДПЛА.

Розглядаються умови конфлікту, де метою функціонування є досягнення максимального значення функції виграшу

$$U : \max C(X, U, t) \quad (3.20)$$

при виконанні обмежень  $X \in \Omega_X$ ,  $U \in \Omega_U$ ,  $t \in [t_0, \dots, t_k]$ .

З точки зору класичної теорії автоматичного управління дана задача має рішення тільки в тому випадку, коли виконуються умови повної керованості і



спостереження. При цьому слід враховувати, що наявність алгоритмів управління у кожного з апаратів групи ДПЛА, принципово гарантує повне спостереження і керованість такої системи (групи ДПЛА).

Інформаційна напруженість функціонування оператора (операторів) в разі управління групою ДПЛА визначається залежністю

$$\rho^{mo}(x,u,t) = \tau^{mo}(u,t) \cdot \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \lambda_{ij}(x,t)}{N}, \quad (3.23)$$

де  $\tau^{mo}(u,t) \in \left[ \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \tau_{ij}}{N}, \max \tau_{ij} \right]$  – середній час обслуговування оператором запитів

на зміну завдань при управлінні групою ДПЛА.

Отже, розподіл функцій управління на тренажері ДПЛА, коли оператор управляє елементами комплексу як єдиним макрооб'єктом, а автоматичні системи здійснюють узгодження руху та функцій елементів комплексу в складі групи ДПЛА, відповідає рішенням задачі оптимізації автоматизованої системи управління на тренажері групою ДПЛА екологічного моніторингу.

### Висновки по розділу 3

1. Запропонована технологія інтелектуального розвантаження оператора тренажера ДПЛА при проведенні екологічного спостереження об'єктів критичної інфраструктури. Ця технологія передбачає застосування існуючих методів розподілу функцій управління між оператором та автоматичними пристроями, узгодження психофізіологічних характеристик оператора та

автоматичних пристроїв, оцінку психофізіологічної напруженості оператора, і вимагає розроблення нових адекватних методів, що враховують процеси взаємодії людини і технічних пристроїв на більш високому рівні – інформаційному.

2. Інтелектуальне розвантаження оператора тренажера ДПЛА здійснюється шляхом підтримки прийняття рішень при проведенні екологічного спостереження об'єктів критичної інфраструктури. Ці рішення стосуються як вибору траєкторії руху так й порядку застосування спеціалізованого обладнання екологічного спостереження. Пошук ефективного рішення є в прагненні пошуку екстремуму (для визначеності до мінімізації) значень показників якості.

3. Зручна геометрична інтерпретація процедури відшукування ефективного альтернативного рішення виходить при введенні плоскої  $K$ -мірної полярної системи координат (рис.3.2), при цьому на  $j$  осі відкладається зважене нормалізоване значення ПЯ  $\tilde{R}_j$ . При прагненні до мінімізації показників якості ідеальній гіпотетичній альтернативі буде відповідати точка – початок координат. Ефективній альтернативі буде відповідати багатокутник найменшої площі  $S(x)$  або периметра  $P(x)$ .

4. Основним бажаним результатом екологічного спостереження та тренажері ДПЛА є здійснення моніторингу визначених декількох об'єктів спостереження з максимальною достовірністю. Сутність задачі моніторингу декількох об'єктів (об'єктів критичної інфраструктури) буде формалізовано наступним чином: з наявної сукупності об'єктів спостереження (цілей) необхідно виділити послідовність (відповідно маршруту обстеження) з максимальною достовірністю отримання моніторингової інформації за мінімальний час, з мінімальними витратами, з безпекою для навколишнього середовища.

5. Запропонована методика синтезу алгоритмів системи директорного керування для оператора ДПЛА екологічного спостереження при рішенні завдань моніторингу декількох об'єктів.

6. Сутність завдання моніторингу декількох об'єктів (об'єктів критичної інфраструктури) може бути формалізовано наступним чином: з наявної сукупності об'єктів спостереження (цілей) необхідно виділити послідовність (відповідно маршруту обстеження) з максимальною достовірністю отримання моніторингової інформації за мінімальний час, з мінімальними витратами, з безпекою для навколишнього середовища. При цьому задачу вибору маршруту треба розуміти в широкому змісті, не тільки як визначення траєкторії польоту ДПЛА, але і виділення з загальної групи цілей об'єктів моніторингу, котрі будуть обстежені, визначення способу обльоту кожного з об'єктів, визначення безпеки цього маршруту і можливості ефективного застосування моніторингової апаратури.

7. Директорне керування ДПЛА здійснюється з одією з двох форм:

А. На програмному дисплеї імітатора візуальної обстановки тренажера відображаються положення органів керування: програмні та реальні. При тренуванні на тренажері завдання оператора полягає у відхиленні органів керування (керма) ДПЛА таким чином, щоб усунути (ліквідувати) різницю в положеннях програмного та реального органів керування. Включення бортового обладнання моніторингу у визначений час здійснюється натисканням на кнопку включення відповідної апаратури за відповідним сигналом. Цю форму директорного керування ДПЛА доцільно застосовувати на початковому етапі (первинна підготовка) підготовки оператора ДПЛА екологічного спостереження.

Б. В імітаторі пілотажно-навігаційної системі тренажера відображаються задані (програмні) параметри траєкторії руху та час включення

(застосування) моніторингової апаратури. Форма візуалізації може відповідати візуалізації директорного керування в пілотажно-навігаційних комплексах сучасних літальних апаратів. При тренуванні на тренажері завдання оператора полягає у відхіленні органів керування (керма) ДПЛА таким чином, щоб усунути (ліквідувати) різницю в положеннях програмного та реального положень (відхилень) траєкторних параметрів руху. Включення бортового обладнання спостереження у визначений час також здійснюється натисканням на кнопку включення відповідної апаратури за відповідним сигналом.

8. При синтезі тренажера ДПЛА екологічного моніторингу доцільно врахувати та реалізувати в програмному забезпеченні тренажера особливості відпрацювання специфічних завдань екологічного спостереження (нештатних, аварійних ситуацій). Такими завданнями є попередження та моніторинг пожеж, хімічних та радіаційних забруднень, вибухів, прояв екологічного тероризму тощо. Тому у тренажері ДПЛА екологічного спостереження доцільно передбачити можливість відпрацювання дій оператора з контролю пожеженебезпечної ситуації. При створенні програмного забезпечення спеціалізованого тренажера потрібно враховувати особливості реальної обстановки в імітаторі візуальної обстановки тренажеру.

9. Регулярний повітряний моніторинг із застосуванням ДПЛА дозволить контролювати проведення робіт на території потенційно небезпечних об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури, виявляти перебування сторонніх осіб і транспортних засобів в особливо охоронюваних зонах, дистанційно здійснювати радіаційну розвідку місцевості. Основні об'єкти, за якими може здійснюватися візуальне спостереження за допомогою ДПЛА:

територія техногенно небезпечних об'єктів; житлове селище; транспортні комунікації; технологічні комунікації та інженерні мережі.

10. При обиранні і оптимізації траєкторії польоту на тренажері ДПЛА доцільне враховувати, що одного з головних завдань щодо забезпечення моніторингу техногенно небезпечних об'єктів (об'єктів критичної інфраструктури) при польоті ДПЛА і вироблення пропозицій для прийняття рішень на польоті, є вибір найкращої траєкторії польоту на виконання екологічного моніторингу. Характер траєкторії польоту визначається метою поставленого завдання екологічного моніторингу, тактичним радіусом дії ДПЛА, і можливістю керування ДПЛА та апаратурою спостереження під час польоту. Політ на виконання екологічного моніторингу в усіх випадках повинен виконуватися за оптимальною (найвигіднішою траєкторією). Оптимізація траєкторії польоту передбачає визначення критеріїв, обчислення їх значень і порівняння за ними усіх можливих маршрутів та профілів польоту. До основних, визначальних факторів, що вимагає обов'язкового обліку при виборі траєкторії ДПЛА екологічного спостереження: характер поставленого моніторингового завдання; можливості ДПЛА за дальністю; метеорологічні умови і умови взаємного освітлення на період виконання поставленого завдання; напрямки виходу на об'єкт спостереження, майданчики приземлення і умови виявлення об'єктів моніторингу; рельєф місцевості і характер підстилаючої поверхні; можливості спеціальної апаратури спостереження.

11. Технічне вдосконалення засобів взаємодії з людиною дозволяє розширити можливості тренажера ДПЛА, але виявляється неприйнятним в разі, коли спостерігається значний розрив між динамічними властивостями реального об'єкта управління (в даному випадку – ДПЛА) і психофізіологічних обмежень оператора тренажера. Перший напрямок

зниження психофізіологічної напруженості оператора на тренажері ДПЛА полягає в реалізації схеми розподілу функцій управління між людиною і технічними пристроями, при якій оператор здійснює управління траекторним рухом (рух центру мас), а автоматика ДПЛА реалізує всі функції стабілізації та керування апаратурою екологічного моніторингу. Другий напрямок полягає в реалізації схеми розподілу функцій управління ДПЛА на тренажері і узгодження характеристик людини-оператора і технічних пристроїв тренажера, при якій оператор здійснює управління макрооб'єктами (головним ДПЛА), а автоматика ДПЛА реалізує всі функції екологічного моніторингу. Отже, розподіл функцій управління та тренажері ДПЛА, коли оператор управляє елементами комплексу як єдиним макрооб'єктом, а автоматичні системи здійснюють узгодження руху та функцій елементів комплексу в складі групи ДПЛА, відповідає рішенням задачі оптимізації автоматизованої системи управління на тренажері групою ДПЛА екологічного спостереження.

## РОЗДІЛ 4

### ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДГОТОВКИ НА ТРЕНАЖЕРІ ОПЕРАТОРІВ ДПЛА ЕКОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

#### **4.1. Розробка моделі тренажерного комплексу для професійної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження**

Для вирішення завдань підготовки, атестації та інформаційної підтримки персоналу тренажера ДПЛА екологічного спостереження доцільно використовувати комплексну автоматизовану навчальну систему для професійної підготовки персоналу тренажера. Дана система повинна забезпечувати не тільки професійну підготовку операторів, а й атестацію операторів (допуск до самостійної роботи з реальними апаратами), та підтримку прийняття рішень на тренажері.

Характерною рисою комплексної автоматизованої навчальної системи для професійної підготовки операторів тренажера ДПЛА є наявність взаємопов'язаних логічних блоків, які можуть бути умовно розбиті на дві групи:

- 1) блоки, що відображають реалізацію навчальних завдань;
- 2) блоки вирішення завдань управління процесом тренування (навчання).

Завданнями комплексної автоматизованої навчальної системи операторів на тренажері є:

- формування (відновлення, підтримання на необхідному рівні) професійних знань з конструкції, призначення, принципів функціонування, технології експлуатації ДПЛА екологічного спостереження і їх елементів;
- вироблення практичних умінь і навичок щодо виконання операцій моніторингових процесів індивідуально, а також у складі групи ДПЛА;

- формування навичок і компетенцій прийняття обґрунтованих рішень при виконанні моніторингових операцій в умовах виникнення передбачених і непередбачених (нештатних, аварійних) ситуацій;

- атестація операторів ДПЛА;

- інформаційна підтримка при виконанні завдань професійної (експлуатаційної) діяльності.

Завдання комплексної автоматизованої навчальної системи тренажера можуть бути логічним чином реалізовані в рамках тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу:

- електронний інтерактивний підручник;

- програмний тренажер для вироблення індивідуальних практичних навичок виконання операцій на тренажері (далі - індивідуальний тренажер);

- програмний тренажер для вироблення практичних навичок виконання операцій в складі групи ДПЛА (далі - колективний тренажер);

- підсистема атестації персоналу;

- підсистема підтримки прийняття рішень при виникненні надзвичайних ситуацій;

- підсистема інформаційної підтримки професійної діяльності оператора ДПЛА.

*Електронний інтерактивний підручник* призначений для навчання оператора тренажера ДПЛА навчального матеріалу (тексти технічних описів досліджуваного обладнання, його інтерактивних 2D- і 3D-моделей, анімації (візуалізація навколишнього середовища), фото- і відеозображень, звукового супроводу і т. д.) для вивчення конструкції, принципу функціонування тренажера та його складових частин, порядку і правил виконання операцій при користуванні ДПЛА за призначенням, технічного обслуговування, інших експлуатаційних процесів з урахуванням вимог безпеки.

Електронний інтерактивний підручник реалізує наступні функції:



- надання оператору пристрої тренажера, його елементів і технології виконання експлуатаційних процесів за допомогою відображення інформації в текстове-графічному вигляді;

- текстове-графічне відображення операцій з підготовки та застосування за призначенням тренажера і його елементів;

- звуковий текстовий супровід навчання;

- надання основних відомостей про учнів;

- вибір і редагування профілю тренування (навчання);

- формування груп, які навчаються;

- контроль засвоєння матеріалу, що вивчається шляхом формування питань в режимах самоконтролю і контрольного опитування;

- формування оцінки тому, якого навчають (можливо за п'ятибальною шкалою);

- висновок результатів тестування операторів на реєструючій пристрій і архівація результатів навчання;

- захист результатів тестування від несанкціонованого втручання учнів;

- можливість зміни пароля для керівника навчання.

В електронному інтерактивному підручнику навчальний матеріал повинен бути адаптований для роботи на персональному комп'ютері (тобто кожна сторінка цілком відображається на екрані), текст має гіперпосилання (які розкривають поняття, доповнюють текст ілюстраціями, таблицями, відеороликами тощо), глосарій (словник), засоби контролю якості засвоєння навчального матеріалу.

Навчальний матеріал в електронному інтерактивному підручнику представлений у вигляді дерева навчання, має ієрархічну структуру, за допомогою якої можна вибрати необхідний розділ для вивчення. У середині кожного розділу наведено технічний опис досліджуваного обладнання, його інтерактивні 2D і 3D моделі, принципові електричні, пневмо- і гідросхеми обладнання екологічного моніторингу, показаний принцип дії систем (агрегатів) і їх компонентів, а також порядок виконання технологічних

операцій при застосуванні моніторингового обладнання за призначенням, технічного обслуговування з використанням анімації та звукового текстового супроводу. Використовуючи гіперпосилання, можна вибрати об'єкти для вивчення, починаючи з елементів конструкції та датчиків систем спостереження і закінчуючи ДПЛА екологічного спостереження в цілому. Технічний опис обладнання, його тактико-технічні характеристики, порядок виконання технологічних операцій, довідкові таблиці і інші матеріали наводяться у відповідності з конструкторською і експлуатаційною документацією.

Електронний інтерактивний підручник тренажера ДПЛА доцільне реалізувати у вигляді програмного комплексу навчання, який складається з трьох програмних засобів: – графічного відображення операцій; – управління процесами навчання і тестування; – контролю засвоєння матеріалу оператором.

Оператор тренажера ДПЛА включає модуль оцінки і контролю, що дозволяє отримати певний результат (показник), що відображає якість засвоєння знань (умінь, навичок). Результатом роботи модуля оцінки і контролю є відомості про рівень знань конкретного оператора на поточний момент. На основі цих відомостей інструктор керує процесом навчання. Всі дані про процес освоєння навчального матеріалу оператором тренажера, отримані оцінки архівуються і дозволяють здійснювати аналіз ступеня засвоєння програми навчання і сформулювати пропозиції щодо усунення недоліків. Електронний інтерактивний підручник включається до складу апаратно-програмного комплексу тренажера ДПЛА, який має в своєму складі: серверну частину, мережеве обладнання, клієнтську частину – автоматизоване робоче місце на базі ПЕОМ, загальносистемне та спеціальне програмне забезпечення.

Сценарій використання електронного інтерактивного підручника тренажера ДПЛА екологічного спостереження приведено на рис. 4.1.

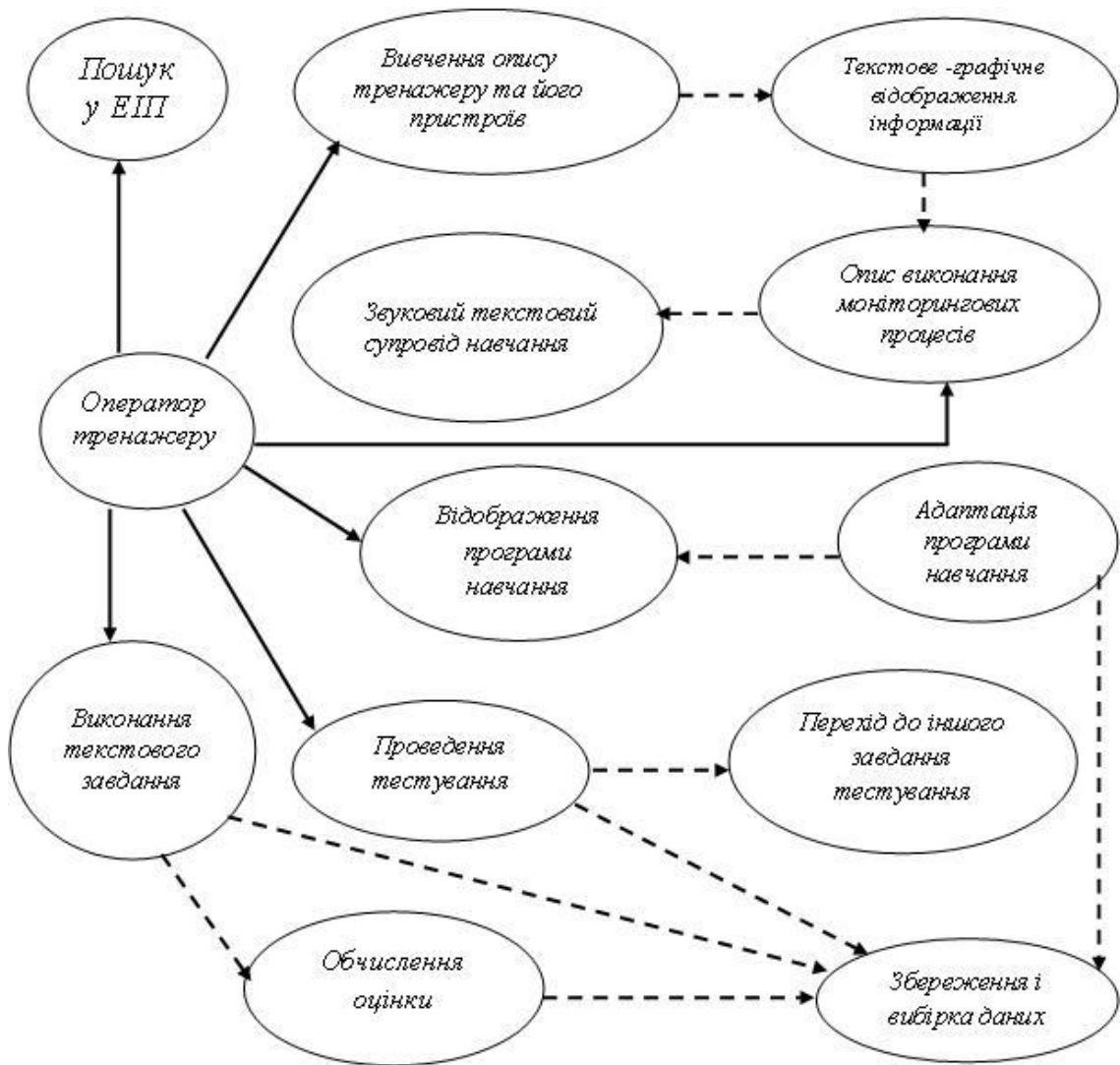


Рис. 4.1. Сценарій використання електронного інтерактивного підручника тренажера ДПЛА екологічного моніторингу

*Індивідуальний тренажер* призначений для формування, вдосконалення, відновлення і підтримання на необхідному рівні практичних умінь і навичок індивідуальної операторської діяльності з виконання технологічних операцій на тренажері ДПЛА як в штатних (певних ЕД) умовах а також при виникненні надзвичайних ситуацій в польоті ДПЛА.

Індивідуальний тренажер реалізує наступні функції:

- моделювання функцій ДПЛА і зовнішньої обстановки в усьому діапазоні зміни її характеристик, у всіх режимах і умовах застосування;
- моделювання переміщень органів управління ДПЛА, забезпечення просторового і тимчасового відповідності імітованих і реальних візуальних об'єктів і процесів моніторингу;

- відтворення навчальної інформації в реальному і регульованому (уповільненому або прискореному) масштабах часу;
- автоматична демонстрація (показ) еталонного виконання завдання;
- ускладнення умов виконання завдання в міру набуття навичок оператора;
- зупинка тренування за командою інструктора;
- відпрацювання оператором не тільки всього завдання, а й окремих його елементів (при необхідності);
- видача оператору підказок про необхідні дії або докладних роз'яснень залежно від виду помилки і етапу підготовки;
- звуковий супровід тренінгу (супровід виконуваних технологічних операцій, команди, доповіді і т.п.);
- відпрацювання завдань в режимі самонавчання без залучення інструктора і без обмеження числа спроб з правом вибору темпу, послідовності відпрацювання, рівня складності завдання;
- багаторазове вивчення без залучення інструктора процесу еталонного виконання завдання;
- захист робочих програм від збоїв, викликаних помилковими діями оператора тренажера;
- відтворення інструктажу оператора про порядок і правила користування тренажером і виконанні навчальних завдань;
- автоматичний контроль проведення тренування на тренажері з сигналізацією інструктору про відволікання уваги або допущених оператором помилок.

Сценарій використання індивідуального тренажера ДПЛА екологічного спостереження приведено на рис. 4.2.

*Колективний тренажер* призначений для формування, вдосконалення, відновлення і підтримання на необхідному рівні у тих, хто навчається, практичних умінь і навичок колективного виконання моніторингових технологічних операцій у складі групи в штатних умовах застосування

ДПЛА, а також при виникненні надзвичайних (нештатних, аварійних ситуацій).

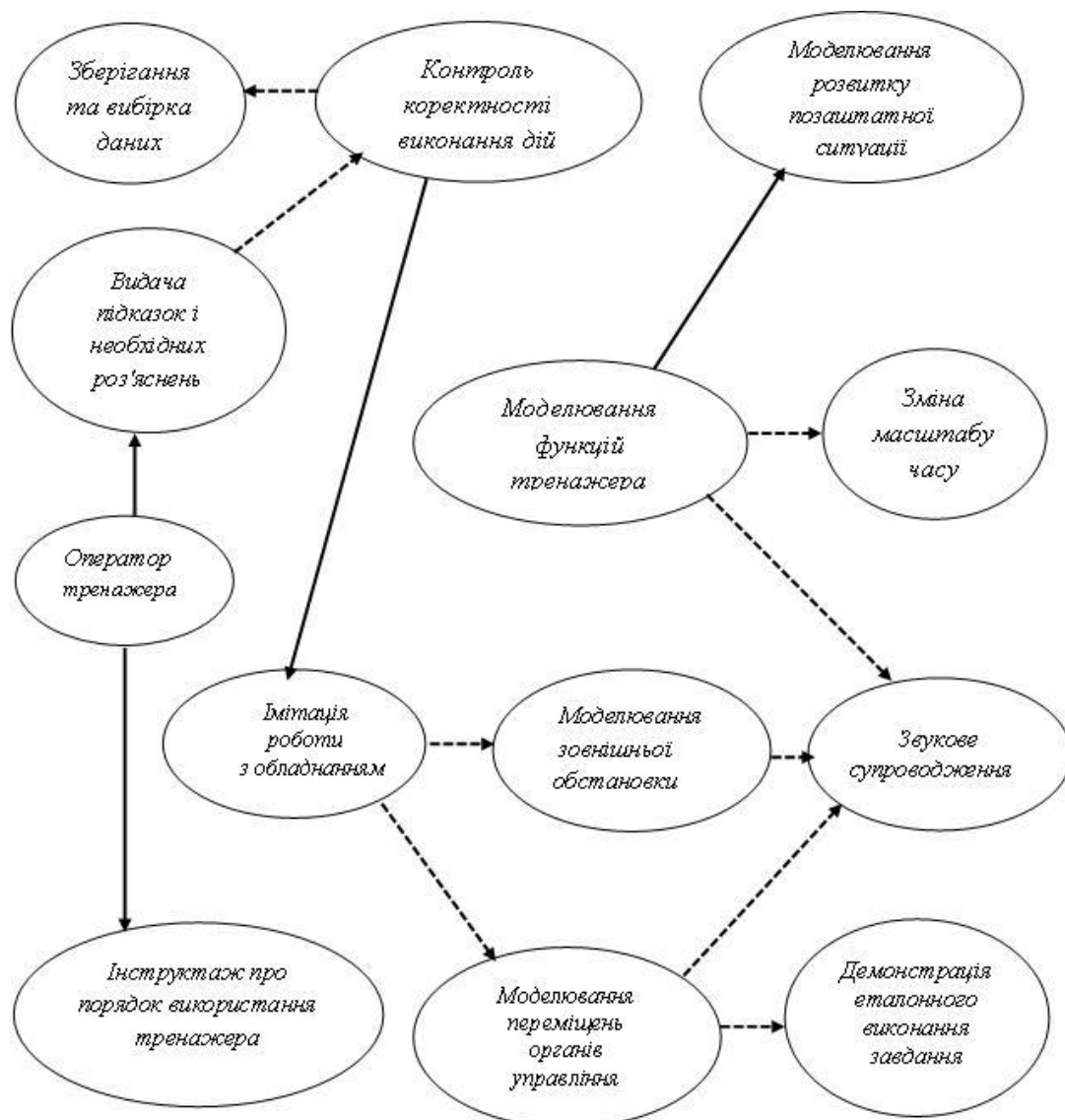


Рис. 4.2. Сценарій використання індивідуального тренажера ДПЛА екологічного моніторингу

Підсистема атестації персоналу призначена для проведення атестації оператора тренажера за результатами навчання.

Підсистема атестації персоналу реалізує наступні функції:

- ознайомлення з критеріями оцінювання якості діяльності, рівня навичок і вмінь, з поточним рівнем підготовки і з прогнозованою датою закінчення підготовки;

- порівняння своїх результатів навчання з результатами інших операторів;

- контроль параметрів, що характеризують якість роботи оператора, їх порівняння з нормативними за критеріями, що відповідають даному етапу навчання і умов тренування, що обирається інструктором;

- накопичення інформації про тенденції розвитку знань, умінь і навичок;

- видача інструктору оператора тренажера інформації про якість діяльності оператора, тенденції розвитку навичку і про його помилки;

- об'єктивна оцінка злагоженості як у групі операторів, так і злагоженості взаємодіючих груп;

- документування основних подій, дій операторів, відповідей та інших даних для подальшого зберігання та відтворенні в реальному, уповільненому або прискореному масштабі часу для оцінки ходу тренування;

- реєстрація операторів, облік відвідування та успішності планування занять;

- видача операторам програм навчання і завдань на додаткове вивчення матеріалу;

- складання звітів за результатами навчання.

Сценарій використання підсистеми атестації персоналу та тренажері ДПЛА екологічного спостереження приведено на рис. 4.3.

*Підсистема підтримки прийняття рішень при виникненні надзвичайних ситуацій* призначена для формування у персоналу тренажера навичок і компетенцій прийняття обґрунтованих рішень при виконанні моніторингових операцій в умовах виникнення розрахункових і нерозрахованих надзвичайних ситуацій, а також інформаційної підтримки прийняття рішень при виникненні надзвичайних ситуацій в повсякденній діяльності з експлуатації тренажера ДПЛА екологічного моніторингу.

Підсистема підтримки прийняття рішень реалізує наступні функції:

- збір, накопичення і систематизація інформації за передбаченими надзвичайним ситуаціям, які мали місце в процесі експлуатації тренажера (реального польоту ДПЛА) і порядку виходу з них;

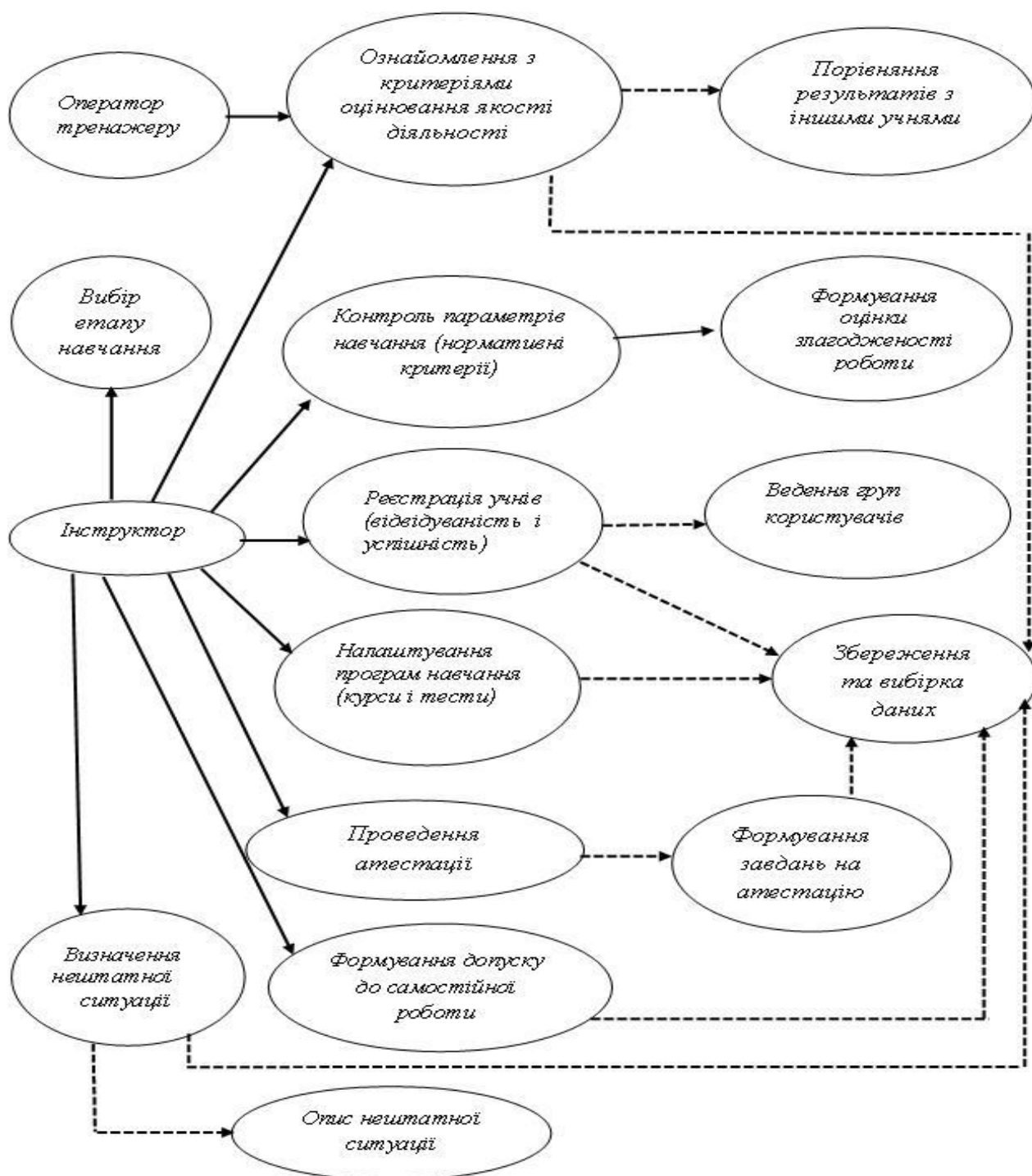


Рис. 4.3. Сценарій використання підсистеми атестації персоналу та тренажері ДПЛА екологічного моніторингу

- надання інформації за порядком виходу з аварійних ситуацій (перелік першочергових заходів, найбільш ймовірні сценарії розвитку, ймовірні небезпечні зони польоту ДПЛА тобто;

- оцінка можливостей несприятливих наслідків при прийнятті рішень щодо виходу з непередбачених надзвичайних ситуацій;

- надання інформації для вибору критерію рішення щодо виходу з надзвичайних ситуацій.

Сценарій використання підсистеми прийняття рішень приведено на рис. 4.4.

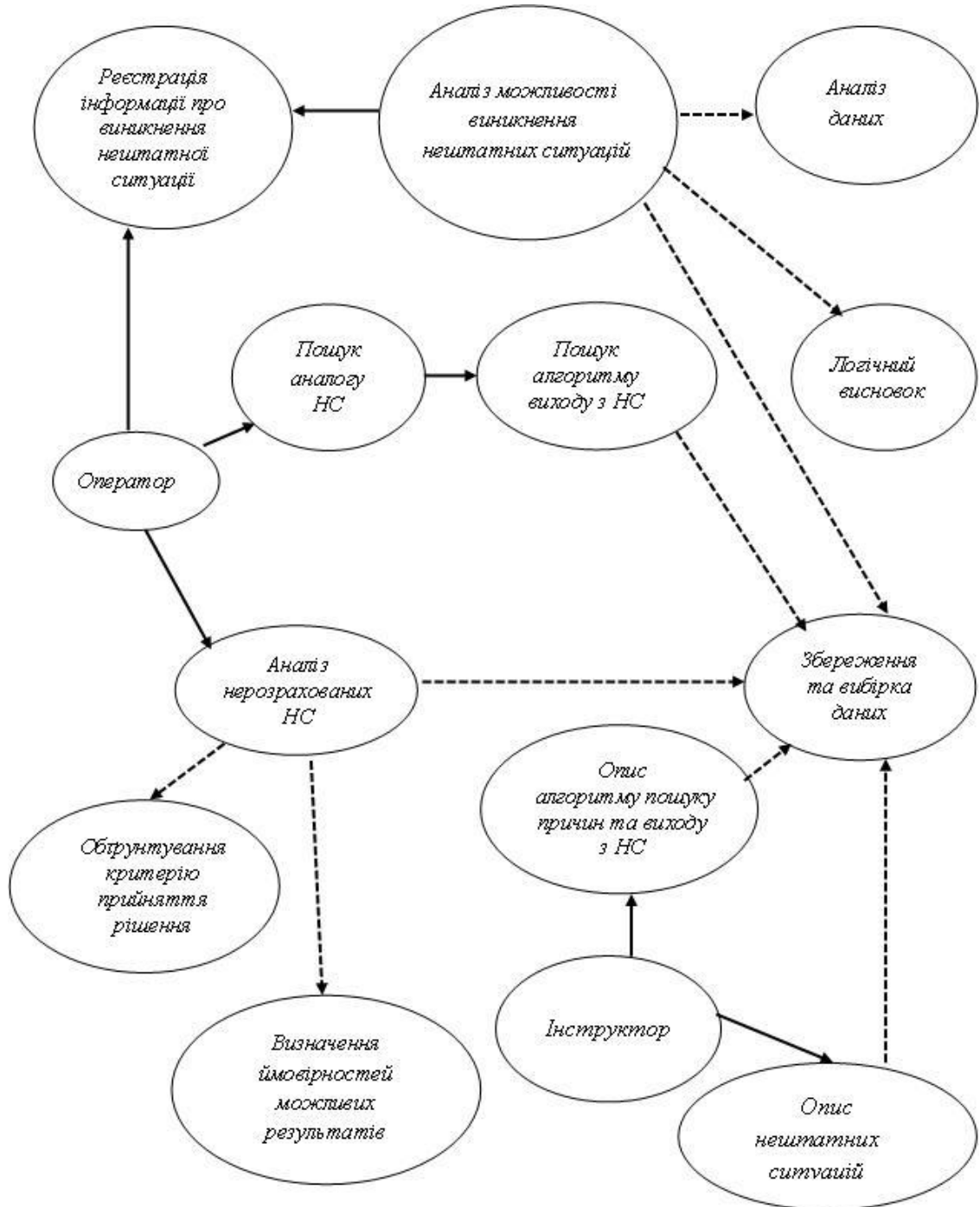


Рис. 4.4. Сценарій використання підсистеми прийняття рішень на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу



*Підсистема інформаційної підтримки професійної діяльності* оператора ДПЛА призначена для автоматизації процесів збору та подання оперативної інформації про технічний стан тренажера, планування експлуатаційних процесів і контролю за їх виконанням. Підсистема інформаційної підтримки професійної діяльності реалізує наступні функції:

- планування та автоматизований контроль виконання експлуатаційних процесів (технічне обслуговування, ремонт, дороблення, огляд наглядовими органами, рекламатійна робота і т.п.) на всіх етапах експлуатації тренажера (введення в експлуатацію, приведення і підтримання в готовності, застосування за призначенням);

- збір, систематизація і подання оперативної інформації про технічний стан обладнання комплексного тренажера і прогнозуванні його зміни;

- ведення в електронному вигляді необхідної експлуатаційної та звітної документації;

- надання в електронному вигляді експлуатаційної, конструкторської, нормативно-технічної та довідкової документації.

Сценарій використання підсистеми інформаційної підтримки професійної діяльності оператора ДПЛА екологічного спостереження приведено на рис.4.5.

Запропоновані складові (функціональні підсистеми) визначають базовий функціональний склад тренажера ДПЛА екологічного моніторингу.

*Структурно-функціональна модель комплексної автоматизованої навчальної системи для професійної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження.*

На основі розроблених функціональних підсистем розроблена структурно-функціональна модель тренажерного комплексу ДПЛА (рис. 4.6), що забезпечує вирішення завдань використання тренажера і підтримки прийняття рішень. Структурно-функціональна модель визначає склад основних компонентів комплексного тренажера ДПЛА, ключові модулі, їх функціональне призначення, інтерфейси і показує перелік користувачів.

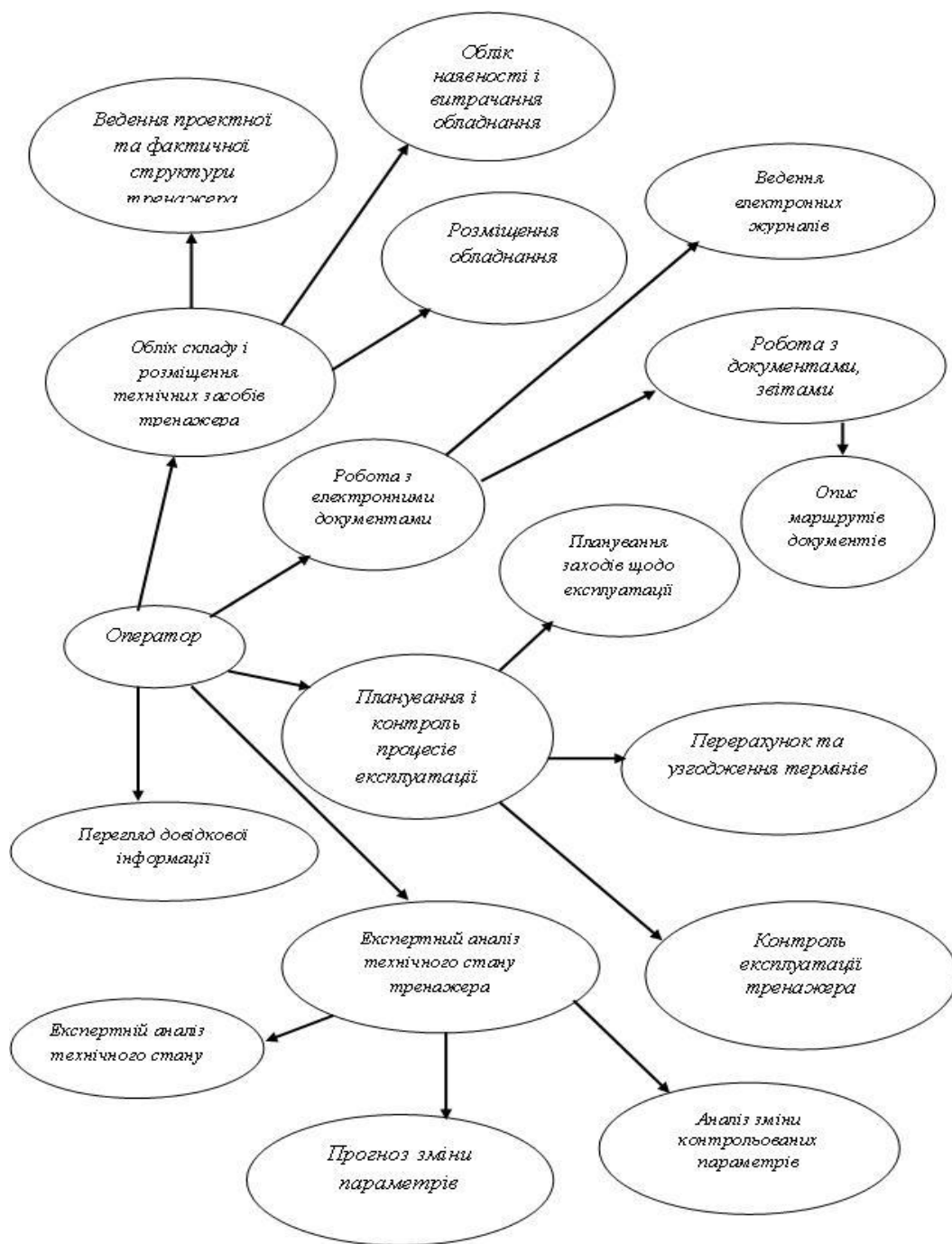


Рис. 4.5. Сценарій використання підсистеми інформаційної підтримки професійної діяльності оператора ДПЛА екологічного спостереження

Важливим аспектом при створенні комплексного тренажера є початкове наповнення, яке повинно формуватися на підставі регламентуючих документів, опису реального обладнання ДПЛА, а також методичного досвіду з теоретичної та практичної підготовки, якими володіє педагогічний склад профільних навчальних закладів. Ця інформація формується у вигляді

бази знань і з використанням онтологічної моделі предметної області визначає технологію надання інформації операторам.

Оператор з використанням електронного інтерактивного підручника, індивідуального, колективного тренажера має можливість пройти як теоретичну підготовку з використанням всіх сучасних засобів представлення інформації (2D-зображення, 3D-моделі, анімація, мнемосхеми, карти, табличний, мережеве та лінійне представлення технологічних графіків і т.п. ), так і практичного відпрацювання навичок виконання технологічних процесів і виходу з надзвичайних ситуацій, які можуть виникнути при експлуатації реального ДПЛА екологічного спостереження.

Персонал комплексного тренажера за допомогою підсистеми інформаційної підтримки вирішує повсякденні експлуатаційні завдання. При цьому, при виникненні надзвичайних ситуацій з використанням відповідної підсистеми приймаються обґрунтовані рішення щодо виходу з нештатних, аварійних ситуацій.

Запропонована структурно-функціональна модель тренажера (рис.4.6.) забезпечує реалізацію всіх функцій ДПЛА екологічного спостереження. Слід зазначити ключові відмінності представленої структурно-функціональної моделі від існуючих аналогів [54,65, 77, 90].

Інтерактивні електронні технічні інструкції та настанови, описані в літературі, в загальному випадку можуть відповідати або не відповідати загальновизнаним підходам і специфікаціям (наприклад, S1000D, CALS-технології). Але всі вони будуються за принципом структурованого подання інформації без урахування особливостей засвоєння даної інформації учнем. У представленій структурно-функціональній моделі передбачено модуль автоматичної адаптації. Його основне призначення – забезпечити автоматичне підстроювання курсу відповідно до ступеня засвоєння матеріалу. За участю педагогічного складу профільних галузевих університетів описується онтологічна модель процесу засвоєння матеріалу з урахуванням вимог до фахівців наземних служб забезпечення польотів і

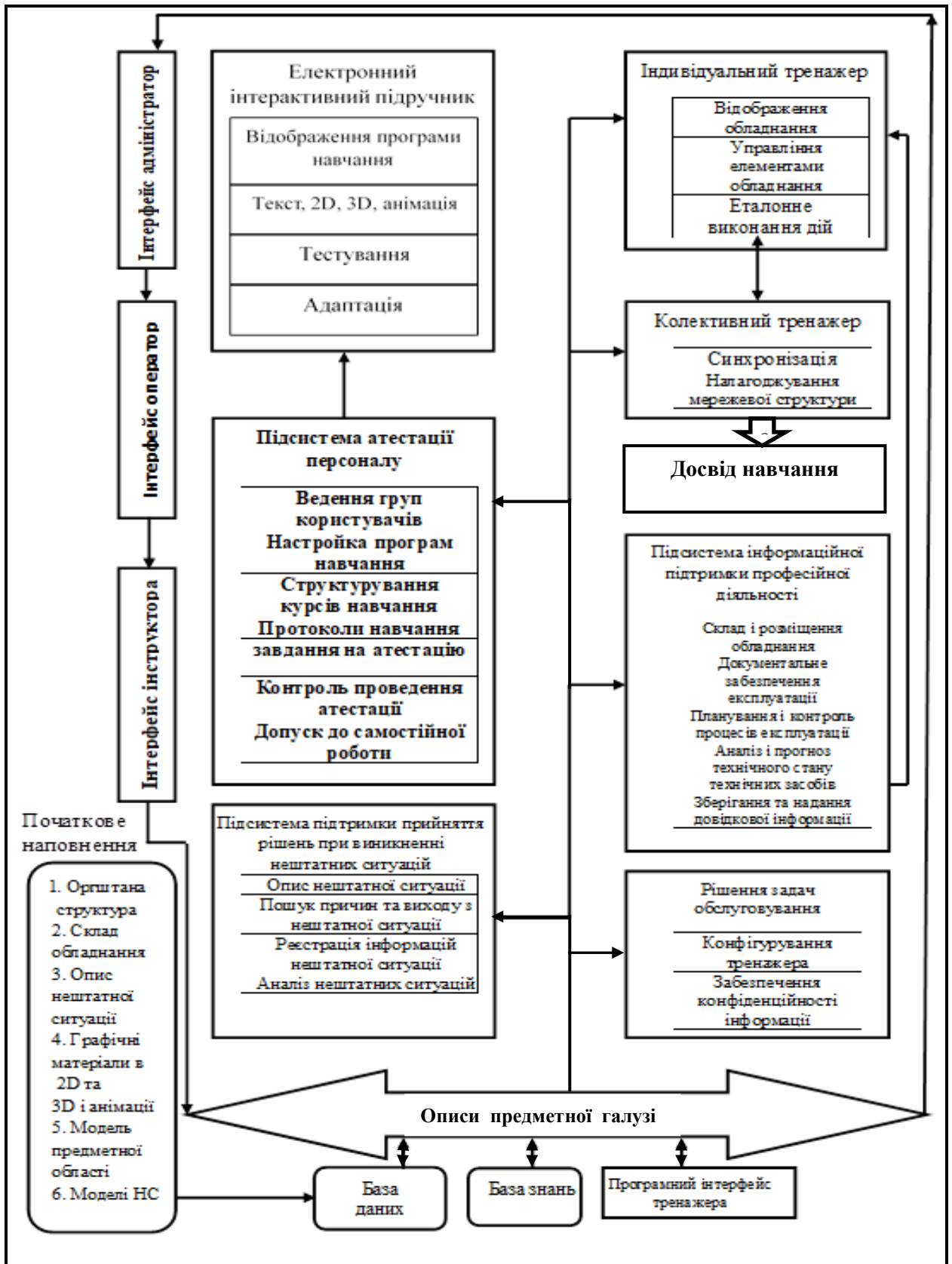


Рис. 4.6. Запропонована структурно-функціональна модель тренажера ДПЛА екологічного моніторингу

сучасних методів навчання. Дана модель є основою для підготовки оператора з використанням інтерактивного електронного інструктора. У найпростішому випадку вона включає повторне надання для вивчення недостатньо засвоєних розділів документації.

Імітація надзвичайних ситуацій передбачає їх моделювання, дозволяючи оператору отримувати навички з пошуку алгоритму виходу, але цим його функції не обмежуються. При цьому забезпечується також робота з непередбаченими надзвичайними ситуаціями. Тому вихід з нештатних ситуацій може бути виконаний з використанням декількох додаткових операцій технологічного процесу і в загальному випадку вимагає формування нового алгоритму виходу.

Імітація надзвичайних ситуацій передбачає їх моделювання, дозволяючи оператору отримувати навички з пошуку алгоритму виходу, але цим його функції не обмежуються. При цьому забезпечується також робота з непередбаченими надзвичайними ситуаціями. Тому вихід з нештатних ситуацій вимагає формування нового алгоритму виходу.

Відповідно, після виявлення надзвичайної ситуації оператор тренажера ДПЛА повинен визначити відсутність її опису в базі знань та прийняти рішення про подальші дії. При навчанні виходу з надзвичайної ситуації в моделі (в базі знань тренажера) передбачені стратегії, яких повинен дотримуватися інструктор, і критеріїв прийняття рішення.

Такими стратегіями можуть бути: прагнення виконати цільове завдання без зміни терміну закінчення; намір виконати цільове завдання, але з перенесенням терміну закінчення; рішення припинити виконання експлуатаційного процесу.

Вихідні дані для комплексного тренажера ДПЛА у вигляді навчальних модулів, що містять всю мультимедійну і текстову інформацію, а також програмні моделі і зовнішній вигляд елементів імітованих систем і агрегатів і опис імітованих технологічних процесів вводяться на етапі розроблення

тренажера. Надалі у інструктора є можливість змінити тільки послідовність навчання, склад досліджуваних розділів і ввести нові непередбачені надзвичайні ситуації. Зміна базової онтологічної моделі може виконати тільки інструктор, але сама модель змінюється розробниками системи.

#### **4.2. Склад тренажерного комплексу для професійної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження**

*Індивідуальний тренажер для підготовки операторів групи ДПЛА екологічного спостереження.*

Тренажер ДПЛА екологічного моніторингу представляє собою процедурний тренажер, що імітує реальне робоче місце оператора системи управління ДПЛА екологічного спостереження за всіма видами моніторингового обладнання. Тренажер дозволяє виробити навички виконання відповідних технологічних операцій з підготовки ДПЛА до пуску, саме пуску, керування в польоті, повернення на визначену ділянку посадки. В тренажері ДПЛА повинні бути реалізовані екранні симулятори органів керування самого ДПЛА та органів управління апаратури спостереження обладнання. Запам'ятовування правильної послідовності дій на початковому етапі підготовки досягається за рахунок тренінгу шляхом блокування неправильних дій. При цьому оператору тренажера надається можливість не тільки керувати роботою обладнання за допомогою віртуальних органів управління, а й відстежувати його реакцію в цілому, спостерігаючи на моніторі змодельований відгук досліджуваної системи. Таким чином, процес придбання навичок роботи з пультовим обладнанням стає наочним і глибоко осмисленим. Візуальні образи досліджуваних об'єктів моніторингу створені за допомогою імітатора візуальної обстановки. Для реалізації рухів, динамічних процесів або фізичних явищ використана програмна анімація.

Реалізується звуковий супровід тренінгу (супровід виконуваних технологічних операцій, команди, доповіді і т.д.). Для більшої наочності процесу доцільне передбачити використання відеофрагментів.

Взаємодія користувача з об'єктами комплексного тренажера реалізується за допомогою впливу маніпулятором віртуальних органів управління (або за допомогою використання сенсорного монітора). Моделювання штатного експлуатаційного процесу ДПЛА екологічного спостереження і надзвичайних ситуацій виконується на основі сценаріїв. У сценарії описані правильна послідовність дій операторів, пов'язаних у часі в єдиний технологічний процес (у і залежності від стану досліджуваного об'єкта). Сценарій визначає зміни стану об'єктів моніторингу, що виникають в результаті зовнішніх подій. Тренажер ДПЛА дозволяє забезпечити можливість виконання правильних і неправильних дій оператором і відповідно до закладеної моделі здійснювати екологічний моніторинг визначених об'єктів, районів.

Крім штатних технологічних процесів в тренажері реалізується можливість підключення та моделювання сценаріїв виникнення надзвичайних ситуацій, а також виконання оператором правильної послідовності дій для виходу з них і приведення ДПЛА в штатний стан.

У запропонованій типовій архітектурі тренажера забезпечується два способи управління інформаційною підтримкою: інтерактивне та контекстне управління.

Інтерактивне управління має на увазі відображення інформації на вимогу оператора з урахуванням ситуації, в якій він знаходиться.

При контекстному управлінні інформація відображається не з ініціативи користувача-оператора, а в залежності від поточної ситуації (наприклад, якщо оператор припустився помилки).

В якості інформаційної підтримки можуть застосовуватися текстові та гіпертекстові структури, флеш-анімація, діалогові вікна, таблиці, фотографії, тривимірні моделі, мнемосхеми і т.п.

Структурно тренажер ДПЛА екологічного спостереження представляє собою спеціальне програмне забезпечення двох типів автоматизованих робочих місць (АРМ): керівника навчання (інструктора) і того, хто навчається (оператор). АРМ інструктора є центральною ланкою комп'ютерного тренажера і призначений для вирішення наступних завдань:

- настройка сеансу навчання (тренування), яка включає в себе: вибір сценарію і переліку модельованих етапів моніторингового технологічного процесу, призначення конкретних операторів на ролі учнів, визначення складу і параметрів моделювання надзвичайних ситуацій.

- управління роботою тренажера і синхронізація роботи всіх АРМ відповідно до заданого технологічного процесу. Моделювання станів об'єктів моніторингу за закладеною моделлю з урахуванням внутрішніх дій тих, хто навчається і зовнішніх параметрів, заданих інструктором (керівником навчання);

- збір з АРМ результатів навчання і накопичення статистики навчання з подальшим записом інформації в базу даних;

- забезпечення можливості інструктору (керівнику навчання) в режимі реального часу і в режимі післясеансного аналізу контролювати хід виконання технологічного процесу, отримувати детальну і інтегровану персоналізовану інформацію при правильних і неправильних діях операторів.

На АРМ оператора ДПЛА покладаються такі завдання:

- візуальне відображення віртуальних пристроїв управління ДПЛА і забезпечення можливості керування польотом та спеціальною апаратурою;

- реалізація різних спеціальних ефектів з використанням дво- і тривимірної графіки, флеш-анімації, засобів мультимедіа;



- контроль дій оператора тренажера, перевірка коректності виконаної дії, інформування учнів про некоректні дії;

- інформаційна підтримка учня з виведенням на екран контекстної допомоги в залежності від виконуваних дій, етапів польотного завдання, складеної ситуації в польоті (наприклад, виникнення надзвичайних ситуацій), показ навчальних матеріалів в різних формах подання;

- оброблення та виконання внутрішніх керуючих команд тренажера, що надходять з АРМ інструктора (керівника навчання), наприклад, команди на дозвіл або заборону виконання дій з пристроями управління, на зміну польотного завдання тощо);

- передача на АРМ інструктора (керівника навчання) інформації про вчинені оператором вірних і невірних дій в процесі виконання польотного завдання.

Варіант реалізації екранної форми індивідуального тренажера наведено на рис. 4.7.

*Колективний тренажер для підготовки операторів групи ДПЛА екологічного спостереження.*

В рамках НДР «Розробка нормативно-методичного документа – рубризатора завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем ДЗЗ та ГІС» (0118U005461) запропоновано комплексний тренажер, який призначений для підготовки операторів групи ДПЛА екологічного спостереження.

Такий тренажер відкриває нові функціональні можливості екологічного моніторингу:

- групове навчання практичним навичкам і проведення тренувань;
- моделювання роботи групи операторів (або роботи одного оператора з групою ДПЛА) з технологічним обладнанням і пристроями екологічного моніторингу в штатних та нештатних ситуаціях;

- контроль дій тих, хто навчається, формування та збереження протоколів правильних і помилкових дій операторів.



Рис. 4.7. Варіанти реалізації екранної форми індивідуального тренажера.  
Варіант реалізації екранної форми колективного тренажера  
представлений на рис. 4.8.

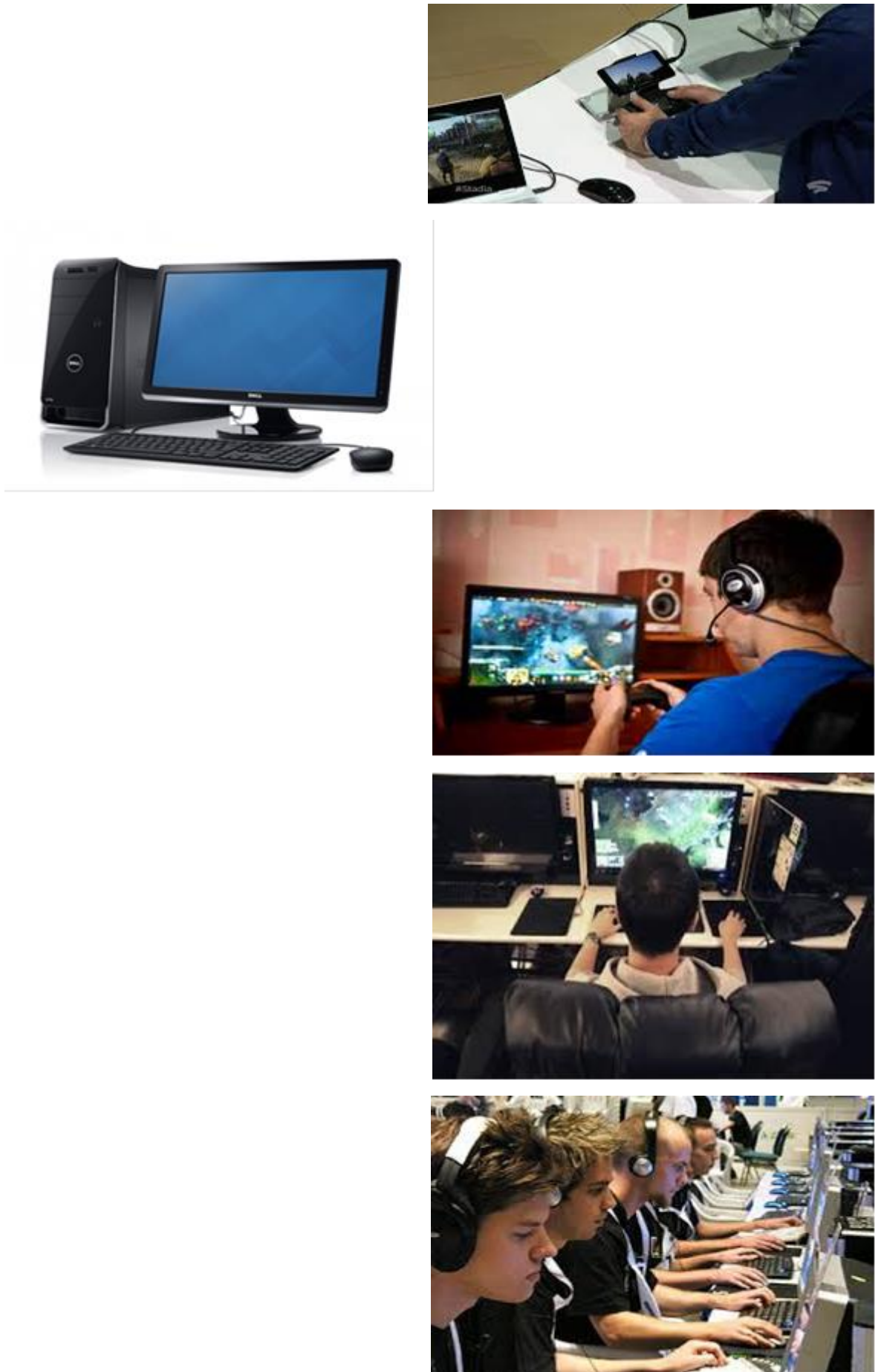


Рис. 4.8. Варіант реалізації екранної форми колективного тренажера

### **4.3. Проведення імітаційного моделювання та оцінювання якості підготовки оператора ДПЛА на тренажерному комплексі екологічного спостереження**

В основу функціонування комплексного тренажера ДПЛА екологічного моніторингу можуть бути покладені моделі навчання, що спираються на інтерактивну взаємодію оператора тренажера з імітаційними моделями самого апарату та апаратури екологічного спостереження. В результаті система гарантує досягнення необхідного рівня практично всім операторам ДПЛА.

Зокрема, надзвичайні ситуації і дії в них слід розглядати вже з початкових етапів освітнього процесу (передбачені надзвичайні ситуації), а в ході виконання завдань наступних етапів доцільно ускладнювати завдання, пов'язані з пошуком рішення щодо виходу з надзвичайних ситуацій.

*Побудова індивідуальної освітньої траєкторії при навчанні з використанням тренажера ДПЛА екологічного моніторингу*

Порядок роботи оператора в умовах застосування автоматизованої навчальної системи тренажера визначається або жорстким сценарієм, заданим розробником тренажера, або вибирається з набору типових сценарних схем. [105-108]. При розробці моделі функціонування комплексного тренажера ДПЛА екологічного моніторингу за основу взята модель, описана в [86, 87]. Модель функціонування комплексного тренажера ДПЛА екологічного моніторингу може бути представлена графом і матрицею на рис.4.9.

Дана модель діє на кожному з п'яти етапів навчання, а саме:

Етап 1 – отримання теоретичних знань про конструкцію тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу, принципах його дії, правилах і заходах безпеки при його експлуатації.

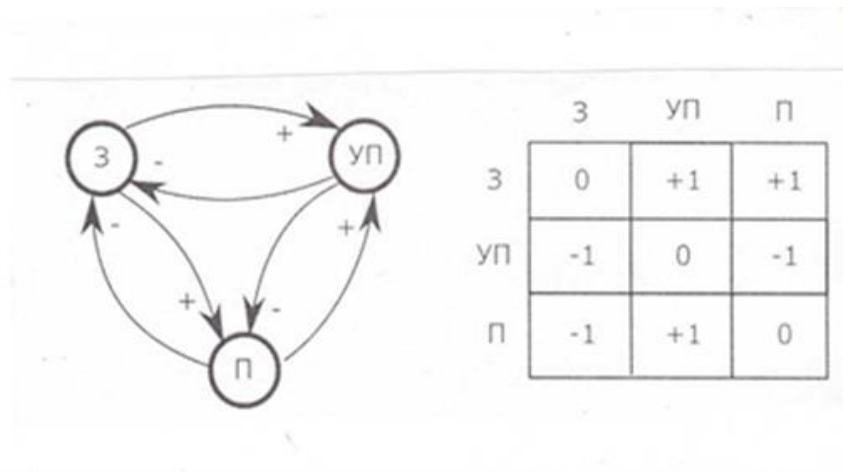


Рис. 4.9. Орієнтований граф моделі функціонування тренажера і його матриця суміжності

Етап 2 – вивчення технології експлуатації тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу, порядку виконання типових моніторингових технологічних операцій та експлуатаційних процесів, що проводяться з тренажером.

Етап 3 – формування умінь і навичок практичного індивідуального виконання типових моніторингових технологічних операцій та експлуатаційних процесів.

Етап 4 – придбання навичок практичної роботи в команді в складі групи операторів, в т.ч. навичок керівництва групою, включаючи прийняття рішень в разі виникнення надзвичайних ситуацій.

Етап 5 – придбання компетенцій щодо прийняття обґрунтованих рішень щодо виходу з непередбачених надзвичайних ситуацій.

На модулі функціонування тренажера вершина графа З – це кількість контрольних завдань (питань або вправ), які пред'являються тому, якого навчають в процесі підготовки на тренажері для засвоєння будь-якого навчального матеріалу.

Вершина УП – це рівень підготовленості, який обчислюється як відношення  $УП = ПЗ/З$ , де ПО – кількість правильних виконаних контрольних завдань (відповідей на питання). При цьому значення УП лежать в інтервалі  $[0,1]$ .

Вершина  $\Pi$  – це рівень допомоги, що надається оператору тренажера, якого навчають в ході виконання контрольних завдань (вправ). Це може бути пропозиція і теоретична інформація або повна відповідь на питання (повний опис процесу рішення вправи). Залежно від ступеня повноти допомоги величина  $\Pi$  представляється в інтервалі  $[0,1]$ , де 0 – це відсутність допомоги; 1 – повне рішення контрольного завдання (відповідь на питання) викладачем (інструктором) з розбором і обґрунтуванням.

Ребра даного графа, крім орієнтації, характеризуються числовими параметрами дуг  $a_k$  ( $k = 1, 2, \dots, 6$ ). Суть параметрів  $a_k$  можна пояснити на прикладі так званого знакового орієнтованого графа (рис. 4.9.). Дуга, що зв'язує вершину З з вершиною УП, має знак +. Це означає, що збільшення кількості питань-вправ веде до збільшення рівня підготовленості, а зменшення З – до зменшення УП. Дуга, що зв'язує УП з З має знак –. Це означає, що збільшення УП веде до зменшення З, а зменшення УП – до збільшення З. Знаковий граф є окремим випадком зваженого орієнтованого графа, коли параметри  $a_k$  цілочисельні і приймають значення +1 або –1, що відображається в матриці суміжності.

Таким чином, на початковому етапі побудови моделі встановлюються на якісному рівні зв'язку між різними характеристиками процесу навчання на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу. В процесі моделювання сценарію реального процесу навчання з'являються додаткові чинники, які кардинальним чином змінюють лінійну схему освітнього процесу, що може бути продемонстровано переходом від найпростішої моделі навчання, до більш складних моделей, що враховують індивідуальні здібності учня, як представлено на рис. 4.10.

У модель включені такі додаткові чинники (вершини): – УМ – обсяг досліджуваного навчального матеріалу; – УС – рівень складності матеріалу; – Сп – рівень здібностей учня.

Їх величини, що характеризують вихідні показники модельованого процесу, також можна нормувати до інтервалу  $[0,1]$ . У даній моделі вони

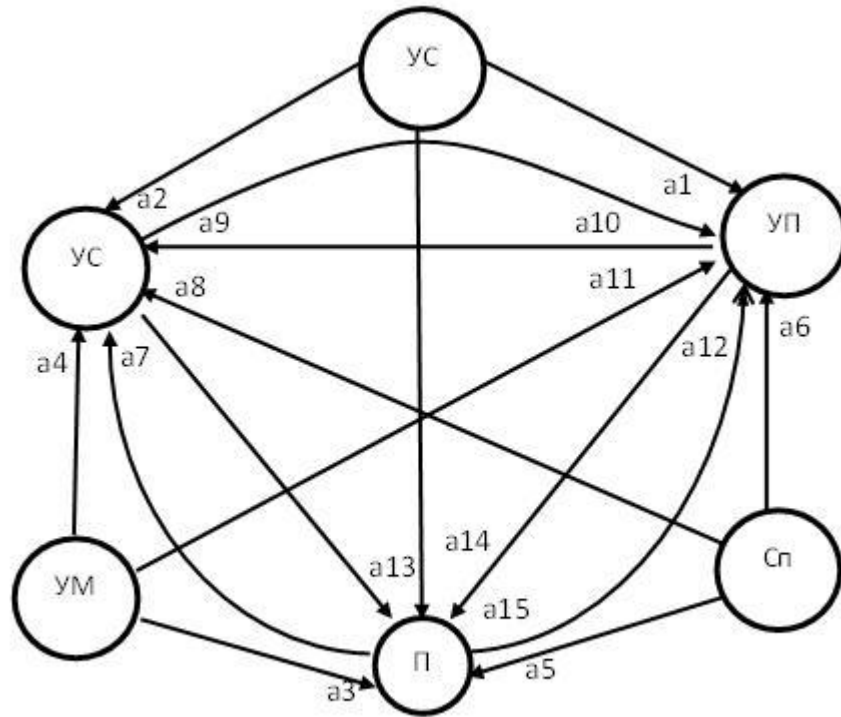


Рис. 4.10. Граф моделі навчання із застосуванням тренажера ДПЛА екологічного моніторингу

впливають лише на вершини З, УП і П, але зворотних зв'язків від них не мають. Вплив один на одного вершини УМ, УС, Сп також не роблять. Аналіз дозволяє визначити знаки ребер (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1

#### Знаки ребер орієнтованого графа

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
+	–	+	–	–
$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
+	+	+	–	–
$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
–	+	+	+	–

Запропонована модель дозволяє будувати індивідуальні навчальні технології для о Для підвищення результативності процесу навчання до

складу тренажера ДПЛА доцільне застосувати додатковий канал контролю за зміною функціонального стану оператора під час відпрацювання їм завдань щодо виходу з надзвичайних ситуацій.

При цьому практична форма реалізації контролю може здійснюватися як без використання приладових систем, так і з їх використанням. Можлива схема контролю функціонального стану оператора тренажера з використанням приладного обладнання (рис. 4.11) передбачає використання додаткових технічних засобів, що дозволяють оцінити поточний психофізіологічний стан оператора тренажера [86-88, 90]. ператора тренажера ДПЛА.

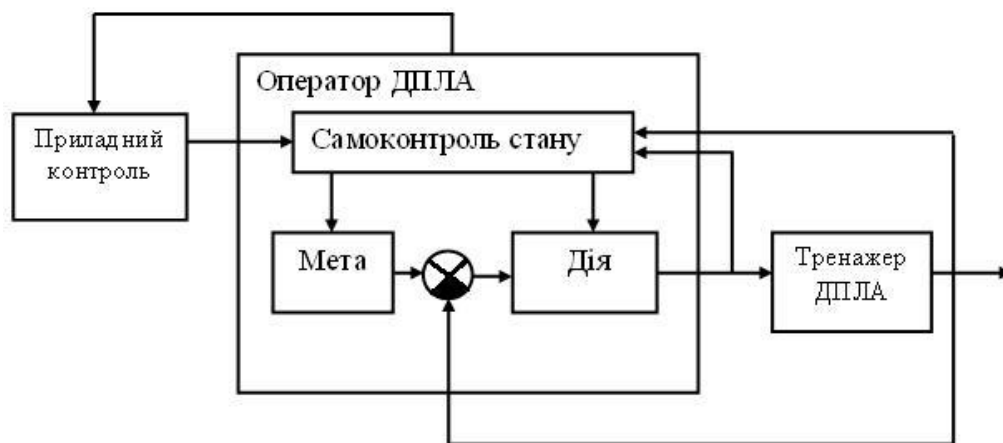


Рис. 4.11. Схема навчання на тренажері з приладним контролем стану оператора

Цей варіант реалізації забезпечує наочність спостережень за функціональним станом оператора тренажера і контролю освоєння їм методики ефективних дій в різних ситуаціях. При цьому подібні системи контролю повинні бути дворівневими. Перший рівень призначений для самоконтролю оператора за своїм станом, а другим – для зовнішнього спостереження, пов'язаного з прийняттям рішень про допуск або



відсторонення конкретного виконавця від роботи. Моніторинг змін стану оператора при виконанні ним завдань тренажерної підготовки може використовуватися для формування цілісного висновку про ступінь виробленості професійних навичок і готовності переходу до занять в умовах реальної практичної діяльності. Саме цей підхід дозволяє побудувати індивідуальну програму навчання за зовнішнім контролем правильності дій оператора. В результаті використання запропонованого підходу доведеться кардинально переглянути методику оцінювання якості формування професійних компетенцій в процесі навчання.

Класичний підхід до оцінювання результату навчання (тренування) на тренажері може бути зведений до критерію якості, близькому до тих, які використовуються для характеристик технічних засобів тренажера. Наприклад, якщо в результаті виконання тестового тренажного завдання оператор повинен забезпечити зміну вихідного стану керованого ним ДПЛА  $X_0$  до кінцевого стану  $X_T$  уздовж заданої траєкторії  $X^*(t)$ , то найпростіша оцінка точності виконання заданих дій може бути отримана у вигляді

$$I = \int_0^{\infty} (X^*(t) - X(t))^T A (X^*(t) - X(t)) dt \quad (4.1)$$

де  $I$  – інтегральна оцінка якості виконання завдання,  $A$  – обрана матриця вагових коефіцієнтів.

Функціональний стан організму оператора під час виконання тестового завдання можливо охарактеризувати вектором параметрів  $Y(t)$ , а його функціональний стан, прийняте за норму  $Y^*(t)$ , то сукупна оцінка якості виконання завдання може бути задана у вигляді

$$I = \int_0^{\infty} \left( (X^*(t) - X(t))^T A (X^*(t) - X(t)) + (Y^*(t) - Y(t))^T B (Y^*(t) - Y(t)) \right) dt \quad (4.2)$$

де  $A, B$  – матриці вагових коефіцієнтів.

З застосуванням (4.2) з'являється можливість більш точно оцінювати процес формування необхідних професійних навичок і принципово повному формувати мотивацію професійного удосконалення тренажних

навиків. Запропоноване кількісне оцінювання ефективності виконання завдання може виставити більш високий бал оператору, який допустив незначні відхилення від заданої траєкторії, але виконував завдання з меншою психофізіологічною напругою [94, 95].

#### **4.4. Розробка науково-методичного апарату підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження до дій в нештатних ситуаціях**

Підготовка до дій в надзвичайних ситуаціях є одним з найважливіших етапів професійної підготовки оператора тренажера ДПЛА екологічного спостереження.

Рішення, які необхідно приймати при експлуатації тренажера, можна умовно розділити на дві групи.

Перша група пов'язана з пошуком необхідної інформації, яка є в базі даних, і оформлена в формі експлуатаційного документа (плану, технічного завдання, акту та ін.). При цьому передбачається, що подібні рішення раніше вже приймалися, аналоги ситуації, що склалася є, і рішення є типовими.

Друга група пов'язана з обґрунтуванням послідовності дій в умовах відсутності аналогів.

За першою групою існують напрацьовані рішення як теоретичної [53-58], так і практичної спрямованості [59-95]. Зокрема, в цю групу входять передбачені надзвичайні ситуації.

По другій групі напрацювань поки небагато. З ускладненням тренажера ДПЛА екологічного моніторингу кількість ситуацій, що вимагають прийняття рішень другої групи, буде тільки зростати, оскільки заздалегідь неможливо передбачити всі можливі поєднання факторів, що впливають і варіанти поведінки об'єкта [91-93].

Завдання підготовки оператора щодо дій у подібних ситуаціях передбачає наступні етапи:

- обґрунтування класу надзвичайних ситуацій, для якого розробляється науково-методичний апарат;
- розробка моделі розвитку надзвичайних ситуацій;
- аналіз і обґрунтування можливих рішень, які можуть бути прийняті персоналом;
- розробка моделі оцінювання наслідків можливих рішень;
- аналіз та обґрунтування критерію прийняття рішення щодо виходу з надзвичайних ситуацій;
- розроблення моделі (алгоритму) прийняття рішення щодо виходу з надзвичайних ситуацій.

*Модель розвитку нештатної ситуації як послідовність прийнятих рішень.*

Вихід з надзвичайних ситуацій передбачає послідовність прийнятих рішень та умовно може бути розділений на декілька кроків (етапів). При цьому під етапом прийняття рішення розуміється період часу, протягом якого здійснюється процес аналізу інформації, оцінювання можливих варіантів рішення, вибору прийнятного варіанту на підставі обґрунтованої критерієм, його реалізація аж до надходження інформації, або обумовлює необхідність прийняття наступного рішення, або свідчить про повернення процесу в штатний режим. Кількість етапів прийняття рішення заздалегідь не відомо.

Якщо в результаті прийнятого рішення оператор переходить до штатних (планованих даним рішенням) дій, то подальших рішень не потрібно. В іншому випадку, тобто при появі інформації, яка свідчить про те, що процес зміни стану відбувається не у відповідності з прийнятим рішенням (вихід з надзвичайної ситуації не відбувається), потрібне прийняття нового рішення на основі аналізу ситуації, що склалася. Моделі розвитку подібних надзвичайних ситуацій можуть базуватися на математичному апараті теорії графів, теорії випадкових процесів, теорії нечітких множин, теорії ігор, теорії прийняття рішень [7, 109].

З точки зору поставленої задачі модель розвитку надзвичайної ситуації повинна описувати процес послідовного прийняття рішень оператором щодо виходу з надзвичайної ситуації. Такий підхід обумовлений такими причинами:

- оператор тренажера має на основі аналізу ситуації, що виникла сформулювати мету виходу з надзвичайної ситуації, або, іншими словами, вибрати стратегію виходу з надзвичайної ситуації;

- в результаті прийнятого рішення стан об'єкта, на якому сталася надзвичайна ситуація, змінюється, і модель повинна описувати можливі результати цього рішення;

- модель надзвичайної ситуації повинна дозволяти оцінювати результат всіх можливих рішень (ціну рішень) і можливість реалізації результатів цих рішень;

- модель повинна дозволяти приймати рішення за різними критеріями, що описує різні переваги (значимість виконання процесу і можливість його перенесення, ризик виникнення аварії, наслідки невиконання процесу і т.д.).

Для формування когнітивних компетенцій щодо прийняття рішень щодо виходу з надзвичайних ситуацій пропонується застосувати апарат теорії ігор [10, 11, 25, 111-133]. Процес виникнення і розвитку надзвичайної ситуації можна представити у вигляді антагоністичної гри  $G$  з двома учасниками: оператор, завданням якого є вихід з нештатної ситуації, і сама надзвичайна ситуація, розвиток якої може відбуватися за різними сценаріями, в тому числі і в залежності від прийнятих оператором рішень [69-71]. При цьому другий гравець, – “надзвичайна ситуація” є фіктивним гравцем. При формулюванні мети гри для оператора природно припустити, що він зацікавлений в максимально можливому виграші. Виграш є не тільки досягнення цільового результату процесу, або виконання цільової завдання (ВЦЗ), але і недопущення тяжких (серйозних, значних) наслідків розвитку надзвичайної ситуації, тобто запобігання можливого збитку або, принаймні, скорочення його до мінімуму. Що стосується цілей фіктивного гравця (“надзвичайна

ситуація”)), то про них нічого не можна точно сказати через невизначеність, яка пов’язана з причинами виникнення надзвичайної ситуації і можливими сценаріями її розвитку. Проте, на основі песимістичного підходу можна припустити, що фіктивний гравець перешкоджає досягненню мети оператору і прагне мінімізувати його виграш.

Таким чином, мета оператора в моделі антагоністичної гри полягає в максимізації виграшу, що включає як досягнення мети проведеного процесу, так і запобігання можливого збитку внаслідок розвитку надзвичайної ситуації в аварійну (катастрофічну). Мета фіктивного гравця полягає в мінімізації виграшу оператора (в максимальному збитку від розвитку надзвичайної ситуації). Тоді гра  $\Gamma$  являє собою кортеж:

$$\Gamma = \langle A, B, H \rangle \quad (4.3)$$

де  $A$  – безліч стратегій 1-го гравця (оператор);  $B$  – безліч стратегій 2-го гравця (фіктивний гравець);  $H$  – безліч виграшів 1-го гравця (програшів 2-го гравця). Під стратегією оператора розуміється обрана мета виходу з надзвичайної ситуації і сукупність дій по її досягненню. Спочатку розглянемо цілі, які можуть стояти перед оператором при прийнятті рішення щодо виходу з надзвичайної ситуації.

Залежно від зовнішнього прояву надзвичайної ситуації, накопиченого досвіду виходу з подібних ситуацій (або його відсутності), наявного запасу часу, ресурсів, впливу проведеної операції на кінцевий результат і інших чинників, оператор тренажера може діяти з різними цілями. По-перше, оперативне усунення надзвичайної ситуації і продовження виконання цільової завдання для отримання необхідного цільового результату. По-друге, зупинка виконання операції, встановлення причини виникнення надзвичайної ситуації, її усунення з залученням додаткових ресурсів і часу, а потім виконання цільового завдання. По-третє, негайне припинення поточної операції і інших пов’язаних робіт з метою недопущення розвитку надзвичайної ситуації до аварії (катастрофи) і відмова від виконання

цільового завдання. Відповідно до цих цільових установок обираються стратегії оператора.

$a_1$  – стратегія 1, спрямована на усунення причини надзвичайної ситуації і подальше продовження роботи за попереднє визначеним планом;

$a_2$  – стратегія 2, пов'язана з відстрочкою (або додатковими ресурсами) для встановлення причини надзвичайної ситуації і прийняття рішення про подальше продовження роботи після усунення причини надзвичайної ситуації;

$a_3$  – стратегія 3, пов'язана зі скасуванням подальших робіт і необхідністю виходу з надзвичайної ситуації (припинення моніторингових робіт, повернення на аеродром посадки, недопущення аварійного розвитку надзвичайної ситуації).

Таким чином, безліч стратегій 1-го гравця (оператора) являє собою кортеж з трьох елементів:

$$A_{\langle 3 \rangle} = \langle a_1, a_2, a_3 \rangle \quad (4.4)$$

Основна складність при прийнятті стратегії оператора полягає в невизначеності сценаріїв розвитку надзвичайної ситуації. Ця невизначеність описується стратегіями фіктивного гравця.

У найбільш сприятливому для оператора випадку надзвичайна ситуація допускає оперативне усунення причини її виникнення і подальше виконання операції з заданими параметрами.

Другий вид можливих сценаріїв розвитку надзвичайної ситуації передбачає залучення додаткових ресурсів, затримку, подальше виконання операції тільки після усунення причини надзвичайної ситуації.

Третя ситуація не допускає подальшого виконання операції і вимагає скасування виконання цільового завдання (припинення робіт, при цьому аварія не відбувається).

Четверта ситуація передбачає аварійний (катастрофічний) розвиток ситуації.

Відповідно до можливих сценаріїв розвитку надзвичайної ситуації визначаються стратегії фіктивного гравця:

$b_1$  – стратегія 1, яка припускає продовження роботи щодо застосування об'єкта за попереднім планом. Надзвичайна ситуація не впливає на виконання цільового завдання або її усунення не вимагає додаткових витрат часу і ресурсів;

$b_2$  – стратегія 2, що передбачає додаткові витрати часу і / або ресурсів для виходу з надзвичайної ситуації і подальше виконання цільового завдання;

$b_3$  – стратегія 3, яка обумовлює необхідність скасування подальших робіт щодо застосування об'єкта (виконання цільового завдання) і проведення робіт щодо виходу з нештатної ситуації;

$b_4$  – стратегія 4, пов'язана з аварійним розвитком нештатної ситуації. Таким чином, безліч стратегій 2-го гравця (фіктивний гравець) є кортеж з чотирьох елементів:

$$B_{\langle 4 \rangle} = \langle b_1, b_2, b_3, b_4 \rangle \quad (4.5)$$

Матриця ціни гри (виграшів гравців) при використанні ними всіх обраних стратегій є безліччю виграшів 1-го гравця – оператора тренажера (або програшів 2-го гравця – фіктивного гравця) і має вигляд:

$$H = \{h_{ij}\}, i=1,3; j=1,4 \quad (4.6)$$

де  $h_{ij}$  – виграш першого гравця (оператора), що реалізує  $i$ -у стратегію за умовою, що 2-й гравець (фіктивний гравець) використовує  $j$ -у стратегію. Позначимо можливі поєднання ситуацій, що характеризують вибори гравцями різних стратегій, через  $(i, j)$ .

Реалізація стратегії  $a_1$  призводить до штатного виконання цільового завдання в ситуації (1,1), до виконання цільового завдання з додатковими незапланованими ресурсами – в ситуації (1,2), до скасування виконання цільового завдання і збереження об'єкта в цілісності – в ситуації (1,3), до події (аварії, катастрофи) – в ситуації (1,4).

Реалізація стратегії  $a_2$  призводить до виконання цільового завдання з додатковими незапланованими ресурсами в ситуації (2,1), до виконання цільового завдання з додатковими запланованими ресурсами в ситуації (2,2), до скасування виконання цільового завдання – в ситуації (2,3), до події – в ситуації (2,4).

Реалізація стратегії  $a_3$  призводить до скасування виконання цільового завдання в усіх ситуаціях. При цьому виграш фіктивного гравця дорівнює виграшу оператора з протилежним знаком (за визначенням антагоністичної гри). Перший хід робить фіктивний гравець, в результаті якого виявляються фактори, які свідчать про виникнення надзвичайної ситуації. Оператор тренажера оцінює ситуацію і приймає рішення (дії) до виходу з надзвичайної ситуації. Наступний крок – визначення виграшів гравців при різних поєднаннях стратегій.

*Оцінювання наслідків можливих рішень щодо виходу з нештатної ситуації*

Всі компоненти, що становлять вартість ціни гри (можливого виграшу або програшу) при виборі і реалізації того чи іншого рішення, можна розділити на наступні п'ять груп (рис. 4.12):

1) витрати, пов'язані з проведенням робіт щодо виходу з надзвичайної ситуації. Вони включають витрати на виконання запланованих робіт відповідно до прийнятого рішення і витрати на проведення робіт, необхідність в проведенні яких з'явилася в процесі виконання планових робіт;

2) вартість виконання цільового завдання, що відображає цільовий результат проведеного процесу;

3) вартість відмови від виконання цільового завдання. Як правило, ця складова обумовлена не тільки втратами, пов'язаними з невиконанням цільової завдання. Компоненти вартості виграшу при виході з надзвичайної ситуації: вартість виконання цільового завдання; витрати на вихід з надзвичайної ситуації; вартість відмови від виконання цільового завдання;



невиконання цільової завдання; запобігання шкоди; збиток персоналу. Основні складові ціни гри: екологічні збитки; непланові та планові збитки; збиток від події; вихід з ладу техніки; збиток зв'язаних об'єктів; витрати на штрафні санкції;



Рис. 4.12. Основні складові вартості

4) витрати на штрафні санкції, пов'язані з відмовою від виконання цільового завдання;

5) витрати, обумовлені подією (аварією, катастрофою), яке відбулося внаслідок невиходу з надзвичайної ситуації. Ці витрати включають в себе наступні складові: а) витрати, пов'язані з виходом з ладу техніки; б) витрати, пов'язані із загибеллю персоналу, нанесенням шкоди здоров'ю людей (каліцтва, травми); в) витрати, пов'язані з нанесенням шкоди зв'язаних об'єктів; г) витрати, пов'язані з нанесенням шкоди навколишньому середовищу.

Відповідно до [90, 95] можна виділити наступні види подій: – катастрофа (знищення літального апарату, наземного пункту керування, травмування та загибель людей), – аварія (загибель літального апарату в польоті внаслідок помилкового рішення щодо виходу з надзвичайної ситуації, при цьому наземний комплекс не пошкоджений); – поломка (вихід з

ладу літального апарату і/або апаратури спостереження і/або наземного комплексу). У загальному випадку всі вартості, витрати і втрати є випадковими величинами, які залежать від впливу безлічі різних чинників. Вартість виконання цільового завдання може бути оцінена виходячи з таких міркувань. По-перше, це отримання цільового ефекту – виконання екологічного моніторингу визначених об’єктів, регіонів. По-друге, вартість робіт з підтримки заданого стану об’єкта експлуатації, необхідного для виконання цільового завдання.

Після кожного етапу (тобто появи інформації про зміну стану об’єкта і обумовленої цим можливості зробити висновок про правильність прийнятого на цьому етапі рішення) можливі наступні варіанти:

1) якщо рішення було прийнято правильно (прийняте рішення відповідало сценарієм розвитку надзвичайної ситуації), то подальший розвиток подій відбувається за штатною схемою і завдання виходу з надзвичайної ситуації вирішене;

2) якщо рішення було прийнято неправильно (прийняте рішення не відповідало сценаріям розвитку надзвичайної ситуації), то з урахуванням інформації, що з’явилася слід знову вирішувати задачу прийняття рішення. Класичні методи розв’язання задачі в детермінованій постановці дозволяють отримати оптимальне рішення  $a_{\text{опт}}$  на основі принципу максимуму – рішення, відповідне максимально можливого виграшу в найгірших умовах [94, 95]:

$$a_{\text{опт}} = \text{Arg} \max_i \min_j h_{il}(a_i, b_j) \quad (4.7)$$

Однак, оскільки існує явна невизначеність в реалізації сценаріїв розвитку надзвичайної ситуації ( $b_j$ ), то використання чистих стратегій неможливо.

*Вибір і обґрунтування критерію прийняття рішень щодо виходу з нештатної ситуації.*

При виникненні нештатної ситуації з’являється задача вибору критерію виходу з цієї ситуації. Вибір критерію обумовлений, по-перше, цільовою установкою виходу з нештатної ситуації, в тому числі уподобаннями системи

вищого рівня, по-друге, наявною інформацією про стан об'єкта і можливі сценарії розвитку нештатної ситуації.

При вирішенні поставленого завдання доцільно обмежитися трикомпонентним кортежем пріоритетів:

- пріоритет 1 – висока значимість виконання цільового завдання;
- пріоритет 2 – необхідність збереження об'єкта (ДПЛА);
- пріоритет 3 – необхідність збереження інфраструктури комплексу тренажера.

Сприятливими наслідками можуть бути визнані різні виходи з надзвичайної ситуації:

- необхідність виконання цільового завдання дуже висока і її перенесення неможливе;
- допустиме перенесення виконання цільового завдання;
- в першому плані є не виконання цільового завдання, а запобігання аварії.

#### *Алгоритм прийняття рішення щодо виходу з нештатної ситуації*

Перелічимо основні етапи підготовки і прийняття рішення щодо виходу з надзвичайної ситуації. Цей процес є багатокроковим, і кількість кроків наперед невідомо, але послідовність дій однакова для всіх кроків прийняття рішення.

1. Опис можливих стратегій виходу з нештатних ситуацій і оцінка можливих результатів при реалізації кожної стратегії.
2. Заповнення матриці вигащів.
3. Оцінювання можливостей вибору оператором кожної стратегії.
4. Оцінювання допустимої можливості аварії, в тому числі на основі визначених пріоритетів системи.
5. Порівняння розрахованої можливості з допустимим значенням.
6. Обґрунтування вибору критерію прийняття рішення.
7. Прийняття рішення для 1-го кроку.

8. Якщо реалізація рішення призвела до виходу з нештатної ситуації, процес підготовки та прийняття рішення завершено. В іншому випадку, слід переходити до 2-го кроку і повернутися до п.1.

Алгоритм прийняття рішення передбачає виконання таких процедур.

1. Опис можливих стратегій виходу з НС і оцінка можливих результатів при реалізації кожної стратегії з урахуванням їх можливих поєднань з різними сценаріями розвитку НС.

2. Заповнення матриці виграшів  $H = \{h_{ij}\}$ ,  $i = 1, k; j = 1, l$ .

3. Оцінювання можливостей вибору оператором допустимої можливості аварії.

4. Оцінювання допустимої можливості аварії, в тому числі на основі пріоритетів завдань екологічного спостереження.

5. Порівняння розрахованої можливості аварії з допустимим значенням.

6. Обґрунтування вибору критерію прийняття рішення.

7. Прийняття рішення для 1-го кроку.

8. Якщо реалізація рішення привела до виходу з НС, процес підготовки та прийняття рішення завершено. В іншому випадку, слід переходити до 2-го кроку. У загальному вигляді алгоритм прийняття рішення щодо виходу з нештатної ситуації представлений на рис. 4.13.

Отримані результати є основою науково-методичного апарату підготовки персоналу до прийняття рішень в нештатній ситуації.

#### **4.5. Оцінювання ефективності прийнятого рішення і часу реакції оператора дистанційно пілотованого літального апарату при виникненні нештатної ситуації**

Проведений аналіз свідчить, що загальноприйнятими показниками ефективності ергатичних систем управління є оперативність прийнятих рішень та їх достовірність [22, 24, 27]. Інтегральним показником, що

враховує і оперативність, і якість рішень,  $\epsilon$  ймовірність своєчасного й правильного ухвалення рішення  $P$ ,

$$P = P_t D \quad (4.8)$$

де  $P_t$  – ймовірність своєчасності рішення, тобто того, що рішення буде прийнято за час менший за  $t$ ;  $D$  – достовірність прийнятого рішення.

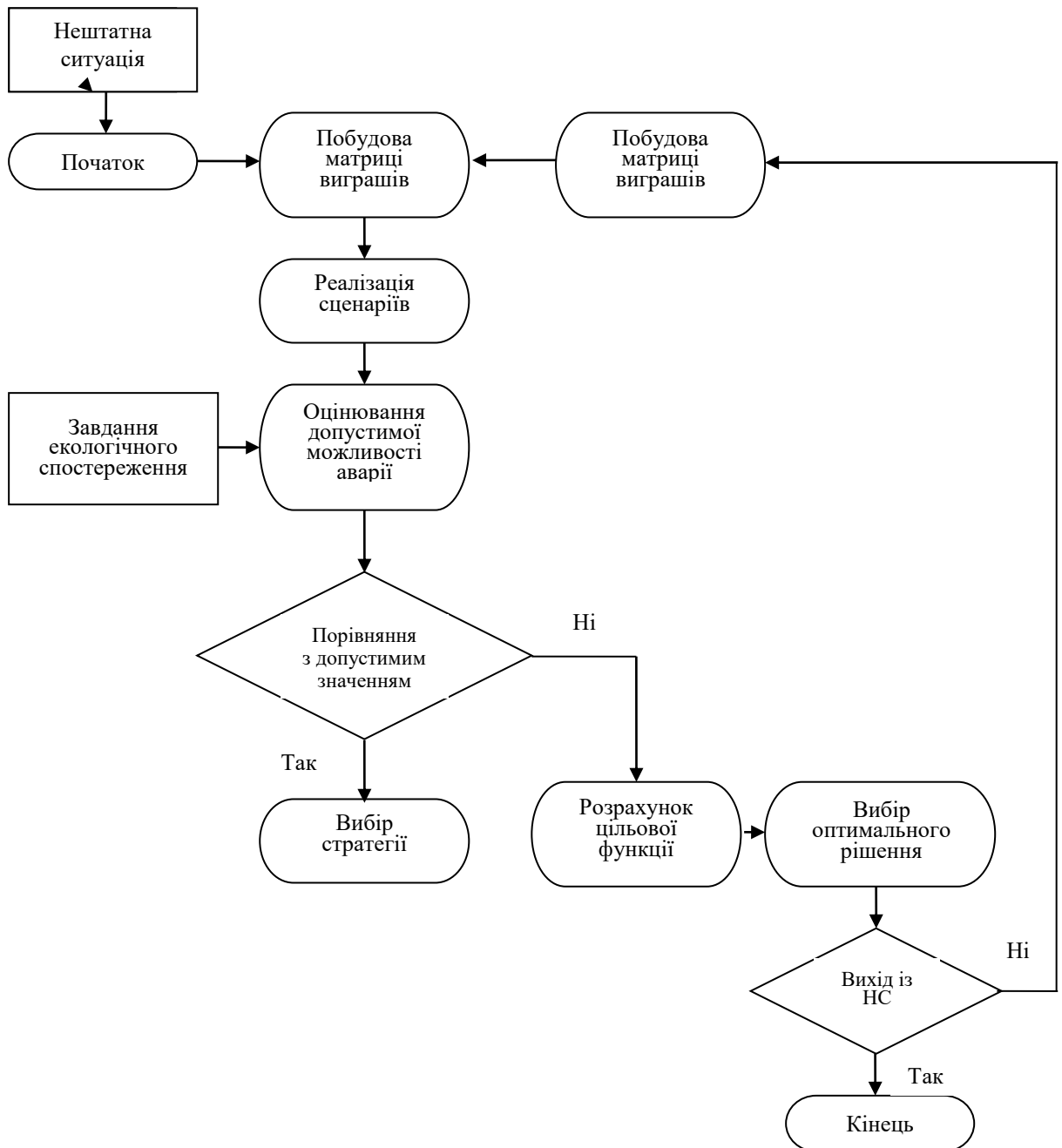


Рис. 4.13. Алгоритм прийняття рішення щодо виходу з нештатної ситуації

Однак варто зазначити, що вираз (4.8) справедливий лише за умови незалежності ймовірностей  $P_t$  і  $D$ , що практично неможливо. Тому більш доцільно окремо розглядати методи розрахунку показників своєчасності (оперативності)  $P_t$  і достовірності  $D$  прийнятих рішень.

Оцінку оперативності прийняття рішень можна здійснити на основі експериментальних досліджень, аналітично або із застосуванням методів імітаційного моделювання. Експериментальна оцінка  $P_t$ , природно, можлива лише в умовах реальної експлуатації тренажера ДПЛА на основі використання системи підтримки прийняття рішень в умовах зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих впливів. На етапі проектування тренажерного комплексу ДПЛА більш доцільно застосувати аналітичні методи оцінки  $P_t$ . При цьому залежно від наявності вихідної інформації про часові характеристики задач управління можуть бути використані або нечіткі, або імовірнісні моделі розрахунку. У першому випадку в якості вихідних даних використовується експертна інформація, у другому – статистичні дані про характеристики задач.

Імітаційне моделювання для оцінки достовірності  $D$ , застосовується на всіх етапах проектування тренажера. Існує кілька підходів до апріорної порівняльної оцінки достовірності прийнятих рішень: варіантний метод; метод оцінки за зовнішнім критерієм (критерію ефективності керованої системи); імовірнісний метод.

В дисертаційній роботі проведено імітаційне моделювання на тренажері ДПЛА MILVUS для оцінювання дій екіпажу щодо прийняття рішення з усунення нештатних ситуацій під час польоту.

MILVUS – це безпілотний літальний апарат з фіксованим крилом, що базується на технології вертикального зльоту та посадки. Ця технологія компанії DRONEIT допомагає зменшити злітно-посадкові смуги або відкриті площі для зльоту та посадки. Також вона попереджає пошкодження, що можуть спричинятися зовнішніми факторами, наприклад, зіткнення з землею під час зльоту та посадки.

DRONEIT пропонує 2 типи MILVUS в залежності від аксесуарів, що розташовані знизу літака. MILVUS-M призначений для точної геодезичної зйомки площ землі, а MILVUS-R – для дистанційної спостереження.

#### Характеристики MILVUS

Тип: літальний апарат з фіксованим крилом, що базується на технології вертикального зльоту та посадки.

Розміри : 2000 x 770 x 300 мм

Вага: 4,9 кг (без акумулятора)

Фюзеляж: композит

Час польоту: до 60 хв

Максимальна швидкість польоту: 100 км/год

Швидкість вітру: до 13 м/с (зліт та посадка до 5 м/с)

Режим польоту: авто / ручний

MILVUS-M використовується на геодезичних та картографічних роботах. Він має тривалий час польоту – до 60 хв та робочу дистанцію до 60 км. MILVUS-M може надати точні геодезичні / картографічні дані з великих площ дуже швидко, а його вбудований двоосний стабілізатор забезпечує ефективну та стабільну зйомку для 3D моделювання після закінчення цієї зйомки.

MILVUS-R має трьохосний стабілізатор, що дозволяє отримувати стабільні і точні дані зображень для розвідки та моніторингу. Аварійна розвідка на відстані може підтримуватися водночас з постійним спостереженням та моніторингом.

Імітаційне моделювання процесу реагування оператора (пілота) ДПЛА на нештатні ситуації виконувалось під час горизонтального польоту на заданому ешелоні. Використовувалось штатне обладнання тренажеру MILVUS та додатковий персональний комп'ютер, на якому встановлена запропонована в дисертації система підтримки прийняття рішення. Під час імітаційного моделювання на тренажері інструктором вводились нештатні ситуації.

Оцінювалось два показника ефективності дій оператора тренажеру:

– вимірювався час реакції оператора на нештатну ситуацію;

– експертною системою оцінювалась достовірність прийнятого рішення (ймовірність правильно прийнятого рішення).

На відміну від традиційного реагування оператором на нештатні ситуації, використовувалось функціонування запропонованої системи підтримки прийняття рішень. В тренажері MILVUS на робоче місце оператора (пілота) ДПЛА встановлені додатково монітори комп'ютера, на якому встановлена СППР для реагування на нештатні ситуації MILVUS. Під час введення нештатних ситуацій, СППР видавала оператору додаткову інформацію (додатково до штатної Системи електронної індикації Electronic Flight Instrument System (EFIS)) про нештатну ситуацію та одне, два або три альтернативні рішення.

Нештатні ситуації моделювались шляхом введення критичних відмов (табл. 4.2) та серйозних відмов (табл. 4.3)

Таблиця 4.2

Критичні відмови, що можуть призвести до авіаційних подій, відмови, що вимагають швидкого реагування, час прийняття рішення – до 10 с.

Номер	Позначення відмови	Відмова	Пояснення
1	$V_1$	engine severe damage or separation	відмова одного двигуна
2	$V_2$	loss of both engines	відмова двох двигунів
3	$V_3$	S Flight Management Computer (FMC)	відмова наземної системи управління
4	$V_4$	EHSI	відмова відеопередавача
5	$V_5$	Control and Display Unit (CDU)	відмова програмного забезпечення



Таблиця 4.3

Серйозні відмови, що можуть призвести до авіаційних інцидентів, відмови, що не вимагають швидкого реагування, час прийняття рішення – від 10 до 120 с

№	Позначення відмови	Відмова	Пояснення
1	S <sub>1</sub>	jammed or restricted flight controls	відсутнє керування кермом напряду
2	S <sub>2</sub>	uncommanded rudder yaw or roll	відсутнє керування рисканням або креном
3	S <sub>3</sub>	restricted flight controls	відсутнє керування кермом висоти
4	S <sub>4</sub>	airspeed unreliable	неправильні показання швидкості
5	S <sub>5</sub>	IRS fault	відмова навігаційної системи
6	S <sub>6</sub>	ADiRU fail	відмова цифрової системи повітряних сигналів
7	S <sub>7</sub>	EADI	відмова комплексного пілотажного індикатору
8	S <sub>8</sub>	DFDS	відмова системи директорного управління
9	S <sub>9</sub>	the IRS ATT and/or NAV mode(s) can be inoperative	відмова режиму навігації та/або визначення місця положення
10	S <sub>10</sub>	display failure	відмова дисплея

При цьому критичні відмови вводились від 1 до 3 одночасно. Критичні відмови вимагають негайних дій оператора тренажера. Дані відмови можуть призвести до авіаційних подій, коли подальший політ в штатному режимі неможливий.

Проте можливим є суттєве ураження ДПЛА або його втрата. На відміну від критичних відмов, серйозні відмови мають більшу імовірність появи. Вони можуть призвести до авіаційних інцидентів, коли виявлені відхилення від нормального функціонування ДПЛА можуть створити загрозу цілісності повітряного судна, та які мають суттєвий вплив на безпеку польоту, але не завершилися авіаційною подією.

Серйозні відмови вводились інструктором тренажеру одночасно від 1 до 10. Такі нештатні ситуації в реальному польоті вимагають від пілота ДПЛА прийняття рішення протягом десятків секунд в залежності від ступеня

важливості. При цьому пілот ДПЛА має можливість користуватись Довідником Quick Reference Handbook (QRH) для повітряного MILVUS.

Під час моделювання вводились відмови в тренажері літака MILVUS FMGS (Flight Management Given System). Експертною системою оцінювалась правильність дій оператора тренажера при появі нештатної ситуації внаслідок навмисно введених відмов.

За результатами моделювання побудовано залежність достовірності  $D$  (ймовірність правильно прийнятого рішення оператором тренажера) від кількості одночасно введених відмов елементів комплексу управління (рис. 4.14):

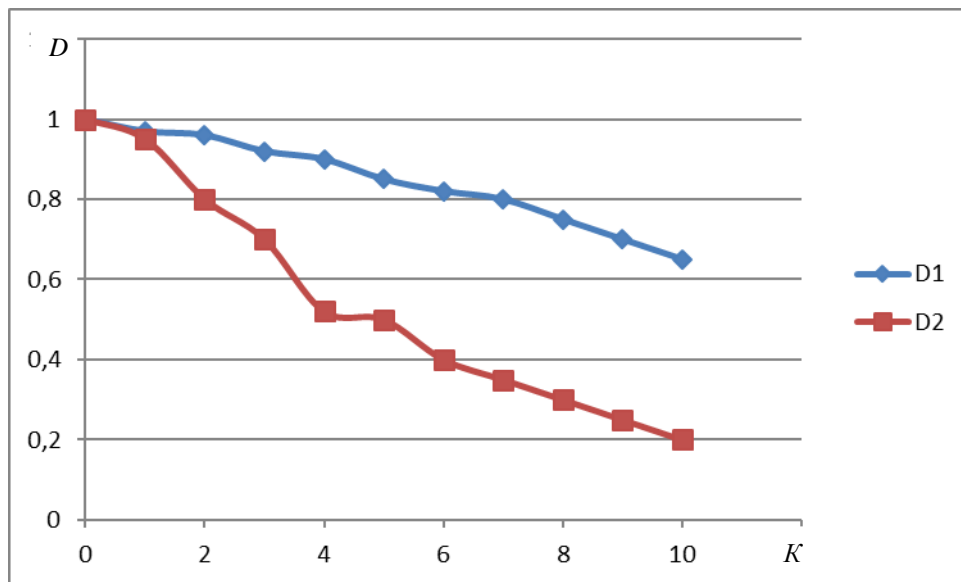


Рис. 4.14. Результати імітаційного моделювання достовірності прийнятих рішень в залежності від кількості  $K$  одночасно введених відмов:

$D1$  – достовірність прийнятих рішень оператором тренажера при функціонуванні СППР;

$D2$  – достовірність прийнятих рішень пілотом ДПЛА без СППР

$$D_{i1} = \frac{M_{i1}}{N_{i1}}, k = 1$$

$$D_{i1,i2} = \frac{M_{i1i2}}{N_{i1i2}}, k = 2$$

$$D_{i_1 i_2 \dots i_n} = \frac{M_{i_1 i_2 \dots i_n}}{N_{i_1 i_2 \dots i_n}}, \quad k = n, \quad n \in [4, 10]$$

де  $M_{i_1}$  - кількість правильно прийнятих рішень;  $N_{i_1}$  - загальна кількість рішень.

При проведенні порівняльного аналізу достовірності прийнятих рішень із застосуванням запропонованої СППР та без застосування СППР, враховуємо, що на сьогоднішній день вимоги нормативних документів декларують 75–80 % правильно прийнятих рішень пілотом ДПЛА щодо усунення нештатних ситуацій.

За результатами моделювання можна зробити висновок про те, що досягнуто підвищення показників функціональної стійкості комплексу управління ДПЛА. Це забезпечує ефективність усунення нештатних ситуацій та дозволяє підвищити достовірність прийняття рішень оператором ДПЛА на 12–20 %.

Зокрема в роботі проведено моделювання та побудовано залежність середнього часу реагування на нештатну ситуацію від кількості одночасно введених відмов (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Розрахунок середнього часу реагування на нештатну ситуацію із відмовами  $T_{св}$  в залежності від кількості  $K$  одночасно введених відмов для певної нештатної ситуації

$K$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{св}$ (оператор), с	11	15	19	27	36	45	57	74	97	169
$T_{св}$ (СППР), с	5	6	9	13	15	18	22	26	28	32

Із результатів моделювання можна зробити висновок, що при наявності однієї нештатної ситуації швидкість прийняття рішення пілотом без використання СППР майже нічим не відрізняється від швидкості прийняття рішення з використанням СППР. Проте, із зростанням кількості нештатних ситуацій швидкість прийняття рішення пілотом більша при умові використання ним системи підтримки прийняття рішень. Отже, використання

СППР при серйозних відмовах забезпечує функціональну стійкість тренажерного комплексу ДПЛА в умовах дії дестабілізуючих чинників  $S_1$ - $S_{10}$ . Крім того, проведено моделювання середнього часу реагування на нештатну ситуацію із критичними відмовами від кількості одночасно введених відмов для певної нештатної ситуації. Моделювання проводилося при кількості одночасно введених критичних відмов від 1 до 5. Критичні відмови вимагають негайних дій екіпажу. Дані відмови можуть призвести до авіаційних подій, коли подальший політ в штатному режимі неможливий. Проте можливим є втрата ДПЛА.

Використовуючи відомі методи математичної статистики, було визначено математичне очікування, дисперсію, середньо квадратичне відхилення та довірчий інтервал для випадку використання СППР та без використання СППР. Оцінка математичного сподівання  $x$  значення ознаки  $\xi$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Оцінка середнього квадратичного відхилення

$$D_{x.\text{випр}} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\bar{x})^2 \right] \cdot \frac{n}{n-1} ; \quad \sigma_x = \sqrt{D_{x.\text{випр}}}$$

За значенням довірчої ймовірності  $\beta$  за довідниковими даними треба знайти значення  $t_\beta$ .

Розмір довірчого інтервалу  $\varepsilon$  можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \cdot t_\beta$$

Границі довірчого інтервалу з довірчою ймовірністю  $\beta$  будуть мати вигляд:

$$\bar{x} - \varepsilon < m_x < \bar{x} + \varepsilon.$$

При необхідності, потрібну кількість спроб (обсяг вибірки  $n$ ) можна оцінити за формулою

$$n = \frac{t_\beta^2 \cdot \sigma_x^2}{\varepsilon^2} . \quad t_\beta = \arg\Phi\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

де  $\Phi$ –функція Лапласа.

Використовуючи результати моделювання, що зображені на рис 4.14, можна розрахувати показник функціональної стійкості (середній час реагування на нештатну ситуацію із критичними відмовами  $T_{кв}$ ) в залежності від кількості  $K$  одночасно введених відмов для певної нештатної ситуації (табл.4.5)

Таблиця 4.5

Кількість  $K$  одночасно введених відмов для певної нештатної ситуації

$K$	1	2	3
$T_{кв}(\text{оператор}), \text{с}$	2,12	2,49	5,44
$T_{кв}(\text{СППР}), \text{с}$	5,06	5,91	9,67

Таким чином проведено моделювання та побудовано залежність середнього часу реагування на нештатну ситуацію від кількості одночасно введених відмов.

#### Висновки по розділу 4

1. Удосконалено узагальнену методику забезпечення функціональної стійкості тренажерного комплексу ДПЛА, яка відрізняється від існуючих використанням системи підтримки прийняття рішень для виявлення позаштатних ситуацій під дією зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Реалізація даної методики дозволить підвищити достовірність виявлення нештатної ситуації та ефективність реагування екіпажу. Під показниками функціональної стійкості тренажерного комплексу ДПЛА розуміється оперативність прийнятих рішень пілотом та їх достовірність.

Завдання комплексної автоматизованої навчальної системи тренажера можуть бути логічним чином реалізовані в рамках тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу: електронний інтерактивний підручник; програмний тренажер для вироблення індивідуальних практичних навичок виконання операцій на тренажері (далі – індивідуальний тренажер); програмний тренажер для вироблення практичних навичок виконання

операцій в складі групи ДПЛА екологічного спостереження; підсистема атестації персоналу; підсистема підтримки прийняття рішень при виникненні надзвичайних ситуацій; підсистема інформаційної підтримки професійної діяльності оператора ДПЛА.

3. Запропонована структурно-функціональна модель тренажера, яка забезпечує реалізацію всіх функцій ДПЛА екологічного спостереження. Слід зазначити ключові відмінності представленої структурно-функціональної моделі від існуючих аналогів. У представленій структурно-функціональній моделі передбачено модуль автоматичної адаптації. Його основне призначення – забезпечити автоматичне підстроювання курсу відповідно до ступеня засвоєння матеріалу з урахуванням вимог до фахівців наземних служб забезпечення польотів і сучасних методів навчання.

4. Імітація надзвичайних ситуацій передбачає їх моделювання, дозволяючи оператору отримувати навички з пошуку алгоритму виходу, але цим його функції не обмежуються. При цьому забезпечується також робота з непередбаченими надзвичайними ситуаціями. Тому вихід з нештатних ситуацій вимагає формування нового алгоритму виходу.

5. Запропоновано склад тренажерного комплексу для професійної підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження, як індивідуального та колективного тренажера для підготовки операторів групи ДПЛА екологічного спостереження. Визначено завдання для спеціального програмного забезпечення двох типів автоматизованих робочих місць керівника навчання (інструктора) і того, хто навчається (оператора).

6. Запропонована технологія на базі науково-методичного апарату побудови індивідуальної освітньої траєкторії при навчанні з використанням тренажера ДПЛА екологічного моніторингу та дій в нештатних ситуаціях.

7. З точки зору поставленого завдання модель розвитку надзвичайної ситуації повинна описувати процес послідовного прийняття рішень оператором щодо виходу з надзвичайної ситуації. Такий підхід обумовлений такими причинами: оператор тренажера має на основі аналізу ситуації, що

виникла сформулювати мету виходу з надзвичайної ситуації, або, іншими словами, вибрати стратегію виходу з надзвичайної ситуації; в результаті прийнятого рішення стан об'єкта, на якому сталася надзвичайна ситуація, змінюється, і модель повинна описувати можливі результати цього рішення; модель надзвичайної ситуації повинна дозволяти оцінювати цільовий результат всіх можливих рішень (ціну рішень) і можливість реалізації результатів цих рішень; модель повинна дозволяти приймати рішення за різними критеріями, що описує різні переваги (значимість виконання процесу і можливість його перенесення, ризик виникнення аварії, наслідки невиконання процесу і т.д.).

8. Запропонована методика оцінювання наслідків можливих рішень щодо виходу з нештатної ситуації, вибору і обґрунтуванню критерію прийняття рішень щодо виходу з нештатної ситуації.

9. Запропонована методика оцінювання достовірності прийнятого рішення і часу реакції оператора дистанційно пілотованого літального апарату при виникненні нештатної ситуації (розрахунок показників своєчасності (оперативності) і достовірності прийнятих рішень).

10. Проведено моделювання середнього часу реагування на нештатну ситуацію із критичними відмовами від кількості одночасно введених відмов для певної нештатної ситуації. Моделювання проводилося при кількості одночасно введених критичних відмов від 1 до 3. Критичні відмови вимагають негайних дій екіпажу, можуть призвести до авіаційних подій, коли подальший політ в штатному режимі неможливий. Проте можливим є втрата ДПЛА екологічного спостереження.

11. За результатами імітаційного моделювання розраховано середній час реагування на нештатну ситуацію із критичними відмовами  $T_{ке}$  в залежності від кількості  $K$  одночасно введених відмов для певної нештатної ситуації, що свідчить про те, що досягнуто підвищення показників функціональної стійкості комплексу управління ДПЛА. Це забезпечує ефективність усунення

нештатних ситуацій та дозволяє підвищити достовірність прийняття рішень оператором ДПЛА на 12–20 %.

12. За результатами моделювання на основі використання тренажерного комплексу ДПЛА досягнуто підвищення показників функціональної стійкості, що забезпечує усунення нештатних ситуацій та дозволяє говорити про підвищення достовірності прийняття рішень пілотом ДПЛА на 22–35 % за рахунок використання системи підтримки прийняття рішень в процесі функціонування під час пошуку рішень в нештатних ситуаціях виникнення збоїв та некоректностей в розподілених базах знань.



## ВИСНОВКИ

У результаті проведених у дисертаційній роботі досліджень вирішено актуальне наукове завдання, яке полягає в удосконаленні інформаційного та програмного забезпечення спеціального тренажерного комплексу дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. В роботі розкриті особливості та закономірності синтезу тренажерного комплексу дистанційно пілотованого літального апарату екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки, запропоновано методики, моделі, алгоритми, що дозволяють підвищити ефективність навчання пілотів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження. При цьому основні наукові і практичні результати полягають у такому.

1. Вперше обґрунтовано методи створення тренажерних комплексів щодо підвищення ефективності підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження, які враховують критерії ефективності навчання та напрями підвищення якості підготовки операторів ДПЛА екологічного спостереження.

2. Вперше запропоновано модель тренажерного контуру керування (стабілізації на оперативно програмованій траєкторії) безпілотного апарату, яка на відміну від відомих заснована на використанні зворотних задач динаміки.

3. Удосконалено методику проведення екологічного спостереження об'єктів критичної інфраструктури на тренажері дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження, яка на відміну від відомих враховує технологію інтелектуального розвантаження оператора тренажера та надає можливість проведення екологічного спостереження декількох об'єктів в одному польоті шляхом синтезу та реалізації алгоритмів системи директорного керування на тренажері.

4. Набуло подальшого розвитку застосування методів імітаційного моделювання та оцінювання ефективності підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження, що дозволяє оцінювати якість підготовки оператора та дій в нештатних ситуаціях на тренажерному комплексі екологічного спостереження.

5. За результатами імітаційного моделювання розраховано середній час реагування на нештатну ситуацію із критичними відмовами  $T_{кв}$  в залежності від кількості  $K$  одночасно введених відмов для певної нештатної ситуації, що свідчить про те, що досягнуто підвищення показників функціональної стійкості комплексу управління ДПЛА. Це забезпечує ефективність усунення нештатних ситуацій та дозволяє підвищити достовірність прийняття рішень оператором ДПЛА на 12–20 %. За результатами моделювання на основі використання тренажерного комплексу ДПЛА досягнуто підвищення показників функціональної стійкості, що забезпечує усунення нештатних ситуацій та дозволяє говорити про підвищення достовірності прийняття рішень пілотом ДПЛА на 22–35 % за рахунок використання системи підтримки прийняття рішень в процесі функціонування під час пошуку рішень в нештатних ситуаціях виникнення збоїв та некоректностей в розподілених базах знань.

6. Розроблений науково-методичний та математичний апарат (програмне забезпечення) орієнтовано на фахівців операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів при виконанні завдань екологічного моніторингу навколишнього природного середовища та техногенно небезпечних об'єктів (об'єктів критичної інфраструктури).

7. Достовірність наукових і практичних результатів підтверджена збігом отриманих результатів із відомими даними та перевіркою експериментальних досліджень. Основні наукові і практичні результати, що отримані в дисертаційній роботі впроваджені та можуть бути застосовані в системах для підвищення кваліфікаційної підготовки пілотів ДПЛА при здійсненні

екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, техногенно небезпечних об'єктів, при виникненні нештатних, аварійних ситуацій.

8. Мета дослідження, яка полягала у підвищенні ефективності процесу підготовки оператора дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження за рахунок удосконалення інформаційного та програмного забезпечення спеціального тренажерного комплексу ДПЛА екологічного моніторингу – досягнута, та всі часткові завдання вирішені повністю. Наукові результати досліджень є внеском в теорію створення тренажерних комплексів дистанційно пілотованих літальних апаратів.

9. Перспективним напрямком подальших досліджень є удосконалення алгоритмічного та програмного забезпечення тренажерного комплексу для відпрацювання дій індивідуально для кожного оператора в умовах аварійних та катастрофічних екологічних та техногенних ситуацій.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Ажогин В.В. Згуровский М.З. Автоматизированное проектирование математического обеспечения АСУ ТП. -К.: Вища шк..-1986. -335 с.
2. Андреев В. Экологическая война как техногенная катастрофа // Военная мысль. - 1999. -№ 4. – с. 12–19.
3. Апенько Н.В. Стан та перспективи авіаційного тренажеробудування / Н.В.Апенько // Вісник НАУ. –2012. –№3. –С. 78–81.
4. Артюшин Л.М. Вероятностный анализ кибернетических систем /Артюшин Л.М., Машков О.А. – К.: КИВВС, 1993.– 376 с.
5. Артюшин Л.М. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам / Артюшин Л.М., Машков О.А.– Киев: КВВАИУ, 1991. – 88 с.
6. Артюшин Л.М. Теоретичні основи технічної кібернетики / Артюшин Л.М., Машков О.А., Дурняк Б.В., Плащенко О.А. Львів.: Українська академія друкарства, 2004. – 120 с.
7. Артюшин Л.М., Машков О.А., Сивов Н.С. Теория автоматического управления. Киев.: КИ ВВС, 1996, 686 с.
8. Артюшин Л.М., Панов В.И., Шамоу Г.В. Синтез алгоритмов управления полета на основе решения обратных задач динамики. Киев: КВВАИУ, 1982, 44с.
9. Барбашин Е.А. Введение в теорию устойчивости. М., Наука, 1967, 223 с.
10. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях./Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир. –1976., с. 172 –216.
11. Бобров В.А. Экспериментально-психологическое исследование совмещенной операторской деятельности // Методология инженерной психологии труда и управления. – М.: Наука. – 1981. – с.6 – 16.

12. Боднер В.А. Авиационные тренажеры / В.А. Боднер, Р.А. Закиров, И.И. Смирнова – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.
13. Бондар О.І., Машков О.А., Абідов С.Т., Системний аналіз небезпеки у зоні проведення антитерористичної операції на сході України: біосферні конфлікти та транскордонне забруднення / Екологічні науки: науково-практичний журнал. – К. :ДЕА, 2015. – №9, с. 5–26.
14. Борисов С.В., Шагалов М.Р. О количественной оценке алгоритмов работы операторов сложных технических систем // Эффективность и надежность систем "человек - техника". – М.: Машиностроение. –1975. – с. 62–63.
15. Борсук С.П. Графічне відображення інформації в тренажерах та системах навчання / С.П. Борсук, О.Г. Яременко // ПОЛІТ-2009 ІХ Міжнар. наук. конф. студентів та молодих учених: Зб. тез. – К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – с. 189.
16. Велищанский М.А., Крищенко А.П., Ткачев С.Б. Синтез алгоритмов переориентации космического аппарата на основе концепции обратной задачи динамики // Известия РАН Теория и системы управления. 2003. № 5. с. 156–163.
17. Волкович В.Л., Волошин А.Ф. Модели и метода оптимизации надежности сложных систем. – К.: Наук, думка. – 1992. – 312 с.
18. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. - К.: Наук, думка. – 1992. – 160 с.
19. Вудсон У., Коновер Д. Справочник по инженерной психологии. – М.: Мир. – 1968. – 518 с.
20. Галиуллин А.С. Методы решения обратных задач динамики. М.: Наука, 1986. 224 с.
21. Галиуллин А.С. Обратные задачи динамики. М.: Наука.1981, 144 с.
22. Гедз В. Тренажерна підготовка – складова навчання курсантів / В. Гедз // Крила України. – 2012. – № 42(653). – с. 4.

23. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука. 1971. – 386 с.
24. Епихина Н.А. Методы исследования надежности летчика на комплексном тренажере самолета с использованием специальных приемов моделирования стрессовой ситуации / Н.А. Епихина // Проблемы інженерно-педагогічної освіти: зб. наук. пр. –Х.: УПА, 2007. –Вип. 18–19. –С. 230–238.
25. Смельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений. – М.: Знание. – 1985. – 32 с.
26. Єрмошина О.В., Крищенко А.П. Синтез программных управлений ориентацией космического аппарата методом обратных задач динамики // Известия РАН Теория и системы управления. 2000. № 2. С. 155–162.
27. Єпіхіна Н.О. Методика тренажерної підготовки пілотів у періоди перерв льотної діяльності : автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 / Н.О. Єпіхіна. – Харків, 2009. – 18 с.
28. Жевнин А.А., Колесников К.С., Крищенко А.П., Толокнов В.И. Синтез алгоритмов терминального управления на основе концепции обратных задач динамики (обзор) // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1985. № 4. – с. 178–188.
29. Завалова Н.Д., Пономаренко В.А. О методических основах изучения ошибочных действий человека, управляющего летательным аппаратом //Деятельность космонавта в полете и повышение ее эффективности. – М.: Машиностроение. –1981. – с. 100–111.
30. Зайцев В. Использование тренажеров при подготовке летчиков ВМС США / В. Зайцев // Зарубежное военное обозрение. –2005. –№2. – с. 59–64.
31. Згуровский М.З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования. – К.: Выща шк.. – 1990. – 351 с.
32. Казачкин Б.И. Авиационные тренажеры как связующее звено между наземной и летной подготовкой / Б.И. Казачкин, Г.А. Немчиков, Н.О. Кобельков, В.Г. Кодола. –Монино:, 1999. – 160 с.

33. Качинський А. Про екологічну безпеку України: в пошуках нової концепції // Розбудова держави. – 1994. – № 5. – с. 7–13.

34. Качинський А. Системний аналіз визначення пріоритетів в екологічній безпеці України. - Київ : 1995. - 46 с. (Препринт / Національний інститут стратегічних досліджень; №42).

35. Качинський А. Сучасні проблеми екологічної безпеки України. - Київ : 1994. - 48 с. (Препринт / Національний інститут стратегічних досліджень; №33).

36. Качинський А., Хміль Г. Екологічна безпека України: аналіз, оцінка та державна політика. –К.: НІСД, 1997. – 127 с. (Сер. “Екологічна безпека”; Вип. 3).

37. Кашковский В.В. Использование авиационных тренажеров в научных исследованиях / В.В. Кашковский, В.В. Устинов // Актуальные проблемы и перспективы развития ГА России: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. работников и асп.– Иркутск: ИФ МГТУ ГА, 2012. – с. 151–156.

38. Керницький О.М. Проблеми підготовки курсантів-льотчиків у вищому закладі військової освіти / О.М. Керницький // Зб. наук. пр. Національної академії оборони України. – 2004. – № 4 (41). – с.19–25.

39. Коврижкин О.Г. та ін. Решение краевой задачи динамики полета методом встречных движений // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1993. – № 1. – с. 30–34.

40. Красовский А.А. Авиационные тренажёры / А.А. Красовский, В.И. Лопатин, А.И. Наумов, Ю.Н. Самолаев Ю.Н. // Изд. ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского. – М.: 1992. – 320 с.

41. Красовский А.А. Пилотажно-навигационные и комплексные тренажеры / А.А. Красовский, А.В. Кудиненко – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1984. – 204 с.

42. Красовский А.А. Основы теории авиационных тренажёров / А.А. Красовский – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.

43. Красовский А.А. Пилотажно-навигационные и комплексные тренажеры / А.А. Красовский М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998. – 320 с.
44. Кремешний О.І., Ковтонюк І.Б. Використання тренажерів для удосконалення навчального процесу в системах підготовки авіаційних фахівців / Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил ім. І. Кожедуба. – 2007. – Випуск 2(14). – С. 165–167.
45. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, 1988. 328 с.
46. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. М.: Наука, 1987. 304 с.
47. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций: учебное пособие для ВТУзов. М.: Машиностроение, 2004. 576 с.
48. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987.
49. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели/П Д. Крутько. – М.: Наука, 1988.
50. Лавров Н.Г., Страшинин Е.Э., Шалимов Л.Н. Применение концепции обратных задач динамики к проблеме управления угловым движением спускаемого аппарата / Вестник ЮУрГУ, № 26, 2009, с. 4–9.
51. Лапшин Э.В. Информационные модели проектирования интеллектуальных тренажеров широкого профиля / Э. В. Лапшин, А. В. Блинов, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2000. – № 8. – с. 23–27.
52. Мамаев В.Я. Болевые точки тренажеростроения и возможные пути их устранения. // В ж.: Мир авионики, №1, 2003. – с. 38-39.
53. Мамчур Ю.В. Проблеми питання створення тренажера оператора дистанційно пілотованого літального апарата екологічного моніторингу / Матеріали науково-технічної конференції “Інноваційні аерокосмічні



технології в екологічному моніторингу” м. Київ, ДЕА, 24–25 квітня 2018 р., с. 37–38.

54. Мамчур Ю.В. Обоснование синергетической схемы управления группой дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2018., с. 181–190.

55. Мамчур Ю.В. Застосування комп'ютерних та інформаційних технологій в тренажерних комплексах екологічного моніторингу з застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи” 14 вересня 2018, – Львів: ЛДУБЖД, 2018, с.181.

56. Мамчур Ю.В. Проблеми розвитку державної системи моніторингу навколишнього природного середовища з використанням аерокосмічних та геоінформаційних технологій / Сучасні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу: Матеріали доповідей науково-практичного семінару, м. Київ, 27 листопада 2017 р., ДЕА, 2017, с. 8–9.

57. Мамчур Ю.В. Сучасні проблеми управління екологічною безпекою з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів / “Проблеми екологічної безпеки” XVI міжнародна науково-технічна конференція: Матеріали конференції — Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018 с.65.

58. Маренич С.Ю. Особливості теоретичної підготовки курсантів льотних спеціалізацій з бортового обладнання конкретного типу літального апарата / С. Ю. Маренич, М.М. Петренко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2011. – Випуск 2(28). – с. 200–203.

59. Машков О.А. Алгоритм стабілізації динамічної системи з урахуванням можливості порушень в енергетичній підсистемі / Кононов

О.А., Борисенко В.Є., Машков О.А. // Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗС України. – випуск 6. – К., 2000. – с. 28–32.

60. Машков О.А. Аналіз результатів досліджень функціонально-стійких технічних систем / Машков О.А., Кононов О.А. // Вісник Житомирського державного технічного університету. – Житомир: ЖДТУ, 2006. – №3 (38). – с. 93–103.

61. Машков О.А. Возможности обеспечения функциональной устойчивости эргатических систем управления в рамках существующего методического аппарата / Машков О.А., Кононов О.А. // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К.: ІПМЕ, 2006. – № 32. – с. 151–157.

62. Машков О.А. Застосування методу моментів теорії кореляційного аналізу для дослідження використання енергетичних ресурсів у замкнутому контурі управління авіаційно-космічної системи / Кононов О.А., Борисенко В.Є., Машков О.А. // Труды академії. – К.: НАОУ, 1999. – №16. – с. 31–35.

63. Машков О.А. Метод забезпечення функціональної стійкості інформаційно-керуючого комплексу з використанням інформаційної надмірності / Машков О.А., Кононов О.А., Юньов В.П. // Зб. наук. праць. – К.: КІВПС, 1997. – № 7. – с. 73–85.

64. Машков О.А. Методи забезпечення функціональної стійкості авіаційних ергатичних систем / Машков О.А., Кононов О.А., Пастушенко В.П. // Збірник тез доповідей та виступів науково-практичної конференції «Стан та шляхи вдосконалення технічної експлуатації, капітального ремонту, розробки та модернізації авіаційної техніки Збройних Сил України», 22–23 вересня 2005р. – К.: ДНДІА, 2005. – с. 45.

65. Машков О.А. Методичні підходи до забезпечення функціональної стійкості авіаційно-космічних ергатичних систем / Машков О.А., Кононов О.А., Пастушенко В.П. // Матеріали науково-практичної конференції «Застосування космічних систем в інтересах національної безпеки та оборони», 30 вересня 2005р. – К.: НАОУ, 2005. – с. 8–9.

66. Машков О.А. Методологічні аспекти синтезу систем управління інтегрованими авіаційно-космічними комплексами розвідки / Машков О.А., Кононов О.А. // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування космічних систем в інтересах національної безпеки та оборони», 3 жовтня 2007р. – К.: НАОУ, 2007. – с. 21–22.

67. Машков О.А. Можливості забезпечення надійності ергатичних систем управління перспективними бойовими авіаційними комплексами в рамках існуючих технологій / Машков О.А., Кононов О.А., Пастушенко В.П., Довжук Д.В. // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченко. – К.: ВІ КНУ, 2006. – №2. – с. 101–104.

68. Машков О.А. Некоторые особенности синтеза системы автоматического управления полетом летательного аппарата на основе решения обратной задачи динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.: КВВАИУ, 1985, с. 49–51.

69. Машков О.А. Некоторые особенности синтеза системы автоматического управления полетом летательного аппарата на основе решения обратной задачи динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.: КВВАИУ, 1985, с. 49–51.

70. Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем при случайных воздействиях. – К.: КВВАИУ. – 1989. – 49 с.

71. Машков О.А. Особенности применения метода обратных задач динамики для многомерных систем автоматического управления / Научно-методический сборник, Вып.1. Оборудование летательных аппаратов. – К.: КВВАИУ, 1987, с. 47–49.

72. Машков О.А. Особливості організації синергетичного управління процесом застосування перспективних безпілотних авіаційних систем / Машков О.А., Кононов О.А., Самборський І.І. // Труды академії. – К.: НАОУ, 2008. – №2(82). – с. 65–74.

73. Машков О.А. Оценка времени переходного процесса в динамической системе с алгоритмом управления на основе решения обратных задач динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.: КВВАИУ, 1985, с. 65–67.

74. Машков О.А. Оценка устойчивости динамической системы с алгоритмом управления, полученным на основе решения обратных задач динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.: КВВАИУ, 1985, с. 62–64.

75. Машков О.А. Применение метода максимального правдоподобия для построения адаптивного многомерного фильтра, устойчивого к отказам измерителей / Сивов Н.С., Машков О.А. // Адаптивные системы автоматического управления. – К.: 1990, вып.19, с. 47–53.

76. Машков О.А. Применение теории функционально устойчивых систем для решения задач навигации и управления объектами вида «макросистема» / Машков О.А., Кононов О.А. // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ навігації та зв'язку, 2007. – вип. № 3. – с. 15–19.

77. Машков О.А. Принципи побудови систем управління груповим застосуванням безпілотних літальних апаратів / Машков О.А., Кононов О.А., Самборській І.І. // Тези доповідей та виступів науково-практичної конференції «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки», 19–20 червня 2008р. – К.: ДНДІА, 2008. – с. 58.

78. Машков О.А. Принципы функциональной устойчивости сложных систем / Машков О.А., Машков В.А. // Наука и оборона. – 1995. – №2. – с. 7–44.

79. Машков О.А. Проблематика совершенствования способов совместного применения беспилотных авиационных комплексов / Машков О.А., Кононов О.А., Самборский І.І. // Арсенал. – К., 2007. – С. 23–28.

80. Машков О.А. Проблемы обеспечения функциональной устойчивости бортовых информационно-управляющих комплексов авиационно-

космической системы / Кононов О.А., Машков О.А. // Збірник наукових праць КІ ВПС, вип. 10. – К.: КІ ВПС. – 1999. – С. 60–66.

81. Машков О.А. Проблемы синтеза функционально-устойчивых информационно-управляющих комплексов подвижных объектов. //1-ая украинская конференция по автоматическому управлению. Тезисы докладов. Часть 2. – 1994. – с. 363.

82. Машков О.А. Синтез многомерных автоматических систем на основе решения обратных задач динамики / Киев: КВВАИУ, 1989, 76 с.

83. Машков О.А. Структура системы управления угловым положением самолета с заданными динамическими характеристиками / Научно-методические материалы по вопросам повышения эффективности и надежности систем авиационного оборудования. – К.: КВВАИУ, 1985, с. 39–42.

84. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (детермінована постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 82. – с. 166–176.

85. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (стохастична постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 83. – с. 146–153.

86. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Формалізація задачі підготовки на тренажері оператора керування безпілотним літальним апаратом екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки / Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального

закладу “Університет новітніх технологій”. – К.: ПВНЗ “Університет новітніх технологій”, 2018. – Випуск 2(6), с. 24–30.

87. Машков О.А., Мамчур Ю.В., Жукаускас С.В. Напрями удосконалення системи екологічного моніторингу з застосуванням дистанційно-пілотованих літальних апаратів / Екологічні науки: науково-практичний журнал. – К.: ДЕА, 2018. – №2(21). – с. 22–29.

88. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Обґрунтування напрямків розробки тренажерів підготовки операторів дистанційно-пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу / Журнал “Системи управління, навігації та зв’язку, 3(49), 2018, с. 16–21.

89. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Застосування концепції оберненої задачі динаміки для синтезу програмного керування рухом в імітаторі динаміки польоту тренажера дистанційно пілотованого літального апарату / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 82. – с. 154-166.

90. Машков О.А., Мамчур Ю.В., Жукаускас С.В. Нігородова С.А. Технологія синтезу системи керування дистанційно пілотованого літального апарата з заданими динамічними властивостями / Стандартизація, сертифікація, якість. – К.: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019. – № 1 (113). –с. 54–66.

91. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Загроза національній безпеці: екологічний тероризм, як сучасний виклик суспільству / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки, №1 (17) 2018, с. 8–21.

92. Машков О.А. Мамчур Ю.В. Загроза національної безпеки: аерокосмічний тероризм, як новий виклик безпеці суспільства / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки, №2 (17) 2018, с. 8–28.

93. Машков О.А., Мамчур Ю.В., Жукаускас С.В. Методологія протидії екологічним загрозам, ризикам та екологічному тероризму: системний підхід

/ НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки, №3–4 (19–20) 2018, с. 8–31.

94. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Аналитическая оценка качества процесса управления на тренажерах дистанционно пилотируемого летательного аппарата с алгоритмом на основе решения обратных задач динамики / Научно-технический журнал: Аерокосмічні технології, – вип. 2(02), 2017 с. 59–62.

95. Машков О.А., Мамчур Ю.В., Жукаускас С.В. Нігородова С.А. Технології конструктивного спілкування пілота оператора дистанційно пілотованого літального апарату та системи підтримки прийняття рішень в умовах впливу стрес-факторів екстремальної екологічної ситуації / Авіаційна та екстремальна психологія у контексті технологічних досягнень: збірник наукових праць. – К. ТОВ «Альфа-ПК», 2019, с. 183–189.

96. Настасенко О.Г., Бондар О.І., Машков О.А. Системний підхід щодо ліквідації екологічної катастрофи у зоні антитерористичної операції / Екологічні науки: науково-практичний журнал. – К. :ДЕА, 2014. - №6, с. 5–20.

97. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2016/ <http://www.menr.gov.ua/dopovidi/nacdopovidi>

98. Невзоров Р.В. Використання тренажерів у процесі підготовки курсантів-льотчиків авіаційних вищих військових навчальних закладів / Збірник наукових праць Національної академії державної прикордонної служби України, серія: педагогічні та психологічні науки, №3(68) 2013, с. 97–206.

99. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука. – 1986. – 312 с.

100. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. - М.: Наука. 1981. 208 с.

101. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ.-М.: Высшая школа. – 1989. – 367с.

102. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Конструирование алгоритмов управления полетом на основе решения обратной задачи динамики. Продольное движение. М., Техническая кібернетика, №2, 1981, с. 162–170.

103. Петров, Б.Н. Построение алгоритмов управления как обратная задача динамики / Б.Н. Петров, П.Д. Крутько, Е.П. Попов // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247, No 5.

104. Р. Невзоров Аналіз класифікації авіаційних тренажерів як елементу вдосконалення навчального процесу підготовки курсантів-льотчиків до виконання бойових завдань / Фізичне виховання, спорт і культура здоров'я у сучасному суспільстві : збірник наукових праць, No 4 (24), 2013, с. 36–40.

105. Синеглазов В.М. Виртуальный тренажёр, как средство повышения эффективности обучения оператора / В.М. Синеглазов, С.П. Борсук // Електроніка та системи управління. – Київ : НАУ. – 2007. – 1(11). – с. 114–119.

106. Синеглазов В.М. Методика адаптивного контролю у функціональних тренажерах. / В.М. Синеглазов, С.П. Борсук. // Вістник Національного авіаційного університету. – К. : НАУ. – 2008. – 1(34). – с. 12–15.

107. Синеглазов В.М. Проблемы побудови процедурного тренажера. / В.М. Синеглазов, С.П. Борсук, С.І. Ільницька // Вістник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 3(50). – с. 51–53.

108. Синеглазов В.М. Архітектура тренажерних комплексів на прикладі комплексів Атлант і Атлант-2 / В.М. Синеглазов, С.П. Борсук // Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки. Наук.-практ. конф: Тези доп. та виступів. – К. : ДНДИА. – 2008. – с. 93.

109. Теорія автоматичного керування / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, М.С. Сивов. – Львів: Вид-во УАД, 2004. – 272 с.



110. Чапанис А.О. О распределении функций между людьми и машинами //Инженерно-психологическое проектирование. -Вып. 1. -М.: Наука. – 1970. – 166 с.

111. [bvpservice.by/.../avtonomnye-trenazhery-podgotovki-operatorov-bespilotnykh-letatel](http://bvpservice.by/.../avtonomnye-trenazhery-podgotovki-operatorov-bespilotnykh-letatel).

112. Donald Liddick. Eco-Terrorism: Radical Environmental and Animal Liberation Movements. Westport, Connecticut, Praeger Publishers, 2006. pp. 300.

113. Gostev V.I. Self-diagnosis of modular system in random performance of elementary tests / Gostev V.I., Mashkov O.A., Mashkov V.A. // Cybernetics and computing Tehnology, Discrete Control Systems, Allerton press, inc, 150 Fifth Avenue, New York, NY10011, №105, 1999, pp. 104–112.

114. <http://kursak.net/obshhestvennaya-opasnost-ekstremizma-i-terrorizma>

115. <http://ru.wikipedia.org/wiki/UAV>

116. <http://tekhnosfera.com/metodiki-otsenki-i-korreksii-parametrov-poleta-v-aviatsionnyh-trenazherah#ixzz53lkKBgyK>

117. <http://teknol.ru/products/aviation/uav/>

118. <http://www.airwar.ru/bpla.html>

119. <http://www.allbest.ru/>

120. <http://www.dissercat.com/content/metodika-formirovaniya-upravlyayushchikh-vozddeistvii-dlya-obektivnoi-otsenki-letno-tekhniche#ixzz53lktV9KR>

121. <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-integrirovannykh-sredstv-predstavleniya-znanii-v-sistemakh-mashinnogo-obucheniya-#ixzz53lmmuFoX>

122. [http://www.ispl.ru/Sistemy\\_upravleniya-BLA.html](http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html)

123. <http://teknol.ru/products/aviation/uav/>

124. <http://www.km.ru/referats/333287-bespilotnye-samolety>

125. Drone Wars: Transforming Conflict, Law, and Policy. Peter Bergen (Editor), Daniel Rothenberg (Editor) Cambridge University Press, 2014.

126. <https://bmpd.livejournal.com/2029756.html>

127. [https://socportal.info/2018/01/15/skoro\\_drony\\_budut\\_sbivatsja\\_v\\_stai\\_kak\\_ptitsy.html](https://socportal.info/2018/01/15/skoro_drony_budut_sbivatsja_v_stai_kak_ptitsy.html)
128. <https://www.popmech.ru/.../230301-kak-v-rossii-treniruyut-operatorov-voennykh-bes...>
129. Drone Warfare. John Kaag and Sarah Kreps Polity; 1 edition, 2014.
130. Methods for providing fault tolerance of airborne computer system through their self-control /Gostev V.I., Mashkov O.A., Mashkov V.A. // Cybernetics and computing Tehnology, Discrete Control Systems, Allerton press, inc, 150 Fifth Avenue, New York, NY10011, №109, 1999, p. 33–44.
131. [nppstrela.ru/products/aviatso/](http://nppstrela.ru/products/aviatso/)
132. [www.indelauav.com/news.html](http://www.indelauav.com/news.html)
133. [zoom.cnews.ru/rnd/article/item/bespilotnye\\_samolety\\_zamenyat\\_pograni\\_chnikov](http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/bespilotnye_samolety_zamenyat_pograni_chnikov)

## Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Державної екологічної академії  
післядипломної освіти та управління  
доктор біологічних наук, професор

 О.І. Бондар  
« 26 » 29 грудня 2018 року



### АКТ

#### впровадження результатів дисертаційних досліджень Мамчура Юлія Валерійовича

Комісія у складі: голови комісії – директор Навчально-наукового інституту екологічної безпеки та управління доктор геологічних наук, доцент Улицький О.А. та члени комісії: завідувач кафедри екологічного моніторингу геоінформаційних та аерокосмічних технологій, доктор технічних наук, професор Пашков Д.П. та професор кафедри екологічного моніторингу геоінформаційних та аерокосмічних технологій доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Ващенко В.М., склали акт про впровадження результатів наукових досліджень на основі розглянутих матеріалів дисертаційної роботи Мамчура Юлія Валерійовича, а саме:

розроблені методи створення тренажерних комплексів дистанційно-пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) екологічного моніторингу для підвищення ефективності підготовки операторів, особливістю яких є врахування критеріїв ефективності навчання та якості їх підготовки;

запропоновано модель тренажерного контуру керування (стабілізації на окремих (оперативних) ділянках програмованої траєкторії) ДПЛА на основі вирішення зворотних задач динаміки;

удосконалено методику проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури на тренажері ДПЛА екологічного моніторингу, яка на відміну від відомих враховує технологію інтелектуального розвантаження оператора тренажера та надає можливість проведення екологічного моніторингу декількох об'єктів в польоті шляхом синтезу та реалізації алгоритмів системи директорного керування на тренажері.

Результати дисертаційних досліджень увійшли до звітів науково-дослідних робіт «Дослідження антропогенних джерел електромагнітного випромінювання НЦУВКЗ та їх впливу на екосистеми» (0118U006675); «Розробка проекту автоматизованої системи моніторингу довкілля Київської області» (0117U007076); «Проведення оцінки та вивчення еколого-техногенного стану Донецької та Луганської областей з метою розробки рекомендацій щодо природно-ресурсного відновлення на екологічних

засадах» (0117U006967) та можуть бути використані при створенні перспективних безпілотних авіаційних систем та підготовки операторів щодо управління ДПЛА для оперативної передачі зйомки з літального апарату на наземний інформаційний комплекс в реальному масштабі часу.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє розширити можливості функціонування ДПЛА спостереження для вирішення екологічних завдань моніторингу та контролю за станом навколишнього природного середовища на основі якісної підготовки операторів управління ДПЛА.

Результати дисертаційної роботи, які знайшли відображення при виконанні науково-дослідних робіт «Дослідження антропогенних джерел електромагнітного випромінювання НЦУВКЗ та їх впливу на екосистеми», «Розробка проекту автоматизованої системи моніторингу довкілля Київської області» та «Проведення оцінки та вивчення еколого-техногенного стану Донецької та Луганської областей з метою розробки рекомендацій щодо природно-ресурсного відновлення на екологічних засадах» мають важливе значення та можуть бути застосовані при використанні для різних типів безпілотних летальних апаратів.

Дисертаційні дослідження Мамчура Юлія Валерійовича мають важливе значення для науки і технічних розробок. Рекомендувати та продовжити дослідження в даному напрямку.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався, у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:  
доктор геологічних наук, доцент



О.А. Улицький

Члени комісії:  
доктор технічних наук, професор



Д.П. Пашков

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник



В.М. Ващенко

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Заступник начальника Льотної академії НАУ з навчальної, науково-методичної та виховної роботи,  
к.т.н., доцент Залевський А.В.

«22» 01 2019 року

**А К Т**

**впровадження результатів дисертаційних досліджень  
Мамчура Юлія Валерійовича**

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Мамчура Юлія Валерійовича «Зворотні задачі динаміки в тренажерному комплексі дистанційно пілотованого літального апарату екологічного спостереження» прийняті до впровадження в роботі Льотної академії Національного авіаційного університету для удосконалення інформаційного та програмного забезпечення тренажерного комплексу дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє удосконалити науково-методичний апарат синтезу тренажерного контуру керування безпілотного апарату на основі вирішення зворотних задач динаміки.

Результати дисертаційної роботи мають важливе значення та можуть бути застосовані при побудові сучасних тренажерних систем екологічного моніторингу за допомогою дистанційно пілотованих літальних апаратів, які здійснюють спостереження.

Дисертаційні дослідження Мамчура Юлія Валерійовича мають важливе значення для науки і технічних розробок.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:

кандидат технічних наук, доцент,  
директор науково-виробничого інституту  
аеронавігації ЛА НАУ



В.М. Неділько

Члени комісії:

кандидат технічних наук, доцент,  
декан факультету обслуговування  
повітряного руху ЛА НАУ  
кандидат технічних наук,  
начальник центру безпілотних  
літальних апаратів ЛА НАУ



А.М. Невиніцин



Ю.Г. Ковальов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Національного центру управління та випробувань космічних засобів, канд. техн. наук, старш. наук. співр.



В.І. ПРИСЯЖНИЙ

2018 р.

#### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Мамчура Юлія Валерійовича «Зворотні задачі динаміки в тренажерному комплексі дистанційно пілотованого літального апарату екологічного спостереження».

Комісія Національного центру управління та випробувань космічних засобів у складі: голови комісії – першого заступника начальника Національного центру Волоха К.П., заступника начальника Національного центру з науково-випробувальної роботи Ониська В.В., начальника відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук Мамарева В.М. та головного фахівця відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук Кутового О.М. у період з 3 по 4 грудня 2018 року розглянула основні результати дисертаційного дослідження, отримані особисто Мамчуром Ю.В., а саме:

методи підвищення ефективності підготовки операторів на тренажерних комплексах дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу;

модель тренажерного контуру керування безпілотним апаратом, що реалізує алгоритм на основі вирішення зворотних задач динаміки;

методику проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури на тренажері дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу;

методики імітаційного моделювання та оцінки ефективності підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу.

Основні результати дисертаційних досліджень автора опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані на наукових конференціях, зокрема:

1. Мамчур Ю.В. Проблемні питання створення тренажера оператора дистанційно пілотованого літального апарата екологічного моніторингу / Матеріали науково-технічної конференції “Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу” м. Київ, ДЕА, 24-25 квітня 2018 р., с. 37-38.

2. Мамчур Ю.В. Обоснование синергетической схемы управления группой дистанционно пилотируемых летательных аппаратов / Збірка наукових праць: Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції.– Херсон: Вид. ХНТУ, 2018., с. 181-190.

3. Мамчур Ю.В., Машков О.А. Аналитическая оценка качества процесса управления на тренажере дистанционно пилотируемого летательного аппарата с алгоритмом на основе решения обратных задач динамики / Науково-технічний журнал: Аерокосмічні технології, - вип. 2(02), 2017 с. 59-62.

4. Мамчур Ю.В., Машков О.А. Обґрунтування напрямків розробки тренажерів підготовки операторів дистанційно-пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу / Журнал “Системи управління, навігації та зв'язку, 3(49), 2018, с. 16-21.

5. Мамчур Ю.В. Сучасні проблеми управління екологічною безпекою з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів / “Проблеми екологічної безпеки” XVI міжнародна науково-технічна конференція: Матеріали конференції — Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018 с. 65.

На підставі розгляду представлених матеріалів комісія встановила та цим актом засвідчує, що результати вищезазначеного дисертаційного дослідження, отримані Мамчуром Юлієм Валерійовичем, використані у Національному центрі при проведенні прикладних наукових досліджень щодо обґрунтування напрямків розвитку систем екологічного моніторингу, у тому числі шляхом використання дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) з попередньою підготовкою операторів на тренажерних комплексах. Підготовка операторів Національного центру на тренажерних комплексах перед початком безпосередньої експлуатації та періодичні тренування у процесі експлуатації за запропонованою Мамчуром Ю.В. методикою проведення екологічного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури дозволять значно підвищити якість підготовки експлуатуючого персоналу, суттєво знизити ризики невиконання завдань та пошкодження ДПЛА під час експлуатації.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є підставою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:



К.П. Волох

Члени комісії:



В.В. Онисько



В.М. Мамарев



О.М. Кутовий

НАУКОВО-ВИРОБНИЧА  
ВПРОВАДЖУВАЛЬНА  
ФІРМА

“ГЕОТЕХНОЛОГІЯ”



SCIENTIFIC  
PRODUCTION  
“GEOTECHNOLOGY”  
FIRM LTD.

Київ-98, вул. Дніпровська набережна, 7, к.23  
ЄДРПОУ 16284494, Св.№35693991. ІНН №162844926045  
E-mail: mea.geotech@gmail.com Tel. 553-01-79, Mob. (+380 66) 616 7927

Вих. № 9/1 від 20.12 2018 р.

### АКТ

#### впровадження результатів дисертаційних досліджень Мамчура Юлія Валерійовича

Засвідчуємо, що результати наукових досліджень на основі матеріалів дисертаційної роботи Мамчура Юлія Валерійовича впроваджені у Науково-Виробничої Впроваджувальної Фірми «ГЕОТЕХНОЛОГІЯ».

Запропоновані методики, моделі, алгоритми, дозволили підвищити ефективність навчання операторів апаратури дистанційного керування вертикальної аеродинамічна енерговітроустановка ВАДЭУ-Інтегратор Природних Енергій ІПЭ «СМЕРЧ, та оператора при ліквідації аварій вибухо-імпульсними технологіями. Переваги впровадження результатів дисертаційних досліджень наступні:

- можливість перерозподілу часу навчання операторів різним навичкам з урахуванням особливостей об'єкта моніторингу;
- навчання різним навичкам управління екологічного моніторингу з урахуванням індивідуальних особливостей пілотів та нештатних (аварійних) ситуацій.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє знизити обчислювальну складність та покращує можливості оператора при виникненні нештатних, аварійних ситуацій в порівнянні з існуючими методичними розробками.

Дисертаційні дослідження Мамчура Юлія Валерійовича мають важливе значення для науки і технічних розробок. Рекомендувати та продовжити дослідження в даному напрямку.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався, у зв'язку з науковим призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Генеральний директор,  
Член Комітету з розвитку виробничої кооперації з підприємствами  
Торгово-Промислової палати України

«20» 12 2018 року



Є.А. Мухін



## ДОДАТОК Б

# АВТОНОМНІ ТРЕНАЖЕРИ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

### Класифікація спеціалізованих тренажерів

1. Спеціалізований тренажер моніторингу навколишнього природного середовища
2. Спеціалізований тренажер моніторингу техногенне небезпечних об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури.
3. Спеціалізований тренажер моніторингу та попередження надзвичайних ситуацій.
4. Спеціалізований тренажер моніторингу об'єктів природно-заповідного фонду.
5. Спеціалізований тренажер моніторингу підземних об'єктів (трубопроводів та земельних провалин).
6. Спеціалізований тренажер моніторингу стану водної поверхні.

### ДПЛА екологічного моніторингу



**Призначення:** - навчання операторів БЛА принципам застосування БАК;

- контроль якості підготовки операторів БЛА без використання штатних засобів ВАК.

#### **Можливості тренажера:**

Тренажер дозволяє здійснювати практичне навчання оператора БЛА виконання наступних функцій:

- проведення автономного функціонального контролю БАК;
- створення, редагування і введення польотного завдання в БЛА;
- коригування польотного завдання в ході польоту БЛА;
- формування команд управління польотом БЛА;
- формування команд управління цільової навантаженням;
- запис параметричної та видової інформації з бортового пристрою реєстрації;
- робота при виникненні аварійної ситуації;

- аналіз зареєстрованої інформації та підготовка звіту.

Для вдосконалення навичок операторів БЛА в тренажері реалізований курс навчальних завдань. Інструктор може імітувати в тренажері виникнення різних аварійних ситуацій в ході виконання учнем навчального завдання.

Склад тренажера:

- автоматизоване робоче місце оператора БЛА на базі ноутбука (макет штатного варіанта наземного пункту управління);
- кошти документування;
- спеціальне тренажно-програмне забезпечення.

## **ТАКТИЧНИЙ БЕЗПЛОТНИЙ АВІАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС «БЕРКУТ-2Е»**



Комплекс «Беркут-2Е» призначений для оснащення тактичних підрозділів сухопутних військ і сил спеціальних операцій з метою вирішення завдань щодо ведення оптико-електронної розвідки місцевості в різних погодних умовах і в будь-який час доби, цілевказівки вогневим засобам.

### ***Склад:***

два безпілотні літальні апарати (БЛА);  
комплект змінних цільових навантажень: фотомодуль (фотокамера), модуль розвідки в інфрачервоному діапазоні (тепловізіонна камера), модуль телевізійної розвідки (телевізійна камера);  
наземна станція керування;  
приймально-передавальний пристрій;  
пусковий пристрій;  
два контейнери для зберігання і транспортування БЛА і цільових навантажень.

### ***Вирішуємо завдання:***

- спостереження в заданому районі за земною і водною поверхнею, отримання в реальному масштабі часу тепловізійного і телевізійного зображення місцевості;

- пошук і виявлення наземних (надводних) об'єктів, визначення їх координат;
- передача розвідувальної інформації в реальному масштабі часу командирам підрозділів тактичної ланки.

***Основні характеристики комплексу:***

Виконання польоту БЛА в автоматичному режимі

Радіус дії БЛА до 35 км

Спосіб зльоту БЛА з використанням катапульти

Спосіб посадки БЛА з використанням парашута

Статичний стеля польоту БЛА

з корисним навантаженням до 3000 м

Крейсерська швидкість польоту БЛА в межах 80 -100 км / год

Час польоту БЛА до 120 хв

Вага БЛА до 10 кг

Варіант виконання возить (в контейнерах)

Бойовий розрахунок не менше 2-х осіб



***Технічні можливості БЛА:***

- політ в автоматичному режимі (з можливістю виконувати політ без участі оператора відповідно до введеного польотного завдання, в тому числі і виконання посадки);
- політ в автоматизованому режимі (під управлінням і по командах оператора);
- аварійне припинення польоту і повернення БЛА в заданий район в автоматичному режимі при недоцільності подальшого виконання завдання, в тому числі і виконання посадки.

***Особливості / Переваги***

Запуск літального апарату здійснюється з катапульты. Для запуску не потрібно підготовлена злітно-посадкова смуга, що дозволяє використання БЛА в будь-якому важкодоступному районі.

Комплекс забезпечує можливість управління одним БЛА з наземної станції управління (НСУ). У базовій комплектації комплекс містить до двох БЛА, проте можливо комплектування і великою кількістю БЛА.

Конструкція БЛА забезпечує його високі льотні характеристики. БЛА виконаний за схемою «літаюче крило».

Конструкція фюзеляжу дозволяє здійснити швидку збірку і розбирання, зміну бортового обладнання, а також кріплення цільових навантажень (ЦН) без застосування додаткових (крім наявних в ЗПП) технічних засобів і пристосувань.

Упаковка комплексу являє собою контейнери, що забезпечують зручну і надійне транспортування будь-яким видом транспорту (наземним, морським і повітряним), доставку БЛА, змінних модулів ЦН, НСУ до місця запуску і захист виробу від механічних пошкоджень і впливу атмосферних опадів.

Система менеджменту якості Постачальника сертифікована на відповідність вимогам СТБ ISO 9001-2009.

Гарантійний термін експлуатації обладнання, що постачається - 12 місяців.

Термін служби поставляється виробу - не менше 5 років з моменту введення в експлуатацію.

## **ТАКТИЧНИЙ БЕЗПЛОТНИЙ АВІАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС «БЕРКУТ-1Е»**



Комплекс «Беркут-1Е» призначений для оснащення тактичних підрозділів сухопутних військ і сил спеціальних операцій з метою вирішення завдань щодо ведення оптико-електронної розвідки місцевості в різних погодних умовах і в будь-який час доби,

цілевказівки вогневим засобам.

### **СКЛАД**

- два безпілотні літальні апарати (БЛА);
- комплект змінних цільових навантажень: фотомодуль (фотокамера), модуль розвідки в інфрачервоному

діапазоні (тепловізійна камера), модуль телевізійної розвідки (телевізійна камера);

- наземна станція керування;
- приймально-передавальний пристрій;
- контейнер для зберігання і транспортування безпілотного авіаційного комплексу.

***Комплект змінного цільового навантаження***



***Наземна станція управління (приймально-передавальний пристрій)***



***Вирішуємі завдання:***

- спостереження в заданому районі за земною і водною поверхнею, отримання в реальному масштабі часу тепловізійного і телевізійного зображення місцевості;
- пошук і виявлення наземних (надводних) об'єктів, визначення їх координат;
- передача розвідувальної інформації в реальному масштабі часу командирам підрозділів тактичної ланки.

***Основні характеристики комплексу***

Виконання польоту БЛА в автоматичному режимі

Радіус дії БЛА до 15 км  
 Спосіб зльоту БЛА «з руки»  
 Спосіб посадки БЛА з використанням парашута  
 Статичний стеєль польоту БЛА  
 з корисним навантаженням до 1000 м  
 Крейсерська швидкість польоту БЛА в межах 50 - 80 км / год  
 Час польоту БЛА до 60 хв.  
 Вага БЛА до 3,5 кг  
 Варіант виконання ношений  
 Бойовий розрахунок не менше 2-х осіб

Технічні можливості БЛА:

- політ в автоматичному режимі (з можливістю виконувати політ без участі оператора відповідно до введеного польотного завдання, в тому числі і виконання посадки);
- політ в автоматизованому режимі (під управлінням і по командах оператора);
- аварійне припинення польоту і повернення БЛА в заданий район в автоматичному режимі при недоцільності подальшого виконання завдання, в тому числі і виконання посадки.

### ***Особливості / Переваги***

Запуск літального апарату здійснюється з руки. Для запуску не потрібно підготовлена злітно-посадкова смуга, що дозволяє використання БЛА в будь-якому важкодоступному районі.

Можливий запуск літального апарату в межах міської забудови. Для безаварійної посадки БЛА з використанням парашута досить обмеженою відкритого майданчика.

Комплекс забезпечує можливість управління одним БЛА з наземної станції управління (НСУ). У базовій комплектації комплекс містить до двох БЛА, проте можливо комплектування і великою кількістю БЛА.

Конструкція БЛА забезпечує його високі льотні характеристики. БЛА виконаний за схемою «моноплана з штовхає гвинтом».

Конструкція фюзеляжу дозволяє здійснити швидку збірку і розбирання, зміну бортового обладнання, а також кріплення цільових навантажень без застосування додаткових (крім наявних в ЗПП) технічних засобів і пристосувань

Упаковка комплексу являє собою контейнер, що забезпечує зручну і надійну перенесення розрахунком з 2-х чоловік, а також транспортування

будь-яким видом транспорту (наземним, морським і повітряним), доставку БЛА, змінних модулів ЦН, НСУ до місця запуску і захист виробу від механічних пошкоджень і впливу атмосферних опадів.

Система менеджменту якості Постачальника сертифікована на відповідність вимогам СТБ ISO 9001-2009.

Гарантійний термін експлуатації обладнання, що постачається - 12 місяців.

Термін служби поставляється виробу - не менше 5 років з моменту введення в експлуатацію.

### **БЕЗПЛОТНИЙ АВІАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС «ГРИФ -100Е»**



Комплекс «Гриф - 100Е» призначений для ведення повітряної оптико-електронної і радіаційної розвідки місцевості, радіоелектронної протидії радіоелектронним засобам противника, виявлення надзвичайних

ситуацій та оцінки їх наслідків.

#### **Склад:**

- до чотирьох безпілотних літальних апаратів (БЛА);
- змінні цільові навантаження:
- гіростабілізований оптико-електронна система (ГОЕС), призначена для ведення видовий розвідки в видимому і інфрачервоному діапазонах;
- бортова апаратура радіаційного контролю (БАРК), призначена для оперативного ведення повітряної радіаційної розвідки місцевості;
- апаратура постановки радіоперешкод АПР і АПР-3, призначена для створення перешкод приймачів супутникових радіонавігаційних систем GPS і ГЛОНАСС, систем супутникового зв'язку INMARSAT, THURAYA, IRIDIUM;
- наземний пункт управління (НПУ), призначений для автоматизації завдань, що вирішуються комплексом в ході виконання БЛА завдань за призначенням;
- засоби наземного забезпечення:
- машина технічного обслуговування, призначена для підготовки до застосування БЛА, проведення технічного обслуговування і ремонту комплексу;

- транспортна машина, призначена для транспортування і самостійної розвантаження контейнерів з БЛА, пошуку і доставки БЛА, що здійснив аварійну посадку.

**Комплект зміни цільового навантаження**



АПР

АПРЗ

БАПК

ГОЕС

**Наземний пункт управління (НПУ)**



**СЕРІЯ БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ  
ВІДЕОМОНІТОРИНГУ МІСЦЕВОСТІ «БУСЕЛ», «БУСЕЛ М» І  
«БУСЕЛ М50»**



**Призначення:** Відео моніторинг місцевості та об'єктів, супровід рухомих об'єктів з борта безпілотного літального апарату (БЛА) та передача по радіоканалу отриманої відеоінформації на наземний пункт управління (НПУ) та інших віддалених споживачам при роботі в масштабі часу, близькому до реального.



**Можливості:**

Безпілотні авіаційні комплекси (БАК) класу «міні» з дальністю застосування від 20 до 70 км в залежності від встановленої цільової навантаження здатні здійснювати фото-, відео-, інфрачервону або мультиспектрального зйомку за допомогою оптичних систем, встановлених на гіростабілізований платформі, в світле і темне час доби. Великий спектр можливостей цільової навантаження і високі аеродинамічні якості літальних апаратів дозволяють використовувати БАК «Бусел», «Бусел М» і «Бусел М50» для виявлення надзвичайних ситуацій, контролю стану територій, на яких проходять нафто- і газопроводи, боротьби з браконьєрством, обліку тварин, моніторингу потоків автотранспорту на дорогах (з автоматичним супроводом об'єктів), контролю державного кордону, моніторингу стану ліній електропередач і сільськогосподарських угідь і т.д.

**Склад комплексу:**

- БЛА (від одного до п'яти шт.);
- мобільний або переносний НПУ;
- модуль приймально-передавальної апаратури (від одного до двох комплектів);
- Стандартний комплект цільового навантаження (гіростабілізований інфрачервона, фото-, відео- або мультиспектрального камера);
- Встановити ZIP;
- комплект експлуатаційної документації.

**Технічні характеристики сімейства безпілотних авіаційних комплексів відеомоніторингу місцевості класу «міні» «БУСЕЛ», «БУСЕЛ М» і «БУСЕЛ М50»**

Технічні характеристики	«БУСЕЛ»	«БУСЕЛ М»	«БУСЕЛ М50»
Силова установка	2 електродвигуна		
Максимальна злітна маса, кг	до 6	до 10	до 14
Повний розмах крила, мм	2335	2420	3470
Тривалість польоту, хв.	до 60	до 120	до 150
Діапазон швидкостей польоту, км/год	40–100	60–120	60–100
Максимальна висота польоту, м	до 1500	до 4000	до 5000
Максимальний радіус застосування, км	20	50	70

Цільове навантаження	гіроплатформа; ТВ-, фото- ІЧ- або мульти-спектральна камера	
Пілотажне-навігаційний комплекс	GPS та САУ	GPS, ГЛОНАСС та САУ
Спосіб startу/посадки	з руки/парашут	

## ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧНИЙ КОМПЛЕКС «БУРЕВІСНИК»



Безпілотний авіаційний комплекс (далі - ВАК) дальньої дії для моніторингу місцевості і об'єктів «БУРЕВІСНИК». БАК «БУРЕВІСНИК» призначений для оперативного спостереження за великими ділянками місцевості, протяжними об'єктами і територіями, отримання і передачі інформації споживачам в режимі реального часу в будь-який час суток. БАК «БУРЕВІСНИК» спроектований і виготовляється в Республіці Білорусь. БАК пройшов весь цикл державних приймальних випробувань і в даний час успішно поставляється на експорт.

### **Склад БАК:**

- безпілотний літальний апарат (від одного до п'яти штук);
- стаціонарний або мобільний (на базі автомобіля) наземний пункт управління;
- модуль приймально-передавальної апаратури (до двох комплектів);
- комплект цільового навантаження (модуль оптико-електронного та радіаційного моніторингу);
- комплект запасних частин, інструменту та приладдя;
- засоби наземного забезпечення;
- комплект експлуатаційної документації.

### **Функціональне призначення БАК:**

- контроль державного кордону та прилеглих територій;
- моніторинг територій навколо особливо важливих об'єктів з отриманням відео в режимі реального часу;
- виявлення цілей, коригування вогню артилерії, здійснення збору розвідувальної інформації на великих відстанях в режимі реального часу в будь-який час доби;
- радіаційний контроль заданої території, оцінка розвитку надзвичайних ситуацій;

- моніторинг територій національних парків, заповідників, водних акваторій, боротьба з браконьєрством в денний і нічний час;
- виявлення і затримання порушників дорожнього руху, пошук втрачених людей в важкодоступних місцях;
- виготовлення проектної та вишукувальної продукції землеустрою, земельного кадастру і моніторингу земель.

### **ТИПИ ВИКОРИСТОВУВАНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ (ДАЛІ - БЛА):**



### **БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ВЕРТОЛІТНОГО ТИПУ «INDELA-I.N.SKY»**



Безпілотний літальний апарат серії «INDELA - I.N.SKY» являє собою літальний апарат з одним двигуном внутрішнього згоряння, що працюють на високооктановому бензині. БЛА обладнаний комплексом авіоніки, що забезпечує в автоматичному режимі: зліт, політ, посадку БЛА з можливістю

зависання над об'єктом для виконання місії, а також управління корисним навантаженням і бортовий частиною системи передачі даних. БЛА призначений для виконання завдань:

- моніторинг місцевості в режимі реального часу;
- виявлення об'єктів і стеження за ними;
- визначення координат виявлених об'єктів;
- передача відеоінформації у видимому і інфрачервоному діапазонах.

БЛА може застосовуватися вдень і вночі в простих і обмежено складних метеоумовах, здійснюючи автоматичний зліт і посадку з невідготовлених майданчиків, розміром 30х30 м.

Потужність двигуна VANKEL (4хтактний, роторний, водяного охолодження)	26 кВт
Витрати палива	5-8 кг/год
Довжина з гвинтами, що обертаються	3 787 мм
Довжина	3 052 мм
Діаметр несучого гвинта	3 400 мм
Висота	1 346 мм
База шаси	1 180 мм
Максимальна злітна вага	140 кг
Стандартний запас палива	25 кг
Крейсерська швидкість польоту у землі	70 км/год
Тривалість польоту (висота 100-500 м)	от 3год до 5год
Робоча температура (Температурний режим може обмежувати робочого діапазону електронних компонентів, а так само робочою температурою двигуна)	



**Компанія Israel Aerospace Industries (IAI): мініатюрний безпілотний літальний апарат-«метелик».**

Як пише Flightglobal, апарат важить всього кілька грамів і може перебувати в повітрі 20 хвилин. Зараз ізраїльська компанія працює над двома крилатими прототипами: маленькою «метеликом» масою вісім грамів і

великий, чия маса досягає 13 грамів. Апарати харчуються від компактної літій-полімерної батареї масою два грами. Кожен БПЛА оснащується мікровідеокамер масою всього 0,1 грама.

У рух «метелик» приводить компактний електромотор, що працює на 7000 оборотів в хвилину. На команди оператора БПЛА відгукуються за допомогою системи управління польотом масою три грами.

Крила «метелика» зроблені вручну. З початком серійного виробництва БПЛА комплектуючі для безпілотників планується поставити на конвеєр. Використовувати безпілотнікі- "метелики" передбачається, зокрема, в ситуаціях із захопленням заручників. Таким чином БПЛА, оснащений відеокамерою і мікрофоном, зможе непомітно розвідати обстановку в зоні інциденту.

Як повідомляє Flightglobal, створенням безпілотника інженери ІАІ займаються під гаслом "якщо може природа - ми спробуємо їй наслідувати". Роботу над апаратом почали зі створення чотирьохкрилими прототипу, схожого з бабкою. Надалі планується навчити БПЛА літати тільки на двох крилах. Для цього, зокрема, потрібно скорегувати амплітуду їх коливань. Як пояснив співрозмовник видання, на це буде потрібно кілька місяців.

#### **Компанія Northrop Grumman: безпілотний літальний апарат морського спостереження MQ-4C Triton**

Компанія Northrop Grumman буде за свій рахунок додатковий безпілотний літальний апарат морського спостереження MQ-4C Triton за програмою ВМС США для використання в демонстраційних і конструктивних випробуваннях платформи.

БЛА Triton призначений для передачі надводних кораблях детальної картини великих районів океану і прибережних зон. Його здатність виконувати польоти протягом 24 годин дозволить доповнювати багато пілотовані літаки розвідки і спостереження.

На заводі компанії в Палмдейле (шт. Каліфорнія) крильові секції приєднані до фюзеляжу апарату, в подальшому на ньому будуть встановлені розвідувальне і чіткий устаткування, як і на інших апаратах Triton для ВМС США.

«Апарат буде використовуватися в майбутніх випробуваннях ВМС США, щоб забезпечити введення в експлуатацію БЛА Triton в кінці 2015 року», сказав Стів Еневолд (Steve Enewold), керівник програми Triton і віце-президент Northrop Grumman.

## ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС РОЗРОБКИ МАРШРУТУ І ПОЛЬОТНИХ ЗАВДАНЬ НА ТРЕНАЖЕРІ ДПЛА ЕКОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

(Керівництво оператора)

### І. Програмний комплекс «Розробка маршрутів»

#### 1.1 Загальний опис програмного комплексу (ПК) «Розробка маршрутів»

##### *Призначення програми*

ПК «Розробка маршрутів» призначений для розробки маршруту польоту ДПЛА на тлі цифрової карти району спостереження (ЦКРС), корекції раніше розроблених маршрутів і збереження розробленого маршруту в базі даних польотів ДПЛА з встановленням логічного зв'язку розробленого маршруту з вибраними для вирішення екологічного спостереження завданнями. ПК дозволяє вести одночасну розробку або корекцію маршрутів по двох каналах.



Для вирішення завдань в відповідності зі своїм призначенням ПК «Розробка маршрутів» містить в своєму складі наступні програмні компоненти: управління і відображення ЦКМ; завдання і редагування точки стояння НПУ; прокладки і редагування маршруту; збереження маршруту в БД.

##### *Умови виконання програми*

Програмний комплекс «Розробка маршрутів» є додатком і функціонує під управлінням ОС Windows / Linux / MSVC. Для функціонування ПК необхідна наявність СУБД «Лінтер-ВС» та ІГІС «Інтеграція.МС». Для роботи ПК «Розробка маршрутів» необхідні налаштування і активізація СУБД «Лінтер-ВС».

##### *Виконання програми*

Запуск ПК «Розробка маршрутів» проводиться шляхом запуску файлу route.exe.

Завершення роботи ПК «Розробка маршрутів» здійснюється командою головного меню «Файл» - «Вихід» або натисканням кнопки  панелі інструментів або натисканням керуючої кнопки  (Close) головного вікна програми (рис. В.1).

#### 1.2 Програмний компонент управління і відображення цифрової карти району спостереження

##### *Призначення програми*

Програмний компонент (ПК) управління і відображення ЦКРС призначений для організації інтерфейсу оператора тренажеру при управлінні картою, що відображається.

У відповідності зі своїм призначенням ПК забезпечує виконання таких функцій: настройка параметрів відображення карти; переміщення карти в вікні перегляду; масштабування карти; додавання (видалення) файлів матричної інформації про рельєф місцевості; додавання (видалення) файлів екологічної обстановки; додавання (видалення) файлів растрових карт; збереження (завантаження) карти в (з) БД; створення нового вікна по виділеній області; надання оператору програмного інтерфейсу для роботи і управління ЦКРС за допомогою використання команд меню і кнопок панелі інструментів.

#### *Умови виконання програми*





Вихідними даними для ПК управління і відображення ЦКРС є ім'я файлу цифрової карти місцевості, імена файлів матричної інформації, екологічної обстановки і растрових карт.

#### *Виконання програми*

Головне вікно ПК управління і відображення ЦКРС (рис. В.1) має наступну структуру: назва вікна; керуючі кнопки; рядок головного меню; панель інструментів; робоча область; смуги прокрутки; інформаційна панель.

Для інформування оператора в назві вікна вказується назва файлу, що відображається ЦКРС і її масштаб.

Кнопки дозволяють оператору управляти головним вікном ПК:

- кнопка «» - згорнути вікно в кнопку на панелі завдань;
- кнопка «» - розгорнути вікно до розмірів екрану;
- кнопка «» - відновити нормальне положення вікна;
- кнопка «» - закрити вікно.

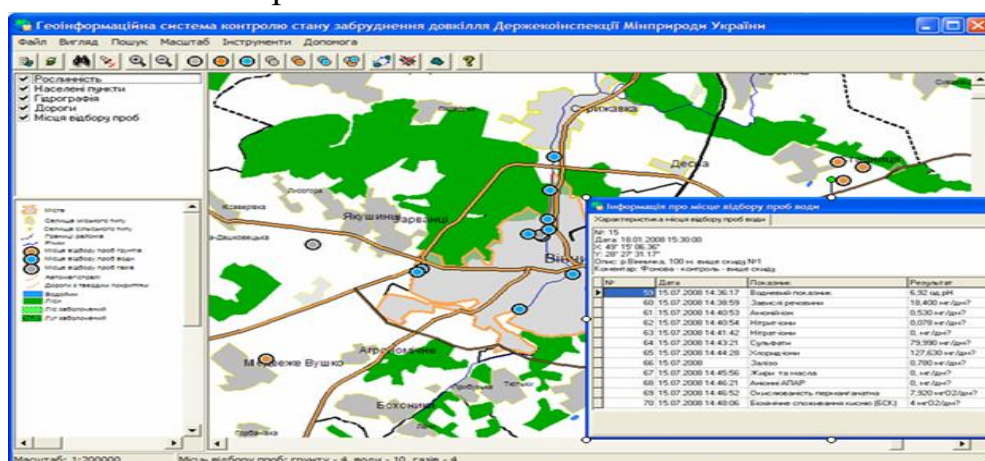
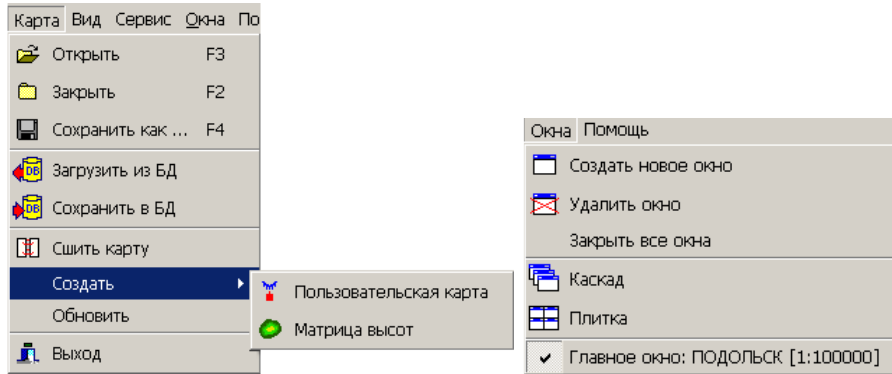


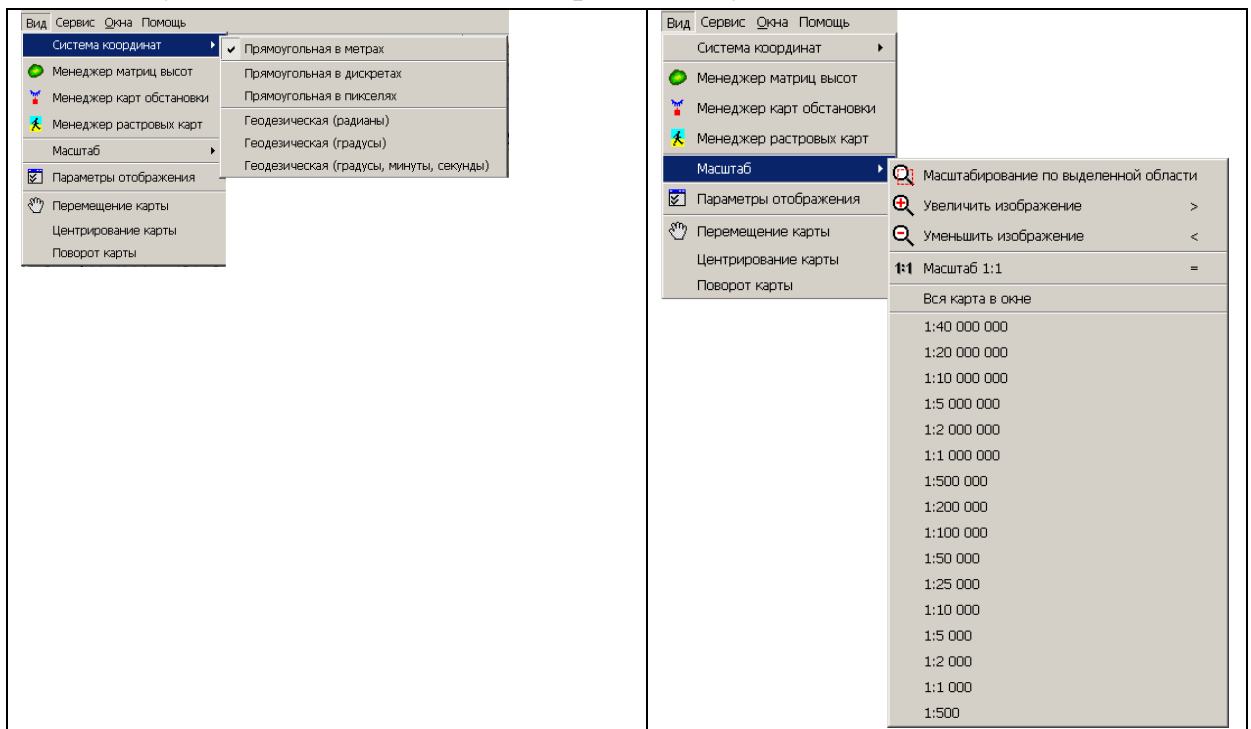
Рис. В.1. Інтерфейс ПК управління і відображення ЦКРС

Рядок головного меню дозволяє забезпечити швидкий доступ оператора до повного переліку необхідних для роботи команд, що розміщуються, в залежності від їх призначення, у відповідних пунктах головного меню: «Карта», «Вид», «Сервіс», «Вікна», «Допомога». Вибір команд з меню, що випадає можна здійснити за допомогою маніпулятора «миша» або кнопок панелі інструментів.

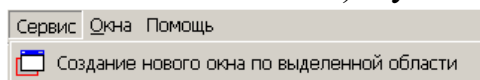
Склад команд пунктів головного меню показаний на рис.В.2 (а - г).



а) Пункт головного меню «Карта» б) Пункт головного меню «Вікна»




в) Пункт головного меню «Вид»






г) Пункт головного меню «Сервіс»

Рис. В.2. Головне меню


Панель інструментів містить кнопки для швидкого доступу до найбільш часто використовуваних команд меню:

- кнопка «» - відкрити карту;



- кнопка «» - закрити карту;
- кнопка «» - зберегти карту;
- кнопка «» - зшити карту;
- кнопка «» - завантажити карту з БД;
- кнопка «» - зберегти карту в БД;
- кнопка «» - завантажити менеджер файлів матричної інформації;
- кнопка «» - завантажити менеджер файлів растрових карт;
- кнопка «» - завантажити менеджер файлів обстановки;
- кнопка «» - масштабування по виділеній області;
- кнопка «» - збільшити зображення;
- кнопка «» - зменшити зображення;
- кнопка «» - встановити вихідний масштаб;
- кнопка «» - параметри відображення;
- кнопка «» - переміщення карти;
- кнопка «» - створення нового вікна по виділеній області;
- кнопка «» - створити нове вікно;
- кнопка «» - видалити вікно;
- кнопка «» - скасувати;
- кнопка «» - відновити;
- кнопка «» - допомога;
- кнопка «» - вихід.

Робоча область призначена для відображення ЦКРС.

Для відкриття картки необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Відкрити» пункту меню «Карта». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Відкрити / завантажити нову карту» (рис. В.3). У діалоговому вікні вибрати файл електронної карти (\* .map або \* .dir з подальшою конвертацією у формат \* .map (рис. В.4)) за допомогою «миші» або клавіш «↑» і «↓» клавіатури і натиснути кнопку «Відкрити». У разі успішного відкриття даного файлу діалогове вікно

закривається, а в робочій області головного вікна ПК управління і відображення карти (рис. В.1) з'явиться зображення електронної карти.

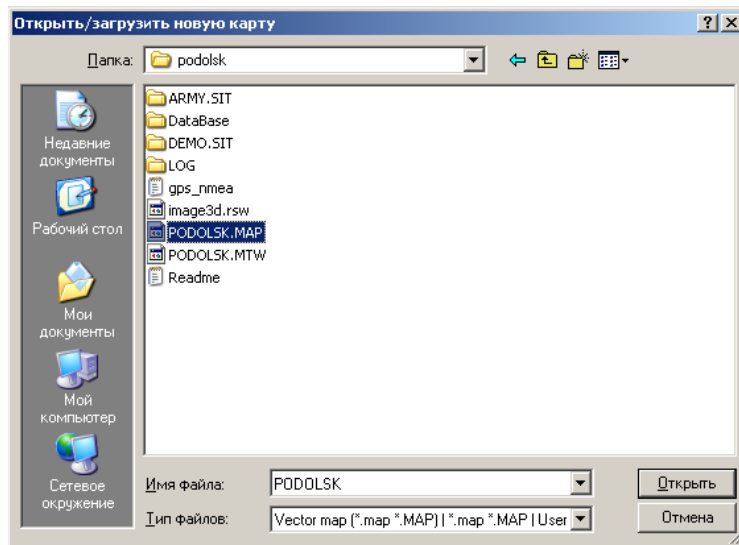



Рис. В.3. Діалогове вікно «Відкрити / завантажити нову карту»

Натискання кнопки «Скасувати» забезпечує закриття діалогового вікна «Відкрити / завантажити нову карту».

При відкритті карти з подальшим її конвертацією в формат з розширенням \* .map необхідно задати ім'я карти (ім'я файлу результату конвертації карти) і вибрати каталог для запису конвертованій карти за допомогою кнопки «» і натиснути «Застосувати». При натисканні кнопки «Скасувати» діалогове вікно закривається, а конвертація і відкриття карти не виконується.

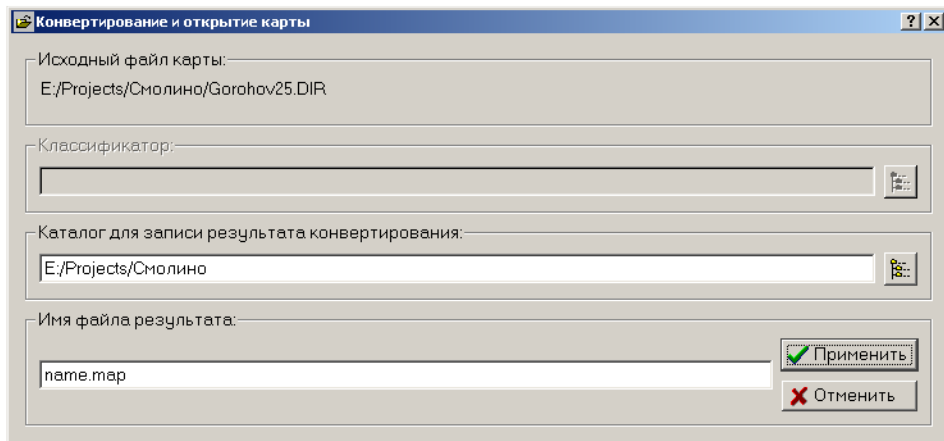




Рис. В.4. Діалогове вікно «Конвертація і відкриття карти»

Якщо карта збережена в БД, то для її відкриття необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Завантажити з БД» пункту меню «Карта». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Виберіть карту» (рисунки В.5). У діалоговому вікні вибрати карту за допомогою «миші» або клавіш «↑» і «↓» клавіатури і натиснути кнопку «Застосувати». У разі успішного відкриття даного файлу діалогове вікно

закривається, а в робочій області головного вікна ПК управління і відображення карти (рис. В.1) з'явиться зображення електронної карти. Натискання кнопки «Скасувати» забезпечує закриття діалогового вікна.

Для закриття карти необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Закрити» пункту меню «Карта».

Горизонтальна і вертикальна смуги прокрутки у нижнього і правого краю вікна використовуються для перегляду тих частин ЦКМ, які не відображаються у вікні зараз.

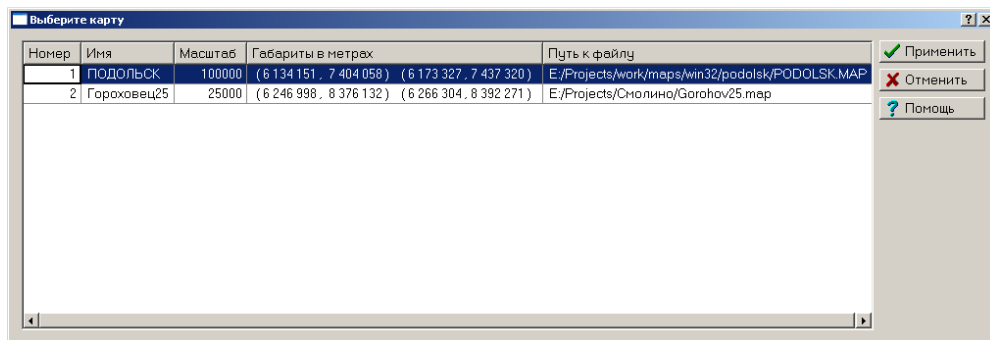





Рис. В.5. Діалогове вікно «Виберіть карту»

Також можна включити режим переміщення карти, натиснувши кнопку «» панелі інструментів. Потім встановіть курсор маніпулятора «миша» на зображення карти. Натиснувши і утримуючи ліву кнопку «миші», проведіть курсор в потрібному напрямку. Коли кнопка віджимається, або курсор «миші» не рухається, або курсор йде за межі вікна карти, переміщення карти припиняється. Для виходу з цього режиму необхідно віджати кнопку «».

Інформаційна панель, наведена на рис. В.6, призначена для оперативного інформування оператора про координати точки, на яку вказує курсор маніпулятора «миша» в робочому вікні, базовому (вихідному) масштабі і масштабі поточного відображення ЦКРС, а також про найменування і тип відображається ЦКМ.



Рис. В.6. Інформаційна панель

Для збереження карти необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Зберегти як ...» пункту меню «Карта». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Зберегти карту як ... (рис. В.7). У діалоговому вікні задати ім'я файлу і натиснути кнопку «Зберегти». Натискання кнопки «Скасувати» забезпечує закриття діалогового вікна «Зберегти карту як ...».

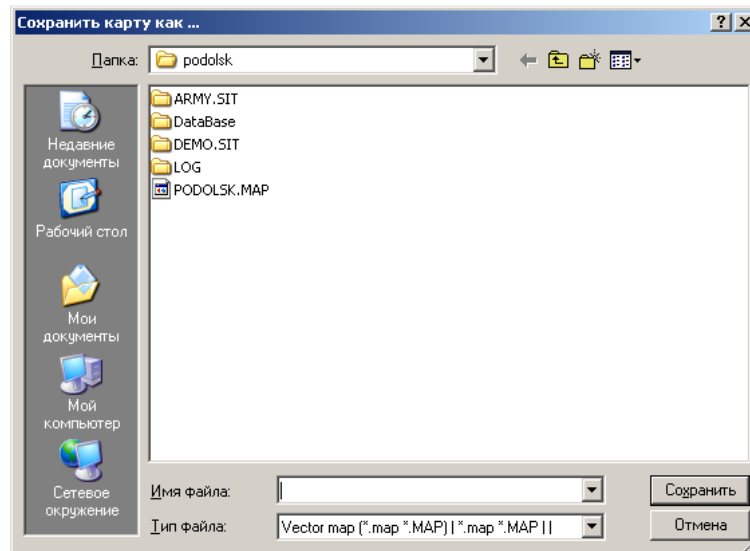




Рис. В.7. Діалогове вікно «Зберегти карту як ...»

Для збереження карти в БД необхідно натиснути кнопку  панелі інструментів або вибрати команду «Зберегти в БД» пункту меню «Карта».

Для додавання і видалення файлів матричної інформації необхідно натиснути кнопку  панелі інструментів або вибрати команду «Менеджер матриць висот» пункту меню «Файл». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Менеджер файлів матриць висот» (рис. В.8).

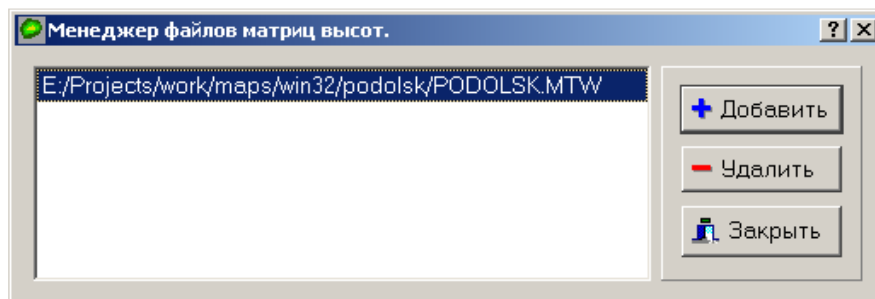


Рис. В.8. Діалогове вікно «Менеджер файлів матриць висот»

При натисканні кнопки «Додати» необхідно у відчиненому вікні вибрати файл матричної інформації для відкритої електронної карти (\* .mtw). У разі успішного відкриття даного файлу на екрані до зображення електронної карти додається зображення рельєфу місцевості. В іншому випадку буде видане відповідне повідомлення.

Для видалення файлу матричної інформації необхідно вибрати потрібний файл у списку відкритих файлів за допомогою «миші» або клавіш «↑» і «↓» клавіатури і натиснути кнопку «Видалити». При цьому даний файл видалиться зі списку і з зображення карти.

Натискання кнопки «Закрити» забезпечує закриття діалогового вікна «Менеджер файлів матриць висот».

Робота з менеджером карт обстановки (рис. В.9) і менеджером файлів растрових карт (рис. В.10) аналогічна роботі з менеджером файлів матриць висот.

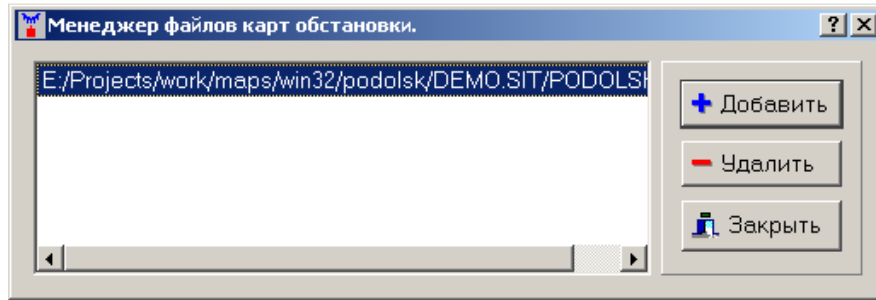


Рис. В.9. Діалогове вікно «Менеджер карт обстановки»

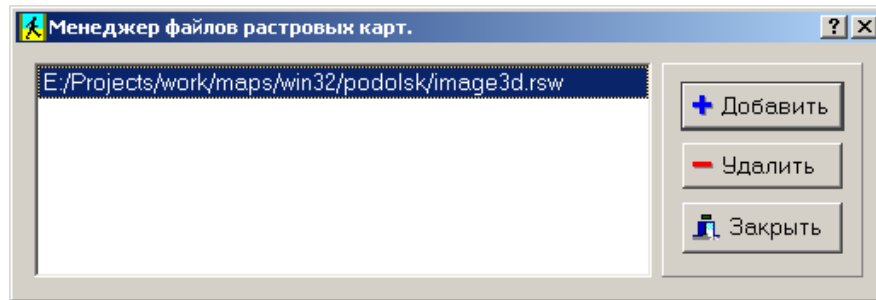



Рис. В.10. Діалогове вікно «Менеджер файлів растрових карт»

Для налаштування параметрів (властивостей) відображення карти необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Параметри відображення» пункту меню «Вид».

На сторінці «Карта» задаються настройки параметрів карти (рис. В.11): - яскравість і контрастність; - коефіцієнт масштабування.

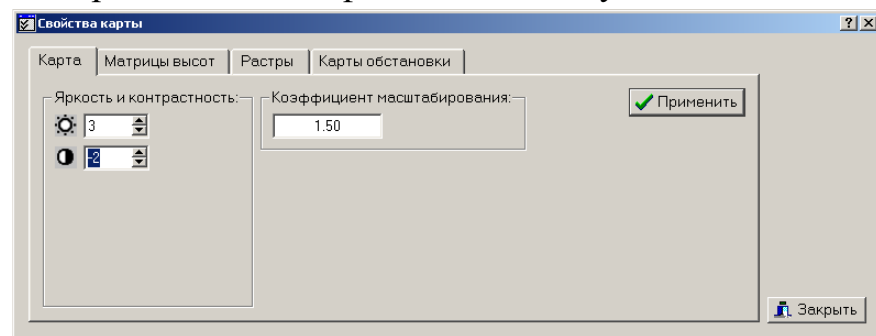


Рис. В.11. Діалогове вікно настройки параметрів відображення карти

На сторінках «Матриці висот» (рис. В.12) і «Растры» (рис. В.13) задаються настройки параметрів карти матриці висот і растрів: яскравість і контрастність; порядок відображення; ступінь видимості.

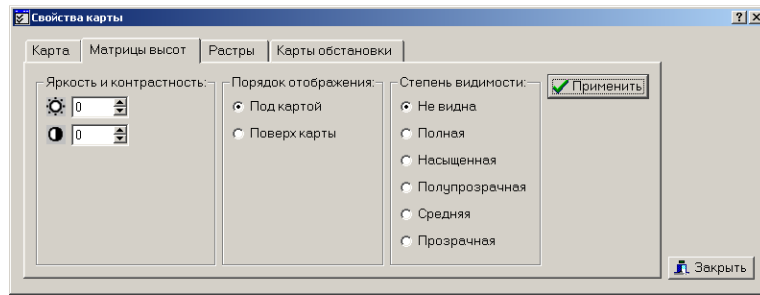


Рис. В.12. Діалогове вікно налаштування параметрів відображення матриці  
ВИСОТ

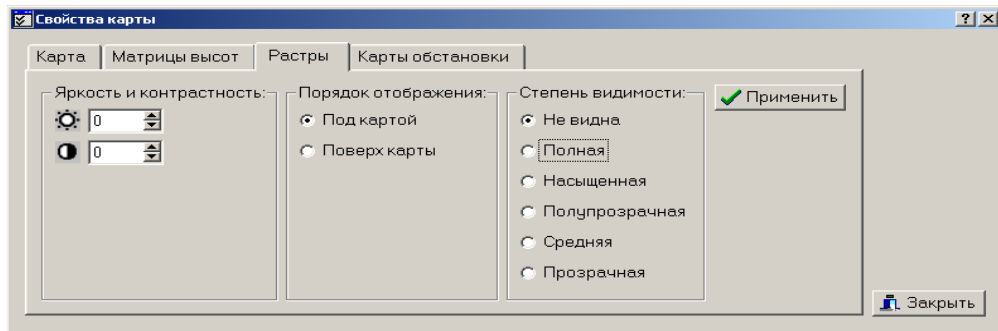


Рис. В.13. Діалогове вікно настройки параметрів відображення растрів

На сторінці «Карты обстановки» (рис. В.14) задаються настройки яркості і контрастності карти обстановки.

При натисканні кнопки «Застосувати» здійснюється застосування обраних параметрів відображення карти для поточної сторінки.

Натискання кнопки «Закрити» забезпечує відмову від застосування обраних налаштувань параметрів відображення карти. Після цього відбувається закриття діалогового вікна «Властивості карти».

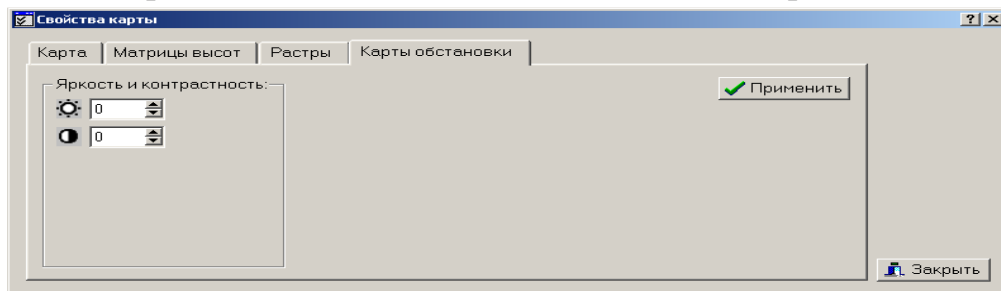










Рис. в.14. Діалогове вікно настройки параметрів відображення карти  
обстановки


Щоб включити режим зменшення зображення карти, необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Зменшити зображення» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид».

Так само зменшити зображення карти можна за допомогою масштабування по виділеній області. Натиснути послідовно кнопки «» і



«» і виділити область масштабування. Для виходу з цього режиму необхідно віджати кнопку «» або повторно вибрати команду «Масштабування по виділеній області» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид».

Щоб включити режим збільшення зображення карти, необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Збільшити зображення» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид».

Так само збільшити зображення карти можна за допомогою масштабування по виділеній області. Натиснути послідовно кнопки «» і «» і виділити область масштабування. Для виходу з цього режиму необхідно віджати кнопку «» або повторно вибрати команду «Масштабування по виділеній області» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид».


Для відображення карти в вихідному (базовому) масштабі необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Масштаб 1: 1» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид».

Щоб у вікні перегляду була видна вся карта, необхідно вибрати команду «Вся карта у вікні» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид». При цьому масштаб відображення карти зміниться так, що вона цілком відобразиться у вікні перегляду. Для переходу до конкретного значення масштабу карти необхідно вибрати команду пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид» з необхідним значенням масштабу відображення.

Для створення нового вікна в робочій області необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Створити нове вікно» пункту меню «Вікна». При цьому на екрані відобразиться порожнє вікно, в якому можна відкрити карту описаними вище способами. Для створення нового вікна по виділеній області необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Створення нового вікна по виділеній області» пункту меню «Сервіс» і утримуючи ліву кнопку «миші» виділити область для відображення.

Якщо в робочій області відкрито більше однієї картки, то перемикання між вікнами здійснюється вибором (натисканням лівої кнопки «миші») відповідного вікна з пункту меню «Вікна» або розміщенням вікон каскадом

вибором команди «Каскад» або плиткою вибором команди «Плитка» пункту меню « вікна ».

Для видалення вікна з робочою областю необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Видалити вікно» пункту меню «Вікна». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Закрити вікно» (рис. В.15).

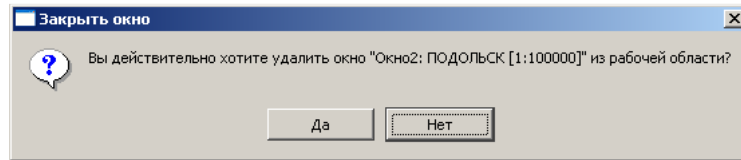


Рис. В.15. Діалогове вікно закриття вікна

При натисканні кнопки «Так» вибране вікно віддаляється з робочої області. Натискання кнопки «Ні» забезпечує закриття діалогового вікна «Закрити вікно».

### **1.3 Програмний компонент завдання і редагування точки розташування наземного пункту управління польотом ДПЛА на тренажері**

#### *Призначення програми*


ПК завдання і редагування точки стояння НПУ призначений для завдання і зміни координат точки стояння НПУ і відображення її на ЦКРС.

У відповідності зі своїм призначенням ПК забезпечує виконання таких функцій: введення та зміна значень координат точки стояння НПУ з клавіатури; відображення значка НПУ на карті; введення та переміщення точки стояння НПУ на карті за допомогою маніпулятора «миша»; установка точки стояння НПУ на карті за результатами топоприв'язки.


#### *Умови виконання програми*

Вихідними даними для ПК завдання і редагування точки стояння НПУ є ім'я файлу цифрової карти місцевості, значення координат точки стояння НПУ.

#### *Виконання програми*

Для завдання і редагування точки стояння НПУ необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Координати НПУ» пункту головного меню «Маршрут». В результаті цього з'являється діалогове вікно «Координати НПУ», показане на рис. В.16. Завдання і редагування координат НПУ можливо трьома способами: введення значень координат з клавіатури в діалоговому вікні «Координати НПУ»; за результатами топоприв'язки; за допомогою маніпулятора «миша».



Спочатку в вікні виводяться координати лівого нижнього кута карти. Координати НПУ задаються в метрах в абсолютних координатах карти. Коли вікно відкривається для редагування координат НПУ, в ньому виводяться поточні значення координат. Якщо після введення значень натиснути кнопку «Застосувати», то на карту в точку із заданими координатами буде виведена (в разі редагування координат - перенесена) піктограма НПУ «», і в першій інформаційній панелі над вікном карти відобразяться введені значення.

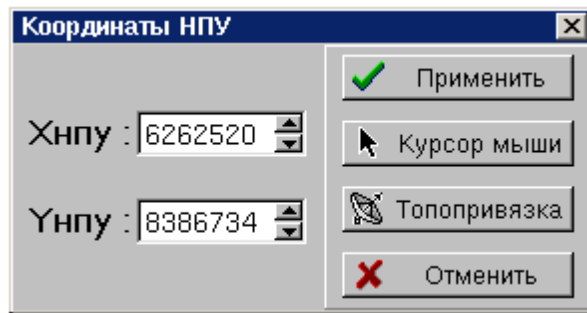


Рис. В.16. Діалогове вікно «Координати НПУ»

Для введення або переміщення точки стояння НПУ за результатами топоприв'язки необхідно натиснути кнопку «Прив'язка». В результаті цього, якщо дані топоприв'язки задовольняють координатам карти, піктограма НПУ відображається в місці, відповідному координатам топоприв'язки. В іншому випадку видається відповідне повідомлення.

Для введення точки стояння НПУ за допомогою маніпулятора «миша» необхідно закрити вікно «Координати НПУ», натиснувши кнопку «Курсор миші». Далі, встановивши курсор «миші» в точку на карті, яка відповідає НПУ, натиснути ліву кнопку «миші». При цьому на карті з'явиться піктограма, що відображає положення НПУ. У цьому ж режимі, якщо точка НПУ вже встановлена, можна поставити. Для цього потрібно вибрати піктограму НПУ, встановивши на неї курсор «миші» і натиснувши ліву кнопку. Потім перемістити «миша» з натиснутою лівою кнопкою в потрібне місце карти. Коли кнопка віджимається, НПУ перемальовується в новому місці.

Натискання кнопки «Скасувати» закриває діалогове вікно «Координати НПУ» і скасовує установку або редагування точки стояння НПУ.

Якщо для вибраної ділянки робіт відсутній матриця висот, то після завдання координат  $X$  і  $Y$  точки стояння НПУ на екран буде виведено діалогове вікно, наведене на рис. В.17, для завдання висоти точки стояння НПУ з топографічної карти.

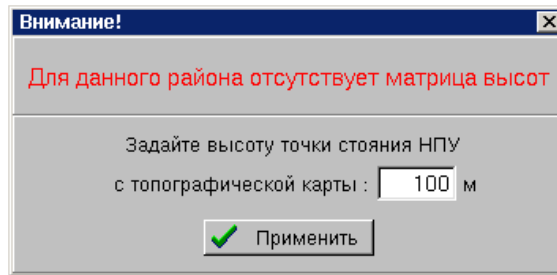



Рис. В.17. Діалогове вікно для завдання висоти точки стояння НПУ

Якщо при редагуванні координат НПУ маршрут був заданий, то він коригується щодо нових значень координат точки стояння НПУ.

Після завдання або редагування точки стояння НПУ з клавіатури або за результатами топоприв'язка встановлюється режим редагування координат НПУ за допомогою маніпулятора «миша».

Для виходу з цього режиму необхідно віджати кнопку «» або повторно вибрати команду «Координати НПУ» пункту меню «Маршрут».

#### **1.4 Програмний компонент прокладки і редагування маршруту**

##### *Призначення програми*

ПК прокладки і редагування маршруту призначений для розробки і редагування маршруту на тлі ЦКРС.

У відповідності зі своїм призначенням ПКТ прокладки і редагування маршруту забезпечує виконання таких функцій: прокладка маршруту по карті за допомогою маніпулятора «миша»; автоматичне формування і відображення на карті маршруту польоту ДПЛА з урахуванням пріоритету і часу виконання завдань екологічного спостереження і напрямку вітру; редагування маршруту; перегляд параметрів маршруту в табличному вигляді; видалення маршруту з карти; вибір маршруту з БД польотів ДПЛА і відображення його на карті.

##### *Умови виконання програми*













Вихідними даними для ПК прокладки і редагування маршруту є ім'я файлу цифрової карти місцевості, матриця висот, значення координат точки розташування НПУ, координати районів особливої уваги і об'єктів екологічного спостереження, значення швидкості і напрямку вітру.

##### *Виконання програми*


Головне вікно ПК прокладки і редагування маршруту має вигляд, наведений на рис. В.18.

Склад команд пунктів головного меню показаний на рис. В.19.


Панель інструментів містить кнопки для швидкого доступу до найбільш часто використовуваних команд меню:

- кнопка «» - створити маневр;
- кнопка «» - створити спеціальний маневр;
- кнопка «» - видалити маневр;
- кнопка «» - змінити маневр;
- кнопка «» - додати маневр в шлях;
- кнопка «» - вставити маневр в шлях;
- кнопка «» - видалити маневр з шляху;
- кнопка «» - додати точку;
- кнопка «» - видалити точку;
- кнопка «» - змінити точку;
- кнопка «» - завантажити маршрут з БД;
- кнопка «» - зберегти маршрут в БД;


Можливі три способи завдання маршруту: прокладка на тлі ЦКРС за допомогою маніпулятора «миша» нового маршруту; вибір з БД польотів ДПЛА раніше розробленого маршруту і відображення його на карті для можливого подальшого редагування та використання; автоматичне формування і відображення на карті маршруту польоту ДПЛА.



Маршрут складається з пов'язаної послідовності маневрів. Маневри в свою чергу складаються з пов'язаної групи проміжних точок маршруту, яка утворює траєкторію маневру. Для створення маневру за допомогою маніпулятора «миша» необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Створити ...» пункту меню «Маневри». В результаті цього з'являється діалогове вікно «Характеристики маневру», показане на рис. Г.20.



При натисканні кнопки «Застосувати» здійснюється збереження встановлених характеристик маневру. Натискання кнопки «Закрити» забезпечує закриття діалогового вікна «Характеристики маневру». Редагування маневру передбачає наступні операції: додавання проміжних точок маршруту; видалення проміжних точок маршруту ХТТ; зміна проміжних точок маршруту.



Щоб додати проміжних точок маршруту в маневр, необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Додати точку» пункту головного меню «Маневри». В результаті цього з'являється діалогове вікно «Характеристики ХТТ».

При натисканні кнопки «Застосувати» вікна «Характеристики проміжних точок маршруту» проводиться перевірка всіх умов і редагування маневру. При невиконанні будь-якої умови видаються відповідні повідомлення. При виконанні всіх умов проміжні точки маршруту з'єднуються прямими, утворюючи ламану лінію маршруту, і знову в вікні «Характеристики проміжних точок маршруту» виводяться значення параметрів точки вже з обчисленим мінімально допустимим значенням висоти  $H$  (при наявності матричної інформації про рельєф місцевості), які знову можна відредагувати. Кнопка «Скасувати» у діалоговому вікні «Характеристики ХТТ» закриває це вікно і скасовує редагування.

Для виходу з режиму додавання проміжних пунктів маршруту необхідно віджати кнопку  або повторно вибрати команду «Додати точку» пункту головного меню «Маневри».

Щоб видалити пункт маршруту з маневру, необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Видалити точку» пункту головного меню «Маневри». Для виходу з режиму видалення пунктів маршруту необхідно віджати кнопку  або повторно вибрати команду «Видалити точку» пункту головного меню «Маневри».


Щоб змінити пункти маршруту, необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Змінити точку» пункту головного меню «Маневри». Для виходу з режиму переміщення пункту маршруту необхідно віджати кнопку  або повторно вибрати команду «Змінити точку» пункту головного меню «Маневри».


Для виходу з режиму створення траєкторії руху необхідно віджати кнопку  або повторно вибрати команду «Створити ...» пункту головного меню «Маневри». При розробці маршруту можна використовувати готовий маршрут з БД. Для цього необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Завантажити з БД ...» пункту головного меню «Маршрут».


При автоматичній розробці маршруту траєкторія маневру є спеціальною. Існують наступні типові види спеціальних траєкторій авіаційного маневру: «відрізок»; «замкнута траєкторія»; «коло»; «метелик»; «вісімка»; «змійка»; «область».

Розробка маневру відбувається наступним чином: вибирається спеціальний маневр з переліку вручну або автоматично з урахуванням завдання екологічного спостереження; вводиться набір параметрів, що дозволяє побудувати траєкторію руху; автоматично відбувається побудова

траєкторії руху; відбувається повне або часткове заповнення параметрів заголовка маневру; здійснюється збереження траєкторії руху.

Параметри розробленого або обраного з БД маршруту для зручності можна переглянути в табличному вигляді. Для цього необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Показати в таблиці» пункту головного меню «Маршрут». В результаті цього на екрані з'явиться таблиця з параметрами проміжних пунктів маршруту.

Для видалення таблиці з екрану необхідно віджати кнопку  або повторно вибрати команду «Показати в таблиці» пункту головного меню «Маршрут».

Для видалення з карти маршруту на поточному каналі необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Видалити» пункту головного меню «Маршрут». Після цього буде виданий запит на підтвердження видалення.

## **1.5 Програмний компонент збереження маршруту в БД**

### *Призначення програми*


ПК збереження маршруту в БД призначений для збереження розробленого маршруту в БД, а також, в разі розробки маршруту для обраних завдань, для формування польотного завдання в БД для обраних завдань і цього маршруту.

У відповідності зі своїм призначенням ПК логічно пов'язує завдання екологічного спостереження, розроблений маршрут, ЦКРС і польотне завдання в єдине інформаційне поле автоматизованої системи управління ДПЛА на тренажері.

### *Умови виконання програми*

Функціонування ПК збереження маршруту в БД можливо після закінчення розробки маршруту. Вихідними даними для ПК є ім'я файлу цифрової карти місцевості, координати точки розташування НПУ, список маневрів на маршруті.

### *Виконання програми*

Щоб зберегти розроблений маршрут в БД необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Зберегти в БД ...» пункту меню «Маршрут» в пункті головного меню «Завдання». В результаті цього видається запит на підтвердження збереження: «Ви дійсно хочете зберегти поточний маршрут в БД?».

## **2. Програмний комплекс «Розробка польотного завдання»**

### **2.1 Призначення програмного комплексу**

ПК розробки польотного завдання (ПЗ) ДПЛА екологічного спостереження забезпечує виконання таких функцій: перегляд існуючих в базі даних ПЗ; редагування існуючих ПЗ; створення нових ПЗ; створення нових параметрів ПЗ; збереження змін в базі даних.


## **2.2 Умови виконання програмного комплексу**

Програмний комплекс розробки ПЗ ДПЛА екологічного спостереження функціонує на комп'ютерах під управлінням операційних систем Windows 2000 / XP і Linux / MSVC. Для функціонування ПК в Linux-подібних системах необхідне графічне середовище X Window.

Програмний комплекс розроблено в середовищі програм Microsoft Visual C ++ 6.0 на базі бібліотек розробки додатків Qt 3.3.

## **2.3 Запуск програми**

Запуск ПК розробки ПЗ ДПЛА екологічного спостереження проводиться шляхом виконання виконуваного файлу PZ\_qt.

Завершення роботи ПК здійснюється натисканням стандартної кнопки  - «Завершення роботи», яка знаходиться в правому верхньому куті основної форми ПК.

## ДОДАТОК Г

**ЗАВДАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ  
ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ НА СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ТРЕНАЖЕРАХ  
ДПЛА ЕКОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

*(відповідно до Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища, затвердженої Постановою Верховної Ради України)*

**КЛАСИФІКАЦІЯ**

*спеціалізованих тренажерів ДПЛА екологічного спостереження*

7. Спеціалізований тренажер моніторингу навколишнього природного середовища
8. Спеціалізований тренажер моніторингу техногенне небезпечних об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури.
9. Спеціалізований тренажер моніторингу та попередження надзвичайних ситуацій.
10. Спеціалізований тренажер моніторингу об'єктів природно-заповідного фонду.
11. Спеціалізований тренажер моніторингу підземних об'єктів (трубопроводів та земельних провалин).
12. Спеціалізований тренажер моніторингу стану водної поверхні.

**ЗАВДАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

***1. Моніторинг атмосферного повітря.***

- Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря (динаміка викидів забруднюючих речовин стаціонарними та пересувними джерелами, основні забруднювачі атмосферного повітря (за галузями економіки).
- Транскордонне забруднення атмосферного повітря.
- Якість атмосферного повітря в населених пунктах.
- Стан радіаційного забруднення атмосферного повітря.
- Використання озоноруйнівних речовин та їх вплив на довкілля.
- Вплив забруднюючих речовин на здоров'я людини та біорізноманіття.

- Моніторинг заходів, спрямованих на поліпшення стану атмосферного повітря.

### ***2. Моніторингові дослідження щодо змiну клімату.***

- Оцінка антропогенних викидів та абсорбції парникових газів.

- Моніторинг скорочення антропогенних викидів парникових газів та адаптації до змін клімату.

### ***3. Моніторинг водних ресурсів.***

- Моніторинг водних ресурсів та їх використання.

- Моніторинг водозабезпеченості територій та регіонів

- Забруднення поверхневих вод.

- Моніторинг скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти та очистка стічних вод.

- Моніторинг транскордонного забруднення поверхневих вод.

- Моніторинг якості поверхневих вод (оцінка якості вод за гідрохімічними показниками, гідробіологічна оцінка якості вод та стан гідро біоценозів, мікробіологічна оцінка якості вод з огляду на епідемічну ситуацію)

- Радіаційний стан поверхневих вод.

- Моніторинг якості питної води та її вплив на здоров'я населення.

- Екологічний стан чорного та азовського морів.

- Моніторинг заходів щодо поліпшення стану водних об'єктів.

### ***4. Моніторинг за збереженням біологічного та ландшафтнього різноманіття, природно-заповідного фонду та національної екологічної мережі.***

- Моніторинг заходів щодо збереження біологічного та ландшафтнього різноманіття.

- Моніторинг національної екомережі.

- Моніторинг природних територій та об'єкти.

- Моніторинг природно-заповідного фонду.

- Моніторинг водно-болотних угідь міжнародного значення.

- Моніторинг біосферних резерватів та об'єктів всесвітньої природної спадщини.



- Моніторинг за станом охорони, використання та відтворення рослинного світу.

- Моніторинг лісових ресурси.

- Моніторинг за станом використання недеревних природних рослинних ресурсів.

- Моніторинг за охороною та відтворенням видів рослин, занесених до червоної книги України та тих, що підпадають під дію міжнародних договорів.

- Моніторинг адвентивних видів рослин.

- Моніторинг стану зелених насаджень.

- Моніторинг заходів щодо збереження рослинного світу.

- Моніторинг за охороною, використанням та відтворенням тваринного світу.

- Моніторинг тваринного світу (стан і ведення мисливського та рибного господарств; охорона та відтворення видів тварин, занесених до червоної книги України, та тих, що підпадають під дію міжнародних договорів; інвазійні види тварин; заходи щодо збереження тваринного світу).

- Моніторинг стану рекреаційних ресурсів та розвиток курортних зон.

### ***5. Моніторинг земельних ресурсів та ґрунтів.***

- Моніторинг структури та використання земельних ресурсів (структура та динаміка змін земельного фонду; господарське використання земельних угідь).

- Моніторинг основних чинників антропогенного впливу на земельні ресурси (стан і якість ґрунтів; деградація земель).

- Моніторинг використання та охорони земель.

### ***6. Моніторинг за погодженням та збереженням надр.***

- Моніторинг мінерально-сировинної бази (стан та використання мінерально-сировинної бази).

- Моніторинг геологічного середовища (підземні води: ресурси, використання, якість; екзогенні геологічні процеси).

- Геологічний контроль за вивченням та використанням надр.

### ***7. Моніторинг поводження з відходами.***

- Моніторинг утворення та накопичення відходів.
- Моніторинг поводження з відходами (збирання, зберігання, утилізація та видалення).
- Моніторинг використання відходів як вторинної сировини.
- Моніторинг транскордонного перевезення небезпечних відходів.

### ***8. Моніторинг стану екологічної безпеки.***

- Моніторинг об'єктів, що становлять підвищену екологічну небезпеку
- Моніторинг стану радіаційного забруднення території України
- Моніторинг техногенно небезпечних об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури.

### ***9. Моніторинг впливу промисловості на довкілля.***

- Моніторинг впливу на довкілля (гірничодобувна промисловість; металургійна промисловість; харчова промисловість).
- Моніторинг заходів з екологізації промислового виробництва.

### ***10. Моніторинг впливу сільського господарства на довкілля.***

- Моніторинг впливу на довкілля (внесення мінеральних і органічних добрив на оброблювані землі; використання пестицидів).
- Моніторинг зрошення та осушення земель.
- Моніторинг тенденцій у тваринництві.
- Моніторинг органічного сільського господарства.

### ***11. Моніторинг впливу енергетичного комплексу на довкілля.***

- Моніторинг енергетики та її вплив на довкілля (структура виробництва та використання енергії; ефективність енергоспоживання та енергозбереження).
- Моніторинг впливу енергетичної галузі на довкілля.
- Моніторинг використання відновлюваних джерел енергії та розвиток альтернативної енергетики.

### ***12. Моніторинг впливу транспорту на довкілля.***

***13. Моніторинг за збалансованим виробництвом та споживанням.***

### ***14. Моніторинг проведення природоохоронних дій.***

**РУБРИКАТОР  
ЗАВДАНЬ У СФЕРІ ЕКОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА  
ДОПОМОГОЮ ДІЛА**

*Перелік завдань*

1. А. ГЕОЛОГІЯ І РЕСУРСИ НАДР (в т.ч. підземні води)
  - 1.1. А1. Структурна геологія
  - 1.2. А2. Породні комплекси
  - 1.3. А3. Мінерагеничні дослідження
  - 1.4. А4. Гідрогеологія
  - 1.5. А5. Геоморфлогія і сучасні рельєфоутворюючі процеси
2. Б. ГІДРОЛОГІЯ І ПОВЕРХНЕВІ ВОДНІ РЕСУРСИ
  - 2.1. Б1. Гідрологія суші
3. В. ЛІСОВІ РЕСУРСИ І РОСЛИННИЙ ПОКРИВ
  - 3.1. В1. Геоботаніка
  - 3.2. В2. Лісові ресурси
4. Г. ВПЛИВИ НА ДОВКІЛЛЯ
  - 4.1. Г1. Надра
  - 4.2. Г2. Ліси
  - 4.3. Г3. Землі
  - 4.4. Г4. Ландшафти
  - 4.5. Г.5. Селітебні території
  - 4.6. Г6. Водні об'єкти
  - 4.7. Г7. Повітряне середовище
5. Д. ТВАРИННИЙ СВІТ
6. Ж. АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ
  - 6.1. Ж1. Атмосферна циркуляція
  - 6.2. Ж2. Хмарність
  - 6.3. Ж3. Антропогенні впливи на атмосферне повітря
7. З. АТМОСФЕРНІ ОПАДИ І СНІГОВИЙ ПОКРИВ
8. І. КОМУНІКАЦІЙНІ ОБ'ЄКТИ
9. К. СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО
10. Л. ВИКОРИСТАННЯ І РОЗВИТОК ТЕРИТОРІЙ

№ з/п	ТЕМА	НАЙМЕНУВАННЯ ЗАВДАННЯ
<b>А. ГЕОЛОГІЯ І РЕСУРСИ НАДР (в т.ч. підземні води)</b>		
<b>А1. СТРУКТУРНА ГЕОЛОГІЯ</b>		
1.	Трансрегіональні диз'юнктиви.	Виявлення трансрегіональних лінеamentів, розривних порушень Виявлення зон планетарної тріщинності Виявлення кільцевих структур різних рангів і типів(мега-, макро-мезоструктури, полігенні, моногенні тощо).
2.	Структурно	Уточнення структурного каркасу території, у

	формаційні підрозділи.	тому числі виділення тектонічних блоків різного ступеню переробки (внаслідок кливажування, розсланцювання, зім'яття в складки тощо). Виявлення структур, уточнення контурів виявлених структур і зон різних типів (синклінорії, антиклінорії, мікститові, сутурні комплекси тощо).
3.	Регіональні диз'юнктиви.	Виявлення регіональних лінеаментів, розривних порушень різних видів та елементів їх будови. Виявлення ареалів різних типів тріщинності (паралельні, радіальні, віялоподібні, концентричні, конусоподібні та ін.).
4.	Неотектонні (сучасні ендегенні процеси).	Виявлення зон новітньої ендегенної активності і динаміки зміни параметрів теплових аномалій (рифтові, сейсмогенні та ін.). Виявлення ділянок локальних структур, активних в новітній час (дрібних розривів, тріщинності, структур просідання, зміщення, активізації вулканів та їх елементів, фумарол та ін.).
5.	Складчасті комплекси (зони) і структури.	Виявлення і уточнення меж регіональних структур різних типів (лінійно-складчасті, покровноскладчасті, зім'яло, меланжеві, міжбрилові дислокації, вали і тому подібне), для відкритих територій, розшифровка їх внутрішньої будови. Виявлення і уточнення меж великих складок і структур (синкліналі, антикліналі, брахіструктури, горст-антикліналі, горст-синкліналі, граніто-гнейсові куполи, вали і тому подібне), для відкритих територій, розшифровка їх внутрішньої будови.
6.	Локальні структурні елементи.	Виділення розривів локального класу : дрібні оперяючі розломи, елементи динамопар, ділянки тріщинності, катаклаза, зв'язані з диз'юнктивами та ін. Виділення дрібних складок і їх груп, замкових частин великих складок, структурних носів, диапиров лінійних і куполовидних, соляних куполів та ін.
<b>A2. ПОРОДНІ КОМПЛЕКСИ</b>		

7.	Стратифіковані утворення.	<p>Виділення і уточнення контурів стратифікованих утворень (товщі, комплекси, пачки та ін.).</p> <p>Дослідження по протяжності мар керуючих (опорних) горизонтів, шарів серед однорідних порід.</p>
8.	Магматичні утворення.	<p>Виділення регіональних площ розвитку інтрузивних утворень (інтруз. комплекси, батоліти, штоки, поліхронні масиви та ін.), дослідження їх меж.</p> <p>Виділення регіональних площ розвитку вулканічних утворень(вулк. комплекси, складно побудовані лавові, туфові і лахарові поля, вулканоплутони, стратовулкани, кальдеро-вулкани, моногенні вулкани, щитові будови та ін.), дослідження їх меж.</p> <p>Виділення локальних площ розвитку інтрузивних утворень (фазні тіла, акмоліти, бісмаліти, інтрузивні куполи, конічні поклади, лаколіти, лополіти, штоки та ін.), виявлення їх внутрішньої будови, в межах відкритих територій дослідження меж, отримання інформації про речовий склад геологічних тіл.</p> <p>Виділення площ розвитку нестратифікованих вулканічних утворень (вулк. підкомплекси, лавові і туфові покриви, каскади, маари, вулканічні конуси, куполи, діатреми, сілли, сомми, великі екструзиви та ін.), на відкритих територіях, виявлення їх внутрішньої будови, дослідження контурів.</p> <p>Виділення малих інтрузій, лінійно витягнутих малих інтрузій неправильної форми та ін.), оконтурювання їх полів і штокверкових жильних зон.</p> <p>Виділення локальних вулканічних і палеовулканічних тіл (лавові і лахарові потоки, паразитичні кратери, жерловини, вулканічні голки, некки, екструзиви, трубки вибуху, туфові і туффізитові дайки та ін.), дослідження їх меж і по протяжності.</p>
9.	Метаморфічні утворення.	Виділення площ розвитку метаморфічних утворень (метаморфічні і метасоматичні підкомплекси, ділянки, зони приконтактних,

		приразломних метасоматичних порід та ін.), для відкритих територій, виявлення елементів їх внутрішньої будови, дослідження меж.
10.	N - Q освіти.	Дешифрування N - Q відкладень, визначення їх генетичних типів, співвідношень, форм речового складу.
11.	Похоронені утворення.	Виявлення і геометризація похоронених (що неглибоко залягають) частин геологічних тіл і тектонічних порушень.
<b>A3. МІНЕРАГЕНІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>		
12.	Мінерагенічне районування.	Уточнення меж мінерагенічних підрозділів (мінерагенічних зон, поясів, басейнів тощо).
		Уточнення меж мінерагенічних підрозділів (рудоносних районів, площ, вузлів, полів тощо), для відкритих територій виявлення елементів внутрішньої будови.
		Уточнення меж структур, з якими пов'язані родовища вугілля, нафти, газу, (стратиформного та ін. генетичних типів), для відкритих територій виявлення елементів їх внутрішньої будови.
13.	Рудоконтрольовані структури та комплекси.	Отримання додаткових критеріїв для уточнення закономірностей розміщення корисних копалин, локалізації потенційно рудоносних об'єктів, перспективних ділянок (рудоконтролюючих розломів, їх зчленувань, перетинів, зон дроблення, тріщинності, складок і їх замкових частин, сприятливих породних комплексів тощо).
<b>A4. ГІДРОГЕОЛОГІЯ</b>		
14.	Гідрогеологічне районування.	Гідрогеологічне районування по межах породних комплексів, вододілах, потоках і тому подібне (гідрогеол. регіони, райони, басейни 3 і 4 порядків та ін.).
		Уточнення меж водогосподарських підрозділів (водогосп. регіони, райони, басейни 1 і 2 порядки і тому подібне).
15.	Природні ресурси підземних вод (ПРПВ).	Уточнення меж територій оцінки ПРПВ (стокові басейни в межах артезіанських басейнів, структурно-літологічні бар'єри та ін.).
		Виявлення непрямих ознак і виявлення ділянок місця розташування ґрунтових вод,

		оконтурювання водоносних шарів.
		Виявлення ділянок розвантаження (розкриття) ґрунтових вод на поверхні.
<b>A5. ГЕОМОРФОЛОГІЯ І СУЧАСНІ РЕЛЬЄФОУТВОРЮЮЧІ ПРОЦЕСИ</b>		
16.	Генетичні категорії рельєфу.	Визначення генетичного типу рельєфу для території (водної ерозії, абразії і акумуляції, водно-льодовиковій ерозії і акумуляції; вітрової ерозії і акумуляції; вулканічної діяльності і їх різновиду) .
		Виділення схилів і визначення їх генезису (обвального-осипні, зсувні, соліфлюкційні, делювіальні, ерозійні, алювіально-терасні, тектонічні, поверхні лавових потоків та ін.).
17.	Морфографічні категорії рельєфу.	Визначення морфографічної категорії рельєфу території (рівнинний, горбистий, гірський).
		Визначення морфографічного типу рельєфу (хвилястий, горбистий, гривистий, западинний, балочний, яр, предгірний, високогірний та ін.).
		Визначення морфографічного типу схилу (опуклий, ввігнутий та ін.).
		Визначення морфографічного типу річкової долини (U-подібна, V-подібна, така, що терасує, безрусельно-деллева та ін.).
18.	Морфометричні категорії рельєфу.	Визначення морфометричного типу рельєфу по густині розчленування.
		Виділення територій з різним типом розчленування (структурно-денудація, структурно-ерозійне та ін.).
		Виділення морфометричного типу рельєфу по глибині розчленування.
		Виявлення ділянок аномальних ухилів подовжнього профілю тальвегів-потоків.
19.	Форми рельєфу.	Виділення елементів, що обмежують форми рельєфу (схил, вершина, брівка, сідловина, уступ, вододіл, тиловий шов та ін.).
20.	Карстово-суффізійні процеси і просадки ґрунту.	Виділення ділянок виходу на поверхню порід, що карстуються.
		Виявлення форм прояву карстово-суффізійних процесів.
		Виділення масивів з проявом карстово-суффізійних процесів.

		Визначення типів малюнків, густини і характерних розмірів карстових і суффозійних депресій в межах масиву, що виділяється.
		Виявлення зв'язаності форм прояву карстово-суффозійних процесів з елементами ерозійної мережі.
		Визначення стадії розвитку форм прояву карстово-суффозійних процесів і виділення усередині виділеного масиву ділянок поширення форм прояву карстово-суффозійних процесів, що знаходяться на різних стадіях розвитку.
		Визначення дій що посилюють розвиток карстово-суффозійних процесів.
21.	Геокріологічні явища.	Виділення термокарстових озерних масивів, аласів і хасирів, визначення щільності форм і їх характерного малюнка.
		Виділення ділянок схилів з розвитком процесів солефлюкції.
		Виділення курумних полів.
		Виявлення таликів.
		Визначення стадії розвитку кріогенних процесів і виділення масивів поширення форм прояву кріогенних процесів, що знаходяться на різних стадіях розвитку.
		Виявлення і типізація ділянок прогресуючої деградації ММП.
		Визначення чинників, стимулюючих розвиток кріогенних процесів.
22.	Ерозійні процеси.	Виявлення масивів з проявом площинного змиву.
		Виявлення ярів.
		Визначення масивів, схильних до процесів яро утворення.
		Визначення характерного малюнка, розмірів, густини форм прояву процесів лінійної і площинної ерозії.
		Виявлення зв'язаності форм прояву лінійної ерозії із структурно-тектонічною будовою.
		Виділення ділянок берегів потоків, що активно руйнуються.
		Визначення чинників стимулюючих розвиток ерозійних процесів.



		Визначення стадії розвитку форм (окремих частин форм) прояву ерозійних процесів і виділення ділянок поширення ерозійних процесів, що знаходяться на різних стадіях розвитку.
23.	Процеси переформовування берегової зони озер і водосховищ.	Виявлення типів абразійних форм (кліфи, бенчі, укоси, кекури, абразійні дуги та ін.).
		Виявлення ділянок узбережжя з проявом термоабразійних процесів.
		Виділення типів акумулятивних берегів і форм берегової акумуляції.
		Визначення форм берегової акумуляції (тераси і пляжі, коси, перейми, томболо, пересипи, пляжі, лагуни, мілини і осушення літоралі).
		Виділення ділянок формування потоків наносів.
		Визначення міри активності руйнування берегів і виділення ділянок з різною мірою активності процесів руйнування берегів.
		Визначення режиму берегової акумуляції (інтенсивність і сезонність побережного і поперечного переміщення наносів і річкового твердого стоку).
24.	Гравітаційні процеси.	Виділення ділянок схилів із зсувними деформаціями.
		Виділення осипів і обвалів.
		Виділення делювіально-пролювіальних конусів винесення.
		Визначення стадії розвитку форми прояву і її елементів.
		Виділення масивів з проявом гравітаційних процесів і виділення ділянок усередині виділеного масиву з формами, що знаходяться на різних стадіях розвитку.
25.	Еолові процеси.	Виявлення піщаних масивів.
		Визначення типів і внутрішньої структури піщаних масивів.
		Визначення міри закріпленої піщаних масивів рослинним покривом.
		Виявлення вогнищ прояву дефляції і визначення дій що посилюють її розвиток.
26.	Болота і заболочені території.	Виділення великих болотяних масивів.
		Визначення типу болотяних масивів –

		ефтрофні (низинні), мезотроні (перехідні) і оліготрофні (верхові).
		Виділення внутрішньої структури елементів болотяного масиву - гряди, мочарини, озера, потоки, топи та ін.
		Визначення стадії розвитку болота (потужність торф'яної товщі).
		Визначення характеру водного живлення болота.
		Розпізнавання шляхів руху води у болоті.
<b>Б. ГІДРОЛОГІЯ І ПОВЕРХНЕВІ ВОДНІ РЕСУРСИ</b>		
<b>Б1. ГІДРОЛОГІЯ СУШІ</b>		
27.	Гідрографія річок.	Виділення річкової мережі.
		Визначення характерного малюнка річкової мережі.
		Виділення улоговин стоку і лощин.
		Виділення річкової долини та її елементів (бровка схил, дно, заплава тераси та ін.).
		Виділення вододілів річкових систем (оконтурювання річкових басейнів).
		Визначення типу річки по джерелу живлення.
		Виділення і типізація пригирлових ділянок (дельта, естуарій) та його елементів.
		Виявлення сліпих гирл річок (висячих дельт).
28.	Гідрографія озер.	Виділення озер.
		Визначення типу озера за характером водообміну (стічні, безстічні, проточні, тимчасово стічні та ін.).
		Визначення генетичного типу озера улоговини.
		Розрізнення прісних і мінеральних (солоних) озер .
		Визначення типу мінеральних озер (самосадові, сухі та ін.).
		Виявлення основних частин озер і водосховищ і їх елементів (береговий схил, узбережжя, берегова мілина).
		Визначення лінії урізання води озер та водосховищ.
		Виділення прибережної рослинності і визначення міри заростання і ступеню заростання озер і водосховищ.

		Виявлення цвітіння озер і водосховищ.
29.	Руслові процеси річок.	Виявлення елементів будови заплав великих річок(закрути, меандри, фурки, стариці та ін.).
		Виділення і типізація русла річки, ті, що фуркиють, міандриують та ін.).
		Визначення типу міандрування русла.
		Виявлення і типізація великих руслових форм і їх елементів(гряди, перекати, плеса, затони та ін.).
		Виявлення структури молодих заплавних утворень (острови, мілини, коси, відмостки, бичевники та ін.).
		Визначення типу руслового процесу.
		Визначення розподілу каламутності по руслу річки.
		Виявлення суспензії твердого стоку річок в гирло річок та її розподіл.
30.	Гідрометрія річок і озер.	Визначення коефіцієнта звивистості річки.
		Визначення густини річкової мережі.
		Визначення довжини і порізаності берегової лінії озер і водосховищ.
		Визначення температури водної поверхні великих водойм.
31.	Оцінка льодової обстановки морів, озер, річок і водосховищ.	Встановлення віку льодів і визначення вікового складу льодів в зоні.
		Виявлення початкових видів льодів.
		Виявлення форм нерухомого льоду (припай, підошва припая, лід на березі, стамуха та ін.).
		Виявлення і оцінка просторів чистої води серед льоду (розводдя, ополонка, промоїна та ін.)
		Виявлення і оцінка льодів (льодовитість, згуртованість та ін.), що дрейфують.
		Визначення характеристик крижаної поверхні (торостистість, засніженість, забрудненість льоду та ін.).
		Оцінка стадії танення льодів.
		Виявлення нерівномірності сходу льоду на річках (розкриття).
		Виявлення льодових заторів на річках, ділянок русла з течією води поверх льоду та ін.

32.	Паводки і повені.	Виявлення меж затоплених територій.
		Виявлення меж зон затоплення.
		Виявлення причин затоплення заплави (льодових заторів, заломів та ін.).
33.	Сніговий покрив.	Виявлення меж областей стійкого снігового покриву.
		Визначення стану снігу.
		Виявлення межі сходу снігового покриву.
34.	Льодовики.	Виявлення і типізація льодовиків.
		Виявлення області живлення і стоку льодовика.
		Виявлення поверхневих і бічних морен льодовика.
<b>В. ЛІСОВІ РЕСУРСИ І РОСЛИННИЙ ПОКРИВ</b>		
<b>В1. ГЕОБОТАНІКА</b>		
35.	Ліси.	Типізація лісових співтовариств.
36.	Степи.	Виділення і типізація ділянок із степовою рослинністю.
37.	Степові пожежі.	Оперативне спостереження за степовими пожежами.
		Визначення міри і швидкості відновлення степового рослинного покриву.
38.	Лугова рослинність.	Виділення і типізація лугових заплавної терас.
		Виділення і типізація лугових гольців і підгольців.
39.	Болотяна рослинність.	Виділення і типізація рослинності заболочених днищ річкових долин.
		Виділення і типізація рослинності верхових боліт.
		Виділення і типізація рослинності боліт в кріолітозоні.
40.	Кущі.	Виділення і типізація кущів.
		Виділення ділянок з кедровим стлаником.
41.	Рослинність гір.	Виділення і типізація рослинності гірської флори.
		Виділення і типізація рослинності полонинної флори.
42.	Сезонні зміни рослинного покриву.	Визначення індексів вегетації рослинного покриву.
<b>В2. ЛІСОВІ РЕСУРСИ</b>		
43.	Запаси лісу.	Визначення меж лісів і лісистості територій.
		Оцінка порідного складу деревостою.
		Оцінка зімкнутої запони.

		Виділення масивів старих лісів.
		Оцінка вікової структури і продуктивності лісів.
		Виділення масивів рідколісся, вітровалу.
		Виявлення вогнищ розвитку ентомопаталогій (для великих вогнищ).
44.	Лісові пожежі і посяпожежна інвентаризація лісу.	Оцінка пожаронебезпеки лісів.
		Визначення координат ділянок займання і оперативне спостереження за лісовими пожежами.
		Виділення гару і визначення віку пожежі.
		Оцінка стану відновлення вигорілих ділянок лісу.
<b>Г. ВПЛИВИ НА ДОВКІЛЛЯ</b>		
<b>Г1. НАДРА</b>		
45.	Впливи, промислових, енергетичних підприємств гірничовидобувних і інженерних споруд.	Виявлення відкритих кар'єрних розробок, шламонакопичувачів, відстійників промислових вод, полігонів драг, кущів бурових свердловин.
		Виявлення внутрішньої структури об'єктів надрокористування.
		Визначення стану об'єктів надрокористування (стадії проведення робіт).
		Визначення меж порушення ліцензійних ділянок при веденні відкритих розробок ПП.
		Виявлення ділянок сучасних, антропогенно-стимульованих, і омолоджених ЕкП і визначення ступеню їх активізації.
		Виявлення інженерних споруд що зазнають впливу ЕкП і визначення ступеню дії впливу.
		Виділення територій з різним ступенем перетвореності (порушеності) геологічного середовища.
<b>Г2. ЛІСИ</b>		
46.	Впливи під час проведення лісозаготівель.	Визначення освоєності лісових масивів рубками.
		Визначення типу рубок (освітлення і проріджування, прохідні, суцільні, вибіркові).
		Визначення площі лісосіки.
		Виявлення порушень меж відведення лісосік.
		Виявлення порушень норм по ширині і напрямку лісосік і рубки (проти пануючого

		напряму вітрів).
		Виявлення недотримання встановленої ширини насінних смуг і куртин.
		Оцінка стану місць рубок і виявлення порушень (знищення підросту і надгрунтового покриву на площі, що перевищує допустиму, недотримання протипожежних вимог та ін.).
		Виявлення ділянок знищення лісового покриву в межах водозахисних зон великих потоків (водозахисних лісів).
		Виявлення ділянок лісозаготівель в межах територій (заказники, заповідники, нац. парки), що особливо охороняються.
		Виявлення порушення правил рубок на схилах і порушення рослинного і ґрунтового покриву, що виконує функції інженерного захисту ґрунтів.
<b>ГЗ. ЗЕМЛІ</b>		
47.	Оцінка порушеності земель.	Виявлення ділянок пасовищної дигресії в степовій зоні (перевипасання худоби).
		Виявлення масивів ґрунтового покриву з ознаками деградації.
		Виділення ділянок з різним ступенем перетвореності (порушеності) рослинного покриву.
		Виявлення ділянок розвитку процесів дефляції і масивів пісків, що пересуваються.
		Виявлення процесів запустинювання на ділянках нераціональної меліорації.
		Виявлення ділянок приколодезного запустинювання.
		Виявлення солончакових масивів та їх структури.
		Виділення усередині масиву ділянок з різною мірою засолення.
		Визначення причин процесів засолення ґрунтів.
		Визначення ступеню виявлення чинників запустинення.
		Виявлення ділянок і локалізація джерел забруднення земель нафтою, нафтопродуктами та ін. (44.5).
		Визначення видів використання земель.

48.	Дорожньо-комунікаційні об'єкти	Виявлення комунікаційних об'єктів, їх ранжирування (продуктопроводи, дороги, ЛЕП і тому подібне).
		Виявлення наслідків будівництва і експлуатації доріг і комунікацій.
<b>Г4. ЛАНДШАФТИ</b>		
49.	Оцінка стійкості природних і антропогенних систем.	Ранжування ділянок природно-антропогенних систем за ступенем стійкості до антропогенних дій.
		Виділення площ з ознаками структурних і функціональних змін і їх оцінка.
		Виявлення господарської діяльності у межах ООПТ.
<b>Г.5. СЕЛІТЕБНІ ТЕРИТОРІЇ</b>		
50.	Екологічні проблеми міст.	Виявлення об'єктів розміщення відходів виробництва і споживання.
		Виявлення несанкціонованих місць розміщення відходів виробництва і споживання.
		Виявлення несанкціонованих забудов, зміни планування міст і сіл.
		Оцінка густини забудови і озеленення міст.
		Визначення забруднення снігового покриву навколо міст.
<b>Г6. ВОДНІ ОБ'ЄКТИ</b>		
51.	Впливи на берегову зону.	Виявлення гідротехнічних споруд.
		Виявлення промислових об'єктів, що знаходяться у безпосередній близькості від берегової зони великих водойм та їх інфраструктури.
		Визначення ділянок берегової зони, що випробовують дію селітебних і промислових об'єктів і знаходяться різною мірою перетворюваності.
52.	Дія на акваторію.	Виявлення на поверхні водойм ділянок, забруднених поверхнево-активними речовинами (аварійних скидів і розливів забруднюючих речовин) і визначення джерел забруднення.
		Виявлення ділянок водойм, забруднених мінеральними суспензіями (аварійних скидань і розливів забруднюючих речовин) і визначення джерел забруднення.
		Виділення ділянок водойми з різною мірою

		забруднення, визначення їх розмірів і ранжирування.
		Визначення площі і ступеню (рівня) забруднення водосховищ ГЕС деревиною.
		Прогноз поширення забруднюючих речовин по акваторії в межах водного басейну.
<b>Г7. ПОВІТРЯНЕ СЕРЕДОВИЩЕ</b>		
53.	Аерозольно-димові забруднення.	Визначення джерел аерозольно-димових забруднень.
		Визначення площ поширення і рівня аерозольно-димових забруднень.
<b>Д. ТВАРИННИЙ СВІТ</b>		
54.	Місце існування тваринного світу.	Оцінка стану (якості) місця існування мисливських та інших видів тварин.
<b>Ж. АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ</b>		
<b>Ж1. АТМОСФЕРНА ЦИРКУЛЯЦІЯ</b>		
55.	Радіаційний баланс.	Вивчення атмосферної циркуляції.
		Побудова профілю вологості атмосфери.
		Побудова температурного профілю атмосфери.
56.	Хімія атмосфери.	Вимір концентрації газів, що викликають парниковий ефект.
		Вимір вмісту атмосферного озону.
		Вимір змісту аерозолів в атмосфері.
<b>Ж2. ХМАРНІСТЬ</b>		
57.	Розподіл хмарного покриву.	Оцінка розподілу хмарного покриву для прогнозування погоди.
		Визначення типу хмарності, розміру хмарних утворень.
		Оцінка циклонної діяльності для прогнозування погоди та попередження надзвичайних ситуацій.
58.	Характеристики хмар.	Вимірювання висоти верхньої межі хмар.
		Вимірювання температури і тиску на верхній межі хмар.
<b>Ж3. АНТРОПОГЕННІ ВПЛИВИ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ</b>		
59.	Аерозольнодимові забруднення.	Оцінка глобального рівня аерозольно-димових забруднень.
		Виявлення регіональних закономірностей розсіювання аерозольно-димових забруднень та їх циркуляції.
		Виявлення джерел аерозольно-димових забруднень.



		Оцінка просторово-часових змін вмісту забруднюючих речовин в атмосфері над містами і промисловими підприємствами.
		Виявлення транскордонного перенесення аерозольно-димових забруднень.
<b>З. АТМОСФЕРНІ ОПАДИ І СНІГОВИЙ ПОКРИВ</b>		
60.	Атмосферні опади.	Вимірювання водоемності хмар для прогнозування атмосферних опадів.
		Вимірювання розміру і фазового стану складених часток хмар для прогнозування атмосферних опадів.
		Виявлення зон випадання атмосферних опадів.
61.	Сніговий покрив.	Виявлення меж областей стійкого снігового покриву.
		Моніторинг межі сходу снігового покриву.
		Визначення характеристик снігового покриву (потужність, вологість).
		Вивчення динаміки встановлення і сходу снігового покриву.
<b>І. КОМУНІКАЦІЙНІ ОБ'ЄКТИ</b>		
62.	Експлуатація комунікаційних об'єктів.	Виявлення комунікаційних об'єктів, їх ранжування(продуктопроводи, дороги, ЛЕП тощо).
		Оцінка стану і пропускної спроможності доріг.
		Оцінка стану комунікацій і виявлення передаварійних ділянок.
		Вивчення транспортних зон.
		Виявлення наслідків будівництва і експлуатації доріг і комунікацій.
63.	Будівництво комунікаційних об'єктів.	Вибір трас для проектування і будівництва нових доріг.
		Оцінка ходу будівництва автомобільних шляхів та залізниць.
		Оцінка ходу будівництва ЛЕП, продуктопроводів.
<b>К. СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО</b>		
64.	Площі сільськогосподарських угідь.	Ідентифікація та облік площ посівів сільськогосподарських культур.
		Визначення площі пару.
		Визначення площі пасовищ.
		Оцінка площі збирання врожаю

		сільськогосподарських культур.
65.	Стан сільськогосподарських угідь.	Виявлення осередків підвищеної засміченості зернових культур.
		Виявлення осередків ураження сільськогосподарських культур внаслідок стихійних явищ (град, зливи, урагани, посуха, пожежі).
		Оцінка площ сільськогосподарських культур потерпілих від хвороб і шкідників.
		Виявлення деградації природних кормових угідь.
66.	Прогнозування врожайності.	Оцінка схожості сільськогосподарських культур.
		Прогноз врожайності сільськогосподарських культур.
		Оцінка ступеню стиглості сільськогосподарських культур.
		Оцінка сезонної продуктивності пасовищ.
		Оцінка об'ємів збору продукції рослинництва.
67.	Агротехнічні заходи.	Визначення площі пари, що вимагає проведення протибур'янових заходів.
		Визначення ділянок добрив, що вимагають внесення, і отрутохімікатів для підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.
		Визначення термінів і якості проведення агротехнічних заходів.
68.	Агрокліматичні умови.	Агрокліматичне районування.
		Розпізнавання і контроль розвитку посух.
<b>Л. ВИКОРИСТАННЯ І РОЗВИТОК ТЕРИТОРІЙ</b>		
69.	Територіальне планування.	Визначення зон з особливими умовами використання територій.
		Визначення територій, схильних до ризику виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру.
		Визначення зон негативного впливу об'єктів капітального будівництва у разі розміщення таких об'єктів.
70.	Містобудівне зонування.	Визначення функціональних зон (житлових, суспільно-ділових, виробничих зон, зон інженерної і транспортної інфраструктур, зон сільськогосподарського використання, зон рекреаційного призначення, зон розміщення

		військових об'єктів і інші види територіальних зон).
		Виділення у складі житлових зон: зон забудови індивідуальними, малоповерховими, середнеетажними, багатоповерховими житловими будинками і зон житлової забудови інших видів.
		Виявлення несанкціонованих забудов, змін планування міст і сільських поселень.
		Оцінка густини забудови і озелененості міст.
71.	Планування територій.	Виділення елементів планувальної структури (кварталів, мікрорайонів, інших елементів).
		Виявлення меж земельних ділянок, на яких розташовані лінії електропередачі, лінії зв'язку(у тому числі лінійно-кабельні споруди), трубопроводи, автомобільні дороги, залізничні лінії і інші подібні споруди.
		Встановлення меж забудованих земельних ділянок і меж незабудованих земельних ділянок.
		Встановлення меж земельних ділянок, на яких розташовані об'єкти капітального будівництва.
		Встановлення меж зон планованого розміщення об'єктів соціально-культурного і комунально- побутового призначення, інших об'єктів капітального будівництва.
		Виявлення земельних ділянок, розміри яких перевищують встановлені містобудівним регламентом граничні (мінімальні і(чи) максимальні) розміри земельних ділянок.
72.	Земельний кадастр.	Визначення видів використання земель.
		Оцінка стану земель.
		Оцінка якості земель (у тому числі показники стану родючості).
		Виявлення об'єктів нерухомого майна, міцно пов'язаних із земельною ділянкою.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В. Напрями удосконалення системи екологічного моніторингу з застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, 2018. № 2 (21). С.22–29.

2. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Обґрунтування напрямків розробки тренажерів підготовки операторів дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу / Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2018. Том 3. № 49. С. 16–21.

3. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Застосування концепції оберненої задачі динаміки для синтезу програмного керування рухом в імітаторі динаміки польоту тренажера дистанційно пілотованого літального апарату / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. К.: НАН України, 2018. Вип. 82. С. 154–166.

4. Машков О.А., Дурняк Б.В., **Мамчур Ю.В.**, Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарата на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (стохастична постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. К.: НАН України, 2018. Вип. 83. С. 146–153.

5. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В. Нігородова С.А. Технологія синтезу системи керування дистанційно пілотованого літального апарата з заданими динамічними властивостями / Стандартизація,

сертифікація, якість. Науково-технічний журнал. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. № 1 (113). С. 54–66.

6. Машков О.А., Триснюк В.М., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В., Нігородова С.А., Триснюк Т.В.. Технологія синтезу алгоритму керування для забезпечення стабілізації дистанційно пілотованого літального апарату для оперативно-програмованої траєкторії / Математичне моделювання в економіці: міжнародний науковий журнал. К.: НАН України, № 1 (14). С.33–47.

7. Машков О.А., Триснюк В.М., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу / Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: науково-технічний журнал. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. № 1 (19). С.69–78.

8. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Формалізація задачі підготовки на тренажері оператора керування безпілотним літальним апаратом екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки / Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій». К.: ПВНЗ «Університет новітніх технологій», 2018. Вип. 2 (6). С. 24–30.

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

9. **Мамчур Ю.В.** Проблеми розвитку державної системи моніторингу навколишнього природного середовища з використанням аерокосмічних та геоінформаційних технологій / Сучасні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу: Матеріали доповідей науково-практичного семінару. Київ, 27 листопада 2017 р. К.: ДЕА, 2017. С. 8–9.

10. **Мамчур Ю.В.** Проблемні питання створення тренажера оператора дистанційно пілотованого літального апарата екологічного моніторингу / Матеріали науково-технічної конференції “Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу”. Київ, 24–25 квітня 2018 р. К.: ДЕА, 2017. С. 37–38.

11. **Мамчур Ю.В.** Обоснование синергетической схемы управления группой дистанционно пилотируемых летательных аппаратов / Збірка наукових праць. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. Залізний Порт, Херсонської обл., 21–25 травня 2018 р. Херсон: ХНТУ, 2018. С. 181–190.

12. **Мамчур Ю.В.** Застосування комп'ютерних та інформаційних технологій в тренажерних комплексах екологічного моніторингу з застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». Львів, 14 вересня 2018 р. Львів: ЛДУБЖД, 2018. С.181.

13. **Мамчур Ю.В.** Сучасні проблеми управління екологічною безпекою з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів / Проблеми екологічної безпеки. Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції. Кременчук, 4–7 жовтня 2018 р. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018. С.65.

14. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Напрями удосконалення технічних засобів інструментальних психофізіологічних досліджень для оцінки достовірності інформації / Інтелектуальні власність і право на шляху до сталого розвитку України: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 19 квітня 2019 року. К. С. 265–268.

15. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас С.В. Нігородова С.А. Технології конструктивного спілкування пілота оператора дистанційно пілотованого літального апарату та системи підтримки прийняття рішень в умовах впливу стрес-факторів екстремальної екологічної ситуації / Авіаційна та екстремальна психологія у контексті технологічних досягнень: XI міжнародна науково-практична конференція. Збірник наукових праць. Київ, 23 – 24 квітня 2019 року. К. «Альфа-ПК», 2019. С. 183–189.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

16. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Аналитическая оценка качества процесса управления на тренажерах дистанционно пилотируемого летательного аппарата с алгоритмом на основе решения обратных задач динамики / Аерокосмічні технології. Науково-технічний журнал. К.: НЦУВКЗ, 2017. Вип. 2 (02). С. 59–62.

17. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.** Загроза національній безпеці: екологічний тероризм, як сучасний виклик суспільству / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки. К.: АНБ, 2018. № 1 (17). С. 8–21.

18. Машков О.А. **Мамчур Ю.В.** Загроза національної безпеки: аерокосмічний тероризм, як новий виклик безпеці суспільства / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки. К.: АНБ, 2018. № 2 (18). С. 8–28.

19. Машков О.А., **Мамчур Ю.В.**, Жукаускас. С.В. Методологія протидії екологічним загрозам, ризикам та екологічному тероризму: системний підхід / НАУКОВИЙ ЧАСОПИС Академії національної безпеки. К.: АНБ, 2018. № 3–4 (19–20). С. 8–31.

### **Відомості про апробацію результатів дисертації**

1. Науково-практичний семінар “Сучасні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу” (Київ, 27 листопада 2017 р.); форма участі – очна.

2. Науково-технічна конференція “Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу” (Київ, 24–25 квітня 2018 р.); форма участі – очна.

3. Міжнародна наукова конференція “Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту” (Залізний Порт, Херсонської обл., 21–25 травня 2018 р.); форма участі – заочна.

4. III міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». (Львів, 14 вересня 2018 р.); форма участі – очна.

5. XVI міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екологічної безпеки». (Кременчук, 4–7 жовтня 2018 р.); форма участі – заочна.

6. II міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні власність і право на шляху до сталого розвитку України» (Київ, 19 квітня 2019 р.); форма участі – очна.

7. XI міжнародна науково-практична конференція «Авіаційна та екстремальна психологія у контексті технологічних досягнень» (Київ, 23 – 24 квітня 2019 р.); форма участі – очна.