

АНОТАЦІЯ

Граф М.С. Моделі та інформаційні технології обробки інформації в безпілотних повітряних суднах - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки» – Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Об'єктом дослідження є процес обробки інформації в бортовому комп'ютері БПС.

Предметом дослідження є методи, математичні моделі та алгоритми обробки інформації в бортовому комп'ютері безпілотного повітряного судна.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та основні задачі досліджень, показано взаємозв'язок вибраного напрямку з освітньо-науковими програмами, планами та темами, сформульовано наукову новизну та показано практичне значення одержаних результатів, приведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію та впровадження результатів досліджень.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів та засобів обробки інформації в безпілотних повітряних суднах (БПС), приведено основні моделі, що використовуються для обробки інформації в БПС, проведено аналіз першоджерел з питань існуючих методів та алгоритмів для обробки інформації в БПС та дестабілізуючих факторів. Відзначено, що найперспективнішими методами, що використовуються для інформаційних технологій при обробці інформації в БПС є нейронні мережі, що засновані на навчанні та нечітка логіка з застосуванням експертних систем при накопиченні знань для забезпечення ефективного рішення задач. Встановлені основні фактори, що впливають на обробку інформації в БПС, показаної та обґрунтовані основні методи та алгоритми, що використовуються в інформаційних технологіях при обробці інформації. За результатами проведеного аналізу було сформульовано мету роботи, визначено основні наукові задачі, що необхідно розв'язати для її

досягнення. Спираючись на проведений аналізу стану задачі стосовно моделей та методів обробки інформації в БПС, запропоновані методи та алгоритми для вирішення задачі.

В другому розділі розглянуто методи обробки інформації в БПС, проведено класифікацію моделей. Визначено поняття кількості інформації для широкого класу ймовірнісних об'єктів. Розглянуто існуючі математичні моделі керування безпілотним повітряним судном та проведено та аналізу динаміки системи керування в цілому на будь-яких її режимах. Показано основні та локальні нелінійності: для аеродинамічних сил та моментів, для прискорення гравітаційного, вирази щільності повітря, сил тяги двигунів. Для визначення траєкторії польоту здійснено перехід від оригіналу до моделі. Для перевірки адекватності моделі проведено порівняння з експериментом та з іншою моделлю, адекватність якої підтверджена експериментом та з використанням критерія Фішера. Проведено аналіз причин та наслідків, з використанням підходу ізольованого уявлення, причин і наслідків. Запропоновано структуру модернізованої багаторівневої системи керування. Проведено аналіз впливу на точність та швидкість двосторонньої передачі інформації між оператором та бортовим комп'ютером БПС в умовах невизначеності. Побудовано узагальнену структуру інтелектуальної системи керування.

У третьому розділі розглянуто процес отримання, обробки і передачі інформації з БПС, на який може впливати зовнішнє середовище. Проведено оцінку інформаційних параметрів в задачах керування БПС із застосуванням фільтру Калмана. Запропоновано класифікацію інформаційних технологій для обробки інформації з БПС. Визначено, що система для обробки інформації при передачі та керуванні БПС повинна забезпечувати виконання таких функцій як підвищення точності та швидкості обробки інформації в системі керування в режимі реального часу. Для представлення функціонального призначення системи створено діаграму варіантів використання та для опису системи та її структури – діаграму класів, дерево

функцій - для процесу обробки інформації в БПС. Розроблено алгоритм навчання штучної нейронної мережі на основі математичної моделі руху в БПС з використанням рекурентної нейронної мережі LSTM. Побудовано структуру нечіткої експертної системи для прийняття рішень в умовах нечіткості та неповноти. Показано метод моделювання польотної траєкторії до заданої точки з обходом перешкод з використанням сплайнів та згладжуванням траєкторії за допомогою кубічних кривих Без'є. Сформульовано постановку задачі керування траєкторією польоту БПС з обходженням перешкод. Розроблено алгоритм та створено блок-схему алгоритму для системи керування траєкторією польоту БПС. Показано, що при обході перешкод розроблений алгоритм формує кусково-лінійну апроксимацію траєкторії обходження перешкод в реальному часі. Розглянуто проблему забезпечення захисту даних в системі зв'язку БПС або ДПАС при двосторонньому обміні інформацією між бортовим комп'ютером та оператором. Для прогнозування стану системи інформаційної безпеки було запропоновано використовувати фільтра Калмана, що дозволяє оброблювати інформацію, прибирати завади та іншу зайву інформацію. Визначено змінні для побудови матриць при застосуванні фільтрації. Побудовано дерево властивостей системи передачі інформації між бортовим комп'ютером БПС та оператором, враховано можливість впливу різних факторів на точність та швидкість передачі інформації.

В четвертому розділі проведено аналіз впливу на точність та швидкість передачі інформації на результат методів фільтрації, враховано можливість впливу зовнішніх факторів. Побудовано логіко-лінгвістичну модель для корекції точності та швидкості передачі інформації було побудовано, що дозволяє приймати управлінські рішення за умови відхилення цих характеристик від встановленого оптимального значення. Показано вплив ситуацій, що потребують управлінського впливу для покращення точності, швидкості та достовірності передачі інформації в системі зв'язку БПС, розглянуто можливі управляючі операції, наведено операції, необхідні для

налаштування наведеної логіко-лінгвістичної моделі (ЛЛМ), запропоновано використовувати підхід для виведення рішень на основі ЛЛМ. Розроблено алгоритм та написано програму для проведення моделювання руху з врахуванням збереження поздовжньої осі БПС в горизонтальній площині, для запобігання зниження враховано запас вертикальної швидкості та можливі зміни кута крену на 90 та 180 градусів. Проведено експертну оцінку трьох характеристик, що визначають досконалість передачі інформації в інформаційній системі. Значення векторів пріоритетів та отримано зведені оцінки характеристик за методом Делфі. Визначено середні значення оцінок, середні квадратичні відхилення, нижній та верхній кuartилі, проведено корегування інформації, яку опрацьовує аналітична група. За допомогою методу Делфі зменшено коливання по всій сукупності індивідуальних відповідей, обмежено коливання всередині груп. Запропоновано використовувати методи машинного навчання з підкріпленням, зокрема алгоритм Q-Learning для побудови траєкторії між двома заданими пунктами призначення з можливістю обходу нерухомих перешкод. В результаті роботи було створено програму для навчання нейронної мережі, для розрахунків та руху БПС по заданій траєкторії з обходом перешкод. Проведено планування траєкторії руху БПС в динамічному середовищі з врахуванням перешкод з використанням нейронної мережі CNN, та гібриду CNN+LSTM. Створено програму для запропонованої реалізації.

В загальних висновках підсумовано основні результати досліджень, проведених в дисертаційній роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих при проведенні симуляції.

Таким чином, у представленій дисертаційній роботі вирішується науково-прикладна задача з підвищення точності, швидкості та достовірності обробки інформації при передачі в системах зв'язку БПС, розглянуто можливі управляючі операції, запропоновано використовувати підхід для виведення рішень на основі логіко-лінгвістичної моделі та з використанням нейронних. Рішення поставленої задачі здійснюється шляхом розробки

інформаційної технології, методів, методики та програмних додатків, за допомогою яких створюються передумови для підвищення якості результатів планування та перепланування траєкторії руху БПС або ДПАС в статичному та динамічному середовищі з обходом перешкод.

В дисертаційній роботі *вперше* отримано такі наукові результати: *вперше* проведено аналіз існуючих методів і засобів розробки інформаційних технологій по керуванню БПС; *вперше* розроблено нову інформаційну технологію проектування збору та обробки інформації у БПС; *вперше* розроблено метод обробки інформації при керуванні БПС з використанням комбінації нейронних мереж та з використанням нечіткої логіки; *вперше* розроблено новий метод обробки інформації при побудові траєкторії польоту БПС; *вперше* запропоновано нову математичну модель обробки інформації в комп'ютерних системах блоку керування.

Отримала подальший розвиток інформаційна технологія визначення координат перешкод в статичному середовищі та перебудови траєкторії польоту БПС при зміні координат в динамічному середовищі. Запропонована інформаційна технологія може бути використана у системах інтелектуальної обробки інформації в авіаційній галузі, зокрема в аеропортах України.

Удосконалено структуру модернізованої багаторівневої системи керування. Проведено синтез системи прийняття рішень в комп'ютеризованій системі керування безпілотним повітряним судном.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємствах ПАТ НВО «Київський завод автоматики» та Державному підприємстві «Завод 410 ЦА», а також в навчальному процесі Національного авіаційного університету при підготовці бакалаврів за спеціальністю «Інформаційні вимірювальні системи» та «Електротехнічні системи електроспоживання».

Ключові слова: інформаційні технології, безпілотне повітряне судно, дистанційно пілотована авіаційна система, комп'ютеризована система, інтелектуальна система обробки інформації, планування траєкторії.

SUMMARY

Graf M.S. Models and information technologies of information processing in unmanned aerial vehicles - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of doctor of philosophy (PhD) by specialty 122 – «Computer sciences» - National Aviation University, Kyiv, 2021.

The object of the research is the process of information processing in the on-board computer of the BPS.

The subject of the research is methods, mathematical models and algorithms for processing information in an on-board computer of an unmanned aircraft.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and main tasks of research, shows the relationship of the chosen direction with educational and scientific programs, plans and topics, formulates scientific novelty and shows the practical significance of the results obtained, provides data on the personal contribution of the applicant, publications, testing and implementation of research results are given.

In the first chapter, the analysis of existing methods and means of information processing in unmanned aerial vehicles (UAVs) is carried out, the main models used for information processing in the UAV are given, the analysis of primary sources on the issues of existing methods and algorithms for information processing in the UAV and destabilizing factors is carried out. It is noted that the most promising methods used for information technologies when processing information in a UAV are neural networks based on training and fuzzy logic using expert systems in the accumulation of knowledge to ensure effective problem solving. The main factors influencing the processing of information in the UAV have been established, shown and the basic methods and algorithms used in information technologies in information processing have been substantiated. Based on the results of the analysis, the goal of the work was formulated, the main scientific problems were identified, it is necessary to solve for its achievement.

Based on the analysis of the state of the problem with respect to the models and methods of information processing in the UAV, methods and algorithms for solving the problem are proposed.

In the second chapter, the methods of information processing in the UAV are considered, the classification of the models is carried out. The concept of the amount of information for a wide class of probabilistic objects is defined. The existing mathematical models of control of an unmanned aircraft and the conduct and analysis of the dynamics of the control system as a whole in any of its modes are considered. The main and local nonlinearities are shown: for aerodynamic forces and moments, for gravitational acceleration, expression of air density, engine thrust forces. To determine the flight trajectory, a transition was made from the original model. To check the adequacy of the model, a comparison was made with the experiment and with another model, the adequacy of which was confirmed by experiment and using the Fisher criterion. The analysis of causes and consequences is carried out using the approach of an isolated view, causes and effects. The structure of the modernized multilevel control system is proposed. The analysis of the influence on the accuracy and speed of two-way information transfer between the operator and the on-board computer of the UAV under conditions of uncertainty is carried out. A generalized structure of an intelligent control system has been built.

The third chapter discusses the process of receiving, processing and transmitting information from the UAV, which can be influenced by the external environment. The estimation of information parameters in the control problems of the UAV with the use of the Kalman filter is carried out. The classification of information technologies for processing information from the UAV is proposed. It has been determined that the system for processing information during transmission and control of the UAV should ensure the performance of such functions as increasing the accuracy and speed of information processing in the control system in real time. To represent the functional purpose of the system, a diagram of use cases was created and to describe the system and its structure - a

class diagram, a tree of functions - for the information processing process in the UAV. An algorithm for learning an artificial neural network based on a mathematical model of motion in a UAV using a recurrent neural network LSTM has been developed. The structure of a fuzzy expert system for decision-making in conditions of fuzzy and incompleteness has been built. A method for modeling a flight trajectory to a given point with avoiding obstacles using splines and smoothing the trajectory using cubic Bezier curves is shown. The formulation of the problem of control of the flight trajectory of the BPS with obstacle reversal is formulated. An algorithm was developed and a block diagram of the algorithm for the control system of the flight trajectory of the UAV was created. It is shown that when avoiding obstacles, the developed algorithm forms a piecewise linear approximation of the trajectory of avoiding obstacles in real time. The problem of ensuring data protection in the communication system of the UAV or RPAS during the two-way exchange of information between the on-board computer and the operator is considered. To predict the state of the information security system, it was proposed to use the Kalman filter, which allows you to process information, remove interference and other unnecessary information. Variables are defined for constructing matrices when filtering is applied. A tree of properties of the information transfer system between the on-board computer of the UAV and the operator was built, the possibility of the influence of various factors on the accuracy and speed of information transfer was taken into account.

In the fourth chapter, the analysis of the influence of the filtering methods on the accuracy and speed of information transmission on the result of filtering methods is carried out, the possibility of the influence of external factors is taken into account. A logical-linguistic model was built to correct the accuracy and speed of information transfer, it was built, which allows making management decisions, subject to the deviation of these characteristics of the established optimal value. The influence of situations requiring managerial action to improve the accuracy, speed and reliability of information transfer in the UAV communication system is shown, possible control operations are considered, the operations necessary to

adjust the reduced logical-linguistic model (LLM) are given, it is proposed to use an approach for deriving solutions based on the LLM. An algorithm was developed and a program was written to simulate the movement, taking into account the preservation of the longitudinal axis of the UAV in the horizontal plane, to prevent a decrease in the vertical speed fund and possible changes in the roll angle by 90 and 180 degrees. An expert assessment of three characteristics that determine the perfection of information transfer in an information system has been carried out. The values of the priority vectors and the summary estimates of the characteristics by the Delphi method are obtained. The mean values of the estimates, standard deviations, lower and upper quartiles, correcting the information processed by the analytical group were determined. With the help of the Delphi method, fluctuations in the entire set of individual responses are reduced, fluctuations within groups are limited. It is proposed to use methods of machine learning with reinforcement, in particular, the Q-Learning algorithm for constructing a trajectory between two given destinations with the ability to bypass fixed obstacles. As a result of the work, a program was created for training a neural network, for calculating and moving the BPS along a given trajectory with avoiding obstacles. The planning of the trajectory of the UAV movement in a dynamic environment, taking into account obstacles, using the CNN neural network, and the CNN + LSTM hybrid has been carried out. A program has been created for the proposed implementation.

The general conclusions summarize the main results of the research carried out in the dissertation work, both theoretical and experimental, obtained during the simulation.

Thus, in the presented dissertation work, a scientific and applied problem is solved to improve the accuracy, speed and reliability of information processing during transmission in UAV communication systems, possible control operations are considered, it is proposed to use an approach for deriving solutions based on a logical-linguistic model and using neural ones. The solution to this problem is carried out by the development of information technology, methods, techniques and software applications, with the help of which the prerequisites are created to

improve the quality of the results, planning and redevelopment of the trajectory of the BPS or RPAS in a static and dynamic environment with avoiding obstacles.

In the dissertation work, for the first time, the following scientific results were obtained: for the first time, an analysis of existing methods and tools for the development of information technologies for the control of UAV was carried out; for the first time a new information technology was developed for designing the collection and processing of information in the UAV; for the first time a method of information processing was developed when controlling UAV using a combination of neural networks and using fuzzy logic; for the first time a new method of information processing was developed when constructing the flight trajectory of the UAV; for the first time a new mathematical model of information processing in the computer systems of the control unit was proposed.

Information technology for determining the coordinates of obstacles in a static environment and restructuring the flight trajectory of the UAV when the coordinates change in a dynamic environment has been further developed. The proposed information technology can be used in intelligent information processing systems in the aviation industry, in particular at the airports of Ukraine.

The structure of the modernized multilevel control system has been improved. The synthesis of a decision-making system in a computerized control system for an unmanned aircraft has been carried out.

The results of the dissertation work were introduced at the enterprises of PJSC RPA "Kiev Automatics Plant" and the State Enterprise "Plant 410 CA", as well as in the educational process of the National Aviation University in the preparation of bachelors in the specialty "Information measuring systems" and "Electrical power consumption systems".

Keywords: information technology, unmanned aerial vehicle, remotely piloted aircraft system, computerized system, intelligent information processing system, trajectory planning.

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Граф М.С. Аналіз існуючих методів обробки інформації в блоці керування безпілотного повітряного судна / М.С. Граф // Вісник Інженерної академії України. – К., 2016. – № 4. – С. 20–22.
2. Граф М.С. Моделювання польотної траєкторії до заданої точки з обходом перешкод / М.С. Граф // Вісник Інженерної академії України. – К., 2019. – № 2. – С. 7–11.
3. Граф М.С. Інтелектуальна система оброблення інформації блока керування безпілотного повітряного судна / М.С. Граф, В.П. Квасніков // Системні дослідження та інформаційні технології. – К., 2019 – №4 – С. 59-65. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2019.4.06.
4. Граф М.С. Система обходу навчальних перешкод безпілотним повітряним судном / М.С. Граф, В.П. // Технічна інженерія. – Житомир, 2020 – №2 (86) – С. 81-85. DOI: 10.26642/ten-2020-2(86)-81-85.
5. Designing a computerized information processing system to build a movement trajectory of an unmanned aircraft / [Kvasnikov V., Ornatskyi D., Graf M., Shelukha O.]. – К.: Eastern European journal of Enterprise Technologies, 2021. – pp. 33-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225501 (Scopus).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Граф М.С. “Існуючі математичні моделі керування безпілотним повітряним судном” // XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів “Політ. Сучасні проблеми науки”. / Тези доповідей – К.: НАУ, 2017. – С. 90-92.
7. Граф М.С., Ігнатенко П.Л. “Аналіз сучасних моделей обробки інформації та керування в безпілотному повітряному судні” // VII Міжнародна науково-технічна конференція “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем” / Збірник тез, том 2 – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – С. 135-136.

8. Граф М.С. “Прийняття рішень в системі керування безпілотним повітряним судном” // XIII Міжнародна науково-технічна конференція “АВІА-2017” / Збірник тез – К.: НАУ, 2017. – С. 4.36-4.38.

9. Граф М.С. “Метод автоматичного підбору способу коригування точності та швидкості передачі інформації в безпілотному повітряному судні” // VII Міжнародна науково-технічна конференція “ITSEC” / Збірник тез – К.: НАУ, 2017. – С.46-47.

10. Граф М.С., Варченко О.І. “Дерево властивостей для інформаційних технологій передачі даних між бортовим комп’ютером безпілотного повітряного судна та оператором” // IV Міжнародна наукова конференція “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)” / Збірник тез – Вінниця: ВНТУ, 2017 – С. 209-210.

11. Граф М.С. “Виведення рішень на основі логіко-лінгвістичної моделі для корекції точності та швидкості передачі інформації в безпілотному повітряному судні” // II Міжнародна науково-технічна конференція “Комп’ютерні технології, інновації, проблеми, рішення - 2017” / Тези доповідей – Житомир: ЖДТУ, 2017. – С. 15-16.

12. Граф М.С. “Аналіз призначення системи обробки інформації та керування безпілотного повітряного судна” // Науково-технічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених “Інноваційні технології” / Збірник тез – К.: НАУ, 2017. С – 67-68.

13. Граф М.С. “Моделювання руху безпілотного повітряного судна”// IX Міжнародна науково-технічна конференція “АВІА-2018” / Збірник тез – К.: НАУ, 2018. – С. 2.14-2.15.

14. Граф М.С., Ігнатенко П.Л. “Модернізація та удосконалення інтелектуальних систем керування безпілотного повітряного судна”// VIII Міжнародна науково-технічна конференція “комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем” / Збірник тез, том 2 – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – С. 211-212.

15. Граф М.С. “Аналіз знань в інтелектуальній системи керування траєкторним рухом безпілотного повітряного судна” // XI Міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” / Збірник тез – К.: НАУ, 2018. – С. 72-73.

16. Граф М.С. “Інформаційна безпека в інтелектуальних системах керування безпілотним повітряним судном// VIII Міжнародна науково-технічна конференція “ITSEC” / Збірник тез – К.: НАУ, 2018. – С. 6-7.

17. Graf, M. and Kvasnikov, V. (2018), «The Construction of the Algorithm Study Based on the Mathematical Model of Motion», ICTERI, pp. 235–242. **(Scopus).**

18. Граф М.С. “Construction of algorithm for training of neural network in unmanned aerial vehicles”// XIV Міжнародна наукова конференція “ABIA-2018” / Збірник тез – К.: НАУ, 2019. – С. 4.66-4.68.

19. Граф М.С., Квасніков В.П., Ігнатенко П.Л. “Побудова алгоритму навчання нейронної мережі в безпілотних повітряних суднах”// IX Міжнародна науково-технічна конференція “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем” / Збірник тез, том 2 – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – С. 257-258.

20. Граф М.С. “Обробка сигналів при передачі інформації в безпілотному повітряному судні за допомогою алгоритму перетворення Фур’є” // XII Міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” / Збірник тез – К.: НАУ, 2019. – С. 182-183.

21. Граф М.С. “Побудова алгоритму траєкторії руху безпілотного повітряного судна з втратою висоти” // XIII Міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” / Збірник тез – К.: НАУ, 2020. – С. 222-224.