

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет залізничного транспорту

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет залізничного транспорту

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ІВАНЮК ОЛЕКСАНДР ІГОРОВИЧ

УДК 004:681.51

## ДИСЕРТАЦІЯ

# МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

126 — Інформаційні системи та технології

12 — Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 О. І. Іванюк

Науковий керівник

Каргін Анатолій Олексійович,  
доктор технічних наук, професор

Харків — 2021

## АНОТАЦІЯ

*Іванюк О. І.* Модель та метод інформаційної технології навігації автономних мобільних систем в умовах невизначеності. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 — Інформаційні системи та технології. — Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливого наукового завдання з розробки моделі та методу інформаційної технології навігації автономних мобільних систем (АМС), що забезпечує однорідну інтеграцію таких чотирьох завдань навігаційного циклу, як сприйняття інформації, локалізація, динамічне планування маршруту та ситуаційне керування рухом у недетермінованому частково спостережуваному оточенні.

Частини досліджень, результати яких викладено в дисертації, виконано в межах науково-дослідної роботи Українського державного університету залізничного транспорту «Розумні машини та інтернет речі зі штучним інтелектом», № ДР 0120U104276 та держбюджетної науково-дослідної роботи Харківського національного університету радіоелектроніки «Глибинні гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних та їх швидке навчання», № ДР 0119U001403.

Об'єкт дослідження: процес навігації автономних мобільних систем.

Предмет дослідження: моделі, методи і технології навігації автономних мобільних систем в умовах невизначеності, неповноти та нечіткості інформації.

Метою дисертаційного дослідження є розширення можливостей навігації мобільних систем в автономному режимі в умовах частково недетермінованого оточення.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено такі завдання дослідження:

1) проведено аналіз існуючих моделей та методів навігації, що використовуються в автономних мобільних системах;

2) розроблено модель ситуаційного управління переміщенням по маршруту автономної мобільної системи в умовах передбачених збурень на основі концептуальної моделі сприйняття з механізмами управління контекстом і переключення уваги;

3) розроблено модель та метод ситуаційного управління переміщенням по маршруту з динамічним переплануванням маршруту автономної мобільної системи в умовах непередбачених збурень;

4) розвинуто інформаційну технологію навігації автономної мобільної системи на основі моделі ситуаційного управління переміщенням та динамічного перепланування;

5) проведено комплексне тестування розроблених моделі, методу та інформаційної технології.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в такому:

– уперше розроблено модель ситуаційного управління переміщенням автономної мобільної системи з переплануванням маршруту, яка, на відміну від існуючих, враховує вплив заздалегідь непередбачених збурень, що унеможливають переміщення до цільової позиції маршруту, та завдяки ситуаційному переплануванню на підставі сенсорних даних про поточну ситуацію дозволяє автономній мобільній системі досягнути цілі;

– удосконалено метод ситуаційного управління з урахуванням контексту, який адаптовано до завдання управління переміщенням автономної мобільної системи вздовж заданого маршруту, що дозволяє на цій підставі вирішувати завдання навігації мобільних автономних систем в умовах невизначеності й неповної інформації;

– забезпечено подальший розвиток інформаційної технології навігації автономної мобільної системи за рахунок використання моделі та методу ситуаційного управління з переплануванням маршруту, що дозволяє розширити застосування автономних мобільних систем в автономному режимі у частково

недетермінованому оточені, коли відсутня можливість або економічно необґрунтоване упорядкування оточення.

Практичне значення отриманих теоретичних результатів полягає у тому, що запропоновані у роботі модель і метод ситуаційного управління з переплануванням маршруту автономної мобільної системи є універсальним засобом, який може використовуватись у завданнях управління розумними машинами широкого класу. Фрагменти дисертаційної роботи запроваджено: в процесі виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Глибинні гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних та їх швидке навчання», № ДР 0119U001403; у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту.

У *першому розділі* проведено аналіз функціонального навантаження, сфер застосування та перспектив використання автономних мобільних систем. Розглянуто відомі підходи до вирішення завдання навігації АМС. Висвітлено сутність завдань, що формують навігаційний цикл: сприйняття інформації про оточення, локалізація та картографування, планування маршруту, керування рухом. Проаналізовано відомі моделі та методи вирішення цих завдань. Розкрито сутність підходу ситуаційного управління, його переваги та досвід застосування в інших предметних галузях. На підставі наведеного аналізу зроблено висновки щодо факторів, які накладають обмеження на використання методів і моделей навігації в автономних мобільних системах. Тобто в умовах недетермінованості й обмеженого спостереження за оточенням потрібні методи автоматичного перепланування маршруту, що інтегровані з моделями сприйняття даних від сенсорів і ситуаційним управлінням.

У *другому розділі* викладено застосування підходу ситуаційного управління з урахуванням контексту до завдання навігації автономних мобільних систем. На основі відомого підходу ситуаційного управління запропоновано модель управління переміщенням АМС. Для цього виконано стратифікацію бази знань АМС за рівнями абстрагування. Однорідність інтеграції рішень завдань, які виникають на різних етапах навігаційного циклу,

досягнуто за рахунок використання однакової для всіх рівнів моделі представлення знань, а саме нечітких правил, що обробляються за допомогою механізму виведення модифікованої нечіткої моделі Такагі-Сугено-Канга. Наведено метод представлення у вигляді нечітких правил Такагі-Сугено-Канга для п'яти рівнів бази знань: знання, що описують цілі АМС; знання про план досягнення цілі; картографічні знання; знання про стратегії руху в ключових точках робочого простору та між ними; знання про стратегії керування рухом.

Наведено комп'ютерні експерименти з розробленою моделлю. Результати експериментів показали, що модель забезпечує успішне виконання завдання переміщення АМС уздовж заздалегідь запланованого маршруту без перешкод; переміщення, коли в пам'яті АМС міститься декілька маршрутів, зокрема й таких, що мають спільні ділянки, при цьому колізії не виникають; переміщення АМС уздовж маршруту, коли збурення, що пов'язані з обмеженнями спостереження оточення, ускладнюють вирішення завдання локалізації. Ці збурення долаються шляхом узагальнення ситуації, що виконується механізмом виведення нечіткої моделі Такагі-Сугено-Канга.

*У третьому розділі* розроблено метод ситуаційного управління автономною мобільною системою з переплануванням маршруту, що забезпечує виконання завдань АМС в умовах непередбачених перешкод. Запропонований метод використовує знання АМС про відомі фрагменти маршрутів для синтезу нових маршрутів руху з метою забезпечення досягнення цілі в умовах зміни оточення.

*У четвертому розділі* запропоновано розвиток інформаційної технології навігації АМС на основі моделі управління та методу перепланування, наведених у розділах 2 та 3. Запропоновано структуру програмного забезпечення бортової системи АМС, що підтримує інформаційну технологію її навігації. Структура складається з п'яти модулів, три з яких базуються на моделі, розробленій у цій роботі.

Інформаційна технологія використана для проведення натурних експериментів. У ході експериментів здійснювалось варіювання повноти бази

маршрутів АМС та динамічно додавались перешкоди в оточенні, що унеможлилювали рух за відомими (або автономно побудованими при отриманні цілі руху) маршрутами. Метою експериментів було проведення комплексного тестування пропонованої інформаційної технології щодо можливості її застосування для вирішення завдання моніторингу просторово розосереджених об'єктів. За результатами експериментів було встановлено придатність пропонованої системи для умов, коли досяжність цільової точки руху є принципово можливою, враховуючи наявні знання, тобто АМС здатна обрати або самостійно побудувати маршрут в умовах появи динамічних перешкод, що поєднує поточне місцезнаходження АМС із цільовим. Якщо принципове досягнення цільової точки неможливе через недостатній обсяг поточних знань, АМС здатна переходити у режим випадкового руху, який дозволяє здійснити поповнення поточної бази знань.

Результати дисертаційних досліджень викладено у 17 наукових працях автора, а саме: 4 наукові статті в періодичних виданнях, з яких 3 статті у виданнях, внесених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б», 1 стаття у закордонному періодичному науковому виданні (Болгарія); 1 розділ у колективній монографії, виданій за кордоном (Швейцарія); 12 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, серед яких 1 доповідь опублікована в матеріалах міжнародної наукової конференції, що індексується наукометричною базою Scopus.

*Ключові слова:* автономна мобільна система, навігація, ситуаційне управління, технології штучного інтелекту, когнітивна робототехніка, системи, засновані на правилах, нечітка обробка інформації, інтеграція цифрових рішень, навчання з підкріпленням.

## ABSTRACT

*Ivaniuk O. I.* Model and method of information technology of navigation of autonomous mobile systems under conditions of uncertainty. — Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy is specialty 126 — Information Systems and Technologies. — Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2021.

The thesis is devoted to the solution of an important scientific problem on the development of a model and method of the information technology of navigation of an autonomous mobile system (AMS), which provides homogeneous integration of four navigation cycle tasks such as information perception, localization, dynamic path planning and situational motion control in an indeterminate partially observed environment.

Parts of the research, the results of which are presented in the thesis, were performed within the research work of the Ukrainian State University of Railway Transport "Smart machines and the Internet of Things with artificial intelligence", № DR 0120U104276 and the state-funded research work of the Kharkiv National University of Radio Electronics "Deep hybrid systems of computational intelligence for data streams analysis and their fast learning", № DR 0119U001403.

The research object is the process of navigation of autonomous mobile systems.

The research subject encompasses models, methods and technologies of navigation of autonomous mobile systems in the conditions of uncertainty, incompleteness and fuzzies of information.

The research aim is to expand the possibilities of navigation of mobile systems in the autonomous mode in a partially indeterminate environment.

To achieve the research aim the following research tasks have been solved:

1) an analysis of existing models and methods of navigation used in autonomous mobile systems has been carried out;

2) a model of situational control of movement on a path of an autonomous mobile system in the conditions of the provided disturbances based on the perception conceptual model with mechanisms of context management and attention switching has been developed;

3) a model and method of situational control of movement on a path with dynamic re-planning of a path of an autonomous mobile system in the conditions of unforeseen disturbances have been developed;

4) the information technology of navigation of an autonomous mobile system based on the model of situational control of movement and dynamic re-planning has been developed;

5) comprehensive testing of the developed model, method and information technology has been carried out.

The scientific novelty of the thesis is as follows:

– for the first time, a model of situational control of an autonomous mobile system movement with re-planning of a path has been developed, which, unlike others, takes into account the impact of unforeseen disturbances that make it impossible to move to the goal position of the path, and due to situational re-planning based on sensory data about the current situation allows an autonomous mobile system to achieve the goal;

– the context-sensitive method of situational control has been improved, which is adapted to the task of controlling the movement of an autonomous mobile system along a given path, which allows on this basis to solve the problem of navigation of mobile autonomous systems in conditions of uncertainty and incomplete information;

– the further development received the information technology of navigation of an autonomous mobile system using the model and method of situational control with re-planning of the path, which allows to expand the use autonomous mobile systems in a partially indeterminate environment, when there is no possibility or economically unreasonable a streamlining of the environment.

The practical significance of the obtained theoretical results of the thesis is that the proposed model and method of situational control with re-planning of the path of



an autonomous mobile system is a universal tool that can be used in the control of smart machines of a wide class. Fragments of the thesis were introduced: in the process of performing state-funded research work "Deep hybrid systems of computational intelligence for data streams analysis and their fast learning", № DR 0119U001403; in the educational process of the Ukrainian State University of Railway Transport.

*In Chapter One*, the analysis of functional loading, spheres of application and prospects of use of autonomous mobile systems is carried out. Known approaches to solving the problem of an AMS navigation are considered. The essence of the tasks that form the navigation cycle is highlighted: perception of information about the environment, localization and mapping, path planning, motion control. Known models and methods of solving these problems are analyzed. The essence of the situational control approach, its advantages and experience in other subject areas are revealed. Based on the above analysis, conclusions are drawn on the factors that impose restrictions on the use of methods and models of navigation in autonomous mobile systems. That is, in conditions of nondeterministic and limited observation of the environment requires methods of automatic re-planning of the path, integrated with models of data perception from sensors and the situational control.

*In Chapter Two*, the application of the context-sensitive situational control approach to the task of navigation of autonomous mobile systems is stated. Based on the known approach of situational control, a model of an AMS movement control is proposed. For this purpose, an AMS knowledge base was stratified according to the levels of abstraction. The homogeneity of the integration of solutions to tasks that arise at different stages of the navigation cycle is achieved through the use of the same for all levels of the model of knowledge representation, namely fuzzy rules that processed by the inference mechanism of the modified Takagi-Sugeno-Kang fuzzy model. A method of representation in the form of fuzzy Takagi-Sugeno-Kang rules for five levels of the knowledge base is given: knowledge describing the goals of an AMS; knowledge of the plan to achieve the goal; cartographic knowledge; knowledge of movement strategies at key points in the workspace and between them; knowledge of motion control strategies.

Computer experiments with the developed model are given. The results of the experiments showed that the model ensures the successful completion of the task of moving an AMS along a pre-planned path without obstacles; moving an AMS without collisions when an AMS memory contains several paths, including those that have common areas; moving an AMS along a path when disturbances related to environmental observation limitations make it difficult to solve the localization task. These disturbances are overcome by generalizing the situation, which is performed by the inference mechanism of the Takagi-Sugeno-Kang fuzzy model.

*In Chapter Three*, a method of situational control of an autonomous mobile system with re-planning of the path, which ensures the performance of an AMS tasks in the event of unforeseen disturbances is developed. The proposed method uses the knowledge of an AMS about the known fragments of paths to synthesize new paths to ensure the achievement of the goal in a changing environment.

*In Chapter Four*, the development of information technology of navigation of an AMS based on the control model and re-planning method given in chapters 2 and 3 is proposed. The structure of an AMS on-board system software that supports the information technology of its navigation is proposed. The structure consists of five modules, three of which are based on the model developed in the thesis.

The information technology is used for field experiments. During the experiments, the completeness of an AMS path database was varied and obstacles in the environment were dynamically added, which made it impossible to move on known (or autonomously constructed when obtaining the movement goal) paths. The purpose of the experiments was to conduct a comprehensive test of the proposed information technology on the possibility of its use to solve the problem of monitoring spatially distributed objects. According to the results of the experiments, the suitability of the proposed system was established for conditions when the reach of the goal point of the movement is fundamentally possible, given the available knowledge, i.e., an AMS is able to choose or build a path in dynamic obstacles, combining the current location of an AMS with the goal point. If it is impossible to achieve the goal point in principle

due to insufficient current knowledge, an AMS is able to switch to a random motion mode, which allows replenishing the current knowledge base.

The results of dissertation research are presented in 17 scientific works of the author, namely: 4 scientific articles in periodicals, of which 3 articles in periodicals included in the list of scientific professional publications of Ukraine category "B", 1 article in a foreign periodical (Bulgaria); 1 chapter in a collective monograph published abroad (Switzerland); 12 publications in the proceedings of international and all-

Ukrainian scientific conferences, among which 1 publication published in the proceedings of the international scientific conference, indexed by the Scopus database.

*Keywords:* autonomous mobile system, navigation, situational control, artificial intelligence technologies, cognitive robotics, rule-based systems, fuzzy information processing, integration of digital solutions, reinforced learning.

## Список публікацій здобувача

***Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

1. Каргін А. О., Іванюк О. І. Модель ситуаційного планування й керування переміщеннями автономного роботу. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Вип. 4, № 3. С. 41–51. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.3.05.

2. Ivaniuk O. Navigation of Autonomous Systems based on Situation Control with Dynamic Replanning. *Information Processing Systems*. 2020. № 3 (162). P. 44–51. DOI: 10.30748/soi.2020.162.05.

3. Martovytskyi V., Ivaniuk O. Approach to Building a Global Mobile Agent Way Based on Q-learning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 3 (13). P. 43–51. DOI: 10.30837/itssi.2020.13.043.

4. Kargin A., Ivaniuk O., Cherneva G. Autonomous Robot Path Planning Methods Analysis. *Mechanics. Transport. Communications*. 2020. № 2020/2. P. 28–35.

5. Kargin A., Ivaniuk O., Panchenko A., Muhitovs R. Motion Control of Smart Autonomous Mobile System Based on the Perception Model. *ICTE in Transportation and Logistics 2019. ICTE ToL 2019. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure* / edited by Ginters E., Ruiz Estrada M., Piera Eroles M. Springer, Cham, 2019. P. 145-153. DOI: 10.1007/978-3-030-39688-6\_20.

***Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

6. Kargin A., Ivaniuk O., Galych G., Panchenko A. Polygon for smart machine application. *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. IEEE, 2018. P. 464–468. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409178.

7. Каргін А. О., Іванюк О. І. Застосування модифікованої моделі нечіткого виводу Такагі-Сугено-Канга в задачах когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 33-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 30 жовт. 2020 р. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 16–17.

8. Каргін А. О., Іванюк О. І. Багаторівнева модель навігації автономного робота, заснована на динамічному ситуаційному управлінні. *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація — 2020»*, м. Одеса, 22–23 жовт. 2020 р. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 291–293.

9. Каргін А. О., Іванюк О. І. Представлення картографічних знань про оточення в моделях когнітивної робототехніки. *Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»*, м. Запоріжжя, 7–9 жовт. 2020 р. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 124–126.

10. Каргін А. О., Іванюк О. І. Полігон для натурних експериментів з моделями когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–25 жовт. 2019 р. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 68–69.

11. Каргін А. О., Іванюк О. І., Лучников Д. В. та ін. Система дистанційного управління мобільним роботом за допомогою голосових команд. *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод»*, м. Краматорськ, 18–20 квіт. 2019 р. Краматорськ: ДДМА, 2019. С. 19–21.

12. Каргін А. О., Іванюк О. І. Застосування часової логіки в алгоритмах дослідження оточення мобільного робота. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 74–75.

13. Бриксін В. О., Іванюк О. І., Матюхова Н. О. та ін. Реалізація програмного та ситуаційного управління мобільним роботом. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 72–73.

14. Іванюк О. І. Обробка первинних сенсорних даних для представлення у гранулярних обчисленнях. *Тези доповідей 80-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*, м. Харків, 24–26 квіт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 43–44.

15. Каргін А. О., Іванюк О. І., Лахно О. Г. Організація взаємодії розумних машин та інтелектуальних сенсорів в інтернеті речей. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 30-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 26–27 жовт. 2017 р. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 80–81.

16. Каргин А. А., Иванюк А. И. Об одном подходе к построению систем мониторинга ситуаций на основе колесных роботов. *Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності»*, м. Львів, 16 листоп. 2017 р. Львів: НАСВ, 2017. С. 21.

17. Каргин А. А., Петренко Т. Г., Иванюк А. И. О научном полигоне для апробации решений индустриальной революции 4.0 в железнодорожной отрасли. *Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 80-річчю В. В. Свиридова «Інформаційні системи та технології»*, с. Коблево, 11–16 верес. 2017 р. Харків, 2017. С. 51–52.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ.....	25
Сфери застосування та функції АМС.....	25
Підходи до вирішення завдання навігації АМС у просторі .....	28
Методи вирішення завдання сприйняття інформації про оточення .....	32
Методи вирішення завдання локалізації та картографування .....	34
Методи вирішення завдання планування маршруту руху... ..	37
Методи вирішення завдання керування рухом .....	43
Огляд ситуаційного підходу до завдання управління .....	44
Висновки до першого розділу.....	45
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯМ АВТОНОМНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ УЗДОВЖ ЗАДАНОГО МАРШРУТУ .....	46
Постанова завдання управління переміщенням АМС уздовж маршруту з перешкодами .....	46
Адаптація моделі сприйняття з механізмом відстеження контексту до завдання ситуаційного управління переміщенням АМС .....	50
Модель подання знань.....	52
Багатошарова ієрархічна структура знань.....	52
Факти, супутники фактів .....	55
Правила подання цілей, маршруту .....	55
Картографічні знання, правила подання стратегій руху .....	57

Управління переміщенням АМС на основі модифікованої моделі Такагі-Сугено-Канга .....	62
Дослідження моделі .....	64
Модель штучного оточення .....	64
Подання знань.....	65
Переміщення вздовж одного маршруту без перешкод. Обмеження та можливості подання маршруту.....	72
Декілька маршрутів у пам'яті. Переключення з одного маршруту на інший .....	73
Переміщення вздовж одного маршруту з перешкодами .....	74
Дослідження впливу контексту на впевненість локалізації АМС .....	76
Висновки до другого розділу .....	77
РОЗДІЛ 3. МЕТОД СИТУАЦІЙНОГО ПЕРЕПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ РУХУ АВТОНОМНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ .....	79
Обґрунтування вибору моделі перепланування маршруту.....	79
Модель подання маршруту. База знань маршрутів .....	87
Модель планувальника маршрутів: синтез маршруту методом конкатенації типових фрагментів маршруту .....	92
Вимоги до знань про оточення, що необхідні для можливості синтезу маршрутів.....	93
Синтез маршрутів із типових фрагментів: два фрагменти..	94
Синтез маршрутів із типових фрагментів: довільне число фрагментів.....	99
Модель планувальника маршрутів: створення типових фрагментів маршруту методом машинного навчання .....	100
Модель ситуаційного управління з використанням знань про маршрут .....	103
Комп'ютерні експерименти .....	108



Дослідження алгоритму синтезу маршруту з типових фрагментів .....	17
.....	109
Моделювання руху АМС за маршрутом з невідомими перешкодами .....	110
Висновки до третього розділу.....	111
РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ПРИКЛАДІ МОНІТОРИНГУ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ .....	113
Організація навігації АМС, що виконують завдання моніторингу розосереджених об'єктів.....	113
Програмна реалізація .....	117
Структура програмного забезпечення.....	117
Модуль ситуаційного управління .....	118
Модуль перепланування маршруту .....	120
Організація знань та даних .....	120
Комплексне тестування системи навігації на прикладі колісних роботів, що виконують моніторинг ситуацій у приміщенні .....	121
Апаратне забезпечення полігону АМС .....	124
План експериментів. Обговорення результатів .....	125
Висновки до четвертого розділу.....	126
ВИСНОВКИ .....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
Додаток А Список публікацій здобувача.....	145
Додаток Б Акти упровадження.....	148
Додаток В Опис полігону для натурних експериментів .....	150

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

IDEF0 — Integrated DEFinition (методологія функціонального моделювання та графічного подання процесів)

SLAM — Simultaneous Localization and Mapping (одночасна локалізація та картографування)

AMP — автономний мобільний робот

AMC — автономна мобільна система

AC — автономна система

БЗ — база знань

БІНС — бортова інерціальна система

ГСК — глобальна система координат

ІМОП — інтелектуальний механізм обробки правил

ІТНАМС — інформаційна технологія навігації автономних мобільних систем

КТРП — ключова точка робочого простору

МСП(Н) — модель сприйняття, заснована на правилах (в навігації)

МППР — марківський процес прийняття рішень

МТСК — модифікована нечітка модель Такагі-Сугено-Канга

НХ — нечітка характеристика

ПІД контролер — пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер

СУПМ — ситуаційне управління з переплануванням маршруту

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Концепція автономних систем (АС) набуває все більшого поширення у створенні таких різноманітних систем, як: великомасштабні, розподілені в просторі системи моніторингу стану будь-якого оточення; розумне місто і розумний дім; індустріальний та побутовий інтернет речей із сукупністю компонентів, що реалізують в автономному режимі певну функцію, для виконання якої потрібна різноманітна інформація. Індустріальні АС компонується з автоматичних ліній, верстатів із числовим програмним керуванням, транспортних систем, роботів. Залізнична і автомобільна галузі в перспективних планах передбачають створення АС на базі розумних автомобілів і розумних поїздів. АС, що виконують функції моніторингу ситуацій, містять мобільні пристрої (роботи, безпілотні літальні апарати) для спостереження й отримання інформації. У проєктах розумних міст, як і у всіх вищеперерахованих системах, основним компонентом АС є розумна автономна машина, що переміщується у просторі. Одним із головних завдань автономних мобільних систем (АМС) є навігація, що в умовах упорядкованого оточення вирішується традиційними методами планування та управління. Але це пов'язано з великими витратами на упорядкування оточення, з одного боку, й унеможливорює використання АМС у гнучких виробничих системах. Крім цього, бурхливий розвиток робототехніки обумовлений надією на застосування роботів у недетермінованому оточенні, коли у заздалегідь передбачених ситуаціях мобільні роботи мають надавати сервіси чи реалізувати виробничу функцію. Наявність непередбачених перешкод порушує плани переміщення АМС і потребує або розробки нового плану переміщень, або часткового перегляду попереднього плану. Завдання навігації АМС розглядається у чотирьох аспектах: сприйняття інформації про оточення, локалізація ділянки маршруту, де знаходиться АМС, і відображення місцезнаходження АМС на карті оточення, планування маршруту переміщення та керування рухом. Для автономної навігації АМС важливе одночасне вирішення перелічених завдань. Такий підхід,

відомий як SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), базується на методах і моделях штучного інтелекту. Однак залишається невирішеним завдання навігації АМС у просторі, де можливі збурення. Проблема полягає в тому, що різноманітні збурення, які виникають у процесі руху робота, не дозволяють реалізувати переміщення вздовж заздалегідь запланованого маршруту і вимагають поточного перепланування відповідно до отриманої від сенсорів ситуації. Для АС проблема посилюється необхідністю автоматичного формування моделі поточної ситуації на основі даних від сенсорів й інтегрування цієї моделі ситуації з моделями планування й управління у реальному часі.

Пошуку шляхів вирішення завдання навігації присвячено наукові праці таких авторів: G. Bekey [1], Н. Choset [2–5], О. Khatib [6], S. LaValle [7, 8], С. Lee [9], А. Savkin [10–12], R. Siegwart [13], М. Spong [14, 15], S. Thrun [2, 16, 17], S. Tzafestas [18], S. Yang [19, 20].

Отже, актуальною є тема дисертаційної роботи, в якій вирішується **наукове завдання** з розробки моделі та методу інформаційної технології навігації АМС, що забезпечує однорідну інтеграцію таких чотирьох завдань навігаційного циклу, як сприйняття інформації, локалізація, динамічне планування маршруту та ситуаційне керування рухом у недетермінованому частково спостережуваному оточенні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Частина досліджень, результати яких викладено в дисертації, виконано в межах науково-дослідної роботи Українського державного університету залізничного транспорту «Розумні машини та інтернет речі зі штучним інтелектом», № ДР 0120U104276 та держбюджетної науково-дослідної роботи Харківського національного університету радіоелектроніки «Глибинні гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних та їх швидке навчання», № ДР 0119U001403.

**Мета і завдання дослідження** відповідно до предмета та об'єкта дослідження.

*Об'єкт дослідження:* процес навігації автономних мобільних систем.

*Предмет дослідження:* моделі, методи і технології навігації автономних мобільних систем в умовах невизначеності, неповноти та нечіткості інформації.

*Метою дисертаційного дослідження є розширення можливостей навігації мобільних систем в автономному режимі в умовах частково недетермінованого оточення.*

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи необхідно вирішити такі завдання:

1) провести аналіз існуючих моделей та методів навігації, що використовуються в АМС;

2) розробити модель ситуаційного управління переміщенням по маршруту АМС в умовах передбачених збурень на основі концептуальної моделі сприйняття з механізмами управління контекстом і переключення уваги;

3) розробити модель та метод ситуаційного управління переміщенням по маршруту з динамічним переплануванням маршруту АМС в умовах непередбачених збурень;

4) розвинути інформаційну технологію навігації АМС на основі моделі ситуаційного управління переміщенням та динамічного перепланування;

5) провести комплексне тестування розроблених моделей, методу та інформаційної технології.

**Методи дослідження.** Під час виконання завдань дослідження були використані методи: ситуаційного управління та нечіткої логіки у розробці моделі управління переміщенням АМС; теоретико-множинного опису та математичної логіки у формалізації завдання управління переміщенням АМС; теорії експерименту і комп'ютерного моделювання для проведення комп'ютерних і натурних експериментів із розробленими моделлю, методом та інформаційною технологією; машинного навчання з підкріпленням та теорії оптимізації під час розробки модуля створення типових фрагментів маршруту; функціонального моделювання для удосконалення інформаційної технології навігації АМС.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у такому:

1) *уперше* розроблено модель ситуаційного управління переміщенням АМС з переплануванням маршруту, яка, на відміну від існуючих, враховує вплив задалегідь непередбачених збурень, що унеможливають переміщення до цільової позиції маршруту, та завдяки ситуаційному переплануванню на підставі сенсорних даних про поточну ситуацію дозволяє АМС досягнути цілі;

2) *удосконалено* метод ситуаційного управління з урахуванням контексту, який адаптовано до завдання управління переміщенням АМС уздовж заданого маршруту, що дозволяє на цій підставі вирішувати завдання її навігації в умовах невизначеності й неповної інформації;

3) *набула подальшого розвитку* інформаційна технологія навігації АМС за рахунок використання моделі та методу ситуаційного управління з переплануванням маршруту, що дозволяє розширити застосування АМС в автономному режимі у частково недетермінованому оточенні, коли відсутня можливість або економічно необґрунтоване упорядкування оточення.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичне значення отриманих теоретичних результатів полягає у тому, що запропоновані у роботі модель і метод ситуаційного управління з переплануванням маршруту АМС є універсальним засобом, який може використовуватись у завданнях управління розумними машинами широкого класу.

Фрагменти дисертаційної роботи запроваджено (додаток Б):

– у процес виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Глибинні гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних та їх швидке навчання», № ДР 0119U001403 (акт впровадження від 03.12.2020 р.);

– у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту (акт впровадження від 20.10.2020 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором особисто.

Результати дисертаційних досліджень викладено у 17 наукових працях автора, а саме: 4 наукові статті в періодичних виданнях, з яких 3 статті у виданнях, внесених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» [21–23], 1 стаття у закордонному періодичному науковому виданні (Болгарія) [24]; 1 розділ у колективній монографії, виданій за кордоном (Швейцарія) [25]; 12 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, серед яких 1 доповідь опублікована в матеріалах міжнародної наукової конференції, що індексується наукометричною базою Scopus [26].

Наукова праця [22] опублікована без співавторів. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: у статті [21] запропоновано стратифікацію бази знань АМС на п'ять рівнів абстрагування, виконано адаптацію загальної форми нечітких правил Такагі-Сугено-Канга до кожного із рівнів, створено штучне оточення, проведено серії комп'ютерних експериментів та виконано аналіз їх результатів; у статті [23] запропоновано застосування підходу навчання з підкріпленням до побудови типових фрагментів маршрутів руху АМС, виконано програмну реалізацію з алгоритму та проведено комп'ютерні експерименти; у статті [24] проведено аналіз існуючих методів планування маршруту руху АМС, запропоновано використання підходу ситуаційного управління до вирішення завдання динамічного перепланування маршрутів у разі виникнення непередбачених збурень в оточенні; у розділі монографії [25] запропоновано імплементацію моделі сприйняття до вирішення завдання навігації АМС, побудовано правила для подання знань АМС про оточення, виконано проєктування, апаратну та програмну реалізацію фізичної моделі АМС, сформовано протоколи та проведено серії натурних і комп'ютерних експериментів, виконано аналіз отриманих результатів.

**Апробація матеріалів дисертації.** Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на таких наукових конференціях: 6-та Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи та технології» (Коблево, 11-16 вересня 2017 р.) [27]; 30-та, 31-ша, 32-га, 33-тя Міжнародні науково-практичні конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»

(Харків, 26-27 жовтня 2017 р., 24-26 жовтня 2018 р., 24-25 жовтня 2019 р., 30 жовтня 2020 р.) [28–32]; науково-практична конференція «Застосування Сухопутних військ Збройних сил України у конфліктах сучасності» (Львів, 16 листопада 2017 р.) [33]; 80-та Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, 24-26 квітня 2018 р.) [34]; 9th International IEEE Conference Dependable Systems, Services and Technologies (Київ, 24-27 травня 2018 р.) [26]; III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» (Краматорськ, 18-20 квітня 2019 р.) [35]; X Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 07-09 жовтня 2020 р.) [36]; XIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація — 2020» (Одеса, 22-23 жовтня 2020 р.) [37].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 155 сторінки друкованого тексту, з них анотація — на 13 сторінках, зміст — на 3 сторінках, перелік умовних позначень — на 1 сторінці, основний текст — на 111 сторінках, список із 137 використаних джерел — на 15 сторінках, додатки — на 11 сторінках. Дисертація містить 30 рисунків, та 6 таблиць, з яких 1 на 1 окремій сторінці.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bekey G. *Autonomous Robots — From Biological Inspiration To Implementation And Control*. MIT Press, 2005. 577 p.
2. Choset H., Lynch K., Hutchinson S. et al. *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation*. Cambridge Mass: MIT Press, 2005. 603 p.
3. Choset H. Coverage of known spaces: The boustrophedon cellular decomposition. *Autonomous Robots*. 2000. Vol. 9, № 3. P. 247–253. DOI: 10.1023/A:1008958800904.
4. Choset H., Pignon P. Coverage Path Planning: The Boustrophedon Cellular Decomposition. *Field and Service Robotics*. Springer London, 1998. P. 203–209. DOI: 10.1007/978-1-4471-1273-0\_32.
5. Acar E. U., Choset H., Rizzi A. A. et al. Morse decompositions for coverage tasks. *International Journal of Robotics Research*. 2002. Vol. 21, № 4. P. 331–344. DOI: 10.1177/027836402320556359.
6. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Proceedings — IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1985. P. 500–505. DOI: 10.1109/ROBOT.1985.1087247.
7. LaValle S. *Planning algorithms*. Cambridge University Press, 2006. 826 p. DOI: 10.1017/CBO9780511546877.
8. LaValle S. Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning. / 1998.
9. Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G. *Robotics: control, sensing, vision, and intelligence*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1987. 580 p.
10. Hoy M., Matveev A. S., Savkin A. V. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: A survey. *Robotica*. 2015. Vol. 33, № 3. P. 463–497. DOI: 10.1017/S0263574714000289.
11. Huang H., Savkin A. V., Ding M. et al. Mobile robots in wireless sensor networks: A survey on tasks. *Computer Networks*. 2019. Vol. 148. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.comnet.2018.10.018.

12. Matveev A. S., Savkin A. V., Hoy M. et al. Safe Robot Navigation Among Moving and Steady Obstacles. *Safe Robot Navigation Among Moving and Steady Obstacles*. Elsevier Inc., 2015. 1–344 p. DOI: 10.1016/c2014-0-04846-0.

13. Siegwart R., Nourbakhsh I. Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, 2004. 321 p.

14. Spong M., Vidyasagar M. Robot Dynamics and Control. Wiley, 1989. 336 p.

15. Spong M., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. Wiley, 2005. 496 p.

16. Thrun S. Probabilistic robotics. *Communications of the ACM*. 2002. Vol. 45, № 3. P. 52–57. DOI: 10.1145/504729.504754.

17. Thrun S., Gutmann J.-S., Fox D. et al. Integrating Topological and Metric Maps for Mobile Robot Navigation: A Statistical Approach. *Proceedings of the fifteenth national/tenth conference on Artificial intelligence/Innovative applications of artificial intelligence*. 1998. P. 989–995.

18. Tzafestas S. G. Introduction to Mobile Robot Control. Elsevier, 2014. 691 p. DOI: 10.1016/C2013-0-01365-5.

19. Sun B., Zhu D., Yang S. X. An Optimized Fuzzy Control Algorithm for Three-Dimensional AUV Path Planning. *International Journal of Fuzzy Systems*. 2018. Vol. 20, № 2. P. 597–610. DOI: 10.1007/s40815-017-0403-1.

20. Wang L., Yang S. X., Biglarbegian M. A fuzzy logic based bio-inspired system for mobile robot navigation. *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 2012. P. 219–224. DOI: 10.1109/MFI.2012.6343040.

21. Каргін А. О., Іванюк О. І. Модель ситуаційного планування й керування переміщеннями автономного роботу. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Вип. 4, № 3. С. 41–51. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.3.05.

22. Ivaniuk O. Navigation of Autonomous Systems based on Situation Control with Dynamic Replanning. *Information Processing Systems*. 2020. № 3 (162). P. 44–51. DOI: 10.30748/soi.2020.162.05.

23. Martovytskyi V., Ivaniuk O. Approach to Building a Global Mobile Agent Way Based on Q-learning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 3 (13). P. 43–51. DOI: 10.30837/itssi.2020.13.043.

24. Kargin A., Ivaniuk O., Cherneva G. Autonomous Robot Path Planning Methods Analysis. *Mechanics. Transport. Communications*. 2020. № 2020/2. P. 28–35.

25. Kargin A., Ivaniuk O., Panchenko A., Muhitovs R. Motion Control of Smart Autonomous Mobile System Based on the Perception Model. *ICTE in Transportation and Logistics 2019. ICTE ToL 2019. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure* / edited by Ginters E., Ruiz Estrada M., Piera Eroles M. Springer, Cham, 2019. P. 145-153. DOI: 10.1007/978-3-030-39688-6\_20.

26. Kargin A., Ivaniuk O., Galych G., Panchenko A. Polygon for smart machine application. *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. IEEE, 2018. P. 464-468. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409178.

27. Каргин А. А., Петренко Т. Г., Иванюк А. И. О научном полигоне для апробации решений индустриальной революции 4.0 в железнодорожной отрасли. *Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 80-річчю В. В. Свиридова «Інформаційні системи та технології»*, с. Коблево, 11–16 верес. 2017 р. Харків, 2017. С. 51–52.

28. Каргін А. О., Иванюк О. І., Лахно О. Г. Організація взаємодії розумних машин та інтелектуальних сенсорів в інтернеті речей. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 30-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 26–27 жовт. 2017 р. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 80–81.

29. Каргін А. О., Иванюк О. І. Застосування часової логіки в алгоритмах дослідження оточення мобільного робота. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 74–75.

30. Бриксін В. О., Іванюк О. І., Матюхова Н. О. та ін. Реалізація програмного та ситуаційного управління мобільним роботом. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 72–73.

31. Каргін А. О., Іванюк О. І. Полігон для натурних експериментів з моделями когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–25 жовт. 2019 р. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 68–69.

32. Каргін А. О., Іванюк О. І. Застосування модифікованої моделі нечіткого виводу Такагі-Сугено-Канга в задачах когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 33-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 30 жовт. 2020 р. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 16–17.

33. Каргін А. А., Іванюк А. И. Об одном подходе к построению систем мониторинга ситуаций на основе колесных роботов. *Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності»*, м. Львів, 16 листоп. 2017 р. Львів: НАСВ, 2017. С. 21.

34. Іванюк О. І. Обробка первинних сенсорних даних для представлення у гранулярних обчисленнях. *Тези доповідей 80-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*, м. Харків, 24–26 квіт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 43–44.

35. Каргін А. О., Іванюк О. І., Лучников Д. В. та ін. Система дистанційного управління мобільним роботом за допомогою голосових команд. *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод»*, м. Краматорськ, 18–20 квіт. 2019 р. Краматорськ: ДДМА, 2019. С. 19–21.

36. Каргін А. О., Іванюк О. І. Представлення картографічних знань про

оточення в моделях когнітивної робототехніки. *Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»*, м. Запоріжжя, 7–9 жовт. 2020 р. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 124–126.

37. Каргін А. О., Іванюк О. І. Багаторівнева модель навігації автономного робота, заснована на динамічному ситуаційному управлінні. *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація — 2020»*, м. Одеса, 22-23 жовт. 2020 р. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 291–293.

38. Богданський Ю. В. Диференціальні рівняння. Київ: ІВЦ «Видавництво Політехніка», 2011. 214 р.

39. Hawkinson J., Bates T. Guidelines for creation, selection, and registration of an Autonomous System (AS). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1930> (last accessed: 03.06.20).

40. ROBOT | definition in the Cambridge English Dictionary. URL: <https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/robot> (last accessed: 13.07.20).

41. Silver D., Huang A., Maddison C. J. et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*. 2016. Vol. 529, № 7587. P. 484–489. DOI: 10.1038/nature16961.

42. Mulken T. J. M. van, Schols R. M., Scharmga A. M. J. et al. First-in-human robotic supermicrosurgery using a dedicated microsurgical robot for treating breast cancer-related lymphedema: a randomized pilot trial. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, № 1. P. 1–7. DOI: 10.1038/s41467-019-14188-w.

43. Kot T., Novák P. Application of virtual reality in teleoperation of the military mobile robotic system TAROS. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. Vol. 15, № 1. P. 1–6. DOI: 10.1177/1729881417751545.

44. Pilat Z., Klimasara W., Pachuta M. et al. Some new robotization problems related to the introduction of collaborative robots into industrial practice. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*. 2019. Vol. 13, № 4. P. 91–97. DOI: 10.14313/JAMRIS/4-2019/42.

45. Epson WorkSense W-01 — Epson. URL: <https://www.epson.eu/robots/dual-arm> (last accessed: 05.12.20).
46. Pepito J. A., Ito H., Betriana F. et al. Intelligent humanoid robots expressing artificial humanlike empathy in nursing situations. *Nursing Philosophy*. 2020. Vol. 21, № 4. DOI: 10.1111/nup.12318.
47. Moxi — Diligent Robotics. URL: <https://diligentrobots.com/moxi> (last accessed: 05.12.20).
48. Умінський В. В. Аналіз систем управління переміщенням мобільних роботів. *Вісник Інженерної академії України*. 2013. № 3–4. С. 306–308.
49. Ащепкова Н. С. Розробка адаптивної системи керування моделі робота-навантажувача на базі Lego Mindstorms NXT. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. Т. 5, № 6(25). С. 45–48. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.51215.
50. Pinto A. B., Barbosa R. S., Silva M. F. Autonomous robot control by neural networks. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Verlag, 2015. P. 597–606. DOI: 10.1007/978-3-319-10380-8\_57.
51. Chen W., Zhang T. An indoor mobile robot navigation technique using odometry and electronic compass. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017. Vol. 14, № 3. P. 1–15. DOI: 10.1177/1729881417711643.
52. Pandey A. Mobile Robot Navigation and Obstacle Avoidance Techniques: A Review. *International Robotics & Automation Journal*. 2017. Vol. 2, № 3. P. 96–105. DOI: 10.15406/iratj.2017.02.00023.
53. Singh N. H., Thongam K. Mobile Robot Navigation Using Fuzzy Logic in Static Environments. *Procedia Computer Science*. Elsevier, 2018. P. 11–17. DOI: 10.1016/j.procs.2017.12.004.
54. Crowley J. L. Mathematical foundations of navigation and perception for an autonomous mobile robot. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer Verlag, 1996. P. 9–51. DOI: 10.1007/BFb0013953.
55. Braunstingl R., Sanz P., Ezkerra J. M. Fuzzy Logic Wall Following of a

Mobile Robot Based on the Concept of General Perception. *Proceedings of the Seventh International Conference on Advanced Robotics*. SEPT, 1995. P. 367–376.

56. Premebida C., Ambrus R., Marton Z.-C. Intelligent Robotic Perception Systems: *Applications of Mobile Robots*. IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.79742.

57. Xie C., Xiang Y., Mousavian A. et al. The Best of Both Modes: Separately Leveraging RGB and Depth for Unseen Object Instance Segmentation. *Proceedings of the Conference on Robot Learning*. PMLR, 12 May 2020. P. 1369–1378.

58. Zhang X., Chen Z., Jonathan Wu Q. M. et al. Fast Semantic Segmentation for Scene Perception. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, № 2. P. 1183–1192. DOI: 10.1109/TII.2018.2849348.

59. Nguyen T. N., Michaelis B., Al-Hamadi A. et al. Stereo-camera-based urban environment perception using occupancy grid and object tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2012. Vol. 13, № 1. P. 154–165. DOI: 10.1109/TITS.2011.2165705.

60. Gupta S., Girshick R., Arbeláez P. et al. Learning rich features from RGB-D images for object detection and segmentation. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer Verlag, 2014. P. 345–360. DOI: 10.1007/978-3-319-10584-0\_23.

61. Xiang Y., Xie C., Mousavian A. et al. Learning RGB-D Feature Embeddings for Unseen Object Instance Segmentation. *arXiv*. 2020. P. 1–10.

62. Kargin A., Petrenko T. Spatio-temporal data interpretation based on perceptual model: *Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data. Studies in Computational Intelligence*. Edited by Mashtalir V., Ruban I., Levashenko V. Springer, Cham, 2020. P. 101–159. DOI: 10.1007/978-3-030-35480-0\_3.

63. Kargin A., Petrenko T. Multi-level Computing With Words Model to Autonomous Systems Control. *Proceedings of the 9th International Conference “Information Control Systems & Technologies.”* Odessa, September 2020. P. 16–30.

64. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: a Modern Approach*. Prentice

Hall, 2010. 1132 p.

65. Jia Y., Yan X., Xu Y. A Survey of simultaneous localization and mapping for robot. *Proceedings of 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2019*. IEEE, 01 December 2019. P. 857–861. DOI: 10.1109/IAEAC47372.2019.8997820.

66. Zhang F., Li S., Yuan S. et al. Algorithms analysis of mobile robot SLAM based on Kalman and particle filter. *Proceedings of 2017 9th International Conference On Modelling, Identification and Control, ICMIC 2017*. IEEE, 21 March 2018. P. 1050–1055. DOI: 10.1109/ICMIC.2017.8321612.

67. Cadena C., Carlone L., Carrillo H. et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol. 32, № 6. P. 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754.

68. Luo C., Krishnan M., Paulik M. et al. An effective trace-guided wavefront navigation and map-building approach for autonomous mobile robots. *Intelligent Robots and Computer Vision XXXI: Algorithms and Techniques*. SPIE, 03 February 2014. DOI: 10.1117/12.2040885.

69. Aleksandrovich Y. D., Stepanovich K. A., Zalmanovich M. V. Mobile Robot Navigation Based on Artificial Landmarks with Machine Vision System. *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 24 (11). P. 1467–1472.

70. Chen X., Sun H., Zhang H. A New Method of Simultaneous Localization and Mapping for Mobile Robots Using Acoustic Landmarks. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, № 7. P. 1–24. DOI: 10.3390/app9071352.

71. Wu H., Wu X., Tian G. Indoor robot localization based on single RFID tag. *Artificial Life and Robotics*. 2018. Vol. 23, № 3. P. 373–379. DOI: 10.1007/s10015-018-0449-7.

72. Cesetti A., Frontoni E., Mancini A. et al. A Vision-based guidance system for UAV navigation and safe landing using natural landmarks. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 2010. Vol. 57, № 1–4. P. 233–257. DOI: 10.1007/s10846-009-9373-3.



73. Alatise M. B., Hancke G. P. A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 39830–39846. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2975643.

74. Li Q., Zhu J., Liu T. et al. Visual landmark sequence-based indoor localization. *Proceedings of the 1st Workshop on GeoAI: AI and Deep Learning for Geographic Knowledge Discovery, GeoAI 2017*. New York, USA, ACM, 07 November 2017. P. 14–23. DOI: 10.1145/3149808.3149812.

75. Guan K., Ma L., Tan X. et al. Vision-based indoor localization approach based on SURF and landmark. *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2016*. IEEE, 26 September 2016. P. 655–659. DOI: 10.1109/IWCMC.2016.7577134.

76. Hou B., Wang J., Zhou H. et al. Navigation Landmark Recognition and Matching Algorithm Based on the Improved SURF. *Proceedings — 2019 Chinese Automation Congress, CAC 2019*. IEEE, 01 November 2019. P. 1356–1361. DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8996908.

77. Li K., Zhang L. Research on Underwater Navigation Algorithm Based on SIFT Matching Algorithm. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. DEStech Publications, 07 July 2017. P. 170–177. DOI: 10.12783/dtetr/icmeca2017/11929.

78. Zhenjun L., Nisar H., Malik A. S. A framework for real time indoor robot navigation using Monte Carlo Localization and ORB feature detection. *Proceedings of the International Symposium on Consumer Electronics, ISCE*. IEEE, 2014. DOI: 10.1109/ISCE.2014.6884401.

79. Nilwong S., Hossain D., Kaneko S. et al. Deep Learning-Based Landmark Detection for Mobile Robot Outdoor Localization. *Machines*. 2019. Vol. 7, № 2. P. 25. DOI: 10.3390/machines7020025.

80. Goerzen C., Kong Z., Mettler B. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 2010. Vol. 57, № 1–4. P. 65–100. DOI: 10.1007/s10846-009-9383-1.

81. Alt H., Welzl E. Visibility graphs and obstacle-avoiding shortest paths. *Zeitschrift für Operations Research*. 1988. Vol. 32. P. 145–164. DOI: 10.1007/BF01928918.
82. Takahashi O., Schilling R. J. Motion Planning in a Plane Using Generalized Voronoi Diagrams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1989. Vol. 5, № 2. P. 143–150. DOI: 10.1109/70.88035.
83. Latombe J.-C., Latombe J.-C. Exact Cell Decomposition: *Robot Motion Planning*. Springer US, 1991. P. 200–247. DOI: 10.1007/978-1-4615-4022-9\_5.
84. Moravec H. P., Elfes A. High resolution maps from wide angle sonar. *Proceedings — IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1985. P. 116–121. DOI: 10.1109/ROBOT.1985.1087316.
85. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous Systems*. 2013. Vol. 61, № 12. P. 1258–1276. DOI: 10.1016/j.robot.2013.09.004.
86. Noborio H., Naniwa T., Arimoto S. A quadtree-based path-planning algorithm for a mobile robot. *Journal of Robotic Systems*. 1990. Vol. 7, № 4. P. 555–574. DOI: 10.1002/rob.4620070404.
87. Lingelbach F. Path planning using probabilistic cell decomposition. *Proceedings — IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2004. P. 467–472. DOI: 10.1109/robot.2004.1307193.
88. Sato K. Deadlock-free motion planning using the Laplace potential field. *Advanced Robotics*. 1992. Vol. 7, № 5. P. 449–461. DOI: 10.1163/156855393X00285.
89. Vadakkepat P., Tan K. C., Ming-Liang W. Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning. *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, CEC 2000*. IEEE Computer Society, 2000. P. 256–263. DOI: 10.1109/CEC.2000.870304.
90. Jaradat M. A. K., Garibeh M. H., Feilat E. A. Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field. *Soft Computing*. 2012. Vol. 16, № 1. P. 153–164. DOI: 10.1007/s00500-011-0742-z.
91. Kavraki L. E., Švestka P., Latombe J. C. et al. Probabilistic roadmaps for

path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996. Vol. 12, № 4. P. 566–580. DOI: 10.1109/70.508439.

92. Karaman S., Frazzoli E. Incremental sampling-based algorithms for optimal motion planning. *Robotics: Science and Systems*. MIT Press Journals, 2011. P. 267–274. DOI: 10.15607/rss.2010.vi.034.

93. Naderi K., Rajamaki J., Hamalainen P. RT-RRT\*: A real-time path planning algorithm based on RRT\*. *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games, MIG 2015*. ACM, 16 November 2015. P. 113–118. DOI: 10.1145/2822013.2822036.

94. Zhao Y., Zheng Z., Liu Y. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning. *Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 158. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.knosys.2018.05.033.

95. Patle B. K., Babu L G., Pandey A. et al. A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15, № 4. P. 582–606. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.011.

96. Hank M., Haddad M. A hybrid approach for autonomous navigation of mobile robots in partially-known environments. *Robotics and Autonomous Systems*. 2016. Vol. 86. P. 113–127. DOI: 10.1016/j.robot.2016.09.009.

97. Ruiz E., Acuña R. Safe navigation of mobile robots using a hybrid navigation framework with a fuzzy logic decision process. *Communications in Computer and Information Science*. Springer Verlag, 2016. P. 39–56. DOI: 10.1007/978-3-319-47247-8\_3.

98. Pandey A., Parhi D. R. Autonomous mobile robot navigation in cluttered environment using hybrid Takagi-Sugeno fuzzy model and simulated annealing algorithm controller. *World Journal of Engineering*. 2016. Vol. 13, № 5. P. 431–440. DOI: 10.1108/WJE-08-2016-0055.

99. Hendler J., Tate A., Drummond M. AI Planning: Systems and Techniques. *AI Magazine*. 1990. Vol. 11, № 2. P. 77. DOI: 10.1609/AIMAG.V11I2.833.

100. Nau D. S. Current Trends in Automated Planning. *AI Magazine*. 2007. Vol. 28, № 4. P. 58.

101. Alford R., Shivashankar V., Roberts M. et al. Hierarchical planning: relating task and goal decomposition with task sharing. *Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 2016. P. 3022–3028.

102. Ferrer-Mestres J., Francès G., Geffner H. Combined Task and Motion Planning as Classical AI Planning. *arXiv*. 2017. P. 1–10.
103. Georgievski I., Aiello M. HTN planning: Overview, comparison, and beyond. *Artificial Intelligence*. 2015. Vol. 222. P. 124–156. DOI: 10.1016/j.artint.2015.02.002.
104. Baillargeon R., DeJong G. F. Explanation-based learning in infancy. *Psychonomic Bulletin and Review*. 2017. Vol. 24, № 5. P. 1511–1526. DOI: 10.3758/s13423-017-1334-4.
105. Aineto D., Jiménez S., Onaindia E. Explanation-Based Learning of Action Models: *Knowledge Engineering Tools and Techniques for AI Planning*. Springer International Publishing, 2020. P. 3–20. DOI: 10.1007/978-3-030-38561-3\_1.
106. Leonetti M., Iocchi L., Stone P. A synthesis of automated planning and reinforcement learning for efficient, robust decision-making. *Artificial Intelligence*. 2016. Vol. 241. P. 103–130. DOI: 10.1016/j.artint.2016.07.004.
107. Hammond K. J. Case-Based Planning. *Case-Based Planning*. Elsevier, 1989. 277 p. DOI: 10.1016/c2009-0-22186-6.
108. Spalazzi L. A survey on case-based planning. *Artificial Intelligence Review*. 2001. Vol. 16, № 1. P. 3–36. DOI: 10.1023/A:1011081305027.
109. Zhuo H. H., Kambhampati S. Model-lite planning: Case-based vs. model-based approaches. *Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 246. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.artint.2017.01.004.
110. Ozen O., Sariyildiz E., Yu H. et al. Practical PID controller tuning for motion control. *Proceedings — 2015 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2015*. IEEE, 09 April 2015. P. 240–245. DOI: 10.1109/ICMECH.2015.7083981.
111. Ahmad S., Siddique N. H., Tokhi M. O. Modular Fuzzy Logic Controller for Motion Control of Two-Wheeled Wheelchair: *Fuzzy Logic — Controls, Concepts, Theories and Applications*. InTech, 2012. P. 37–58. DOI: 10.5772/37584.

112. Falsafi M. H., Alipour K., Tarvirdizadeh B. Fuzzy motion control for wheeled mobile robots in real-time. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 8, № 2. P. 133–144. DOI: 10.22061/jcarme.2018.2204.1205.

113. Wang G., Liu X., Zhao Y. et al. Neural Network-Based Adaptive Motion Control for a Mobile Robot with Unknown Longitudinal Slipping. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 2019. Vol. 32, № 1. P. 61. DOI: 10.1186/s10033-019-0373-3.

114. Герасимов В. Н. Система управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление*. 2013. № 5 (181). С. 94–102.

115. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. Москва: Наука, 1986. 288 с.

116. Каргин А. А., Петренко Т. Г. Управление умной машиной на основе модели категорийного представления ситуации: подход гранулярного компьютеринга. *Проблеми інформаційних технологій*. 2017. № 1. С. 17–28.

117. Каргин А. А., Петренко Т. Г. Абстрагирование и категоризация в умных машинах на основе гранулярных вычислений. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Інформатика та моделювання*. 2017. № 50. С. 130–141. DOI: 10.20998/2411-0558.2017.50.06.

118. Kargin A., Panchenko S., Vasiljevs A. et al. Implementation of cognitive perception functions in fuzzy situational control model. *Procedia Computer Science*. Elsevier, 2019. P. 231–238. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.128.

119. Kargin A., Petrenko T. Internet of Things Smart Rules Engine. *2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S&T 2018 — Proceedings*. IEEE, 31 January 2019. P. 639–644. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632027.

120. Kargin A., Petrenko T. Knowledge Representation in Smart Rules Engine. *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications*

*Technologies, AICT 2019 — Proceedings*. IEEE, 01 July 2019. P. 231–236. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847831.

121. Kargin A., Petrenko T. Abstraction as a Way of Uncertainty Representation in Smart Rules Engine. *2019 11th International Scientific and Practical Conference on Electronics and Information Technologies, ELIT 2019 — Proceedings*. IEEE, 01 September 2019. P. 136–141. DOI: 10.1109/ELIT.2019.8892321.

122. Каргин А. А. Введение в интеллектуальные машины. Книга 1. Интеллектуальные регуляторы. Донецк: Норд-Пресс, 2010. 526 с.

123. Oliehoek F. Value-Based Planning for Teams of Agents in Stochastic Partially Observable Environments. Amsterdam University Press, 2010. 222 p. DOI: 10.5117/9789056296100.

124. Nilsson N. J. The quest for artificial intelligence: A history of ideas and achievements. *The Quest for Artificial Intelligence: A History of Ideas and Achievements*. Cambridge University Press, 2011. 562 p. DOI: 10.1017/CBO9780511819346.

125. Luger G. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. Pearson education, 2009. 784 p.

126. Kargin A., Krachkovsky M. Method of Computer-aided Instruction in Situation Control Systems. *European Researcher*. 2013. Vol. 58, № 9–1. P. 2167–2178.

127. Каргин А. А., Котенко В. Н., Асланов А. Е. Синтез ситуационных систем управления реального времени на основе концепции нечеткого управляемого динамического процесса. *Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології в науці, економіці та освіті*. 2001. Т. 2. С. 108–113.

128. Jahanshahi H., Jafarzadeh M., Sari N. N. et al. Robot Motion Planning in an Unknown Environment with Danger Space. *Electronics*. 2019. Vol. 8, № 201. P. 27. DOI: 10.3390/electronics8020201.

129. Fisac J. F., Bajcsy A., Herbert S. L. et al. Probabilistically Safe Robot Planning with Confidence-Based Human Predictions. *arXiv*. 2018.

130. Lacerda B., Faruq F., Parker D. et al. Probabilistic planning with formal

performance guarantees for mobile service robots. *The International Journal of Robotics Research*. 2019. Vol. 38, № 9. P. 1098–1123. DOI: 10.1177/0278364919856695.

131. Zhang S., Sridharan M., Wyatt J. L. Mixed Logical Inference and Probabilistic Planning for Robots in Unreliable Worlds. *IEEE Transactions on Robotics*. 2015. Vol. 31, № 3. P. 699–713. DOI: 10.1109/TRO.2015.2422531.

132. Zhou J., Paolini R., Johnson A. M. et al. A Probabilistic Planning Framework for Planar Grasping under Uncertainty. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2017. Vol. 2, № 4. P. 2111–2118. DOI: 10.1109/LRA.2017.2720845.

133. Pandey A., Sonkar R. K., Pandey K. K. et al. Path planning navigation of mobile robot with obstacles avoidance using fuzzy logic controller. *2014 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control: Green Challenges and Smart Solutions, ISCO 2014 — Proceedings*. IEEE, 07 May 2014. P. 36–41. DOI: 10.1109/ISCO.2014.7103914.

134. Mohanty P. K., Parhi D. R. Path Planning Strategy for Mobile Robot Navigation Using MANFIS Controller. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, 2014. P. 353–361. DOI: 10.1007/978-3-319-02931-3\_40.

135. Wang Y., Wei T., Qu X. Study of multi-objective fuzzy optimization for path planning. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2012. Vol. 25, № 1. P. 51–56. DOI: 10.1016/S1000-9361(11)60361-0.

136. Gul F., Rahiman W., Nazli Alhady S. S. A comprehensive study for robot navigation techniques. *Cogent Engineering*. 2019. Vol. 6, № 1. P. 1–25. DOI: 10.1080/23311916.2019.1632046.

137. Jackson P. Introduction to expert systems. Addison-Wesley Publishing Company, 1986. 246 p.

## Додаток А

## Список публікацій здобувача

***Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

1. Каргін А. О., Іванюк О. І. Модель ситуаційного планування й керування переміщеннями автономного роботу. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Вип. 4, № 3. С. 41–51. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.3.05.

2. Ivaniuk O. Navigation of Autonomous Systems based on Situation Control with Dynamic Replanning. *Information Processing Systems*. 2020. № 3 (162). P. 44–51. DOI: 10.30748/soi.2020.162.05.

3. Martovytskyi V., Ivaniuk O. Approach to Building a Global Mobile Agent Way Based on Q-learning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 3 (13). P. 43–51. DOI: 10.30837/itssi.2020.13.043.

4. Kargin A., Ivaniuk O., Cherneva G. Autonomous Robot Path Planning Methods Analysis. *Mechanics. Transport. Communications*. 2020. № 2020/2. P. 28–35.

5. Kargin A., Ivaniuk O., Panchenko A., Muhitovs R. Motion Control of Smart Autonomous Mobile System Based on the Perception Model. *ICTE in Transportation and Logistics 2019. ICTE ToL 2019. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure* / edited by Ginters E., Ruiz Estrada M., Piera Eroles M. Springer, Cham, 2019. P. 145-153. DOI: 10.1007/978-3-030-39688-6\_20.

***Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

6. Kargin A., Ivaniuk O., Galych G., Panchenko A. Polygon for smart machine application. *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. IEEE, 2018. P. 464-468. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409178.

7. Каргін А. О., Іванюк О. І. Застосування модифікованої моделі нечіткого виводу Такагі-Сугено-Канга в задачах когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 33-ї Міжнародної науково-*



*практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 30 жовт. 2020 р. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 16–17.

8. Каргін А. О., Іванюк О. І. Багаторівнева модель навігації автономного робота, заснована на динамічному ситуаційному управлінні. *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація — 2020»*, м. Одеса, 22–23 жовт. 2020 р. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 291–293.

9. Каргін А. О., Іванюк О. І. Представлення картографічних знань про оточення в моделях когнітивної робототехніки. *Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»*, м. Запоріжжя, 7–9 жовт. 2020 р. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 124–126.

10. Каргін А. О., Іванюк О. І. Полігон для натурних експериментів з моделями когнітивної робототехніки. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–25 жовт. 2019 р. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 68–69.

11. Каргін А. О., Іванюк О. І., Лучников Д. В. та ін. Система дистанційного управління мобільним роботом за допомогою голосових команд. *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод»*, м. Краматорськ, 18–20 квіт. 2019 р. Краматорськ: ДДМА, 2019. С. 19–21.

12. Каргін А. О., Іванюк О. І. Застосування часової логіки в алгоритмах дослідження оточення мобільного робота. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*, м. Харків, 24–26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 74–75.

13. Бриксін В. О., Іванюк О. І., Матюхова Н. О. та ін. Реалізація програмного та ситуаційного управління мобільним роботом. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 31-ї Міжнародної науково-практичної*

конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»,

м. Харків, 24–26 жовт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 72–73.

14. Іванюк О. І. Обробка первинних сенсорних даних для представлення у гранулярних обчисленнях. *Тези доповідей 80-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»,* м. Харків, 24–26 квіт. 2018 р. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 43–44.

15. Каргін А. О., Іванюк О. І., Лахно О. Г. Організація взаємодії розумних машин та інтелектуальних сенсорів в інтернеті речей. *Тези стендових доповідей та виступів учасників 30-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»,* м. Харків, 26–27 жовт. 2017 р. Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 80–81.

16. Каргин А. А., Іванюк А. И. Об одном подходе к построению систем мониторинга ситуаций на основе колесных роботов. *Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності»,* м. Львів, 16 листоп. 2017 р. Львів: НАСВ, 2017. С. 21.

17. Каргин А. А., Петренко Т. Г., Іванюк А. И. О научном полигоне для апробации решений индустриальной революции 4.0 в железнодорожной отрасли. *Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 80-річчю В. В. Свиридова «Інформаційні системи та технології»,* с. Кobleво, 11–16 верес. 2017 р. Харків, 2017. С. 51–52.