

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

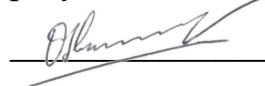
# МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

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 унеможливлювали 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<br>МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ .....                                                        | 25 |
| 1.1 Сфери застосування та функції АМС .....                                                                                     | 25 |
| 1.2 Підходи до вирішення завдання навігації АМС у просторі .....                                                                | 28 |
| 1.2.1 Методи вирішення завдання сприйняття інформації про<br>оточення .....                                                     | 32 |
| 1.2.2 Методи вирішення завдання локалізації та<br>картографування .....                                                         | 34 |
| 1.2.3 Методи вирішення завдання планування маршруту руху...                                                                     | 37 |
| 1.2.4 Методи вирішення завдання керування рухом.....                                                                            | 43 |
| 1.3 Огляд ситуаційного підходу до завдання управління.....                                                                      | 44 |
| 1.4 Висновки до першого розділу.....                                                                                            | 45 |
| РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯМ АВТОНОМНОЇ<br>МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ УЗДОВЖ ЗАДАНОГО МАРШРУТУ.....                          | 46 |
| 2.1 Постанова завдання управління переміщенням АМС уздовж<br>маршруту з перешкодами.....                                        | 46 |
| 2.2 Адаптація моделі сприйняття з механізмом відстеження контексту<br>до завдання ситуаційного управління переміщенням АМС..... | 50 |
| 2.3 Модель подання знань .....                                                                                                  | 52 |
| 2.3.1 Багатошарова ієрархічна структура знань .....                                                                             | 52 |
| 2.3.2 Факти, супутники фактів.....                                                                                              | 55 |
| 2.3.3 Правила подання цілей, маршруту.....                                                                                      | 55 |
| 2.3.4 Картографічні знання, правила подання стратегій<br>руху.....                                                              | 57 |

|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4 Управління переміщенням АМС на основі модифікованої моделі Такагі-Сугено-Канга .....                   | 62        |
| 2.5 Дослідження моделі .....                                                                               | 64        |
| 2.5.1 Модель штучного оточення .....                                                                       | 64        |
| 2.5.2 Подання знань .....                                                                                  | 65        |
| 2.5.3 Переміщення вздовж одного маршруту без перешкод. Обмеження та можливості подання маршруту .....      | 72        |
| 2.5.4 Декілька маршрутів у пам'яті. Переключення з одного маршруту на інший .....                          | 73        |
| 2.5.5 Переміщення вздовж одного маршруту з перешкодами .....                                               | 74        |
| 2.5.6 Дослідження впливу контексту на впевненість локалізації АМС .....                                    | 76        |
| 2.6 Висновки до другого розділу .....                                                                      | 77        |
| <b>РОЗДІЛ 3. МЕТОД СИТУАЦІЙНОГО ПЕРЕПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ РУХУ АВТОНОМНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ: .....</b>       | <b>79</b> |
| 3.1 Обґрунтування вибору моделі перепланування маршруту .....                                              | 79        |
| 3.2 Модель подання маршруту. База знань маршрутів .....                                                    | 87        |
| 3.3 Модель планувальника маршрутів: синтез маршруту методом конкатенації типових фрагментів маршруту ..... | 92        |
| 3.3.1 Вимоги до знань про оточення, що необхідні для можливості синтезу маршрутів .....                    | 93        |
| 3.3.2 Синтез маршрутів із типових фрагментів: два фрагменти ..                                             | 94        |
| 3.3.3 Синтез маршрутів із типових фрагментів: довільне число фрагментів .....                              | 99        |
| 3.4 Модель планувальника маршрутів: створення типових фрагментів маршруту методом машинного навчання ..... | 100       |
| 3.5 Модель ситуаційного управління з використанням знань про маршрут .....                                 | 103       |
| 3.6 Комп'ютерні експерименти .....                                                                         | 108       |

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.1 Дослідження алгоритму синтезу маршруту з типових фрагментів .....                                                              | 109        |
| 3.6.2 Моделювання руху АМС за маршрутом з невідомими перешкодами.....                                                                | 110        |
| 3.7 Висновки до третього розділу .....                                                                                               | 111        |
| <b>РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ПРИКЛАДІ МОНІТОРИНГУ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ .....</b> | <b>113</b> |
| 4.1 Організація навігації АМС, що виконують завдання моніторингу розосереджених об'єктів .....                                       | 113        |
| 4.2 Програмна реалізація.....                                                                                                        | 117        |
| 4.2.1 Структура програмного забезпечення.....                                                                                        | 117        |
| 4.2.2 Модуль ситуаційного управління .....                                                                                           | 118        |
| 4.2.3 Модуль перепланування маршруту .....                                                                                           | 120        |
| 4.3 Організація знань та даних.....                                                                                                  | 120        |
| 4.4 Комплексне тестування системи навігації на прикладі колісних роботів, що виконують моніторинг ситуацій у приміщенні .....        | 121        |
| 4.4.1 Апаратне забезпечення полігону АМС .....                                                                                       | 124        |
| 4.4.2 План експериментів. Обговорення результатів.....                                                                               | 125        |
| 4.5 Висновки до четвертого розділу.....                                                                                              | 126        |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>                                                                                                                 | <b>128</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                                                               | <b>130</b> |
| 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 заздалегідь 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 проектування, 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.

## **РОЗДІЛ 1**

### **АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ**

У розділі проведено аналіз функціонального навантаження, сфер застосування та перспектив використання АМС. 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. Зроблено огляд відомих моделей та методів вирішення цих завдань. Розкрито сутність підходу ситуаційного управління, його переваги та досвід застосування в інших предметних галузях. Сформульовано завдання досліджень.

#### **1.1 Сфери застосування та функції АМС**

Термін «автономна система» має декілька значень у різних галузях людського знання. У математиці АС є синонімом терміна «автономне диференціальне рівняння» та позначає «систему звичайних диференціальних рівнянь, яка не залежить явно від незалежної змінної» [38]. У галузі комп'ютерних мереж АС визначається як «зв'язана група з одного або декількох наборів префіксів ІР-адрес у віданні одного або декількох операторів Інтернет-мережі, яка має чітко визначені політики маршрутизації» [39]. Спільним у наведених визначеннях є те, що АС характеризується певною незалежністю.

У сучасному контексті в галузі інформаційних технологій та комп'ютерних наук під терміном «автономна система» частіше за все розуміють систему, що заснована на моделях та методах штучного інтелекту, здатну вирішувати певне завдання або групу завдань зі значним ступенем незалежності від зовнішніх джерел інформації (окрім тієї інформації, що доступна сенсорним системам, якими обладнана система) та управління.

Дотичним до поняття АС є поняття «робот». Цей термін уведений Карелом Чапеком у науково-фантастичній п'єсі «Росумські універсальні роботи» (чеськ. Rossumovi univerzální roboti). У сучасному сенсі поняття «робот» має таке визначення: «машина, керована комп'ютером, яка використовується для автоматичного виконання завдань» [40]. Робот може бути як автономною, так і неавтономною системою.

Автономний робот — інтелектуальна машина, здатна виконувати покладені на неї завдання в оточенні самостійно, без явного зовнішнього управління над власними діями [1].

Мобільний робот — робот, що для виконання поставленого завдання здатен змінювати власне положення в оточенні.

Стаціонарний робот — робот, що зафіксований відносно певної точки та функціонує в обмеженому просторі. Стаціонарні роботи найширше представлені промисловими маніпуляторами, що застосовуються для автоматизації процесів виробництва.

Автономна мобільна система — різновид автономних систем, наділених можливістю зміни власного положення в оточенні.

Поняття «автономний мобільний робот» (АМР) є, певною мірою, синонімічним поняттю АМС, але, слід відзначити, що термін АМС має більш виражене підкреслення інформаційної складової, тоді, як термін АРМ одночасно передбачає апаратну, програмну та інформаційну підтримку.

На рис. 1.1 за допомогою діаграми Ейлера зображено взаємозв'язки між описаними поняттями.

На рис. 1.1 наведені такі приклади:

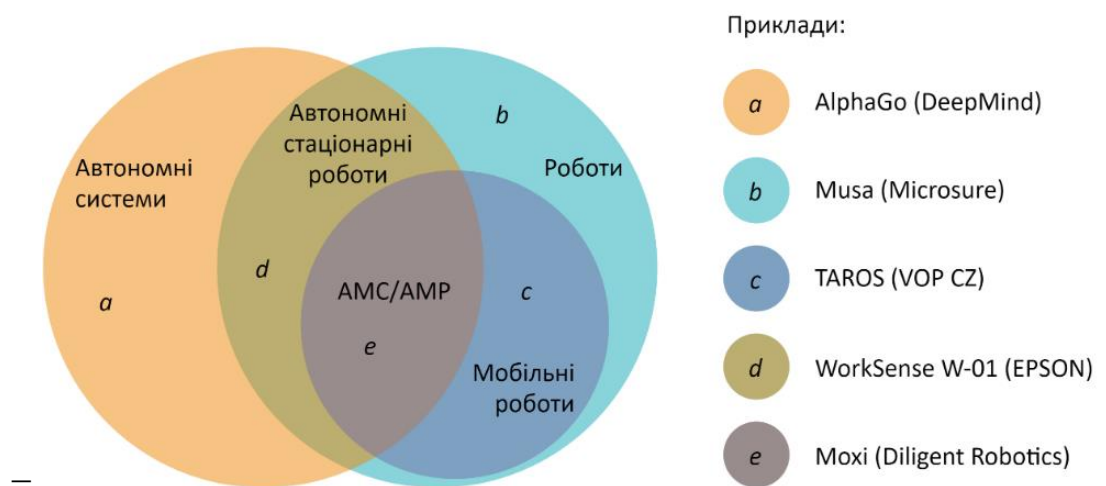
– *a*: AlphaGo (DeepMind) — автономна система, створена засобами машинного навчання для гри в го [41];

– *b*: Musa (Microsure) — стаціонарний телекерований робот, призначений для виконання високоточних мікрохірургічних операцій [42];

– *c*: TAROS (VOP CZ) — мобільний телекерований колісний робот воєнного призначення, створений для виконання розвідувальних та спеціальних операцій, логістичного забезпечення [43];

– *d*: WorkSense W-01 (EPSON) — стаціонарний автономний робот багатоцільового призначення, застосовується для створення масштабованих гнучких автоматичних виробничих ліній [44, 45];

– *e*: Moxi (Diligent Robotics) — автономний мобільний робот, призначений для взаємодії та допомоги медичному персоналу лікарень шляхом виконання рутинних завдань, таких, як доставка витратних матеріалів [46, 47].



– Рисунок 1.1 — Діаграма Ейлера представлення понять «автономні системи», «роботи» та їх взаємозв’язків

Існують автономні системи, що одночасно складаються зі стаціонарної та мобільної компонент. Прикладами таких АС є системи моніторингу, що складаються із множини територіально розподілених інтелектуальних сенсорів та множини АМР [27, 28].

## 1.2 Підходи до вирішення завдання навігації АМС у просторі

Робототехніка є інтегральною галуззю знань, що охоплює механіку, електричну інженерію, комп'ютерну інженерію, комп'ютерні науки, теорію прийняття рішень, штучний інтелект тощо. Перелічені напрями виступають теоретичною основою різних етапів проєктування та створення роботів, так перші чотири напрями забезпечують розробку та інтеграцію апаратних компонентів робототехнічних систем. Зі свого боку теорія прийняття рішень та штучний інтелект є основою для побудови високорівневих алгоритмів управління, зокрема й інтелектуальних та когнітивних.

Завданням мобільної робототехніки на когнітивному рівні є вирішення завдання навігації (управління переміщенням), що полягає у забезпеченні АМС здатністю до орієнтування на місцевості, точної побудови та проходження маршрутів, створення карти оточення та локалізації об'єктів на ній, патрулювання територій тощо.

У праці [13] навігація АМС визначається таким чином: «маючи часткові або цілісні знання про оточення та ціль руху, навігація забезпечує здатність робота діяти на основі власних знань та сенсорних даних таким чином, щоб досягти цілі руху у найбільш ефективний та надійний спосіб».

Навігація АМС може відбуватися за різних початкових знань про оточення та мету руху. Можна виділити такі ситуації: 1) оточення є заздалегідь відомим та не змінюється в процесі руху (відоме статичне оточення); 2) оточення є заздалегідь відомим, але може зазнавати змін — випадково можуть виникати перешкоди на маршруті руху (відоме динамічне оточення); 3) оточення є невідомим та незмінним (невідоме статичне оточення); 4) оточення є невідомим та може змінюватись (невідоме динамічне оточення).

Навігація АМС може мати різні цілі: 1) досягнення цільової точки (переміщення вздовж маршруту, *start-to-goal navigation*); 2) покриття траєкторією руху усієї площі карти (*coverage navigation*); 3) дослідження оточення; 4) патрулювання.

У праці [13] процес навігації АМС у загальному вигляді наведено й описано у вигляді циклу (рис. 1.2).

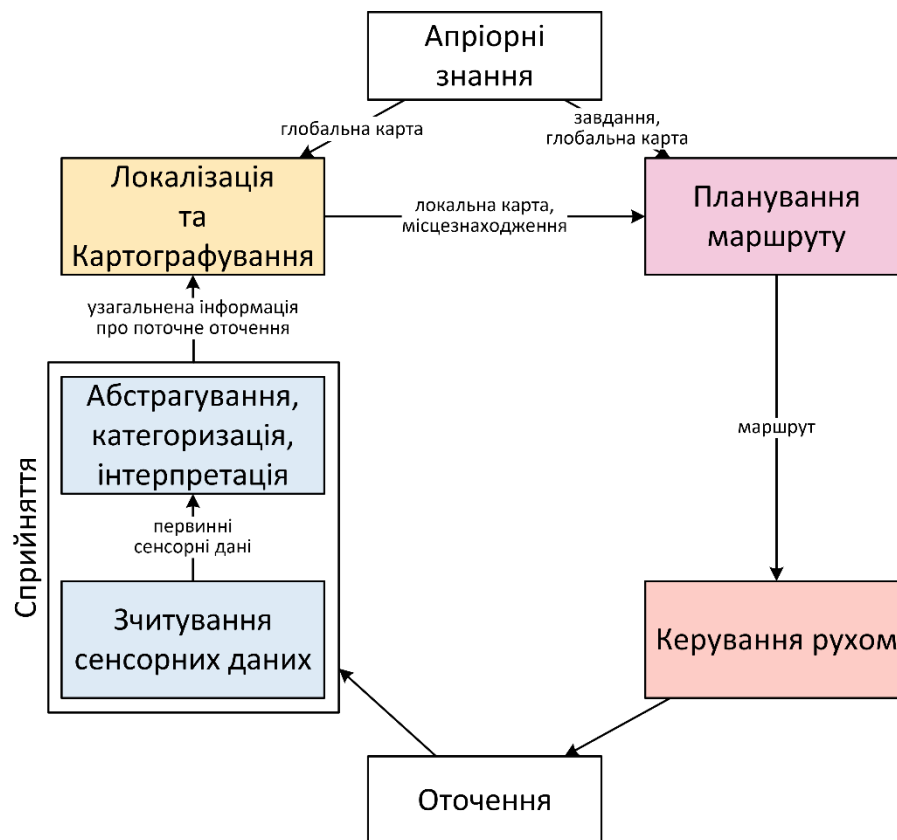


Рисунок 1.2 — Процес навігації АМС (адаптовано з [13])

Як видно з рис. 1.2, процес навігації має такі складові: сприйняття інформації про оточення (perception), локалізація та побудова карти оточення (localization and mapping), планування маршруту руху (path planning іноді motion planning) та керування рухом (motion control).

*Сприйняття інформації про оточення* — завдання, що полягає у зчитуванні, обробці, узагальненні та інтерпретації даних, отриманих від сенсорних систем АМС.

*Локалізація та побудова карти про оточення* — два взаємопов'язаних завдання, що забезпечують прив'язку об'єктів до карти оточення (заздалегідь відомої або самостійно побудованої). Найбільш важливий випадок локалізації — самолокалізація — визначення АМС власного положення в оточенні.

*Планування маршруту руху* — завдання, що полягає у побудові оптимального за певним критерієм маршруту руху АМС від вихідної точки до цільової. Залежно від обсягу початкових знань розрізняють глобальне та локальне планування маршруту руху. Глобальне планування маршруту можливе в ситуаціях із відомим оточенням. Завдання локального планування маршруту руху вирішується у разі невідомого оточення і потребує потоку сенсорних даних про оточення (sensor-based).

*Керування рухом* — завдання, що полягає у забезпеченні проходження маршруту руху без відхилень, забезпечуючи контроль швидкості на напрямку руху АМС.

Як окрему складову можна виділити *високорівневе управління і прийняття рішень*. Завдання цієї складової полягає в інтеграції рішень, що виникають у результаті застосування відомих методів до інших завдань навігаційного циклу. Вирішення завдання, як правило, являє собою багаторівневу систему, що архітектурно відповідає рис. 1.2 [10].

У праці [48] представлена типова функціональна схема системи управління переміщенням АМС. Схема включає завдання навігаційного циклу, розташовані ієрархічно, відповідно до рівня прийняття рішень (рис. 1.3). Так, виділено три рівні управління: стратегічний, тактичний та виконавчий. Стратегічному рівню відповідають завдання сприйняття й локалізації та картографування, тактичному — планування маршруту, виконавчому — керування рухом. Втручання оператора можливе на будь-якому рівні, але система управління вважається тим більш автономною, чим більше завдань вирішується безпосередньо АМС.

Крім того, в праці [48] запропонована класифікація систем управління переміщенням АМС за ступенем автономності. Виділено такі системи управління: ручні, автоматизовані та автоматичні. Ручні системи управління передбачають вирішення завдань навігації операторам у дистанційному режимі; в автоматизованих системах управління відбувається розподіл функцій між оператором та безпосередньо АМС, яка виконує, як правило, низькорівневі операції керування рухом. Автоматичні системи управління забезпечують

вирішення завдань навігації АМС в автономному режимі. Такі системи поділено на програмні, адаптивні та інтелектуальні.

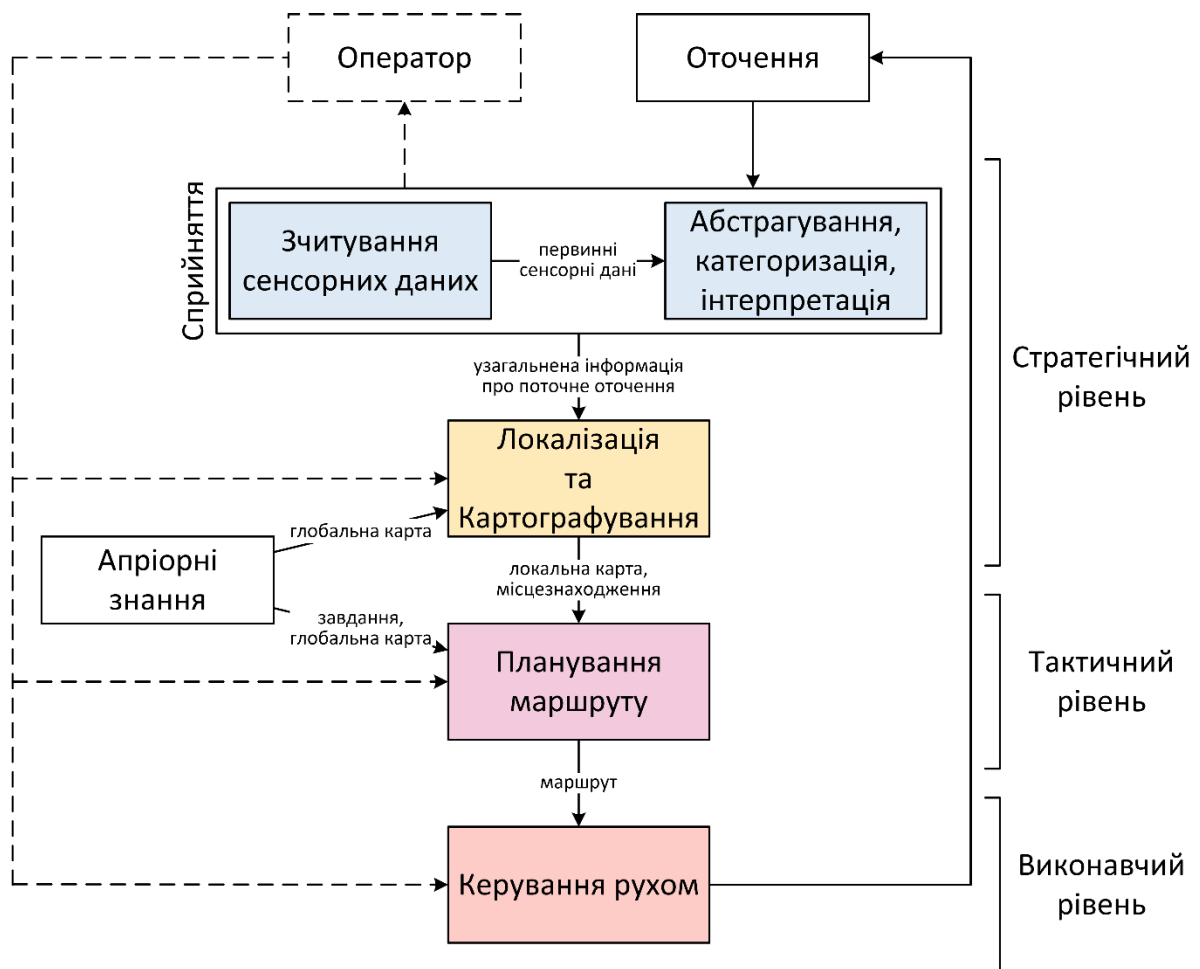


Рисунок 1.3 — Схема системи управління переміщеннями АМС (адаптовано з [48])

Програмні автоматичні системи управління АМС фактично не забезпечують автономного функціонування у складних стохастичних умовах, а придатні для детермінованих або навіть незмінних оточень. Такі системи виконують дії відповідно до жорстко закладеного алгоритму і не реагують на зміни оточення (можуть бути взагалі позбавленими сенсорних систем) [48].

Адаптивні автоматичні системи управління АМС, використовуючи сенсори, забезпечують динамічне коригування власних параметрів залежно від ситуації в оточенні. Таке коригування може бути здійснено шляхом вибору

адекватної поточній ситуації стратегії управління з безлічі інших, що є заздалегідь закладеними до системи управління [48, 49].

Інтелектуальні автоматичні системи управління АМС засновані на підходах штучного інтелекту, використовують моделі, методи та алгоритми машинного навчання, штучних нейронних мереж, експертних систем, нечіткої логіки еволюційних обчислень тощо [48, 50–53].

Дисертаційна робота присвячена дослідженню АМС, що вирішує в автономному режимі завдання сприйняття, локалізації, планування маршруту та керування рухом.

### **1.2.1 Методи вирішення завдання сприйняття інформації про оточення**

Апаратною основою сприйняття інформації АМС про оточення є сенсори — пристрої, що призначені для виявлення подій або змін певних параметрів оточення і передачі даних про це іншим пристроям, як правило, контролерам або комп'ютерам, які здійснюють подальшу обробку інформації. Сенсори класифікують за декількома ознаками [13]:

1) за відношенням вимірюваної інформації до АМС:

– пропріоцептивні — вимірювана інформація характеризує параметри АМС (швидкість АМС, положення рухомих актуаторів тощо);

– екстероцептивні — вимірювана інформація характеризує оточення (колір поверхні, рівень освітленості, рівень звукового тиску тощо);

2) за способом вимірювання інформації:

– активні — сенсор здійснює електромагнітне або інше випромінювання в оточення та вимірює його відбиття (ультразвукові далекоміри випромінюють ультразвук, сенсори відбиття — інфрачервоні промені, лідари — лазерний промінь тощо);

— пасивні — сенсор здійснює вимірювання наявного в оточенні випромінювання (мікрофони, відеокамери, сенсори освітленості, сенсори температури тощо).

Класичні методи сприйняття засновані на фільтрації [54], статистичній [17] та нечіткій [55] обробці потоків сенсорних даних.

Сучасні дослідження завдання сприйняття використовують методи класичного машинного навчання та глибинних нейронних мереж [56]. Як сенсорні дані використовуються потоки зображень із камер форматів RGB або RGB-D (канал D кодує відстань від камери до перешкоди). У межах такого підходу завдання сприйняття формалізується у вигляді завдання інстанс- [57] або семантичної [58] сегментації, відстежування [59] та детектування об'єктів [60] тощо.

Перспективним підходом до вирішення завдання сприйняття є використання методики навчання представлень для автоматичного виявлення ознак (вкладень, *embedding*). Цей метод дозволяє отримати функцію, що перетворює простір первинних сенсорних даних у простір вкладень (*embedding space*), в якому однакові ситуації (подані з різних ракурсів або зашумлені) є високорельованими. Таке перетворення дозволяє розпізнавати ситуації незалежно від наявності перешкод та положень АМС [60, 61].

Тобто, системі сприйняття інформації АМС характерна обробка великої кількості даних від різноманітних сенсорів. Це створює труднощі на шляху їх використання на стратегічному рівні, коли приймається рішення з урахуванням просторово-часових сегментів цих даних. Одним із напрямів подолання згаданих труднощів є попереднє узагальнення даних від сенсорів із подальшим поданням їх за допомогою однорідної моделі у вигляді сенсу слів. Такий підхід запропонований у працях [62, 63], які пропонують технологію інтелектуального механізму обробки правил (ІМОП), що дозволяє зменшити розмірність завдання. На першому етапі роботи ІМОП шляхом застосування механізмів абстрагування та узагальнення формується опис первинних сенсорних даних у вигляді невеликої множини високорівнених слів природної мови. Отримані слова мають

нечіткі характеристики, що використовуються як вхідні змінні нечіткої моделі виведення на другому етапі роботи ІМОП.

Дисертаційне дослідження використовує описаний підхід. Подання та планування маршруту на основі даних від сенсорів у розділах 2 і 3 виконується на базі фактів, що являють собою сенс сегментів даних від сенсорів.

### **1.2.2 Методи вирішення завдання локалізації та картографування**

Роль локалізації та побудови карти в навігаційному циклі може бути різною залежно від обсягу початкових знань та характеру доступної сенсорної інформації.

Найбільш загальним і складним є випадок, коли карта оточення є повністю невідомою, перед АМС постає завдання одночасної побудови карти оточення та самолокалізації на ній — SLAM [64]. У таких умовах побудова карти може бути самоціллю, тобто вирішується завдання дослідження без визначеної цілі руху. Для вирішення завдання SLAM застосовують різні сенсорні системи, зокрема бортові інерціальні системи (БІНС) — сенсорні комплекси на основі акселерометрів та гіроскопів, які часто доповнюються цифровими компасами та одометричними сенсорами. БІНС дозволяють визначати поточне положення на основі вихідного за умови високої точності сенсорів. У реальних умовах похибки вимірювання БІНС стрімко накопичуються, що призводить до розбіжності між справжнім положенням АМС і тим, що визначається АМС як справжнє. Завдання SLAM пов'язано з боротьбою з накопиченням у процесі руху помилок, обумовлених обмеженою точністю сенсорних систем. Для його вирішення застосовуються різні техніки, більшість з яких заснована на боротьбі із шумом: фільтрація Калмана (KF), розширена фільтрація Калмана (EKF SLAM) та багаточастинкова фільтрація (FastSLAM) [65–67].

Сучасним підходом до вирішення завдання SLAM із застосуванням методів комп'ютерного зору є Visual SLAM (VSLAM, візуальний SLAM).

Відомим представником алгоритмів Visual SLAM є ORB-SLAM (Oriented FAST and Rotated BRIEF, орієнтовані швидкі ознаки).

На противагу загальному випадку постанови завдання локалізації та картографування можливі випадки більш спрощеного формулювання, коли АМС має певну апріорну інформацію про оточення або доступ до глобальної системи координат (ГСК), наприклад, до GPS (Global Positioning System, глобальна система позиціонування) системи супутникової навігації. Слід зазначити, що застосування ГСК накладає значні обмеження на автономність функціонування АМС.

В ситуації невідомого оточення та доступу до ГСК постає завдання побудови карти. У такому разі завдання є спрощеним та пов'язаним із простими алгоритмами боротьби із шумом у сенсорних даних. Для вирішення завдання застосовують сенсорні системи, що базуються на лазерах, лідарах (Light Identification, Detection and Ranging, LiDAR) та сонарах [68].

У разі повністю відомого оточення та відсутності доступу до ГСК ключову роль відіграє вирішення завдання самолокалізації — визначення АМС власного положення на відомій карті за обробкою даних від сенсорів.

Потреба у побудові карти може бути відсутня, а локалізація значно спрощена, коли оточення є заздалегідь відомим і доступне звернення за допомогою сенсорних систем до ГСК.

Може виникати необхідність оновлення карти у відомому оточенні або доповнення у частково відомому оточенні. Тут також можуть застосовуватись підходи вирішення завдання SLAM.

Поширеним є підхід до вирішення завдання локалізації, заснований на використанні ключових точок робочого простору (КТРП, landmark). КТРП відіграють роль орієнтирів, які містять певну інформацію, що стає доступною АМС за допомогою сприйняття. Така інформація може бути координатами відповідної точки простору або власне інформацією про те, що КТРП знаходиться в певному місці. КТРП можуть бути штучними або природними. Штучні КТРП — це об'єкти, що розміщені у робочому просторі спеціально для

забезпечення функціонування АМС і можуть кодувати корисну інформацію своєю формою, кольором, розміром тощо. Приклади штучних КТРП: шаблонні маркери, штрих-коди, коди швидкого відгуку (QR-коди), маркери-зображення, світлові та шумові сигнали, радіочастотні ідентифікатори тощо [69–71]. Природні КТРП — довільні точки простору, основне функціонування яких не пов'язане із забезпеченням функціонування АМС. Приклади природних КТРП: перехрестя та повороти доріг або коридорів, глухі кути, двері, дорожня розмітка, природні орієнтири тощо [72]. Очевидною вимогою до природних КТРП має бути їх постійність і незмінність [73].

Розпізнавання КТРП може здійснюватися за допомогою різних сенсорних систем. У разі використання штучних КТРП можуть бути передбачені спеціалізовані сенсори (зчитувачі штрих- або QR-кодів, зчитувачі міток радіочастотної ідентифікації тощо). Часто [74] для розпізнавання природних КТРП застосовують аналіз потоків зображень із використанням методик знаходження особливих точок зображень КТРП та розрахунку їх дескрипторів (вектор чисел) за допомогою алгоритмів SURF (Speeded Up Robust Features, пришвидшені стійкі ознаки) [75, 76], SIFT (Scale-Invariant Feature Transform, масштабонезалежне перетворення ознак) [77], ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF, орієнтовані швидкі ознаки) [78]. У процесі руху АМС здійснюється пошук відповідності між дескрипторами відомих КТРП та дескрипторами особливих точок, що виявлені на поточному знімку з камери, шляхом мінімізації відстані між ними у  $L_1$ -,  $L_2$ -метриці або у метриці Хемінга. З аналогічною метою можна використовувати техніки глибинного навчання [79].

У дисертаційному дослідженні розглядається підхід до вирішення завдання локалізації, заснований на використанні КТРП. Цей підхід набуває перевагу, якщо в ролі дескрипторів КТРП використовувати факти, що у вербальному вигляді являють собою сенс даних від сенсорів. Тобто, постає завдання інтеграції моделі сприйняття, що виконує узагальнення даних, з моделлю локалізації АМС, у якій дескриптори КТРП можуть бути подані фактами.

### 1.2.3 Методи вирішення завдання планування маршруту руху

Для вирішення завдання планування маршруту руху визначається множина точок робочого простору  $\mathcal{W}$ , в якому існують АМС і перешкоди. Точки  $q \in \mathcal{W}$ , зайняті перешкодами, формують множину  $\mathcal{O}$ . Очевидно, що беручи до уваги форму, фізичні розміри та кінематичні характеристики АМС, множина точок, в яких може перебувати АМС, є меншою, ніж  $\mathcal{W} \setminus \mathcal{O}$ . З метою визначення усіх точок простору, в яких може знаходитись АМС, не стикаючись із перешкодами, вводиться поняття конфігураційного простору  $\mathcal{C}$ . Множина усіх точок  $q \in \mathcal{C}$ , в яких АМС може знаходитись, не перетинаючись із перешкодами, є вільним простором  $\mathcal{C}_{free}$ , решта конфігураційного простору  $\mathcal{C}_{obst} = \mathcal{C} \setminus \mathcal{C}_{free}$  є простором, зайнятим перешкодами.

Якщо метою навігації є досягнення цільової точки  $q_{goal}$  від вихідної точки  $q_{init}$ , то математично завдання полягає у знаходженні послідовності проміжних точок  $q \in \mathcal{C}_{free}$ , що з'єднують  $q_{init}$  з  $q_{goal}$  таким чином, щоб для будь-якої пари сусідніх точок з послідовності виконувалась умова  $(q_i, q_{i+1}) \in \mathcal{C}_{free}$ .

Класичні методи планування маршруту руху АМС, що вирішують завдання глобального планування, поділяють на чотири групи [2]:

- методи побудови дорожніх карт (скелетонізація);
- методи клітинної декомпозиції;
- методи штучних потенційних полів;
- вибірккові методи.

Серед класичних методів, що не належать до жодної з наведених груп, можна віднести сімейство Bug алгоритмів.

Методи з перших двох груп зводять завдання планування маршруту руху до дискретного завдання пошуку на графі. [64]. Для вирішення завдання пошуку на графі застосовують алгоритм Дейкстри та його евристичні покращання:  $A^*$  (A star),  $D^*$ , (D star), Focused  $D^*$ ,  $D^*$  Lite тощо.

*Методи дорожніх карт* зводяться до формування графа маршрутів руху (дорожньої карти)  $G = (V, E)$  на основі карти оточення і вирішення завдання пошуку маршруту на отриманому графі [80]. До цієї групи методів відносять графи видимості [81] та діаграми Вороного [82].

Дорожні карти на основі графів видимості. Метод формує дорожню карту таким чином: вершинами графа є точка старту  $q_{init}$ , цільова точка руху  $q_{goal}$  та кути перешкод  $q_{obst}$ . Вершини  $q_i \in V$  та  $q_j \in V$  з'єднуються ребром, якщо  $(q_i, q_j) \in \mathcal{C}_{free}$ . Цей метод забезпечує побудову оптимального за довжиною маршруту руху між точкою старту та цільовою точкою, але має суттєві недоліки: по-перше, розмір графа росте надто швидко у разі збільшення числа перешкод, що обумовлює низьку швидкодію у складних оточеннях; по-друге, отриманий маршрут проходить надто близько до перешкод (у граничному випадку сегментами маршруту виступатимуть бічні грані перешкод) [7, 13].

Дорожні карти на основі діаграм Вороного. На відміну від графів видимості, метод на основі діаграм Вороного формує дорожню карту  $G$  таким чином, щоб максимізувати відстань до перешкод: кожна точка  $q$  отриманої дорожньої карти є рівновіддаленою від найближчих до неї перешкод. Метод спричиняє невиправдане збільшення довжини маршруту для відкритих просторів та може бути складним в обчисленні для оточень зі складною формою перешкод [64].

*Методи клітинної декомпозиції* розбивають карту оточення на множину зон (клітин), що не перетинаються, для кожної з яких обирається характеристична точка. На основі характеристичних точок формується граф, що описує оточення [80]. Розрізняють точну та наближену клітинну декомпозицію [18].

До точної декомпозиції належить такі методи: трапецеїдальна декомпозиція (інколи має назву вертикальної декомпозиції) [83], декомпозиція бустрофедоном [4] та декомпозиція Морса [5].

Трапецеїдальна декомпозиція. Тут декомпозиція на зони виконується шляхом проведення паралельних прямих через вершини перешкод. Ці прямі виступають бічними межами зон, іншими межами виступають або межі карти, або сторони перешкод. Отримані зони є трапеціями (або трикутниками у виродженому випадку), характеристичними точками зон обираються середини середніх ліній трапецій (трикутників). Трапецеїдальна декомпозиція вимагає полігональності перешкод, що є її недоліком.

Декомпозиція бустрофедоном. Метод є подальшим розвитком трапецеїдальної декомпозиції. Тут як межі зон обираються лише ті вертикальні лінії, які можуть бути продовжені по обидва боки від вершини перешкоди, через яку вона проведена, таким чином зменшується підсумкова кількість отриманих зон. Характеристичними точками можуть обиратися центроїди відповідних зон.

Декомпозиція Морса. Є узагальненням декомпозиції бустрофедоном на випадок неполігональних перешкод. Межі зон формуються на основі критичних точок, отриманих за допомогою функції Морса.

До наближеної клітинної декомпозиції відносять методи сітчастої декомпозиції [84, 85], декомпозиції деревом квадрантів [86] і ймовірнісної декомпозиції [87].

Сітчаста декомпозиція. Метод передбачає накладання на карту оточення рівномірної квадратної (трикутної, шестикутної) сітки. Кожній клітинці сітки ставиться у відповідність значення, що позначає наявність або відсутність перешкоди у цій клітинці. Точність сітчастої декомпозиції залежить від дискретності сітки. Недоліком методу є надто швидкий ріст обсягу пам'яті, що необхідна для зберігання сіток із високим рівнем деталізації карти.

Декомпозиція деревом квадрантів. Ітеративний метод, що є розвитком сітчастої декомпозиції: карта оточення поділяється на чотири рівних прямокутних сегменти, потім кожен сегмент, що містить перешкоду (або її частину), знову поділяється на чотири рівні підсегменти і так далі доти, доки усі сегменти не досягнуть мінімального (наперед заданого) розміру або не

міститимуть перешкод. Метод може бути застосований тільки у відомому статичному оточенні.

*Методи штучних потенційних полів* будують на основі карти оточення функцію, що описує простір за допомогою силового поля: цільова точка руху має низький потенціал, а перешкоди — високий потенціал. АМС моделюється як частка, що має масу (якщо вважати штучне поле гравітаційним) або позитивний заряд (якщо вважати штучне поле електростатичним) і таким чином здійснює переміщення від точки з високим до точки з низьким потенціалом [80]. Оригінальний метод [6] має суттєвий недолік, що полягає у наявності у штучному потенційному полі зон локальних оптимумів, які заважають АМС дістатися цільової точки руху. Існують подальші розвідки методу штучних потенційних полів, що усувають зазначений недолік, наприклад, на основі рівняння Лапласа [88]. Більш сучасні варіанти методу забезпечують рух АМС в умовах перешкод, що рухаються: на основі еволюційних алгоритмів [89] і на основі нечітких штучних потенційних полів [90].

*Вибіркові методи* є найбільш сучасними із класичних алгоритмів, вони використовують метод Монте-Карло для вирішення завдання побудови маршруту. До цієї групи методів відносять ймовірнісні дорожні карти (PRM) [91], швидкодосліджуючі випадкові дерева (RRT) [8].

*Ймовірнісні дорожні карти.* Метод будує дорожню карту  $G = (V, E)$  шляхом випадкової генерації координат  $n$  точок  $q_{rand} \in \mathcal{C}$ . Кожна точка, що належить вільному простору  $q_{rand} \in \mathcal{C}_{free}$ , додається до графа  $G$ . Точки  $q \in V$  з'єднуються ребрами із своїми сусідами  $q_{near}$  у межах заданого радіуса  $r$  (якщо таке поєднання не перетинає перешкод  $(q, q_{near}) \notin \mathcal{C}_{obst}$ ). Недоліком методу є те, що для забезпечення достатньої точності дорожньої карти кількість точок  $q_{rand}$  має бути великою. Особливо цей недолік виявляється в оточеннях, що мають вузькі проходи, оскільки ймовірність потрапляння випадкової точки в таке місце низька [87].

Швидкодосліджуючі випадкові дерева. Метод ітеративно будує дорожню карту  $G = (V, E)$ . На нульовій ітерації дерево містить одну вершину (випадкову точку вільного простору  $q_{rand} \in C_{free}$  або точку старту  $q_{init} \in C_{free}$ ). На наступних ітераціях із вільного простору обираються випадкові точки  $q_{rand} \in C_{free}$ . На прямій, що поєднує точку  $q_{rand}$  із найближчою до неї вершиною дерева  $q_{near} \in V$ , на заданій відстані  $r$  відкладається нова точка  $q_{new}$ . Якщо  $(q_{near}, q_{new}) \in C_{free}$ , то вершина  $q_{new}$  і ребро  $(q_{near}, q_{new})$  додаються до дерева  $G$  [2]. Існує значна кількість покращань швидкодосліджуючих випадкових дерев: RRG — забезпечує знаходження оптимального маршруту [92]; RRT\* — деревоподібна версія алгоритму RRG [92]; RT-RRT\* — варіант RRT, пристосований до динамічного оточення за рахунок перебудови дерева з точки, в якій знаходиться АМС в реальному часі [93].

Сьогодні подальшого розвитку набувають реактивні методи планування, насамперед за рахунок використання різноманітних підходів штучного інтелекту. Відомими є алгоритми, що вирішують завдання планування маршруту, засновані на моделях обчислювального інтелекту [94, 95]. У межах цього класу виділяють методи, засновані на нечіткій логіці, нейронних мережах, стайних алгоритмах.

Також мають розвиток методи, що використовують гібридні підходи, шляхом комбінування класичних підходів глобального планування із реактивними підходами локального планування, за сенсорними даними. Такий підхід дає добрі результати для умов відомого, але динамічного оточення. Прикладами систем, що реалізують гібридні алгоритми, є: [96] — глобальне планування здійснюється на графі, що формується на основі заздалегідь заданих характеристичних точках оточення, локальне — на основі нечіткого контролера; [97] — вибірккові методи, поєднані зі штучними потенційними полями за допомогою нечіткого контролера; [98] — поєднуються алгоритм імітації відпалу і нечіткий контролер типу Такагі-Сугено.

Багато існуючих алгоритмів підтримують можливість перепланування, але для цього вимагають оновлення глобальної інформації про оточення в кожен момент часу. Більш адекватною до реальних завдань є ситуація, коли роботу доступна глобальна інформація про оточення на початку виконання завдання, а в ході виконання ця інформація доповнюється лише локально за рахунок сенсорних даних.

Автономність функціонування АМС у реальному часі накладає основні обмеження на вибір моделі планування. Планування дій має відбуватися в нерозривному зв'язку з реалізацією плану шляхом прийняття управлінських рішень, що забезпечують виконання етапів плану. Це є передумовою того, щоб технологію автоматичного планування інтегрувати із системою управління. Класичні методи планування, розглянуті в цьому розділі, в основному зосереджені на створенні алгоритмів для детермінованого, повністю спостережуваного оточення. [64, 99–102]. Більшість з них зосереджена на техніці пошуку оптимального (або субоптимального) плану з припущенням, що планувальник має повні знання про поточний стан оточення і причинно-наслідкові зв'язки, які керують змінами в цьому оточенні. [64, 99]. Імплементация цих технологій для АМС ускладнена, бо ці методи не дозволяють домогтися досить високої швидкодії і не передбачають для недетермінованого оточення перепланування від досягнутого. Якщо проблема швидкодії генерації плану долається за допомогою низки технік (ієрархія планів, реактивне планування, планування, засноване на правилах [64, 101–103]), то питання перепланування від досягнутого залишаються відкритими. Істотні результати з планування в реальному часі для недетермінованого оточення отримані для мобільних роботів і АМС. Як альтернатива переплануванню розглядаються механізми, в яких пропонується відмовитися від складного планування на користь поверхневого планування з використанням технологій навчання на основі пояснень (explanation-based learning) [104, 105] і машинного навчання. [106]. Планування на основі прецедентів (case-based planning) [64, 107–109] відкриває можливості для швидкого перепланування від досягнутого за рахунок і використання

готових фрагментів плану (прецедентів). Уникнути перепланування «від нуля» у використанні технології планування на основі прецедентів можна за умови, що фрагменти виконаного плану будуть використані для пошуку фрагмента плану, що залишився для виконання. Цей важливий висновок для вибору моделі планування посилює необхідність узгодження технології автоматичного планування з моделями локалізації та управління АМС.

#### **1.2.4 Методи вирішення завдання керування рухом**

Для вирішення завдання керування рухом важливим параметром є кінематична модель АМС [13]. Класифікація АМС за типами кінематичної моделі [10]:

- голономні — незалежно від власної орієнтації в просторі мають однакові можливості для руху в будь-якому напрямку;
- неголономні моноциклічні — мають обмеження на можливості руху залежно від кутової орієнтації в просторі та швидкості її зміни;
- неголономні біциклічні — мають обмеження на мінімальну кривизну траєкторії руху.

Накладання обмеження неголономності вимагає для забезпечення проходження АМС траєкторії, отриманої на етапі планування маршруту, врахування орієнтації АМС у просторі та її положення відносно оточення. Загальним підходом до вирішення завдання керування рухом є поділ траєкторії руху на сегменти (як правило, прямі лінії та сегменти окружності). За таких обмежень використовують суто програмні методи керування, які не орієнтовані на застосування у недетермінованих умовах.

Для вирішення завдання керування рухом по відомому маршруту в умовах часткової недетермінованості застосовуються системи керування з лінійними регуляторами (пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) контролери [110]), нечіткі контролери [111, 112], нейромережеві контролери [113, 114].

У дисертації запропоновано використання нечіткої логічної системи до вирішення завдання ситуаційного керування проходженням траєкторії руху.

### **1.3 Огляд ситуаційного підходу до завдання управління**

Метод ситуаційного управління, як підхід до вирішення завдання управління складними системами, запропоновано професором Д. А. Поспеловим. У праці [115] викладено методологію та теоретичні основи цього підходу, а саме: застосування моделей подання знань (класичних, мережових, фреймових, на базі псевдофізичних (часової, просторової) логік тощо) до об'єкта управління та процесу управління об'єктом, за допомогою механізмів узагальнення та навчання, з подальшим використанням дедуктивного виведення для отримання багатокрокових рішень.

Значного подальшого розвитку підхід ситуаційного управління набув у працях професора А. О. Каргіна. У статтях [62, 63, 116–121] ситуаційне управління реалізується на основі продукційних та семантичних моделей подання знань, що забезпечують багаторівневий (з різним рівнем абстрагування) опис ситуацій. Розроблений підхід гранулярних обчислень. Уведені механізми абстрагування, переключення уваги та відстеження контексту. Механізм абстрагування полягає у застосуванні нечіткого зіставлення поточних знань про ситуацію із прототипами, на основі чого визначається фактор упевненості у наявності певної ситуації. Механізм переключення уваги дозволяє визначати актуальну мету управління, а механізм відстеження контексту реалізує визначення та зміну поточних підцілей, необхідних для досягнення мети. Обробка моделей подання знань виконується із застосуванням методів нечіткої логіки. Як об'єкт застосування розглядаються завдання управління розумними машинами та інтелектуальними сенсорами інтернету речей.

Ця модель покладена в основу системи ситуаційного управління переміщенням АМС.

## 1.4 Висновки до першого розділу

Наведений аналіз показав, що в дослідженнях недостатньо уваги приділено розробці підходів, які забезпечують однорідну інтеграцію рішень різних завдань навігації. Виняток становлять завдання локалізації та картографування, що вирішуються одночасно. Завдання локалізації, планування маршруту та керування рухом у працях розглядаються окремо, без урахування взаємного впливу похибок, що виникають на кожному етапі.

Існуючі дослідження приділяють замало уваги вирішенню проблеми неповноти та нечіткості інформації про оточення. Рішення, що виникають на основі неправильно сприйнятої інформації про оточення, мають певні наслідки, боротьба з якими має бути заснована на динамічному ситуаційному переплануванні. Тому виникають такі завдання:

- Розробити модель, що забезпечить подання апріорних знань АМС про оточення. Знання про оточення доцільно описувати, спираючись на ключові точки робочого простору. Формальною основою розроблюваної моделі має стати інтелектуальний механізм обробки правил, що забезпечить узагальнене подання та обробку знань. Модель має забезпечувати функціонування АМС в оточенні, що є детермінованим та незмінним.
- Розробити метод, що за допомогою планування на основі прецедентів дозволить розширити можливості моделі. Метод має використовувати апріорні знання АМС про оточення та поточні сенсорні дані для виконання побудови нових маршрутів руху та ситуаційного перепланування існуючих в умовах змінного недетермінованого оточення. Метод необхідно інтегрувати із розробленою моделлю.
- Запропонувати розвиток інформаційної технології навігації АМС за допомогою розроблених моделі та методу.

Результати розділу викладені в працях [24, 29, 30, 34].

## РОЗДІЛ 2

### **МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯМ АВТОНОМНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ УЗДОВЖ ЗАДАНОГО МАРШРУТУ**

У розділі показано застосування підходу ситуаційного управління до завдання навігації АМС з урахуванням контексту. Розроблено модель управління переміщенням АМС. Проведено комп'ютерні експерименти з розробленою моделлю.

#### **2.1 Постановка завдання управління переміщенням АМС уздовж маршруту з перешкодами**

Завданням АМС є досягнення поставленої перед нею цілі, шляхом реалізації керівних впливів на основі інтерпретації даних про своє оточення, отриманих від сенсорів. У загальному випадку оточення є таким, що динамічно змінюється, містить стохастичні збурення. Окрім того, дані, отримані від сенсорів, можуть бути неповними і помилковими. За таких умов доцільне застосування моделей обробки (сприйняття) сенсорної інформації АМС, які дозволяють інтерпретувати первинні дані й отримувати узагальнений опис ситуації в оточенні.

У межах когнітивної робототехніки виділяють декілька підходів до управління АМС: програмне управління, програмне управління зі зворотними зв'язками, ситуаційне управління, нечітке ситуаційне управління. Перелічені підходи наведені у порядку зростання адаптивності моделей, що пропонуються ними. Так, нечітке ситуаційне управління є найбільш універсальним інструментом і може бути застосованим для вирішення завдання навігації АМС у складних динамічних оточеннях.

У контексті нечіткого ситуаційного управління моделі сприйняття засновані на правилах та наводять вирішення завдання управління переміщенням АМС уздовж маршруту у вигляді циклічного виконання

послідовності з трьох етапів: сприйняття інформації від сенсорів, планування маршруту руху та актуацію виконавчих органів для реалізації переміщення. Перший етап спирається на первинні дані від сенсорів, два наступні — на знання, отримані в результаті обробки інформації з попереднього етапу. Знання про маршрут руху в таких моделях подаються у вигляді послідовностей з ключових точок робочого простору, кожна з яких характеризується набором сенсорних ознак  $\langle f_1, f_2, \dots, f_n \rangle$ . У правилах дескриптор  $i$ -ї КТРП наводиться у вигляді факту  $\mathbf{f}_{L_i}$ , який є вектором сенсорних ознак  $\mathbf{f}_{L_i} = \langle f_1, f_2, \dots, f_n \rangle$  [62].

Хоча нечіткі системи сприйняття, що засновані на правилах, мають низку суттєвих переваг (однорідність подання знань, масштабованість), під час вирішення реальних завдань у складних динамічних оточеннях вони стикаються з двома суттєвими проблемами:

1) Експоненціальний ріст розміру бази знань системи за лінійного росту розміру завдання;

2) низька стійкість до збурень в оточенні: апарат нечіткої логіки дозволяє обійти проблему неповноти та зашумленості сенсорних ознак ключових точок, але, наприклад, зникнення наступної за планом КТРП або наявність перед нею перешкоди, яку неможливо локально усунути, призводить до зупинки процесу просування по маршруту.

У працях [62, 118] запропонована модифікована модель сприйняття, заснована на правилах (МСП), доповнена механізмом відстеження контексту.

Контекст у цю модель вводиться за допомогою спеціальних контекстних супутників факту  $\mathbf{f}_{L_i}$  (фактів-супутників) —  $^{sat}\mathbf{f}_{L_i}$ , які є парними до основних фактів та виконують роль комірок пам'яті, що фіксують знання щодо процесу просування по маршруту. Набір активних фактів-супутників формує контекстне поле, що має адекватно описувати поточний стан та положення АМС в оточенні.

Факти  $\mathbf{f}_{L_i}$ , у моделі [62, 118], описуються нечіткою характеристикою (НХ), на основі якої визначається фактор упевненості (cf). Фактори упевненості фактів  $cf\_f_{L_i}$ , що описують КТРП, залежать від сенсорних ознак цих КТРП. Фактори

упевненості фактів-супутників  $cf\_f_{L_i}^{sat}$  залежать від факторів упевненості інших фактів-супутників відповідно до логіки вирішення поставленого завдання. Таким чином класична МСП, що містить механізм виведення у реальному часі на основі знань про поточну присутність або відсутність АМС у КТРП, доповнюється механізмом відстеження контексту що спирається на факти-супутники, використовуючи подієву модель часу.

У праці [120] запропоновано визначати фактор упевненості  $cf\_f_{L_i}$  за допомогою нечіткої характеристики, яка є нечітким L-R числом:

$$cf\_f_{L_i} = \{cf \mid m(cf), \forall cf \in [-1;1]\};$$

$$m(cf) = e^{-\frac{(cf-a)^2}{2b^2}}, \quad (2.1)$$

де  $a(f_{L_i}, f') \in [-1;1]$  — значення, що виражає ступінь збігу прототипу факту  $f_{L_i}$  з вектором поточних сенсорних ознак  $f'$ ;

$b$  – фактор старіння вимірюваних сенсорних значень.

Загалом визначення фактора упевненості може здійснюватися іншим чином і не враховувати старіння інформації.

Крім того, модель [62, 118] містить явне посилання на подію появи КТРП — у полях **IF** правил міститься конструкція  $event(f_{L_i})$ . Це забезпечує зіставлення правила лише тоді, коли на момент виведення є актуальним факт  $event(f_{L_i})$  та збігаються інші факти прототипу поля **IF** з відповідним сегментом бази знань (БЗ). Така особливість забезпечує динамічне розрізнення правил (замість попарного розрізнення), що забезпечує зменшення бази знань моделі.

Механізм відстеження контексту в моделі [62, 118] проілюстровано на рис. 2.1 (КТРП на рисунку впорядковані відповідно до маршруту).

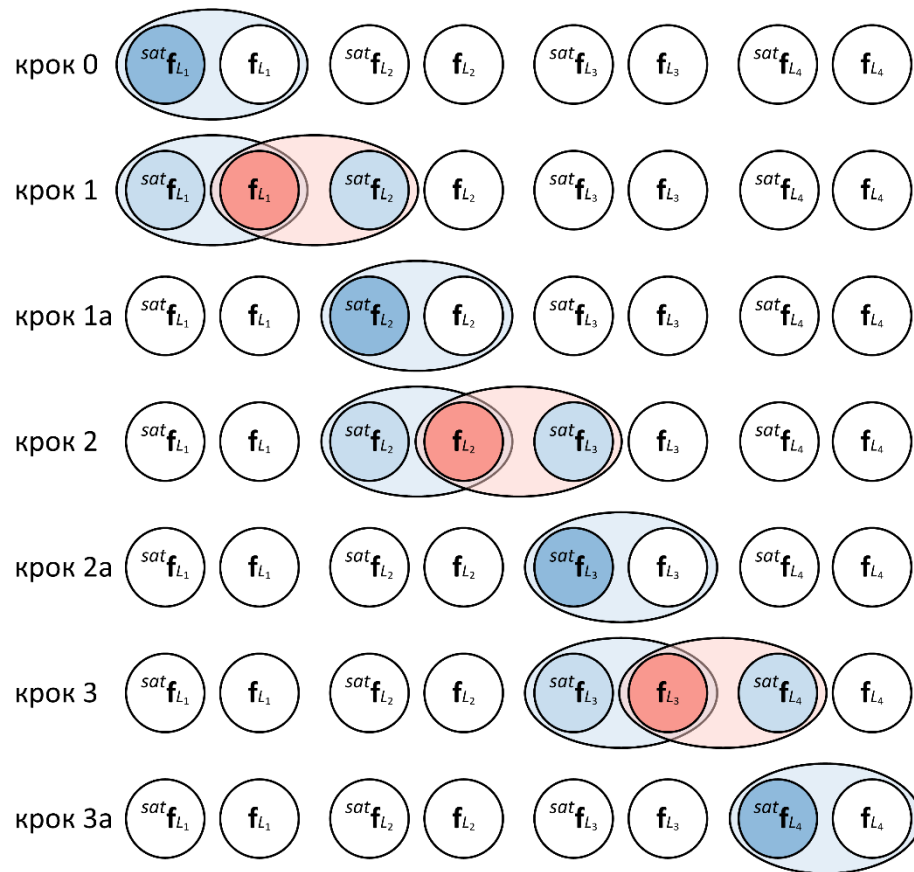


Рисунок 2.1 — Зміна контекстного поля під час фізичного переміщення АМС за маршрутом (адаптовано з [118])

На рис. 2.1 факти та їх супутники зображено кружечками. Червоні кружечки позначають актуалізовані факти (факти із високим значенням  $sf$ , отриманим у результаті сприйняття), сині кружечки — актуалізовані факти-супутники, прозорі кружечки — деактуалізовані факти та факти-супутники. Овалами позначається контекстне поле. Блакитні овали поєднують факти із відповідними їм фактами супутниками (наприклад, на кроках 0, 1а, 2а, 3а). Фізично це означає, що локальною ціллю переміщення АМС є КТРП, якій відповідає актуалізований факт-супутник, і ціль буде досягнута у разі виявлення сенсорних ознак цієї КТРП (тобто буде зареєстрована подія появи високого значення фактора упевненості факту, що відповідає цій КТРП). У межах цього контекстного поля знижується поріг чутливості реєстрації сенсорних ознак очікуваної КТРП. У момент досягнення локальної цілі відбувається процес зміщення контекстного поля відповідно до заданого маршруту руху. На рисунку

цей процес позначено овалом рожевого кольору: у разі досягнення поточної локальної цілі відбувається деактуалізація поточно актуалізованого факту-супутника й актуалізація факту-супутника, що відповідає наступній за маршрутом КТРП (наприклад, на кроках 1, 2, 3) [118].

На кроці 0 АМС знаходиться у певному стартовому положенні та очікує появи сенсорних ознак КТРП  $L_1$ , про що свідчить актуалізованість факту-супутника  $^{sat}\mathbf{f}_{L_1}$  ( $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{L_1} \approx 1$ ).

На кроці 1 відбувається подія появи сенсорних ознак КТРП  $L_1$ , про що свідчить актуалізованість факту  $\mathbf{f}_{L_1}$  ( $cf\_ \mathbf{f}_{L_1} \approx 1$ ). Після цього відбувається деактуалізація факту-супутника  $^{sat}\mathbf{f}_{L_1}$  ( $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{L_1} \approx 0$ ) й актуалізація факту-супутника наступної за маршрутом КТРП  $L_2$ .  $^{sat}\mathbf{f}_{L_2}$  ( $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{L_2} \approx 1$ ).

Кроки 1а, 2а, 3а демонструють ситуації, аналогічні тій, що спостерігалася на кроці 0, а кроки 1 та 2 – ситуації, аналогічні тій, що спостерігалася на кроці 1.

Отже, сутність моделі з механізмом відстеження контексту [62, 118] полягає тому, що обмежена підмножина фактів, які локалізовані в контекстному полі, за певних подій (актуалізація певними сенсорними даними факту) переміщається уздовж заданої послідовності контекстних фактів-супутників. Контекстне поле підтримується в часі фактом-супутником, навколо якого воно зосереджено. Переміщення контекстного поля ініціюється подією — появою ознак КТРП, що описуються сенсорними даними.

## **2.2 Адаптація моделі сприйняття з механізмом відстеження контексту до завдання ситуаційного управління переміщенням АМС**

Адаптація моделі МСП у навігації (МСПН) базується на припущенні, що в просторі, в якому функціонує АМС, довільним чином розподілено множину ключових точок робочого простору  $\mathcal{L} = \{L_1, \dots, L_m\}$ . КТРП можуть являти собою штучно додані до робочого простору мітки (наприклад, радіомаяки або візуальні маркери із закодованою інформацією) або природні особливості робочого

простру.  $L_i$  характеризується набором унікальних ознак  $\langle f_1, f_2, \dots, f_n \rangle$ . На множині КТРП  $\mathcal{L}$  може бути задана множина маршрутів  $\mathcal{R} = \{R_j\}$ . Наприклад,  $j$ -й маршрут переміщення АМС задається у вигляді впорядкованої послідовності КТРП  $R_j = \langle L_{j,1}, \dots, L_{j,p} \rangle$ , де  $p$  — довжина маршруту. Під час переміщення АМС по маршруту можуть виникати перешкоди таким чином, що рух між  $L_{j,i}$ ,  $L_{j,i+1}$  неможливий. Перешкоди можна розділити на два види: перешкода, що усувається шляхом «локального об'їзду» та  $L_{j,i+1}$  у кінцевому підсумку досягається; перешкода, що усувається шляхом зміни фрагмента маршруту таким чином, щоб досягнути наступної доступної КТРП по маршруту за  $L_{j,i+1}$ , наприклад,  $L_{j,i+2}$  або  $L_{j,i+3}$ . Останній тип перешкоди унеможливорює досягнення точки маршруту  $L_{j,i+1}$  і вимагає відхилення від маршруту з подальшим поверненням до маршруту в точці  $L_{j,i+n}$  ( $n > 1$ ).

За таких припущень МСПН, яка використовується для управління переміщенням АМС уздовж маршруту, базується на таких знаннях:

- цілі й плани переміщень та усунення перешкод;
- факти, що подають на основі даних від сенсорів можливі ситуації в оточенні АМС;
- правила, що подають знання про маршрути, робочий простір АМС та стратегії руху;
- базові алгоритми керування АМС у типових ситуаціях.

## 2.3 Модель подання знань

### 2.3.1 Багатошарова ієрархічна структура знань

Знання АМС про ціль, план і маршрут переміщення, про стратегію і конкретні керівні впливи, необхідні для досягнення цілі, подані на різних рівнях абстрагування у вигляді нечітких правил із використанням фактів різних рівнів узагальнення. Загалом, правила мають однакову форму, що відповідає модифікованій нечіткій моделі Такагі-Сугено-Канга (МТСК) (2.2) для всіх рівнів.

$$R_i^{(\ell)}: \quad \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_i^\ell) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_i^\ell \text{ is high and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_j^{\ell+1} \text{ is high} \\ \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_k^\ell = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_i^\ell = -1, \quad [cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_j^{\ell+1} = -1], \quad (2.2)$$

де  $CF_{-} \mathbf{f}_i^\ell$  — ім'я лінгвістичної змінної, яка нечітко за допомогою трьох термів (high, low, zero) подає числове значення фактора упевненості  $cf_{-} \mathbf{f}_i^\ell$  факту  $\mathbf{f}_i^\ell$   $\ell$ -го рівня [117, 122].

У (2.2) наведено правило  $\ell$ -го рівня абстрагування, до якого включені:  $\mathbf{f}_i^\ell$  — факт  $\ell$ -го рівня абстрагування даних від сенсорів;  $^{sat} \mathbf{f}_i^\ell$  — супутник факту  $\mathbf{f}_i^\ell$ , що використовується для вказівки на поточну ціль  $\ell$ -го рівня, та актуальний контекст, що супроводжує процес досягнення цілі;  $^{sat} \mathbf{f}_j^{\ell+1}$  — супутник факту  $\ell+1$ -го рівня абстрагування. Правило активізується подією  $event(\mathbf{f}_i^\ell)$ , що породжується появою даних від сенсорів про ознаки  $i$ -ї КТРП, якщо поточна підціль переміщення досягнута, про що свідчить активність супутника цього факту  $CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_i^\ell \text{ is high}$ . Умова  $CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_j^{\ell+1} \text{ is high}$  у правилі (2.2) вказує на актуальну підціль  $\ell+1$ -го рівня та зв'язує це правило з актуальним контекстом (правило подає фазу актуального плану верхнього рівня). Правило за активізації змінює підціль  $\ell$ -го рівня після досягнення актуальної підцілі цього рівня й

опційно (у разі досягнення останньої підцілі  $\ell$ -го рівня) деактуалізує підціль  $\ell+1$ -го рівня ( $[cf\_sat \mathbf{f}_j^{\ell+1} = -1]$ ).

Усі вхідні лінгвістичні змінні, які використовуються в моделі, мають однакову структуру: містять три терми (high, low, zero), що мають однакові для всіх правил функції належності (рис. 2.2).

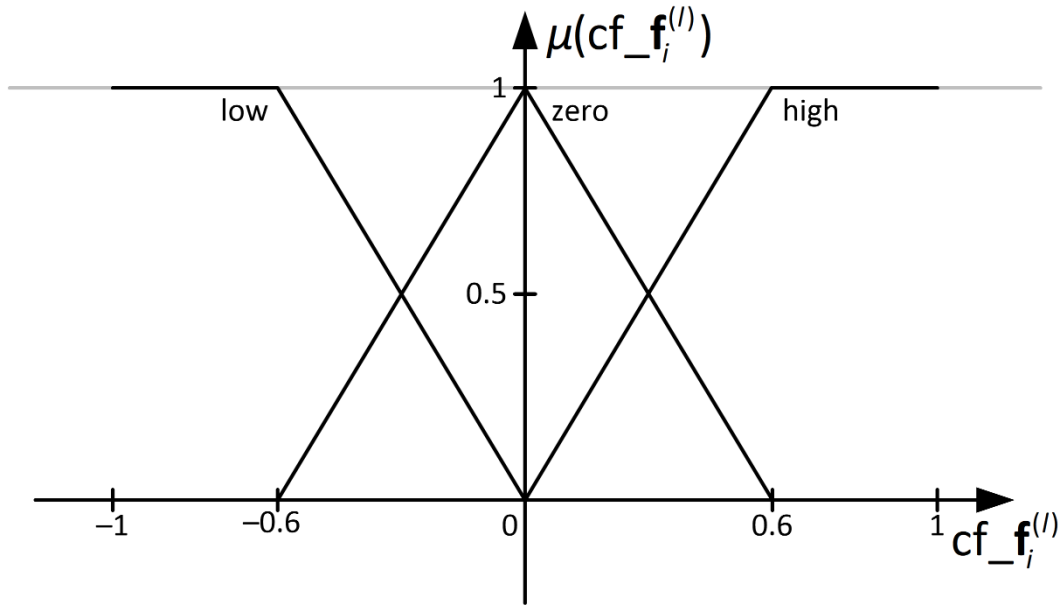


Рисунок 2.2 — Уніфікована структура лінгвістичних змінних, що використовуються в моделі

Модифікація моделі МТСК зводиться до такого. По-перше, правило у полі ЯКЩО може мати конструкцію  $event(\mathbf{f}_i)$ . Це означає що правило застосовується механізмом виведення МТСК тоді, коли сталася подія: фактор упевненості факту  $\mathbf{f}_i$  на поточному кроці обробки даних набув значення  $cf\_f_i > \varepsilon$ , а на попередньому кроці ця умова не виконувалася. Коли на поточному кроці з фактом  $\mathbf{f}_i$  події не відбувається, то правило, до якого входить факт  $\mathbf{f}_i$ , виключається з обробки механізмом МТСК (у класичних продукційних системах штучного інтелекту це правило є таким, що викреслюється). По-друге, якщо супутник  $sat \mathbf{f}_i$  факту  $\mathbf{f}_i$  активовано  $cf\_sat \mathbf{f}_i = 1$  (поточна ціль актуальна), то механізм відстеження контексту приділяє ідентифікації події цим фактом більше

уваги, що реалізовано шляхом зменшення порогу  $\varepsilon$  в умові визначення події  $cf\_f_i > \varepsilon - \Delta \cdot cf\_^{sat} f_i$ , де  $\Delta$  — експериментально обрана константа.

$$event(f_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } cf\_f_i^{(t)} > \varepsilon - \Delta \cdot cf\_^{sat} f_i \wedge cf\_f_i^{(t-1)} \leq \varepsilon - \Delta \cdot cf\_^{sat} f_i; \\ 0, & \text{elsewise.} \end{cases} \quad (2.3)$$

Для вирішення завдання навігації АМС пропонується така модель стратифікації БЗ за рівнями абстрагування.

На верхньому рівні знаходиться множина правил, які описують цілі АМС (різні завдання чи функції). Нижче рівнем знаходяться знання про план досягнення цілі (опис маршруту переміщень у вигляді послідовності КТРП, через які пролягає маршрут). Ще нижче рівнем організовані картографічні знання: для кожної КТРП даються плани досягнення суміжних з нею КТРП. На найнижчому рівні БЗ організовані знання про можливі способи керування актуаторами АМС (елементарні стратегії керування актуаторами).

На рис. 2.3 у графічному вигляді показано стратифікацію БЗ за рівнями абстрактного подання управління переміщенням АМС.



Рисунок 2.3 — Стратифікація БЗ за рівнями абстрактного подання управління переміщенням АМС

### 2.3.2 Факти, супутники фактів

Дані від сенсорів в АМС обробляються механізмом абстрагування [117, 122] з метою отримання їх опису у вигляді багаторівневого факту у вербальній формі на різних рівнях узагальнення. Факт має нечітку характеристику (2.1), яка показує, наскільки зміст вербального подання ситуації (прототип) відповідає конкретному набору даних від сенсорів АМС [117, 122].

### 2.3.3 Правила подання цілей, маршруту

Усі цілі АМС, що вимагають переміщень, задаються зовні й для досягнення мети потребують плану дій (маршруту переміщень). На верхньому рівні БЗ знаходяться правила, що актуалізують знання нижніх рівнів про конкретний маршрут, які використовуються як подання контексту для управління переміщенням. Для кожного  $k$ -го маршруту з  $n_s$  можливих задається правило:

$$\begin{aligned}
 R_k^{(4)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Start_k}) \text{ and } CF_{\mathbf{f}_{Start_k}}^{sat} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf_{\mathbf{f}_{R_j}}^{sat} = 1, \quad cf_{\mathbf{f}_{L_{j,1}}}^{sat} = 1, \quad cf_{\mathbf{f}_{Line\_in}}^{sat} = 1, \\
 & \quad \quad \quad cf_{\mathbf{f}_{Start_1}}^{sat} = -1, \dots, cf_{\mathbf{f}_{Start_{n_s}}}^{sat} = -1; \\
 & j = 1, 2, \dots, n_r; \quad k = 1, 2, \dots, n_s.
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

На цьому ж рівні БЗ знаходяться правила, які деактуалізують контекст (порцію знань, що описують маршрут), коли мета досягнута, про що свідчить досягнення останньої точки маршруту, яка описується фактом  $\mathbf{f}_{L_{j,p}}$ . Це така множина правил:

$$\begin{aligned}
R_{j,p}^{(4)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_{j,p}}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{j,p}} \text{ is high and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_j} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_j} = -1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{j,p}} = -1, \\
& \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_1} = 1, \dots, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_{n_s}} = 1; \\
& i = 1, 2, \dots, p; \quad j = 1, 2, \dots, n_r.
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Друга група цілей переміщення АМС пов'язана з появою перешкод, що порушують нормальний режим переміщення. Аналогічно, як і для вищеописаних цілей, на верхньому рівні БЗ знаходяться правила, що актуалізують знання нижніх рівнів про плани усунення перешкоди, та правила, що деактуалізують цю порцію знань, коли мета досягнута. У (2.6) наведено множину правил, що актуалізують знання про плани усунення перешкоди:

$$\begin{aligned}
R_i^{(4)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Obst_i}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Obst_i} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{PlanObst_i} = 1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{i,1}} = 1; \\
& i = 1, 2, \dots, n_{ob}.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Факти  $\mathbf{f}_{Start_k}$  у (2.4) і  $\mathbf{f}_{Obst_i}$  у (2.6) формуються на основі даних від сенсорів, наприклад, кнопка, що активізує команду на виконання завдання, або голосова команда, або сенсор відстані до перешкоди. Для активізації правила, наприклад, (2.4), крім події  $\text{event}(\mathbf{f}_{Start_k})$ , потрібна актуальна ціль  $CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_k} \text{ is high}$ . Актуалізацію цілі  $CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_k} \text{ is high}$  було виконано механізмом переключення уваги, коли була досягнута попередня ціль цього рівня. Застосування механізмів відстеження контексту та переключення уваги [62] буде розглянуто нижче. Активне правило (2.4) актуалізує контекст, що пов'язаний із досягненням поточної мети  $cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_j} = 1$  для нижчих рівнів. Крім цього, правило (2.4) деактуалізує цілі цього рівня  $^{sat} \mathbf{f}_{Start_1}, \dots, ^{sat} \mathbf{f}_{Start_{n_s}}$  щоб унеможливити реалізацію інших команд, які можуть надходити до АМС під час виконання вже прийнятої команди. Аналогічні функції з планування усунення перешкоди, коли вона з'являється, виконують правила з групи (2.6). В обох випадках правила

активізують факт-супутник першої КТРП  $^{sat}\mathbf{f}_{L_{j,1}}$  у маршруті переміщення і плані обходу перешкоди  $^{sat}\mathbf{f}_{L_{i,1}}$ .

Маршрут, наприклад,  $j$ -й у вигляді впорядкованої послідовності КТРП  $R_j = \langle L_{j,1}, \dots, L_{j,p} \rangle$ , поданий множиною з  $p$  правил. Правило  $R_{j,i}^{(3)}$  описує ділянку маршруту між КТРП  $L_{j,i}$  та  $L_{j,i+1}$ . Для цієї ділянки маршруту поточною ціллю переміщення є КТРП  $L_{j,i+1}$ , поданий супутником  $^{sat}\mathbf{f}_{L_{j,i+1}}$  факту  $\mathbf{f}_{L_{j,i+1}}$ , що описує ознаки КТРП  $L_{j,i+1}$ . Вхідна КТРП ділянки маршруту подана фактом  $\mathbf{f}_{L_{j,i}}$ . Нечіткі правила в БЗ подані відповідно до (2.7).

$$\begin{aligned}
 R_{j,i}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_{j,i}}) \text{ and } CF_{-}^{sat}\mathbf{f}_{L_{j,i}} \text{ is high and } CF_{-}^{sat}\mathbf{f}_{R_j} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat}\mathbf{f}_{L_{j,i+1}} = 1, \quad cf_{-}^{sat}\mathbf{f}_{L_{j,i}} = -1; \\
 & i = 1, 2, \dots, p-1; \quad j = 1, 2, \dots, n_r.
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

### 2.3.4 Картографічні знання, правила подання стратегій руху

КТРП  $L_i$  безпосередньо зв'язана дорогами зі скінченною множиною КТРП  $\{L_j\} \subset \mathcal{L}$ ,  $j = 1, 2, \dots, k$  робочого простору. Дорога, яка прилягає до КТРП  $L_i$  і проходить до КТРП  $L_j$ , має ідентифікатор, пов'язаний з її напрямком (північ, схід, південь, захід або більш детально). Знання в БЗ про карту місцевості подані множиною правил, що описують дороги, які безпосередньо зв'язують КТРП  $L_i$  з усіма суміжними КТРП  $L_j$ :

$$\begin{aligned}
 R_i^{(2,1)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}\mathbf{f}_{L_i} \text{ is high and } CF_{-}^{sat}\mathbf{f}_{L_j} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat}\mathbf{f}_{Out\_dir} = 1; \\
 & i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, k.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

У правилі (2.8) цільова КТРП  $L_j$  подана фактом-супутником  $^{sat}\mathbf{f}_{L_j}$  факту  $\mathbf{f}_{L_j}$ , а вхідна КТРП подана двома фактами:  $\mathbf{f}_{L_i}$  та фактом-супутником  $^{sat}\mathbf{f}_{Out\_dir}$  факту  $\mathbf{f}_{Out\_dir}$ , який є ідентифікатором виїзної дороги від  $\mathbf{f}_{L_i}$ , що безпосередньо зв'язує його з  $\mathbf{f}_{L_j}$ .

Правила (2.8) не пов'язані з конкретним маршрутом. Вони можуть бути активізовані сенсорними даними про місцезнаходження АМС, коли вона знаходиться в оточенні КТРП  $L_i$ .

Картографічні знання відіграють ключову роль у вирішенні завдання планування маршруту руху. Для отримання картографічних знань, поданих у формі (2.8), можна застосувати методи глобального планування (описані у підрозділі 1.2.3), зокрема діаграми Вороного, графи видимості, штучні потенційні поля, клітинну декомпозицію тощо. Значна частина цих методів на основі відомої карти оточення будує граф можливих шляхів руху (дорожню карту, граф оточення тощо), до якого можна застосувати пошукові алгоритми для визначення оптимальних за певним критерієм маршрутів.

На рис. 2.4 наведено приклад застосування алгоритму вертикальної клітинної декомпозиції до карти штучного оточення та отриманий граф можливих шляхів руху (дорожню карту).

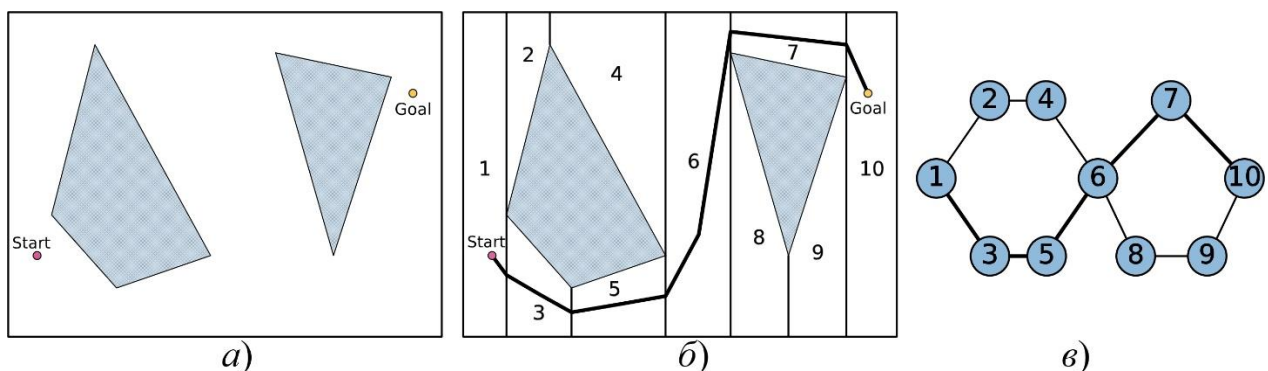


Рисунок 2.4 — Приклад роботи алгоритму вертикальної клітинної декомпозиції а) вихідна карта оточення; б) розбиття оточення на клітини (показано маршрут від стартової точки до цілі руху, отриманий за допомогою пошуку в ширину); в) граф шляхів руху

Граф можливих шляхів руху (рис. 2.4) можна використати для отримання набору нечітких правил (2.8). Так, факти, поміщені в поле **IF**, описують ребро на графі можливих шляхів руху, а сукупність усіх пар фактів з полів **IF** множини картографічних правил є виключним переліком ребер графу можливих шляхів руху.

Якщо АМС знаходиться на під'їзній дорозі до деякої КТРП (в зоні доступу до даних), на основі ідентифікатора цієї дороги формуються ознаки факту  $\mathbf{f}_{In\_dir}$ . Ціллю переміщення АМС є виїзна дорога з ідентифікатором, що поданий супутником факту  $^{sat}\mathbf{f}_{Out\_dir}$ . Картографічні знання про те, який маневр потрібно виконати, щоб потрапити з під'їзної дороги на виїзну, формують правила типу (2.9):

$$R_i^{(2,2)} : \quad \mathbf{IF} \quad CF\_f_{In\_dir} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{Out\_dir} \text{ is high} \\ \mathbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Maneuver\_type} = 1, \quad cf\_^{sat}f_{Out\_dir} = -1. \quad (2.9)$$

КТРП може являти собою певне розгалуження доріг або глухий кут. На рис. 2.5 показані можливі типи розгалужень, які використовувалися в моделі простору. Передбачається, що на кожній із доріг, що прилягають до КТРП, на деякій відстані від розгалуження є розмітка у вигляді суцільної смуги «стоп». Інформація про цю лінію, отримана за допомогою сенсорів АМС, формує факт  $\mathbf{f}_{Line\_in}$ . План проїзду КТРП декомпозований на дві фази. Перша фаза це виконання маневру (проїзд прямо або поворот), щоб потрапити до старт-стоп лінії на виїзній дорозі або зі старт-стоп лінії на в'їзній дорозі. Друга фаза це початок руху по виїзній дорозі. Знання про маневр на першій фазі подані правилом (2.10). Правило актуалізується у разі появи події (наїзд на старт-стоп лінію,  $event(\mathbf{f}_{Line\_in})$ ) й у разі виконання умов: безпечна ситуація на розгалуженні доріг ( $CF\_f_{Safe} \text{ is high}$ ), тип маневру ( $CF\_^{sat}f_{Maneuver\_type} \text{ is high}$ ), спосіб виконання маневру ( $CF\_f_{Maneuver\_method} \text{ is high}$ ). Дані, на базі яких формується подання

ситуації оточення КТРП у вигляді фактів  $f_{Safe}$ ,  $f_{Maneuver\_type}$ ,  $f_{Maneuver\_method}$ , зберігаються у пам'яті кожної КТРП і стають доступні сенсорам АМС, коли вона знаходиться на старт-стоп лінії. Правило (2.10) актуалізує супутники фактів: ціль переміщення до старт-стоп лінії на виїзній дорозі  $cf\_^{sat}f_{Line\_out}=1$  і стратегію керування рухом:

$$\begin{aligned}
 R_i^{(1,1)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(f_{Line}) \text{ and } CF\_^{sat}f_{Line\_in} \text{ is high} \\
 & \text{and } CF\_f_{Safe} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{Maneuver\_type} \text{ is high} \\
 & \text{and } CF\_f_{Maneuver\_method} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Line\_out} = 1, \quad cf\_^{sat}f_{U\_Maneuver\_type\_method} = 1, \\
 & \quad cf\_^{sat}f_{Line\_in} = -1, \quad cf\_^{sat}f_{Maneuver\_type} = -1.
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

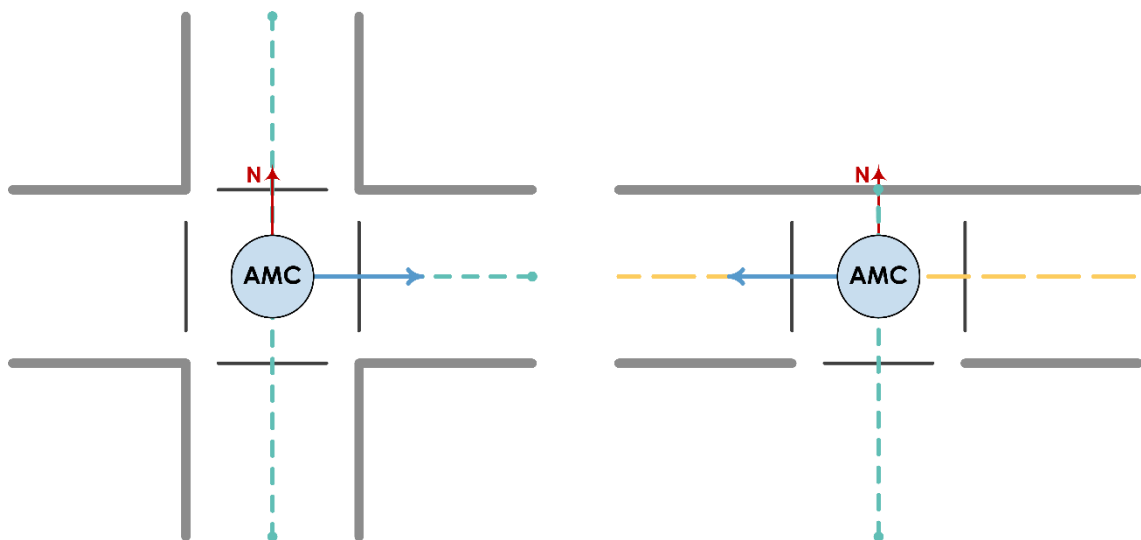


Рисунок 2.5 — Типи розгалужень

Правило (2.11) описує знання про другу фазу — початок руху по виїзній дорозі. На рис. 2.6 показані можливі типи виїзних доріг, які використовувалися в моделі простору. Актуалізується правило подією наїзду на старт-стоп лінію під час очікування її на виїзній дорозі  $CF\_^{sat}f_{Line\_out} \text{ is high}$ . За заданого типу руху по виїзній дорозі  $CF\_f_{Moving\_method} \text{ is high}$  актуалізується стратегія керування  $cf\_^{sat}f_{U\_Moving\_method} = 1$  і цільова ситуація, до появи якої ця стратегія керування залишатиметься актуальною  $cf\_^{sat}f_{Line\_in} = 1$ .

$$\begin{aligned}
 R_i^{(1,2)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
 & \text{and } CF_{-} \mathbf{f}_{Moving\_method} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_method} = 1, \\
 & \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1.
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

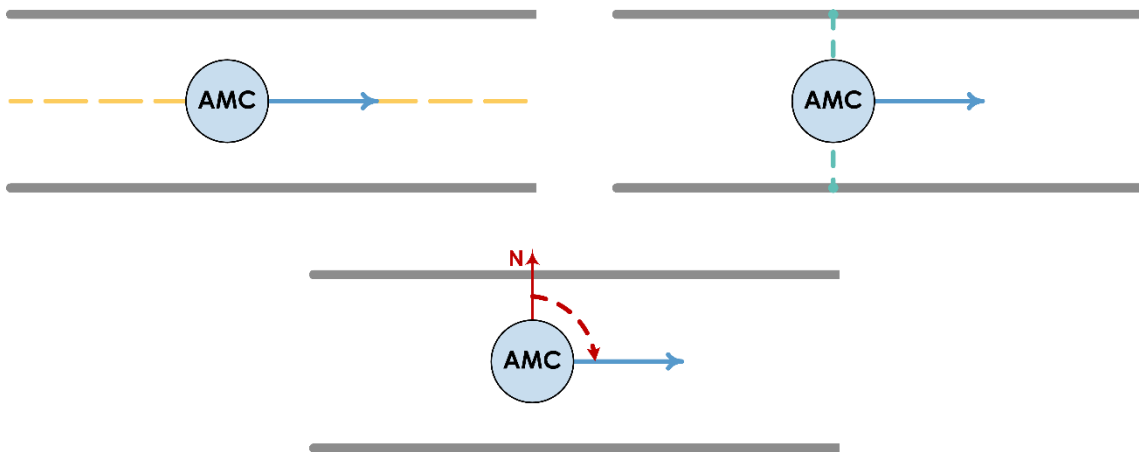


Рисунок 2.6 — Типи доріг

Стратегія керування реалізується контролером, наприклад, ПІД, нейронним або нечітким, який заснований на певному алгоритмі управління за прямими або зворотним зв'язком. Правило (2.12) активує контролер, що керує маневром (проїзд від в'їзної start-стоп лінії до виїзної start-стоп лінії розгалуження, яке подане КТРП, рис. 2.). Правило (2.13) активує контролер, що керує проїздом відповідним методом (рис. 2.6) від виїзної start-стоп лінії одної КТРП до в'їзної start-стоп лінії іншої КТРП.

$$\begin{aligned}
 R_i^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_type\_method} \text{ is high} \\
 & \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad U\_Maneuver\_type\_method.
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
 R_i^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_method} \text{ is high} \\
 & \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad U\_Moving\_method.
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

## 2.4 Управління переміщенням АМС на основі модифікованої моделі Такагі-Сугено-Канга

Нижче наведено алгоритм, що реалізує обробку даних від сенсорів і формування керівних впливів за допомогою МТСК. На кожному такті управління виконуються обчислення, що наведені на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 — Алгоритм формування керівних впливів за допомогою МТСК

Нижче наведено приклад обробки даних алгоритмом для рівня моделі, що відповідає знанням про стратегії руху по розгалуженнях (перехрестях), поданих множиною правил типу (2.11), які для конкретного випадку можуть бути подані набором із трьох правил:

- $R_1^{(1,2)} : \text{IF } event(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high and } CF_{-} \mathbf{f}_{Moving\_mark} \text{ is high}$   
 $\text{THEN } cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_mark} = 1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1;$
- $R_2^{(1,2)} : \text{IF } event(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high and } CF_{-} \mathbf{f}_{Moving\_dist} \text{ is high}$   
 $\text{THEN } cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_dist} = 1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1;$
- $R_3^{(1,2)} : \text{IF } event(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high and } CF_{-} \mathbf{f}_{Moving\_azim} \text{ is high}$   
 $\text{THEN } cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_azim} = 1, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1.$

У правилах факт  $\mathbf{f}_{Line}$  відповідає наїзду АМС на старт-стоп лінію; факти-супутники  $^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out}$ ,  $^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in}$  — очікуванню наїзду на виїзну та в'їзну старт-стоп лінію відповідно; факти  $\mathbf{f}_{Moving\_mark}$ ,  $\mathbf{f}_{Moving\_dist}$ ,  $\mathbf{f}_{Moving\_azim}$  — типу керування рухом (за розміткою, за відстанню до перешкоди, за азимутом); факти-супутники  $^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_mark}$ ,  $^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_dist}$ ,  $^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_azim}$  — запуску відповідної стратегії керування рухом.

На рис. 2.8 для наведених правил зображено результат виведення для модельної ситуації. Вважаємо, що  $cf_{-} \mathbf{f}_{Line} > \varepsilon$ , а отже усі три правила буреть участь у процесі обробки. Як видно, значення фактора упевненості у фактах, що відповідають типу керування рухом, який потрібно застосувати для успішного проїзду розгалуження, різняться (моделюється зашумленість даних). На основі вихідних даних перевага надається факту-супутнику, що відповідає запуску стратегії керування рухом за відстанню до перешкоди.

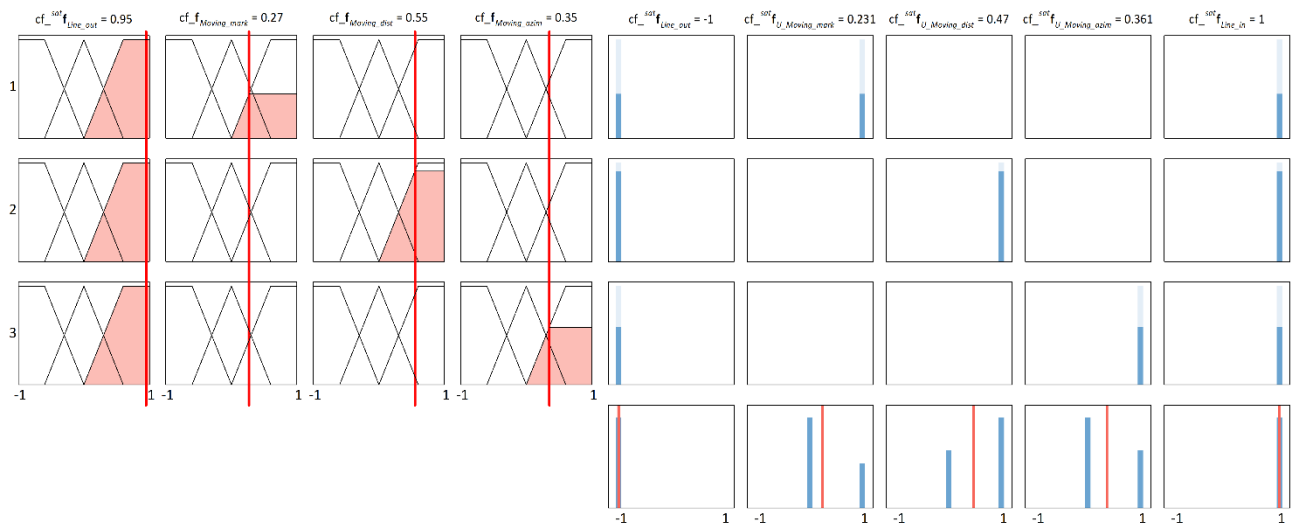


Рисунок 2.8 — Приклад виведення за допомогою МТСК

## 2.5 Дослідження моделі

### 2.5.1 Модель штучного оточення

Для дослідження моделі було розроблено штучне оточення у вигляді ортогонального лабіринту (рис. 2.9). У ключових точках лабіринту (розгалуженнях та глухих кутах) містяться КТРП  $L_1, L_2, \dots, L_{18}$ . Рух по дорогах між КТРП організовано з використанням трьох сенсорних систем: на основі лінії розмітки (на рис. 2.9 показано жовтим кольором) із використанням сенсора лінії; на основі відстані до обмежувальних стін (показано зеленим кольором) із використанням далекомірів; на основі руху по азимуту (показано червоним кольором) з використанням цифрового компаса.

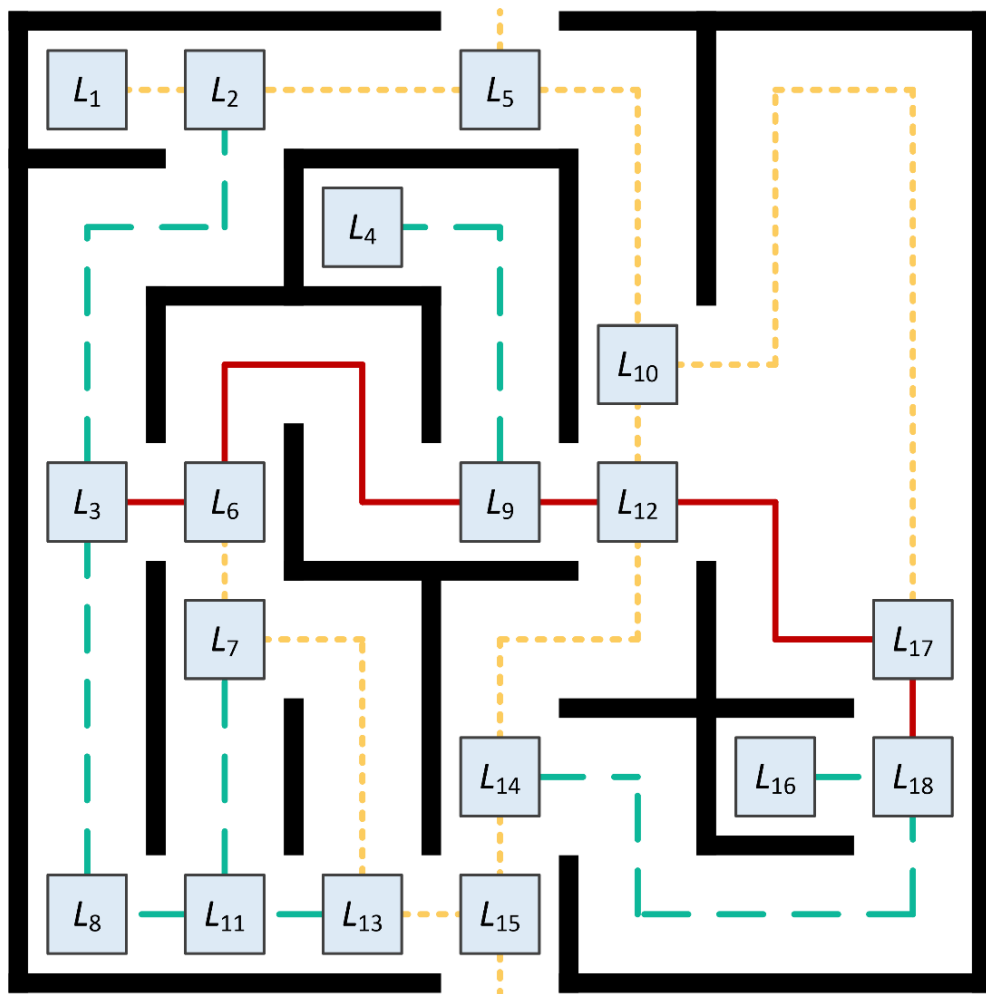


Рисунок 2.9 — Оточення для експериментів

### 2.5.2 Подання знань

Відповідно до описаної моделі сформована п'ятишарова БЗ, що описує знання про цілі, різні маршрути в штучному оточенні, картографічні знання про робочий простір, знання про способи керування актуаторами АМС.

Для апробації підходу було розроблено програму, що реалізує обробку даних від сенсорів на основі знань (2.4–2.13) за допомогою МТСК, яка містить механізми відстеження контексту та переключення уваги.

Нижче наведено приклад одного з проведених експериментів. БЗ (2.4–2.13) конкретизована для одного маршруту  $R_1 = \langle L_5, L_2, L_3, L_6, L_7, L_{13}, L_{15} \rangle$  (рис. 2.9). Конкретизовані правила (2.4), (2.5) мають вигляд:

$$\begin{aligned}
R_1^{(4)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Start_1}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_5} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1, \\
& \quad \quad \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_1} = -1, \dots, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_4} = -1; \\
R_{1,6}^{(4)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_{15}}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{15}} \text{ is high} \\
& \quad \quad \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} = -1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{15}} = -1, \\
& \quad \quad \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_1} = 1, \dots, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Start_4} = 1.
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Правила (2.7), що безпосередньо описують маршрут  $R_1$ , наведені нижче:

$$\begin{aligned}
R_{1,1}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_5}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_5} \text{ is high} \\
& \quad \quad \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_2} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_5} = -1; \\
R_{1,2}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_2}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_2} \text{ is high} \\
& \quad \quad \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_3} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_2} = -1; \\
R_{1,3}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_3}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_3} \text{ is high} \\
& \quad \quad \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_6} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_3} = -1; \\
R_{1,4}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_6}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_6} \text{ is high} \\
& \quad \quad \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_7} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_6} = -1; \\
R_{1,5}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_7}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_7} \text{ is high} \\
& \quad \quad \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{13}} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_7} = -1; \\
R_{1,6}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_{13}}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{13}} \text{ is high} \\
& \quad \quad \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{R_1} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{15}} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_{13}} = -1.
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Картографічні знання (2.8), (2.9) про робочий простір (рис. 2.9) наведені правилами (2.16), (2.17).

$$\begin{aligned}
 R_3^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_2} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_3} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_S} = 1; \\
 R_6^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_3} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_6} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_E} = 1; \\
 R_9^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_5} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_2} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_W} = 1; \\
 R_{12}^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_6} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_7} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_S} = 1; \\
 R_{15}^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_7} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_{11}} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_S} = 1; \\
 R_{16}^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_7} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_{13}} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_E} = 1; \\
 R_{27}^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_{11}} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_{13}} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_E} = 1; \\
 R_{28}^{(2,1)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{L_{13}} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{L_{15}} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Out\_E} = 1. \\
 R_2^{(2,2)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{In\_N} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{Out\_E} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Maneuver\_left} = 1, cf\_^{sat}f_{Out\_E} = -1; \\
 R_3^{(2,2)} : \quad & \textbf{IF} \quad CF\_f_{In\_N} \text{ is high and } CF\_^{sat}f_{Out\_S} \text{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{Maneuver\_forward} = 1, cf\_^{sat}f_{Out\_S} = -1;
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

$$\tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
R_4^{(2,2)} : \quad & \text{IF} \quad CF\_f_{In\_N} \text{ is high and } CF\_f_{Out\_W}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf\_f_{Maneuver\_right}^{sat} = 1, cf\_f_{Out\_W}^{sat} = -1; \\
R_7^{(2,2)} : \quad & \text{IF} \quad CF\_f_{In\_E} \text{ is high and } CF\_f_{Out\_S}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf\_f_{Maneuver\_left}^{sat} = 1, cf\_f_{Out\_S}^{sat} = -1; \\
R_{14}^{(2,2)} : \quad & \text{IF} \quad CF\_f_{In\_W} \text{ is high and } CF\_f_{Out\_E}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf\_f_{Maneuver\_forward}^{sat} = 1, cf\_f_{Out\_E}^{sat} = -1; \\
R_{15}^{(2,2)} : \quad & \text{IF} \quad CF\_f_{In\_W} \text{ is high and } CF\_f_{Out\_S}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf\_f_{Maneuver\_right}^{sat} = 1, cf\_f_{Out\_S}^{sat} = -1.
\end{aligned}$$

Знання про стратегії руху по розгалуженнях, що на рис. 2.6 показані відповідними КТРП, подані множиною нижченаведених правил:

$$\begin{aligned}
R_1^{(1,1)} : \quad & \text{IF} \quad event(f_{Line}) \text{ and } CF\_f_{Line\_in}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{and } CF\_f_{Safe} \text{ is high and } CF\_f_{Maneuver\_right}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{and } CF\_f_{Maneuver\_mark} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf\_f_{Line\_out}^{sat} = 1, cf\_f_{U\_Maneuver\_right\_mark}^{sat} = 1, \\
& cf\_f_{Line\_in}^{sat} = -1, cf\_f_{Maneuver\_right}^{sat} = -1; \\
R_3^{(1,1)} : \quad & \text{IF} \quad event(f_{Line}) \text{ and } CF\_f_{Line\_in}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{and } CF\_f_{Safe} \text{ is high and } CF\_f_{Maneuver\_left}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{and } CF\_f_{Maneuver\_mark} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf\_f_{Line\_out}^{sat} = 1, cf\_f_{U\_Maneuver\_left\_mark}^{sat} = 1, \\
& cf\_f_{Line\_in}^{sat} = -1, cf\_f_{Maneuver\_left}^{sat} = -1; \\
R_9^{(1,1)} : \quad & \text{IF} \quad event(f_{Line}) \text{ and } CF\_f_{Line\_in}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{and } CF\_f_{Safe} \text{ is high and } CF\_f_{Maneuver\_right}^{sat} \text{ is high} \\
& \text{and } CF\_f_{Maneuver\_azim} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf\_f_{Line\_out}^{sat} = 1, cf\_f_{U\_Maneuver\_right\_azim}^{sat} = 1, \\
& cf\_f_{Line\_in}^{sat} = -1, cf\_f_{Maneuver\_right}^{sat} = -1;
\end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
R_{11}^{(1,1)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-} \mathbf{f}_{Safe} \text{ is high and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Maneuver\_left} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-} \mathbf{f}_{Maneuver\_azim} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_left\_azim} = 1, \\
& \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = -1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Maneuver\_left} = -1. \\
\\
R_1^{(1,2)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-} \mathbf{f}_{Moving\_mark} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_mark} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1; \\
\\
R_2^{(1,2)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-} \mathbf{f}_{Moving\_dist} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_dist} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1; \quad (2.19) \\
\\
R_3^{(1,2)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-} \mathbf{f}_{Moving\_azim} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} = -1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_azim} = 1, \quad cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} = 1.
\end{aligned}$$

Знання про можливі стратегії керування подані множиною правил:

$$\begin{aligned}
R_1^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_mark} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad U\_Maneuver\_right\_mark; \\
\\
R_3^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_left\_mark} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad U\_Maneuver\_left\_mark; \\
\\
R_9^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_azim} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad U\_Maneuver\_right\_azim; \\
\\
R_9^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_left\_azim} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{THEN} \quad U\_Maneuver\_left\_azim;
\end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}
R_{13}^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_mark} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} \text{ is high} \\
& \text{THEN } U\_Moving\_mark; \\
R_{14}^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_dist} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} \text{ is high} \\
& \text{THEN } U\_Moving\_dist; \\
R_{15}^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_azim} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} \text{ is high} \\
& \text{THEN } U\_Moving\_azim; \\
R_{16}^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Obst_i} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_in} \text{ is high} \\
& \text{THEN } U\_Obst_i.
\end{aligned}$$

Передбачається, що у довільний момент контролю може бути реалізована тільки одна стратегія керування рухом. Цю умову реалізують модифіковані (2.20) правила. Наприклад, правило  $R_1^{(0)}$  в (2.20) набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
R_1^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_mark} \text{ is high} \\
& \text{and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{Line\_out} \text{ is high} \\
& \text{THEN } U\_Maneuver\_right\_mark, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_left\_mark} = -1, \\
& cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_azim} = -1, \dots, cf_{-}^{sat} \mathbf{f}_{U\_Moving\_azim} = -1.
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Результати емуляції проїзду АМС по маршруту  $R_1$  наведені в табл. 2.1. У першому стовпці наведено множину фактів та їх супутників, що задіяні в маршруті  $R_1$ . Інші стовпці відповідають подіям, що породжуються зміною ситуації у разі переміщення АМС уздовж маршруту.

Таблиця 2.1 — Результати комп'ютерного експерименту cf<sub>f</sub>

| Факт                          | Номери кроків обробки даних від сенсорів |     |     |     |     |    |    |     |    |     |    |     |     |     |     |     |     |    |     |  |
|-------------------------------|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|--|
|                               | 0                                        | 1   | 2   | 3   | 4   | 4a | 4б | 4в  | 5  | ... | 14 | 14a | 14б | 14в | 14г | 14д | 14е | 15 | ... |  |
| 1                             | 2                                        | 3   | 4   | 5   | 6   | 7  | 8  | 9   | 10 | 11  | 12 | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19 | 20  |  |
| $f_{Start_i}$                 | -1                                       | 0.8 | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Start_i}$           | 1                                        | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{R_i}$               | -1                                       | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1   | 1  | ... | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  | ... |  |
| $f_{Obst_i}$                  | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | 1  | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Obst_i}$            | 1                                        | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1   | 1  | ... | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1  | ... |  |
| $^{sat}f_{U\_Obst_i}$         | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | 1  | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Obst_i\_mark}$      | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | 1  | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{L_5}$                     | -1                                       | -1  | 0.9 | 0.9 | 0.9 | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{L_5}$               | -1                                       | 1   | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{L_2}$                     | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | 1  | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{L_2}$               | -1                                       | -1  | 1   | 1   | 1   | 1  | 1  | 1   | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{L_3}$                     | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{L_3}$               | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | 1  | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{L_7}$                     | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | 1  | 1   | 1   | 1   | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{L_7}$               | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{L_{11}}$                  | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | 1   | 1   | 1   | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{L_{11}}$            | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | 1   | 1   | 1   | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{L_{13}}$                  | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | 1  | ... |  |
| $^{sat}f_{L_{13}}$            | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | 1  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | -1 | ... |  |
| $f_{L_{15}}$                  | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{L_{15}}$            | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | 1  | ... |  |
| $^{sat}f_{Out\_E}$            | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Out\_S}$            | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Out\_W}$            | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{In\_N}$                   | -1                                       | -1  | 1   | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | 1  | 1   | -1  | -1  | 1   | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{In\_E}$                   | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | 1  | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{In\_W}$                   | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | 1  | ... |  |
| $^{sat}f_{Maneuver\_left}$    | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | 1  | ... | 1  | -1  | -1  | -1  | 1   | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Maneuver\_right}$   | -1                                       | -1  | 1   | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Maneuver\_forward}$ | -1                                       | -1  | -1  | -1  | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | 1   | -1  | -1  | -1  | -1  | -1  | 1  | ... |  |
| $f_{Line}$                    | -1                                       | -1  | -1  | 0.8 | 0.9 | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | 1   | 1   | -1  | 1   | 1   | -1 | ... |  |
| $^{sat}f_{Line\_in}$          | -1                                       | 1   | 1   | -1  | 1   | 1  | 1  | 1   | 1  | ... | 1  | 1   | -1  | 1   | 1   | -1  | 1   | 1  | ... |  |
| $^{sat}f_{Line\_out}$         | -1                                       | -1  | -1  | 1   | -1  | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | 1   | -1  | -1  | 1   | -1  | -1 | ... |  |
| $f_{Safe}$                    | -1                                       | -1  | 1   | 1   | 1   | -1 | -1 | -1  | -1 | ... | -1 | -1  | -1  | -1  | 1   | 1   | 1   | -1 | ... |  |
| $f_{Maneuver\_mark}$          | -1                                       | -1  | -1  | 1   | -1  | -1 | -1 | 0.8 | -1 | ... | -1 | -1  | 1   | -1  | -1  | 1   | -1  | -1 | ... |  |

| 1                                               | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11  | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20  |
|-------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| $^{sat}\mathbf{f}_{Maneuver\_mark}$             | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $^{sat}\mathbf{f}_{U\_Maneuver\_left\_mark}$    | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | ... |
| $^{sat}\mathbf{f}_{U\_Maneuver\_right\_mark}$   | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $^{sat}\mathbf{f}_{U\_Maneuver\_forward\_mark}$ | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $\mathbf{f}_{Moving\_dist}$                     | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | 1  | -1 | ... |
| $\mathbf{f}_{Moving\_mark}$                     | -1 | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $^{sat}\mathbf{f}_{U\_Moving\_dist}$            | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | 1  | 1  | -1 | -1 | 1  | -1 | ... |
| $^{sat}\mathbf{f}_{U\_Moving\_mark}$            | -1 | -1 | -1 | -1 | 1  | 1  | 1  | 1  | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $\mathbf{U}_{Maneuver\_left\_mark}$             | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $\mathbf{U}_{Maneuver\_right\_mark}$            | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $\mathbf{U}_{Maneuver\_forward\_mark}$          | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $\mathbf{U}_{Moving\_dist}$                     | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | 1  | -1 | ... |
| $\mathbf{U}_{Moving\_mark}$                     | -1 | -1 | -1 | -1 | 1  | 1  | -1 | 1  | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |
| $\mathbf{U}_{Obst_i}$                           | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | -1 | ... | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | ... |

### 2.5.3 Переміщення вздовж одного маршруту без перешкод. Обмеження та можливості подання маршруту

Результати емулявання руху без перешкод наведені в табл. 2.1 на кроках 0–4.

Крок 0. Початкова ситуація: АМС знаходиться в режимі очікування будь-якої події, про що свідчать  $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{Start_t} = 1$ ,  $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{Obst_t} = 1$ .

Крок 1. Відбулася подія  $cf\_ \mathbf{f}_{Start_t} > \varepsilon - \Delta$  для  $\varepsilon = 0.75$ ,  $\Delta = 0.25$ , оскільки  $cf\_ \mathbf{f}_{Start_t} = 0.8$ . У табл. 2.1 комірки для факторів упевненості, значення яких мало місце на початку кроку обробки МТСК, зображені зеленим кольором, події для цих фактів — рожевим, результати обчислень правил — жовтим. Для цієї ситуації механізмом виведення МТСК буде застосовано тільки одне правило на верхньому рівні  $R_1^{(4)}$ , яке визначить  $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{R_1} = 1$ ,  $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{L_5} = 1$ ,  $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{Line\_in} = 1$ . Умови для активізації будь-яких правил нижчих рівнів відсутні, тому немає більше змін у станах фактів.

Крок 2. Актуалізовані на попередньому кроці ціль переміщення  $^{sat}\mathbf{f}_{R_1}$  та перша підціль маршруту  $^{sat}\mathbf{f}_{L_5}$  активізували механізм переключення уваги. Це

дозволило на поточному кроці обробки даних обчислити значення фактів, зокрема числі  $cf\_f_{L_5} = 0.9$ , і зареєструвати подію  $cf\_f_{L_5} > \varepsilon - \Delta$ . Для цієї ситуації механізмом виведення МТСК на третьому рівні буде активізовано правило  $R_{1,1}^{(3)}$ , яке визначить  $cf\_^{sat}f_{L_5} = -1$ ,  $cf\_^{sat}f_{L_2} = 1$ . На першому підрівні другого рівня на цьому кроці з'являється факт  $cf\_f_{In\_N} = 1$ , через що буде активізовано правило  $R_9^{(2,1)}$ , у результаті визначається  $cf\_^{sat}f_{Out\_W} = 1$ . На другому підрівні другого рівня активізується правило  $R_4^{(2,2)}$ , що визначає  $cf\_^{sat}f_{Out\_W} = -1$ ,  $cf\_^{sat}f_{Maneuver\_right} = 1$ . У табл. 2.1 блакитним кольором показано факт, який на одному кроці активізується та деактивізується.

Крок 3. Відбулася подія  $cf\_f_{Line} > \varepsilon - \Delta$ , оскільки  $cf\_f_{Line} = 0.8$ . З'являються факти  $f_{Maneuver\_mark} = 1$  та КТРП  $f_{Safe} = 1$ . Застосовується правило  $R_1^{(1,1)}$ , що визначає  $cf\_^{sat}f_{Line\_out} = 1$ ,  $cf\_^{sat}f_{U\_Maneuver\_right\_mark} = 1$ ,  $cf\_^{sat}f_{Line\_in} = -1$ ,  $cf\_^{sat}f_{Maneuver\_right} = -1$ .  $cf\_^{sat}f_{U\_Maneuver\_right\_mark} = 1$ . Правило нульового рівня  $R_1^{(0)}$  запускає до виконання стратегію  $U_{Maneuver\_right\_mark}$ .

#### 2.5.4 Декілька маршрутів у пам'яті. Переключення з одного маршруту на інший

Система забезпечує підтримку декількох маршрутів руху, що знаходяться у вигляді правил (2.4–2.7) у БЗ. Переключення АМС з одного маршруту руху на інший реалізовано у вигляді правил (2.4) і можливе за умови активізації факту-супутника  $^{sat}f_{Start_k}$ , що відповідає готовності АМС до проїзду  $k$ -го маршруту.

## 2.5.5 Переміщення вздовж одного маршруту з перешкодами

Результати емулявання руху з перешкодами наведені в табл. 2.1 на кроках 4–15.

Крок 4. Відбулася подія  $cf\_f_{Line} > \varepsilon - \Delta$ , оскільки  $cf\_f_{Line} = 0.9$ . З'являється факт  $f_{Moving\_mark}$ . Застосовується правило  $R_1^{(1,2)}$ , що визначає  $cf\_^{sat}f_{Line\_out} = -1$ ,  $cf\_^{sat}f_{U\_Moving\_mark} = 1$  та  $cf\_^{sat}f_{Line\_in} = 1$ . Правило  $R_{13}^{(0)}$ , для якого виконується умова  $cf\_^{sat}f_{U\_Moving\_mark} = 1$ , запускає до виконання стратегію  $U_{Moving\_mark}$ . АМС починає рух до  $L_2$  (рис. 2.7).

Крок 4а. Ситуація, коли АМС рухається між КТРП  $L_5$  і  $L_2$  без перешкод, задовольняє вимоги тільки одного правила  $R_{13}^{(0)}$  у (2.20) із зауваженнями (2.21). Згідно з цим правилом стратегія керування рухом зберігається без змін.

Крок 4б. Моделюється поява перешкоди на маршруті руху АМС. Для спрощення припускається, що факт  $f_{Obst_i}$  у правилі (2.6) достовірно ідентифікує перешкоду, наприклад, яку можна об'їхати справа, на основі даних від сенсору відстані. Нижче наведені додаткові правила, які активують стратегію керування рухом для оминання перешкоди, поки знову не з'явиться розмітка.

$$\begin{aligned}
 R_i^{(4)} : \quad & \text{IF} \quad event(f_{Obst_i}) \text{ and } CF\_^{sat}f_{Obst_i} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{U\_Obst_i} = 1, cf\_^{sat}f_{Maneuver\_mark} = 1, cf\_^{sat}f_{Obst\_mark} = 1; \\
 R_i^{(0)} : \quad & \text{IF} \quad event(f_{Maneuver\_mark}) \text{ and } CF\_^{sat}f_{Maneuver\_mark} \text{ is high} \\
 & \quad \text{and } CF\_^{sat}f_{Obst\_mark} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf\_^{sat}f_{U\_Moving\_mark} = 1, cf\_^{sat}f_{Maneuver\_mark} = -1, \\
 & \quad cf\_^{sat}f_{Obst\_mark} = -1.
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Крок 5. Аналогічно кроку 2, коли досягнуто  $L_2$ . Кроки 6–13 відображають симуляцію безперешкодного руху на ділянках  $(L_2, L_3, L_6, L_7)$ . Кроки 5, 8, 11, 14 описують ситуації, коли виникає подія, поява'язана із прибуттям АМС до чергової

КТРП за маршрутом  $\mathbf{f}_{L_{1,i}}$ . З'являється факт, що описує напрямок під'їзду до КТРП  $\mathbf{f}_{In\_dir}$ . Актуалізуються супутники фактів чергової цільової КТРП за цим маршрутом  $^{sat}\mathbf{f}_{L_{1,i+1}}$ , напрямку виїзду з КТРП  $^{sat}\mathbf{f}_{Out\_dir}$  та типу маневру  $^{sat}\mathbf{f}_{Maneuver\_type}$ , що необхідно виконати для проїзду КТРП. Кроки 6, 9, 12, 15 описують ситуації, коли виникає подія досягнення старт-стоп лінії на в'їзній дорозі  $\mathbf{f}_{Line}$ . З'являються факти  $\mathbf{f}_{Maneuver\_method}$  методу виконання маневру для проїзду КТРП та безпечності проїзду  $\mathbf{f}_{Safe}$ . Актуалізуються супутники фактів появи старт-стоп лінії на виїзній дорозі  $^{sat}\mathbf{f}_{Line\_out}$  та стратегії руху по КТРП. Запускається стратегія керування рухом  $\mathbf{U}_{Maneuver\_type\_method}$ . На кроках 7, 10, 13, 16 виникає подія досягнення старт-стоп лінії на виїзній дорозі  $\mathbf{f}_{Line}$  відповідних КТРП. З'являється факт методу руху по виїзній дорозі  $\mathbf{f}_{Moving\_method}$ . Актуалізуються супутники фактів появи старт-стоп лінії на в'їзній дорозі  $^{sat}\mathbf{f}_{Line\_in}$  та стратегії руху на виїзних дорогах. Запускаються стратегії керування рухом на виїзних дорогах  $\mathbf{U}_{Moving\_method}$ . Крок 17 описує подію появи ознак кінцевої КТРП за маршрутом  $\mathbf{f}_{L_{14}}$ . Виконується деактуалізація факту руху по маршруту  $^{sat}\mathbf{f}_{R_1}$ . Актуалізуються факти, що показують готовність АМС до виконання нових завдань  $^{sat}\mathbf{f}_{Start_1}$ .

На особливу уваги заслуговують кроки 14, 14а, 14б, 14в. На 14-му кроці досягнуто  $L_7$ . На кроці 14а моделюється небезпечна ситуація: рух на ділянці  $L_7$  —  $L_{13}$  небезпечний ( $CF\_f_{Safe}$  is low). Тому правило з (2.16) не буде активізованим і, як наслідок, не буде визначена стратегія керування рухом. Якщо БЗ доповнити правилами об'їзду з  $L_7$  через  $L_{11}$  до  $L_{13}$ , то далі рух по маршруту буде продовжений. Нижче наведено правило об'їзду небезпечної ділянки після активізації якого будуть активізовані правила з (2.16), що вкажуть напрям виїзду до  $L_{11}$  і правила нижчих рівнів, що активізують стратегію керування рухом від  $L_7$  через  $L_{11}$ .

$$\begin{aligned}
 R_{j,7}^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad CF\_f_{Safe} \text{ is low } \textbf{and} \ CF\_f_{L_{13}}^{sat} \text{ is high} \\
 & \textbf{and} \ CF\_f_{L_7} \text{ is high} \\
 & \text{THEN} \quad cf\_f_{L_{11}}^{sat} = 1, \ cf\_f_{detour}^{sat} = 1
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Кроки 14г, 14д, 14е описують ситуації проїзду від  $L_{11}$  до  $L_{13}$ . Оскільки поточна ціль перерваного руху по маршруту  $CF\_f_{L_{13}}^{sat} \text{ is high}$  увесь час об'їзду залишається активною, то у разі досягнення  $L_{11}$  планування маршруту відбувається на початковій базі правил, як і для маршруту без перешкод. Особливість полягає в необхідності деактивації факту  $cf\_f_{detour}^{sat} = -1$ .

### 2.5.6 Дослідження впливу контексту на впевненість локалізації АМС

Проведено дослідження впливу неповноти інформації на прийняття рішення, наприклад в КТРП  $L_{10}$ . Моделювалася ситуація, коли дані від сенсорів не дозволяли АМС однозначно локалізувати КТРП, в якій вона знаходиться.

Неповнота і нечіткість даних від сенсорів не дозволяли однозначно ідентифікувати місцезнаходження АМС, коли вона дійсно знаходилась у КТРП  $L_{10}$ . Система сприйняття з упевненістю  $cf\_f_{L_{10}}$  стверджувала, що поточна КТРП —  $L_{10}$ , і з упевненістю  $cf\_f_{L_{12}}$ , що поточна КТРП —  $L_{12}$ . Значення контекстних фактів-супутників становили  $cf\_f_{L_{10}}^{sat} = 0.9$  і  $cf\_f_{L_{12}}^{sat} = 0.1$ . Були прийняті наступні значення констант  $\varepsilon = 0.75$  і  $\Delta = 0.25$ . У табл. 2.2 наведені результати реєстрації подій  $event(f_{L_{10}})$  і  $event(f_{L_{12}})$ .

Таблиця 2.2 — Результати дослідження впливу контексту (значення  $event(\mathbf{f}_{L_{10}})$  і  $event(\mathbf{f}_{L_{12}})$ )

| Факт $\mathbf{f}_{L_i}$ | Фактор упевненості факту-супутника $cf_{sat} \mathbf{f}_{L_i}$ | Фактор упевненості факту ( $cf_{\mathbf{f}_{L_{10}}} = cf_{\mathbf{f}_{L_{12}}}$ ) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
|                         |                                                                | 0                                                                                  | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.9 | 1 |
| $L_{10}$                | 0.9                                                            | 0                                                                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1 |
| $L_{12}$                | 0.1                                                            | 0                                                                                  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 1 |

З таблиці видно, що врахування контексту через використання фактів-супутників дозволяє зменшити вплив неповноти і нечіткості даних, які надходять від сенсорів. За появи збурень, що приводять до помилкової локалізації КТРП із факторами упевненості  $cf_{\mathbf{f}_{L_{10}}} = cf_{\mathbf{f}_{L_{12}}} = 0.6$  і  $cf_{\mathbf{f}_{L_{10}}} = cf_{\mathbf{f}_{L_{12}}} = 0.7$ , здійснюється коректна ідентифікація КТРП  $L_{10}$  і, як наслідок, АМС приймає вірне рішення щодо подальшого переміщення.

## 2.6 Висновки до другого розділу

Дослідження моделі сприйняття, заснованої на правилах, показали спроможність її застосування для класу завдань навігації АМС. Модель сприйняття, що інтегрована з модифікованою моделлю Такагі-Сугено-Канга, вирішує завдання подання знань АМС про оточення та ситуаційне управління переміщенням АМС уздовж маршруту, задовольняє вимоги щодо автономних систем і має переваги порівняно з методами програмного та евристичного управління за такими критеріями:

1) гнучкість забезпечується завдяки поданню нечіткими правилами різного рівня узагальнення знання про цілі, маршрут і план усунення перешкод, картографічні знання про робочий простір, стратегії і конкретні керівні рішення, що дозволяє адаптувати знання під конкретні умови без перепрограмування системи управління;

2) масштабованість забезпечується заміною фрагментів бази знань. На рівні маршрутів додаються нові правила, що задають ділянки маршруту між двома суміжними КТРП. На рівні картографічних даних додаються правила, що описують зв'язки нових КТРП з існуючими. На рівні функціональних можливостей АМС додаються правила, що описують нові стратегії поведінки та керування рухом АМС. На рівні інформаційного забезпечення додаються нові факти, що описують відповідні концепти, побудовані на даних від доданих до системи нових сенсорів;

3) опрацювання невизначеності забезпечується механізмами переключення уваги та відстеження контексту, завдяки яким знання про перешкоди та стратегії їх подолання автоматично застосовуються у небезпечних ситуаціях. Результати комп'ютерних експериментів підтвердили можливості АМС щодо автономного виконання завдання у ситуаціях, коли, по-перше, виникають перешкоди, що потребують ситуаційного перепланування фрагмента маршруту або усунення перешкоди шляхом переключення на іншу стратегію, по-друге, через перешкоди недостатньо інформації для вирішення завдання локалізації АМС.

Подальші дослідження спрямовані на створення механізмів адаптації й навчання з автоматичного перепланування маршрутів.

Результати розділу викладені в працях [21, 22, 25, 32, 36, 37].

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОД СИТУАЦІЙНОГО ПЕРЕПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ РУХУ АВТОНОМНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ

У розділі розроблено метод ситуаційного управління АМС із переплануванням маршруту. Запропонований метод забезпечує використання апріорних знань АМС про фрагменти маршрутів для синтезу нових маршрутів руху з метою забезпечення досягнення цілі в умовах зміни оточення.

#### 3.1 Обґрунтування вибору моделі перепланування маршруту

Планування маршруту переміщення АМС належить до завдань планування, що розглядаються в межах штучного інтелекту. Моделі планування на концептуальному рівні розглядають, враховуючи два фактори [64]:

- 1) для якої проблемної галузі створюється план;
- 2) яким чином здійснюється реалізація плану.

Розглядається така класифікація проблемних галузей [64, 123]:

- 1) детерміновані або недетерміновані. Недетерміновані поділяють на два типи: обмеженої недетермінованості та необмеженої недетермінованості;
- 2) статичні або динамічні;
- 3) повністю спостережувані або частково спостережувані.

Підходами до планування з урахуванням способу виконання плану (реалізації) можуть бути:

- 1) планування без використання сенсорів (без сприйняття);
- 2) умовне планування (плануванням з урахуванням передбачуваних ситуацій);
- 3) перепланування на основі контролю виконання плану;
- 4) безперервне планування.

Оскільки досліджується можливість застосування методу планування для АМС, які мають автономно функціонувати в заздалегідь невпорядкованому

оточення, то детермінована проблемна галузь і перший метод планування в припущенні, що для реалізації плану не будуть використовуватися сенсори, не розглядаються у цій роботі. Для обґрунтування можливості використання останніх трьох методів розглянемо таку модель поведінки АМС у недетермінованому оточенні.

У штучному інтелекті [122, 124, 125] як формальна платформа подання рішення завдання використовується парадигма простору станів. Скористаємось цим підходом для побудови парадигми ситуаційного управління та ситуаційного планування. Для цього будемо оперувати ситуацією, що описує оточення та АМС, як певним станом. Головне те, що ситуації, як окремі елементи, є такими, що попарно розрізняються за якимось критерієм. Кожній ситуації поставимо у відповідність унікальний ідентифікатор, що позначається  $S_i$ . Простір можливих станів утворено множиною ситуацій, що розрізняються, визначених на множині ознак. Переходи між станами відображають можливі переходи з однієї ситуації до іншої. На рис 3.1 наведено приклад графа переходів у просторі станів (ситуаційна мережа): стан  $S_1$  відповідає вихідній ситуації, стан  $S_{11}$  — кінцевій ситуації. Послідовність ситуації  $S_1, S_2, S_7, S_9, S_{11}$  відповідає одному з рішень завдання в просторі станів. У роботі це рішення відповідає одному з маршрутів переміщення АМС.

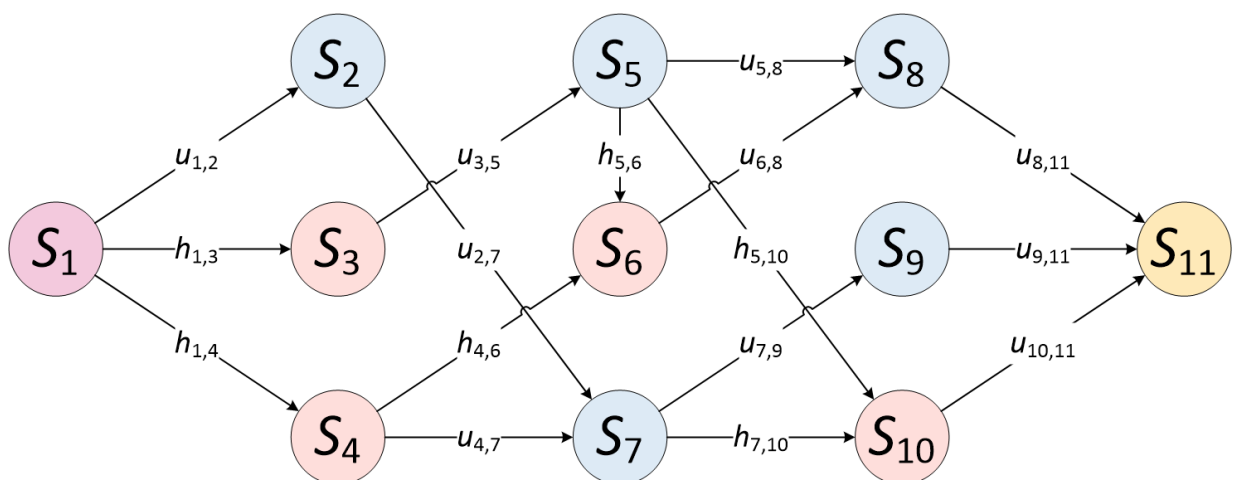


Рисунок 3.1 — Приклад ситуаційної мережі

Наведений граф має особливості. Головна з них полягає в тому, що граф відображає переходи з однієї ситуації в іншу (переміщення АМС у просторі) не тільки через реалізацію керівного впливу, але й через вплив перешкод (вплив оточення). На рис. 3.1 показано, що зі стану  $S_1$  можливий перехід у стан  $S_2$  через реалізацію керівного впливу  $u_{1,2}$  або в стани  $S_3$ ,  $S_4$  через збурювальні впливи (перешкод  $h_{1,3}$  та  $h_{1,4}$  відповідно). Наведений на рис. 3.1 граф описує поведінку недетермінованої проблемної галузі. Якщо заздалегідь відомі всі можливі ситуації і переходи з однієї ситуації в інші, тоді граф описує проблемну галузь, що належить до класу обмеженої недетермінованості, і завдання планування розглядається для цієї проблемної галузі. Якщо заздалегідь невідомі всі можливі ситуації (множина станів у графі на рис. 3.1) і, як наслідок, невідомі всі переходи, тоді завдання планування розглядається для проблемної галузі, що належать до типу необмеженої недетермінованості. Забезпечення автономності функціонування АМС саме для такої проблемної галузі є актуальним завданням на сучасному етапі й у цій роботі розглядається модель перепланування маршруту для цього випадку.

Стани (ситуації) на рис. 3.1 можуть бути повністю або частково спостережуваними. Якщо будь-яка ситуація в процесі сприйняття чітко й однозначно ідентифікується (при зіставленні з описом у БЗ однозначно належить до одного із шаблонів), то модель планування необхідно підбирати для повністю спостережуваної проблемної галузі. Якщо результат сприйняття ситуації неможливо однозначно порівняти з якимось одним шаблоном із БЗ, то модель планування необхідно підбирати для частково спостережуваної проблемної галузі.

Тепер можна аргументовано обґрунтувати вибір моделі планування, спираючись на введені критерії класифікації проблемної галузі.

Умовне планування використовується в повністю або частково спостережуваних, обмежено недетермінованих, динамічних проблемних галузях.

Планування для повністю спостережуваного випадку зводиться до того, що в «класичний план» (послідовність етапів (дій АМС)) вставляються операції сприйняття на кожному його етапі, що виконують перевірки умов, необхідних для виконання наступного етапу плану [64]. Обирається та гілка плану, умови якої відповідають результатам сприйняття (даним від сенсорів). По суті [126], умовне планування, інтегроване з реалізацію умовного плану, є ситуаційним управлінням в інтерпретації [115, 122, 127]. Розглянемо це на прикладі рис. 3.1. Нехай ціль АМС полягає в переміщенні з вихідної точки (ситуація  $S_1$ ) до цільової (ситуація  $S_{11}$ ). Відповідно до принципів умовного планування буде створено план у вигляді графа на рис. 3.1. Для його реалізації на етапі переміщення система ситуаційного управління АМС має використовувати знання про план (маршрут) переміщення. Ці знання можна подати послідовністю зв'язаних трійок  $(S_i - u_{i,j} - S_j)$ . Тоді «класичний» 5-етапний план (маршрут)  $S_1, S_2, S_7, S_9, S_{11}$  буде поданий порціями знань, розподілених за п'ятьма етапами (рис. 3.1):

$$\langle (S_1 - u_{1,2} - S_2), (S_2 - u_{2,7} - S_7), (S_7 - u_{7,9} - S_9), (S_9 - u_{9,11} - S_{11}) \rangle, \quad (3.1)$$

а умовний план з урахуванням можливих розгалужень, обумовлених перешкодами, буде доповнено знаннями для кожного етапу:

$$\begin{aligned} & \langle (S_1 - u_{1,2} - S_2), \{ (S_2 - u_{2,7} - S_7), (S_3 - u_{3,5} - S_5), (S_4 - u_{4,7} - S_7) \}, \\ & \{ (S_5 - u_{5,8} - S_8), (S_6 - u_{6,8} - S_8), (S_7 - u_{7,9} - S_9) \}, \\ & \{ (S_8 - u_{8,11} - S_{11}), (S_9 - u_{9,11} - S_{11}), (S_{10} - u_{10,11} - S_{11}) \} \rangle \end{aligned} \quad (3.2)$$

Наведемо коментарі до умовного плану (3.2). На другому етапі реалізації плану в (3.2) передбачено додатково дві умови  $S_3, S_4$ . У плані передбачено, що,

незважаючи на те, що в ситуації  $S_1$  буде реалізовано управління  $u_{1,2}$ , ситуація  $S_2$  не буде досягнута через вплив перешкоди. Прояв перешкоди  $h_{1,4}$  подано у вигляді переходу зі стану  $S_1$  до стану  $S_4$ . В умовному плані це передбачено у вигляді розгалуження плану: із ситуації  $S_4$  встановлено перехід у ситуацію  $S_7$  у результаті реалізації управління  $u_{4,7}$ .

Умовне планування в частково спостережуваній проблемній галузі має такі особливості. Для частково спостережуваної проблемної галузі результати сприйняття неможливо однозначно віднести до однієї з усіх можливих ситуацій (опису). Тут можливі два варіанти.

Для першого варіанта невизначеність зводиться до того, що результат сприйняття повністю не збігається з жодною з можливих ситуацій, але за деяким фрагментом повного опису ситуації точно збігається з кількома з можливих ситуацій. Із такою невизначеністю сприйняття працює теорія ймовірностей. Відомі підходи до перепланування маршруту АМС для цієї проблемної галузі, засновані на імовірнісних моделях [128–132].

Для другого варіанту невизначеність полягає в тому, що результат сприйняття не має жодного фрагмента з його подання, який би однозначно з повною упевненістю збігався хоча б з однією ситуацією (її фрагментом). Із такою невизначеністю сприйняття працює теорія нечітких множин. Відомі підходи до перепланування маршруту АМС для цієї проблемної галузі, засновані на нечітких моделях [19, 133–135].

Більшість сучасних АМС розроблено на основі концепції обмеженої детермінованості проблемної галузі. Перспективні дослідження спрямовані на проблемні галузі необмеженої недетермінованості. Для цієї концепції пропонуються третій і четвертий зі згаданих вище підходів до перепланування маршруту, а саме: перепланування на основі контролю виконання плану та безперервне планування. Розглянемо ці підходи.

Необмежена недетермінованість на прикладі рис. 3.1 зводиться до того, що заздалегідь невідомі:

- 1) кількість усіх можливих ситуацій  $S_i$  та їх опис;
- 2) апріорні знання  $(S_i - u_{i,j} - S_j)$  для усіх можливих ситуацій  $S_i$ , що пов'язують результат виконання команди в умовах попереднього етапу плану.

Для подолання невизначеності першого випадку різними авторами пропонуються методи, що в основному базуються на нечітких моделях [116, 136]. Невизначеність другого випадку в основному враховується в імовірнісних моделях [131]. Завдання планування для проблемної галузі, яка характеризується цим видом невизначеності, пропонується вирішувати на основі марківських моделей [74, 130, 131].

У роботі пропонується підхід до вирішення завдання маршрутизації АМС (розробка маршруту і реалізація управління переміщенням уздовж маршруту), в якому інтегровані три концепції: класифікації ситуацій на основі абстрагування та узагальнення [116, 121, 137], ситуаційного управління [115, 126] і перепланування на основі контролю виконання плану [64, 107].

У пропонованому підході функціонування в часі АМС розчленовується на етапи. Етап функціонування пов'язаний з етапом плану (маршруту) і включає три фази: контроль виконання попереднього етапу плану, перевірку умов, необхідних для продовження реалізації плану, і безпосередньо реалізацію етапу плану.

Перша фаза — контроль виконання плану — реалізується на основі моделі сприйняття даних від сенсорів [62], в якій реалізована концепція абстрагування й узагальнення. Ступінь виконання фрагмента плану оцінюється на основі опису ситуації у вигляді сенсу слів високого рівня абстрагування.

Друга фаза — перевірка умов, необхідних для продовження реалізації плану. У реальних оточеннях, що належать до необмеженої недетермінованості, в процесі реалізації будь-якого етапу плану можуть виникати обурення, що призводять до того, що передбачені планом дії не спричиняють очікуваних, планованих ситуацій. Тому після виконання чергового етапу плану необхідний контроль його виконання. У літературі розглядаються два способи організації контролю виконання плану. У першому способі, названому контролем дії [64],

перевіряється оточення для визначення того, що наступний етап плану виявиться здійсненим за умови застосування дій, передбачених планом. Другий спосіб, названий контролем плану [64], передбачає перевірку фрагмента плану, що залишився. У цьому дослідженні розглядається перший спосіб, а саме контроль дій. Покажемо суть способу. Для цього перейдемо до розгляду ситуації у вигляді множини ознак і будемо використовувати терміни «повна ситуація», припускаючи, що вона представлена на всій безлічі ознак, і «фрагмент ситуації» як деяку підмножину ознак.

Реалізація плану на основі концепції ситуаційного управління, як уже зазначалося, є багатоетапним процесом прийняття керівних впливів із метою перетворення деякої вихідної ситуації  $C_0 \subset S_0$  на кінцеву  $C^* \subset S_n$ , де  $C_0, C^*$  — фрагменти повної ситуації  $S_i$ ;  $S_0, S_n$  — відповідно, повна вихідна ситуація і повна кінцева ситуація на  $n$ -му кроці управління відповідно.

Розглянемо перші два етапи вже відомого плану  $S_1, S_2, S_7, S_9, S_{11}$ . За відсутності збурень його реалізацію методом ситуаційного управління можна подати як:

$$\{C_1\} \xrightarrow{u_{1,2}} \{C_2, C'_2\} \xrightarrow{u_{2,7}} \{C_7, C'_7\} \xrightarrow{u_{7,9}} \{C'_9\} \quad (3.3)$$

Якщо в повній ситуації  $S_1$  присутній фрагмент  $C_1$  (необхідна та достатня умова для виконання першого етапу плану), то за відсутності збурень реалізація управління  $u_{1,2}$  обов'язково приводить до появи фрагмента ситуації  $C'_2$ . Тепер, якщо на другому етапі плану в повній ситуації  $S_2$  присутні обидва фрагмента  $C'_2$  и  $C_2$ , які становлять необхідні і достатні умови для виконання другого етапу плану, то управління  $u_{2,7}$  приводить до появи фрагмента ситуації  $C'_7$ . Однак, якщо фрагмент  $C_2$  відсутній через дії перешкод, то управління  $u_{2,7}$  вже не приведе до появи цього фрагмента, а отже на третьому етапі виконання плану не

будуть виконуватися умови для його реалізації. На рис. 3.2 графічно показані наведені вище міркування.

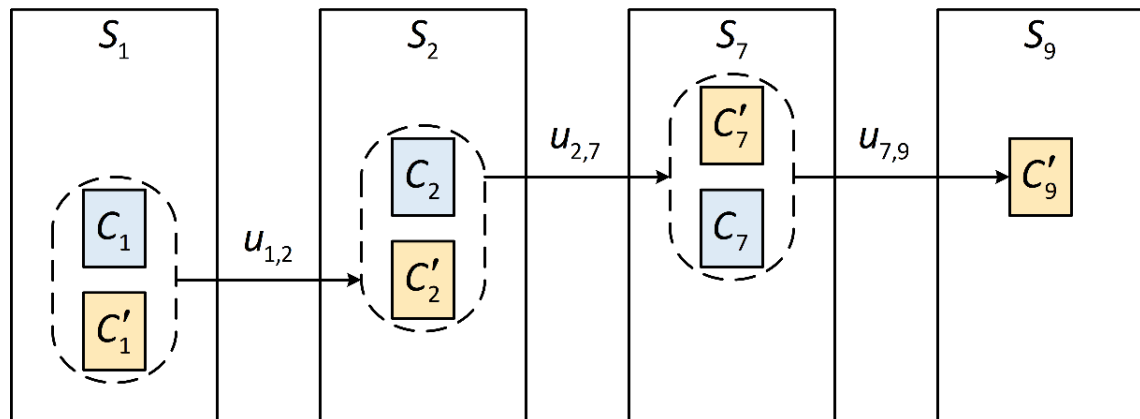


Рисунок 3.2 — Ілюстрація ситуаційного управління

Тобто, ситуаційна система управління, яка реалізує план, має зберігати знання, які стосуються кожного етапу плану, про умови, необхідні для реалізації етапу плану (3.1), у вигляді правил:

$$IF \{C_i, C'_i\} \subset S_i THEN u_{i,j} \quad (3.4)$$

Так, на другій фазі виконання етапу плану перевірка умов, необхідних для продовження виконання плану способом контролю дії, зводиться до зіставлення результатів контролю оточення, отриманих від системи сприйняття в узагальненому абстрактному вигляді  $S_i$  у (3.4) з описом необхідних для виконання поточного етапу плану умов  $\{C_i, C'_i\}$ , поданих також сенсом слів високого рівня узагальнення й абстрагування. Якщо умова (3.4) виконується, то здійснюється перехід до третьої фази виконання етапу плану, а саме до безпосередньої реалізації дії  $u_{i,j}$ . Якщо умова не виконується, то здійснюється перепланування — виправлення або коригування решти плану. Вимога до процедури перепланування зводиться до того, щоб змін зазнала якомога менша частина плану, що залишився.

Третя фаза — реалізація етапу плану (крім безпосередньо реалізації управління  $u_{i,j}$ ) включає процедуру коригування решти плану. Коригування зводиться до видалення з плану (послідовності етапів, що залишилися для виконання) попереднього виконаного етапу плану і зміни станів етапів плану, що залишилися.

Слід відзначити, що в переліку підходів до організації планування, наведеному на початку цього розділу, було перераховано чотири варіанти. Останній із них — безперервне планування — призначений для систем, здатних існувати в деякому оточенні невизначено довго і для яких у ході виконання певного плану можуть надходити нові цілі, що вимагають відмови від актуального на попередній момент плану і переходу на виконання нового плану. Це спеціальний вид автономних систем, який не є предметом досліджень цієї роботи. Тому вказаний підхід до планування не розглядається.

### 3.2 Модель подання маршруту. База знань маршрутів

Розглянемо модель подання маршруту АМС. Ілюстрацію теоретичних викладок будемо проводити за рис. 3.3, на якому зображено множину КТРП  $\mathcal{L} = \{L_A, \dots, L_Z\}$ .  $L_i$  характеризується набором унікальних ознак. На множині  $\mathcal{L}$  можуть бути задані різні маршрути.

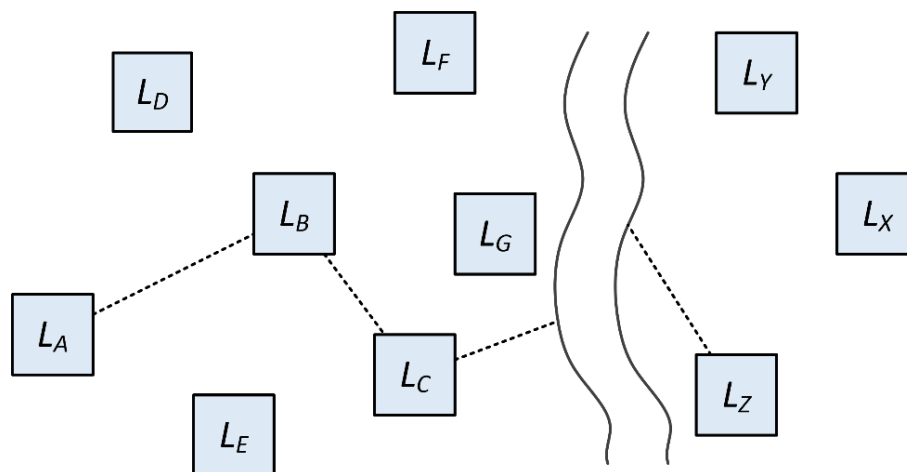


Рисунок 3.3 — Приклад робочого простору з ключовими точками

Кожній ключовій точці  $L_i$ , як і раніше в розділі 2, ставиться у відповідність факт  $\mathbf{f}_{L_i}$ , який є вектором її унікальних ознак (значень даних від сенсорів, які формують ці ознаки). Як і раніше, числовою характеристикою факту  $\mathbf{f}_{L_i}$  є нечітка характеристика факту  $\text{cf\_}\mathbf{f}_{L_i}$ . Обчислювальна модель НХ залишається такою самою, як і в розділі 2.

Із кожним фактом  $\mathbf{f}_{L_i}$  зв'язаний один факт-супутник  $^{sat}\mathbf{f}_{L_i}$ . Його обчислювальна модель змінюється порівняно з тією, що була розглянута в розділі 2. Уводиться поняття стану, в якому може знаходитися факт-супутник. Множина можливих станів фактів-супутників є множиною натуральних чисел, включаючи нуль  $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$ . У довільний момент часу факт-супутник може перебувати в одному з цих станів. Будемо позначати факт-супутник, що знаходиться в стані  $(s)$ , через  $^{sat}\mathbf{f}_{L_i}^{(s)}$  (стан позначено числом у круглих дужках).

Маршрут зв'язує вихідну КТРП, наприклад  $i$ -у, з цільовою КТРП, наприклад  $j$ -ю. Вихідною є КТРП, в якій на поточний момент знаходиться АМС і сенсори АМС відображають ознаки КТРП у значення  $\text{cf\_}\mathbf{f}_{L_i}$ . У міру переміщення АМС з однієї КТРП до іншої КТРП, відповідно до маршруту, вихідна КТРП в описі маршруту змінюється. Кінцева цільова КТРП не змінюється, поки АМС не досягне цілі.

Розглянемо маршрут, що проходить через  $m$  КТРП:

$$R = \left\langle \underbrace{L_A, L_B, L_C, \dots, L_Z}_m \right\rangle, \quad (3.5)$$

У маршруті (3.5) вихідною КТРП є  $L_A$ , а цільовою  $L_Z$ . Будемо подавати такий маршрут послідовністю фактів-супутників, відповідних КТРП. Факт-супутник вихідної КТРП  $L_A$  знаходиться в стані  $(0)$ . У (3.5) стан факту-супутника КТРП  $L_B$  набуде значення  $(1)$ , стан факту-супутника КТРП  $L_C$  набуде

значення (2) і так далі. Факт-супутник цільової КТРП  $L_z$  набуде значення  $(m-1)$ . Ціле число  $(i)$ , що позначає стан факту-супутника КТРП, за змістом відображає відстань цієї КТРП у маршруті (послідовності у (3.5)) по відношенню до вихідної КТРП. З урахуванням зроблених пояснень, маршрут (3.5) буде записано не у вигляді вектора, а у вигляді неупорядкованої множини:

$$R = \left\{ {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, \dots, {}^{sat}\mathbf{f}_{L_z}^{(m-1)} \right\} \quad (3.6)$$

Стан (0) факту-супутника в поданні маршруту завжди вказує на поточний етап обробки даних АМС. Нехай АМС почала рух по маршруту (3.6) від КТРП  $L_A$  до КТРП  $L_B$ . Після того, як АМС досягне КТРП  $L_B$ , опис маршруту оновлюється й актуальним для обробки стає маршрут, отриманий із (3.6). Він наведений нижче:

$$R = \left\{ {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(0)}, {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(1)}, \dots, {}^{sat}\mathbf{f}_{L_z}^{(m-2)} \right\} \quad (3.7)$$

У маршруті (3.7) вихідною КТРП, яка вказує на поточний етап обробки даних АМС, є  $L_B$ , а найближчою (локальною) цільовою КТРП є  $L_C$ . У маршруті (3.6) вихідною КТРП була  $L_A$ , а цільовою  $L_B$ . Тобто, у міру переміщення АМС уздовж маршруту опис актуального маршруту змінюється після досягнення найближчої цільової КТРП.

Розглянемо графічне зображення маршруту на спрощеному робочому просторі АМС (рис. 3.4). На рисунку показано одновимірний простір з п'яти КТРП (упорядкування ідентифікаторів КТРП не є обов'язковим для ілюстрації графічного зображення маршруту) за двома різними маршрутами.

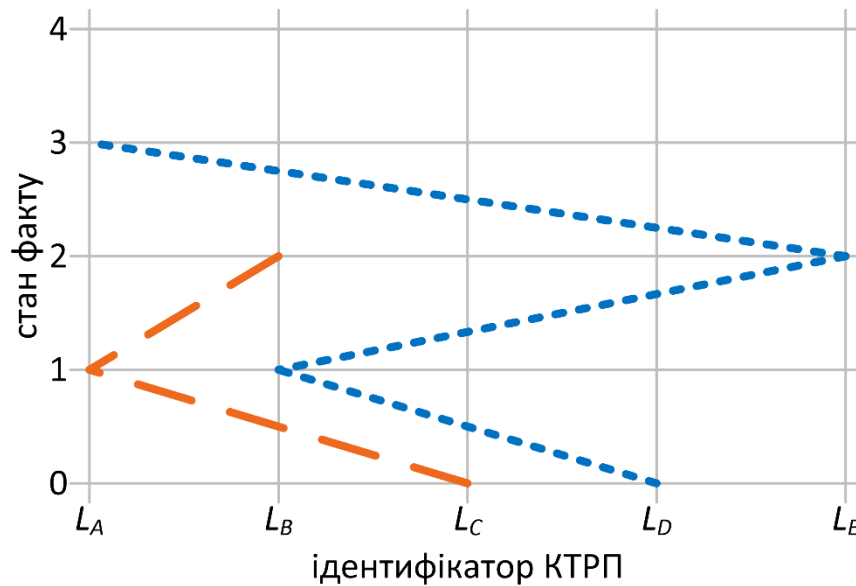


Рисунок 3.4 — Приклад зображення маршрутів за допомогою діаграми

Перший маршрут подано множиною:

$$R_1 = \left\{ \text{sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(0)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(2)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(3)} \right\}. \quad (3.8)$$

У маршруті (3.8) КТРП  $L_D$  є вихідною. Маршрут (3.8) проходить через КТРП  $L_B$  та КТРП  $L_E$ , кінцевою цільовою є КТРП  $L_A$ . На рис. 3.4 маршрут (3.8) зображено синьою лінією.

Другий маршрут подано множиною:

$$R_2 = \left\{ \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(0)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(1)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(2)} \right\}. \quad (3.9)$$

Другий маршрут зображено на рис. 3.4 помаранчевою лінією. Маршрут (3.9) включає три КТРП:  $L_C$ ,  $L_A$  та  $L_B$ .

Незважаючи на те, що маршрут (3.6) подано у вигляді невпорядкованої множини фактів-супутників, завдяки введенню стану факту-супутника послідовність елементів цієї множини можна відновити шляхом сортування за зростанням (спаданням) значень, які визначають стан фактів-супутників. У

цьому легко переконатися з аналізу графіків маршрутів на рис. 3.4. Якщо відстежувати факти-супутники зверху-вниз (від кінцевої цільової КТРП до КТРП, в якій зараз знаходиться АМС), то можна отримати маршрут у вигляді спадної за значеннями станів послідовності фактів-супутників КТРП. Якщо відстежувати знизу-вгору від вихідної точки, в якій зараз знаходиться АМС, до цільової, то одержимо маршрут у вигляді висхідної за значеннями станів послідовності фактів-супутників КТРП.

Модель подання маршруту виконує двоєдине завдання. З одного боку, вона використовується планувальником маршруту для перепланування на кожному етапі переміщення уздовж маршруту. Планувальник маршруту постійно модифікує актуальний маршрут відповідно до поточного місцезнаходження АМС, тому опис маршруту (модель подання (3.6)) динамічно змінюється. З іншого боку, знання, що подають актуальний на поточний момент часу маршрут, оперативно використовуються системою ситуаційного управління АМС. Щоб модель маршруту відображала актуальну на поточний момент найближчу ціль, для системи ситуаційного управління необхідно ввести у модель фактор упевненості кожного факту-супутника, що входять до подання маршруту (3.6). Із урахуванням цього модель маршруту набуде вигляду (3.10).

$$R = \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \right\rangle, \dots, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_Z}^{(m)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_Z}^{(m-1)} \right\rangle \right\}. \quad (3.10)$$

БЗ про маршрути АМС містить множину маршрутів у вигляді (3.10). До БЗ входять типові, часто використовувані фрагменти маршрутів, що зв'язують окремі вузлові КТРП, через які проходить множина інших маршрутів більшої довжини. Ці маршрути в оперативному режимі синтезуються з двох і більше типових маршрутів планувальником маршрутів, коли потрібно перепланування маршруту. Метод перепланування маршруту шляхом конкатенації типових маршрутів розглядається в наступному підрозділі. Типові маршрути

формується методом машинного навчання в міру накопичення даних про траєкторії переміщення АМС під час виконання завдань.

### 3.3 Модель планувальника маршрутів: синтез маршруту методом конкатенації типових фрагментів маршруту

Модель планувальника маршрутів на основі методу конкатенації відомих фрагментів маршруту опишемо, за формою подання маршрутів (3.10).

Вважатимемо, якщо є відомим маршрут на певній послідовності КТРП, то є відомим зворотний маршрут у вигляді оберненої послідовності тих же КТРП.

Завдання синтезу може виникати тоді, коли наявні знання АМС не містять маршруту, що зв'язує КТРП  $L_A$  з КТРП  $L_Z$ .

Побічне просте завдання побудови такого маршруту, що не вимагає синтезу, виникає, коли знання АМС містять маршрут, що включає обидві КТРП  $L_A$  та  $L_Z$ , але ці КТРП не є вихідною та кінцевою цільовою точками, відповідно, для цього маршруту. Таке завдання вирішується «вирізанням» необхідного фрагмента з відомого маршруту з подальшою зміною станів у формі (3.10) таким чином, щоб вихідна КТРП  $L_A$  мала стан (0), а кінцева цільова ( $m-1$ ), де  $m$  — довжина вирізаного фрагмента.

Наприклад, розглянемо завдання побудови маршруту, що поєднає КТРП  $L_B$  і  $L_D$ , використовуючи відомий маршрут  $R_1$  заданий у формі (3.10):

$$R_1 = \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \right\rangle, \right. \\ \left. \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(3)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(3)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(4)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(4)} \right\rangle \right\}.$$

В результаті вирішення такого завдання отримаємо:

$$R_2 = \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(0)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(1)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)}, cf_{-} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)} \right\rangle \right\}.$$

### 3.3.1 Вимоги до знань про оточення, що необхідні для можливості синтезу маршрутів

Розглянемо можливі ситуації наявності знань про вихідну та кінцеву цільову точки маршруту, що потрібно синтезувати:

1. Ситуації наявності знань про вихідну точку маршруту, що потрібно синтезувати:

а) вихідна точка може бути вихідною в одному або декількох маршрутах із множини відомих маршрутів  $\mathcal{R}$ ;

б) вихідна точка може належати одному або декільком маршрутам із множини відомих маршрутів  $\mathcal{R}$ , але не бути у ньому/них вихідною;

с) вихідна точка може не належати жодному маршруту з множини відомих маршрутів  $\mathcal{R}$ .

2. Ситуації наявності знань про кінцеву цільову точку маршруту, що потрібно синтезувати:

а) кінцева цільова точка може бути кінцевою цільовою в одному або декількох маршрутах із множини відомих маршрутів  $\mathcal{R}$ ;

б) кінцева цільова точка може належати одному або декільком маршрутам із множини відомих маршрутів  $\mathcal{R}$ , але не бути у ньому/них кінцевою цільовою;

с) кінцева цільова точка може не належати жодному маршруту з множини відомих маршрутів  $\mathcal{R}$ .

Якщо має місце ситуація 1.с або 2.с, то синтез маршруту принципово неможливий, оскільки наявний обсяг знань про оточення є недостатнім.

Ситуації 1.б та 2.б є такими, що можна звести до ситуації 1.а та 2.а відповідно. Наприклад, якщо необхідно синтезувати маршрут з вихідною КТРП  $L_N$  і при цьому відомий маршрут  $R_j \in \mathcal{R}, R_j = \langle L_A, \dots, L_N, \dots, L_Z \rangle$ , такий, що  $\exists \pi_a(R_j = \langle L_A, \dots, L_N, \dots, L_Z \rangle) = L_N, a \in [1, 2, \dots, \text{len}(R_j)]$  ( $\pi_a(R_j)$ ), — значення  $a$ -ї

компоненти вектора  $R_j$ ), то такий маршрут можна розділити на два, в яких  $L_N$  є вихідною:  $R_{j,1} = \langle L_N, \dots, L_A \rangle$ ,  $R_{j,2} = \langle L_N, \dots, L_Z \rangle$ , і які відповідають ситуації 1.а. Для кінцевої цільової КТРП застосовні аналогічні міркування. Тому, в подальшому без обмеження загальності розглядатимемо ситуації 1.а та 2.а.

### 3.3.2 Синтез маршрутів із типових фрагментів: два фрагменти

Розглянемо можливі ситуації синтезу маршруту  $R_i$  із КТРП  $L_A$  до КТРП  $L_Z$ .

Спочатку розглянемо найпростішу ситуацію, коли існують маршрути  $R_j = \langle L_A, \dots, L_N \rangle$  та  $R_k = \langle L_N, \dots, L_Z \rangle$ , такі, що кінцева КТРП ( $L_N$ ) маршруту  $R_j \mid \exists \pi_a(R_j) = L_A, a \in [1, 2, \dots, \text{len}(R_j)]$  є вихідною КТРП ( $L_N$ ) маршруту  $R_k \mid \exists \pi_b(R_k) = L_Z, b \in [1, 2, \dots, \text{len}(R_k)]$ . Синтез маршруту  $R_i$  у формі (3.10) можна здійснити шляхом конкатенації маршрутів  $R_j$  та  $R_k$ . У синтезованому маршруті стани фактів-супутників, що входять до маршруту  $R_j$ , залишаються незмінними, а стани фактів-супутників, що входять до маршруту  $R_k$ , збільшуються на величину, що відповідає значенню стану факту-супутника КТРП  $L_N$  у маршруті  $R_j$ . Оскільки маршрути  $R_j$  та  $R_k$  містять спільну КТРП ( $L_N$ ), то після конкатенації у синтезованому маршруті  $R_i$  вона опиниться двічі, але після актуалізації станів спільна КТРП буде подана двома однаковими векторами, а отже, дубльоване значення буде фільтроване, оскільки у формі (3.10) маршрути подаються у вигляді множин.

Процес синтезу маршруту за такої ситуації продемонструємо на прикладі.

На рис. 3.5 зображено два маршрути  $R_1, R_2$ , задані на множині КТРП  $\mathcal{L} = \{L_A, L_B, L_C, L_D, L_E\}$ . Маршрут  $R_1$  заданий послідовністю КТРП  $\langle L_A, L_B, L_C \rangle$ , маршрут  $R_2$  — послідовністю КТРП  $\langle L_C, L_D, L_E \rangle$ .

У формі (3.10) маршрути  $R_1, R_2$  записуються таким чином:

$$\begin{aligned} R_1 &= \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \right\rangle \right\}; \\ R_2 &= \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(0)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(1)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(2)} \right\rangle \right\}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

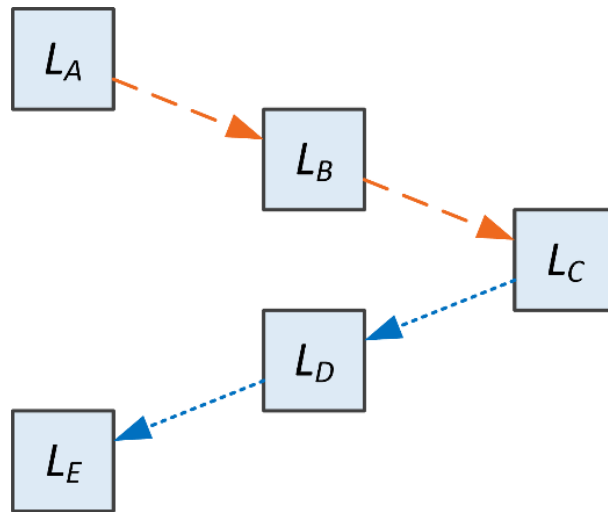


Рисунок 3.5 — Маршрути  $R_1$  (помаранчева лінія) та  $R_2$  (синя лінія)

Розглянемо завдання синтезу маршруту  $R_3$ , що має поєднувати КТРП  $L_A$  із КТРП  $L_E$ . Із рис. 3.5 видно, що такий маршрут можна побудувати шляхом послідовного проходження маршрутів  $R_1$  та  $R_2$ .

Діаграми маршрутів  $R_1$  та  $R_2$  наведено на рис. 3.6 а); діаграму синтезованого маршруту  $R_3$  — на рис. 3.6 б).

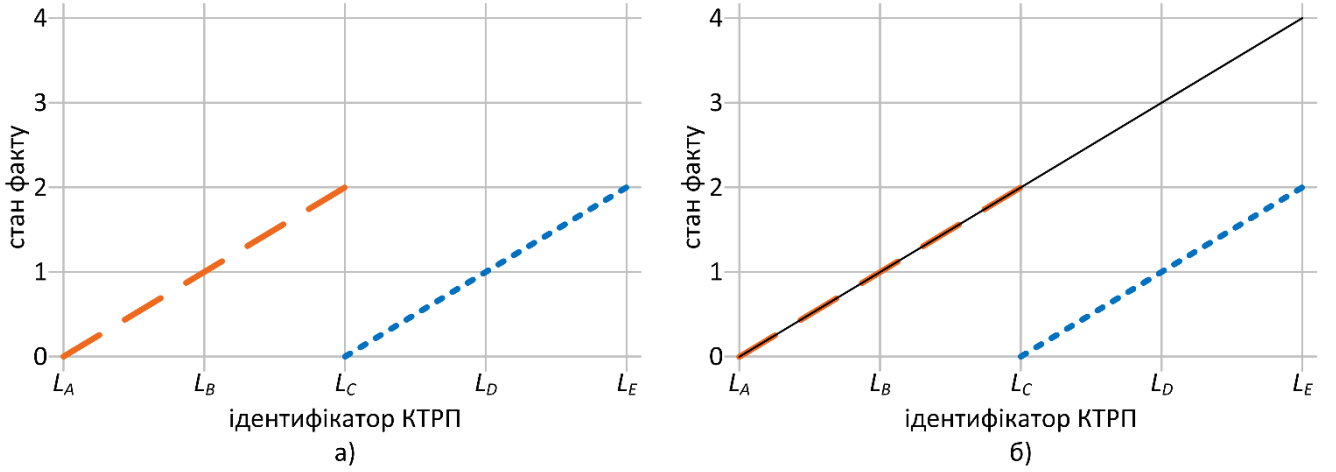


Рисунок 3.6 — Діаграми маршрутів: а)  $R_1$  (помаранчева лінія);  $R_2$  (синя лінія);  
б)  $R_3$  (чорна лінія).

Із урахуванням зазначеного синтезований маршрут  $R_3$  у формі (3.10) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \right\rangle, \right. \\
 &\quad \left. \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(0+2)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(0+2)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(1+2)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(1+2)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(2+2)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(2+2)} \right\rangle \right\} = \\
 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \right\rangle, \right. \\
 &\quad \left. \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(3)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(3)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(4)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(4)} \right\rangle \right\} = \\
 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \right\rangle, \right. \\
 &\quad \left. \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(3)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(3)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(4)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(4)} \right\rangle \right\}.
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Іншою ситуацією синтезу маршрутів із двох фрагментів є та, коли існують маршрути  $R_j = \langle L_A, \dots, L_N, \dots \rangle$  та  $R_k = \langle \dots, L_N, \dots, L_Z \rangle$ , або  $R_j = \langle L_A, \dots, L_N \rangle$  та  $R_k = \langle \dots, L_N, \dots, L_Z \rangle$ , або  $R_j = \langle L_A, \dots, L_N, \dots \rangle$  та  $R_k = \langle L_N, \dots, L_Z \rangle$ , такі, що кінцева КТРП маршруту  $R_j \mid \exists \pi_a(R_j) = L_A, a \in [1, 2, \dots, \text{len}(R_j)]$  не є вихідною КТРП маршруту  $R_k \mid \exists \pi_b(R_k) = L_Z, b \in [1, 2, \dots, \text{len}(R_k)]$ . Тут синтез маршруту  $R_i$  у формі (3.10) здійснюється шляхом конкатенації фрагментів маршрутів  $R_j$  та  $R_k$ : до

маршруту  $R_i$  включаються фрагмент  $\langle L_A, \dots, L_N \rangle$  маршруту  $R_j$  та фрагмент  $\langle L_N, \dots, L_Z \rangle$  маршруту  $R_k$ . У маршруті  $R_i$  стани фактів-супутників, що входять до фрагмента  $\langle L_A, \dots, L_N \rangle$ , залишаються незмінними, а стани фактів-супутників, що входять до фрагмента  $\langle L_N, \dots, L_Z \rangle$ , збільшуються на величину, що відповідає значенню стану факту-супутника  $L_N$  з фрагмента  $\langle L_A, \dots, L_N \rangle$ . Як і в першій ситуації, дублювання присутності КТРП  $L_N$  у синтезованому маршруті  $R_i$  буде автоматично усунуте.

Процес синтезу маршруту за такої ситуації продемонструємо на прикладі.

На рис. 3.7 зображено два маршрути  $R_1, R_2$ , заданих на множині КТРП  $\mathcal{L} = \{L_A, L_B, L_C, L_D, L_E\}$ . Маршрут  $R_1$  заданий послідовністю КТРП  $\langle L_A, L_B, L_D, L_C \rangle$ , маршрут  $R_2$  — послідовністю КТРП  $\langle L_C, L_D, L_E \rangle$ .

У формі (3.10) маршрути  $R_1, R_2$  записуються таким чином:

$$R_1 = \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(3)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(3)} \right\rangle \right\}; \quad (3.13)$$

$$R_2 = \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(0)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_C}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(1)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(2)} \right\rangle \right\}.$$

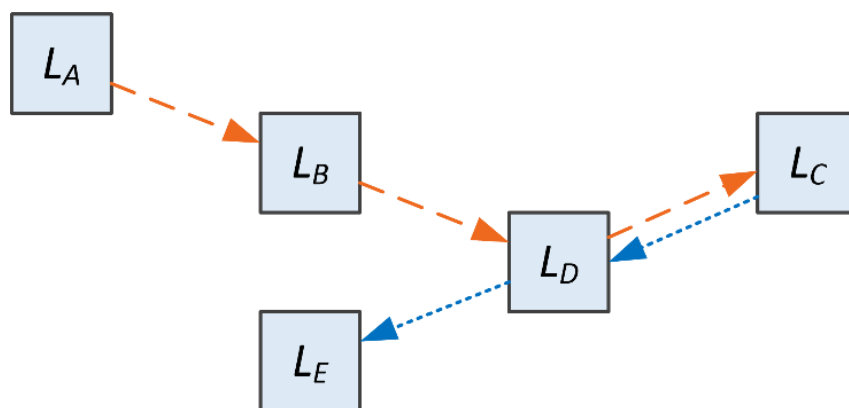


Рисунок 3.7 — Маршрути  $R_1$  (помаранчева лінія) та  $R_2$  (синя лінія)

Розглянемо завдання синтезу маршруту  $R_3$ , що має поєднувати КТРП  $L_A$  із КТРП  $L_E$ . Із рис. 3.7 видно, що такий маршрут можна побудувати шляхом послідовного проходження фрагмента  $\langle L_A, L_B, L_D \rangle$  маршруту  $R_1$  та фрагмента  $\langle L_D, L_E \rangle$  маршруту  $R_2$ .

Діаграми маршрутів  $R_1$  та  $R_2$  наведено на рис. 3.8 а); діаграму синтезованого маршруту  $R_3$  — на рис. 3.8 б).

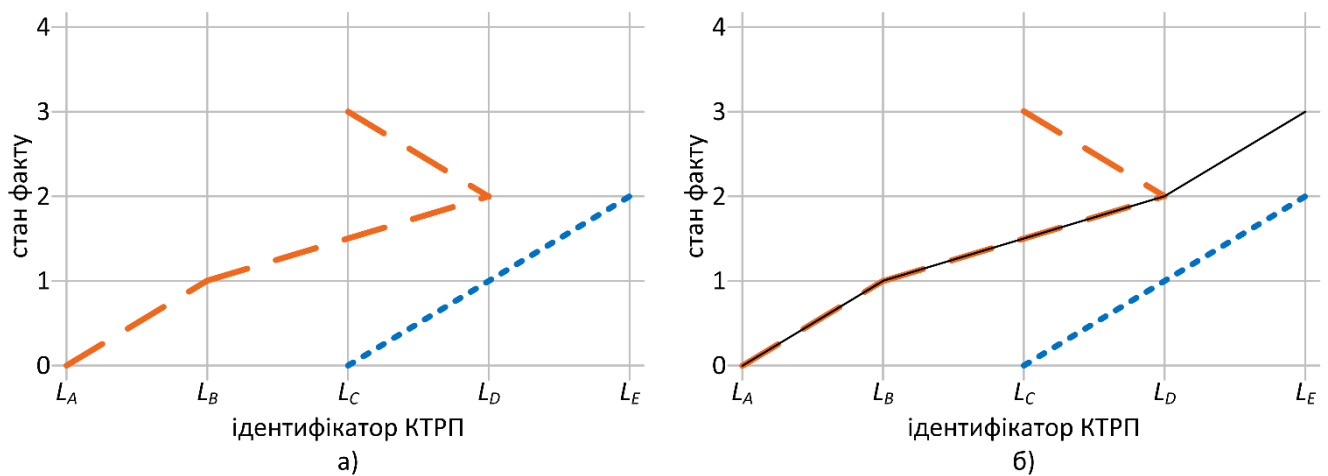


Рисунок 3.8 — Діаграми маршрутів: а)  $R_1$  (помаранчева лінія);  $R_2$  (синя лінія);  
б)  $R_3$  (чорна лінія).

Із урахуванням зазначеного синтезований маршрут  $R_3$  у формі (3.10) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned}
 R_3 = & \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)} \right\rangle, \right. \\
 & \left. \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(0+2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(0+2)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(1+2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(1+2)} \right\rangle \right\} = \\
 = & \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)} \right\rangle, \right. \\
 & \left. \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(0+2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(0+2)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(1+2)}, cf\_{}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(1+2)} \right\rangle \right\} =
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$= \left\{ \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, \text{cf\_} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, \text{cf\_} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \right\rangle, \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)}, \text{cf\_} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(2)} \right\rangle, \right. \\ \left. \left\langle {}^{sat}\mathbf{f}_{L_E}^{(3)}, \text{cf\_} {}^{sat}\mathbf{f}_{L_D}^{(3)} \right\rangle \right\}.$$

Із вищезазначеного можна зробити висновок, що перша ситуація синтезу маршрутів із двох фрагментів є окремим випадком другої ситуації.

У подальшому для збереження загальності під час синтезу маршрутів (або їх фрагментів) із двох фрагментів розглядатимемо другий випадок.

### 3.3.3 Синтез маршрутів із типових фрагментів: довільне число фрагментів

Попередньо розглянули модель синтезу маршруту з двох фрагментів (табл. 3.1, ситуація № 1), що містять спільну КТРП. Загалом може виникнути ситуація, коли два фрагменти, які містять вихідну точку (початковий фрагмент) та кінцеву цільову точку (кінцевий фрагмент) маршруту, що синтезується, відповідно, можуть не мати спільних точок (табл. 3.1, ситуації № 2–3). Тут потрібно застосувати пошук додаткових фрагментів, що дозволять зов'язати початковий та кінцевий фрагменти.

Таблиця 3.1 — Ситуації, що виникають під час синтезу

| № | Початковий фрагмент                      | Проміжні фрагменти                                                            | Кінцевий фрагмент                        |
|---|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1 | 2                                        | 3                                                                             | 4                                        |
| 1 | $\langle L_A, \dots, L_N, \dots \rangle$ | —                                                                             | $\langle \dots, L_N, \dots, L_Z \rangle$ |
| 2 | $\langle L_A, \dots, L_N, \dots \rangle$ | $\langle \dots, L_N, \dots, L_S, \dots \rangle$                               | $\langle \dots, L_S, \dots, L_Z \rangle$ |
| 3 | $\langle L_A, \dots, L_N, \dots \rangle$ | $\langle \dots, L_N, \dots \rangle, \dots, \langle \dots, L_S, \dots \rangle$ | $\langle \dots, L_S, \dots, L_Z \rangle$ |

Пошук додаткових фрагментів запропоновано здійснювати за допомогою пошуку в глибину (depth-first search, DFS) на множині відомих маршрутів. Відповідний алгоритм наведено нижче:

---

**Алгоритм синтезу маршруту руху з КТРП  $L_{start}$  до КТРП  $L_{goal}$** 


---

```

1: function Planning( $L_{start}, L_{goal}, \mathcal{R}$ ):
2:    $\mathcal{V} \leftarrow \emptyset$ 
3:   for  $R_i \in \mathcal{R} \mid \exists \pi_a(R_i) = L_{start}$  :
4:     if  $\exists \pi_b(R_i) = L_{goal}$  :
5:       return  $R_i^{[a,b]}$ 
6:     for  $\pi_b(R_i) \mid \pi_b(R_i) \notin \mathcal{V}, b = a - 1, a + 1, a - 2, a + 2 \dots$ :
7:        $\mathcal{V} \leftarrow \mathcal{V} + \{\pi_b(R_i)\}$ 
8:        $P \leftarrow \text{Concatenate}(R_i^{[a,b]}, \text{Planning}(\pi_b(R_i), L_{goal}, \mathcal{R} \setminus R_i))$ 
9:       if  $P \neq \emptyset$ :
10:        return  $P$ 
11:  return  $\emptyset$ 

```

---

Наведений алгоритм узагальнює усі попарні комбінації ситуацій 1.a, 1.b з ситуаціями 2.a, 2.b. Дані комбінації відповідають випадку, коли синтез необхідного маршруту є принципово можливим, тобто наявний обсяг знань про оточення є достатнім.

Для ситуацій 1.c та 2.c (синтез маршруту принципово неможливий) пропонується використовувати процедуру відхилення від маршруту, коли із множини КТРП, що є безпосередньо зв'язаними із поточним положенням АМС, обирається випадкова КТРП і визначається локальною ціллю переміщення. Дана процедура є такою, що масштабується на більш віддалені від поточного положення АМС КТРП.

### **3.4 Модель планувальника маршрутів: створення типових фрагментів маршруту методом машинного навчання**

Для формування БЗ АМС про типові маршрути пропонується використати методи машинного навчання, а саме навчання з підкріпленням. Відповідно до підходу навчання з підкріпленням побудова глобальних маршрутів та їх типових фрагментів здійснюється на основі взаємодії із оточенням. Воно дає винагороду

за ці дії, а агент продовжує їх виконувати. Такий підхід дозволить застосовувати цей метод для широкого кола ситуацій і пристроїв.

Підхід полягає в такому: мобільний агент, який взаємодіє із оточенням, описаним у вигляді марківського процесу прийняття рішень (МППР), виконує певні дії (із заздалегідь визначеної множини дій) у відповідь на стан оточення. Із використанням алгоритмів з частковим навчанням виконується пошук такої стратегії, щоб станам оточення були поставлені у відповідність дії із множини дій для досягнення максимальної винагороди.

Формально підхід до побудови глобального маршруту руху мобільного агента на основі Q-learning описується за допомогою множини станів зовнішнього оточення  $\mathcal{S}$ , множини дій  $\mathcal{A}$ , множини скалярних «винагород».

У довільний момент часу  $t$  агент характеризується станом  $s_t \in \mathcal{S}$  і множиною всіх можливих дій у поточному стані середовища  $\mathcal{A}(s_t)$ . Виконуючи вибір дії  $a \in \mathcal{A}(s_t)$ , агент переходить у стан  $s_{t+1}$  і отримує винагороду  $r_t$ . Спираючись на таку взаємодію з оточенням, агент завдяки Q-learning має виробити стратегію  $\Omega: \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{A}$ , яка максимізує величину винагороди  $R = r_0 + r_1 + \dots + r_n$  у разі МППР, що має термінальний стан, або величину  $R = \gamma^0 r_0 + \gamma^1 r_1 + \dots + \gamma^n r_n$  для МППР без термінальних станів (де  $0 \leq \gamma \leq 1$  — дисконтувальний множник для «очікуваної винагороди»).

На основі винагороди, яку агент одержав від зовнішнього оточення, формується функція корисності  $Q$ , що згодом дає можливість не випадково обирати стратегію поведінки, а враховувати накопичений досвід попередньої взаємодії із зовнішнім оточенням.  $Q: \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ .

Тобто алгоритм — це функція якості від стану і дії:  $Q: \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ .

Перед навчанням  $Q$  ініціалізується випадковими значеннями. Після цього в кожен момент часу  $t$  агент вибирає дію  $a_t$ , отримує винагороду  $r_t$ , переходить у новий стан  $s_{t+1}$ , який може залежати від попереднього стану  $s_t$  і вибраної дії, й

оновлює функцію  $Q$ . Оновлення функції використовує зважене середнє між старим і новим значеннями:

$$Q^{new}(s_{t+1}, a_{t+1}) = Q(s_t, a_t) + \lambda \cdot (r_t + \gamma \cdot \max_a (Q^{new}(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t))),$$

де  $\lambda$  — швидкість навчання.

Головним елементом у підході на основі Q-learning є матриця винагород — Q-таблиця стану системи. Матриця  $Q$  є набором станів системи і ваг реакції системи на різні дії. Намагаючись пройти через задане оточення, АМС вчиться уникати перешкод і знаходити маршрут руху до місця призначення. Результатом взаємодії агента і зовнішнього оточення є Q-таблиця накопиченого досвіду, за допомогою якої АМС приймає рішення про наступний крок.

Програмна реалізація алгоритму складається з двох модулів: модуль агента і модуль оточення. Агент впливає на зовнішнє оточення, а зовнішнє оточення у відповідь на дії агента впливає на нього.

На кожному кроці агент: виконує дію (вгору, вниз, вправо, вліво), отримує спостереження (новий стан), отримує винагороду. Середовище: отримує спостереження (новий стан), видає винагороду.

Алгоритми показали найшвидшу збіжність за таких параметрів:  $\lambda = 0.5, \gamma = 0.99$ .

Оптимальна Q-таблиця має значення, які дозволяють АМС виконувати кращі дії в кожному стані, даючи в результаті кращий маршрут. Значення з Q-таблиці використовуються для створення стратегії у плануванні маршруту між двома точками.

### 3.5 Модель ситуаційного управління з використанням знань про маршрут

У даному підрозділі розглядається модель ситуаційного управління переміщенням АМС уздовж маршруту з його переплануванням на кожному етапі реалізації плану переміщення. Модель ситуаційного управління з переплануванням (ситуаційне управління з переплануванням маршруту, СУПМ) базується на моделях, викладених у другому розділі. Тому, викладення СУПМ тут зводиться до опису модифікацій окремих правил (підрозд. 2.3) та адаптації алгоритму планування (підрозд. 3.3) для обробки правил процедурами, викладеними в підрозділі 2.3.

СУПМ базується на тих самих знаннях, що й система управління переміщенням, розглянута у підрозділі 2.3:

- цілі й плани переміщень;
- факти, що на основі даних від сенсорів подають можливі ситуації в оточенні АМС;
- правила, що подають знання про робочий простір АМС та стратегії керування рухом;
- базові алгоритми керування АМС у типових ситуаціях.

Особливості СУПМ порівняно з моделлю управління (підрозд. 2.3) такі.

На четвертому рівні багаточислової БЗ (рис. 2.3) цілі АМС, що вимагають переміщень, задаються зовні у вигляді цільової КТРП. У моделі СУПМ для позначення того, що КТРП є цільовою, вводяться два стани факту  $\mathbf{f}_{L_i}$ . Стан факту КТРП, яка на поточний час не є кінцевою ціллю переміщення АМС (цільова КТРП), будемо позначати як і раніше  $\mathbf{f}_{L_i}$ . Стан факту КТРП, яка на поточний час є кінцевою ціллю переміщень, будемо позначати індексом «goal» —  $^{goal}\mathbf{f}_{L_j}$ . Таким чином АМС отримує від оточення завдання на переміщення у вигляді цільової КТРП. Ця подія переключає стан факту відповідної КТРП із  $\mathbf{f}_{L_j}$  на

$^{goal}\mathbf{f}_{L_j}$ , тобто встановлюється кінцева ціль переміщень АМС. Звертається увага на те, що, на відміну від моделі, описаної в підрозділі 2.3, де завдання АМС задається у вигляді активованого маршруту, для моделі СУПМ завдання задається у вигляді кінцевої цілі (кінцевої КТРП маршруту переміщень). Сам маршрут розробляється АМС. Для цього використовується інформація щодо поточної КТРП, де знаходиться зараз АМС, і цільової КТРП у вигляді активного стану  $^{goal}\mathbf{f}_{L_j}$ . Процедура розробки маршруту активується правилами четвертого рівня багаточислової БЗ (рис. 2.3). Правила (2.4) замінюються на

$$\begin{aligned}
 R_k^{(4)}: \quad & \textbf{IF} \quad event(^{goal}\mathbf{f}_{L_j}) \textbf{ and } CF\_^{sat}\mathbf{f}_{L_i}^{(0)} \textbf{ is high} \\
 & \textbf{THEN} \quad cf\_^{sat}\mathbf{f}_{L_j}^{(p)} = 0, \quad p = 1, \dots, k, \\
 & \quad cf\_^{goal}\mathbf{f}_{L_r} = -1, \quad \forall L_r \in \mathcal{L}, \quad L_r \neq L_j, \\
 & \quad Planning(L_i, L_j, \mathcal{R}),
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

де  $\mathcal{L} = \{L_1, \dots, L_m\}$  — множина КТРП.

У (3.15) правило активізується подією, пов'язаною з появою нового завдання (кінцева ціль переміщення  $event(^{goal}\mathbf{f}_{L_j})$ ), за додаткових умов, що поточною метою переміщення є  $L_i$  ( $CF\_^{sat}\mathbf{f}_{L_i}^{(0)} \textbf{ is high}$ ). У разі активізації правила (3.15), по-перше, формуються умови для активізації усіх можливих станів факту-супутника цільової КТРП  $L_j$  ( $cf\_^{sat}\mathbf{f}_{L_j}^{(p)} = 0, \quad p = 1, \dots, k$ ); по-друге, змінюється стан фактів усіх КТРП, що не є цільовими ( $cf\_^{goal}\mathbf{f}_{L_r} = -1, \quad \forall L_r \in \mathcal{L}, \quad L_r \neq L_j$ ); по-третє, активується процедура перепланування маршруту від  $L_i$  до  $L_j$  ( $Planning(L_i, L_j, \mathcal{R})$ ). Ця процедура описана у підрозділі 3.3. Умови активізації процедури є універсальними для різних випадків. Наприклад, якщо нове завдання виникає перед АМС, коли виконання поточного завдання не закінчено, а виконано якийсь етап. У цьому разі АМС рухається до локальної цілі поточного завдання  $L_i$  і тому виконуються умови  $CF\_^{sat}\mathbf{f}_{L_i}^{(0)} \textbf{ is high}$ . В іншому випадку, коли

попереднє завдання було успішно виконано й АМС на останньому етапі маршруту досягла глобального (кінцевого) цільового  $L_j$  і при цьому у правилі нижчого рівня видалити операцію  $cf\_^{sat} \mathbf{f}_{L_i}^{(0)} = -1$ , то умова  $CF\_^{sat} \mathbf{f}_{L_i}^{(0)}$  is high в (3.15) буде зберігатися необмежено довго, поки не з'явиться нове завдання.

Враховуючи останнє зауваження правила (2.5), які деактуалізують контекст (порцію знань, що описують маршрут), коли мета досягнута, про що свідчить досягнення останньої точки маршруту,  $L_j$  набуде вигляду:

$$R_k^{(4)} : \quad \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_j}) \text{ and } CF\_^{sat} \mathbf{f}_{L_j}^{(1)} \text{ is high and } CF\_^{goal} \mathbf{f}_{L_j} \text{ is high} \quad (3.16) \\ \text{THEN} \quad cf\_^{sat} \mathbf{f}_{L_j}^{(p)} = -1, \quad p = 1, \dots, k, \quad p \neq 0, \\ cf\_^{goal} \mathbf{f}_{L_j} = -1.$$

Правило (3.16) стає активним, коли АМС досягає кінцевої КТРП маршруту ( $\text{event}(\mathbf{f}_{L_j})$ ), і ця КТРП є поточною ціллю на останньому етапі маршруту ( $CF\_^{sat} \mathbf{f}_{L_j}^{(0)}$  is high), про що свідчить активність (0)-го стану факту-супутника ( $^{sat} \mathbf{f}_{L_j}^{(0)}$ ), і ця КТРП є кінцевою ціллю маршруту (активний стан «глобальна ціль» факту  $L_j$  ( $CF\_^{goal} \mathbf{f}_{L_j}$  is high)). Досягнення кінцевої точки маршруту деактивізує всі стани, крім (0)-го супутника факту ( $cf\_^{sat} \mathbf{f}_{L_j}^{(p)} = -1, \quad p = 1, \dots, k$ ), і деактивізує стан «глобальна ціль» факту  $L_j$  ( $cf\_^{goal} \mathbf{f}_{L_j} = -1$ ).

Правила (2.7) третього рівня (рис. 2.3) також зазнають змін. Їх модифікація полягає у такому.

Локальна ціль на будь-якому поточному етапі маршруту завжди задається активністю (0)-го стану факту-супутника, зв'язаному з КТРП, яка є поточною (локальною) ціллю, наприклад, для  $L_i$  це буде  $CF\_^{sat} \mathbf{f}_{L_i}^{(0)}$  is high. Локальна ціль може бути як досягнутою, так і недосягнутою на поточному етапі обробки маршруту через таке:

– по-перше, можуть виникнути збурення під час реалізації етапу маршруту на нижніх рівнях, які призведуть до того, що АМС виявиться в іншій КТРП, а не в  $L_t$ ;

– по-друге, на ділянці маршруту між КТРП, з якої АМС переміщується на поточному етапі, та локальною ціллю  $L_t$  може виникнути непередбачена перешкода, яка не дозволить АМС досягти локальної цілі.

Отже, під час обробки будь-якого етапу потрібно розглядати три варіанти.

Перший варіант, коли локальна ціль досягнута, обробляється правилами типу:

$$\begin{aligned} R_k^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_t}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_t}^{(0)} \text{ is high} \\ & \text{THEN} \quad \text{Adjustment}({}^{sat} \mathbf{f}_{L_t}^{(0)}, {}^{goal} \mathbf{f}_{L_j}). \end{aligned} \quad (3.17)$$

Другий варіант, коли локальна ціль не досягнута та АМС виявилася в іншій КТРП, наприклад, в  $L_r$ , а не  $L_t$ , обробляється такими правилами:

$$\begin{aligned} R_k^{(3)} : \quad & \text{IF} \quad \text{event}(\mathbf{f}_{L_r}) \text{ and } CF_{-}^{sat} \mathbf{f}_{L_t}^{(0)} \text{ is high} \\ & \text{THEN} \quad \text{Planning}(L_r, L_t, \mathcal{R}). \end{aligned} \quad (3.18)$$

Третій варіант, коли непередбачена перешкода не дозволяє АМС досягти локальної цілі і вона знаходиться десь між  $L_r$ , з якої переміщається на поточному етапі, та поточною локальною ціллю  $L_t$ , потребує введення спеціального факту, назовемо його «перешкода» і будемо позначати  $\mathbf{f}_{Obst_i}$ . Коли виникає така ситуація правила нижніх рівнів активізують цей факт, а на третьому рівні цей факт обробляється правилами (2.6), як було показано в підрозділі 2.3.3.

У (3.17) процедура  $\text{Adjustment}({}^{sat} \mathbf{f}_{L_t}^{(0)}, {}^{goal} \mathbf{f}_{L_j})$  корегує маршрут у вигляді (3.7) шляхом зниження рівня стану кожного факту-супутника, які описують

фрагмент маршруту, що залишився. Ця процедура може бути реалізована у вигляді множини правил типу, наприклад, для маршруту:

$$R_1 = \left\{ \text{sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(3)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(4)} \right\}. \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} & \text{IF CF\_sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(4)} \text{ is high and CF\_goal } \mathbf{f}_{L_E} \text{ is high} \\ & \text{THEN cf\_sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(3)} = -1, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(3)} = 1; \\ & \text{IF CF\_sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(3)} \text{ is high and CF\_sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(3)} \text{ is high} \\ & \text{THEN cf\_sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(3)} = -1, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(2)} = 1; \\ & \text{IF CF\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)} \text{ is high and CF\_sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(2)} \text{ is high} \\ & \text{THEN cf\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(2)} = -1, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(1)} = 1; \\ & \text{IF CF\_sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)} \text{ is high and CF\_sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(1)} \text{ is high} \\ & \text{THEN cf\_sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)} = -1, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(0)} = 1, \\ & \text{IF CF\_sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)} \text{ is high and CF\_sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(0)} \text{ is high} \\ & \text{THEN cf\_sat } \mathbf{f}_{L_A}^{(0)} = -1. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Після виконання процедури зниження рівня стану супутників фактів, що утворюють маршрут,  $L_A$ , якого досягла АМС, переводиться у стан вихідної КТРП поточного етапу маршруту, а наступна КТРП  $L_B$  маршруту, яка знаходилася до цього в стані  $\text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(1)}$  переводиться у стан поточної цілі  $\text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(0)}$ . Про це свідчить стан (0)-го рівня (рис. 3.9): відрізок 1, що зображує маршрут (3.19), після обробки за правилами (3.20), переходить у відрізок 2, що зображує перепланований маршрут у вигляді  $R_2 = \left\{ \text{sat } \mathbf{f}_{L_B}^{(0)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_C}^{(1)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_D}^{(2)}, \text{sat } \mathbf{f}_{L_E}^{(3)} \right\}$ , актуальний на поточному етапі плану. Відрізки 3, 4 і точка 5 на рис. 3.9 зображають фрагменти маршруту, що залишилися на наступних етапах переміщення АМС уздовж маршруту (3.19).

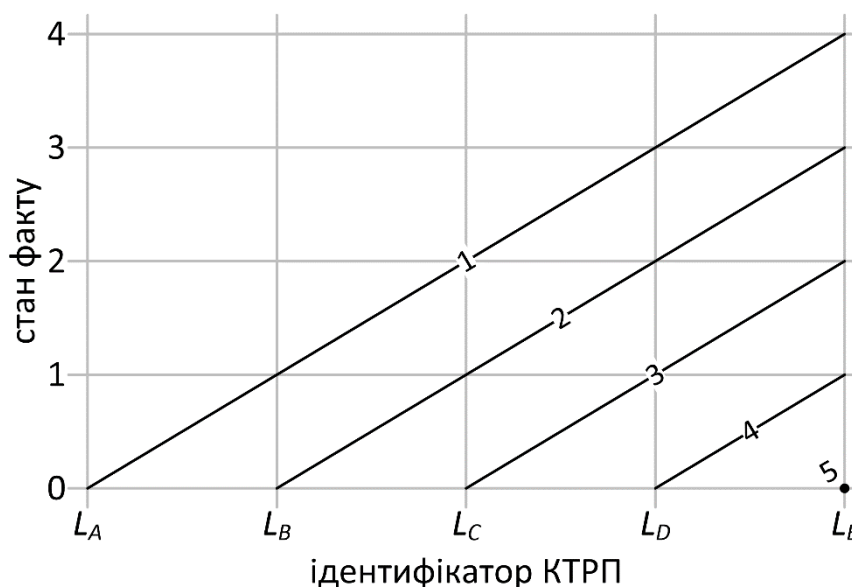


Рисунок 3.9 — Ілюстрація процесу проходження маршруту АМС

Картографічні знання (2.8–2.9), що були наведені в підрозділі 2.3.4, та їх обробка, а також знання, які деталізують стратегії руху по КТРП і між ними і стратегії керування рухом, залишаються без змін.

### 3.6 Комп'ютерні експерименти

Експериментальне дослідження СУПМ здійснювалось за допомогою комп'ютерного моделювання в межах штучного оточення, описаного у підрозділі 2.5.1. Апріорні знання АМС містили 6 таких маршрутів руху у штучному оточенні:

$$- \langle L_1, L_2, L_5, L_{10}, L_{17}, L_{18}, L_{14}, L_{15} \rangle;$$

$$- \langle L_{15}, L_{14}, L_{18}, L_{16} \rangle;$$

$$- \langle L_2, L_3, L_8, L_{11}, L_{13}, L_{15} \rangle;$$

$$- \langle L_3, L_6, L_9, L_{12}, L_{17} \rangle;$$

$$- \langle L_4, L_9 \rangle;$$

$$- \langle L_3, L_6, L_7, L_{11} \rangle.$$

Дані маршруту наведені в БЗ АМС у вигляді (3.10):

$$\begin{aligned}
R_1 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_1}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_1}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_2}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_2}^{(1)} \right\rangle, \dots, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_{15}}^{(7)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_{15}}^{(7)} \right\rangle \right\}; \\
R_2 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_{15}}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_{15}}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_{14}}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_{14}}^{(1)} \right\rangle, \dots, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_{16}}^{(7)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_{16}}^{(7)} \right\rangle \right\}; \\
R_3 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_2}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_2}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_3}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_3}^{(1)} \right\rangle, \dots, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_{15}}^{(7)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_{15}}^{(7)} \right\rangle \right\}; \\
R_4 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_3}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_3}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_6}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_6}^{(1)} \right\rangle, \dots, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_{17}}^{(7)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_{17}}^{(7)} \right\rangle \right\}; \\
R_5 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_4}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_4}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_9}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_9}^{(1)} \right\rangle \right\}; \\
R_6 &= \left\{ \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_3}^{(0)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_3}^{(0)} \right\rangle, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_6}^{(1)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_6}^{(1)} \right\rangle, \dots, \left\langle \text{sat } \mathbf{f}_{L_{11}}^{(7)}, \text{cf\_sat } \mathbf{f}_{L_{11}}^{(7)} \right\rangle \right\}.
\end{aligned}$$

### 3.6.1 Дослідження алгоритму синтезу маршруту з типових фрагментів

Для підтвердження дієздатності алгоритму синтезу маршруту з типових фрагментів було проведено експеримент із синтезу нових маршрутів у межах описаного оточення і відомих маршрутів за схемою кожна КТРП із кожною КТРП (разом  $18^2 = 324$  маршрути). Оскільки у відомих АМС маршрутах є всі КТРП штучного оточення і ці маршрути формують зв'язний граф, то такий синтез є можливим.

З аналітичного аналізу складу відомих маршрутів можна встановити, що вони не містять шляхів, які безпосередньо зв'язують такі пари КТРП:  $L_7$  та  $L_{13}$ ,  $L_{10}$  та  $L_{12}$ ,  $L_{12}$  та  $L_{14}$ . У табл. 3.2 наведено синтезовані маршрути для цих пар.

Таблиця 3.2 — Приклади синтезованих маршрутів для пар КТРП, між якими маршрути невідомі

| Початкова КТРП | Кінцева КТРП | Синтезований маршрут                                                    |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1              | 2            | 3                                                                       |
| $L_7$          | $L_{13}$     | $\langle L_7, L_6, L_3, L_8, L_{11}, L_{13} \rangle$                    |
| $L_{13}$       | $L_7$        | $\langle L_{13}, L_{11}, L_7 \rangle$                                   |
| $L_{10}$       | $L_{12}$     | $\langle L_{10}, L_{17}, L_{12} \rangle$                                |
| $L_{12}$       | $L_{10}$     | $\langle L_{12}, L_{17}, L_{10} \rangle$                                |
| $L_{12}$       | $L_{14}$     | $\langle L_{12}, L_{17}, L_{18}, L_{14} \rangle$                        |
| $L_{14}$       | $L_{12}$     | $\langle L_{14}, L_{15}, L_{13}, L_{11}, L_7, L_6, L_9, L_{12} \rangle$ |

### 3.6.2 Моделювання руху АМС за маршрутом з невідомими перешкодами

Моделювання руху АМС за маршрутом здійснювалось відповідно до подієвого підходу. Завданням АМС було досягнення кінцевої цільової КТРП  $L_{15}$  зі стартової КТРП  $L_5$ . Результати моделювання наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 — Подієве моделювання процесу руху АМС до цільової КТРП

| Подія                                              | Процедура                                           | Маршрут                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2                                                  | 3                                                   | 4                                                                                                                                                                                        |
| $event(goal L_{15}),$<br>$sat f_{L_5}^{(0)} = 1$   | $Planning(L_5, L_{15}, \mathcal{R})$                | $R = \left\{ sat f_{L_5}^{(0)}, sat f_{L_2}^{(1)}, sat f_{L_3}^{(2)}, \right.$<br>$\left. sat f_{L_8}^{(3)}, sat f_{L_{41}}^{(4)}, sat f_{L_{13}}^{(5)}, sat f_{L_{15}}^{(6)} \right\}.$ |
| $event(f_{L_2}),$<br>$sat f_{L_2}^{(1)} = 1$       | $Adjustment(sat f_{L_2}^{(1)}, goal f_{L_{15}})$    | $R = \left\{ sat f_{L_2}^{(0)}, sat f_{L_3}^{(1)}, sat f_{L_8}^{(2)}, \right.$<br>$\left. sat f_{L_{11}}^{(3)}, sat f_{L_{13}}^{(4)}, sat f_{L_{15}}^{(5)} \right\}.$                    |
| $event(f_{L_3}),$<br>$sat f_{L_3}^{(1)} = 1$       | $Adjustment(sat f_{L_3}^{(1)}, goal f_{L_{15}})$    | $R = \left\{ sat f_{L_3}^{(0)}, sat f_{L_8}^{(1)}, sat f_{L_{11}}^{(2)}, \right.$<br>$\left. sat f_{L_{13}}^{(3)}, sat f_{L_{15}}^{(4)} \right\}.$                                       |
| $event(f_{L_6}),$<br>$sat f_{L_8}^{(1)} = 1$       | $Planning(L_6, L_{15}, \mathcal{R})$                | $R = \left\{ sat f_{L_6}^{(0)}, sat f_{L_7}^{(1)}, sat f_{L_{11}}^{(2)}, \right.$<br>$\left. sat f_{L_{13}}^{(3)}, sat f_{L_{15}}^{(4)} \right\}.$                                       |
| $event(f_{L_7}),$<br>$sat f_{L_7}^{(1)} = 1$       | $Adjustment(sat f_{L_7}^{(1)}, goal f_{L_{15}})$    | $R = \left\{ sat f_{L_7}^{(0)}, sat f_{L_{11}}^{(1)}, sat f_{L_{13}}^{(2)}, \right.$<br>$\left. sat f_{L_{15}}^{(3)} \right\}.$                                                          |
| $event(f_{L_{11}}),$<br>$sat f_{L_{11}}^{(1)} = 1$ | $Adjustment(sat f_{L_{11}}^{(1)}, goal f_{L_{15}})$ | $R = \left\{ sat f_{L_{11}}^{(0)}, sat f_{L_{13}}^{(1)}, sat f_{L_{15}}^{(2)} \right\}$                                                                                                  |
| $event(f_{L_{13}}),$<br>$sat f_{L_{13}}^{(1)} = 1$ | $Adjustment(sat f_{L_{13}}^{(1)}, goal f_{L_{15}})$ | $R = \left\{ sat f_{L_{13}}^{(0)}, sat f_{L_{15}}^{(1)} \right\}$                                                                                                                        |
| $event(f_{L_{15}}),$<br>$sat f_{L_{15}}^{(1)} = 1$ | $cf\_goal f_{L_{15}} = -1$                          | —                                                                                                                                                                                        |

На першому кроці моделювання АМС було здійснено планування маршруту руху з КТРП  $L_{15}$  до КТРП  $L_5$  на основі відомих маршрутів. У

результаті планування АМС отримано такий маршрут:  $\langle L_5, L_2, L_3, L_8, L_{11}, L_{13}, L_{15} \rangle$ .

АМС розпочала рух до КТРП, що має стан (1):  $L_2$ .

На кроках 2 та 3 АМС досягає наступних за планом КТРП, а саме  $L_2$  та  $L_3$  відповідно, та виконує коригування маршруту відповідно до процедури Adjustment.

На кроці 4 АМС унаслідок впливу непередбачених перешкод опинилася у КТРП  $L_6$ , хоча за планом наступною була КТРП  $L_8$ . У такій ситуації АМС було застосовано процедуру перепланування, в результаті якої отримано новий маршрут руху:  $\langle L_6, L_7, L_{11}, L_{13}, L_{15} \rangle$ .

На кроках 5–7 АМС у штатному режимі досягає чергових за маршрутом КТРП:  $L_7$ ,  $L_{11}$  та  $L_{13}$ .

На кроці 8 АМС досягає кінцевої цільової КТРП:  $L_{15}$ .

### 3.7 Висновки до третього розділу

Для забезпечення врахування за методом ситуаційного управління випадкових змін, що можуть виникати в умовах частково недетермінованого оточення, розроблено метод динамічного ситуаційного перепланування, який забезпечує адаптацію поточного маршруту до непередбачених збурень. Цей метод використовує апріорні знання АМС про можливі маршрути руху та поточну інформацію про оточення, сформовану за допомогою сенсорних систем.

Синтез типових фрагментів маршруту (апріорних маршрутів), що використовуються для динамічного планування нових маршрутів, запропоновано виконувати, використовуючи навчання з підкріпленням. Такий підхід забезпечує використання статистичних даних, отриманих у процесі функціонування мобільних систем у заданому оточенні, для формування обмеженої множини субоптимальних фрагментів маршрутів.

Для перевірки адекватності розробленого методу проведено серії комп'ютерних експериментів, що підтверджують здатність методу до вирішення завдання перепланування маршрутів руху для уникнення непередбачуваних перешкод.

Результати розділу викладені в працях [22–24].

## РОЗДІЛ 4

### ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ НАВІГАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ НА ПРИКЛАДІ МОНІТОРИНГУ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ОБ’ЄКТІВ

У розділі розвинуто інформаційну технологію навігації АМС на основі моделі управління та перепланування, наведеної в розділах 2 та 3.

#### **4.1 Організація навігації АМС, що виконують завдання моніторингу розосереджених об’єктів**

Інформаційна технологія навігації автономних мобільних систем (ІТНАМС) поєднує в собі метод ситуаційного управління переміщенням АМС з урахуванням контексту та модель ситуаційного управління переміщенням АМС з переплануванням маршруту, що містить поєднання рішень завдань усіх етапів навігаційного циклу, динамічне перепланування маршрутів руху в разі виникнення непередбачуваних перешкод, поповнення БЗ маршрутів руху.

Основними діями, які має забезпечувати інформаційна технологія, є сприйняття АМС інформації про оточення, задання АМС цілі руху (шляхом установлення цільової КТРП або маршруту руху), визначення АМС локальної цілі руху, визначення АМС керівних впливів.

На рис. 4.1 зображено діаграму варіантів використання ІТНАМС.

За допомогою IDEF0-нотації (Integrated DEFinition — методологія функціонального моделювання та графічного подання процесів) розглянемо технологію обробки інформації в ІТНАМС від етапу збору сенсорних даних АМС до етапу формування керівних впливів. На рис. 4.2 технологія зображена у загальному вигляді. Входом процесу є дані про оточення, отримані за допомогою сенсорів. Виходом процесу є керівні впливи, що мають бути здійснені АМС. Управління процесу здійснюється на основі знань АМС про прототипи ситуацій, цілі руху, маршрути руху, робочий простір і стратегії керування рухом.

Механізмами процесу є: механізм виведення модифікованої моделі Такагі-Сугено-Канга, механізм абстрагування, алгоритм перепланування, механізм переключення уваги, механізм відстеження контексту.

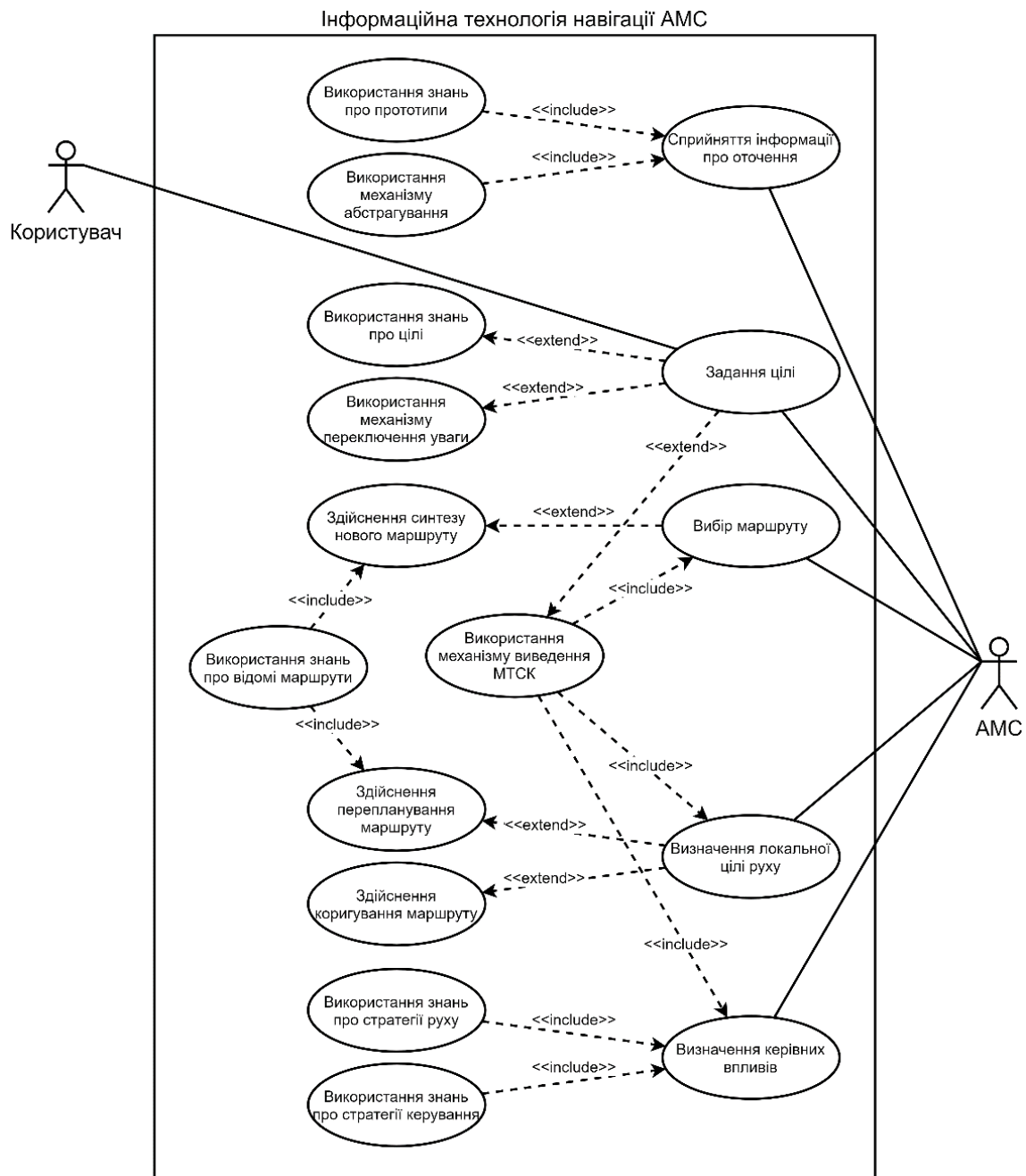


Рисунок 4.1 — Діаграма варіантів використання інформаційної технології

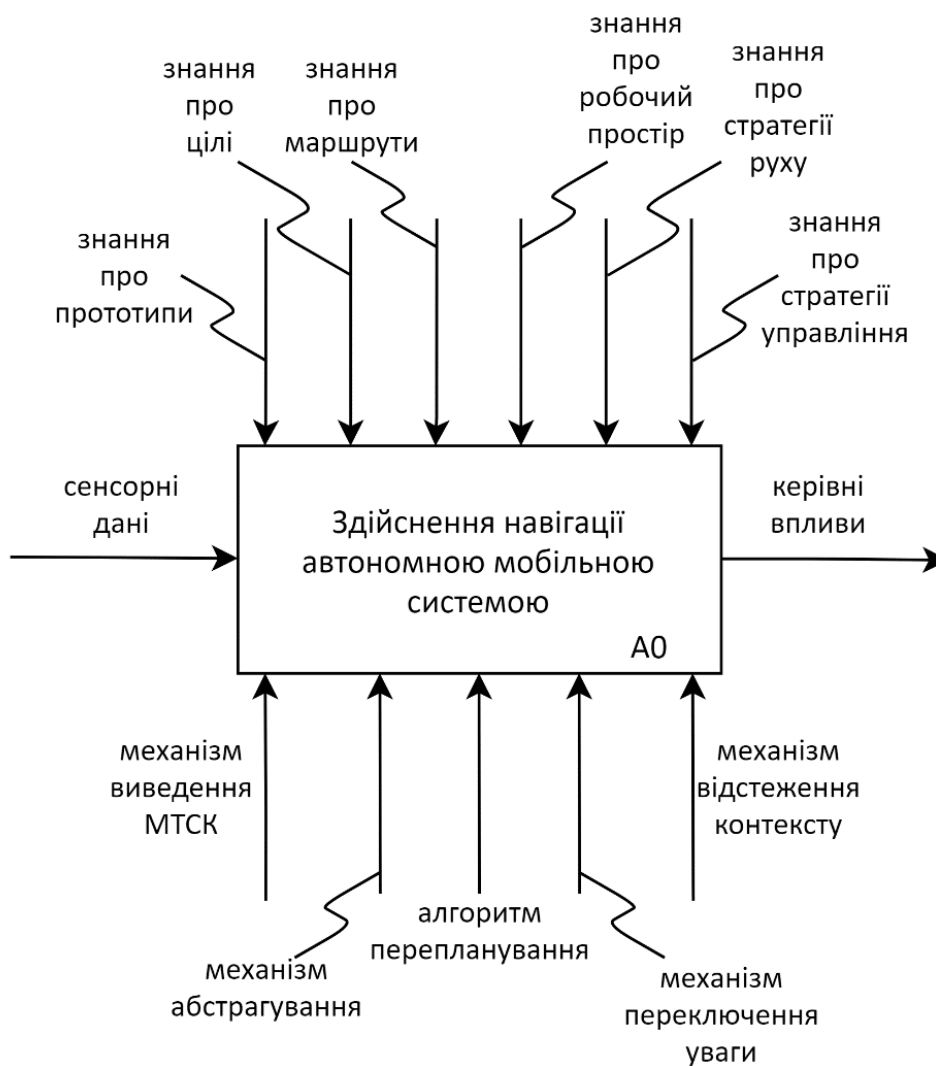


Рисунок 4.2 — Функціональне подання інформаційної технології здійснення навігації АМС у загальному вигляді, наведене за допомогою IDEF0-нотації

Декомпозиція технології обробки інформації під час здійснення навігації АМС за допомогою IDEF0T-нотації зображена на рис. 4.3. Декомпозиція виконана на 4 підпроцеси:

1) *сприйняття інформації про оточення:*

- вхід — сенсорні дані у вигляді векторів фактів  $f_i^l$ ;
- вихід — інформація про оточення у вигляді факторів упевненості фактів  $cf\_f_i^l$ ;
- управління — знання про прототипи фактів  $f_i^l$ ;
- механізми — механізм абстрагування.

2) *визначення цілі:*

- вхід — факти, що описують цілі;
- вихід — факти-супутники, що ініціалізують рух за маршрутом;
- управління — знання про цілі;
- механізми — механізм виведення МТСК, механізм переключення уваги.

3) *визначення деталей переміщення:*

- вхід — факти, що описують ключові точки, факти-супутники, що ініціалізують рух за маршрутом;
- вихід — факти-супутники стратегій управління;
- управління — знання про маршрути, про робочий простір, про стратегії руху;
- механізми — механізм виведення МТСК, алгоритм перепланування, механізм відстеження контексту.

4) *визначення керівних впливів:*

- вхід — факти-супутники стратегій управління;
- вихід — керівні впливи;
- управління — знання про стратегії управління;
- механізми — механізм виведення МТСК.

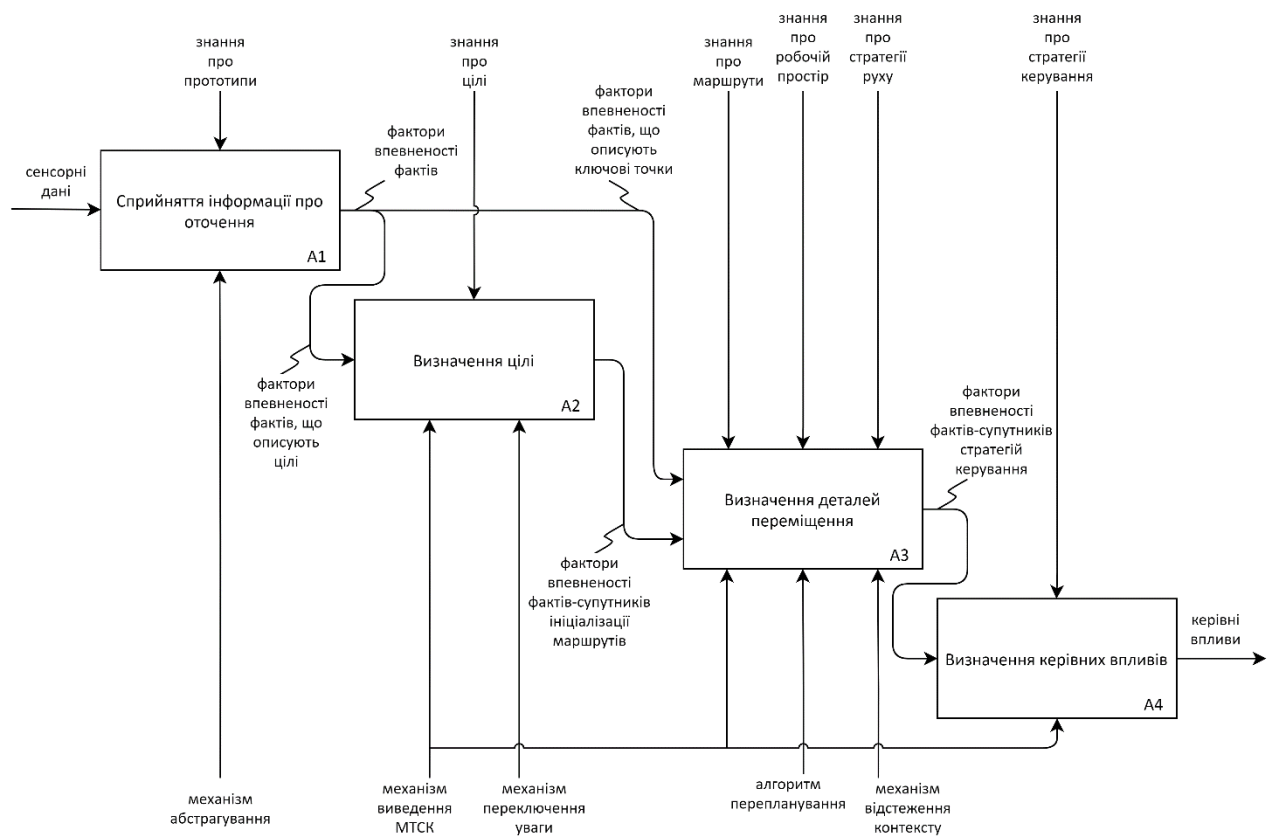


Рисунок 4.3 — Функціональне подання інформаційної технології здійснення навігації AMC у декомпозованому вигляді, наведене за допомогою IDEF0-нотації

## 4.2 Програмна реалізація

### 4.2.1 Структура програмного забезпечення

Програмна реалізація інформаційної технології навігації AMC складається з таких модулів: сприйняття та локалізація, ситуаційне управління, реалізація стратегій керування рухом, створення типових фрагментів маршруту, перепланування маршруту.

Структура програмного забезпечення наведена на рис. 4.4.

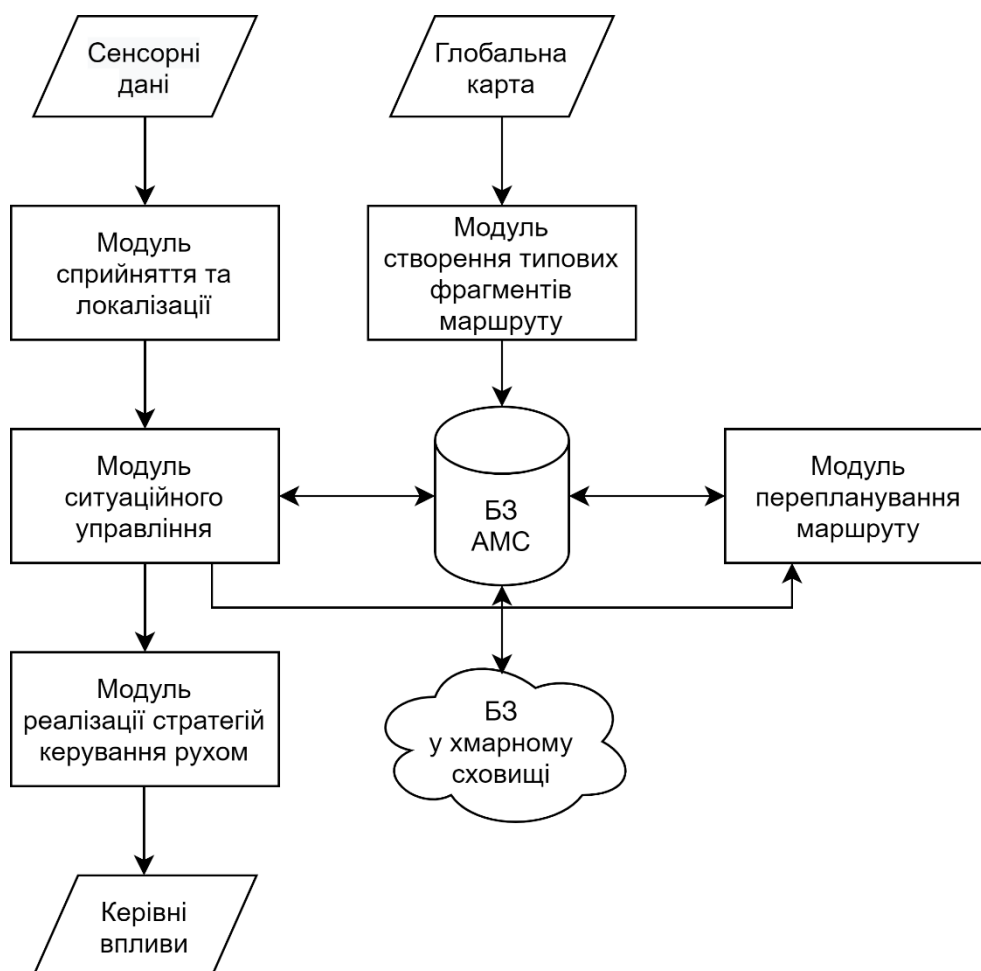


Рисунок 4.4 — Структурна схема програмного забезпечення бортової системи AMC

#### 4.2.2 Модуль ситуаційного управління

Модуль ситуаційного управління переміщенням реалізовано відповідно до алгоритму, описаного в підрозділі 2.4 (рис. 2.7) та представленого за допомогою псевдокоду:

---

#### Алгоритм формування керівних впливів за допомогою МТСК

---

- 1: **for**  $t = [1, 2, \dots]$ :
- 2:    $\mathbf{f}' \leftarrow \text{Perception}()$
- 3:   **for**  $\forall \mathbf{f}_i$ :
- 4:      $\text{cf\_f}_i \leftarrow \text{Abstraction\_mechanism}(\mathbf{f}_i, \mathbf{f}')$
- 5:   **for**  $\forall \mathbf{f}_i^{(4)}$ :

```

6:    $cf\_sat \mathbf{f}_i^{(4)} \leftarrow \text{Attention\_mechanism}()$ 
7:   for  $\ell = [3, 2, 1]$ :
8:     for  $\forall \mathbf{f}_i^{(\ell)}$ :
9:        $cf\_sat \mathbf{f}_i^{(\ell)} \leftarrow \text{Context\_mechanism}()$ 
10:  for  $\forall^{sat} \mathbf{f}_{U_i}$ :
11:     $\text{Control\_strategy\_realization}(U_i)$ 

```

---

Діаграма класів модуля ситуаційного управління наведена на рис. 4.5.

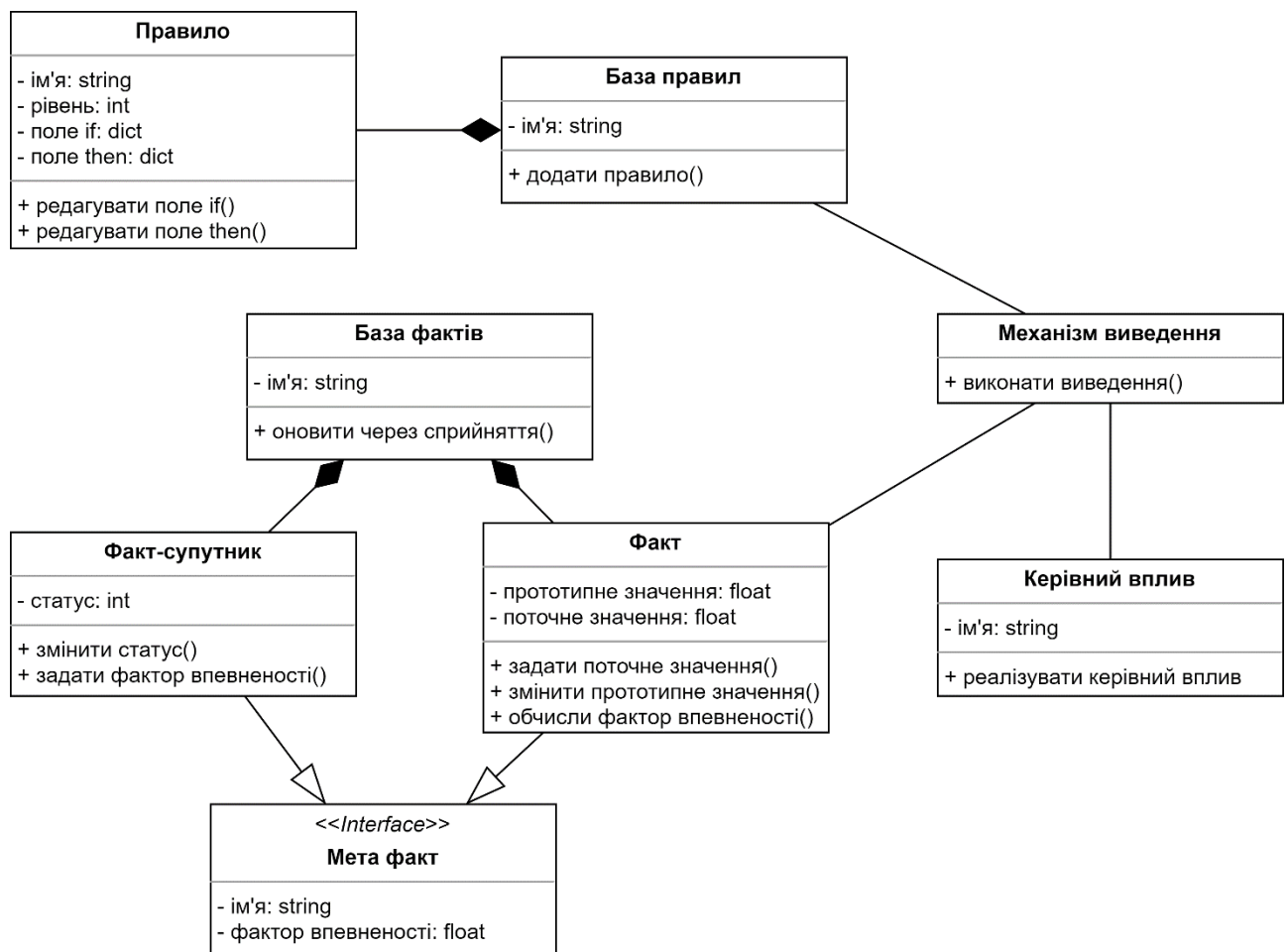


Рисунок 4.5 — Діаграма класів модуля ситуаційного управління

### 4.2.3 Модуль перепланування маршруту

Модуль перепланування маршруту реалізовано відповідно до алгоритму, наведеному у підрозділі 3.3.3.

Діаграма класів модуля перепланування маршруту наведена на рис. 4.6.

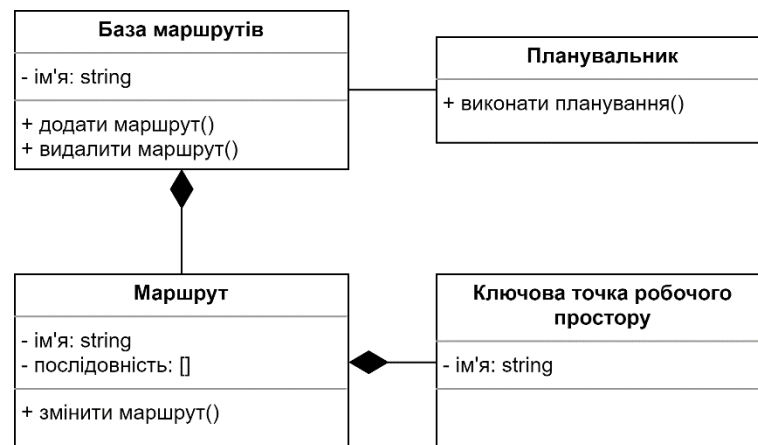


Рисунок 4.6 — Діаграма класів модуля перепланування маршруту

## 4.3 Організація знань та даних

Обсяг картографічних знань моделі ситуаційного управління, які в узагальненому вигляді описані правилами (2.8–2.9), залежить від розмірів та складності оточення. Зберігання та обробка у режимі реального часу великого обсягу картографічних правил є завданням складним в обчисленні, можливості вирішення якого обмежуються характеристиками бортового обчислювального пристрою АМС. Тому постає завдання розосередження знань між двома рівнями інформаційної технології: нижнім — АМС та верхнім — віддаленим хмарним сховищем.

Для розподілу знань між рівнями можна використати одну з двох стратегій, зображених на рис. 4.7. Перша стратегія (рис. 4.7 а) передбачає зберігання картографічних знань в обсязі, що описує оточення у радіусі  $r$  навколо АМС. Оновлення картографічних знань відбувається після відхилення  $\delta$  від точки попереднього оновлення. Друга стратегія (рис. 4.7 б) передбачає зберігання

картографічних знань, що описують оточення в межах коридора шириною  $h$  уздовж поточного маршруту руху. У такому разі оновлення бази картографічних правил, що зберігається у АМС, відбувається після отримання нового завдання руху або перепланування поточного завдання. За обох стратегій забезпечується автономність функціонування АМС у межах радіуса  $r$  та коридора шириною  $h$  відповідно.

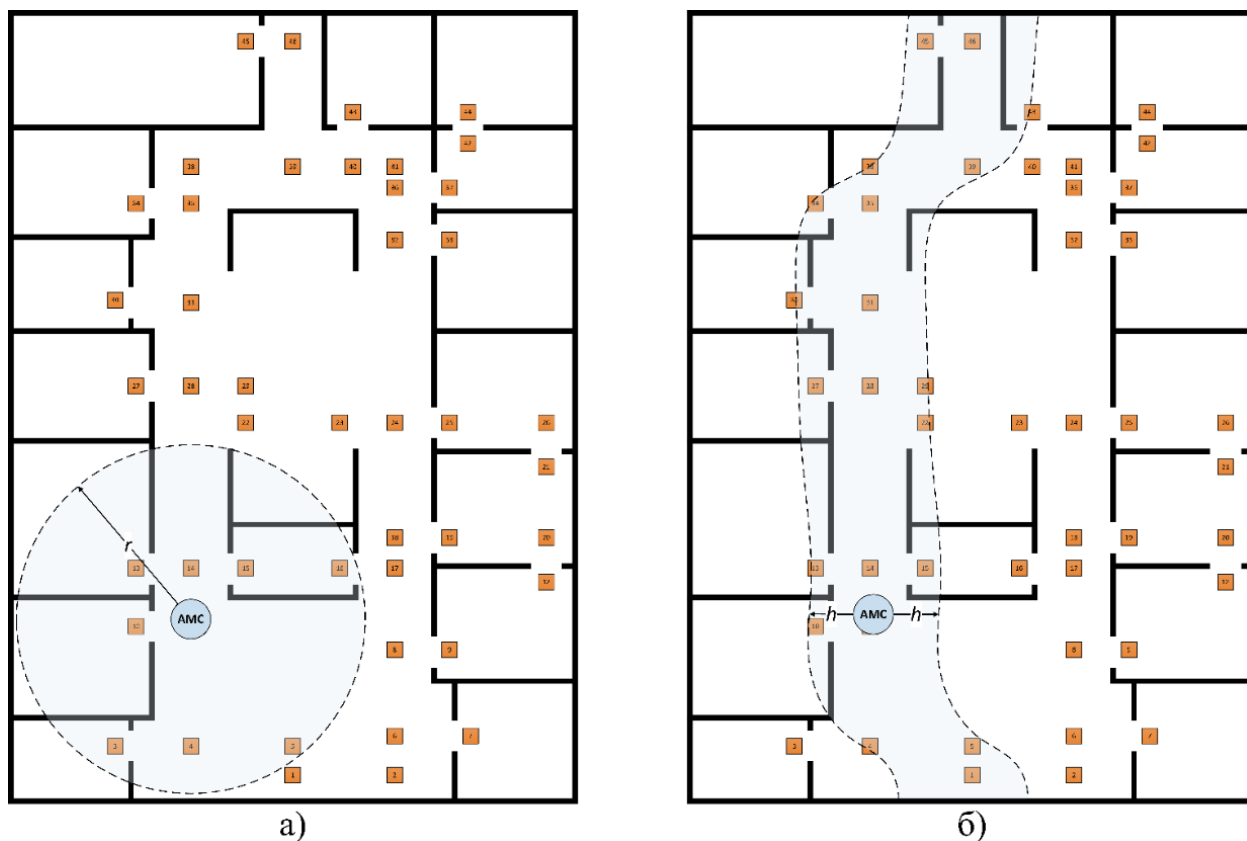


Рисунок 4.7 — Ілюстрація стратегій розподілу знань між АМС та хмарним сховищем

#### 4.4 Комплексне тестування системи навігації на прикладі колісних роботів, що виконують моніторинг ситуацій у приміщенні

Тестування системи навігації виконувалось у межах полігону[26]. Тестове оточення схематично зображено у додатку В на рис. В.1.

Із метою забезпечення тестового дослідження ІТНАМС у межах полігону виконано декілька спрощень для абстракції від обробки складних типів

сенсорних даних (відеопотоки, дані від радарів та лідарів) для вирішення завдань сприйняття, локалізації та керування рухом:

1. АМС, використана в тестових дослідженнях, обладнана простими типами сенсорних систем: ультразвуковими дальномірами для відстеження відстаней до перешкод, сенсорами відбиття для відстеження дорожньої розмітки (за наявності), цифровим компасом для відстеження кута відхилення від напрямку на північ та зчитувачем RFID-міток.

2. Локалізація на основі ідентифікації ключових точок маршруту, яка у цілому може здійснюватися шляхом обробки відеоряду із камер, якими обладнана АМС, у тестових дослідженнях спрощувалась до зчитування інформації з RFID-міток, що розосереджені в оточенні. Структура інформації, що записана в RFID-мітку, яка відповідає ключовій точці  $L_i$ , описується вектором:

$$\left( \begin{array}{l} \mathbf{f}'_{L_i}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Maneuver\_method}_{N,E}}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Maneuver\_method}_{N,S}}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Maneuver\_method}_{N,W}}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Maneuver\_method}_{E,S}}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Maneuver\_method}_{E,W}}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Maneuver\_method}_{S,W}}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Moving\_method}_N}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Moving\_method}_E}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Moving\_method}_S}, \\ \mathbf{f}'_{\text{Moving\_method}_W} \end{array} \right), \quad (4.1)$$

де  $\mathbf{f}_{L_i} \in \{0,1\}^n$  — вектор бінарних значень, що унікально описує ключову точку оточення  $L_i$ ;

$\mathbf{f}_{\text{Maneuver\_method}_{r1,r2}} \in \{0,1\}^m$  — вектор бінарних значень, що описує тип сенсорних даних, на основі яких має здійснюватися проїзд ключової точки  $L_i$  з напрямку  $r1$  до напрямку  $r2$ ,  $\mathbf{f}_{\text{Maneuver\_method}_{r1,r2}} = \mathbf{f}_{\text{Maneuver\_method}_{r2,r1}}$ ;

$\mathbf{f}_{Moving\_method_r} \in \{0,1\}^l$  — вектор бінарних значень, що описує сенсорний тип даних, на основі яких має здійснюватись рух по виїзній дорозі, що прилягає до ключової точки  $L_i$  з напрямку  $r$ ;

$\mathbf{f}'_{L_i}$  — зашумлена версія вектора  $\mathbf{f}_{L_i}$ ;

$\mathbf{f}'_{Maneuver\_method_{r1,r2}}$  — зашумлена версія вектора  $\mathbf{f}_{Maneuver\_method_{r1,r2}}$ ;

$\mathbf{f}'_{Moving\_method_r}$  — зашумлена версія вектора  $\mathbf{f}_{Moving\_method_r}$ .

Вектори  $\mathbf{f}_{L_i}$ ,  $\mathbf{f}_{Maneuver\_method_{r1,r2}}$ ,  $\mathbf{f}_{Moving\_method_r}$  використовувались для імітації складних сенсорних даних, що потрібні для попарного розрізнення ключових точок, типів сенсорних даних для проїзду ключових точок, типів сенсорних даних для руху по виїзних дорогах відповідно. Сенсорні дані є тим більш схожими, чим меншою є відстань Хеммінга між відповідними їм векторами. На основі цього припущення здійснювалось моделювання зашумленості інформації про оточення: записані в RFID-мітки вектори  $\mathbf{f}'_{L_i}$ ,  $\mathbf{f}'_{Maneuver\_method_{r1,r2}}$ ,  $\mathbf{f}'_{Moving\_method_r}$  є версіями векторів  $\mathbf{f}_{L_i}$ ,  $\mathbf{f}_{Maneuver\_method_{r1,r2}}$ ,  $\mathbf{f}_{Moving\_method_r}$  із випадковими помилками (інверсними значеннями у випадкових позиціях). Визначення фактора упевненості факту, що відповідає порції знань про певну характеристику оточення, здійснюється за формулою:

$$\begin{aligned} cf\_f_{L_i} &= 1 - \frac{2d_H(\mathbf{f}_{L_i}, \mathbf{f}'_{L_i})}{n}; \\ cf\_f_{Maneuver\_method_{r1,r2}} &= 1 - \frac{2d_H(\mathbf{f}'_{Maneuver\_method_{r1,r2}}, \mathbf{f}_{Maneuver\_method_{r1,r2}})}{m}; \\ cf\_f_{Moving\_method_r} &= 1 - \frac{2d_H(\mathbf{f}'_{Moving\_method_r}, \mathbf{f}_{Moving\_method_r})}{l}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

де  $d_H(\mathbf{v}, \mathbf{w})$  — відстань Хеммінга між векторами  $\mathbf{v}$  та  $\mathbf{w}$ ;

$n$  — число компонент вектора  $\mathbf{f}_{L_i}$ ;

$m$  — число компонент вектора  $\mathbf{f}_{Maneuver\_method_{r1,r2}}$ ;

$l$  — число компонент вектора  $\mathbf{f}_{Moving\_method_r}$ .

#### 4.4.1 Апаратне забезпечення полігону АМС

Апаратне забезпечення АМС, використаної в тестуванні, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 — Апаратне забезпечення АМС

| Компонент             | Опис компонента               | Кількість компонентів у складі АМС |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Car Chassis 2WD       | Акрилова двоколісна платформа | 1                                  |
| Raspberry Pi 3B       | Одноплатний комп'ютер         | 1                                  |
| Waveshare MotorShield | Драйвер моторів               | 1                                  |
| HC-SR04               | Ультразвуковий дальномір      | 3                                  |
| KY-033                | Сенсор відбиття               | 2                                  |
| HMC5983               | Цифровий компас               | 1                                  |
| RFID-RC522            | Зчитувач RFID-міток           | 1                                  |
| Battery 10650 x3      | Акумулятор                    | 1                                  |

Структурну схему та зображення АМС, що використовувалась під час проведення експериментів, наведено на рис. 4.8. і 4.9 відповідно.

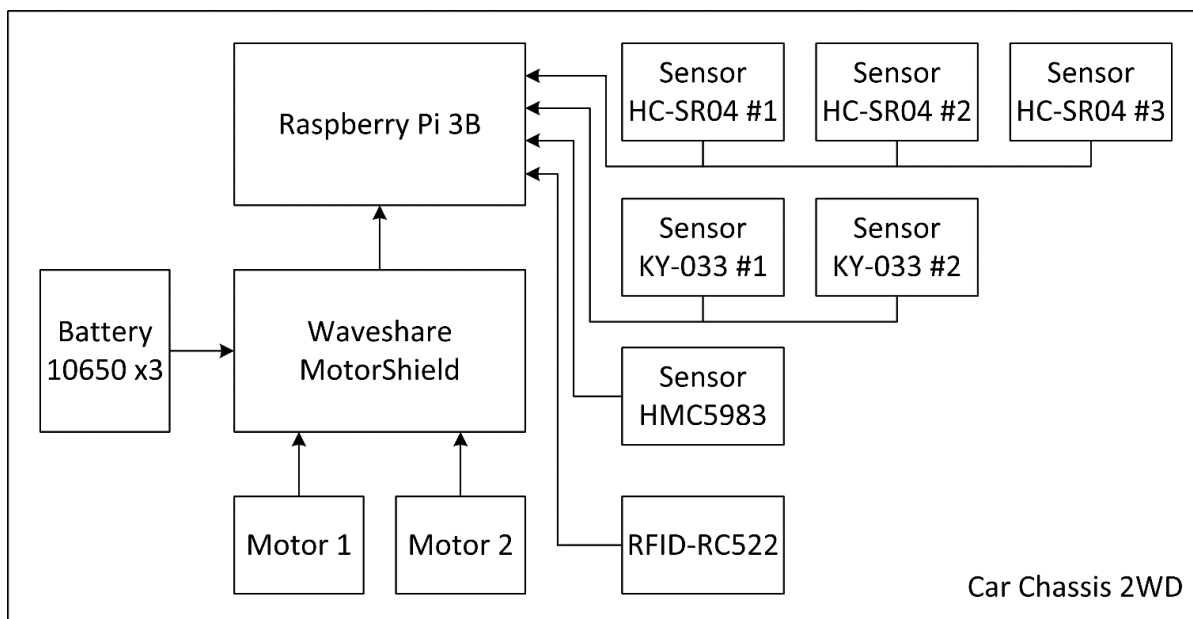


Рисунок 4.8 — Структурна схема АМС

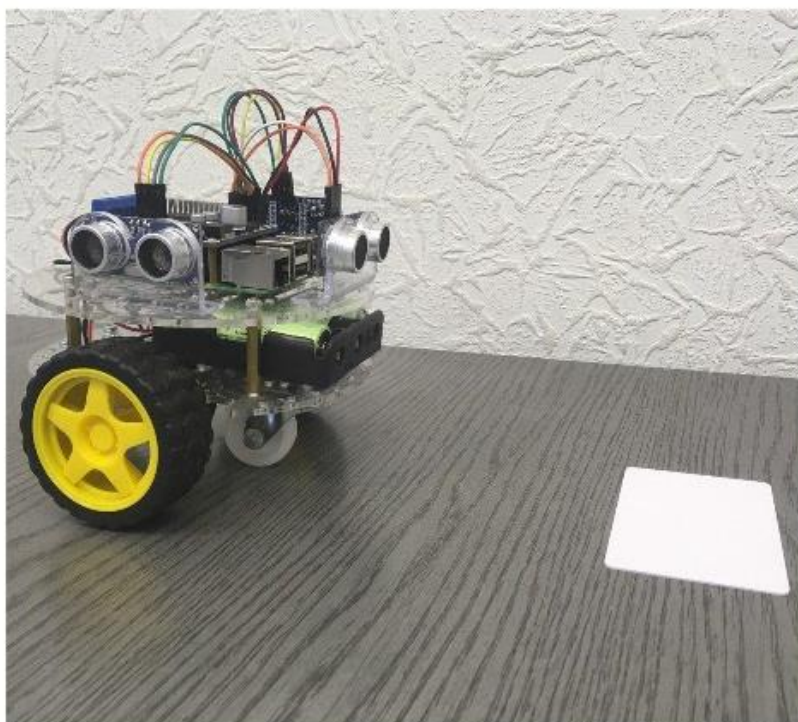


Рисунок 4.9 — Зображення АМС

Ключові точки робочого простору в межах полігону імітувались з використанням RFID-міток серії Milfare 1k S50[31]. Разом полігон містить 74 КТРП. План полігону та опис картографічних правил наведено в додатку В.

#### **4.4.2 План експериментів. Обговорення результатів**

Отримана програмна реалізація інформаційної технології навігації АМС була протестована в межах полігону АМС.

У ході експериментів здійснювалось варіювання повноти бази маршрутів АМС та динамічно додавались перешкоди в оточенні, що унеможливлювали рух за відомими (або автономно побудованими при отриманні цілі руху) маршрутами.

Зашумленість сенсорних даних здійснювалось, шляхом додавання стохастичних завад до вектора-опису КТРП, що записано у відповідну RFID-мітку.

Метою експериментів було комплексне тестування пропонованої інформаційної технології щодо можливості її застосування для вирішення завдання моніторингу просторово розосереджених об'єктів.

За результатами експериментів була встановлена придатність пропонованої системи для умов, коли досяжність цільової точки руху є принципово можливою, враховуючи наявні знання, АМС здатна обрати або самостійно побудувати маршрут в умовах появи динамічних перешкод, що поєднує поточне місцезнаходження АМС із цільовим. Якщо принципове досягнення цільової точки неможливо, за обсягом поточних знань АМС здатна переходити у режим випадкового руху, який дозволяє здійснити поповнення поточної БЗ.

#### **4.4 Висновки до четвертого розділу**

У розділі запропоновано розвиток інформаційної технології навігації АМС на основі розроблених моделі та методу ситуаційного управління з переплануванням маршруту. Запропоновано функціональну модель інформаційної технології у вигляді IDEF0-діаграм. Представлено структуру програмного забезпечення бортової системи АМС, що складається з п'яти

модулів. Описано умови, обладнання та програмне забезпечення проведення натурних експериментів із запропонованою інформаційною технологією. Описано результати, що підтверджують її придатність до використання й упровадження.

Результати розділу викладені в працях [25–28, 31, 33, 35].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе наукове завдання — розробка моделі та методу інформаційної технології навігації АМС, що забезпечує однорідну інтеграцію рішень різних завдань навігаційного циклу для забезпечення функціонування АМС в умовах невизначеності за рахунок динамічного перепланування маршрутів руху. Основні наукові та практичні результати роботи зазначені нижче.

1. Проведено аналіз існуючих моделей та методів навігації, що використовуються в АМС. Установлено, що процес навігації подають у вигляді навігаційного циклу, що складається з чотирьох етапів: сприйняття інформації про оточення, локалізації і картографування, планування маршруту руху та керування рухом. Дослідження кожного етапу окремо показало, що існує багато моделей і методів, покликаних вирішувати завдання, що відповідає певному етапу, зокрема і таких, що засновані на технологіях штучного інтелекту, а саме машинному навчанню та штучних нейронних мережах. Проте немає технологій, що забезпечують однорідну інтеграцію рішень завдань різних етапів навігаційного циклу, спираються на конкретну модель подання знань та ураховують ефекти, пов'язані з помилками, що виникають на кожному етапі навігаційного циклу.

2. Розроблено модель ситуаційного управління переміщенням АМС в умовах передбачених збурень. Модель базується на множині фактів та множинах нечітких правил, що описують апріорні знання АМС про цілі, маршрути, карту оточення, стратегії взаємодії з ключовими точками робочого простору та стратегії управління. Правила оброблюються механізмом нечіткого виведення модифікованої моделі Такагі-Сугено-Канга. Завдяки поданню знань АМС про оточення у вигляді нечітких правил різного рівня узагальнення модель є гнучкою. Використання підходу стратифікації БЗ АМС за рівнями робить модель масштабованою: фрагменти знань, що знаходяться на різних рівнях, можуть бути замінені або доповнені новими знаннями. Застосування у моделі

механізмів абстрагування, переключення уваги та відстеження контексту підвищують стійкість АМС до змін в оточенні завдяки використанню АМС апіорних знань про завади і стратегії їх подолання у відповідних ситуаціях.

3. Для забезпечення можливості використання моделі управління переміщенням АМС в умовах частково недетермінованого оточення розроблено метод ситуаційного перепланування маршруту руху АМС, що враховує вплив заздалегідь непередбачених збурень, які унеможливають переміщення до цільової позиції маршруту, і завдяки ситуаційному переплануванню на підставі сенсорних даних про поточну ситуацію дозволяє АМС досягнути цілі. Запропоновано метод синтезу типових маршрутів та фрагментів маршрутів, що використовують для динамічного перепланування під час виникнення непередбачених збурень. Метод базується на технології машинного навчання з підкріпленням.

4. Забезпечено подальший розвиток інформаційної технології навігації АМС за рахунок використання моделі та методу ситуаційного управління з переплануванням маршруту, що дозволяє розширити застосування АМС в автономному режимі в частково недетермінованому оточенні, коли відсутня можливість або економічно не обґрунтовано упорядкування оточення.

5. Проведено тестування запропонованого методу та моделі за допомогою комп'ютерних експериментів, у процесі яких виконувалося емулявання руху АМС за маршрутом у різних умовах. Комплексне тестування інформаційної технології проведено за допомогою натурних експериментів на науково-навчальному полігоні. Результати експериментів показали придатність пропонованої системи для умов, коли досяжність цільової точки руху є принципово можливою, враховуючи наявні знання. АМС здатна обрати або самостійно побудувати маршрут в умовах появи динамічних перешкод, що поєднує поточне місцезнаходження АМС із цільовим.

## 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. Кoblevo, 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. 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.

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 «ХПІ». 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., 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.

## Додаток Б

### Акти упровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки  
М. В. Неофітний  
2020 р.



АКТ  
про впровадження результатів дисертаційної роботи  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
аспіранта кафедри інформаційних технологій  
Українського державного університету залізничного транспорту  
**Іванюка Олександра Ігоровича**  
**«Модель та метод інформаційної технології навігації  
автономних мобільних систем в умовах невизначеності»**  
у науково-дослідну роботу № 326 Харківського національного університету  
радіоелектроніки

Комісія у складі голови – д.т.н., проф. Бодяньського Є. В., наукового керівника НДР №326, професора кафедри штучного інтелекту, наукового керівника ПНДЛ АСУ ХНУРЕ та членів – к.т.н., с.н.с. Плїсс І. П., відповідального виконавця НДР №326, провідного наукового співробітника ПНДЛ АСУ ХНУРЕ; Хоменко Н. Ю., начальника наукового інформаційно-аналітичного відділу ХНУРЕ, склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Іванюка О. І. використовуються у Харківському національному університеті радіоелектроніки при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи № 326 «Глибинні гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних ті їх швидке навчання», № ДР 0119U001403, яка виконується згідно з наказом Міністерства освіти і науки України за результатами конкурсного відбору проектів наукових досліджень.

Розроблена в дисертації модель навігації автономних мобільних систем в умовах невизначеності реалізує однорідну інтеграцію цифрових рішень різних завдань навігаційного циклу автономної мобільної системи на основі багаторівневої структури нечітких правил та машинного навчання. Модель забезпечує функціонування мобільного робота в умовах потоків неповної та нечіткої інформації, за рахунок динамічного ситуаційного перепланування.

Результати будуть використані в науково-технічному звіті по НДР № 326.

Голова комісії:

Є. В. Бодяньський

Члени комісії:

І. П. Плїсс

Н. Ю. Хоменко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи  
Українського державного університету  
залізничного транспорту

Дмитро МКРТИЧЬЯН

« 20 жовтня » 2020 р.

**АКТ**

про впровадження у навчальний процес кафедри інформаційних технологій  
результатів дисертаційної роботи Іванюка Олександра Ігоровича

Комісія у складі голови – доцента кафедри інформаційних технологій, кандидата технічних наук, доцента Бриксина В.О., членів комісії – доцента кафедри інформаційних технологій, кандидата технічних наук, доцента Петренко Т.Г., доцента кафедри інформаційних технологій, кандидата технічних наук, доцента Ситніка Б.Т., склала цей акт про те, що у навчальному процесі кафедри інформаційних технологій Українського державного університету залізничного транспорту при викладанні навчальних дисциплін «Нейро й нечітке керування в робототехніці» та «Машинне навчання» були використані наступні результати дисертаційної роботи Іванюка О.І.:

– модель ситуаційного управління переміщенням АМС з переплануванням маршруту, яка враховує вплив наперед 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;

– метод ситуаційного управління з урахуванням контексту, який використовує підхід навчання з підкріпленням та є адаптованим до завдання управління переміщенням АМС вздовж заданого маршруту, що дозволяє на цій підставі вирішувати завдання навігації мобільних автономних систем в умовах невизначеності й неповної інформації.

Голова комісії



Володимир БРИКСІН

Члени комісії:



Тетяна ПЕТРЕНКО



Борис СИТНІК

## Додаток В

## Опис полігону для натурних експериментів

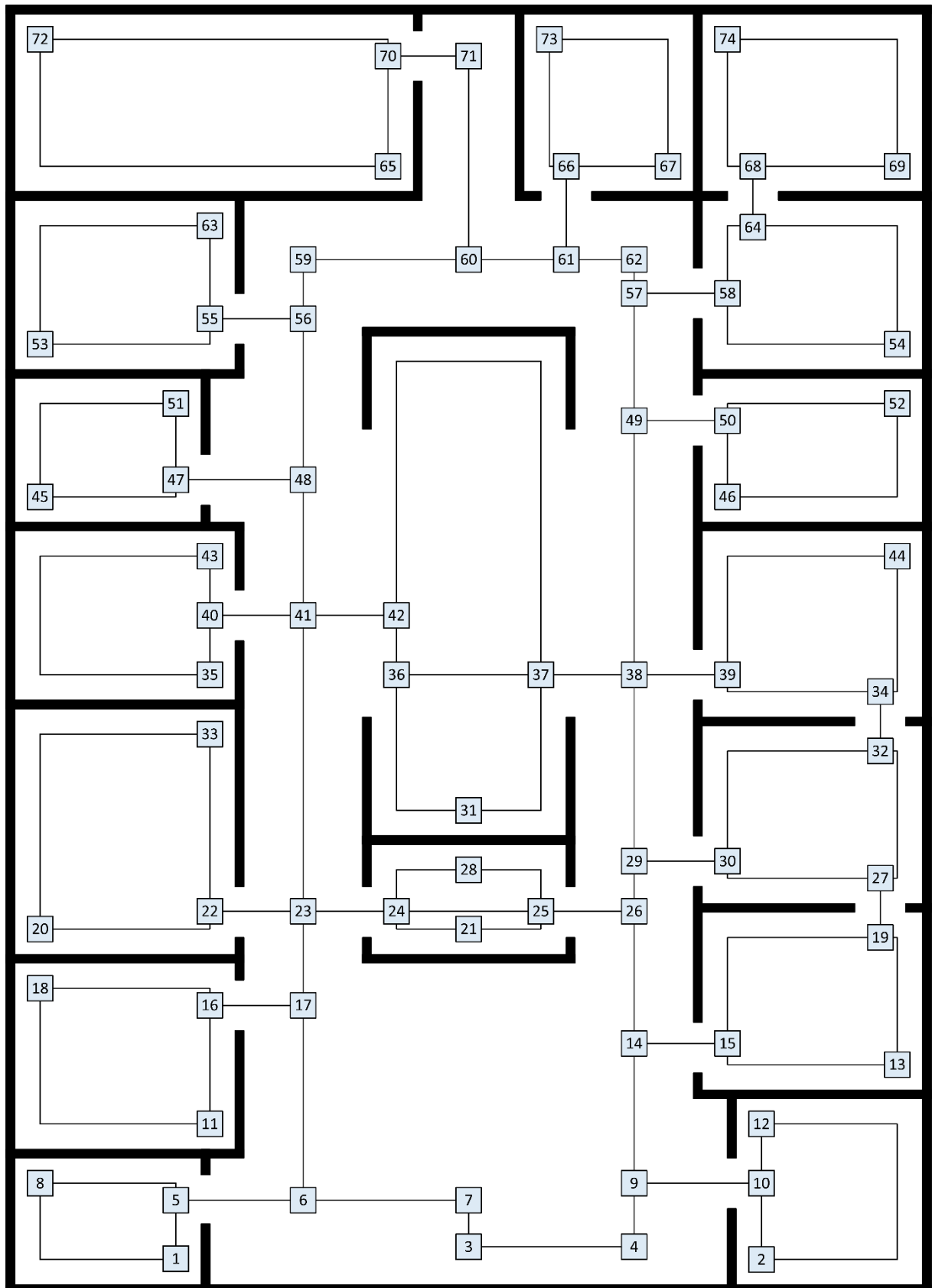


Рисунок В.1 — План оточення для натурних експериментів

Таблиця В.1 — Картографічні правила, що описують оточення рис. В.1

|    | <i>IF</i>                   |                                | <i>THEN</i>                  |
|----|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1  | 2                           | 3                              | 4                            |
| 1  | CF_f <sub>L1</sub> is high  | CF_satf <sub>L5</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 2  | CF_f <sub>L1</sub> is high  | CF_satf <sub>L8</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 3  | CF_f <sub>L2</sub> is high  | CF_satf <sub>L10</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 4  | CF_f <sub>L2</sub> is high  | CF_satf <sub>L12</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 5  | CF_f <sub>L3</sub> is high  | CF_satf <sub>L4</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 6  | CF_f <sub>L3</sub> is high  | CF_satf <sub>L7</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 7  | CF_f <sub>L4</sub> is high  | CF_satf <sub>L3</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 8  | CF_f <sub>L4</sub> is high  | CF_satf <sub>L9</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 9  | CF_f <sub>L5</sub> is high  | CF_satf <sub>L1</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 10 | CF_f <sub>L5</sub> is high  | CF_satf <sub>L6</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 11 | CF_f <sub>L5</sub> is high  | CF_satf <sub>L8</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 12 | CF_f <sub>L6</sub> is high  | CF_satf <sub>L5</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 13 | CF_f <sub>L6</sub> is high  | CF_satf <sub>L7</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 14 | CF_f <sub>L6</sub> is high  | CF_satf <sub>L17</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 15 | CF_f <sub>L7</sub> is high  | CF_satf <sub>L3</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 16 | CF_f <sub>L7</sub> is high  | CF_satf <sub>L6</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 17 | CF_f <sub>L8</sub> is high  | CF_satf <sub>L1</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 18 | CF_f <sub>L8</sub> is high  | CF_satf <sub>L5</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 19 | CF_f <sub>L9</sub> is high  | CF_satf <sub>L4</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 20 | CF_f <sub>L9</sub> is high  | CF_satf <sub>L10</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 21 | CF_f <sub>L9</sub> is high  | CF_satf <sub>L14</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 22 | CF_f <sub>L10</sub> is high | CF_satf <sub>L2</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 23 | CF_f <sub>L10</sub> is high | CF_satf <sub>L9</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 24 | CF_f <sub>L10</sub> is high | CF_satf <sub>L12</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 25 | CF_f <sub>L11</sub> is high | CF_satf <sub>L16</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 26 | CF_f <sub>L11</sub> is high | CF_satf <sub>L18</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 27 | CF_f <sub>L12</sub> is high | CF_satf <sub>L2</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 28 | CF_f <sub>L12</sub> is high | CF_satf <sub>L10</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 29 | CF_f <sub>L13</sub> is high | CF_satf <sub>L15</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 30 | CF_f <sub>L13</sub> is high | CF_satf <sub>L19</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 31 | CF_f <sub>L14</sub> is high | CF_satf <sub>L9</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 32 | CF_f <sub>L14</sub> is high | CF_satf <sub>L15</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 33 | CF_f <sub>L14</sub> is high | CF_satf <sub>L26</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 34 | CF_f <sub>L15</sub> is high | CF_satf <sub>L13</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 35 | CF_f <sub>L15</sub> is high | CF_satf <sub>L14</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 36 | CF_f <sub>L15</sub> is high | CF_satf <sub>L19</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 37 | CF_f <sub>L16</sub> is high | CF_satf <sub>L11</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 38 | CF_f <sub>L16</sub> is high | CF_satf <sub>L17</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 39 | CF_f <sub>L16</sub> is high | CF_satf <sub>L18</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 40 | CF_f <sub>L17</sub> is high | CF_satf <sub>L6</sub> is high  | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 41 | CF_f <sub>L17</sub> is high | CF_satf <sub>L16</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 42 | CF_f <sub>L17</sub> is high | CF_satf <sub>L23</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 43 | CF_f <sub>L18</sub> is high | CF_satf <sub>L11</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 44 | CF_f <sub>L18</sub> is high | CF_satf <sub>L16</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |

|    |                             |                                |                              |
|----|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 45 | CF_f <sub>L19</sub> is high | CF_satf <sub>L13</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 46 | CF_f <sub>L19</sub> is high | CF_satf <sub>L15</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 47 | CF_f <sub>L19</sub> is high | CF_satf <sub>L27</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 48 | CF_f <sub>L20</sub> is high | CF_satf <sub>L22</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 49 | CF_f <sub>L20</sub> is high | CF_satf <sub>L33</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 50 | CF_f <sub>L21</sub> is high | CF_satf <sub>L24</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 51 | CF_f <sub>L21</sub> is high | CF_satf <sub>L25</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 52 | CF_f <sub>L22</sub> is high | CF_satf <sub>L20</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 53 | CF_f <sub>L22</sub> is high | CF_satf <sub>L23</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 54 | CF_f <sub>L22</sub> is high | CF_satf <sub>L33</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 55 | CF_f <sub>L23</sub> is high | CF_satf <sub>L17</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 56 | CF_f <sub>L23</sub> is high | CF_satf <sub>L22</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 57 | CF_f <sub>L23</sub> is high | CF_satf <sub>L24</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 58 | CF_f <sub>L23</sub> is high | CF_satf <sub>L41</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 59 | CF_f <sub>L24</sub> is high | CF_satf <sub>L21</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 60 | CF_f <sub>L24</sub> is high | CF_satf <sub>L23</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 61 | CF_f <sub>L24</sub> is high | CF_satf <sub>L25</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 62 | CF_f <sub>L24</sub> is high | CF_satf <sub>L28</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 63 | CF_f <sub>L25</sub> is high | CF_satf <sub>L21</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 64 | CF_f <sub>L25</sub> is high | CF_satf <sub>L24</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 65 | CF_f <sub>L25</sub> is high | CF_satf <sub>L26</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 66 | CF_f <sub>L25</sub> is high | CF_satf <sub>L28</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 67 | CF_f <sub>L26</sub> is high | CF_satf <sub>L14</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 68 | CF_f <sub>L26</sub> is high | CF_satf <sub>L25</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 69 | CF_f <sub>L26</sub> is high | CF_satf <sub>L29</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 70 | CF_f <sub>L27</sub> is high | CF_satf <sub>L19</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 71 | CF_f <sub>L27</sub> is high | CF_satf <sub>L30</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 72 | CF_f <sub>L27</sub> is high | CF_satf <sub>L32</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 73 | CF_f <sub>L28</sub> is high | CF_satf <sub>L24</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 74 | CF_f <sub>L28</sub> is high | CF_satf <sub>L25</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 75 | CF_f <sub>L29</sub> is high | CF_satf <sub>L26</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 76 | CF_f <sub>L29</sub> is high | CF_satf <sub>L30</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 77 | CF_f <sub>L29</sub> is high | CF_satf <sub>L38</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 78 | CF_f <sub>L30</sub> is high | CF_satf <sub>L27</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 79 | CF_f <sub>L30</sub> is high | CF_satf <sub>L29</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 80 | CF_f <sub>L30</sub> is high | CF_satf <sub>L32</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 81 | CF_f <sub>L31</sub> is high | CF_satf <sub>L36</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 82 | CF_f <sub>L31</sub> is high | CF_satf <sub>L37</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 83 | CF_f <sub>L32</sub> is high | CF_satf <sub>L27</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 84 | CF_f <sub>L32</sub> is high | CF_satf <sub>L30</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 85 | CF_f <sub>L32</sub> is high | CF_satf <sub>L34</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 86 | CF_f <sub>L33</sub> is high | CF_satf <sub>L20</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 87 | CF_f <sub>L33</sub> is high | CF_satf <sub>L22</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 88 | CF_f <sub>L34</sub> is high | CF_satf <sub>L32</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 89 | CF_f <sub>L34</sub> is high | CF_satf <sub>L39</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 90 | CF_f <sub>L34</sub> is high | CF_satf <sub>L44</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 91 | CF_f <sub>L35</sub> is high | CF_satf <sub>L40</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 92 | CF_f <sub>L35</sub> is high | CF_satf <sub>L43</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |

|     |                             |                                |                              |
|-----|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 93  | CF_f <sub>L36</sub> is high | CF_satf <sub>L31</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 94  | CF_f <sub>L36</sub> is high | CF_satf <sub>L37</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 95  | CF_f <sub>L36</sub> is high | CF_satf <sub>L42</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 96  | CF_f <sub>L37</sub> is high | CF_satf <sub>L31</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 97  | CF_f <sub>L37</sub> is high | CF_satf <sub>L36</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 98  | CF_f <sub>L37</sub> is high | CF_satf <sub>L38</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 99  | CF_f <sub>L37</sub> is high | CF_satf <sub>L42</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 100 | CF_f <sub>L38</sub> is high | CF_satf <sub>L29</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 101 | CF_f <sub>L38</sub> is high | CF_satf <sub>L37</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 102 | CF_f <sub>L38</sub> is high | CF_satf <sub>L39</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 103 | CF_f <sub>L38</sub> is high | CF_satf <sub>L49</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 104 | CF_f <sub>L39</sub> is high | CF_satf <sub>L34</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 105 | CF_f <sub>L39</sub> is high | CF_satf <sub>L38</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 106 | CF_f <sub>L39</sub> is high | CF_satf <sub>L44</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 107 | CF_f <sub>L40</sub> is high | CF_satf <sub>L35</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 108 | CF_f <sub>L40</sub> is high | CF_satf <sub>L41</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 109 | CF_f <sub>L40</sub> is high | CF_satf <sub>L43</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 110 | CF_f <sub>L41</sub> is high | CF_satf <sub>L23</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 111 | CF_f <sub>L41</sub> is high | CF_satf <sub>L40</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 112 | CF_f <sub>L41</sub> is high | CF_satf <sub>L42</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 113 | CF_f <sub>L41</sub> is high | CF_satf <sub>L48</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 114 | CF_f <sub>L42</sub> is high | CF_satf <sub>L36</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 115 | CF_f <sub>L42</sub> is high | CF_satf <sub>L37</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 116 | CF_f <sub>L42</sub> is high | CF_satf <sub>L41</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 117 | CF_f <sub>L43</sub> is high | CF_satf <sub>L35</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 118 | CF_f <sub>L43</sub> is high | CF_satf <sub>L40</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 119 | CF_f <sub>L44</sub> is high | CF_satf <sub>L34</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 120 | CF_f <sub>L44</sub> is high | CF_satf <sub>L39</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 121 | CF_f <sub>L45</sub> is high | CF_satf <sub>L47</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 122 | CF_f <sub>L45</sub> is high | CF_satf <sub>L51</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 123 | CF_f <sub>L46</sub> is high | CF_satf <sub>L50</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 124 | CF_f <sub>L46</sub> is high | CF_satf <sub>L52</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 125 | CF_f <sub>L47</sub> is high | CF_satf <sub>L45</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 126 | CF_f <sub>L47</sub> is high | CF_satf <sub>L48</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 127 | CF_f <sub>L47</sub> is high | CF_satf <sub>L51</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 128 | CF_f <sub>L48</sub> is high | CF_satf <sub>L41</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 129 | CF_f <sub>L48</sub> is high | CF_satf <sub>L47</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 130 | CF_f <sub>L48</sub> is high | CF_satf <sub>L56</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 131 | CF_f <sub>L49</sub> is high | CF_satf <sub>L38</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 132 | CF_f <sub>L49</sub> is high | CF_satf <sub>L50</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 133 | CF_f <sub>L49</sub> is high | CF_satf <sub>L57</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 134 | CF_f <sub>L50</sub> is high | CF_satf <sub>L46</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 135 | CF_f <sub>L50</sub> is high | CF_satf <sub>L49</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 136 | CF_f <sub>L50</sub> is high | CF_satf <sub>L52</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 137 | CF_f <sub>L51</sub> is high | CF_satf <sub>L45</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 138 | CF_f <sub>L51</sub> is high | CF_satf <sub>L47</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 139 | CF_f <sub>L52</sub> is high | CF_satf <sub>L46</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 140 | CF_f <sub>L52</sub> is high | CF_satf <sub>L50</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |

|     |                             |                                |                              |
|-----|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 141 | CF_f <sub>L53</sub> is high | CF_satf <sub>L55</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 142 | CF_f <sub>L53</sub> is high | CF_satf <sub>L63</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 143 | CF_f <sub>L54</sub> is high | CF_satf <sub>L58</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 144 | CF_f <sub>L54</sub> is high | CF_satf <sub>L64</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 145 | CF_f <sub>L55</sub> is high | CF_satf <sub>L53</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 146 | CF_f <sub>L55</sub> is high | CF_satf <sub>L56</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 147 | CF_f <sub>L55</sub> is high | CF_satf <sub>L63</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 148 | CF_f <sub>L56</sub> is high | CF_satf <sub>L48</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 149 | CF_f <sub>L56</sub> is high | CF_satf <sub>L55</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 150 | CF_f <sub>L56</sub> is high | CF_satf <sub>L59</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 151 | CF_f <sub>L57</sub> is high | CF_satf <sub>L49</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 152 | CF_f <sub>L57</sub> is high | CF_satf <sub>L58</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 153 | CF_f <sub>L57</sub> is high | CF_satf <sub>L62</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 154 | CF_f <sub>L58</sub> is high | CF_satf <sub>L54</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 155 | CF_f <sub>L58</sub> is high | CF_satf <sub>L57</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 156 | CF_f <sub>L58</sub> is high | CF_satf <sub>L64</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 157 | CF_f <sub>L59</sub> is high | CF_satf <sub>L56</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 158 | CF_f <sub>L59</sub> is high | CF_satf <sub>L60</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 159 | CF_f <sub>L60</sub> is high | CF_satf <sub>L59</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 160 | CF_f <sub>L60</sub> is high | CF_satf <sub>L61</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 161 | CF_f <sub>L60</sub> is high | CF_satf <sub>L71</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 162 | CF_f <sub>L61</sub> is high | CF_satf <sub>L60</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 163 | CF_f <sub>L61</sub> is high | CF_satf <sub>L62</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 164 | CF_f <sub>L61</sub> is high | CF_satf <sub>L66</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 165 | CF_f <sub>L62</sub> is high | CF_satf <sub>L57</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 166 | CF_f <sub>L62</sub> is high | CF_satf <sub>L61</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 167 | CF_f <sub>L63</sub> is high | CF_satf <sub>L53</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 168 | CF_f <sub>L63</sub> is high | CF_satf <sub>L55</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 169 | CF_f <sub>L64</sub> is high | CF_satf <sub>L54</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 170 | CF_f <sub>L64</sub> is high | CF_satf <sub>L58</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 171 | CF_f <sub>L64</sub> is high | CF_satf <sub>L68</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 172 | CF_f <sub>L65</sub> is high | CF_satf <sub>L70</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 173 | CF_f <sub>L65</sub> is high | CF_satf <sub>L72</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 174 | CF_f <sub>L66</sub> is high | CF_satf <sub>L61</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 175 | CF_f <sub>L66</sub> is high | CF_satf <sub>L67</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 176 | CF_f <sub>L66</sub> is high | CF_satf <sub>L73</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 177 | CF_f <sub>L67</sub> is high | CF_satf <sub>L66</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 178 | CF_f <sub>L67</sub> is high | CF_satf <sub>L73</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 179 | CF_f <sub>L68</sub> is high | CF_satf <sub>L64</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 180 | CF_f <sub>L68</sub> is high | CF_satf <sub>L69</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 181 | CF_f <sub>L68</sub> is high | CF_satf <sub>L74</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 182 | CF_f <sub>L69</sub> is high | CF_satf <sub>L68</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |
| 183 | CF_f <sub>L69</sub> is high | CF_satf <sub>L74</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 184 | CF_f <sub>L70</sub> is high | CF_satf <sub>L65</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 185 | CF_f <sub>L70</sub> is high | CF_satf <sub>L71</sub> is high | cf_satf <sub>Out_E</sub> = 1 |
| 186 | CF_f <sub>L70</sub> is high | CF_satf <sub>L72</sub> is high | cf_satf <sub>Out_N</sub> = 1 |
| 187 | CF_f <sub>L71</sub> is high | CF_satf <sub>L60</sub> is high | cf_satf <sub>Out_S</sub> = 1 |
| 188 | CF_f <sub>L71</sub> is high | CF_satf <sub>L70</sub> is high | cf_satf <sub>Out_W</sub> = 1 |

|     |                                |                                      |                                     |
|-----|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 189 | CF_ $\mathbf{f}_{L72}$ is high | CF_ $\mathbf{f}_{L65}^{sat}$ is high | cf_ $\mathbf{f}_{Out\_S}^{sat} = 1$ |
| 190 | CF_ $\mathbf{f}_{L72}$ is high | CF_ $\mathbf{f}_{L70}^{sat}$ is high | cf_ $\mathbf{f}_{Out\_E}^{sat} = 1$ |
| 191 | CF_ $\mathbf{f}_{L73}$ is high | CF_ $\mathbf{f}_{L66}^{sat}$ is high | cf_ $\mathbf{f}_{Out\_S}^{sat} = 1$ |
| 192 | CF_ $\mathbf{f}_{L73}$ is high | CF_ $\mathbf{f}_{L67}^{sat}$ is high | cf_ $\mathbf{f}_{Out\_E}^{sat} = 1$ |
| 193 | CF_ $\mathbf{f}_{L74}$ is high | CF_ $\mathbf{f}_{L68}^{sat}$ is high | cf_ $\mathbf{f}_{Out\_S}^{sat} = 1$ |
| 194 | CF_ $\mathbf{f}_{L74}$ is high | CF_ $\mathbf{f}_{L69}^{sat}$ is high | cf_ $\mathbf{f}_{Out\_E}^{sat} = 1$ |