

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ЦИМБАЛ ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 004.896

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У АВТОМАТИЗОВАНОМУ КЕРУВАННІ
ГНУЧКИМ ІНТЕГРОВАНИМ РАДІОЕЛЕКТРОННИМ ВИРОБНИЦТВОМ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Невлюдов Ігор Шакирович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри технології і автоматизації виробництва
радіоелектронних та електронно-обчислювальних засобів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Ладанюк Анатолій Петрович,
Національний університет харчових технологій,
завідувач кафедри автоматизації процесів управління;

доктор технічних наук, професор,
Міхальов Олександр Ілліч,
Національна металургійна академія України,
завідувач кафедри інформаційних технологій та систем;

доктор технічних наук, професор,
Осадчий Сергій Іванович,
Кіровоградський національний технічний університет,
завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів.

Захист відбудеться «___» _____ 2015 р., о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: пр. Леніна, 14, м. Харків, 61166.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: пр. Леніна, 14, м. Харків, 61166.

Автореферат розісланий «___» _____ 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.П. Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Використання гнучких інтегрованих систем (ГІС) має забезпечувати швидкий та маловитратний перехід виробництва до випуску нових типів продукції. Ефективність ГІС визначається оптимальною організацією використання технологічного обладнання, яка забезпечується роботизованими та транспортними системами, що постачають у ГІС заготовки, деталі та інструмент, здійснюють необхідне обслуговування та контроль технологічних процесів.

Виробництво компонентів радіоелектронної апаратури (РЕА) та інших виробів радіоелектронного приладобудування має враховувати постійну зміну кон'юнктури споживчого ринку і необхідність переходів до випуску інших типів продукції в лічені тижні або дні. Випуск РЕА запроваджується в умовах серійного або дрібносерійного виробництва, що й вимагає широкого використання гнучких інтегрованих роботизованих систем (ГІРС) різного типу.

Слід, однак, вказати, що існуючі ГІС виробництва РЕА мають низку істотних недоліків: системи керування ГІС є надмірно централізованими; засоби моделювання роботи технологічного обладнання є застарілими або відсутніми; недостатнім є рівень автономності засобів керування та моніторингу на робочому місці; відсутні модулі аналізу технологічних завдань, прийняття рішень на окремому робочому місці за результатами моніторингу робочого простору; відсутні модулі адаптації систем прийняття рішень до локальних або глобальних змін у робочому просторі (РП), станах ГІРС; відсутні засоби навчання та самонавчання; відсутні розвинені модулі комунікації з іншими ГІС та ГІРС. Таким чином, рівень технічного і технологічного розвитку впроваджених ГІС є невідповідним викликам сучасного виробництва, вимагає підвищеної уваги з боку дослідників і робить дослідження в даній галузі одними з найбільш перспективних у сучасній науці та технологіях.

Функціонування технологічного обладнання ГІРС в реальних умовах стикається з впливом зовнішніх чинників різного роду: статичних та рухомих об'єктів виробничого простору, людей, іншого обладнання та оснащення. При цьому суттєво підвищується роль систем прийняття рішень, які забезпечують розробку планів функціонування ГІРС на глобальному і локальних рівнях.

З цієї причини утворилося протиріччя між традиційними підходами планування рішень і вимогами працездатності виробничих систем. Це протиріччя є змістом *актуальної науково-прикладної проблеми*, що полягає у необхідності створення теоретичних основ інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованих системах керування гнучкими роботизованими інтегрованими системами виробництва РЕА для забезпечення їх функціонування в умовах невизначеності робочого простору та характеру виробничих завдань. Рішення проблеми дозволить підвищити ефективність процесів керування гнучкими інтегрованими системами виробництва РЕА.

Таким чином, тема, що присвячена розробці моделей та методів інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованих системах керування гнучкого інтегрованого роботизованого виробництва, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт у відповідності до планів Міністерства освіти і науки України в Харківському національному університеті радіоелектроніки в рамках НДР кафедри технології та автоматизації виробництва РЕЗ та ЕОЗ за держбюджетними темами: «Конструкторсько-технологічні основи створення перспективних компонентів електромеханічних систем та технологій їх виготовлення» (№ ДР 0108U002216); «Теоретичні основи мікромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (№ ДР 0110U002594); «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями та їх впровадження» (№ ДР 0113U000358). У вказаних роботах здобувач брав участь у якості виконавця. Ним розроблено методи та окремі моделі інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованих системах керування ГІС, відповідне математичне, інформаційне, програмне та апаратне забезпечення.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою дослідження є розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми створення теоретичних основ інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованих системах керування гнучкими роботизованими інтегрованими системами виробництва радіоелектронної апаратури, математичного, інформаційного та програмного забезпечення для планування виробничих завдань функціонування ГІРС, що враховує зміни станів виробничої системи та робочого простору, оперативно перебудовує плани розв'язання складних практичних завдань, у тому числі в процесі їх виконання, та дозволить підвищити ефективність процесів керування гнучкими інтегрованими системами виробництва РЕА.

Задачами дослідження є:

- аналіз сучасного стану розвитку автоматизованих систем керування гнучких інтегрованих роботизованих систем в цілому та систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень автономними роботами;
- дослідження і розробка концепції та методу адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих роботизованих систем виробництва РЕА;
- розробка моделей інтелектуальної підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах керування на основі методу адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем;
- розробка моделей подання знань та методу побудови систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах керування гнучкого інтегрованого роботизованого виробництва;
- розробка інформаційного та програмного забезпечення засобів інтелектуальної підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах керування гнучкими інтегрованими роботизованими системами виробництва РЕА.

Об'єктом дослідження є процеси планування стратегій функціонування автоматизованих систем керування гнучкого інтегрованого роботизованого виробництва.

Предметом дослідження є методи та моделі та інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованому керуванні гнучким інтегрованим радіоелектронним виробництвом.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використано основні положення теорії штучного інтелекту – для розробки методів інтелектуальної підтримки прийняття рішень, системи баз знань; теорії множин – для розробки теоретико-множинної моделі процесів планування стратегій функціонування гнучких інтегрованих роботизованих систем; теорії предикатів – для розробки логічної моделі; теорії нечітких множин – для дослідження та розробки нечіткої моделі; теорії ймовірностей – для розробки імовірнісної моделі планування стратегій функціонування гнучкої інтегрованої роботизованої системи. Для проведення експериментальних досліджень гнучких інтегрованих роботизованих систем, практичної перевірки результатів роботи, розробки програмного забезпечення використано мови програмування C/C++ та Prolog, програмні бібліотеки MFC, OpenGL, OpenCV.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано концепцію побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (ІСПР) гнучких інтегрованих роботизованих систем (ГІРС) радіоелектронного виробництва, яка, на відміну від існуючих, враховує технічний склад ГІРС, її робочого простору та визначає склад інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень автоматизованої системи керування ГІРС.

2. Вперше запропоновано метод адаптації стратегій функціонування, який на відміну від існуючих на основі розробленої концепції побудови ІСПР забезпечує формалізацію станів робочого простору, ГІРС та її цілей, визначає стратегії функціонування ГІРС в умовах змін робочого простору, станів автоматизованої системи керування та загальної мети виробничої системи.

3. Вперше запропоновано динамічну модель стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем, яка за допомогою формалізації якісних станів ГІРС та переходів між ними характеризує взаємодію роботизованої системи з об'єктами робочого простору під час реалізації розроблених стратегій і, на відміну від існуючих моделей, дозволяє забезпечити опис функціонування автоматизованої системи керування ГІРС в умовах динамічного стану робочого простору.

4. Вперше запропоновано теоретико-множинну модель адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем, у якій у відповідності до сформульованої виробничої мети, станів системи та робочого простору формуються стратегії функціонування ГІРС, і яка, на відміну від існуючих моделей дозволяє забезпечити опис впливу змін робочого простору гнучкої інтегрованої роботизованої системи на процес формування стратегій і формулює основні поняття адаптації їх планування.

5. Вперше запропоновано логічну модель адаптації стратегій функціонування гнучкої інтегрованої роботизованої системи, яка використовує логіку предикатів і, на відміну від існуючих моделей, описує відношення, що існують між об'єктами робочого простору ГІРС, формулює цілі автоматизованої системи керування у вигляді необхідних станів робочого простору і забезпечує побудову механізмів логічного виведення.

6. Отримав подальший розвиток метод побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, який на відміну від існуючих методів дозволяє формалізувати процес прийняття рішень у автоматизованій системі керування гнучкої інтегрованої системи у вигляді уніфікованої пошукової процедури, яка функціонує на

основі фреймоподібних структур знань, визначає послідовності розв'язання окремих технологічних завдань і дозволяє автоматичний пошук рішень.

7. Отримала подальший розвиток модель інтелектуального прийняття рішень на основі теорії нечітких множин, що, на відміну від існуючих моделей, забезпечує опис процесу планування функціонування автоматизованої системи керування в умовах непевності інформації про стан ГПС, непевності вибору дій на кожному кроці планування стратегій дозволяє забезпечити оцінку альтернативних шляхів розв'язання завдань, що постають перед виробничою системою.

8. Отримала подальший розвиток імовірнісна модель інтелектуального прийняття рішень, яка шляхом розгляду планування стратегій як дискретного багатостадійного процесу, кожен крок якого є ймовірним і залежить від попередніх кроків відповідно до теорії марківських ланцюгів, на відміну від існуючих моделей дозволяє забезпечити оцінку альтернативних шляхів розв'язання завдань автоматизованої системи керування в умовах імовірнісного опису станів гнучкої інтегрованої системи.

9. Отримала подальший розвиток імітаційна модель опису організації виробництва, яка характеризує основні виробничі показники, обладнання та персонал, та, на відміну від існуючих моделей, забезпечує гнучкість у переході до іншої номенклатури продукції і дозволяє структурувати подання інформації у гнучких інтегрованих системах.

Практична значущість одержаних результатів:

1. Розроблені і доведені до практичної реалізації у вигляді інформаційного та програмного забезпечення нові імітаційні моделі процесів планування стратегій функціонування у автоматизованих системах керування роботами забезпечують нові проектні рішення з автоматизації процесів розв'язання складних практичних завдань гнучких інтегрованих роботизованих систем.

2. Розроблене інформаційне та програмне забезпечення автоматизованої системи керування маніпуляційним роботом у складі підсистем графічного моделювання, аналізу голосової та візуальної інформації, програмного керування маніпулятором дозволяють проводити необхідні математичні розрахунки, забезпечувати обробку голосової й візуальної інформації, інтелектуальну підтримку прийняття рішень під час планування стратегій функціонування щодо складальних і допоміжних технологічних операцій у гнучкій інтегрованій роботизованій системі.

3. Розроблене інформаційне та програмне забезпечення автоматизованої системи керування перспективним транспортним роботом практично реалізує розроблені теоретичні моделі та методи, проводить аналіз динаміки робочого простору робота за допомогою системи комп'ютерного зору, забезпечує адаптацію планування технологічних маршрутів і окремих операцій, дозволяє підвищити ефективність функціонування гнучкої інтегрованої роботизованої системи виробництва компонентів РЕА.

4. Розроблене інформаційне та програмне забезпечення автоматизованої системи керування експериментальної гнучкої інтегрованої виробничої системи забезпечує аналіз динаміки виробничої ділянки за допомогою системи комп'ютерного зору і забезпечує інтелектуальне прийняття рішень щодо планування, виконання та адаптації технологічних операцій складання виробів РЕА і, таким чином, дозволяє підвищити ефективність функціонування гнучкої інтегрованої роботизованої системи.

Запропоновані нечітка та ймовірнісна моделі планування стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем впроваджені на Державному Науково-виробничому підприємстві «Комунар» (акт впровадження від 4.02.2014) і реалізовані у вигляді апаратних та програмних засобів експериментальної системи керування гнучкої інтегрованої ділянки виробництва компонентів радіоелектронної апаратури. Розроблені метод та логічна модель адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем впроваджено на Державному підприємстві «Харківський машинобудівний завод ФЕД» (акт впровадження від 2.06.2014), чим забезпечено зменшення транспортних витрат, підвищення ефективності обслуговування гнучких інтегрованих систем. Розроблені та реалізовані у вигляді інформаційного та програмного забезпечення динамічна та теоретико-множинна модель планування стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем впроваджені на державному підприємстві «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування» і забезпечують підвищення якості технологічної підготовки заготівельного виробництва автоматичних штампувальних комплексів (акт впровадження від 11.11.2013). Розроблені динамічна та логічна модель адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем впроваджені також у Харківському (акт від 20.01.14) та Київському (акт від 20.01.14) інститутах судових експертиз і використовуються під час експертизи процесів складання та розборки радіоелектронних виробів. Розроблені методи і моделі, інформаційне та програмне забезпечення впроваджені у навчальний процес та НДР у Харківському національному університеті радіоелектроніки (акти впровадження від 11.03.2014), у навчальний процес в Донецькому інституті підприємництва (акт від 12.12.2012 р).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: в [1] – принципи функціонування систем інтелектуального проектування в робототехніці, в [2] – інформаційна модель та реалізація системи планування, в [3] – моделі систем планування стратегій, в [4] – геометрична модель маніпулятора, в [5] – модель транслятора, в [6] – характеристики персептрона та параметри експериментів, в [9] – інформаційне та програмне забезпечення ГІС, в [10] – логічна модель формування голосових команд, в [11] – моделі складальних операцій, в [12] – динамічна модель процесу складання деталей, в [16] – геометрична модель маніпулятора, в [17] – логічна модель проектування роботизованих процесів, в [18] – теоретико-множинна модель адаптивного планування стратегій, в [19] – модель керування, в [20] – імітаційні моделі процесів прийняття рішень в системах керування, в [21] – опис концепції інтелектуальних виробничих систем, в [23] – фреймова модель конструкторських знань, в [24] – метод побудови інтелектуального вирішувача, в [25] – методи побудови сенсорних систем робота, в [26] – моделювання системи керування роботом, в [27] – програмне забезпечення експертної системи, в [29] – інформаційне забезпечення системи керування, в [31] – модель керування роботом, в [32] – моделі адаптивного планування стратегій, в [33] – метод побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, в [34] – ймовірнісна модель планування стратегій робота, в [37] – нейроподібна модель керування роботом, в [38, 39] – принципи побудови системи голосового керування, в [40] – основні положення логічної моделі, в [41] –

принципи побудови транслятора голосових команд, в [43] – модель інтелектуальної системи керування роботом, в [44] – принципи адаптації роботизованої системи, в [46] – структура адаптивної системи керування, в [47] – принципи розробки інтелектуальної системи керування роботом, в [48] – принципи реалізації системи керування мобільним роботом, в [49] – формулювання завдань прийняття рішень, в [50] – модель прийняття рішень, в [51] – концепції інтелектуальних агентів, в [52] – модель адаптивної візуальної системи, в [53] – концепція адаптивного керування, в [54] – теоретико-множинна модель планування дій робота, в [55] – нечітка та теоретико-множинна моделі планування дій робота.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи представлені на: 2-му та 3-му Міжнародних радіоелектронних форумах «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (Харків, 19-23 вересня 2005 р., 22-24 жовтня 2008 р.); 10-му та 11-му міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка та молодь у XXI ст.» (Харків, 10-12 квітня 2006 р., 10-12 квітня 2007 р.); 3-й, 4й та 6-й міжнародних молодіжних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» (Севастополь, 16-21 квітня 2007 р., 21-25 квітня 2008 р., 14-24 квітня 2010 р.); 9-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції TCSET 2008 (Львів, 19-23 лютого 2008 р.); 1-й Міжнародній науковій конференції «Електронна компонентна база. Стан та перспективи розвитку» (Харків - Судак, 30 вересня - 3 жовтня 2008 р.); XI-й, XII-й та XII-й міжнародних науково-технічних конференціях «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 26 – 30 травня 2009 р., 25–29 травня 2010 р., 23–28 травня 2011 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» (Севастополь, 7–12 вересня 2009 р., 6–10 вересня 2010 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Дніпропетровськ, 4 –11 червня 2010 р.); 1-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем» (Сєверодонецьк, 25-26 жовтня 2011 р.); II-й міжнародній науково-практичній конференції «Робототехніка як освітня технологія» (Железногорськ, 3 грудня 2011 року); міжнародному симпозиумі «East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012)» (Харків, 14–17 вересня 2012 року), на науково-технічних семінарах Харківського національного університету радіоелектроніки (2012-2014 рр), Кембріджського університету (Велика Британія) (2008 р), Придніпровського наукового центру НАН України (м. Дніпропетровськ, 2014 р.).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 55 наукових праць, з них 34 статті, у тому числі 31 у наукових фахових виданнях України з технічних наук (9 одноосібних, 5 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз), 3 статті у виданнях інших країн; 1 монографія (у спів-авторстві), 20 публікацій у збірниках матеріалів і тез доповідей науково-технічних конференцій.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота є рукописом і складається із вступу, 6 розділів, висновків, двох додатків. Повний обсяг дисертації складає 371 с, що включає 56 рисунків, з них 2 на окремих сторінках, 9 таблиць, список використаних джерел з 288 найменувань на 31 сторінці, 2 додатки на 46 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми досліджень, наведено зв'язки дисертаційної роботи з науковими напрямками. Сформульовано наукову проблему, наведено відомості про наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, реалізацію результатів роботи. Наведено інформацію про наукові публікації автора за темою роботи, його особистий внесок у вирішення наукової проблеми розробки інтелектуальних систем прийняття рішень гнучких планування стратегій функціонування ГІРС, сформульовано мету та задачі дослідження.

У першому розділі роботи проводиться аналіз сучасних концепцій гнучких інтегрованих систем, розглядається їх еволюція від гнучких виробничих систем (ГВС) до сучасних інтегрованих автоматизованих виробництв нового типу. Розглядається структура та функції автоматизованих систем керування гнучких автоматизованих дільниць. Проводиться аналіз використання промислових роботів у складі ГІС, в тому числі завдань автоматизованого керування роботами. Зазначається низка недоліків автоматизованих систем керування існуючих ГІС виробництва РЕА, зокрема їх надмірна централізація, недостатній рівень автономності засобів керування та моніторингу, адаптації та прийняття рішень. Вказується, що сучасною тенденцією ГІС є їх перехід до концепції інтелектуальних виробничих систем, в тому числі на основі агентного-орієнтованого підходу. Вказується, що робочий простір такого виробництва є визначеним лише частково, є стохастичним, динамічним, безперервним, мультиагентним. Для опису функціонування об'єктів, які приймають рішення в такому РП доцільно використати концепцію інтелектуальних агентів, що фізично реалізуються і вигляді автономних роботів та іншого інтелектуалізованого технологічного обладнання. Розглядаються практичні реалізації систем планування стратегій функціонування та розробка цілеспрямованих систем планування функцій ГІС. Відзначається, що окремою проблемою ГІРС є адаптація процесів прийняття рішень під час розв'язання виробничих завдань. Обґрунтовано доцільність створення концепції побудови гнучкої інтегрованої роботизованої дільниці, що містить у своєму складі інтелектуальний транспортно-складальний робот, який забезпечує транспортування заготовок та деталей, моніторинг виконання технологічних операцій і окремих переходів на технологічному обладнанні, виконання окремих транспортно-складальних операцій, зокрема для виробництва компонентів радіоелектронної апаратури (РЕА). Сформульована проблема дослідження, що полягає у необхідності підвищення ефективності процесів автоматизованого керування за рахунок використання нових методів та моделей інтелектуальної підтримки прийняття рішень мета та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі для розв'язання завдання побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень гнучких інтегрованих роботизованих систем (ГІРС) пропонується концепція адаптації стратегій функціонування, яка виходить з того, що:

- а) існує суб'єкт (суб'єкти) планування стратегій у вигляді мобільного або маніпуляційного робота (роботів), оснащеного автоматизованою системою керування (АСК);
- б) існують об'єкти ГІРС, стосовно яких приймається і здійснюється рішення;

в) існує робочий простір (РП), що включає суб'єкти та об'єкти планування стратегій, також сторонні об'єкти, що можуть впливати на процес планування стратегій, характер простору ГРС задається і може бути детермінованим або стохастичним;

г) властивостями суб'єкта планування стратегій (АСК робота) є:

- технічні характеристики (спроможність до виконання рішення);
- розробка стратегій функціонування відповідно до поточного стану РП;
- виконання стратегії стосовно переміщень у РП або маніпуляцій з об'єктами;
- адаптація стратегії у разі змін виробничого завдання або у РП;
- адаптація виконання рішень у відповідності з обраною стратегією;

д) тоді інтелектуальна система підтримки прийняття рішень автоматизованої системи керування виконавчого суб'єкта складатиметься з таких частин (рисунок 1):

– блок накопичення інформації про РП (база даних, пов'язана із сенсорною системою виконавчого суб'єкта);

– блок операторних схем, що містить стандартизовані описи розв'язання окремих підзадач (база знань АСК робота);

– блок пошуку стратегій, що на основі інформації про мету окремого кроку планування стратегій або на основі глобальної мети висуває гіпотезу (у загальному випадку) щодо стратегії функціонування;

– блок планування стратегій, який у взаємодії з сенсорною системою має здійснювати спостереження (моніторинг) змін РП системи і, за необхідності, змінювати (адаптувати) план реалізації рішення;

– блок формулювання мети системи;

– блок перевірки результатів роботи АСК;

– блок формування і виконання рухів (маніпуляцій).

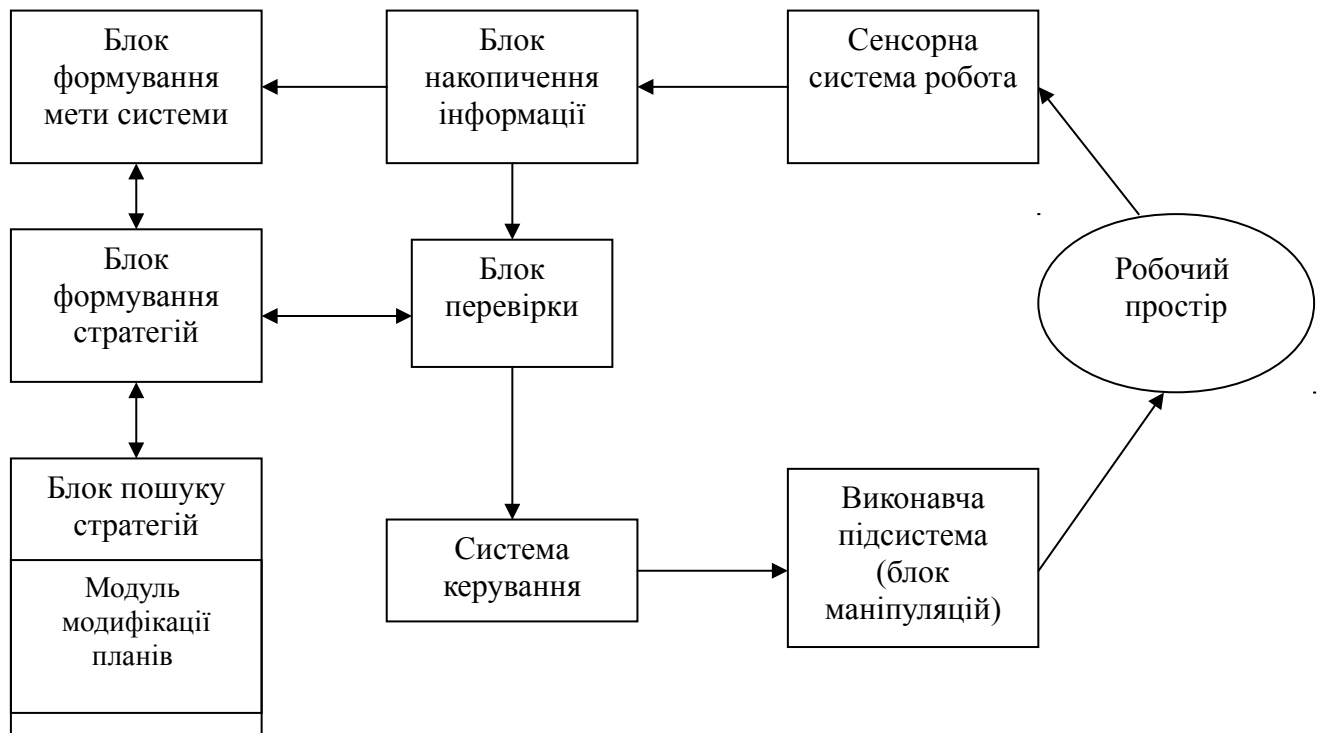


Рисунок 1 – Схема автоматизованої системи керування ГРС

Розроблена структура має сприймати інформацію про стан робочого простору інтегрованої системи і модифікувати процес планування стратегій у відповідності до змін у просторі, тобто мати ознаки адаптивної системи.

Опис даних автоматизованої системи керування (АСК) ГРС з точки зору планування стратегій матиме такий вигляд: стан робототехнічної системи (РТС) у складі ГРС, характеризується множиною елементів $x_i \in X, i = 0 \dots n-1$, і описується як вектор $X = \{X^0, X^1, \dots, X^{n-1}\}$, що у моменти часу t_0, \dots, t_{n-1} приймає значення $X_0 = \{x_0^0, x_0^1, \dots, x_0^{n-1}\}$, $X_1 = \{x_1^0, x_1^1, \dots, x_1^{n-1}\}, \dots, X_{n-1} = \{x_{n-1}^0, x_{n-1}^1, \dots, x_{n-1}^{n-1}\}$.

РТС існує робочому просторі (РП) $s_i \in S, i = 0 \dots m-1$.

РП є 2-х або 3-х вимірним і залежить від часу. Множина характеристик РП задається як вектор станів $S = \{S^0, S^1, \dots, S^{n-1}\}$ і у моменти часу t_0, \dots, t_{n-1} приймає значення $S_0 = \{s_0^0, s_0^1, \dots, s_0^{n-1}\}$, $S_1 = \{s_1^0, s_1^1, \dots, s_1^{n-1}\}, \dots, S_{n-1} = \{s_{n-1}^0, s_{n-1}^1, \dots, s_{n-1}^{n-1}\}$;

РТС здатна планувати рішення $d_k \in D, k = 0 \dots l-1$ стосовно перетворення своїх станів і станів РП. Множина рішень, що приймаються системою планування стратегій (СПР) інтелектуальної системи керування (ІКС) формують вектор $\bar{D} = \{d_0, d_1, \dots, d_{m-1}\}$, де m – кількість рішень у проміжку часу t_0, \dots, t_{n-1} ;

Рішення реалізуються діями РТС: $a_i \in A, i = 0 \dots l-1$.

Множина дій $A = \{a^0, a^1, \dots, a^{n-1}\}$ здійснюється РТС як реалізація прийнятих рішень \bar{D}_i у складі рухів або маніпуляцій $a_{mv} \subset A, a_{mp} \subset A$.

Ціль функціонування РТС є станом $y \in X$, що досягається послідовним перетворенням станів: $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow \dots \rightarrow x_{n-1} = y$.

Таким чином в процесі досягнення мети відбуваються перетворення:

$$x_1 = f_1(x_0, y, s_0, d_0, a_0) + \varepsilon_0, \|x_1 - f(x_0)\| \leq \varepsilon_0,$$

.....

$$x_k = f_k(x_{k-1}, y, s_{k-1}, d_{k-1}, a_{k-1}) + \varepsilon_k, \|x_k - f(x_{k-1})\| \leq \varepsilon_k,$$

.....

$$y = f_n(x_{n-1}, y, s_{n-1}, d_{n-1}, a_{n-1}) + \varepsilon_n, \|y - f(x_{n-1})\| \leq \varepsilon_n,$$

де f – функція переходів, ε – похибка переходу.

Переходи характеризуються вартістю $c_i \in A, i = 1 \dots n$ та тривалістю $t_i \in T, i = 1 \dots n$. Метою є знаходження такої послідовності переходів f_1, \dots, f_n , яка забезпечуватиме перехід системи з початкового стану x_0 у цільовий y .

$$\text{Умовами пошуку } \varepsilon: \sum_{i=1}^n t_i \rightarrow \min, \sum_{i=1}^n c_i \rightarrow \min, \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \rightarrow \min.$$

При цьому вказані множини представляють конкретні елементи АСК.

Зокрема, РТС (множина X) з точки зору розв'язання завдань АСК пропонується описати у складі наступних елементів: маніпулятор, автоматизована система керування, сенсорна система, система технічного зору, система зв'язку, платформа мобільного робота.

Опис множини рішень D пропонується у складі: рішення про переміщення маніпулятора (маніпуляторів) на рівні окремих операцій; рішення про напрям рухів шасі мобільного робота, зміни швидкості і прискорення; запити давачів та системи

системи технічного зору; очікуваний результат (прийняте рішення); передумови прийняття рішень.

Опис множини об'єктів робочого простору (РП) S : об'єкти РП; стан РП.

Опис множини Y цілей АСК робота: розташування робота у точці РП, операції (маніпуляції) у точці простору; отримані дані про стан РП.

Прикладами постановки завдання роботу є:

знаходиться у точці(x, y, z);

здійснити операцію(*взяти_об'єкт*(*клас*(*трансформатор*))).

Гнучка інтегрована складальна система (ГІСС) розглядається у складі автоматів складання (паяння), транспортно-складальних роботів, накопичувачів, що формують множину $eq_i \in Eq, i = 0 \dots n-1$. Метою ГІСС є забезпечення складання пристроїв (модулів) РЕА, зокрема на друкованих платах M .

При цьому $M = \langle B, Ch, T, R, C, L, \dots \rangle$, де B – друкована плата, Ch – мікропроцесорні пристрої, T – напівпровідникові прилади, R – резистори, C – конденсатори, L – індуктивності.

Конфігурація пристрою визначається його конструкторським проектом M^G , який визначає цільове розташування елементів на друкованій платі. Фактично модуль (плата) є прямокутною матрицею, що заповнюється елементами множини M .

Початково, M_0 є нульовою. ГІСС генерує рішення $d_k \in D, k = 0, \dots, l-1$, що реалізуються діями (технологічними переходами): $a_k \in A, k = 0, \dots, l-1$. Рішення \bar{D} про порядок виконання операцій складання є послідовністю операцій $a_i \in A, i = 0 \dots l-1$, що полягатимуть у встановленні в B елементів множин Ch, T, R, C, L, \dots , наприклад

$$\bar{D} = \{Ch_0, Ch_1, T_0, T_1, R_0, Ch_3, C_0, L_0, \dots\}.$$

В процесі досягнення цільового стану M^G відбуваються перетворення $M_i = f_i(Eq, D_i, M_{i-1}) : M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots \rightarrow M^G$.

Заповнення M визначатиметься порядком операцій складання, який визначатиметься проектом M^G , технологічними правилами Tr , технологічним обладнанням E . Таким чином $\bar{D} = g(M^G, Tr, E)$. Метою є знаходження такої послідовності переходів f_1, \dots, f_n , яка забезпечуватиме перехід системи з початкового стану M_0 у цільовий M^G . Приклади елементів робочого простору ГІС показано на рисунку 2.

Під час розробки АСК для ГІС різного призначення важливим етапом є вибір моделей планування стратегій із урахуванням конкретних умов робочого простору, можливостей моделей технологічного обладнання, в тому числі роботів, характеристик їх сенсорних систем та інших показників. Характер обраних моделей визначає сутність методів планування стратегій.

Метод адаптивного планування стратегій є описом сукупності прийомів та операцій, що застосовуються у автоматизованих системах керування ГІРС у розв'язанні складних виробничих завдань.

- 1) Метод розглядає РТС як сукупність об'єктів і підсистем $X = \{X_0, X_1, \dots, X_{n-1}\}$.
- 2) Метод передбачає отримання інформації про стан РП робота за допомогою сенсорної системи, на основі чого формується множина об'єктів простору S .
- 3) Мета системи має формулюватися як необхідний стан Y .

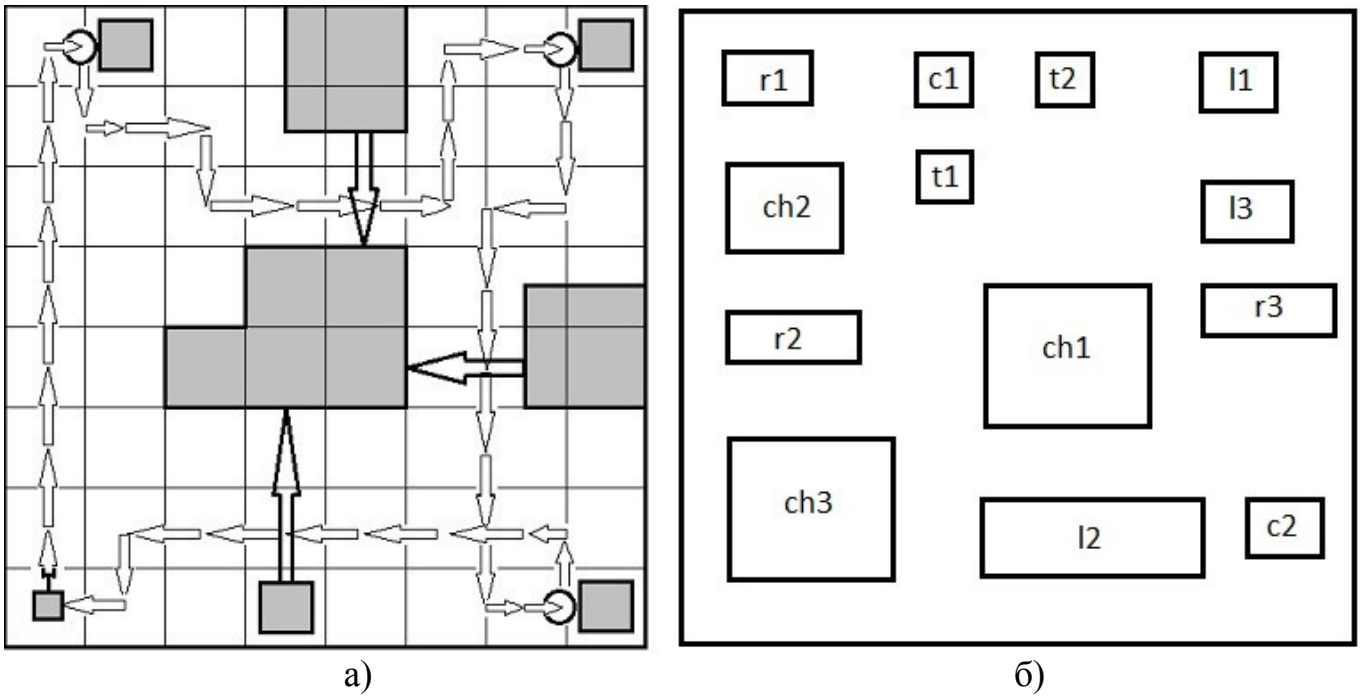


Рисунок 2 – Приклади організації робочого простору ГІС:

а) – завдання транспортного робота, б) – завдання маніпуляційного робота

4) Мета системи має розглядатися як набір дискретних складових – підцілей СК, що досягаються за допомогою набору рішень $Y = \{G_0, G_1, \dots, G_{n-1}\}$.

5) Для досягнення поставленої мети СК має визначити план рішення $D = \{D_0, D_1, \dots, D_{n-1}\}$, що дозволяє послідовно досягти усі підцілі загальної мети.

6) Під час визначення загальної мети та окремих цілей СК має враховуватися як стан самої СК, так і стан робочого простору $G_i = f\{X_i, S_i, D_i\}$.

7) Якщо вплив власного стану СК та РП не дозволяє виконувати окремі дії щодо з реалізації запланованих підцілей у досягненні загальної мети системи $D_i * X_i * S_i \neq G_i$, план рішення має бути зміненим (адаптованим) таким чином, щоб забезпечити перехід від поточного стану СК до цільового: $D_i * X_i * S_i \neq G_i$,

8) Якість вибору плану досягнення мети СК має оцінюватися відповідно до умов поточного та наступного станів СК та РП робота: $\|D_{imp} - D_i\| < Q(X_i, S_i, G_i)$.

Виконання робототехнічною системою (РТС) певних завдань є динамічним процесом, який складається з окремих дискретних кроків і виконується протягом певного часу. Тому, пропонується динамічна модель планування стратегій.

Динамічна модель виходить з існування станів РТС $x_i \in X, i = 0 \dots n-1$, станів РП $s_i \in S, i = 0 \dots m-1$, одного або декількох станів $y \in X, s^G \in X$ що є метою РТС, яка досягається рішеннями $d_i \in D, i = 0 \dots n-1$.

Відповідно до рішень d_i відбуваються переходи:

між станами РТС: $p_i(x_i, x_{i-1}), p_i \in P, i = 0 \dots n-1$,

між станами РП: $\psi_i(s_i, s_{i-1}), \psi_i \in \Psi, i = 0 \dots n-1$.

Переходам РТС і РП згідно рішень d_i відповідають функції розв'язання окремих технологічних завдань (ТЗ):

$$f_i = \langle x_0^i, p_0^i, x_1^i, p_1^i, \dots, x_{n-1}^i \rangle, f_i \in F,$$

функції планування стратегій:

$$G_i = G(f_0, p_0, \psi_0, \dots, f_{n-1}, p_{n-1}, \psi_{n-1}),$$

при цьому n обмежується.

Функціонування РТС характеризується зміною станів самої РТС, РП, завдань:

$$x_0 \prec x_1 \prec \dots \prec x_{n-1}, s_0 \prec s_1 \prec \dots \prec s_{n-1}, G_0 \prec G_1 \prec \dots \prec G_{n-1}.$$

Кожне завдання характеризується рівнями якості: $q_0 \prec q_1 \prec \dots \prec q_{n-1}$, при цьому:

$$q_1 = f_1(x_0, y, s_0, d_0, a_0, t_0, c_0, q_0),$$

$$\dots, \\ q_n = f_n(x_{n-1}, y, s_{n-1}, d_{n-1}, a_{n-1}, t_{n-1}, c_{n-1}, q_{n-1}),$$

Умови розв'язання завдань: $\sum_{i=1}^n q_i \rightarrow \max$, $\sum_{i=1}^n c_i \rightarrow \min$, $\sum_{i=1}^n t_i \rightarrow \min$.

Досягнення цільового стану Y забезпечується виконанням завдань, що формує вектор $\vec{f}^0 = \langle f_0^0, f_1^0, f_2^0, \dots, f_{n-1}^0 \rangle$.

Якщо за певних $\psi_i \in \Psi$ цільові функції не забезпечують досягнення цільових станів y , s^G , або якість переходів q_i не є задовільною, функція планування стратегій G_i має бути змінена таким чином, що слід згенерувати такий вектор $f^* = \langle f_0^*, \dots, f_{m-1}^* \rangle$ що задовольнятиме $G_i^*(x_i) = y$ або $G_i^*(s_i) = s^G$.

Увесь процес планування стратегій подаватиметься послідовністю виконання технологічних завдань і складатиме певний технологічний процес. До технологічних завдань, зокрема, належать локомоційні, маніпуляційні, обслуговуючі, заготівельні та інші операції.

Взаємодія РТС з системою планування стратегій (підсистемою вирішувача) описуватиметься відношеннями, що задаються декартовими добутками і відповідають дискретним етапам (на проміжку часу $t=0, \dots, k$) виконання процесу рішення:

$$(X_0 \times D_0 \times S_0, X_1 \times D_1 \times S_1, X_2 \times D_2 \times S_2, \dots, X_k \times D_k \times S_k)$$

і відповідають якісним станам ІСК: $\langle Q_0^i, Q_1^i, Q_2^i, \dots, Q_{n-1}^i \rangle$, відповідно набору станів якості $C_1 \prec C_2 \prec C_3 \prec \dots \prec C_n$.

Модель зміни станів визначатиметься взаємодією елементів множин X, D, S :

$$(X_0 \times D_0 \times S_0) \prec (X_1 \times D_1 \times S_1) \prec \dots \prec (X_{n-1} \times D_{n-1} \times S_{n-1}),$$

що відображає процес планування стратегій у АСК роботом, який має враховувати стан елементів РТС, їх взаємодію з РП, можливість вибору певних рішень у конкретних умовах місця і часу. Таким чином, динамічна модель описує еволюцію РП ГІРС, що здійснюється її активними діями задля досягнення цільового стану.

Формально процес планування стратегій у АСК ГІРС може розглядатися декількома способами. Одним з найбільш загальних є теоретико-множинний підхід.

Розглянемо множини X, D, S станів РТС, її рішень, станів РП, відповідно.

Мета інтелектуальної системи прийняття рішень (ІСПР) ГІРС полягає у переході у цільовий стан y , що досягається застосуванням декартових добутків $X_i \times D_i \times S_i$ на кожному кроці роботи. Для досягнення мети в момент t_0 своєї роботи СПР розробляє початковий план: $\vec{D}^0 = \{d_0^0, d_1^0, \dots, d_{n-1}^0\}$, який передбачає послідовні переходи станів: $X_0^0 \rightarrow X_1^0 \rightarrow \dots \rightarrow X_{n-1}^0 \equiv Y$,

що реалізується за допомогою декартових добутків:

$$X_0 \times D_0^0 \times S_0 \rightarrow X_1 \times D_1^0 \times S_1 \rightarrow \dots \rightarrow X_{n-1} \times D_{n-1}^0 \times S_{n-1},$$

і має призвести систему у цільовий стан Y .

Переходи мають відповідати обмеженням:

$$\|X_1 - D_0 \times X_0 \times S_0\| \leq \varepsilon_1, \|X_2 - D_1 \times X_1 \times S_1\| \leq \varepsilon_2, \dots, \|Y - D_{n-1} \times X_{n-1} \times S_{n-1}\| \leq \varepsilon_n.$$

Розглядаючи вираз $F: D \times X \rightarrow Y$ для конкретних множин рішень і об'єктів, слід розглядати весь набір пар множин актів рішення та характеристик роботизованої системи, що характеризують декартовий добуток, наприклад:

$$\begin{aligned} & D \{ \text{перейти, взяти, подивитись} \} \times \\ & X \{ \text{маніпулятор, контролер, сенсори, СТЗ, СЗ, шасі} \} \\ & = Y \{ \text{робот_у_точці}(x_i, y_i, z_i) \} = \\ & = D \{ \{ \text{перейти, маніпулятор} \}, \{ \text{перейти, контролер} \}, \\ & \{ \text{перейти, СТЗ} \}, \{ \text{перейти, СЗ} \}, \{ \text{перейти, шасі} \}, \{ \text{взяти,} \\ & \{ \text{взяти, контролер} \}, \{ \text{взяти, сенсор} \}, \{ \text{взяти, СТЗ} \}, \{ \\ & \{ \text{взяти, шасі} \}, \{ \text{взяти, маніпулятор} \}, \{ \text{подивитись,} \end{aligned}$$

Результат отримано за умови врахування сумісностей пар декартової множини, де сумісними є шасі і операція переходу, операція взяття об'єкта, СТЗ і операція огляду РП, несумісними є пари взяття контролера та переходу сенсора.

Дія «перейти» має очікуваний результат – *робот_у_точці* (x, y, z), таким чином у множині D обирається операція $\{ \text{перейти, шасі} \}$:

$$D(\text{перейти, шасі}) = \{ \text{робот_у_точці}(x, y, z) \}.$$

Разом з тим рішення має передумову

$$D(\text{перейти}(\text{очікуваний результат}(\text{робот_у_точці}(x, y, z))),$$

$$\text{передумова}(\text{робот_у_точці}(x, y, z))).$$

Наявність передумови викликає необхідність рекурсивного рішення підцілі:

$$D(\dots) \times X(\dots) = \{ \text{робот_у_точці}(x, y, z) \}.$$

Якщо розглядати процес планування стратегій за умов визначень, показаних вище, тоді у початковому стані системи X_0 для досягнення цільового стану Y необхі-

дно виконати послідовність дій $D_0^0, D_1^0, D_2^0, \dots, D_n^0$ (індекс 0 позначає початковий варіант стратегії). Таким чином, маємо наступний набір переходів станів системи:

$$X_1 * D_1^0 = X_2 ; \dots ; X_{n-1} * D_{n-1}^0 = Y .$$

Якщо ж враховувати вплив середовища S на кожному етапі, тоді:

$$\begin{aligned} X_0 * D_0^0(S_0) &= X_1, & S_0 * D_0^0(S_0) &= S_1; \\ X_1 * D_1^0(S_1) &= X_2, & S_1 * D_1^0(S_1) &= S_2; \end{aligned}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$X_{n-1} * D_{n-1}^0(S_{n-1}) = Y, \quad S_{n-1} * D_{n-1}^0(S_{n-1}) = S_n .$$

Невиконання обмежень та динамічний характер РП призводить до не досяжності окремих станів та до неможливості виконання початкового плану:

$$\begin{aligned} X_k \times D_k^0 \neq X_{k+1}, \text{ якщо } \|X_{k+1} - D_k^0 \times X_k\| > \varepsilon_k, \\ \exists S_i \exists X_i \exists D_i : (X_i \times S_i = X_{i+1} \wedge X_i \times D_i \neq X_{i+1}) . \end{aligned}$$

При цьому СПР має знайти такий набір рішень $\vec{D}^* = \{d_0^*, d_1^*, \dots, d_{n-1}^*\}$, який забезпечуватиме перехід до недосягнутого раніше стану:

$$\exists S_i \exists X_i \exists D_i^* : (X_i \times D_i^* = X_{i+1})$$

або перехід до наступних (після $i+1$) станів, якщо досягнення X_{i+1} не є критичним для реалізації технологічного процесу РТС:

$$\begin{aligned} \exists S_i \exists X_i \exists D_i^{**} : (X_i \times D_i^{**} = X_{i+k}) \\ X_0^0 \rightarrow X_1^0 \rightarrow \dots \rightarrow X_k^0 \rightarrow X_{k+1}^* \rightarrow X_{k+2}^* \rightarrow \dots \rightarrow X_{k+1}^L \rightarrow Y, \\ \vec{D} = \vec{D}^0 \cup \vec{D}^* \cup \dots \cup \vec{D}^L, \end{aligned}$$

де $*$ і L позначають модифікований і кінцевий плани рішень.

Це означатиме, що, за певних умов, на етапі X_k запланованої дії D_k^0 стає недостатньо для досягнення X_{k+1} , тобто $X_k * D_k^0 \neq X_{k+1}$, або стан X_{k+1} стає в принципі недосяжним, наприклад за умови наявності у комірниці перешкоди певного типу (рисунок 3).

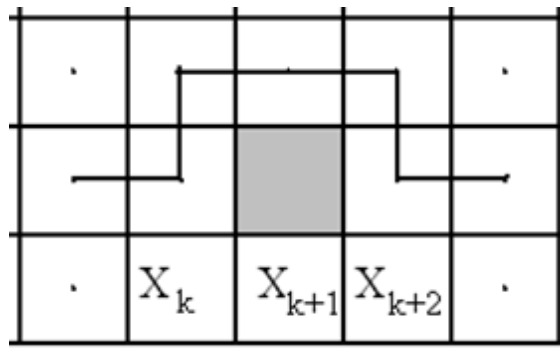


Рисунок 3 – Обходження комірки X_{k+1} за наявності перешкоди в ній

Якщо X_{k+1} є ключовим елементом теорії планування стратегій, відносно якої будується увесь процес рішення, тоді недосяжність X_{k+1} може поставити ОПР в скрутне становище тупика. В інших випадках X_{k+1} замінюється близькими станами.

За умови недосяжності стану X_{k+1} ОПР має адаптуватися до умов РП і генерувати відносно стану X_k нову послідовність дій щодо досягнення мети:

$$X_0^0 \rightarrow X_1^0 \rightarrow \dots \rightarrow X_k^0 \rightarrow X_{k+1}^1 \rightarrow X_{k+2}^1 \rightarrow \dots \rightarrow X_{n-1}^1 \rightarrow Y.$$

Дискретні актів планування стратегій означатимуть послідовність:

$$D_0^0 \rightarrow D_1^0 \rightarrow \dots \rightarrow D_k^0 \rightarrow D_{k+1}^1 \rightarrow D_{k+2}^1 \rightarrow \dots \rightarrow D_{n-1}^L.$$

Певні стани початкового і адаптованого маршрутів можуть повторюватися:

$$X_0^0 \rightarrow X_1^0 \rightarrow \dots \rightarrow X_k^0 \rightarrow X_{k+1}^1 \rightarrow X_{k+2}^1 \rightarrow \dots \rightarrow X_{n-2}^0 \rightarrow X_{n-1}^0 \rightarrow Y,$$

однак це, з іншого боку, означає можливість нових ситуацій адаптації:

$$\begin{aligned} X_0^0 \rightarrow X_1^0 \rightarrow X_3^1 \rightarrow X_4^1 \rightarrow X_5^1 \rightarrow X_6^0 \rightarrow X_7^0 \rightarrow X_8^2 \rightarrow X_9^2 \rightarrow X_{10}^2 \rightarrow \\ \rightarrow X_{11}^1 \rightarrow X_{12}^1 \rightarrow X_{13}^0 \rightarrow X_{14}^0 \rightarrow X_{15}^0 \rightarrow Y \end{aligned}$$

Тут початковий план X^0 спочатку (від стану X_3^0) адаптується за планом X^1 , потім, починаючи з X_7^0 , має нову адаптацію $X_8^2 \rightarrow X_9^2 \rightarrow X_{10}^2$ і закінчується досягненням мети за допомогою елементів планів X^0 і X^1 .

Таким чином, для адаптивного планування стратегій характерними є:

- 1) генерація початкового плану перед виконанням рішення;
- 2) виконання прийнятого плану;
- 3) визначення ситуацій, у яких попередньо прийнятий план стає з точки зору виконання неможливим;
- 4) у разі виникнення ситуацій невиконання попереднього плану – генерація нового плану, тобто адаптація рішення із урахуванням обставин, що змінилися.

Формально, підхід можна записати у такий спосіб, в якому початковий стан розв'язання задачі розробляється відповідно стану ІСК:

$$\begin{aligned} X_0^0 \rightarrow X_1^0 \rightarrow \dots \rightarrow X_k^0 \rightarrow X_{k+1}^0 \rightarrow \dots \rightarrow X_{n-1}^0 \rightarrow Y, \\ D_0 \rightarrow D_1 \rightarrow \dots \rightarrow D_k \rightarrow D_{k+1} \rightarrow \dots \rightarrow D_{n-1}. \end{aligned}$$

Якщо у РП АСК відбуваються зміни, вектор станів об'єктів модифікується, через що оператори прийняття рішень стають хибними.

Визначення 1. Існують стани X АСК, викликані змінами у множині S РП, перехід до яких є неможливим без змін вектора \bar{D} планування стратегій:

$$\exists S_i \exists X_i \exists D_i : (X_i * S_i = X_{i+1}) \wedge (X_i * D_i) \neq X_{i+1}.$$

Наслідком є необхідність модифікації вектора D_i - адаптація раніше прийнятого рішення і висунення такого плану \bar{D}'_i , який задовольняє зміненним умовам:

$$\forall X'_i \exists D'_i : (X'_i * D'_i = X'_{i+1}), \text{ де } D_i * S_i = D'_i, X_i * S_i = X'_{i+1}.$$

Новий розроблений план включатиме елементи старого плану, тобто, якщо розглядати старий план \vec{D}_i як сукупність підмножин $\{\vec{D}_{i1}, \vec{D}_{i2}, \dots, \vec{D}_{in}\}$, тоді до складу D_i' входять окремі \vec{D}_{ij} , тобто $\exists D_{ij}, D_{ij} \subset D_i : D_{ij} \subset D_i'$.

Визначення 2. Систему планування стратегій, здатну змінювати послідовність та характер рішень, прийнятих відповідно до змін у РП, називають адаптивною.

Інакше, адаптивна система планування стратегій (АСПС) є системою, здатною генерувати нові плани поведінки складного об'єкта під впливом зовнішніх чинників. Адаптований план має враховувати стани зміненого РП.

Визначення 3. Якщо однорідний РП у момент 0 характеризується набором об'єктів $X_0 = \{x_0^0, x_0^1, \dots, x_0^n\}$, або вектором \vec{X}^0 , а в інший момент – відповідними векторами \vec{X}^i , які характеризують стан РП у різні моменти часу, існують оператори планування стратегій, здатні переводити систему з одного стану і інший, тобто:

$$\exists X_k^i \exists X_l^j \exists \vec{D}_{kl} : \vec{D}_{kl}(X_k^i) \Rightarrow X_l^j \text{ або } \exists X_k^i \exists X_l^j \exists \vec{D}_{kl} : X_k^i * \vec{D}_{kl} \Rightarrow X_l^j,$$

де, у свою чергу, вектор \vec{D}_{kl} є множиною $\{D_k, \dots, D_l\}$.

Визначення 4. Впорядкована сукупність операторів рішення, що переводять систему зі стану i в стан j , називається планом P_{ij} , що поєднує вектори станів та операторів планування стратегій

$$P_{ij} = \dots \begin{bmatrix} X_i * D_i \rightarrow X_{i+1} \\ X_{i+1} * D_{i+1} \rightarrow X_{i+2} \\ \dots \\ X_{j-1} * D_{j-1} \rightarrow X_j \end{bmatrix}.$$

Під час адаптивного планування стратегій план може неодноразово змінюватися і переходити з одного стану в інший. Таким чином, формується набір (вектор) планів, останній з набору характеризуватиме перелік усіх актів планування стратегій, що забезпечили досягнення цільового стану:

$$\vec{P} = \{P_0, P_1, P_2, \dots, P_n\}.$$

Визначення 5. Сукупність усіх планів, що були розроблені під час адаптивного планування стратегій, називається повним планом рішення. Останній елемент повного плану є адаптованим планом прийняття рішень.

Наявність повного плану рішення дозволяє забезпечити у тому числі технічне спостереження еволюції планів системи, детальний аналіз в разі виникнення технічних проблем або в разі незадоволення результату заданим умовам.

Вибір наступної – логічної моделі обумовлюється тим, що заплановані дії ГПС мають виглядати послідовними, перевіреними і, отже, логічними у звичайному розумінні. Ще однією рисою прийнятого рішення є його істинність у відповідності до поточних умов РП, тобто рішення, що приймається у просторі S є істинним у момент часу t і може бути неістинним у момент $t+1$, проте завжди рішення матиме значення істинності. Під час розгляду логічної моделі використаємо позначення, аналогічні теоретико-множинній моделі.

Нехай задані множини X, D, S , станів РТС, її рішень, станів РП, відповідно.

Тоді $x_i \in X, d_i \in D, s_i \in S \in$ атомарними виразами моделі діяльності РТС і РП.

Між окремими елементами множин X, D, S вводяться операції $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$.

Для опису теорії на множинах X, D, S вводяться функції перетворення станів

РТС: $x_i = f(x_0, \dots, x_{i-1})$, перетворення станів РП: $s_i = f(s_0, \dots, s_{i-1})$.

Також вводяться предикати, що пов'язують елементи множин X, D, S :

$$pt(x_i), pt(s_i), pt(d_i), pt(x_i, s_i), pt(x_i, d_i), pt(d_i, s_i), pt(x_i, d_i, s_i)$$

які забезпечують опис властивостей РТС та РП, їх взаємний вплив та залежність.

Серед предикатів визначають: $pr(x_i, s_i) \subset pt$ – множину описів РТС у РП,

$ps(x_i, s_i) \subset pt$ – множину описів РП у зв'язку з РТС, $pa(x_i, s_i) \subset pt$ – множину дій РТС у РП, $pg(pr, ps) \subset pt$ – множину цілей РТС у РП.

Мета РТС задається як новий (або існуючий) стан РТС або РП:

$$pg(pr, ps) \leftarrow (pr(x_i, s_i) \vee ps(x_i, s_i)).$$

База даних РТС задається як сукупність описів $pr()_0, pt()_0$:

$$pr(x_i), pr(x_i, s_i), ps(s_i), ps(x_i, s_i).$$

База знань РТС задається як сукупність описів $pa(x_i, s_i)$ дій РТС у РП.

Опис $pa(x_i, s_i)$ є стратегією розв'язання мети $pg(pr(x_i, s_i), ps(x_i, s_i))$, якщо існує така кон'юнкція сукупностей дій РТС $pa(x_i, s_i)$, що забезпечує мету:

$$pg(pr(x_i, s_i), ps(x_i, s_i)) \leftarrow pa^0(x_i, s_i) \wedge pa^1(x_i, s_i) \wedge \dots \wedge pa^{n-1}(x_i, s_i), \text{ або}$$

$$pg(pr(x_i, s_i), ps(x_i, s_i)) \leftarrow \bigwedge_{i=0}^{n-1} pa^i(x_i, s_i),$$

причому: $\exists f, f \in F : x_i = f_i(x_{i-1}, s_{i-1}), \exists \psi, \psi \in \Psi : x_i = \psi_i(x_{i-1}, s_{i-1})$.

Таким чином, $pa(x_i, s_i) = T \| f_i + \psi_i \|$.

Процес прийняття рішень є послідовним набором m альтернатив розв'язання цілей системи:

$$pg^0(pr, ps) \leftarrow pg^0_0(pr_0, ps_0, pa_0) \wedge pg^0_1(pr_1, ps_1, pa_1) \wedge \dots$$

$$\wedge pg^0_{n-1}(pr_{n-1}, ps_{n-1}, pa_{n-1}) = \bigwedge_{i=0}^{n-1} pg^0_i(pr_i, ps_i, pa_i)$$

.....

$$pg^m(pr, ps) \leftarrow pg^m_0(pr_0, ps_0, pa_0) \wedge pg^m_1(pr_1, ps_1, pa_1) \wedge \dots$$

$$\wedge pg^m_{n-1}(pr_{n-1}, ps_{n-1}, pa_{n-1}) = \bigwedge_{i=0}^{n-1} pg^m_i(pr_i, ps_i, pa_i).$$

Таким чином загальна ціль описуватиметься:

$$pg^{total}(pr, ps) \leftarrow \bigvee_{j=0}^{m-1} \bigwedge_{i=0}^{n-1} pg^m_i(pr_i, ps_i, pa_i).$$

В умовах формулювання мети РТС розробляється початковий план, який передбачає наступні перетворення станів системи:

$$pr(x_1, s_1) \leftarrow pa^0_0(pr(x_0, s_0) \vee ps(x_0, s_0)), ,$$

.....

$$pr(x_n = Y, s_n) \leftarrow pa^0_{n-1}(pr(x_{n-1}, s_{n-1}) \vee ps(x_{n-1}, s_{n-1})).$$

В умовах динамічного РП досяжність окремих $pg(pr(x_i, s_i), ps(x_i, s_i))$ стає неможливою: $pr(x_i, s_i) \neq pa^0_i(pr(x_{i-1}, s_{i-1}) \vee ps(x_{i-1}, s_{i-1}))$.

В таких умовах необхідна модифікація схеми:

$$pr(x_i, s_i) \leftarrow pa^*_i(pr(x_{i-1}, s_{i-1}) \vee ps(x_{i-1}, s_{i-1})),$$

$$pr(x_{i+1}, s_{i+1}) \leftarrow pa^*_{i+1}(pr(x_i, s_i) \vee ps(x_i, s_i)),$$

що у результаті дає модифікацію стратегії рішення:

$$pg^{m^*}(pr, ps) \leftarrow pg_0^{m^*}(pr_0, ps_0, pa_0) \wedge pg_1^{m^*}(pr_1, ps_1, pa_1) \wedge \dots \\ \wedge pg_{n-1}^{m^*}(pr_{n-1}, ps_{n-1}, pa_{n-1}) = \bigwedge_{i=0}^{n-1} pg_i^{m^*}(pr_i, ps_i, pa_i).$$

Зокрема, позначимо $X = \{X^0, X^1, \dots, X^{n-1}\}$ як множину станів РТС.

Нехай автоматизована система керування (АСК) в процесі виконання прийнятого рішення забезпечує перетворення початкового стану $state(x_0^0, x_1^0, x_2^0, \dots, x_{n-1}^0)$ у певний цільовий стан $state(x_0^m, x_1^m, x_2^m, \dots, x_{n-1}^m)$.

Якщо ГІРС (робот і РП навколо нього) в початковий момент часу складає множину аргументів x_0^0, \dots, x_n^0 і характеризується станом $state(x_0^0, x_1^0, x_2^0, \dots, x_{n-1}^0)$, тоді розглядаючи дискретний процес планування стратегій, який складається з окремих дій $action_0, \dots, action_k$, можна вказати, що перехід з одного дискретного стану в інший є певним відношенням між об'єктами:

$$state(x_0^1, x_1^1, \dots, x_n^1) \leftarrow action_0(state(x_0^0, x_1^0, \dots, x_n^0)),$$

тут $state$ – відношення (предикат), що характеризує стан системи в цілому, $action(state)$ – що означає дію щодо переходу з одного стану в інший.

Вся діяльність щодо переходу з одного стану системи в інший (шляхом виконання списку рішень) є набором предикатів: $state(X^1) \leftarrow action_0(state(X^0))$,

$$state(X^2) \leftarrow action_1(state(X^1)), \dots, state(X^{n-1} = Y) \leftarrow action_{n-2}(state(X^{n-2})).$$

Таким чином, мета системи планування стратегій – знайти відповідну кількість $action_i$, які задовольняли б умовам станів $state_i$ системи.

Вибір дії $action_i$ для перетворення стану $state(X^i)$ у стан $state(X^{i+1})$ здійснюється за забезпечення сумісності аргументів $action$ та відповідного стану X^{i+1} , що означатиме реалізацію стану (локальної мети) X^{i+1} за допомогою виконання АСК дій $action$:

$$X^{i+1} \leftarrow action(X^i),$$

де X^{i+1} – можливий результат дії $action$ за умови стану X^i , причому мають виконуватись наступні умови:

- а) $X^i \sim X^i$ – сумісність початкових даних дії $action$ з початковими даними;
- б) $X^{i+1} \sim X^{i+1}$ – сумісність результату дії $action$ з локальною метою X^{i+1} .

Визначення 6. Предикатна схема є адаптивною, якщо складові частини антецедента (правої частини предикатного виразу) і результат схеми (консеквент) змінюються у залежності від змін у стані АСК і робочого простору (РП):

$$state(Y) \leftarrow action(S_0), action(S_1), \dots, action(S_{n-1}),$$

де Y – мета системи; S_0, S_1, \dots, S_{n-1} – послідовні стани АСК.

Однак, в умовах динамічного стану РП (світ робота) і стан самого робота можуть змінюватися (зміни не є обов'язковими, проте вірогідними) і цілком можлива ситуація, коли на певному стані $state(X^{i-1})$ дія $action_{i-1}(state(X^{i-1}))$ не призводить до переходу системи у стан $state(X^i)$, тобто: $state(X^i) \neq action_{i-1}(state(X^{i-1}))$.

В цих умовах на перший погляд необхідно знайти такий предикат *action*, який задовольнив би умові виразу. Однак, на ділі кількість можливих реальних дій є обмеженою (на відміну від кількості станів), тому вихід полягатиме у знаходженні такої дискретної послідовності \overline{action} (вектор предикатів), що задовольнятиме меті системи.

Таким чином, якщо існує є множина X світу об'єктів і початковим станом є X^0 , тоді для досягнення цільового стану Y необхідно запланувати послідовність дій, що відображається предикатами *action*, а стан системи – предикатом *state*:

$$\begin{aligned} state(X^0), state(X^1) &\leftarrow action_0(state(X^0)), \\ state(X^2) &\leftarrow action_1(state(X^1)), \dots, state(Y) &\leftarrow action_{n-1}(state(X^{n-1})). \end{aligned}$$

Якщо на певному етапі i , стан X^i є недосяжним, тобто $state(X^i) \neq action_{i-1}(state(X^{i-1}))$, тоді адаптивна система планування стратегій має генерувати нову послідовність предикатів дій \overline{action} , що задовольнятиме змінам РП:

$$state(X^i) \leftarrow action_{n-1}^1(state(X^{i-1})), \dots, state(Y) \leftarrow action_{n-1}^{m-1}(state(X^{n-1})).$$

Аналогічна ситуація виникатиме коли СПР має інформацію про зміну мети системи. Це означатиме, що цільовий стан $state(Y)$ замінюється на певний $state(Y^i)$. При цьому можливі дві ситуації:

- а) інформація про заміну цілі надходить у момент знаходження системи у стані i – $state(x^i)$ і можлива генерація плану \overline{action} для переходу зі стану x^i у стан y^i ;
- б) інформація про зміну цілі надходить у момент знаходження системи у стані $state(x^i)$, але генерація плану \overline{action} можлива лише зі стану $state(x^{i-k})$, де $k \leq i$, тобто для генерації плану система має повернутися у попередні стани, аж до $state(x^0)$.

Це викликатиме необхідність генерації нової послідовності предикатів-дій.

Згідно визначення 4, план рішення буде складатися з наборів $\{action_0, action_1, \dots, action_n\}$, а повний план складатиметься з усіх планів, що були розроблені під час прийняття рішення. Адаптований план рішення буде виражатися записом:

$$plan^{adaptive}(Y) \leftarrow action_0(state(X^0), action_1(state(X^1), \dots, action_{n-1}(state(X^{n-1}))))).$$

Такий план є кінцевим рішенням АСПС. Розроблений план зазнаватиме змін аж до виконання останньої підцілі запланованої послідовності.

Додатково у дисертаційній роботі розглядається можливість використання предикатів вищих порядків для опису формування технологічних процесів ГІРС.

У третьому розділі розглядаються моделі інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності характеристик гнучких інтегрованих систем.

Класичний підхід до планування стратегій АСК розглядає визначеність усіх подій на бінарному рівні. Необхідність врахування ризиків, пов'язаних з виконанням дій та станом технологічного обладнання, обумовлює використання інших підходів моделювання планування стратегій, зокрема на основі теорії нечітких множин.

Розгляд нечіткої моделі планування стратегій функціонування РТС потребує введення нечітких множини $\tilde{X}, \tilde{D}, \tilde{S}$, що описують стани РТС, її рішення, стани РП:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i &\in \tilde{X}, \tilde{X} = \{\mu_0 / x_0, \mu_1 / x_1, \dots, \mu_{n-1} / x_{n-1}\}, \\ \tilde{d}_i &\in \tilde{D}, \tilde{D} = \{\mu_0 / d_0, \mu_1 / d_1, \dots, \mu_{n-1} / d_{n-1}\}, \\ \tilde{s}_i &\in \tilde{S}, \tilde{S} = \{\mu_0 / s_0, \mu_1 / s_1, \dots, \mu_{n-1} / s_{n-1}\}. \end{aligned}$$

Нечіткість (або чіткість) визначається непевністю інформації про стан РТС (важко визначити придатність схвата робота до захоплення деталі, зчепленням коліс з поверхнею та їх станом, станом батарей тощо). Нечіткість РП визначається неповною інформацією про його спостереження (похибки сенсорів та системи технічного зору), непевністю змін у просторі.

Дискретний стан простору визначатиметься у вигляді матриці

$$S = \begin{bmatrix} \mu_0^0 / S_0^0 & \mu_0^1 / S_0^1 & \dots & \mu_0^{m-1} / S_0^{m-1} \\ \mu_1^0 / S_1^0 & \mu_1^1 / S_1^1 & \dots & \mu_1^{m-1} / S_1^{m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{n-1}^0 / S_{n-1}^0 & \mu_{n-1}^1 / S_{n-1}^1 & \dots & \mu_{n-1}^{m-1} / S_{n-1}^{m-1} \end{bmatrix}.$$

У роботах з систем комп'ютерного зору описано метод подання траєкторій ланцюговим кодом Фрімена. Аналогічно стан ділянок РП, що безпосередньо оточують поточне положення робота, пропонується описати вектором розмірності 9:

$$\tilde{S} = \{ \mu_0 / s_0, \mu_1 / s_1, \dots, \mu_8 / s_8 \}.$$

Аналогічно визначаються рухи робота: $\tilde{M}v = \{ \mu_0 / mv_0, \mu_1 / mv_1, \dots, \mu_8 / mv_8 \}$,

Маніпуляції з об'єктами: $\tilde{M}p = \{ \mu_0 / mp_0, \mu_1 / mp_1, \dots, \mu_{n-1} / mp_{n-1} \}$.

Згідно коду Фрімена можливість руху автономного робота у різних напрямках може бути зображена нечіткою множиною з восьми елементів:

$$\tilde{M}_i = \langle \mu_0 / M_i^0, \mu_1 / M_i^1, \mu_2 / M_i^2, \dots, \mu_7 / M_i^7 \rangle,$$

де для кожного i -ї ділянки маршруту елемент M_i^j зображатиме напрямок руху відповідно до коду Фрімена.

Аналогічним чином позначимо набір можливих дій робота:

$$\tilde{A}_i = \langle \mu_0 / \tilde{A}_i^0, \mu_1 / \tilde{A}_i^1, \mu_2 / \tilde{A}_i^2, \dots, \mu_{n-1} / \tilde{A}_i^{n-1} \rangle.$$

Метою функціонування РТС є досягнення цільових станів \tilde{Y} або \tilde{S}^g , що можуть бути отримані в результаті покрокової еволюції станів РТС або РП:

$$\tilde{X}_0 \rightarrow \tilde{X}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \tilde{X}_{n-1} \equiv \tilde{Y} \text{ або } \tilde{S}_0 \rightarrow \tilde{S}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \tilde{S}_{n-1} \equiv \tilde{S}^g.$$

Еволюція станів РТС і РП відбувається як результат застосування РТС певної стратегії рішення:

$$\tilde{D}_0 \rightarrow \tilde{D}_1 \rightarrow \dots \rightarrow \tilde{D}_{n-1} \equiv \tilde{D} \text{ або } \tilde{D} = \bigwedge_{i=0}^n \tilde{D}_i$$

і виражається у діях або маніпуляціях:

$$\tilde{A}_i = f(x_{i-1}, s_{i-1}, d_{i-1}), \quad \tilde{A}_i = \tilde{M}v_i \vee \tilde{M}p_i,$$

Обмеження: $\|\tilde{A}_i - \tilde{A}_{i-1}\| = \mu_i(A_i) - \mu_{i-1}(A_{i-1}) \leq \varepsilon_{ai}$,

$$\|\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i-1}\| = \mu_i(x_i) - \mu_{i-1}(x_{i-1}) \leq \varepsilon_{xi}, \quad \|\tilde{s}_i - \tilde{s}_{i-1}\| = \mu_i(s_i) - \mu_{i-1}(s_{i-1}) \leq \varepsilon_{si}.$$

Невиконання обмежень внаслідок динамічного стану РП, недостатніх властивостей РТС вимагатиме переформулювання початкового плану рішень \tilde{D}^0 , який має компенсувати невиконання обмежень.

Кінцевий план складатиметься з елементів попередніх планів:

$$\tilde{D}^{final} = \tilde{D}^0 \cup \tilde{D}^1 \cup \dots \cup \tilde{D}^{k-1}.$$

Його особливістю є причинно-наслідковий зв'язок між окремими елементами. Вибір певного варіанту є дефазифікацією вектора планування стратегій.

Адаптивність нечіткої системи планування стратегій виникає за умови змін нечітких векторів прийняття рішень, які відображають динаміку робочого простору та динаміку ОПР (автономного транспортно-складального робота у складі ГІРС).

Визначення 7. Система планування стратегій, у якій нечіткий вектор прийняття рішень в умовах динамічного простору зазнає змін, називається адаптивною.

Для частини випадків на певному кроці розв'язання задачі нечіткої за вибором акт прийняття рішень $\tilde{D}_i = \mu_i / D_i$ матиме коефіцієнт визначеності $\mu_i < \varepsilon$, де $\varepsilon \geq 0$ - поріг вибору (для найпростішого випадку) і має вважатиметься неприйнятним для системи. В такому випадку генератор дій має знайти нове рішення для кроку i , тобто генерувати \tilde{D}_i' і всю подальшу послідовність актів прийняття рішення:

$$\tilde{X}_0 * \tilde{D}_0 \Rightarrow \dots \Rightarrow \tilde{X}_i * \tilde{D}_i' \Rightarrow \tilde{X}_{i+1} * \tilde{D}_{i+1}' \Rightarrow \dots \Rightarrow \tilde{X}_{n-1} * \tilde{D}_{n-1}' \Rightarrow \tilde{Y}_n,$$

У описі нечіткої системи планування стратегій коефіцієнти визначеності окремих підцілей для таких етапів рішення дорівнюватимуть 0:

$$\bar{D} = \{\mu_0 \neq 0 / D_0, \mu_1 \neq 0 / D_0, \dots, \mu_i = 0 / D_i, \dots, \mu_{n-1} \neq 0 / D_{n-1}\}.$$

Наявність такого факту означатиме необхідність переформулювання плану \bar{D} , починаючи з D_i , тобто:

$$\bar{D}' = \{\mu_0 \neq 0 / D_0, \mu_1 \neq 0 / D_0, \dots, \mu_i' \neq 0 / D_i', \mu_{i+1}' \neq 0 / D_{i+1}', \dots, \mu_{n-1}' \neq 0 / D_{n-1}'\},$$

при цьому перелік дій, що слідуватимуть за μ_i' / D_i' , не обов'язково змінюватиметься, початковий план складатиметься з постійної (c) та змінної (t) частин: $\bar{D} = \bar{D}^c \cup \bar{D}^t$.

Для іншої частини актів рішення із коефіцієнтами визначеності $\mu_i \geq \varepsilon$ необхідною стає оцінка усієї послідовності планування стратегій і вибір такого вектора \bar{D} , який має найбільшу сумарну визначеність. Таким чином, адаптація плану полягатиме у зміні частини \bar{D}^t , причому аналіз цієї частини має здійснюватись постійно, на кожному наступному кроці роботи системи аж до досягнення цільового стану.

Використання методів нечітких множин показує більш гнучкий і точний характер опису станів процесу планування стратегій, можливість детальної числової оцінки кожного кроку інтелектуалізованої ГІРС.

Ймовірнісна модель інтелектуальної підтримки прийняття рішень

залежить від інформації про характер взаємодії ГІРС з робочим простором. Розгляд можна надмірно ускладнити, припускаючи, що поточний стан залежатиме від усіх попередніх, від даних вимірювання та сигналів керування на попередніх етапах. Але такий підхід є малопродуктивним. Замість нього слід використати модель Марківських ланцюгів: якщо стан x_t є завершеним, тоді він підсумовує усі попередні події x , вимірювання z та сигнали керування u , що до нього призвели. Зі статистичної точки зору попередній стан x_{t-1} як раз і містить дані про усі попередні впливи, залежні від часу, зокрема про $u_{1:t-1}, z_{1:t-1}$. Перехід зі стану x_{t-1} в x_t забезпечується сигналом керування u_t :

$$p(x_t | x_{0:t-1}, z_{1:t-1}, u_{1:t}) = p(x_t | x_{t-1}, u_t).$$

Система планування стратегій забезпечуватиме перехід з одного стану до іншого у відповідності до мети (цілей) ГІРС. Проте питання досягнення мети не є ключовим з точки зору теорії ймовірностей. Вибір кінцевої мети досягається за допомогою, здебільшого, логічних методів. Місце логічної теорії логічної теорії можна

визначити у розробці загальної стратегії рішення, а місце теорії ймовірностей у оцінці стратегії і здійсненні оперативного керування ГРС.

Таким чином, представляючи систему S у наборі станів $\bar{S}_i (i=1, \dots, n)$ за допомогою теорії ймовірностей розглядають переходи системи зі стану S_i у стани S_1, \dots, S_n .

Характеристики станів ймовірнісної системи у формують послідовність.

Крок 0 (початковий). Якщо у момент часу t_0 система знаходиться у стані S_i , можна записати такі ймовірності станів:

$$P_1(0)=0, P_2(0)=0, \dots, P_i(0)=1, \dots, P_n(0)=0.$$

Повна ймовірність для Кроку 0 має вигляд:

$$P_0^\Sigma = P_1(0) + P_2(0) + \dots + P_n(0) = P_i(0).$$

Крок 1 (враховуються ймовірності переходів зі стану i у всі інші стани $1, \dots, n$, включно з поверненням у самий стан i). Ймовірності окремих станів:

$$P_1(1) = P_i(0) * P_{i1}, P_2(1) = P_i(0) * P_{i2}, \dots, P_i(1) = P_i(0) * P_{ii}, \dots, P_n(1) = P_i(0) * P_{in},$$

де $P_1(1)$ – ймовірність стану 1 після кроку 0, $P_2(1)$ – ймовірність стану 2 після кроку 0, тощо, а P_{i1} – ймовірність переходу зі стану i у стан 1.

Повна ймовірність для Кроку 1 має форму запису:

$$P_1^\Sigma = P_i(0) * P_{i1} + P_i(0) * P_{i2} + \dots + P_i(0) * P_{in}.$$

Крок 2 (враховується ймовірність переходів зі станів після кроку 1):

$$P_1(2) = P_1(1) * P_{21}, P_2(2) = P_2(1) * P_{22}, \dots, P_i(2) = P_i(1) * P_{2i}, \dots, P_n(2) = P_n(1) * P_{2n},$$

із відповідним виразом для повної ймовірності:

$$P_2^\Sigma = P_1(1) * P_{21} + P_2(1) * P_{22} + \dots + P_n(1) * P_{2n}.$$

Крок N описується відповідно:

$$P_1(N) = P_1(N_{n-1}) * P_{(n-1)1}, P_2(N) = P_2(N_{n-1}) * P_{(n-1)2}, \dots, P_i(N) = P_i(N_{n-1}) * P_{(n-1)i}, \dots, \\ P_n(N) = P_n(N_{n-1}) * P_{(n-1)n},$$

де $P_1(N)$ – ймовірність стану 1 після виконання кроку N, а $P_{(n-1)1}$ – ймовірність переходу зі стану $(n-1)$ у стан 1. Повна ймовірність має вигляд:

$$P_n^\Sigma = P_1(N_{n-1}) * P_{(n-1)1} + P_2(N_{n-1}) * P_{(n-1)2} + \dots + P_n(N_{n-1}) * P_{(n-1)n}.$$

Самі ймовірності переходів від одного стану у інший, відповідно до теорії марківських ланцюгів, формують матрицю переходів. Ймовірність передбачає наявність випробовувань, проте у разі ГРС (з роботами маніпуляційного або мобільного типу) такої практики може і не бути. Тобто матриця переходів має формуватися під час процесу планування стратегій на основі наявного для системи планування стратегій досвіду і відображає його відсутність або наявність.

Як у випадку нового формування матриці переходів, так і для системи на основі досвіду, характерною є ситуація, коли характер РП та його конфігурація змінюються під час функціонування ГРС, тобто слід казати про необхідність її адаптації, а з точки зору планування стратегій – про адаптивну ймовірнісну систему планування стратегій. Якщо РП ГРС змінюється, наприклад об'єкти світу переміщуються або на РП впливають інші чинники (наприклад, у відкритому просторі пройшов дощ і ділянка ґрунту стає важко прохідною для транспортного робота, або на шляху утворилася глибока вибоїна), тоді зміни матриці ймовірностей переходів відбуваються одночасно з отриманням інформації про такі зміни. Таким чином, матриця ймовірнісних переходів залежатиме від стану об'єктів РП:

$$P(S) = \begin{bmatrix} P(S_0^0) & P(S_0^1) & \dots & P(S_0^{m-1}) \\ P(S_1^0) & P(S_1^1) & \dots & P(S_1^{m-1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P(S_{n-1}^0) & P(S_{n-1}^1) & \dots & P(S_{n-1}^{m-1}) \end{bmatrix}.$$

Отже, якщо розглядати процес планування стратегій як дискретну послідовність актів, що мають імовірнісний характер, маємо опис еволюції станів ГПС:

$$P(S_0) * P(D_0(\max_{i=0,n} P_i(0))) = P(S_1),$$

$$P(S_1) * P(D_1(\max_{i=0,n} P_i(1))) = P(S_2),$$

$$\dots$$

$$P(S_{n-1}) * P(D_{n-1}(\max_{i=0,n} P_i(n-1))) = P(S_n).$$

Для адаптивного планування стратегій матимемо:

$$P(S_0(t_0)) * P(D_0(\max_{i=0,n} P_i(0), t_0)) = P(S_1(t_1)),$$

$$P(S_1(t_1)) * P(D_1(\max_{i=0,n} P_i(1), t_1)) = P(S_2(t_2)),$$

$$\dots$$

$$P(S_{n-1}(t_{n-1})) * P(D_{n-1}(\max_{i=0,n} P_i(n-1), t_{n-1})) = P(S_n(t_n)).$$

З практичної точки зору це означатиме:

- а) система планування стратегій функціонуватиме у дискретному часі;
- б) у кожен дискретний момент часу за допомогою сенсорної системи ГПС відбуватиметься оновлення матриці переходів з одного стану системи у інший;
- в) на кожному кроці планування стратегій з матриці ймовірностей для кожного її рядка відповідного переходу зі стану S_i в стан S_{i+1} має обиратися найбільш імовірний перехід, або набір найбільш імовірних переходів, що мають оцінюватися;
- г) оцінка всього процесу планування стратегій може відбуватися за допомогою імовірнісних переходів від початкового до цільового стану ГПС.

Приклад планування стратегій для завдання керування автономним транспортно-складальним роботом, схематично показано на рисунку 4.

Таким чином, імовірнісний процес планування стратегій в умовах подання процесу у вигляді марківського ланцюга, полягатиме у перемноженні поточних (накопичених до певного кроку) ймовірностей з ймовірностями переходів у новий стан.

За результатами оцінки різних шляхів пересування автономного робота (АР) має обиратися шлях, що має найвищу обраховану ймовірність. На процес вибору впливатимуть: наявність досвіду переходу маршрутом; інформація від сенсорів ГПС про стан ділянки маршруту; інформація про стан шасі АР; інформація про можливі загрози стану АР. Крім того, впливатимуть і оптимізаційні фактори: оцінка ділянки з точки зору наближення до цілі і вибір ділянки, яка має ближчу відстань до

цілі; відвідуваність ділянки AP у попередні періоди; висока швидкість проходження ділянки; відсутність перешкод; відсутність впливів інших AP та сторонніх об'єктів.

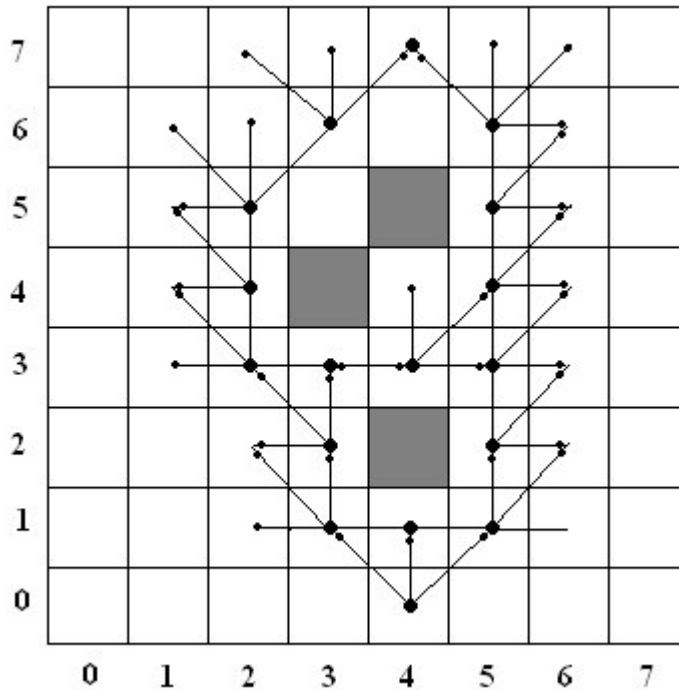


Рисунок 4 – Схема рухів автономного робота у РП з перешкодами

З точки зору адаптивного планування стратегій зміни у РП призводитимуть до змін ймовірностей переходів. Одні ділянки будуть збільшувати свою ймовірність, інші – зменшувати її аж до 0. Таким чином, розроблені раніше плани, що враховуватимуть ймовірність переходів, можуть втрачати високі рівні ймовірностей, і викликатимуть необхідність розробки нових планів рішення і їх адаптації до змін у робочому просторі ГРС. Сформульований та виконаний ГРС план, складатиме пам'ять системи, виражену у досвіді здійснених рішень.

У четвертому розділі розглядається розробка моделей подання знань систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень. Першою є узагальнена модель подання виробництва. Згідно цієї моделі будь-який тип виробництва є кортеж:

$$M_i \langle V_i, E_i, LM_i, Q_i, WS_i, Fl_i \rangle, \quad i = 1, 2, 3.$$

В цьому виразі V_i – об'єм випуску продукції, E_i – наявне технологічне обладнання та оснащення, LM_i – рівень ручної праці, Q_i – рівень кваліфікації робітників, WS_i – рівень організації робочого простору, Fl_i – рівень гнучкості виробництва.

Для одиничного (проектного) типу виробництва:

$$M_1 \langle V_1, E_1, LM_1, Q_1, WS_1, Fl_1 \rangle, \quad E_1 \langle PrC_1, NC_1, SE_1 \rangle,$$

де множина технологічного обладнання E_1 складається з оброблювальних центрів PrC_1 , верстатів з ЧПК NC_1 та спеціалізованого обладнання SE_1 , зазвичай не пов'язаних спільними засобами транспортного виробничого забезпечення.

Для серійного типу виробництва та його різновидів (дрібно-, середньо- та великосерійного) запишемо аналогічний кортеж M_2 :

$$M_2 \langle V_2, E_2, LM_2, Q_2, Ws_2, Fl_2 \rangle, E_2 \langle PrC_2, NC_2, FIS_2 \rangle, FIS_2 \langle PrC_2, NC_2, IR_2, TR_2, IIA_2 \rangle.$$

На відміну від одиничного типу виробництва для серійного виробництва M_2 у E_2 додано FIS – гнучку інтегровану систему (системи), що характеризує сучасний рівень розвитку виробничих систем.

У свою чергу FIS_2 складається з окремих оброблювальних центрів PrC_1 , верстатів з ЧПК NC_2 , що обслуговуються промисловими роботами IR_2 , пов'язуються спільними засобами транспортного виробничого забезпечення, в тому числі у вигляді транспортних роботів IR_2 . Моніторинг функціонування FIS_2 пропонується забезпечувати за допомогою інтелектуальних транспортно-складальних роботів IIA_2 , які виконуватимуть функції інтелектуальних виробничих агентів.

Масове виробництво опишемо кортежем M_3 :

$$M_3 \langle V_3, E_3, LM_3, Q_3, Ws_3, Fl_3 \rangle, E_3 \langle PrC_3, NC_3, FIS_3 \rangle, FIS_3 \langle PrC_3, NC_3, IR_3, TR_3, FIS_3 \rangle.$$

Відмінністю M_3 є більший рівень автоматизації виконуваних робіт, що забезпечується великою кількістю обладнання E_3 , яке, в основному не потребує присутності інтелектуальних виробничих агентів, проте містить вбудовані гнучкі інтегровані системи (показано наявністю рекурсивного члена FIS_3).

Вказані типи виробництва різняться своїми властивостями: $V_1 \ll V_2 \ll V_3$, $Fl_1 > Fl_2 > Fl_3$, $Ws_1 < Ws_2 < Ws_3$, $Q_1 > Q_2 > Q_3$, $N(E_1) < N(E_2) < N(E_3)$.

Крім того, для опису різних типів виробництв пропонується ввести комплексний показник гнучкості виробництва, залежний від об'єму випуску, кількості обладнання, рівнів кваліфікації робітників та організації робочого простору:

$$Fl = Fl_i(V_i, N(E_i), Q_i, Ws_i).$$

Таким чином, запропонована модель типів виробництв та їх основних характеристик дозволяє підкреслити спільні і відмінні риси виробничих процесів різного способу організації, відокремлює серійне виробництво у клас, що поряд з технологічним обладнанням може використати мобільні транспортно-складальні роботи, які функціонуватимуть відповідно до концепції інтелектуальних виробничих агентів.

Для опису послідовності функціонування інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень АСК ГПС пропонується метод її організації, який передбачає існування наступної інформації:

- об'єкти робочого простору – множина $I = \{I_0, I_1, \dots, I_n\}$;
- операторні схеми (стратегії) – множина $SCH = \{SCH_0, \dots, SCH_k\}$;
- мета або набір цілей – множина $G = \{G_0, G_1, \dots, G_l\}$.

Згідно методу, блок пошуку рішень інтелектуальної системи прийняття рішень здійснює перевірку інформації у АСК, вибір стратегій, виконання рухів та маніпуляцій з об'єктами РП: $G \times I \times SCH = D$, де $D = \{D_0, D_1, \dots, D_k\}$ – множина рішень.

Відповідно до обраної стратегії задля перевірки можливості її практичної реалізації має відбуватися перевірка рішення:

$$D \times CH = D_{checked}, \text{ де } D_{checked} \text{ – перевірене рішення.}$$

Після успішної перевірки рішення здійснюється виконання (імплементация) прийнятого рішення $D_{checked} \times Exec = D_{executed}$;

У випадку зміни інформації про РП можуть змінюватися як операторні схеми розв'язання рішень (змінюється порядок використання схем або генеруються нові операторні схеми), може змінюватися мета системи, тобто у загальному випадку у

випадку зміни інформації про робочий простір I має відбуватися зміна цілей G і операторних схем SCH : $G' \times I' \times SCH' = D'$, де штрих позначає модифікацію цілей, робочого простору та операторних схем.

Процес пошуку рішення має вигляд $G \times I \times SCH = D$.

Мета системи планування стратегій G має, у більшості випадків, чіткий характер. Тобто застосування чітких або нечітких цілей може призводити до появи чіткого або нечіткого результату.

Схема дії, або операторна схема SCH , має у більшості випадків нечіткий характер і складається з таких компонентів: результат операторної схеми (ідентифікатор вибору); список передумов; список викреслювань; список додавання:

$$SCH_i = \{G_i, PreCond_i, Add_i, Del_i\},$$

де G_i – результат операторної схеми, виражений у отриманні цільового стану, що має чіткий або нечіткий характер (нечіткий у разі нечіткого обчислення передумов);

$PreCond_i$ – є набором передумов, які ІКС має виконати для отримання результату Rez_i , і фактично може виражатися комбінацією підцілей, що підлягають виконанню або вже виконані системою: $PreCond_i = \{G_{pre_0}, \dots, G_{pre_n}\}$.

Del_i і Add_i представляють списки викреслювань та додавання, відповідно.

Функціонування АСК ГПС передбачає наявність обмеженої кількості стратегій SCH . Обмеженість визначається фізичними, технічними та інтелектуальними можливостями автономного робота до виконання поставлених завдань.

Зокрема, якщо перед ГПС ставиться завдання G_i , серед набору операторних схем SCH має обиратися така (такі) з них, що за своїм результатом є сумісною з поставленим завданням: $G_i; SCH_j = \{G_j, PreCond_j, Add_j, Del_j\}; G_i \cong G_j$.

Якщо операторна схема знайдена, для досягнення G_i виконується весь набір передумов $PreCond_i$, що передбачає розв'язання підцілей набору $\{G_{pre_0}, \dots, G_{pre_n}\}$. Підцілі входять до загальної множини цілей АКС $G = \{G_0, G_1, \dots, G_i\}$. Таким чином, послідовне розв'язання підцілей має пов'язати початковий стан АСК з цільовим.

Якщо операторну схему не знайдено, АСК може виявитись не в змозі виконати завдання і має продукувати операторну схему, що дозволить отримати мету.

Операторні схеми системи планування представляють описи дій, що можуть виконуватися в межах моделі світу, і є за сутністю фреймами. Для автономного робота (АР) це можуть бути дії: відкрити (закрити) двері, перейти у кімнату N , перейти до об'єкту M , пересунути об'єкт P до об'єкту Q тощо. Кількість описів залежить від ступеню складності завдань ГПС. Для систем планування маніпуляцій транспортно-складальних АР (ТСАР) схеми відповідають технологічним переходам (рисунок 5).

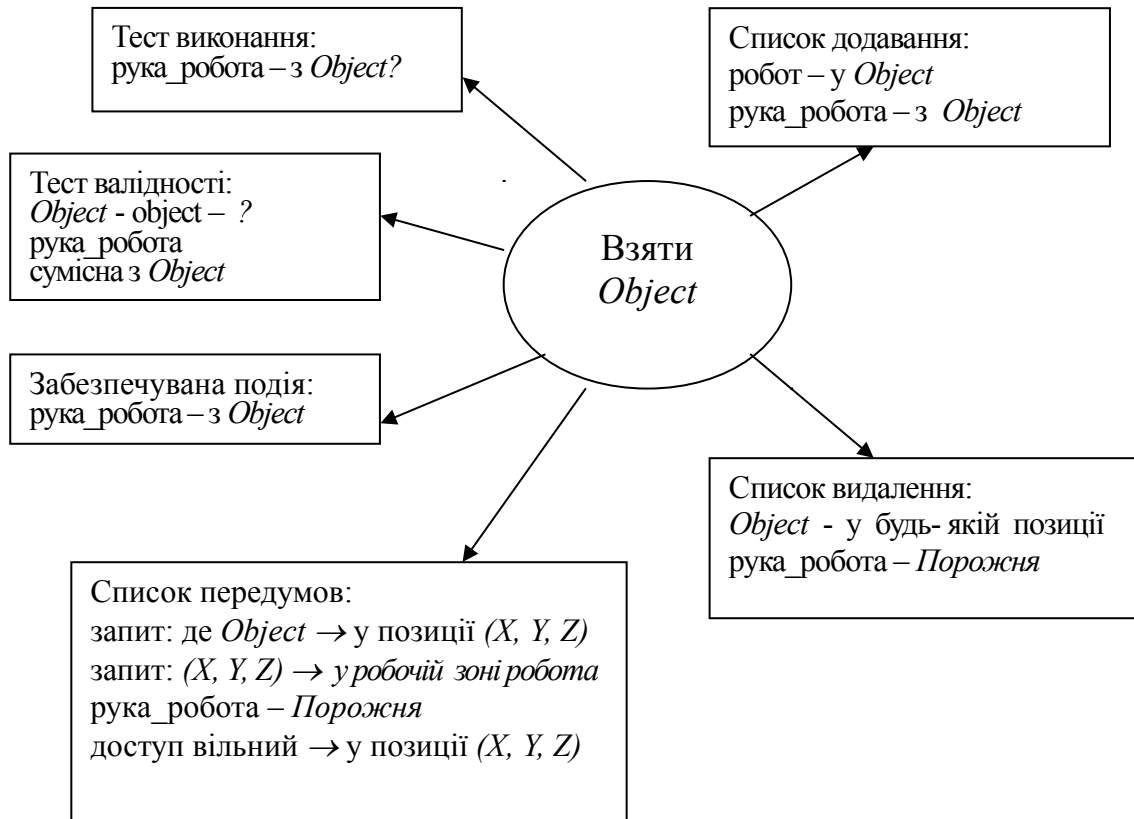


Рисунок 5 – Приклад операторної схеми дії «Взяти Об’єкт» ТСАР
підмета: робот – у Room

Отримані в ході планування стратегій результати можуть демонструватися за допомогою дво- або тривимірного комп’ютерного моделювання та бути виконані після відповідного тестування безпосередньо у АСК ГРС.

П’ятий розділ присвячено розробці засобів інформаційної підтримки інтелектуальної системи керування автономними роботами (АР).

Зокрема, розроблена геометрична модель триланкового маніпулятора, яка дозволяє суттєво спростити розв’язання зворотної позиційної задачі під час розробки програмного забезпечення для керування маніпуляторами автономних роботів.

Також розроблено програмне забезпечення, що імітує пульт системи керування промисловим роботом РМ-01, дозволяє здійснювати керування його маніпулятором за допомогою керуючої ЕОМ, забезпечує аналіз голосової та візуальної інформації в системі керування роботом і дозволяє підвищити рівень сприйняття інформації системою керування роботом. Крім того в розділі описується процес обробки інформації від системи технічного зору робота, яка забезпечує побудову карти РП робота; розпізнавання та ідентифікація об’єктів у РП; контроль операцій маніпулятора; корекцію роботи АСК роботом відповідно до результатів маніпуляцій.

Система технічного зору робота забезпечує зворотній зв’язок між робочим простором та системою керування АР. Положення камери може бути статичним і охоплювати увесь РП або динамічним та пов’язуватися з суглобом маніпулятора.

З метою реалізації логічної моделі планування стратегій розроблено основні компоненти інтерпретатора мови логічного програмування Prolog, що може використатися для розробки компоненти планування стратегій ІСК виробничої системи.

У шостому розділі наведено результати розробки програмного забезпечення підсистеми інтелектуальної підтримки прийняття рішень АСК ГІРС. Описано особливості розробки програмного забезпечення АСК автономного робота (АР), який функціонує у дискретному просторі об'єктів і подій ГІРС.

Маршрут АР розробляється системою планування стратегій на основі цільової інформації, що надходить від АСК ГІРС. Для планування маршруту система повинна на кожному кроці керуватися такою інформацією:

- 1) перший варіант маршруту переміщення генерується перед початком руху у початковій точці, він враховує стан РП на момент свого складання;
- 2) кожен наступний крок маршруту має наближати АР до комірки-мети, тому з усіх комірок, що оточують поточну, під час планування має обиратися така, що має найменшу відстань до мети і що є простим критерієм оптимізації;
- 3) система планування маршруту має постійно перевіряти стан комірок, що оточують поточне положення АР, їх вільність та факт минулого відвідання;
- 4) якщо комірka, запланована маршрутом в якості наступного кроку АР, є зайнятою, відносно поточного стану АР необхідно генерувати новий маршрут переміщення, який враховуватиме стан комірок світу;
- 5) якщо АР оточено зайнятими комірками, очікувати на звільнення сусідніх комірок (або запропонувати дії щодо звільнення сусідніх позицій);
- 6) якщо АР досягнув мету, зберегти виконаний маршрут у базу даних.

Для реальних завдань це означатиме необхідність обхід перешкод на шляху робота і адаптацію раніше розроблених планів до вимог поточного стану РП функціонування АР. Також в розділі наводяться результати розробки системи планування стратегій АР у обмеженому РП, яка відповідає моделям розділу 2.

Для проведення експериментальних досліджень властивостей ГІРС пропонувався такий склад обладнання:

- мобільний робот (МР) Lego NXT Mindstorms у триколісній конфігурації із схватом та набором сенсорів: дальності, дотику, звуку, світла (кольору);
- система технічного зору (СТЗ), що забезпечує отримання інформації про РП, та складається з глобальної (встановлена над РП ГІС) та бортової СТЗ (на МР);
- керуючий портативний комп'ютер (оснащений пристроями WiFi, Bluetooth), який забезпечує отримання інформації від систем технічного зору, сенсорної системи робота, здійснює дистанційне програмне керування мобільною платформою, реалізує систему планування стратегій, здійснюючи координацію складових ГІРС.

Зв'язок у ГІРС здійснюється за допомогою дротового та бездротового зв'язку.

Програмне керування АР забезпечується за допомогою Bluetooth-інтерфейсу керуючого комп'ютера. Окремо програмне керування АР може здійснюватися і за допомогою комунікатора із встановленою ОС Windows Mobile (рисунком 6). У командному режимі розроблена програма забезпечує визначення поточного положення АР, завдання цільової точки, вектора пересування, відкриття та закриття схвату.

У режимі планування стратегій встановлюється завдання АР. Зокрема, задаються: агент дії – робот, характер дії, наприклад, «взяти об'єкт» - «take», об'єкт дії, наприклад, «Трансформатор. Тип2». Рішення виводиться у вікні «Decision». Після прийняття рішення за допомогою системи програмного керування здійснюється йо-

го реалізація. Вказання завдань переміщення АР може, також здійснюватися у візуальний спосіб, для чого вказуються початкова і кінцева точки маршруту АР. Аналіз інформації про стан робочого простору здійснюється СТЗ методами Кенні та аналізу контурів, положення АР визначається класифікатором Хаара.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє розглядати АР як мультиагентну систему у складі агента руху (підсистема керування рухом АР), агента зору (система комп'ютерного зору АР), агента чуття (реалізується сенсорною системою АР та засобами обробки інформації), агента навігації (пов'язаний з системою керування рухом АР та системою комп'ютерного зору), агента планування стратегій. Програмне забезпечення реалізує АСК АР, що функціонує у динамічному РП.

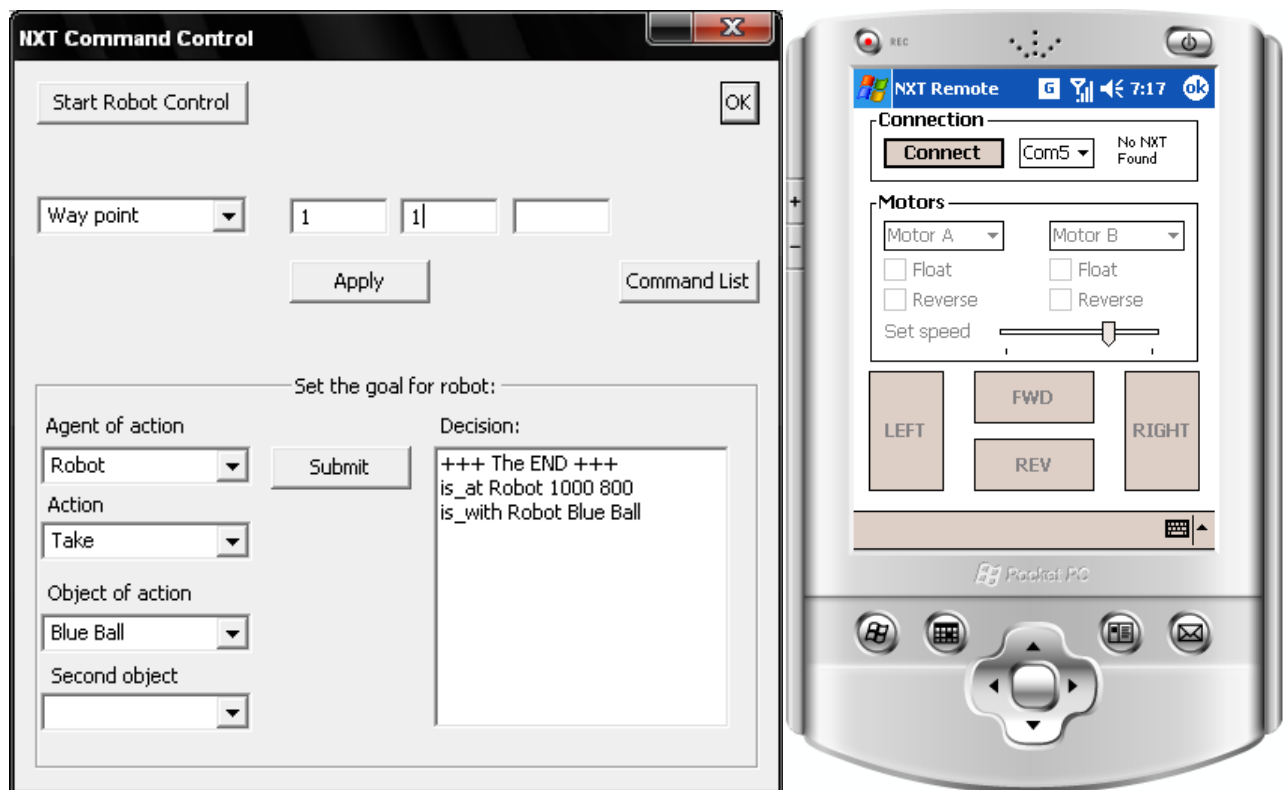


Рисунок 6 – Інтерфейси розроблених програм керування АР

Інша частина дисертаційного дослідження присвячена розробці експериментальних ГІС виробництва радіоелектронних модулів на базі технологічного обладнання для складання і паяння модулів РЕА та промислових роботів.

Для забезпечення включення робота до складу ГІС розроблено пристрій керування, здатний забезпечувати більш ефективно керування роботом на рівні його підключення до ПЕОМ та інтеграції до складу інших ГІС. Розроблене програмне забезпечення дозволяє здійснювати керування роботом у ручному режимі, навчання, розробку прикладного програмного забезпечення із виконання технологічних операцій складання. Програмний інтерфейс АСК ГІРС показано на рисунку 7.

Розроблений пристрій керування використовується для промислових роботів різного типу, зокрема, РФ-202М, МРЛУ-200. В ході експериментальних досліджень для відпрацювання режимів роботи у складі ГІС робот РФ-202М було функціонально поєднано з автоматом складання деталей мобільних телефонів Tradex

5133. При цьому функція робота полягала у обслуговуванні автомата, який забезпечує складання радіоелектронних виробів. Також досліджувалось використання пристрою керування робота РФ-202М з автоматизованим паяльним обладнанням (рисунок 8).

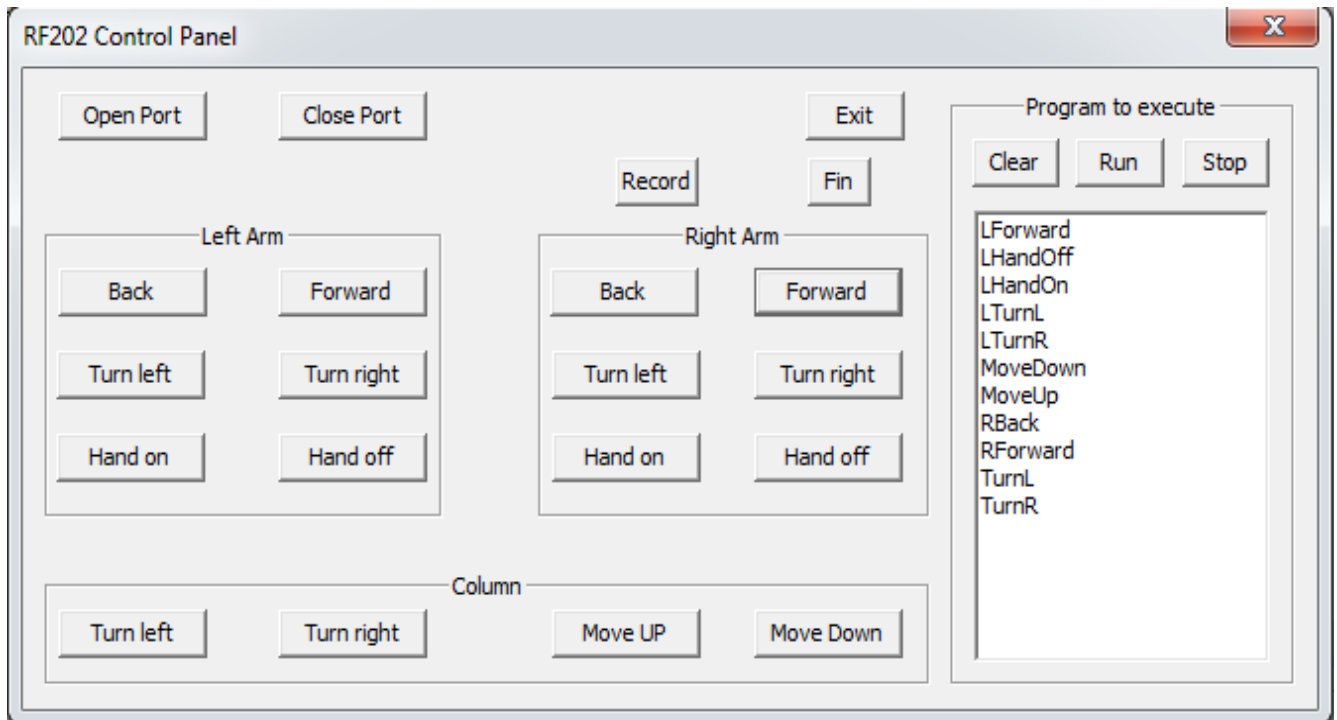


Рисунок 7 – Програмний інтерфейс системи керування роботом РФ-202М

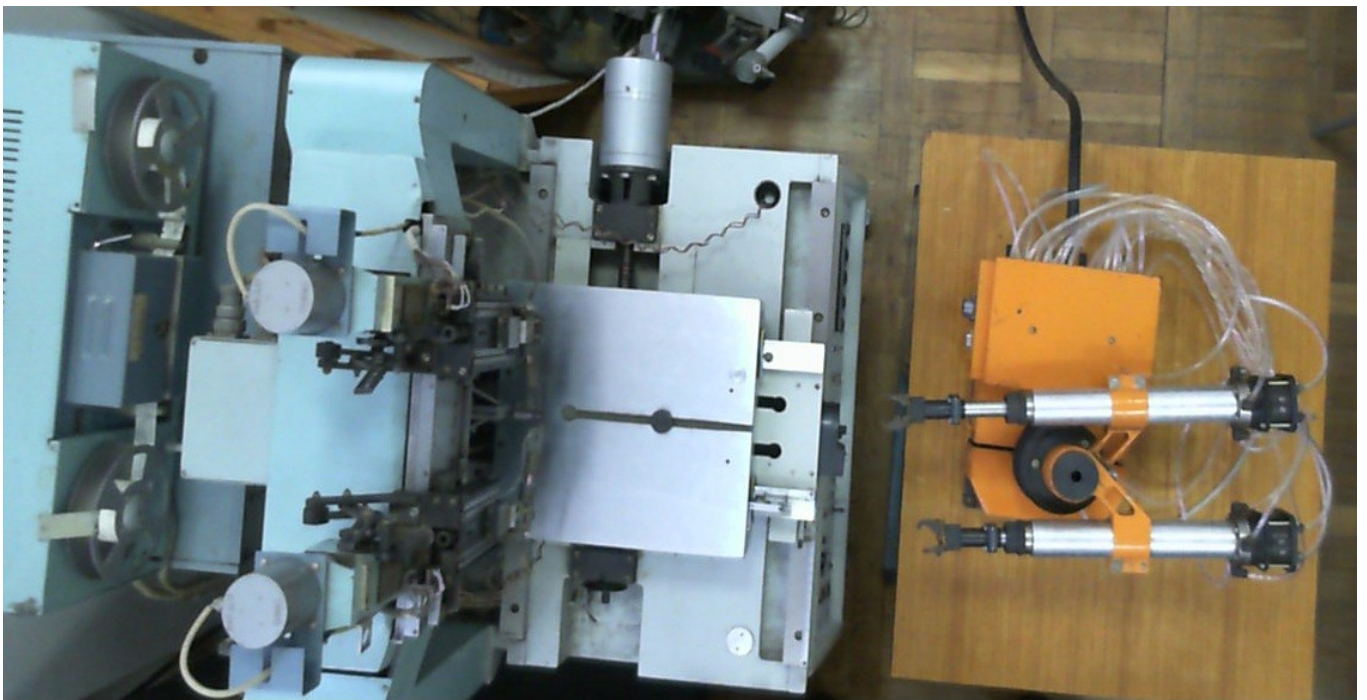


Рисунок 8 – Експериментальна ГС у складі установки автоматизованої пайки УАП-1, промислового робота РФ-202М, пристрою керування та ПЕОМ

Проведені експериментальні дослідження автоматизованої системи керування промисловим роботом РФ-202М показали її простоту і надійність, можливість адаптації до умов функціонування у ГПС різного типу.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено теоретичні та практичні результати, що у відповідності до мети дослідження і поставленим завданням, є розв'язанням актуальної науково-прикладної проблеми, що полягає у необхідності створення теоретичних основ інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованих системах керування гнучкими інтегрованими системами радіоелектронного виробництва для забезпечення їх функціонування в умовах невизначеності робочого простору та характеру виробничих завдань. Розв'язання проблеми дозволяє підвищити ефективність процесів керування гнучкими інтегрованими системами радіоелектронного виробництв.

1. Запропонована нова концепція побудови інтелектуальних систем прийняття рішень (ІСПР), що враховує технічний склад ГПС, її робочого простору і визначає склад інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень автоматизованої системи керування ГПС.

2. Запропоновано новий метод адаптації стратегій функціонування ГПС, який на основі розробленої концепції побудови ІСПР забезпечує формалізацію станів робочого простору, ГПС та її цілей, визначає стратегії функціонування ГПС в умовах змін робочого простору, станів автоматизованої системи керування та загальної мети виробничої системи.

3. Запропонована нова динамічна модель стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем, яка за допомогою формалізації якісних станів ГПС та переходів між ними характеризує взаємодію роботизованої системи з об'єктами робочого простору під час реалізації розроблених стратегій і дозволяє забезпечити опис функціонування автоматизованої системи керування ГПС в умовах динамічного стану робочого простору.

4. Запропонована нова теоретико-множинна модель адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем, у якій у відповідності до сформульованої виробничої мети, станів системи та робочого простору формуються стратегії функціонування ГПС, забезпечується опис впливу змін робочого простору гнучкої інтегрованої роботизованої системи на процес формування стратегій, формулюються основні поняття адаптації їх планування.

5. Запропонована нова логічна модель адаптації стратегій функціонування, яка використовує логіку предикатів і описує відношення, що існують між об'єктами робочого простору ГПС, формулює цілі автоматизованої системи керування у вигляді необхідних станів робочого простору і забезпечує побудову механізмів логічного виведення інтелектуальної підтримки та прийняття рішень ГПС.

6. Отримала подальший розвитку модель інтелектуального прийняття рішень на основі теорії нечітких множин, яка забезпечує опис планування в умовах непевності інформації про стан ГПС, непевності вибору дій на кожному кроці функціонування автоматизованої системи керування і на їх основі забезпечує оцінку

альтернативних шляхів розв'язання завдань, що постають перед виробничою системою.

7. Отримала подальший розвиток імовірнісна модель інтелектуального прийняття рішень, яка шляхом розгляду планування стратегій як дискретного багатостадійного процесу, кожен крок якого є ймовірним і залежить від попередніх кроків відповідно до теорії марковських ланцюгів, дозволяє забезпечити оцінку альтернативних шляхів розв'язання завдань автоматизованої системи керування в умовах імовірнісного опису станів ГРС.

8. Отримав подальший розвиток метод побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, який дозволяє формалізувати процес прийняття рішень у автоматизованій системі керування гнучкої інтегрованої системи у вигляді уніфікованої пошукової процедури, яка функціонує на основі фреймподібних структур знань, визначає послідовності розв'язання окремих технологічних завдань і дозволяє автоматичний пошук рішень в межах компетенції системи;

9. Отримала подальший розвиток імітаційна модель опису організації виробництва, яка характеризує основні виробничі показники, обладнання та персонал, та забезпечує гнучкість у переході до випуску іншої номенклатури продукції і дозволяє структурувати подання інформації у гнучких інтегрованих системах.

10. Розроблено основні підсистеми інтерпретатора мови програмування Prolog, який дозволяє практично реалізувати запропоновану логічну модель планування стратегій і може використатися у розробці інтелектуальної складової автоматизованої системи керування ГРС як засіб системи планування стратегій високого рівня.

11. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропоновані теоретичні моделі, і складається з підсистем графічного моделювання, аналізу голосової та візуальної інформації, програмного керування автономними роботами, які дозволяють проводити необхідні математичні розрахунки та обробку голосової та візуальної інформації з метою інформаційної підтримки автоматизованої системи керування ГРС.

12. Розроблено програмно-технічне забезпечення автоматизованих систем керування автономними роботами (транспортного та складального призначення), яке практично реалізує розроблені теоретичні моделі та метод, проводить аналіз динаміки робочого простору ГРС за допомогою системи технічного зору, забезпечує адаптивне планування технологічних маршрутів і окремих операцій, виконання технологічних переходів і, як результат, дозволяє підвищити ефективність функціонування гнучких інтегрованих роботизованих систем. Результати розробки впроваджено в роботі підприємств і установ Харкова та інших міст України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Невлюдов И.Ш. Интеллектуальное проектирование технологических процессов роботизированной сборки / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютин. – Харьков: НТМТ, 2010. – 206 с.

2. Цымбал А.М. Реализация системы разработки планов на Турбо-Пролог / А.М. Цымбал, О.В. Попова // Авиационно-космическая техника и технология. Тру-

ды Государственного аэрокосмического университета им. Жуковского "ХАИ". Вып. 18. – Харьков. – 2000 г. – С. 68-71

3. Цимбал О.М. Системи планування рішень інтелектуальних роботів: стан та перспективи / О.М. Цимбал, Р.І. Цехмістро // Східно-європейський журнал передових технологій, Харків. – 2004. – № 4 (10). – С. 60-63

4. Цимбал О.М. Геометричне моделювання роботів та технологія OpenGL / О.М. Цимбал, Д.Г. Смаглюк // Східно-європейський журнал передових технологій, Харків. – 2005. – № 4/2 (16). – С. 4-7.

5. Цимбал О.М. Розробка транслятора простої мови програмування / О.М. Цимбал, Р.І. Цехмістро // Радіоелектроніка та інформатика, Харків. – 2006. – № 1. – С. 57-65.

6. Невлюдов І.Ш. Розпізнавання голосових команд за допомогою багатозарового перцептрона / І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, С.С. Мільотіна // Східно-європейський журнал передових технологій, Харків. – 2006. – № 3/2 (16). – С. 13-16.

7. Цимбал О.М. Реалізація транслятора мови програмування PROLOG: лексичний та синтаксичний аналіз / О.М. Цимбал // Комп'ютинг, Тернопільський державний економічний університет, Тернопіль. – 2007. – т. 6, вип. 1. – С. 15-24.

8. Цимбал О.М. Подання знань у системах прийняття рішень інтелектуальних роботів / О.М. Цимбал // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2006. – № 2 (65). С. 65-70.

9. Цымбал А.М. Использование искусственной нейронной сети в подсистеме ввода голосовой информации САПР ТП роботизированного производства / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Радиозлектроника и информатика, Харьков. – 2007. – № 1. – С. 56 - 61.

10. Невлюдов И.Ш. Голосовое формирование управляющих команд работа в САПР технологических процессов / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, Харьков. – 2008. – № 2/2 (32). – С. 12-14

11. Невлюдов И.Ш. Голосовое формирование управляющих команд при проектировании роботизированных сборочных процессов / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, Харьков. – 2008. – № 4/2 (34). – С. 65-68.

12. Невлюдов И.Ш. Сетевые модели и проектирование технологии сборочных процессов / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Технология приборостроения. Харьков. – 2008. – № 1. – С. 27-32

13. Цимбал О.М. Розробка адаптивного вирішувача інтелектуального робота / О.М. Цимбал // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 6/2 (36). – С. 35-39.

14. Цимбал О.М. Використання OpenCV у СТЗ робота / О.М. Цимбал // Технология приборостроения. – Харьков. – 2008. – № 2. – С. 44 - 47.

15. Цимбал О.М. Обчислення визначеності подій у деревах прийняття рішень / О.М. Цимбал // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, Харьков. – 2009. – № 2/2 (38). – С. 28-31.

16. Цымбал А.М. Технологии программирования и робототехника / А.М. Цымбал, А.И. Бронников, А.Е. Литвинова, О.Е. Чернышенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 3/2 (39). – С. 56-60.

17. Nevlyudov I. Computer-aided design for robotic assembly technology / I. Nevlyudov, O. Tsymbal, S. Milyutina // *Radioelectronics and informatics*. – 2009. – № 2 (45). – P. 63-67.
18. Цимбал О.М. Адаптивні методи та їх використання у робототехніці / І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, С.С. Мілютіна, А.І. Бронніков // *Технология приборостроения*. Харьков. – 2011. – № 1. – С. 8 - 12.
19. Nevlyudov I.Sh. Acoustic model application to mobile robot guidance / I.Sh. Nevlyudov, A.M. Tsymbal, S.S. Milyutina, V.Y. Sharkovsky / *Telecommunications And Radio Engineering*, 2012, v 71, No 17, P. 1589-1597.
20. Цымбал А.М. Моделирование адаптивного принятия решений в ИСУ роботом / А.М. Цымбал, А.И. Бронников // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, Белгород. – 2013. – №4, С. 173-176.
21. Цимбал О.М. Концепція інтелектуальних виробничих агентів та особливості її реалізації / О.М. Цимбал, А.І. Бронніков, О.І. Куценко, Є.С. Шейн // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, Харьков, 2014, № 1/2 (67), С. 9-13.
22. Цымбал А.М. Методические аспекты планирования стратегий интеллектуальной системы управления роботом / А.М. Цымбал // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, Белгород. – 2014. – №2, С. 139-142.
23. Аврамов В.Г. Подсистема анализа конструкторской документации в САПР ТП механической обработки / В.Г. Аврамов, О.В. Тучин, А.М. Цымбал, А.А. Чернышенко // *Радиотехника. - Всеукр. Межвед. науч.-техн. сб.*, Харьков, ХТУРЭ . – 1997. – Вып. 103. – С. 22-25
24. Цимбал О.М. Реалізація системи розробки планів для інтелектуального робота мовою С++ / О.М. Цимбал, О.В. Попова, С.О. Нестерцова // *Проблеми біоніки. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. - Харків, ХТУРЭ. – 2000. – Вып. 53. – С. 62-64.*
25. Невлюдов И.Ш. Интеграция системы технического зрения в технологический робототехнический комплекс / И.Ш. Невлюдов, В.В. Токарев, А.М. Цымбал // *Радиотехника. Всеукр. Меж вед. Науч.- техн. Сб. - Харьков, ХТУРЭ. – 2001. – Вып. 120. – С. 188-191*
26. Denisov S. The industrial robot control system emulation on personal computer / S. Denisov, D. Smaglyuk, V. Tokarev, A. Tsymbal // *Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета. Сб. науч. Трудов. – Харьков, ХГАДИ, 2001, Вып. 15-16, с. 188-190*
27. Цымбал А.М. Разработка экспертной системы для диагностики психиатрических заболеваний / А.М. Цымбал, А.М. Цымбал // *Проблемы бионики. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. - Харьков, ХНУРЭ. – 2004. – Вып. 60. – С. 122-128*
28. Цимбал О.М. Адаптація маніпулятора MR-999E до умов експерименту / Цимбал О.М. // *Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2007. – Вип. 150. – С. 167—170.*
29. Martinson E.B. Evaluation of the Accuracy of Sound Volume Models Created From Robot-Acquired Information / E.B.Martinson, I.S. Nevlyudov, A.M. Tsymbal // *Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн зб. – 2009. – Вип. 157. – С. 18-24.*
30. Цымбал А.М. Планирование решений в системе управления роботом / А.М. Цымбал // *Вестник СевГТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь. – 2009. – Вып. 95. – С. 124-128.*

31. Невлюдов И.Ш. Применение акустической модели для управления мобильным роботом / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютіна, В.Ю. Шарковский // Радиотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн зб. – 2011. – Вип. 164. – С. 120-125.
32. Цимбал О.М. Адаптивність у прийнятті рішень роботів / О.М. Цимбал, А.І. Бронніков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011, № 4/4 (52). – С. 40-43.
33. Захлебїна Л.Є. Завдання прийняття рішень та їх опис у робототехніці / Л.Є. Захлебїна, І.А. Караван, І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2011, № 40, С. 124 – 132.
34. Цимбал О.М. Адаптивні процеси у завданнях робототехніки / О.М. Цимбал, А.І. Бронніков // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 3 (101), т. 1, С. 68 -73.
35. Цимбал О.М. Логічна модель адаптивного прийняття рішень / О.М. Цимбал // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 9 (107), С. 120 - 124.
36. Цимбал О.М. OpenGL та моделювання маніпуляторів промислових роботів / О.М. Цимбал // «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку: Матеріали 2-го Міжнародного радіоелектронного форуму 19-23 вересня 2005 р.: тези доп. – Харків, 2005. – т. 3. – С. 213 – 216.
37. Цимбал О.М. Нейронні мережі та голосове керування роботом / О.М. Цимбал, С.С. Милютіна // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 10-й международный молодежный форум, 10 – 12 апр. 2006 г.: тезисы докл. – Харків, 2006. – С. 564.
38. Цымбал А.М. Использование ИНС при голосовом управлении роботом / А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 11-й международный молодежный форум, 10 – 12 апр. 2007 г.: тезисы докл. – Харьков, 2007. – С. 344.
39. Цымбал А.М. Подсистема голосового управления роботом на основе искусственной нейронной сети / А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ–2007»: 3-я международная молодежная научно-техническая конф., 16 – 21 апр. 2007 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2007. – С. 196.
40. Невлюдов И.Ш. Assembly Technological Process Design Logical Model / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // TCSET'2008: 9-я международная молодежная научно-техническая конф., 19–23 февр. 2008 г.: тезисы докл. – Львов, 2008. – С. 80–82.
41. Цымбал А.М. Транслятор команд голосового управления роботом / А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ–2008»: 4-я Международная молодежная научно-техническая конф., 21–25 апр. 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2008. – С. 258.
42. Цимбал О.М. Планування дій маніпуляційного робота / О.М. Цимбал // «Електронна компонентна база. Стан та перспективи розвитку. Матеріали 3-го Міжнародного радіоелектронного форуму 30 вересня - 3 жовтня 2008 р.: тези доп. – Харків-Судак, 2008. – т. 3. – С. 198 – 200.
43. Цимбал О.М. Розробка керуючих підсистем інтелектуального робота / О.М. Цимбал, С.С. Милютіна // «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку: Матеріали 3-го Міжнародного радіоелектронного форуму 22-24 жовтня 2008 р.: тези доп. – Харків, 2008. – т. 5. – С. 80 – 82.
44. Цымбал А.М. Проектирование адаптивной сборочной роботизированной системы / А.М. Цымбал, С.С. Милютіна // Стратегия качества в промышленности и

образовании: 4-я международная конф., 30 мая – 6 июня 2008 г.: тезисы докл. – Варна, 2008. – С. 804–807.

45. Цымбал А.М. Планирование действий интеллектуального робота / А.М. Цымбал, С.С. Милютина // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-технической конференции 8 – 12 сентября 2008 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2008. – С. 257 – 260.

46. Цимбал О.М. Планування дій у системі керування маніпуляційним роботом / А.М. Цымбал // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції 26 – 30 травня 2009 р.: тези доп. – Київ, 2009. – С. 404.

47. Цимбал О.М. Розробка системи керування інтелектуальним роботом / О.М. Цимбал, С.С. Милютина // Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення: Міжнародна науково-технічна конференція 7–12 вересня 2009 р.: тези доп. – Севастополь, 2009. – С. 303–305.

48. Цымбал А.М. Речевая информация для голосового управления роботом / А.М. Цымбал, С.С. Милютина // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010: Материалы 6-й международной молодежной научно-технической конференции 14 – 24 апреля 2010 г.: тез. докл. – Севастополь, 2010. – С. 364.

49. Цимбал О.М. Реалізація мобільної системи на платформі iRobot / О.М. Цимбал, В.Ю. Шарковський // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції 25 – 29 травня 2010 р.: тези доп. – Київ, 2010. – С. 501.

50. Цимбал О.М. Завдання прийняття рішень у робототехніці / О.М. Цимбал, С.С. Милютина // Стратегия качества в промышленности и образовании: Материалы международной научно-технической конференции 4 – 11 июня 2010 г.: тезисы докл. – Днепропетровск-Варна, 2010. – С. 660-662.

51. Цымбал А.М. Программное моделирование системы управления мобильным роботом / А.М. Цымбал, А.И. Бронников // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-технической конференции 6 – 10 сентября 2010 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2010. – С. 224 – 226.

52. Цимбал О.М. Особливості адаптивного візуального керування мобільними роботами / Цимбал О.М., Бронніков А.І. // Перша Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем»: матеріали конференції. – Северодонецьк: Технол. Ін-т Східноукр. Нац. Ун-ту ім. В. Даля, 2011. – С. 26 – 28

53. Цимбал О.М. Адаптивні методи та їх реалізація в робототехніці / О.М. Цимбал, А.І. Бронніков // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції 23–28 травня 2011 р.: тези доп.– Київ, 2011.– С. 335.

54. Цымбал А.М. Адаптивное принятие решений в робототехнике и его особенности / А.М. Цымбал, С.С. Милютина // Робототехника как образовательная технология: Материалы международной научно-технической конференции 3 декабря 2011 г.: тезисы докл. – Железногорск, 2011. – С. 119 – 122.

55. Tsymbal A.M. Decision-making in Robotics and adaptive tasks / A.M. Tsymbal, A. I. Bronnikov // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012), Kharkov, Sept. 14-17, 2012. – P. 417-420.

АНОТАЦІЯ

Цимбал О.М. Методи та моделі інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованому керуванні гнучким інтегрованим роботизованим радіоелектронним виробництвом. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки. Міністерство освіти і науки України, Харків, 2015.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню проблеми створення теоретичних основ інтелектуальної підтримки прийняття рішень у автоматизованих системах керування гнучкими інтегрованими системами радіоелектронного виробництва для забезпечення їх функціонування в умовах невизначеності робочого простору та характеру виробничих завдань. Вперше запропоновано: концепцію побудови інтелектуальних систем прийняття рішень та метод адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих роботизованих систем; динамічну, теоретико-множинну та логічну моделі адаптації стратегій функціонування гнучких інтегрованих систем, які дозволяють забезпечити опис функціонування автоматизованої системи керування в умовах динамічного стану робочого простору. Одержали подальший розвиток: метод побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, який дозволяє забезпечити процес прийняття рішень у вигляді уніфікованої пошукової процедури; нечітка та імовірнісна моделі інтелектуального прийняття рішень, які дозволяють забезпечити оцінку альтернативних шляхів розв'язання завдань автоматизованої системи керування в умовах невизначеності; імітаційна модель опису організації виробництва, яка структурує подання інформації у гнучких інтегрованих системах. Розроблені в дисертації моделі та методи дозволяють забезпечити нові проектні рішення з автоматизації процесів керування гнучкими інтегрованими роботизованими системами радіоелектронного виробництва.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, адаптація, стратегія функціонування, гнучка інтегрована система, роботизована система, радіоелектронна апаратура, автоматизована система керування, імітаційна модель, інформаційна модель.

АННОТАЦИЯ

Цымбал А.М. Методы и модели интеллектуальной поддержки принятия решений в автоматизированном управлении гибким интегрированным радиоэлектронным производством. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2015.

Дисертационная работа посвящена решению проблемы разработки теоретических основ интеллектуальной поддержки принятия решений в автоматизированных системах управления гибкими интегрированными системами радиоэлектронного производства для обеспечения их функционирования в условиях неопределенности рабочего пространства и характера производственных задач. Впервые предложено: концепцию построения интеллектуальных систем принятия решений и метод адаптации стратегий функционирования гибких интегрированных роботизованных систем; динамическую, теоретико-множественную и логическую модели адаптации стратегий функционирования гибких интегрированных систем, позволяющие обеспечить описание функционирования автоматизированной системы управления в условиях динамического состояния рабочего пространства. Получили дальнейшее развитие: метод построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений, который позволяет обеспечить процесс принятия решений в виде унифицированной поисковой процедуры; нечеткая и вероятностная модели интеллектуального принятия решений, которые позволяют обеспечить оценку альтернативных путей решения заданий автоматизированной системы управления в условиях неопределенности; имитационная модель организации производства, позволяющая структурировать информацию в гибких интегрированных системах. Разработанные в диссертации модели та методы позволяют обеспечить новые проектные решения в области автоматизации процессов управления гибкими интегрированными роботизованными системами.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, адаптация, стратегия функционирования, гибкая интегрированная система, роботизованная система, радиоэлектронная аппаратура, автоматизированная система управления, имитационная модель, информационная модель.

ABSTRACT

Tsymbol O.M. Methods and models of intellectual decision-making support for automatized control of flexible integrated manufacturing of radio electronic devices. – Manuscript.

A Thesis for a Doctor of Technical Sciences degree in the specialty 05.13.07 – the automation of control processes. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2015.

The thesis is dedicated to the problem of decision-making intellectual support theoretical basis development for control systems of flexible integrated robotized systems of radio-electronic devices production to supply their functioning in conditions of workspace and manufacturing tasks uncertainty.

There is proposed the new concept of intellectual support decision-making systems for flexible integrated robotized systems, which provides the support of automatized control processes, the adaptation of developed strategies for technological equipment functioning, taking in account the dynamic state of workspace and of technological system during execution of developed plans. Also, thesis proposes the new method of functioning strategies adaptive planning, which considers the decision-making process in condition of manufacturing system states and goals dynamics. The proposed new dynamic model of adaptive planning considers the interaction of manufacturing system with workspace

during implementation of strategies and supplies the description of automatized control system functioning. New model, based on set theory, formulates the basic items of adaptive planning and supplies the description of workspace changes influence to the strategies adaptation. The proposed new logical model, based on predicate's logics, describes the relationships between the manufacturing system and its workspace, formulates the goals of intellectual control system as required workspace states and defines the construction of logical inference drive for flexible integrated system.

In addition, thesis contains the improved model of strategies planning, based on fuzzy theory set, which describes the planning for conditions of flexible integrated system information and of action choice uncertainty and implements the estimation of alternative ways on problem solving. The improved probabilistic model of strategies planning considers the decision-making for integrated manufacturing system as discreet multistage process, defined by Markov-chain method probability evaluation at every, evaluates the alternative ways on problem solving for automatized control system with probabilistic description. The improved method of intellectual decision-making system support defines the inference drive as standardized search procedure, based on framework knowledge structures, defines the order of technological problems solving and supplies the automatic problem solving for closed workspace. The improved informational model of manufacturing describes the working personnel, equipment and flexibility to reconstruct for new goods production.

There are developed the basic subsystems of Prolog programming language interpreter, which implements the proposed logical model of strategies planning, used for intellectual decision-making support of automatized control system. Thesis describes the developed software, which implements the proposed theoretical models and contains the subsystems of graphical simulation, of voice and visual control analyzes, of autonomous robot control to support the flexible integrated system automatized control system. Also there is developed the automatized control system software, which implements the proposed methods and models, provides the observation of flexible integrated system dynamics with computer vision tools, supplies the adaptive technological transitions and operations planning and execution, and, as a result improves the efficiency of flexible integrated robotized system functioning.

Keywords: decision-making support system, adaptation, functioning strategy, flexible integrated system, robotized system, radio electronic equipment, automatized control system, simulation model, information model.

