

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Долгоруков Сергій Олегович**



УДК 004.9/.896]:[629.3.018.2:629.056.6-042.4](043.3)

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ВИПРОБУВАЛЬНОГО  
СТЕНДУ НАВІГАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів, Національного авіаційного університету Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор  
**Синєглазов Віктор Михайлович**,  
завідувач кафедри авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів Національного авіаційного університету,  
заслужений діяч науки і техніки України,  
лауреат Державної премії України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Бідюк Петро Іванович**,  
Інститут прикладного системного аналізу  
Національного технічного університету України «КПІ  
ім. Ігоря Сікорського»;

доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Глазунов Микола Михайлович**,  
Інститут Кібернетики імені В.М. Глушкова НАН  
України,  
провідний науковий співробітник відділу методів  
негладкої оптимізації №120.

Захист відбудеться «28» вересня 2021 року о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, пр. Любомира Гузара 1, корп. 1, ауд. 1.001.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «18» серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.062.08  
доктор технічних наук, професор



В. М. Шутко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На даний час велике значення має проблема підвищення якості навігаційного обладнання літальних апаратів, що досягається завдяки використанню випробувальних стендів. Один з підходів до підвищення продуктивності випробувальних стендів (ВС), до якого особливо прагнуть виробники, полягає в значному збільшенні динаміки руху ВС. В першу чергу це означає збільшення розгінної здатності, що дозволяє підвищити прискорення вздовж динамічної траєкторії, і лише в другу чергу - збільшення максимальної точності випробувань.

Збільшення максимального прискорення осі, а також досяжних швидкостей переміщення осей ВС може бути використано різними способами для підвищення продуктивності:

- Підвищення точності випробувань і можливостей ВС: Високоточна підтримка технологічно оптимальної швидкості випробувань уздовж запрограмованого просторового контуру за рахунок одночасного руху кількох осей вимагає їх постійного прискорення і уповільнення. Таким чином, збільшення прискорень осей є необхідною умовою для бажаного підвищення динамічної точності траєкторії і, отже, точності ВС, що виготовляється.

- Зниження виробничих витрат: Підвищена динаміка руху ВС дозволяє значно збільшити часові відрізки в послідовності випробувань з постійними, оптимальними технологічними умовами.

Однак для оцінки динамічних характеристик ВС можна використовувати не тільки дані про прогнозовані максимальних значеннях прискорень осей і швидкостей переміщення. Швидше, вони повинні розглядатися в поєднанні зі швидкістю зміни прискорення, яка може бути реалізована на ВС. Це пов'язано з тим, що дана змінна є вирішальною для того, які значення прискорення і швидкості руху можуть бути використані в реальній експлуатації ВС, а також на коротких ділянках прискорення.

Через фізичні причини вимога високої точності траєкторії при високодинамічних траверсних рухах являє собою класичний конфлікт цілей. Більш високі швидкості руху і, зокрема, більш високі прискорення осей, необхідні для цього, пов'язані з пропорційно вищими інерційними ефектами і потужностями приводів, що призводить до збільшення напруги і віброзбудження для елементів управління, приводів і рами. Таким чином, на додаток до статичної жорсткості і вібраційної поведінки конструкції ВС, динаміка руху пов'язаних осей ВС стає все більш важливою для потенціалу продуктивності високо динамічного ВС.

Основним завданням розробки є досягнення мінімально можливих рухомих мас в поєднанні з досить високою динамічною жорсткістю. Внаслідок цього зростають вимоги до відповідних навантажень конструкції механічної рами карданового підвісу і приводів ВС, які повинні бути реалізовані в процесі розробки.

Центральною мірою тут є інтегрована і синхронізована співпраця різних учасників виробничого процесу випробувальних стендів (механіка,

електротехніка та електроніка, інформаційні технології) з самого початку розробки. Зростаюча технологічна складність і неоднорідність динамічних випробувальних стендів змушує приділяти більше уваги між-організаційному проектуванню в майбутніх процесах розробки такого обладнання.

Поведінку ВС повинно бути досліджено і оптимізовано не тільки на рівні окремих підсистем, на рівні ВС в цілому, а й на рівні взаємодії постачальників елементів всіх частин ВС - механіки, електротехніки та електроніки, інформаційних технологій.

Отже, при побудові даного виду систем вимагається застосування методів багатокритеріальної структурно-параметричної оптимізації з дотриманням набору технічних і економічних обмежень, що потребує більш детального вивчення, побудови моделей елементів ВС і розроблення системи автоматизованого проектування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася у Національному авіаційному університеті за проведення науково-дослідних робіт з таких тем: «Ресурс» (реєстраційний номер 0101U006265), «Методологія автоматизованого проектування пілотажно-навігаційного комплексу гелікоптера» (реєстраційний номер 0102U000376), «Методики створення інтегрованої інформаційної системи літаків малої авіації на основі безплатформеної нанотехнологічної інерціальної навігаційної системи» (реєстраційний номер 0109U000689). «Комплексна робота зі створення дослідницького зразка безпілотної авіаційної системи «Україна» на базі двомоторного безпілотної повітряного судна» (реєстраційний номер 0101U006265).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності проектування ВС, а так само його елементів, за рахунок побудови системи автоматизованого проектування на основі використання інтелектуальних підходів, зокрема, багатокритеріальних методів оптимізації.

Основні завдання, які слід вирішити для досягнення мети роботи:

- визначити структуру системи автоматизованого проектування ВС;
- розробити інтелектуальний підхід для реалізації САПР на основі типової структури ВС, включаючи механіку, електротехніку та електроніку, програмне забезпечення;
- розробити метод проектування на базі навчання з підкріпленням для вирішення завдання багатокритеріального прийняття рішень
- розробити підсистему автоматизованого проектування інтелектуальних агентів проектування елементів ВС на базі штучного інтелекту (ШІ).
- розробити систему автоматизованого проектування ВС;

**Об'єкт дослідження** є система автоматизованого проектування ВС.

**Предметом досліджень** є методи, моделі і алгоритми, на основі яких відбувається розв'язується завдання побудови САПР ВС.

**Методи досліджень** базуються на положеннях:

- теорії оптимізації, дискретної математики і лінійної алгебри, що дозволило провести структурно-параметричний синтез;

- теорії мета-евристичних алгоритмів та навчання з підкріпленням, що дозволило провести пошук оптимальних проектних рішень в умовах невизначеності та обмежень;

- імітаційного та комп'ютерного моделювання, що дозволило підтвердити достовірність отриманих результатів, а так само виконати перевірку рішення під час вирішення завдання багатокритеріального прийняття рішень;

Як засіб розв'язання поставлених завдань використовувалося математичне та комп'ютерне моделювання. У дослідженнях використовувались програмні пакети Matlab, Simulink, а також мова програмування Python.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Запропоновано багато-агентний підхід для автоматизації проектування ВС, який відрізняється від відомих тим, що використовує агентів-проектувальників з елементами ІІІ - навчання з підкріпленням для вирішення завдання багатокритеріального прийняття рішень, в результаті забезпечуються покращення пошуку проектних рішень з точки зору використання попередніх знань. Підхід не тільки дозволяє легко включати нові функції нагород за необхідності, але і зважувати їх відносну важливість в залежності від потреб конкретного завдання проектування випробувального стенду.

2. Вперше розроблена структура комплексу програмного середовища САПР, яка відрізняється від відомих тим, що поєднує взаємодію між ієрархічними рівнями інженерів-проектувальників та інтелектуальних агентів з власними моделями поведінки, що дозволяє скоротити час проектування та забезпечити взаємодію зацікавлених учасників процесу за межами організацій.

3. Розроблено метод побудови САПР ВС, який відрізняється від відомих тим, що забезпечує інтеграцію існуючих САПР в єдиний автономний комплекс, в якому людина-оператор визначає критерії та обмеження, в межах яких багато-агентній системі з підтримкою ІІІ дозволяється управляти автоматизованими операціями, що призводить до економії часу проектування.

4. Вперше запропоновано метод розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень під час проектування, який відрізняється від відомих тим, що при його реалізації використовуються агенти з автономним навчанням, що самостійно збирають дані, генерують нові знання і використовують їх для коригування процесу прийняття рішень, що дозволяє безпосередньо оптимізувати цільові параметри без необхідності визначати модель та форму апроксимації цих функцій.

Наукові результати і висновки, отримані у дисертації, підкріплено порівняльними дослідженнями результатів запропонованих методів з відомими.

**Практичне значення отриманих результатів.** На підставі розробленого математичного забезпечення:

1. Спроектвана і побудована система випробування навігаційного обладнання, навчально-наукової лабораторії авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів, що дозволило перевірити ефективність системи автоматизованого проектування для побудови ВС;

2. На основі запрограмованої САПР розроблено, побудовано, налаштовано дослідну модель випробувального імітаційного динамічного трьох осевого стенду.

3. Результати дисертаційної роботи впроваджено у процес виробництва мікропроцесорних систем релейного захисту (МРЗС) державного підприємства «Виробниче об'єднання «Київприлад» у конструкторсько-технологічному відділі.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, які відносяться до захисту, отримані автором особисто. Низку робіт надруковано у співавторстві.

У роботах [8,4] випробувальний стенд навігаційного обладнання розглядається як об'єкт автоматизованого проектування і визначаються основні завдання та проблеми проектування ВС. В [1] здобувачем виконана постановка задачі структурно-параметричного синтезу САПР ВС. Визначена типова структура ВС, включаючи механіку, електротехніку та електроніку і програмне забезпечення. Розроблено структуру системи автоматизованого проектування ВС з багато-агентною інтелектуальною підсистемою автоматизованого проектування. Стан технологій, методів і засобів розробки випробувальних стендів навігаційного обладнання розглянуто в [2,5,11,13,14]. Аналізується відмінність між загальними підходами та тими, які конкретно відносяться до розробки ВС. В роботах [7] та [9] обґрунтовано принцип автономного навчання агентів системи САПР проектування елементів ВС на базі ІІІ та теорії ігор.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та методологічні положення та результати досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних міжнародних науково-технічних конференціях:

II міжнародна конференція IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) (Kyiv, Ukraine, October 15-17, 2013); III міжнародна конференція IEEE International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Kyiv, Ukraine, October 14-17, 2014); III міжнародна конференція IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) (Kyiv, Ukraine, October 13-15, 2015); IV міжнародна конференція IEEE International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Kyiv, Ukraine, October 18-20, 2016); IV міжнародна конференція IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) (Kyiv, Ukraine, October 17-19, 2017); V міжнародна конференція IEEE International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Kyiv, Ukraine, October 16-18, 2018); IV міжнародна конференція IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) (Kyiv, Ukraine, October 22-24, 2019); VI міжнародна конференція IEEE International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Kyiv, Ukraine, October 20-23, 2020).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття – у закордонному виданні ЕС та ОЕСР, 5 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 8 тез доповідей у збірниках матеріалів

конференцій (з них 8 включені до міжнародних наукометричних баз включаючи Scopus).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списків використаних джерел до кожного розділу, 3 додатків. Повний обсяг дисертації становить 218 сторінок, з яких 17 містять додатки. Загальний обсяг основної частини становить 200 сторінок друкованого тексту, включаючи 46 рисунків, 16 таблиць, 212 використаних джерел, які викладені на 24 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, виконано формулювання мети й завдання дисертації, визначено об'єкт та предмет дослідження, методологічні основи досліджень, описані основні наукові результати, новизна та практична цінність отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами й темами, а також наведено відомості про публікації, апробацію та структуру роботи.

У **першому розділі** дисертації розглянуто випробувальний стенд навігаційного обладнання як об'єкт автоматизованого проектування. Розділ починається з класифікації навігаційного обладнання як об'єкта випробування та висвітлює основні проблеми, що виникають під час проектування ВС для конкретних типів навігаційного обладнання. Розглядається стан справ в області методів та інструментів в процесі розробки випробувальних стендів навігаційного обладнання, висвітлюється їх призначення, класифікація та виробники. Проводиться відмінність між загальними підходами проектування випробувальних стендів та тими, які конкретно відносяться до розробки ВС навігаційного обладнання. Обґрунтовується доцільність автоматизованого проектування випробувальних стендів навігаційного обладнання та основні проблеми проектування випробувальних стендів. Вказується на необхідність дій, що впливають з мети даної роботи.

Проектування випробувальних стендів - складний процес, що включає в себе розробку технічного завдання, проектних пропозицій, ескізного і технічного проєктів, розробку функціональних і принципівих схем, розрахунок елементів і систем стенду, вибір конфігурації стенда, що забезпечує задані проектні параметри, і остаточну розробку робочої документації на стенд.

На рис. 1 показана блок-схема для випробувального стенду навігаційного обладнання Національного авіаційного університету.

Завдання проектування стенду полягає в тому, щоб в будь-яких умовах застосування виявити властивості випробувального стенду, які забезпечували б його максимальну ефективність.

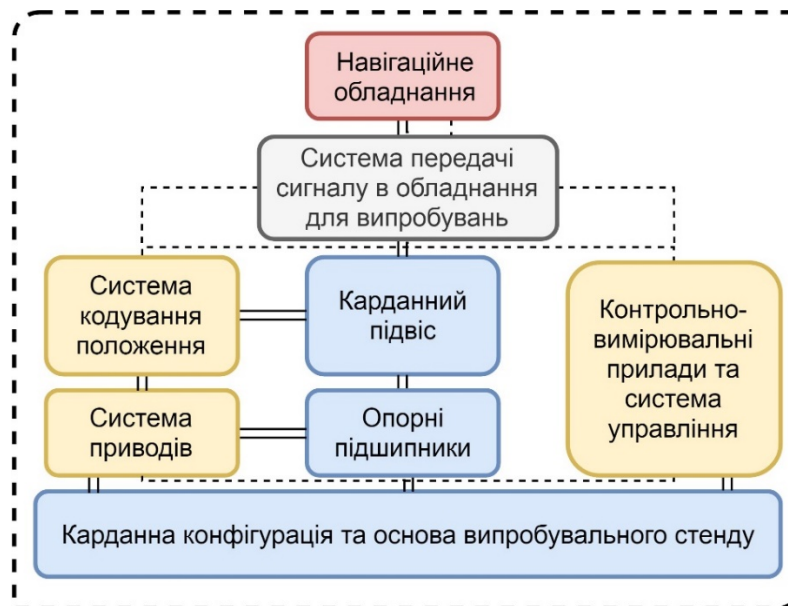


Рис. 1. Блок-схема випробувального стенду

Формалізацію задачі оптимізації проектних параметрів випробувального стенду при методах проектування за допомогою САПР можна представити у вигляді:

$$x = \arg \text{extr} \{C, M, A, T, R\}$$

$$x \in \Omega, y$$

$$x = \text{opt}, C = \text{min}; M = \text{max}; A = \text{min}; T = \text{max}; R = \text{max},$$

де  $x$  – проектні параметри;  $\{C, M, A, T, R\}$  критерії оптимізації – вартість; маса випробуваного обладнання; граничні відхилення параметрів від заданих; довговічність; надійність, та відповідні обмеження критеріїв  $y = \{y_{Cmin} \leq y_C \leq y_{Cmax}, y_{Mmin} \leq y_M \leq y_{Mmax}, y_{Amin} \leq y_A \leq y_{Amax}, y_{Tmin} \leq y_T \leq y_{Tmax}, y_{Rmin} \leq y_R \leq y_{Rmax}\}$ ,

та  $\Omega = \{x | x_i \geq 0, x | x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax}, i \in [1, n]\}$ ,  $x$  – вектор проектних параметрів та обмежень, представлений набором  $n$  елементів.

**Другий розділ** присвячено розробці автоматизованої системи проектування ВС. В процесі розробки ВС його складна функціональна структура призводить до виникнення безлічі завдань, що вимагають застосування різних інструментів САПР. Для вирішення специфічних вимог до проектування ВС повинні бути розроблені додаткові програмні середовища. Це досягається застосуванням багато-агентної САПР ВС, де агенти (А) або інтелектуальні агенти (ІА) відіграють вирішальну роль, виконуючи роль посередника між людиною і інструментами САПР загального призначення.

Згідно стандарту VDI 2206 (Методологія проектування мехатронних систем) описана структура загальної мехатронної моделі ВС. Вона складається з агентів, призначених для роботи з САПР загального призначення для проектування механічних конструкцій, електроніки та системи управління:

(А<sub>1</sub>) – агент виконавчої частини (електроніки), яка складається з електричних приводів, системи кодування положення, системи передачі сигналу в обладнання для випробувань.



( $A_2$ ) – агент механічної частини, що складається з карданового підвісу та інших опорних конструкцій стану – агент ( $A_3$ ). Разом з агентом опорних підшипників ( $A_4$ ) це утворює підсистему САПР механічної частини, що разом з іншим обладнанням підлягають спільному проектуванню.

( $A_5$ ) агент для випробувального столу, термокамери, або іншими приладами для додаткових умов випробування. Конструкція випробувального столу повинна забезпечувати можливість установки і підключення навігаційного обладнання і повинна мати всі необхідні механічні, електричні та інші відповідні сполучні вузли. ( $A_6$ ) Агент системи управління і підтримки підсистем енергозабезпечення випробувального столу (електричної, гідравлічної, пневматичної і т.д.). ( $A_7$ ) Агент з проектування робочого місця оператора. ( $A_8$ ) Агент з розробки програмного забезпечення середовища проведення випробувань та середовища керування, моніторингу, перевірки, налаштування випробувального стану. Середовище має забезпечувати всі вимоги програми випробувань навігаційного обладнання та мати можливість калібрування та перевірки придатності випробувального стану та відповідність стану специфікаціям виробника — програма самодіагностики.

Наведений вище список не є вичерпним, він може бути розширений до декількох десятків різних агентів  $A_N$ , загальною кількістю  $N$ , що складають комплекс САПР ВС. Основний елемент системи САПР ВС називається агентом.

Проектування на першому етапі починається з верхнього рівня агентів та прямує на рівні підсистем, що підпорядковані за ієрархією.

В цьому дослідженні основна увага сконцентрована на двох верхніх рівнях агентів (1) та (2). Інші підсистеми можуть бути спроектовані раніше ніж (1) та (2), однак такі обмеження накладають суттєві проблеми та унеможливають проектування оптимальних підсистем (1) та (2). Основні обмеження та параметри проектування (2) використовуються як обмеження при проектуванні (3) та (4). Рівень (5) проектується з використанням обмежень (2) – (4).

Проектування оптимальної системи керування складає окреме комплексне завдання досліджень та виходить за межі цієї роботи. Рівні проектування (6), (7), (8) та інші підсистеми нижчого рівня мають проектуватись тільки з використанням параметрів обмежень (2). Оптимальне проектування програмного середовища для комплексу випробувального стану навігаційного обладнання потребує окремих засобів, методології та інструментів дослідження, що не висвітлюються в даній роботі.

САПР проектування випробувальних станів навігаційного обладнання (Рис.2) складається з набору агентів і загальних інструментів проектування САПР (ІІ). Будемо називати ІІ - підсистемами проектування.

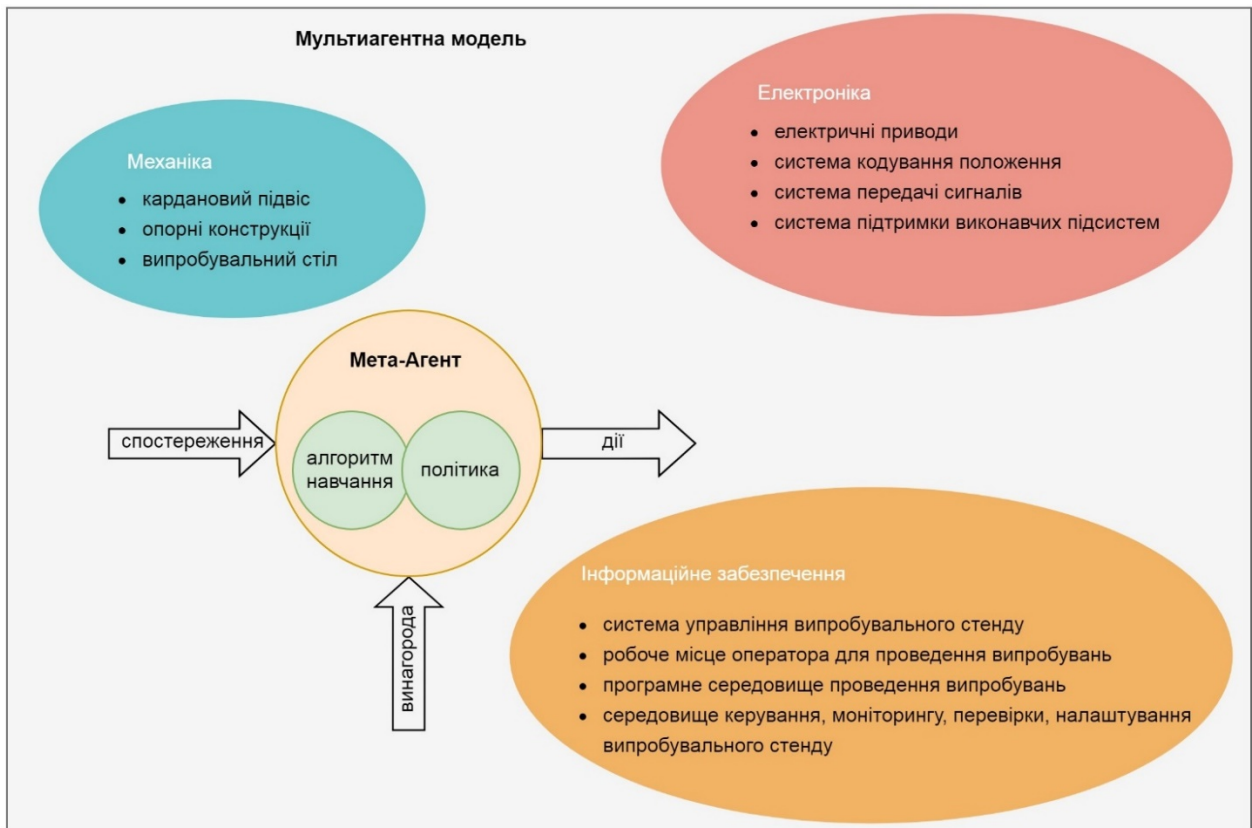


Рис. 2. Модель багатоагентної системи проектування ВС

Агенти перетворюють інформацію для підсистем проектування ВС, отримують завдання від мета-агента і відправляють назад результати. Кожен агент управляє одним або декількома підсистемами проектування, але контроль ІІ не може бути розподілений між кількома агентами.

Агент або інтелектуальний агент (ІА) - це автономна сутність, вміщена в середовище проектування, який обробляє інформацію, отриману через сприйняття. Агент може керувати ним за допомогою дій і діяти відповідно до його станів для досягнення своїх цілей, які визначаються винагородою. що здатна контролювати його і діяти відповідно до його стану для досягнення поставлених завдань. Агент обробляє отриману інформацію за допомогою навчання, досліджує рішення відповідно до правил своєї політики і вибирає краще рішення, співпрацюючи з іншими агентами в середовищі проектування ВС.

Агенти взаємодіють через мета-агента. Мета-агент - виконує певні підзавдання, які агенти можуть виконувати для інших агентів. Дії мета-агента – це вибір між низкою проектних рішень з урахуванням ряду мір переваг або властивостей, це процес визначення найкращих значень або комбінації змінних проектних рішень, таким чином, щоб спроектована система була коректною щодо обмежень, а ефективність системи максимізована щодо численних, можливо, суперечливих цілей. Мета-агент приймає евристичні рішення – це поєднання попереднього вибору та компромісного рішення. Процес прийняття евристичного рішення відрізняється тим, що має елементи ІІІ.

Таким чином САПР ВС складається з:

- $M$ , мета-агент,
- $A$ , набір агентів,
- $G$ , набір підсистем проектування  $III$ .
- $T$  - набір завдань, які виконує мета-агент.  $T = \{T_1, \dots, T_n\}$ , де  $n$  - кількість різних завдань в системі САПР.
- $ST$ , набір підзавдань, які виконують агенти.  $ST = \{ST_1, \dots, ST_m\}$ , де  $m$  - кількість різних підзавдань в системі САПР.
- $D$  показує залежність між агентами та підсистемами проектування  $III$ .
- $S$  - це архітектура системи. Це набір залежностей між підсистемами проектування.
- $R$  - це вимоги до вихідної інформації для кожної підсистеми проектування.

Позначимо САПР символом  $AI_{CAD}$ . Таким чином САПР:

$$AI_{CAD} = \langle M_T(p_s, a_s), A_{ST}, G, D, S_R \rangle,$$

де  $G = \{G_1, \dots, G_p\}$ ,  $p$  - кількість підсистем проектування в системі САПР. Стан підсистем проектування  $G$  визначається  $p_s$ . Якщо  $p_s = 0$ , підсистема проектування не може виконувати підзавдання. Якщо  $p_s = 1$ , підсистема проектування працює, вона може виконувати підзавдання, якщо має достатньо вихідної інформації;  $A = \{A_1, \dots, A_a\}$ ,  $a$  - кількість агентів в системі САПР. Активний стан агента  $A$  визначається змінною  $a_s$ . Якщо  $a_s = 0$ , агент не може виконувати завдання. Якщо  $a_s = 1$ , агент працює та може виконувати завдання.

Основним елементом для визначення ІА є його логіка, яка може бути математично визначена як функція.

Функція агента визначається як  $S \rightarrow A$ , а сприйняття як  $S \rightarrow P$ ,

де  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_t\}$  - інформація з середовища проектування,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  - дії агента, таким чином щоб:

$$IA = \langle S, A, R, P, \rho_0 \rangle,$$

де  $S$  це набір всіх дійсних станів,

$A$  це набір всіх дійсних дій,

$R: S \times A \times S \rightarrow \mathbb{R}$  це функція винагороди, де  $r_t = R(s_t, a_t, s_{t+1})$ ,

$P: S \times A \rightarrow \mathcal{P}(S)$  є функцією ймовірності переходу, де  $P(s'|s, a)$  ймовірність переходу в стан  $s'$  якщо почати перехід із стану  $s$  та виконати дію  $a$ , і  $\rho_0$  це розподіл початкового стану.

Політика - це, по суті, інтелект агента, правило, яке використовується агентом для прийняття рішення про те, які дії слід зробити. Воно може бути детермінованим, і в цьому випадку зазвичай позначається як  $\mu$ :

$$a_t = \mu(s_t),$$

або воно може бути стохастичним, і в цьому випадку зазвичай позначається як  $\pi$ :

$$a_t \sim \pi(\cdot | s_t).$$

Функція винагороди (здобутку)  $R$  має вирішальне значення в навчанні агента. Вона залежить від поточного стану середовища, дії яка щойно відбулась, та наступного стану середовища:

$$r_t = R(s_t, a_t, s_{t+1}).$$

Часто вона спрощується до функції залежності від поточного стану ,  $r_t = R(s_t)$ , або пари стану-дії  $r_t = R(s_t, a_t)$ .

Метою агента є максимізація деякого поняття сукупної винагороди по траєкторії, що також називається епізодами. Всі такі випадки позначимо  $R(\tau)$ .

Траєкторія  $\tau$  це послідовність станів і дій в середовищі,  $\tau = (s_0, a_0, s_1, a_1, \dots)$ .

Одним з видів здобутку є недисконтований здобуток, який являє собою лише суму винагород, отриманих в фіксованому вікні кроків:

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^T r_t.$$

Інший вид здобутку - сума всіх винагород, отриманих агентом за весь час, але зі знижкою в залежності від того, наскільки давно в часі вони були отримані. Це формулювання винагороди включає коефіцієнт дисконтування  $\gamma \in (0,1)$ :

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t.$$

Одним з видів здобутку (винагороди) для вибору оптимальної політики агентів системи САПР може бути модель помилки орієнтації випробувального стенда, рис. 3.

Як і при будь-якій зміні орієнтації тіла, теорема Ейлера стверджує, що ми завжди можемо знайти вектор  $A$  та обертання  $\delta_O$ , що примусить тіло  $H''$  співпадати з  $H'$ . Ми визначаємо кут  $\delta_O$ , який переміщує тіло навігаційного обладнання, розташоване в орієнтації  $H''$  в орієнтацію  $H'$ , як похибку орієнтації випробувального стенда. Квадрат величини похибки орієнтації вказано як:

$$\delta_O^2 = \frac{1}{2} Tr\{\delta R^T \delta R\}$$

де  $\delta R$  це похибка матриці обертання (косинуси напрямку), тобто

$$\delta R \equiv R(\theta) - R(\theta, \mathcal{E}),$$

де  $R(\theta)$  це відповідна матриця косинусів напрямку.

Окремі похибки випробувального стенду (ВС) представлені у вигляді набору похибок  $\mathcal{E} = (K, W, E)$ .

Набір похибок, що зображений на рис. 3, є функцією фізичних перекосів (неортогональності), похибок підшипників і похибок датчика положення сервоприводу випробувального стенду навігаційного обладнання. Ці похибки мають певний геометричний зв'язок між собою та з набором початкових положень осей ВС.

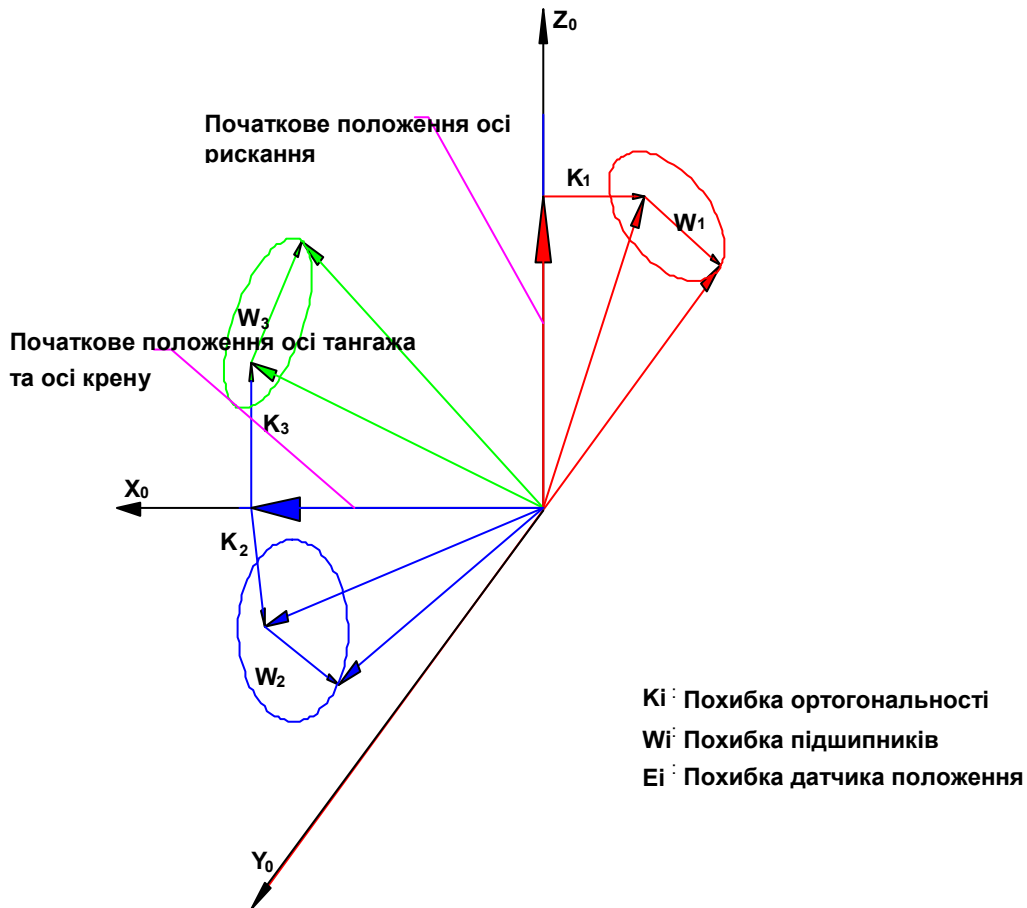


Рис. 3. Модель похибки орієнтації випробувального стенда

Максимальна похибка орієнтації випробувального стенда:

$$\delta_{0max} = \max_{\Theta, \varepsilon} \{\delta_0\}$$

$$\delta_{0max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\text{Tr}\{\delta R^T \delta R\}} \Big|_{max}$$

Для обчислення моделі похибки розроблена програмна модель на мові програмування Python, щоб забезпечити її використання у системі проектування випробувального стенду (Рис. 4.).

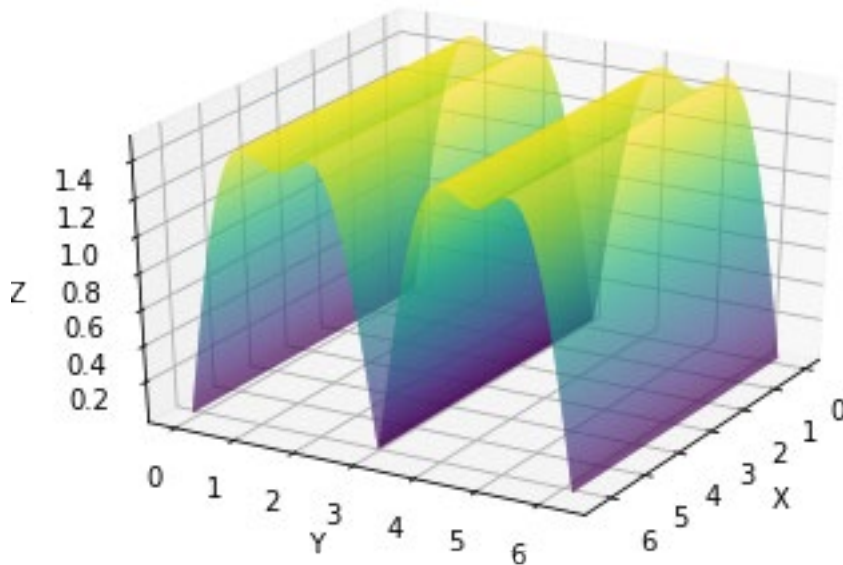


Рис. 4. Модель похибки для відхилення ортогональності 1 кутова сек.

Завданням навчання агента (НА) є побудова політики, яка максимізує очікуваний здобуток. Покладемо, що і переходи станів середовища, і політика є стохастичними. У цьому випадку ймовірність траєкторії з кроків  $T$ :

$$P(\tau|\pi) = \rho_0(s_0) \prod_{t=0}^{T-1} P(s_{t+1}|s_t, a_t)\pi(a_t|s_t).$$

Тоді очікуваний здобуток, що позначається  $J(\pi)$ :

$$J(\pi) = \int_{\tau} P(\tau|\pi)R(\tau) = \mathbb{E}_{\tau \sim \pi} [R(\tau)].$$

Головне завдання оптимізації НА може бути виражене наступним чином:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} J(\pi),$$

де  $\pi^*$  – оптимальна політика.

Значення пари стану-дія – очікуваний здобуток, якщо починати в цьому стані або парі стан-дія, а потім надалі виконувати дії відповідно до певної політики визначається функцією значень здобутку (ФЗЗ).

Використовуються чотири основні ФЗЗ:

1. ФЗЗ за політикою,  $V^{\pi}(s)$ , яка дає очікуваний здобуток, якщо починати в стані  $s$  і потім завжди діяти відповідно до політики  $\pi$ :

$$V^{\pi}(s) = \mathbb{E}_{\tau \sim \pi} [R(\tau)|s_0 = s]$$

2. ФЗЗ за політикою та дією,  $Q^{\pi}(s, a)$ , яка дає очікуваний здобуток, якщо починати в стані  $s$ , виконати довільну дію  $a$  (що може не виходити з політики), і потім завжди діяти відповідно до політики  $\pi$ :

$$Q^{\pi}(s, a) = \mathbb{E}_{\tau \sim \pi} [R(\tau)|s_0 = s, a_0 = a]$$

3. Оптимальна ФЗЗ,  $V^*(s)$ , яка дає очікуваний здобуток, якщо починати в стані  $s$  і завжди діяти відповідно до оптимальної політики в середовищі:

$$V^*(s) = \max_{\pi} \mathbb{E}_{\tau \sim \pi} [R(\tau)|s_0 = s]$$

4. Оптимальна ФЗЗ за дією,  $Q^*(s, a)$ , яка дає очікуваний здобуток, якщо починати в стані  $s$ , виконати довільну дію  $a$ , і потім завжди діяти відповідно до оптимальної політики в середовищі:

$$Q^*(s, a) = \max_{\pi} \mathbb{E}_{\tau \sim \pi} [R(\tau) | s_0 = s, a_0 = a]$$

Також виникає два ключових зв'язки між функцією ФФЗ та ФФЗ за дією:

$$V^\pi(s) = \mathbb{E}_{a \sim \pi} [Q^\pi(s, a)],$$

та

$$V^*(s) = \max_a Q^*(s, a).$$

Крім того існує важливий зв'язок між оптимальної ФФЗ за дією  $Q^*(s, a)$  та дією, що вибрана оптимальної політикою. За визначенням,  $Q^*(s, a)$  дає очікуваний здобуток, якщо починати в стані  $s$ , виконати довільну дію  $a$ , і потім завжди діяти відповідно до оптимальної політики.

Оптимальна політика в  $s$  вибере дію, яка максимізує очікуваний здобуток від початку в стані  $s$ . В результаті, якщо у нас є  $Q^*$ , ми можемо безпосередньо отримати оптимальне дію,  $a^*(s)$ , через

$$a^*(s) = \arg \max_a Q^*(s, a).$$

Може бути кілька дій, які максимізують  $Q^*(s, a)$ . В цьому випадку всі вони оптимальні, і оптимальна політика може випадково вибрати будь-яку з них. Але завжди є оптимальна політика, яка детерміновано вибирає дію.

Всі чотири ФФЗ підкоряються спеціальним рівнянням самопогодження, що називаються рівняннями Беллмана. Основна ідея рівнянь Беллмана полягає в наступному.

Здобуток відправної точки (стану) - це винагорода, що очікується в цій точці, плюс здобуток в будь якій наступній точці.

Рівняння Беллмана для ФФЗ за політикою наступні:

$$V^\pi(s) = \mathbb{E}_{a \sim \pi} [r(s, a) + \gamma V^\pi(s')],$$

$$Q^\pi(s, a) = \mathbb{E}_{s' \sim P} [r(s, a) + \gamma \mathbb{E}_{a' \sim \pi} [Q^\pi(s', a')]]$$

де  $s' \sim P$  скорочене найменування  $s' \sim P(\cdot | s, a)$ , що вказує, що наступний стан  $s'$  відбирається з правил переходу середовища;  $a \sim \pi$  скорочене найменування  $a \sim \pi(\cdot | s)$ ; иа  $a' \sim \pi$  скорочене найменування  $a' \sim \pi(\cdot | s')$ .

Рівняння Беллмана для оптимальної ФФЗ наступні:

$$V^*(s) = \max_a \mathbb{E}_{s' \sim P} [r(s, a) + \gamma V^*(s')],$$

$$Q^*(s, a) = \mathbb{E}_{s' \sim P} [r(s, a) + \gamma \max_{a'} [Q^*(s', a')]].$$

Вирішальною відмінністю між рівняннями Беллмана для ФФЗ за політикою та оптимальної ФФЗ є відсутність або наявність функції  $\max$  над діями. Її включення відображає той факт, що кожний раз, коли агент вибирає свою дію, для того щоб діяти оптимально, він повинен вибрати ту дію, яка призводить до максимального значення здобутку.

Іноді нам не потрібно визначати, наскільки дія є правильною в абсолютному значенні цього слова, а тільки наскільки вона краща за інші в середньому. Тобто, ми хочемо знати відносну перевагу цієї дії. Для цього використовується функція переваги дії (ФПД).

ФПД  $A^\pi(s, a)$  відповідно до політики  $\pi$  характеризує наскільки краще зробити конкретну дію  $a$  в стані  $s$ , ніж випадково обрану дію згідно з  $\pi(\cdot | s)$ , за

умови, що надалі всі дії будуть виконуватись відповідно до  $\pi$ . ФПД визначається як

$$A^\pi(s, a) = Q^\pi(s, a) - V^\pi(s).$$

Функція переваги має вирішальне значення для методів навчання агента.

$$\theta_{k+1} = \operatorname{argmax}_{\theta} \mathbb{E}_{s, a \sim \pi_{\theta_k}} [L(s, a, \theta_k, \theta)],$$

Навчання виконується максимізуючи цільову функцію агента  $L$ .

$$L(s, a, \theta_k, \theta) = \min \left( \frac{\pi_{\theta}(a|s)}{\pi_{\theta_k}(a|s)} A^{\pi_{\theta_k}}(s, a), g(\epsilon, A^{\pi_{\theta_k}}(s, a)) \right),$$

де

$$g(\epsilon, A) = \begin{cases} (1 + \epsilon)A & ; A \geq 0 \\ (1 - \epsilon)A & ; A < 0. \end{cases}$$

де  $\epsilon$  - це гіперпараметр, який приблизно визначає, наскільки далеко нова політика може відхилитися від старої.

В роботі [7] система мультиагентного оптимального проектування розширена з використанням формулювань та конструкцій теорії ігор. Ця робота розширює інтеграцію теорії ігор у багатоагентну систему. У схемі мультиагентного оптимального проектування якщо використовується однорівневий підхід, гра є спільною, оскільки агентні завдання поєднуються в одну однорівневу проблему. Якщо використовується багаторівневий підхід, тоді агенти повинні бути визначені статусом у гри-проектуванні. Можливі види ігор та взаємодії визначаються мета-агентом:

- кооперативна: кожна команда ІА співпрацює та представляє інформацію інших команд.
- некооперативна: кожна команда ІА повинна робити припущення щодо інших команд,
- лідер: ІА вирішує спочатку, що домінує в процесі проектування, припускаючи, що послідовники поведуться раціонально,
- послідовник: ІА або чекає на іншого ІА, або домінує інший.

У системі САПР використовується мета-агент, що використовує дві моделі, обидві - глибокі нейронні мережі, одна з яких називається "Актор", а інша - "Критик". Завдання моделі Критика - навчитися оцінювати, чи призвела дія, що виконав Актор, до покращення нагороди з навколишнього середовища чи ні, і дати цю інформацію Актору. Критик передає Актору дійсне число, яке вказує на оцінку ( $Q$ ) дії, здійсненої в попередньому стані  $s_{s-1}$ . Порівнюючи цей рейтинг, отриманий від Критика, Актор може порівняти свою поточну політику з новою політикою і вирішити, як він хоче поліпшити себе, щоб зробити кращі дії.

**Третій розділ 3** присвячений інтеграції комплексу програмних бібліотек та САПР в автоматизований процес розробки ВС за допомогою штучного інтелекту. Для цього пояснюється структура багато-агентної моделі проектування ВС з використанням інтегрованих систем САПР (Рис 5.).

Етапи оптимізації та проектування розподіляються на декілька кроків, відповідно до моделі проектування визначеної у попередньому розділі. Визначається підтип технічного рішення для застосування в підсистемі ВС. Результат розв'язання задачі - обраний клас технічного рішення. Після цього



вирішується завдання оптимізації параметрів підсистем випробувального стенду. Результат - визначені параметри підсистем.

В якості прикладу розроблено агента для вирішення завдання оптимального вибору комплексу технічних засобів для проектування карданного підвісу випробувального стенду. Завдання вибору комплексу технічних засобів сформульовано як завдання багатокритеріального прийняття рішень.

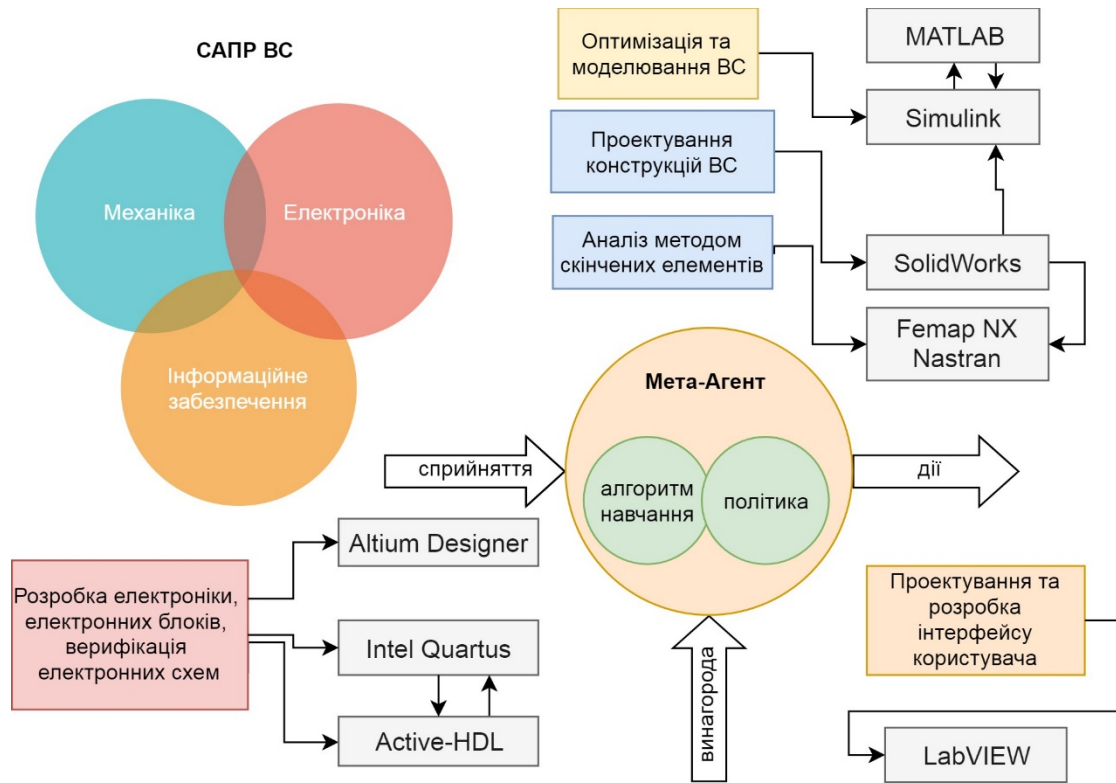


Рис. 5. Інтеграція існуючих САПР в єдиний автономний комплекс

Основні критерії для вибору матеріалів та форми карданного підвісу є термовитривалість, вимоги до обертового моменту, низький обертальний резонанс, поперечна жорсткість, просторова динамічна стабільність конструкції, складність побудови інтерфейсу для під'єднання навігаційного обладнання, складність забезпечення вимог до відхилень параметрів конструкції та стандартів якості необхідних на виробництві, вартість виробництва, тривалість циклу виробництва .

Таблиця 1. Основні критерії для вибору матеріалів та форми карданного підвісу.

Матеріали	термо витривалість	вимоги до обертового моменту	вартість виробництва	Тривалість циклу виробництва	низький обертальний резонанс
	max	min	min	min	max
алюміній	1	5	1	1	1
композитні матеріали	1	1	10	5	2.5

Форма	поперечна жорсткість	просторова динамічна стабільність конструкції	складність побудови інтерфейсу для під'єднання навігаційного обладнання	складність забезпечення вимог до відхилень параметрів конструкції та стандартів якості необхідних на виробництві	вартість виробництва
	max	max	min	min	min
Прямокутна	менша	менша	менша	менша	менша
Сферична	більша	більша	більша	більша	більша

Параметри наведені у відносних величинах, за необхідності та наявності можливе використання точних параметрів від виробника або експериментальних даних.

В попередньому випадку всі критерії вважались рівнозначними. Для завдання вибору комплексу технічних засобів підсистеми опорних підшипників додано параметр ваги критерію.

Таблиця 2. Основні критерії для вибору підсистеми опорних підшипників.

	Биття	Тертя	Ортогон альність осей	Жорсткість	Надійність	складність системи живлення, забезпечення та підтримки	вартість виробництва
Вага, %	15	10	20	10	10	10	25
	min	min	min	max	max	min	min
Механічні кулькові підшипники	4	4	4	4	4	1	1
гідростатичні гідравлічні підшипники	2	3	3	3	1	4	5
гідростатичні пневматичні підшипники	2	2	3	2	3	2	3
магнітні підшипники	1	1	1	1	2	3	10

Для системи кодування положення вибір технічних засобів складається з інерційних датчиків, синусно-косинусного обертового трансформатора (СКОТ), оптичного енкодера та індуктосина. Застосування інерційних датчиків як системи кодування положення запропоновано дослідниками як протилежний підхід до класичного. У світовій практиці розглядаються в більшості випадків оптичні енкодери, індуктосини та СКОТ.

Таблиця 3. Основні критерії для вибору підсистеми кодування положення

	стійкість до шумів	точність	короткострокова стабільність показників	вартість виробництва	складність інтеграції
	max	min	min	min	min
інерційні датчики	1	4	4	4	4
СКОТ	3	3	3	2	3
оптичні енкодери	2	2	1	1	1
індуктосин	4	1	2	3	2

Таблицю завдання вибору матеріалу для прийняття рішення далі перетворюємо у завдання навчання агента. Для цього перетворюємо матеріал карданового підвісу у дії агента, а критерії кодуємо станами середовища навчання.

На рис. 6 показаний граф середовища для прийняття рішень агента вибору матеріалу карданового підвісу.

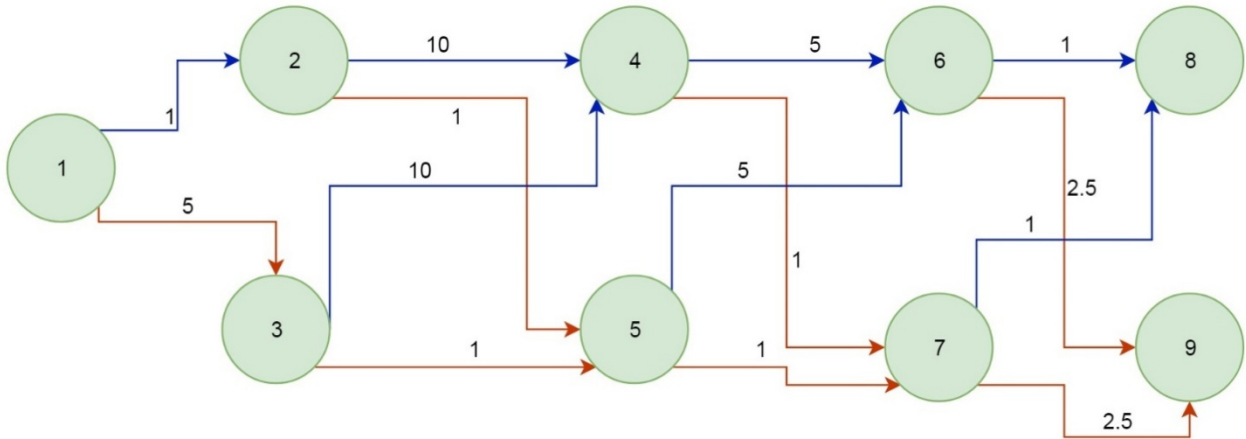


Рис. 6. Середовище навчання з підкріпленням для інтелектуального агента.

На рис. 6. кожне коло являє собою стан. У кожному стані приймається рішення про вибір матеріалу карданного підвісу: синя стрілка - алюміній, оранжева стрілка - композитні матеріали. Агент починає із стану 1. В процесі переходу між станами агент отримує винагороду, яка дорівнює значенню на кожному переході в графі. Значення винагороди це критерії багатокритеріального завдання мінімізації та максимізації із таблиці наведеної вище. Метою навчання є отримання максимальної сумарної винагороди.

Для оптимізації всього випробувального стенду загалом, модель нагороди багатоагентного середовища повинна використовувати багатотільне моделювання випробувального стенду у спеціалізованих САПР. (Рис. 7.)

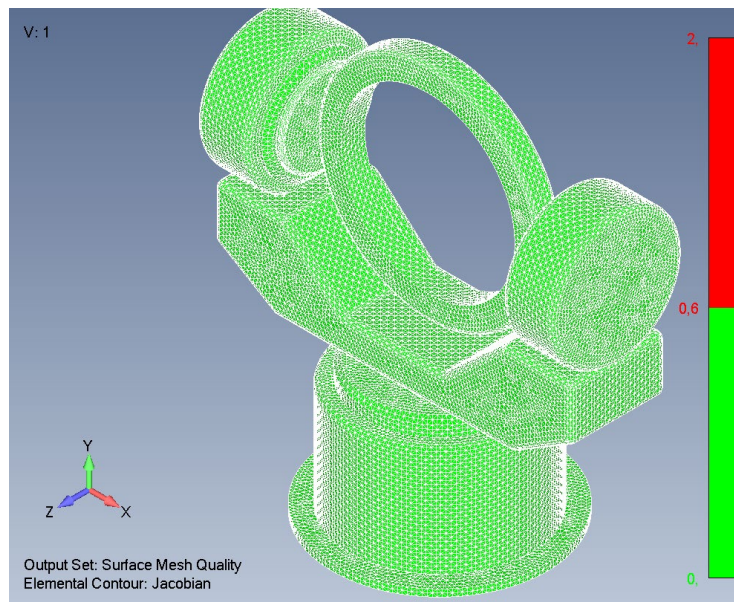


Рис. 7. Підготовка моделі випробувального стенду для багатотільного моделювання у САПР.

Навчання у багато-агентному середовищі, дозволяє включити обмеження завдання на проектування ВС у вигляді функції нагороди. Середовище для прийняття рішень агентів проектування стенду складається з чотирьох ключових елементів:

1. Стани кодують інформацію про часткове проектне рішення, включаючи параметри електричних підсистем (моменти, прискорення, механічні коефіцієнти, частота вибірки інформації про кутове положення), характеристики механічних частин (маса, ортогональність, матеріал), характеристики системи управління.

2. Дії - це всі можливі параметри проектних рішень підсистем, які можуть бути визначені в поточний момент без порушення будь-яких жорстких обмежень на завдання проектування ВС.

3. Переходи між станами визначають розподіл ймовірностей за такими станами, з огляду на стан і дію.

4. Винагорода дорівнює 0 для всіх дій, крім останнього дії, де винагорода є зваженою сумою моделі статичної похибки, динамічної похибки та моделі механічної конфігурації ВС. Розробка правильної функції винагороди є одним з найбільш важливих рішень. Функція винагороди повинна швидко обчислюватись через те що навчання агента часто потребує сотні тисяч ітерацій для досягнення результату. Функція винагороди повинна максимально корелювати з істинною метою завдання проектування ВС. Врахування обмежень – це отримання агентом великої негативної винагородою щоразу за проектні параметри що виходять за межі проектного завдання.

Навчання агента, що моделюється нейронною мережею, відбувається через повторювані епізоди послідовності станів, дій і винагород. Агент вчиться робити дії, максимізує сукупну винагороду. Для навчання доцільно застосовувати алгоритм (РРО) для поновлення параметрів мережі політики, з огляду на кумулятивну винагороду за кожне обране проектне рішення ВС.

В початковому стані  $s_0$  ми маємо порожній масив даних проектних параметрів ВС. На кожному кроці оптимізується один проектний параметр, і

кінцевий стан,  $s_{Final}$ , відповідає повністю оптимізовану багатокритеріальну задачу ВС. Таким чином,  $T$  дорівнює загальній кількості проектних параметрів в завданні проектування ВС. На кожному кроці часі  $t$  агент починає виконувати дію в стані  $s_t$ , виконує дію ( $a_t$ ), переходить в новий стан ( $s_{t+1}$ ) і отримує винагороду ( $r_t$ ) від середовища проектування.  $s_{t+1}$  - це наступний стан, який включає оновлене уявлення агента, що містить інформацію про новий оптимізований проектний параметр ВС.

Модель дій агентів представляє собою простір дій  $m \times n$ , що є розподілом підсистем  $m$  на кількість їх проектних рішень  $n$ .

Незважаючи на відмінності між алгоритмами оптимізації в популяційних метаевристичних методах, процес оптимізації ділиться на дві основні фази: розвідка та диверсифікація, експлуатація та інтенсифікація. Це потрібно для широкого охоплення простору пошуку шляхом використання різних пошукових рішень використовуваного алгоритму для уникнення проблем пошуку.

Для покращення алгоритму оптимізації пропонується поєднання метаевристичного алгоритму полювання орла (АО) та навчання з підкріпленням. АО це популяційний метод, правило оптимізації починається з популяції рішень-кандидатів ( $X$ ), як представлено в рівнянні (1), яка генерується стохастично між верхньою межею ( $UB$ ) і нижньою межею ( $LB$ ) даного завдання. На кожній ітерації в оптимального рішення приблизно визначається найкраще на даний момент рішення.

$$X_{ij} = r_1 \times (UB_j - LB_j) + LB_j, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, Dim \quad (1)$$

де  $X$  позначає безліч поточних рішень-кандидатів, які генеруються випадковим чином,  $X_i$  позначає значення (позиції) рішень,  $N$  - загальна кількість рішень-кандидатів (популяція),  $Dim$  позначає розмірність завдання,  $LB_j$  позначає  $j$ -ю нижню межу, а  $UB_j$  -  $j$ -ю верхню межу даного завдання.

У першому методі ( $X_1$ ) орел розпізнає область здобичі і вибирає кращу область полювання, злітаючи вгору з вертикальною стійкою. Тут АО широко досліджує простір пошуку з високого злету, щоб визначити область простору пошуку, де знаходиться здобич. Математично ця поведінка представлена в рівнянні (2).

$$X_1(t+1) = X_{best}(t) \times \left(\frac{1-t}{T}\right) + (X_M(t) - X_{best}(t) * rand), \quad (2)$$

де,  $X_1(t+1)$  - рішення наступної ітерації  $t$ , яке генерується першим методом пошуку ( $X_1$ ).  $X_{best}(t)$  - найкраще рішення, отримане до  $t$ -ї ітерації, яке відображає приблизне місце здобичі. Це рівняння (1) використовується для управління розширеним пошуком (розвідкою) через кількість ітерацій.  $X_M(t)$  позначає середнє значення місцеположення поточних рішень, пов'язаних на  $t$ -й ітерації,  $rand$  - випадкова величина між 0 і 1.  $t$  і  $T$  - поточна ітерація і максимальне число ітерацій, відповідно.

$$X_M(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(t), \forall j = 1, 2, \dots, Dim \quad (3)$$

де  $Dim$  - розмірність задачі, а  $N$  - кількість рішень-кандидатів (розмір популяції).

У другому методі ( $X_2$ ), коли область здобичі знайдена з високого польоту, орел кружляє над метою здобичі, готується підлетіти до землі, а потім атакує.

Цей метод називається контурним польотом з короткою глісадною атакою. Тут АО вузько досліджує обрану ділянку цільової здобичі, готуючись до атаки. Математично це поведінка представлено в рівнянні (4).

$$X_2(t + 1) = X_{best}(t) \times Levy(D) + X_R(t) + (y - x) * rand, (4)$$

де  $X_2(t + 1)$  - рішення наступної ітерації  $t$ , яке генерується другим методом пошуку ( $X_2$ ).  $D$  - простір розмірності, а  $Levy(D)$  - функція розподілу  $Levy$ , яка обчислюється за допомогою рівняння (5).  $X_R(t)$  - випадкове рішення, взяте в діапазоні  $[1 N]$  на першій ітерації.

$$Levy(D) = s \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\beta}}, \sigma = \left( \frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right) (5)$$

де  $s$  - постійна величина, фіксована на  $0,01$ ,  $u$  і  $v$  - випадкові числа від  $0$  до  $1$ .

$$y = r \times \cos(\theta), x = r \times \sin(\theta) (6)$$

де  $p$  - постійна величина, фіксована на  $1,5$ . У рівнянні (6) для надання форми спіралі в пошуку використовуються  $y$  і  $x$ , які розраховуються наступним чином.

$$r = r_1 + U \times D_1, \theta = -\omega \times D_1 + \theta_1, \theta_1 = \frac{3 \times \pi}{2} (7)$$

$r_1$  приймає значення від  $1$  до  $20$  для фіксованої кількості циклів пошуку, а  $U$  - мале значення, фіксоване на  $0,00565$ .  $D_i$  - цілі числа від  $1$  до довжини простору пошуку ( $Dim$ ), а  $w$  - невелике значення, фіксоване на  $0,005$ .

У третьому методі ( $X_3$ ), коли область здобичі точно визначена, і орел готовий до посадки і атаки, орел спускається вертикально з попередньою атакою, щоб виявити реакцію здобичі. Цей метод названий низьким польотом з повільною атакою спуску. Тут АО використовує обрану область мети, щоб наблизитися до здобичі і атакувати. Математично ця поведінка представлено в рівнянні (8).

$$X_3(t + 1) = (X_{best}(t) - X_M(t)) \times \alpha - rand + ((UB - LB) \times rand + LB) \times \delta, (8)$$

де  $X_3(t + 1)$  - рішення наступної ітерації  $t$ , яке генерується третім методом пошуку ( $X_3$ ).  $X_{best}(t)$  означає приблизне місце розташування здобичі до  $i$ -ї ітерації (найкраще отримане рішення), а  $X_M(t)$  означає середнє значення поточного рішення на  $t$ -й ітерації, яке розраховується за допомогою рівняння (3).  $rand$  - випадкова величина між  $0$  і  $1$ .  $\alpha$  і  $\delta$  - параметри налаштування експлуатації, фіксовані в даній роботі на малому значенні ( $0,1$ ).  $LB$  означає нижню межу, а  $UB$  - верхню межу даного завдання.

У четвертому способі ( $X_4$ ), коли орел наблизився до здобичі, він атакує здобич над землею відповідно до його стохастичних рухів. Цей метод називається "ходити і хапати здобич". Тут, і нарешті, АО атакує здобич в останньому кроці. Математично ця поведінка представлена в рівнянні (9).

$$X_4(t + 1) = QF \times X_{best}(t) - (G_1 \times X(t) \times rand) - G_2 \times Levy(D) + rand \times G_1, (9)$$

де  $X_4(t + 1)$  - рішення наступної ітерації  $t$ , яке генерується четвертим методом пошуку ( $X_4$ ).  $QF$  позначає функцію якості, яка використовується для врівноваження стратегій пошуку, яка розраховується за допомогою рівняння

(10).  $G_1$  позначає різні рухи орла, які використовуються для відстеження здобичі під час втечі, яке генерується за допомогою рівняння (11).  $G_2$  являє собою значення від 2 до 0, які позначають нахил польоту орла, використовуюваного для стеження за здобиччю під час втечі від першого місця розташування ( $I$ ) до останнього місця розташування ( $t$ ), яке генерується за допомогою рівняння (12).  $X(t)$  - поточне рішення на  $t$ -й ітерації.

$$QF(t) = t^{\frac{2 \times rand - 1}{(1-T)^2}} \quad (10)$$

$$G_1 = 2 \times rand - 1 \quad (11)$$

$$G_2 = 2 \times \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (12)$$

$QF(t)$  - значення функції якості на  $t$ -й ітерації, а  $rand$  - випадкова величина між 0 і 1.  $t$  і  $T$  - поточна ітерація і максимальне число ітерацій, відповідно.  $Levy(D)$  - функція розподілу польоту, розрахована за допомогою рівняння (5).

В алгоритмі АО оптимізація починає процедури поліпшення рішення з генерації випадкового визначеного набору рішень-кандидатів, званого популяцією. Через траєкторію повторення, пошукові стратегії АО досліджують розумні позиції близького до оптимального рішення або найкращого отриманого рішення. Кожне рішення оновлює свої позиції відповідно до найкращих рішень, отриманих в результаті процесів оптимізації АО. Щоб підкреслити рівновагу між стратегіями пошуку АО (тобто розвідка та експлуатація), існують чотири стратегії пошуку для розвідки і експлуатації (тобто розширена розвідка, звужена розвідка, розширена експлуатація і звужена експлуатація). Нарешті, процес пошуку АО завершується при досягненні критерію закінчення.

Чотири фази пошуку рішення алгоритму АО - це рівняння (2), формула (4), формула (8) та формула (9), перетворюються на дії агента. Крім того агент може налаштовувати додаткові параметри чотирьох дій для досягнення найкращих результатів повністю моделюючи таким чином поведінку орла. Як результат, призведе до вибору найкращих оптимальних рішень параметрів ВС під час дослідження величезного простору можливих параметрів.

Пропонований АО-Агентний алгоритм
1: Вхідні дані рішення-кандидати ( $X$ ) та кількість епізодів навчання ( $e_{tmax}$ ).
2: Ініціювати стани, дії та параметри агента. $a_t = (a_{0,t}, \dots, a_{X,t})$ $s_t = (q_{0,t}, q_{1,t}, \dots, q_{X,t}, d_{t-1}, \dots, d_{t-\tau})$ де $X_t = (X_{1,t}, \dots, X_{X,t})$
5: Виконувати цикл $e_t \leq e_{tmax}$
6: Розрахувати винагороду в поточному стані. $R(\tau) = \sum_{t=0}^{\tau} r_t$
7: Знайти ( $X_{best}$ ).

8: Оновити політику навчання агента використовуючи оператори АО в формулах (3)–(11).
9: $t=t+1$ .
10: завершити виконання
11: Зберегти параметр Xbest.

Як завдання для майбутніх досліджень, дії агента можуть бути будь-яким природничим алгоритмом - завдання полягає в систематизації всіх метаевристичних способів дослідження та звуження простору пошуку.

Через повторювані епізоди (послідовності станів, дій і винагород) нейронна мережа поведінки агента вчиться робити дії, які максимізують сукупну винагороду.

Пошук архітектури нейронної мережі яка може з найбільшою точністю передбачувати нагороду для оптимізації випробувального стенду є окремим складним завданням. Потім ця архітектура кодує мережу поведінки агента та забезпечує оптимальну координацію дій.

**У четвертому розділі** наводиться оцінка розроблених методів на прикладі реального застосування. З цією метою представлено їх використання в контексті реального проекту для підвищення динамічних характеристик роботи ВС Національного Авіаційного Університету і обговорюються поліпшення, досягнуті в експлуатаційних даних. Це включає експериментальну перевірку розробленої багато-агентної мета моделі проектування ВС шляхом порівняння з існуючими методами. Також на прикладі випробування МЕМС акселерометра підтверджено придатність дослідного зразку випробувального стенда навігаційного обладнання виконувати завдання, що висуваються до тривісних імітаційно-калібрувальних рухомих платформ.

Під час розробки та створення ВС НАУ було використано інструменти САПР для розробки систем випробувального стенду, який складається з трьох осей карданового підвісу.

Процес розробки включав п'ять етапів (Рис. 8):

1. Оптимізація та моделювання ВС за допомогою САПР MATLAB і Simulink.
2. Проектування конструкцій ВС за допомогою САПР SolidWorks,
3. Аналіз методом скінчених елементів за допомогою САПР Femap NX Nastran,
4. Розробка електроніки, електронних блоків, верифікація електронних схем за допомогою САПР Altium Designer, САПР Intel Quartus, САПР Active-HDL.
5. Проектування та розробка інтерфейсу користувача за допомогою САПР LabVIEW.



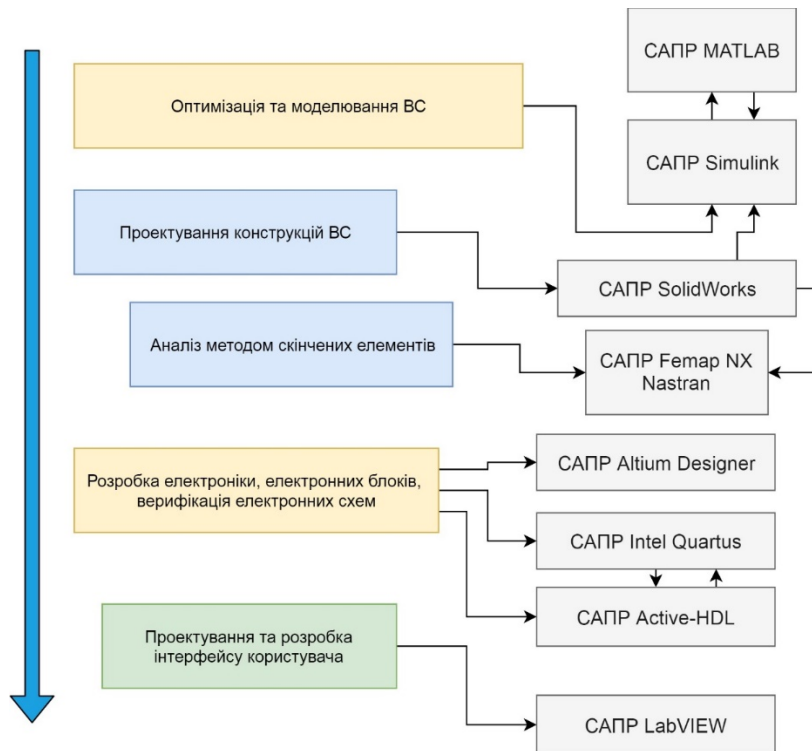


Рис. 8. Процес розробки випробувального стенда НАУ

Застосування САПР для проектування випробувального стенду знизило витрати на розробку, а час проектування скоротився більш ніж на два роки.

На рис 9 показаний результат навчання агента для вирішення завдання таблиці 1. Тривалість навчання складала 200 епізодів, кожен епізод триває 20 кроків. Навчання припиняється, коли агент отримує середню сумарну нагороду більше 22,5 за 30 тренувальних епізодів.

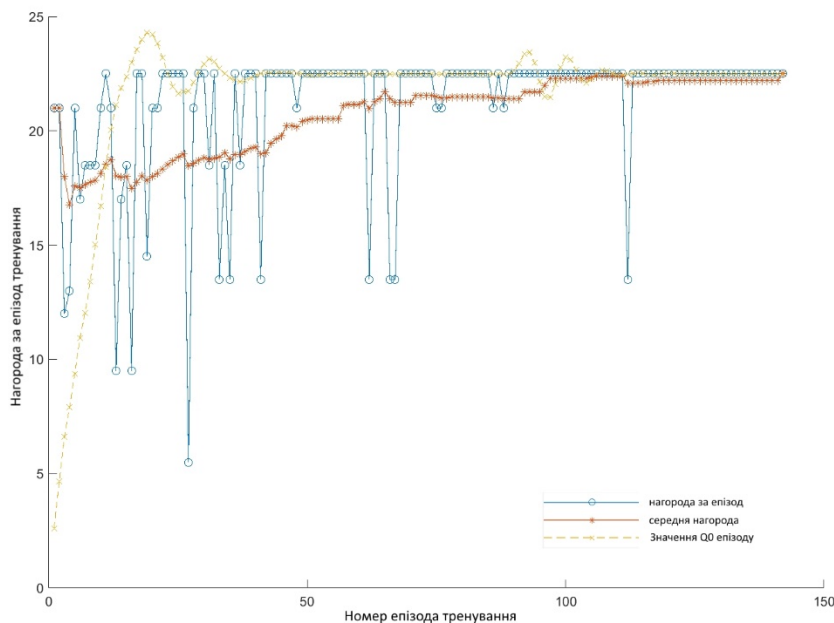


Рис.9. Тренування агента вибору матеріала ВС

Результати порівняно з широко відомими методами Topsis та Promethee.

Таблиця 4. Результати методів навчання агента, Topsis та Promethee

	механічні кулькові підшипники	гідростатичні гідравлічні підшипники	гідростатичні пневматичні підшипники	магнітні підшипники
Агент	1 (28.6318)	4 (23.3137)	3 (24.1282)	2 (25.7919)
Topsis	1 (0,7679)	3 (0,5357)	2 (0,7380)	4 (0,2363)
Promethee	2 (0,1000)	4 (-0,2833)	1 (0,1500)	3 (0,0333)

У ВС застосовуються всі типи, однак у постановці завдання був відданий максимальний ваговий коефіцієнт (0.25) критерію вартості і метод навчання агента та Topsis правильно визначив 1 місце. Щодо інших проектних рішень, то результати всіх методів різняться. Останнє місце в узагальненій таблиці займають гідравлічні рішення. Це найдорожче рішення з точки зору проектування та інтеграції. Пневматичні та магнітні рішення у реальних проектах часто співставляються; та магнітні опорні підшипники, з точки зору інтеграції, через непотрібність інтеграції системи стисненого повітря та більшої жорсткості переважають над пневматичними.

Таким чином валідація та верифікація результатів розробленого методу навчання агента для задачі багатокритеріального прийняття рішень під час проектування підсистем ВС показала задовільні результати та максимально близька до рішень реальних інженерів-проектувальників.

На рис. 10 показаний результат віртуальній симуляції конструкції збірки вала в програмі САПР Nastran до якої за допомогою інтерфейсу інтеграції OLE (Object Linking & Embedding) через мову програмування Python підключений агент розрахунку моделі похибки випробувального стенду.

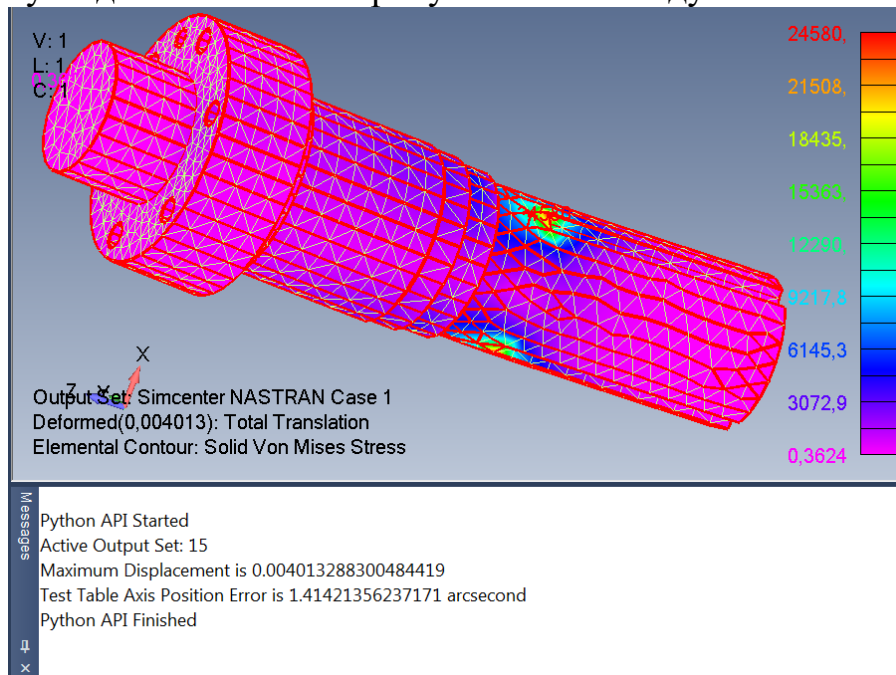


Рис. 10. Інтеграція САПР та середовища програмування Python

Механізм взаємодії побудований таким чином що віртуальна модель випробується за допомогою методів вбудованих САПР Nastran, а через інтерфейс OLE до САПР підключається обчислювальний модуль моделі статичної похибки випробувального стенду. Результати обчислень показані в нижній частині інтерфейсу САПР на рисунку 10.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розглянуто актуальні проблеми проектування випробувальних стендів навігаційного обладнання, які були теоретично та експериментально досліджені.

Основні досягнуті результати:

1. Запропоновано багато-агентний підхід для автоматизації проектування ВС, який використовує агентів-проектувальників з елементами ШІ - навчання з підкріпленням для вирішення завдання багатокритеріального прийняття рішень, що дає в результаті покращення пошуку проектних рішень з точки зору використання попередніх знань. Підхід не тільки дозволяє легко включати нові функції нагород за необхідності, але і зважувати їх відносну важливість в залежності від потреб конкретного завдання проектування випробувального стенду.

2. Вперше розроблена структура комплексу програмного середовища САПР, в якій поєднана взаємодія між ієрархічними рівнями інженерів-проектувальників та інтелектуальних агентів з власними моделями поведінки, що дозволяє скоротити час проектування та забезпечити взаємодію зацікавлених учасників процесу за межами організацій.

3. Розроблено метод побудови САПР ВС, що забезпечує інтеграцію існуючих САПР в єдиний автономний комплекс, в якому людина-оператор визначає критерії та обмеження, в межах яких багато-агентній системі з підтримкою ШІ дозволяється управляти автоматизованими операціями, що призводить до економії часу проектування.

4. Вперше запропоновано метод розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень під час проектування, який при його імплементації використовує агенти з автономним навчанням, що самостійно збирають дані, генерують нові знання і використовують їх для коригування процесу прийняття рішень, що дозволяє безпосередньо оптимізувати цільові параметри без необхідності визначати модель та форму апроксимації цих функцій.

5. На основі запрограмованої САПР розроблено, побудовано, налаштовано випробувальний стенд навігаційного обладнання з наступними характеристиками: габаритні розміри стенда - 1840x1715x1400 мм; максимальна маса навігаційного обладнання, що випробовується - 100 кг; діаметр обертової платформи - 1000 мм; кути повороту та середні радіуси - зовнішня вісь  $\pm 180$  (360) град., 700 мм; середня вісь  $\pm 30$  (60) град., 600 мм; внутрішня вісь  $\pm 180$  (360) град., 530 мм; точність за кутами, крену і тангажу  $\pm 1$  град., канал курсу  $\pm 1.5$  град.; кутова швидкість каналу тангажу - 700 град/сек, каналу крену - 160 град/сек, каналу курсу - 150 град/сек.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях іноземних держав–членів ЄС:

1. S. O. Dolgorukov, “Navigation equipment test table computer-aided design artificial intelligence configuration optimization,” *Věda a perspektivy*, vol. 1, no. 1, pp. 214-227, May, 2021.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, “Optimal choice of the technical means of rate, pitch and roll channels subsystems of navigation equipment simulation table,” *Electronics and control systems*, no. 2, pp. 33-39, 2014.
3. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, “Identification of mechanical backlash of navigation equipment testing table,” *Electronics and control systems*, no. 3, pp. 104-108, 2014.
4. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, “Complex criteria for navigation equipment test table optimal design problem,” *Electronics and control systems*, no. 1, pp. 87-92, 2015.
5. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, “UAV equipment test table for preflight testing,” *Electronics and control systems*, no. 3, pp. 126-132, 2015.
6. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, “Environmental Chamber for Navigation Equipment Test Table,” *Electronics and control systems*, no. 2, pp. 62-66, 2017.

Матеріали та тези наукових доповідей:

7. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, “Computer-aided Design of Navigation Equipment Test Table based on Game Optimization,” in *Proc. IEEE 6th Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, (Kyiv, Ukraine), 2020, pp. 7-10, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255419.
8. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, “Computer-Aided Design System of Navigation Equipment Test Table,” in *Proc. IEEE 5th Int. Conf. Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, (Kyiv, Ukraine), 2019, pp. 7-11, doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943871.

9. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, "Intelligent Integrated Cads of Navigation Equipment Testing System," in *Proc. IEEE 5th Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, (Kyiv, Ukraine), 2018, pp. 7-10, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576314.
10. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, "Dynamic testing of UAV navigation system," in *Proc. IEEE 4th Int. Conf. Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, (Kyiv, Ukraine), 2017, pp. 211-214, doi: 10.1109/APUAVD.2017.8308812.
11. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, "Multi objective optimization for UAV navigation equipment test table design," in *Proc. IEEE 4th Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, (Kyiv, Ukraine), 2016, pp. 117-120, doi: 10.1109/MSNMC.2016.7783121.
12. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, "Dynamic hardware-in-the-loop UAV ground testing system," in *Proc. IEEE Int. Conf. Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, (Kyiv, Ukraine), 2015, pp. 91-94, doi: 10.1109/APUAVD.2015.7346569.
13. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, "Test bench of UAV navigation equipment," in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine, 2014, pp. 108-111, doi: 10.1109/MSNMC.2014.6979743.
14. V. M. Sineglazov and S. O. Dolgorukov, "HardWare-In-The-Loop simulation table for UAV navigation complexes testing," in *Proc. IEEE 2nd Int. Conf. Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*, (Kyiv, Ukraine), 2013, pp. 141-145, doi: 10.1109/APUAVD.2013.6705307.

## АНОТАЦІЯ

**Долгоруков С.О. Автоматизоване проектування випробувального стенду навігаційного обладнання.** - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 «Системи автоматизації проектувальних робіт». - Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності випробувальних стендів (ВС), а так само його елементів, за рахунок побудови системи автоматизованого проектування на основі використання інтелектуальних підходів, зокрема, навчання з підкріпленням.

Запропоновано багато-агентний підхід для автоматизації проектування ВС, який відрізняється від відомих тим, що використовує агентів-проектувальників з елементами ШІ - навчання з підкріпленням для вирішення завдання багатокритеріального прийняття рішень, в результаті забезпечуються покращення пошуку проектних рішень з точки зору використання попередніх знань. Підхід не тільки дозволяє легко включати нові функції нагород за необхідності, але і зважувати їх відносну важливість в залежності від потреб конкретного завдання проектування випробувального стенду. Розроблено метод побудови САПР ВС, який відрізняється від відомих тим, що забезпечує інтеграцію існуючих САПР в єдиний автономний комплекс, в якому людина-оператор визначає критерії та обмеження, в межах яких багато-агентній системі з підтримкою ШІ дозволяється управляти автоматизованими операціями, що призводить до економії часу проектування. Вперше запропоновано метод розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень під час проектування, який при його імплементації використовує агенти з автономним навчанням, що самостійно збирають дані, генерують нові знання і використовують їх для коригування процесу прийняття рішень, що дозволяє безпосередньо оптимізувати цільові параметри без необхідності визначати модель та форму апроксимації цих функцій.

**Ключові слова:** САПР, інженерне проектування, динамічні випробування, навігаційне обладнання, багато-агентні системи, оптимізація, обладнання для аерокосмічної галузі.

## АННОТАЦИЯ

**Долгоруков С.О. Автоматизированное проектирование испытательного стенда навигационного оборудования. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектных работ». – Национальный авиационный университет, Киев, 2021 год.

Целью исследования является повышение эффективности испытательных стендов (ИС), а также его элементов, за счет построения системы автоматизированного проектирования на основе использования интеллектуальных подходов, в частности, обучения с подкреплением.

Предложено много-агентный подход для автоматизации проектирования ИС, который отличается от известных тем, что использует агентов-проектировщиков с элементами искусственного интеллекта (ИИ) - обучение с подкреплением для решения задачи многокритериального принятия решений, в результате обеспечиваются улучшение поиска проектных решений с точки зрения использования предыдущих знаний. Подход не только позволяет легко включать новые функции наград при необходимости, но и взвешивать их относительную важность в зависимости от потребностей конкретной задачи проектирования испытательного стенда. Разработан метод построения САПР ИС, который отличается от известных тем, что обеспечивает интеграцию существующих САПР в единый автономный комплекс, в котором человек-оператор определяет критерии и ограничения, в рамках которых много-агентной системе с поддержкой ИИ разрешается управлять автоматизированными операциями, что приводит к экономии времени проектирования. Впервые предложен метод решения задачи многокритериального принятия решений при проектировании, который при его имплементации использует агенты с автономным обучением, которые самостоятельно собирают данные, генерируют новые знания и используют их для корректировки процесса принятия решений, что позволяет непосредственно оптимизировать целевые параметры без необходимости определять модель и форму аппроксимации этих функций.

**Ключевые слова:** САПР, инженерное проектирование, динамические испытания, навигационное оборудование, много-агентные системы, оптимизация, оборудование для аэрокосмической отрасли.

**ABSTRACT**

**Dolhorukov S.O. Computer-aided design of a navigation equipment test table.** – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Ph.D. thesis in specialty 05.13.12 “Computer-aided design systems”. – National Aviation University, Kyiv, 2021.

The aim of the research is to improve the efficiency of navigation equipment test tables (NETT), as well as its elements, by building a computer-aided design system based on the use of intelligent approaches, in particular reinforcement learning.

A multi-agent approach for NETT design automation is proposed, which differs from the known ones in that it uses design agents with elements of artificial intelligence (AI) - reinforcement learning to solve a multi-criteria decision-making problem, resulting in improved design decision search in terms of using prior knowledge. The approach not only makes it easy to incorporate new features when needed, but also weighs their relative importance depending on the needs of the particular NETT design problem. A method for building an AI CAD system has been developed that differs from the known ones in that it integrates existing CAD systems into a single autonomous complex in which a human operator defines the criteria and constraints within which an AI-enabled multi-agent system is allowed to manage the automated operations, which leads to design time savings. For the first time, a method for solving the problem of multi-criteria design decision-making is proposed, which in its implementation uses agents with autonomous learning that independently collect data, generate new knowledge and use it to adjust the decision-making process, which allows direct optimization of target parameters without the need to define the model and form of approximation of these functions.

**Keywords:** CAD, engineering design, dynamic testing, navigation equipment, multi-agent systems, optimisation, aerospace equipment.



**Долгоруков Сергій Олегович**

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ВИПРОБУВАЛЬНОГО  
СТЕНДУ НАВІГАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

05.13.12 – Системи автоматизації проєктувальних робіт

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Підписано до друку 29.07.2021. Формат 60×90/16.

Ум. друк. арк. 1,2. Обл.-вид. арк. 1,2

Наклад 100 прим. Замовлення № 668

Віддруковано на ризографі в видавничому центрі ФОП Січкач Ю.В.

Свідоцтво ДК №7390 від 05.07.2021

04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А

Тел./факс: 486-50-88, 277-40-16, (050)712-40-80, (097)182-07-07