
DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt215.01.035>

CC BY-NC

КОМАР М.М., канд. техн. наук, старш. дослідник,
заст. директора з наук.-організац. роботи
<https://orcid.org/0000-0001-9194-2850>, e-mail: nickkomar08@gmail.com

ЧЕПИЖЕНКО В.І., д-р. техн. наук., старш. наук. співроб.,
провідн. наук. співроб. відд. інтелектуального управління
<https://orcid.org/0000-0001-8797-4868>, e-mail: chepizhenko.valeriy@gmail.com

БОГАЧУК Ю.П., канд. техн. наук, старш. дослідник,
провідн. наук. співроб. відд. інтелектуального управління,
<https://orcid.org/0000-0002-3663-350X>, e-mail: dep185@irtc.org.ua

СОЛОВЙОВ М.В., аспірант,
провідн. інж.-програміст наук.-досл. лабораторії
безпілотних комплексів і систем
<https://orcid.org/0009-0003-5131-7497>, e-mail: 19Leviathan90@gmail.com

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України та МОН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, 03187, Київ, Україна

РОЗРОБКА МУЛЬТИГАЛУЗЕВОГО МОДЕЛЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ

***Вступ.** В останні роки внаслідок зростання кількості безпілотних систем та розширення їхніх функційних можливостей зріс попит на кваліфікованих операторів та підвищилися вимоги до їх професійної підготовки. Активне застосування безпіотної техніки, її удосконалення та ускладнення конструкцій вимагає створення й розвитку симуляторів та моделювального обладнання, використання яких забезпечує ефективну підготовку компетентних фахівців з експлуатації.*

***Метою статті** є розроблення комплексу для тренажерної підготовки операторів безпілотних систем та проведення спектра експериментально-дослідницьких робіт.*

***Методи.** Під час роботи використовувалися такі методи: методи автоматичного керування, теорія навігації літальних апаратів, теорія прийняття групових рішень, теорія побудови розподілених систем керування літальними апаратами в мережецентричному середовищі, методи напівнатурного моделювання, методи інженерії програмного забезпечення, методи оцінювання пілотажних характеристик та характеристик стійкості і керованості тренажерів, методи оцінювання систем візуалізації тренажерів.*

***Результати.** У результаті роботи було створено прототип комплексу, який можна застосовувати для розроблення та дослідження систем керування літальними апаратами, навчання операторів безпілотних систем, проведення експериментально-дослідницьких робіт.*

Висновки. Розроблений прототип мультигалузевого моделювального комплексу є засобом для виконання завдання якісної підготовки операторів безпілотних систем. Комплекс дає змогу проводити навчання операторів у безпечному середовищі, що знижує ризик пошкодження обладнання та травмування людей. Крім того, комплекс дає змогу проводити дослідження систем керування літальними апаратами та розробляти нові алгоритми керування.

Ключові слова: безпілотна система; тренажерний комплекс, віртуальне середовище; оператор, симуляція, моделювальний комплекс, системи керування.

ВСТУП

В останні роки внаслідок зростання кількості безпілотних систем та розширення їхніх функційних можливостей зріс попит на кваліфікованих операторів та підвищилися вимоги до їх професійної підготовки. В умовах розвитку сфери безпілотних систем закордонні виробники разом із виробництвом самих систем прагнуть також розробляти тренажери для своїх комплексів. Активне застосування безпілотної техніки, її удосконалення та ускладнення конструкцій вимагає створення й розвитку симуляторів та моделювального обладнання, використання яких забезпечує ефективну підготовку компетентних фахівців з експлуатації. Розроблення комплексів для підготовки операторів безпілотних систем є особливо важливим зараз, коли безпілотні системи потрібні як у військовій сфері, так і для завдань цивільної життєдіяльності у воєнний і повоєнний час [1].

За статистичними даними, рівень аварійності безпілотних літальних апаратів усе ще є досить високим — набагато вищим, ніж у пілотованих апаратів. Найчастіше аварії пов'язані з недостатньою кваліфікацією операторів безпілотних систем та відсутністю у них навичок вирішення складних конфліктних ситуацій. Так, при аналізі причин аварій безпілотних літальних апаратів США "Shadow" та "Predator", виявилося, що негативний вплив людського фактору спричиняє відповідно 21% та 67% цих авіаційних подій [2].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Існує ряд методів створення спеціалізованих симуляторів польоту з відтворенням реальних характеристик безпілотних авіаційних систем (БпЛА) та різноманітних сценаріїв розвитку поточної ситуації, а також принципи побудови та оснащення наземних пунктів керування уніфікованим програмним забезпеченням з функційними можливостями керування безпілотною авіаційною системою, навчання операторів і вирішення складних конструкторських завдань [3–5]. Є описи розроблення власного середовища моделювання для БпЛА різного типу [6]. Однак використання декількох середовищ моделювання має недоліком складність порівняння алгоритмів, змодельованих за допомогою різних моделювальних платформ. Крім того, багато часу потребує переформатування алгоритму, який часом недостатньо задокументовано на новій платформі. Інший тип тренажерів — програмні системи віртуальної реальності, дає змогу пілотам, інженерам та дослідникам практикувати, випробовувати, експериментувати та проводити дослідження [7, 8]. Такі тренажери використовують для навчання пілотів у віртуальному

середовищі, що є безпечнішим і дешевшим. Їх також використовують інженери для проєктування та випробування моделей і характеристик літальних апаратів. Незважаючи на переваги таких тренажерів, недоліком є можливість вироблення хибних навичок через недостатню адекватність моделей літальних апаратів. Є описи тренажерів безпілотних літальних апаратів країн НАТО, на які покладається відпрацювання ряду типових завдань, включно з підготовкою до польоту, виконанням зльоту та посадки, застосуванням цільового навантаження за призначенням тощо [9, 10].

Зі зростанням популярності дронів і мультикоптерів можна знайти багато спеціальних симуляторів для БпЛА для професійних, дослідницьких і комерційних цілей. Більшість комерційно орієнтованих симуляторів орієнтовано на любителів [11, 12], тоді як професійні симулятори, як правило, є платформами для навчання операторів та моделювання місій, зокрема у військовій сфері [13, 14]. Ці тренажери зазвичай обмежуються тільки прямим польотом квадрокоптера. Таке базове керування реалізується за допомогою звичайних контролерів джойстика квадрокоптера без будь-якої іншої реалізації контролю або доступу до внутрішніх станів квадрокоптера [15].

Більшість симуляторів, орієнтованих на дослідження БпЛА, вбудовано в механізми фізики та візуалізації, які надають можливість отримати повне знання середовища моделювання та станів. Деякі з цих прикладів дослідницького симулятора можна знайти в [16] із симулятором на основі Unreal Engine 4 або [17] з використанням квадрокоптера низької точності, включеного у V-REP. Інший приклад, оснований на симуляторі “Gazebo” [18], використовується в пакеті “tum_Simulator” [19], який використовує його разом з пакетом “ardrone_autonomy” як драйвер для симуляції квадрокоптера “Parrot Ar.Drone”.

Симуляція USV має таку саму панораму, як і аналог БпЛА. Більшість професійного програмного забезпечення спрямовано на створення прототипів дизайну та на динамічні дослідження на етапах розроблення продукту та зазвичай має вищу вартість доступу. З іншого боку, комерційні симулятори — симулятори для любителів, зазвичай не забезпечують необхідної точності моделі.

Мета статті — розроблення комплексу для тренажерної підготовки операторів безпілотних систем та проведення спектра експериментально-дослідницьких робіт.

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНО-МОДЕЛЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Аналіз сучасних літературних джерел свідчить про такі напрями застосування штучного інтелекту в системах керування рухомими об’єктами, як побудова інтелектуалізованих транспортних засобів, здатних уникати зіткнень з можливими перешкодами [20], створення методів групового керування взаємним положенням [21], розроблення інтелектуалізованих бортових авіаційних систем та комплексів [22], керування безпілотним літальним апаратом з метою автоматичного утримання висоти польоту [23], визначення оптимальних польотних маршрутів для уникнення виявлення радарями супротивника [24], побудова ефективних людино-машинних інтерфейсів на

основі регулювання потоків інформації, яка поступає до операторів [25], виконання навігаційних завдань у зовнішньому середовищі, для якого відсутня точна математична модель [26]. Таким чином, актуальною проблемою побудови прикладних засобів штучного інтелекту є розроблення програмно-апаратних комплексів для забезпечення високоточного керування складними транспортними системами та дослідження особливостей їх функціонування в складних умовах. Одним із важливих елементів новизни при вирішенні зазначеної проблеми є створення інформаційної технології для уніфікованої платформи, на основі якої можна, зокрема, досягнути мети здійснення експериментального моделювання динаміки взаємозв'язків між багатьма компонентами системи [27]. Ще однією метою, яку можливо досягнути за допомогою розробленої нової інформаційної технології, є підвищення якості підготовки пілотів, операторів, диспетчерів та інженерно-технічного складу.

Розроблений комплекс може бути використаний не лише як тренажер, але і як наземний пункт керування безпілотними системами, що є принциповою перевагою програмного забезпечення сучасних тренажерів [3, 4]. Цей тренажерний комплекс, на відміну від описаних у [7, 8], виключає можливість вироблення хибних навичок у операторів, оскільки у його складі присутній натурний зразок БПЛА, який паралельно із візуальною моделлю відпрацьовує команди керування, які надходять від курсанта-оператора. Така натурна візуалізація попереджає оператора про вихід за межі експлуатаційних обмежень.

Можливість швидкого переключення між різними адекватними, глибоко опрацьованими, математичними моделями БПЛА безпілотних систем дає змогу для створення єдиної уніфікованої платформи підготовки операторів для широкого спектру безпілотних систем. На відміну від тренажерів, описаних у [5, 6], комплекс містить аеродинамічні моделі безпілотних літальних апаратів, моделі навігаційної системи, а також моделі зовнішнього середовища. В процесі моделювання відпрацьовуються основні режими роботи оператора безпілотного літального апарата: планування маршрутно-траєкторії; керування орієнтацією, повною енергією, швидкістю та висотою польоту; траєкторне керування рухом; керування маневруванням у разі виникнення складних польотних ситуацій та для уникнення перешкод; налаштування протоколів зв'язку та організація мережевої взаємодії. Результати виконання польотів БПЛА реєструються, обробляються та узагальнюються за допомогою розробленого пакета прикладних програм.

Однією із переваг запропонованих технічних рішень є можливість застосування у режимі тренажерного комплексу підготовки операторів керування безпілотною авіаційною системою. Додаткові переваги перед закордонними аналогами [9, 10] — розширений функціонал, відносно низька вартість, власні математичні моделі, алгоритмічне та програмне забезпечення тощо.

Розроблений програмно-апаратний комплекс ґрунтується на програмному забезпеченні, з можливістю гнучкого застосування — або як наземного пункту управління, або як тренажера. Тобто для навчання або поліпшення навичок операторів не потрібна закупівля та встановлення додаткового обладнання.

Принципово важливою рисою створення прототипу комплексу є можливість поетапного нарощування його функційних можливостей у відповідності до корегування поставлених завдань, уточнення цільових установок та зміни основних характеристик зовнішнього середовища. Зокрема, в процесі розроблення комплексу на додаток до можливостей реалізації програмно-математичних модулів автоматичного керування на віртуальних комп'ютерних системах також окреслено можливість відпрацьовувати програмне забезпечення натурних польотних контролерів. Ще однією важливою позитивною рисою є можливість використовувати комплекс для проведення цілого спектра експериментально-дослідницьких робіт, зокрема, моделювань нових алгоритмів керування для подальшого їх впровадження в системах інтелектуального керування як пілотованими, так і безпілотними літальними апаратами.

СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОГРАМНИХ І АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ КОМПЛЕКСУ

Структурна організація мультигалузевого моделювального комплексу охоплює програмну та апаратну частини. Основними прикладними програмними компонентами комплексу є такі модулі:

1. Модуль імітації та візуалізації польоту для імітації динамічних характеристик літального апарата та графічної візуалізації основних параметрів польоту та взаємозв'язків між компонентами.

2. Модуль бортового комплексу керування рухом та навігації для автоматичного чи інтерактивного керування рухом літального апарата, а також виконання відповідних навігаційних завдань.

3. Модуль поточного планування польоту та оперативного картографування для формування планової траєкторії польоту та її оперативного прив'язування до актуальної карти місцевості.

4. Модуль реєстрації та відображення польотних даних в реальному часі.

5. Модуль мережевого зв'язку між основними компонентами комплексу.

Апаратна частина комплексу керування польотом літального апарата складається з таких основних компонентів:

1. Головної робочої станції, до складу якої входить центральна інформаційно-обчислювальна система та засоби відображення інформації.

2. Допоміжної робочої станції, яка складається з допоміжної інформаційно-обчислювальної системи та пристроїв відображення інформації. Основним функційним призначенням допоміжної робочої станції є імітація засобів керування польотом інших літальних апаратів.

3. Блока керування польотом літального апарата, який безпосередньо керує польотом літального апарата як в автоматичному режимі, так і виконуючи команди оператора в інтерактивному режимі.

4. Блока інтерфейсу, який виконує функції взаємодії з оператором (в інтерактивному режимі керування) чи розподілення необхідних сигналів керування (в інтерактивному режимі);

5. Літального апарата чи його адекватної моделі (натурного зразка безпілотного літального апарата або імітаційних моделей сервоприводів, рульових поверхонь, двигунів та інших подібних елементів літального апарата).

Структурну організацію програмної та апаратної частини прототипу комплексу наведено на Рис. 1.

Розглянемо особливості функціонування основних програмних та апаратних компонентів прототипу програмно-моделювального комплексу.

Модуль імітації та візуалізації польоту. За допомогою модуля імітації та візуалізації польоту імітуються основні компоненти, які визначають динамічні характеристики польоту літального апарата, та відображається графічна інформація основних динамічних характеристик польоту. Як середовище візуалізації застосовується варіант авіаційного симулятора з відкритим вихідним кодом типу "FlightGear". Важливою особливістю цього симулятора, який визначає доцільність його використання для вирішення сформульованих завдань, є той факт, що вихідний код симулятора є доступним і ліцензованим на умовах ліцензії "GNU General Public License". Цей програмний продукт має графічний тривимірний інтерфейс, а також розвинений набір інструментів для підключення зовнішніх пристроїв і забезпечення роботи з застосуванням різних видів мережевих протоколів передавання даних. Імітаційна частина модуля імітації та візуалізації польоту дає можливість моделювання руху літального апарата на усіх етапах польоту, включно з етапами розбігу та пробігу, в різних експлуатаційних умовах та за різних конфігурацій граничних областей. Для ефективної та сталої роботи імітаційної частини модуля імітації та візуалізації польоту використана математична модель, яка дає змогу описати функційну поведінку літального апарата за допомогою його моделювання як твердого тіла з шістьма ступенями свободи.

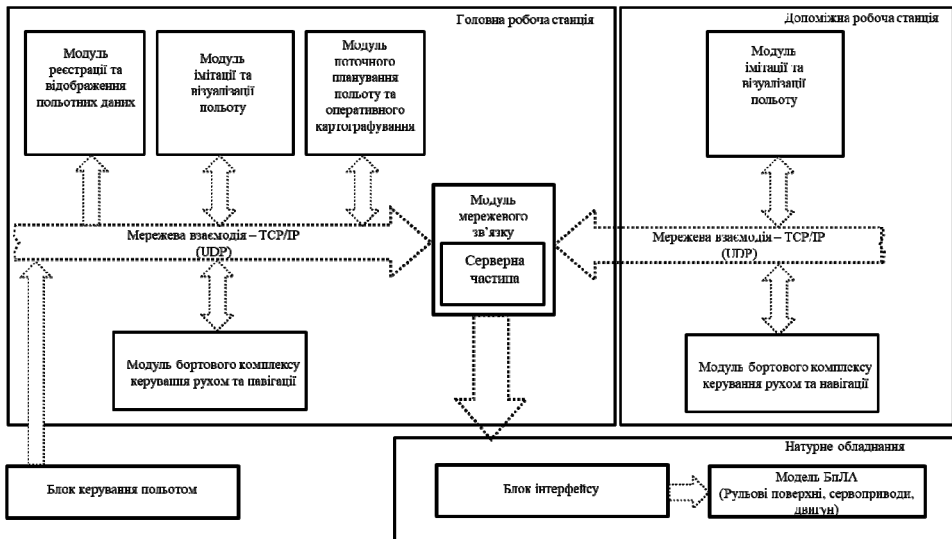


Рис. 1. Структурна організація програмної та апаратної частини комплексу

Один зі складників модуля імітації та візуалізації польоту, який здійснює формування та відображення візуальної інформації, забезпечує отримання необхідних даних щодо стану літального апарата та зовнішнього середовища. Зокрема, може бути відображена інформація щодо поточного положення літального апарата відносно земних орієнтирів і лінії горизонту. Важливою особливістю авіаційного симулятора типу "FlightGear", яка може бути використана у розробленні прототипу комплексу, є можливість надійного обміну пакетами даних з іншими пристроями. Одним з ефективних варіантів реалізації цього обміну є застосування протоколу UDP (User Datagram Protocol). Водночас відповідні пакети даних надсилаються і отримуються через порт Ethernet.

Модуль бортового комплексу системи керування рухом та навігації. Роботу модуля бортового комплексу системи керування рухом та навігації організовано таким чином, що прототип програмно-апаратного комплексу моделювання має у своєму складі дві незалежні програмні компоненти, призначені для керування літальними апаратами. Перша програмна компонента виконує автоматичне керування польотом свого літального апарата, а друга — здійснює автоматичне керування польотом цілі, забезпечуючи стабілізацію кутових положень і витримування заданих параметрів висоти та швидкості руху цілі. Крім того, автоматичне управління польотом охоплює канал керування на основі енергетичних параметрів, який забезпечує витримування заданих величин параметрів висоти та швидкості, а також оптимальне відпрацювання можливих змін у величинах цих параметрів. Функційні можливості вказаного каналу також дають змогу відпрацьовувати алгоритми врахування та компенсації впливу зовнішніх чинників на стабілізацію траєкторії літального апарата. Також до складу комплексу входить спеціалізований канал траєкторного керування, за допомогою якого реалізуються складні заздалегідь задані траєкторії польоту з можливістю виконання різних видів просторового маневрування.

Модуль поточного планування польоту та оперативного картографування здійснює 1) поточне планування польоту; 2) відображення прив'язаної до карти місцевості траєкторії польоту літального апарата, цільової області, заборонених зон, а також основних параметрів польоту. Модуль уможливує контроль відпрацювання заданої траєкторії системою автоматичного керування, а також введення інформації щодо початкових характеристик, цілей, завдань та детального плану польоту, забезпечує передачу в наземний пункт керування інформації щодо висоти, швидкості, курсу, даних для відображення авіагоризонту, яка необхідна для оператора.

Модуль реєстрації та відображення польотних даних виконує функції отримання, реєстрації, відображення та зберігання даних щодо найважливіших параметрів польоту: координат географічного місцезнаходження, лінійних та кутових швидкостей, кутів положення, відомостей щодо поточного стану відпрацювання команд на необхідне відхилення керувальних поверхонь тощо. Ці параметри візуалізуються в реальному часі. Після виконання польотного плану можливий глибший аналіз значень цих параметрів для пошуку прихованих закономірностей у отриманих масивах даних.

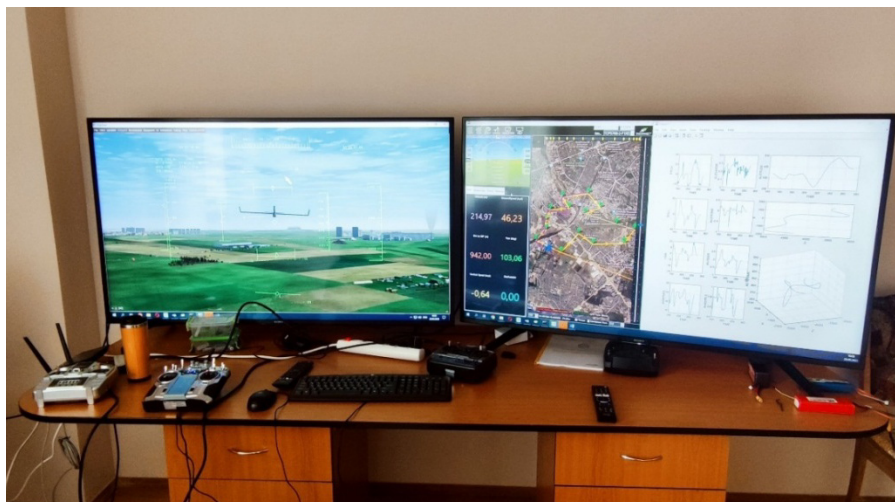


Рис. 2. Розроблений мультигалазевий моделювальний комплекс

Модуль реєстрації та відображення польотних даних реалізовано в пакеті прикладних програм MatLab — інтерактивному інструменті моделювання, імітації та аналізу складних динамічних систем (рис. 2). Під час роботи цього модуля реєструються та відображаються такі змінні та параметри: поточний час; географічні широта та довгота польоту літального апарата, висота та швидкість польоту, проекції швидкості літального апарата на осі системи координат; поточні значення кутів тангажу, крену та курсу; поточне положення важеля керування двигуном літального апарата; кути відхилення керма висоти, елеронів і керма напрямку; поточні положення закрилків; поточні параметри перевантаження.

Модуль мережевого зв'язку забезпечує взаємодію компонентів системи з застосуванням протоколів передавання даних UDP та TCP (Transmission Control Protocol) і синхронізацію дій усіх складників комплексу.

Як було зазначено, апаратна частина прототипу комплексу складається з п'яти основних компонентів: головна робоча станція, допоміжна робоча станція, блок керування польотом літального апарата, блок інтерфейсу, літальний апарат або його адекватна модель. Далі стисло описані особливості функціонування цих компонентів.

Головна робоча станція складається з центральної інформаційно-обчислювальної системи та трьох пристроїв відображення інформації. Центральна інформаційно-обчислювальна система головної робочої станції — це пристрій, який забезпечує виконання головних завдань, покладених на прототип комплексу моделювання польоту літального апарата. Серед цих завдань, які визначають спектр функційних можливостей комплексу, найбільш важливими є:

- формування обчислювального середовища, яке в режимі реального часу забезпечує роботу комплексу та підтримує взаємодію між усіма його компонентами;

- інтеграцію, розподілення та реєстрацію інформації щодо поточних значень та трендів істотних параметрів моделювання для усіх складових прототипу комплексу;
- керування роботою усіх баз та сховищ даних, які використовуються на різних етапах процесу моделювання;
- керування програмними компонентами комплексу, які використовуються на різних етапах процесу моделювання;
- введення даних щодо початкових умов польоту літального апарата, переліку виконуваних завдань, характеристик запланованого маршруту;
- забезпечення узгодженої взаємодії з іншими апаратними компонентами прототипу комплексу (зокрема, з блоком ручного керування польотом, блоком розподілення сигналів, блоком автопілоту).

Допоміжна робоча станція використовується для імітації засобів керування польотом цілі і складається з інформаційно-обчислювальної системи та пристроїв відображення інформації. Інформаційно-обчислювальна система допоміжної робочої станції за допомогою відповідних апаратно-програмних засобів реалізує імітацію засобів керування, які визначають поведінку цілі. Водночас забезпечується належна організація обчислювального середовища, необхідного для ефективного функціонування та узгодженої взаємодії двох блоків: блоку бортового комплексу системи керування основними керувальними елементами цілі, а також блоку імітації динаміки та графічної візуалізації польоту цілі в режимі реального часу. Забезпечується керування програмними компонентами допоміжної робочої станції, а також можливість введення параметрів сформульованого завдання та елементів польотного маршруту для розрахунків початкових умов польоту.

Блок керування польотом літального апарата здійснює безпосереднє керування польотом за допомогою команд пілота літака, оператора безпілотного літального апарата чи диспетчера наземного пункту керування.

Блок інтерфейсу виконує функції розподілення сигналів серед компонентів комплексу. Зокрема, сигнали мікроконтролера використовуються для управління керувальними поверхнями та тягою літального апарата. Керувальні сигнали від бортових пристроїв розподіляються на сервоприводи та двигун літального апарата.

Літальний апарат чи його адекватна модель. — це або натурний зразок безпілотного літального апарата, або імітаційні моделі сервоприводів, рульових поверхонь, двигунів та інших елементів пілотованого літального апарата. Зокрема, на розробленому прототипі комплексу виконувалося моделювання траєкторій літального апарата та рухомої цілі для різних початкових позицій та за наявності у просторі між ними певних видів перешкод. У моделюванні поточних ситуацій враховано можливості аналізу модифікацій ситуаційної поведінки для змін швидкості вітру і різних його напрямків. Відхилення відповідних рульових поверхонь можна спостерігати на імітаційній моделі літального апарата в середовищі “FlightGear” модуля візуалізації польоту.

Розроблений комплекс дає змогу проводити тренажерну підготовку операторів безпілотних систем для набуття таких кваліфікаційних рівнів, як виконання операцій за правилами візуальних польотів у всьому

повітряному просторі за класифікацією ІСАО, окрім класу А, до висоти 5500 м над рівнем землі та виконання операцій за правилами польотів за приладами у всьому повітряному просторі.

Впровадження та застосування розробленого прототипу програмно-моделювального комплексу є економічно вигідним з точки зору збереження матеріальних ресурсів і коштів. Завдяки використанню моделювального комплексу для навчання операторів, ризик пошкодження фактичного літального апарата відсутній. Також нівелюються проблеми з пошуком середовища для тренувань. Основною передумовою для цього є те, що проведення льотних випробувань нових алгоритмів керування на прототипах пілотованих та безпілотних літальних апаратів високої вартості може спричинити суттєві матеріальні витрати через можливі пошкодження або навіть втрату цих літальних апаратів. Причиною цього може бути нештатне виконання застосованих алгоритмів, або через можливі помилки в розроблених законах керування, або за негативного впливу людського чинника (помилки пілота літального апарата, оператора безпілотної авіаційної системи або диспетчера наземного пункту управління тощо). Ще однією суттєвою перевагою запропонованого підходу є те, що модульна конструкція та гнучке програмне забезпечення створеного програмно-апаратного комплексу можуть бути налаштовані для роботи з пілотованими та безпілотними літальними апаратами різних класів.

ВИСНОВКИ

Розроблено дослідний зразок тренажерного комплексу для підготовки операторів з керування безпілотними системами для вдосконалення оперативної підготовки висококваліфікованих операторів.

Розроблений комплекс дає змогу проводити тренажерну підготовку операторів безпілотних систем для набуття таких кваліфікаційних рівнів, як виконання операцій за правилами візуальних польотів у всьому повітряному просторі за класифікацією ІСАО, до висоти 5500 м над рівнем землі та виконання операцій за правилами польотів за приладами в усьому повітряному просторі.

Впровадження та застосування розробленого прототипу програмно-моделювального комплексу є економічно вигідним з точки зору збереження матеріальних ресурсів і коштів, що впливає з переваг застосування будь-яких тренажерів порівняно з потребою їхати на аеродром.

Подальша робота передбачає уніфікацію розробленого комплексу із ширшою номенклатурою безпілотних систем та удосконалення прикладного програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання типових завдань керування та навігації безпілотних систем.

REFERENCES

1. <https://www.polskieradio.pl/398/7856/Artykul/3077550>
2. Kevin W. Williams. A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications, Final Report. DOT/FAA/AM-04/24. Office of Aerospace Medicine Washington, DC 20591, 2004.
3. Liang, X., Wang, Y. Design and development of ground station for UAV/UGV heterogeneous collaborative system. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021.
4. Qi, S., et al. Unmanned Aircraft System Pilot/Operator Qualification Requirements and Training Study. *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*. Wuhan, China. 2008, Vol. 179, 03006
5. H. Ji, P. et al. Simulation of Unmanned Aircraft System Performing Surveillance Mission Based on Advanced Distributed Architecture, 2018. *IEEE CSAA Guid., Nav. and Cont. Conf.* 2018, pp. 1–4.
6. Bergmann K. Way forward unclear for lead-in fighter training system. *Asia-Pacific Defence Reporter*. 2021, 47(1), pp. 21–22.
7. Mairaj A., Baba A.I., Javaid A.Y. Application specific drone simulators: Recent advances and challenges. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019, 94, pp. 100–117.
8. Karatanov O. et al. Implementation of augmented reality technologies in the training process with the design of aircraft equipment. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2021, (1), pp. 110–118.
9. Pinchas G., Tishler A. The Israeli defense industry. The Economics of the Global Defence Industry. Routledge. 2019, pp. 354–377
10. Selecký M., et al. Analysis of using mixed reality simulations for incremental development of multi-uav systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2019, 95(1), pp. 211–227.
11. Drone Racing League. FLY-DRL Sim. URL: <https://thedroneracingleague.com/> (Last access: 29.11.2023)
12. RDS. REAL DRONE SIMULATOR. URL: <https://www.realdronesimulator.com/> (Last access: 29.11.2023)
13. H-SIM. SIMDRONE. URL: <http://www.h-sim.com/> (Last access: 29.11.2023)
14. Quantum3D. Quantum3D UAV Simulator. URL: <https://quantum3d.com/uav-simulator/> (Last access: 29.11.2023)
15. Garzón M., Valente J., Roldán J.J., Garzón-Ramos D., de León J., Barrientos A., del Cerro J. Using ROS in Multi-robot Systems: Experiences and Lessons Learned from Real-World Field Tests. *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference*; Koubaa, A., Ed.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland. 2017, Volume 2, pp. 449–483.
16. Mueller M., Smith N., Ghanem B. A Benchmark and Simulator for UAV Tracking. *Proceedings of the Computer Vision—ECCV 2016*, Amsterdam, The Netherlands, 8–16 Oct 2016; Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland. 2016, pp. 445–461.
17. Olivares-Mendez M.A., Kannan S., Voos H. Setting up a testbed for UAV vision based control using V-REP & ROS: A case study on aerial visual inspection. *Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando, FL, USA, 27–30 May 2014. 2014, pp. 447–458.
18. Meyer J., Sendobry A., Kohlbrecher S., Klingauf U., von Stryk O. Comprehensive Simulation of Quadrotor UAVs using ROS and Gazebo. *Proceedings of the 3rd International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots (SIMPAN)*, Tsukuba, Japan, 5–8 Nov 2012.
19. Huang H.; Sturm J., Tum Simulator. 2018. URL: http://wiki.ros.org/tum_simulator (Last access: 29.11.2023)
20. Nayak D., Patra S. Development of obstacle-avoiding robots using RF technology. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*. 2016, Vol. 4, №4, pp. 214–225.
21. Tang S., Kubo N., Kawanishi N., Furukawa R., Hasegawa A., Takeuchi Y. Cooperative relative positioning for intelligent transportation system. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 2015, Vol. 13, №3, pp. 131–142.

22. Becerra V.M. Autonomous control of unmanned aerial vehicles. *Electronics*. 2019, Vol. 8, №452. URL: https://www.researchgate.net/publication/332588499_Autonomous_Control_of_Unmanned_Aerial_Vehicles. (Last access: 29.11.2023)
23. Warren R. D. Application of artificial intelligence techniques in uninhabited aerial vehicle flight. *Proceedings of the Digital Avionics Systems Conference*. Indianapolis, IN, USA. 2003. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040082071.pdf>. (Last access: 29.11.2023)
24. Pelosi M., Kopp C., Brown M. Range-limited UAV trajectory using terrain masking under radar detection risk. *Applied Artificial Intelligence*. 2012, Vol. 26, №8, pp. 743–759.
25. Roldán J., del Cerro J., Barrientos A. Using process mining to model multi-UAV missions through the experience. *IEEE Intelligent Systems*. 2017, Vol. 32, №4, pp. 40–47.
26. Pham H., La H.M., Feil-Seifer D., Nguyen L.V. Autonomous UAV navigation using reinforcement learning. *Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, Philadelphia, PA, USA. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8468611>. (Last access: 29.11.2023)
27. Volkov O., Komar M., Synytsya K., & Volosheniuk D. The UAV simulation complex for operator training. Multi Conference on Computer Science and Information Systems, MCCSIS 2019-Proceedings of the International Conference on e-Learning 2019. 2019, pp. 313–316.

Received 29.12.2023

Komar M.M., PhD (Engineering), Senior Researcher,
Deputy Director for Scientific and Organizational Work,
<https://orcid.org/0000-0001-9194-2850>, e-mail: nickkomar08@gmail.com
Chepizhenko V.I., DSc (Engineering), Senior Researcher,
Leading Researcher of the Intelligent Control Department,
<https://orcid.org/0000-0001-8797-4868>, e-mail: chepizhenko.valeriy@gmail.com
Bogachuk Yu.P., PhD (Engineering), Senior Researcher,
Leading Researcher of the Intelligent Control Department
<https://orcid.org/0000-0002-3663-350X>, e-mail: dep185@irtc.org.ua
Soloviev M.V., PhD Student,
Leading Engineer of the Research Laboratory of Unmanned Complexes and Systems
<https://orcid.org/0009-0003-5131-7497>, e-mail: 19Leviathan90@gmail.com
International Research and Training Center for Information
Technologies and Systems of the National Academy of Sciences
of Ukraine and the Ministry of Education and Science of Ukraine,
40, Akad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE MULTI PURPOSE SIMULATION COMPLEX FOR TRAINING OF UNMANNED SYSTEMS OPERATORS

Introduction. *This paper discusses the development of a multi-domain simulation complex for training unmanned systems operators. Active use of unmanned systems, their improvement, and complication of designs require the creation and development of simulators and modeling equipment, the use of which ensures effective training of competent operators.*

The purpose of the paper is to develop the multipurpose simulation complex for training of unmanned systems operators and for performing experimental and research works.

The methods. *The following methods were used during the work: methods of automatic control, theory of navigation, theory of group decision making, theory of construction of distributed control systems for aircraft in a network-centric environment, methods of semi-natural modeling, methods of software engineering, methods for evaluating the piloting characteristics and stability and controllability characteristics of simulators, methods for evaluating the visualization systems of simulators.*

The results. *As a result of the work, a prototype of the complex was created, which can be used for the development and research of aircraft control systems, training of unmanned systems operators, and conducting experimental research.*

Conclusions. *The developed prototype of the multi-domain simulation complex is a tool for solving the problem of quality training of operators. The complex allows operators to be trained in a safe environment, which reduces the risk of equipment damage and injuries to people. In addition, the complex allows for the study of aircraft control systems and the development of new control algorithms.*

Keywords: *Unmanned system, Training complex, Virtual environment, Operator, Simulation, Simulation complex, Control systems.*