
ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

УДК 504:3703; 502; 541;553

АДАПТАЦІЯ ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ «РОЗУМНИМИ» БОМБАМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Бондар О.І., Артюшин Л.М., Машков О.А.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ
dei2005@ukr.net, mashkov_oleg_52@ukr.net

Розглянуті питання застосування «розумних» бомб з алгоритмом керування на основі використання методу обернених (зворотних) задач динаміки. Обґрунтовано механізм його застосування для створення «розумних» бомб з метою вирішення завдань із захисту довкілля та природних ресурсів України. Під час дослідження використовувалася сукупність наукових методів теорії автоматичного керування, теоретичної механіки та інформаційних технологій при обґрунтуванні можливості створення та використання «розумних» бомб. Окреслено напрямки «цивільного» застосування «розумних» бомб, означені їхні основні характеристики. Розглянуті етичні та правові аспекти використання, а також майбутнє таких боєприпасів, характерні особливості вжиття методу обернених задач динаміки під час їх створення та застосування. Здійснено формалізацію задачі дотримання заданої траєкторії руху «розумної» бомби (стабілізації програмного руху; термінального керування; адаптивного стеження). Запропонована структурна схема алгоритму керування «розумною» бомбою.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні алгоритмів керування «розумними» бомбами різного практичного призначення із заданими динамічними властивостями на основі вирішення зворотних задач динаміки. Доцільно також розглядати процеси керування такими боєприпасами в стохастичній обстановці під час стабілізації «розумної» бомби на оперативній, програмованій траєкторії на основі рішення оберненої (зворотної) задачі динаміки, що забезпечує підвищення точності ураження та ефективності застосування «розумних» бомб.

Метод обернених завдань динаміки (МОБЗД) – потужний інструмент для вирішення задач управління рухом та оптимізації траєкторій, у тому числі й застосування до динаміки «розумних» бомб. Поліноміальне завдання траєкторії дозволяє зручно описувати різні аспекти руху з використанням поліноміальних функцій. У цьому контексті розглянута можливість застосування МОБЗД з поліноміальним поданням для вирішення різних завдань. *Ключові слова:* алгоритм керування, екологія в умовах війни, засоби пожежогасіння, захист довкілля та природних ресурсів, метод обернених (зворотних) задач динаміки, надзвичайна ситуація, «розумна» бомба.

Adaptation of principles of control of «smart» bombs to solving the tasks of ecological security of ukraine in emergency situations. Bondar O., Artyushyn L., Mashkov O.

The article considers the issue of using smart bombs with a control algorithm based on the use of the method of inverse (inverse) dynamics problems. The mechanism of using the method of inverse dynamics problems for the creation and use of smart bombs for solving the tasks of protecting the environment and natural resources of Ukraine is substantiated. During the study, a set of scientific methods of the theory of automatic control, theoretical mechanics and information technologies was used to substantiate the possibility of creating and using smart bombs. An assessment of the directions of “civilian” use of “smart” bombs is provided, the main characteristics of a smart bomb are determined. The issue of using smart bombs, ethical and legal aspects of using smart bombs, as well as the future of smart bombs are considered. The features of using the method of inverse dynamics problems in creating and using smart bombs are considered. The task of implementing a given trajectory of movement of a smart bomb is formalized (the task of stabilizing program movement; the task of terminal control; the task of adaptive tracking). A structural diagram of the smart bomb control algorithm is proposed. Prospects for further research are in the development of control algorithms for various practical purposes with specified dynamic properties based on the solution of inverse dynamics problems. It is also desirable to consider the processes of control of the SB in a stochastic formulation when stabilizing the SB on an operationally programmed trajectory based on the solution of the inverse (inverse) dynamics problem, which ensures an increase in the accuracy of destruction and the effectiveness of the use of smart bombs. *Key words:* control algorithm, ecology in war conditions, fire extinguishing means, protection of the environment and natural resources, the method of inverse (inverse) dynamics problems, emergency situation, smart bomb.

Постановка проблеми. Керовані проникаючі бомби (англ. Guided Penetration Bomb, скор. GPB), а також керовані авіаційні бомби (КАБ), в англійській літературі їх ще називають «розумні» бомби

(англ. smart bomb), – це авіаційні бомби, оснащені системою наведення та комплектом рульових поверхонь для точного ураження важливих цілей. Такі бомби мають велику проникаючу здатність для

ураження зсередини, забезпечуючи таким чином потужну вражаючу дію, значно сильнішу, ніж від звичайної бомби, що вільно падає. Однак зважаючи на те, що бомба призначена для поразки цілей зсередини, її зона ураження незначна і менша ніж від звичайної бомби, що вільно падає [13-14]. КАБ забезпечені системою управління і наведення. Деякі моделі КАБ оснащуються також невеликими ракетними двигунами, що підвищує дальність і поліпшує керованість польотом [3, 4, 7, 13].

З метою перетворення так званих «тупих» бомб вільного падіння на «розумні» кориговані, розроблюються відповідні комплекти додаткового обладнання, наприклад, AASM Hammer. Базові версії AASM Hammer використовують авіабомби на 250 і 1000 кг (в основі бомби Mk 82 і Mk 84/ BLU109 відповідно). Існують також версії на 125 та 500 кг. Завдяки модульній конструкції можна змінювати характеристики бомби в залежності від типів мети та характеру бойового завдання. Можна програмувати висоту підриву, швидкість та кут руху. Виробником такої технології виступає французька компанія Safran Electronics Defense, Франція. На озброєнні AASM Hammer використовується з 2007 року. У французьких Повітряних силах такі боєприпаси пристосовані для використання літаками Mirage 2000D, Dassault Rafale, Tejas, F-16 та Mirage F1. У Повітряних силах ЗСУ вони адаптовані для пусків з українських літаків МіГ-29 та Су-24М. Дальність таких бомб становить близько 70 км. Імовірно відхилення – близько 10 м.

Автори мають багаторічний досвід реалізації (МОБЗД) під час вирішення задач синтезу систем управління рухомими об'єктами та ставлять за мету аргументувати доцільність розширення його можливостей [1, 2, 5, 6, 7].

У цьому контексті можна розглянути можливість застосування МОБЗД з поліноміальним поданням для вирішення різних завдань. Тому важливо сформулювати методологію застосування «розумних» бомб з використанням методу обернених задач динаміки для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України [1-5, 9, 10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження з питань застосування «розумних» бомб з використанням методу обернених задач динаміки для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України здійснювалися українськими та іноземними фахівцями і вченими, що підтверджується відповідними публікаціями [12-13].

Дж. Р. Вінсент (J. R. Vincent) запропонував застосовувати методи оптимізації та динамічного програмування в аерокосмічній інженерії, включаючи МОБЗД для завдань управління польотом. У працях Д. С. Фостер (D. S. Foster) проведені дослідження щодо застосування МОБЗД у робототехніці та управлінні рухом, включаючи різні уявні траєкто-

рій. У дослідженнях А.Б. Шмідта (A. B. Schmidt) (Німеччина) проведено моделюванням траєкторій з використанням поліноміального уявлення для оптимізації управління рухом літальних апаратів. І.П. Рінк (I. P. Rink) (Франція), досліджуючи питання застосування МОБЗД у системах автоматичного керування та навігації, використовує поліноміальні функції для опису траєкторій. У працях К.С. Лі (K. S. Lee) (Південна Корея) розглянуті питання застосування МОБЗД для автономних літальних апаратів і та дронів, поліноміальні підходи до опису траєкторій в умовах динамічного оточення. Т.М. Хан (T. M. Han) (Китай) запропонував методи оптимізації для управління рухом в аерокосмічних додатках, зокрема, поліноміальні моделі траєкторії [14].

На сьогодні є спеціалізовані видання (сайти), де оприлюднюється інформація щодо «розумних» бомб: Jane's Defense, Defense One; Military Times; National Defense Magazine; The Center for Study of the Drone; MIT Technology Review; Global Security; Arms Control Wonk; Defense News. Хоча багато з таких ресурсів не зосереджені виключно на «розумних» бомбах, вони пропонують великий контент з суміжних тем і можуть бути корисними у вивченні сучасних тенденцій у галузі високоточної зброї та технологій.

Дослідження «розумних» бомб та високоточної зброї часто здійснюються в рамках ширших досліджень військових технологій, тому на цю тему можуть працювати як окремі фахівці, так і дослідні колективи з університетів, наукових організацій та промислових компаній. Ось кілька закордонних колективів, які активно займаються такою тематикою [14]: RAND Corporation; Center for New American Security (CNAS); MIT Lincoln Laboratory; JohnsHopkins University AppliedPhysics Laboratory; U.S. Army Research Laboratory; International Institute for Strategic Studies (IISS); багато університетів, зокрема, MIT, Stanford та технологічні інститути, які мають дослідні групи та лабораторії, що вивчають технології військового призначення, зокрема, автоматизацію та високоточну зброю.

Існують деякі проекти та розробки в галузі високоточної зброї та «розумних» бомб, які ведуться в Україні [13]: в Державному підприємстві «Спеціальне конструкторське бюро «Промінь»; в Державному підприємстві «Об'єднана компанія «Укроборонпром»; в Національному науковому центрі Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О. О. Морозова; в ДК «Укроборонпром»; у «Миколаївському авіаремонтному заводі»; науково-дослідних інститутах НАН України.

Відповідний внесок у розвиток методів обернених (зворотних) задач зробили вітчизняні вчені: Артющин Л.М., Дурняк Б.В., Машков О.А., Мамчур Ю.В., Сокіл Б.І., Тимченко О.В., Хитряк О.І. [1, 2, 5, 6, 7, 11, 12].

Важливо зазначити, що деякі праці та дослідження можуть мати закритий доступ або опубліковані у спеціалізованих військових та наукових виданнях. Більшість згаданих авторів публікують свої роботи у наукових журналах, конференціях та на ресурсах, присвячених питанням безпеки та оборони.

Мета статті. Обґрунтувати механізм застосування методу обернених задач динаміки для створення та застосування «розумних» бомб для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України.

Методи дослідження. Під час дослідження, результати якого наведені в праці нижче, використовувалася сукупність наукових методів теорії автоматичного керування, теоретичної механіки та інформаційних технологій при обґрунтуванні можливості створення та застосування «розумних» бомб.

Результати дослідження.

Оцінка напрямків «цивільного» застосування «розумних» бомб.

Основні характеристики «розумної» бомби.

1. Наведення: «розумні» бомби використовують різні системи наведення, зокрема:

– GPS/ГЛОНАСС: система глобального позиціонування для визначення точного розташування.

– Лазерне наведення: бомби націлені на відбитий лазерний промінь, що дозволяє забезпечити високу точність.

– Інфрочервоні та радіолокаційні системи: для наведення на ціль у різних умовах видимості.

2. Точність: «розумні» бомби здатні вражати цілі з високою точністю, часто з відхиленням менше 10 метрів від заданої координати, що значно збільшує ефективність удару та знижує ризик побічних руйнувань.

3. Типи боєприпасів: «розумні» бомби можуть мати різні конструктивні форми, включаючи:

– Авіаційні бомби, що коректуються: зазвичай являють собою звичайні бомби, оснащені навігаційними системами.

– Керовані ракети: також можуть вважатися «розумними» боєприпасами, оскільки вони мають системи наведення та управління.

Застосування «розумних» бомб.

– Військові операції: «розумні» бомби використовуються у сучасних військових операціях для знищення стратегічно важливих об'єктів із мінімальною кількістю жертв серед цивільного населення.

– Авіаудари: можуть застосовуватись як з літаків, так і з безпілотних літальних апаратів.

– Покриття різних цілей: застосовуються проти наземних, морських та повітряних цілей, включаючи будівлі, інфраструктуру та військову техніку.

Переваги застосування «розумних» бомб.

– Зниження побічних ефектів: Висока точність дозволяє мінімізувати збитки для цивільних об'єктів та зменшити кількість жертв серед мирного населення.

– Ефективність: «розумні» бомби можуть вражати цілі, що добре охороняються, які важко знищити звичайними боєприпасами.

Етичні та правові аспекти застосування «розумних» бомб.

– Використання «розумних» бомб викликає етичні та правові питання, особливо в міських зонах, де ризики для цивільного населення зростають.

– Очевидні побічні ефекти: незважаючи на їх високу точність, зв'язок із високоточною зброєю не виключає можливості жертв серед мирного населення.

Майбутнє «розумних» бомб.

Технології «розумних» бомб продовжують розвиватися, зокрема, завдяки в використанню нового покоління навігаційних систем, ефективної обробки даних та взаємодії з іншими пристроями. Дослідження ведуться в галузі автоматизації, що відкриває нові можливості для застосування у складних бойових умовах. Ось деякі напрямки:

1. Навігаційні технології: розроблення нових систем навігації, заснованих на глобальних навігаційних супутникових системах (ГНСС), інерційних навігаційних системах та інших технологіях, що забезпечують більш високу точність та стійкість до перешкод.

2. Штучний інтелект та машинне навчання: використання штучного інтелекту для обробки великих обсягів даних, аналізу цільової обстановки та прийняття складніших рішень: розробку алгоритмів для автоматичної ідентифікації цілей, поліпшення точності наведення та оцінки ризиків.

3. Системи взаємодії: дослідження в галузі мережевої передачі даних між різними бойовими системами, дронами та іншими платформами для покращення координації та обміну інформацією в реальному часі.

4. Нові системи управління та автономії: розроблення більш автономних систем, що можуть діяти з мінімальною або відсутньою участю людини, включаючи використання дронів та роботів.

5. Кібербезпека: дослідження, спрямовані на захист автоматизованих систем від кіберзагроз, включаючи захист даних та побудову надійних архітектур для запобігання несанкціонованому доступу.

6. Етика та правові аспекти: вивчення правових та етичних наслідків використання автоматизованих систем у військових діях, зокрема й дискусії щодо «роботизованих воєн» та можливе використання автономної зброї.

7. Потенціал застосування нових матеріалів та технологій: дослідження в галузі нових матеріалів, які можуть покращити характеристики вибухових речовин та конструкції боєприпасів.

Такі напрямки досліджень дозволяють підвищити ефективність застосування «розумних» бомб. Люди звикли асоціювати бомби з веденням військових дій та руйнуваннями. Тепер з'явилася цікава ідея щодо

мирного застосуванням авіаційних бомб та мін. «Килимові бомбардування» допоможуть перенести і засіяти порожні землі насінням дерев і рослин.

Незвичайна концепція бомби – Seedbomb («Насіннева бомба»). «Богоголовка» цієї бомби начинена насінням дерева (рис. 1).

Бомби призначені для боротьби з опустеленням та вирубуванням дерев. Насіння, одягнені в капсули синтетичного ґрунту, які поступово руйнуються, забезпечують рослину необхідними мінеральними речовинами, а також регулюють процес зволоження ґрунту.

Страшні вогняні шторми, які випалюють величезні площі, можна погасити упродовж дня. Одна бомба, що містить майже півтонни вогнегасної суміші, здатна задавити полум'я навіть за умов страшного вогневого шторму на площі 1000 квадратних метрів [8-10, 13, 14]. Відомі результати дослідження створення на основі військових технологій справжні дива мирного застосування «розумних» бомб, наприклад, протипожежна авіабомба АСП-500. Це авіаційний засіб пожежогасіння масою 500 кілограм.

Відомо, що найпотужніші неядерні боєприпаси створюються на основі об'ємно-детонуючих сумішей. Вітчизняним розробникам вдалося реалізувати принцип розпилення таких сумішей у мирних цілях. Замість вибухової речовини миттєво розпорошувався вогнегасний склад. Полум'я збивалося, і, за нестачі кисню, якийсь час горіння не відновлювалося [9, 10, 13, 14]. До речі, за допомогою АСП-500 можна гасити і точкові осередки займання. Якби

спалахнув, припустимо, цех якогось заводу, літаки Су-25 з пікірування могли покласти бомби саме до нього. Більше того, щоб потрапити, образно кажучи, у вікно висотки, що горить, може розглядатися варіант створення керованих плануючих бомб АСП, причому різних вагових категорій. Відмінною стороною нового виду боєприпасів повинна стати повна безпека для людини. Допрацьована АСП-500 може скидатися з літака АН-70. При цьому один захід АН-70 може забезпечити гарантоване придушення вогню на площі 10 га. Нові розрахунки лише підтвердили те, що було відомо вже наприкінці вісімдесятих: ефективність боротьби з найстрашнішими пожежами зростає у десятки разів. А зараз на виснажливу боротьбу з вогнем йдуть тижні, і навіть місяці за величезних фінансових витрат. Тисячі тон води, скинуті з висоти кілька сотень метрів – нижче літати при сильній пожежі небезпечно – здебільшого випаровуються, не долетівши до землі.

Не дивно, що при пожежах вогонь стихає тоді, коли все вигоріло, а не після авіаційного поливу. Тому потрібно докорінно переглянути сам підхід до боротьби з лісовими пожежами. Вважається, що торф'яні пожежі ефективно гасити взагалі неможливо. Адже вогонь вірус десь глибоко під землею. Тим часом, технологія боротьби з торфом, що горить, може застосовувати використання «розумних» бомб. РБ пробивають верхній шар торфу та розриваються у порожнини основної пожежі. Родзинка полягає в тому, що РБ начинені не тротилом і гексогеном, а реагентами, що переривають горіння на рівні фізико-хімічних процесів. Прицільний обстріл лікві-

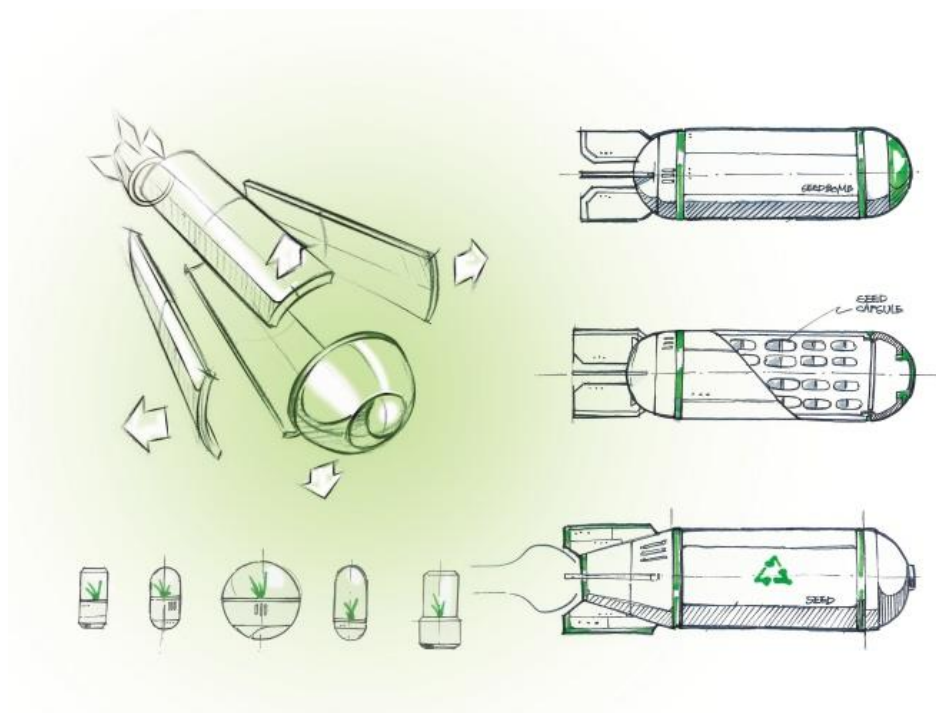


Рис. 1. Насіннева бомба

дує вогонь у найстрашнішому торф'яному пеклі за лічені хвилини. А далі вже можна закачувати воду та активно охолоджувати торфовища, перемішуючи шари ґрунту. Тому вважаємо за доцільне створення міжвідомчої структури, яка змогла б вирішити питання створення боєприпасових систем пожежогасіння, а також визначати, коли і кому такі системи застосовувати.

З пожежами борються ДСНС, і вогнегасні міни з бомбами, начебто, відомству дуже потрібні, але ця служба немає засобів їх доставки у вогнище пожежі. Немає у них ані бомбардувальників, ані мінометних розрахунків. Все це – у міністерстві оборони. При цьому застосування «розумних» бомб може привести до зменшення загальної вартості боротьби зі стихійними лихами у сотні, а то й у тисячі разів.

Особливості застосування методу обернених задач динаміки під час створення та застосування «розумних» бомб.

«Розумні» бомби, також відомі як керовані боєприпаси або точні боєприпаси, є видом зброї, що оснащена системами наведення та управління, які дозволяють їм точно націлюватися на певні об'єкти. Зважаючи на те, що обладнання «розумної» бомби має обмеження за вагою та габаритами, пропонується в системі керування «розумною» бомбою формувати алгоритми керування рухом за методом обернених задач динаміки (МОБЗД). Відомо, що метод обернених завдань динаміки (МОБЗД) є потужним інструментом для вирішення задач управління рухом та оптимізації траєкторій. Метод обернених (зворотних) завдань динаміки (МОБЗД) знаходить застосування у різних галузях, включаючи аерокосмічну інженерію, робототехніку та системи керування та динаміки.

Розробку алгоритмів синтезу керування для «розумних» бомб (РБ) передбачається здійснювати з використанням концепції зворотних задач динаміки [12]. Ця концепція передбачає формалізацію задачі здійснення заданої траєкторії руху та стабілізацію програмного руху (термінального керування, адаптивного стеження).

У прямій постановці задача синтезу алгоритмів адаптивних систем керування програмним рухом РБ зводиться до визначення законів формування керуючих функцій U_n^0 (переміщення керуючих механізмів системи, відхилення рульових органів) за умови досягнення деяких показників, що побічно характеризують якість процесу керування J .

У зворотній постановці задача визначення U_n^0 розглядається в два етапи. На першому етапі визначаються керуючі сили F , що надають системі необхідний рух. Ці сили можуть відповідати реальним фізичним силам і моментам, які необхідно прикласти до об'єкта керування для забезпечення оптимального програмного руху $X_n^0(t)$. На другому етапі розглядаються питання практичної реалізації необхідних сил і визначаються керуючі функції $U_n^0(t)$.

Розглянемо керований об'єкт (РБ), стан якого у момент часу t описується вектор-функцією $X(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]$. Компоненти $X_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ створюють фазові координати, а n -вимірний евклідовий простір R^n точок X – простір станів. Динаміка руху керованого об'єкта (РБ) в часі описується матричним диференціальним рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F[X(t), U(t), Z(t)] + P(t); \\ X(t_0) &= X_0, \quad t \in [t_0, t_T], \end{aligned} \quad (1)$$

де $U(t)$ – m -вимірний вектор керуючих впливів; $Z(t)$ – r -вимірний вектор параметрів об'єкта;

$$\Xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_r(t)]$$

$P(t)$ – n -вимірний вектор зовнішніх збурень; X_0 – початковий стан; $T = t_T - t_0$ – час руху об'єкта. На керування і стан об'єкта задані обмеження

$$X(t) \in Q_X; \quad U(t) \in Q_U.$$

На інтервалах часу $[t_0, t_T]$ функція керування $U(t)$ кусково-неперервна і може мати в ізолюваних точках розриви першого роду. Вважаємо, що значення параметра ξ_i невідомі, причому відома тільки обмежена множина $Q_\xi = \{\Xi\}$ допустимих значень параметра ξ_i . Крім того вважаються невідомими як зовнішні збурення, що постійно діють $P(t)$, так і їхні імовірнісні властивості. Це пов'язано з тим, що збурення розглядаються як неспостережувані і невимірювані. Щодо збурень $P(t)$ відомо, що $P(t) \in Q_p$ при всіх $t \in [t_0, t_T]$ де Q_p – задана фізична множина. Метою керування є забезпечення руху РБ за заданою штатною траєкторією руху шляхом відповідного вибору $U(t) \in Q_u$. Під програмою руху об'єкта розуміємо бажаний закон зміни в часі стану $X(t)$. Програмний рух можна побудувати виходячи з різних міркувань. Програмне керування $U_n(t)$ і породжуване ним $X_p(t)$ називатимемо оптимальними і позначати відповідно $U_n^0(t)$, $X_n^0(t)$ якщо вони забезпечують мінімум заданому функціоналу якості

$$J[U_n^0(\cdot), X_n^0(\cdot)] = \min J[U_n(\cdot), X_n(\cdot)].$$

Залежно від вимог, що пред'являються до системи керування РБ, можна виділити три основні задачі: задача стабілізації програмного руху; задача термінального керування; задача адаптивного стеження [12]. Розглянемо особливості застосування методу зворотних задач для РБ, що описується матричним рівнянням в операторній формі [12]

$$A(p)X = B(p)U, \quad (4)$$

$$A(p) = \{a_{ij}(p)\}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$X^T = [X_1 \dots X_n], \quad (6)$$

$$B(p) = \{b_{ij}(p)\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (7)$$

$$U^T = [U_1 \dots U_r]. \quad (8)$$

Відомо, що таке керування може бути представ-лене у формі Коші. Побудуємо алгоритм керування за якого рух РБ з точки $X(0)$ на початку координат здійснюється за траєкторією

$$X_n(t) = \begin{bmatrix} C_{11}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{1k}e^{\lambda_k t} \\ C_{21}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{2k}e^{\lambda_k t} \\ \vdots \\ C_{n1}e^{\lambda_1 t} + \dots + C_{nk}e^{\lambda_k t} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

або в матричній формі

$$X_n(t) = Ce^{\Lambda t}, \quad (10)$$

$$C = \{C_{ij}\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (11)$$

$$[e^{\Lambda t}]^T = [e^{\lambda_1 t} e^{\lambda_2 t} \dots e^{\lambda_k t}], \quad (12)$$

де $\lambda_l, l = \overline{1, k}$ – різні дійсні або комплексно зв'язані числа, що задовольняють умові $Re^{\lambda_l} < 0$. Постійні коефіцієнти $C_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}$ однозначно визначаються початковими значеннями фазових координат і їх $(k-1)$ похідної. За умови довільного чину у виборі прийнятих значень параметрів $C_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}, \lambda_l, l = \overline{1, k}$ отримаємо різноманіття різних програмних рухів. Застосування вибору довільним чином може бути використане для виділення тих програмних рухів $X_n(t)$, які є рішенням рівняння (4) і задовольняють різним обмеженням (наприклад, конструктивним обмеженням або обмеженням на безпеку руху). Керуючу силу, що реалізовує траєкторію $X_n(t)$ позначимо $f_n[t]$. Шукатимемо таку траєкторію у вигляді

$$f_{\text{in}}[t] = A(p) X_{\text{in}}(t). \quad (13)$$

Для отримання програмного закону зміни керуючої сили підставимо вираз (9) в (13).

$$f_n(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(p)(c_{11}e^{\lambda_{11}t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_{1k}t}) + \dots + a_{1n}(p)(c_{11}e^{\lambda_{11}t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_{1k}t}) \\ a_{21}(p)(c_{11}e^{\lambda_{11}t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_{1k}t}) + \dots + a_{2n}(p)(c_{11}e^{\lambda_{11}t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_{1k}t}) \\ \vdots \\ a_{n1}(p)(c_{11}e^{\lambda_{11}t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_{1k}t}) + \dots + a_{nn}(p)(c_{11}e^{\lambda_{11}t} + \dots + c_{1k}e^{\lambda_{1k}t}) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Крім того, вважаємо, що

$$A(p) = \{a_{ij}(p)\} = \{m_{ij}p^2 + r_{ij}p + h_{ij}\}, i, j = \overline{1, n}. \quad (15)$$

Підставляючи вираз (15) у вираз (14) можна отримати такий вираз керуючої сили в матричній формі

$$f_n[t] = (MCA_d^2 + RCA_d + HC)e^{\lambda t}, \quad (16)$$

$$M = \{m_{ij}\}, i, j = \overline{1, n}; C = \{c_{ij}\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k};$$

$$\Lambda_d = diag\{\lambda_i\}, i = \overline{1, k};$$

$$R = \{r_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, n};$$

$$[e^{\lambda t}]^T = \{e^{\lambda_i t}\}, i = \overline{1, k}.$$

Для того, щоб траєкторія $X_n(t)$ починалася в точці

$$X_n(0) = \begin{bmatrix} X_{10} & \dot{X}_{10} & \ddot{X}_{10} \dots X_{10}^{(k-1)} \\ X_{20} & \dot{X}_{20} & \ddot{X}_{20} \dots X_{20}^{(k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n0} & \dot{X}_{n0} & \ddot{X}_{n0} \dots X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix},$$

елементи матриці $C = \{c_{ij}\}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, k}$ треба визначити в результаті рішення n систем k алгебраїчних рівнянь в матричній формі

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \dots \\ C_{1k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{10} \\ \dot{X}_{10} \\ \dots \\ X_{10}^{(k-1)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_{n1} \\ C_{n2} \\ \dots \\ C_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{n0} \\ \dot{X}_{n0} \\ \dots \\ X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix}$$

Рішення цих матричних рівнянь має вигляд:

$$[C_{11} \dots C_{1k}]^T = \Phi^{-1} [X_{10} \dot{X}_{10} \dots X_{10}^{(k-1)}]^T, \quad (17)$$

$$[C_{n_1} \dots C_{n_k}]^T = \Phi^{-1}[X_{n_0} \dot{X}_{n_0} \dots X_{n_0}^{(k-1)}]^T \quad (18)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{k-1} & \lambda_2^{k-1} & \dots & \lambda_k^{k-1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Підставивши вираз (19) у вирази (17), (18) зна-
ходимо

$$C = \begin{bmatrix} X_{10} & \dot{X}_{10} & \dots & X_{10}^{(k-1)} \\ X_{20} & \dot{X}_{20} & \dots & X_{20}^{(k-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n0} & \dot{X}_{n0} & \dots & X_{n0}^{(k-1)} \end{bmatrix} = \Phi^{-1} = X(0)\Phi^{-1T}. \quad (20)$$

Вираз для вектору керуючої сили може бути знайдений шляхом підстановки виразу (20) у вираз (16). Маємо:

$$f_n[t] = \{M(X(0)[\Phi^{-1}]^T)\Lambda_d^2 + R(X(0)[\Phi^{-1}]^T)\Lambda_d + H(X(0)[\Phi^{-1}]^T)\}e^{\Lambda t}. \quad (21)$$

Аналізуючи отриманий вираз (21) вважаємо, що для отримання потрібної керуючої сили необхідно заздалегідь: описати об'єкт керування, шляхом завдання елементів матриць M , R , H ; задати початкові умови по кожній керованій координаті та їх перших $(k-1)$ похідних; задати програмну траєкторію руху, шляхом відповідного вибору елементів λ_i , $i=1, k$.

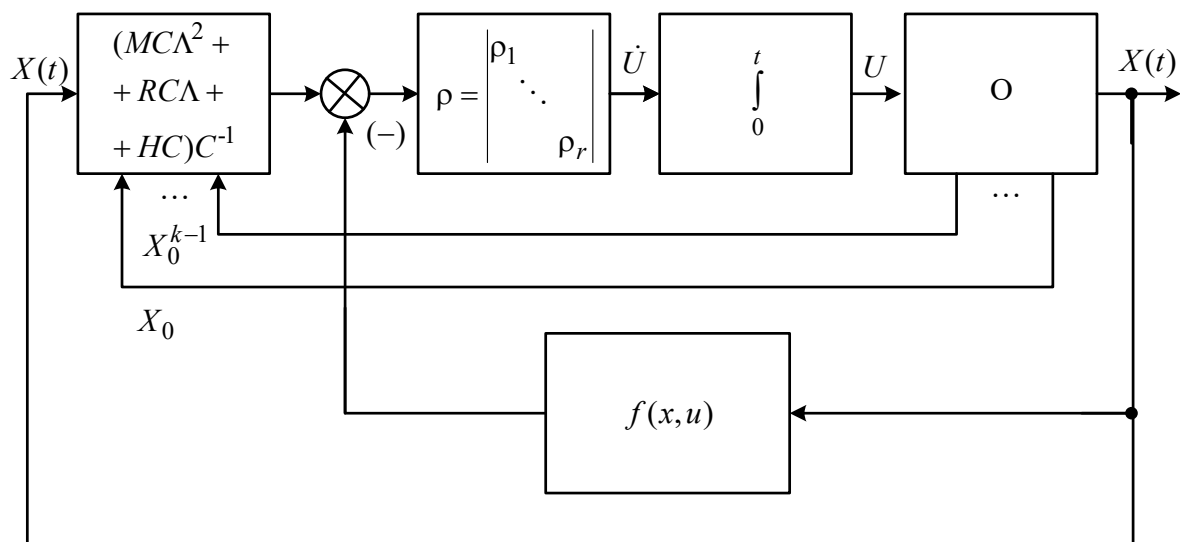


Рис. 2. Структурна схема алгоритму керування «розумною» бомбою

Відшукування виразу для керуючої сили закінчується першим етапом вирішення заданої задачі. Розглянемо наступний етап, пов'язаний з реалізацією програми зміни сили. Задача практичної реалізації алгоритму керування силою f_n полягає у визначенні вектору керуючих функцій U_n тобто величин відхилень органів керування, за допомогою яких створюється сила $f_n[X_n, U_n]$. Очевидно, що вирішення такого завдання визначається структурою і параметрами об'єкта керування та вимірюваною інформацією. Структурна схема алгоритму керування, побудованого відповідно до (21), приведена на рис. 2.

Таким чином, побудова алгоритмів керування рухом РБ за методом обернених задач динаміки має два аспекти. Перший з них пов'язаний з безпосереднім формуванням вектора потрібної керуючої сили $f^*[x]$, а другий – з обчисленням значень елементів вектора керуючої функції $U_n(t)$, який створює необхідну силу f^* . Розрахункові співвідношення, за допомогою яких обчислюються f^* і $U_n(t)$ і складають зміст алгоритму керування рухом. Оскільки керування рухом здійснюється за принципом керування силою, отриманий алгоритм керування є адаптивним, його динамічні властивості адекватні динамічним властивостям системи. Коефіцієнти системи керування РБ визначаються початковими параметрами руху об'єкта, а також заданої програмної траєкторії. Це дозволяє змінювати параметри програмної траєкторії під час руху об'єкта.

Висновки. У праці розглянуті питання застосування «розумних» бомб з алгоритмом керування

на основі використання методу обернених (зворотних) задач динаміки. Обґрунтовано механізм застосування методу обернених задач динаміки для створення та застосування «розумних» бомб для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України. Під час дослідження використовувалася сукупність наукових методів теорії автоматичного керування, теоретичної механіки та інформаційних технологій при обґрунтуванні можливості створення та застосування «розумних» бомб.

Надано оцінку напрямків «цивільного» застосування «розумних» бомб, означено основні характеристики «розумної» бомби. Розглянуті етичні та правові аспекти використання «розумних» бомб та їхнє майбутнє, а також особливості застосування методу обернених задач динаміки під час створення та застосування «розумних» бомб. Здійснено формалізацію завдання щодо заданої траєкторії руху «розумної» бомби (стабілізації програмного руху; термінального керування; адаптивного стеження). Запропонована структурна схема алгоритму керування «розумною» бомбою.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці алгоритмів керування РБ різного практичного призначення із заданими динамічними властивостями на основі вирішення зворотних задач динаміки. Доцільно також розглядати процеси керування РБ у стохастичній постановці при стабілізації РБ на оперативному-програмованій траєкторії на основі рішення оберненої (зворотньої) задачі динаміки, що забезпечує підвищення точності ураження та ефективності застосування «розумних» бомб.

Література

1. Артющин Л.М. Оптимальне керування динамічною системою на основі розв'язку оберненої задачі динаміки / Доповіді Академії наук Української РСР, № 7, Серія А. Фізико-математичні та технічні науки: Кібернетика та обчислювальна техніка, 1987. С. 60-63.

2. Артюшин Л.М. Синтез алгоритмів керування рухом складних механічних систем за методом обернених задач динаміки / Доповіді Академії наук Української РСР, № 8, Серія А. Фізико-математичні та технічні науки: Кібернетика та обчислювальна техніка, 1986. С. 73-76.
3. Артюшин Л.М., Герасименко В. В., Коваль В. В. Метод формування спільної авіаційної групи. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, № 1(40)/2021. С. 63–68.
4. Артюшин Л.М. Герасименко В. В., Коваль В. В. Синтез раціональних структур бойових порядків спільних авіаційних груп. Журнал наукових праць “Соціальний розвиток та безпека”. Том 11, № 3, 2021. С. 209–220.
5. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (детермінована постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. Київ, 2018. Вип. 82. С. 166-176.
6. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (стохастична постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 83. С. 146-153.
7. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Формалізація задачі підготовки на тренажері оператора керування безпілотним літальним апаратом екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки / Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу “Університет новітніх технологій”. К.: ПВНЗ “Університет новітніх технологій”, 2018. Випуск 2(6), С. 24-30.
8. Неклонський І.М. Тактика ліквідування надзвичайних ситуацій: / Курс лекцій – Х.: НУЦЗУ, 2017. 367 с.
9. Про затвердження Методичних рекомендацій із складання, корегування та відпрацювання оперативних карток гасіння пожеж : наказ Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 24.10.2023 р. №НС-848. URL: <https://kv.dsns.gov.ua/upload/1/9/3/1/3/5/3/nakaz-dsns848-vid-24102023.pdf>.
10. Про особливості реагування на надзвичайні ситуації під час збройної агресії: наказ Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 02.04.2024 р. № 375. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf>.
11. Сокіл Б.І. Обернені задачі динаміки нелінійних систем із розподіленими параметрами та один підхід до їх розв’язання / Б.І. Сокіл, О.І. Хитряк // Науковий вісник УкрДЛІТУ : зб. наук.-техн. праць. Львів : Вид-во УкрДЛІТУ. 2009. – № 19.10. С. 64-67.
12. Теорія автоматичного керування / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, М.С. Сивов. Львів: Вид-во УАД, 2004. 272 с.
13. Чумаченко С.М., Барбашин В.В., Маринін А.І., Мошенський А.О., Струнін І.В. Аналіз існуючих підходів для оцінки ефективності в предметній галузі авіаційного пошуку та рятування / Інженерія природокористування, 2020, № 3(17), С. 118 – 125.
14. Sawicki T. Pożary: przyczyny, metodyka, przykłady: (wybrane zagadnienia) : book 1-e Wyd. Lubin : Specjalistyczne Biuro Badań Pożarów Tomasz Sawicki, 2021. 237.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: