

УДК 623.1/7



М. А. Подригало



А. І. Нікорчук

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО СКЛАДНОГО РУХУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ НАЗЕМНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

У статті зазначено, що застосування моделі багатокомпонентного складного руху дає змогу здійснювати контроль стійкості і керованості під час руху як одиничних безпілотних наземних комплексів, так і у складі груп. Запропоновані показники контролю керування. Як такі використовуються вектори відносних лінійних і кутових прискорень, вони уможливають контроль стійкості і керованості групи безпілотних наземних комплексів.

Для забезпечення високої точності переміщення групи безпілотних наземних комплексів запропоновано розглядати їх як механізм з багатьма ступенями вільності та гнучкими кінематичними зв'язками, які допускають певні відносні переміщення між окремими ланками. Зв'язки між зазначеними кінематичними парами автори статті назвали телекомунікаційними або інформаційними.

К л ю ч о в і с л о в а : безпілотні наземні комплекси, багатокомпонентний складний рух, керованість, стійкість.

Постановка проблеми. Повномасштабне вторгнення агресора в Україну зумовило перегляд стратегічних напрямів розвитку військової техніки. Одним із пріоритетних векторів став розвиток роботизованих систем. Такий підхід дозволяє мінімізувати участь особового складу в зоні ураження вогневих засобів противника та забезпечити перевагу на полі бою, використовуючи дистанційне ведення бойових дій [1]. На сьогодні Сили безпеки і оборони України активно застосовують безпілотні наземні комплекси (БпНК). Паралельно підприємства військово-промислового комплексу України розробляють безпілотні автомобілі з метою збереження життя особового складу під час виконання бойових завдань. Відповідно до Доктрини [1] безпілотний автомобіль можна віднести до безпілотного наземного комплексу, у склад якого входять рухомий наземний апарат та пов'язані з ним пункти (станції, лінії) дистанційного керування і контролю, інші елементи, які забезпечують його функціонування.

Застосування БпНК на полі бою як з української сторони, так і з боку противника змушує шукати шляхи вдосконалювання конструкції БпНК та способів їхнього раціонального використання для створення переваги над противником. Один із способів застосування БпНК, що може бути реалізований найближчим часом, пов'язаний з виконанням завдань у складі груп.

Групове застосування БпНК забезпечує низку переваг, зокрема у таких випадках:

- ураження (подавлення) живої сили і військової техніки противника;
- надання вогневої підтримки підрозділам, які ведуть наступальні дії;
- ведення розвідки;
- постановка радіозавад;
- використання як ретрансляторів;

– виконання завдань з підвезення боєприпасів, пально-мастильних матеріалів та інших матеріально-технічних засобів.

Водночас використання у складі груп БпНК потребує узгодження дій між ними. Тому забезпечення контролю руху групи безпілотних машин є актуальним питанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уперше динамічну модель багатокомпонентного складного руху для аналізу переміщення групи безпілотних наземних машин було запропоновано у праці [2], де розглянуто такі сценарії:

- синхронізація руху мобільних машин зі змінною масою;

– узгодження та підтримання синхронного руху безпілотних машин у складі організованої автомобільної колони.

У теоретичній механіці складним називають рух, за якого переміщення точки або твердого тіла розглядається одночасно відносно двох систем відліку: одна з них вважається умовно нерухомою, а інша рухається відносно першої певним чином. Відповідно рух точки (або тіла), що спостерігається за таких умов, називається складним рухом [2].

Переміщення рухомої системи координат відносно нерухомої називається переносним рухом. Траєкторія та кінематичні характеристики цього переміщення визначаються як траєкторія і параметри переносного руху. До основних параметрів переносного руху належать переміщення, швидкості та прискорення контрольних точок рухомої системи координат відносно нерухомої [2].

Відносним рухом точки або твердого тіла називається рух, який розглядається відносно рухомої системи координат. У межах цієї системи визначаються траєкторія, переміщення, швидкість і прискорення руху точки або тіла. Відповідні кінематичні характеристики дістали назви: «відносне переміщення», «відносна швидкість» та «відносне прискорення» [2].

У працях [2–6] продемонстровано можливість застосування моделі складного руху для аналізу динаміки систем, що складаються з групи мобільних машин. Зокрема у статті [2] розглянуто приклади спільного руху тракторів, тракторів із комбайнами, а також автомобілів із комбайнами під час виконання сільськогосподарських і транспортних операцій. Такий тип руху автори статті [2] трактують як рух системи мобільних машинних агрегатів.

Як зазначене у дослідженні [2], основною відмінністю системи мобільних агрегатів від традиційної механічної системи є відсутність жорсткого механічного зв'язку між її елементами (ланками). У таких системах кінематичний ланцюг та кінематичні пари мають умовний характер, оскільки не накладають жорстких обмежень на відносні переміщення між ланками. Зв'язок між ними здебільшого реалізується візуальним або інформаційним (комунікаційним) шляхом [2]. У першому наближенні такий зв'язок розглядається як неголономний [5].

Із зростанням кількості машинних агрегатів у системі зростає і кількість ступенів рухливості, яку можна орієнтовно визначати за допомогою відомих структурних формул Сомова – Малишева, Чебишева або Добровольського.

Для одиничного автомобіля автори праці [5] пропонують вважати переносним рухом його рівномірний прямолінійний рух по горизонтальній опорній поверхні. Відхилення траєкторії від цього ідеального руху, зумовлені зовнішніми або внутрішніми збуреннями, інтерпретуються як відносні рухи. За такого підходу саме відносні рухи є джерелом непродуктивних (додаткових) витрат енергії, пов'язаних із рухом автомобіля.

Кількість відносних рухів визначається числом ступенів вільності тіла, що рухається. Для одиничного автомобіля як фізичного об'єкта ця кількість становить шість: три поступальні та три обертальні ступені вільності.

У працях [5, 6] показано, що механічні системи з пружними ланками можуть розглядатися як механізми з нескінченно великою кількістю ступенів вільності. У межах цих досліджень наведено приклади руху еластичного колеса автомобіля як в усталеному, так і в неусталеному режимах.

У працях [7, 8] встановлено взаємозв'язок між кількістю ступенів вільності рухомого об'єкта та необхідною кількістю вимірювальних осей, потрібних для контролю параметрів і реалізації керування рухом машини. Додатково у працях [7, 9] визначено залежність між кількістю керуючих впливів та ступенями рухливості ходової частини автомобіля.

Однак у наявних дослідженнях не запропоновано методів керування безпілотними мобільними машинами, які були б засновані на мінімізації відносних рухів ланок механічних систем із телекомунікаційними зв'язками.

Метою статті є визначення показників точності керування БпНК під час використання моделі багатокомпонентного складного руху. Для досягнення поставленої мети необхідно з'ясувати умови керованості об'єктів, які входять до механічної системи мобільних машин, що рухаються.

Виклад основного матеріалу. Для БпНК ключовими експлуатаційними властивостями є керованість і стійкість, оскільки зменшення кількості керуючих впливів, необхідних для забезпечення заданої траєкторії руху, безпосередньо впливає на ефективність їх застосування.

Як зазначене у авторефераті дисертації [7], керованість визначається як здатність об'єкта адекватно реагувати на керуючі дії. У випадку безпілотної мобільної машини, зокрема автомобіля,

під керованістю слід розуміти не лише реакцію на поворот керованих коліс, а й здатність до виконання інших маневрів, як-от розгін та гальмування.

Крім того, у авторефераті [7] показано, що всі види маневрувань можна поділити на прості та складні. До простих маневрів належать ті, для реалізації яких достатньо не більше двох послідовних керуючих впливів. Натомість складні маневри потребують більше двох керуючих дій. Типовим прикладом складного маневру є переміщення автомобіля в умовах обмеженого простору.

Ускладнення маневру негативно впливає на маневреність безпіотної машини. Основним показником маневреності є час виконання маневру $T_{\text{ман}}$ [7]. Збільшення цього часу знижує ефективність використання БпНК, особливо в умовах бойових дій, де критично важливими є швидкість реагування і мобільність.

Згідно з відомими працями [3, 10, 11], застосування спеціальних способів повороту, як-от: динамічний поворот, комбінований поворот та рух типу «краб», дозволяє звести складні маневри до простих. Це своєю чергою сприяє підвищенню маневреності безпілотних мобільних машин.

Новим підходом до підвищення маневреності безпілотних роботизованих комплексів є застосування переднього поворотного моста [12–14]. Як показано у дослідженнях [7, 9], використання паралельних керуючих впливів під час здійснення повороту дозволяє збільшити кількість ступенів рухливості ходової частини транспортного засобу. До таких керуючих впливів належать одночасний поворот напрямних коліс та створення різниці дотичних реакцій дороги на колесах лівого і правого бортів.

Керованість і стійкість безпілотних машин перебувають у діалектичному взаємозв'язку: зі зростанням стійкості зазвичай знижується керованість, і навпаки. У випадку прямолінійного усталеного руху мобільної машини стійкість розглядається як комплексна динамічна властивість, у межах якої керованість є одним з її компонентів.

При використанні моделі багатокомпонентного складного руху за базовий тип переміщення для побудови алгоритмів керування одиничними безпілотними машинами доцільно обирати переносний рух, який задається оператором шляхом формування сукупності керуючих впливів. Як контрольовані параметри слід розглядати прискорення, що діють уздовж усіх вимірювальних осей, включаючи кутові прискорення. Кількість таких осей має відповідати числу ступенів рухливості об'єкта керування. Для одиничного об'єкта зі складним характером руху (в контексті керування парціальними прискореннями) це означає

$$\bar{a}_x = \bar{a}_{ex} + \bar{a}_{tx}; \quad (1)$$

$$\bar{a}_y = \bar{a}_{ey} + \bar{a}_{ty}; \quad (2)$$

$$\bar{a}_z = \bar{a}_{ez} + \bar{a}_{tz}, \quad (3)$$

де $\bar{a}_x; \bar{a}_y; \bar{a}_z$ – лінійні прискорення об'єкта, що виникають у напрямках трьох координатних осей;

$\bar{a}_{ex}; \bar{a}_{ey}; \bar{a}_{ez}$ – переносні лінійні прискорення;

$\bar{a}_{tx}; \bar{a}_{ty}; \bar{a}_{tz}$ – відносні лінійні прискорення, що виникають у напрямках трьох координатних осей.

Для кутових переміщень додаються ще три рівняння:

$$\bar{\varepsilon}_x = \bar{\varepsilon}_{ex} + \bar{\varepsilon}_{tx}; \quad (4)$$

$$\bar{\varepsilon}_y = \bar{\varepsilon}_{ey} + \bar{\varepsilon}_{ty}; \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_z = \bar{\varepsilon}_{ez} + \bar{\varepsilon}_{tz}, \quad (6)$$

де $\bar{\varepsilon}_x; \bar{\varepsilon}_y; \bar{\varepsilon}_z$ – кутові прискорення об'єкта, що виникають відносно трьох координатних осей;

$\bar{\varepsilon}_{ex}; \bar{\varepsilon}_{ey}; \bar{\varepsilon}_{ez}$ – переносні кутові прискорення, які передаються об'єкту керування;

$\bar{\varepsilon}_{tx}; \bar{\varepsilon}_{ty}; \bar{\varepsilon}_{tz}$ – відносні кутові прискорення, викликані зовнішніми збудниками і нестійкістю процесу керування.

У разі абсолютно керованого і стійкого процесу руху

$$\bar{a}_{tx} = 0; \quad \bar{a}_{ty} = 0; \quad \bar{a}_{tz} = 0; \quad \bar{\varepsilon}_{tx} = 0; \quad \bar{\varepsilon}_{ty} = 0; \quad \bar{\varepsilon}_{tz} = 0.$$

Отже, для забезпечення ідеального процесу керування рухом необхідне виконання зазначених умов.

Під час керування групою БпНК умови ідеального керування будуть такі:

$$\sum_{i=1}^K a_{\tau_{ix}} = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^K a_{\tau_{iy}} = 0; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^K a_{\tau_{iz}} = 0; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^K \varepsilon_{\tau_{ix}} = 0; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^K \varepsilon_{\tau_{iy}} = 0; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^K \varepsilon_{\tau_{iz}} = 0, \quad (12)$$

де K – кількість БпНК.

Як результат проведеного дослідження запропоновано використовувати модель багатокомпонентного складного руху для оцінювання стійкості і керованості БпНК.

Висновки

1. У статті запропоновано розглядати безпілотні наземні комплекси, що здійснюють рух у складі груп, як механізм з великою кількістю ступенів рухливості і нежорсткими кінематичними парами з певним відносним зміщенням ланок. Зв'язки між описаними кінематичними парами визначено як телекомунікаційні або інформаційні.

2. Застосування моделі багатокомпонентного складного руху забезпечує можливість контролю стійкості та керованості безпілотних наземних комплексів як у режимі індивідуального руху, так і під час функціонування у складі груп.

3. Запропоновані показники точності керування (як такі використовуються вектори відносних лінійних і кутових прискорень) дають змогу контролювати та забезпечити стійкість і керованість безпілотних наземних комплексів під час руху.

Перспективою подальших досліджень є розроблення алгоритмів керування безпілотними наземними комплексами, що рухаються у складі груп.

Перелік джерел посилання

1. ОП 3-0(46). Доктрина «Застосування безпілотних ударних систем у Збройних Силах України». Київ : Центральне управління безпілотних систем ГШ ЗС України спільно з ЦНДІ ЗС України, 2024. 59 с.
2. Operating of mobile machine units system using the model of multicomponent complex movement / A. Lebedev et al. *Автомобільний транспорт*. 2015. Вип. 36. С. 60–66.
3. Мазін О. С. Підвищення енергоефективності автомобілів при маневруванні зниженням непродуктивних втрат енергії : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20. Харків, 2020. 20 с.
4. Абрамов Д. В. Концепція покращення функціональної стабільності динамічних та енергоперетворюючих властивостей автомобілів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.02. Харків, 2018. 40 с.
5. Динаміка машин з пружними ланками. На прикладі автомобілів і тракторів : монографія / за ред. М. А. Подригало та О. С. Полянського. Харків : Естет Прінт, 2024. 272 с.
6. Динаміка колеса автомобіля : монографія / за ред. М. А. Подригало та О. С. Полянського. Харків : ХНАДУ, 2019. 199 с.
7. Клец Д. М. Концепція забезпечення стабільності показників стійкості та керованості автомобілів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20. Харків, 2015. 40 с.

8. Визначення необхідної кількості акселерометрів і місця їх установки при динамічних випробуваннях мобільних машин / Подригало М. А., Артёмов М. П., Клец Д. М., Коробко А. І. *Механіка та машинобудування*. 2012. № 2. С. 127–135.
9. Подригало М. А., Гармаш В. П., Побережний А. А. Поліпшення маневреності чотиривісних автомобілів збільшенням числа ступенів рухомості ходової частини. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2022. Вип. 1 (39). С. 38–41.
10. Бобошко О. А. Підвищення маневреності колісних тракторів і самохідних шасі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02. Харків, 2002. 20 с.
11. Бобошко О. А. Наукові основи підвищення показників маневреності автомобілів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.02. Харків, 2019. 40 с.
12. Закапко О. Г. Поліпшення агрегатованості і маневреності тракторних самохідних шасі використанням переднього поворотного мосту : дис. ... д-ра філософії (PhD): 274. Харків, 2023. 170 с.
13. Гармаш В. П. Поліпшення маневреності колісних машин шляхом використання роздільного приводу коліс поворотного мосту : дис. ... д-ра філософії (PhD): 274. Харків, 2023. 146 с.
14. Малогабаритний колісний транспортний засіб з переднім поворотним мостом, що підвішений балансірно : пат. 153925 Україна : № u202300045; заявл. 05.01.2023; опубл. 20.09.2023. Бюл. № 38.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2025 р.

UDC 623.1/7

М. Podryhalo, A. Nikorchuk

APPLICATION OF THE MODEL OF MULTI-COMPONENT COMPOUND MOTION IN CONTROLLING UNMANNED MOBILE MACHINES

The replacement of humans with robots on the battlefield is not a new idea, but today it has seen significant development, particularly in the implementation of technologies that were considered unattainable just a few decades ago.

First and foremost, this concerns unmanned ground vehicles (hereafter referred to as UGVs), which enable the execution of combat missions as well as logistics support tasks. Their advantages include the absence of a driver and the possibility of creating a low-profile vehicle, as well as a lower cost compared to a manned vehicle. However, one disadvantage is the remote control via radio signal. The enemy can use electronic warfare (EW) tools to disrupt control signals, and the alternative – wired control – limits the operational range of the UGV.

A promising direction in military robotization is the deployment of autonomous UGVs, which eliminates the human factor during task execution and allows UGVs to operate as part of a group, thereby gaining an advantage over the enemy.

Managing a group of UGVs is a complex process, and it is essential to ensure coordinated movement between the UGVs and monitor their dynamic characteristics.

This article proposes using a model of multi-component complex motion, which allows for the monitoring of the stability and controllability of UGVs. The suggested control indicators are vectors of relative linear and angular accelerations, which provide insight into the stability and maneuverability of the UGV group.

To ensure accurate movement of the UGV group, it is proposed to consider them as a mechanism with a high number of degrees of freedom and non-rigid kinematic pairs, allowing for certain relative displacements of the links.

The connections between these kinematic pairs are referred to by the authors as telecommunicative or informational links.

Keywords : ground robotic complexes, multi-component complex motion controllability, stability.

Подригало Михайло Абович – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>

Нікорчук Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, докторант Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0003-2683-9106>