

## КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ ТАКТИЧНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Класифікація задач управління групою тактичних безпілотних літальних апаратів.* Сучасні технології в створенні пристроїв, які в своєму складі мають БпЛА (акселерометрів, датчиків, процесорів, радіопередавачів і таке інше в мініатюрному виконанні), дозволяють створювати малогабаритні БпЛА з відносно невеликою вартістю.

Безпілотні літальні апарати стають важливими платформами ведення бойових дій, оскільки вони значно знижують ризик життя людини під час виконання бойових завдань. БпЛА може бути використаний, наприклад, для виявлення мобільних вогневих розрахунків, комплексів управління вогнем, збору інформації про противника тощо.

Тенденції використання тактичних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) являється перехід від використання поодиноких безпілотних літальних апаратів до груп і комплексів БпЛА.

В статті проведена класифікація тактичних БпЛА за способом управління, типом управління, розміром і масою, способом використання.

Ефективне використання тактичних БпЛА не можливе без відповідної системи управління групою (роем) БпЛА.

Запропоновано класифікацію задач управління групою тактичних БпЛА за етапами, функціями, способом, охопленням, цільовою функцією.

Розглянуті основні методи, реалізуючі конкретні задачі управління групою тактичних БпЛА. Для реалізації колективного управління запропоновано використання методу ройового інтелекту.

Рій повинен мати можливість діяти автономно під час пошуку цілей, кооперовано приймати рішення на своєму шляху.

Виділені основні проблеми управління групою БпЛА та запропоновано варіанти їх рішення.

**Ключові слова:** ройовий інтелект, ройова взаємодія, система управління, повітряна мережа.

**Гримуд А.Г. Классификация задач управления группой тактических беспилотных летательных аппаратов.** Современные технологии в создании устройств, которые в своем составе имеют БпЛА (акселерометров, датчиков, процессоров, радиопередатчиков и т.д. в миниатюрном исполнении), позволяют создавать малогабаритные БпЛА с относительно небольшой стоимостью.

Беспилотные летательные аппараты становятся важными платформами ведения боевых действий, поскольку они значительно снижают риск жизни человека во время выполнения боевых задач. БпЛА может быть использован, например, для выявления мобильных огневых расчетов, комплексов управления огнем, сбора информации о противнике и тому подобное.

Тенденции использования тактических беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) является переход от использования отдельных беспилотных летательных аппаратов к группам и комплексам БпЛА.

В статье проведена классификация тактических БпЛА по способу управления, типу управления, размера и массы, способу использования.

Эффективное использование тактических БпЛА невозможно без соответствующей системы управления группой (роем) БпЛА.

Предложенная классификация задач управления группой тактических БпЛА по этапам, функциям, способу, охватом, целевой функцией.

Рассмотрены основные методы, реализующие конкретные задачи управления группой тактических БпЛА. Для реализации коллективного управления предложено использование метода роевого интеллекта.

Рой должен иметь возможность действовать автономно при поиске целей, кооперировано принимать решения на своем пути.

Выделены основные проблемы управления группой БпЛА и предложены варианты их решения.

**Ключевые слова:** роевой интеллект, роевое взаимодействие, система управления, воздушная сеть.

**A. Grymud Classification of control tasks for a group of tactical unmanned aerial vehicles.** Modern technologies in the creation of devices that have UAVs (accelerometers, sensors, processors, radio transmitters and the like in miniature design) make it possible to create small UAVs with relatively low cost.

Unmanned aerial vehicles are becoming important platforms of combat, as they significantly reduce the risk of a person's life when performing combat missions. UAVs can be used, for example, to detect mobile firearms, fire control systems, collect enemy information, and the like.

Trends in the use of tactical unmanned aerial vehicles (UAVs) is the transition from the use of single unmanned aerial vehicles to UAV groups and complexes.

The article deals with the classification of tactical UAVs by control method, control type, size and weight, method of use.

*Effective use of tactical UAVs is not possible without an appropriate UAV group (swarm) management system.*

*The classification of the tasks of managing a group of tactical UAVs by stages, functions, method, coverage, target function is proposed.*

*The basic methods of implementing the specific tasks of managing a group of tactical UAVs are considered. To implement collective management, the use of the method of swarm intelligence is proposed.*

*Swarm must be able to act autonomously in the search for goals, to make co-operative decisions.*

*The main problems of UAV group management are highlighted and solutions are suggested.*

**Keywords:** *swarm intelligence, swarm interaction, control system, air network.*

**Постановка завдання в загальному вигляді.** Одним із сучасних етапів розвитку БпЛА військового призначення є пріоритетне використання групи (рою) малогабаритних БпЛА в тактичній ланці управління. Це пояснюється не тільки тим, що їх масове виробництво і застосування БпЛА в тактичній ланці управління виявляється дешевше, ніж пілотовані літальні апарати, але і тим, що деякі типи БпЛА спроможні вирішувати завдання, недоступні пілотованим літальним апаратам. Вони можуть здійснювати розвідувальні операції зі збору інформації, про противника, транспортувати вантажі, здійснювати ураження техніки та живої сили противника, розгортати повітряну телекомунікаційну мережу обміну інформації в умовах щільної міської забудови тощо. Пошкодження БпЛА в ході виконання бойової задачі несе лише фінансові втрати і не загрожує життю пілота, що дозволяє використовувати БпЛА в ризикованих операціях.

Група (рій) БпЛА тактичної ланки управління може виконувати різні функції (розвідки, зв'язку, враження тощо). Ефективне використання групи БпЛА в умовах ведення бойових дій неможливо без відповідної системи управління нею, яка повинна вирішувати множини завдань управління. Тому задача аналізу та класифікації задач управління групою (роєм) тактичних БпЛА є актуальною.

**Аналіз останніх публікацій.** В публікаціях [1] описуються тенденції розвитку малогабаритних БпЛА, зокрема перехід від використання поодиноких БпЛА до груп і комплексів БпЛА. Приділяється увага проблемі злагодженого управління групою безпілотних літальних апаратів. В роботі [2] проаналізовано алгоритм мурашиних колоній для задачі побудови раціональних маршрутів переміщення БпЛА.

В роботі [3] розглянуті завдання управління переміщенням групи БпЛА на основі дій колонії бджіл. Модель прийняття рішень з управління повітряною телекомунікаційною мережею БпЛА запропоновано в статті [4]. Адаптивне управління автономною групою БпЛА проаналізовано в [5]. Класифікації задач управління польотом групою БпЛА запропоновано в публікації [6]. Однак узагальненої класифікації всієї множини задач управління групою тактичних БпЛА на даний час не проведено.

**Метою статті** є класифікація задач управління групою тактичних БпЛА.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Одним із основних факторів, які виступають на користь малогабаритних БпЛА, є ціна їх виробництва.

Незважаючи на те, що виробництво поодиноких дослідних зразків міні- і мікро-БпЛА не можна вважати дешевим, тим не менш вартість серійних зразків у випадку їх масового виробництва призведе не тільки до зменшення вартості поодинокого зразка, а й до можливості їх групового застосування.

Запропоновано виділяти кілька етапів створення та застосування БпЛА:

перший етап – створення та розробка окремих БпЛА;

другий етап – створюються комплекси з декількох незалежних БпЛА за функціями;

третій етап в собі має створення комплексів, що взаємодіють один з одним;

четвертий етап – створення комплексів з БпЛА, здатних вбудовуватися в будь-які складні функціонуючі системи, що дозволяють говорити про „БпЛА-технології”. Особливості і переваги застосування груп БпЛА докладно описані в [5].

Класифікація тактичних БпЛА представлена на рис. 1.



Рис. 1. Класифікація тактичних БпЛА

Управління польотом забезпечується двома способами:

дистанційно-пілотоване управління – забезпечується оператором БпЛА з наземного пункту управління в режимі реального часу;

автоматичний спосіб управління – забезпечується автопілотом по раніше заданих маршрутах, висотах польоту, швидкістю та стабілізацією кутів орієнтації.

На сьогоднішній день найбільш використовуєним способом є дистанційно-пілотований спосіб, що дозволяє здійснювати польоти в режимі реального часу. Оператор із землі управляє БпЛА і вносить зміни в маршрут слідування БпЛА. Однак з точки зору захищеності каналу управління БпЛА від електромагнітного впливу цей спосіб є найбільш вразливим. Крім цього дальність польоту обмежена можливостями каналу радіозв'язку.

За типом конструкції БпЛА поділяються на два типи: обертаємого і фіксованого крила. БпЛА фіксованого крила – це безпілотні літаки, які використовують прямий поштовх по фіксованому крилу, щоб отримати піднімальну силу. Перевагами БпЛА фіксованого крила є відносно значна швидкість польоту. Недоліками таких БпЛА є необхідність додаткового обладнання при запуску БпЛА, складність здійснення посадки, неможливість зависання в повітрі тощо.

БпЛА обертаємого крила поділяються на два типи – одногвинтові (гелікоптери) та багатогвинтові (мультикоптери). Гелікоптери зазвичай використовують приводний несучий гвинт, який забезпечує підйомну силу, яка врівноважується хвостовим кермовим гвинтом. Багатогвинтові гвинтокрили мають більше 2-х несучих гвинтів для управління всіма формами руху. На відміну від БпЛА фіксованого крила їх перевагами є: спрощені взліт та посадка, спроможність під час проведення операції зависати над супротивником в просторі тощо. Недоліками їх по відношенню до БпЛА фіксованого крила є менша швидкість польоту, менший час польоту, менша висота польоту, більші витрати енергоресурсу тощо.

За ланкою управління БпЛА поділяють на тактичні БпЛА та оперативно-тактичні БпЛА.

Таблиця 1

Класифікація БпЛА за ланкою управління

Категорія	Підкатегорія	Маса (кг)	Максимальная дальність дії (км)
Тактичні	нано (Nano, п)	0,025	менше 1
	мікро (Micro, р)	до 5	менше 10
	міні (Mini)	Менше 20 - 150	менше 30
Оперативно-тактичні	легкі (SR)	50 - 250	30 - 80

У таблиці 1 показана класифікація БпЛА за ланкою управління з приведенням англійських еквівалентів категорій і аббревіатур. Наведена класифікація поширюється як на вже існуючі, так і на перспективні розробки БпЛА. Для тактичної ланки управління

доцільніше використання нано-, мікро- та міні-БпЛА. Це цілком зрозуміло, тому що бурхливий прогрес в цьому класі апаратів обумовлений збігом відразу декількох сприятливих факторів, а саме відносна простота їх експлуатації і мала вартість.

В останні десятиріччя створені всі необхідні умови для розробок і початку виробництва саме таких апаратів – відносно невеликих за масою і габаритами, але здатних виконувати досить серйозні завдання.

До числа таких створених передумов можна віднести: досягнення в області мікросистемної техніки (зокрема, поява гіроскопів і акселерометрів в мікро-мініатюрному виконанні), широке впровадження систем глобального позиціонування (таких як GPS), поява інших необхідних елементів для комплектування міні-БпЛА: відеокамер, прийомо-передавачів, безколекторних електродвигунів і відповідних драйверів, енергоємних літій-полімерних акумуляторів тощо.

За способом використання БпЛА розділяють на: транспортні, розвідувальні, ударні, телекомунікаційні тощо.

Транспортні БпЛА призначені для переміщення, доставки різних габаритів вантажів (медикаментів, боєприпасів тощо).

Розвідувальні БпЛА вирішують завдання щодо розвідування територій, бойової обстановки, виявлення уразливих місць противника тощо.

Ударні БпЛА вирішують задачі ураження сил та засобів противника під час виконання бойового завдання.

Телекомунікаційні БпЛА забезпечують інформаційний обмін між наземною мережею та повітряною мережею.

Для вирішення задач управління групою БпЛА необхідне створення відповідної системи, призначеної для вирішення множини задач управління (рис 2).



Рис. 2. Класифікація задач управління групою тактичних БпЛА

На рис. 2. наведена класифікація задач управління групою тактичних БпЛА, які можна класифікувати за етапами, функціями, способом, охопленням (об'єкт управління) та за цільовою функцією управління.

За етапами задачі управління діляться на задачі планування, розгортання (організаційний спосіб реалізації), нарощування і оперативного управління (організаційно-технологічний спосіб).

Етап планування здійснюється центром управління (наземною станцією). Змістом планування є (виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів): розрахунок необхідної кількості БпЛА, розрахунок маршруту їх переміщення, задача взаємодії, задача управління групою тактичних БпЛА тощо.

Етап розгортання полягає в реалізації етапу планування запуску групи БпЛА і управління їх польотом у задані райони баражування. Контроль за етапом розгортання здійснюється із центру управління, або головним (ведучим) БпЛА у випадку автономного управління групою БпЛА без наземного пункту управління.

Етап нарощування групи (дальності групи БпЛА) здійснюється з метою забезпечення зв'язком групи БпЛА, збільшення бойових можливостей групи БпЛА тощо.

На етапі оперативного управління за прийнятими критеріями ефективності постійно оцінюється стан групи БпЛА і приймаються міри (відповідно до задачі та реальної обстановки) з утриманням показників ефективності функціонування в заданих межах, або здійснюється їх оптимізація.

Задачі оперативного управління (на відміну від задач планування) вирішуються змішаним способом (централізовано/децентралізовано) у режимі реального часу, а за змістом багаторазово їх повторюють. Управління групою БпЛА може здійснюватися окремим БпЛА, який являється в групі старшим (ведучим), або наземною станцією управління (особою, що приймає рішення).

Етапи циклу управління групою БпЛА включають в себе:

збір інформації про стан групи БпЛА;

аналіз даної інформації – визначаються: ступінь виконання групою БпЛА своїх функцій, необхідність управляючого впливу, цілі управління з подальшою деталізацією їх на підцілі;

прийняття рішення: централізовано – головним (ведучим) БпЛА на виконання завдання (по збору даних, ідентифікації, координації, виявлення та знищення цілі тощо), або наземною станцією; децентралізовано – кожним БпЛА в кооперації з іншими БпЛА;

реалізація рішення – реалізація запланованого завдання групою (роєм) під час виконання задачі, операції тощо.

За функціями задач управління групою БпЛА поділяють на: переміщення, телекомунікаційні, моніторингу, навігації, ідентифікації цілі, знищення цілі тощо.

Задачі управління переміщенням БпЛА поділяється на наступні:

політ БпЛА (здійснення групою БпЛА переміщення в район виконання завдання та повернення до необхідного району приземлення);

організація (самоорганізація) в просторі групи (рою), яка передбачає здатність рою цілеспрямовано управляти розміщенням та переміщенням БпЛА у просторі, з урахуванням можливих змін чисельності рою та умов польоту.

Самоорганізацію рою БпЛА використовують для впорядкованого розміщення рою БпЛА в просторі, побудови різного роду геометричних формацій, уникнення зіткнень з іншими БпЛА рою, колективного оминання перешкод.

Використання алгоритмів самоорганізації дає змогу групі БпЛА здійснювати спільні узгоджені дії;

координація дій групи БпЛА (дії виконання всією групою БпЛА поставлених задач).

Особливу увагу заслуговує забезпечення стійкого польоту тактичних БпЛА, котрі повинні кординувати свої дії під впливом природної турбулентності атмосфери, особливо в умовах щільної міської забудови.

Для забезпечення обміну даними використовується телекомунікаційна підсистема, яка дає змогу здійснювати управління групою БпЛА в просторі за рахунок обміну інформації із заданою якістю в групі між БпЛА, між окремими БпЛА і наземною станцією управління.

Функція моніторингу передбачає: збір різних типів інформації (відеоінформацію, інформацію спостереження, характеристики навколишнього середовища, інформацію із

сенсорних полів тощо), накопичення інформації, передача інформації на наземну станцію управління, або іншим БпЛА тощо.

Орієнтування в просторі та навігація включає в себе визначення положення (координат) БпЛА в просторі для забезпечення польотом БпЛА за заданим курсом і висотою з додержанням визначеного часу польоту.

Система ідентифікації цілей призначена для розпізнавання об'єктів (техніки, живої сили противника тощо) по шляху слідування групи (рою) тактичних БпЛА яка має заздалегіть закладену інформацію про об'єкти спостереження.

Функція знищення цілі – це наведення на ціль, польот до цілі, ураження сил та засобів противника під час виконання бойового завдання.

Управління може бути реалізоване централізованим, децентралізованим або змішаним (гібридним) способом.

Управління здійснюється централізовано за допомогою центру управління (наземною станцією управління) та/або за допомогою головного (ведучого) БпЛА в групі при умові автономного польоту. Децентралізоване управління здійснюється кожним БпЛА в групі тактичних БпЛА. В умовах змішаного управління (частка функцій виконується централізовано центром управління та за допомогою головного (ведучого) БпЛА в групі, а друга – децентралізовано кожним БпЛА в групі окремо).

За охопленням (об'єктом управління) задачі управління можуть вирішуватись в межах всієї повітряної мережі, напрямку передачі (управлінням між БпЛА), маршруту передачі, окремого БпЛА, каналу зв'язку управління між собою під час виконання переміщення та прийняття рішень групою БпЛА.

Цільові функції управління повинні бути орієнтовані на функціонал підсистем управління. Наприклад, телекомунікаційна підсистема повинна забезпечувати зв'язність і обмін передачі даними із заданою якістю між БпЛА, БпЛА з наземною станцією управління. Цільовими функціями підсистеми переміщення можуть бути: мінімальний час польоту групою БпЛА, визначення мінімальних витрат енергії на виконання завдання групою БпЛА, пошук і своєчасне виявлення перешкод, в якості яких можуть виступати будівлі, дерева, лінії електропередач, повітряні потоки, зони дії ППО противника тощо.

Для реалізації задач управління необхідно використовувати алгоритми (методи) управління, які будуть закладені в спеціальне програмне забезпечення системи управління БпЛА.

Розглянемо можливі методи управління групою БпЛА.

*Ройова взаємодія* – як одне з рішень проблем управління малорогабаритних БпЛА. Однією із серйозних проблем, що стоять на шляху використання малорогабаритних тактичних БпЛА є проблема в забезпеченні радіозв'язком оператора управління (наземна станція управління).

Справа в тому, що малі розміри БпЛА накладають суттєві обмеження на запас бортового енергоресурсу, велика частина якого призначена для забезпечення руху, і лише невелика частина енергоресурсу може використовуватися приймально-передавальною апаратурою. Таким чином, потужність радіопередавачів суттєво обмежена.

Невеликі розміри БпЛА також обмежують розміри антен.

Одним із рішень цієї проблеми є використання направлених наземних антен для супроводу апарату по лінії супроводження, очевидно, що такий підхід суттєво обмежує сферу застосування малорогабаритних БпЛА.

В якості вирішення проблеми кооперованого прийняття рішення в групах БпЛА пропонується використовувати метод ройового інтелекту. Згідно з теорією ройового інтелекту, роєм називається тільки та група, яка складається з достатньо великої кількості БпЛА.

Методи ройової взаємодії знаходять застосування в задачах управління великими групами наземних мобільних мікророботів (наприклад, проекти *Swarm-bots* і *Swagmonoid*)

[5], що може служити підтвердженням того, що використання цих методів для груп БпЛА може виявитися настільки ж ефективним.

Адже БпЛА можна розглядати як „повітряні роботи з шістьма ступенями свободи”.

Це дозволяє припустити, що методи взаємодії в групах БпЛА допомагають вирішити ще одну проблему малогабаритних БпЛА – збір даних про навколишнє середовище.

Справа в тому, що малі габарити апарату істотно обмежують доступний набір бортових сенсорних пристроїв.

Обмежений енергоресурс також несприятливо позначається на допустимі енерговитрати засобів збору даних про супротивника, що призводить до зменшення дальності роботи активних засобів збору даних.

Ці обмеження призводять до того, що малогабаритні БпЛА взмозі самостійно зібрати інформацію лише про відносно невеликі області навколо себе.

Проте для забезпечення сталого польоту апарату необхідні дані нерухомих і рухомих перешкод, розташованих в значно більшій зоні, особливо за курсом руху.

При ройовій взаємодії в групі БпЛА сусідні БпЛА обмінюються інформацією про параметри навколишнього середовища, збільшуючи доступні один одному відомості про перешкоди, повітряні потоки та інші важливі параметри середовища.

Для різних цільових функцій управління необхідно використовувати різноманітні математичні методи, наприклад, в останній час дуже активно для управління рухом групи тактичних БпЛА використовується метод на основі ройового інтелекту [7], для забезпечення маршрутів переміщення використовується метод пошуку найкоротшого шляху, в залежності від типу вихідних даних інформації можливе використання методу чіткої оптимізації, якщо немає повної інформації про групу – використовують метод нечіткої оптимізації, можуть використовуватись методи для прийняття рішень вирішення поведінки та маршрутною поведінки методів із використанням нейронних мереж.

В подальшому для реалізації сумісної роботи та управління групи БпЛА можна застосувати:

Метод на основі теорії ройового інтелекту [8].

Метод на основі теорії колективної поведінки [2].

Метод на основі теорії групової робототехніки [9].

Аналіз наведених вище методів з метою оцінювання придатності кожної з них для вирішення проблеми реалізації сумісної роботи групи БпЛА може бути предметом окремого дослідження.

**Висновки.** В даній роботі проведено аналіз і класифікацію систем управління. Дані задачі розбиті за функціями, етапами, способами, цільовими функціями управління. Визначені основні математичні методи їх рішення.

Для дослідження шляхів реалізації сумісної роботи групи БпЛА запропоновано використовувати метод ройового інтелекту. Вибір цього підходу зумовлений схожістю елементів рою (тактичних mini-БпЛА) і середовища (повітря), в якому ці об'єкти функціонують.

В подальшому дослідженні планується вдосконалити вирішення декількох типових задач за допомогою евристичного алгоритму управління групою (роєм) БпЛА.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Голембо В.А., Мельников Р.Г. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів. Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. 2018р.

Субботін С. О., Олійник, О. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей – Запоріжжя: ЗНТУ. 2009.

Курейчик В. В., Полупанова В. В. Эволюционная оптимизация на основе алгоритма колонии пчёл. Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2009.

Романюк В.А., Степаненко С.О. Модель прийняття рішень по управлінню повітряної мережею. Збірник наукових праць ВІТІ №3 – 2019р.

Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Гранчина Г.О. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов. Стохастическая оптимизация в информатике. – 2009.

Almeida, M.; Hildmann, H. Distributed UAV-swarm-based real-time geomatic data collection under dynamic all changing resolution requirements. In Proceedings of the UAV-g 2017-International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, in ISPRS Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Trieste, Italy, 3-6 July 2017.

7. Курейчик В. В., Запорожец Д. Ю. Роевой алгоритм в задачах оптимизации. Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010.

8. Карпенко А. П., Селиверстов Е. Ю. Обзор методов роя частиц для задачи глобальной оптимизации (particles swarm optimization). Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2009.

9. Карпов В.Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике. Управление большими системами, М: ИПУ РАН, 2016, Выпуск 59.

10. Романюк В.А., Степаненко С.О., Панченко І.В., Восколович О.І., Літаючі самоорганізуючі мережі. Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017.

11. SAS Institute Inc. All Rights Reserved. [www.sas.com/ru\\_ru/insights/articles/analytics/what-is-artificial-intelligence.html](http://www.sas.com/ru_ru/insights/articles/analytics/what-is-artificial-intelligence.html)

12. S. Kapustian Multi-level organization of collective interaction in group of intelligent robots // New of the Southern Federal University / Technical science, No. 9. 2004. - P. 149-158.

13. Hildmann, H.; Almeida, M.; Kovacs, E.; Saffre, F. Termite algorithms to control collaborative swarms of satellites. In Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2018), i-SAIRAS 2018, Madrid, Spain, 4-6 July 2018; European Space Agency: Paris, France, 2018.

14. Карпенко А. П., Селиверстов Е. Ю. Обзор методов роя частиц для задачи глобальной оптимизации (particles swarm optimization). Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2009.

15. Субботін С. О., Олійник А. О., Олійник О. О. Ітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей. — Запоріжжя: ЗНТУ, 2009.

16. Кочегурова Е. А., Мартынов Я. А., Мартынова Ю. А., Цапко С. Г. Алгоритм муравьиных колоний для задачи проектирования рациональных маршрутных сетей городского пассажирского транспорта. СибГУТИ. – 2014.