

УДК 623.592

<sup>1</sup>С.В. Ленков, д.т.н., проф.<sup>2</sup>С.А. Шворов, д.т.н., с.н.с.<sup>3</sup>Ю.В. Гунченко, к.т.н.<sup>2</sup>Д.В. Чирченко

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

<sup>1</sup>Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України<sup>3</sup>Одеський національний політехнічний університет

*Розглядаються методологічні питання та підхід щодо побудови й організації функціонування мобільних роботизованих систем спеціального призначення.*

**Ключові слова:** роботизовані системи, мобільні роботи, структурний та параметричний синтез, інтелектуальна система управління.

**Вступ.** Одним із перспективних напрямків сучасної робототехніки є створення наземних мобільних роботів (МР), призначених для виконання широкого кола робіт, пов'язаних з пошуком (знаходженням), збором, завантаженням, перевезенням та переробкою різноманітних матеріалів. До складу подібних роботів входить маніпуляційна система для виконання технологічних операцій, транспортна система, що призначена для доставки маніпуляційного обладнання до місця проведення технологічних операцій, а також система управління МР, яка забезпечує керування його виконавчими вузлами. Доставка робочого обладнання до місця виконання технологічних операцій ведеться в умовах невизначеності, коли заздалегідь невідомі маршрути руху МР та місця знаходження об'єктів-перешкод, з якими він може взаємодіяти в процесі руху. У зв'язку із цим вирішальну роль при пресуванні МР починають грати показники його прохідності (рух і маневрування на поверхнях з різними покриттями, подолання підйомів, порогових перешкод тощо), що забезпечуються його системою пересування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Різними аспектами створення та застосування МР спеціального призначення займаються ряд вітчизняних наукових і виробничих організацій та зарубіжних підприємств, що працюють в галузі мобільної робототехніки спеціального призначення - фірми REMOTEC, Foster-Miller, Cybermotion (США), Alvis Logistics, Lockheed Martin (Великобританія), Cybernetix, Giat Industries (Франція), Telerob (Німеччина) та ін.

Незважаючи на значні успіхи з розвитку теорії та практики побудови роботів спеціального призначення, деякі завдання, що пов'язані зі створенням та організацією функціонування МР надлегкого класу, вирішені не в повній мірі [1-3]. Аналіз показує, що актуальною в робототехніці спеціального призначення є проблема розробки і дослідження системи пересування колісного МР надлегкого класу.

**Метою статті** є подальший розвиток методологічних основ побудови мобільних роботизованих систем (МРС), у рамках яких розробляється сукупність методів аналізу і синтезу МРС для обґрунтування раціонального варіанта побудови та організації функціонування МР.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Для досягнення мети виникає необхідність у вирішенні наступних груп наукових задач:

1. Формулювання концептуальних основ побудови та організації функціонування МР.
2. Розробка методології структурного і параметричного синтезу МРС та організація їх оптимального функціонування.
3. Розробка методичних основ обґрунтування вимог до МРС на основі запропонованої методології їх синтезу.
4. Розробка методичних принципів побудови та організації функціонування МРС і їх основних елементів, що забезпечить реалізацію запропонованих до них вимог.

При вирішенні **першої групи** наукових задач визначається: мета функціонування МРС і розв'язувані нею задачі; умови функціонування.

У загальному випадку мірою ефективності функціонування МРС є величина ( $G$ ), що характеризує ступінь реалізації МРС технологічних операцій з урахуванням їх важливості:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n v_i N_{pi}}{\sum_{i=1}^n v_i N_{oi}}, \quad (1)$$

де  $N_{oi}$  – необхідна кількість технологічних операцій  $i$ -го типу, що повинна виконуватись за допомогою МРС;

$N_{pi}$  – кількість технологічних операцій  $i$ -го типу, що виконує МРС;

$n$  – кількість типів технологічних операцій;

$v_i$  – важливість технологічних операцій  $i$ -го типу.

У загальному випадку постановка проблеми побудови МРС зводиться до наступного: необхідно знайти з множини можливих варіантів ( $X$ ) такий варіант побудови МРС ( $x$ ), при якому забезпечується виконання максимально можливої кількості технологічних операцій з мінімальними фінансовими ( $C$ ) і часовими ( $T$ ) витратами.

Формальна постановка наукової проблеми може бути представлена у вигляді рішення трикритеріальної задачі:

$$G \rightarrow \max_{x \in X}, C \rightarrow \min_{x \in X}, T \rightarrow \min_{x \in X}. \quad (2)$$

Як видно з (2) усі критерії мають суперечливий характер і знайти оптимальний варіант побудови МРС, що задовольняє всім зазначеним вище умовам, у край складно. Без розробки теоретико-концептуальних основ побудови таких систем, що включають створення методів оптимізації структури і параметрів МРС, вирішення зазначеної проблеми неможливе.

Основні поняття теорії побудови МРС базуються на категоріях загальної теорії систем. При цьому спільність понять теорії систем виявляється в конкретній предметній сфері, в тому числі й стосовно МРС. У якості основних елементів МРС будуть виступати МР. При цьому МРС являє сукупність інтелектуальних МР, об'єднаних ієрархічними, інформаційними, керуючими зв'язками, де кожний елемент спрямований на досягнення загальної мети (2). При створенні МРС необхідно визначити її структуру і номенклатуру алгоритмів, які найкраще відповідають призначенню системи. Щоб вирішувати такого роду прикладні задачі, необхідно мати у своєму розпорядженні знання про ефективність різних способів структурної організації МРС, методів керування процесами її функціонування. Властивості і закономірності динамічного функціонування, які мають місце у МРС з різною організацією, складають предмет теорії побудови МРС.

Для задач першої групи характерні такі два етапи проведення досліджень. На першому етапі необхідно побудувати концептуальну модель функціонування МРС, а на другому етапі, на базі прийнятої концептуальної моделі, будується математична модель динамічного дискретно-керованого процесу, у якому: об'єктом керування є МР; керованими параметрами - показники якості діяльності МР; керуючими впливами – оперативні завдання на виконання робіт. Також розробляється система показників і методика оцінки ефективності функціонування МР. Результатом аналізу, проведеного в рамках теорії побудови МРС, є моделі процесів їхнього функціонування і закономірності, що властиві цим процесам та системі взагалі. У цьому і є пізнавальна цінність аналізу. Прикладна його цінність обумовлена використанням результатів для постановки задачі синтезу.

У **другій групі** задач теорії побудови МРС однією з основних є задача їх оптимального синтезу, яка спрямована на вибір способу побудови системи, що найкраще пристосована для виконання заданих функцій. Вихідними в задачі синтезу є такі дані: функції та завдання системи; перелік обмежень на характеристики системи (тимчасові, ресурсні); критерій ефективності, що встановлює спосіб оцінки якості системи в цілому. Виходячи з цих відомостей, необхідно визначити структуру системи, параметри елементів і стратегію керування процесами, що повинні задовольняти заданим обмеженням і бути оптимальними щодо змісту критеріїв ефективності. Процедура синтезу МРС поділяється на процедури структурного і параметричного синтезу. Метою структурного синтезу є визначення структури

побудови системи: типу підсистем, склад елементів і зв'язків між ними. Параметричний синтез полягає у визначенні оптимальним способом технічних характеристик підсистем та основних елементів при фіксованій структурній схемі системи. Задача синтезу оптимальної структури розглядається як задача визначення оптимального відображення множини виконуваних функцій МРС на множини її взаємозалежних елементів. Відповідно розробляються методи оптимального планування та керування МР як процесу організації оптимального функціонування динамічної дискретно-керованої системи.

Методика вирішення задачі параметричного синтезу МРС включає такі основні етапи. По-перше – визначаються показники ефективності кожного із варіантів побудови МРС на множині умов функціонування системи для вибору найкращих з них. На другому етапі методики вирішується задача класифікації ситуацій за ознакою задоволення прийнятним обмеженням. Під ситуацією в багатомірному факторному просторі розуміється варіант рішення, а також варіант умов його реалізації. Для кожної точки ситуації робиться розрахунок показників ефективності і порівняння отриманих значень з припустимими. Для звуження множини варіантів рішень на третьому етапі застосовується принцип оптимізації по Парето, що виділяє припустиму Парето-ефективну множини рішень [4]. Подальше звуження множини варіантів рішень пов'язане з концептуальним вибором такого варіанту побудови МРС із всієї множини, який забезпечує достатньо високий (необхідний) рівень показників цільової та економічної ефективності. При цьому оптимальне рішення дозволяє визначити діапазон припустимих значень параметрів МРС по виконанню поставлених завдань.

Методичні основи обґрунтування вимог до МРС базуються на методології їх синтезу і включають вирішення **третьої групи** задач: моделювання динаміки руху МР в умовах перешкод та згідно з отриманими показниками цільової та економічної ефективності – формулюються вимоги до побудови МРС. При цьому обґрунтовуються вимоги до підсистем об'єктивного контролю, планування та керування МР, апаратних і програмних засобів усіх підсистем МРС.

Для розв'язання даних підзадач необхідно обрати такі методи, які дозволили б врахувати характерні особливості функціонування МРС (рис. 1).

При розв'язанні задачі прогнозу показників необхідно враховувати нестационарність, стохастичність процесу, наявність неповної інформації та ін. Тому для розв'язання цієї задачі доцільно використовувати методи імітаційного моделювання та методи штучного інтелекту, які дозволять спрогнозувати показники роботи МР в певних технологічних умовах.

При розв'язанні задачі розподілу завдань кожному МР необхідно враховувати складність і велику розмірність цієї задачі. Складність цієї задачі пов'язана з тим, що доцільно враховувати декілька критеріїв при плануванні робіт, з одного боку, необхідно зменшити втрати від можливого невиконання певної кількості поставлених завдань МР, а з іншого боку, необхідно мінімізувати витрати на проведення робіт, які залежать від кількості МР та інших технічних засобів, що використовуються. Велика розмірність цієї задачі пов'язана зі значною кількістю технологічних умов, кількістю МР та технічних засобів власних і орендованих, а також із наявністю різноманітних обмежень, які необхідно враховувати при формуванні плану робіт. Ефективним методом розв'язання такого типу задач є еволюційне моделювання, зокрема, метод генетичного алгоритму.

Задачу розподілу МР за завданнями доцільно розв'язувати методами теорії масового обслуговування, які дозволять врахувати вплив фактора випадковості на процес.

Разом з цим, внаслідок особливостей функціонування МРС і характеру поставлених задач, більш ефективним їх розв'язання буде з використанням сучасних інформаційних й інтелектуальних технологій. Внаслідок того, що існує необхідність використання сукупності різноманітних методів, як класичного моделювання систем, так і методів штучного інтелекту й імітаційного моделювання для розв'язання поставлених задач, то раціональним буде створити саме гібридну інтелектуальну систему управління МРС.

**Четверта група** задач передбачає розробку технічних принципів побудови МРС, тобто технічні рішення, що забезпечать реалізацію обґрунтованих вимог до них. З концептуальної точки зору МРС являє собою гібридну інтелектуальну систему, яка спочатку вивчає оперативні завдання, а потім за допомогою спеціальних методів та моделей забезпечує: оптимальне планування кількості МР для виконання оперативних завдань; визначення оптимальних

маршрутів пересування МР; прогнозування ефективності виконання поставлених оперативних завдань та управління МР.

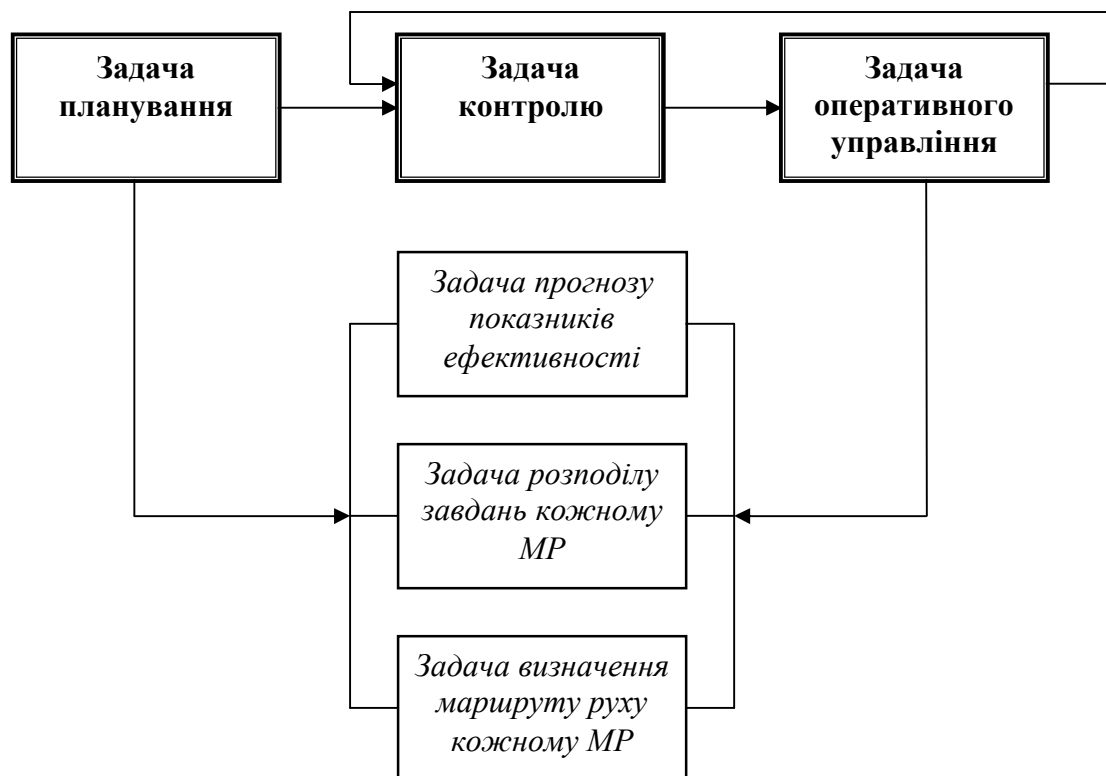


Рис. 1. Схема взаємодії задач

Визначення оптимальних маршрутів пересування МР полягає у вирішенні задачі синтезу компромісно-оптимальних траєкторій руху мобільних роботів з розпізнаванням перешкод в конфліктному середовищі.

Під конфліктним середовищем розуміється сукупність різноманітних предметів (рухомих та нерухомих), розташованих у зоні пошуку, наближення мобільного робота до яких небажано. Як правило, конфліктне середовище складається з конфліктуючих предметів (перешкод), наявність яких у зоні пошуку оптимальної траєкторії зумовлена процесами, не зв'язаними з проходженням через цю зону МР. Конфліктуючі предмети даного класу будемо називати пасивними. Однак інколи, при розв'язанні деяких специфічних задач синтезу компромісно-оптимальних траєкторій, доводиться мати справу з іншими конфліктуючими технічними засобами та мобільними роботами, що також знаходяться та рухаються в зоні пошуку для просування МР до кінцевої цільової точки. Конфліктуючі предмети цього класу будемо називати активними.

Таким чином, для правильного розв'язання задачі синтезу компромісно-оптимальних маршрутів пересування роботів, що рухаються у конфліктному середовищі, необхідно щоб методика розрахунку цих маршрутів дозволяла враховувати вид перешкод, та на підставі його властивостей кількісно оцінити вплив конфліктного середовища на траєкторію пересування мобільного робота.

Розпізнавання перешкод включає в себе ряд кроків:  
 сприйняття образу (технічне вимірювання);  
 попереднє опрацювання отриманого сигналу (фільтрація);  
 виділення потрібних характеристик (індексація);  
 класифікація перешкоди та прийняття рішення.

Стосовно першого кроку, то для сприйняття образу можна використати сприймаючий елемент, наприклад HiTechnic. Він може працювати в трьох режимах: відрізнити шість кольорів, чи розподіляти сприйнятий колір на три кольори режиму RGB (червоний, зелений, синій); фіксувати зовнішнє освітлення і видавати результат в умовних одиницях; фіксувати відбите світло, створене власним випромінювачем і видавати результат в умовних одиницях.

Для попереднього опрацювання (фільтрації) вхідних образів доцільно використати Вейвлет-аналіз, який базується на використанні вейвлетів, що являють собою математичні функції та дозволяють аналізувати різні частотні компоненти. У загальному випадку такий аналіз відбувається в площині: вейвлет-коефіцієнт – час – рівень. Самі вейвлет-коефіцієнти визначаються інтегральним перетворенням сигналу. Отримані вейвлет-спектрограми принципово відрізняються від рядів Фур'є тим, що дають чітку прив'язку спектра особливостей сигналу до часу.

Третій та четвертий кроки розпізнавання образів, як правило, об'єднуються у системі розпізнавання образів (СРО), яка і є головним елементом такого інтелектуального комплексу. Алгоритм синтезу СРО є достатньо відпрацьованим: отримання тренувальної вибірки; вибір способу представлення даних та значимих характеристик; розробка класифікуючого критерію; навчання СРО; перевірка якості роботи з можливістю повернення до кроку 2 (або навіть і 1); оптимізація СРО [5-8].

Як відомо, протягом дослідження проблем розпізнавання образів виокремились два основні підходи – детерміністичний та статистичний. Перший включає в себе математичні формалізовані емпіричні і евристичні методи, другий базується на фундаментальних результатах математичної статистики. Однак, під час практичної реалізації відповідних інтелектуальних систем розподілити їх досить складно, а інколи і неможливо.

До проміжного класу СРО можна віднести і нейронні мережі (НМ). Традиційна для такого підходу, щодо вирішення задач розпізнавання образів, нейромережева архітектура – багат шаровий перцептрон. Враховуючи налагодженість програмних засобів та здатність до адаптивного підлаштування в умовах динамічної розмитості технологічної інформації, саме цей математичний апарат доцільно використовувати для створення СРО.

Після визначення виду перешкоди вирішується задача синтезу компромісно-оптимальних траєкторій руху мобільного об'єкта в конфліктному середовищі. Для розв'язання даної задачі запропоновано метод багатокритеріального динамічного програмування, суть якого полягає в наступному [9-10].

Відправна задача приводиться до дискретного виду. Для цього область простору станів, що нас цікавить, накривається  $n$ -арною мережею  $N^{(1)} \times N^{(2)} \times \dots \times N^{(n)}$ , при цьому вважається, що зображуючі точки можуть переміщуватися тільки з одного вузла цієї мережі до іншого.

Вузли мережі, що розташовані в заборонених областях, будемо називати забороненими точками. Шукана траєкторія не може проходити через ці точки ні за яких обставин.

У вузлах мережі, розташованих у безпосередній близькості від конфліктуючих предметів та границь заборонених зон (в тому випадку, якщо наближення до заборонених зон небажано), розміщують  $(y^*, x^*)$  - точки-носії потенціалу небезпеки. Усі інші вузли мережі є точками допустимої області, в якій і виконується пошук оптимальної траєкторії.

Довжина шляху  $l_{j-1,i}^{j,m}$  характеризується довжиною переходу з рівня  $j-1$  по координаті  $U$  на рівень  $j$ . При цьому вважається, що "свій" об'єкт, знаходячись в одній із допустимих точок на  $j-1$ -му рівні мережі, може переходити лише в одну з допустимих точок на  $j$ -му рівні.

Крім довжини шляху необхідно враховувати критерій  $\Psi$ , який оцінює небезпеку від зближення "свого" та "чужого" МР, який теж повинен мінімізуватися [9-10].

Задача синтезу оптимальної траєкторії руху в заданих умовах розв'язується методом динамічного програмування з узагальненим критерієм оптимальності по нелінійній схемі компромісів. При цьому для визначення оптимального шляху в кожному  $m$ -у допустиму точку по координаті  $x$   $j$ -го рівня по  $y$  на кожному кроці розв'язується функціональне рівняння Беллмана

$$\Phi(j, m) = \min_{i \in I_{j-1}} \left[ \Delta \Phi_{j-1,i}^{j,m} + \Phi(j-1, i) \right], j \in [1, J] \quad (3)$$

з граничною умовою  $\Phi(0, s) = 0$ , де  $j$  – кількість рівнів переходу по координаті  $U$  на мережі;  $I_{j-1}$  – кількість допустимих точок на  $j-1$ -му рівні мережі;  $S$  – номер початкової точки по

координаті  $x$  на нульовому рівні мережі;  $\Phi(j, m)$  – сумарні втрати по узагальненому критерію оптимальності при переході з початкової точки  $(0, s)$  в точку  $(j, m)$  мережі;  $\Delta\Phi_{j-1, i}^{j, m}$  – прирощення узагальненого критерію при переході з точки  $(j-1, i)$  в точку  $(j, m)$  мережі.

В узагальненій критерій якості входять три приватних критерії. Перший – кількісно визначає ступінь небезпеки наближення до конфліктуючих предметів ( $P$ ). Другий – характеризує довжину переходу з точки  $(j-1, i)$  в точку  $(j, m)$  мережі ( $l_{j-1, i}^{j, m}$ ). Третій приватний критерій  $\psi$  – визначає ступінь небезпеки наближення до рухомого "чужого" МР під час переходу з точки  $(j-1, i)$  в точку  $(j, m)$  мережі.

Структура узагальненого критерію будується в відповідності з методологією нелінійної схеми компромісів [4, 9, 10] та визначається виразом

$$\Delta\Phi_{j-1, i}^{j, m} = \frac{P_{\max}}{P_{\max} - P_{j, m}} + \frac{l_{\max}}{l_{\max} - l_{j-1, i}^{j, m}} + \frac{\psi_{\max}}{\psi_{\max} - \psi_{j-1, i}^{j, m}} \quad (4)$$

В якості оптимальної на рівні  $j$  вибирається та допустима точка даного рівня, якій відповідає мінімуму сумарних втрат по узагальненому критерію оптимальності.

Як показують результати попередніх експериментів, на основі сумісного використання методів розпізнавання образів та багатокритеріальної оптимізації, забезпечується вирішення задачі синтезу компромісно-оптимальних траєкторій руху мобільних роботів з розпізнаванням перешкод в конфліктному середовищі, що необхідно для обґрунтування раціонального варіанта побудови та організації функціонування МР.

### Висновки

Таким чином, застосування методів, моделей та методик розглянутих методологічних основ раціонального варіанта побудови інтелектуальної мобільної роботизованої системи надає змогу вирішити науково-практичну проблему – забезпечити виконання необхідного комплексу робіт, пов'язаних із пошуком (знаходженням), збором, завантаженням, перевезенням та переробкою різноманітних матеріалів, за рахунок оптимального проектування та використання інтелектуальних мобільних роботів.

### Список літературних джерел

1. Батанов А.Ф. Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций А.Ф. Батанов, С.Н. Грицынин, С.В. Муркин // Специальная техника. – 1999. – №6. – С. 10–17.
2. Маслов О.А. Мобильные роботы для обнаружения и уничтожения ВУ / Маслов О.А. // Специальная техника. – 2005. – №5. – С. 18–21.
3. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. 2-е изд., доп. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
4. Сложные технические и эргатические системы: Методы исследования : [Монография] / А.Н. Воронин, Ю.К. Зиятдинов, А.В. Харченко, В.В. Осташевский – Харьков: Факт, 1997. – 240 с.
5. Пелихов Е.Ф. Экономическая эффективность инноваций: [Монография] / Е.Ф. Пелихов; Нар. укр. акад. - Х. : Изд-во НУА, 2005. – 167 с. : табл. – Библиогр.: с. 136–139 (43 назв.).
6. Фукунава К. Автоматическое распознавание образов / К. Фукунава. – М.: Наука, 1979. – 367 с.
7. Бабаков М.Ф. Методы машинного моделирования в проектировании электронной аппаратуры / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов. – Х.: НАЭКУ "ХАИ", 2002. – 89 с.
8. Лисенко В.П. Ймовірнісна (Байєсівська) нейронна мережа класифікації температурних образів / В.П. Лисенко, В.М. Штепа, А.О. Дудник // Вісник аграрної науки. – 2011. – № 4. – С. 53–56.
9. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем / Воронин А.Н.. – К.: Наукова думка, 1992. – 157 с.
10. Підхід до вирішення задачі компромісно-оптимального вибору маршруту руху об'єктів в конфліктному середовищі / С.А. Шворов, А.М. Берназ О.І. [та ін.] // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2008. – № 19. – С. 63–71.