

УДК 351.861

*В. О. Собина, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-6908-8037)**Д. В. Тарадуда, к.т.н., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-9167-0058)**Д. Л. Соколов, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7772-6577)**М. О. Демент, к.пед.н., доц. каф. (ORCID 0000-0003-4975-384X)**Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

ЩОДО ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ РОБОТОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Розроблено алгоритм управління робототехнічним комплексом під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини. Запропонований алгоритм дозволяє синтезувати реакцію на вхідні команди і характеристики замкнутого контуру цілком незалежно. У роботі пропонується новий силовий контролер, який має дві явні переваги: по-перше, він має робастну структуру сервосистеми, тобто коли ведеться управління зусиллям реакції від середовища, то водночас контролюється стійкість і збереження досить високої швидкодії; по-друге, управління зусиллям ведеться через положення, тобто запропонований силовий контролер включає систему управління траєкторією. Вирішення поставленої мети відбувалося шляхом застосування моделі імпедансу та зворотної кінематики в системі управління рухом. З метою подальшої верифікації алгоритму управління робототехнічним комплексом при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в роботі сформульовано якісні та кількісні значення основних тактико-технічних характеристик робототехнічного комплексу, такі як: дальність радіо- і телеуправління, частота радіо- і телеканалу, максимальна потужністю радіоактивного випромінювання в зоні роботи комплексу, максимальна концентрація основних небезпечних хімічних речовин в зоні роботи комплексу, максимальна потужність теплового потоку в зоні роботи комплексу та час його роботи в таких умовах, а також максимальна швидкість пересування комплексу. На основі вивчення вітчизняного і зарубіжного досвіду застосування мобільних роботів в роботі розроблено загальну структурну схему робототехнічного комплексу для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Також розроблено траєкторію руху робототехнічного комплексу при проведенні попередньої розвідки в зоні умовної надзвичайної ситуації. При проектуванні траєкторії руху було застосовано наступні алгоритми з характерними для них умовами та обмеженнями: алгоритм на основі уявлень про траєкторію руху у вигляді орієнтованого ациклічного графа; алгоритм знаходження К найкоротших шляхів між двома заданими вершинами в орієнтованому ациклічному графі; алгоритм призначення ваг вершинам зазначеного графа з урахуванням габаритних розмірів і вимог до мінімізації енергоспоживання. Подальші дослідження планується присвятити розробці натурального зразка робототехнічного комплексу для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, потенційно небезпечний об'єкт, радіаційно-хімічно- чи вибухонебезпечна речовина, робототехнічний комплекс, система управління

1. Вступ

На сьогодні для сталого розвитку промислового комплексу України необхідна розвинена система реагування на надзвичайні ситуації (далі НС) та ліквідації їх наслідків, які можуть виникнути як при перевезенні небезпечних вантажів так і при їх експлуатації на потенційно небезпечних об'єктах [1–3].

Особливо небезпечними є надзвичайні події, які супроводжуються пожежами (вибухами) цистерн з легкозаймистими і горючими рідинами та зрідженими вуглеводневими газами, а також розливом (викидом) небезпечних хімічних чи радіоактивних речовин. Про це свідчить також аналіз наслідків аварії на Чорнобильський АЕС, залізничному транспорті у Львівській області (аварія з викидом жовтого фо-

сфору) тощо [4]. Чимала небезпека також від пожеж твердих горючих матеріалів у рухомому складі залізничного транспорту та на промислових об'єктах. Більш того, ліквідація наслідків НС на таких об'єктах відзначається складністю в організації дій аварійно-рятувальних підрозділів, що обумовлено наявністю великої кількості речовин, що мають різноманітні вибухонебезпечні властивості, зосередженням сил та засобів, особливо на важкодоступних ділянках, тощо.

У зв'язку з вище наведеним, виникає актуальна наукова проблема – висока потенційна небезпека надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для вирішення поставленої наукової проблеми необхідно провести аналіз літературних даних щодо ліквідації наслідків НС на об'єктах, що експлуатують чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини з погляду застосування робототехнічних комплексів.

Початок вітчизняних досліджень з проблеми створення робототехнічних засобів для застосування в екстремальних умовах відноситься до 1986 року. Поштовхом до становлення розвитку проблеми створення робототехнічних засобів стала аварія на Чорнобильській АЕС у 1986 році. Ця аварія стала потужним імпульсом розвитку робототехніки та досвіду застосування таких засобів при ліквідації наслідків НС.

В роботі [5] робиться огляд сучасного стану у сфері створення аварійно рятувальних роботів. Розглянуто основні напрямки, на яких концентруються провідні розробники, а саме, створення дистанційно керованих роботів, орієнтованих на роботу на різних стадіях ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. В роботі аналізується можливість застосування існуючих зразків роботів, дистанційно керованих групою людей-операторів і здатних здійснювати як силові дії на різні об'єкти, що зустрічаються в районі аварії, так і тонко координовані дії, пов'язані з різними видами аналізу зразків на місці аварії. Однак в статті не приділяється увага розробці алгоритмів управління роботою мобільних робототехнічних комплексів в умовах автономної роботи без участі оператора.

Робота [6] присвячена вирішенню завдання розробки алгоритмів, апаратно-програмних систем та інструментальних засобів для формування управління автоматичним рухом маневреного мобільного робота в умовах обмеженого простору. Однак основною не вирішеною проблемою залишається відсутність засобу керування рухом та засобу звітування про прогнозований стан, що є складовими частинами ефективної системи управління робототехнічними комплексами.

Стаття [7] присвячена дослідженню прогнозування розвитку та вимог до розвитку мобільної роботизованої системи. Розглянуто проблеми розробки та розподілу мобільних роботизованих систем у сферах ризику для здоров'я та життя людини, етапи проектування мобільної роботизованої системи. У статті розглядається апаратний серійний міні-трактор. Пропонуються системи та блоки, які будуть включені до комплексу як компоненти. Однією з головних цільових функцій проектування є забезпечення доступності продукту. Проте не вирішеною проблемою залишається розробка апаратного та програмного забезпечення для мобільної роботизованої системи.

У роботі [8] розглядаються зусилля європейського проекту ICARUS щодо розвитку безпілотного пошуку і рятувальних робіт за допомогою наземних апаратів (UGV). Застосування роботизованих комплексів UGV дозволяє збирати керів-

нику ліквідації НС комплексну та інтегровану інформацію для підвищення ситуативної обізнаності про НС, а також дистанційно виконувати роботи з порятунку людських життів. Комплекси UGV мають можливість до індивідуальної або спільної навігації, працювати в автономному та напівавтономному режимі, а також виконання вказівок від базової станція. Однак технічне виконання комплексу UGV не дозволяє його застосування при аваріях на об'єктах, що експлуатують чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини.

Питанням автономних систем, в яких оператор лише вказує кінцеві та проміжні цілі, а саме автономної навігації робота присвячена робота [9]. В роботі також розглядаються завдання, які можуть вирішуватися робототехнічними комплексами як в мирний так і в воєнний час та приведена їх класифікація, а також сформульовані загальні проблеми і перспективи у сфері розвитку робототехніки. Однак приклади мобільних роботів, що пропонуються до застосування мають низький рівень інтелектуалізації та є по суті дистанційно-керованими зразками, які вимагають стійкого зв'язку з оператором. Тобто наявний значний доробок в галузі фундаментальних і пошукових досліджень з різних проблем штучного інтелекту недостатньо реалізований в реальних розробках.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність ефективної системи управління робототехнічними комплексами в автономному та дистанційному режимах під час ліквідації наслідків НС як в цілому, так і на потенційно небезпечних об'єктах та об'єктах перевезення небезпечних вантажів зокрема.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка алгоритмів управління робототехнічними комплексами під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

– розробити алгоритм управління робототехнічним комплексом під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини;

– розробити траєкторію руху робототехнічного комплексу при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини.

4. Розробка алгоритму управління робототехнічним комплексом при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

Робототехнічний комплекс – це сукупність програмно-алгоритмічних і апаратних рішень, що забезпечують комплексну автоматизацію виконання групи поставлених завдань. Оснащення підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту такими комплексами дає можливість мінімізації залучення особового складу до аварійно-рятувальних чи інших невідкладних робіт у зоні впливу небезпечних хімічних, радіоактивних чи вибухонебезпечних речовин. Однак застосування таких комплексів потребує ефективної системи їх управління для коректної та швидкої роботи.

Управління становищем, зіткненням і зусиллям маніпуляційного робота, засновані на робастних сервосистемах.

Робастна система дозволяє синтезувати реакцію на вхідні команду і характеристики замкнутого контуру цілком незалежно. Конфігурація сервосистеми наступна: $P(s)$ – керований об'єкт і $r, u, y, d, i \xi$ – еталонна команда, вхідний сигнал управління, вихід, невдоволення і шуми сенсора відповідно. Контролери $C_A(s)$ і $C_B(s)$ синтезовані як

$$C_A(s) = \frac{1}{P_n(s)} \frac{Q(s)}{1 - Q(s)}, \quad (1)$$

та

$$C_B(s) = \frac{G_r(s)}{1 - G_r(s)} \frac{1}{P_n(s)} \frac{1}{1 - Q(s)}, \quad (2)$$

де $P_n(s)$ – номінальна модель об'єкта $P(s)$ і $G_r(s)$ – задана командна реакція. У запропонованому підході $Q(s)$ є найбільш істотним параметром для того, щоб визначити робастність і характеристики подавлення невдоволення.

В даному випадку, при параметризації $C_A(s)$ і $C_B(s)$ необхідне введення деяких обмежень на $G_r(s)$ і $Q(s)$.

Де

$$G_s = \frac{G_r(s)}{1 - G_r(s)} \frac{1}{P_n(s)} \quad (3)$$

При відсутності варіацій параметрів і невдоволень, помилка $e = u'$ -и дорівнює 0. Тоді реакція на командний вхід збігається з певною характеристикою реакції $G_r(s)$ незалежно від параметра $Q(s)$. Коли існують варіації параметрів або невдоволення, то $e \neq 0$ і помилка зводиться до нуля за допомогою контуру зворотного зв'язку з $Q(s)$.

Система управління рухом включає в себе модель імпедансу, зворотну кінематику, позиційний контролер, маніпулятор, систему управління траєкторією, сенсор зусилля.

У роботі пропонується новий силовий контролер, який має дві явні особливості. По-перше, запропонований силовий контролер має робастну структуру сервосистеми. Коли ведеться управління зусиллям реакції від середовища, то водночас контролюється стійкість і збереження досить високої швидкодії. Це виявляється можливим, якщо відомі параметри середовища. Однак в більшості випадків досить важко отримати точну модель середовища. У запропонованому силовому контролері варіації параметрів в середовищі придушуються в сенсі функції чутливості.

По-друге, управління зусиллям ведеться через положення. Запропонований силовий контролер включає систему управління траєкторією. Силовий контролер усуває позиційну команду, коли реалізує задане зусилля. За допомогою додавання цієї команди до команди про початкову траєкторію, дуже легко може бути реалізовано також гібридне управління.

Запропонована система силового управління включає в себе зворотну кінематику, позиційний контролер, маніпулятор, систему управління, силовий контролер.

Силові контролери C_A^f і C_B^f параметризовані тим же самим чином як і позиційна сервосистема

$$C_A^f(s) = \frac{1Q^f(s)}{P_n^f(s)1 - Q^f(s)}, \quad (4)$$

$$C_B^f(S) = \frac{G_r^f(S)}{1 - G_r^f(S)} \frac{1}{P_n^f(S)} \frac{1}{1 - Q^f(S)}, \quad (5)$$

номінальна модель середовища складається з комбінації пружини і демпфера, тобто

$$P_n^f(S) = D_{en^s} + K_{en}, \quad (6)$$

$$G_r^f(S) = \frac{1}{\tau_r^f S + 1}, \quad (7)$$

$$Q^f(S) = \frac{2\tau_d^f S + 1}{(\tau_d^f S)^2 + 2\tau_d^f S + 1}, \quad (8)$$

де

$$\tau_r^f \gg \tau_d^f.$$

Запропонована схема системи управління при зіткненні є модифікованою системою силового управління. Контролер $C_B^f(S)$ в вихідному силовому контролері розділений на дві частини $C_{B1}^f(S)$ і $C_{B2}^f(S)$, де

$$C_{B1}^f(S) = \frac{G_r^f(S)}{1 - G_r^f(S)P_n^f(S)}, \quad (9)$$

$$C_{B2}^f(S) = \frac{1}{1 - Q^f(S)}. \quad (10)$$

Тут дається попереджувальний вхід x_{col} на контролер який розглядає контактну швидкість

$$F = P_n^f(S)x_f^{ref}. \quad (11)$$

Для управління зіткненням використовується тільки $C_{v(S)}$. Тут дається попереджувальний вхід x_{col} на контролер який розглядає контактну швидкість v_0 задане зусилля F_d і жорсткість середовища K_{en} як

$$x_f^{ref} = x_{col} = C_{col}(v_0, F_d, K_{en}) = \frac{1}{\tau_{col}^s + 1} \frac{F_d}{K_{en}}, \quad (12)$$

де

$$\tau_{col} = \frac{F_d}{K_{en} v_0} \quad (13)$$

x_{col} – задовольняє умовам: 1)- $x_{col}(0) = v_0$; 2)- $x_{col}(\infty) = F_d / K_{en}$.

Вибираємо $K_{en} = \max/K_e$ так, щоб силова реакція не була перерегульована. Перехідна характеристика залежить від вільного параметра $Q^f(s)$, якщо змінюється середовище. У загальному випадку, якщо $Q^f(s)$ має більш високу робастність. Перехідні характеристики однак можуть стати більш коливальними.

5. Розробка траєкторії руху робототехнічного комплексу при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

З метою подальшої верифікації алгоритму управління робототехнічним комплексом необхідна розробка та планування траєкторії його руху при ліквідації наслідків НС. Це впливає з новизни і складності методів управління рухом за присутності сенсорних перешкод. Головною проблемою є налагодження не програм, а алгоритмів перетворення сенсорних даних і прийняття поведінкових рішень. Розробку траєкторії руху неможливо здійснити без розуміння причин невірної роботи алгоритмів управління. Для цього необхідне розуміння основних тактико-технічних характеристик робототехнічного комплексу.

Проведені наукові дослідження, а також вивчення вітчизняного і зарубіжного досвіду застосування робототехнічних комплексів [10] визначають наступні якісні та кількісні значення основних тактико-технічних вимог.

Вимоги за призначенням:

1. Дальність радіо- і телеуправління з захистом від перешкод – до 2000 м (в умовах прямої радіовидимості з частотою 420-440 МГц – радіоканал і телесигнал – понад 1,2 ГГц).

2. Можливість контролю радіоактивного випромінювання, концентрацій хімічно небезпечних речовин, параметрів температури повітря та інших матеріалів з передачею інформації по радіоканалу.

3. Можливість дистанційного відбору проб повітря, ґрунту і води.

4. Можливість установки комплексу змінного технологічного обладнання.

Вимоги до живучості і стійкості до зовнішніх впливів:

1. Стійкість до радіоактивного випромінювання потужністю – до 10000 Р/год.

2. Інтегральна стійкість заміни блоків управління до радіоактивного випромінювання – не менше 106 Р.

3. Стійкість до впливу основних небезпечних хімічних речовин – до 5000 ГДК.

4. Стійкість до впливу теплового потоку – не менше 15 Вт/м² протягом не менше 0,5 год.

5. Стійкість до дезактивууючим речовин і розчинів.

6. Збереження працездатності в інтервалі температур від -50 °С до +50 °С.

Вимоги до надійності:

1. Середнє напрацювання на відмову – не менше 200 ч.

2. Середній ресурс – не менше 1000 год.

3. Термін служби – не менше 15 років.

Конструктивні вимоги:

1. Можливість дегазації і дезактивації.

2. Можливість транспортування усіма видами транспорту без обмеження дальності і швидкості.

3. Конструктивне виконання з умовою повної автономності.

4. Можливість дистанційної заміни технологічного обладнання за допомогою швидкоз'єднаних з'єднань.

Сучасні технології з конструювання моторно-трансмісійної групи і ходової частини дозволяють забезпечити пересування комплексу зі максимальними швидкостями: на дорогах з твердим покриттям 60-70 км/год, по пересіченій місцевості 25-35 км/год. Необхідно відзначити, що зазначені вище значення швидкості обмежені низкою факторів, наприклад дальністю видимості в різних умовах (географічних, топографічних, фізичних, метеорологічних), а також можливостями системи дистанційного управління.

Застосування алгоритму управління робототехнічним комплексом під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, сформульовані якісні та кількісні значення основних тактико-технічних вимог до робототехнічних комплексів, а також вивчення вітчизняного і зарубіжного досвіду застосування мобільних роботів дозволили розробити загальну структурну схему робототехнічного комплексу для ліквідації наслідків НС (рис. 1).

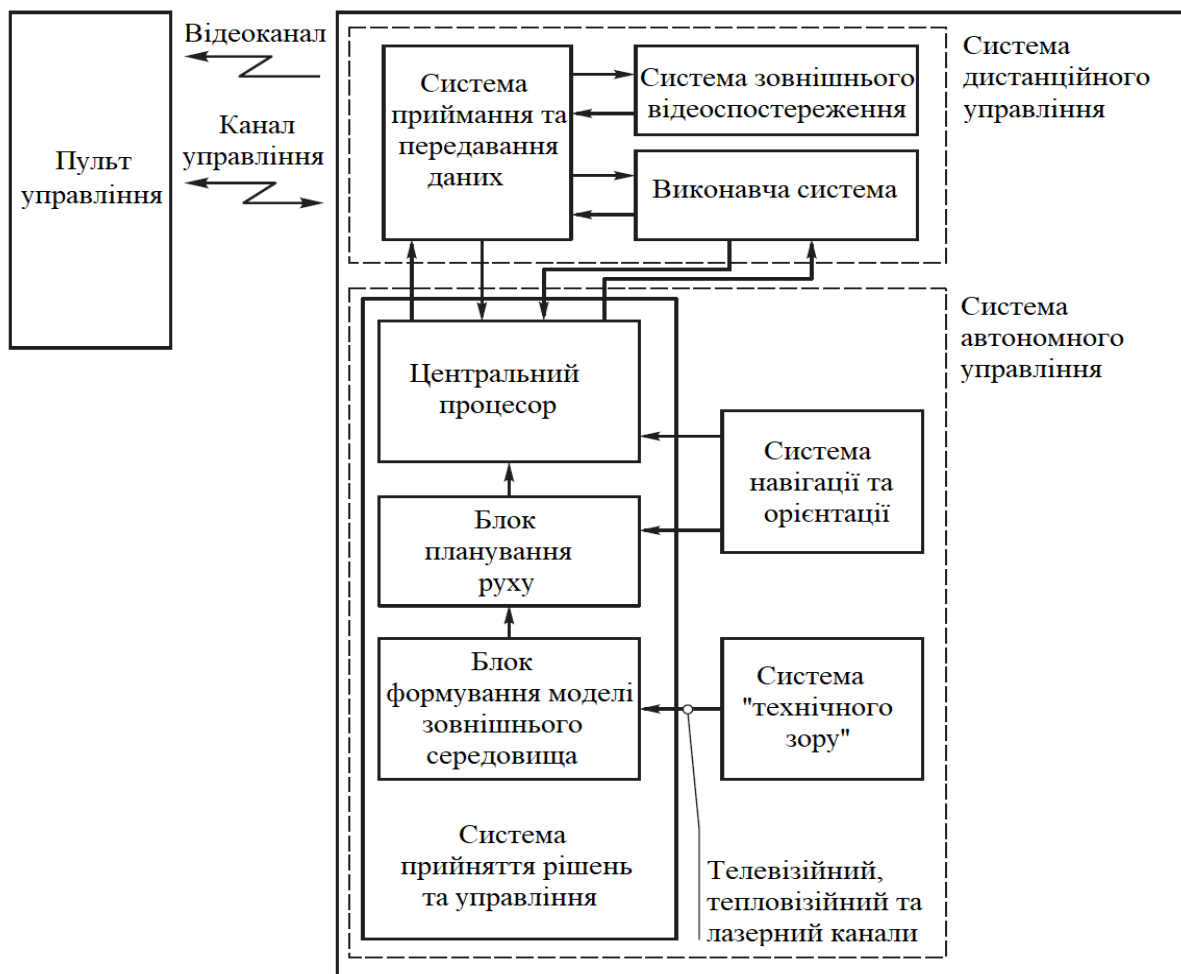


Рис. 1. Загальна структурна схема робототехнічного комплексу ліквідації наслідків НС

Траєкторію руху робототехнічного комплексу доцільно планувати для проведення попередньої розвідки в зоні умовної НС [5]. Це дозволяє з однієї сторони оперативно уточнювати картографічні дані, а з іншого – з урахуванням отриманої інформації планувати в подальшій роботі оптимальні траєкторії руху, підвищуючи тим самим ефективність використання комплексу при розв'язку завдань з ліквідації наслідків НС.

При проектуванні траєкторії руху було застосовано наступні алгоритми з ха-
civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-33-15

раактерними для них умовами та обмеженнями: алгоритм на основі уявлень про траєкторію руху у вигляді орієнтованого ациклічного графа; алгоритм знаходження K найкоротших шляхів між двома заданими вершинами в орієнтованому ациклічному графі; алгоритм призначення ваг вершинам зазначеного графа з урахуванням габаритних розмірів і вимог до мінімізації енергоспоживання. Вихідними даними для її реалізації є:

- картографічні дані;
- дані, отримані із безпілотних літальних засобів;
- кількість M і масогабаритні показники (ширина $l_{\text{Ш РТК}i}$ висота $l_{\text{В РТК}i}$ ($i=1, \dots, M$) робототехнічних комплексів, що плануються до застосування.

Крок 1. Формування на основі вихідних даних графа $G(A, B)$ тактичних траєкторій руху. При цьому вершинам графа $A=\{a_i\}$, $i=1, \dots, N$, ставляться у відповідність місця зміни траєкторії руху і у вигляді координат $\{x_i, y_i\}$ задаються їхні географічні місця розташування, а ребрам B – ділянки шляху руху між відповідними вузлами (при наявності такого шляху) і їх конфігурація. Відхилення тактичної траєкторії від глобальної пов'язане з наявністю завалів і важко прохідних ділянок. У якості параметрів конфігурації ділянок шляхи руху виступають:

- довжина l_d ділянки;
- мінімальна ширина $l_{\text{Ш}}$ «коридора», необхідного для руху комплексу на даній ділянці;
- мінімальна висота $l_{\text{В}}$ «коридора», необхідного для руху комплексу на даній ділянці.

Крок 2. Вибір для проведення подальших розрахунків $K=M$ у припущенні, що для виконання робіт з ліквідації наслідків НС (розчищення завалу, гасіння пожежі, пошуку постраждалого та ін.), запланованих до застосування комплексів будуть направлятися одночасно.

Крок 3. Знаходження K найкоротших шляхів між початковою й кінцевою вершинами графа $G(A, B)$. У якості початкової вершини обирається місце «запуску» комплексу, у якості кінцевої – ділянка майбутніх робіт, а в якості ваг ребер – $l=l_d$.

Крок 4. Перетворення графа $G(A, B)$ в $G'(A, B)$, що містить тільки K найкоротших шляхів, отриманих на попередньому кроці.

Крок 5. Знаходження K' найкоротших шляхів між початковою й кінцевою вершинами графа $G'(A, B)$. При цьому в якості ваг ребер обирається величина $l = \begin{cases} 1, & \text{якщо } l_{\text{Ш}} > \max(l_{\text{Ш РТК}i}); \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

Крок 6. Якщо $K' < M$, то $K=K+1$ і перехід кроку 2; а якщо ні, то перехід до наступного кроку.

Крок 7. Перетворення графа $G'(A, B)$ в $G''(A, B)$, що містить тільки K' найкоротших шляхів, отриманих на кроці 5.

Крок 8. Знаходження K'' найкоротших шляхів між початковою й кінцевою вершинами графа $G''(A, B)$. При цьому в якості ваг ребер обирається величина $l = \begin{cases} 1, & \text{якщо } l_{\text{В}} > \max(l_{\text{В РТК}i}); \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

Крок 9. Якщо $K'' < M$, то $K=K+1$ і перехід до кроку 2; якщо ні, то перехід до наступного кроку.

Крок 10. Якщо число найкоротших шляхів $K'' > M$, то вибір в якості траєкторії руху запланованих до застосування комплексів перших M шляхів.

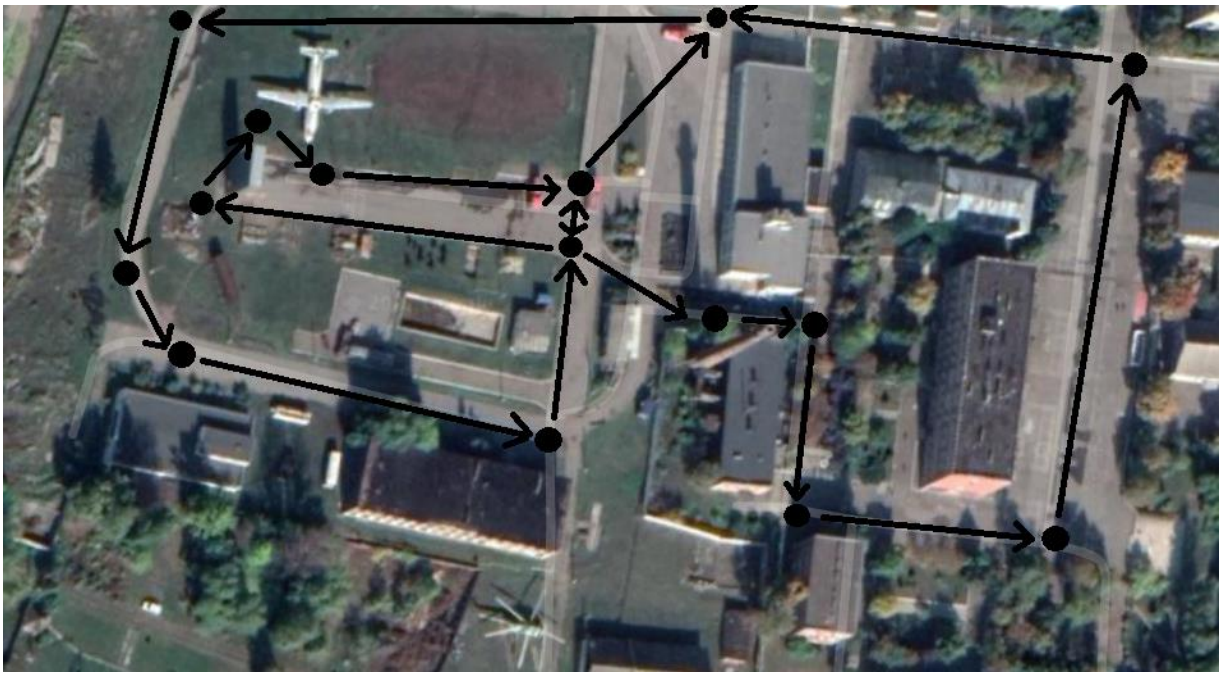


Рис. 2. Планування траєкторії руху робототехнічних комплексів при проведенні попередньої розвідки в зоні НС

6. Обговорення результатів розробки та застосування алгоритмів управління робототехнічними комплексами

В результаті проведеного дослідження було досягнуто поставленої мети, а саме: розроблено та застосовано алгоритм управління робототехнічними комплексами під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини. Вирішення поставленої мети відбувалося шляхом застосування моделі імпедансу та зворотної кінематики в системі управління рухом, що дозволяє робототехнічному комплексу, за умови підтримання $F=0$, відстежувати початкове положення траєкторії x_d , якщо ж $F \neq 0$ через контакт із середовищем, комплекс рухається по поверхні об'єкта. Ця система містить ознаки, властиві механічному імпедансному управлінню. Коли ми вважаємо x_d постійним, то вона переходить в чисто імпедансний контролер. Модель віртуального механічного імпедансу представляє зусилля F і вона є зовнішня сила і M_c , D_c , K_c є матриці віртуальної інерції, в'язкості і пружинного коефіцієнта відповідно. Ці матриці регулюються таким чином, щоб маніпулятор мав заданий механічний імпеданс. Еталонний стан x_c формується вимірним зусиллям і моделлю імпедансу і додається до початкового командного положення x_d , T_6 є матриця, використана для гомогенних перетворень для того, щоб скорегувати напрямок сенсора зусилля.

Позитивним моментом проведеного дослідження є застосування нового силового контролера в системі управління рухом робототехнічного комплексу, що дає дві явні переваги: по-перше, він має робастну структуру сервосистеми, тобто коли ведеться управління зусиллям реакції від середовища, то водночас контролюється стійкість і збереження досить високої швидкодії; по-друге, управління зусиллям ведеться через положення, тобто запропонований силовий контролер включає систему управління траєкторією.

Аналізуючи реалізацію алгоритму управління робототехнічним комплексом під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (розділ 5), а конкретніше заг-

льну структурну схему робототехнічного комплексу ліквідації наслідків НС (рис. 1), слід зазначити, що найважливішою складовою є система технічного зору, так як у багатьох випадках телевізійної і навіть стереотелевізійної інформації виявляється недостатньо для ефективного аналізу та оцінки оперативної обстановки. Крім того, для ефективного управління комплексом в особливо складних умовах функціонування необхідний огляд робочої зони з різних позицій. Технічна реалізація запропонованої структурної схеми робототехнічного комплексу ліквідації наслідків НС дозволяє надходження такої інформації до оператора в формі, що забезпечує тривимірне моделювання робочої зони з можливістю оперативного розрахунку і планування дій в умовах недетермінованої обстановки при дистанційному режимі роботи комплексу. Крім того реалізація запропонованої схеми дозволяє обробляти дану інформацію системою прийняття рішень та управління (рис. 1), що забезпечує високоточні навігацію і позиціонування робототехнічного комплексу при роботі в автономному режимі і виконанні складних технологічних операцій у важкодоступних місцях, будівлях і приміщеннях без прив'язки до супутникових навігаційних систем, а також при русі в умовах складної пересіченої місцевості.

Результатом реалізації запропонованого у розділі 5 алгоритму є траєкторії руху (рис. 2), оптимальні з погляду проходження по них мінімальної відстані запланованим до застосування робототехнічним комплексом при проведенні попередньої розвідки в зоні НС. Розв'язки запропонованих залежностей враховують габаритні розміри робототехнічних комплексів (що суттєво впливають на процес транспортування в умовах завалів) і вимоги до мінімізації їх енергоспоживання. Кількість комплексів M залежить від різновиду майбутніх робіт з ліквідації наслідків НС і вимагає обґрунтування в кожному конкретному випадку. Аналіз алгоритму управління робототехнічними комплексами під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій показав, що у випадку відсутності K найкоротших шляхів (уже на 3 кроці запропонованого алгоритму) необхідно змінити стратегію застосування робототехнічних комплексів, а саме зменшити кількість маршрутів руху, та сформувати траєкторію їх руху «один за одним».

7. Висновки

1. Розроблено алгоритм управління робототехнічним комплексом під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини. Запропонований алгоритм дозволяє синтезувати реакцію на входні команди і характеристики замкнутого контуру цілком незалежно. У роботі пропонується новий силовий контролер, який має дві явні переваги: по-перше, він має робастну структуру сервосистеми, тобто коли ведеться управління зусиллям реакції від середовища, то водночас контролюється стійкість і збереження досить високої швидкодії; по-друге, управління зусиллям ведеться через положення, тобто запропонований силовий контролер включає систему управління траєкторією. Вирішення поставленої мети відбувалося шляхом застосування моделі імпедансу та зворотної кінематики в системі управління рухом, що дозволяє робототехнічному комплексу, за умови підтримання $F=0$, відстежувати початкове положення траєкторії x_d , якщо ж $F \neq 0$ через контакт із середовищем, комплекс рухається по поверхні об'єкта.

2. З метою подальшої верифікації алгоритму управління робототехнічним

комплексом при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в роботі сформульовано якісні та кількісні значення основних тактико-технічних характеристик робототехнічного комплексу, а саме: дальність радіо- і телеуправління з захистом від перешкод – до 2000 м з частотою 420-440 МГц – радіоканал і телесигнал – понад 1,2 ГГц; стійкість до радіоактивного випромінювання потужністю – до 10000 Р/год; стійкість до впливу основних небезпечних хімічних речовин – до 5000 ГДК; стійкість до впливу теплового потоку – не менше 15 Вт/м² протягом не менше 0,5 год; максимальна швидкість пересування на дорогах з твердим покриттям 60-70 км/год, по пересіченій місцевості 25-35 км/год. Застосування алгоритму управління робототехнічним комплексом під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, сформульовані якісні та кількісні значення основних тактико-технічних вимог до робототехнічних комплексів, а також вивчення вітчизняного і зарубіжного досвіду застосування мобільних роботів дозволили розробити загальну структурну схему робототехнічного комплексу для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. В свою чергу все вище перераховане дозволило розробити траєкторію руху робототехнічного комплексу при проведенні попередньої розвідки в зоні умовної надзвичайної ситуації. При проектуванні траєкторії руху було застосовано наступні алгоритми з характерними для них умовами та обмеженнями: алгоритм на основі уявлень про траєкторію руху у вигляді орієнтованого ациклічного графа; алгоритм знаходження К найкоротших шляхів між двома заданими вершинами в орієнтованому ациклічному графі; алгоритм призначення ваг вершинам зазначеного графа з урахуванням габаритних розмірів і вимог до мінімізації енергоспоживання.

Подальші дослідження планується присвятити розробці натурального зразка робототехнічного комплексу для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, що виникають на об'єктах, на яких експлуатуються чи транспортують небезпечні хімічні, радіоактивні чи вибухонебезпечні речовини.

Література

1. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Taraduda D. Physical Features of Pollutants Spread in the Air During the Emergency at NPPs // Nuclear and Radiation Safety. 2019. V. 4(84). P. 81–91. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11)
2. Offerman W. E. How firefighters can train for hazmat transport incidents. URL: <https://www.firerescue1.com/community-awareness/articles/how-firefighters-can-train-for-hazmat-transport-incident-Eet0xEQwXiXiKsVV> (дата звернення: 02.02.2021).
3. Buts Y. V., Kraynyuk E. V., Kozodoy D. S., Barbashin V. V. Evaluation of emergency events at the transportation of dangerous goods in the context of the technogenic load in regions // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. 2018. V. 3(75). P. 27–35. <https://doi.org/10.15802/stp2018/134347>
4. Popov O., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Pomaza-Ponomarenko A. Emergencies at Potentially Dangerous Objects Causing Atmosphere Pollution: Peculiarities of Chemically Hazardous Substances Migration // In: Babak V., Isaienko V., Zaporozhets A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. V. 298. P. 151–163. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_10

5. Motienko A. I. Planning tactical motion trajectories of automated robotic means during disaster relief // Scientific Statements: Series Economics. Informatics. 2016. № 2(223). V. 37. P. 139–143.

6. Newman W. S. Mobile-Robot Motion Control // A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. September 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315152691-13>

7. Zhukabayeva T., Oralbekova Z., Zhartybayeva M., Zhumadillayeva A., Adamova A. Prospects of Development of Technologies in the Field of Robotics and the Stages of Design of Mobile Robotic Complex // 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS). Malaysia 24-27 Aug. 2015. <https://doi.org/10.1109/ICITCS.2015.7293010>

8. De Cubber G., Doroftei D., Serrano D., Chintamani K., Sabino R. Stephane Ourevitch Search and rescue robots developed by the european icarus project // International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Sweden 21-26 Oct. 2013. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2013.6719323>

9. Рубцов И. В., Бошляков А. А., Лапшов В. С., Машков К. Ю., Носков В. П. Проблемы и перспективы развития мобильной робототехники военного назначения. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-razvitiya-mobilnoy-robototekniki-voennogo-naznacheniya/viewer> (дата звернення: 03.02.2021).

10. Ovchinnikov V., Mingaleev S., Zhestkova S. Prospects of Robotic Complexes Development for Solving Problems of Unified Emergency Prevention and Response State System // Civil Security Technology. 2018. V. 15. № 3(57). P. 4–8.

V. Sobyna, PhD, Associate Professor, Head of Department

D. Taraduda, PhD, Deputy Head of Department

D. Sokolov, PhD, Associate Professor of the Department

M. Dement, PhD, Associate Professor of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ON THE ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF EMERGENCIES WITH THE HELP OF ROBOTICS COMPLEXES

An algorithm for controlling the robotic complex during the elimination of the consequences of emergencies that occur at facilities where hazardous chemicals, radioactive or explosive substances are exploited or transported has been developed. The proposed algorithm allows you to synthesize the response to input commands and the characteristics of a closed loop completely independently. The paper proposes a new power controller, which has two obvious advantages: first, it has a robust structure of the servo system, ie when controlling the reaction force from the environment, it also controls the stability and maintaining a fairly high speed; secondly, the force is controlled through the position, ie the proposed power controller includes a trajectory control system. The goal was solved by applying the model of impedance and inverse kinematics in the motion control system. In order to further verify the algorithm of control of the robotic complex in the aftermath of emergencies in the work formulated qualitative and quantitative values of the main tactical and technical characteristics of the robotic complex, such as: range of radio and TV control, frequency of radio and TV channels, maximum radioactive radiation power complex, the maximum concentration of basic hazardous chemicals in the area of operation of the complex, the maximum heat flux in the area of operation of the complex and the time of its operation in such conditions, as well as the maximum speed of the complex. Based on the study of domestic and foreign experience in the use of mobile robots in the work developed a general structural diagram of the robotic complex to eliminate the consequences of emergencies. The trajectory of the robotics complex during preliminary reconnaissance in the zone of conditional emergency has also been developed. When designing the trajectory of motion, the following algorithms were used with their characteristic conditions and constraints: an algorithm based on representations of the trajectory of motion in the form of an oriented acyclic graph;

algorithm for finding K the shortest paths between two given vertices in an oriented acyclic graph; algorithm for assigning scales to the vertices of the specified graph, taking into account the overall dimensions and requirements for minimizing energy consumption. Further research is planned on the development of a full-scale model of a robotic complex to eliminate the consequences of emergencies that occur at facilities where hazardous chemicals, radioactive or explosive substances are exploited or transported.

Keywords: emergency situation, potentially dangerous object, radiation- chemical-hazardous or explosive substance, robotics complexes, control system

References

1. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D. (2019). Physical Features of Pollutants Spread in the Air During the Emergency at NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 4(84), 81–91. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11)
2. Offerman, W. E. (2016). How firefighters can train for hazmat transport incidents. Retrieved from <https://www.firerescue1.com/community-awareness/articles/how-firefighters-can-train-for-hazmat-transport-incident-Eet0xEQwXiXiKsVV/>
3. Buts, Y. V., Kraynyuk, E. V., Kozodoy, D. S., Barbashin, V. V. (2018). Evaluation of emergency events at the transportation of dangerous goods in the context of the technogenic load in regions. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 3(75), 27–35. <https://doi.org/10.15802/stp2018/134347>
4. Popov, O., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Pomaza-Ponomarenko, A. (2020). Emergencies at Potentially Dangerous Objects Causing Atmosphere Pollution: Peculiarities of Chemically Hazardous Substances Migration. *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*, 298, 151–163. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_10
5. Motienko, A. I. (2016). Planning tactical motion trajectories of automated robotic means during disaster relief. *Scientific Statements: Series Economics. Informatics*, 2(223), 37, 139–143.
6. Newman, W. S. (2017). Mobile-Robot Motion Control. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. <https://doi.org/10.1201/9781315152691-13>
7. Zhukabayeva, T., Oralbekova, Z., Zhartybayeva, M., Zhumadillayeva, A., Adamova, A. (2015). Prospects of Development of Technologies in the Field of Robotics and the Stages of Design of Mobile Robotic Complex. 5th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS), Malaysia 24-27 Aug. <https://doi.org/10.1109/ICITCS.2015.7293010>
8. De Cubber, G., Doroftei, D., Serrano, D., Chintamani, K., Sabino, R. (2013). Stephane Ourevitch Search and rescue robots developed by the european icarus project. International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Sweden 21-26 Oct. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2013.6719323>
9. Rubcov, I. V., Boshlyakov, A. A., Lapshov, V. S., Mashkov, K. YU., Noskov, V. P. (2015). Problemy i perspektivy razvitiya mobil'noj robototekhniki voennogo naznacheniya. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-razvitiya-mobilnoy-robototekhniki-voennogo-naznacheniya/viewer>
10. Ovchinnikov, V., Mingaleev, S., Zhestkova, S. (2018). Prospects of Robotic Complexes Development for Solving Problems of Unified Emergency Prevention and Response State System. *Civil Security Technology*, 15, 3(57), 4–8.

Надійшла до редколегії: 03.03.2021

Прийнята до друку: 07.04.2021