



УДК 629.7.615.3

**STRUCTURE OF THE CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS
MOBILE ROBOT OF VARIABLE CONFIGURATION**
**СТРУКТУРА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА
ЗМІНЮВАНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ**

Ashcherkova N.S. /Ащепкова Н.С.*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-1870-1062

*Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Gagarin Ave. 72, 49010**Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, пр. Гагаріна 72, 49010***Koshevoy N.D. /Кошовий М.Д.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф..**National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, st. Chkalov, 17, 61070**Національний аерокосмічний університет "ХАІ" ім. М. Жуковського,**Харків, вул. Чкалова, 17, 61070*

Анотація. У статті розглянуто дві конструкції АМР змінюваної конфігурації. Досліджено три режими керованого руху АМР змінюваної конфігурації. Визначено динамічні особливості об'єкту керування. Складено структурні схеми автоматичного та дистанційного адаптивного керування. При цьому система керування може миттєво реагувати на взаємозв'язок каналів керування, зміни зовнішньої обстановки й поточного стану об'єкту, зовнішні впливи для запобігання зіткненням із перешкодами й збереження працездатності АМР. Це дозволить забезпечити керованість, зберегти задану кутову орієнтацію в напрямках перпендикулярних напрямку руху та підвищити продуктивність роботи АМР.

Ключові слова: автономний мобільний робот, система керування, адаптивне керування.

Вступ.

Роботи і маніпулятори (М) були створені для виконання завдань у небезпечних або шкідливих для людини умовах. Усе частіше М використовуються у військових цілях [1, 2], у космосі [3, 4], у ядерній енергетиці [5], для подолання наслідків техногенних і природних катастроф [6]. Для робіт в екстремальних умовах, як правило, застосовуються дистанційно керовані роботи й М.

Розширення сфери застосування й підвищення складності завдань для сучасних автономних мобільних роботів (АМР) обумовлює наявність елементів конструкції, які рухаються відносно платформи робота. Прикладом таких елементів конструкції може бути маніпулятор, виконавчі органи спеціалізованого обладнання або рухливе устаткування: щуп, бур, ківш і т.п. [7, 8] При експлуатації АМР ці елементи переміщуються відносно платформи, змінюючи конфігурацію й геометрію мас динамічного об'єкта.

Аналіз літератури.

Наявність рухливої основи підвищує маневреність маніпуляційних АМР, розширює робочий простір і збільшує кількість припустимих конфігурацій маніпулятора, але знижує точність позиціонування схвату (навісного устаткування або інструменту). Динамічні процеси для АМР змінюваної конфігурації можна розділити на три режими руху траєкторії:



- 1) керування рухом АМР можна розбити на три етапи: планування маршруту, планування поточного фрагменту маршрутного завдання, реалізація маршрутного завдання [9]. Синтез закону керування плоским рухом робота є типовою задачею: відомо декілька методів стабілізації руху вздовж заданої траєкторії. керований рух платформи по заданому маршруту з „зачекованим” навісним обладнанням або маніпулятором;
- 2) виконання технологічних операцій навісним обладнанням або маніпулятором при зупиненій платформі;
- 3) навісне обладнання або маніпулятор виконує технологічні операції при керованому русі платформи.

Керований рух платформи з „зачекованим” маніпулятором досить добре досліджено для різних варіантів конструкції шасі. При реалізації цього режиму руху АМР – керований візок, який рухається вздовж траєкторії. При переміщенні АМР змінюваної конфігурації по заданому маршруту система керування повинна забезпечити мінімальне відхилення центру мас платформи від заданої

В [10] запропоновано метод керування динамічними об'єктами при якому сигнал командного вектору подається до блоку формування обмежень векторної функції відхилення від заданої траєкторії. Сигнал командного вектору залежить від суми вихідних сигналів з динамічного об'єкту керування й з блоку формування заданої траєкторії. При цьому сигнал командного вектору формується як розв'язок рівняння обмежень щодо шуканого командного вектору і його k перших похідних. Недоліком даного методу є застосування квадратичних критеріїв оптимальності, що приводить до зниження швидкодії системи керування.

В [11] розглянуто метод робастного керування багатомірним динамічним об'єктом, що полягає в оптимізації проходження об'єктом розрахованої траєкторії з підвищеними показниками точності при компенсації дії сил зовнішнього збурювання. Недоліком даного методу є зневага перехресним зв'язком каналів керування.

В [12] представлено алгоритм керування автономним мобільним роботом, який на етапі ідентифікації враховує недіагональність і нестационарність тензору інерції об'єкта в базовій системі координат. Недоліком є те, що система керування лише адаптується до інерційних особливостей динамічного об'єкта, як до зовнішніх збурень.

Запропоновані методи не можна застосувати для опису динаміки рухів маніпулятора відносно платформи АМР. При експлуатації АМР навісним обладнанням виконуються технологічні операції переміщення об'єкту маніпулювання (вантаж, інструмент, контрольно-вимірювальні прилади) за заданим законом руху [7]. Залежно від призначення АМР на різних ділянках траєкторії можуть змінюватися параметри навантаження: геометричні розміри, форма, розподіл мас. Таким чином, АМР змінюваної конфігурації є динамічним об'єктом з недіагональним і нестационарним тензором інерції [7]. Для дослідження динаміки такі АМР можна розглядати як M на рухливій основі або систему „носій та перенесене тіло”. Особливістю динаміки АМР змінюваної



конфігурації, як системи тіл, є:

- зміна положення центру мас системи при відносному русі маніпулятора,
- сумірність недиагональних і діагональних елементів тензору інерції, обчислених відносно осей базової системи координат, пов'язаної із центром мас платформи АМР;
- не співспрямованість головних центральних осей інерції з осями системи координат зв'язаної із платформою АМР.

Перелічені особливості динаміки системи обумовлюють перехресний зв'язок каналів керування за рахунок взаємного впливу динамічних параметрів об'єкту керування. Це призводить до виникнення „паразитних” збурюючих моментів і спричиняє втрату орієнтації АМР у вертикальних площинах. Втрата орієнтації або падіння АМР в робочій зоні з екстремальними умовами не лише приводить до неможливості виконання технологічних операцій і спричиняє матеріальні збитки. При транспортуванні радіаційних або вибухонебезпечних об'єктів падіння АМР може мати катастрофічні наслідки.

Таким чином, розробка структурної схеми адаптивного керування АМР змінюваної конфігурації є актуальною науково - прикладною задачею. Реалізація адаптивного методу керування АМР дозволить: мінімізувати відхилення центру мас динамічного об'єкта від траєкторії, зменшити енерговитратні й забезпечити задану кутову орієнтацію об'єкту керування в площинах перпендикулярних напрямку руху.

Основний текст.

Мета дослідження – розробка структури системи адаптивного керування АМР змінюваної конфігурації. Впровадження адаптивного керування дозволить: мінімізувати відхилення центру мас АМР змінюваної конфігурації від траєкторії, зменшити енерговитратні й забезпечити задану кутову орієнтацію об'єкту керування в напрямках перпендикулярних напрямку руху.

Об'єкт дослідження. У якості об'єкта дослідження розглядається клас динамічних об'єктів, для яких у базовій системі координат $C1X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$, пов'язаної із центром мас шасі, тензор інерції - недиагональний і нестационарний [7]. Прикладом таких об'єктів є: автономний мобільний робот з маніпулятором (рис. 1) [8], автономний мобільний робот з рухливими елементами конструкції (рис. 2) [8].

На рис.1 представлена схема конструкції АМР із маніпулятором. Конструкція складається з повнопривідного 4 – колісного шасі; антропоморфного маніпулятора складеного з диску, що обертається навколо вертикальної осі, та стрижневих ланок руки, з'єднаних ротаційними кінематичними парами п'ятого класу.

На рис.2 наведена схема конструкції АМР з рухливими елементами. Конструкція складається з повнопривідного 4 – колісного шасі, навісного обладнання (ківш, щуп, бур і т.п.), з'єднаних із платформою ротаційними кінематичними парами п'ятого класу й рухливих інформаційних пристроїв (камера, дозиметр, пожежний сповіщувач і т.п.) змонтованих на кільці, що обертається навколо вертикальної осі.

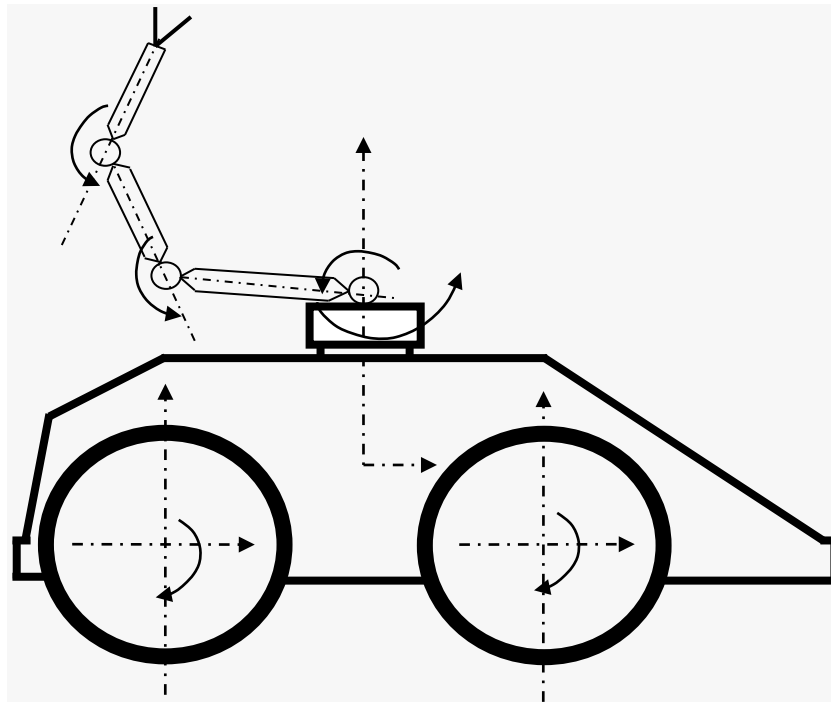


Рисунок 1 – Схема конструкції автономного мобільного роботу з маніпулятором

Джерело: [8]

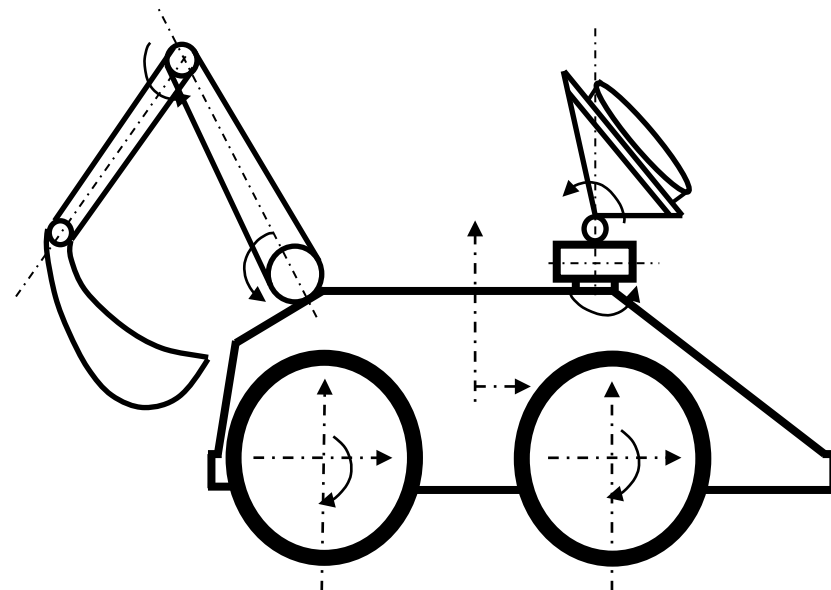


Рисунок 2 – Схема конструкції автономного мобільного роботу з рухливими елементами

Джерело: [8]

Метод розв'язання. Розробку системи керування АМР потрібно проводити на основі точної математичної моделі динаміки. Динамічна модель АМР змінюваної конфігурації повинна враховувати зовнішні збурювання, недіагональність і нестационарність тензору інерції, зсув положення центру мас, тертя в кінематичних парах, конструктивні обмеження і т.д. Умови експлуатації таких динамічних об'єктів найчастіше не тільки не відомі апіорно, але й можуть раптово мінятися в широкому діапазоні [5, 6, 8]. Причини невизначеності й нестационарності цих умов полягають:

- 1) у недоліку інформації про властивості зовнішнього середовища;



- 2) у технічних обмеженнях, природньому розкиді й дрейфі параметрів сенсорної й рухової систем об'єкта;
- 3) у виникненні перешкод і обчислювальних погрешностей у каналах зв'язку й керування.

Зовнішні збурення, наявність перешкод у робочій зоні, зміни параметрів навантаження, обмеження у кінематичних парах і приводах обумовлюють зміни динамічних параметрів АМР змінюваної конфігурації. Відомі алгоритми керування для подібних об'єктів дозволяють ефективно відпрацьовувати досить вузький діапазон зміни динамічних параметрів об'єкту. При розробці системи керування потрібно врахувати, що зміни параметрів АМР у процесі виконання технологічних операцій впливають на вагові коефіцієнти перехресного зв'язку каналів керування. Це обумовлює зниження ефективності керування по зворотному зв'язку.

АМР для роботи в екстремальних умовах передбачають автоматичне або дистанційне адаптивне керування. Структурну схему системи автоматичного адаптивного керування АМР змінюваної конфігурації наведено на рис. 3.

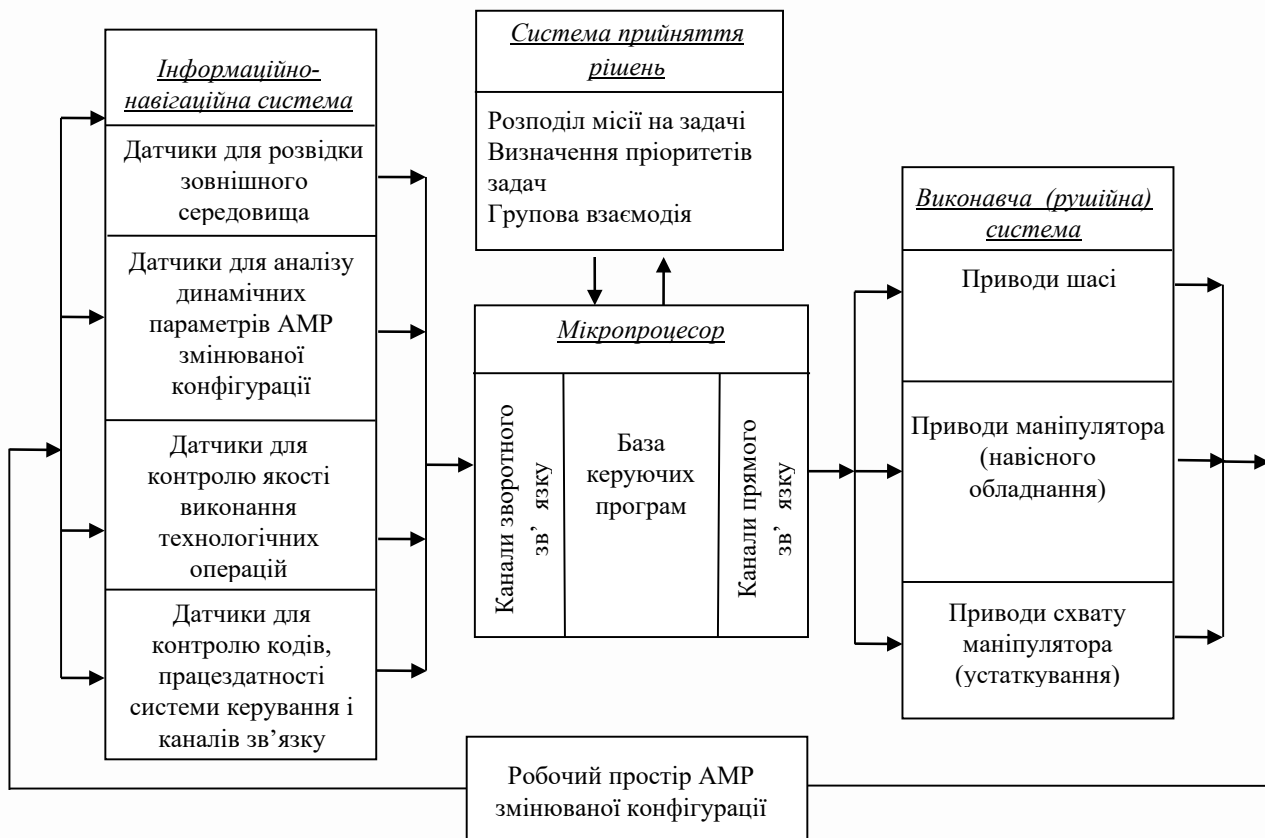


Рисунок 3 – Структурна схема системи автоматичного керування автономного мобільного роботу змінюваної конфігурації

Авт. розробка

При автоматичному адаптивному керуванні АМР діє автономно для виконання глобального завдання - місії. При цьому оцінка пріоритетності завдання, розподіл завдання місії на окремі задачі, розробка стратегії, групова взаємодія з АМР та БПЛА, аналіз оперативної обстановки, реакція на зовнішні збурення і т. п. здійснюється власною системою керування АМР. При



автоматичному адаптивному керуванні АМР доцільно використовувати роботи третього покоління. Система керування яких самостійно:

- будує модель зовнішнього середовища,
- визначає мету завдання і об'єкт маніпулювання,
- обирає необхідне устаткування для виконання технологічних операцій,
- обчислює координати точок для виконання технологічних операцій,
- виконує синтез оптимальної траєкторії до точки виконання технологічних операцій,
- здійснює генерацію керуючих команд для руху АМР вздовж оптимальної траєкторії та (або) для виконання технологічних операцій.

При автоматичному керуванні АМР реалізується адаптивне керування динамічним об'єктом без присутності людини-оператора. Для ефективного автоматичного керування у процесор системи керування необхідно завантажити мету місії, можливі стратегії досягнення мети, карту місцевості, область робочої зони, коди каналів зв'язку для можливої взаємодії з іншими АМР, БПЛА або фахівцями спеціальних підрозділів. Для забезпечення безперервного руху система керування робота повинна приймати рішення в реальному часі.

Структурну схему системи дистанційного адаптивного керування АМР змінюваної конфігурації наведено на рис. 4. При дистанційному адаптивному керуванні аналіз оперативної обстановки, визначення пріоритетів, розподіл місії на окремі задачі, вибір устаткування та синтез команд здійснюється у центрі керування і передається системі керування АМР по каналах зв'язку.

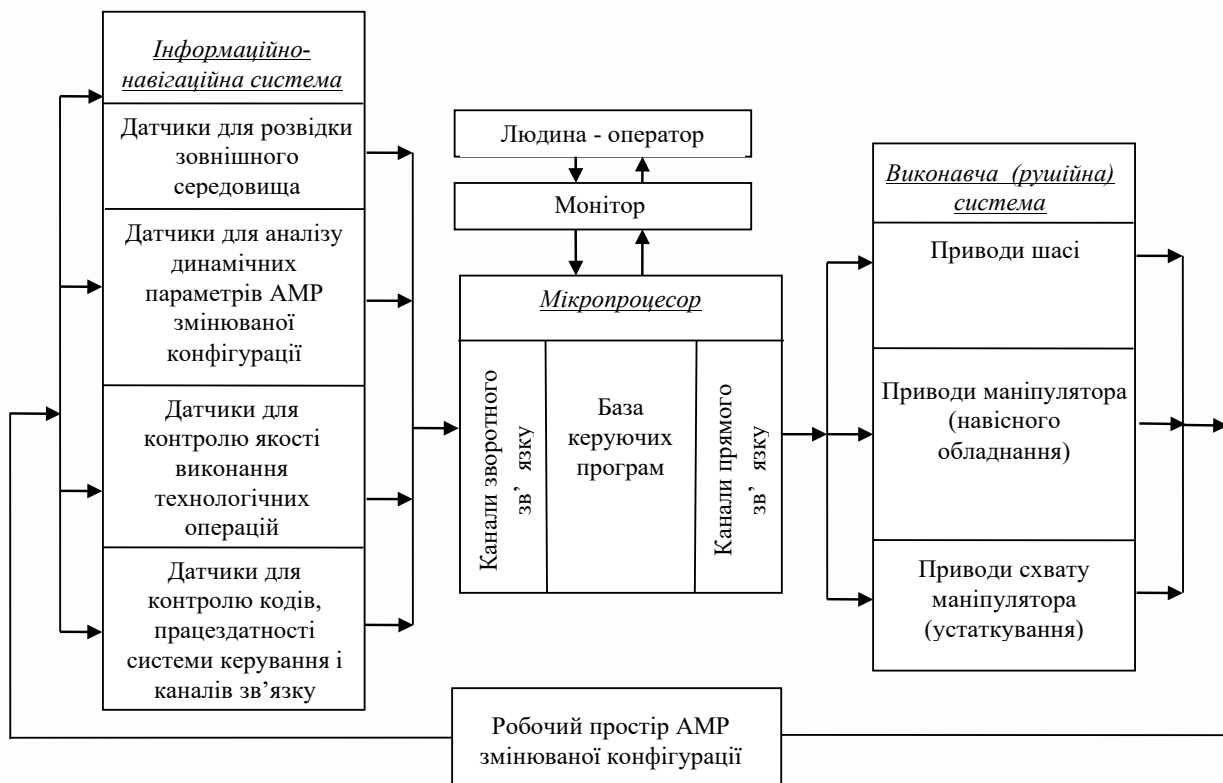


Рисунок 4 – Структурна схема системи дистанційного керування автономного мобільного роботу змінюваної конфігурації

Авт.розробка



При дистанційному керуванні основна частка керуючих програм завантажується у мікропроцесор до початку місії, а необхідна оперативна інформація може надаватись по каналах зв'язку під час виконання місії. Дистанційне керування може мати запізнювання та погану перешкодозахищеність. Це обмежує застосування дистанційного керування АМР при роботі в екстремальних умовах та при надзвичайних ситуаціях які потребують негайної реакції.

Під час руху динамічного об'єкту уздовж траєкторії критерієм оптимальності є мінімізація відхилення центру мас об'єкту від розрахованої траєкторії. Під час виконання технологічних операцій критерієм оптимальності буде якісний показник технологічного процесу (точність позиціонування, повторюваність руху інструменту і т.п.). На кожній ітерації алгоритму керування здійснюється адаптація до зовнішніх збурень, умов робочого простору, поточної конфігурації АМР, параметрів навантаження, помилок керуючих кодів і перешкод у каналах зв'язку. Застосування запропонованих структур системи керування АМР змінюваної конфігурації перетворює адаптивне керування в надзвичайно гнучкий інструмент організації цілеспрямованої поведінки робота в умовах невизначеності.

Висновки. Розглянуто керований рух АМР змінюваної конфігурації. Визначено динамічні особливості об'єкту керування. Складено структурні схеми автоматичного та дистанційного адаптивного керування. При цьому система керування може миттєво реагувати на взаємозв'язок каналів керування, зміни зовнішньої обстановки й поточного стану об'єкту, зовнішні впливи для запобігання зіткненням із перешкодами й збереження працездатності АМР. Це дозволить забезпечити керованість, зберегти задану кутову орієнтацію в напрямках перпендикулярних напрямку руху та підвищити продуктивність роботи АМР.

Література.

1. Лапота, А.В., Спасский, Б.А. (2020). Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения. Робототехника и техническая кибернетика, 8(1), 5 – 17. doi: 10.31776/RTSJ.8101
2. Цариченко, С.Г., Антохин, Е.А., Чернова, П.Д. и Дементей, В.П. (2020). Состояние и проблемы стандартизации и унификации наземных робототехнических комплексов военного назначения. Робототехника и техническая кибернетика, Vol. 8 (1), pp. 18–23. doi: 10.31776/RTSJ.8102.
3. Ермолов, И.Л., Хрипунов, С.П., Благодарящев, И.В. и Хрипунов, С.С. (2017). Типовая структурно-функциональная схема робототехнических комплексов военного назначения. Информационно-измерительные и управляющие системы, Vol. 15 (6), pp. 4-9. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29712433>
4. Kurfess, T.R. (2018). Robotics and Automation Handbook; CRC Press: Boca Raton, FL, USA; ISBN 978-1-4200-3973-3.
5. Siciliano B., Khatib O. (2016). Springer Handbook of Robotics; Springer: Heidelberg, Berlin,; ISBN 978-3-319-32552-1.



6. Barrett, L. (2020). Handbook of Robotics; Willford Press: Forest Hills, NY, USA; ISBN 978-1-68285-776-2.

7. Ashhepkova N. S. (2022). Analysis of inertia tensor of autonomous mobile robot/ N.S. Ashhepkova/ Technology Audit and Production Reserves. – Kharkiv. – February, 2022. – Vol.63. № 1-2. – P. 24 – 34. DOI:10.30890/2567-5273/.2021-15-02-066

8. Ащепкова Н. С. (2021). Управление динамическим объектом с недиагональным и нестационарным тензором инерции при движении вдоль траектории// Modern engineering and innovative technologies, Выпуск №18, Німеччина – декабрь, 2021. – № 1(5). – С. 35 – 44. DOI:10.30890/2567-5273/.2021-15-02

9. Петров В.Ф. (2012). Программно-аппаратный комплекс управления автономным движением мобильного робота / В.Ф. Петров, А.И. Терентьев, Ю.В. Блохин, В.В. Демьянов // Известия Тульского Государственного Университета. Серия: Технические науки. – Тула: ТулГУ. – 2012. - № 11 (2) – С. 143-148.

10. Способ управления динамическими объектами, патент RU2302028U1 от 27.06.2007 г., МПК G05B6/02, G05D1/00. Авторы: Винокуров В.В. (RU), Воробьев А.В. (RU), Куликов В.Е. (RU), Харьков В.П. (RU).

11. Спосіб робастного керування багатовимірним динамічним об'єктом, патент UA57100U от 10.02.2011 г., МПК G05B 11/01. Авторы: Тимченко В.Л. (UA), Кондратенко Ю.П. (UA), Кукліна К.О. (UA).

12. Ащепкова Н.С. (2020). Адаптивная система управления автономным мобильным роботом/ Н.С. Ащепкова, С.А. Ащепков // SCIENCE AND EDUCATION A NEW DIMENSION. Natural and Technical Sciences. VI(19), Issue: 181, 2020.- P. 20-30.

***Abstract.** Two constructions of AMP of variable configuration are considered. Three modes of controlled motion of AMR of variable configuration were investigated. The dynamic features of the control object are determined. Structural diagrams of automatic and remote adaptive control have been compiled. At the same time, the control system can instantly react to the interrelationship of control channels, changes in the external environment and the current state of the object, external influences to prevent collisions with obstacles and preserve the operational efficiency of the AMR. This will make it possible to ensure controllability, maintain the given angular orientation in directions perpendicular to the direction of movement and increase the performance of AMR work.*

***Key words:** autonomous mobile robot, control system, adaptive control.*

*Стаття підготовлена в рамках роботи за д/б темою № 0122 U 001326
«Науково- методичне забезпечення прикладних досліджень в механіці
механотронних систем» 2022-2024 р.р.*

Стаття відправлена: 15.12.2022 г.
© Ащепкова Н.С., Кошовий М.Д.