

TECHNICAL SCIENCES

Алгоритм адаптивного керування автономного мобільного робота

Н. С. Ащепкова

Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара
Corresponding author. E-mail: ashchepkovanatalya@gmail.com

Paper received 13.12.20; Accepted for publication 23.12.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-244VIII30-10>

Анотація. Розглядається завдання синтезу алгоритму адаптивного керування автономним мобільним роботом (АМР) із маніпулятором, який передбачає одночасне вивчення й оцінювання в реальному часі динамічних характеристик АМР (завдання ідентифікації) і визначення параметрів керування по отриманій моделі (завдання синтезу). Особливостями динаміки є недіагональність і нестационарність тензору інерції, зсув положення центру мас, конструктивні обмеження у приводах і т.д. В роботі представлено результати дослідження керованого руху мобільного робота з маніпулятором, визначено задачі системи керування, наведено структурну схему алгоритму адаптивного керування.

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

За даними Міжнародної федерації по робототехніці (IFR) в 2018 році у світі було продано більше 420 тис. промислових, понад 270 тис. професійних сервісних і 16,3 млн. персональних і розважальних роботів. Сьогодні робототехнічні комплекси широко застосовуються при роботі в небезпечних й шкідливих для людини умовах:

- виявлення й транспортування вибухонебезпечних предметів;
- роботи в умовах підвищеної радіації;
- догляд за пацієнтами в умовах пандемії;
- технологічні операції на виробництві при підвищеній концентрації шкідливих речовин (фарбування й нанесення покриттів);
- підводна прокладка силових кабелів і т.д.

Розширення сфери застосування та ускладнення завдань для сучасних автономних мобільних роботів (АМР) обумовлює наявність елементів конструкції, рухомих відносно платформи робота. Прикладом таких елементів конструкції може бути маніпулятор, виконавчі органи спеціалізованого обладнання або рухливе навісне устаткування: шуп, бур, ківш і т.п. [1] При експлуатації АМР ці елементи рухаються відносно платформи, змінюючи геометрію мас системи.

Системи керування роботів й маніпуляторів відносяться до класу нелінійних багатомірних систем зі змінною структурою з множиною входів і виходів. АМР з маніпулятором є складною механічною системою, яку можна вважати маніпулятором на рухливій основі. Ланки маніпулятора – перенесені тіла, платформа – несуче тіло [2]. При відносному русі елементів конструкції АМР змінюваної конфігурації його головні центральні осі інерції не спрямовані з осями системи координат зв'язаної з платформою АМР. В [3] здійснено аналіз тензору інерції АМР із маніпулятором при різній конфігурації їх взаємного положення при масі маніпулятора з вантажем до 20% маси платформи АМР. Результати досліджень наведені в [3] доводять, що значення відцентрових моментів інерції системи при відносному русі маніпулятора сумірні значенням осьових моментів інерції системи, навіть якщо маса рухомих елементів конструкції менша, ніж 10% маси платформи. Авторами в [3] установлена залежність

значень елементів тензора інерції АМР змінюваної конфігурації від значень узагальнених координат рухливих елементів конструкції. Крім того, визначена залежність значень елементів тензора інерції АМР змінюваної конфігурації від співвідношення маси платформи й маси рухливих елементів конструкції. Тому при синтезі алгоритмів керування тензор інерції такої системи потрібно приймати недіагональним і нестационарним.

Робот, як об'єкт керування, це - багатоканальна, багатозв'язна, суттєво нелінійна динамічна система. Дослідженнями динаміки й керування роботів займалися Є.І. Юревич, А.В. Тимофєєв, В.С. Яструбів, О.М. Філатов і інші. При переміщенні АМР змінюваної конфігурації по заданому маршруту система керування має забезпечити мінімальне відхилення центру мас платформи від заданої траєкторії. При цьому керуючі моменти направлені вздовж осей системи координат зв'язаної з платформою АМР [4]. Результати математичного моделювання та аналізу динаміки АМР змінюваної конфігурації наведені в [5] демонструють взаємозв'язок каналів керування обумовлений недіагональністю і нестационарністю тензору інерції. В [6] представлено модель трьох ланкового маніпулятора доповнену рівняннями динаміки електроприводів для кожного ступеня рухливості з врахуванням впливів нелінійностей і змін параметрів маніпулятора. На основі отриманої моделі запропоновано три алгоритми адаптивного керування на основі принципу зворотного зв'язку. При цьому на кожному кроці використовується інформація тільки в поточному значенні вектора стану маніпулятора, що значно зменшує обсяг обчислень. В [6] автор пропонує використовувати для маніпулятора алгоритми адаптивного керування в реальному часі, які не вимагають повного виміру вектора стану системи. Представлені алгоритми забезпечують системі керування маніпулятором адаптивні властивості стосовно змін навантаження.

Сучасні методи керування рухом маніпулятора по бажаній траєкторії, розділяються на шість напрямків [4, 7]: оптимальне керування, керування по обчислювальному моменту, керування по силовому моменту, гібридне керування, робастне керування, керування зі

змінною структурою. З аналізу літератури випливає, що відомі методи вимагають наявності точної моделі динаміки маніпулятора й не враховують зміни параметрів маніпулятора в процесі роботи. У результаті погіршується динаміка й демпфірування системи, обмежуються точність і швидкість позиціонування кінцевої ланки. Даних недоліків можна уникнути застосуванням керування адаптивного не лише до зовнішніх впливів але і до зміни параметрів маніпулятора в процесі роботи.

Актуальність роботи обумовлена тим, що успіхи в області теорії адаптивного керування й бурхливий розвиток мікропроцесорів створюють реальні передумови для розробки й широкого використання АМР з адаптивним керуванням і елементами штучного інтелекту.

Мета дослідження – розробка ефективного алгоритму адаптивного керування багатозв'язною і багатofункціональною системою «АМР з маніпулятором».

Сучасна практика керування рухливими об'єктами базується на поділі рухів і керуванні кожним компонентом руху окремим виконавчим механізмом. Сучасні методи динамічного керування електромеханічними об'єктами типу маніпуляторів здійснюють обмежену компенсацію змін моментів інерції й корисного навантаження, а також коефіцієнтів зв'язку між зчленуваннями, що приводить до зниження швидкості й точності співвідносної реакції. Методи нелінійного керування, наприклад, метод розрахункових моментів або метод нелінійного прямого зв'язку, звичайно вимагають досить точної динамічної моделі й обумовлюють використання складних алгоритмів керування в реальному часі.

На точність динамічної моделі АМР із маніпулятором впливають багато факторів: зовнішні збурювання, недиагональність і нестационарність тензору інерції, зсув положення центру мас, тертя, конструктивні обмеження і т.д. Відомі алгоритми керування для подібних об'єктів дозволяють ефективно відпрацьовувати досить вузький діапазон зміни параметрів об'єкта. Врахування широкої зміни параметрів вимагає адаптивного підходу при формуванні алгоритмів керування, відповідно, більш докладної моделі об'єкта. Одним з найбільш ефективних підходів до подолання цих труднощів, є створення нових адаптивних алгоритмів, які не вимагають апріорного точного знання параметрів динаміки робота й здатних працювати в заздалегідь невідомих умовах його функціонування.

Розглянемо керований рух АМР з врахуванням недиагональності тензора інерції якщо головні центральні осі інерції АМР змінюють орієнтацію відносно векторів керуючих моментів. Рух АМР змінюваної конфігурації характеризується швидкістю $\dot{\vec{v}}_0$ руху вздовж траєкторії полюса O_0 - центра мас системи й вектором кутової швидкості $\vec{\Omega}$:

$$\vec{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} \Omega_x = \dot{\varphi} - \dot{\psi} \cdot \sin \psi, \\ \Omega_y = \dot{\psi} \cdot \cos \varphi + \dot{\psi} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \psi, \\ \Omega_z = -\dot{\psi} \cdot \sin \varphi + \dot{\psi} \cdot \cos \psi \cdot \cos \varphi. \end{cases}$$

Схема конструкції АМР із маніпулятором наведена на рис.1. Конструкція складається з повнопривідної 4 – колісної платформи АМР, та маніпулятора складеного

з кільця, що обертається навколо вертикальної осі, та стрижневих ланок – руки, з'єднаних ротаційними кінематичними парами п'ятого класу.

Розглянемо процес експлуатації АМР оснащеного антропоморфним маніпулятором з чотирма ступенями рухливості. При переміщенні мобільного робота змінюваної конфігурації по заданому маршруту система керування має забезпечити мінімальне відхилення центру мас платформи від заданої траєкторії. При цьому керуючі моменти направлені вздовж осей системи координат зв'язаній з платформою автономного мобільного робота. При відносних рухах маніпулятора тензор інерції системи тіл в системі координат пов'язаній з платформою набуває недиагональності і нестационарності, що обумовлює взаємозв'язок каналів керування. Кількість керуючих впливів: під час переміщення траєкторією – чотири (на кожне колесо), під час роботи маніпулятора – чотири (на кожен узагальнену координату). Таким чином, система керування багатовимірною, зв'язок між каналами керування здійснюється за рахунок фізичних властивостей об'єкту керування.

Цикл роботи АМР можна розділити на декілька етапів:

- рух платформи АМР з точки старту S до точки фінішу F при нерухомому маніпуляторі з дотриманням вимог оптимальності (швидкодія, продуктивність або економічність, і т. п.);
- виконання технологічних операцій маніпулятором, навісним або інформаційним обладнанням при нерухомій платформі;
- повернення платформи АМР до точки старту S або рух до заздалегідь заданої кінцевої точки K при нерухомому маніпуляторі.

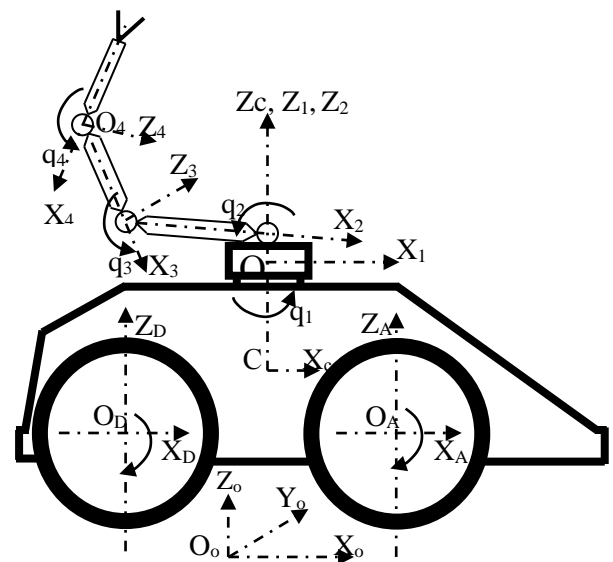


Рис. 1. Схема конструкції АМР з маніпулятором

На першому і третьому етапі роботи АМР являє собою візок з адаптивною системою керування, який рухається в наперед невизначених умовах зовнішнього середовища. Для забезпечення усталеного руху АМР з точки старту S до точки фінішу F при нерухомому маніпуляторі з дотриманням вимог оптимальності необхідно виконати математичне та імітаційне моделювання. Динаміку та керованість чотирьохколісного повнопривідного автономного мобільного робота детально

досліджено у [8]. Керуючі впливи – моменти прикладені до кожного колеса обумовлюють відхилення маніпулятора від початкового положення в наслідок недіагональності тензору інерції. При поверненні платформи АМР необхідно врахувати зміну розподілу мас конструкції відносно центра мас платформи обумовлену наявністю об'єктів маніпулювання, зразків ґрунту, зразків води і т.п. при нерухомому маніпуляторі.

На другому етапі роботи АМР можна розглядати як антропоморфний маніпулятор на рухливій основі. Моделювання взаємодії робот - зовнішнє середовище, у загальному виді містить:

- трансляцію завдання (визначення об'єкту, кількості і характеру перешкод, координат точок старту та фінішу, гранично допустимих значень параметрів руху й т. ін.);

- пошук додаткової інформації або інструментів до початку виконання завдання;

- виконання завдання (деякої макрозадачі, яка може складатися з великої кількості елементарних підзадач).

Ефективність керування маніпуляторами в значній мірі визначається методами навчання, застосованими алгоритмами й засобами адаптації. Керування схватом маніпулятора АМР здійснюється оператором дистанційно. Конструкцією передбачено три канали передачі даних (оптоволоконний дрiт, Wi-fi та захищений радіозв'язок). Корегування рухів та контроль результатів діяльності маніпулятора здійснюється за допомогою системи відеоспостереження.

Умови експлуатації АМР з маніпулятором найчас-

тіше не тільки не відомі апіорно, але й можуть непередбачено змінюватися в широкому діапазоні. Причини невизначеності й нестационарності цих умов полягають: 1) у недоліку інформації про властивості зовнішнього середовища; 2) у технічних обмеженнях, природному розкиді й дрейфі параметрів сенсорної й рухової систем робота; 3) у виникненні перешкод і обчислювальних погрішностей у каналах зв'язку й керування.

У зв'язку із цим розглядається постановка завдання синтезу алгоритму адаптивного керування АМР із маніпулятором, яка полягає в одночасному вивченні й оцінюванні в реальному часі динамічних характеристик АМР (завдання ідентифікації) і визначенні параметрів керування по отриманій моделі (завдання синтезу).

Згідно [6] модель АМР може бути представлена у вигляді рівняння "вхід - вихід":

$$y(t) = f_y[y(t-1), y(t-2), \dots, u(t-1), u(t-2), \dots, Q(t), \Theta(t)],$$

де y – вихідна змінна, u – керування, Θ – збурення, f_y – деяка функція, Q – параметри АМР з маніпулятором, $t=1, 2, \dots, n$ – дискретний час.

Алгоритм адаптивного керування рекурентного типу записується у вигляді:

$$u(t) = f_u[u(t-1), y(t), U_e(t), Q(t)],$$

де U_e –бажана траєкторія рухів АМР з маніпулятором, f_u – функція керування залежна від впровадженого закону.

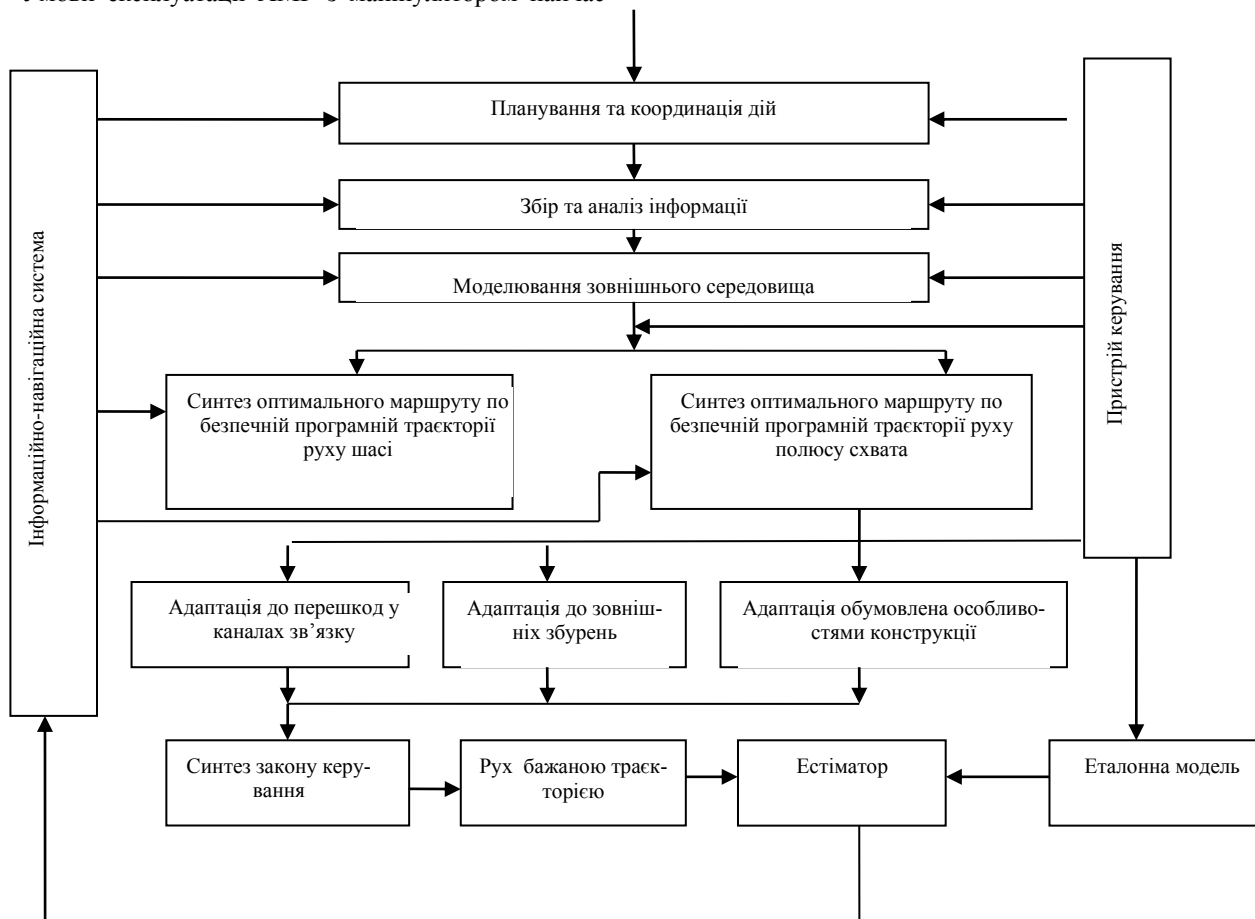


Рис.2. Структурна схема алгоритму адаптивного керування АМР з маніпулятором

Критерієм адаптації є мінімізація відхилення векто-

ра стану АМР від бажаної траєкторії, який може бути

записаний в загальному вигляді:

$$I = \Phi(U_e(t) - y(t)) \rightarrow \min.$$

Структурна схема алгоритму адаптивного керування АМР з маніпулятором наведена на рис.2.

Запропонований алгоритм керування дозволяє оснащувати роботи засобами автоматичного навчання (самонавчання) і адаптації, які перетворюють їхню керуючу систему в надзвичайно гнучкий інструмент організації цілеспрямованого поведіння в умовах невизначеності. Саме тому роботи з адаптивним керуванням і елементами штучного інтелекту значно перевершують по можливостях роботи із програмним керуванням: вони можуть адекватно реагувати на зміни зовнішньої обстановки, підбудовуватися до дрейфу параметрів зовнішнього середовища, розпізнавати й обходити перешкоди, ідентифікувати цільові об'єкти, визначати їхні характеристики.

Висновок. Розглядається завдання синтезу алгоритму адаптивного керування АМР із маніпулятором, який передбачає одночасне вивчення й оцінювання в реальному часі динамічних характеристик АМР (завдання ідентифікації) і визначення параметрів керування по отриманій моделі (завдання синтезу). Особ-

ливостями динаміки є недиагональність і нестационарність тензору інерції, зсув положення центру мас, конструктивні обмеження у приводах, тертя у кінематичних парах і т.д. Умови експлуатації АМР з маніпулятором найчастіше не тільки не відомі априорно, але й можуть непередбачено змінюватися в широкому діапазоні. Причини невизначеності й нестационарності цих умов полягають: 1) у недоліку інформації про властивості зовнішнього середовища; 2) у технічних обмеженнях, природному розкиді й дрейфі параметрів сенсорної й рухової систем робота; 3) у виникненні перешкод і обчислювальних погрешностей у каналах зв'язку й керування. Запропонований алгоритм керування дозволяє оснащувати роботи засобами автоматичного навчання (самонавчання) і адаптації, які перетворюють їхню керуючу систему в надзвичайно гнучкий інструмент організації цілеспрямованого поведіння в умовах невизначеності.

Подальші дослідження і синтез багатозв'язної системи керування мобільного робота з маніпулятором дозволить підвищити його живучість і ефективність за умов автономної роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Юревич Е. И. Основы робототехники: учеб. пособие / Е. И. Юревич // – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 304 с.
2. Коллюбин С. А. Динамика робототехнических систем. Уч. пособие / С. А. Коллюбин // – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с.
3. Ащепкова Н. С. Аналіз недиагональності і нестационарності тензору інерції автономного мобільного робота/ Н. С. Ащепкова, О. В. Збруцький, О. В. Биценко// Механіка гіроскопічних систем. – НТУУ «КПІ». – Вип.39. – 2020. – С.24–34.
4. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 480 с.
5. Ащепкова Н.С. Моделирование динамики автономного мобильного робота з маніпулятором/ Н.С. Ащепкова, А.В. Збруцький // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ». – декабрь, 2020. – № 31. – С. 4-14.
6. Брдни М. Адаптивное управление роботами-манипуляторами. /М. Брдни// Автореферат канд. дис. . – Москва, 18 с.
7. Шашихин В. Н. Современные проблемы автоматического управления / В. Н. Шашихин // – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 210 с.
8. Мартынов Ю. Г. Управление движением мобильных колесных роботов/ Ю. Г. Мартынов // Фундамент. и прикл. матем., – Москва „МГУ”. – Т.11., Вип.8. – 2005. – С.29–80.

REFERENCES

1. Jurevich, E. (2017) Basis of robot, BHV - Petersburg, St. Petersburg, 304 p.
2. Kolyubin, S. (2017) Dynamics of the robots systems, Publishing house of ITMO University, St. Petersburg, 117 p.
3. Ashchepkova, N., Zbrutskiy, O. and Bitsenko, O. (2020) “Analysis of non-angularity and non-stationarity to the tensor of energy of an autonomous mobile robot”, Herald of the National Technical University “KPI”. Subject issue: Mechanics of gyroscopic systems. Vol. 3 – pp. 24 – 34.
4. Zenkevich, S. and Yushenko, A. (2004) Bases of control system for manipulation robots, Publishing house of Moscow State Technical University by N. Bauman, Moscow, 480 p.
5. Ashchepkova, N. and Zbrutskiy, O. (2020) “Simulation of the dynamics of an autonomous mobile robot with a manipulator”, Herald of the National Technical University “KPI”. Subject issue: Computer Science and Modeling. Kharkiv. Vol. 39 – pp. 4 – 14.
6. Brdni M. (1993) Adaptive control of manipulator robots: Author's thesis, Moscow, 18 p.
7. Shashikhin, V. (2017) Modern problems of automatic control, Publishing house of St. Petersburg Polytechnic Institute, St. Petersburg, 210 p.
8. Martynov, Y. (2005) “Motion control of mobile wheeled robots”, Herald of the Moscow University. Subject issue: Fundam. and app. mat. – Moscow. Vol. 11 – pp. 29 – 80.

Algorithm for adaptive control of autonomous mobile robot

N. S. Ashchepkova

Annotation. The problem of synthesis of an algorithm for adaptive control of an autonomous mobile robot (AMR) with a manipulator is considered, which provides for the simultaneous study and evaluation in real time of the dynamic characteristics of AMR (identification problem) and determination of control parameters from the obtained model (synthesis problem). The peculiarities of the AMR dynamics are the nondiagonal and nonstationarity of the tensor of inertia, the displacement of the position of the center of mass, design constraints in drives, etc. The paper presents the results of a study of the controlled movement of a mobile robot with a manipulator, defines the tasks of the control system, and provides a block diagram of the adaptive control algorithm.

Keywords: autonomous mobile robot, manipulator, adaptive control.