



УДК 681.5

**ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN CHANNELS OF THE CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT**  
**АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ КАНАЛІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА**

Ashhepkova 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, av. Gagarin 72, 49010**Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, пр. Гагарина 72, 49010*

Koshevoy N.D. / Кошовий М.Д.

*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-9465-4467

*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 автономний мобільний робот з маніпулятором. Особливістю конструкції є недиагональний та нестационарний тензор інерції, що обумовлює перехресний зв'язок каналів за рахунок фізичних властивостей об'єкту керування. Об'єкт дослідження - багатозв'язна система керування автономного мобільного робота з маніпулятором. Мета дослідження – проаналізувати вплив перехресних зв'язків на точність багатозв'язної системи керування автономного мобільного робота з маніпулятором.

**Ключові слова:** автономний мобільний робот, маніпулятор, багатозв'язна система керування.

### **Вступ.**

Розвиток елементної бази та програмного забезпечення є підґрунтям для ускладнення структур та алгоритмів систем керування. Впровадження систем адаптивного керування з елементами штучного інтелекту підвищує автономність мобільних робототехнічних комплексів (РТК). В роботах [1, 2] підкреслюється важливість застосування модульного принципу складання конструкцій автономних мобільних роботів (АМР). Впровадження модульного принципу обумовлює наявність різноманітних змінних елементів конструкції, рухомих відносно платформи робота [3]. Прикладом таких елементів конструкції може бути маніпулятор, щуп, бур, ківш і т.п. [4].

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'язаній з платформою АМР [5]. При відносному русі елементів конструкції АМР змінюваної конфігурації його головні центральні осі інерції не спрямовані з осями системи координат зв'язаної з платформою АМР.

При дистанційній роботі в екстремальних апріорно невизначених умовах, при здійсненні технологічних операцій з крихкими або вибухонебезпечними об'єктами застосовують АМР з маніпулятором [1–3]. АМР з маніпулятором є складною механічною системою, яку можна вважати маніпулятором на рухливій



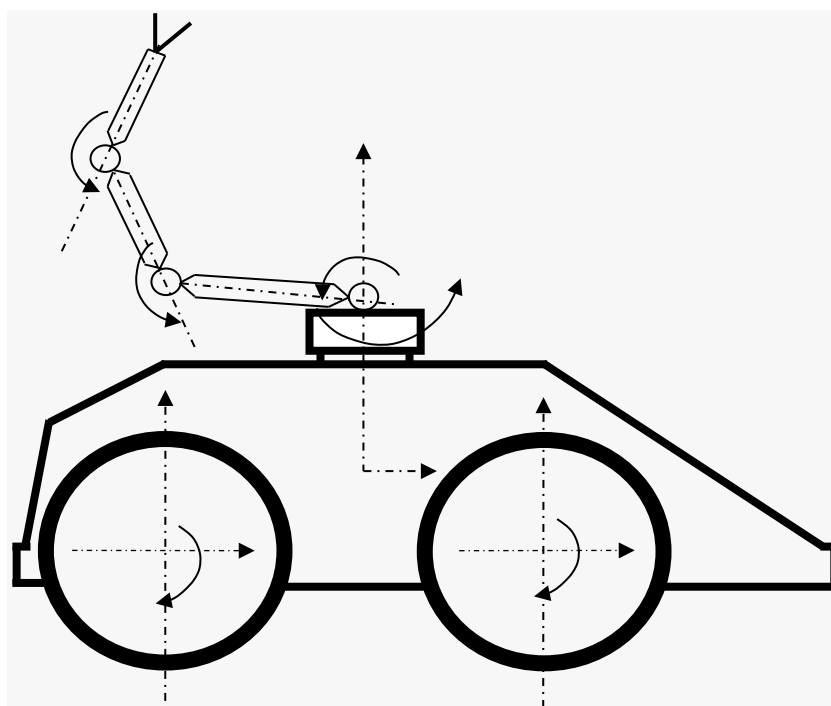
основі. Ланки маніпулятора – перенесені тіла, платформа – несуче тіло. Результати досліджень наведені в [6] доводять, що значення відцентрових моментів інерції системи при відносному русі маніпулятора сумірні значенням осьових моментів інерції системи, навіть якщо маса рухомих елементів конструкції менша, ніж 10% маси платформи. Результати математичного моделювання та аналізу динаміки АМР змінюваної конфігурації наведені в [7, 8] демонструють взаємозв'язок каналів керування обумовлений недиагональністю і нестационарністю тензору інерції.

Актуальність роботи полягає в необхідності забезпечення керованості АМР при роботі в екстремальних апріорно невизначених умовах, при здійсненні технологічних операцій з крихкими або вибухонебезпечними об'єктами.

### 1. Постановка задачі

Об'єктом дослідження є система керування автономного мобільного робота оснащеного антропоморфним маніпулятором з чотирма ступенями рухливості.

Схема конструкції АМР з маніпулятором наведена на рис. 1. Конструкція складається з повнопривідної 4 – колісної платформи АМР, та антропоморфного маніпулятора складеного з кільця, що обертається навколо вертикальної вісі, та стрижневих ланок – руки, з'єднаних ротаційними кінематичними парами п'ятого класу.



**Рисунок 1 – Схема конструкції автономного мобільного робота з маніпулятором**

*Джерело: [7]*

Цикл роботи АМР з маніпулятором 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.);

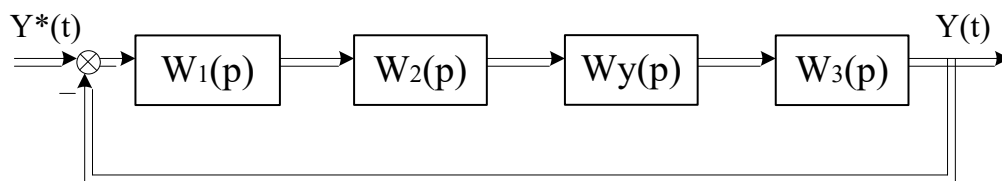


- виконання технологічних операцій маніпулятором, навісним або інформаційним обладнанням при нерухомій платформі;
- повернення платформи АМР до точки старту S або рух до заздалегідь заданої кінцевої точки K при нерухомому маніпуляторі.

На першому і третьому етапі роботи АМР з маніпулятором являє собою візок з адаптивною системою керування, який рухається в наперед невизначених умовах зовнішнього середовища. Динаміку та керованість чотириколісного повнопривідного автономного мобільного робота детально досліджено у [9]. Керуючі впливи – моменти прикладені до кожного колеса обумовлюють відхилення маніпулятора від початкового положення в наслідок недіагональності тензору інерції. На другому етапі роботи АМР можна розглядати як антропоморфний маніпулятор на рухливій основі. Кількість керуючих впливів: під час переміщення траєкторією – чотири (на кожне колесо), під час роботи маніпулятора – чотири (на кожен узагальнену координату). Якщо маніпулятор виконує технологічні операції при переміщенні платформи, то система керування містить вісім каналів.

Система керування для АМР з маніпулятором на кожному етапі роботи містить щонайменше чотири канали керування з перехресним зв'язком, обумовленим фізичними властивостями об'єкту керування. Особливості динаміки та методи аналізу й синтезу таких систем керування наведено у [10].

Структурна схема багатозв'язної системи керування (БСК), показана на рис. 2. Перехресні зв'язки каналів керування зосереджені у багатовимірному об'єкті керування.



**Рисунок 2 – Структурна схема багатозв'язної системи керування**

*Авторська розробка*

Передаточні матриці (ПМ) лінійних ланок у складі чотирьохвимірної БСК мають вигляд:

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \text{diag}\{W_{p1}(p); W_{p2}(p); W_{p3}(p); W_{p4}(p)\}; \\ W_2(p) &= \text{diag}\{W_{01}(p); W_{02}(p); W_{03}(p); W_{04}(p)\}; \\ W_3(p) &= \text{diag}\{1/p; 1/p; 1/p; 1/p\}, \end{aligned}$$

де  $W_{pi}(p)$  – передаточні функції  $i$ -го сепаратного регулятора;  $i = 1, \dots, 4$ ;

$W_{0i}(p) = \frac{K_i}{(1 + pT_{ai})(1 + pT_{bi})}$  – передаточні функції незмінної частини  $i$ -го сепаратного каналу;

$W_k(p) = [E + W_x(p)]$  – ПМ компенсатора із прямими перехресними зв'язками. Тут



$$W_x(p) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & W_{x4}(p) \\ 0 & 0 & W_{x3}(p) & 0 \\ 0 & W_{x2}(p) & 0 & 0 \\ W_{x1}(p) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а  $W_{x1}(p)$ ,  $W_{x2}(p)$ ,  $W_{x3}(p)$  і  $W_{x4}(p)$  – передаточні функції прямих (або зворотних) перехресних зв'язків у складі послідовного компенсатора, що забезпечує властивість автономності каналів регулювання;

$$W_y(p) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & W_{y4}(p) \\ 1 & 1 & W_{y3}(p) & 1 \\ 1 & W_{y2}(p) & 1 & 1 \\ W_{y1}(p) & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

де  $W_{yi}(p) = \frac{K_{yi}}{1 + pT_{yi}}$  – передаточні функції перехресних зв'язків в об'єкті

керування.

Для визначеності, як приклад, розглянемо БСК з початковими даними наведеними у табл.1.

**Таблиця 1 - Коефіцієнти передаточних функцій**

Номер каналу	Коефіцієнти незмінної частини $i$ -го сепаратного каналу			Коефіцієнти перехресних зв'язків $i$ -го сепаратного каналу	
	$K_i, c^{-1}$	$T_{ai}, c$	$T_{bi}, c$	$K_{yi}, c^{-1}$	$T_{yi}, c$
1	125	0,07	0,01	-15	0,028
2	135	0,11	0,009	10	0,0135
3	110	0,06	0,035	-12	0,024
4	120	0,15	0,032	10	0,048

*Авторська розробка*

Усі розрахунки проведемо з застосуванням пакету прикладних програм Mathcad.

Мета дослідження – проаналізувати вплив перехресних зв'язків на БСК автономного мобільного робота з маніпулятором. Для досягнення цієї мети потрібно для кожної пари сигналів «вхід - вихід» розглянути наступні режими функціонування БСК:

- сталий режим,
- динамічний режим.

## 2. Результати досліджень та обговорення

### 2.1 Вплив перехресних зв'язків на точність багатозв'язної системи керування у сталому режимі.

Запишемо передавальну матрицю розімкнутої системи (рис. 2)

$$W(p) = W_3(p)W_y(p)W_2(p)W_1(p). \quad (1)$$

Вираз для одержання характеристичного рівняння

$$\det [E+W(p)] = 0, \quad (2)$$



де  $[E+W(p)]$  – матриця обернених різниць. Її визначник являє собою дробово-раціональну функцію  $H(p)$ , у чисельнику якої – характеристичний поліном  $\varphi_3(p)$  для замкнутої БСК, а в знаменнику – характеристичний поліном  $\varphi_p(p)$  для розімкнутої БСК

$$H(p) = \varphi_3(p)/\varphi_p(p). \quad (3)$$

Запишемо передавальну матрицю замкнутої системи (рис. 2)

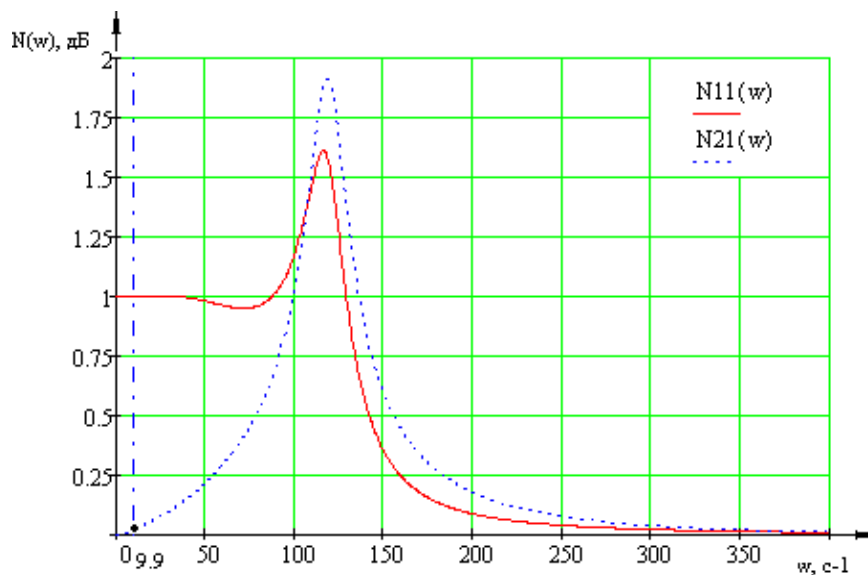
$$\Phi(p) = [E + W(p)]^{-1} \cdot W(p),$$

де  $W(p)$  – передавальна матриця розімкнутої системи (1).

Розглянута система має чотири входи й чотири виходи, таким чином, передавальна матриця замкнутої системи матиме вигляд

$$\Phi(p) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(p) & \Phi_{12}(p) & \Phi_{13}(p) & \Phi_{14}(p) \\ \Phi_{21}(p) & \Phi_{22}(p) & \Phi_{23}(p) & \Phi_{24}(p) \\ \Phi_{31}(p) & \Phi_{32}(p) & \Phi_{33}(p) & \Phi_{34}(p) \\ \Phi_{41}(p) & \Phi_{42}(p) & \Phi_{43}(p) & \Phi_{44}(p) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

Передавальна матриця замкнутої системи, що відповідає парі «вх. 1 – вих. 1», –  $\Phi_{11}(p)$ , парі «вх. 1 – вих. 2» –  $\Phi_{21}(p)$ , парі «вх. 1 – вих. 3» –  $\Phi_{31}(p)$ , парі «вх. 1 – вих. 4» –  $\Phi_{41}(p)$ . За допомогою програмного пакета MathCAD побудуємо амплітудо-частотні характеристики (АЧХ) замкнутої БСК відносно пар «вх. 1 – вих. 1» і «вх. 1 – вих. 2»:  $N_{11}(w) = |\Phi_{11}(jw)|$ ,  $N_{21}(w) = |\Phi_{21}(jw)|$  (рис. 3).



**Рисунок 3 – Амплітудо-частотні характеристики замкнутої багатозв'язної системи керування**

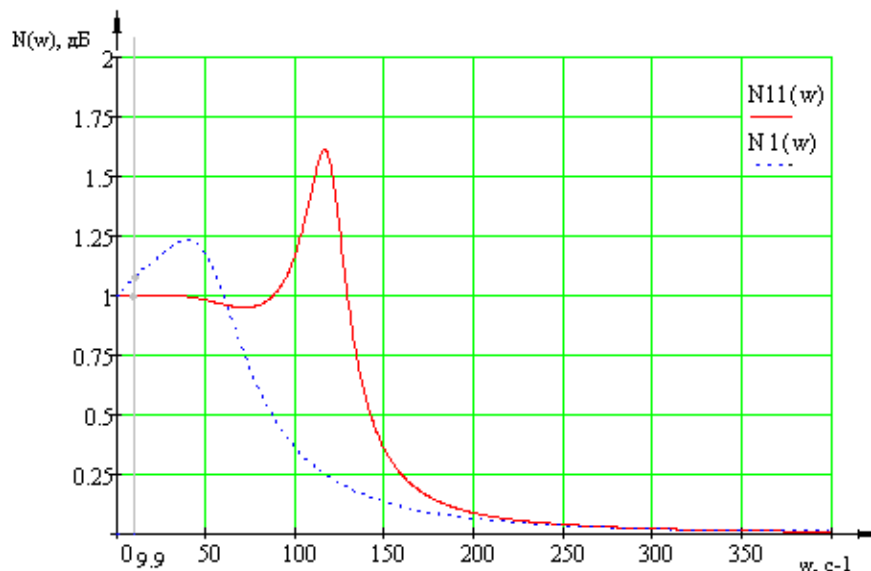
*Авторська розробка*

За точність БСК у сталому режимі відповідає низькочастотна ділянка АЧХ, за якою можна визначити амплітудно-фазові викривлення. Для прикладу визначимо ординати побудованих характеристик на частоті  $\omega_1=9,9 \text{ c}^{-1}$ ;  $N_{11}(9,9)=1,001$ ;  $N_{21}(9,9)=0,023$  (рис. 3)

Порівняємо АЧХ першого сепаратного каналу  $N_1(w)$  й АЧХ вихідної системи щодо пари «вх. 1- вих. 1»  $N_{11}(w)$ , для цього подамо їх на одному графіку (рис. 4).



Якщо припустити, що сталий режим існує, то, судячи з низькочастотного діапазону АЧХ, результатом впливу перехресних зв'язків є зменшення амплітудних викривлень на розглянутій частоті  $\omega_1=9,9 \text{ c}^{-1}$ . За графіком АЧХ можна визначити критичну частоту за якою перехресний зв'язок каналів збільшує амплітудні викривлення (для рис.4  $\omega_{кр}=62,5 \text{ c}^{-1}$ ).



**Рисунок 4 – Порівняння амплітудо-частотних характеристик**

*Авторська розробка*

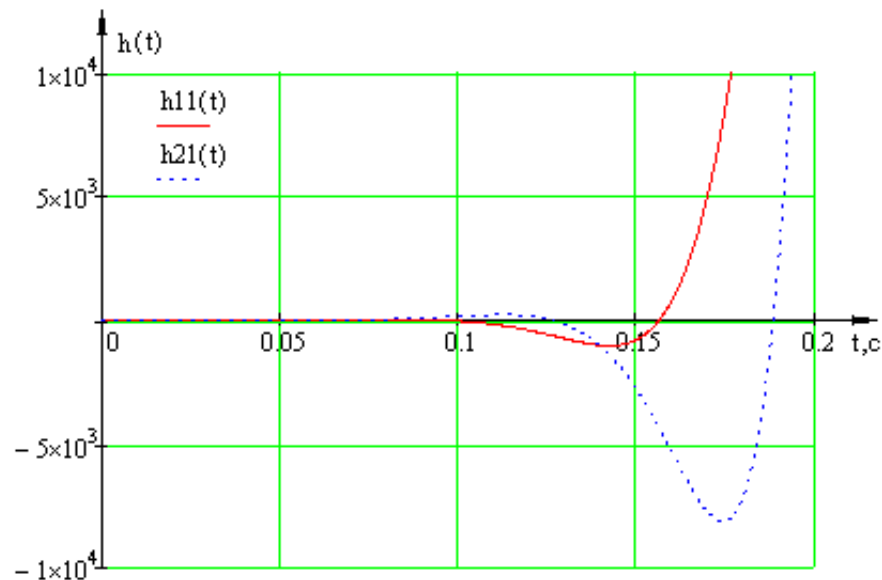
Наявність перехресного зв'язку обумовлена недиагональністю тензора інерції АМР з маніпулятором, тобто фізичними властивостями об'єкту керування. Це обумовлює марність сподівань на ефективність впровадження корегуючих пристроїв для лінеаризації системи керування. Оскільки тензор інерції об'єкту керування нестационарний, то для кожної пари сигналів «вхід - вихід» значення критичної частоти  $\omega_{кр}$  є нелінійною функцією часу.

## **2.2. Вплив перехресних зв'язків на точність багатозв'язної системи керування у динамічному режимі.**

Для дослідження динамічного режиму БСК проаналізуємо перехідні характеристики, тобто реакцію системи керування на вплив  $1(t)$ . Для прикладу, розглянемо графіки перехідних функцій відносно пар «вх. 1 – вих. 1», «вх. 1 – вих. 2» ( $h_{11}(t)$  та  $h_{21}(t)$  – відповідно) побудовані у програмному пакеті MathCAD (рис. 5).

На графіках перехідних функцій  $h_{11}(t)$  та  $h_{21}(t)$  (рис.5) можна бачити, що амплітуда нелінійно збільшується зі зростанням часу. Таким чином, вихідна двовимірна система «вх. 1 – вих. 1», «вх. 1 – вих. 2» – нестійка.

Для остаточного висновку стосовно стійкості БСК у динамічному режимі потрібно провести додаткове дослідження за кожним каналом керування. Однак, за результатами наведеного прикладу, можна зробити висновок, що перехресні зв'язки, уведені в об'єкт керування, погіршують динамічні властивості багатозв'язної системи керування.



**Рисунок 5 – Графіки перехідних функцій**

*Авторська розробка*

**Висновки** Були розглянуті особливості системи керування автономного мобільного робота з маніпулятором. У роботі представлено результати дослідження взаємозв'язку каналів багатозв'язної системи керування. Наявність перехресного зв'язку обумовлена недіагональністю тензора інерції автономного мобільного робота з маніпулятором, тобто фізичними властивостями об'єкту керування. Запровадження корегуючих пристроїв для лінеаризації такої системи керування не ефективне.

Були отримані якісні та кількісні оцінки для розглянутого прикладу початкових умов. Аналіз проведено за амплітудно-частотними та перехідними характеристиками. Математичне моделювання багатозв'язної системи керування здійснено з використанням пакету прикладних програм MathCad. Оскільки тензор інерції об'єкту керування нестационарний, то для кожної пари сигналів «вхід - вихід» значення критичної частоти  $\omega_{кр}$  є нелінійною функцією часу.

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

Оскільки мобільний робот з маніпулятором є прикладом класу об'єктів «автономний мобільний робот змінюваної конфігурації», то отримані результати можна застосовувати до всіх об'єктів цього класу.

### **Література.**

1. Лапота, А.В., Спасский, Б.А. (2020). Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения. Робототехника и техническая кибернетика, № 8(1). – С. 5 – 17. doi: 10.31776/RTCJ.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, № 8 (1) . – С. 18–23. doi: 10.31776/RTCJ.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, № 15 (6). –С. 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. Barrett, L. (2020). Handbook of Robotics; Willford Press: Forest Hills, NY, USA; ISBN 978-1-68285-776-2.
6. Ashhepkova, N.S. (2022). Analysis of inertia tensor of autonomous mobile robot. Technology Audit and Production Reserves. – Kharkiv. – February, 2022. – Vol.63. № 1-2. – P. 24 – 34. doi: 10.30890/2567-5273/2021-15-02-066
7. Ashhepkova, N.S. (2023). Construction of a mathematical model of the dynamics of an autonomous mobile robot of variable configuration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – Kharkiv. – December, 2022. –Vol. 6 №7 (120). – P. 30 – 44. doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269840
8. Zbrutsky, A., Koshevoy, N and Ashhepkova, N. Analysis of the Dynamics and Controllability of Autonomous Mobile Robot with a Manipulator/ In “Recent Developments in Automatic Control System”. – River Publishers, 2022 – P. 121 – 144. ISBN 9788770226745
9. 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.
10. Зырянов Г. В. Системы управления многосвязными объектами: учеб. пособие / Г. В. Зырянов // – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 112 с.

**Abstract.** The article deals with an autonomous mobile robot with a manipulator. A feature of the design is the non-diagonality and non-stationarity of the inertia tensor, which causes the cross-connection of the channels due to the physical properties of the control object. The introduction of corrective devices for the linearization of such a control system is not effective.

The object of research is a multi-link control system of an autonomous mobile robot with a manipulator. The purpose of the study is to analyze the influence of cross-connections on the accuracy of a multi-link control system of an autonomous mobile robot with a manipulator.

The analysis was carried out according to the amplitude-frequency and transient characteristics. Mathematical modeling of the multi-link control system was carried out using the MathCad application program package. Qualitative and quantitative assessments were obtained for the considered example of a multi-link control system. Since the inertia tensor of the control object is non-stationary, for each pair of "input - output" signals, the value of the critical frequency  $\omega_{cr}$  is a nonlinear function of time.

**Keywords:** autonomous mobile robot, manipulator, multi-link control system.

Стаття підготовлена в рамках роботи за д/б темами:  
№ 0122 U 001326 «Науково-методичне забезпечення прикладних досліджень в механіці механотронних систем», 2022-2024 р.р.  
№ 0121 U 108950 «Розробка вимірювальних перетворювачів з цифровим виходом», 2021-2023 р.р.

Стаття відправлена: 20.11.2023 г.

© Ащепкова Н.С., Кошовий М.Д.