

УДК629.7.615.3

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.07

М. Д. КОШЕВИЙ, д-р техн. наук, проф., каф. НАУ "ХАІ"

ім. М. Жуковського, Харків,

Н. С. АЩЕПКОВА, канд. техн. наук, доц., ДНУ ім. О. Гончара,

Дніпро

МЕТОД СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНИХ ТРАЄКТОРІЙ СХВАТУ МАНІПУЛЯТОРА АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Розглянуто особливості динаміки автономного мобільного роботу змінюваної конфігурації при відносному русі маніпулятора. Для ефективного виконання маніпулятором АМР технологічних операцій в екстремальних наперед не визначених умовах доцільно на етапі проектування розробити базу даних, що містить оптимальні послідовності переміщень по узагальнених координатах, які забезпечують пересування схвату між заданими початковими і кінцевими точками робочого простору. Іл.: 3. Табл.: 2. Бібліогр.: 20 назв.

Ключові слова: автономний мобільний робот; маніпулятор; динаміка; схват; траєкторія.

Постановка задачі. Розширення сфери застосування та ускладнення завдань для сучасних автономних мобільних роботів (АМР) обумовлює наявність елементів конструкції, рухомих відносно платформи робота: маніпулятор, щуп, бур, ківш і т.п. При експлуатації АМР ці елементи рухаються відносно платформи, змінюючи геометрію мас системи. При плануванні траєкторій схвату маніпулятора АМР необхідно враховувати рух платформи вздовж траєкторії або зсув зупиненої платформи.

Особливістю динаміки АМР з маніпулятором, як системи тіл, є:

– зміна положення центра мас системи при відносному русі маніпулятора,

– сумірність недиагональних і діагональних елементів тензора інерції, обчислених відносно осей базової системи координат $SX_c Y_c Z_c$, пов'язаної із центром мас платформи АМР.

Зміна положення центру мас системи обумовлює виникнення збурюючих моментів.

Недиагональність тензору інерції системи тіл відносно базової системи координат, обумовлює:

– виникнення неузгодженості головних центральних осей інерції системи тіл з осями зв'язаної із центром мас платформи АМР базовою системою координат $SX_c Y_c Z_c$,

– неузгодженість керуючих впливів з напрямками головних

центральної осей інерції системи,

– взаємозалежність каналів керування.

Відцентрові і осьові моменти інерції АМР з маніпулятором (відносно осей базової системи координат $CX_cY_cZ_c$) залежать від часу і значень узагальнених координат.

Планування траєкторій схвату маніпулятора АМР з врахуванням перелічених особливостей дозволить підвищити експлуатаційні характеристики АМР при дистанційній роботі в наперед невизначених або екстремальних умовах.

Таким чином, розробка методу синтезу оптимальних траєкторій схвату маніпулятора АМР з урахуванням особливостей динаміки конструкції є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз літератури. Розвиток нових технологій дає можливість застосування маніпуляторів (М) для робіт в екстремальних для людини умовах. Наприклад, використання М і автономних мобільних роботів (АМР) для ліквідації наслідків екологічних і техногенних катастроф, експлуатація дистанційно керованих М для роботи з радіоактивними речовинами, застосування М для складання конструкцій у космосі або на морському дні і т.п. Для робіт в екстремальних умовах, як правило, застосовуються дистанційно керовані роботи й М. У багатьох випадках дистанційно керована рука-маніпулятор встановлюється на керовану рухливу платформу. Це розширює сервісні характеристики М, але накладає більш жорсткі вимоги на пристрої систем керування й спостереження. Прикладом таких конструкцій є: рука-маніпулятор розміщена на космічному апараті, на кораблі, на колісному шасі і т.п. У всіх перерахованих вище випадках рух основи впливає на кінематику й динаміку руки-маніпулятора, збільшуючи помилку позиціонування й відхилення полюса схвату від заданої траєкторії. Динамічні процеси для М на рухомій платформі можна розділити на три режими руху:

– керований рух платформи по заданому маршруту з "зачекованим" М;

– виконання технологічних операцій М при зупиненій платформі;

– М виконує технологічні операції при керованому русі платформи.

Керований рух платформи з "зачекованим" маніпулятором досить добре досліджено для різних варіантів конструкції шасі. В [1] досліджено динаміку повнопривідного 4-колісного візка при поворотах. Синтез закону керування плоским рухом транспортного робота є типовою задачею: відомо декілька методів стабілізації руху вздовж заданої траєкторії. У [2] застосовано перетворення системи рівнянь до

нормальної форми Коші з подальшим диференціюванням по новій незалежній змінній [2 – 4]. У [5] рівняння динаміки візка складаються відносно шляхових координат, які добре фіксують відхилення від заданої траєкторії.

При виконанні технологічних операцій M , який встановлено на зупинену платформу, доцільно розглянути рівняння динаміки відносно нерухомої системи координат, пов'язаної з точкою стикування M і платформи. При цьому розв'язок задач кінематичного і динамічного аналізу M залежить від співвідношення інерційних характеристик платформи і M з навантаженням. В якості навантаження може бути об'єкт маніпулювання, щуп, бур, ківш і т.п. В [6 – 9] розглядається два підходи до складання рівнянь динаміки M : метод Ньютона-Ейлера й метод Лагранжа-Ейлера. Для моделювання процесів динаміки і керування M доцільно застосовувати математичні пакети Mathcad [10 – 12] або Matlab [13 – 15]. В [13] презентовано псевдо символічне динамічне моделювання (PSDM) для створення спрощених динамічних моделей M , конструкція яких містить до 7 ступенів рухливості. Представлений алгоритм дозволяє генерувати код у реальному часі, моделювати динаміку й підвищувати ефективність моделі за рахунок виключення мінімально важливих елементів. Крім того, авторами [13] розроблена реалізація алгоритму в середовищі MATLAB, яка є загальнодоступною. Авторами [14] була розроблена віртуальна модель кінематики й динаміки M в MATLAB&SIMULINK. Представлена модель використовує ПІД-регулятор, а рівняння динаміки отримані методом Лагранжа-Ейлера. Робота [15] присвячена динамічному моделюванню просторового трьохланкового M з використанням символічних і чисельних методів. Для складання рівнянь динаміки у формі простору станів пропонується алгоритм, заснований на методі Ньютона-Ейлера. Алгоритм реалізовано у системі Maple, моделювання здійснено в MATLAB&SIMULINK.

При експлуатації АМР маніпулятором виконуються технологічні операції переміщення об'єкту маніпулювання (вантаж, інструмент, контрольно-вимірювальні прилади) за заданим законом руху [8, 9]. Залежно від призначення маніпулятора на різних ділянках траєкторії АМР можуть змінюватися параметри навантаження: геометричні розміри, форма, розподіл мас [8, 9]. Ці особливості слід врахувати на етапі проектування і складання математичної моделі, оскільки коефіцієнти диференціальних рівнянь є функціями узагальнених координат маніпулятора і залежать від закону руху і параметрів навантаження [8 – 10, 16, 17].

Для вирішення цього завдання на ЕОМ можна використати мови

програмування (Fortran, Pascal, C) або математичні пакети (Matlab, Mathcad). Чисельні методи рішення інженерних завдань реалізуються в середовищі прикладних програм Mathcad [18, 19], яке характеризується можливістю рішення алгебраїчних лінійних і нелінійних рівнянь, диференціальних рівнянь і систем; виконанням операцій з векторами, матрицями і поліномами [18, 19].

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є чотириколісний повнопривідний АМР із маніпулятором, маса якого з вантажем складає 10 % ÷ 20 % від маси платформи АМР. Схема конструкції АМР із маніпулятором наведена на рис. 1. Конструкція складається з повнопривідної 4-колісної платформи АМР; маніпулятора складеного з диску, що обертається навколо вертикальної осі, та стрижневих ланок руки, з'єднаних ротаційними кінематичними парами п'ятого класу.

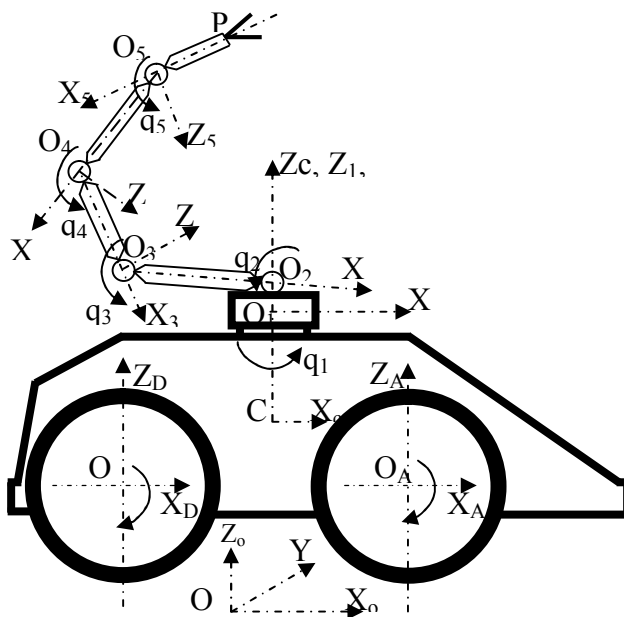


Рис. 1. Схема конструкції АМР з маніпулятором

Розглянемо розрахункову модель представлену на рис. 2, (геометричні розміри вказано у мм). Маса маніпулятора з навантаженням становить до 20 % від маси платформи АМР.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності використання АМР при дистанційній роботі в наперед невизначених або екстремальних умовах: вибір оптимальної конфігурації маніпулятора АМР для забезпечення якісних показників і надійного виконання заданих

технологічних операцій; вибір послідовності рухів по узагальненим координатам; забезпечення мінімального відхилення схвату маніпулятора АМР від заданої траєкторії.

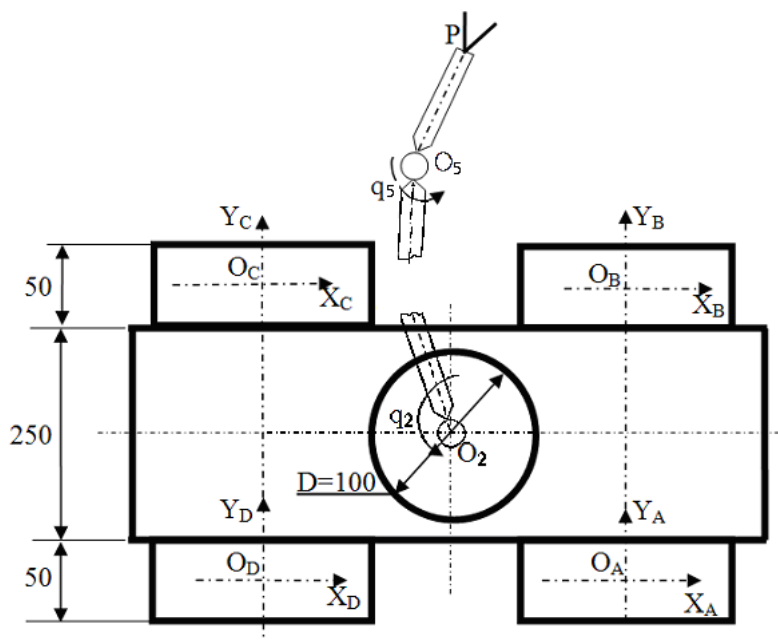


Рис. 2. Розрахункова модель АМР с маніпулятором

Матеріали та методи дослідження. Сформульовані в роботі висновки, наукові припущення й рекомендації базуються на фундаментальних положеннях теоретичної механіки, теорії диференціальних рівнянь й теорії керування [5, 6, 16, 17].

При моделюванні траєкторії схвату маніпулятора АМР припустимо наступне:

- платформа АМР – абсолютно твердий жорсткий паралелепіпед (рис. 3) з рівномірним розподілом маси із щільністю $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$;
- масою кінематичних пар можна знехтувати;
- друга, третя, четверта і п'ята ланки маніпулятора абсолютно тверді жорсткі стрижні діаметром $d = 30 \text{ мм}$, з рівномірним розподілом маси із щільністю $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, довжиною $l_5 = O_5P = 300 \text{ мм}$, $l_4 = O_4O_5 = 600 \text{ мм}$, $l_3 = O_3O_4 = 700 \text{ мм}$, $l_2 = O_2O_3 = 800 \text{ мм}$; $l_1 = O_1O_2 = 50 \text{ мм}$.
- маси другої, третьої і четвертої ланки маніпулятора зосереджені в кінематичних парах, тобто у точках O_2 , O_3 і O_4 відповідно.
- перша ланка маніпулятора абсолютно твердий жорсткий диск діаметром $D = 100 \text{ мм}$ висотою $h = 50 \text{ мм}$, з рівномірним розподілом маси

із щільністю $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$;

– узагальнені координати мають конструктивні обмеження

$$q_1(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{15\pi}{8} \right], \quad q_2(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{2\pi}{3} \right], \quad q_3(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{2\pi}{3} \right], \quad q_4(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{2\pi}{3} \right],$$

$$q_5(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{15\pi}{8} \right].$$

– мотор-колеса діаметром $D = 165 \text{ мм}$ товщиною $b = 50 \text{ мм}$, масою 2800 г .

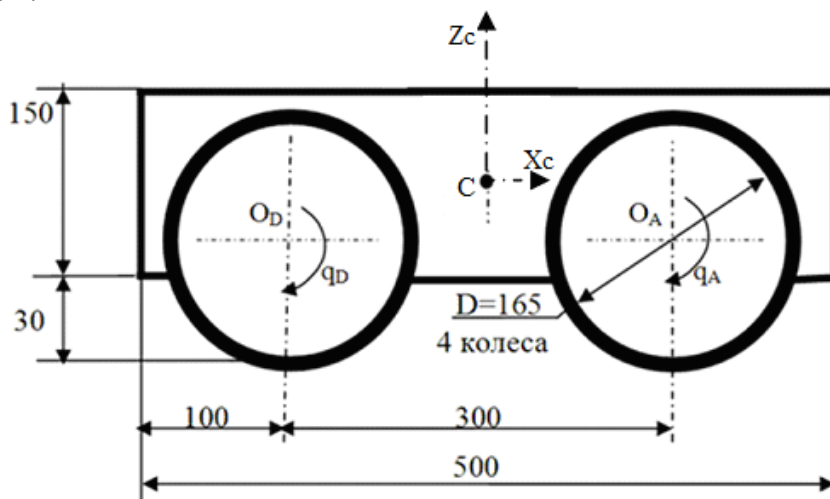


Рис. 3. Розрахункова модель платформи автономного мобільного робота

Рівняння динаміки моделі АМР змінюваної конфігурації в загальному випадку включають:

- рівняння керованого руху центру мас багатомасової системи по заданій траєкторії;
- рівняння кутового руху платформи з маніпулятором відносно центра мас багатомасової системи;
- рівняння відносного руху маніпулятора;
- рівняння регулятора системи керування.

Припустимо, що рух схвату АМР при виконанні технологічних операцій здійснюється, як послідовність переміщень по узагальненим координатам M встановленого на зупинену платформу. В цьому випадку моделювання траєкторії схвату виконується у системі координат $O_1X_1Y_1Z_1$ нерухомій відносно платформи, O_1 – точка стиковки M і платформи.

Метод синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР складається з наступних етапів:

- кінематичний та динамічний аналіз маніпулятора;
- обчислення меж робочого простору;
- перевірка приналежності координат вузлових точок технологічного процесу робочому простору маніпулятора;
- визначення конфігурації маніпулятора для точок робочого простору, координати яких відповідають вузловим точкам технологічного процесу;
- оцінка точності позиціонування схвату, перерегулювання та часу перехідного процесу при визначених конфігураціях M для кожної послідовності переміщень по узагальненим координатам.
- синтез оптимальної траєкторії схвату M , як послідовності переміщень по узагальненим координатам, на основі аналізу отриманих результатів для забезпечення якісних показників виконання технологічних операцій.

Оскільки, елементи тензору інерції АМР відносно осей базової системи координат $SX_cY_cZ_c$ сумірні, то приріст будь-якої узагальненої координати Δq_i обумовлює зміну перерозподілу мас, зсув платформи і зниження точності позиціонування. Таким чином, для ефективного виконання маніпулятором АМР технологічних операцій в екстремальних наперед не визначених умовах необхідно на етапі проектування розробити базу даних, яка б містила оптимальні послідовності переміщень по узагальненим координатам з заданими початковими та кінцевими точками робочого простору. Розрахунки на кожному етапі методу синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР можна виконати з використанням стандартного програмного забезпечення (Fortran, Pascal, C або математичних пакетів Matlab, Mathcad).

Розглянемо реалізацію методу синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР з застосуванням Mathcad. Програмне середовище Mathcad дозволяє автоматизовано провести кінематичний та динамічний аналіз [10], визначити межі робочого простору [11], провести моделювання приводу обертання для кожного ступеня рухливості, проаналізувати оптимальність конфігурацій у заданих точках робочого простору [20], оцінити точність позиціонування схвату [12].

Кінематичний та динамічний аналіз маніпулятора здійснюють з урахуванням потужності приводів, коефіцієнтів тертя, особливостей конструкції й характеристик кінематичних пар. У [11] представлені результати моделювання руху та зображення робочого простору полюса схвату маніпулятора АМР в системі координат $O_1X_1Y_1Z_1$ при заданих обмеженнях узагальнених координат $q_i(t) \in [q_{i_{min}}; q_{i_{max}}]$, $i = 1, \dots, 5$ з використанням пакета прикладних програм Mathcad.

Припустимо, що в системі координат $O_1X_1Y_1Z_1$ задані координати

вузлових точок технологічного процесу: $S1(-0,202; 0,404; 0,002)$; $S2(-0,130; 0,433; -0,017)$. Результати розв'язання зворотного завдання кінематики M відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$ і відповідні набори значень узагальнених координат q_i наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати розв'язання зворотного завдання кінематики маніпулятора АМР відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$

Координати вузлових точок траєкторії (м)	Набор	Значення узагальнених координат (рад)				
		q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
$S1(-0,202; 0,404; 0,002)$	S11	-0,464	1,529	1,613	2,406	0
	S12	-0,464	0,677	2,465	-0,200	0
	S13	2,678	2,854	0,288	-1,636	0
	S14	2,678	2,124	1,017	0,331	0
$S2(-0,130; 0,433; -0,017)$	S21	2,850	2,826	0,316	-1,615	0
	S22	2,850	2,117	1,025	0,275	0
	S23	-0,292	1,550	1,591	2,486	0
	S24	-0,292	0,684	2,458	-0,252	0

Для реалізації переміщення схвату маніпулятора з точки $S1$ у точку $S2$ (табл.1) існує 192 послідовності переміщень по узагальненим координатам. Оцінка точності позиціонування схвату, перерегулювання та часу перехідного процесу при визначених конфігураціях M для кожної послідовності переміщень по узагальненим координатам проводилась з застосуванням Mathcad. Корекція точності позиціонування схвату враховує зсув платформи АМР обумовлений приростом будь-якої узагальненої координати Δq_i . Для прикладу у табл. 2 наведено значення часу перехідного процесу $t_{пп}$, точності позиціонування схвату P , перерегулювання δ , корекції ΔP та загальної точності позиціонування P_{Σ} для конфігурацій маніпулятора $S11$ і $S21$ при послідовностях переміщень $q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$ та $q_2 \rightarrow q_1 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$ по узагальненим координатам M .

Таблиця 2

Оцінка якісних показників виконання технологічних операцій маніпулятором АМР відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$

Послідовність переміщень	Якісні показники				
	$t_{пп}$, с	P , м	δ , %	ΔP , м	P_{Σ} , м
$q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$	13,85	0,0019	11,76	0,0038	0,0057
$q_2 \rightarrow q_1 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$	13,90	0,0008	162,50	0,0121	0,0129

Обчислення проведено відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$.

Моделювання послідовностей переміщень по узагальненим координатам M дозволило для кожного варіанту траєкторії схвату M оцінити час перехідного процесу, перерегулювання та точність позиціонування. На основі аналізу отриманих результатів проведено синтез оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР, яка реалізується при послідовності переміщень $q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$ по узагальненим координатам M і забезпечує задані значення якісних показників при виконанні технологічних операцій.

Висновки. Актуальність розглянутої науково-прикладної задачі обумовлена розширенням області застосування маніпуляторів і АМР, ускладненням їх технологічних операцій. Запропоновано метод синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР з врахуванням особливостей динаміки конструкції.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– Уперше представлено метод синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР з врахуванням особливостей динаміки конструкції.

– Удосконалено метод математичного моделювання послідовностей переміщень по узагальненим координатам маніпулятора АМР. Застосування даного методу дозволяє на етапі проектування розробити базу даних, яка містить оптимальні послідовності переміщень по узагальненим координатам з заданими початковими та кінцевими точками робочого простору.

– Одержало подальший розвиток метод оцінки якісних показників виконання маніпулятором АМР технологічних операцій. Обчислення точності позиціонування схвату, перерегулювання та часу перехідного процесу проведено з застосуванням Mathcad при визначених конфігураціях M для кожної послідовності переміщень по узагальненим координатам. Корекція точності позиціонування схвату враховує зсув платформи АМР обумовлений приростом будь-якої узагальненої координати Δq_i .

Застосування запропонованого методу дозволяє програмно проводити синтез оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР, яка реалізується при визначеній послідовності переміщень по узагальненим координатам M і забезпечує задані значення якісних показників при виконанні технологічних операцій.

Список літератури:

1. *Ащенкова Н.С.* Динаміка моделі транспортного робота при поворотах / *Н.С. Ащенкова, С.А. Ащенков, С.А. Канера* // Science and Education in New Dimension. – 2018. – VI(19). – Issue 171. – P 26-29.
2. *Tkachev S.* Stabilization of nonminimum-phase multi-input affine system / *S. Tkachev* // Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU. – 2012. – №8.
3. *Andrianova O.* Path following simulation of wheeled vehicle / *O. Andrianova* // Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU. – 2011. – Vol.10. – № 77-30569/239840.
4. *Gilimyanov R.* Motion control for a wheeled robot following a curvilinear path / *R. Gilimyanov, A. Pesterev, L. Rapoport* // Journal of Computer and Systems Science International. – 2008. – Vol.47. – №6. – P. 987-994,
5. *Kanatikov A.* Features of transition to path coordinates in a problem of path stabilization / *A. Kanatikov, T. Kasatkina* // Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU. – 2012. – № 7.
6. *Bai S.* Manipulator Dynamics / *S. Bai, L. Zhou, G. Wu* // Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. – Springer. – 2015. – P. 1855-1872,
7. *Orsag M.* Aerial Manipulator Dynamics / *M. Orsag, C. Korpela, P.Y. Oh., S. Bogdan* // Aerial Manipulation. – Springer. – 2018. – P. 33-85.
8. *Юревич Е.И.* Основы робототехники: учеб. пособие / *Е.И. Юревич* // СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 304 с.
9. *Колюбин С.А.* Динамика робототехнических систем. Уч. пособие / *С.А. Колюбин* // СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с.
10. *Ащенкова Н.С.* Метод кинематического и динамического анализа манипулятора с использованием Mathcad / *Н.С. Ащенкова* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – Харьков: – 2015. – № 5/7 (77). – С. 54-63.
11. *Ashchepkova N.* Divising a method to analyze the current state of the manipulator workspace / *N. Ashchepkova* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 1/7 (109). – P. 63-74.
12. *Ащенкова Н.С.* Моделювання та аналіз точності позиціонування маніпулятора / *Н.С. Ащенкова* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 19 (1241). – С. 34-42.
13. *Lloyd S.* A numeric derivation for fast regressive modeling of manipulator dynamics / *S. Lloyd, R. Irani, M. Ahmadi* // Mechanism and Machine Theory. – 2021. – № 156:104149.
14. *Khurpade J.* A Virtual Model of 2D Planar Manipulator Dynamics / *J. Khurpade, S.S. Dhami, S. Banwait* // International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT). – 2018.
15. *Tian S.X.* Dynamic Modeling and Simulation of a Manipulator with Joint Inertia / *S.X. Tian, S.Z. Wang* // International Symposium on Information and Automation, ISIA 2010: Information and Automation. – 2010. – P. 10-16.
16. *Никитин Н.Н.* Курс теоретической механики. Учебн. для ВУЗов / *Н.Н. Никитин* // М.: Лань, 2010. – 720 с.
17. *Павловський М.А.* Теоретична механіка. Підручник / *М.А. Павловський* // Київ: Техніка, 2002. – 512 с.
18. *Fausett L.V.* Numerical methods using Mathcad / *L.V. Fausett*. – Prentice Hall, 2002. – 702 p.
19. *Maxfield B.* Engineering with Mathcad: using Mathcad to create and organize your engineering calculation / *B. Maxfield*. – Butterworth-Heinemann. – 2006. – 512 p.
20. *Ащенкова Н.С.* Определение оптимальных конфигураций антропоморфного

манипулятора с шестью степенями подвижности / *Н.С. Ащепкова* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 28 (1353). – С. 94-107.

References:

1. Ashchepkova, N., Ashchepkov, S. and Kapera, S. (2018), "Dynamics of transport robot model during the turns", *Science and Education in New Dimension*, VI(19), Issue 171, pp. 26-29.
2. Tkachev, S. (2012), "Stabilization of nonminimum-phase multi-input affine system, Science and Education", *Scientific periodical of the Bauman MSTU*, №8.
3. Andrianova, O. (2011), "Path following simulation of wheeled vehicle", *Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU*, Vol. 10, № 77-30569/239840.
4. Gilimyanov, R., Pesterev, A. and Rapoport, L. (2008), "Motion control for a wheeled robot following a curvilinear path", *Journal of Computer and Systems Science International*, Vol. 47, № 6, pp. 987-994.
5. Kanatkov, A. and Kasatkina, T. (2012), "Features of transition to path coordinates in a problem of path stabilization", *Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU*, №7.
6. Bai, S., Zhou, L. and Wu, G. (2015), "*Manipulator Dynamics*", in book: *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer, pp. 1855-1872.
7. Orsag, M., Korpela, C., Oh, P.Y. and Bogdan, S. (2018), "*Aerial Manipulator Dynamics*", in book: *Aerial Manipulation*, Springer, pp. 33-85.
8. Jurevich, E. (2017), *Basis of robot*, BHV-Petersburg, St. Petersburg, 304 p.
9. Kolyubin, S. (2017), *Dynamics of the robots systems*, Publishing house of ITMO University, St. Petersburg, 117 p.
10. Ashchepkova, N. (2015), "Mathcad in the kinematic and dynamic analysis of the manipulator", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5/7 (77), pp. 54-63. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51105.
11. Ashchepkova, N. (2021), "Dividing a method to analyze the current state of the manipulator workspace", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1/7 (109), pp. 63-74, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225121.
12. Ashchepkova, N. (2019), "Determination of optimal configurations of an antropomorphic manipulator with six degrees of mobility", *Herald of the National Technical University "KhPI". Series of: Informatics and Modeling*. Vol. 28 (1353), pp. 94-107, DOI: 10.20998/2411-0558.2019.28.01.
13. Lloyd, S., Irani, R. and Ahmad, M. (2021), "A numeric derivation for fast regressive modeling of manipulator dynamics", *Mechanism and Machine Theory*, № 156:104149, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104149.
14. Khurpade, J., Dharmi, S. S. and Banwait, S. (2018), "A Virtual Model of 2D Planar Manipulator Dynamics", *International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, DOI: 10.1109/ICSSIT.2018.8748674.
15. Tian, S. X. and Wang, S. Z. (2010), "Dynamic Modeling and Simulation of a Manipulator with Joint Inertia", *International Symposium on Information and Automation, ISIA 2010: Information and Automation*, pp. 10-16.
16. Nikitin, N. (2010), *Course of theoretical mechanics*, Lan, Moscow, 720 p.
17. Pavlovsky, M. (2002), *Theoretical mechanics*, Technics, Kyiv, 512 p.
18. Fausett, L.V. (2002), *Numerical methods using Mathcad*, Prentice Hall, 702 p.
19. Maxfield, B. (2006), *Engineering with Mathcad: using Mathcad to create and organize your engineering calculation*, Butterworth-Heinemann, 512 p.

20. Ashchepkova, N. (2019), "Determination of optimal configurations of an anthropomorphic manipulator with six degrees of mobility", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, Kharkov, NTU "KhPI", 2019, № 28, pp. 94-107.

*Статтю представил д-р техн. наук, проф. ДНУ ім. О. Гончара
Давидов С.О.*

Надійшла (received) 10.06.2021

Ashchepkova Natalja Sergeevna, PhD, Associate professor
Department of Mechatronics
Oles Honchar Dnipro National University
Ave. Gagarin, 72, Dnipro, Ukraine, 49010
E-mail: ashchepkovanatalya@gmail.com
Contact tel.: (068)219-64-90,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1870-1062>

Koshevoy Nicolay Dmitrievich, Dr. Tech. Sci., Professor
Department of Intelligent Visual Systems and Engineering of Quality
National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute"
st. Chkalov, 17, Kharkov, Ukraine, 61070
E-mail: kafedraapi@ukr.net
Contact tel.: 050-76-90-92
ORCID: [http:// orcid.org/0000-0001-9465-4467](http://orcid.org/0000-0001-9465-4467)

УДК 629.7.615.3

Метод синтезу оптимальних траскторій схвату маніпулятора автономного мобільного робота / Кошовий М.Д., Ащепкова Н.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 86 – 98.

Розглянуто особливості динаміки автономного мобільного роботу змінюваної конфігурації при відносному русі маніпулятора. Для ефективного виконання маніпулятором АМР технологічних операцій в екстремальних наперед не визначених умовах доцільно на етапі проектування розробити базу даних, що містить оптимальні послідовності переміщень по узагальнених координатах, які забезпечують пересування схвату між заданими початковими і кінцевими точками робочого простору. Ил.: 3. Табл.: 2. Бібліогр.: 20 назв.

Ключові слова: автономний мобільний робот; маніпулятор; динаміка; схват; траекторія.

УДК 629.7.615.3

Метод синтеза оптимальных траскторий схвата манипулятора автономного мобильного робота / Кошовой Н.Д., Ащепкова Н.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 86 – 98.

Рассмотрены особенности динамики автономного мобильного робота изменяемой конфигурации при относительном движении манипулятора.

Для эффективного выполнения манипулятором АМР технологических операций в экстремальных заранее не известных условиях целесообразно на этапе проектирования разработать базу данных, содержащую оптимальные последовательности перемещений по обобщенным координатам, обеспечивающие перемещение схвата между заданными начальными и конечными точками рабочего пространства. Ил.: 3. Табл.: 2. Библиогр.: 20 назв.

Ключевые слова: автономный мобильный робот; манипулятор; динамика; схват; траектория.

UDC 629.7.615.3

Method of synthesis of optimal grip trajectories of a manipulator of an autonomous mobile robot / Koshovy M.D, Ashepkova N.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 86 – 98.

The features of the dynamics of an autonomous mobile robot of variable configuration with a relative motion of the manipulator are considered.

To effectively perform technological operations by the AMR manipulator in extreme previously unknown conditions, it is advisable at the design stage to develop a database containing the optimal sequences of movements along generalized coordinates that ensure the movement of the gripper between the given initial and final points of the working space. Figs.: 3. Tabl.: 2. Refs.: 20 titles.

Key words: autonomous mobile robot; manipulator; dynamics; grasping; trajectory.