

IV МЕХАНІЗАЦІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТИЗАЦІЯ

УДК 681.532:69.002.5

Канд. техн. наук О. Г. Гурко, Ю. О. Доля

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ АВТОГІДРОПІДІЙМАЧА З ОБЕРТАЛЬНИМИ ЗЧЛЕНУВАННЯМИ

У рамках вирішення завдання побудови системи автоматизованого управління рухом автогідропідіймача з двома обертальними секціями побудовано імітаційну модель, яка дозволила одержати залежності для визначення кінематичних параметрів руху підіймача. Адекватність одержаних залежностей підтверджено експериментально. Для проведення експерименту розроблено вимірювальний комплекс.

Ключові слова: автогідропідіймач, комп'ютерна модель, вимірювальний комплекс, експеримент, адекватність моделі.

Номенклатура

L_1	– хід штоку гідроциліндра нижньої секції;
L_2	– хід штоку гідроциліндра нижньої секції;
θ_B	– кут нахилу верхньої секції відносно горизонту;
θ_H	– кут нахилу нижньої секції відносно горизонту;
ω_B	– кутова швидкість руху верхньої секції;
v_B	– лінійне прискорення верхньої секції;
A_G	– значення кута, отримане при обробці даних від гіроскопа;
A_A	– значення кута, отримане при обробці даних від акселерометра;
Δt	– крок дискретизації за часом;
τ	– постійна часу акселерометра;
АГП	– автогідропідіймач;
САУ	– система автоматизованого управління;
МПП	– мікропроцесорний пристрій;
ПЕОМ	– персональна електронно-обчислювальна машина

Вступ

Утримання сучасного муніципального господарства часто пов'язане з організацією робіт на висоті, для проведення яких використовуються АГП. АГП – це вантажопідійомні машини, що призначені для переміщення людей у люльках, під кутом або вертикально з одного рівня на інший [1]. АГП є універсальним видом спецтехніки, що мають низку переваг, таких як мобільність, простота в управлінні, практичність і широка сфера за-

стосування. Оскільки АГП призначені для переміщення людей (робітників) на значну висоту, то вони вважаються обладнанням підвищеної небезпеки. У зв'язку з цим необхідна розробка і впровадження САУ, що дозволяють визначати безпечні і, в той же час, найбільш раціональні (з мінімальними витратами часу й енергії) режими руху секцій АГП з вихідної точки в кінцеву, а також реалізовувати цей рух.

Постановка задачі

При розробці САУ АГП необхідно мати адекватну математичну та/або комп'ютерну модель автогідропідіймача. Адекватність моделі підтверджується шляхом порівняння результатів моделювання й експериментальних даних, розбіжність між якими не повинна перевищувати 10–18 % [2]. Тому метою даної роботи є побудова комп'ютерної моделі механізму АГП та експериментальна перевірка її адекватності.

Досягнення поставленої в роботі мети передбачає вирішення наступних завдань: 1) побудову комп'ютерної моделі АГП; 2) розробку вимірювального комплексу для дослідження руху АГП; 3) проведення експериментальних досліджень параметрів руху АГП; 4) шляхом порівняння результатів моделювання і експериментальних даних оцінити адекватність комп'ютерної моделі.

Огляд літератури

Питанням дослідження і управління рухом секцій АГП в літературі приділено недостатньо уваги. Серед робіт що присвячені даній темі, слід відзначити [3], в якій запропонована САУ рухом АГП з ПД-регулятором. Для визначення бажаних законів зміни узагальнених координат і їх швидкостей при переміщенні секцій АГП з одного положення в інше використовувалася інтерполяційний поліном п'ятого порядку. Однак, в роботі не враховувалися обмеження на положення і швидкість руху секцій АГП. Кінематичному дослідженню АГП присвячена робота [4], в якій отримано аналітичний розв'язок задачі визначення положення вузлових точок механізму двосекційного АГП.

У той же час, існує розв'язок аналогічних завдань, але для інших видів будівельної техніки з робочим обладнанням маніпуляторного виду. Зокрема в [5] визначено умови розсіювання енергії у приводах шарнірно-зчленованої стріли для крана маніпулятора. У роботі [6] наведено методику розрахунку оптимального режиму пуску висувної рукояті крана-маніпулятора разом з вантажем, визначені кінематичні характеристики руху системи, з заданими крайніми умовами руху висувної рукояті з вантажем. Монографія [2] присвячена розробці оптимальних траєкторій робочого органу будівельного маніпулятора. Робота [7] присвячена розробці САУ маніпулятором гідравлічного екскаватора.

Таким чином, є доцільним використати досвід, накопичений при дослідженні інших машин, при розробці САУ АГП. САУ АГП повинна забезпечити плавність ходу секцій та необхідну орієнтацію люльки при подачі її до місця проведення робіт. При проектуванні такої САУ необхідно знати існуючі заборонені положення, неприпустимі значення з точки зору кінематичних і геометричних обмежень, та гранично допустимі значення швидкостей та прискорень. Ці значення можна отримати аналітично або шляхом моделювання, але в реальному випадку аналітичні й емпіричні розрахунки будуть відрізнятися один від одного.

Матеріали і методи

Як приклад будемо розглядати двосекційний АГП з ланками, що обертаються, який знаходиться на навчально-науковій виробничій базі ХНАДУ. Для дослідження параметрів руху АГП у пакеті «КОМПАС-3D» побудована 2D модель АГП масштабі 1:10 (рис. 1). Дана модель використовувалася для визначення кінематичних залежностей між переміщенням штоків виконавчих гідроциліндрів і кутовими положеннями секцій АГП, а також при визначенні значень кутових швидкостей і прискорень елементів кінематичної схеми АГП.

При отриманні зазначених залежностей розглядалося переміщення верхньої секції з початкового положення $\theta_{v0} = -7,7$ градуса в кінцеве $\theta_{vf} = -68,9$ градуса, в той час, як кут нахилу нижньої секції змінювався від $\theta_{h0} = 3,5$ до $\theta_{hf} = 23,0$ градусів. Хід L_1 штоку гідроциліндра нижньої секції АГП змінювалася в діапазоні $L_1 = 0 \dots 140$ мм, а гідроциліндра верхньої секції $L_2 = 0 \dots 380$ мм.

Для зручності обчислень діапазони зміни L_1 та L_2 від початкового значення до кінцевого були розбиті на 5 інтервалів з кроком 35 мм для L_1 , і 95 мм для L_2 (табл. 1).

Таблиця 1 – Діапазони ходу гідроциліндрів секцій АГП

L_1 , мм	0	35	70	105	140
L_2 , мм	0	95	190	285	380

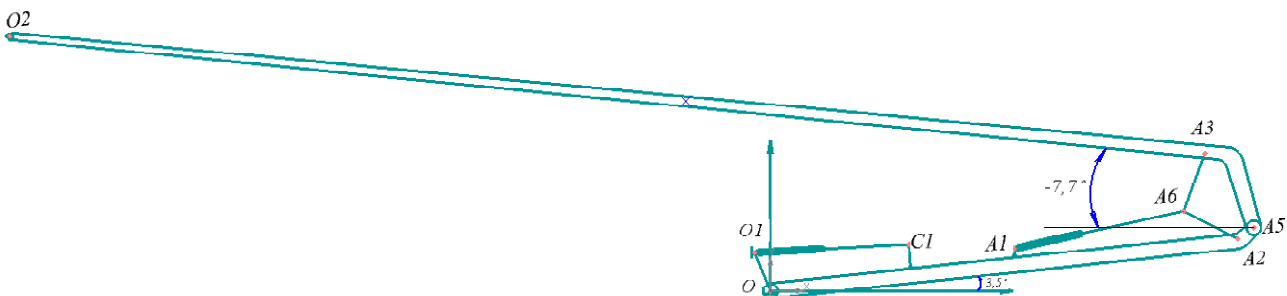


Рис. 1. 2D модель автогідропідіймача

$$\theta_H = 8,552L_1 - 3,0832, \quad (1)$$

$$\theta_H = -0,236L_1 + 39,35, \quad (2)$$

$$\theta_B = 0,1534L_2 - 8,4085, \quad (3)$$

$$\theta_B = -0,1532L_2 + 69,157, \quad (4)$$

$$\omega_B = 10^{-6}L_2^2 - 0,0005L_2 + 0,1865, \quad (5)$$

$$\upsilon_B = -0,0002L_2^2 - 0,0973L_2 + 18. \quad (6)$$

Залежності (1), (3), (5), (6) відповідають підніманню секцій, а (2), (4), – їх опусканню.

Для перевірки адекватності отриманих рівнянь (1)–(6) необхідно виконати перевірку з експериментальними даними. Визначення поточних значень параметрів руху АГП в реальному часі вимагає розробки відповідного вимірювального комплексу.

Експерименти

В основі розробленого вимірювального комплексу (рис. 2) для реєстрації даних про динамічні параметри АГП використано датчик GY-521 на мікросхемі MPU6050 компанії InvenSense, виконаний за MEMS-технологією (Micro Electro Mechanical Systems). У складі датчика є трьохкоординатний гіроскоп і трьохкоординатний акселерометр, що робить його вимірювальним пристроєм з 6-ма ступенями свободи. MPU 6050 містить 7 вбудованих 16-ти бітних АЦП: по 3 для оцифрування виходів з гіроскопа і з акселерометра, і 1 – для вбудованого датчика температури, який використовується для температурної корекції результатів.

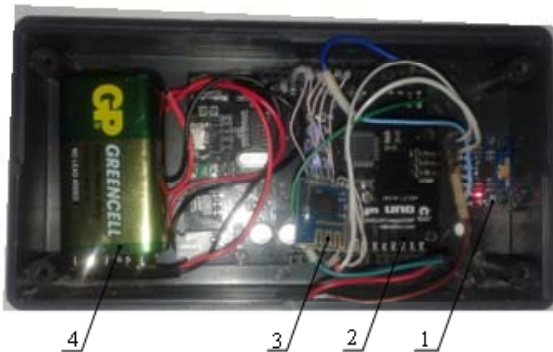


Рис. 2. Вимірювально-передавальний модуль:

- 1 – датчик руху GY-521; 2 – мікропроцесорний пристрій Arduino UNO; 3 – радіомодуль SE08R01; 4 – джерело живлення

Передача результатів вимірювання від встановлених на секціях АГП датчиків до закріплених поруч МПП проводиться за допомогою двохдротового інтерфейсу I2C. Кожний з МПП виконує попередню обробку показань і передає отримані результати для подальшого аналізу на віддалено розташовану ЕОМ. Використання дротового інтерфейсу для обміну даними між МПП та ЕОМ

незручно і недоцільно, оскільки вимагає наявності досить протяжних ліній, а крім того, є ризик їх пошкодження. У зв'язку з цим реалізований бездротовий обмін даними МПП/ЕОМ. Для цієї мети використаний радіопередавальний модуль SE08R01 (рис. 2), який може виконувати роль як приймача, так і передавача, працює за стандартним UART інтерфейсом, має вбудований фільтр і апаратний контроль помилок. У якості МПП використана мікропроцесорна платформа Arduino UNO.

Дані про лінійні прискорення і кутові швидкості, отримані від GY-521, використовуються для визначення кутових положень секцій АГП у відповідності з наступною формулою [8]:

$$\alpha = k \cdot A_A + (1-k) \cdot A_G. \quad (7)$$

$$k = \frac{\tau}{\tau + \Delta t}. \quad (8)$$

Таким чином, реалізується комплементарний фільтр, який дозволяє компенсувати похибку визначення кутових положень за допомогою одних тільки акселерометрів.

Структурна схема розробленого вимірювального комплексу наведена на рис. 3.

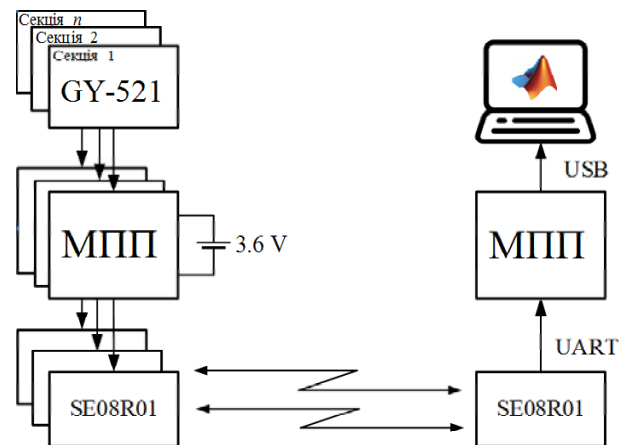


Рис. 3. Структура вимірювального комплексу

Для визначення впливу випадкових похибок на результати вимірювань проведено серію експериментів у статистиці, тобто при нерухомому АГП, і виконана статистична обробка отриманих даних, що дозволило оцінити точність вимірювань. При цьому три датчики були однаково орієнтовані на нерухомій, гладкій, горизонтальній поверхні. Рівень горизонту був перевірений за допомогою датчика цифрового кутоміра Bosch PAM 220, що має похибку вимірювання рівня $\pm 0,05^\circ$. Показання датчиків передавалися на ПЕОМ з періодичністю 124 мс, у результаті чого для кожного датчика сформована генеральна сукупність з 484 елементів. Значення основних статистичних показників вибірок наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення показників вибірок при вимірюванні нуля

Показник	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3
Середнє, $\bar{\alpha}_i$ [°]	-0,004	-0,005	-0,004
Стандартна помилка, S_E [°]	0,002	0,002	0,002
Медіана, [°]	0,000	0,000	0,000
Стандартне відхилення, σ [°]	0,042	0,051	0,049
Дисперсія вибірки, σ^2 [°]	0,002	0,003	0,002
Мінімальне значення у вибірці, α_{\min} [°]	-0,09	-0,15	-0,14
Максимальне значення у вибірці, α_{\max} [°]	0,11	0,12	0,12
Рівень надійності (95,0 %)	0,004	0,005	0,004

Таким чином, можна сформулювати вихідну гіпотезу про те, що розглянуті помилки вимірювання підпорядковуються нормальному закону розподілу ймовірності із середніми значеннями $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_3 = -0,004^\circ$, $\bar{\alpha}_2 = -0,005^\circ$ і стандартними відхиленнями $\sigma_1 = 0,042^\circ$, $\sigma_2 = 0,051^\circ$; $\sigma_3 = 0,049^\circ$ відповідно для першого, другого і третього датчиків.

Отримані вибірки проаналізовані на наявність промахів за допомогою критерію Н.В. Смирнова. У результаті перевірки промахів у вибірках не виявлено.

З вибірки сформовані варіаційні ряди, які підлягають перевірці на нормальність розподілу. У якості критерію узгодження використано критерій Пірсона [9]. Спостережувані значення $\chi^2_{спос1} = 7,30$, $\chi^2_{спос2} = 6,92$ та $\chi^2_{спос3} = 11,70$ для 1-го, 2-го і 3-го датчиків відповідно. Рівень значущості прийнятий рівним 0,05. Критичні значення: $\chi^2_{крит1} = 11,07$, $\chi^2_{крит2} = \chi^2_{крит3} = 12,59$. Умова $\chi^2_{спос} \leq \chi^2_{крит}$ виконується, отже, дані спостережень узгоджуються з гіпотезою про нормальний розподіл результатів вимірювань.

На рис. 4 наведені гістограми, що характеризують емпіричні щільності ймовірності (1), а також криві (2), що описують теоретичні щільності p_i при нормальному розподілі.

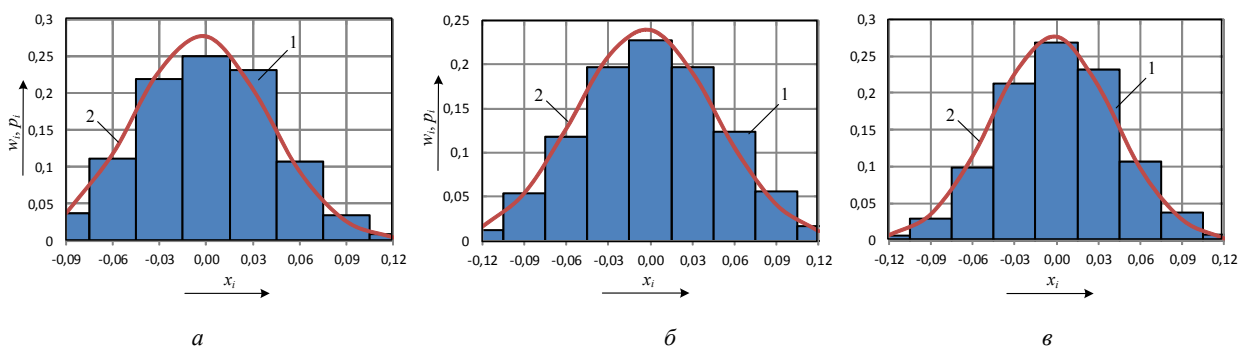


Рис. 4. Емпіричні (1) і теоретичні (2) щільності ймовірностей при вимірі нуля: а – датчик 1; б – датчик 2; в – датчик 3

Для перевірки адекватності комп'ютерної моделі АГП та одержаних залежностей (1)–(6) проведено ряд експериментів над АГП. Визначення параметрів руху секцій АГП здійснювалося за допомогою описаного вище вимірювального комплексу.

Розташування вимірювально-передавальних модулів зображено на рис. 5.

У ході проведення експерименту визначалися: кути, кутові швидкості та лінійні прискорення точок P_0, P_1, P_2 (рис. 5).

Результати

Приклади зміни одержаних вимірювальних параметрів від часу наведені на рис. 6–8.

Після обробки одержаних результатів вимірювання розраховано залежності кутів повороту та кутових швидкостей від переміщення штоків виконавчих гідроциліндрів. Відповідні залежності у вигляді графіків наведено на рис. 9–12. На тих же рисунках для зручності зображені графіки, що побудовані за результатами моделювання на підставі формул (1)–(6).

Обговорення

Аналіз рисунків 9–14, а також даних в табл. 3, де наведені процентні значення відхилень між залежностями, одержаними при моделюванні та шляхом проведення експерименту, не перевищують 11 %, що свідчить про адекватність побудованої комп'ютерної моделі. Таким чином, її можна використовувати при синтезі та аналізі САУ.



Рис. 5. Розташування датчиків на експериментальному АГП

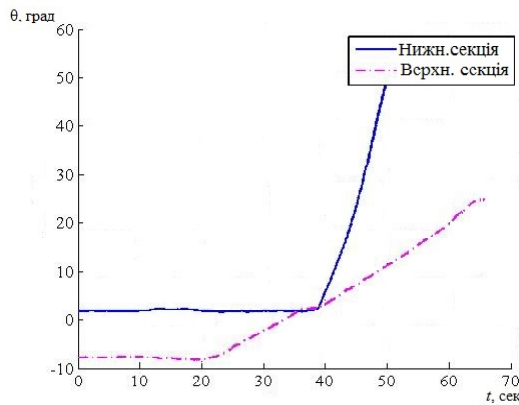


Рис. 6. Графік зміни кута нахилу нижньої і верхньої секцій в залежності від часу

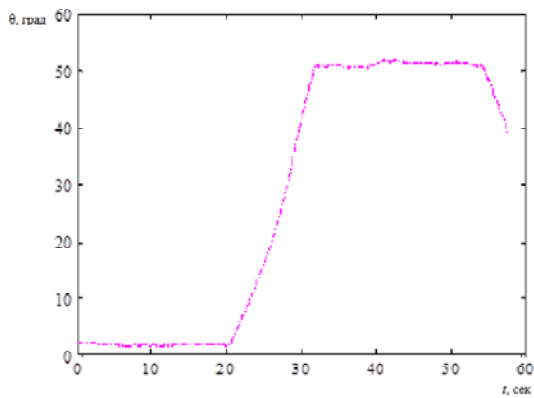


Рис. 7. Графік зміни кута верхньої секції в залежності від часу

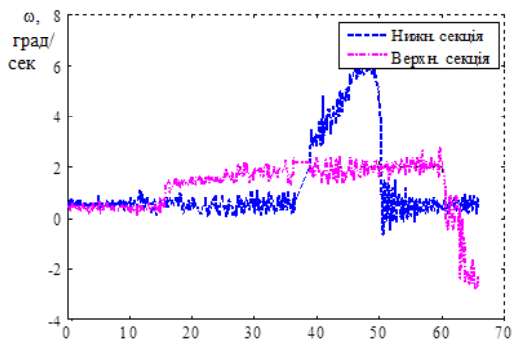


Рис. 8. Графік зміни кутових швидкостей верхньої і нижньої секцій в залежності від часу

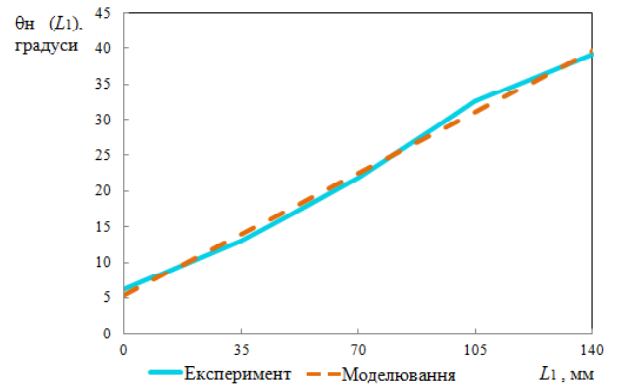


Рис. 9. Зміна кута нахилу при підйомі нижньої секції

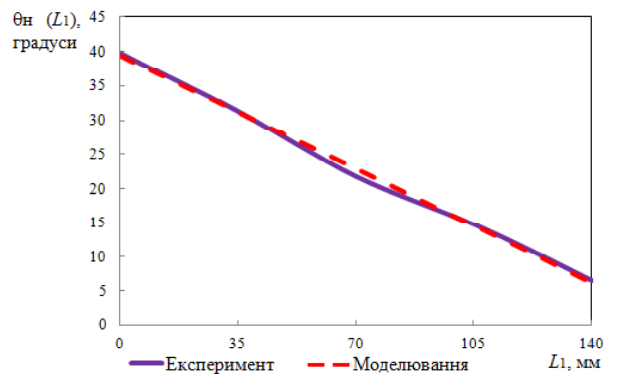


Рис. 10. Зміна кута нахилу при опусканні нижньої секції

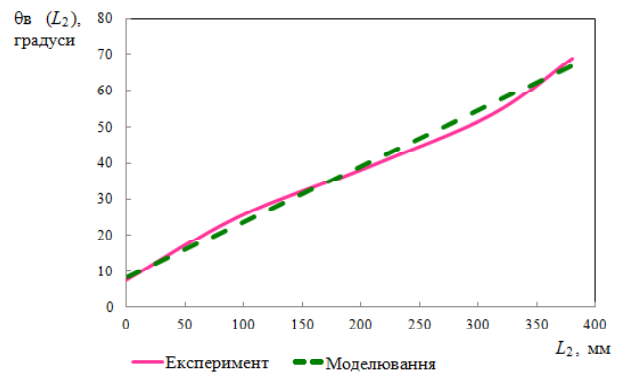


Рис. 11. Зміна кута нахилу при підйомі верхньої секції

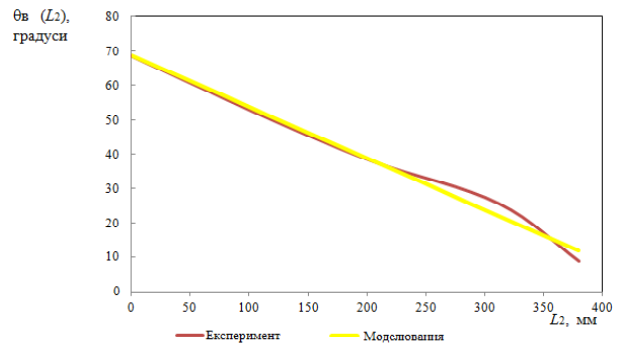


Рис. 12. Зміна кута нахилу при опусканні верхньої секції

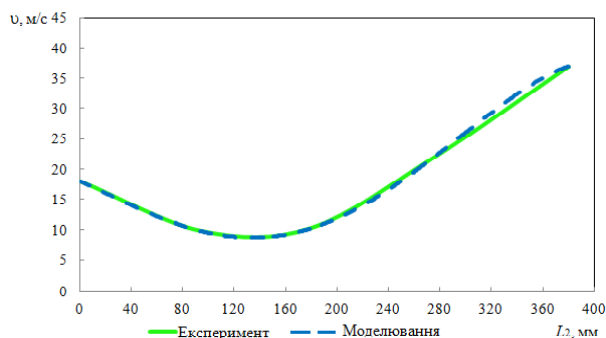


Рис. 13. Лінійна швидкість люльки при підйомі верхньої секції

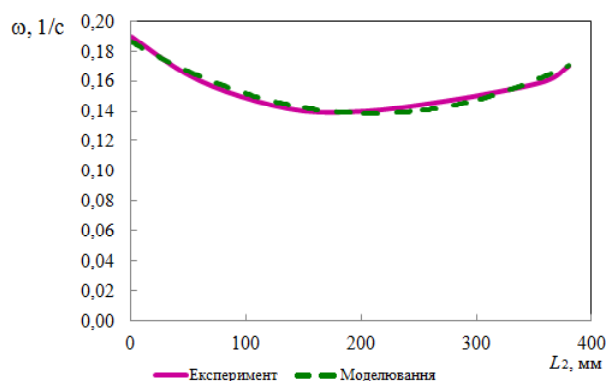


Рис. 14. Кутова швидкість підйому верхньої секції

Таблиця 3 – Середньоквадратичне відхилення даних між моделюванням і експериментальними даними

Параметр	Відхилення, %
Кут θ_H , при підйомі нижньої секції	10,38
Кут θ_H , при опусканні нижньої секції	7,07
Кут θ_B , при підйомі верхньої секції	7,18
Кут θ_B , при опусканні верхньої секції	2,92
Лінійна швидкість v_B люльки	8,27
Кутова швидкість ω_B підйому верхньої секції	0,02

Відхилення між модельними та експериментальними даними пов'язано з тим, що при моделюванні руху АГП передбачалися ідеальні умови руху з постійними швидкостями руху штоків та у відсутності дії різноманітних зовнішніх факторів.

Висновки

Проаналізувавши проведені дослідження, можна зробити наступні висновки.

Комп'ютерна модель, що описує рух АГП досить близька до експериментальної, отриманої в результаті проведення випробувань на натурному зразку, і є адекватною. Таким чином, її можна використовувати для подальших розрахунків.

Отримані в ході моделювання залежності є вихідними даними для вирішення завдання синтезу раціональних траєкторій секцій АГП.

Розроблений вимірювальний комплекс, що має необхідні характеристики для здійснення виміру параметрів руху АГП в реальному часі та може бути використаний для реалізації зворотнього зв'язку в САУ АГП.

Наступним кроком при синтезі САУ АГП є розробка математичної та комп'ютерної моделі АГП з урахуванням динамічних параметрів. На вирішення даного завдання спрямована подальша робота.

Подяки

Висловлюємо вдячність за організаційну та технічну допомогу Розенфельду Миколі Володимировичу, старшому викладачеві ХНАДУ за допомогу при проведенні експерименту та обробці його результатів.

Список літератури

1. Гудков Ю. И. Автомобильные подъёмники и вышки / Ю. И. Гудков, Н. П. Сытник. – К. : Основа, 2004. – 208 с.
2. Щербаков В. С. Автоматизация моделирования оптимальной траектории движения рабочего органа строительного манипулятора : монография / В. С. Щербаков, И. А. Реброва, М. С. Корытов. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2009. – 106 с.
3. Гурко А. Г. Разработка системы управления движением автогидроподъемника / А. Г. Гурко, И. Г. Кириченко // зб. наук. праць : Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія : Підйомно-транспортні, будівельні і дорожні машини і обладнання. – 2014. – С. 210–220.
4. Гурко А. Г. Исследование положений стрелы двухзвенного автогидроподъемника / А. Г. Гурко, Н. В. Розенфельд, Ю. А. Доля // Технология приборостроения. – 2015. – Вып. 1. – С. 58–61.
5. Ловейкін В. С. Области збереження енерговитрат у вантажних маніпуляторах на транспортних засобах / В. С. Ловейкін, Д. О. Мішук // Гірничі та піднімально-транспортні машини. – 2009. – № 75. – С. 37–42.
6. Ловейкін В. С. Оптимізація режиму пуску висувної рукояті крана-маніпулятора під час горизонтального переміщення вантажу з урахуванням його коливань / В. С. Ловейкін, Д. О. Мішук // Гірничі та піднімально-транспортні машини. – 2010. – № 76. – С. 3–8.
7. Gurko A. Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control / A. Gurko, O. Sergiyenko etc. // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2016. – Vol. – P. 177–196.
8. Мещеряков Я. Е. Мониторинг точности позиционирования основных функциональных узлов технологических машин / Я. Е. Мещеряков, А. М. Кориков // Актуальные проблемы современного машиностроения : сборник трудов Международной научно-практической конференции, г. Юрга, 11–12 декабря 2014 г. – Томск, 2014. – С. 38–42.
9. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : Справочник / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.

Одержано 12.12.2016

Гурко А.Г., Доля Ю.А. Исследование параметров движения автогидроподъемника с вращательными сочленениями

В рамках решения задачи построения системы автоматизированного управления движением автогидроподъемника с двумя вращательными секциями построена имитационная модель, которая позволила получить зависимости для определения кинематических параметров движения подъемника. Адекватность полученных зависимостей подтверждена экспериментально. Для проведения эксперимента разработан измерительный комплекс.

Ключевые слова: автогидроподъемник, компьютерная модель, измерительный комплекс, эксперимент, адекватность модели.

Gurko A., Dolia Yu. Investigation of cherry-picker motion parameters with rotational joints

Within the framework of the solution of the problem of creation of an automated control system of a two-link cherry-picker movement, the simulation model, which allowed obtaining the cherry-picker kinematic relationships, has been built. The adequacy of the obtained relationships has been confirmed by experimental results. For carrying out of the experiment a measuring complex has been created.

Key words: cherry-picker, computer model, measurement complex, experiment, model adequacy.
