АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

УДК 681.513;62.505;621.9.04 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).211-219

В.А. Зозуля, доц., канд. техн. наук, **С.І. Осадчий,** проф., д-р техн. наук,
М.М. Мельніченко, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: irish38@ukr.net

Аналіз характеристики точності відтворення еталонної траєкторії платформою Гауфа-Стюарта з системою управління для різних видів завдань

Мета статті полягає в аналізі публікацій направлених на отримання оцінки точності відтворення тестового сигналу платформою Гауфа–Стюарта з певною системою керування для різних видів задач на підставі експериментальних даних. Були виявлені особливості конструкції, системи керування, типу тестового сигналу та умов експерименту, які впливають на характеристики точності платформи Гауфа–Стюарта.
платформа Гауфа-Стюарта, система управління, еталонна траєкторія, оцінки точності

В.А. Зозуля, доц., канд. техн. наук, С.И. Осадчий, проф., д-р техн. наук, Н.Н. Мельниченко, асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Анализ характеристики точности воспроизведения эталонной траектории платформой Гауфа-Стюарта с системой управления для различных видов задач

Цель статьи заключается в анализе публикаций направленных на получение оценки точности воспроизведения тестового сигнала платформой Гауфа-Стюарта с определенной системой управления для различных видов задач на основании экспериментальных данных. Были выявлены особенности конструкции, системы управления, типа тестового сигнала и условий эксперимента, которые влияют на характеристики точности платформы Гауфа-Стюарта.
платформа Гауфа-Стюарта, система управления, эталонная траектория, оценки точности

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливий інтерес представляє механізми паралельної кінематичної структури на основі платформи Гауфа-Стюарта (гексапод), яка має шість однотипних кінематичних ланцюгів (штанг) і має шість ступенів вільності рухомої платформи [1,2]. Програмно регулюючи довжину штанг, можна керувати положенням вихідної ланки, переміщати її в вертикальному і горизонтальному напрямках, повертати в трьох площинах.

Багатьма авторами були розроблені та досліджені зразки платформи Гауфа-Стюарта (гексапод) [2-6]. Зокрема, авторами [4] розроблено дослідний зразок верстата на основі платформи Гауфа-Стюарта (гексапод), до складу якої входять: шість сервосистем змінного струму, однокомпьютерній варіант системи PCNC (Personal Computer Numerical Control) на основі вільно поширюваного програмного забезпечення з відкритим кодом LinuxCNC на платформі ОС Linux Ubuntu. Створена фізична модель може бути застосована для фізичного моделювання руху об’єктів в 3D просторі, механізмів переміщення робочих органів металорізальних верстатів та контрольно-вимірювальних машин з паралельної кінематикою і інших технічних об'єктів.

© В.А. Зозуля, С.І. Осадчий, М.М. Мельніченко, 2019

Але, з багатьох літературних джерел, наприклад [2, 5-8], відомо, що платформа Гауфа-Стюарта відноситься до багатовимірного об'єкту управління, динаміка, якої залежить від сфери її застосування. З наведеного огляду літературних джерел, використання платформи Гауфа-Стюарта для вирішення різних завдань, можна побачити, що існують технологічні завдання при яких вона здійснює рух, точно слідуючи бажаної траєкторії і положенню орієнтації в певному часовому інтервалі: при значному впливі, що збурює з боку навколишнього середовища (оброблювальний центр - режим в зоні обробки, стабілізаційна платформа - під впливом поривів вітру, морської качки) так і при незначному впливі, що збурює з боку навколишнього середовища (тренажер льотної підготовки, вібраційна платформа). При цьому практично всі види завдань, які вирішуються платформою Гауфа-Стюарта здійснюються в режимі програмного управління.

Важливою частиною даних досліджень є розробка системи управління рухом механізму несучої системи платформи Гауфа-Стюарта, виходячи із заданих вимог, що пред'являються до системи. Однак, досягнення граничних динамічних характеристик такими механізмами можливо тільки в результаті розробки і впровадження оптимальних замкнених систем управління [9]. Однією з граничних динамічних характеристик є оцінка точності.

Існують публікацій [10, 11] спрямовані на аналіз показника точності позиціювання, який є інтегральною оцінкою точності виготовлення основних базових деталей несучої системи механізму і визначається сукупною дією всіх первинних похибок механізму при нульовій швидкості руху (оцінка в статиці). Такі дослідження не дозволяють дати оцінку точності виконання заданої траєкторії несучою механічною системою разом з системою управління і тим більше визначити граничні можливості підвищення точності.

Постановка проблеми. Виходячи з цього проблема дослідження полягає у тому, що за результатами випробування платформи Гауфа-Стюарта оцінити зв'язок якості виконання завдання стеження за еталонною траєкторією в динаміці для різних видів задач з відповідним способом керування.

Постановка завдання. Мета статті полягає в аналізі публікацій направлених на отримання оцінки точності відтворення тестового сигналу платформою Гауфа–Стюарта з певною системою керування для різних видів задач на підставі експериментальних даних. При цьому виявити особливості конструкції, системи керування, типу тестового сигналу та умов експерименту, які впливають на характеристики точності платформи Гауфа–Стюарта.

Виклад основного матеріалу. Для оцінки точності руху механізму несучої системи гексаподу в динаміці все частіше застосовується методика вимірювання точності відпрацювання еталонної траєкторії, зокрема, окружності, заданого радіуса. Методи і порядок проведення оцінки точності відпрацювання кругової траєкторії регламентуються ДСТУ 30544 «Методи перевірки точності і постійності відпрацювання кругової траєкторії» і стандартом ISO 230-4 [12].

В роботі [10] представлені оцінки точності роботи верстата-гексапод «Гексамех-1». В основу несучої системи верстата покладена перевернута платформа Гауфа-Стюарта, яка має шість ступенів рухливості. Верстат-гексапод «Гексамех-1» призначений для обробки складних криволінійних поверхонь великогабаритних деталей методом швидкісного фрезерування, свердління і розточування. В якості системи ЧПУ застосована система управління «POWER AUTOMATION» зі спеціальною платою переходу від декартової системи координат в систему L - координат (систему координат приводів штанг), з використанням системи управління

на основі ПІД регулятора. У цій роботі наведено експериментальні дослідження оцінки точності відпрацювання еталонної окружності, яка виконується верстатом-гексаподом «Гексамех-1» з радіусом 150мм в площині XY на висоті 300 мм над площиною столу, при швидкості обходу кола 500 мм / хв. Відносна похибка відтворення еталонної окружності по координаті X 18%, по координаті Y 15%, середнє квадратичне відхилення 17%.

Аналіз експериментальних даних представлених в роботі [10] показує, що характер поведінки кривої відхилення від окружності мало залежить від висоти розташування платформи Гауфа-Стюарта над площиною столу, як і від радіусу кола. У розглянутому джерелі вважають, що низькочастотна складова кривої відхилення від середнього значення - це, кінематичне відхилення, яке викликається первинними похибками механізму - платформи Гауфа-Стюарта, відхилення положення розмірів і форми реального елемента кінематичної пари в тілі ланки від положення, розмірів і форми ідеального елементу, а також проковзування в парах кочення , які не враховуються в алгоритмі калібрування верстата. Спостерігається високочастотна складова, амплітуда якої збільшується зі збільшенням швидкості обходу кола. Дослідження точності відпрацювання кругової траєкторії при різних швидкостях обходу показали, що амплітуда високочастотних коливань залежить від швидкості обходу кола, частота коливань, яких близька до 1-й власній частоті несучої системи верстата-гексаподу. Середнє квадратичне відхилення (розсіювання значень випадкової величини відносно її математичного очікування - ДСТУ 8.736-2011) характеризує ступінь вибору натягу у всіх рухомих і нерухомих стиках вузлів верстата-гексапод, а також характеризує сили тертя в рухомих вузлах верстата-гексапод (спрямовувачі, ШГП, підшипники і ін.).

У статті [13] представлений прототип фрезерного верстата-гексаподу Hexaglide, розробленого Інститутом верстатобудування в ETH Zurich, Швейцарія на базі перевернутої платформи Гауфа-Стюарта. Для управління Hexaglide запропонована схема, нелінійного адаптивного регулятора з спостерігачем за швидкістю, аналогічний так званому регулятору обчисленого крутного моменту. При цьому динамічна модель платформи Гауфа-Стюарта в режимі реального часу використовує потрібні значення замість фактичних координат платформи. Оскільки розрахунок динамічної моделі платформи Гауфа-Стюарта в декартовій системі координат з використанням чисельного алгоритму для вирішення прямої кінематики займає дуже багато часу. Так само наведені порівняльні експериментальні дані точності відтворення еталонної траєкторії з діаметром кола 40 мм, для верстата-гексапод Hexaglide під керуванням ПД регулятора і під управлінням нелінійного адаптивного регулятора з спостерігачем. Для ПД регулятора при швидкості 0,1 м/с відхилення від окружності мінімальне - 17 μм, максимальне - 19 μм, відносна похибка - 9%; при швидкості 0,3 м/с мінімальне - 24 μм, максимальне - 127 μм, відносна похибка - 34%; при швидкості 0,4 м/с мінімальне - 56 μм, максимальне - 253 μм, відносна похибка - 66%. Для нелінійного адаптивного регулятора при швидкості 0,4 м / с відхилення від окружності мінімальне - 11 μм, максимальне - 34 μм, відносна похибка - 10%. Аналіз експериментальних даних точності відтворення еталонної окружності показує залежність збільшення похибки від швидкості відтворення, для ПД регулятора. Так само можна зробити висновок, що нелінійний адаптивний регулятор з спостерігачем за швидкістю володіє в кілька разів більше точністю, ніж звичайний ПД регулятор.

У статті [14] представлена платформа Гауфа-Стюарта, розроблена в Політехнічному університеті Каталонії (UPC). Ця платформа була адаптована до загальної задачі спостереження. Управління кожної віссю здійснюється ПД

регулятором. Наведено експериментальні дані оцінки точності відтворення кола радіусом 100 мм. Максимальна помилка відтворення траєкторії по абсолютній величині становить менше 3,8 мм або відносна похибка 3,8%.

У статті [15] розглядається експериментальна установка робота-маніпулятора, на основі платформи Гауфа - Стюарта. Верхня платформа його може переміщатися в межах ±0,2 м по осях X і Y, ±0,1 м по осі Z, ±25° по крену і тангажу і ±30° по рисканню. У цій статті запропоновано дослідження регулятора на основі зворотної динаміки, також званий регулятор обчисленого крутного моменту. В основі цього регулятора лежить припущення, що нелінійні матриці коефіцієнтів динамічної моделі платформи Гауфа-Стюарта через малий діапазон руху можна апроксимувати і отримати постійними. Тим самим спростивши реалізацію цього регулятора в реальному часі. Помилки моделювання, викликані таким наближенням, компенсуються робастним регулятором H∞, який розглядає помилку як збурення, при цьому ПІД-регулятор використовується в прямому зв'язку для стеження за положенням. Так само в цій статті представлені результати експериментів, в яких центр платформи відтворює еталонну кругову траєкторію з радіусом 0,02 м в площині XY з швидкістю 0,314 м / с під управлінням регулятора на основі зворотної динаміки з компенсацією невизначеностей робастних регулятором H∞ і простого ПІД- регулятора. Максимальне відхилення від еталонної окружності для регулятора на основі зворотної динаміки одно 0,75 мм або відносна похибка 3,75%, для ПІД-регулятора 3 мм або відносна похибка 15%. Можна зробити висновок, що регулятор на основі зворотної динаміки з компенсацією невизначеностей робастним регулятором H∞ набагато якісніше відстежує еталонну траєкторію, ніж простий ПІД-регулятор.

Для дослідження характеристик по точності в динаміці платформи Гауфа-Стюарта з системою управління крім кругової траєкторії використовується синусоїдальний тестовий сигнал.

В роботі [16] наведено випробувальний стенд на базі платформи Гауфа-Стюарта під назвою Active-helideck. Він спроектований як активний вертолітний майданчик, який використовується при посадці і зльоті з кораблів або з морських споруд. Active-helideck компенсує коливання корабля під дією морської хвилі. Компенсація здійснюється за допомогою з координованого дії його шести приводів у відповідності з сигналами інерціального вимірювального пристрою, який визначає поточний стан вертолітного майданчика.

Так само в цій роботі наведено експериментальне дослідження метою, якого було визначити можливість стабілізації активного вертолітного майданчика з платформою Гауфа-Стюарта під дією коливань корабельної палуби. Управління положенням активного вертолітного майданчика і корабельної палуби здійснюється за допомогою ПД регулятора. Моделювання коливання морської хвилі (корабельної палуби) виконується паралельним роботом з трьома ступенями свободи, уздовж осі z - у вертикальному напрямку, і обертанням по осях - крену і тангажу, за допомогою синусоїдальних коливань (частота ≈0,1 Гц при амплітуді 70мм). З експериментальних результатів можна визначити, що похибка стабілізації положення вертолітного майданчика представлена кутами Ейлера та дорівнює: максимальне відхилення курсу (рискання) - 0,005°, крену - 0,01° тангажу - 0,012° в лінійних переміщеннях X - 28 мм, або відносна похибка 40 %, Y - 34мм або відносна похибка 48,5%, і Z - 4 мм або відносна похибка 5,7%.

Можна зробити висновок, що для платформи Гауфа-Стюарта, яка виконує стабілізацію положення, дуже важливо мати якісні показники точності за кутами крену, тангажу, курсу (рискання) і за лінійною координатою Z. Крім того, недоліком при

оцінці точності стабілізації є те, що експериментальне дослідження були проведені при регулярному сигналі, а експлуатація платформи Active-helideck здійснюється при впливі морської хитавиці, тобто випадкових коливаннях.

Для аналітичного представлення спектру нерегулярного морського хвилювання можна використовувати два методи. У першому з них параметри спектра розглядають як функції умов хвилеутворення: швидкості і тривалості дії вітру, довжини розгону хвиль і т. д. У другому методі вважають відомими видимі елементи хвиль (наприклад, середню висоту або висоту 3% забезпеченості, середній період) і параметри спектра визначають як функції цих елементів. Перший метод використовують, головним чином, для прогнозів хвилювання, другий - для розрахунку впливу хвиль на різні споруди, в тому числі і на кораблі.

Реальне морське хвилювання нерегулярно і трехмерно. Таке хвилювання характеризують просторово-часовими спектрами. Вони ґрунтуються на уявленні схвильованої поверхні моря тривимірною моделлю у вигляді неізотропного однорідного випадкового поля. Так наприклад, в роботі [17] були отримані графічні зображення спектральних і взаємних спектральних щільностей тривимірної просторової качки "важкого" корабля (ПКІК "Юрій Гагарін").

У статті [5] запропонована експериментальна установка паралельного маніпулятора з 6 ступенями свободи, на основі платформи Гауфа-Стюарта. На основі експериментальних даних проведено порівняльний аналіз точності відтворення тестових траєкторій паралельним маніпулятором під керуванням трьох регуляторів: робастного нелінійного регулятора на основі робочого простору з методом непрямої оцінки стану і тертя системи (закон управління називається TRNCE); нелінійного регулятора на основі робочого простору з методом непрямої оцінки стану і тертя системи (закон управління називається TNCE); ПІД регулятора на основі простору узагальненої координати з методом непрямої оцінки стану і тертя системи (закон управління PIDE). Схема непрямої оцінки стану системи складається з методу Ньютона-Рафсона і алгоритму альфа-бета-трекера, які є простим рішенням і легко застосовні до реальної системи замість дорогого датчика 6 DOF стану. Спостерігач тертя Фрідленде-Парку застосовується в якості еквівалентної оцінки тертя для ослаблення невизначеного обурення через тертя. Була виконана оцінка точності відтворення різноспрямованих чотирьох тестових синусоїдальних сигналів: крен - 2,0°/1,0 Гц, тангажу - 5,0°/0,5 Гц, рискання - 2,5°/1,0 Гц і вертикальна хитавиця - 5,0 мм/0,5 Гц. Лінійні похибки відтворення тестового сигналу у регулятора TRNCE розташовуються в межах + 0,77мм або відносна похибка 15,4% і - 0,48мм або відносна похибка 9,6%, у TNCE між + 0,76 мм або відносна похибка 15,2%. і - 0,52мм або відносна похибка 10,4%, а у PIDE в межах ± 1,5 мм або відносна похибка 30%. Кутові похибки у регулятора TRNCE розташовуються в межах ± 0,35°, у TNCE в межах ± 0,45°, тоді як похибки у регулятора PIDE ± 1,5°.

Аналіз похибок при відтворенні тестового синусоїдального сигналу показав, що нелінійні регулятори TRNCE і TNCE мають меншу похибку, ніж PIDE, за рахунок керування у робочому просторі, компенсації нелінійностей (сили інерції, гравітації, Коріоліса і центробіжних). Більш якісне управління на основі регулятора TRNCE, обумовлене робастністю регулятора, яка враховує невизначеності системи.

У дослідницькій роботі [6] представлений маніпулятор на основі платформи Гауфа-Стюарта для додатків біомеханічного тестування вивчення колінних суглобів людини. Так само він може бути використаний в роботизованих додатках, які вимагають високої точності позиціонування при великих зовнішніх навантаженнях (наприклад, механічна обробка).

Динамічна точність маніпулятора на основі платформи Гауфа-Стюарта вимірювалася при вхідному синусоїдальній сигналі з амплітудою ±1мм і ±1° з частотою 0,1 Гц для кожної з шести ступенів свободи послідовно протягом трьох циклів. Під управлінням децентралізованого (для кожної осі) ПІД регулятора, були отримані середньоквадратичні помилки по лінійним координатам: X - 0,01 мм або відносна похибка 1%, Y- 0,0196мм або відносна похибка 1,96%, Z - 0,0035мм або відносна похибка 0,35%; по кутових координатах: крен - 0,0482°, тангажу - 0,0018°, курс (рискання) - 0,0322°. Під управлінням ПІД регулятора, були отримані середньоквадратичні помилки по лінійним координатам: X - 0,0098мм або відносна похибка 9,8%, Y - 0,0068мм або відносна похибка 0,68%, Z - 0,0026мм або відносна похибка 0,26 %; по кутових координатах: крен - 0,0347°, тангажу - 0,0015°, курс (рискання) - 0,0231°.

Так само в цій роботі наведено аналіз точності відтворення тестового сигналу маніпулятором на основі платформи Гауфа-Стюарта за допомогою алгоритму управління опором (силою), коли зовнішній контур управління опором розміщений навколо внутрішнього контуру управління положення. Динамічна точність маніпулятора на основі платформи Гауфа-Стюарта вимірювалася при зсуві (переміщення по осях X і Y), осьовому навантаженні (переміщення по осі Z), вигину (обертання по осі X і Y) і крученні (обертання по осі Z). При цьому використовувався синусоїдальний сигнал з амплітудою +/- 3 мм (+/- 10 градусів для обертання) і частотою 0,1 Гц для кожної з шести ступенів свободи послідовно протягом трьох циклів. Середньоквадратичні помилки при зсуві (переміщення по осі X): X - 6,40μм, Y- 4,92μм, Z - 1,87μм, крен - 6,02м°, тангажу - 4,08м°, курс (рискання) - 6,23м°. Середньоквадратичні помилки при зсуві (переміщення по осі Y): X - 2,51μм, Y- 6,40μм, Z - 1,32μм, крен - 4,17м°, тангажу - 3,44м°, курс (рискання) - 3,52м°. Середньоквадратичні помилки при осьової навантаженні (переміщення по осі Z): X - 18,68μм, Y- 18,28μм, Z - 9,87μм, крен - 18,64м°, тангажу - 27,44м°, курс (рискання) - 17,20м°. Середньоквадратичні помилки при вигині (обертання по осі X): X - 6,34μм, Y- 14,16μм, Z - 3,01μм, крен - 10,50м°, тангажу - 7,81м°, курс (рискання) - 10,53м°. Середньоквадратичні помилки при вигині (обертання по осі Y): X - 9,66μм, Y- 7,53μм, Z - 3,28μм, крен - 7,37м°, тангажу - 8,25м°, курс (рискання) - 8,00м°. Середньоквадратичні помилки при крученні (обертання по осі Z): X - 10,39μм, Y- 7,63μм, Z - 3,03μм, крен - 10,47м°, тангажу - 13,32м°, курс (рискання) - 7,42м°.

Проаналізувавши експериментальні показники точності відтворення тестового сигналу по кожній з шести ступенів свободи можна зробити висновок, що максимальна похибка відхилення по лінійної координаті це 18,68μм або відносна похибка 0,62% при осьової навантаженні (переміщення по осі Z), по куту крен - 18,64м° також при осьової навантаженні (переміщення по осі Z). Абсолютна точність маніпулятора на основі платформи Гауфа-Стюарта була підтверджена на основі ISO 10360 перевірочного випробування для координатно-вимірювальних машин.

Висновки. З наведеного аналізу точності роботи механізму несучої системи платформи Гауфа-Стюарта в динаміці можна зробити наступні висновки.

Щоб поліпшити якість характеристик по точності необхідно попередньо провести калібрування несучої системи платформи Гауфа-Стюарта, тим самим уточнивши параметри кінематичної моделі і корекцію на різні люфти і ступеня натягу.

Для оцінки точності відтворення еталонної траєкторії в динаміці в основному використовується кругова траєкторія і синусоїдальний сигнал, тобто регулярний сигнал. Платформа Гауфа-Стюарта для різних видів виконуваних завдань показує різні

характеристики по точності. Це пов'язано не тільки виду виконуваних завдань, а й від параметрів конструкції, використовуваної системи управління. Як показує аналіз, точність відтворення залежить так само від швидкості руху, і від напрямку руху (в прямому або зворотному ході).

Для більш якісної оцінки точності управління платформою Гауфа-Стюарта при виконанні конкретного завдання, необхідно в якості тестового сигналу використовувати сигнал, який максимально наближає до реальних умови експлуатації.

Аналіз показує, що використовуються в якості системи управління платформи Гауфа-Стюарта робасні і адаптивні регулятори виконують більш точно відтворення траєкторії ніж прості ПД, ПІД. Це так само підтверджує необхідність використання зворотного зв'язку, який охоплює всю несучу механічну систему платформи Гауфа-Стюарта, а не тільки кожної штанги окремо. Так само можна побачити, що не одна із запропонованих систем управління не можуть гарантувати оптимальне використання платформи Гауфа-Стюарта, щоб досягти граничних точностних можливостей.

Список літератури

1. Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180* (Part 1, 15), 1965. P. 371–386.
2. Merlet, J.-P. Parallel Robots. Springer; 2nd edition, 2006. 394 p.
3. Кузнєцов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Діневич Г.Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури : монографія. К.; Херсон: Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т", Херсон. нац. техн. ун-т. 2009. 456 с.
4. Розробка фізичної моделі верстата на основі механізму паралельної структури з системою керування приводами переміщення робочого органа: Звіт по НДДКР Кіровоградський національний технічний університет. № ДР 0109U00210, облік. № 0211U005056. Кіровоград, 2011. 176с.
5. Hag Seong Kim. Task Space Approach of Robust Nonlinear Control for a 6 DOF Parallel *Manipulator. Parallel Manipulators, New Developments* / Book edited by: Jee-Hwan Ryu. I-Tech Education and Publishing, 2008. P. 427-444. ISBN 978-3-902613-20-2. URL: http://www.intechopen.com/books/parallel_manipulators_new_developments (дата звернення: 1.05.2019).
6. Boyin Ding. A Study of a Gough-Stewart Platformbased Manipulator for Applications in Biomechanical Testing: A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Mechanical Engineering / School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide. South Australia, Australia, 2014. 237 p.
7. Hamid D. Taghirad. Parallel Robots. Mechanics and Control. CRC Press; 1 edition, by Taylor & Francis Group, 2013. 533 p.
8. Зозуля В.А., Осадчий С.І., Бєляєв Ю., Pawłowski P. Класифікація завдань і принципів управління механізмом паралельної кінематичної структури для вирішення різних завдань. *Automation of Technological and Business Processes.* 2018. Т.10, №2. С. 18 – 29.
9. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Москва: Наука, 1966. 623с.
10. Сироткин Р. О. Экспериментальное исследование статических и динамических свойств механизма параллельной структуры на примере несущей системы станка – гексапода: дис. … канд. тех. наук: 05.02.11, 05.02.18 / Ростислав Олегович Сироткин. Москва. 2008. 170 с.
11. Дем’яненко А. С. Система контролю просторового положення інструменту верстата з механізмами паралельної структури: автореф. дис. на здобуття вч. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». Київ. 2015. 20 с.
12. Станки металлорежущие. Методы проверки точности и постоянства отработки круговой траектории. ГОСТ 30544-97. [Введен в действие от 1997-11-20]. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 1997. 9 с.
13. Marcel Honegger. Nonlinear adaptive control of a 6 dof parallel manipulator. URL: https://www.researchgate.net/publication/228594629_Nonlinear_adaptive_control_of_a_6_dof_parallel_manipulator (дата звернення: 1.05.2019).
14. Rossell, Josep M., Vicente-Rodrigo, Jesus, Rubió-Massegú, J., Barcons, V. An effective strategy of real-time vision-based control for a Stewart platform. *IEEE International Conference on Industrial*

Technology. "Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 19-22 February 2018". 2018, pp. 75-80. URL: http://hdl.handle.net/2117/114945 (дата звернення: 1.05.2019).

15. Se-Han Lee, Jae-Bok Song, Woo-Chun Choi, Daehie Hong. Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics. *Journal of Mechatronics* 2003. Vol. 13. pp. 605–619.
16. Alexandre Campos, Jacqueline Quintero, Roque Saltar´en, Manuel Ferre and Rafael Aracil. An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. " Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26, 2008" pp. 3705-3710.
17. Вовк В.Г., Страшко В.А., Тимошенко Н.А. Трехмерная модель динамики стохастических угловых движений корабля в крейсерском движении. *Гіротехнолоні, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки*: VI міжнародна науково-технічна конференція. Збірник доповідей. Частина II, 26-27 квітня 2007 р. Київ: Україна. 2007. С.14-19.

References

1. Stewart, D. (1965). A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180* (Part 1, 15), P. 371–386 [in English].
2. Merlet, J.-P. (2006). Parallel Robots, Springer, 2nd edition. 394 p. [in English].
3. Kuznetsov, Yu. M., Dmitriev, D. O. & Dinevich, G. Yu. (2009). *Komponovky verstativ z mekhanizmamy paralel'noyi struktury [Compositions of machine tools with mechanisms of parallel structure]*. Kyiv; Kherson: Nats. tekhn. un-t Ukrayiny "Kyyiv. politekhn. in-t", Kherson. nats. tekhn. un-t [in Ukraine].
4. Rozrobka fizychnoyi modeli verstata na osnovi mekhanizmu paralelʹnoyi struktury z systemoyu keruvannya pryvodamy peremishchennya robochoho orhana [Development of the physical model of the machine on the basis of the mechanism of parallel structure with the control system of the actuators of movement of the working body]. (2011): Zvit po NDDKR Kirovohradsʹkyy natsionalʹnyy tekhnichnyy universytet. – № DR 0109U00210, oblik. № 0211U005056. Kirovograd [in Ukrainian].
5. Hag Seong Kim. (2008). Task Space Approach of Robust Nonlinear Control for a 6 DOF Parallel *Manipulator. Parallel Manipulators, New Developments* / Book edited by: Jee-Hwan Ryu. I-Tech Education and Publishing. P. 427-444. ISBN 978-3-902613-20-2. URL: http://www.intechopen.com/books/parallel_manipulators_new_[in English].
6. Boyin Ding. (2014). A Study of a Gough-Stewart Platformbased Manipulator for Applications in Biomechanical Testing: A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Mechanical Engineering / School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide. South Australia, Australia. 237 p. [in English].
7. Hamid D. Taghirad. (2013). Parallel Robots. Mechanics and Control. CRC Press; 1 edition, by Taylor & Francis Group. 533 p. [in English].
8. Zozulya, V.A., Osadchy, S.I., Belyaev, YU. & Pawłowski, P. (2018). Klasyfikatsiya zavdannya y Pryntsypiv upravlinnya mekhanizmom paralelʹnoyi kinematichnoyi struktury dlya vyrishennyu riznikh zavdannya [Classification of tasks and principles of management of the mechanism of a parallel kinematic structure for solving various problems]. *Automation of Technological and Business Processes, 10 (2)*, 18 – 29 [in Ukraine].
9. Feldbaum A.A. (1966). *Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]*. Moskow.: Nauka [in Russian].
10. Sirotkin R. A. (2008). Eksperimental'noye issledovaniye staticheskikh i dinamicheskikh svoystv mekhanizma parallel'noy struktury na primere nesushchey sistemy stanka – geksapod [Experimental study of the static and dynamic properties of the structure of the mechanism parallel to the example machine carrier system – hexapod] : *Candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
11. Demyanenko A. S. (2015). Systema kontrolyu prostorovo polozhennya instrumentu verstata z mekhanizmami paralelʹnoyi struktury [The system of control of the spatial position of the tool of the machine with mechanisms of parallel structure]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukraine].
12. Stanki metallorezhushchiye. Metody proverki tochnosti i postoyanstva otrabotki krugovoy trayektorii [Metal-cutting machines. Methods for checking the accuracy and consistency of working out a circular path]. (1997). *HOST 30544-97 from 20th November 1997*. Minsk. Mezhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii [in Russian].
13. Marcel Honegger. (2019). Nonlinear adaptive control of a 6 dof parallel manipulator. URL:

https://www.researchgate.net/publication/228594629_Nonlinear_adaptive_control_of_a_6_dof_parallel_manipulator [in English].

14. Rossell, Josep M., Vicente-Rodrigo, Jesus, Rubió-Massegú, J., Barcons, V. (2018). An effective strategy of real-time vision-based control for a Stewart platform. *IEEE International Conference on Industrial Technology*. "Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 19-22 February 2018". pp. 75-80. URL: http://hdl.handle.net/2117/114945 [in English].
15. Se-Han Lee, Jae-Bok Song, Woo-Chun Choi, Daehie Hong. (2003). Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics. *Journal of Mechatronics, Vol. 13*, 605–619 [in English].
16. Alexandre Campos, Jacqueline Quintero, Roque Saltar´en, Manuel Ferre and Rafael Aracil. (2008). An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26. pp.3705-3710 [in English].
17. Vovk V.G., Strashko V.A., Timoshenko N.A. (2007). Tryvymirna model′ dynamiky stokhastychnykh kutovykh rukhiv korablya v kreysers′komu rusi [Three-dimensional model of the dynamics of the stochastic angular motions of a ship in cruising motion]. Proceedings from gyro technology, navigation, traffic management and aerospace engineering*: VI mizhnarodna naukovo-tekhnichna. Chastyna II (26-27 kvitnya 2007 hoda) - VI International Scientific and Technical Conference.* (pp.14-19). Kyyiv, Ukrayina [in Russian].

Valerii Zozulia, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Osadchy,** Prof., DSc., **Mykola Melnichenko,** postgraduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Analysis of the Accuracy of the Reproduction of the Reference Trajectory by the Gough-Stewart Platform with the Control System for Various types of Tasks

The purpose of the paper is to analyze publications aimed at obtaining an accurate estimate of the test signal reproduction by the Gough -Stewart platform with a specific control system for various types of tasks based on experimental data. At the same, to identify the features of the design, control system, type of test signal and experimental conditions that affect the accuracy characteristics of the Gough -Stewart platform.

In the paper an analysis of researches on the estimation of the accuracy of the motion of the mechanism of the carrier system of the Gough -Stewart system in the dynamics was performed in the development of the reference trajectory, in particular, the circumference and the sinusoidal signal, that is, regular signals. On the basis of the analysis, the connection between the quality of the task of tracking the reference trajectory for various types of tasks performed, from the design parameters used by the control system of the Gough-Stewart platform was evaluated. As the analysis shows, the accuracy of reproduction depends on the speed of movement, and on the direction of motion. For a better evaluation of the accuracy of the control of the Gough-Stewart platform when performing a specific task, it is necessary to use as a test signal a signal that is as close as possible to the actual operating conditions.

The analysis shows that used as a control system for the Gough-Stewart platform, robust and adaptive controls perform more precisely the reproduction of the trajectory than simple PD, PID. This also confirms the need for feedback that covers the entire carrier system of the Gough-Stewart platform, and not just each rod separately. It can also be seen that not one of the proposed control systems can guarantee the optimal use of the Gough-Stewart platform in order to achieve extremely precise characteristics.

Gough-Stewart platform, control system, reference trajectory, accuracy estimates

Одержано (Received) 28.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 31.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019