

УДК 629.3.018.2

Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.
Херсонський національний технічний університет**ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИМУЛЯТОРІВ РУХУ НА ОСНОВІ
ПРИВОДІВ ПРОСТОРОВОГО КОМПОНУВАННЯ**

Стаття присвячена комплексному дослідженню розвитку тренажерної техніки. Авторами дається порівняльна характеристика механізмів паралельної структури з конструкціями послідовної структури. Проаналізовані існуючі роботи вчених, які досліджують тренажери з паралельної кінематикою. Запропоновано структурну схему системи управління каркасної установкою. Розроблено алгоритм системи технічної діагностики мехатронної системи тренажерної платформи. Використавши практичний досвід, проведено дослідження діапазону кутів нахилу оператора для більш ефективної імітації. Внесено пропозиції для розширення можливостей роботи тренажерної платформи.

Ключові слова: *тренажерна платформа, механізм паралельної структури, пряма задача кінематики, зворотна задача кінематики, каркасна установка.*

У світовій практиці автомобілебудування для різнобічного оцінювання функціональних можливостей автомобілів, поширюється застосування тренажерних комплексів. Для відтворення реалістичних умов, доцільно механічні навантаження доповнювати монітори симулятора візуальним супроводженням навколишніх обставин. В результаті застосування потужних комп'ютерних систем і спеціалізованого програмного забезпечення досягається реалістичність того, що відбувається [1, 2].

Транспортні тренажери характеризуються за ступенем рухливості, як одно рухливі, двох рухливі і т.п. Найбільш поширені багатоступеневі тренажерні комплекси побудовано на основі механізмів паралельної структури (МПС) [1]. МПС мають наступні переваги у порівнянні з механізмами послідовної структури:

- висока жорсткість, що обумовлена роботою телескопічного пристрою на розтягнення-стиснення і рівномірним розподілом зусиль по всій структурі;
- більш висока точність позиціонування;
- збільшена вантажопідйомність при однаковій вазі механізмів;
- закріплені на нерухомій основі приводні вузли, що знижує вплив сил інерції ланок механізму при русі;
- при меншій масі вихідної ланки забезпечуються більш високі швидкості переміщень і прискорення;
- різко знижується металоємність.

Незважаючи на наявність багатьох переваг, механізми паралельної структури мають ряд недоліків і обмежень. Наприклад, кілька замкнутих кінематичних ланок збільшують жорсткість і вантажопідйомність механізму, але при цьому зменшують робочий простір маніпулятора. Недоліком є незручність управління: переміщення вихідної ланки в межах одного ступеня свободи має бути скоординованим з роботою всіх приводів[4]. Це завдання вирішується повною або частковою кінематичною розв'язкою переміщення вихідної ланки, при якій одна ступінь свободи вихідної ланки співвіднесена (пов'язана) з одним конкретним приводом. Негативною стороною вирішення цього завдання є збільшення навантаження на окремий привід, можливо послаблення жорсткості конструкції і підвищення вимог до приводів.

В Україні дослідження тренажерів з паралельною кінематикою проводяться в НТУУ «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського професором Кузнецовим Ю.М. [1], в Одеському національному політехнічному інституті проф. Яглінським В.П. [3-6], в Херсонському національному технічному університеті проф. Дмитрієвим Д.О. [7] і проф. Рудаковою Г.В. [8].

Розв'язку задач про положення рухомих платформ багатоступеневих механізмів присвячено роботи багатьох відомих науковців: Крайнева С. Л., Коліскара А.Р., Глазунова А.А., Воробйова П.А., Лебедева С.В. та інших [9].

У загальному вигляді до задач кінематики просторових механізмів відносяться:

1. Пряма задача кінематики - Визначення траєкторії руху вихідної ланки за заданими законами руху приводних ланок.
2. Зворотна задача кінематики - Визначення законів переміщення керуючих приводних координат, що забезпечують потрібний закон переміщення вихідної ланки.
3. Розв'язок системи рівнянь для розрахунку керування виконавчими приводами з метою забезпечення заданої траєкторії переміщення вихідної ланки.

При аналізі існуючих МПС з точки зору програмування системи керування важливе значення має зворотна задача кінематики. Але при синтезі нового технологічного обладнання з паралельною кінематикою особливу роль відіграє саме пряма задача кінематики тому, що критеріями створення високопродуктивних тренажерів є здатність виконавчого органу (ВО) забезпечувати поставлені технологічні задачі.

МПС характеризуються тим, що ВО пов'язаний з несучою системою з'єднувальними кінематичними ланками змінної довжини, кожна з яких містить одну поступальну пару, забезпечену приводом, та дві сферичні пари.

« l -координатний» механізм представляє собою два відносно рухомих тіла (ВО та несуча система механізму), з'єднаних між собою стрижнями змінної довжини l . Зміною однієї або декількох довжин l можна змінювати відносне положення з'єднаних тіл, тобто можна здійснювати маніпулювання робочим органом у визначеному робочому просторі. Довжини l з'єднувальних кінематичних ланок однозначно визначаються положенням виконавчого органу.

Згідно розглянутого методу [3], за допомогою побудови сфер та положень точок на ній, можуть бути систематизовані положення самого тіла.

На відміну від загальновідомих рівнянь руху вільного тіла з використанням кутів Ейлера, наведені рівняння описують рух тіла за допомогою тільки лінійних величин [8].

Для ряду структур l -координатних механізмів координати точок виконавчого органу в системі OXYZ можуть бути визначені аналітично. У таких структурах кількість точок на тілі або на базі дорівнює трьом та у одній з них сходяться три відрізки, внаслідок чого у кожній з структур можна виділити три піраміди, ребра яких утворені відрізками l_1, l_2, \dots, l_6 , які з'єднують точки бази, та відрізками, які з'єднують точки тіла.

Сутність чисельно-аналітичного метода полягає в утворенні структури l -координат, для якої декартові координати точок тіла визначаються у явному вигляді, визначення значень додаткових координат, заданому l -координатами та знаходженню декартових координат заданих точок тіла.

Для вирішення прямої задачі кінематики в структурах типу гексапод запропоновано [4] ітераційний метод визначення положення рухомої платформи у просторі за рахунок отримання координат трьох точок a, b, c , в яких телескопічні штанги шарнірно з'єднані з вихідною ланкою (рис. 1).

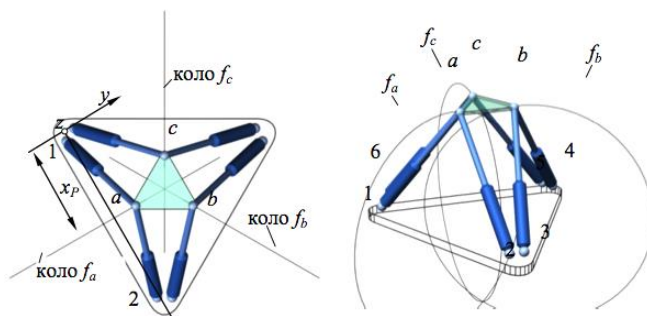


Рис.1. Розташування областей в компоновці верстату

Розглянемо будь-яку пару штанг змінної довжини l_1, l_2 , з'єднаних в одній точці, наприклад A (рис. 2). Дана структура представляє собою механізм-типу біпод з трьома замкненими контурами, які складають просторовий МПС – гексапод.

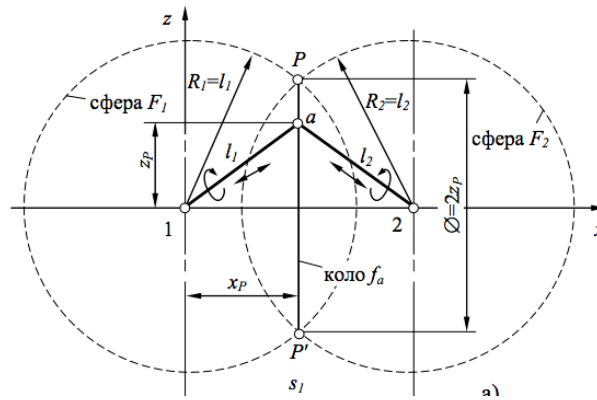


Рис. 2. Схема кінематики біподу

При заданих величинах l_1, l_2 та положенні нижніх кінців штанг (x_1, z_1) і (x_2, z_2) , відповідно, точка a на кінці стрижня l_1 може займати у просторі будь-яке положення на поверхні сфери F_1 з радіусом $R_1=l_1$, а кінець штанги l_2 положення на поверхні сфери F_2 з радіусом $R_2=l_2$. Спільною областю, де може бути визначено точку a шарнірного з'єднання трикутного контура, буде перетин двох сфер F_1 і F_2 , що уявляє собою криву другого порядку - коло f_a радіусом $R_a=z_p$. Точка P є допоміжною в визначенні параметрів кола f_a , зокрема радіусу і положення на міжосьовій відстані $|1-2|$ [6].

Слід зауважити, що коло f_a має сталу орієнтацію у просторі і завжди перпендикулярно до осі Ox , його положення $f_a(C)$ визначається координатою x_p , і як радіус z_p , залежить від вхідних змінних l_1, l_2 . В компоновці гексапода (x_1, z_1) і (x_2, z_2) не змінні.

Параметри x_p і z_p в свою чергу визначаються системою рівнянь двох кіл, радіуси яких $R_1=l_1$ і $R_2=l_2$ відповідають екваторам сфер F_1 і F_2 , відповідно

$$\begin{cases} x_p^2 + z_p^2 = l_1^2; \\ (x_p - s_1)^2 + z_p^2 = l_2^2, \end{cases} \quad (1)$$

звідки

$$x_{p1,2} = \frac{s_1^2 + l_1^2 - l_2^2}{2 \cdot s_1^2}, \quad z_{p1,2} = \pm \sqrt{l_1^2 - x_{p1,2}^2}. \quad (2)$$

Наступним етапом має бути визначення належності кожної точки шарнірного з'єднання штанг a, b, c на рухомій платформі власній області, тобто $a \in f_a, b \in f_b, c \in f_c$ при виконанні умови

$$U = \begin{cases} d_{ab} - \varepsilon = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}; \\ d_{bc} - \varepsilon = \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2 + (z_b - z_c)^2}; \\ d_{ca} - \varepsilon = \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2 + (z_c - z_a)^2}, \end{cases} \quad (3)$$

де d_{ab}, d_{bc}, d_{ca} - сталі відрізки між точками $a-b, b-c, a-c$, відповідно, що визначаються конструктивним виконанням рухомої платформи; ε - задана похибка наближення розрахунків.

Отримання координат $x_a, x_b, x_c, z_a, z_b, z_c$ виконується методами математичного програмування шляхом ітерацій з підстановкою значень $(x_a, z_a), (x_b, z_b), (z_a, z_c)$ по черзі у вкладені цикли направленої руху кожної точки a, b, c уздовж власної області визначення f_a, f_b, f_c .

Дану методику також можна використати для МПС з постійною довжиною штанг і змішаною кінематикою. Тоді, наприклад, в структурі біглайду змінними будуть (x_1, z_1) і (x_2, z_2) , а l_1, l_2 - сталі величини. Трикутний замкнений контур біподу або біглайду є основним в будові просторових МПС, тому ітераційний метод в поєднанні з аналітичним визначенням точки з'єднання двох штанг просторової стрижневої системи найбільш підходить для теоретичних досліджень майбутніх компоновок тренажерів з паралельною кінематикою [1].

Викладені алгоритми використовують як основні для розрахунку керованого переміщення ВО тренажеру, моделювання положень багатоланкового просторового МПС і побудов динамічних моделей тренажерів з паралельною кінематикою нового покоління.

В процесі виконання роботи було виготовлено дослідний зразок тренажеру, використовуючи спеціальне апаратне і програмне забезпечення.

1. До апаратного забезпечення відносяться:

- механічний каркас;
- тренажерне крісло;
- комп'ютерна система управління приводами.

На експериментальній установці досліджено діапазон кутів нахилу крісла, який складає від 0 до 30 градусів навколо осей координат. Швидкість переміщень кареток задається в діапазоні 0.6 м/хв - 1.8 м/хв, яким відповідає кутова швидкість крісла 0.52 рад/хв - 1.6 рад/хв навколо осей (рис. 3).

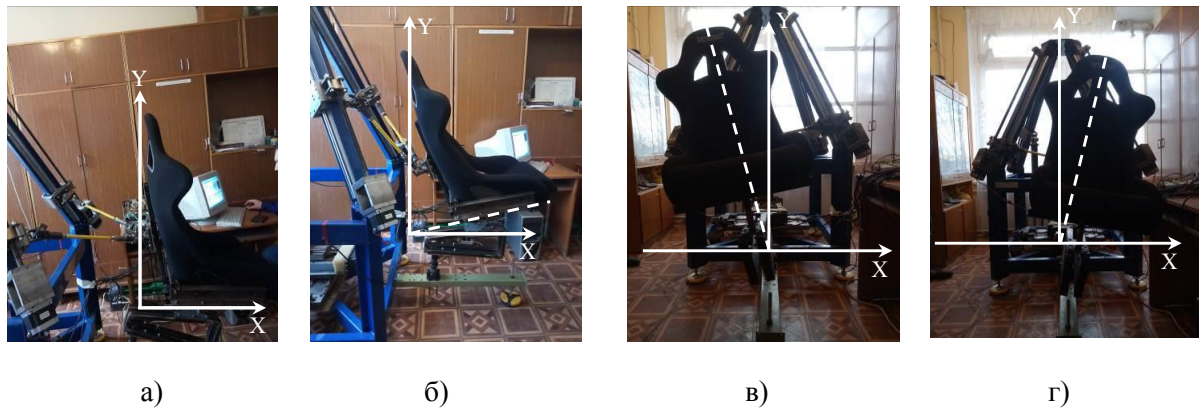


Рис. 3. Наглядне зображення діапазону кутів нахилу дослідного зразка:

- а) – початкове положення крісла; б) – підйом крісла відносно осі ординат на 15°;
в) – крен крісла відносно осі ординат на 15°; г) - крен крісла відносно осі ординат на -15°

Для крайніх положень крісла дослідного зразка тренажеру зафіксовано керовані координати, які відпрацьовують крокові двигуни просторової мехатронної системи.

Розроблений дослідний зразок, на даний момент реалізує обертання навколо двох осей, що відповідає симуляції таких маневрів як крен і занос. Для розширення можливостей пропонується додати рух нижнього шарніру крісла вздовж осі x (рис. 4, а), та обертання даної напрямної навколо осі у (рис. 4, б) при цьому не потребує зміни алгоритму розв'язку задач кінематики та передачі сигналів до системи керування [10].

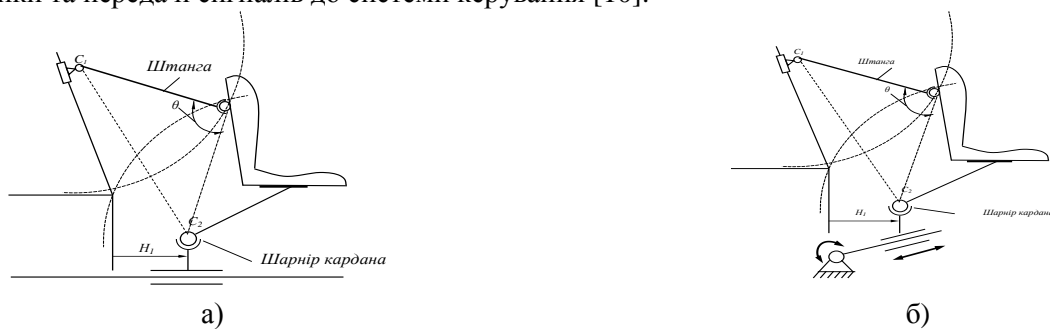


Рис. 4. Конструктивна модернізація дослідного зразка:

- а – поступальний рух крісла вперед-назад; б – імітація тангажу

Переміщення крісла тренажеру задається верхнім рівнем управління, який складається з персонального комп'ютера і керує кожним електродвигуном за допомогою окремого драйвера. Структурна схема системи управління каркасною установкою приведена на рис.5.

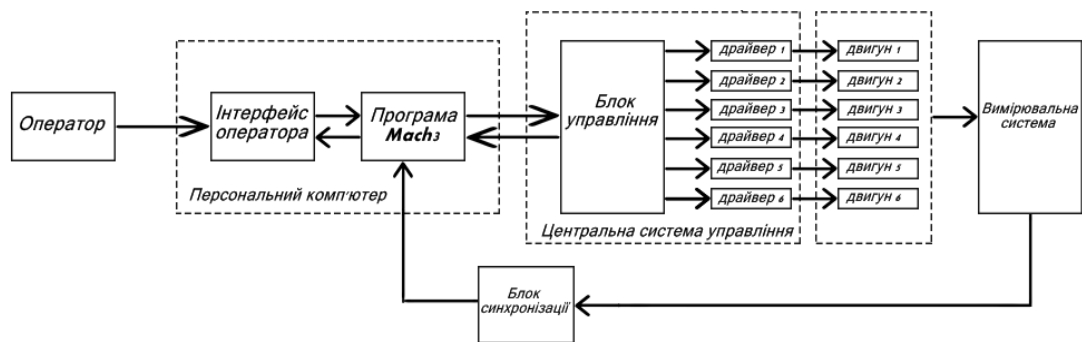


Рис. 5. Структурна схема системи управління

Датчики, розміщені на приводах та елементах конструкції установки, разом складають інформаційно-вимірювальну підсистему, яка відстежує параметри роботи каркасної установки і відправляє дані на верхній рівень управління [8, 11].

В якості вимірювальної підсистеми виступають датчики положення виконавчого органу та віброакустичний датчик, на підставі даних якого виконується функціональна діагностика роботи установки (рис.6).

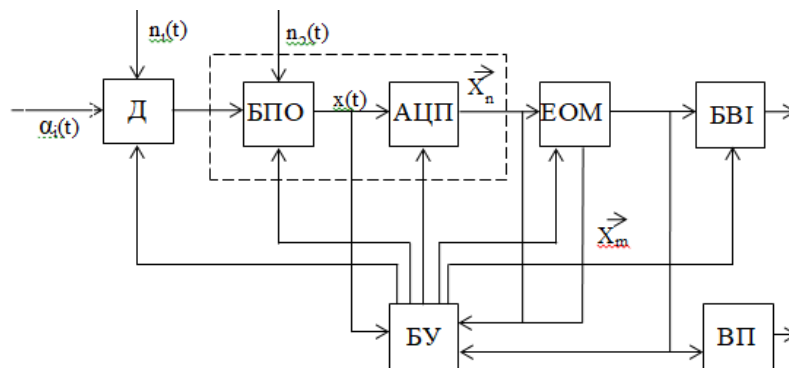


Рис. 6. Структурна схема системи технічної діагностики

Д – Датчик; БПО – блок попередньої обробки; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина; БУ – блок управління параметрами й алгоритмами; БВІ – блок реєстрації, відображення інформації; ВП – виконавчий пристрій, X_n – робоча вибірка, X_m – навчальна вибірка (n, m – об'єми вибірок).

У процесі технічної діагностики інформація про поведінку об'єкта контролю α_i реєструється датчиком (Д). Приймачі БПО і АЦП реалізують функції попередньої аналогової обробки суміші сигналів і перешкод, забезпечуючи посилення слабких сигналів на тлі власних шумів; смугову, низькочастотну та режекторну фільтрацію зовнішніх $n_1(t)$ і внутрішніх $n_2(t)$ перешкод; нормування вихідних процесів $x(t)$ за інтенсивністю. Перетворені сигнали надходять на ЕОМ, де проходять статистичну, математичну обробку. Блок БУ реалізує функції управління процесом обробки сигналів в приймачах і процесорі, а також задає параметри для виконавчого пристрою (ВП) [12].

У подальшому планується проведення ряд комплексних досліджень впливу збурюючих факторів апаратної частини установки з метою розв'язання оптимізаційної задачі, що зменшила б вплив збурень на рух тренажеру.

2. До спеціалізованого програмного забезпечення тренажеру відносяться:

- програма TAngle;
- середовище 3D моделювання 3D Studio Max.

На основі виразів і алгоритмів переміщення ВО, було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення TAngle (рис. 7), яке дозволяє здійснювати аналіз кінематичних параметрів тренажеру.

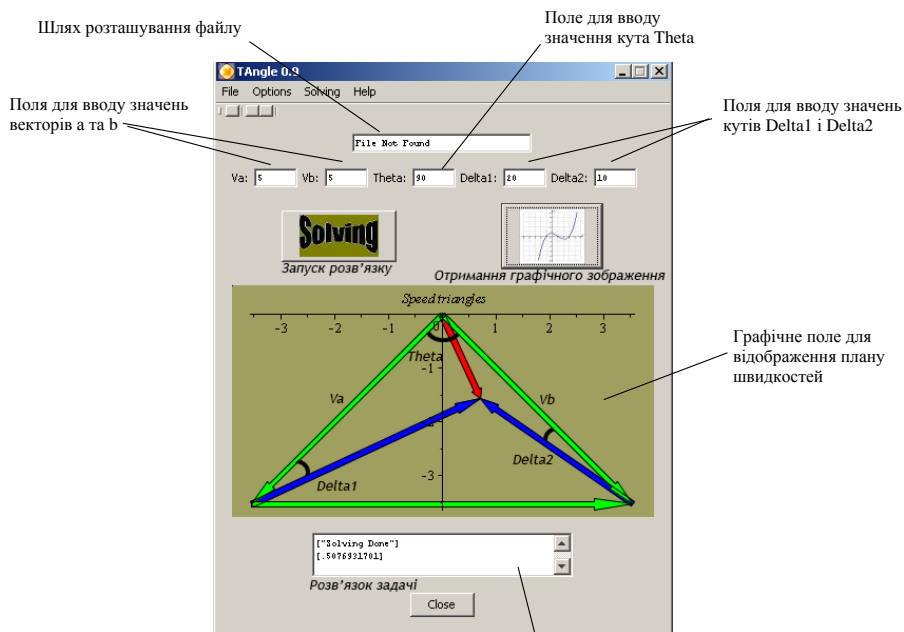


Рис. 7. Зовнішній вигляд робочого вікна програми TAngle

Дана програма розв'язує пряму задачу кінематики, де задаються параметри векторів V_A і V_B , а також значення кутів δ_1 і δ_2 . TAngle графічно відтворює план зв'язку швидкостей та кутів нахилу штанг установки з МПС, та показує, положення робочого органу при заданих параметрах.

Для комп'ютерного розв'язку задач кінематики та моделювання роботи просторових симуляторів руху створена ієрархічно зв'язана модель в середовищі 3D Studio max з використанням математичного зв'язку усіх ланок та їх складових, який програмується на мові maxscript.

Створено повнорозмірну геометричну модель механічної складової приводів просторового компонування тренажерної платформи для симуляції руху екіпажів мобільних машин (рис. 8) [10].

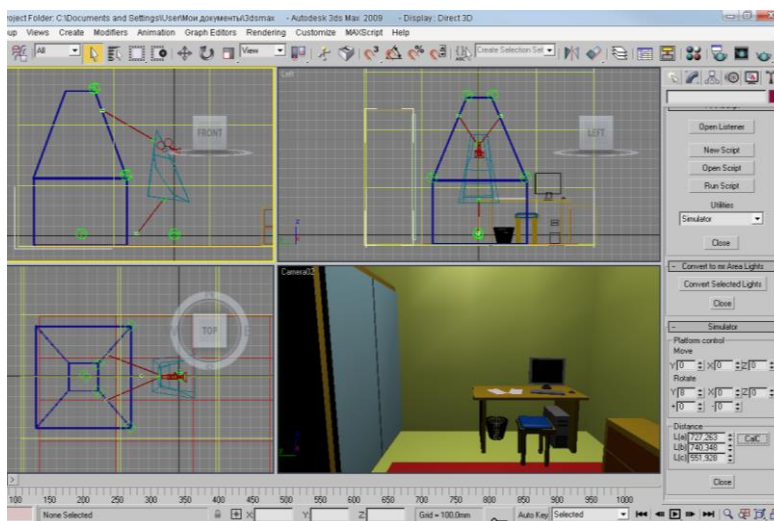


Рис. 8. Створена у середовищі 3D StudioMax ієрархічно-зв'язана комп'ютерна модель просторової системи приводів для керування тренажером

Взаємний зв'язок засобів апаратного і програмного забезпечення [10] можна представити у загальному виді графу поданого на рис. 9.

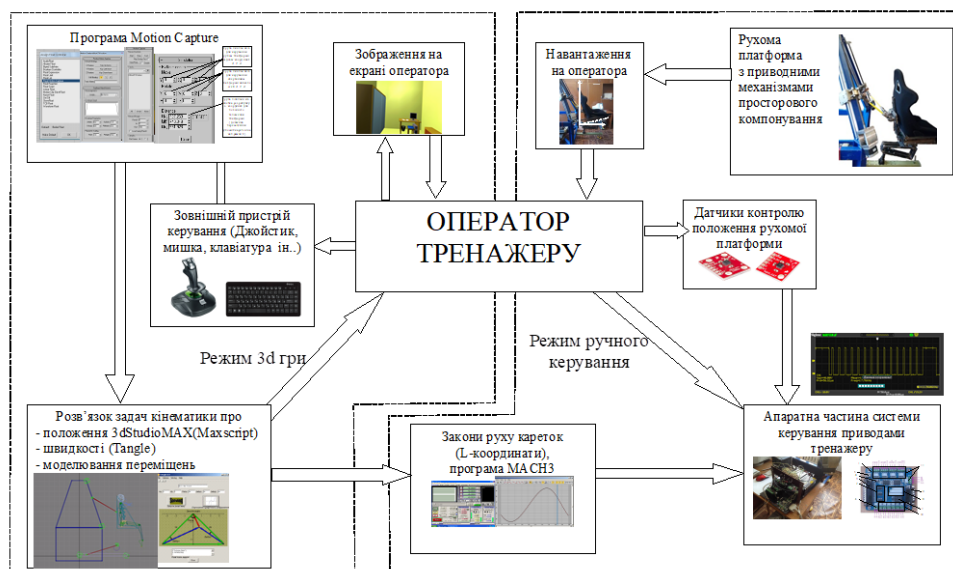


Рис. 9. Граф взаємозв'язку модулів мехатронної системи з приводами просторового компонування

Висновки. Виконано аналіз сучасних систем тренажерів і тренувальної техніки для екіпажів мобільних машин, який свідчить про стрімкий розвиток мехатронних систем з застосуванням конструкцій просторових приводів для відтворення або симуляції складних переміщень несучих платформ з оператором з безпосереднім зв'язком системи керування і відповідним інтегрованим впливом на хід переміщень платформи. Більшість автоматизованих тренажерів побудовано із застосуванням багатоланкових і багатоприводних шарнірно-стрижневих систем.

Розглянуто математичне ядро для зв'язку зворотної і прямої задач кінематики.

Виготовлено дослідний зразок просторової мехатронної системи з апаратним забезпеченням на основі механізму паралельної структури оснащеного кроковими двигунами, блоку управління та датчиків положення.

Експериментально встановлено робочі параметри виготовленого тренажерного стенду, які складають заміну кутів обертання (нахилу) у діапазоні 0.6 м/хв - 1.8 м/хв. та діагональних швидкостей ланок в межах від 0.52 рад/хв до 1.6 рад/хв навколо осей.

Надано пропозиції щодо удосконалення тренажерної техніки та розширення областей її застосування.

Інформаційні джерела

1. Кузнецов Ю.М. Компонувки верстатів з механізмами паралельної структури: Монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
2. Merlet J. P. Parallel robots / J. P. Merlet – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 372 p.
3. Яглінський В.П. Визначення технічного рівня тренажера-гексапода / В.П. Яглінський, А.С. Обайди, М.М. Москвичев, Г.В. Козерацький // «Сучасні технології промислового комплексу», 2015, ХНТУ, Херсон, Україна. – 26 с.
4. Москвичев Н.Н. Спектр частот тренажера-гексапода при маневре / Н.Н. Москвичев, В.П. Яглінський, А.С. Обайди, Г.В. Козерацький//«Сучасні технології промислового комплексу», 2015, ХНТУ, Херсон, Україна. – 58 с.
5. Ал-Обайди А.С. Имитационная модель механизмов гексапода/ А.С. Обайди, Н.Н. Москвичев, В.П. Яглінський, Г.В. Козерацький//«Сучасні технології промислового комплексу», 2015, ХНТУ, Херсон, Україна.
6. Яглінський В.П., Гутиря С.С. Надійність авіаційного тренажера на основі гексапода при екстремальних навантаженнях // Вісник СевНТУ, Вип. 120, Серія Механіка, енергетика, екологія: Зб. Наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2011. – С. 196-205.
7. Дмитрієв Д.О. Застосування графоаналітичного методу для аналізу кінематики

механізмів паралельної структури і викладання дисципліни теорія механізмів і машин / Д.О. Дмитрієв, С.А. Русанов, О.О. Сафьяник // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», випуск 3. – Херсон: ХНТУ, 2017.- С.67-71.

8. Рудакова Г.В. Розробка спеціалізованого програмного забезпечення для проектування каркасних установок з механізмами паралельної структури / Г.В. Рудакова, С.А. Русанов, С.В. Ревенко // Вісник Херсонського національного технічного університету. Вип. 4(63). – Херсон: ХНТУ, 2017.

9. Глазунов В. А. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой / В. А. Глазунов, А. Ш. Колискор, А. Ф. Крайнев, Б. И. Модель // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 1. – С. 41 – 49.

10. Омельчук А.А. Математичне і програмно-апаратне забезпечення тренажерної установки за просторовими приводами руху/ А.А. Омельчук, О.О. Сафьяник, І.С. Березкін, П.М. Павлов.//Журнал «Системные технологии». 2018 –С.64-71.

11. Лебеденко Ю.О. Інформаційно-вимірювальна підсистема багатоприводної каркасної установки з механізмами паралельної структури / Ю.О. Лебеденко, А.А. Омельчук, О.О. Сафьяник // Вісник Херсонського національного технічного університету. Вип. 3(62). Т.1. – Херсон: ХНТУ, 2017. - С. 317 – 322.

12. Кондратьева И.Ю. Проблемы функциональной диагностики электромеханических систем в реальном времени/ И.Ю. Кондратьева, А.В. Рудакова//Всеукраїнська науково-практична конференція з автоматичного управління. – Херсон:ХНТУ, 2018, -С. 11.

Ревенко С.В., Павлов П.Н., Кондратьева И.Ю.
Херсонский национальный технический университет

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИМУЛЯТОРА ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИВОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПОНОВКИ

Статья посвящена комплексному исследованию развития тренажерной техники в целом и средствам ее управления. Авторами дается сравнительное описание механизмов параллельной структуры с конструкциями последовательной структуры. Проанализированы существующие на эту тему работы ученых, которые исследуют тренажеры с параллельной кинематикой. Так же предложена структурная схема системы управления каркасной установкой. Разработан алгоритм системы технической диагностики мехатронной системы тренажерной платформы. Используя практический опыт, проведено исследование диапазона углов наклона оператора для более эффективной имитации. Внесены предложения для расширения возможностей работы тренажерной платформы.

Ключевые слова: тренажерная платформа, механизм параллельной структуры, прямая задача кинематики, обратная задача кинематики, каркасная установка.

Revenko S.V., Pavlov P.N., Kondratieva I.Y.
Kherson National Technical University

SOFTWARE AND HARDWARE OF THE MOVEMENT SIMULATORS ON THE BASIS OF SPACE APPLICATION DRIVERS

The article is devoted to a comprehensive study of the development of simulators in general and the means of its management. The authors give a comparative description of the mechanisms of a parallel structure with constructions of a sequential structure. An analysis of the work of scientists studying simulators with parallel kinematics is made. A structural diagram of the frame control system is introduced. An algorithm for the system of technical diagnostics of the mechatronic system of the training platform has been developed. Using practical experience, the research of the range of slope angles of the operator for more effective situation has been made. The proposals for expanding the capabilities of the simulator platform have been made.

Keywords: simulator platform, mechanism of parallel structure, direct task of kinematics, inverse task of kinematics, frame installation.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018.