УДК 621.9.04

Струтинський С.В. к.т.н., Гуржій А.А.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ ,Україна

ВИЗНАЧЕННЯ СТОХАСТИЧНИХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ НА ОСОБЛИВИХ ДІЛЯНКАХ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУПРОСТОРОВОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДІВ

Strutinskij C., Gurzhij A.
The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (strutynskyi@gmail.com)

DEFINITION OF STOCHASTIC DYNAMIC STRESSES ARISING IN PARTICULAR AREA TRAJECTORY EXECUTIVE BODY SPATIAL SYSTEM DRIVES

Рассмотрен технологический комплекс, который содержит пространственные системы приводов. Комплекс включает станок параллельной кинематики и шестикоординатный стол с приводами. Показано, что в процессе функционирования комплекса имеют место особые области траекторий взаимного положения рабочего органа станка и стола. В особых областях наблюдается стохастические колебательные процессы бесконечно малой амплитуды. Предложена методика теоритического обобщения и математического описания колебательных процессов. В результате определены случайные динамические нагрузки, в системе приводов действующие в особых областях траекторий.

Ключевые слова: пространственные механизмы, приводы, системы, траектории, особенности, колебательные процессы, экстремумы, импульсные воздействия, сложение импульсов, спектр, нагрузки.

Вступ

Технологічне обладнання на основі просторової системи приводів має широкі функціональні можливості. Застосування мехатронних систем керування в даному обладнанні дозволяє реалізувати комп'ютерно-інтегровані методи формоутворення високої ефективності. Тому дослідження особливостей просторової системи приводів є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає у розробці мехатронних просторових систем приводів з високими показниками точності.

Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями розвитку високоефективного технологічного обладнання, зокрема, обладнання для маніпулювання об'єктами машинобудування.

В останніх дослідженнях і публікаціях [1, 2] наведені результати розробки та використання технологічного обладнання на основі мехатронних систем приводів із паралельними кінематичними зв'язками. Визначені характеристики жорсткості [3] та особливості програмування обладнання [4]. Окремі публікації присвячено дослідженню питань динамічної точності обладнання [5].

Результатів досліджень навантажень, обумовлених особливостями траєкторій руху виконавчого органу в системі приводів, у літературних джерелах не виявлено.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відносяться дослідження особливих ділянок траєкторій руху виконавчого органу, зокрема, ділянок, де наявні різкі зміни напрямку (злами) траєкторій.

Метою досліджень викладених в даній статті є визначення стохастичних динамічних навантажень, які виникають на особливих ділянках траєкторій. Задачами досліджень є детальний аналіз динамічних процесів на особливих ділянках траєкторій, узагальнення динамічних процесів по спеціально розробленій методиці та встановлення статистичних закономірностей стохастичних динамічних навантажень, які діють на виконавчий орган системи приводів на особливій ділянці траєкторій.

Просторові системи приводів та особливості траєкторій переміщення їх виконавчих органів

Дослідження проведені на спеціально розробленому технологічному комплексі, технологічний комплекс призначено для багатокоординатної обробки деталей в межах робочого простору 500x500x500мм. Число керованих координат складає 12. Шість із них забезпечується приводами переміщення інструменту. Інші шість керованих координат забезпечують необхідне просторове положення стола. Комплекс дозволяє встановлювати необхідну точність обробки: 0,05..0,1мм при застосуванні розімкнених схем керування та 0,001..0,005мм при використанні зворотніх зв'язків по виміру просторового положення виконавчого органу. Технологічний

 © Струтинський С.В., Гуржій А.А., 2012

комплекс забезпечує високопродуктивну обробку металів, дерева, пластмас, каменю, різноманітних будівельних матеріалів, паперу, картону та інших.

Основною складовою комплексу є верстат-гексапод[1] із мехатронною системою керування (рис. 1).

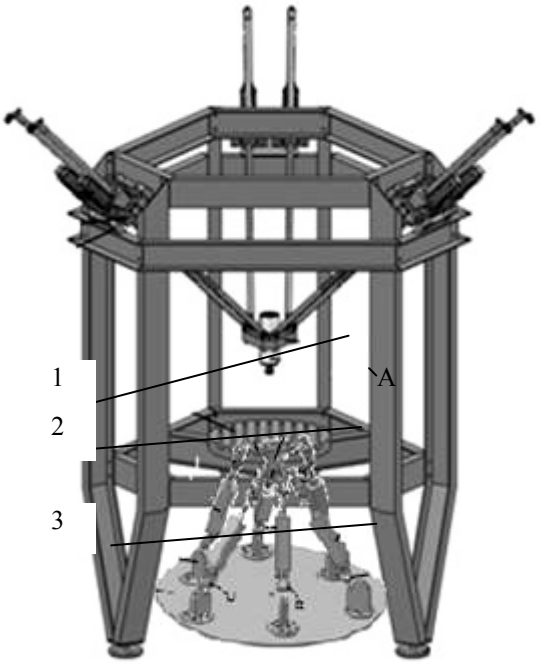


Рис. 1. Технологічний комплекс на основі верстата-гексапода з системою маніпулювання

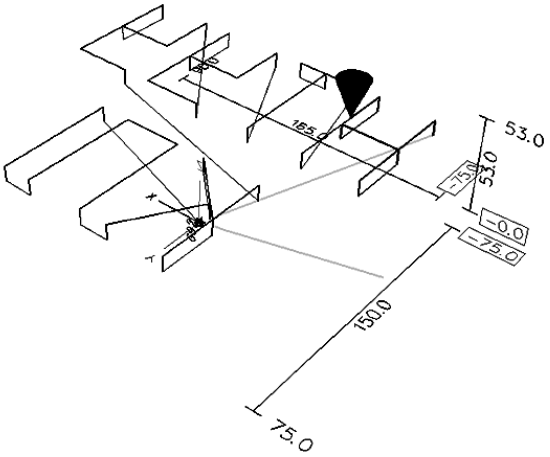


Рис. 2. Типова траєкторія руху виконавчого органу просторової системи приводів, яка має особливості у вигляді зламів (конус на рисунку показує поперечно-кутове положення виконавчого органу відносно стола)

Верстат-гексапод включає рухомий виконавчий орган 1, що має шість ступенів вільності і здійснює просторові рухи. Оброблювана деталь встановлюється на рухомому столі 2, який може змінювати своє положення в просторі за допомогою системи маніпулювання.

Система маніпулювання побудована по схемі механізма-гексапода і має шість дискретних приводів на базі пневмоциліндрів 3. Система оснащена додатковими приводами мікропереміщень. Система маніпулювання забезпечує установку деталі в необхідному положенні. Відносно даного положення здійснюється переміщення виконавчого органу, в якому встановлено високообертовий шпиндель.

Технологічний комплекс найбільш ефективний при обробці складно-профільних поверхонь. Порівняно просто реалізується обробка лінійних поверхонь типу гіперболічного параболоїда та інших. Специфіка роботи кінематичних ланцюгів забезпечує реалізацію обробки різноманітних поверхонь 4-го та більш високих порядків.

Реалізація комп'ютерно-інтегрованих методів формоутворення на технологічному комплексі має суттєві відмінності від формоутворення традиційного технологічного обладнання. Причиною цього є особливості кінематики просторової системи приводів, наявність сингулярних (особливих) положень механізмів та специфіка алгоритмічного забезпечення системи керування.

Особливістю реалізації комп'ютерно-інтегрованих методів формоутворення на технологічному комплексі є наявність складних траєкторій переміщення інструменту відносно стола. Траєкторії мають особливості у вигляді зламів (рис. 2).

При різких змінах напрямку руху (зламі траєкторії) в динамічній системі технологічного комплексу виникають складні динамічні навантаження. В процесі досліджень проведено детальний аналіз процесів у точках зламу траєкторій.

Детальний аналіз процесу руху виконавчого органу на особливих ділянках траєкторії

Рух виконавчого органу, як твердого тіла, описується поступальним рухом характерної точки (полюса) та поворотом навколо цієї точки [7]. Характерна точка виконавчого органу, прийнята за полюс, визначає рух виконавчого органу в просторі. Точка переміщується по відповідній траєкторії, яка може мати складний характер. Переміщення полюса визначається векторами натурального триедра (природного тригранника) траєкторії.

Кінематичні ланцюги технологічного комплексу включають привод і передачі з високими коефіцієнтами підсилення. В поєднанні з особливостями програмування це приводить до появи особливих ділянок траєкторій руху інструменту відносно поточного положення стола. На особливих ділянках має місце різка зміна поперечно-кутового положення інструменту (точка А) або різка зміна його напрямку руху (точка В) (рис. 3).

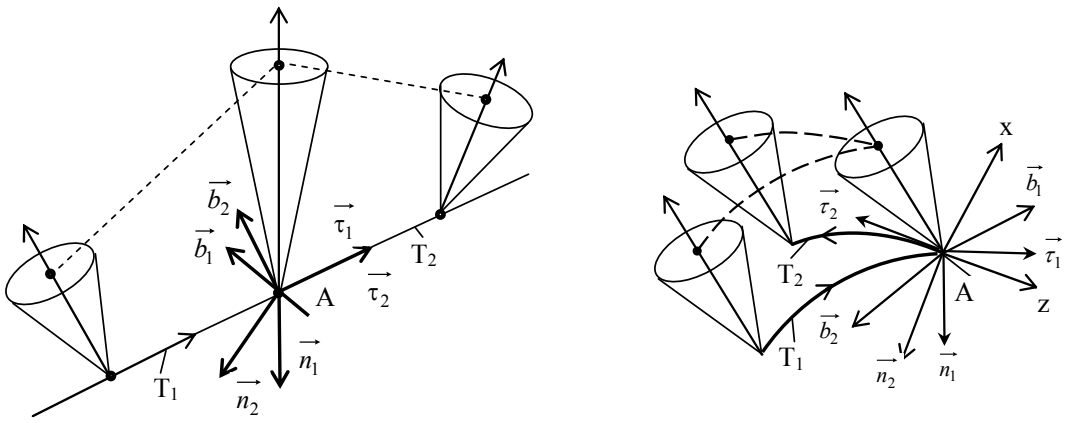


Рис. 3. Особливі ділянки траєкторії, які супроводжуються різким поворотом інструменту (*а*) та різкою зміною напрямку руху інструменту (*б*)

Для опису кінематичних параметрів траєкторії застосовані натуральні триедри (природні тригранники) траєкторій. В особливих точках натуральні триедри раптово змінюють своє положення . Тригранник $\vec{\tau}_1 \ \ \vec{n}_1 \ \ \vec{b}_1$ змінюється на тригранник $\vec{\tau}_2 \ \ \vec{n}_2 \ \ \vec{b}_2$.

Проведено експериментальні дослідження переміщення виконавчого органу на особливих ділянках траєкторії. Для вимірів переміщення виконавчого органу при різкій зміні напрямку його руху використано безконтактні високочутливі тріангуляційні лазерні вимірювачі відстані серії РФ603-10/2. Вимірювач має робочий діапазон 2 мм з точністю вимірів 0,2 мкм. Використано два вимірювачі 1, встановлені у двох взаємно-перпендикулярних напрямках на відстані 11 мм від контрольної циліндричної поверхні 2 виконавчого органу (рис. 4)

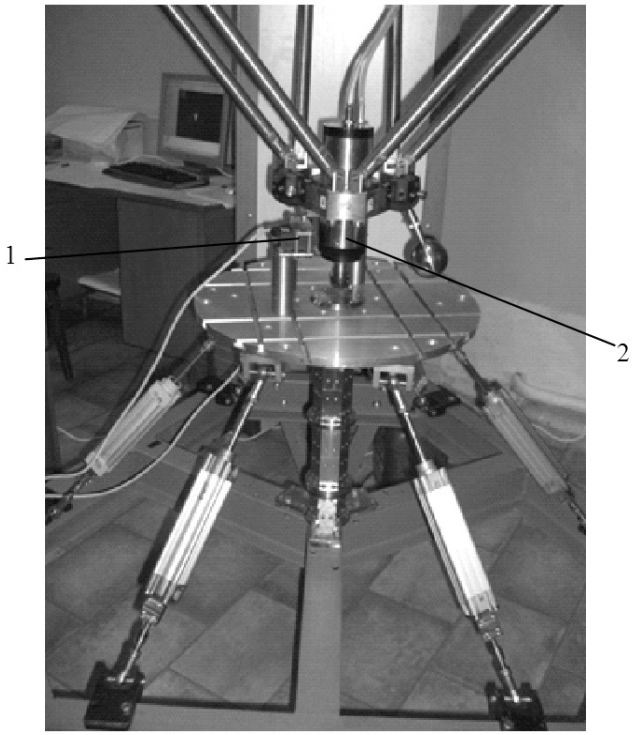


Рис. 4. Встановлення лазерних вимірювачів 1 на нерухомому столі при вимірі переміщення виконавчого органу 2 на особливій ділянці, відповідній зміні напрямку його руху на 90° або 180°

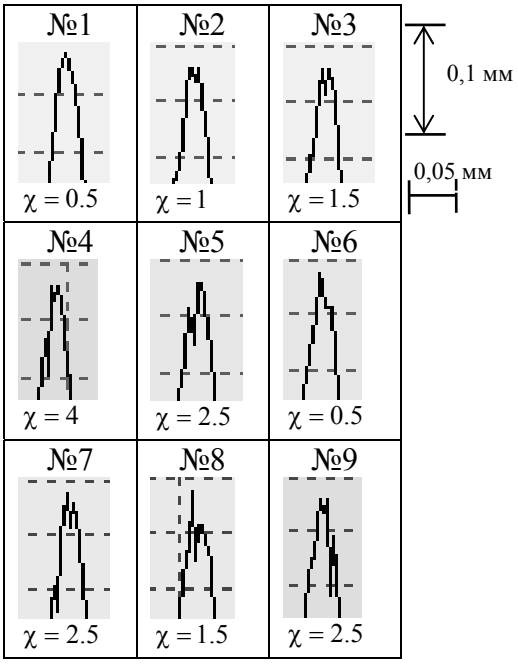


Рис. 5. Виміряні дев'ять реалізацій (№1..№9) коливального процесу на особливій ділянці траєкторії (χ - число повних коливань виконавчого органу)

В процесі експериментальних вимірів визначено переміщення виконавчого органу при його виході в позицію (особливу ділянку траєкторії) з подальшим зворотнім рухом при повороті на 90° або на 180°. Здійснювався послідовний вихід виконавчого органу в позицію, відповідну одній вершині квадрата заданої траєкторії руху. Проведено виміри почергового виходу в позицію з реєстрацією переміщення виконавчого органу на особливій ділянці. Одержано набір експериментально визначених реалізацій випадкового процесу високочастотного коливального руху виконавчого органу на особливій ділянці (рис. 5).

На основі експериментальних вимірів встановлено, що на особливих ділянках траєкторії мають місце коливальні рухи з частотою 20..25 Гц виконавчого органу незначної амплітуди випадкового характеру. Типова реалізація коливального процесу на особливій ділянці траєкторії включає кілька коливань незначної амплітуди подана на рис. 6.

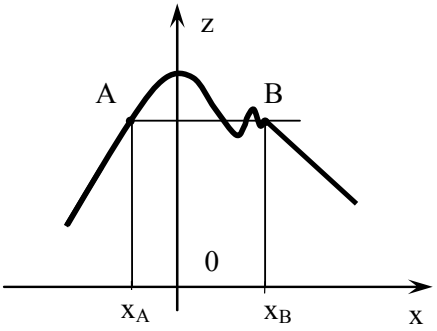


Рис. 6. Характерна реалізація процесу в точці зламу траєкторії, яка має півтора (χ=1,5) повних коливання

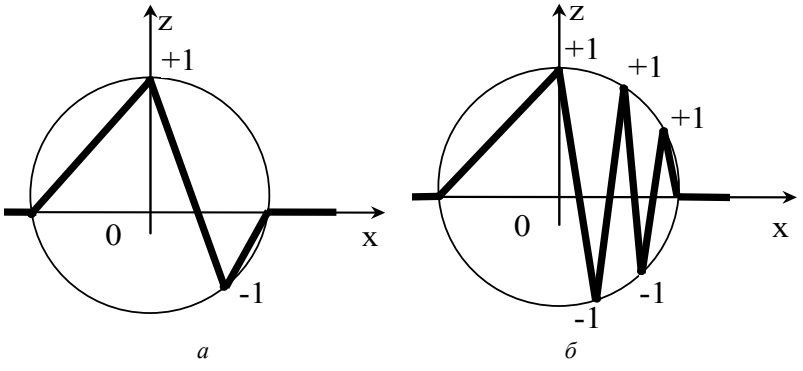


Рис. 7. Типові нескінченно малі коливальні процеси зміни траєкторії в її особливій точці: *а* – процес відповідний одному повному коливанню; *б* – пакет імпульсів, що містить 2,5 коливання

Переміщення виконавчого органу на особливій ділянці траєкторії підлягають закономірностям випадкового характеру і являють собою нечітко визначені (розмиті, Fuzzy) нескінченно малі процеси[8]. Вони реалізуються у вигляді пакету імпульсів. Число, амплітуда і частота імпульсів та їх форма визначаються умовами роботи обладнання. Типовими є пакети імпульсів, число повних коливань яких складає 0,5..4 (рис. 7)

Для дослідження динамічних процесів у особливих точках траєкторії застосовані стохастичні матриці та різномасштабні процеси [8]. Стохастична матриця узагальнює набір реалізацій випадкового коливального процесу по числу екстремумів. Матриця сформована у вигляді таблиці (табл. 1) відповідно графіків наведених на рис. 5.Значення +1 компоненти матриці відповідає максимуму процесу, а значення -1 відповідає мінімуму процесу.

Таблиця 1

Наявність екстремумів у окремих реалізаціях коливального процесу на особливій ділянці траєкторії

№ реалізації процесу	Вхід z_A	Наявність екстремумів реалізації процесу								Вихід z_B	Коливальність χ
1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
2	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1,0
3	0	+1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	1,5
4	0	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0	4
5	0	+1	-1	+1	-1	+1	0	0	0	0	2,5
6	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
7	0	+1	-1	+1	-1	+1	0	0	0	0	2,5
8	0	+1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	1,5
9	0	+1	-1	+1	-1	+1	0	0	0	0	2,5

Другий рядок таблиці відповідає умовному зображенню процесу, показаному на рис. 7а, а п’ятий рядок відповідає процесу,зображеному на рис. 7б.

Стохастична матриця є основою детального аналізу процесу. По ній визначається середнє число екстремумів та проводиться фільтрація інформації з метою встановлення суттєвих інформативних параметрів процесу. Аналіз проведено окремо для кожної компоненти шестивимірного вектора координат, який описує положення виконавчого органу в просторі.

Випадкові динамічні навантаження на виконавчий органна особливих ділянках траєкторії

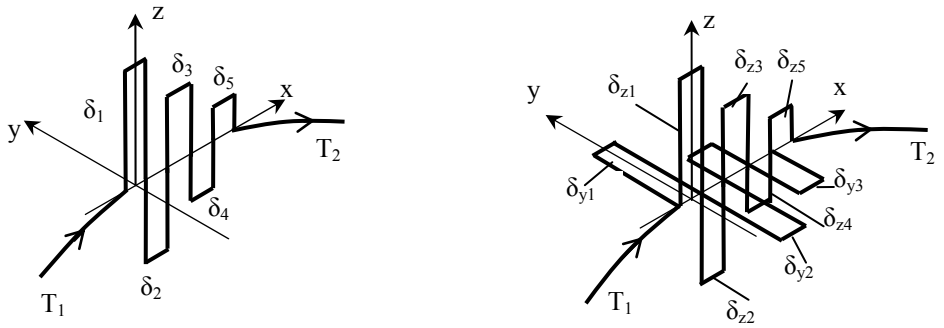
В результаті детального аналізу процесів на особливій ділянці траєкторії встановлено, що кожна складова вектора положення виконавчого органу на особливій ділянці являє собою пакет імпульсів.

Пакет імпульсів подано у вигляді набору узагальнених функцій імпульсного типу. Узагальнені функції відповідають δ-функції Дирака із фіксованою, різною для кожного імпульса, інтегральною нормою:

$$\int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} \delta_i(t)\,dt = S_{oi},$$

де ε – нескінченно мале число $(\varepsilon \neq 0)$; S_{oi} - інтегральна норма відповідного *i*-гоімпульса.

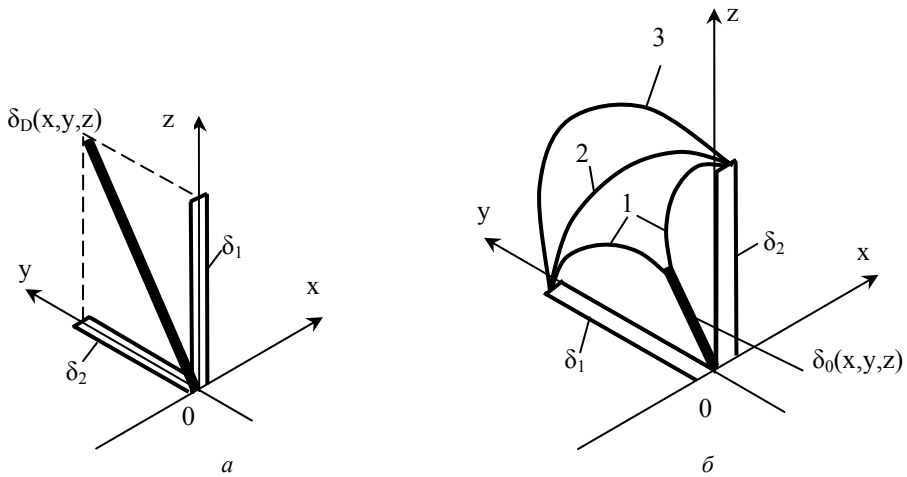
Якщо імпульси на особливій ділянці траєкторії діють в одній площині, маємо плоский пакет імпульсів (рис. 8а).



а *б*

Рис. 8. Коливальні процеси на особливій ділянці траєкторії у вигляді пакетів імпульсів: *а* – пакет імпульсів, що діє в одній площині; *б* – два пакети синфазних імпульсів, що діють у двох взаємно-перпендикулярних площинах

При дії двох пакетів імпульсів у двох взаємно-перпендикулярних площинах результуюча дія залежить від взаємного розташування (фази) імпульсів (рис. 9).



а *б*

Рис. 9. Дія двох взаємно-перпендикулярних імпульсів: *а* – співпадаючі (синфазні) імпульси; *б* – імпульси, що мають фазове зміщення різної величини

Якщо імпульси діють одночасно (синфазно) маємо результуюче навантаження у вигляді двомірної δ-функції (див. рис. 9а).

При наявності фазового зміщення імпульсів (рис. 9б) результуючий імпульс $\delta_0(x,y,z)$ змінює свою величину і напрямок. Якщо фази вихідних імпульсів не співпадають, то годограф результатуючого імпульса (крива 1) має мінімум. При частковому спів падінні фаз імпульсів годограф являє собою опуклу криву (крива 2). При збільшенні ступеня співпадіння годограф (крива 3) витягується, набуваючі граничного значення у випадку повного співпадіння фаз імпульсів.

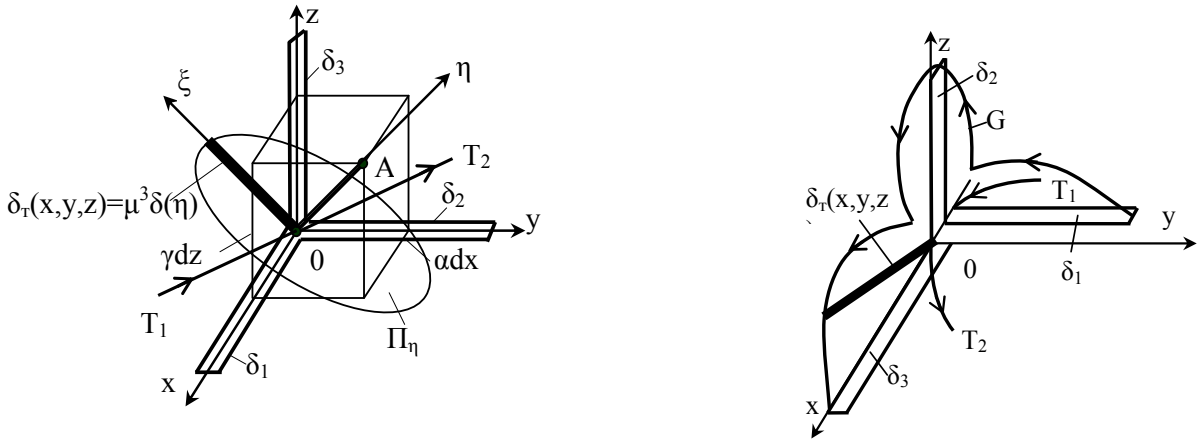
При одночасній дії трьох взаємно-перпендикулярних імпульсів схема дії навантаження ускладнюється (рис. 10).

Синфазна дія трьох взаємно-перпендикулярних імпульсів (див. рис. 10а) відповідає силовому фактору у вигляді тримірної δ -функції [8]. При наявності різниці фаз складових імпульсів має місце суперпозиція дій у взаємно-

перпендикулярних напрямках. Наявність суттєвої різниці фаз приводить до складного просторового імпульсного навантаження на виконавчий орган (рис. 10 б).

Результуючий імпульсний процес $\delta(x,y,z)$ змінює свій напрямок у просторі. Його годограф має вигляд складної просторової кривої G. Максимуми кривої відповідають складовим імпульсного процесу $\delta_1,\delta_2,\delta_3$. Мінімуми кривої відповідають точкам найбільшої різниці фаз складових імпульсів.

В результаті обробки стохастичної матриці встановлено, що коливальний процес на особливій ділянці має частотний спектр, який змінюється від постійного значення незалежного від частоти для одиничного імпульсного навантаження до спектра, який наближається до δ-функції при достатньо великому числіімпульсів у пакеті.



а *б*

Рис. 10. Взаємодія процесів у вигляді сукупності трьох імпульсів, що діють на особливій ділянці траєкторії: *а* – синфазна дія імпульсів та узагальнення синфазно-діючих імпульсів тримірною δ-функцією; *б* – дія трьох зміщених в фазі імпульсів

Відповідно для опису випадкового процесу змін траєкторії запропоновано використати випадковий процес із обмеженим спектром[9] реалізація якого подана у вигляді ряду:

$$z(t)=\sum_{k=-\infty}^{+\infty} z(t_k)\frac{\sin\left[2\pi f(t-t_k)\right]}{2\pi f(t-t_k)},$$

де f – базове значення циклічної частоти.

Вибіркові значення часу t_k^* та процесу $z_k(t_k)$ задані з допомогою генератора випадковихчисел з рівномірним законом розподілу. При цьому на особливій ділянці траєкторії виникають просторові навантаження $F(t)$ на виконавчий орган (рис. 11а). Типова реалізація навантаження має змінну амплітуду і період. Базова частота процесу простежується в групах коливань (див. рис. 11 б).

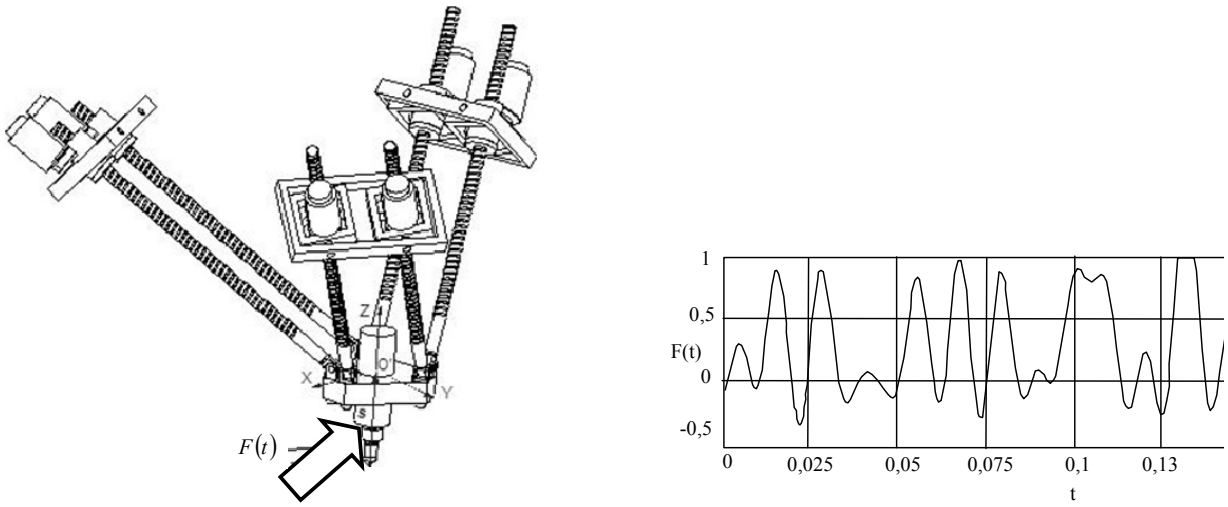
Випадкові навантаження діють в невеликий проміжок часу. Вонивиникають на особливих ділянках траєкторії (показано стрілками на рис. 12).

Випадкові навантаження діють в дотичній площині натурального триедра в околиці особливої ділянки траєкторії в напрямку бісектриси кута між дотичними до траєкторії справа і зліва від точки зламу.

При реалізації методів формоутворення на верстаті паралельної кінематики необхідно обмежувати динамічні навантаження. Це досягається програмними засобами системи шляхом обмежень на зміни натурального триедра траєкторії на особливих ділянках.

Висновки

1. Показано, що траєкторії переміщення виконавчого органу просторової системи приводів мають особливі ділянки у вигляді зламів, де мають місце різкі зміни натурального триедра(природного тригранника) траєкторії.
2. В результаті експериментальних вимірів встановлено, що на особливій ділянці траєкторії має місце коливальний процес випадкового характеру. Реалізації процесу мають 0,5-4 повних коливань з частотою 20..25 Гц і амплітудою, що не перевищує 20 мкм.
3. На особливій ділянці траєкторії імпульсні складові процесу, що діють у взаємно-перпендикулярних напрямках складуються реалізуючи складний просторовий імпульсний процес, який змінюється від одновимірної δ-функції до двох або тривимірної δ-функції при синфазних складових процесу.



а *б*

Рис. 11. Навантаження на виконавчий орган на особливій ділянці траєкторії (*а*) та типова реалізація модуля випадкових навантажень (*б*)

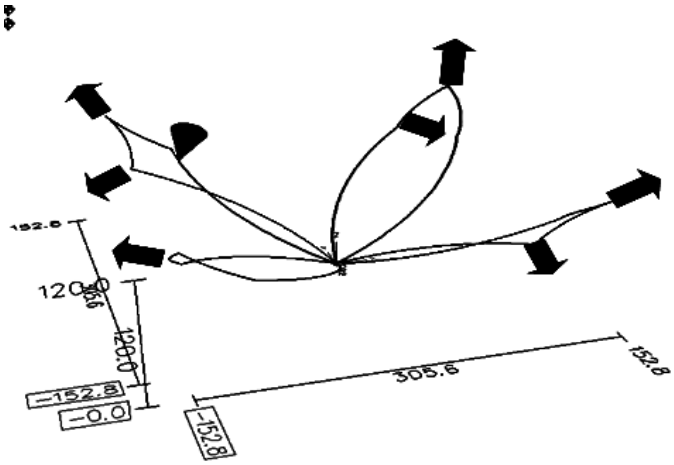


Рис. 12. Типова траєкторія переміщення інструменту відносно фіксованого положення столу (стрілками показано динамічні навантаження, які виникають на особливих ділянках траєкторії

4. На особливих ділянках траєкторії виникають широкополосні випадкові навантаження на виконавчий орган напрямок яких відповідає бісектрисі кута між дотичними до траєкторії справа і зліва від точки зламу, а модуль навантаження відповідає випадковому процесу з обмеженим спектром.
5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується встановити раціональні діапазони зміни натурального триедра траєкторії на особливих ділянках, які відповідають регламентованим діапазонам зміни модуля випадкових навантажень на виконавчий орган.

Анотація

Розглянуто технологічний комплекс, який містить просторові системи приводів. Комплекс включає верстат паралельної кінематики і шести координатний стіл з приводами. Показано, що в процесі функціонування комплексу мають місце особливі області зламу траєкторій взаємного положення робочого органу верстата і столу. В особливих областях спостерігаються стохастичні коливальні процеси нескінченно малої амплітуди. Запропоновано методику теоритичного узагальнення і математичного опису коливальних процесів. В результаті визначені випадкові динамічні навантаження в системі приводів, що діють в особливих областях траєкторій.

Ключові слова: просторові механізми, приводи, системи, траєкторії, особливості, коливальні процеси, екстремуми, імпульсні дії, додавання імпульсів, спектр, навантаження

Abstract
Considered technological complex that contains spatial drive system. The complex consists of parallel kinematics machines and table six coordinate drives. It is shown that in the operation of the complex are special trajectories of the relative position of the working body of the machine and table. In certain areas there is stochastic oscillatory processes infinitely small amplitude. The methods of synthesis and theoretically the mathematical description of oscillatory processes. As a result, define the random dynamic loads in the drive system operating in specific areas of the trajectories.
Keywords: spatial mechanisms, actuators, systems, trajectories, especially oscillatory processes, extrema, pulse effects, the addition of pulses, range, load

1. *Новіков М.* Розробка верстата-гексапода з шестикоординатною системою ЧПК і результати його дослідницького застосування / М. Новіков, В. Струтинський, А. Кириченко // Машинознавство. – Львів: ТзОВ «КІНПАТРІ ЛТД», 2011. – №5-6 (167-168). – С. 3-10.
2. *Кириченко А.М.* Вплив діапазону кутів повороту шарнірних опор на об'єм робочого простору верстата-гексапода / А.М. Кириченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 65. – С. 56-63.
3. *Кириченко А.М.* Матриця жорсткості просторових механізмів паралельної структури з пружними ланками / А.М. Кириченко // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – Вип. 40, ч. І. – С. 256-262.
4. *Струтинський В.Б.* Ідентифікація геометричних параметрів механізмів паралельної структури з ланками змінної довжини / В.Б. Струтинський, А.М. Кириченко // Технологічні комплекси. – Луцьк: Вид-во ЛНТУ, 2011. – № 2(4). – С. 62-67.
5. *Струтинський С.В.* Застосування дискретних математичних моделей у вигляді просторових матриць та багатомірних узагальнених функцій для опису стохастичного тензорного поля моментів інерції сферичної опори // Праці конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій». – Львів, 22-24 жовтня 2008. – С.195-196.
6. *Струтинський С.В.* Нелінійні стохастичні поля тензорів інерції сферичних опор рідинного тертя просторових механізмів // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 1/2009 (54) частина 1. – С. 49 - 56.
7. *Павловський М. А.* Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.
8. *Струтинський С.В.,*Кропівна А. Аналіз процесів технологічних систем. Навчальний посібник. – Кіровоград: «КОД», 2010. – 428 с.
9. *Струтинський В.Б.,*Колот О.В. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: Монографія. – Краматорськ: ЗАТ "Тираж-51", 2005. – 530 с.

REFERENCES

1. *Novikov M.,* Strutins'kijV., Kirichenko A. Mashinoznavstvo. [Engineeringscience]. Lviv: TzOV «KINPATRI LTD», 2011, 5-6, pp. 3-10.
2. *Kirichenko A.M.* Visnik Chernigivs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija «Tehnichninauki». [Announcerof the Tchernihiv state technological university. Series are «Engineerings sciences».].Chernigiv: ChDTU, 2011, no 65,pp. 56-63.
3. *Kirichenko A.M.* Zagal'noderzhavnij mizhvidomchij naukovo-tehnichnij zbirnik. Konstrujuvannja, virobnictvo ta ekspluatacija sil's'kogospodarskih mashin. [National interdepartmenta lscientificand technical collection. Constructing, production an dexploitation of agricul tural machines]. Kirovograd: KNTU, 2010, no 40-I, pp. 256-262.
4. *Strutins'kij V.B.,* Kirichenko A.M. Tehnologichni kompleksi. [Technological complexes]. Luck: LNTU, 2011, no.2, pp.62-67.
5. *Strutins'kij S.V.* Praci konferencií «Teorija ta praktika racional'nogo proektuvannja, vigotovlennja i ekspluatacií mashinobudivnih konstrukcij». (Labours of conference are «Theory and practice of the rational planning, making and exploitation of machine-building constructions»). Lviv, 2008, pp.195-196.
6. *Strutins'kij S.V.* Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo. [Announcer of the Krementchuk state polytechnic university of the name of MykhajloOstrogradskogo]. Kremenchuk: KDPU, 2009, no. 54-1, pp. 49 - 56.
7. *Pavlovs'kij M. A.* Teoretichna mehanika (Theoretical mechanics), Kyiv: Tehnika, 2002. 512 p.
8. *Strutins'kij S.V.,*Kropivna A. Analiz procesiv tehnologichnih sistem. Navchal'nij posibnik (Analysis of processes of the technological systems). Kirovograd: KOD, 2010. 428 p.
9. *Strutins'kij V.B.,* Kolot O.V. Matematichne modeljuvannja stohastichnih procesiv u sistemah privodiv (A mathematical design of stochastic processes is in the systems of occasions). Kramators'k: ZAT Tirazh-51, 2005. 530 p.