

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ НЕЛІНІЙНИХ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ ПРОСТОРОВОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ТА РІЗНОМАСШТАБНИХ ПРОЦЕСІВ

Strutinskiy S., Gyrgiy A.

The National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine (kvm_mmi@mail.ru)

AUTHENTICATION OF PARAMETERS OF NONLINEAR HYSTERESIS DESCRIPTIONS OF SPHERICAL HINGES OF SPATIAL SYSTEM OF OCCASIONS IS WITH THE USE OF FUZZY SET AND OF THE DIFFERENTIAL SCALE PROCESSES

Представлено результати досліджень шарнірних з'єднань просторової системи приводів обладнання з паралельною кінематикою. Визначено нелінійні характеристики люфтового з'єднання, яке має місце в сферичному шарнірі просторового механізму. Здійснено ідентифікацію гістерезисних характеристик сферичних шарнірів з використанням теорії нечітких множин та різномасштабних процесів.

Ключові слова: сферичний шарнір, ідентифікація, зазор, нелінійна характеристика, установка, експеримент, гістерезис, розсіювання, нечітка множина, характеристична функція, нескінченно малий процес, нескінченно швидкий процес, синтез характеристики.

Вступ

Просторові системи приводів є основою прогресивного технологічного обладнання. Розробка такого обладнання потребує дослідження окремих вузлів системи приводів. Тому визначення нелінійних гістерезисних характеристик сферичних шарнірів є актуальним.

Сферичні шарніри мають гарантовано зазори. Конструкція шарніра включає пружні елементи та фрикційні пари. Це обумовлює нелінійні неоднозначні характеристики шарніра. Наукова проблема в загальному вигляді включає математичний опис нелінійних гістерезисних характеристик сферичного шарніра.

Ідентифікація нелінійних гістерезисних характеристик шарнірів дає можливість прогнозувати показники точності просторових шарнірних механізмів. Відповідно стає можливим підвищення точності просторової системи приводів на етапі проектування. Проектування просторової системи приводів являє собою важливе наукове і практичне завдання сучасного машинобудування.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено ряд конструкцій просторових шарнірних механізмів [1]. В монографії [2] розглянуті конструкції сферичних шарнірів. При розрахунках, як правило, шарніри приймаються безлюфтовими з лінійними характеристиками жорсткості [3]. В статтях [4, 5] розглянуті статичні характеристики сферичних шарнірів рідинного тертя. Вони подані у вигляді однозначних гладких залежностей. Визначення нелінійних гістерезисних характеристик сферичних шарнірів у літературних джерелах і мережі Internet не виявлено.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься теоретичне узагальнення експериментально визначених нелінійних гістерезисних характеристик сферичних шарнірів за допомогою сучасних інформаційних технологій.

Метою досліджень поставлена ідентифікація параметрів експериментально визначених нелінійних гістерезисних характеристик сферичних шарнірів та їх теоретичне узагальнення. Задачами досліджень є розробка методики і обладнання для експериментального визначення характеристик шарнірів, якісний і кількісний аналіз одержаного масиву експериментальних даних з ідентифікацією параметрів характеристик; теоретичне узагальнення результатів експериментів з використанням теорії нечітких множин та різномасштабних процесів.

Просторова система приводів побудована по схемі механізму гексапода і включає рухому платформу 1 яка з'єднана за допомогою шести приводів 2 з нерухомою основою 3 (рис. 1).

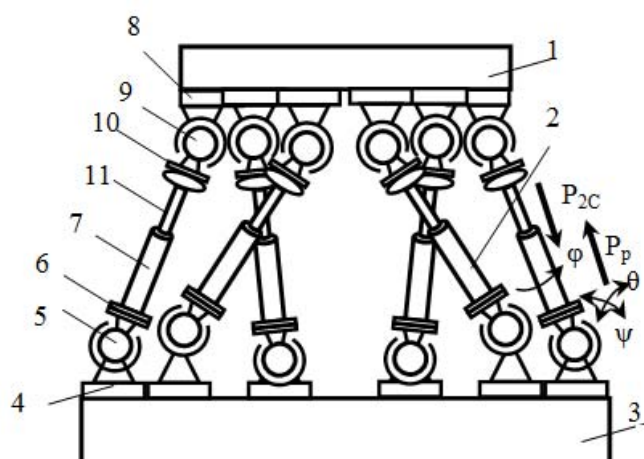


Рис. 1. Конструктивна схема просторової системи приводів

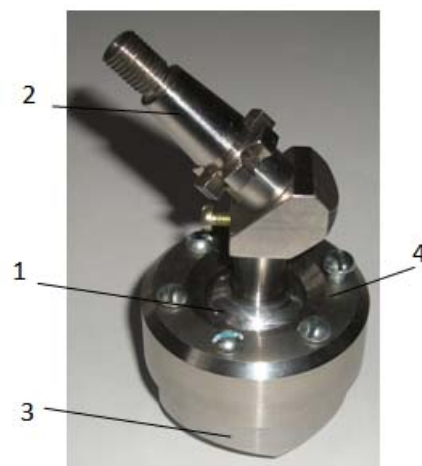


Рис. 2. Загальний вигляд сферичного шарніра

Кожен привод має на своїх кінцях сферичні шарніри. Корпус 4 нижнього шарніра встановлено на нерухомій основі. Нижній шарнір 5 з'єднано фланцем 6 з корпусом привода 7. Корпус верхнього шарніра 8 встановлено на рухомій платформі. Верхній шарнір 9 своїм фланцем 10 з'єднано із штоком привода 11.

Сферичний шарнір виконано у вигляді окремого вузла (рис. 2). Він має сферу 1 із хвостовиком 2. Сфера поміщена в корпусі 3 і фіксується кришкою 4. Між сферою та корпусом наявний зазор для компенсації температурних деформацій деталей. Сфера та відповідна їй сферична поверхня корпусу і кришки шарніра мають похибки виготовлення тому зазор між сферичними поверхнями збільшено для компенсації похибок виготовлення деталей шарніра.

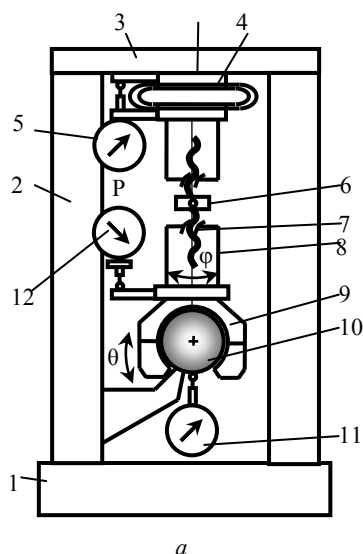


Рис. 3. Установка для визначення нелінійних пружно-дисипативних характеристик сферичного шарніра:
а-принципова схема; б – загальний вигляд

Внаслідок похибок виготовлення деталей та особливостей кріплення корпусу шарніра і кришки зазор має різну величину в різних точках сферичних поверхонь. Величина зазору по поверхні сфери залежить також від поперечно-кутового положення шарніра. Величина зазору визначається багаточисельними факторами нечітко визначеного характеру. Тому контроль зазору виготовленого сферичного шарніра здійснено експериментальними методами по спеціальній методиці.

Для визначення геометричних та пружно-дисипативних характеристик шарніра розроблена і застосована спеціальна установка (рис. 3).

Установка має силову плиту 1, стійки 2 та траверсу 3. На траверсі закріплено двосторонній кільцевий динамометр який має пружину 4 деформація якої вимірюється індикатором 5. Установка має навантажувачий гвинтовий пристрій, що включає гвинт 6 хвостовики якого мають праву і ліву різь, що входить в безззорні розрізні гайки 7. Гайка 7 виконана в рухомій частині привода 8 на якій закріплено корпус сферичного шарніра 9. Сфера 10 шарніра

закріплена на стійці 2. Для вимірів переміщення сфери і корпусу шарніра служать індикатори 11 і 12.

Установка працює наступним чином. Поворотом гвинта 6 забезпечується переміщення рухомої частини 8 та корпусу 9 сферичного шарніра. Зусилля яке виникає деформує пружину 4 динамометра, а її деформація реєструється індикатором 5. Відповідні наявному зусиллю переміщення корпусу 9 сферичного шарніра вимірюються індикатором 12. Індикатор 11 служить для контролю фіксованого положення сфери 10. У випадку переміщення сфери при значних навантаженнях переміщення корпусу 9 відносно сфери 10 знаходиться як різниця показань індикаторів 12 та 11.

Нелінійні гістерезисні пружно-дисипативні характеристики шарніра являють собою нечітко визначену неоднозначну залежність. Для знаходження характеристики розроблено спеціальну методику

експериментальних вимірів характеристики. Вона базується на врахуванні реальних умов роботи шарніра в складі просторового механізму.

Нелінійні гістерезисні характеристики шарніра виміряно при зміні навантаження від стискаючого P_c до навантаження розтягу P_p .

Проведено виміри переміщення сфери у відносно корпуса шарніра при дії на шарнір циклічного вертикального знакозмінного навантаження (рис. 4).

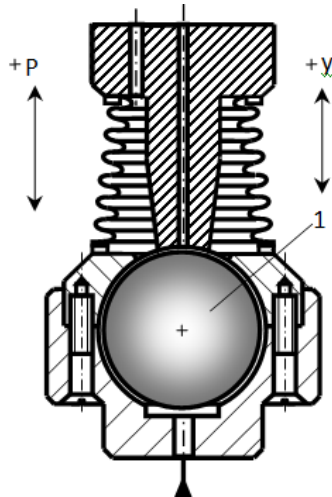


Рис. 4. Схема переміщення сфери відносно корпуса шарніра при дії циклічного знакозмінного навантаження

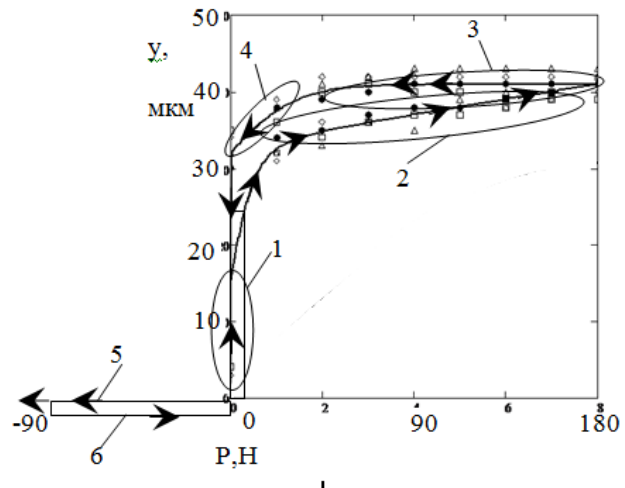


Рис. 5. Результати експериментальних вимірів характеристик сферичного шарніра при кількох циклах навантаження

Виміри проведено для п'яти циклів навантаження. Одержана характеристика (рис. 5) має кілька характерних ділянок. Ділянка 1 відповідає зміні положення сфери відносно корпуса при зміні знака навантаження від стискаючого до розтягуючого. Ділянка має незначну протяжність в околиці нульового навантаження на шарнір. Ділянка 2 відповідає деформаційній характеристиці шарніра при розтягуючому навантаженні. Початок ділянки 2 де вона примикає до ділянки 1 відповідає вибірці зазорів до повного прилягання сферичних поверхонь. Основна частина ділянки 2 відповідає пружним деформаціям шарніра які складаються із контактних деформацій між сферою і сферичним сидлом, деформацій корпуса і кришки та деформацій елементів кріплення корпуса і кришки (гвинтів). Ділянка 3 визначає характеристику шарніра при зменшенні навантаження від максимального розтягуючого. Вона має практично постійне значення. Характеристика також має ділянку 4 різкого переміщення сфери відносно корпуса при зменшенні навантаження до нуля. При стискаючому навантаженні на шарнір характеристика відповідає ділянці 5 яка має практично постійне значення характеристики. Постійне значення пояснюється вкрай незначними деформаціями між сферою і сферичним сидлом корпуса. При зміні навантаження від максимального стискаючого до нуля характеристика відповідає ділянці 6. В результаті вимірів встановлено що характеристика має неоднозначність у вигляді петлі гістерезису між ділянками 2 і 3, 4.

В процесі досліджень виконана ідентифікація параметрів характеристик на кожній ділянці. Ідентифікація проведена для кожного окремого циклу навантаження та для всієї сукупності циклів навантаження. Для першого циклу навантаження (показано чорними точками) характеристика на ділянці 2 описана наступною нелінійною математичною моделлю

$$y(P) = a_0 + a_1 P + \sum_{k=1}^n b_k \operatorname{th}(c_k P),$$

де постійні коефіцієнти моделі:

$$a_0 = 32 \text{ мкм}, \quad a_1 = 0,044 \text{ 1/Н}, \quad b_1 = 15 \text{ мкм}, \quad b_2 = 3 \text{ мкм}, \quad c_1 = 0,089 \text{ 1/Н}, \quad c_2 = 0,036 \text{ 1/Н}.$$

Для інших циклів вимірів вигляд характеристики дещо змінюється. Ці зміни є невеликими, але в порівнянні із незначною петлею гістерезису вони є суттєвими. Тому детермінований підхід до опису характеристики не є доцільним. Ефективним є запропонована ідентифікація параметрів нелінійних характеристик за допомогою апарату нечітких (Fuzzy) множин [6, 7] та різномасштабних процесів [8, 9]. Ідентифікація параметрів полягає у наступному. Проведено якісний аналіз характеристики по окремим ділянкам. Ділянка 1 характеризує собою вузьку полосу яка розташована справа від осі ординат. На даній ділянці наявний нескінченно швидкий процес зміни положення сфери відносно корпуса. Процес має властивість асиметрії та є обмеженим [9]. Процес характеризується складною мікроструктурою.

Розглянемо значення характеристик по окремим циклам на ділянці 2 (рис.6).

В кожному перетині характеристики ($P = const$) на ділянці 2 точки розташовуються в межах деякої полоси. По ширині полоси значення характеристики являє собою нечітко визначену (розмиту, Fuzzy) множину.

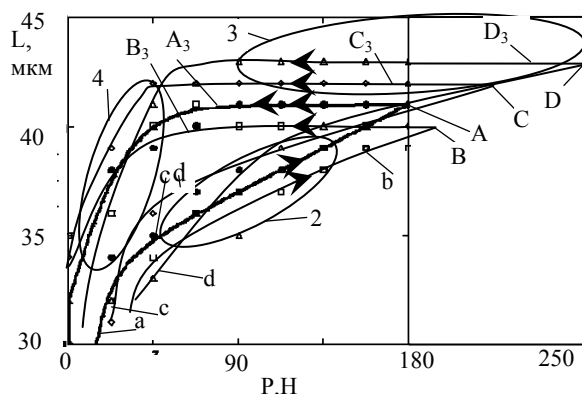


Рис. 6. Експериментально визначені характеристики шарніра у вигляді набору кількох петель гістерезису

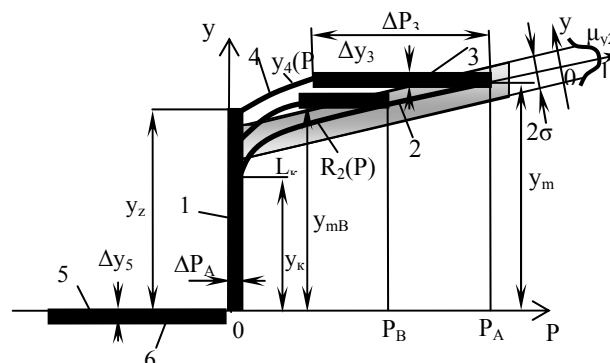


Рис. 7. Ідентифікація параметрів нелінійної гістерезисної характеристики сферичного шарніра

Для опису нечітко визначеної множини запропоновано ввести відповідні характеристичні функції приналежності [6]. Визначення функції приналежності є елементом аналізу нечітко визначеної множини [7].

Із аналізу характеристик випливає, що множина їх значень на ділянці 2 є незалежною і визначається рядом факторів які супроводжують виборку люфту. Характеристики для окремих циклів навантаження на ділянці 2 являють собою набір кривих a, b, c, d, які наближаються до паралельних прямих. Для ділянки 2 вибрана функція приналежності нечіткої множини значень характеристики у вигляді плавної кривої.

Характеристика на ділянці 3 являє собою набір прямих паралельних осі абсцис. Їх ординати визначено положенням кінцевих точок характеристики (точки A, B, C, D). Для ділянки 3 кожен процес (показано лініями A₃, B₃, C₃, D₃) є чітко визначеним і знаходиться в межах вузької полоси (лінії).

Для ділянки 4 характеристики процес являє собою нечітко визначену множину з деякою функцією приналежності.

Характеристика шарніра при циклічному навантаженні ідентифікована як сукупність нескінченно швидких, нечітко визначених, та нескінченно малих процесів (рис. 7).

На ділянці 5 переміщення корпусу шарніра є майже постійним тобто характеристика знаходиться в межах вузької полоси (лінії). При стискаючому навантаженні деформації шарніра є незначними, а зміна положення сфери відносно корпусу шарніра (ділянка 5) являє собою нескінченно малий необмежений процес який мало змінюється при зміні навантаження. Процес на ділянці 5 розповсюджується в напрямку $P \rightarrow -\infty$, але є обмеженим справа. Процес на ділянці 6 теж є нескінченно малим і переходить в нескінченно швидкий процес (ділянка 1) в околиці точки $P=0$. Процес на ділянках 5 і 6 має чітко виражену асиметрію тому, що переміщення шарніра завжди менше нульового значення. При зміні знаку навантаження з від'ємного до додатного нескінченно малий процес 6 конвертується в нескінченно швидкий процес відповідний ділянці 1.

Для ідентифікації характеристики на ділянці 2 використано ряд положень теорії нечітких (Fuzzy) множин. Проведено визначення характеристичної функції приналежності та синтез процесу відповідно знайденої функції. Для характеристики нечіткої множини, що описує даний процес введено детермінований лінійний процес $R_2(P)$, що характеризує середнє значення полоси та параметр σ , який визначає точки переходу функції приналежності через значення $\frac{1}{2}$. Вказані параметри знаходяться в результаті теоретичного узагальнення вимірювань по окремим циклам характеристик шарніра.

Для опису нечітко визначених процесів застосовано різні характеристичні функції приналежності [7]. Для ділянки 2 застосовано характеристичну функцію приналежності $\mu_{y2}(y)$ у вигляді кривої Гауса. Це обґрунтовано суттєвим випадковим розкидом значень характеристики жорсткості шарніра при розтягу. Для ділянки 4 вибрано трапецієвидну функцію приналежності. При цьому для функцій приналежності ділянок 2 і 4 має місце різна ширина (ступінь «розмиття») функції приналежності.

Для ідентифікації функцій приналежності використані експериментальні дані. Побудова функції приналежності розглянута на прикладі процесу відповідного ділянці 2 і здійснюється наступним чином. Массив значень характеристики по 5 циклам навантаження піддано статистичній обробці з побудовою лінійної регресійної моделі

$$R_2(P) = k_0 + k_1 P$$

де $k_0 = \text{intrsept}(vp,vy)$, $k_1 = \text{slope}(vp,vy)$ коефіцієнти лінійної регресії; vp – дискретні значення аргументу; vy – точкові значення характеристики визначені експериментально для всіх циклів навантаження і всього діапазону зміни розтягуючого навантаження.

Визначено центровані відносно лінійної регресії експериментальні значення характеристики

$$vy^0 = vy - R_2(vp).$$

Для центрованих значень процесу по кожному циклу побудовані прямокутні функції приналежності для нечітких множин експериментальних значень характеристик по окремим циклам навантаження (рис. 8).

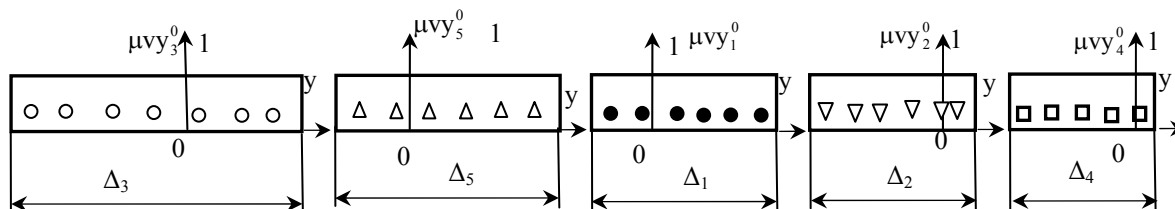


Рис. 8. Характеристичні функції приналежності нечітких множин центрованих значень характеристики шарніра на ділянці 2 для п'яти циклів навантаження

Проведено впорядкування системи нечітких множин які відповідають окремим циклам навантаження. Впорядкування здійснено по зменшенню ширини Δ_i прямокутної функції приналежності. На рис.8 представлені в порядку зліва направо впорядковані значення функцій приналежності для нечітких множин відповідних п'яти циклам вимірів характеристик.

Результуюча характеристична функція приналежності одержана як результат об'єднання функцій приналежності по окремим циклам. Тобто

$$\mu_p = \mu(vy_1^0 \cap vy_2^0 \cap vy_3^0 \cap vy_4^0 \cap vy_5^0).$$

Операція об'єднання здійснена по окремим складовим починаючи з множини цикла, що має найбільш широкую функцію приналежності Δ_3 . Геометрично операція об'єднання нечітких множин інтерпретується у вигляді блочної діаграми (рис. 9а).

Кожен блок який утворює шар діаграми є результатом об'єднання кількох нечітко визначених множин. Блок I є результатом об'єднання множини vy_3^0 із нею самою. Блок II є результатом об'єднання множин vy_3^0 і $\cap vy_5^0$. Блок III результатом об'єднання множин $vy_3^0 \cap vy_5^0 \cap vy_1^0$. Блок IV є результатом об'єднання множин $vy_3^0 \cap vy_5^0 \cap vy_1^0 \cap vy_2^0$. Блок V є результатом об'єднання всіх 5-ти множин. Одержана блочна діаграма згладжена плавною залежністю у вигляді кривої Гауса

$$\mu_{pg}(y) = e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}.$$

За критерій оптимального згладження прийнято рівність площі блочної діаграми і площі кривої Гауса. Вісь симетрії кривої (точка y_0) в загальному випадку не співпадає із значенням характеристики відповідним лінійній регресійній моделі.

Ідентифікована характеристична функція приналежності у вигляді кривої Гауса свідчить про рівноцінність вкладу окремих факторів у формування нечіткої множини значень характеристики при значному (достатньо великому) числі факторів.

В ряді випадків наявна обмежена група факторів, що формує характеристику. При цьому ідентифікована функція приналежності має чітко виражену асиметрію (крива 1 на рис. 9б) із максимумом при $y=y_{01}$. Композиція окремих факторів формує двовершинну характеристичну функцію приналежності із максимумами при $y=y_{02}$ та $y=y_{03}$. Для апроксимації даних функцій приналежності використано відповідні щільності розподілу випадкових величин. Застосовано щільності гама і бета розподілу, розподілу Пуассона, геометричного біноміального та інших. При наявності кількох максимумів ідентифікована характеристична функція приналежності описується дво- або багатовершинним розподілом випадкової величини.

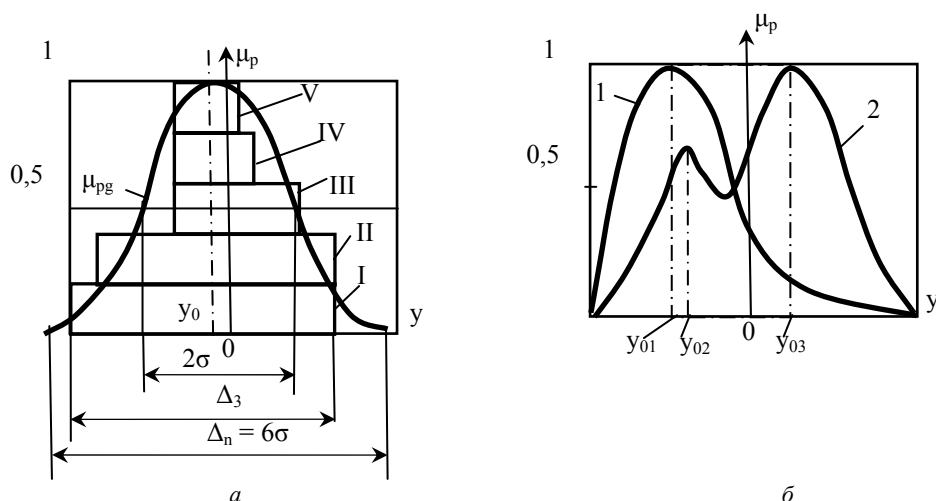


Рис. 9. Геометрична інтерпретація об'єднання набору нечітких множин у вигляді блочної діаграми (а) та асиметричні характеристичні функції приналежності (б), які відображають превалюючий вплив окремих факторів на формування нечіткої множини

Знайдені по результатам експериментів характеристичні функції приналежності дають можливість з високою точністю прогнозувати вид і параметри нелінійної гістерезисної характеристики люфтового з'єднання в шарнірі. Прогноз значень характеристики здійснено спеціальними методами. Найбільш загальними є прогнозування значень характеристики на основі гіпотези про рівноцінність вкладу окремих факторів при значному числі факторів впливу. При цьому характеристична функція відповідає кривій Гауса, а прогноз значення є окремою реалізацією випадкового числа із масиву нормально розподілених випадкових чисел, математичне сподівання яких відповідає знайденій лінійній регресійній моделі характеристики, а середньоквадратичне відхилення (стандарт) дорівнює напівширині знайденої характеристичної функції приналежності у вигляді кривої Гауса по її точкам переходу.

Значення характеристики шарніра, зокрема на ділянці 2 буде визначено у вигляді

$$y_2 = R_2(P) + N_2^* = k_0 + k_1 P + N_2^*,$$

де N_2^* - значення корекції характеристики відповідно нечіткої множини, що описує полосу розсіювання характеристики на ділянці 2.

Корекцію характеристики N_2^* одержано за допомогою генератора випадкових чисел з нормальним законом розподілу. Для практичного застосування генеровано таблицю випадкових чисел із стандартом $\sigma=1$ $N_0^* = \text{rmorm}(20,0,1)$. Їх значення приведено в табл. 1.

Таблиця

Таблиця генерованих випадкових чисел з нормальним законом розподілу

i	1	2	3	4	5	6	7
N_0^*	-0,475	-0,689	0,759	-0,019	0,265	-1,037	0,492

Відповідно величина корекції характеристики для $\sigma_2 \neq 1$ визначається у вигляді $N_2^* = \sigma_2 N_0^*$.

По значенню характеристики на ділянці 2 знаходиться її поточне значення відповідне заданому навантаженню. Максимальне значення характеристики відповідає максимальному навантаженню P_m і складає

$$y_m = y_2(P_m) = k_0 + k_1 P_m + N_2^*.$$

Одержана величина y_m визначає постійне значення характеристики на ділянці 3.

Виборка зазору в сферичному шарнірі характеризується величиною максимального переміщення. Наближено для невеликих навантажень можна прийняти

$$y_m = k_0 + N_2^*$$

Дана залежність дозволяє з достатньою точністю оцінити зазор в сферичному шарнірі. Вона відповідає характеристиці реле в якого кінцеве значення являє собою нечітко визначену множину (рис. 10а).

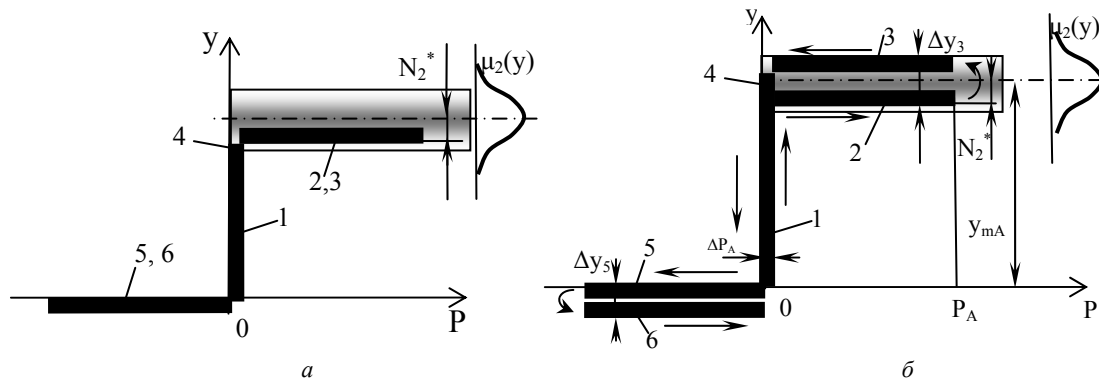


Рис. 10. Характеристика люфтового з'єднання сферичного шарніра у вигляді ступінчатої залежності із нечітко визначеною ординатою (а) та узагальнена гістерезисна характеристика сферичного шарніра (б)

Недоліком характеристики реле є ігнорування в ній гістерезисних явищ.

Для врахування явища гістерезису запропоновано ідентифікувати характеристику шарніра у вигляді петлеподібних залежностей складених із набору ступінчатих функцій побудованих із нескінченно малих та нескінченно швидких процесів (рис. 10 б).

Гістерезисні властивості люфтового з'єднання враховані петлеподібними ділянками характеристики. Основна петля гістерезису включає ділянки 2, 3, 4. При цьому ширина петлі Δy_3 є кінцевою. При дії стискаючого навантаження (ділянка 5) з подальшим розвантаженням (ділянка 6) теж має місце петля гістерезису, але її ширина $\Delta y_5 \rightarrow 0$.

Ідентифікована характеристика з достатньою точністю описує статичні і динамічні переміщення сфери відносно корпусу шарніра при знакозмінних навантаженнях.

Проведені дослідження підтвердили ефективність застосування теорії нечітких множин та різномасштабних процесів для опису характеристик сферичних шарнірів просторової системи приводів.

Висновки

1. Люфти та з'єднання між деталями у сферичних шарнірах суттєвим чином впливають на параметри точності просторової системи приводів. Найбільш доцільно визначити нелінійні пружно-дисипативні характеристики шарнірів експериментальними методами. Розроблена установка дає можливість ідентифікувати параметри нелінійних характеристик сферичного шарніра, які характеризуються різкими змінами положення сфери в діапазоні 35 ... 45 мкм та розсіянням значень характеристики в межах 5 ... 8 мкм.

2. Встановлено, що при стискаючих навантаженнях гістерезисна характеристика шарніра близька до нескінченно малого процесу петлеподібного типу який конвертується в нескінченно швидкий процес при зміні знака навантаження із стискаючого до розтягуючого.

3. При зростаючих розтягуючих навантаженнях характеристика шарніра описується сумою лінійної регресійної моделі та нечітко визначеної множини, що відображає розсіяння характеристики. При цьому характеристична функція приналежності нечіткої множини близька до кривої Гауса із середньоквадратичним відхиленням 1.2 мкм. При спадних розтягуючих навантаженнях характеристика шарніра має постійне значення і відповідає процесу нескінченно малих змін передісторією якого є нечітко визначена множина значень характеристики.

4. Ідентифікація параметрів нелінійної гістерезисної характеристики шарніра здійснюється шляхом синтезу значень характеристики із нечітко визначеної множини. При цьому лінійна регресійна модель нижньої гілки петлі гістерезису доповнюється прогностичним значенням, яке визначається за допомогою генератора випадкових чисел з нормальним законом розподілу, щільність розподілу якого відповідає знайдений характеристичній функції приналежності.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується визначення нелінійних гістерезисних характеристик просторової системи приводів яка містить 12 сферичних шарнірів.

Аннотация. Представлены результаты исследований шарнирных соединений пространственной системы приводов оборудования с параллельной кинематикой. Определены нелинейные характеристики люфтового соединения, которое имеет место в сферическом шарнире пространственного механизма. Осуществлена идентификация гистерезисных характеристик сферических шарниров с использованием теории нечетких множеств и разномасштабных процессов.

Ключевые слова: сферический шарнир, идентификация, зазор, нелинейная характеристика, установка, эксперимент, гистерезис, рассеивание, нечеткое множество, характеристическая функция, бесконечно малый процесс, бесконечно быстрый процесс, синтез характеристики.

Abstract. The results of studies in the spatial system drive mechanism of the type hexapod. For the developed spherical joints are defined non-linear elastic-dissipative characteristics. For this purpose, was made a special experimental plant, which measured the hysteresis characteristics of the joints under cyclic loading. Characteristics of joints are described by analytical dependences of regression by using Fuzzy Sets. Determined by the characteristic functions of fuzzy sets that describes the response. They were obtained by the composition of mathematical models of the characteristics of individual cycles of loading of spherical joints. Membership functions were approximated by Gause curve.

Developed a method for analytical description of nonlinear hysteretic characteristics of the joints through the synthesis of the obtained values of the characteristics by obtained characteristics functions of fuzzy sets. The method uses a random number generator, which corresponds to the distribution law of membership functions. There was proposed a simplified description of the nonlinear characteristics of the joints which takes into account their hysteresis properties and the availability of uncertainty of values of characteristics.

Given recommendations of using of the results for determine the precision parameters of the spatial drive system.

Keywords: spherical hinge, authentication, gap, nonlinear description, setting, experiment, hysteresis, dispersion, unclear plural, characteristic function, infinitely small process, infinitely rapid process, synthesis of description.

1. Бушувев В.В. Практика конструирования машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 448с. ISBN 5-217-003341-х
2. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования. – М.: Машиностроение, 2003. – 385с.
3. Крижанівський В. А., Кузнецов Ю. М., Валявський І. А., Склярів Р. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. Під ред. Ю. М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
4. Струтинський С.В. Експериментальні дослідження силових характеристик аеростатичного сферичного шарніра / С.В. Струтинський // Технологія і техніка друкарства. Зб.наук.праць – 2010, №1 (27). – С.163-170.
5. Струтинський С.В. Експериментальні дослідження характеристик регульованого аеростатичного сферичного шарніра / С.В. Струтинський, О.М. Яхно // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування. – №59. – Київ, 2010. – С.224-22
6. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т.Тэрано, К.Асан, М.Сугэно. – М.:Мир, 1993. – 368с.
7. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 221с.
8. Струтинський С.В. Різномасштабні динамічні процеси в мехатронних системах // Кіровоградський національний технічний університет / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 35. – КНТУ, 2005. – С. 310-315.
9. Струтинський С.В., Кропивна А. Аналіз процесів технологічних систем. Навчальний посібник. – Кіровоград: «КОД», 2010. –428 с.-ISBN 978-966-1508-48-3.

REFERENCES

1. Bushuev V.V. Praktika konstruirovaniya mashin(Practice of designing of machines). Moscow: Mashinostroenie, 2006. 448p.
2. Krajnev A.F. Ideologija konstruirovaniya (Ideology of designing). Moscow: Mashinostroenie, 2003. 385p.
3. Krizhanivskij V. A., Kuznecov Ju. M., Valjavs'kij I. A., Skljarov R. A. Tehnologichne obladnannja z paralel'noju kinematikoj (A technological equipment is with a parallel kinematics). Kirovograd, 2004. 449 p.
4. Strutinsky S.V. Tehnologija i tehnika drukarstva. [Technology and technique of book-printing]. 2010. no 1 (27). pp.163-170.
5. Strutinsky S.V., Jahno O.M. Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". No 59. 2010. pp.224-228.
6. Tjerano T., Asan K., Sugeno M. Prikladnye nechetkie sistemy (Application unclear systems). Moscow: Mir, 1993. 368p.
7. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Ju. Nечetkaja logika i iskusstvennye nejronnye seti (Fuzzy logic and artificial neuron networks). Moscow: Fizmatlit, 2001. 221 p.
8. Strutinsky S.V. Konstruuvannja, virobnictvo ta ekspluatacija sil'skogospodars'kih mashin. [Constructing, production and exploitation of agricultural machines]. KNTU, 2005.no 35. pp.310-315.
9. Strutinskij S.V., Kropivna A. Analiz procesiv tehnologichnih system (Analysis of processes of the technological systems). Kirovograd: «KOD», 2010. 428 p.