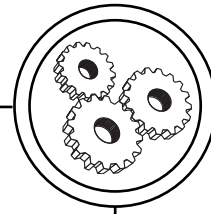


## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



УДК 621.91

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ГІДРОСТАТИЧНО-АЕРОСТАТИЧНОГО ОПОРНОГО ВУЗЛА

© С. В. Струтинський, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

**Приведена конструкція розробанного гідростатически аеростатического опорного узла пространственого механізма. Рассмотрены особенности изготовления точных сферических поверхностей основных деталей узла. Изложена методика экспериментального определения реальной геометрии сферических поверхностей на измерительной машине и разработан расчетный комплекс для обработки результатов экспериментов. Установлены характерные параметры поверхностей, в частности радиус номинальной сферической поверхности, отклонения от сферической, амплитуды и периоды волнистости и параметры микрогеометрии.**

**The construction of the developed hydrostatical aerostatics supporting knot of spatial mechanism is resulted. The features of making of exact spherical surfaces of basic details of knot are considered. The method of experimental determination of the real geometry of spherical surfaces is expounded on a measuring machine and a calculation complex is developed for treatment of results of experiments. The characteristic parameters of surfaces are set, in particular radius of nominal spherical surface, deviation from spherical of amplitude and periods of waviness.**

#### **Актуальність дослідження**

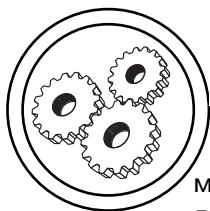
В просторових механізмах технологічного обладнання широко застосовуються шарніри із трьома ступенями вільності [1]. Прогресивними конструкціями шарнірів є сферичні гідростатичні або аеростатичні опори. Вони мають високу точність, незначні моменти опору, допускають регулювання положення опори [2]. Гідростатичні опори та комбіновані гідростатично-аеростатичні опори мають гарні демпфуючі властивості. Їх застосування суттєвим чином під-

вищує динамічні характеристики механізмів, зменшує шум і вібрацію технологічного обладнання [3]. Тому розробка і дослідження безконтактних опорних вузлів є актуальною задачею.

#### **Постановка проблеми в загальному вигляді**

Сферичні гідростатичні та аеростатичні опорні вузли мають точні сферичні поверхні зазор між якими складає 40...100 мкм [4].

Забезпечення необхідної величини і стабільності зазору в



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

межах сферичної поверхні являє собою складну проектно-технологічну проблему. Одним із аспектів цієї проблеми є виготовлення деталей, які мають точні зовнішні поверхні у вигляді ділянки сфери. Дані ділянки охоплюють значні тілесні кути і розташовані по різні боки діаметральних перетинів сфери [5].

*Зв'язок проблеми із важливими науковими та практичними завданнями*

Проблема виготовлення точних сферичних поверхонь є основою вирішення багатьох наукових та практичних завдань вітчизняної промисловості [1]. Розв'язання даної проблеми дозволяє створити прогресивні конструкції металообробного обладнання [2], промислових роботів, маніпуляторів [3], штабелерів, різноманітних сенсорів, вимірювальних комплексів та інших машин та механізмів.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В останніх дослідженнях і публікаціях наведена значна кількість даних по конструкції, виготовленню та контролю якості точних сферичних поверхонь [2]. При виготовленні, як правило використовуються спеціальні сферотокерні або сферошліфувальні верстати. Для вирішення технологічних проблем виготовлення сферичних поверхонь необхідна система виміру точних геометричних розмірів сферичних поверхонь. Як правило сферична поверхня контролюється вимірами відхилення від номінальної сферичної поверхні в 25 або 49 точках. Для розробленого сфе-

ричного аеростатичного опорного вузла дана система вимірів є непридатною. Вона не враховує реальних відхилень поверхонь в межах робочих зазорів аеростатичних опор.

*Вирішення невирішених частин загальної проблеми*

В Національному технічному університеті України розроблено ряд конструкцій сферичних гідростатично-аеростатичних опорних вузлів просторових механізмів. Реалізація сферичних опорних вузлів обумовила вирішення ряду технологічних проблем, зокрема виготовлення точних зовнішніх і внутрішніх сферичних поверхонь. Виготовлені деталі із сферичними поверхнями мають похибки геометрії. Для визначення похибок здійснені виміри реальних сферичних поверхонь на вимірювальній машині.

Розроблена спеціальна методика обробки результатів вимірів, що дозволяє визначити реальну конфігурацію виготовленої поверхні.

### **Мета досліджень**

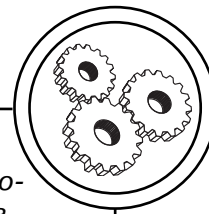
Викладення спеціальна методика обробки результатів вимірів, визначення результатів вимірів та їх аналіз.

### **Виклад основного матеріалу досліджень**

Конструкція розробленого сферичного гідростатично-аеростатичного опорного вузла.

Опорний вузол (рис. 1) має корпус 1, з яким з'єднується кришка 2. Спеціальні гвинтові приводи 3 і 4 призначені для переміщення кришки відносно кор-

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



пуса. В якості приводів застосовуються гвинтові механізми та спеціальні термомеханічні приводи переміщень. Гвинтові приводи служать для початкового регулювання опори, а термомеханічні — для компенсації температурних деформацій ланок просторового механізму.

Корпус і кришка мають порожнину із ділянками точних сферичних поверхонь 5, 6, в які із зазором поміщається рухома сфера 7, з'єднана із штангою 8 просторового механізму. На сферичних ділянках корпуса і кришки розміщені аеростатичні опори із вставками 9. Опори мають дроселі 10, до яких підводиться повітря під тиском  $p_n$ . Всього опорний вузол має шість аеростатичних опор. Частина з них має регульовані дроселі 11, що дозволяють в певних межах регулювати середнє (нульове) положення сфери  $W$  відносно корпуса.

Опорний вузол має гідравлічну струменеву систему регулювання несучої спроможності окремих аеростатичних опор. Це здійснюється динамічною дією струменів робочої рідини на периферійні ділянки аеростатичних опор. Струмені формуються в соплових пристроях 12, виготовлених методом лазерної стереолітографії. Зміною тиску робочої рідини  $p_{y1} \dots p_{y3}$  забезпечується зміна параметрів струменів, а відповідно і регулювання положення сфери відносно корпуса в напрямках  $x, y, z$ .

Додатково опорний вузол включає систему 13 підводу повітря до приводів зміни довжини штанг просторового механізму.

*Основні деталі виготовлено-го сферичного опорного вузла*

Основні технологічні труднощі виготовлення опорного вузла полягають в обробці ділянок точних сферичних поверхонь корпуса, кришки і сфери. Корпус 1 і кришка 2 мають ділянки сферичних поверхонь у вигляді сферичного сегмента 3 та сферичних секторів 4 (рис. 2).

Виготовлення сферичних поверхонь корпуса і кришки здійснюється з однієї установки. Одержані ділянки сферичних поверхонь підлягають контролю згідно розробленої методики.

Рухома сфера 5 опорного вузла виконана збірною. Вона має дві окремі деталі із точними сферичними поверхнями 6 і 7. Дані сферичні поверхні виконані на верхній і нижній половинках рухомої сфери, повинні узгоджуватись між собою і при збиранні утворювати одну точну сферич-

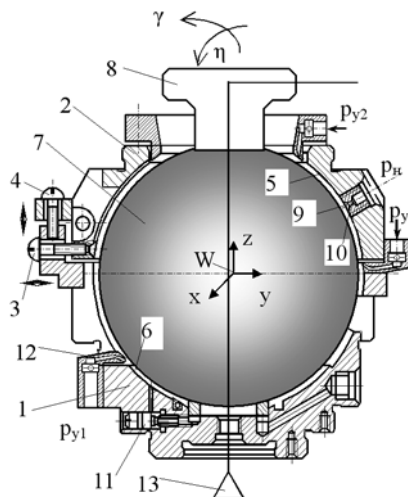
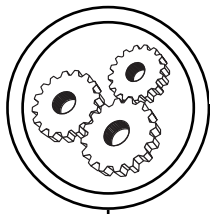


Рис. 1. Конструктивна схема розробленого аеростатично гідростатичного сферичного опорного вузла просторового механізму



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

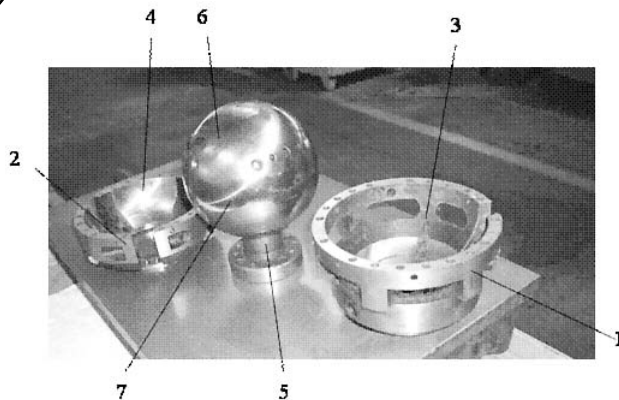


Рис. 2. Основні деталі виготовленого опорного вузла та ділянки точних сферичних поверхонь деталей

ну поверхню. Забезпечення точності даної поверхні здійснюється підгонкою базуючих і центруючих поверхонь в з'єднанні верхньої і нижньої половин рухомої сфери. Проміжний і остаточний контроль одержаної поверхні здійснено на вимірювальній машині з обробкою результатів вимірів по спеціальній методиці.

Виміри геометрії зібраного вузла рухомої сфери здійснено при одній установці вузла по ділянках. Виміри реальної поверх-

ні верхньої половини рухомої сфери виконано в межах квадратної ділянки проекції сферичної поверхні на горизонтальну площину  $Oxy$ . При вимірах щуп вимірювальної машини здійснює сканування сферичної поверхні при переміщенні в напрямках  $x$ ,  $y$ , що відповідають горизонтальним вісям декартової прямокутної системи координат  $xuz$  (рис. 3).

Одержані масиви  $xv$ ,  $yv$ ,  $zv$ ,  $i = 1 \dots N1$  ( $N1 = 2500$ ) координат точок окремих ділянок поверхні у декартовій прямокутній системі координат. Вони охоплюють



Рис. 3. Виміри сферичної поверхні верхньої половини рухомої сфери на вимірювальній машині при скануванні поверхні в напрямку координат  $x$  і  $y$

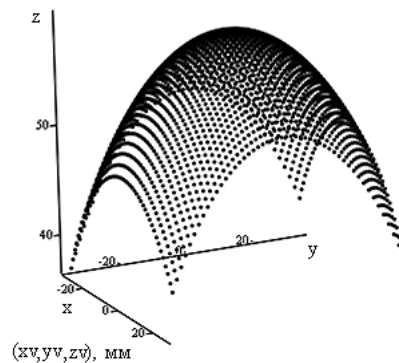


Рис. 4. Точки вимірів реальної поверхні верхньої частини сфери

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

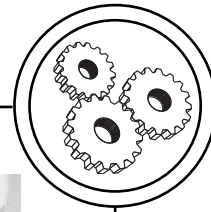


Рис. 5. Виміри правої половини сферичної поверхні нижньої частини рухомої сфери



просторову область складної конфігурації (рис. 4).

Координати точок визначені в декартовій прямокутній системі координат, центр якої розташований в деякому центральному (номінальному) положенні рухомої сфери. Дане положення є неточним. Воно встановлено наближеними вимірами сфери по 6 точках на вимірювальній машині. Вказані точки вибрані в трьох взаємно перпендикулярних напрямках, що відповідають напрямкам вісей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Відносно даної системи координат із відповідним центром проведені виміри реальної геометрії поверхонь нижньої половини рухомої сфери. Сканування здійснено з двох блоків нижньої сфери в межах прямокутних ділянок проєкцій сферичної поверхні на вертикальну площину, паралельну координатній площині  $Oxy$ . При вимірах шуп вимірювальної машини здійснював сканування сферичної поверхні в напрямках  $y$  і  $z$  (рис. 5).

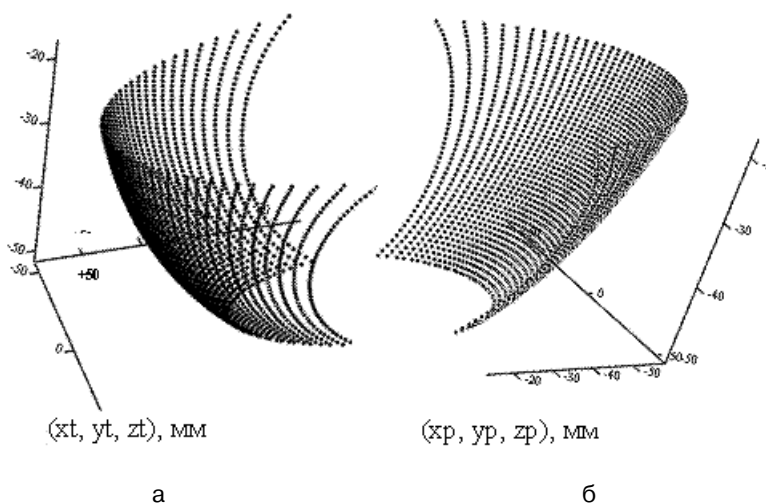
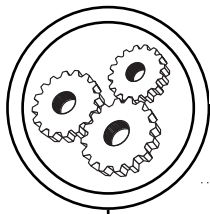


Рис. 6. Розташування точок вимірів лівої (а) та правої (б) половин нижньої частини рухомої сфери



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

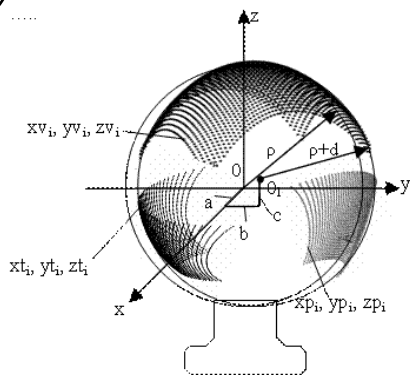


Рис. 7. Номінальна та фактична сферична поверхні та розташування точок вимірів

Одержані масиви  $x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}, i = 1, \dots, N_2$  ( $N_2 = 2500$ ) координат точок кривої половини нижньої частини сфери та масиви  $x_{t_i}, y_{t_i}, z_{t_i}, i = 1, \dots, N_3$  ( $N_3 = 2500$ ) координат точок лівої половини нижньої частини сфери. Дані масиви точок охоплюють дві просторові області сфери складної конфігурації (рис. 6).

По одержаним масивам декартових прямокутних координатах знайдені сферичні координати точок сферичних поверхонь, зокрема поточні значення радіуса  $\rho$  та кутових координат  $\Theta$  і  $\varphi$  згідно формул

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \Theta = \arccos \frac{z}{\rho},$$

$$\varphi = \arctg \frac{y}{x}.$$

Для знаходження фактичного радіуса та положення центра сферичної поверхні використана спеціальна методика. Реальна поверхня має середній радіус  $\rho_0 = \rho + d$  та положення центра сфери, яке характеризується координатами  $a, b, c$  (рис. 7).

При цьому рівняння сферичної поверхні у системі координат  $x, y, z$  має вигляд

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = (\rho + d)^2,$$

де  $a, b, c, d$  — параметри, які знаходяться на основі розв'язку багатовимірної задачі оптимізації.

Знаходження оптимальних значень параметрів здійснено методом Монте-Карло для критерію оптимізації у вигляді мінімуму функціонала

$$S = \sum_{i=1}^N [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2 - (\rho_i - d)^2]^2,$$

де сума знаходиться по всіх вимірних точках  $N = N_1 + N_2 + N_3$ .

Функціонал відповідає сумі квадратів відхилень сферичної поверхні від масиву точок з координатами  $x_i, y_i, z_i, \rho_i$ . Згідно методу Монте-Карло сформовано масиви випадкових значень параметрів  $a_j, b_j, c_j, d_j, j = 1 \dots 1000$ . Для цього використані генератори випадкових чисел із рівномірним законом розподілу. Для набору випадкових параметрів обчислено набір значень критерію оптимізації

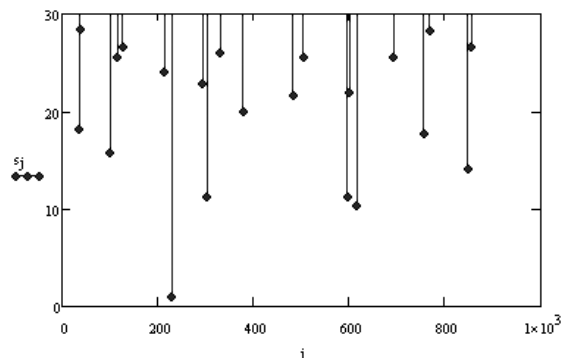
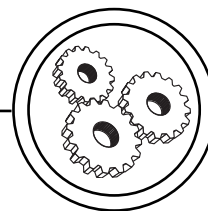
$$S_j = \sum_{i=1}^N (x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2 + (z_i - c_j)^2 - (\rho_i - d_j)^2.$$

Оптимальним набором значень параметрів вважається такий, що забезпечує умову  $\min(S_j)$ .

Мінімум функціонала знаходиться безпосереднім обчисленням при графічному виводі результатів обчислень (рис. 8).



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



а

$$s^T =$$

	226	227	228	229	230
0	$1.255 \cdot 10^3$	68.808	0.841	147.85	349.221

б

Рис. 8. Розраховані значення функціоналу в залежності від номера розрахунку (а) та числові значення номера розрахунку і величини функціоналу (б)

Відповідно знайденому номеру ( $j = 228$ ) визначено набір значень параметрів, які забезпечують мінімум функціоналу:  $a = -2,793$  мкм,  $b = 2,298$  мкм,  $c = -3,448$  мкм,  $d = 2,563$  мкм.

Відповідно фактичний середній радіус сфери складає

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 58,8 + 0,002563 = \\ &= 58,802563 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Одержана сферична поверхня є номінальною поверхнею розробленої опори. В процесі

обробки експериментальних даних визначені абсолютні відхилення реальної поверхні від номінальної сферичної, відхилення від сферичності та огинальну поверхню. Додатково встановлені параметри хвилястості та шорсткості виготовлених сферичних поверхонь.

Загальний діапазон відхилень від номінального радіуса сфери визначено шляхом аналізу графіків всіх масивів вимірів (рис. 9).

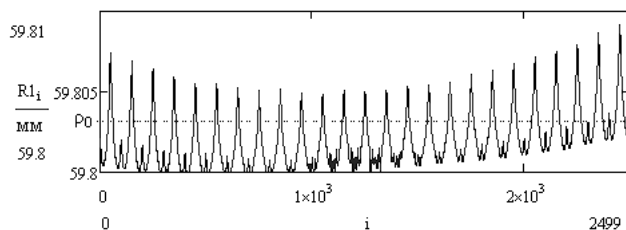
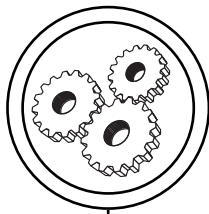


Рис. 9. Масив виміряних значень поточного радіуса верхньої частини сфери



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

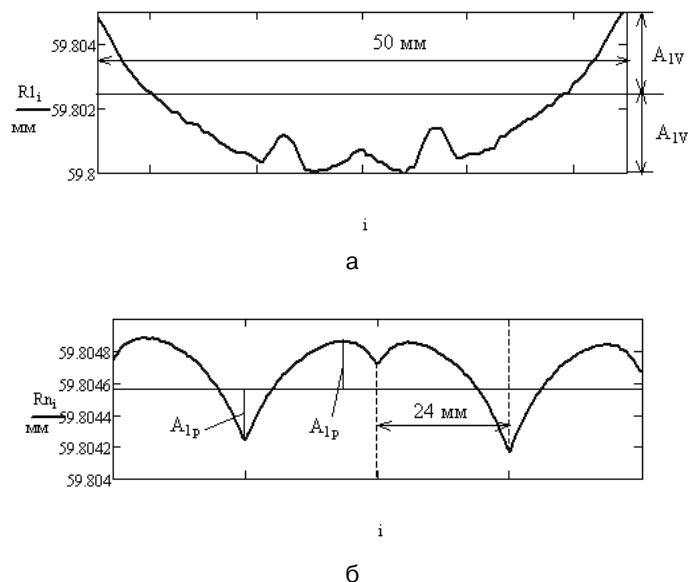


Рис. 10. Зміна радіуса на протязі одного циклу сканування верхньої частини сфери (а) та нижньої частини сфери (б)

Із аналізу графіка випливає, що відхилення радіуса від номінального значення знаходиться в межах  $-2,5.. + 3,5$  мкм. Додатні відхилення на межах області сканування дещо перевищують середній рівень. Для робочих ділянок сфери додатні та від'ємні відхилення від номінального радіуса можна вважати близькими, а вимірне загальне відхилення від сферичності не перевищує  $5,5$  мкм.

В межах відхилень від сферичності знаходяться похибки форми сфери, що відповідають хвилястості та шорсткості. Реальна поверхня має різні складові хвилястості. Довгі хвилі (довжина  $40...50$  мм) відповідають циклам скануванням сферичної поверхні (рис. 10).

Амплітуда довгих хвиль складає  $1,5...4$  мкм. Довгі хвилі є основною причиною відхилення

реальної поверхні від номінальної сфери.

При вимірах також встановлено наявність коротких хвиль складної природи. В результаті гармонічного аналізу результатів вимірів встановлено, що короткі хвилі відповідають полігармонічному процесу виду

$$\Delta = \sum_{k=1}^3 A_k \sin\left(\frac{2\pi kx}{T_k} + \psi_k\right),$$

де  $A_k$  — амплітуди гармонік;  $T_k$  — періоди складових;  $\psi_k$  — фази гармонік.

Амплітуди, періоди та початкові фази визначались із умови відповідності розрахункового полігармонічного процесу експериментальним даним. Полігармонічні залежності із задовільною точністю відповідають результатам вимірів (рис. 11).

Амплітуди складових гармонік складають  $A_k = 0,05..1,5$  мкм;



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

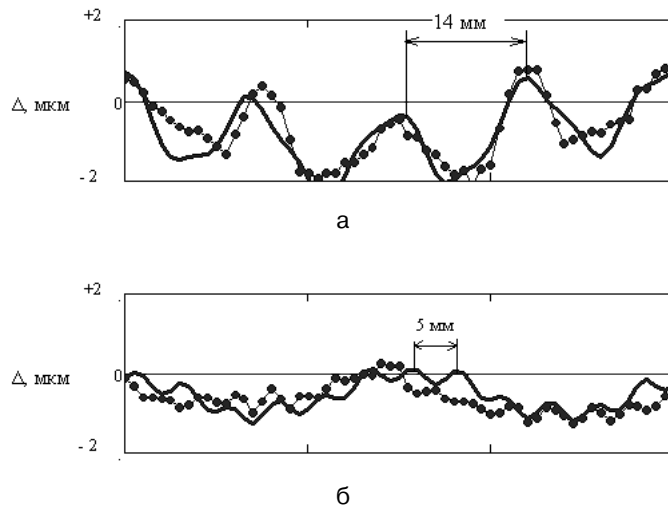
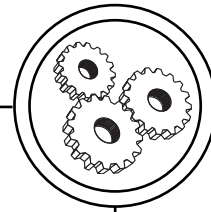


Рис. 11. Результати вимірів короткоперіодичної хвилястості (крапки на графіках) та їх опис полігармонічними процесами, складеними із трьох гармонік (суцільні криві) для верхньої частини сфери (а) та нижньої частини сфери (б)

періоди  $T_k = 3..20$  мм. Вклад короткоперіодичної хвилястості у формування загальної похибки суттєво менший ніж довгоперіодичної хвилястості.

Для визначення параметрів мікропрофіля оброблених сферичних поверхонь проведені спеціальні виміри. Виміри здійснені за допомогою комплексу Taylor Hobson із подальшим повним спектральним аналізом результатів вимірів. Типова експери-

ментальна профілограма мікропрофіля обробленої поверхні (рис. 12) має незначні амплітуди при наявності характерних коротких циклів.

В результаті аналізу профілограми встановлено, що середньоарифметичне відхилення профіля складає  $R_a = 0.03..0.1$  мкм. Максимальна висота мікронерівностей  $R_{max} = 0.1..0.8$  мкм. Середня довжина хвиль  $S_m = 2..18$  мкм.

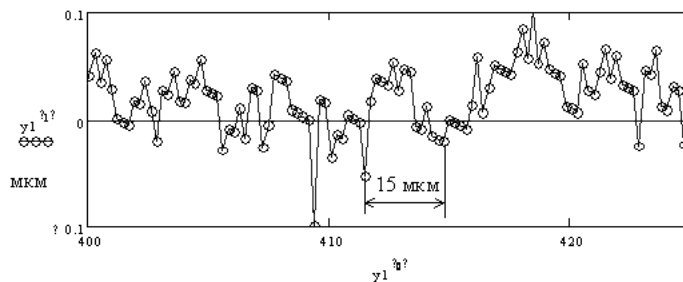
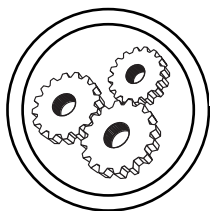


Рис. 12. Типова профілограма мікропрофіля обробленої сферичної поверхні



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

### Висновки

1. Точні сферичні поверхні гідростатично-аеростатичного опорного вузла можуть бути виготовлені в умовах вітчизняного виробництва із застосуванням наявних технологічних і контрольно-вимірювальних засобів.

2. Основною технологічною проблемою є виготовлення збірної рухомої сфери. Для контролю якості рухомої сфери рекомендується здійснити виміри реальних поверхонь верхньої і нижньої частин рухомої сфери на вимірювальній машині при одній установці деталі в зборі.

3. В результаті вимірів встановлено, що відхилення від сферичності знаходяться в межах 5..6 мкм. Основний вклад у формування похибок вносять довго-

періодичні хвилі довжиною 40..50 мм, амплітуда яких сягає 4 мкм. На обробленій поверхні простежуються також короткі хвилі довжиною 3..20 мм, амплітуда яких не перевищує 1,5 мкм.

4. Оброблена поверхня сфери має високі якісні показники мікрорельєфу. Середнє арифметичне відхилення профілю не перевищує  $Ra = 0.1$  мкм при середній довжині хвиль 2..18 мкм.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується провести математичну обробку результатів вимірів з метою одержання математичної моделі реальної сферичної поверхні у вигляді рядів, які включають сферичні гармоніки, побудовані на основі приєднаних функцій Лежандра.

1. Крайнев А. Ф. Идеология конструирования. — М.: Машиностроение, 2003. — 384 с. 2. Бушуев В. В. Практика конструирования машин. — М.: Машиностроение, 2006. — 448 с. 3. Савків В. Б. Ежекційні захоплюючі пристрої промислових роботів для утримування сферичних об'єктів у процесі маніпулювання // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом інженерна механіка). — 2007. — Випуск 20(2). — С. 154—158. 4. Струтинський С. В., Яхно О. М. Визначення статичних і динамічних характеристик гідростатичного сферичного опорного вузла // Промислова гідравліка і пневматика. — 2007. — № 2(16). — С. 85—90. 5. Яхно О. М., Струтинський С. В. Математичне моделювання адаптивної системи автоматичного керування гідростатичного сферичного опорного вузла // Вестник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія Машиностроение. — 2007. — № 51. — С. 70—81.

Рецензент — Ю. В. Петраков, д.т.н., професор,  
зав. кафедри технології машинобудування, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 07.02.08