

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 681.518.22

**КОМПАКТНА ОБЕРТОВА ПЛАТФОРМА
ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД***Заморський О. В.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: zax2020@ukr.net*

З стендового обладнання для випробування гіроскопічних приладів і систем та їх чутливих елементів виділяється одновісна обертова платформа. Подається огляд принципів побудови промислово освоєних стендів для дослідження статичних і динамічних характеристик гіроскопічних приладів і систем. Пропонується схема побудови універсального лабораторного стенду, компактної обертової платформи для дослідження статичних і динамічних характеристик мікромеханічних гіроскопів і акселерометрів, як датчиків кутової швидкості. Розглядаються фізичні компоненти такого стенду та технічні і технологічні проблеми його практичної реалізації. Запропонований лабораторний стенд розглядається як кіберфізична система, в якій обчислювальні компоненти відіграють вирішальну роль при визначенні параметрів системи та досліджувані мікромеханічні датчики. Для цього, окрім фізичного контуру керування електричним приводом для забезпечення стабільності кутової швидкості платформи, розглядається незалежний вимірювальний контур для аналітичного визначення параметрів системи, в тому числі досліджувані мікромеханічні датчики. Універсальність стенду забезпечується вирішенням зворотних задач – визначенням в процесі випробувань статичних і динамічних характеристик електричного приводу та вимірювальних датчиків, які працюють на різних фізичних принципах. Передбачається, що малогабаритний лабораторний стенд, окрім вирішення практичних задач дослідження мікромеханічних датчиків, при розробці відповідного інформаційного інтерфейсу віртуального приладу, може ефективно застосовуватися в навчальному процесі при проведенні лабораторних робіт з відповідних дисциплін напряму приладобудування.

Ключові слова: лабораторний стенд; обертова платформа; електричний привід; мікродвигуни постійного струму; датчики кутової швидкості; мікромеханічні датчики; гіроскопи; акселерометри.

Вступ

Розвиток стендового обладнання для дослідження статичних і динамічних характеристик гіроскопічних приладів і систем розпочинався з простих електромеханічних пристроїв з шарикопідшипниковими підвісами та приводним двигуном з редуктором. Підвіс платформи розташовувався в масивному корпусі стенду. Стабільність кутової швидкості обертової платформи забезпечувалась завдяки її значній інерційній масі. Такий спосіб, який вважається традиційним, застосовується і в сучасних прецизійних стендах з аеростатичним підвісом та безщітковими і безпідшипниковими двигунами, з ртутними струмомірячами та безконтактними датчиками [1]. Обертові платформи зі значною інерційною масою застосовуються в прецизійних стендах фірми Acutronic, типові характеристики яких, наприклад, одновісної обертової платформи серії AC1120S (рис. 1, а): статичні параметри – стабільність кутової швидкості 0,001% в діапазоні $\pm 3000^\circ/\text{с}$ з дискретністю завдання швидкості 0,001% $/\text{с}$, похибка кутового позиціонування менше 15"; динамічний параметр – максимальне прискорення 40 $^\circ/\text{с}^2$ без навантаження на платфор-

му; механічний параметр – биття менше 15"; діаметр платформи AC1120S – 250 мм, навантаження – до 20 кг [2]. Стендам з обертовою платформою, побудованим за традиційною схемою, притаманні порівняно значні вага і розміри.

В стендах нового покоління спосіб забезпечення високої точності і стабільності кутової швидкості обертової платформи базується на високоточній системі керування приводним двигуном за замкнутою схемою із застосуванням інерціальних датчиків [1]. За такою ж схемою побудовано, наприклад, високоточну систему ГС1Л (рис. 1, б) підприємства «Арсенал» (Київ), яка вимірює плоскі кути в динамічному режимі з граничною точністю 0,5" [3]. Подальший розвиток стендів з системами керування на основі інерціальних датчиків направлений на їх мініатюризацію та зниження енергоємності з забезпеченням стабільності й точності завдання кутової швидкості на рівні стендів, які побудовані за традиційною схемою [1].

У вітчизняних учбових лабораторіях використовуються одновісні обертові платформи – малогабаритні електромеханічні поворотні пристрої типу МПУ з розімкнутою схемою керування при-

відним двигуном та з редукторною схемою передачі. В МПУ-1, наприклад, обертання привідного валу синхронного гістерезисного двигуна Г-31А з числом обертів 3000 об/хв і крутним моментом 1,275 мН·м передається на вал платформи через муфту, черв'ячний редуктор з передавальним відношенням 150:1 і фрикційний варіатор з передавальним відношенням від 0,8:1 до 4000:1. Таким чином, забезпечується діапазон кутових швидкостей платформи від 0,03°/с до 150°/с.

Статичні похибки обертової платформи МПУ-1 зростають при зменшенні частоти обертів платформи: похибка завдання кутової швидкості ручним способом по лімбу від 2 % до 5 %; нестабільність завданій кутової швидкості від 1 % до 2 %; різниця між кутовими швидкостями при реверсі від 1 % до 1,5 %. При малих обертах платформи також зростає інтенсивність зношення елементів

фрикційного варіатора МПУ, що є його особливістю. Завдання та визначення динамічних параметрів обертової платформи МПУ не передбачено та не забезпечено, що обмежує її функціональні можливості. Визначення кутових позицій обертової платформи МПУ можливе лише візуально за градусною шкалою. Будь-які вимірювальні пристрої в МПУ відсутні (окремі зразки мають в своїй комплектації лише механічний стрілочний секундомір). Отже, поширені лабораторні стелі навчальних лабораторій мають порівняно вузький діапазон кутових швидкостей, порівняно високі похибки та функціональні обмеження, не мають будь-якого цифрового чи аналогового інформаційного забезпечення. Розміри пристрою МПУ-1 – 405×275×290 мм, діаметр обертової платформи – 220 мм, навантаження – до 8 кг (рис. 1, в).



Рис. 1. Обертові платформи: а) АС1120S фірми Acutronic (Швейцарія); б) ГС1-Л казенного підприємства «Арсенал» (Україна); в) МПУ-1 (СРСР) [1-3].

Мета роботи – розрахунок і практична реалізація універсального лабораторного стелю – компактного пристрою з одновісною обертовою платформою і відповідним механічним, електромеханічним та інформаційним (апаратно-програмним) забезпеченням для дослідження і визначення статичних і динамічних характеристик мікромеханічних датчиків, гіроскопів і акселерометрів, як датчиків кутової швидкості, порівняно невисокої точності і вартості. Запропонований лабораторний стелю розглядається як кіберфізична система, в якій обчислювальні компоненти відіграють вирішальну роль при визначенні параметрів системи та досліджуваних мікромеханічних датчиків. Для цього, окрім фізичного контуру керування електричним приводом для забезпечення стабільності кутової швидкості платформи, розглядається незалежний вимірювальний контур для аналітичного визначення параметрів системи, в тому числі досліджуваних мікромеханічних датчиків. Універсальність стелю забезпечується вирішенням зворотних задач – визначенням у процесі випробувань статичних і динамічних характеристик електричного приводу та вимірювальних датчиків, які працюють на різних фізичних принципах. Передбачається, що малогабаритний лабораторний стелю, окрім вирішення практичних задач дослідження

мікромеханічних датчиків, при розробці відповідного інформаційного інтерфейсу віртуального приладу, може ефективно застосовуватися в навчальному процесі при проведенні лабораторних робіт з відповідних дисциплін напряму приладобудування.

Постановка задачі та вибір схеми побудови лабораторного стелю з обертовою платформою

Розробка точних, високоточних і прецизійних стелю з обертовою платформою передбачає наявність порівняно високих технологій для їх практичної реалізації та, як наслідок, порівняно значних витрат коштів. Розробка та практична реалізація компактного лабораторного стелю з обертовою платформою невисокої вартості, враховуючи заявлену вище мету роботи, потребує відповідних схемних рішень.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр мікромеханічних датчиків порівняно невисокої точності і достатньо низької вартості. У таких мікромеханічних гіроскопах, що є об'єктами дослідження, стандартні характеристики, які визначають необхідні статичні параметри обертової платформи, мають значення: діапазон $\pm 2000^\circ/\text{с}$; роздільна здатність 14,375 LSB/(°/с); чутливість 0,07 °/с (такі характеристики, наприклад, у популярного

тривісного гіроскопа ITG-3200 фірми InvenSense TDK Corporation). Гіроскопи з підвищеною чутливістю мають такі стандартні значення основних характеристик, відповідно: $\pm 1000^\circ/\text{с}$, $32,8 \text{ LSB}/(^\circ/\text{с})$, $0,03^\circ/\text{с}$; $\pm 500^\circ/\text{с}$, $64,5 \text{ LSB}/(^\circ/\text{с})$, $0,015^\circ/\text{с}$; $\pm 250^\circ/\text{с}$, $131 \text{ LSB}/(^\circ/\text{с})$, $0,008^\circ/\text{с}$ (гіроскоп ITG-1010). Тобто, чутливість гіроскопа підвищується пропорційно звуженню його діапазону, при стандартній розрядності аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) гіроскопа, яка зазвичай складає 16 біт.

Для забезпечення широкого діапазону кутових швидкостей обертової платформи вибирається гнучка схема електричного приводу, яка, залежно від обраного діапазону, низьких чи високих кутових швидкостей, передбачає зміну параметрів електромеханічного приводу, передавального відношення та механічної потужності приводу, через взаємозамінність фізичних компонентів стенду.

Для забезпечення стабільності кутової швидкості вибирається гнучка замкнута система керування приводним мікродвигуном із постійним магнітом і з жорстким управлінням, з внутрішнім контуром регулювання струму в зовнішньому контурі регулювання кутової швидкості. Гнучке регулювання кутової швидкості забезпечується, залежно від діапазону заданих кутових швидкостей, застосуванням у контурі регулювання кутової швидкості мікромеханічних гіроскопів або акселерометрів з вищою чутливістю і точністю порівняно з досліджуваними датчиками.

Окрім замкнутого контуру регулювання кутової швидкості, в схему стенда вводиться розімкнутий контур вимірювання кутової швидкості високоточними датчиками, які працюють на різних фізичних принципах, для обчислення похибок недостатнього регулювання кутової швидкості через моменти тертя в опорах підвісу обертової платформи та для подальшого врахування таких похибок при визначенні параметрів досліджуваних мікромеханічних датчиків (через алгоритмічну компенсацію похибок у реальному масштабі часу або через подальшу обробку вимірних даних).

Таким чином, основними компонентами лабораторного стенду з обертовою платформою є механічний підвіс обертової платформи (механічне забезпечення), електричний привід з редуктором і механічною передачею (електромеханічне забезпечення), цифрові інерціальні та інші датчики, мікропроцесорні засоби з безпроводною передачею даних для збору вимірювальної інформації, її аналізу та синтезу, передачі керуючої інформації на виконавчі елементи системи керування електричним приводом обертової платформи та передачі інформації користувачу (інформаційне або апаратно-програмне забезпечення). Візуальний графічний інтерфейс віртуального приладу з певними елементами управління користувачем процесом випробовувань, зберігання протоколів випробову-

вань та вимірювальних даних для подальшої можливої їх обробки, передача при необхідності інформації іншим користувачам забезпечується персональним комп'ютером, з яким лабораторний стенд взаємодіє в реальному масштабі часу за умови безпроводного зв'язку.

Механічне забезпечення обертової платформи

Механічний підвіс, з вертикальною віссю обертання платформи, при завданні необхідної кутової швидкості та забезпеченні її стабільності потенційно є основним джерелом похибок та технологічно є найбільш складним елементом стенду. При додаткових вимогах забезпечення не лише певних статичних, а також певних динамічних властивостей і певного кутового позиціонування платформи, вимоги до підвісу платформи значно зростають. Основні вимоги пов'язані з необхідністю забезпечення точного центрування опори платформи та мінімального моменту тертя в опорах, а також мінімального моменту інерції платформи з опорою при необхідності забезпечення високих динамічних властивостей. Високоточне центрування циліндричної опори практично важко здійснити через гарантований радіальний зазор, який додатково викличе при високих обертах платформи значне биття та, як наслідок, значний момент тертя в опорах. Для вимірювання кутів у прецизійних астрономічних і геодезичних приладах, наприклад, застосовуються конічні опори, для яких проблема високоточного центрування за умови належної обробки поверхонь конічної пари відсутня. Крім того, конічні опори є самоустановлювальними, тобто, при зносі конічної пари положення геометричної осі підвісу не змінюється. Отже, для експериментального зразка лабораторного стенду вибирається конічна опора. Проте, моменти тертя ковзання в конічних опорах більш чим на порядок перевершують моменти тертя в циліндричних опорах, за всіх інших рівних умов. Тому конічна опора вибирається в такому конструктивному виконанні (рис. 2), за якого, як вказано нижче розрахунками, момент тертя ковзання в опорі значно зменшується.

При геометричних розмірах конусної опори $d_1=8 \text{ мм}$, $d_2=20 \text{ мм}$ та $l=74 \text{ мм}$ половина кута при вершині конуса $\alpha=4,635 \text{ град}$ (рис. 2). При коефіцієнті тертя ковзання $f=0,17$ для полірованої пари опори (латунь по латуні без мастила) питома значення $\mu_{\text{То}}$ моменту тертя ковзання $M_{\text{То}}$ при осьовому тиску $P_o=mg$ на опору навантаженням одиничної маси $m=1 \text{ г}$ складає

$$\mu'_{\text{То}} = fmg \frac{d_1 + d_2}{4 \sin \alpha} \approx 0,1444 \frac{\text{мН} \cdot \text{м}}{\text{г}}$$

Для полегшення індивідуального притирання конічні поверхні цапфи та втулки розділені на дві робочі поверхні (середні частини поверхні цапфи і

втулки видалені) так, що відстань між їх середніми перерізами Б-Б і В-В складає $l_1=1,75 \cdot (d_1 + d_2)=49$ мм, а відстань від середнього перерізу Б-Б верхньої робочої поверхні опори до верхньої горизонтальної поверхні платформи складає $l_2=25$ мм.

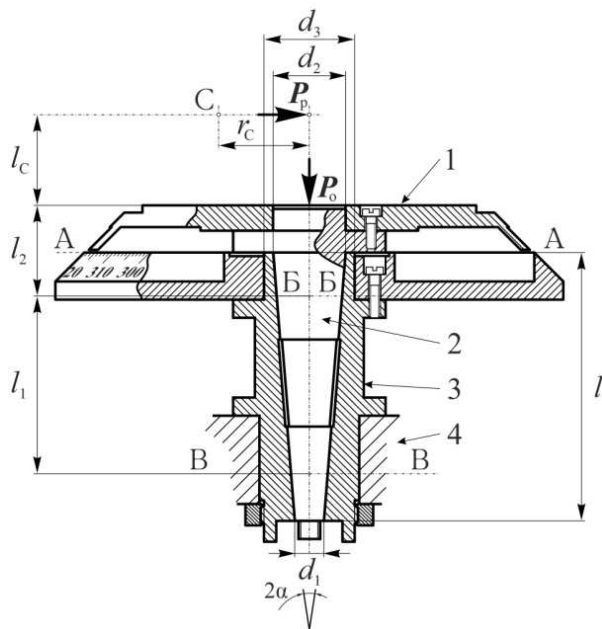


Рис. 2. Варіант конічної опори підвісу, де: 1 – обертова платформа; 2 – конічна опора (цапфа); 3 – конічна опора (втулка); 4 – корпус

Збірка цапфи опори з платформою динамічно збалансовані відносно осі обертання. Якщо при розміщенні корисного навантаження на платформі його центр мас C зміщений у радіальному напрямку на відстань r_c від осі обертання, при обертанні платформи виникає радіальне навантаження на опору внаслідок дії доцентрового прискорення w_c , при цьому тертя ковзання $M_{Тр}$ від радіального навантаження пропорційно квадрату кутової швидкості ω_n обертання платформи. Наприклад, якщо корисне навантаження вибрати з такими номінальними параметрами – маса $m=250$ г, відстань до центру мас C у радіальному напрямку від осі обертання $r_c=25$ мм, відстань до центру мас C в осьовому напрямку від верхньої горизонтальної поверхні платформи $l_c=25$ мм, то питоме значення $\mu_{Тр}$ моменту тертя ковзання $M_{Тр}$ при радіальному тиску $P_p=m(\omega_n)^2 r_c$ на опору таким корисним навантаженням при одиничній кутовій швидкості $\omega_n=1^\circ/\text{с}$ наближено складає [4]:

$$\mu'_{Тр} = 1,27 fm \left(\frac{2\pi}{360} \omega_n \right)^2 r_c \frac{d_1 + d_2}{4 \cos \alpha} \left(2 \frac{l_c + l_2}{l_1} + 1 \right) \approx 3,5112 \cdot 10^{-6} \frac{\text{мН} \cdot \text{м}}{(\text{°}/\text{с})^2}.$$

Для зменшення моменту тертя ковзання $M_{Т0}$ цапфа в горизонтальній площині А-А спірається

на кільце втулки з внутрішнім діаметром $d_2=20$ мм та зовнішнім діаметром $d_3=25$ мм (рис. 2). При такій розгрузці конічної опори питоме значення $\mu_{Т0}$ моменту тертя ковзання $M_{Т0}$ за умови осьового тиску P_0 на опору навантаженням одиничної маси $m=1$ г складає

$$\mu''_{Т0} = \frac{1}{3} fmg \frac{d_3^3 - d_2^3}{d_3^2 - d_2^2} \approx 0,0339 \frac{\text{мН} \cdot \text{м}}{\text{г}}.$$

Отже, при вибраному конструктивному виконанні конічної опори обертової платформи (рис. 2) момент тертя ковзання $M_{Т0}$ від осьового навантаження зменшується більш ніж у чотири рази

$$\frac{\mu''_{Т0}}{\mu'_{Т0}} \cdot 100\% \approx 23,48\%.$$

Таким чином, розрахунковий момент тертя ковзання $M_{Т0}$ від осьового навантаження для конічної опори (маса цапфи $m_{ц}=182$ г), для обертової платформи з опорою без навантаження (маса платформи $m_{п}=148$ г), для обертової платформи з опорою та корисним навантаженням (номінальна маса навантаження $m_{н}=250$ г) при сухому терті без мастила складає:

$$M_{Т0ц} = \mu''_{Т0} m_{ц} \approx 6,17 \text{ мН} \cdot \text{м};$$

$$M_{Т0п} = \mu''_{Т0} (m_{ц} + m_{п}) \approx 11,19 \text{ мН} \cdot \text{м};$$

$$M_{Т0н} = \mu''_{Т0} (m_{ц} + m_{п} + m_{н}) \approx 19,66 \text{ мН} \cdot \text{м}.$$

Розрахунковий момент тертя ковзання $M_{Тр}$ від радіального навантаження на конічну опору при незбалансованому номінальному корисному навантаженні, при сухому терті без мастила, без урахування радіального навантаження, яке може накласти на опору електромеханічний привід (див. наступний підрозділ), при кутовій швидкості обертової платформи в діапазоні від $\omega_{min}=0,01^\circ/\text{с}$ до $\omega_{max}=2000^\circ/\text{с}$ та для середнього значення $\omega_{сер}=1000^\circ/\text{с}$ має відповідно значення:

$$M_{Трmin} = \mu'_{Тр} \omega_{min}^2 \approx 3,51 \cdot 10^{-10} \text{ мН} \cdot \text{м};$$

$$M_{Трmax} = \mu'_{Тр} \omega_{max}^2 \approx 7,02 \text{ мН} \cdot \text{м};$$

$$M_{Трсер} = \mu'_{Тр} \omega_{сер}^2 \approx 3,51 \text{ мН} \cdot \text{м}.$$

Розрахункові осьові моменти інерції $J_{пл}$ та $J_{пл}$ конічної опори (цапфи) підвісу та обертової платформи, які визначатимуть динамічні властивості обертової платформи, мають величини:

$$J_{пл} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; J_{пл} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Електромеханічне забезпечення обертової платформи

Електромеханічне забезпечення обертової платформи, електромеханічний привід, складається з виконавчого мікродвигуна постійного струму з якорним управлінням за замкнутою схемою та механічної системи передачі крутного моменту, який розвиває

мікродвигун, на цапфу конічної опори підвісу обертової платформи, тобто, на вал обертової платформи (схема електромеханічного приводу обертової платформи представлена на рис. 3). Конструктивно відповідний мікродвигун, як і циліндричний редуктор, є взаємозамінними елементами лабораторного стенду, при застосуванні відповідного набору кронштейнів їх зміна в стенді технологічно проста. Може бути застосованим відповідний мікродвигун із вбудованою сенсорною електронікою та/або з вбудованим циліндричним редуктором, з автономними вимірвальними датчиками та/або з автономним циліндричним редуктором (вісь А на рис. 3), або без редуктора при виборі діапазону високих кутових швидкостей обертової платформи. Стационарними (постійними) елементами приводу є одноступенева зубчаста передача (поз. 1 на рис. 3), черв'ячна передача (поз. 2 на рис. 3) та компенсаційна муфта, через яку електромеханічний привід пов'язаний з цапфою конічної опори підвісу – з валом обертової платформи.



Рис. 3. Схема електромеханічного приводу обертової платформи, де: 1 – одноступенева зубчаста передача; 2 – черв'ячна передача

Загальне рівняння обертових моментів електромеханічного приводу обертової платформи:

$$M - M_i = \frac{d}{dt}(J_i \omega) = J_i \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ_i}{dt},$$

де: M – миттєве значення моменту, розвинутого мікродвигуном; ω – миттєве значення кутової швидкості валу мікродвигуна; M_i – миттєве значення моменту навантаження, приведеного до валу мікродвигуна; J_i – осьовий момент інерції навантаження, приведений до валу мікродвигуна.

На відміну від традиційного способу визначення складових значень моменту навантаження M_i та осьового моменту інерції навантаження J_i для елементів електромеханічного приводу, коли такі складові враховуються як енергетичні втрати через загально прийняті коефіцієнти, наприклад,

через коефіцієнт корисної дії механічної передачі, при розробці лабораторного стенду всі складові вказаних моментів, в тому числі складові елементів механічної передачі, визначаються через відповідні прямі розрахунки та/або досліджуються і визначаються експериментально. Водночас, еквівалентні складові (складові, приведені до валу мікродвигуна) моменту навантаження M_i та осьового моменту інерції навантаження J_i визначаються як:

$$M_i = M_0 + i_0 M_{мп} + i_0 i_{мп} (M_{оп} + M_{кн});$$

$$J_i = J_0 + i_0^2 J_{мп} + i_0^2 i_{мп}^2 (J_{оп} + J_{кн});$$

де: M_0 , J_0 , i_0 та $M_{мп}$, $J_{мп}$, $i_{мп}$ – значення моменту навантаження, осьового моменту інерції, передавального відношення змінних елементів електромеханічного приводу (мікродвигуна та циліндричного редуктора) та стаціонарних елементів механічної передачі (зубчастої та черв'ячної передачі, компенсаційної муфти) відповідно; $M_{оп}$, $J_{оп}$ та $M_{кн}$, $J_{кн}$ – значення моменту навантаження, осьового моменту інерції обертової платформи з конічним валом (цапфою конічної опори) та корисного навантаження відповідно; при цьому:

$$M_0 = M_{дв} + M_{рд}; \quad M_{мп} = i_1 M_{чв} + i_1 i_2 (M_{чк} + M_{км});$$

$$M_{оп} = M_{пл} + M_{пл};$$

$$J_0 = J_{дв} + J_{рд}; \quad J_{мп} = i_1^2 J_{чв} + i_1^2 i_2^2 (J_{чк} + J_{км});$$

$$J_{оп} = J_{пл} + J_{пл};$$

де: $M_{дв}$, $M_{рд}$, $M_{чв}$, $M_{чк}$, $M_{км}$, $M_{пл}$, $M_{пл}$ та $J_{дв}$, $J_{рд}$, $J_{чв}$, $J_{чк}$, $J_{км}$, $J_{пл}$, $J_{пл}$ – значення моменту навантаження (тертя в опорах) та осьового моменту інерції мікродвигуна, циліндричного редуктора, осі черв'яка, осі черв'ячного колеса, компенсаційної муфти, конусної опори підвісу платформи, горизонтальної платформи відповідно; i_1 та i_2 – передавальні відношення одноступеневої зубчастої та черв'ячної передач відповідно:

$$i_1 = \frac{z}{40} = 0,25 \cdot z; \quad i_2 = \frac{2}{64} = 0,03125;$$

$$i_1 i_2 = i_{мп} = 0,00078125 \cdot z;$$

де: z – число зубців шестерні на валу мікродвигуна або циліндричного редуктора.

При роботі в діапазоні високих кутових швидкостей обертової платформи (робота без циліндричного редуктора):

$$M_{рд} = 0; \quad J_{рд} = 0; \quad i_0 = 1; \quad z = z_{max} = 20;$$

$$i_1 = \frac{20}{40} = 0,5; \quad i_{мп} = 0,015625.$$

Таким чином, наприклад, загальне рівняння моментів для усталеного режиму (статичний режим роботи) в діапазоні високих кутових швидкостей обертової платформи (циліндричний редуктор)

тор відсутній) за умови незмінного осьового моменту інерції навантаження J_i набуває вигляду:

$$M = M_i = M_{дв} + M_{мп} + i_{мп} (M_{оп} + M_{кн}).$$

Момент навантаження на електромеханічний привід обертової платформи з підвісом та корисним навантаженням визначається як момент тертя ковзання в конічній опорі підвісу, який при кутовій швидкості обертової платформи, наприклад, $\omega_{пср} = 1000^\circ/\text{с}$, та при вибраному вище номінальному незбалансованому корисному навантаженні згідно розрахунків (див. попередній підрозділ) при приведенні до валу мікродвигуна визначено:

$$\begin{aligned} i_{мп} (M_{оп} + M_{кн}) &= i_{мп} (M_{Тон} + M_{Трср}) = \\ &= 0,015625 \cdot (19,66 + 3,51) = 0,015625 \cdot 23,17 \approx \\ &\approx 0,36 \text{ мН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

При проведенні попередніх оціночних лабораторних випробувань макетного зразка стенду з обертовою платформою із застосуванням мікродвигуна постійного струму з постійними магнітами типу ДМ-1,6-8А (розробка СРСР), датчика напруги, струму і потужності на основі сенсора INA219 з нульовим дрейфом і послідовним інтерфейсом I2C (розробка Texas Instruments, США) та датчика обертів на основі трансмісійного фотомікросенсора EE-SX1103 (розробка Omron Electronic Components, США), через непрямі вимірювання експериментально встановлені (за умови кутової швидкості $\omega_{п} \approx 1125^\circ/\text{с}$ обертової платформи) такі значення моментів, приведені до валу мікродвигуна:

$$M_{мп} \approx 0,45 \text{ мН} \cdot \text{м}; \quad i_{мп} (M_{оп} + M_{кн}) \approx 0,50 \text{ мН} \cdot \text{м};$$

водночас, не критичні методичні та інструментальні похибки вимірювання (динамічні похибки оптичного датчика кутової швидкості, похибки визначення електрорушійної сили при зміні опору обмотки якоря мікродвигуна через самонагрівання обмоток при високих обертах тощо) не враховувались, отриманих розрахункових і оціночних експериментальних даних достатньо для належного вибору приводного мікродвигуна для діапазону високих кутових швидкостей обертової платформи. Необхідно, щоб номінальний момент навантаження вибраного мікродвигуна при його максимальній ефективності η_{max} складав $M_{ном} \geq 1 \text{ мН} \cdot \text{м}$.

Кутова швидкість $\omega_{п}$ обертової платформи без урахування пружних зв'язків електромеханічної передачі в усталеному режимі визначається як:

$$\omega_{п} = i_0 i_{мп} \omega = i_0 i_1 i_2 \omega;$$

а для діапазону високих кутових швидкостей (циліндричний редуктор відсутній, $i_0 = 0$) як:

$$\omega_{п} = i_{мп} \omega = i_1 i_2 \omega = 0,015625 \cdot \omega.$$

Отже, для забезпечення максимальної кутової швидкості обертової платформи, наприклад, $\omega_{пср} = 1000^\circ/\text{с}$, необхідно, щоб номінальні оберти валу вибраного мікродвигуна при його максимальній ефективності η_{max} складали значення $n_{ном} \geq 10700 \text{ об/хв}$. Враховуючи визначений вище необхідний номінальний момент $M_{ном}$ мікродвигуна, бажано, щоб номінальна механічна потужність $P_{2ном}$ приводного мікродвигуна складала значення $P_{2ном} = (1,5 \div 2,0) \cdot M_{ном} \omega_{ном} = 1,7 \div 2,3 \text{ Вт}$.

Сучасний ринок пропонує широкий вибір мікродвигунів постійного струму як виконавчих елементів автоматизованих систем – від мікродвигунів широкого застосування, які позиціонуються для точних приладів, наприклад, для певного діапазону кутових швидкостей обертової платформи прийнятними можуть бути механічні та регульовані характеристики мікродвигунів серії RS-360RH/SH фірми Mabuchi Motor (Японія) [5], до мікродвигунів, призначених для високоточних і прецизійних приладів, наприклад, група фірм Faulhaber Group (провідна фірма Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co, Німеччина) представляє мікродвигуни в широкому діапазоні обертових моментів, швидкостей і потужностей, з широким асортиментом супутньої сенсорної електроніки та елементів мікроприводів, в тому числі циліндричних прецизійних безлюфтових редукторів, і автономних, і інтегрованих в мікродвигуни [6].

Інформаційне забезпечення лабораторного стенду

Інформаційне забезпечення лабораторного стенду складається з апаратного забезпечення (фізичні компоненти) та програмного забезпечення (обчислювальні компоненти). Фізичні компоненти, досліджувані мікромеханічні датчики (наприклад, тривісний гіроскоп ITG-3205 розробки InvenSense TDK Corporation, США [7]), мікропроцесорний пристрій (наприклад, на основі мікроконтролера Atmel AVR розробки Atmel Corporation, США), інерціальні датчики контуру регулювання кутової швидкості обертання платформи замкнутої системи керування приводним мікродвигуном (наприклад, інерціальний модуль MAX21105 розробки Maxim Integrated Products, США [8]), інерціальний датчик автономного точного контуру вимірювання кутової швидкості обертання платформи (наприклад, одновісна мікроелектромеханічна гіроскопічна система – *iSensor MEMS Gyroscope Subsystem* – ADIS16136 розробки Analog Devices, США [9]), які розміщуються на рухомій обертовій платформі без струмознімачів, мають автономне живлення і відповідають вимогам низького споживання струму. Такі вимоги не висуваються до стаціонарних фізичних компонентів, які закріплюються на корпусі стенду або в окремому корпусі, крім цього, в якості стаціонарних перетворюючих пристроїв можуть застосовуватись перетворюючі пристрої

змінного струму, наприклад, синусно-косинусний трансформатор СКТ-225-2П (розробка СРСР) для визначення точного позиціонування платформи, для якого передбачено посадове місце по вимірювальній осі 1 (рис. 3) та механічне зціплення з валом черв'ячного колеса (поз. 2 на рис. 3).

До стаціонарних компонентів відноситься мікропроцесорний пристрій, призначений, для збору вимірювальної інформації з стаціонарних датчиків та для керування привідним мікродвигуном.

Обмін даними та синхронізація між мікропроцесорними пристроями, стаціонарним та розміщеним на рухомій обертовій платформі, здійснюється по безпроводному зв'язку, наприклад, із застосуванням, модулів XBee Pro (розробка Digi International, США).

В якості інерціальних датчиків в замкнутому контурі регулювання кутової швидкості застосовуються мікромеханічні гіроскопи або акселерометри з вищою чутливістю і точністю порівняно з досліджуваними мікромеханічними гіроскопами та акселерометрами. При застосуванні в контурі регулювання кутової швидкості акселерометрів вимірюються тангенціальне a_t та доцентрове a_r прискорення в точці їх кріплення на платформі, наприклад, на радіусі платформи $r_a=10$ см, при орієнтації осей чутливості акселерометра перпендикулярно та/або вздовж радіусу платформи відповідно:

$$a_t = \dot{\omega}_n r_a; \quad a_r = \omega_n^2 r_a.$$

Наприклад, при вимірюванні акселерометрами інерціального модуля MAX21105 тангенціального прискорення в діапазоні $\pm 2g$ ($\approx \pm 1961$ см/с²) з роздільною здатністю 15 digit/ $10^{-3}g$, яка відповідає чутливості акселерометра $0,067 \cdot 10^{-3}g$ ($\approx 65 \cdot 10^{-3}$ см/с²), при такті $\Delta\tau=0,01$ с (частота оновлення вимірювальної інформації з акселерометра 100 Гц), можна визначити такі мінімальні значення кутового прискорення $\dot{\omega}_{nmin}$ та кутової швидкості ω_{nmin} обертової платформи:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{nmin} &= \frac{a_{tmin}}{r_a} = \frac{65 \cdot 10^{-3}}{10} = 65 \cdot 10^{-4} \frac{\text{см}}{\text{с}^2 \cdot \text{см}} \\ &= 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{nmin} &= \dot{\omega}_{nmin} \cdot \Delta\tau = 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01 = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1} \approx \\ &\approx 0,0037 \text{ }^\circ / \text{с}. \end{aligned}$$

При вимірюванні акселерометрами інерціального модуля MAX21105 доцентрового прискорення можна визначити такі мінімальне ω_{nmin} та максимальне ω_{nmax} значення кутової швидкості обертової платформи:

$$\begin{aligned} \omega_{nmin} &= \sqrt{\frac{a_{rmin}}{r_a}} = \sqrt{\frac{65 \cdot 10^{-3}}{10}} \approx 8,1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1} \approx \\ &\approx 4,64 \text{ }^\circ / \text{с}; \end{aligned}$$

$$\omega_{nmax} = \sqrt{\frac{a_{rmax}}{r_a}} = \sqrt{\frac{1961}{10}} \approx 14 \text{ с}^{-1} \approx 802,35 \text{ }^\circ / \text{с}.$$

Отже, для наведеного прикладу, застосовуючи в замкнутому контурі регулювання кутової швидкості обертової платформи акселерометри інерціального модуля MAX21105, можна побудувати стенд з обертовою платформою з діапазоном кутових швидкостей від $4,64$ $^\circ/\text{с}$ до $802,35$ $^\circ/\text{с}$ з достатньо високою чутливістю ($0,0037$ $^\circ/\text{с}$) до зміни кутової швидкості обертової платформи при статичному режимі роботи.

Для алгоритмічної компенсації похибок при визначенні статичних характеристик досліджуваних мікромеханічних гіроскопів та акселерометрів, як датчиків кутової швидкості, в контурі відносно високоточного вимірювання кутової швидкості застосовуються датчики, які працюють на різних фізичних принципах, у тому числі одновісні мікромеханічні гіроскопи, які значно перевершують за своїми характеристиками досліджувані мікромеханічні датчики. Наприклад, прецизійні датчики кутової швидкості – одновісні мікроелектромеханічні гіроскопічні системи ADIS16136 або ADIS16137, що як корисне навантаження на обертову платформу мають прийнятні розміри – модуль 36 мм \times 44 мм \times 14 мм, та вагу – 31 г, мають такі характеристики, відповідно: діапазон ± 480 $^\circ/\text{с}$ (ADIS16136) та ± 1000 $^\circ/\text{с}$ (ADIS16137); чутливість $0,00007$ $^\circ/\text{с}$ та $0,00015873$ $^\circ/\text{с}$; дрейф $3,5$ $^\circ/\text{год}$ та $2,8$ $^\circ/\text{год}$; випадковий шум $0,167$ $^\circ/\sqrt{\text{Гц}}$ та $0,15$ $^\circ/\sqrt{\text{Гц}}$.

Аналіз публікацій, зокрема [10]–[14], вказує на актуальність розробки компактною обертовою платформі для дослідження статичних і динамічних властивостей мікромеханічних датчиків, гіроскопів і акселерометрів, як датчиків кутової швидкості [15].

Висновки

Проведені попередні розрахунки та експериментальні дослідження вказують на можливість практичної реалізації такого лабораторного стенду.

Проте, враховуючи особливості вибраної схеми стенду і конструкції обертової платформи, визначення можливих граничних меж стійких кутових швидкостей обертової платформи в статичному режимі роботи, визначення оптимальної тактової частоти вимірювання, зважаючи на шумові характеристики датчиків, оцінка динамічних властивостей обертової платформи, оцінка можливостей точного позиціонування платформи, тощо, потребують додаткових досліджень, в тому числі експериментальних.

Література

- [1] Д. М. Калихман, *Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов*. Санкт-Петербург, РФ: ГНЦ РФ «Электронприбор», 2008.

- [2] *Single Axis Rate Table Series AC1120Si*. Acutronic Switzerland Ltd, Acutronic USA Inc., 2018. [Електронний ресурс]. Доступно: https://assets.ctfassets.net/4yshkjk9i7lb/4acX9cg2EHrZgPrvNUj4cP/8d64624a1bcc1cc1bc6225d785f606e5/Datasheet_1_axis_new_AC1120Si_V1_0_A4.pdf
- [3] *Кутовимірювальна система ГС1Л*. Київ, СРСР, Завод «Арсенал». [Електронний ресурс]. Доступно: <http://old.arsenal.co.ua/index.phtml?id=34>
- [4] Ю. В. Милосердин, Ю. Г. Лакин, *Расчет и конструирование механизмов и приборов и установок*. Москва, СССР: Машиностроение, 1978.
- [5] *Standard Specifications RS-360SH-10500 (Brush motors)*. Mabuchi Motor. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://product.mabuchi-motor.com/detail.html?id=93>
- [6] *FAULHABER Catalogue 2020 – 2021*. Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.faulhaber.com/download/FAULHABER_Catalogue_2020-2021_EN.pdf
- [7] *ITG-3200 Product Specification Revision 1.7*. InvenSense TDK Corporation. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/ITG-3200-Datasheet.pdf>
- [8] *Low-Power, Ultra-Accurate 6 DoF IMU MAX21105*. Maxim Integrated Products. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX21105.pdf>
- [9] *MEMS Inertial Sensors Selection Tables*. Analog Devices. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-selection-guide/MEMS_Inertial_Sensors_Selection_Tables.pdf
- [10] В. В. Седышев, П. Е. Белочкин, «Управление угловым движением одноосного испытательного стенда гироскопических систем», Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, т. 14, № 4, с. 42-50, 2014.
- [11] Д. А. Урядов, В. В. Скотников, «Разработка устройств поддержания угловой скорости повышенной точности», Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, № 3 (15), с. 159-165, 2015.
- [12] Mandadi Srinivasa Rao, Dr. C. M. Ananda, L. R. Manohar, «Design of Single-Axis Rate Table for calibration of Gyro sensor used in Micro Aerial vehicles (MAV)», International Journal of Emerging Technology in Computer Science and Electronic (IJETCSE), ISSN: 0976-1353, vol.14, is. 2, April, 2015.
- [13] Р. В. Ермаков, А. А. Львов, М. С. Светлов, «Исследование методов повышения метрологических характеристик стендов для задания углов и угловых скоростей», Известия ЮФУ. Технические науки, № 3 (188), с. 6-17, 2017, DOI: 10.23683/2311-3103-2017-3-6-17.
- [14] В. П. Подчерзев, Ц. Цинь, «Моделирование калибровки динамически настраиваемых гироскопов на одноосном гиросtabilизаторе», Инженерный журнал: наука и инновации, №10 (70), 2017, DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1682.
- [15] О. В. Заморський, «Електромеханічне забезпечення лабораторного стенду для дослідження статичних і динамічних характеристик мікро-механічних датчиків», на XIX Міжнар. наук.-тех. конф. Приладобудування: стан і перспективи, Київ, 2020, с. 15-16.

УДК 681.518.22

А.В. Заморський*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***КОМПАКТНАЯ ВРАЩАЮЩАЯСЯ ПЛАТФОРМА КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД**

Из лабораторного оборудования для испытания гироскопических приборов и систем, а также их чувствительных элементов, выделяется одноосная вращающаяся платформа. Дается обзор принципов построения промышленно освоенных стендов для исследования статических и динамических характеристик гироскопических приборов и систем.

Предлагается схема построения универсального лабораторного стенда, компактной вращающейся платформы для исследования статических и динамических характеристик микромеханических гироскопов и акселерометров как датчиков угловой скорости. Рассматриваются физические компоненты такого стенда, технические и технологические проблемы его практической реализации.

Предложенный лабораторный стенд рассматривается как киберфизическая система, в которой вычислительные компоненты играют решающую роль при определении параметров системы и исследуемых микромеханических датчиков. Для этого, кроме физического контура управления электрическим приводом для обеспечения стабильности угловой скорости платформы, рассматривается независимый измерительный контур для аналитического определения параметров системы, в том числе исследуемых микромеханических датчиков. Универсаль-

ность стенда обеспечивается решением обратных задач – определением в процессе испытаний статических и динамических характеристик электрического привода и измерительных датчиков, работающих на различных физических принципах. Предполагается, что компактный лабораторный стенд, кроме решения практических задач исследования микромеханических датчиков, при разработке соответствующего информационного интерфейса виртуального прибора, может эффективно применяться в учебном процессе при проведении лабораторных работ по соответствующим дисциплинам направления приборостроения.

Ключевые слова: лабораторный стенд; вращающаяся платформа; электрический привод; микродвигатели постоянного тока; датчики угловой скорости; микромеханические датчики; гироскопы; акселерометры.

A.V. Zamorsky

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

COMPACT ROTARY PLATFORM AS A UNIVERSAL LABORATORY STAND

A single axis rotary platform is distinguished among the laboratory equipment for testing gyroscopic devices and systems and their sensitive elements. An overview of the design principles of industrially developed stands for the study of static and dynamic characteristics of gyroscopic devices and systems is provided.

The scheme of design of the universal laboratory stand is suggested as the compact rotary platform for research of static and dynamic characteristics of micromechanical gyroscopes and accelerometers as sensors of angular speed. The physical components of such a stand and technical and technological problems of its practical implementation are reviewed. The proposed laboratory stand is considered as a cyberphysical system where computing components play a crucial role in determining the parameters of the system and the studied micromechanical sensors. For this purpose, in addition to the physical control loop of the electric drive to ensure the stability of the angular velocity of the platform, an independent measuring loop is considered for analytical determination of system parameters, including the studied micromechanical sensors.

The versatility of the stand is ensured by solving the inverse problems, namely determining in the process of testing static and dynamic characteristics of the electric drive and measuring sensors that work on various physical principles. It is assumed that, in addition to solving practical problems of micromechanical sensors in the development of the appropriate information interface of the virtual device, a compact laboratory stand can be effectively used in the educational process during laboratory work in relevant disciplines of instrument making direction.

Keywords: laboratory stand; rotary platform; electric drive; DC micromotors; angular velocity sensors; micromechanical sensors; gyroscopes; accelerometers.

*Надійшла до редакції
18 березня 2021 року*

*Рецензовано
12 квітня 2021 року*

УДК 531.383

АСТАТИЧНИЙ ІДЕНТИФІКАТОР В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ ГІРОТЕОДОЛІТА

¹⁾Боярчук А. О., ²⁾Мироненко П. С., ²⁾Мураховський С. А., ³⁾Іваненко Р. О.,

¹⁾КП СПБ «Арсенал», Київ, Україна, ²⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна,

³⁾Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ, Україна

E-mail: s.murakhovsky@kpi.ua

Розглянуто основні особливості умов роботи засобів наземного орієнтування. Показано, що при наявності зовнішніх збурень можливим є виникнення додаткової похибки вимірювань. Наведено основні характеристики зовнішніх збурень.

Запропоновано нову структуру регулятора зворотного зв'язку, до складу якого входить астатичний ідентифікатор стану. Розглянуто математичну модель приладу у формі простору станів з врахуванням зовнішніх збурень. Керування положенням чутливого елемента запропоновано проводити методом модального керування за неповним вектором стану. Припускається, що вимірюваним параметром для ідентифікації вектору стану є кут відхилення чутливого елемента гіротеодоліту в азимуті. Проведено аналіз спостережуваності