

**Висновки.** За допомогою математичних моделей впливу дестабілізуючих факторів можна прогнозувати їхній вплив на вихідну частоту резонансного сенсора.

Метод стабілізації частоти НСР струмом зменшує вплив температури на вихідну частоту резонатора у 3,5 – 4 рази, однак він не є технологічним.

Компенсація впливу навколишнього середовища струмом резонатора ускладнює конструкцію і технологію сенсора, оскільки потребує дорогого і складного обладнання для імітації дії дестабілізуючих факторів та ретельного тривалого налаштування.

Найдоцільнішим з погляду технологічності та зменшення похибок є термостатування та герметизація резонансного сенсора.

1. Столярчук П. Г., Байцар Р. І., Гінгін М. П. Резонансні вимірювальні перетворювачі для систем контролю і управління // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2000. – Вип. 56. – С. 100–104 2. Байцар Р. І.,

Рак В. С., Гінгін М. П. Автогенераторні схеми напівпровідникових резонансних сенсорів // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 2000. – № 389: Автоматика, вимірювання та керування. – С. 166 – 171. 3. Столярчук П. Г., Байцар Р. І., Рак В. С., Гінгін М. П. Струнний варіант тензорезистивного методу вимірювання // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 1998. – № 324: Автоматика, вимірювання та керування. – С. 65–69. 4. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с. 5. Засименко В. М. Основы теории планирования эксперимента: навч. посібник. – Львів: Держ. ун-т «Львівська політехніка», 2000. – 205 с. 6. Рак В. С., Засименко В. М., Байцар Р. І. Математичні моделі систематичних похибок частоти вимірювального генератора для напівпровідникового резонансного сенсора // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 8. – С. 73–76. 7. Новиков С. И. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 448 с.

УДК 681.782.2

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ГІДУВАЛЬНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

© Благодир Ярослав<sup>1</sup>, Білінський Андрій<sup>1</sup>, Мартинюк-Лотоцький Костянтин<sup>1</sup>, Вірун Наталія<sup>1</sup>, Вовчик Єва<sup>1</sup>, Дейнека Ростислав<sup>2</sup>, 2011

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка, астрономічна обсерваторія, вул. Кирила і Мефодія, 12, 7905, м. Львів, Україна

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», кафедра приладів точної механіки, вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна

*Описано вдосконалення пристрою для відслідкування руху штучних супутників Землі. Як базовий прилад використано лазерний віддалемір ЛД-2, в який внесено конструкційні зміни. Використання в системі привода крокових двигунів уможливило комп'ютерне керування. Наведено елементи аналізу статичної і динамічної похибок позиціонування.*

*Рассмотрено усовершенствование устройства для отслеживания движения искусственных спутников Земли. Как базовый прибор использован лазерный дальномер ЛД-2, в который внесены конструкционные изменения. Использование в системе привода шаговых двигателей обеспечивает возможность компьютерного управления. Приведены элементы анализа статической и динамической погрешностей позиционирования.*

*This article is devoted to improve of instrument for artificial satellites of Earth following. As base construction used the laser distance-controller ЛД-2 which receive of modifications. Using in this drive-system of stepping-motors give possibility of computer control. The elements of static and dynamic position errors analysis was bringing.*

**Вступ.** Спостереження ШСЗ є дуже складним технічним завданням, тому що зображення супутників, розташовані на порівняно близькій віддалі, дуже швидко переміщуються по небесній сфері. Тому з

моменту запуску першого супутника сконструйовано багато різноманітних установок з гідунням за супутником під час спостереження.

Всі гідувальні монтування можна поділити на три типи:

- п двовісні;
- п тривісні;
- п чотиривісні.

Кожний тип має переваги та недоліки та різне призначення. Звичайно, для спостереження штучних супутників Землі найчастіше використовують альт-азимутальні або горизонтальні монтування. Візуально траєкторія супутника проходить недалеко від великого кола на небі, але її полюс орбіти  $P_0$  може бути розміщений будь-де на небі. Ось чому для спостереження супутників використовують тривісні схеми монтування. Для точнішого відслідкування штучних супутників застосовують чотиривісні монтування, які уможливають кутове переміщення з швидкістю до 2,5 %/с.

**Вирішення проблеми.** З метою спостереження ШСЗ використано модернізоване чотиривісне монтування приладу ЛД-2 (рис. 3). Для цього у блоці 8 встановлюється кроковий двигун, який дасть змогу гідувати зірки та супутники по одній осі. Наявний у складі ЛД-2 двигун постійного струму не дає змоги гідувати зірки на малих швидкостях і потребує складної схеми керування зі зворотним зв'язком. Управління для крокових двигунів є простішим і не вимагає постійного контролю позиціонування.

Оскільки від створення конструкції взятого за основу лазерного віддалеміра минуло доволі багато часу й електронна частина монтування дуже застаріла, то замінили всю електронну частину, а також внесли зміни в механічну частину. Блок орбітального

переміщення давав змогу розвивати кутову швидкість слідування близько 0,5%/с. При заміні у ньому двигуна постійного струму на кроковий двигун ШД-5 і зміни передавального відношення редуктора розрахункова швидкість переміщення становила близько 1,3%/с при забезпеченні точного кутового позиціонування з використанням комп'ютерного керування. Крім цього, встановивши на один з об'єктів телевізійну камеру, можна виконувати дистанційне гідування.

Пристрій із встановленим кроковим двигуном для привода орбітального переміщення має значно ширший динамічний діапазон, тому що кроковий двигун кожного разу відпрацьовує заданий кут повороту, що залежить від кількості поданих імпульсів струму, а кутова швидкість ротора точно дорівнює частоті імпульсів, помноженій на одиничний кут повороту ротора двигуна. Кут повороту двигуна пропорційний до кількості вхідних імпульсів, за кожного з яких двигун може працювати з повним моментом навіть у режимі окремих імпульсів. Залежність обертів двигуна від дискретних імпульсів дає змогу керувати двигуном без зворотного зв'язку, завдяки чому кроковий двигун простіший і дешевший у керуванні. Широкий діапазон швидкостей обертання забезпечується тим, що швидкість пропорційна до частоти вхідних імпульсів. Це дає змогу досягти дуже низьких швидкостей обертання з навантаженням, закріпленим безпосередньо на осі двигуна, а також дуже великих швидкостей. Перші потрібні для спостереження зірок та висоорбітальних об'єктів типу геостационарних, які практично нерухомі, другі – для спостереження низькоорбітальних об'єктів, швидкість яких може досягати 2 кут. град. за секунду.

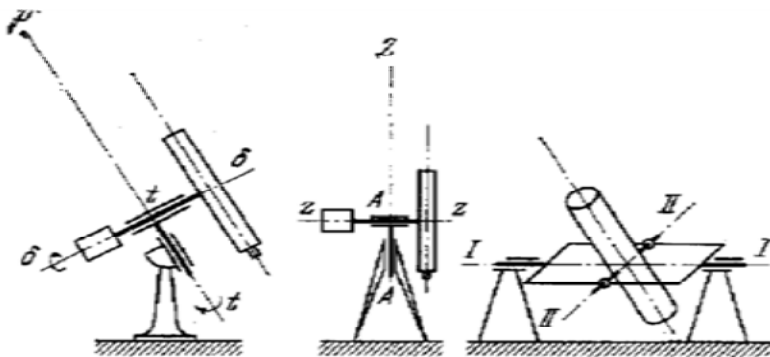


Рис. 1. Основні типи двовісних гідувальних монтувань:  
 А – екваторіальний (P – видимий полюс Всесвіту);  
 В – альт-азимутальний (Z – зеніт);  
 С – горизонтальний

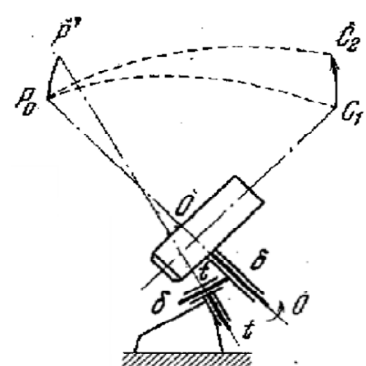


Рис. 2. Схема тривісного монтування:  $P_0$  – полюс орбіти штучного супутника;  
 $C_1-C_2$  – його видима орбіта;  $O-O$  – орбітальна вісь

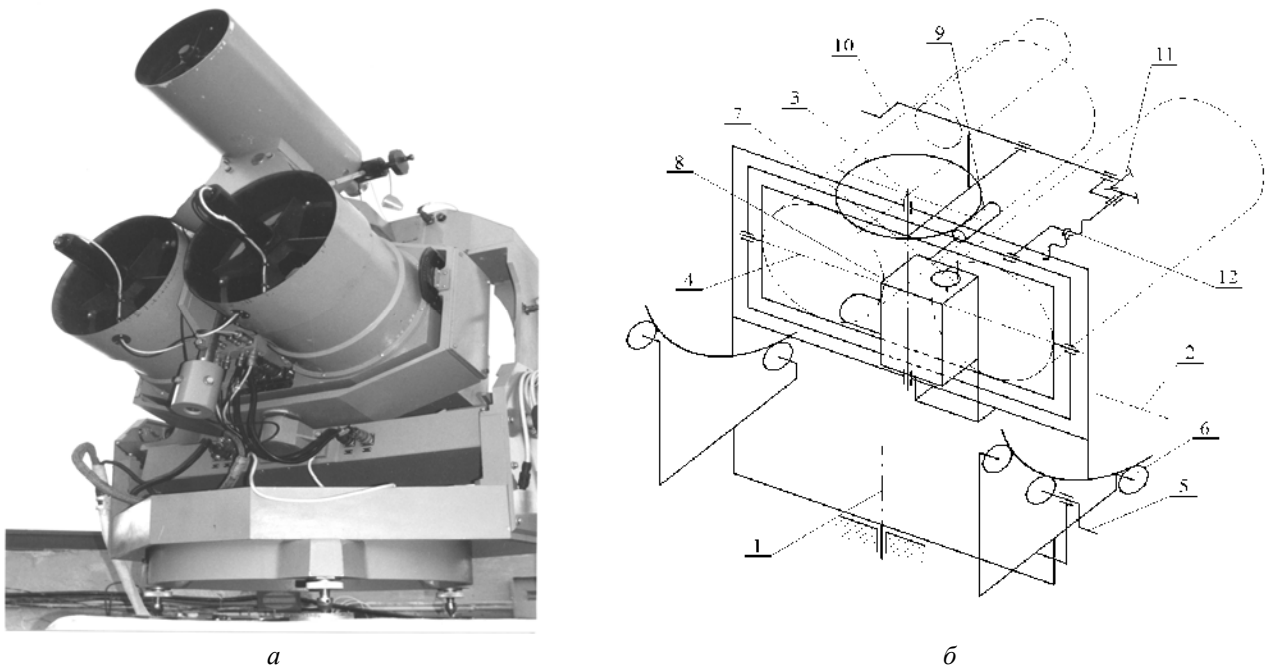


Рис. 3. Лазерний віддалемір ЛД-2: а – загальний вигляд, б – кінематична схема:

1 – вісь азимута; 2 – вісь висоти; 3 – орбітальна вісь; 4 –  $\beta$ -вісь;  
 5 – ручка висоти; 6 – опори переміщення по висоті; 7 – ручка орбітального переміщення; 8 – двигун орбітального переміщення з редуктором; 9 – механізм орбітального переміщення; 10 – ручка корекції висоти;  
 11 – проміжна кінчна передача; 12 – гвинтовий механізм

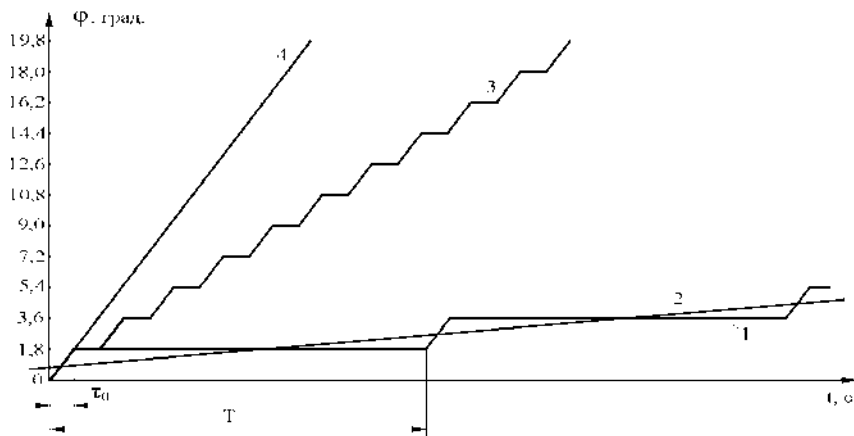


Рис. 4. Часові діаграми роботи крокового двигуна

Однак швидкість руху небесних об'єктів є стабільною і рівномірною, тоді як привід системи кроковим двигуном дає дискретне переміщення з деякою частотою. Тому виникає похибка позиціонування пристрою, викликана відповідними чинниками.

1. Похибка статичного режиму крокового переміщення визначається нелінійною залежністю кута повороту крокового двигуна від часу, що показано на

рис. 4. Використаний двигун ШД-5 виконує 200 кроків за один оберт, тобто елементарний крок становить  $1,8^\circ$ , що двигун здійснює за час  $\tau_0$ . Співвідношення цього часу з періодом слідування керуючих імпульсів  $T$  визначає різні режими роботи крокового двигуна. Якщо період імпульсів  $T$  набагато більший за час виконання одного кроку, то переміщення є ступінчастим (лінія 1), а порівняно з режимом рівно-

мірного переміщення (лінія 2) похибка є максимальною і становить

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_0}{2i}, \quad (1)$$

де  $\varphi_0$  – одиничний крок двигуна;  $i$  – передавальне відношення механізму привода.

Якщо  $\varphi_0 = 1,8^\circ$  (для ШД-5) для орбітального переміщення ( $i=10800$  для ЛД-2), похибка  $\Delta\varphi$  становить 0,3 кутової секунди. Зі збільшенням частоти керуючих імпульсів ця похибка зменшується.

На деякому значенні частоти керуючих імпульсів двигун ще здатний відпрацьовувати окремі кроки, коли час виконання кроку співмірний з часом вистою ротора (частота сприйнятливості двигуна) (лінія 3), а у разі подальшого збільшення частоти двигун переходить у режим постійного некрокового обертання, коли похибка нелінійності наближається до нуля (лінія 4), але втрачається відпрацювання кроків і двигун є некерованим.

Вертикальне переміщення виконує такий самий двигун з приводом через гвинтовий важільний механізм з кроком гвинта 0,75 мм. Розрахункове значення похибки цього переміщення становить 1,62 кутової секунди.

2. Похибка від коливань (динамічна) виникає через те, що система привода поєднує масивний рухомий пристрій і передавальний механізм обмеженої жорсткості. Все це являє собою послідовну механічну коливну систему, яка здійснює вимушені кроками коливання і описується рівнянням

$$I_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = -c_\varphi \left( \varphi_1 - \frac{\varphi_2}{i} \right) - k_\varphi \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{1}{i} \frac{d\varphi_2}{dt} \right), \quad (2)$$

де  $I_1$  – момент інерції поворотного пристрою;  $c_\varphi$  – приведена кутова жорсткість механізму;  $k_\varphi$  – приведене кутове демпфування механізму;  $\varphi_1$  – кут переміщення поворотного пристрою;  $\varphi_2$  – кут переміщення крокового двигуна.

Оскільки необхідна стабільна швидкість відслідкування небесних об'єктів, рівняння (2) можна подати у вигляді

$$\Omega_1 \left( I_1 p + \frac{c_\varphi}{p} + k_\varphi \right) = \Omega_2 \left( \frac{c_\varphi}{p} + k_\varphi \right), \quad (3)$$

де  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор диференціювання;  $\Omega_1$  – амплітуда коливань кутової швидкості поворотного при-

строю;  $\Omega_2$  – амплітуда коливань швидкості крокового двигуна.

Для аналізу коливань швидкості цієї системи привода достатньо використати частотний розв'язок рівняння (3)

$$\Omega_1 = \frac{\Omega_2}{i} \sqrt{\frac{c_\varphi^2 + k_\varphi^2 \omega^2}{(c_\varphi - I_1 \omega^2)^2 + k_\varphi^2 \omega^2}}, \quad (4)$$

де  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота вимушених коливань.

Оскільки значення  $\Omega_2$  задає сам кроковий двигун, то вихідна амплітуда поворотного блока визначається механічними параметрами системи привода. Частотний діапазон роботи крокового двигуна дуже широкий (особливо на низьких частотах), тому дуже імовірно є виникнення механічного резонансу, за якого амплітуда коливань є максимальною. З умови власних коливань системи –  $c_\varphi = I_1 \omega^2$  отримаємо:

$$\Omega_1 = \frac{\Omega_2}{i} \sqrt{\frac{I_1^2 \omega^2 + k_\varphi^2}{k_\varphi^2}}. \quad (5)$$

Звідси амплітуда коливань рухомого пристрою переважно задається демпфувальними властивостями механізму. Якщо демпфування незначне, різко зростає амплітуда коливань і робота пристрою є неможливою, а за великих значень затухання похибка визначається так, як у разі статичного режиму.

**Висновки.** Поряд з простотою керування, широким діапазоном швидкостей і можливістю комп'ютерного керування кроковий привід має нестабільну швидкість обертання, що накладає деякі обмеження на його застосування. У такому випадку розрахункове значення похибки статичного режиму вказує на незначне погіршення якості відслідкування штучних супутників Землі, а похибка від коливань навіть у режимі резонансу мінімізується високою жорсткістю механічної передачі та інерційністю рухомого пристрою, великим передавальним відношенням і значним демпфуванням у зубчастих парах. Крім цього, базова конструкція дає змогу встановити спеціальні демпфувальні пристрої у разі потреби. На цьому етапі монтування проходить випробування та тестування.

1. Михельсон Н.Н. *Оптические телескопы. Теория и конструкция.* – М.: Главная редакция физ.-мат. литературы изд-ва «Наука», 1976. – 512 с. 2. *Двигатель шаговый ШД-5Д-1МУ3, ТУ 16-515-166-79.*