

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОННО-МЕХАНІЧНОГО ДАТЧИКА З ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ

*У статті розроблений електропривод з вентильним двигуном постійного струму і аналого-цифровим контуром управління дозволяє наступне: спростити конструкцію карданового підвісу (із підвісу виключаються елементи динамічного налаштування, тобто, отвір з різьбою, регулювальні гвинти, клеєві з'єднання для фіксації гвинтів); спростити процес динамічного налаштування датчика кутової швидкості (розраховується по відомій методиці необхідний коефіцієнт перерахунку еталонного періоду дискретного формувача еталонного періоду обертання ротора і перепрограмується цей коефіцієнт і, відповідно, період обертання); підвищити точність динамічного налаштування датчика кутової швидкості. Дискретність зміни частоти обертання ротора-0,004 Гц (0,002%) (для отримання такої точності динамічного налаштування датчика з допомогою гвинтів кут повороту кожного гвинта повинен рівнятися приблизно 2 кут.град., для приладу ГД-04, що практично неможливо); забезпечити необхідну точність обертання ротора (після роботи протягом 15 хв. з ціллю стабілізації параметрів) Нестабільність періоду обертання не гірше 0,01% при інтервалі часу вимірювання періоду 0.167 с.*

GALITSKY V.

PJSC Scientific Production Association "Kyiv Automation Plant"

## IMPROVING THE QUALITY OF ADJUSTMENT OF THE PARAMETERS OF THE ANGLE SPEED STABILIZER SYSTEM WITH THE VALVE MOTOR

*Methods and practical recommendations for use in electronic-mechanical sensors of the DC valve motor are offered. The design of the sensors using this engine makes it more efficient to dynamically adjust the angular velocity sensor and has relatively low power consumption. The structure of the sensor using this engine, its influence on the design, regulation, inspection and operation are considered. The work has demonstrated the feasibility of using a DC motor in electronic-mechanical angular velocity sensors as an electric drive. The choice of such an engine due to the fact that it is due to the feedback in the loop stabilization of the rotation speed, which is implemented in the power supply of the engine, provides high stability of the rotation speed, allows you to adjust the specified speed by reprogramming the parameters and thus to dynamically adjust the sensor, has relatively low power consumption. A model of the actuator with a valve motor was manufactured and tested and tested. The precision characteristics of the actuator were determined by measuring the signal period of the rotor position sensor, which is part of the engine. Given that the engine layout is made of three pairs of poles, this period is three times smaller than the period of rotation of the rotor. The results of the measurement and their mathematical processing proved more efficient the use of the propulsion engine in the electronic-mechanical angular velocity sensors. this made it easier to design and dynamically adjust the sensor. Improved tuning accuracy and stable rotor rotation.*

*Ключові слова: кутова швидкість, електронно-механічний датчик, вентильний двигун, система стабілізації.*

**Вступ.** Досягнення в галузі авіації, ракетно-космічної техніки, морського флоту, наземної техніки в значній мірі визначаються застосуванням автономних систем управління, основою яких є гіроскопічні системи. Серед датчиків вектору кутової швидкості обертання Землі при використанні в складних експлуатаційних умовах, на особливу увагу заслуговують електронно-механічні датчики ДНГ [1-4]. Динамічно налаштовувачий гіроскоп являє собою ротор, з'єднаний через карданне кільце з валом двигуна, що обертається на нерухомому підставі. При цьому місця з'єднання ротора з кільцем і вала з кільцем виконують функції пружних підвісів, що утворюють разом з віссю обертання валу ортогональну систему трьох обертальних ступенів свободи. При збігу частоти обертання валу з резонансними частотами ротора і ротора з кільцем інерціальні моменти і моменти в'язкого тертя в пружному підвісі компенсують один одного і, відповідно, при малих кутах відхилення ротора динамічно настроюється гіроскоп поводить як астатичний. До переваг датчиків кутової швидкості на базі гіроскопів цього типу можна віднести: невеликі габаритно-масові і енергетичні характеристики, високу точність, можливість працювати в умовах великих перенавантажень, широкий діапазон вимірюваних параметрів та малий час готовності [2, 3, 4]. Це реалізується за рахунок численних регулювань і таріровок як окремих вузлів датчика, так і всього приладу в цілому. Такі датчики відносяться до традиційних гіроскопічних пристроїв [3, 5-9], в яких виконано умову між параметрами приладу (динамічне налаштування) і, як правило [3, 4], використання пружинного зв'язку між валом привідного двигуна і ротором.

До теперішнього часу виявлені основні фактори, впливаючі на динаміку і точність датчика, вивчено сутність нелінійних ефектів, що виникають в результаті складного характеру деформацій елементів підвісу чутливого елемента [2, 4]. Для ряду конструкцій наведені рекомендації за вибором основних параметрів. Важливими характеристиками інерційних навігаційних систем є їх точність встановлення інерційної швидкості і координат носія [6, 7]. Для досягнення високих показників вихідних даних необхідно

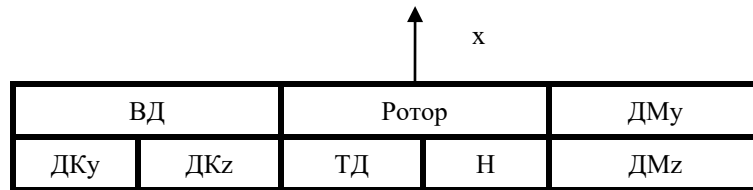
враховувати особливості виготовлення чутливих елементів, їх порогову чутливість, зсув нуля, нелінійність, та інші важливі показники. Для отримання необхідних параметрів запропоновано приклади структурної та функціональної схем датчиків кутової швидкості на базі гіроскопів з застосуванням вентильних двигунів.

В даній статті наведені розрахунки вимірювань періодів сигналів датчика положення ротора в складі вентильного двигуна датчика кутової швидкості. Розглянуто результати статичної обробки даних по рядах характеризують стабільність параметрів блок живлення вентильного двигуна і самого вентильного двигуна.

Вимірювач кутової швидкості являє собою електронно-механічний пристрій, вихідними сигналами якого являється інформація про кутові швидкості відносно двох осей трьохосової системи координат.

До складу електронно-механічних датчика входять:

- чутливий елемент – динамічно налаштований гіроскоп;
  - сервісна електроніка, яка забезпечує роботу гіроскопу; і обробку його вихідних сигналів.
- Структурна схема електронно-механічних датчика кутової швидкості наведено на рис 1.



**Рис. 1.** Структурна схема датчика кутової швидкості

Умовні позначення: ВД- вентильний двигун; ДК- датчик кута; ДМ- датчик момента; ТД- термодатчик; Н- нагрівач; X, Y, Z – осі правої ортогональної системи координат.

Ротор електронно-механічних датчика є носієм кінетичного моменту і являється собою двокільцевий підвіс на пружних перемичках, на якому знаходиться маховик, торець якого являється ротором датчика кута; у внутрішньому розточуванні маховика знаходиться постійний магніт, який разом з маховиком являється ротором датчика моменту.

Вентильний двигун (ВД) забезпечує обертання ротора електронно-механічного датчика і являє собою двофазний двигун постійного струму з двополярною напругою живлення. Статор ВД виконаний у вигляді неферромагнітного циліндру з двома ідентичними двофазними обмотками, одна з яких являється датчиком положення ротора (ДПР), а друга - силовою. Обмотки залиті компаундом і з допомогою фланця на одному із терцев статор кріпиться до корпусу датчика кутової швидкості. Ротор являє собою магнітопровід з постійними магнітами, встановлений на ось, кінці якої за допомогою шарикопідшипників пов'язані з корпусом електронно-механічних датчика.

Датчик кута (ДК) індуктивного типу призначений для реєстрації кутових переміщень ротора відносно чотирьох сердечників з котушками індуктивності, встановлених по окружності в корпусі електронно-механічних датчика під кутом 90° один до одного; котушки поєднанні в мостову схему зі штучною середньою точкою, яка формується постійними резисторами.

Кожна пара протилежних котушок включена по диференціальній схемі. Між торцями сердечників і ротором наявний робочий зазор, в межах якого може відхилитися ротор по двом взаємоперпендикулярним осям.

Сервісна електроніка призначена для забезпечення роботи датчика і включає в себе:

- блок живлення вентильного двигуна (БЖВД);
- інтерфейсний блок (ІБ);
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
- формувач керуючих сигналів (ФКС);
- широтно-імпульсний модулятор (ШІМ);
- джерела вторинного живлення (ДВЖ);
- комутатор термосигналів (КТС).

БЖВД - призначений для пуску, розгону ротора до номінальної швидкості обертання і її стабілізації. Вхідними сигналами БЖВД являються змінні напруги зі статорних обмоток датчика положення ротора, а вихідними - керуючі струми на силові обмотки статора.

ІБ - призначений для попереднього посилення сигналів датчиків кутів.

АЦП - призначений для перетворення аналогових сигналів датчиків кутів в цифровий код.

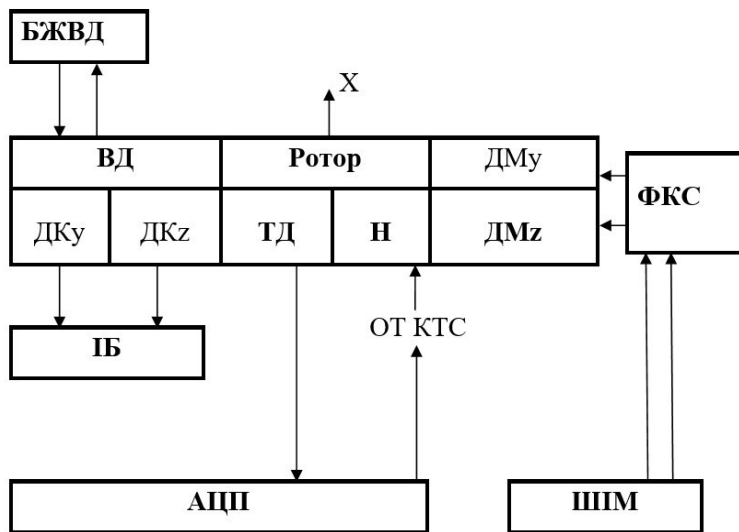
ФКС- призначений для формування синхрочастот керуючих сигналів логічного рівня й керування роботою мостового комутатора.

ШІМ - призначений для формування стабілізованих керуючих струмів на датчик моменту.

ДВЖ призначений для живлення електронних пристроїв і входять в їх склад.

КТС - призначений, зокрема, для керування роботою нагрівачів.

Функціональна схема електронно-механічних датчика наведена на рис 2.



**Рис 2.** Функціональна схема датчика кутової швидкості

Робота окремих пристроїв датчика кутової швидкості. Вентильний двигун - після подачі живлення на БЖВД на обмотки останнього надходить дві напруги синусоїдальної форми, зсунутих по фазі на 90 електричних градусів, з наростаючою частотою. Ротор вентильного двигуна, з яким жорстко пов'язаний ротор датчика кутової швидкості, починає обертатися, при цьому з датчиків положення ротора вентильного двигуна на блок живлення надходять синусоїдальні сигнали, фаза і величина яких залежить від положення ротора і швидкості його обертання. Надалі відбувається розгін до номінальної швидкості обертання ротора й її стабілізація. Безколекторний двигун постійного струму (вентильний), розганяється до номінальної швидкості 9600 об/хв. Фактична швидкість підбирається при регулюванні приладу з ціллю забезпечення динамічного налаштування. У двигуні застосовані високоефективні постійні самарій-кобальтові магніти марки YXG30 (залишкова магнітна індукція  $B_r=1,08T$ ; коерцитивна сила по магнітній індукції  $H_{sv} = 5,5...6,5$  kOe; робоча температура до 250 °C). Статор-котушка набрана на ізолюючому каркасі і залита компаундом.

В процесі виготовлення, регулювання і випробування датчика кутової швидкості контроль проводяться на спеціальних пристосуваннях, що забезпечують установку ротора в різні положення, електровимірювальними приладами для вимірювання кутових переміщень і оптичними приладами для тих же цілей.

Вентильний двигун піддається перевірці наступних параметрів:

- час розгону;
- час вибігу;
- споживана потужність;
- струми в фазах;
- амплітуда віброприскорення;
- остаточний динамічний дисбаланс.

Перевірки проводяться при нормальній і робочій температурах із застосуванням традиційної для цих видів перевірки вимірювальної апаратури і спеціальних пристосувань, що забезпечують відповідну перевірку приладу.

Результати макетування електроприводу датчика кутової швидкості показали позитивне використання вентильний двигун (ВД) постійного струму. Вибір такого двигуна обумовлений тим, що він за рахунок зворотного зв'язку в контурі стабілізації швидкості обертання, яка реалізована в блоці живлення вентильного двигуна (БЖВД), забезпечує високу стабільність швидкості обертання, дає можливість регулювати вказану швидкість шляхом репрограмування параметрів БЖВД і здійснювати таким чином динамічне налаштування ДНГ, має порівняно невелике енергоспоживання. Був виготовлений макет електроприводу з ВД і БЖВД, проведені його випробування.

Точнісні характеристики електроприводу визначалися шляхом вимірювання періоду сигналів датчика положення ротора (ДПР), який входить до складу ВД. Враховуючи, що макет двигуна виконаний з трьома парами полюсів, цей період в три рази менший періоду обертання ротора. Його номінальне значення складає 1666,67 мкс. при швидкості обертання ротора 200Гц. Вимірювання проводились за допомогою прецизійного частотомера при усередненні за 100 періодів (приблизно 0,167с) і за 1000 періодів (приблизно 1,667с) сигналів ДПР протягом 145 хв. Результати вимірювання і їх математичної обробки наведені в таблиці 1.

З даної таблиці 1 зрозуміло, що при усередненні кожного вимірювання протягом 100 періодів сигналів ДПР середнє арифметичне значення відносної помилки  $\frac{2\sigma}{x} \cdot 100$  дорівнює 0,0031%, максимальне значення не перебільшує 0,0036%. При усередненні кожного вимірювання протягом 1000 періодів сигналів ДПР середнє арифметичне значення відносної помилки  $\frac{2\sigma}{x} \cdot 100$  дорівнює 0,0017%, максимальне значення не перебільшує 0,0019%.

Ці дані характеризують якість налаштування параметрів системи стабілізації кутової швидкості обертання ротора. В табл. 1 дані опрацьовувалися як по стовпчикам, так і по рядах. Результати статичної обробки даних по стовпчиках також характеризують якість налаштування параметрів системи стабілізації кутової швидкості обертання ротора.

Таблиця 1

Статистич. характеристики	Результати вимірювань періодів сигналів ДПР, виконанні при усередненні за							
	100 періодів, мкс				1000 періодів, мкс			
	1674,563	1674,625	1674,583	1674,633	1674,545	1674,609	1674,600	1674,590
	1674,563	1674,584	1674,590	1674,618	1674,533	1674,586	1674,639	1674,593
	1674,567	1674,564	1674,608	1674,640	1674,573	1674,598	1674,612	1674,584
	1674,515	1674,577	1674,573	1674,580	1674,540	1674,597	1674,575	1674,588
	1674,568	1674,621	1674,567	1674,574	1674,530	1674,597	1674,594	1674,590
	1674,552	1674,564	1674,608	1674,595	1674,548	1674,608	1674,595	1674,580
	1674,581	1674,614	1674,677	1674,584	1674,521	1674,602	1674,580	1674,583
	1674,574	1674,633	1674,566	1674,674	1674,572	1674,607	1674,612	1674,631
	1674,551	1674,587	1674,617	1674,631	1674,534	1674,591	1674,601	1674,627
	1674,486	1674,614	1674,661	1674,606	1674,547	1674,632	1674,604	1674,617
	1674,542	1674,605	1674,598	1674,594	1674,535	1674,608	1674,613	1674,598
	1674,550	1674,625	1674,603	1674,608	1674,543	1674,603	1674,601	1674,608
	1674,551	1674,590	1674,613	1674,578	1674,524	1674,596	1674,599	1674,606
	1674,560	1674,591	1674,664	1674,557	1674,552	1674,599	1674,597	1674,599
	1674,519	1674,612	1674,586	1674,578	1674,557	1674,571	1674,601	1674,606
	1674,530	1674,586	1674,620	1674,571	1674,552	1674,624	1674,622	1674,591
	1674,532	1674,606	1674,620	1674,561	1674,546	1674,614	1674,628	1674,593
	1674,513	1674,640	1674,585	1674,608	1674,537	1674,597	1674,640	1674,605
	1674,560	1674,587	1674,607	1674,641	1674,568	1674,599	1674,613	1674,584
	1674,503	1674,623	1674,595		1674,542		1674,607	
	1674,527	1674,607	1674,575		1674,554			
	1674,481	1674,613						
	1674,541							
	1674,522							
Кількість вимірювання	25	23	22	20	22	20	21	20
Мінім. значення, мкс	1674,481	1674,564	1674,566	1674,557	1674,521	1674,571	1674,575	1674,580
Максим. значення, мкс	1674,581	1674,640	1674,677	1674,641	1674,631	1674,632	1674,640	1674,631
Середнє арифметичне значення (x), мкс	1674,5397	1674,6023	1674,6061	1674,5971	1674,5463	1674,6018	1674,6066	1674,5987
Середнє квадратичне значення (σ), мкс	0,0269	0,0212	0,0302	0,0262	0,0146	0,0129	0,0163	0,0142
$\frac{2\sigma}{x} \cdot 100\%$	0,003212	0,002532	0,003603	0,003129	0,001743	0,001541	0,001946	0,001696

Результати статичної обробки даних по рядах характеризують стабільність параметрів БЖВД і ВД. З таблиці 1 можна побачити, що при усередненні кожного вимірювання протягом 1000 періодів сигналів ДПР і проведення вимірювань протягом 145 хвилин середнє арифметичне значення відносної помилки  $\frac{2\sigma}{x} \cdot 100$  дорівнює 0,002%, максимальне значення цієї помилки при усередненні по стовпчикам дорівнює 0,00316%, максимальне значення цієї помилки при усередненні по рядах дорівнює 0,00386%. Варто відмітити, що дані вимірювань протягом інтервалу часу, на якому відбувалися температурна стабілізація електроприводу (перші 15 хвилин), в розрахунках не використовувалися.

**Висновки.** Розроблений електропривод з вентильним двигуном постійного струму і аналого-цифровим контуром управління дозволяє наступне:

- спростити конструкцію карданового підвісу (із підвісу виключаються елементи динамічного налаштування, тобто, отвір з різьбою, регульовальні гвинти, клеєві з'єднання для фіксації гвинтів);

- спростити процес динамічного налаштування датчика кутової швидкості (розраховується по відомій методиці необхідний коефіцієнт перерахунку еталонного періоду дискретного формувача еталонного періоду обертання ротора і перепрограмується цей коефіцієнт і, відповідно, період обертання);
- підвищити точність динамічного налаштування датчика кутової швидкості. Дискретність зміни частоти обертання ротора-0,004 Гц (0,002%) (для отримання такої точності динамічного налаштування датчика з допомогою гвинтів кут повороту кожного гвинта повинен рівнятися приблизно 2 кут.град., для приладу ГД-04, що практично неможливо);
- забезпечити необхідну точність обертання ротора (після роботи протягом 15 хв. з ціллю стабілізації параметрів) Нестабільність періоду обертання не гірше 0,01% при інтервалі часу вимірювання періоду 0.167 с.

### Література

1. Басараб, М. А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии / М. А. Басараб, В. Ф. Кравченко, В. А. Матвеев. – М.: Радиотехника, 2005 г. – 176 с.
2. «Руководство по проектированию элементов систем автоматики», Андрияшина Е.П. и др., М., «Высшая школа», 1969 г.
3. Справочник технолога-приборостроителя», в 2-х т. - 2-е изд. перераб. и доп., Т2 / под ред. Е.А.Скороходова - М., «Машиностроение», 1980 г.
4. «Инженерный справочник по космической технике» под ред. проф., докт. техн. наук А.В.Солодова, М., «Воениздат», 1969 г.
5. Болотов М. А., Лёзин И. А. (2011). Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно измерительных машинах// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва.. № 2 (26).- С.28.
6. Брянкин С. Ю. и др. (2010). Прецизионные измерения в машиностроении // Законодательная и прикладная метрология. № 5 (111).- С.48.
7. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. (1985). Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. - 343 с.
8. Модестов М. Б. (1976) Исследование точности модульных головок для координатно-измерительных машин с ЧПУ // Моделирование задач машиностроения на ЭВМ. М.: Наука, 1976.-С. 17-20.
9. Сущенко, О. А. Обзор современного состояния микроэлектро-механических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О. А. Сущенко, С. В. Карасёв // Електроніка та системи управління. – 2011. – №1(27). – С. 103–108.

### References

1. Basarab, M. A. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov v giroskopii / M. A. Basarab, V. F. Kravchenko, V. A. Matveev. – М.: Radiotekhnika, 2005 g. – 176 s.
2. «Rukovodstvo po proektirovaniyu elementov sistem avtomatiki», Andryushina E.P. i dr., М., «Vysshaya shkola», 1969 g.
3. Spravochnik tehnologa-priborostroitelya», v 2-h t. - 2-e izd. pererab. i dop., T2 / pod red. E.A.Skorohodova - М., «Mashinostroeniye», 1980 g.
4. «Inzhenernyj spravochnik po kosmicheskoy tehnike» pod red. prof., dokt. tehn. nauk A.V.Solodova, М., «Voenizdat», 1969 g.
5. Bolotov M. A., Lyozin I. A. (2011). Modeli i metody optimizacii metodik izmereniya detalej GTD pri ih kontrole na koordinatno izmeritelnyh mashinah// Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Korolyova.. № 2 (26).- S.28.
6. Bryankin S. Yu. i dr. (2010). Precizionnye izmereniya v mashinostroenii // Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya. № 5 (111).- S.48.
7. Kobrinskij A. A., Kobrinskij A. E. (1985). Manipulyacionnye sistemy robotov. М.: Nauka, 1985. - 343 s.
8. Modestov M. B. (1976) Issledovanie tochnosti modulnyh golovok dlya koordinatno-izmeritelnyh mashin s ChPU // Modelirovanie zadach mashinostroeniya na EVM. М.: Nauka, 1976.-S. 17-20.
9. Sushenko, O. A. Obzor sovremennogo sostoyaniya mikroelektro-mehanicheskih datchikov uglovoj skorosti i tendencii ih razvitiya / O. A. Sushenko, S. V. Karasyov // Elektronika ta sistemi upravlinnya. – 2011. – №1(27). – S. 103–108.

Рецензія/Peer review : 15.09.2019

Надрукована/Printed : 02.01.2020