

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

О.В. ПЕТРЕНКО, М.В. ІЛЬЧЕНКО

Публічне Акціонерне Товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРИЛАДОВИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ

В роботі розглянуто шляхи підвищення точності та швидкодії стабілізаторів за рахунок введення в контури управління нових інформаційних сенсорів для виміру кутової швидкості замість електромеханічних гіротахометрів. В якості нових інформаційних сенсорів розглянуто сенсори, виготовлені за новими технологіями – коріолісові вібраційні гіроскопи, оптоволоконні гіроскопи та гіроскопи MEMS. Для порівняння наведено дані за технічними характеристиками як електромеханічних гіротахометрів, так запропонованих нових сенсорів для виміру кутової швидкості блоку озброєння. За допомогою математичного моделювання проаналізовано вплив на точність та швидкодію стабілізаторів таких параметрів, як смуга пропускання, частота інформаційного обміну. Аналіз впливу проводився за допомогою перевірки реакції стабілізатора на динамічну похибку стабілізації при використанні різних інформаційних сенсорів кутової швидкості. Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискретності обчислень 1,7 мс і 1,0 мс показало, що при тривалості обчислень 1,0 мс стала похибка при розгоні і русі виробу з постійною кутовою швидкістю у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс, у два рази менше, а після дії імпульсних впливів блок озброєння при дискретності 1,0 мс повертається у вихідне положення з похибкою, яка не перевищує 0,1 кут. хв. Встановлено, що частота формування вихідних сигналів ДУС має бути не менш 1000 Гц і смуга пропускання – не менш 100 Гц.

Ключові слова: гіроскоп, стабілізатор, датчики кутової швидкості.

E.N. BEZBESILNA

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorski»

O.V. PETRENKO, M.V. ILCHENKO

Public joint stock company «Research-and-Production association «Kyiv automatics plant»

WAYS OF INCREASE OF EXACTNESS OF STABILIZERS

The ways of increase of exactness and fast-acting of stabilizers of the easy reserved technique are in-process considered due to introduction to the contours of management of new informative touch-controls for measuring of angular rate gyroscopes. To increase the stripe of key-in of pickoffs, stabilizers of armament, electromechanics rate gyroscope, not maybe, coming from principle of maintenance of his principle of action is indemnification of gyroscopic moment by the spring of torsion. An increase of fast-acting of electromechanics: rate gyroscope is maybe at application of: rate gyroscope of compensative type, in that indemnification of gyroscopic moment is executed by the special electric sensor of moment - electric spring. As new informative touch-controls the touch-controls made for to NT are considered - coriolis oscillation gyroscopes, fiber-optic gyroscopes and gyroscopes of MEMS. For comparison it is resulted date for to technical descriptions, as electromechanics, such offer new touch-controls for measuring of angular rate of block of armament. By means of mathematical design influence is analysed on exactness and fast-acting of stabilizers of such parameters, as a stripe of key-in, frequency of informative exchange. The analysis of influence was conducted by means of checking of reaction of stabilizer for the dynamic error of stabilizing at the use of different informative touch-controls of angular rate. Comparison of stabilizing errors in a vertical channel at discreteness of calculations of 1,7 ms and 1,0 ms showed that at duration of calculations of 1,0 ms an error became at an acceleration and motion of good with a permanent angular rate in comparing to the results at discreteness of 1,7 ms, in two times less than, and after the action of impulsive influences the block of armament at discreteness of 1,0 ms goes back into initial position with an error that does not exceed a 0,1 angle. min. It is set that frequency of forming of initial signals of sensor angular rate must be no less 1000 Hertz and stripe of key-in - no less 100 Hertz.

Keywords: rate gyroscope, stabilizer, sensors of angular rate.

Вступ

Сучасний стан вітчизняного виробництва різноманітних систем характеризується значним підвищенням вимог до точності, швидкодії систем керування та стабілізації систем позиціонування, у тому числі, при експлуатації у складних умовах.

Сучасні рухомі об'єкти мають значно більші швидкості, на них діють значно більші переважання та неконтрольовані механічні збурення (удари, вібрації) (табл. 1) [1]. Тому вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин стабілізаторів озброєння стали значно вищими.

Науково-технічний прогрес у галузі приладових комплексів стабілізаторів (КС) потребує удосконалення компонентів, елементної бази системи керування, використання сучасних цифрових приладів вимірювання кутових швидкостей для покращення тактико-технічних характеристик КС, які мають прийти на заміну аналоговим приладам з забезпеченням максимально можливої мінімізації собівартості апаратури.

Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів [2] показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів немає.

Швидкодія КС характеризується смугою пропускання частот, часом швидкодії електродвигунів і підсилювачів, моментом навантаження на електроприводи, а також, дискретністю за часом цифрового обчислювача.

**Середні параметри коливань корпусу танків при русі
по середньо пересіченій місцевості зі швидкістю до 20 км/год**

№	Види коливань	Кутові коливання		
		Амплітуда, град	Швидкість, град/секунд	Частота, Гц
1	Поздовжні коливання	2,5	8,25	1,1
2	Горизонтальні коливання	1,2	1,6	0,6
3	Поперечні коливання	1,8	6,3	0,8

Збільшити смугу пропускання чутливих елементів КС, електромеханічних гіротахometrів, не можливо, виходячи з принципу збереження його принципу дії – компенсація гіроскопічного моменту пружиною торсіона.

Підвищення швидкодії електромеханічних гіротахometrів можливо при застосуванні гіротахometrів компенсаційного типу, в яких компенсація гіроскопічного моменту виконується спеціальним електричним датчиком моменту – електричною пружиною.

Один із шляхів підвищення точності КС – заміна традиційних електромеханічних гіротахometrів, які мають аналогову вихідну інформацію, на новітні твердотільні гіротахometrи з цифровою вихідною інформацією та значно розширеною смугою пропускання.

Використання в якості чутливих елементів електромеханічних гіротахometrів, на сьогоднішній день, у багатьох випадках виправдано в зв'язку з низьким рівнем шумів, гарними динамічними характеристиками, задовільними характеристиками по точності, напрацьованими технологічними процесами виготовлення. Але механічні гіротахometrи мають ряд недоліків: час готовності до роботи визначається часом розгону гіромотора, низька смуга частот, вихідні сигнали видаються в аналоговому вигляді, незадовільна стійкість до механічних ударних факторів, необхідність додаткового перетворювача енергії для живлення гіромоторів.

Тому найбільшу увагу представляють малогабаритні гіротахometrи, які побудовані без використання обертаючих та рухомих частин. Серед них коріолісовий вібраційний гіроскоп (КВГ), оптоволоконні гіроскопи (ВОГ) та гіроскопи MEMS.

Мета роботи – дослідження можливості підвищення точності та швидкодії стабілізаторів озброєння ЛБМ за рахунок застосування нових чутливих елементів – датчиків кутової швидкості (ДКШ).

З метою вивчення можливості підвищення точнісних характеристик стабілізатора озброєння, було проведено моделювання з використанням як традиційного електромеханічного сенсора кутової швидкості (ДКШ) ГТ, так і твердотільного гіроскопа нового типу – Коріолісового вібраційного гіроскопа (КВГ).

КВГ відрізняються від традиційних електромеханічних гіроскопів підвищеною надійністю та довговічністю (табл. 2), тому, що не мають обертаючих частин, широкую смугу пропускання та стійкість до механічних впливів.

Оцінка середнього часу напрацювання на відмову (СЧНВ) проводилась по даним випробувань багатьох КВГ з урахуванням коефіцієнта Е навколишнього середовища у відповідності з стандартами США MIL-HDBK-217FNotice2 [3].

Таблиця 2

Дані по середньому часу напрацювання на відмову КВГ

Умови доквілля з застосування	СЧНВ Дов. імовірність 99% годин (років)	СЧНВ Дов. імовірність 99,9% годин (років)
Наземні рухомі об'єкти, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Морські об'єкти в приміщенні, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Літаки з екіпажем, грузом, винищувачі, E=5,0	326434(37)	217543 (24)

Вказані сенсори мають широку область використання, у тому числі: для стабілізації платформ з установленими на них вимірювальними пристроями та в системах управління рухомими об'єктами різного класу, у вимірювальних блоках для інерціальної навігації. Технічні характеристики сенсорів кутової швидкості наведено у відповідно ГТ46 (табл. 3) [3], КВГ(табл. 4) [4], ВОГ ВГ910Ф (табл. 5) [5], MEMS G20-75-100 (табл. 6) [6, 7].

Таблиця 3

Технічні характеристики ГТ46

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 50
2	Смуга частот	Гц	30
3	Поріг чутливості	град/с	0,015
4	Масштабний коефіцієнт (МК)	В•с/град	0,17
5	Асиметрія вихідної характеристики	%	10
6	Величина сигналу на нерухомій основі	мВ	100
7	Зона застою	мВ	20
8	Перехресна чутливість	мВ•с/град	1
9	Власна частота	Гц	20 ÷ 25
10	Живлення від джерела 3-фазного струму	В/Гц	36/400
11	Струм споживання	А	0,4
12	Час готовності	с	120
13	Час безперервної роботи	год	6
14	Габаритні розміри	мм	190 x 124 x 86
15	Маса	кг	2,3

Із всіх технічних характеристик ДКШ виберемо найбільш привабливі тим, що вони мають найбільші значення у порівнянні з ГТ46 – це смуга частот, дискретність обміну інформацією та можливість покращити показники точності і швидкодії стабілізатора.

Таблиця 4

Технічні характеристики КВГ

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 200, ±400
2	Смуга частот	Гц	не менше 100
3	Масштабний коефіцієнт (МК)	1/(град/сек)*	0,04
4	Нормальні умови +25 °С		
5	Лінійність МК	%	≤0,04
6	Повторюваність МК від вкл. до вкл. від дня до дня	%	≤0,03
7	Повторюваність зміщення нуля	град/час	5
8	Стабільність зміщення нуля (1σ)	град/час	0,2-1
9	Шум (1σ)	град/час	0,003
10	Температурний діапазон від (-40 до +75)°С		
11	Повторюваність зміщення нуля	град/час	5
12	Стабільність зміщення нуля	град/час	<5
13	Випадковий шум (1σ)	град/час	0,01
14	Температурна стабільність МК (включаючи гістерезис та градієнт температур, 1	%	0,2
15	Умови експлуатації		
16	Робочий температурний діапазон	°С	-40 ÷ +75
17	Температура зберігання	°С	-50 ÷ +95
18	Випадкова вібрація	g	> 15
19	Удар	g, мс	> 400
20	Середнє напруження на відмову (СНВ)	ч	> 500000
21	Параметри живлення		
22	Напруга живлення	В	+(15 ÷ 30)
23	Споживана потужність	Вт	<2,5
24	Інтерфейс	RS-422, RS-485	
25	Габарити: 1. чутливий елемент (ЧЕ) + Ел. Блок 2. єдина конструкція	1. ЧЕ: Ø40×h27 мм Ел. Блок 50×50×25 2. 72×62×58 мм	
26	Маса:	1. 200 гр. 2. 400 гр.	
27	* Вихідний код /МК = град/сек/		

Таблиця 5

Технічні характеристики MEMS G20-075-100

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 75
2	Смуга частот	Гц	100
3	Коефіцієнт передачі	мВ/(град/сек)	15
4	Випадковий шум	град/сек/√Гц	0,05
5	Точність виставки	мрад	± 17,5
6	Час готовності	с	н/д
7	Стійкість до ударів	g	500
8	Температурний діапазон	°С	-40 ÷ +85
9	Маса	г	30
10	Живлення	В	н/д

Таблиця 6

Технічні характеристики ВОГ910Ф

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення мін/макс	
1	Масштабний коефіцієнт(МК), (+20°С)	мВ/(град/сек)	5,5/7,5	
2	Стабільність МК, СКВ при постійній температурі, 1 СКВ	%	-/0,2	
3	Температурний коефіцієнт МК	% / * °С	0/0,1	
4	Зсув нуля	мВ	-/0,4	
5	Стабільність зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКВ	град/год	-/4	
6	Температурний коефіцієнт зсуву нуля	мкВ/°С	-/3	
7	Діапазон вимірюємих швидкостей	°/сек	370	
8	Спектральна платність шумової складової вихідного сигналу	мкВ/√Гц	-/6	
9	Час готовності	сек	-/0,2	
10	Струм живлення +5В (20 °С)	мА	-/190	
11	Смуга частот по рівню 0,7	кГц	0,4/-	
12	Швидкість порту (по умовчання)	кБод	-	
13	Маса (приблизно)	г	120	
14	Габарити (без фланців та роз'єму) 82,3×82,3×20	мм	82,3×82,3×20	
15	Температура робоча (Температура гранична (2 години)	°С	-40(-55) ÷ 70(85)	
16	Габарити (без фланців та роз'єму 82,3×82,3×20	мм	82,3×82,3×20	
17	Температура робоча	°С	-40 ÷ +70	
18	Температура гранична (2 години)	°С	-55 ÷ +85	
19	Вібрація, СКВ	g (Гц)	12 (20...2000)	
20	Удари	мс (g)	1 (150)	
21	Параметри надійності	Середнє напрацювання на відмову	час	60000
		Строк служби (прогноз)	років	15

* - паспортні параметри: МК, струм споживання +5В (20°С)

Експериментальна частина

Методом математичного моделювання було проведено оцінки впливу смуги пропускання та дискретності обчислювальних операцій гіротахметра ГТ46 та MEMS G20-075-100 зі смугою пропускання

100 Гц і ВОГ ВГ910Ф зі смугою пропускання 450 Гц. При моделюванні використовувались математичні моделі гіроскопічних вимірювачів швидкості ГТ46, КВГ, MEMS G20-075-100, які представлені на рис. 2. У процесі моделювання похибка гіротахметра ГТ46 враховувалася у вигляді ланки, що моделює білий шум зі спектральною щільністю $1,44 \cdot 10^{-6} / 100$ відповідної середньоквадратичної похибки (рис. 2 г) Band-limited White Noise). Дослідження можливості підвищення точності стабілізатора при використанні гіротахметра ГТ46 було проведено з урахуванням таких основних положень [8]:

1. З метою покращення характеристик щодо точності стабілізатора озброєння, було проведено оптимізацію коефіцієнта передачі гіротахметра ГТ46 і постійної часу інтегратора, а також коефіцієнтів, що настроюються, у контурах керування.

Оптимізація проводилася на підставі мінімізації **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**-норми замкнутої передатної функції лінійної моделі стабілізатора

Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования., (1)
де **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** – передатна функція замкнутої системи стабілізації,

* – символ комплексно-спряженої матриці.

Обраний критерій забезпечує високу точність процесів керування з урахуванням можливості зміни параметрів системи.

В основу аналізу результатів моделювання було покладено оцінку динамічної похибки стабілізатора, його реакцію на імпульсний вплив.

Оцінка динамічної похибки стабілізатора проводилася на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал, що подається на вхід гіротахометра ГТ46 (рис. 1). Амплітуда та частота зміни сигналу відповідає коливанням корпусу виробу з амплітудою 2,5° й частотою 0,8 Гц.

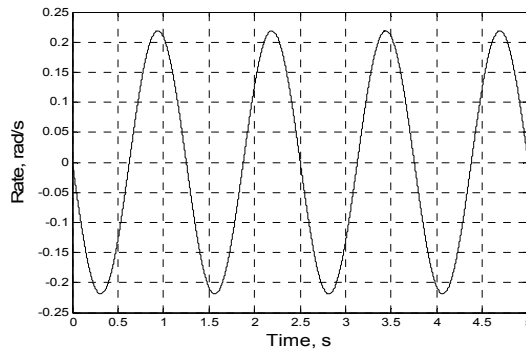


Рис. 1. Гармонійний вплив, що задається на вході гіротахометра ГТ46

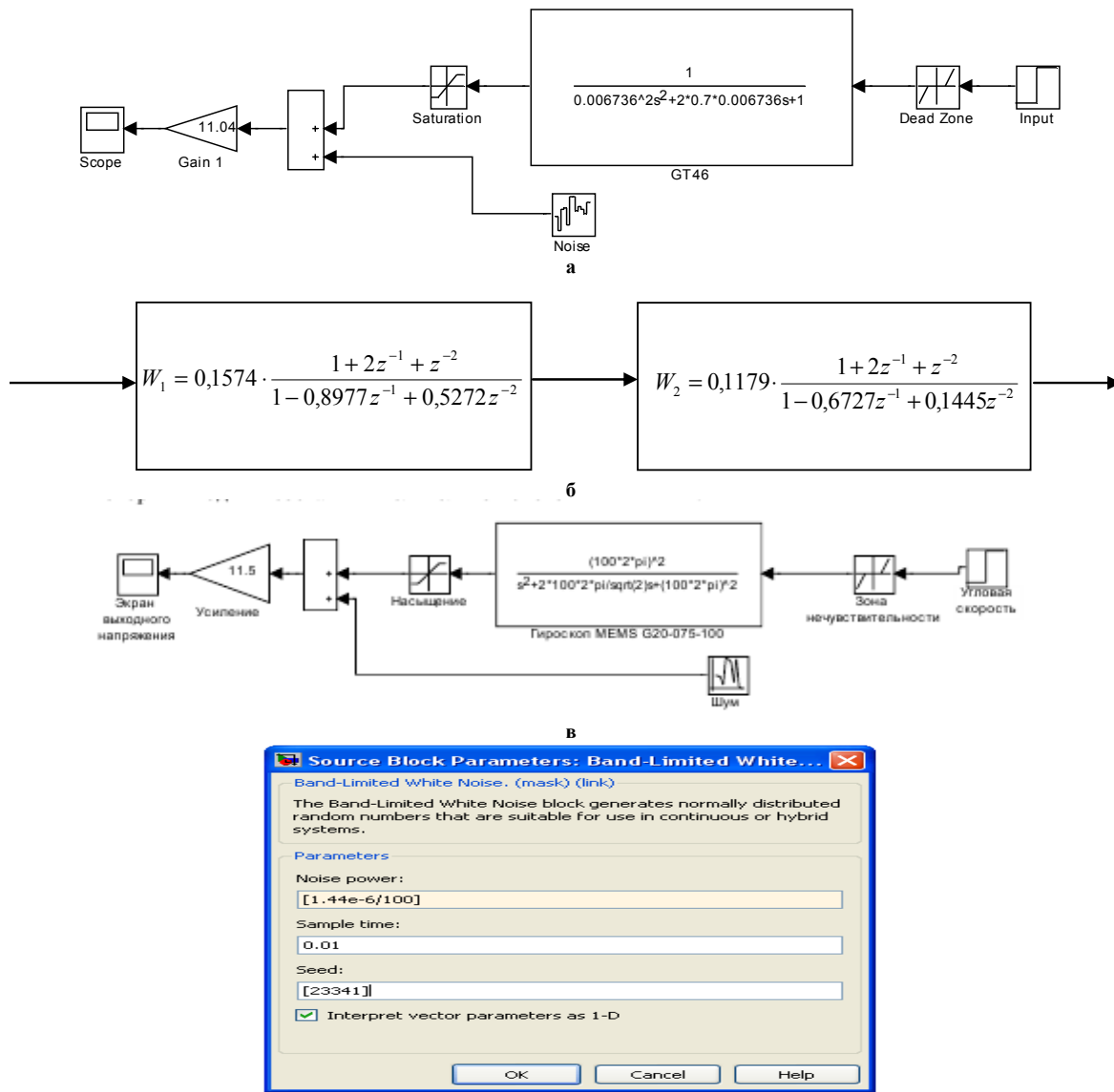


Рис. 2. Математичні моделі ДКШ: а – ГТ46, б – КВГ, в – MEMS G20-075-100, г – Band-limited White Noise

Оцінка імпульсного впливу проводилася на підставі дослідження реакції на послідовність імпульсів, що подаються на вхід гіротахометра ГТ46 (рис. 1). Параметри імпульсних впливів приймалися з урахуванням стрільбових випробувань стабілізатора СВУ-500-4Ц-01. Тривалість імпульсу 5,0 мс з

амплітудою 0,5 рад/с відповідає вихідному сигналу ГТ на рівні 6В.

Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискретності обчислень 1,7 мс і 1,0 мс показало, що при тривалості обчислень 1,0 мс стала похибка при розгоні і русі з постійною кутовою швидкістю, у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс, у два рази менше, а після дії імпульсних впливів на блок озброєння при дискретності 1,0 мс вертається у вихідне положення з похибкою, яка не перевищує 0,1 кут. хв. Встановлено, що частота формування вихідних сигналів ДУС має бути не менш 1000 Гц і смуга пропускання – не менш 100 Гц.

Висновки

Проведений порівняльний аналіз, із застосуванням методів математичного моделювання, підтвердив доцільність застосування в якості сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів, за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що, в свою чергу, призведе до зменшення похибок та покращення характеристик приладових стабілізаторів.

Література

1. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением [Электронный ресурс] : учебное пособие. Лепешинский И.Ю., Варлаков П.М., Захаров Д.Н., Чикирев О.И. – Омск, 2010. – С. 200. – Режим доступа : mslstarussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.
2. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння : монографія / Безвесільна О.М., Цірук В.Г., Квасников В.П., Чіковані В.В. – Київ : ЖДТУ, 2014. – 176 с.
3. Гиротахometrи ГТ46-01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.
4. КВГ, ЦКВГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://zelaz.ru/koriolisovyuy-vibracionnyy-girooskop-kvg-ckvg.htm>.
5. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.
6. Сущенко О.А. Озор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, С.В. Карасев // Електроніка та системи управління. – 2011. – № 1(27). – С.103–108.
7. G20 to axis MEMS rate gyro [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gladiatorotechnologies.com>.
8. Математична модель та технічні характеристики гіротахometrа ГТ-46 / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, Д.С. Козюков // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція “Технічні науки на сучасному етапі” (присвячена Дню науки), 19.05.2018. – С. 92–93.

References

1. Lepeshinskij I.Yu. Avtomaticheskie sistemy upravleniya vooruzheniem [Elektronnyj resurs] : uchebnoe posobie. Lepeshinskij I.Yu., Varlakov P.M., Zaharov D.N., Chikirev O.I. – Omsk, 2010. – S. 200. – Rezhim dostupa : mslstarussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.
2. Bezvesilna O.M. Systemy navedennia ta stabilizatsii ozbroiennia : monohrafyia / Bezvesilna O.M., Tsiruk V.H., Kvasnykov V.P., Chikovani V.V. – Kyiv : ZhDTU, 2014. – 176 s.
3. Hyrotakhometry HT46-01 [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.
4. KVH, TsKVH [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : <https://zelaz.ru/koriolisovyuy-vibracionnyy-girooskop-kvg-ckvg.htm>.
5. Volokonnye datchyky vrashchenia VH***. Svodnye TU [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.
6. Sushenko O.A. Ozor sovremennogo sostoyaniya mikroelektromehanicheskih datchikov uglovoj skorosti i tendencii ih razvitiya / O.A. Sushenko, S.V. Karasev // Elektronika ta sistemi upravlinnya. – 2011. – № 1(27). – S.103–108.
7. G20 to axis MEMS rate gyro [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupa : <http://www.gladiatorotechnologies.com>.
8. Matematychna model ta tekhnichni kharakterystyky hirotakhometrа HT-46 / O.M. Bezvesilna, V.H. Tsiruk, D.S. Koziukov // Vseukrainska naukovo-praktychna on-line konferentsiia “Tekhnichni nauky na suchasnomu etapi” (prysviachena Dniu nauky), 19.05.2018. – S. 92–93.

Рецензія/Peer review : 27.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Киричук