

Черняк М. Г.<sup>1</sup>, доцент, к.т.н., Юр'єв Ю. Ю.<sup>2</sup>, начальник відділу,  
Деревинська О. Ю.<sup>3</sup>, начальник лабораторії

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВІГАЦІЙНОГО МАЯТНИКОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

**En**

In the article navigation compensating pendulous accelerometer (CPA) with silicon sensing element and capacitive position sensor AKS-05 production SDP SE "Arsenal" is investigated. CPAs are used as the basic sensors of primary measurement information of the strapdown inertial navigation systems (SINS) based on the metrological model (MM). It is known that the errors of CPAs produce errors in tasks solved by these systems.

By MM of CPA the authors have offered to understand the mathematical model of its output signal (real transfer function (TF)) and the mathematical model of its errors (MME) presented in the form of functional dependencies on the measured projection of apparent linear acceleration and technological factors which affect the CPA during its production. The sufficient for the practical usage during solving measuring tasks of these systems, the MM of CPA is defined. Coefficients of TF and MME are determined and entered in the certificate of the results of acceptance testing CPA. All systematic errors are compensated algorithmically composed of SINS.

The authors have developed and described methods of the experimental determination of the coefficients of the MM according to the results of its metrological testing. The method of test turnings in the Earth's gravitation field was used for CPA calibration. In addition, method for building an amplitude-frequency characteristic of CPA and method for determining the deviation from linearity of CPA TF within the acceleration measurement range have been developed.

The tests of navigation CPA were carried out on the precision equipment of the enterprise, which allows to determine all coefficients of the MM.

The accelerometer AKS-05 have the following metrological performance: bias – is less than 10 mg; bias stability in run – is not more than 30 mkg/4h; bias stability run to run – is not more than 10 mg; bias temperature sensitivity – is not more than 50 mkg/°C; scale factor random error – is not more than 80 ppm; scale factor temperature sensitivity – is not more than 100 ppm/°C; the error of the base plane – is not more than 3000 mkrad; linear acceleration measurement range  $\pm 45g$ ; operating temperatures range  $(-40 \dots +85)^\circ\text{C}$ .

In conclusion the table with metrological performance of different manufacturers of navigation CPA is given. The results of experimental investigations have shown that navigation CPA production SDP SE "Arsenal" is not inferior to foreign analogues, and can effectively be used in SINS high accuracy.

**Ru**

Представлены методики и результаты испытаний навигационного МКА с кремниевым чувствительным элементом и емкостным датчиком положения

<sup>1</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup> Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», науково-технічний комплекс

<sup>3</sup> Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», науково-технічний комплекс

производства типа «АКС-05» КП СПС «Арсенал». Приведено, имеющееся на предприятии, прецизионное стендовое оборудование для испытаний МКА. По результатам этих испытаний МКА определены индивидуальные коэффициенты его функции преобразования и метрологической модели погрешностей. Приведена таблица сравнения метрологических характеристик зарубежных производителей МКА навигационного класса и МКА производства КП СПС «Арсенал».

### **Вступ**

КП СПБ «Арсенал» є основним приладобудівним підприємством на Україні, де виготовляються навігаційні маятникові компенсаційні акселерометри (МКА) із кремнієвим чутливим елементом (ЧЕ) та ємнісним датчиком кута (ЄДК) типу АКС-05. Вони застосовуються у якості базових датчиків первинної вимірювальної інформації у безплатформних інерціальних навігаційних системах (БІНС) різного виду базування. Відомо, що МКА у значній степені визначають точність задач, що вирішується цими системами [1]. Метрологічні характеристики акселерометра АКС-05 не поступаються характеристикам кращих навігаційних МКА типу QA-3000 (Honeywell, США), А-18 (АТ «РПКБ», Росія), SRJ-01 (КНР).

У стандарті [2] пропонується до основних статичних метрологічних характеристик МКА відносити індивідуальні коефіцієнти функції перетворення (ФП) і математичної моделі похибок (ММП). Тоді під ФП та ММП розуміють прийняті для даного типу МКА функціональні залежності вихідного сигналу акселерометра від вимірюваної проекції вдаваного лінійного прискорення та величин, що діють на МКА під час проведення вимірювання. Тому визначення достатньої для практичного застосування ФП і ММП МКА та експериментальне визначення числових значень їх коефіцієнтів із необхідною точністю є актуальною задачею.

У літературі [1, 2] для МКА із ЄДК, що виготовляються серійно, приведені тільки числові значення окремих метрологічних характеристик та відсутні методики їх випробувань.

### **Постановка задачі**

Метою даної роботи є експериментальне дослідження метрологічних характеристик навігаційного МКА виробництва КП СПБ «Арсенал».

### **Математична модель метрологічних характеристик навігаційного МКА**

Базуючись на рекомендаціях стандарту [2] та статті [3], на підприємстві прийнято для МКА наступний вигляд його ФП та ММП:

ФП у одиницях вихідного сигналу

$$Y_D = K_{0\Sigma} + K_1 a_i + K_2 a_i^2 + K_3 a_i^3 + M_0 a_p + M_p a_0, \quad (1)$$

ММП у одиницях вимірюваного уявного лінійного прискорення

$$\Delta a_i = \frac{(Y_D - Y_I)}{K_1} = k_{0\Sigma} + k_1 a_i + k_2 a_i^2 + k_3 a_i^3 + m_o a_p + m_p a_0, \quad (2)$$

де  $Y_D$  – дійсна індивідуальна ФП МКА;  $Y_I = K_{10} a_i$  – ідеальна ФП (без похибок);  $K_{0\Sigma}$ ,  $k_{0\Sigma}$  – відповідно зміщення нуля (ЗН) МКА та адитивні похибки ЗН;  $K_{10}$ ,  $K_1$  – ідеальний та дійсний масштабний коефіцієнт (МК) МКА;  $a_i$  – вимірювана проекція уявного прискорення на вимірювальну вісь (ВВ) МКА;  $K_2$ ,  $K_3$  – систематичні коефіцієнти нелінійності ФП;  $(M_0 a_p + M_p a_0)$  – адитивна похибка від перехресної чутливості;  $k_1$  – мультиплікативні похибки МК;  $k_2$ ,  $k_3$  – систематичні коефіцієнти нелінійності ММП;  $m_o$ ,  $m_p$  – похибки базової площини (БП).

На підставі результатів, отриманих в статті [3] ММП МКА прийнята у вигляді:

$$\Delta a_i(a_i, \Delta T, t) \approx k_{0H} + \alpha_{T1(2)} \Delta T \pm 0,5 \sqrt{k_{0B}^2 + k_{0D}^2(t)} + (\beta_{T1(2)} \Delta T \pm \overset{\circ}{k}_1(t)) a_i + \quad (3)$$

$$+ k_2 a_i^2 + k_3 a_i^3 + (m_o + \gamma_{T1(2)} \Delta T) a_p + (m_p + \gamma_{T1(2)} \Delta T) a_0,$$

де  $k_{0H}$  – значення ЗН, що паспортизується;  $\alpha_{T1(2)}$  – температурні коефіцієнти ЗН, що паспортизуються;  $\overset{\circ}{k}_{0B}$  – нестабільність ЗН від пуску до пуску;  $\overset{\circ}{k}_{0D}$  – нестабільність ЗН в пуску;  $\overset{\circ}{k}_1$  – довготривала нестабільність МК;  $\beta_{T1(2)}$  – температурні коефіцієнти МК, що паспортизуються;  $\gamma_{T1(2)}$  – температурні коефіцієнти БП МКА, що паспортизуються.

Коефіцієнти ФП та ММП, визначаються та паспортизуються за результатами приймально-здавальних випробувань МКА. Всі систематичні похибки алгоритмічно компенсуються у складі БНС по моделям, наведеним у статті [3].

### Методики та результати дослідження метрологічних характеристик навігаційного МКА

Експериментальне дослідження метрологічних характеристик МКА у КП СПБ «Арсенал» проводиться на прецизійних стендах (рис. 1), які задовольняють пред'явленим технічним вимогам та дозволяють визначити всі параметри прийнятої ФП (1) та ММП (3) МКА за власними методиками.

### Розділ 3. Керування

На стенді, що представлений на рис. 1, а, проводяться статичне калібрування та температурні випробування МКА методом його тестових поворотів у гравітаційному полі Землі. Методика калібрування АК передбачає багатократне високоточне задання, за допомогою оптичної ділильної головки (ОДГ), необхідних кутових тестових положень МКА відносно площини горизонту у діапазоні робочих температур, та високоточне вимірювання вольтметром вихідних сигналів МКА у цих тестових положеннях. За результатами цих вимірювань оцінюються систематичні складові ФП та ММП МКА. Після цього проводяться довготривалі та короткі запуски МКА. За результатами вимірювання вихідних сигналів МКА у цих запусках оцінюють складові його випадкових похибок.



а)



б)



в)

Рис. 1. Стенди для випробувань МКА

На стенді, що представлений на рис. 1, б, проводиться перевірка і контроль динамічних параметрів МКА та побудова його амплітудно-частотних характеристик (АЧХ). Методика визначення динамічних харак-

теристик МКА зводиться до реєстрації і подальшої обробки реакції МКА, що випробовується, на синусоїдальне прискорення із амплітудою  $1 g$  у діапазоні частот  $20 - 2000$  Гц. Із отриманого файлу вихідних сигналів МКА знаходиться значення частоти, що відповідає рівню  $-3$  дБ, яка є смугою пропускання МКА. Максимум АЧХ (показник коливальності) визначається, як відношення максимального значення АЧХ МКА до значення АЧХ на частоті  $20$  Гц.

На стенді, що представлений на рис. 1, в, проводиться визначення діапазону вимірювань МКА та перевірка відхилення від лінійності його ФП у діапазоні вимірювань МКА. На центрифугі відтворюються додатні та від'ємні прискорення та по вихідному сигналу МКА за допомогою апроксимації оцінюється коефіцієнти квадратичної  $k_2$  та кубічної  $k_3$  нелінійностей ФП у діапазоні вимірювань МКА.

На рис. 2 - рис. 4 представлені, як приклад, графіки вихідних сигналів одного із МКА АКС-05, по яким визначаються його точнісні характеристики МКА (рис. 2, рис. 4), та його АЧХ (рис. 3).

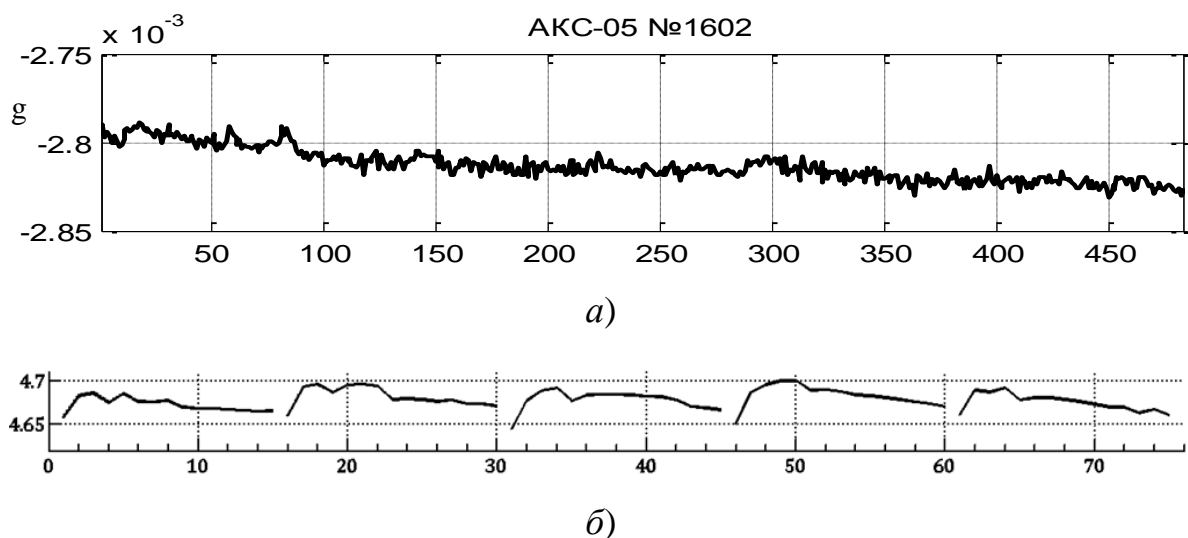


Рис. 2. Вихідні сигнали МКА, що використовуються для оцінки:

- а) нестабільності ЗН у запуску;
- б) нестабільності ЗН від запуску до запуску

У таблиці наведено порівняння основних технічних характеристик МКА АКС-05М виробництва КП СПБ «Арсенал» та характеристик МКА навігаційного класу закордонних виробників.

*Таблиця*

Характеристики МКА різних виробників

Найменування характеристики	АКС-05М (Україна)	QA-3000 (США)	A-18 (Росія)	SRJ-01 (КНР)
Діапазон вимірювання, $g$	$\pm 45$	$\pm 60$	$\pm 25$	$\pm 35$
Нестабільність ЗН, $g$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 4 \cdot 10^{-5}$	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$

## Розділ 3. Керування

Найменування характеристики	АКС-05М (Україна)	QA-3000 (США)	A-18 (Росія)	SRJ-01 (КНР)
Випадкова похибка МК, $ppm$	$\leq 50$	80...250	200	30
Діапазон робочих температур, $^{\circ}C$	-40...+85	-55...+95	-60...+80	-40...+80
Температурний коефіцієнт ЗН у діапазоні робочих температур, $g/^{\circ}C$	$2...5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Температурний коефіцієнт МК у діапазоні робочих температур, $ppm/^{\circ}C$	$\leq 50$	120	200	50
Смуга пропускання, Гц	$\geq 1200$	$\geq 300$	$\geq 200$	$\geq 1000$

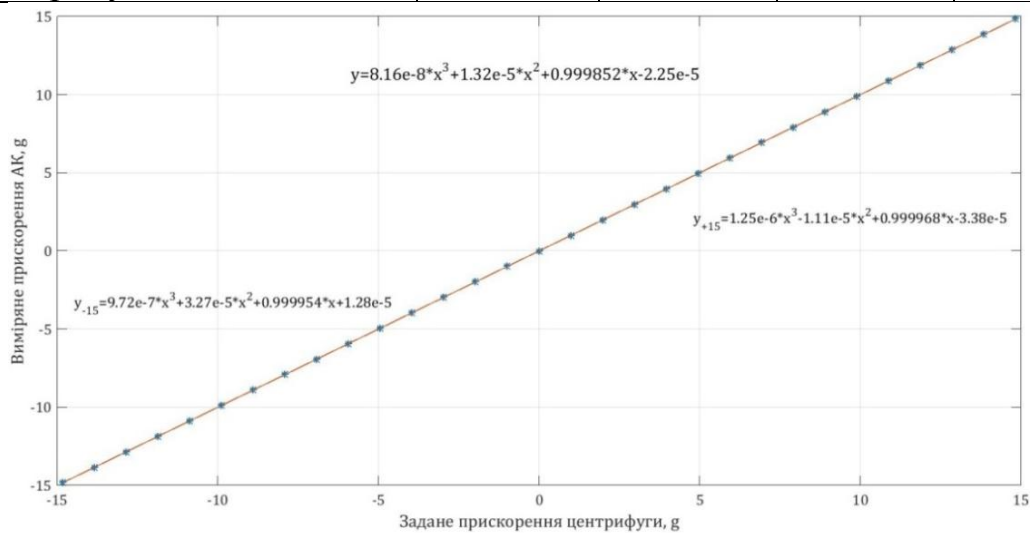


Рис. 3. Функція перетворення МКА

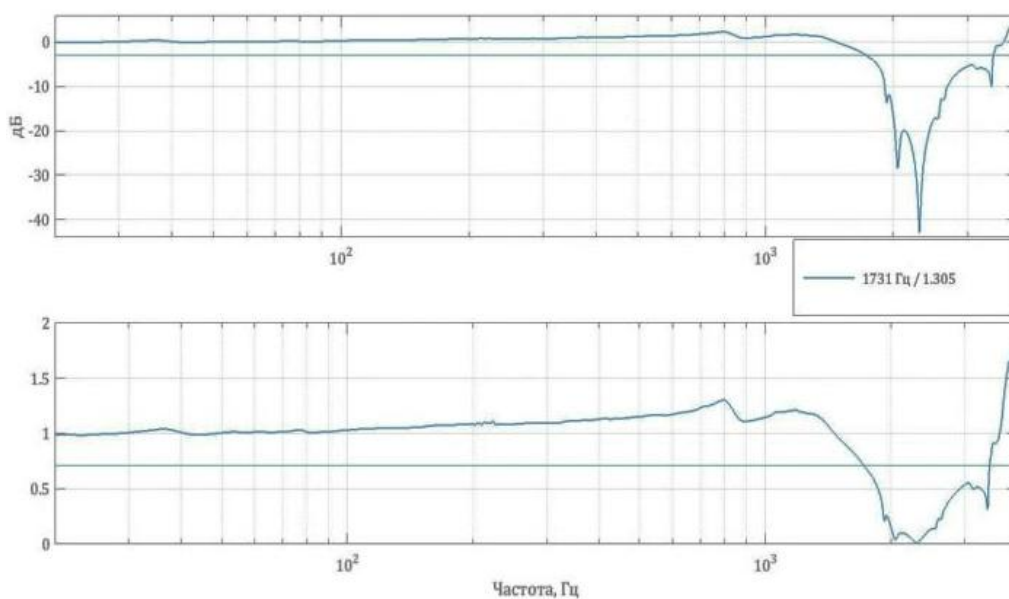


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика МКА

**Висновки**

Експериментально підтверджено, що вирази (1) та (3) складають достатні для практичного застосування у сучасних БІНС математичні моделі ФП та ММП МКА, що враховують особливості його конструкції та принципу дії.

Порівняння основних параметрів МКА свідчать, що акселерометр виробництва КП СПБ «Арсенал» за своїми основними параметрами не поступається закордонним аналогам, та може ефективно застосовуватися в автономних високоточних БІНС.

Представлені у роботі методики експериментальних досліджень МКА є універсальними та можуть бути рекомендовані для проведення експериментальних випробувань навігаційних акселерометрів.

Надалі доцільно, на основі наведених підходів, дослідити вплив конструктивних рішень та технологічних факторів МКА у процесі виробництва на його метрологічні характеристики.

**Список використаної літератури**

1. *Lawrence A.* Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance and Control. Springer-Verlag New York, 2004. 280 p.
2. IEEE Std 1293<sup>TM</sup>-1998 (R2008). IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear, Single-Axis, Nongyroscopic Accelerometers. – Approved 1998-09-25. New York, USA, 233 p.
3. *Chernyak M. G.* Navigation pendulous accelerometer's metrological model and experimental determination of its parameters. / M. G. Chernyak, E. Khazinehdarloo // Nauka I studia. – Przemysl, 2009. – №6(18). – P. 67-74.