Туан, О. Ю. Златкин // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 1 (28). – С. 75 – 81 .
4. Измайлов Е. А. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Е. А. Измайлов, С. Н. Лепе, А. В. Молчанов, Е. Ф. Поликовский. / XV Международная конференция по интегрированным навигационным системам, СПб. 2008, С. 145-154.
5. Аврутов В. В. О скалярной калибровке блока гироскопов и акселерометров // Вісник НТУУ «КПІ», Серія приладобудування. – 2010. – Вип. 40. – С. 10–17.
6. Аврутов В. В. Влияние погрешности поворота стенда на точность калибровки блока гироскопов и акселерометров / В. В. Аврутов, Т. Ю. Мазепа // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 43. – С. 5–10.

Надійшла до редакції
07 жовтня 2014 року

УДК 629.05

ОЦІНКА МЕТОДИК ВИРОБНИЧОЇ КАЛІБРОВКИ МІКРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

Капиця М. С., Мелешко В. В., Лакоза С. Л.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна
mvv44@mail.ru

Визначена модель вихідного сигналу за методом групового урахування аргументів (МГУА). Розглянуто дві основні методики виробничого калібрування: методика тестових поворотів та методика на основі методу найменших квадратів (МНК).

Виконано порівняння ефективності методик калібрування для структури моделі, обраної за допомогою МГУА.

Проаналізовано переваги та недоліки методик. Для ідентифікованої моделі датчиків наведені дані калібрування для акселерометрів Colibrys MS 9002.d. Оцінені похибки датчиків.

Ключові слова: *калібровка, метод найменших квадратів, методика тестових поворотів, методика групового урахування аргументів.*

Вступ

Калібрування – це процедура визначення характеристик інерціальних чутливих елементів (ЧЕ) у результаті спеціально організованого процесу вимірювань вихідних сигналів і їхньої наступної обробки. Дана процедура вимагає значних витрат часу.

Існує два напрямки в калібруванні: калібрування на виробництві та калібрування на діючих об'єктах в процесі роботи. На даний час відомо багато різних методик калібрування на виробництві. Кожна методика має свої переваги й недоліки. В даній роботі розглядаються та порівнюються дві основні методики виробничого калібрування: методика на основі методу найменших квадратів (МНК), методика тестових поворотів [1].

При використанні методики на основі МНК модель вихідних сигналів датчиків може бути будь-якої складності, чого не можна сказати про методику тестових поворотів.

До переваг методики тестових поворотів можна віднести її простоту у використанні. Повороти здійснюються в одній площині для одного датчика, що не вимагає складного устаткування. Недоліки цієї методики полягають в тім, що за допомогою однієї установки блоку датчиків неможливо визначити всі шукані коефіцієнти математичної моделі сигналу датчиків. Це пов’язано з тим, що блок чутливих елементів має три осі чутливості.

Застосування методи групового урахування аргументів для вибору оптимальної моделі

Метода групового урахування аргументів (МГУА) застосовується для ідентифікації структури моделі за результатами спостережень. Апріорно структура моделі сигналу датчика невідома [2].

Алгоритми МГУА [3] відрізняються за способом генерації моделей різної складності. Їх можна об'єднати в дві основні групи: однорядні (комбінаторні) і багаторядні (ітераційні).

У комбінаторних алгоритмах виконується перебір різних часткових моделей із заданого базису з вибором кращою з цих моделей за заданим критерієм селекції. При переборі складність часткових моделей, тобто число аргументів, поступово нарощується від 1 до максимального числа n (число аргументів базисного набору функції). Таким чином, загальна схема комбінаторного алгоритму включає наступні операції: з МНК визначаються коефіцієнти всіх часткових моделей при складності s = 1 (моделі, що складаються з одного аргументу), s = 2 (моделі , які складаються з двох аргументів), ..., s = n (модель, що складається з усіх аргументів заданого базису); для кожної з них обчислюється значення критерію. Можна сказати, що комбінаторний алгоритм МГУА заснований на повній математичної індукції, так як при цьому не пропускається жоден з можливих варіантів моделі, закладених у вихідному базисі.

Вибір оптимальної моделі здійснюється на підставі мінімального значення одного з таких критеріїв [3]:

- Середньоквадратичне відхилення (СКВ) на вибірці $A \cup B$:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{NAB}\sum_{i\in A\cup B}\left(y_i - \overbrace{y_i\left(A\cup B\right)}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{NAB}RSS_{A\cup B}} \to min,$$

де A – послідовність, значення якої використовуються для визначення коефіцієнтів моделі; $\hat{A}$ – послідовність, значення якої використовуються для обчислення похибок за обраним критерієм; $NAB = NA + NB;$ NA, NB – кількість точок, що увійшли відповідно в A і B послідовності; y_i – емпіричне значення вихідної величини в і-й точці; $y_i\left(A\cup B\right)$ – значення вихідної величини в і-й точці, отримане за моделлю, коефіцієнти якої обчислені на вибірці $A\cup B$.

- Критерій регулярності:

$$\Delta\left(B/A\right)=\sqrt{\frac{1}{NAB}\sum_{i\in A\cup B}\left(y_i-\overbrace{y_i\left(A\cup B\right)}\right)^2}\rightarrow min, \qquad (1)$$

де $\Delta\left(B/A\right)$ означає «похибка на B моделі, коефіцієнти якої отримані на A».

- Симетричний критерій регулярності:

$$d=\sqrt{\frac{1}{NAB}\left[\sum_{i\in A\cup B}\left(y_i-\overbrace{y_i\left(A\right.}\ \right)\Big)^2+\sum_{i\in A\cup B}\left(y_i-\overbrace{y_i\left(B\right.}\ \right)\Big)^2\right]}\rightarrow \min .$$

Критерій СКВ на вибірці $A\cup B$ (оцінка коефіцієнтів і вибір моделі проводяться на одній і тій же вибірці $A\cup B$ таблиці вихідних даних) застосовується у разі точних даних або у разі, коли структура моделі апріорі відома. Цей критерій може застосовуватися для уточнення значення коефіцієнтів моделі, структура якої визначена за одним із критеріїв.

Критерій регулярності і симетричний критерій регулярності застосовуються для вибору структури моделі. Порівнюючи їх, можна сказати, що критерій регулярності вибирає більш прості моделі. Але симетричний критерій регулярності більш точно апроксимує вихідну величину моделі, тому вибір критерію слід проводити виходячи з мети моделювання.

Вибір моделі проводиться з використанням критерію регулярності, для вибору більш простої моделі. Похибка за даним критерієм розраховується на контрольній частині вибірки за формулою (1). Результати розрахунків із застосуванням МГУА для ідентифікації структури моделі занесені в табл. 1. Код АЦП – похибка визначається за кодом аналого-цифрового перетворювача.

Таблиця 1. Похибки за критерієм регулярності

№ моделі	Рівняння моделі	Похибка Δ [код АЦП]
1.	$M_1=\mathrm{k}_0+\mathrm{k}_z\mathrm{a}_z$	125
2.	$M_2=k_0+k_ya_y+k_za_z$	128
3.	$M_3=k_0+k_xa_x+k_za_z$	108
4.	$M_4=k_0+k_xa_x+k_ya_y+k_za_z$	84
5.	$M_5=k_0+k_xa_x+k_ya_y+k_za_z+k_{x2}{a_x}^2$	89
6.	$M_6=k_0+k_xa_x+k_ya_y+k_za_z+k_{x2}{a_x}^2+k_{xy}a_xa_y$	90
7.	$M_7=k_0+k_xa_x+k_ya_y+k_za_z+k_{xy}a_xa_y$	83
8.	$M_8=k_0+k_xa_x+k_ya_y+k_za_z+k_{x2}{a_x}^2+k_{y2}{a_y}^2$	89
9.	$M_9=k_0+k_xa_x+k_ya_y+k_za_z+k_{xy}a_xa_y+k_{y2}{a_y}^2$	83

10.	$M_{10} = k_0 + k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z + k_{x2} a_x{}^2 + k_{xy} a_x a_y + k_{y2} a_y{}^2$	111
11.	$M_{11} = k_0 + k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z + k_{x2} a_x{}^2 + k_{y2} a_y{}^2 + k_{z2} a_z{}^2 +$ $+ k_{xy} a_x a_y + k_{xz} a_x a_z + k_{yz} a_y a_z$	20967

З результатів табл. 1 із одинадцяти часткових моделей, оцінених за допомогою МГУА, можна зробити висновок, що найкращими моделями є сьома та дев'ята. Похибки за критерієм регулярності в них найменші $\Delta_{7,9} = 83$, але похибки 3-ох моделей (4-ої ($\Delta_4 = 84$), 7-ої та 9-ої) майже однакові. При виборі з цих 3-ох моделей оптимальної потрібно враховувати параметри обладнання, за допомогою якого знімалися сигнали акселерометрів: використовувався 16-ти бітний АЦП, в якого останній біт відповідає похибці. Вищевказані моделі є рівноточними по критерію регулярності, а значить потрібно обирати для калібрування датчиків найпростішу серед них модель, тобто четверту.

Порівняння методик калібрування акселерометрів методиками МНК та тестових поворотів

Для ідентифікації коефіцієнтів математичної моделі можна застосовувати різні алгоритми. Зокрема, широко відомий алгоритм метода найменших квадратів (МНК). В основі МНК лежить наступний принцип: "найімовірнішим" значенням, яке можна одержати з ряду вимірів однакової точності, є таке значення, для якого сума квадратів різниць цього значення й результатів вимірів є найменшою.

Методика тестових поворотів полягає в тестових поворотах датчика. У ній після кожного повороту чутливого елемента в необхідне положення проводиться вимірювання. При використанні даної методики часто виконують вимірювання вихідного сигналу акселерометра у двох положеннях, які відрізняються орієнтацією на 180°. За допомогою цієї методики можна визначити такі основні параметри акселерометра, як нульовий сигнал, та масштабний коефіцієнт.

Дослідження двох методик калібрування проводилося на основі сигналів блока інерціальних чутливих елементів. Виміри проводилися для акселерометрів Colibrys MS 9002.d. Для установки датчика в різні положення використовувалася ділильна головка ОДГ-10. На рис.1 α, β – кути повороту платформи (вектор вхідних даних), g – прискорення вільного падіння ($g = 9{,}81$ м/с^2).

Для проведення досліджень використаємо спрощену модель вихідного сигналу акселерометра:

$$\begin{aligned} u_{ax} &= u_{a0x} + k_{axx} a_x + k_{axy} a_y + k_{axz} a_z, \\ u_{ay} &= u_{a0y} + k_{ayx} a_x + k_{ayy} a_y + k_{ayz} a_z, \\ u_{az} &= u_{a0z} + k_{azx} a_x + k_{azy} a_y + k_{azz} a_z, \end{aligned} \tag{1}$$

де u_{ai} – вихідний сигнал акселерометра по i- й осі чутливості,

u_{a0i} – зсув нуля, k_{axi} – масштабний коефіцієнт, k_{axy}, k_{axz} – коефіцієнти перехресних зв'язків.

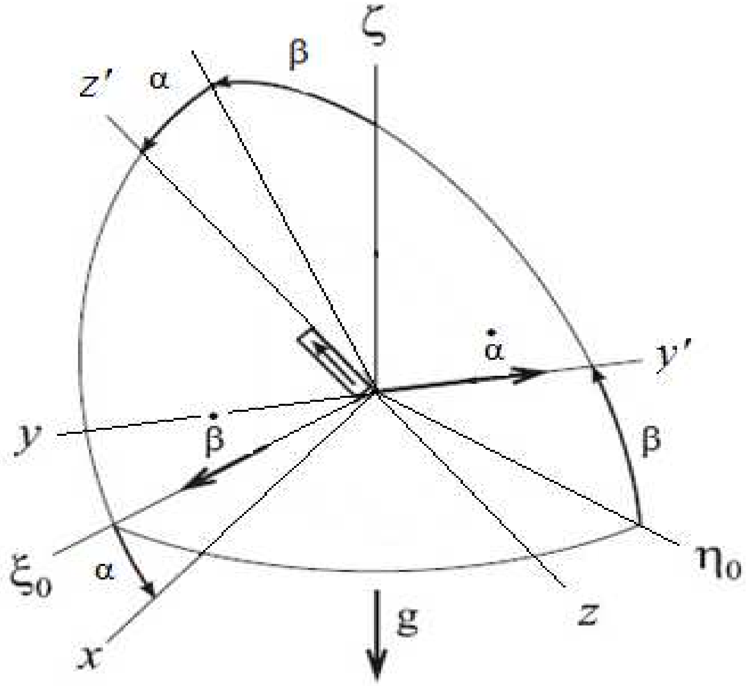

Рис.1. Кінематика поворотів платформи

Проекції уявного прискорення дорівнюють:

$$a_x = -g \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha;$$

$$a_y = -g \cdot \sin\beta;$$

$$a_z = -g \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta.$$

Для використання матричної форми алгоритму МНК, можемо записати модель вихідного сигналу (1) у наступному виді:

$$u_{ai} = \begin{bmatrix} 1 & \cos\alpha \cdot \cos\beta & \sin\alpha \cdot \cos\beta & \sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{a0i} & k_{aix} & k_{aiy} & k_{aiz} \end{bmatrix}^T,$$

$$N = \begin{bmatrix} 1 & \cos\alpha \cdot \cos\beta & \sin\alpha \cdot \cos\beta & \sin\beta \end{bmatrix},$$

де N – матриця параметрів вимірювання.

Алгоритм безпосереднього (пакетного) МНК для визначення коефіцієнтів моделі має вигляд:

$$\hat{x} = \left(N^T N\right)^{-1} N^T z,$$

де x – вектор оцінки коефіцієнтів, z – вектор вимірювання.
Особливістю даного методики є те, що кількість вимірів повинна бути не менше числа невідомих.

У методиці тестових поворотів акселерометр встановлюють так, щоб його вісь чутливості збігалася з напрямком вектора g. Провівши вимір, повертають акселерометр на 180^0 так, щоб вісь чутливості була протилежно спрямована вектору g (рис. 2).

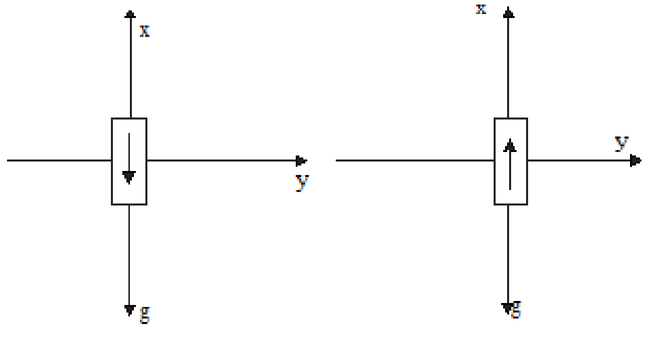

Рис. 2. Положення акселерометра

Введемо припущення, що вісь чутливості акселерометра ідеально збігається з напрямком вектора g.

Запишемо вихідні сигнали акселерометра:

$$u\downarrow = u_0 + k_x g,$$

$$u\uparrow = u_0 - k_x g.$$

Проводячи математичні операції (додавання, віднімання та ділення на два) над вихідними сигналами, можемо визначити масштабний коефіцієнт та зсув нуля датчика.

Результати калібрування одновісного блока акселерометрів Colibrys MS 9002d

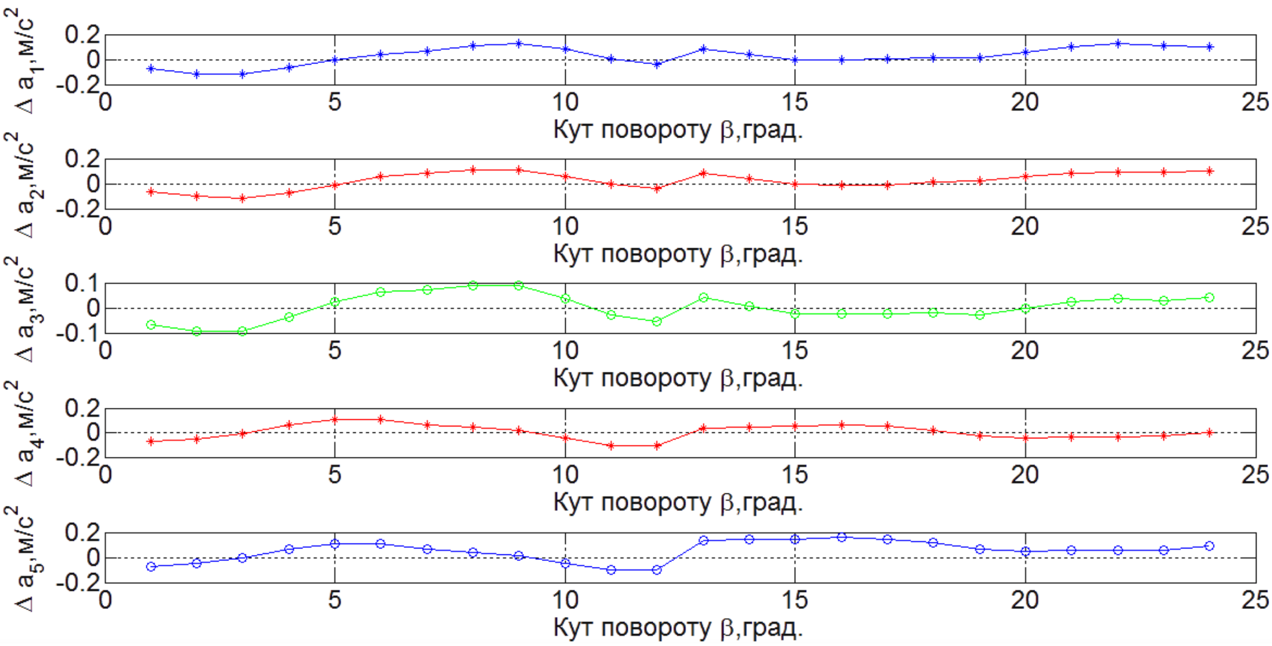

Рис. 3. Похибки вимірювання прискорення після калібрування за допомогою методики на основі МНК та його врахуванню

Результати значень похибок математичного сподівання (МС) та середнього квадратичного відхилення (СКВ) були занесені до табл. 2.

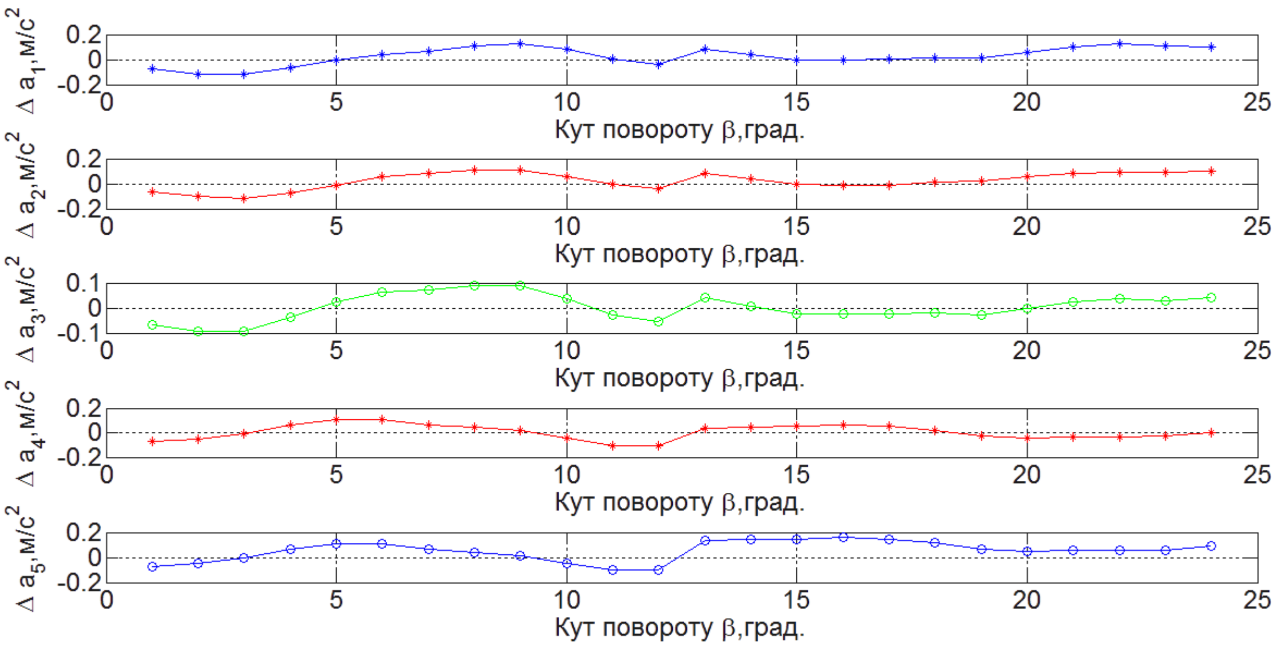

Рис. 4. Похибки вимірювання прискорення після калібрування за допомогою методики тестових поворотів та його врахуванню

Таблиця 2. Оцінка похибок вимірювання 5-ти акселерометрів

№ акселерометра	Методика МНК	Методика тестових поворотів
Значення математичного сподівання похибки, м/с^2		
1.	0.026	0.025
2.	0.022	0.021
3.	0.024	0.011
4.	0.005	0.003
5.	0.051	0.049
Середнє квадратичне відхилення, м/с^2		
1.	0.0721	0.0712
2.	0.0684	0.0682
3.	0.0519	0.0500
4.	0.0595	0.0577
5.	0.0796	0.0789

Висновки

Із одинадцяти часткових моделей, оцінених за допомогою МГУА, можна зробити висновок, що найпростішою та найкращою по критерію регулярності одночасно є четверта модель.

Значення похибок СКВ і математичного сподівання, що визначаються за вказаними методиками, практично однакові, але при використанні МНК зна-чення похибок СКВ і математичного сподівання більші, ніж їх значення похибок при використанні методики тестових поворотів. Для остаточного висновку потрібно провести значні статистичні дослідження, що є предметом подальших розвідок.

При використанні методики тестових поворотів, оцінка вихідних значень менш зміщена, дисперсія похибки вихідного сигналу теж.

Література

1. Аврутов В. В. Мікромеханічні акселерометри та їх випробування: навч. посібник / В. В. Аврутов, П. М. Бондар, В. В. Мелешко; Міністерство освіти і науки України, НТУУ "КПІ". – К.: Корнійчук, 2008. – 62 с.
2. Зайченко Ю. П. Основи проектування інтелектуальних систем: навч. посібник / Ю. П. Зайченко. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2004. – 35 с.
3. Таланчук П. М. Основы теории и проектирования измерительных приборов: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Приборостроение" / П. М. Таланчук, В. Т. Рущенко. – К.: Выща школа, 1989. – 454 с.

Надійшла до редакції
20 березня 2014 року