

УДК 531.383

СКАЛЯРНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ИНЕРЦИАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

Аврутов В. В., Головач С. В.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
г. Киев, Украина*

Рассмотрен скалярный метод контроля и диагностики блока гироскопов и акселерометров, входящих в состав бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). В основе метода лежит скалярный способ калибровки. Согласно методу, строятся алгоритмы контроля и диагностики. В результате проверки алгоритма контроля осуществляется контроль работоспособности всего блока гироскопов или акселерометров, а на основании алгоритма диагностики происходит определение отказавшего элемента и выясняется причина его отказа.

Процесс проверок состоит в сравнении вычисленных оценок значений нулевых сигналов, погрешностей масштабных коэффициентов и углов неортогональностей датчиков с их соответствующими паспортными параметрами с учетом допусков к этим параметрам, хранящимися во внутренней памяти БИНС. В результате сравнения делается вывод о работоспособности датчиков, а также определяется, в каком датчике БИНС произошел отказ.

***Ключевые слова:** инерциально-измерительный модуль, гироскопы, акселерометры, контроль, диагностика*

Введение

Ужесточение требований по надежности к инерциальным навигационным системам (ИНС) приводит к расширению программ испытаний и необходимости проведения контроля и диагностики ИНС.

Существуют различные методы контроля и диагностики навигационных систем. Наиболее простым и распространенным является встроенный контроль уровня выходных сигналов составных частей навигационной системы, который может быть реализован по технологии ВІТЕ (Built In Test Equipment) [1]. Кроме встроенного контроля, диагностирование ИНС реализуется оптимальными методами многоальтернативной фильтрации [2] и методами функциональных диагностических моделей [3].

Если последние методы, применяются для диагностирования инерциально-измерительного модуля ИНС и базируются на использовании избыточного количества чувствительных элементов, то методы оптимальной фильтрации применяются для диагностирования всей навигационной системы в целом и требуют использования информации других приборов и систем, построенных на отличных от инерциальных систем принципах.

Предлагается для контроля и диагностики инерциально-измерительного модуля (ИИМ) ИНС использовать совместно скалярный метод калибровки гироскопов и акселерометров [4-6], а также метод функциональных диагностических моделей, обходясь при этом обычным количеством чувствительных элементов – тремя гироскопами и тремя акселерометрами.

Постановка и решение задачи

Пусть заранее откалиброванный инерциально-измерительный модуль бесплатформенной ИНС представляет собой блок одноосных гироскопов G_x, G_y, G_z и акселерометров A_x, A_y, A_z , связанных с основанием прибора и осями $Oxyz$ (рис. 1).

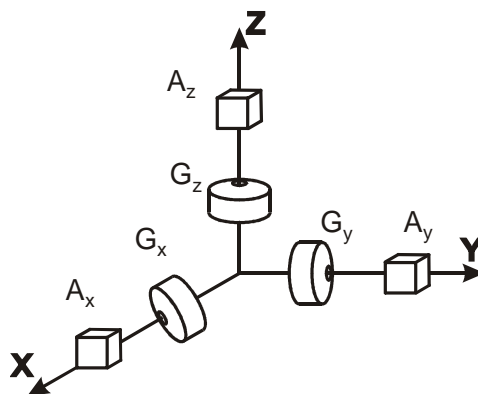


Рис. 1. Инерциально-измерительный модуль

Согласно скалярному способу калибровки, в качестве эталона измеряемой величины принимают не вектор, а скалярную величину. В гравитационном поле Земли для гироскопов такой скалярной величиной будет являться угловая скорость вращения Земли Ω , а для акселерометров – величина ускорения силы тяжести g . Опуская процедуру получения нормированных выходных сигналов гироскопов и акселерометров, запишем основное уравнение метода скалярной калибровки [5,6] для гироскопов:

$$\frac{1}{2}(\tilde{\omega}_x^2 + \tilde{\omega}_y^2 + \tilde{\omega}_z^2 - 1) = (\omega_{x0} + n_{\omega x})\bar{\Omega}_x + (\omega_{y0} + n_{\omega y})\bar{\Omega}_y + (\omega_{z0} + n_{\omega z})\bar{\Omega}_z + e_{\omega x}\bar{\Omega}_x^2 + e_{\omega y}\bar{\Omega}_y^2 + e_{\omega z}\bar{\Omega}_z^2 + (\delta_{\omega xz} - \delta_{\omega yz})\bar{\Omega}_x\bar{\Omega}_y + (\delta_{\omega zy} - \delta_{\omega xy})\bar{\Omega}_x\bar{\Omega}_z + (\delta_{\omega yx} - \delta_{\omega zx})\bar{\Omega}_y\bar{\Omega}_z, \quad (1)$$

где $\tilde{\omega}_x, \tilde{\omega}_y, \tilde{\omega}_z$ – нормированные выходные сигналы гироскопов; $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$ – нормированные нулевые сигналы гироскопов; $\bar{\Omega}_x, \bar{\Omega}_y, \bar{\Omega}_z$ – нормированные проекции угловой скорости вращения Земли; $e_{\omega x}, e_{\omega y}, e_{\omega z}$ – нормированные относительные погрешности масштабных коэффициентов гироскопов; $\delta_{\omega xz}, \delta_{\omega xy}, \delta_{\omega yz}, \delta_{\omega yx}, \delta_{\omega zy}, \delta_{\omega zx}$ – нормированные углы неортогональности осей гироскопов; $n_{\omega x}, n_{\omega y}, n_{\omega z}$ – нормированные случайные шумы гироскопов;

- а также для акселерометров:

$$\frac{1}{2}(\tilde{a}_x^2 + \tilde{a}_y^2 + \tilde{a}_z^2 - 1) = (a_{x0} + n_{ax})\bar{g}_x + (a_{y0} + n_{ay})\bar{g}_y + (a_{z0} + n_{az})\bar{g}_z + e_{ax}\bar{g}_x^2 + e_{ay}\bar{g}_y^2 + e_{az}\bar{g}_z^2 + (\delta_{axz} - \delta_{ayz})\bar{g}_x\bar{g}_y + (\delta_{azy} - \delta_{axy})\bar{g}_x\bar{g}_z + (\delta_{ayx} - \delta_{azx})\bar{g}_y\bar{g}_z, \quad (2)$$

где $\tilde{a}_x, \tilde{a}_y, \tilde{a}_z$ – нормированные выходные сигналы акселерометров; a_{x0}, a_{y0}, a_{z0} –

нормированные нулевые сигналы акселерометров, $\bar{g}_x, \bar{g}_y, \bar{g}_z$ – нормированные проекции ускорения силы тяжести; e_{ax}, e_{ay}, e_{az} – нормированные относительные погрешности масштабных коэффициентов акселерометров, $\delta_{axz}, \delta_{axy}, \delta_{ayz}, \delta_{ayx}, \delta_{azy}, \delta_{azx}$ – нормированные углы неортогональности осей акселерометров; n_{ax}, n_{ay}, n_{az} – нормированные случайные шумы акселерометров.

Благодаря одинаковой структуре уравнений (1) и (2), для получения алгоритма скалярного метода контроля и диагностики инерциально-измерительного модуля бесплатформенной ИНС достаточно рассмотреть алгоритм контроля и диагностики одного из блоков, например, гироскопов.

Как видно из уравнений (1), (2), разность между скалярной величиной нормированного измеряемого вектора и его действительным значением, равным единице, пропорциональна погрешностям блока гироскопов. Коэффициентами в этой зависимости являются нормированные значения угловой скорости $\bar{\Omega}_x, \bar{\Omega}_y, \bar{\Omega}_z$, их степени и произведения.

На основании основного уравнения метода скалярной калибровки (1) построим алгоритм контроля или обнаружения отказа блока гироскопов. Для этого на k -ом шаге квантования можно сформировать следующий предикат для момента времени t_k :

$$F_0(t_k) = \Lambda_0 \left\{ \frac{1}{2} (\tilde{\omega}_x^2 + \tilde{\omega}_y^2 + \tilde{\omega}_z^2 - 1) \leq \lambda_0 \right\} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Здесь в правой части значение «1» – означает работоспособное состояние блока гироскопов, значение «0» – его отказ, λ_0 – граничное значение функции $\frac{1}{2} (\tilde{\omega}_x^2 + \tilde{\omega}_y^2 + \tilde{\omega}_z^2 - 1)$.

С геометрической точки зрения алгоритм контроля блока гироскопов (3) представляет собой сферическую оболочку, толщина которой равна $\sqrt{2\lambda_0}$.

Если скалярное значение суммы нормированных выходных сигналов блока гироскопов, а точнее значение функции $(\tilde{\omega}_x^2 + \tilde{\omega}_y^2 + \tilde{\omega}_z^2 - 1)$ не превышает величины $2\lambda_0$, значит, блок гироскопов находится в работоспособном состоянии. Если нет, то произошел отказ.

После решения задачи контроля – обнаружения отказа всего блока гироскопов необходимо диагностировать место отказа и выяснить его причину. Для этого необходимо на основании уравнения (1) составить и решить систему уравнений для различных положений блока гироскопа.

В уравнениях (1) искомыми неизвестными являются 9 параметров, которые искажают выходные сигналы блока гироскопов. Шесть из них представляют собой разности углов неортогональности осей приборов.

Для того, чтобы на основе основного уравнения скалярной калибровки (1) сформировать систему алгебраических уравнений надо поворачивать блок ги-

роскопов вокруг как минимум двух направлений на фиксированные углы и в каждом положении получать нормированные выходные сигналы. Для решения уравнений (1) требуется минимум девять положений блока гироскопов, т.е. число фиксированных поворотов (испытаний) n должно быть $n \geq 9$.

После осуществления этих поворотов и получения набора данных, можно представить уравнения (1) в матричной форме:

$$\tilde{\omega} = \Omega \cdot e, \quad (4)$$

где $\tilde{\omega}$ – вектор-столбец размерности $(n \times 1)$ нормированных выходных сигналов блока гироскопов:

$$\tilde{\omega} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(\tilde{\omega}_{x1}^2 + \tilde{\omega}_{y1}^2 + \tilde{\omega}_{z1}^2 - 1) \\ \frac{1}{2}(\tilde{\omega}_{x2}^2 + \tilde{\omega}_{y2}^2 + \tilde{\omega}_{z2}^2 - 1) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{1}{2}(\tilde{\omega}_{xn}^2 + \tilde{\omega}_{yn}^2 + \tilde{\omega}_{zn}^2 - 1) \end{bmatrix},$$

Ω – матрица нормированных проекций угловой скорости $\bar{\Omega}$ размерности $(n \times 9)$:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \bar{\Omega}_{x1} & \bar{\Omega}_{y1} & \bar{\Omega}_{z1} & \bar{\Omega}_{x1}^2 & \bar{\Omega}_{y1}^2 & \bar{\Omega}_{z1}^2 & \bar{\Omega}_{x1}\bar{\Omega}_{y1} & \bar{\Omega}_{x1}\bar{\Omega}_{z1} & \bar{\Omega}_{y1}\bar{\Omega}_{z1} \\ \bar{\Omega}_{x2} & \bar{\Omega}_{y2} & \bar{\Omega}_{z2} & \bar{\Omega}_{x2}^2 & \bar{\Omega}_{y2}^2 & \bar{\Omega}_{z2}^2 & \bar{\Omega}_{x2}\bar{\Omega}_{y2} & \bar{\Omega}_{x2}\bar{\Omega}_{z2} & \bar{\Omega}_{y2}\bar{\Omega}_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \bar{\Omega}_{xn} & \bar{\Omega}_{yn} & \bar{\Omega}_{zn} & \bar{\Omega}_{xn}^2 & \bar{\Omega}_{yn}^2 & \bar{\Omega}_{zn}^2 & \bar{\Omega}_{xn}\bar{\Omega}_{yn} & \bar{\Omega}_{xn}\bar{\Omega}_{zn} & \bar{\Omega}_{yn}\bar{\Omega}_{zn} \end{bmatrix};$$

e – вектор-столбец искомым параметров размерности (9×1) :

$$e = \left[\omega_{x0} + n_x, \omega_{y0} + n_y, \omega_{z0} + n_z, e_{\omega x}, e_{\omega y}, e_{\omega z}, \delta_1, \delta_2, \delta_3 \right]^T,$$

где $\delta_1 = \delta_{\omega xz} - \delta_{\omega yz}$, $\delta_2 = \delta_{\omega zy} - \delta_{\omega xy}$, $\delta_3 = \delta_{\omega yx} - \delta_{\omega zx}$.

Решая матричное уравнение (4) методом наименьших квадратов, получим оценки значений e :

$$\hat{e} = (\Omega^T \cdot \Omega)^{-1} \cdot \Omega^T \cdot \tilde{\omega}. \quad (5)$$

Для устранения влияния случайных шумов, при каждом измерении выходные сигналы усредняют, а так как обычно математическое ожидание шумов равно нулю, то оценки параметров \hat{e} не содержат случайных помех:

$$\hat{e} = \left[\hat{\omega}_{x0}, \hat{\omega}_{y0}, \hat{\omega}_{z0}, \hat{e}_{\omega x}, \hat{e}_{\omega y}, \hat{e}_{\omega z}, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2, \hat{\delta}_3 \right]^T.$$

После нахождения \hat{e} , можно воспользоваться следующим набором предикатов, выражающих алгоритм диагностики блока гироскопов:

$$F_1(t_k) = \Lambda_1 \{ \hat{\omega}_{x0} \leq \lambda_1 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; \quad F_4(t_k) = \Lambda_4 \{ \hat{e}_{\omega x} \leq \lambda_4 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; \quad F_7(t_k) = \Lambda_7 \{ \hat{\delta}_1 \leq \lambda_7 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases};$$

$$F_2(t_k) = \Lambda_2 \{ \hat{\omega}_{y0} \leq \lambda_2 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_5(t_k) = \Lambda_5 \{ \hat{e}_{\omega y} \leq \lambda_5 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_8(t_k) = \Lambda_8 \{ \hat{\delta}_2 \leq \lambda_8 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases};$$

$$F_3(t_k) = \Lambda_3 \{ \hat{\omega}_{z0} \leq \lambda_3 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_6(t_k) = \Lambda_6 \{ \hat{e}_{\omega z} \leq \lambda_6 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_9(t_k) = \Lambda_9 \{ \hat{\delta}_3 \leq \lambda_9 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Данные предикаты выражают алгоритм диагностики блока гироскопов ИИМ. Пусть λ_i - некоторые граничные значения. Если разница между полученными оценками \hat{e} погрешностей и их номинальными значениями находится в рамках между $\pm\lambda_i$, следовательно, гироскопы находятся в работоспособном состоянии. Если нет, то произошел отказ. Элемент или элементы вектора-столбца \hat{e} , которые приводят к выходу за рамки $\pm\lambda_i$, указывают, не только какой именно гироскоп отказал, но и по какой причине: из-за несоответствия оценок нулевого сигнала, масштабного коэффициента или углов неортогональностей их паспортным значениям.

На рис. 2 изображена блок-схема алгоритма контроля и диагностики блока гироскопов ИИМ. Здесь цифрами 1,2,3 в кружках обозначены отказы гироскопов, вызванные несоответствием нулевого сигнала, цифрами 4,5,6 – отказы гироскопов, вызванные несоответствием погрешностей масштабных коэффициентов, а цифрами 7,8,9 - отказы гироскопов, вызванные несоответствием углов невыставки гироскопов.

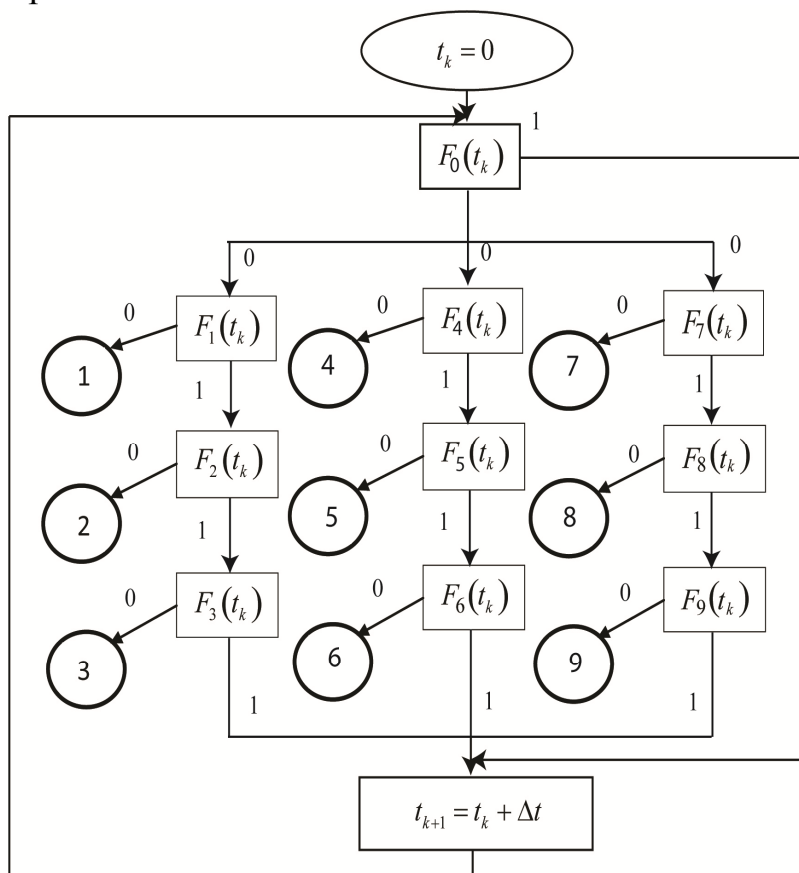


Рис. 2. Блок-схема алгоритма контроля и диагностики блока гироскопов ИИМ

Аналогичная схема может быть построена для блока акселерометров ИИМ. Отличие ее будет состоять в выражениях предикатов (3) и (6). Так для блока акселерометров алгоритм контроля или обнаружения отказов примет вид

$$F_0(t_k) = \Lambda_0 \left\{ \frac{1}{2} (\tilde{a}_x^2 + \tilde{a}_y^2 + \tilde{a}_z^2 - 1) \leq \lambda_0 \right\} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \quad (7)$$

Алгоритм диагностики блока акселерометров будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} F_1(t_k) &= \Lambda_1 \{ |\hat{a}_{x0}| \leq \lambda_1 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_4(t_k) = \Lambda_4 \{ |\hat{e}_{ax}| \leq \lambda_4 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_7(t_k) = \Lambda_7 \{ |\hat{\delta}_4| \leq \lambda_7 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; \\ F_2(t_k) &= \Lambda_2 \{ |\hat{a}_{y0}| \leq \lambda_2 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_5(t_k) = \Lambda_5 \{ |\hat{e}_{ay}| \leq \lambda_5 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_8(t_k) = \Lambda_8 \{ |\hat{\delta}_5| \leq \lambda_8 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (8) \\ F_3(t_k) &= \Lambda_3 \{ |\hat{a}_{z0}| \leq \lambda_3 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_6(t_k) = \Lambda_6 \{ |\hat{e}_{az}| \leq \lambda_6 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}; F_9(t_k) = \Lambda_9 \{ |\hat{\delta}_6| \leq \lambda_9 \} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \end{aligned}$$

Если проверка алгоритма контроля (7) устанавливает факт отказа, или работоспособности всего блока акселерометров, то проверка алгоритма диагностики блока акселерометров (8) позволяет установить какой именно акселерометр отказал и выяснить причину его отказа.

Выводы

Предложен скалярный метод контроля и диагностики блока гироскопов и акселерометров, входящих в состав бесплатформенной ИНС. В основе метода лежит скалярный способ калибровки. Согласно методу, строятся алгоритмы контроля и диагностики. В результате проверки алгоритма контроля осуществляется контроль работоспособности всего блока гироскопов или акселерометров, а на основании алгоритма диагностики происходит определение отказавшего элемента и выясняется причина его отказа.

Процесс проверок состоит в сравнении вычисленных оценок значений нулевых сигналов, погрешностей масштабных коэффициентов и углов неортогональностей датчиков с их соответствующими паспортными параметрами с учетом допусков к этим параметрам, хранящимися во внутренней памяти БИНС. В результате сравнения делается вывод о работоспособности датчиков, а также определяется, в каком датчике БИНС произошел отказ.

Литература

1. Аврутов В. В., Надежность и диагностика приборов и систем / В. В. Аврутов, Н. И. Бурау. – Киев: НТУУ «КПИ», 2014. – 156 с. Электронный ресурс: <http://kafpson.kpi.ua/Arhiv/Method/diagnost.pdf>
2. Дмитриев С. П. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 207 с.
3. Кулик А. С. Диагностирование бесплатформенной инерциальной системы беспилотного летательного аппарата с глубиной до места отказа / А. С. Кулик, С. Н. Фирсов, До Куок

- 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*

© Аврутов В. В., Головач С. В., 2014

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].