

УДК 621.396.988.6:629.12

А.А. ОДИНЦОВ

ИСПЫТАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА КАЧАЮЩЕМСЯ ОСНОВАНИИ

Рассматривается методика испытаний морской бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) на качающемся основании в условиях стенда. Находятся выражения, позволяющие определить погрешности ряда параметров БИНС, связанных с ориентацией объекта. Оцениваются ошибки, вызванные неточностью установки изделия на качающийся стенд и погрешностями самого стенда.

Бесплатформенная инерциальная навигационная система, как и любая ИНС, проходит стендовые испытания на заводе-изготовителе и натурные испытания на морском объекте. При этом определение параметров, связанных с ориентацией объекта, практически всегда, производится только на заводе, оборудованном специальными стендами, имитирующими качку морского объекта.

Использование несложных приспособлений позволяет отнести центр масс испытуемого прибора на достаточное расстояние от центра качаний стенда и тем самым совместить испытания на качке с орбитальным движением объекта, что позволит сократить время испытаний и тем самым уменьшить расходы на их проведение.

Целью настоящей работы являются проверка погрешностей выходных параметров БИНС, связанных с ориентацией в условиях качки и рыскания, а также оценка точности выставки центрального прибора БИНС на стенде и оценка точности самого стенда.

Стенд качки и рыскания представляет собой трехосный стенд, содержащий два кольца и площадку, на которую устанавливается испытуемый прибор. Наружная ось стенда расположена вертикально и представляет собой ось рыскания и курса. Вторая ось стенда расположена горизонтально, ее подшипники установлены в наружном кольце стенда и обеспечивают поворот прибора на угол килевой качки. Третья ось стенда представляет собой ось бортовой качки, подшипники этой оси установлены во втором кольце перпендикулярно оси килевой качки.

Для дальнейшего изложения введем следующие системы координат:

$OENH$ – географический горизонтный трехгранник; $OX^0Y^0Z^0$ – горизонтная система координат, связанная с исходным положением стенда; O_1XYZ – система координат, связанная с внутренней площадкой стенда; $O_1X_1Y_1Z_1$ – система координат, жестко связанная с координатными осями испытуемого прибора. Ее оси отклонены на малые углы от соответствующих осей системы O_1XYZ .

Взаимное положение введенных систем координат показано на рис. 1.

Координатные оси O_1XYZ развернуты относительно системы координат $OX^0Y^0Z^0$ на три угла φ_p, ψ, θ соответственно вокруг осей Z^0 , промежуточной оси X' и оси Y т.е. вектор угловой скорости поворота осей O_1XYZ относительно $OX^0Y^0Z^0$ имеет вид

$$\vec{\omega} = \dot{\varphi}_p \vec{z}_0^0 + \dot{\psi} \vec{x}_0' + \dot{\theta} \vec{y}_0 \quad (1)$$

где $\vec{z}_0^0, \vec{x}_0', \vec{y}_0$ – единичные орты соответствующих осей.

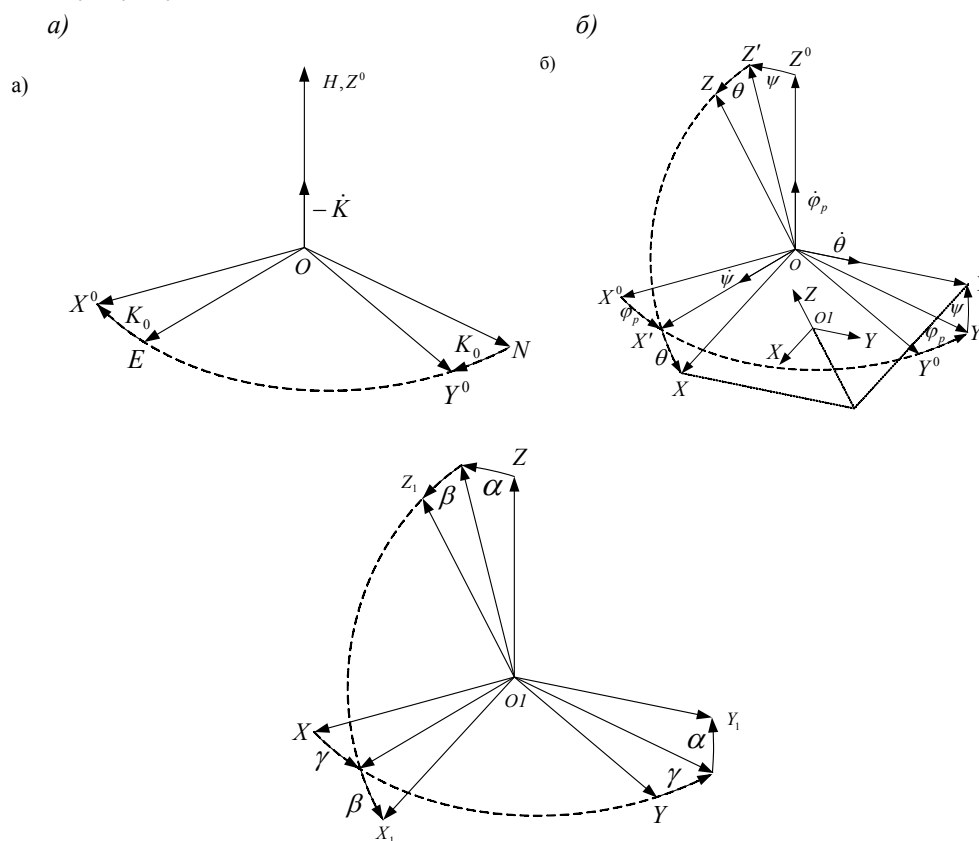


Рис. 1. Системы координат

Запишем следующие матричные соотношения, связывающие введенные координатные базисы:

$$[X^0Y^0Z^0]^T = B[E N H]^T; [X Y Z]^T = A [X^0 Y^0 Z^0]^T; [X Y Z]^T = AB [E N H]^T, \quad (2)$$

где «Т» – символ транспонирования.

Центр масс испытуемого прибора определяется точкой O_1 или радиус-вектором $\vec{r}_c$, проведенным из точки O в точку O_1 с проекциями на оси подвижной системы координат $OXYZ$ соответственно X, Y, Z :

$$\vec{r}_c = x \cdot \vec{x}_0 + y \cdot \vec{y}_0 + z \cdot \vec{z}_0,$$

где $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$ – единичные орты базиса XYZ .

В соответствии с [1] введем понятие отображения вектора $\bar{r}_C$ на некоторый базис, например на базис $OXYZ$, под которым будем понимать матрицу-столбец, составленную из проекций этого вектора на данный базис:

$$\bar{R}_C = [x, y, z]^T \quad (3)$$

Приращения вектора найдем в виде:

$$\Delta \bar{R}_I = \bar{R}_I - \bar{R}_C = (A^T - I) \bar{R}_C, \quad (4)$$

где $I = A^T(t_0)$, и после перепроектирования $\Delta \bar{R}_I$ на оси $OENH$ получим

$$\Delta \bar{R}_\Gamma = B^T \Delta \bar{R}_I = B^T (A^T - I) \bar{R}_C, \quad (5)$$

$\Delta \bar{R}_I$, $\Delta \bar{R}_\Gamma$ – отображения приращений векторов на базисы $X^0 Y^0 Z^0$ и ENH .

Выражения (5) определяют перемещения центра масс испытуемого прибора, вызванные качкой и рысканием, в проекциях на оси систем координат $X^0 Y^0 Z^0$ и ENH соответственно.

Аналогичные перемещения на оси связанной системы координат очевидно будут

$$\Delta \bar{R}_C = A(A^T - I) \bar{R}_C = (I - A) \bar{R}_C \quad (6)$$

где $\Delta \bar{R}_C$ – отображение приращений вектора $\bar{r}_C$ на базис XYZ .

Перейдем к определению линейных скоростей центра масс прибора, вызванных качкой. Линейная скорость в соответствии с [2], вызванная вращением, определяется выражением

$$\bar{V}_C = \bar{\omega} \times \bar{r}_C, \quad (7)$$

где $\bar{r}_C$ – радиус-вектор центра масс прибора БИНС; $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения связанной системы координат O_1XYZ относительно базисов $OX^0 Y^0 Z^0$ или $OENH$; $\bar{V}_C$ – вектор линейной скорости конца радиус-вектора $\bar{r}_C$. Проекции угловых скоростей подвижной системы координат, вызванные качкой и рысканием на ее оси и на оси горизонтной географической системы координат [см. рис. 1, б], очевидно будут:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \dot{\psi} \cos \theta - \dot{\phi}_p \sin \theta \cos \psi; \quad \Omega_1 = \dot{\psi} \cos(\phi_p - K_0) - \dot{\theta} \cos \psi \sin(\phi_p - K_0); \\ \omega_2 &= \dot{\theta} + \dot{\phi}_p \sin \psi; \quad \Omega_2 = \dot{\psi} \sin(\phi_p - K_0) + \dot{\theta} \cos \psi \cos(\phi_p - K_0); \\ \omega_3 &= \dot{\phi}_p \cos \theta \cos \psi + \dot{\psi} \sin \theta; \quad \Omega_3 = \dot{\phi}_p + \dot{\theta} \sin \psi. \end{aligned} \quad (8)$$

Пользуясь соотношениями, полученными в работе [2] и вышеприведенными выражениями, получим линейные перемещения и линейные скорости, вызванные качкой и рысканием, на оси различных систем координат.

Для подвижного базиса имеем:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x - (\cos \theta \cos \phi - \sin \theta \sin \psi \sin \phi_p)x - (\cos \theta \sin \phi_p + \sin \theta \sin \psi \cos \phi_p)y + \sin \theta \cos \psi z; \\ \Delta y &= y + \cos \psi \sin \phi_p x - \cos \psi \cos \phi_p y - \sin \psi z; \\ \Delta z &= z - (\sin \theta \cos \phi_p + \cos \theta \sin \psi \sin \phi_p)x - (\sin \theta \sin \phi_p - \cos \theta \sin \psi \cos \phi_p)y - \cos \theta \cos \psi z. \\ V_{xc} &= (\dot{\theta} + \dot{\phi}_p \sin \psi)z - (\dot{\phi}_p \cos \theta \cos \psi + \dot{\psi} \sin \theta)y; \end{aligned}$$

$$V_{yc} = (\dot{\phi}_p \cos \theta \cos \psi + \dot{\psi} \sin \theta)x - (\dot{\psi} \cos \theta - \dot{\phi}_p \sin \theta \cos \psi)z; \quad (9)$$

$$V_{zc} = (\dot{\psi} \cos \theta - \dot{\phi}_p \sin \theta \cos \psi)y - (\dot{\theta} + \dot{\phi}_p \sin \psi)x.$$

Для исходной системы координат:

$$\begin{aligned} \Delta x_I &= (\cos \theta \cos \varphi_p - \sin \theta \sin \psi \sin \varphi_p)x - \cos \psi \sin \varphi_p y + (\sin \theta \cos \varphi_p + \cos \theta \sin \psi \sin \varphi_p)z - x; \\ \Delta y_I &= (\cos \theta \sin \varphi_p + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi_p)x + \cos \psi \cos \varphi_p y + (\sin \theta \sin \varphi_p - \cos \theta \sin \psi \cos \varphi_p)z - y; \\ \Delta z_I &= -\sin \theta \cos \psi x + \sin \psi y + \cos \theta \cos \psi z - z. \end{aligned} \quad (10)$$

$$[V_{Ix}, V_{Iy}, V_{Iz}]^T = A^T [V_{xc}, V_{yc}, V_{zc}],$$

где V_{xc} , V_{yc} , V_{zc} определяются выражениями (9).

Для горизонтной географической системы координат имеем:

$$\begin{aligned} [\Delta x_\Gamma, \Delta y_\Gamma, \Delta z_\Gamma]^T &= B^T [\Delta x_I, \Delta y_I, \Delta z_I]; \\ [V_{\Gamma x}, V_{\Gamma y}, V_{\Gamma z}]^T &= B^T A^T [V_{xc}, V_{yc}, V_{zc}], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta x_I, \Delta y_I, \Delta z_I$ и V_{xc}, V_{yc}, V_{zc} находятся из выражений (9).

$$\begin{aligned} A^T &= \begin{bmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi_p - \sin \theta \sin \psi \sin \varphi_p & -\cos \psi \sin \varphi_p & \sin \theta \cos \varphi_p + \cos \theta \sin \psi \sin \varphi_p \\ \cos \theta \sin \varphi_p + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi_p & \cos \psi \cos \varphi_p & \sin \theta \sin \varphi_p - \cos \theta \sin \psi \cos \varphi_p \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \\ B^T &= \begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos K_0 & \sin K_0 & 0 \\ -\sin K_0 & \cos K_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

Заметим, что выражение A^T получается из [2] заменой $K = -\varphi_p$.

В частном случае при $X = Y = 0$ из выведенных соотношений получаем:
для подвижного базиса:

$$\Delta x = -\sin \theta \cos \psi z; \Delta y = -\sin \psi z; z = z(1 - \cos \theta \cos \psi). \quad (13)$$

$$V_{xc} = (\dot{\theta} + \dot{\phi}_p \sin \psi)z; V_{yc} = (\dot{\psi} \cos \theta - \dot{\phi}_p \sin \theta \cos \psi)z; V_{zc} = 0.$$

для географической системы координат:

$$\begin{aligned} \Delta x_\Gamma &= [\sin \theta \cos(\varphi_p - K_0) + \cos \theta \sin \psi \sin(\varphi_p - K_0)]z; \\ \Delta y_\Gamma &= [\sin \theta \sin(\varphi_p - K_0) - \cos \theta \sin \psi \cos(\varphi_p - K_0)]z; \\ \Delta z_\Gamma &= (\cos \theta \cos \psi - 1)z \\ \begin{bmatrix} V_{\Gamma x} \\ V_{\Gamma y} \\ V_{\Gamma z} \end{bmatrix} &= B^T A^T \begin{bmatrix} (\dot{\theta} + \dot{\phi}_p \sin \psi)z \\ (-\dot{\psi} \cos \theta + \dot{\phi}_p \sin \theta \cos \psi)z \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для получения перемещений, составляющих 1,5-2,0 м, и соответственно линейных скоростей 1,5-2 м/с испытуемый прибор БИНС целесообразно установить таким образом, чтобы центр его масс находился на расстоянии от центра качаний не менее чем на 2,5 м, т.е. $r_c = z \approx 2,5$ м.

В качестве такой подставки может быть использована металлическая труба, имеющая необходимую жесткость и соответствующие посадочные площадки для БИНС и для крепления на стенде. Тогда при бортовой качке с амплитудой $40 - 45^\circ$ и периодом 6 с перемещения центра масс прибора и его линейная скорость могут достигать $\pm 1,75$ м и $\pm 2,5$ м/с.

Видно, что это в основном относится к горизонтальным составляющим скорости БИНС. Для получения приемлемых значений вертикальных перемещений и скоростей подставка под БИНС должна состоять из вертикальной части, примерно равной 1,5-1,8 м, и горизонтальной части, равной 2 – 2,5 м, т.е. $r_c = x \cdot \bar{x}_0 + z \cdot \bar{z}_0$, где $z = 1,5 - 1,8$ м; $x = 2,5$ м.

В связи с тем что информация об угловой скорости вращения осей стенда отсутствует, необходимо ее получать расчетным путем, исходя из задаваемой амплитуды качки и рыскания и периода задаваемых колебаний.

Стенд качки и рыскания может задавать колебательное движение, изменяющееся по гармоническому закону вокруг каждой из трех осей

$$\varphi_p = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1); \quad \psi = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2); \quad \theta = A_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3), \quad (15)$$

где $\omega_j = \frac{2\pi}{T_j}$ ($j = 1-3$).

Точность измерения углового положения подвижных частей стенда его датчиками угла составляет 10-15 угл. с.

Фигурирующие в вышеприведенных выражениях угловые скорости качки и рыскания определяются расчетным путем из выражений (15) путем дифференцирования соответствующих углов со скользящим осреднением т.е.

$$\dot{\varphi}_p(i) = \sum_{i=n}^{i=n+m} \frac{\varphi_p(i+1) - \varphi_p(i)}{\Delta t}; \quad \dot{\psi}(i) = \sum_{i=n}^{i=n+m} \frac{\psi(i+1) - \psi(i)}{\Delta t}; \quad \dot{\theta}(i) = \sum_{i=n}^{i=n+m} \frac{\theta(i+1) - \theta(i)}{\Delta t}, \quad (16)$$

где n – принимает значения от 1 до $n_k - m$; n_k – количество отсчетов в реализации; m – коэффициент, характеризующий осреднение при скользящем среднем;

Методика проверки параметров ориентации сводится к определению разности между выходными показаниями БИНС и показаниями, снимаемыми с датчиков углов стенда в синхронном режиме, и проведению последующих расчетов в соответствии с вышеприведенными выражениями.

Перейдем к оценке погрешностей методики определения параметров ориентации, в качестве которых примем :

- неточность угловой установки прибора по отношению к осям стенда;
- погрешности определения отстояния центра масс прибора относительно точки пересечения осей стенда;
- ошибки синхронизации времени съема данных;

Оценку погрешностей методики проведем, используя упрощенный вариант полученных соотношений, полагая, что отстояние пробора от центра качаний $X = Y = 0$, рыскание отсутствует, т.е. $\varphi_p = \dot{\varphi}_p = 0$ и $K_0 = 0$. Такой анализ позволит существенно сократить выкладки и не уменьшит общности полученных выводов.

Из приведенных выше соотношений для рассматриваемого случая имеем:

$$\omega_1 = \dot{\psi} \cos \theta; \quad \omega_2 = \dot{\theta}; \quad \omega_3 = \dot{\psi} \sin \theta;$$

$$\Omega_1 = \dot{\psi}; \quad \Omega_2 = \dot{\theta} \cos \psi; \quad \Omega_3 = \dot{\theta} \sin \psi;$$

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= \sin \theta \cos \psi z ; \Delta y = -\sin \psi z ; \Delta z = (1 - \cos \theta \cos \psi) z ; \\
 V_{xc} &= \dot{\theta} z ; V_{yc} = -\dot{\psi} \cos \theta z ; V_{zc} = 0 ; \\
 \Delta x_{\Gamma} &= \sin \theta z ; \Delta y_{\Gamma} = -\cos \theta \sin \psi z ; \Delta z_{\Gamma} = (\cos \theta \cos \psi - 1) z . \\
 V_{\Gamma x} &= \dot{\theta} \cos \theta z ; V_{\Gamma y} = (\dot{\theta} \sin \theta \sin \psi - \dot{\psi} \cos \theta \cos \psi) z ; \\
 V_{\Gamma z} &= -(\dot{\theta} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \psi) z
 \end{aligned} \tag{17}$$

Матрица направляющих косинусов между базисами $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ и $O_1 XYZ$ [см. рис 1, в] имеет вид:

$$\begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \tag{18}$$

Будем полагать $\alpha = \beta = \gamma$.

Оценки точности угловых и линейных величин, вызванных не точной ориентацией прибора относительно стенда:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{\theta}_1 &\approx \dot{\theta} \alpha ; \Delta \theta_1 \approx \theta \alpha ; \\
 \Delta_1(\Delta x) &\approx \sin \theta \cdot z \cdot \alpha ; \Delta V_1 \approx \dot{\theta} z \cdot \alpha ;
 \end{aligned} \tag{19}$$

Погрешность, вызванная ошибкой отстояния центра масс прибора от точки пересечения осей стенда, легко находится из (19):

$$\Delta_2(\Delta x) \approx \sin \theta \cdot \Delta z ; \Delta V_2 \approx \dot{\theta} \cdot \Delta z . \tag{20}$$

Ошибка от неточности синхронизации показаний БИНС и стенда можно оценить из выражений:

$$\begin{aligned}
 \Delta \theta_3 &\approx A \omega \Delta t ; \Delta \dot{\theta}_3 \approx A \omega^2 \Delta t ; \\
 \Delta_3(\Delta x) &\approx A z \omega \cdot \Delta t \cos(A \sin \omega t) \cos \omega t ; \Delta V_3 \approx A \omega^2 \Delta t \cdot z .
 \end{aligned} \tag{21}$$

где Δt – ошибка синхронизации; A , ω – амплитуда и круговая частота бортовой качки.

Рассмотрим теперь вопросы, связанные с погрешностями, вносимыми стендом к которым отнесем:

- погрешность списывания углов датчиками стенда.
- неперпендикулярность осей стенда;

Если упомянутые величины малы, то их можно не учитывать; если же они превышают допустимые пределы, то их необходимо компенсировать при постобработке.

Погрешности списывания углов стенда вносят ошибки, которые можно оценить в соответствие с выражениями:

$$\begin{aligned}
 \Delta \theta_4 &\approx \Delta \theta_{\text{Ду}} ; \Delta \dot{\theta}_4 \approx \Delta \theta_{\text{Ду}} \omega ; \\
 \Delta_4(\Delta x) &\approx \Delta \theta_{\text{Ду}} \cdot z \cos(A \sin \omega t) \sin \omega t ; \Delta V_4 \approx \Delta \theta_{\text{Ду}} \omega \cdot z .
 \end{aligned} \tag{22}$$

На рис. 2 показаны системы координат соответствующие случаю неортогональности осей стенда, измеряемой углом γ_c , который полагаем не более 5–10 угл. мин. Обозначим углы, снимаемые с датчиков угла, ψ_c и θ_c , а углы снимаемые с БИНС, ψ_B и θ_B .

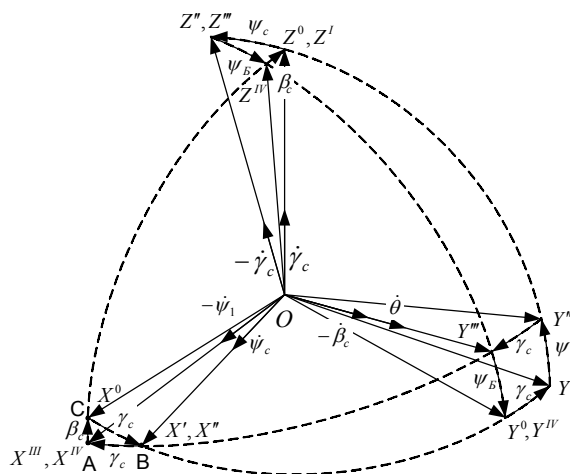


Рис. 2. Системы координат

Используя метод преобразования координат, получим

$$\psi_c \approx \psi_B; \theta_c \approx \theta_B - \gamma_c \sin \psi_c. \quad (23)$$

Для угловых скоростей, как это видно из рис. 2, получим:

$$\dot{\psi}_c \approx \dot{\psi}_B; \quad \dot{\theta}_c \approx \dot{\theta}_B - \gamma \dot{\psi}_c. \quad (24)$$

Оценим точность контроля линейных скоростей БИНС, вызванных погрешностью определения угловой скорости стенда. Из выражения (9) можно получить:

$$\Delta V_c = \Delta \omega \cdot r_c + \Delta r_c \cdot \omega \quad , \quad (25)$$

где Δ – обозначены погрешности соответствующих величин.

При оценке допустимых погрешностей методики и стенда зададимся следующими числовыми данными:

- максимальная угловая скорость, задаваемая стендом $\dot{\theta}_{\max} = 30 \text{ град/с} \approx 0,5 \text{ рад/с}$;
- погрешность определения угловой скорости стенда в соответствии с выражением (18) не превышает 0.1%;
- максимальный угол наклона стенда $\theta_{\max} = 30^\circ \approx 0,5 \text{ рад}$;
- отстояние центра масс прибора от точки пересечения осей стенда $Z = 2 \text{ м}$;
- максимально допустимые погрешности БИНС:

по углам $0.1^0 = 6'$;

по угловым скоростям $0,1 \text{ град/с} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с}$;

по линейным скоростям 0,1 м/с;

по перемещениям 0,05 м.

Считаем, что погрешности методики должны быть в совокупности меньше допустимых соответствующих погрешностей БИНС по крайней мере в 3 раза.

Будем полагать, что :

- точность угловой ориентации прибора по отношению к стенду составляет не более 0.001 рад;
- погрешность определения точек расположения акселерометров от центра качаний стенда не превышает 0,02 м;
- ошибка синхронизации данных не более 1 мс;

- погрешность списывания углов с осей станда составляет 20 угл.с;
- неперпендикулярность осей станда не более 0,001 рад.

Результаты расчетов сведены в таблицу

№	Наименование погрешности	Номер расчетной формулы	Величина ошибки
1	Ошибка угловой ориентации прибора по отношению к станду	(21)	$\Delta\theta_1 = 1,8$ угл.мин $\Delta\dot{\theta}_1 = 0,03$ град/с $\Delta_1(\Delta x) = 0,001$ м $\Delta V_1 = 0,001$ м/с
2	Погрешность определения точек отстояния акселерометров от центра качаний станда	(22)	$\Delta_2(\Delta x) = 0,01$ м $\Delta V_2 = 0,01$ м/с
3	Ошибка от неточности синхронизации данных	(23)	$\Delta\theta_3 = 1,8$ угл.мин $\Delta\dot{\theta}_3 = 0,03$ град/с $\Delta_3(\Delta x) = 0,001$ м $\Delta V_3 = 0,001$ м/с
4	Погрешности списывания углов станда	(24)	$\Delta\theta_4 = 20$ угл.с $\Delta\dot{\theta}_4 = 0,003$ град/с $\Delta_4(\Delta x) = 0,002$ м $\Delta V_4 = 2 \cdot 10^{-4}$ м/с
5	Неперпендикулярность осей станда	(27), (28)	$\Delta\theta_5 = 1,8$ угл.мин $\Delta\dot{\theta}_5 = 0,03$ град/с
6	Погрешность, вызванная неточным определением угловой скорости станда	(29)	$\Delta V_c = 0,015$ м/с

Найдем суммарные погрешности одноименных величин :

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_1^2 + \Delta\theta_3^2 + \Delta\theta_4^2 + \Delta\theta_5^2} = 3,1 \text{ угл.мин.}$$

По аналогии имеем:

$$\Delta\dot{\theta} = 0,05 \text{ град/с ;}$$

$$\Delta(\Delta x) = 0,01 \text{ м/с ;}$$

$$\Delta V = 0,014 \text{ м/с .}$$

Для иллюстрации приведены результаты стендовых конструкторских испытаний изделия «Зенит-СК» на неподвижном и качающемся основании при следующих параметрах гармонической качки

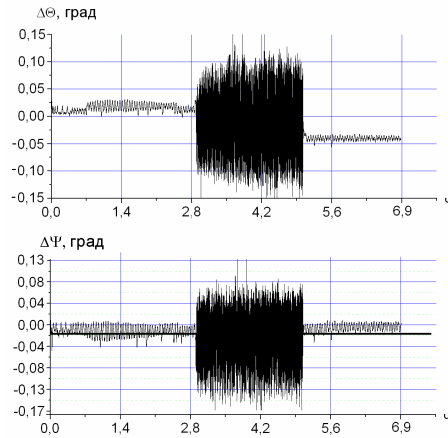
$$A_\theta = 20^\circ, T_\theta = 12 \text{ с ; } A_\psi = 10^\circ, T_\psi = 10 \text{ с .}$$

Отстояние прибора от центра качаний $X = Y = 0, Z = 40$ см, рыскание отсутствует, т.е. $\varphi_p = \dot{\varphi}_p = 0$.

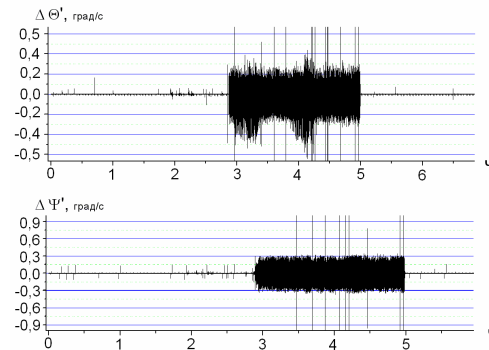
На рис. 3, а, б, в представлены погрешности выработки углов $\Delta\theta, \Delta\psi$, угловых скоростей $\Delta\dot{\theta}, \Delta\dot{\psi}$ качки, а также погрешности линейных скоростей $\Delta V_{GX}, \Delta V_{GY}, \Delta V_{GZ}$ на оси географической системы координат, вызванные качкой. Из графиков видно, что:

- погрешности выработки углов и угловых скоростей качки не превышают $\pm 0,1^\circ$ и $0,3$ град/с соответственно;
- ошибки линейных скоростей не превышают $0,2$ м/с.

а)



б)



в)

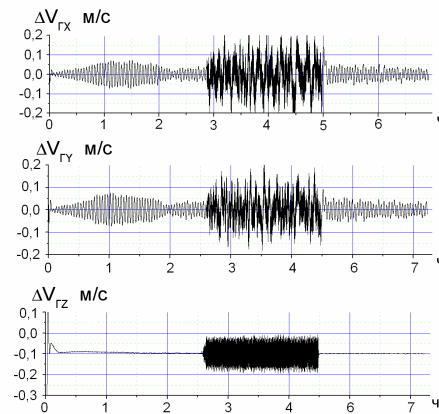


Рис. 3. Различные виды погрешностей

Выводы

1. Показано, что при отстоянии точек расположения акселерометров от точки пересечения осей стенда на расстояние 2-2,5 м можно проводить испытания БИНС, не используя стенды, имитирующие поступательные перемещения БИНС.
2. Оценены погрешности методики, вызванные неточностью угловой ориентации прибора по отношению к осям стенда, ошибками определения отстояний точек расположения акселерометров от центра качаний, погрешностями синхронизации отсчетов датчиков углов стенда и выходной информации БИНС.
3. Оценены ошибки, вызванные погрешностями списывания углов датчиками углов стенда и неперпендикулярностью осей стенда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бранец, В.Н.** Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1992.
2. **Анучин, О.Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов О.Н. Анучин, Г.И. Емельянцев. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003.
3. **Ишлинский, А.Ю.** Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.:Наука, 1976.

Материал поступил 15.10.09