

Инерциальные навигационные системы

Лабораторная работа №1

Выставка платформенной ИНС.

Необходимым и важным этапом подготовки ИНС к основному режиму функционирования – «Навигация» - является режим «Выставка». Для получения уравнений идеального функционирования и ошибок выставки необходимо ввести в рассмотрение следующие системы координат:

- «*i*» - инерциальная система координат. Ось X_i направлена в точку весеннего равноденствия, ось Z_i – в зенит небесной сферы, ось Y_i дополняет систему до правой;
- «*n*» - навигационная система координат, связанная с Землей. Относительно этой системы определяются координаты местоположения и скорость движения объекта. Оси X_n и Y_n лежат в экваториальной плоскости, ось Z_n направлена по оси вращения Земли и совпадает с Z_i ;
- «*o*» - опорный горизонтированный трехгранник, с началом координат в центре масс объекта. Оси X_o и Y_o расположены в плоскости местного горизонта, ось Z_o направлена по местной вертикали вверх. Трехгранник «*o*» определяет ориентацию осей идеальной гироскопической платформы (ГП). Ориентация осей X_o и Y_o к направлению на Восток и Север зависит от закона управления ГП в азимуте (меридианально ориентированная, полусвободная или свободная в азимуте ГП);
- «*p*» - трехгранник платформы. Оси трехгранника совпадают с осями чувствительности триады акселерометров и гироскопов (без учета их неортогональности).
- «*c*» - трехгранник расчетной платформы. Ориентация осей определяется по вычисленным в ИНС значениям координат и угла азимута.

В идеальной ИНС, в отсутствие инструментальных, вычислительных и методических погрешностей трехгранники «*p*» и «*c*» совпадают с идеальным трехгранником «*o*».

В реальной ИНС ошибки в вычислении координат и угла азимута приводят к отклонениям осей «*c*» относительно «*o*» на малые углы $\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$. Ошибки в сигналах управления платформой и инструментальные погрешности гироскопов приведут к отклонению осей «*p*» реальной платформы относительно «*o*» на малые углы Φ_x, Φ_y, Φ_z . Малое рассогласование между трехгранниками «*c*» и «*p*» определяется углами Ψ_x, Ψ_y, Ψ_z .

В процессе выставки необходимо определить ориентацию осей трехгранника «*o*» относительно экваториального геоцентрического навигационного трехгранника «*n*» (см. рис.1).

Кроме этого, при выставке платформенной ИНС необходимо физически совместить оси трехгранника ГП «*p*» с осями трехгранника «*o*».

Матрица направляющих косинусов B_n^o , определяющая ориентацию системы координат «*o*» относительно системы «*n*», имеет элементы b_{ij} , являющиеся функциями углов широты φ , долготы λ и азимута ε . Например,

$$b_{12} = -\sin \varphi \sin \lambda \sin \varepsilon + \cos \lambda \cos \varepsilon.$$

Начальные значения координат точки старта φ и λ вводятся в БЦВМ ИНС извне. При этом погрешность задания широты не должна превышать 0.1 угл. минуты. Начальный угол азимута ε определяется в ИНС автономно, либо по известному значению истинного курса.

Рассмотрим, этапы физического приведения осей «*p*» ГП к осям трехгранника «*o*» и методику вычисления угла азимута ε .

Известно три метода выставки платформенной инерциальной навигационной системы на неподвижном основании. Это выставка по заданному курсу (ЗК), выставка методом одинарного гироскопирования (ОГК) и методом двойного гироскопирования (ДГК). Общим для циклограмм всех методов выставки является начальный этап аналоговой выставки. Само наименование указывает на то, что протекающие при этом процессы происходят в непрерывном времени, без участия БЦВМ.

Вначале, на интервале 14с по сигналам, снимаемым с синусных обмоток СКТ, «обнуляется» четырехосный кардан ГП, и ее оси согласуются с осями моноблока. Это состояние электрического арретирования карданова подвеса продолжается еще в течение 42с пока разгоняются гиromоторы. Данный этап носит название «грубая выставка».

После этого следящие приводы ГП по курсу, тангажу и внутреннему крену переключаются с СКТ на датчики углов гироскопов. Система переходит в режим «аналогового горизонтирования». Избыточная азимутальная ось одного из гироскопов электрически арретируется относительно оси другого цепью внутрирамочной коррекции. Управление ГП в индикаторном режиме осуществляется в горизонте по сигналам акселерометров, а в азимуте – по сигналу курсового СКТ.

Сигналы горизонтальных акселерометров при отклонении ГП от плоскости горизонта отличны от нуля, что вызвано реакцией на действие поля силы тяжести. Указанные сигналы, пройдя через усилители, подаются на датчики моментов гироскопов, вызывая их прецессию. Углы прецессии измеряются датчиками углов гироскопов, сигналы с которых усиливаются и подаются на соответствующие двигатели стабилизации по осям кардана. Двигатели стабилизации доворачивают ГП в горизонт до обнуления выходных сигналов акселерометров (индикаторная стабилизация гироплатформы). Начальное рассогласование ГП относительно

горизонта, достигающее в «грубой выставке» величин до 3 градусов по каждой оси, уменьшается при этом до величин порядка единиц угловых минут. Углы крена γ и тангажа υ определяются по показаниям датчиков углов (СКТ), установленных по горизонтальным осям кардана. Процесс «аналогового горизонтирования» длится 112с.

При выставке по ЗК и методом ОГК, ГП удерживается в азимуте с нулевым гироскопическим курсом (Ψ_{Γ}) и физически не доворачивается своими осями к направлению на Север (Восток). Угол истинного курса ($\Psi_{ик}$), определяемый как угол между горизонтальной проекцией продольной оси моноблока и направлением на Север, задается извне (выставка по ЗК) или определяется автономно в ИНС (методы ОГК и ДГК) по соотношению

$$\Psi_{ик} = \Psi_{\Gamma} - \varepsilon, \quad (1)$$

где ε - угол азимута (угол платформы), вычисленный в БЦВМ ИНС.

Рассмотрим соотношения выставки по ЗК, ОГК и ДГК и соответствующие им уравнения погрешностей.

1. Выставка по заданному курсу.

При выставке по ЗК начальное значение истинного курса $\Psi_{ик0}$ должно быть введено в БЦВМ ИНС с погрешностью не превышающей 0.1 угл. минуты. По окончании этапа аналогового горизонтирования, обязательного для любого метода выставки, ось Y_p ГП совмещается с продольной осью моноблока, а следовательно, $\Psi_{\Gamma} \cong 0$. Тогда, из (1) определяется начальное значение угла азимута

$$\varepsilon = -\Psi_{ик0} \quad (2)$$

После ввода начальных координат места φ и λ , могут быть вычислены все элементы матрицы B_n^o , то есть определена ориентация трехгранника «о» относительно навигационного трехгранника «п». Для физического совмещения осей трехгранника «р» ГП с осями опорного горизонтированного трехгранника «о», то есть проведения этапа цифрового горизонтирования, используются сигналы акселерометров A_x и A_y , по которым в БЦВМ формируются управляющие угловые скорости ω_{px} , ω_{py} , подаваемые на датчики моментов гироскопов горизонтальных каналов:

$$1. \quad \begin{aligned} \dot{V}_{cx} &= a_x - k_1 \cdot V_{cx} & \dot{V}_{cy} &= a_y - k_1 \cdot V_{cy} \\ \omega_{py} &= U \cdot b_{23} + k_2 \cdot \frac{V_{cx}}{a} - \omega_{py}^0 & \omega_{px} &= U \cdot b_{13} - k_2 \cdot \frac{V_{cy}}{a} - \omega_{px}^0 \end{aligned} \quad (3)$$

На датчик момента гироскопа азимутальной оси ГП подается управляющий сигнал

$$\omega_{pz} = U \cdot b_{33} - \omega_{pz}^0 \quad (4)$$

Здесь: $\omega_{px}^0, \omega_{py}^0, \omega_{pz}^0$ - балансирующие значения скоростей дрейфов ГП, полученные на этапе юстировки ИНС и хранящиеся в БЦВМ;

k_1, k_2 - параметры контуров горизонтирования ГП;

a - длина большей полуоси земного эллипсоида;

В проекциях $\omega_{px}, \omega_{py}, \omega_{pz}$ угловой скорости трехгранника «*p*» присутствуют проекции угловой скорости вращения Земли на оси трехгранника «*o*»:

$$U \cdot b_{13} = U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon; \quad U \cdot b_{23} = U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon \quad (5)$$

$$U \cdot b_{33} = U \cdot \sin \varphi, \quad (6)$$

которые могут быть вычислены при заданном φ и угле азимута ε , определяемом в режиме выставки по ЗК по соотношению (2).

Для сокращения времени выставки, значения параметров k_1, k_2 дискретно изменяются во времени. На первом этапе, когда возможное рассогласование ГП относительно горизонта сравнительно велико, быстродействие системы горизонтирования устанавливается достаточно большим. Этому соответствуют значения параметров $k_1 = 0.167 \text{ с}^{-1}, k_2 = 4500$. Однако, большому быстродействию соответствует низкая помехоустойчивость, и помехи, обусловленные внутренними шумами и внешними возмущениями, вносят существенные ошибки. Поэтому, в дальнейшем, когда начальное рассогласование, в основном, устранено, уровень фильтрации помех повышается за счет сужения полосы пропускания контуров горизонтирования. Это достигается выбором новых значений параметров $k_1 = 0.033 \text{ с}^{-1}, k_2 = 180$.

На этапе цифрового горизонтирования трехгранник ГП «*p*» физически доворачивается к осям опорного горизонтированного трехгранника «*o*». Остаточные углы рассогласования осей указанных трехгранников являются малыми величинами и характеризуют ошибки выставки ИНС.

Получим уравнения ошибок выставки, используя зависимости (3), (4), описывающие алгоритм управления ГП при цифровом горизонтировании.

При выставке на неподвижном основании, сигналы V_{cx}, V_{cy} , вычисленные на первых интеграторах (см. рис. 2), представляют собой ошибки ИНС по скорости $\Delta V_x, \Delta V_y$. Выходные сигналы акселерометров a_x, a_y определяются их собственными погрешностями $\delta a_x, \delta a_y$ и составляющими от действия поля силы тяжести на чувствительную массу акселерометров при отклонениях Φ_x, Φ_y их осей чувствительности от плоскости горизонта. Таким образом, из первых уравнений в соотношениях (3) получаем следующие уравнения ошибок:

$$\Delta \dot{V}_x = -g \cdot \Phi_y - k_1 \cdot \Delta V_x + \delta a_x; \quad \Delta \dot{V}_y = g \cdot \Phi_x - k_1 \cdot \Delta V_y + \delta a_y \quad (7)$$

Отклонение ГП от плоскости горизонта Φ_x, Φ_y можно рассматривать как суммарную погрешность, вызванную ошибками Θ_x, Θ_y управления платформой и ошибками Ψ_x, Ψ_y стабилизации, зависящими от инструментальных погрешностей $\delta\omega_x, \delta\omega_y$ гироскопов:

$$\Phi_x = \Theta_x + \Psi_x; \quad \Phi_y = \Theta_y + \Psi_y, \quad (8)$$

Учитывая, что балансировочные значения $\omega_{px}^0, \omega_{py}^0, \omega_{pz}^0$ соответствуют систематическим составляющим скоростей дрейфов ГП, остаточные погрешности гироскопов $\delta\omega_x, \delta\omega_y, \delta\omega_z$ будем рассматривать как разность скоростей дрейфов ГП в запуске и их балансировочных значений. Приближенные уравнения ошибок стабилизации можно записать следующим образом:

$$\dot{\Psi}_x \cong \delta\omega_x; \quad \dot{\Psi}_y \cong \delta\omega_y \quad (9)$$

При цифровом горизонтировании на датчики моментов гироскопов поступает сигнал интегральной коррекции с коэффициентом k_2 , как показано в уравнениях (3). Значения относительной угловой скорости $\frac{V_{cx}}{a}, \frac{V_{cy}}{a}$, вычисляемые в ИНС на неподвижном основании, являются, по существу, ошибками по скорости $\frac{\Delta V_{cx}}{a}, \frac{\Delta V_{cy}}{a}$, вносящими погрешности в сигналы управления ГП. Приближенные уравнения ошибок управления имеют вид:

$$\dot{\Theta}_x \cong -k_2 \cdot \frac{\Delta V_y}{a}; \quad \dot{\Theta}_y \cong k_2 \cdot \frac{\Delta V_x}{a}. \quad (10)$$

Учитывая (8), можно объединить упрощенные уравнения ошибок (9), (10), записав их в виде:

$$\dot{\Phi}_x \cong -k_2 \cdot \frac{\Delta V_y}{a} + \delta\omega_x; \quad \dot{\Phi}_y \cong k_2 \cdot \frac{\Delta V_x}{a} + \delta\omega_y \quad (11)$$

Совместно с (7), соотношения (11) образуют систему уравнений ошибок горизонтальных каналов ИНС при выставке по ЗК в цифровом горизонтировании.

Решим уравнения (7), (11), считая погрешности акселерометров $\delta a_x, \delta a_y$ и скорости дрейфов ГП $\delta\omega_x, \delta\omega_y$ постоянными величинами. Установившиеся значения ошибок горизонтирования $\Phi_{x,ycm}, \Phi_{y,ycm}$ и ошибок в определении скорости $\Delta V_{x,ycm}, \Delta V_{y,ycm}$ по окончании переходных процессов будут определяться соотношениями:

$$\Phi_{x,ycm} \cong -\frac{\delta a_y}{g}; \quad \Phi_{y,ycm} \cong \frac{\delta a_x}{g} \quad (12)$$

$$\Delta V_{x,ycm} \cong -\frac{a}{k_2} \cdot \delta\omega_y; \quad \Delta V_{y,ycm} \cong \frac{a}{k_2} \cdot \delta\omega_x \quad (13)$$

Из (12) следует, что ошибки горизонтирования ГП зависят от погрешностей (смещений нулей) акселерометров.

Установившиеся значения ошибок по скорости $\Delta V_{x,ycm}, \Delta V_{y,ycm}$ измеряются на выходах первых интеграторов и используются для определения не скомпенсированных значений скорости дрейфов ГП в горизонтальных каналах:

$$\delta\omega_x \cong \frac{k_2}{a} \cdot \Delta V_{y,ycm}; \quad \delta\omega_y \cong -\frac{k_2}{a} \cdot \Delta V_{x,ycm} \quad (14)$$

Найденные значения $\delta\omega_x, \delta\omega_y$ позволяют уточнить балансировочные значения скоростей дрейфов ГП, хранящиеся в БЦВМ ИНС:

$$\omega_{px}^1 = \omega_{px}^0 + \delta\omega_x; \quad \omega_{py}^1 = \omega_{py}^0 + \delta\omega_y \quad (15)$$

Не скомпенсированное значение скорости дрейфа ГП $\delta\omega_z$ относительно вертикальной оси может быть оценено при выставке по ЗК как отношение приращения гироскопического курса $\Delta\Psi_\Gamma$, измеренного датчиками угла (СКТ) курсовой оси, к интервалу времени наблюдения:

$$\delta\omega_z = \frac{\Delta\Psi_\Gamma}{\Delta T} \quad (16)$$

В ИНС И-21 этапу «грубая выставка» соответствует показатель готовности ПГ=90, который можно наблюдать на дисплее УВИ при установке переключателя «Параметры» в положение ИК/ПГ.

На этапе аналогового горизонтирования ПГ=80. Продолжительность этапа с момента ввода $\Psi_{ик0}$, φ и λ составляет 112с.

Продолжительность цифрового горизонтирования составляет 120с при ПГ=50. Момент окончания цифрового горизонтирования характеризуется значением ПГ=00. С этого момента проводится определение поправок $\delta\omega_x, \delta\omega_y$ к балансировочным значениям скоростей дрейфов горизонтальных каналов в соответствии с (15). Первые уточненные балансировочные значения (14) индицируются на УВИ через 600с после окончания цифрового горизонтирования (ПГ=00). Последующие значения формируются с пятиминутным осреднением показаний первых интеграторов.

2. Выставка методом одинарного гироскомпассирования.

Одинарное гироскомпассирование (ОГК) является основным методом выставки навигационных систем. В качестве начальных данных используется информация только о широте φ и долготе λ места. Определение истинного курса (гироскомпассирование) осуществляется в ИНС автономно.

Первые два этапа выставки – «грубая выставка», включающая в себя обнуление кардана ГП и разгон гиросмоторов, и аналоговое горизонтирование – совпадают с этапами выставки по ЗК. Значение гироскопического курса ψ_r удерживается равным нулю путем подачи сигнала с синусной обмотки СКТ курсового канала ГП на датчик момента гироскопа в этом канале.

В отличие от выставки по ЗК, начальное значение истинного курса $\Psi_{ик0}$ не известно, а следовательно, не может быть определено начальное значение угла азимута ε по соотношению (2). Для управления платформой может быть вычислена только проекция угловой скорости Земли на вертикальную ось $U \cdot b_{33} = U \cdot \sin \varphi$. Проекции угловой скорости Земли на горизонтальные оси принимаются равными нулю: $U \cdot b_{13} = 0, U \cdot b_{23} = 0$. Их отсутствие в горизонтальных каналах управления можно рассматривать как появление дополнительных скоростей дрейфа ГП к существующим не скомпенсированным значениям $\delta\omega_x, \delta\omega_y$. Суммарные скорости дрейфов ГП после окончания аналогового горизонтирования можно представить в виде:

$$\delta\omega_x^* = \delta\omega_x - U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon; \quad \delta\omega_y^* = \delta\omega_y - U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon.$$

Цифровое горизонтирование при выставке методом ОГК подразделяется на два этапа: грубое и точное гироскопирование (ГК). На этапе грубого ГК используется коррекция гиросмоторов с теми же значениями k_1, k_2 , что и в выставке по ЗК.

Уравнения ошибок будут соответствовать соотношениям:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_x^I &= -g \cdot \Phi_y - k_1 \cdot \Delta V_x^I + \delta a_x & \Delta \dot{V}_y^I &= g \cdot \Phi_x - k_1 \cdot \Delta V_y^I + \delta a_y \\ \dot{\Phi}_y &\cong k_2 \cdot \frac{\Delta V_x^I}{a} + \delta\omega_y^* & \dot{\Phi}_x &\cong -k_2 \cdot \frac{\Delta V_y^I}{a} + \delta\omega_x^* \end{aligned}, \quad (17)$$

аналогичным (6), (11), полученным для выставки по ЗК. Верхний индекс «I» в обозначениях показаний первых интеграторов $\Delta V_x^I, \Delta V_y^I$ указывает, что эти величины относятся к этапу грубого ГК. Переходной процесс, связанный с введением коррекции, протекает в течение 80с при ПГ=70.

Установившиеся решения уравнений (1.15) будут определять ошибки горизонтирования

$$\Phi_{x,ycm} \cong -\frac{\delta a_y}{g}; \quad \Phi_{y,ycm} \cong \frac{\delta a_x}{g} \quad (18)$$

и погрешности скорости на выходах первых интеграторов:

$$\Delta V_{x,\delta\omega}^I \cong -\frac{a}{k_2} \cdot (\delta\omega_y - U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon); \quad \Delta V_{y,\delta\omega}^I \cong \frac{a}{k_2} \cdot (\delta\omega_x - U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon) \quad (19)$$

Для улучшения оценки, значения $\Delta V_x^I, \Delta V_y^I$ осредняются на интервале времени 25с при ПГ=60.

С точностью до погрешностей, определяемых не скомпенсированными скоростями дрейфа $\delta\omega_x, \delta\omega_y$, начальный угол азимута ε вычисляется по формуле

$$\hat{\varepsilon} \cong -\arctg \frac{\Delta V_{y, \hat{\sigma}\hat{\omega}}^I}{\Delta V_{x, \hat{\sigma}\hat{\omega}}^I} \quad (20)$$

По найденному значению $\hat{\varepsilon}$ вычисляются проекции скорости Земли (5), и добавляются к сигналам управления ГП в (3):

$$\omega_{px} = U \cdot \hat{b}_{13} - k_2 \cdot \frac{V_{\hat{n}y}}{a} - \omega_{px}^0; \quad \omega_{py} = U \cdot \hat{b}_{23} + k_2 \cdot \frac{V_{\hat{n}x}}{a} - \omega_{py}^0 \quad (21)$$

Этому этапу соответствует переходной процесс на интервале времени 75с при ПГ=50 в течение которого практически устраняются статические ошибки ГП относительно плоскости горизонта.

Затем система переходит в режим точного гирокомпасирования со значительным сокращением полосы пропускания контуров обратной связи. Параметры горизонтирования устанавливаются равными $k_1 = 0.05 \text{ с}^{-1}$, $k_2 = 540$. Кроме того, вводится угловая скорость

$$\Omega_z = -\frac{k_3}{a \cdot \cos^2 \varphi} \cdot (\Delta V_x^{II} \cdot b_{13} + \Delta V_y^{II} \cdot b_{23}) \quad (22)$$

относительно азимутальной оси с параметром $k_3 = 41000$. Верхний индекс «II» указывает, что величины $\Delta V_x^{II}, \Delta V_y^{II}$ относятся к этапу точного ГК.

Получим соотношения для погрешностей определения азимута методом ОГК. Ошибка в вычислении азимута $\Delta\varepsilon^I$, возникшая на этапе грубого ГК, приведет к погрешностям в задании проекций угловой скорости Земли по осям ГП в (21):

$$U \cdot \hat{b}_{13} = U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \hat{\varepsilon} = U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon - \Delta\varepsilon^I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon$$

$$U \cdot \hat{b}_{23} = U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \hat{\varepsilon} = U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon + \Delta\varepsilon^I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon$$

Эти погрешности, совместно с не скомпенсированными значениями $\delta\omega_x, \delta\omega_y$, будут определять суммарные скорости дрейфа в горизонтальных осях ГП в начале этапа точного ГК.

$$\delta\omega_x^* = \delta\omega_x - \Delta\varepsilon^I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon; \quad \delta\omega_y^* = \delta\omega_y + \Delta\varepsilon^I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon.$$

Уравнения ошибок ИНС в режиме точного ГК будут соответствовать (1.17) при замене индекса «I» на «II». Установившиеся значения $\Delta V_x^{II}, \Delta V_y^{II}$ на выходах первых интеграторов примут вид:

$$\Delta V_{x, \hat{\sigma}\hat{\omega}}^{II} \cong -\frac{a}{k_2} \cdot (\delta\omega_y + \Delta\varepsilon^{II} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon)$$

$$\Delta V_{y, \hat{\sigma}\hat{\omega}}^{II} \cong \frac{a}{k_2} \cdot (\delta\omega_x - \Delta\varepsilon^{II} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon) \quad (23)$$

Введение цепи коррекции в азимутальный канал путем подачи угловой скорости Ω_z (22) эквивалентно введению отрицательной обратной связи по ошибке азимута $\Delta\varepsilon$. При этом направляющие косинусы b_{13}, b_{23} будут соответствовать уравнениям:

$$\dot{b}_{13} = \Omega_z \cdot b_{23}; \quad \dot{b}_{23} = -\Omega_z \cdot b_{13}.$$

Можно показать, что $\Omega_z = \Delta\dot{\varepsilon}$. Начальным условием на этапе точного ГК для ошибки азимута является $\Delta\varepsilon_0'' = \Delta\varepsilon'$. Из соотношений (22), (23) найдем установившееся значение ошибки азимута по окончании точного ГК:

$$\Delta\varepsilon'' = -\frac{\delta\omega_x \cdot \cos \varepsilon - \delta\omega_y \cdot \sin \varepsilon}{U \cdot \cos \varphi} = -\frac{\delta\omega_E}{U \cdot \cos \varphi} \quad (24)$$

Здесь $\delta\omega_E = \delta\omega_x \cdot \cos \varepsilon - \delta\omega_y \cdot \sin \varepsilon$ - не скомпенсированная «восточная» составляющая скорости дрейфа ГП.

Процесс перехода из грубого ГК в точное с коэффициентами k_1, k_2, k_3 в цепях коррекции горизонтальных и азимутального каналов продолжается 240с с индикацией ПГ=40 на дисплее УВИ.

Уравнения ошибок по окончании этапа точного ГК, когда $\Delta\varepsilon''$ принимает установившееся значение, имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_x'' &= -g \cdot \Phi_y - k_1 \cdot \Delta V_x'' + \delta a_x & \Delta\dot{V}_y'' &= g \cdot \Phi_x - k_1 \cdot \Delta V_y'' + \delta a_y \\ \dot{\Phi}_y &\cong k_2 \cdot \frac{\Delta V_x''}{a} + \delta\omega_y - \Delta\varepsilon'' \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varepsilon & \dot{\Phi}_x &\cong -k_2 \cdot \frac{\Delta V_y''}{a} + \delta\omega_x + \Delta\varepsilon'' \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon \end{aligned}$$

Подставив (24) в последние уравнения, получим:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_x'' &= -g \cdot \Phi_y - k_1 \cdot \Delta V_x'' + \delta a_x & \Delta\dot{V}_y'' &= g \cdot \Phi_x - k_1 \cdot \Delta V_y'' + \delta a_y \\ \dot{\Phi}_y &\cong k_2 \cdot \frac{\Delta V_x''}{a} + \delta\omega_N \cdot \cos \varepsilon & \dot{\Phi}_x &\cong -k_2 \cdot \frac{\Delta V_y''}{a} + \delta\omega_N \cdot \sin \varepsilon \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь

$$\delta\omega_N = \delta\omega_y \cdot \cos \varepsilon + \delta\omega_x \cdot \sin \varepsilon \quad (26)$$

- не скомпенсированная «северная» составляющая скорости дрейфа ГП.

По установившимся значениям

$$\Delta V_{x,\text{ст}}'' \cong -\frac{a}{k_2} \cdot \delta\omega_N \cdot \cos \varepsilon; \quad \Delta V_{y,\text{ст}}'' \cong \frac{a}{k_2} \cdot \delta\omega_N \cdot \sin \varepsilon$$

на этапе стационарного режима точного ГК определяется балансирующее значение не скомпенсированной «северной» составляющей скорости дрейфа ГП:

$$\delta\omega_N = -\frac{k_2}{a \cdot \cos \varphi} \cdot (\Delta V_{x,\text{ст}}'' \cdot b_{23} - \Delta V_{y,\text{ст}}'' \cdot b_{13}).$$

Это значение используется для уточнения балансировочных коэффициентов, хранящихся в вычислителе ИНС:

$$\omega_{px}^1 = \omega_{px}^0 + \delta\omega_N \cdot \sin \varepsilon \qquad \omega_{py}^1 = \omega_{py}^0 + \delta\omega_N \cdot \cos \varepsilon \qquad (27)$$

Стационарный режим точного ГК и набор данных о не скомпенсированной «северной» составляющей скорости дрейфа ГП $\delta\omega_N$ продолжается в течение 300с и индицируется на дисплее УВИ с изменением ПГ=30, 29, ..., 01, 00. Значение ПГ=00 означает окончание ОГК и готовность ИНС к режиму «Навигация».

Таким образом, при выставке ИНС методом ОГК проводится горизонтирование ГП с погрешностями Φ_x, Φ_y (18), вычисление азимута ε с погрешностью $\Delta\varepsilon''$ (24) и определение поправок к балансировочным скоростям дрейфа ГП (27). Поскольку в процессе выставки гироскопический курс $\Psi_r \cong 0$, то по вычисленному ε определяется истинный курс $\Psi_{ик} = -\varepsilon$.

3. Выставка методом двойного гироскопирования.

Двойное гироскопирование (ДГК) позволяет не только провести горизонтирование ГП и определить истинный курс, но также найти и скомпенсировать скорости дрейфа ГП по всем трем осям. Поэтому, метод ДГК называют иногда методом балансировки ГП.

Выставка методом ДГК включает в себя следующие основные этапы: проведение ОГК; балансировка «северной» составляющей скорости дрейфа ГП; разворот ГП в азимуте на 90 градусов; повторное проведение ОГК; балансировка новой «северной» составляющей скорости дрейфа ГП.

В основу метода ДГК положено условие постоянства во времени и пространстве скоростей дрейфа по осям ГП до и после ее разворота. Значения параметров, соответствующих первому ОГК будем обозначать индексом «I», а второму ОГК – индексом «II».

По окончании первого ОГК определяется «северная» составляющая $\delta\omega_N$ не скомпенсированной скорости дрейфа ГП (1.26)

$$\delta\omega_N^I = \delta\omega_y \cdot \cos \varepsilon^I + \delta\omega_x \cdot \sin \varepsilon^I, \qquad (28)$$

которая используется для уточнения балансировочных коэффициентов, хранящихся в вычислителе ИНС:

$$\omega_{px}^1 = \omega_{px}^0 + \delta\omega_N^I \cdot \sin \varepsilon^I \qquad \omega_{py}^1 = \omega_{py}^0 + \delta\omega_N^I \cdot \cos \varepsilon^I$$

После балансировки, остаточные значения скоростей дрейфа будут соответствовать выражениям:

$$\delta\omega_x^I = \delta\omega_x - \delta\omega_N^I \cdot \sin \varepsilon^I; \qquad \delta\omega_y^I = \delta\omega_y - \delta\omega_N^I \cdot \cos \varepsilon^I, \qquad (29)$$

При двойном гирокомпасировании момент окончания первого ОГК определяется по дисплею УВИ. Появление после ПГ=..., 02, 01 значения ПГ=75 означает окончание первого ОГК и начала разворота ГП в корпусе ИНС. Разворот происходит против часовой стрелки на угол 90 градусов с высокой степенью точности за интервал времени не превышающий 400с. Окончание разворота характеризуется изменением ПГ=75 на ПГ=70. При этом, новое значение угла азимута будет равно:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' + \frac{\pi}{2}. \quad (30)$$

Далее проводится повторная выставка методом ОГК по известной циклограмме с изменением ПГ=70 до ПГ=00. В процессе выставки определяется значение азимута ε'' с погрешностью, соответствующей (24):

$$\Delta\varepsilon'' = -\frac{\delta\omega_x^I \cdot \cos \varepsilon'' - \delta\omega_y^I \cdot \sin \varepsilon''}{U \cdot \cos \varphi}.$$

Подставив (28)-(30) в последнее равенство, найдем, что $\Delta\varepsilon'' = 0$. Нулевое значение погрешности получено в предположении постоянства скоростей дрейфа ГП во времени и пространстве. Однако, в реальных ГП присутствуют случайные изменения скорости дрейфа в запуске. Кроме того, из-за наличия градиентов электромагнитных и тепловых полей в корпусе ИНС, изменяется воздействие указанных полей на гироскопы при развороте ГП – так называемый «румбовый дрейф». Поэтому, погрешность $\Delta\varepsilon''$ при ДГК отлична от нуля, но ее средне-квадратическое отклонение (СКО) достаточно мало: $\sigma_\varepsilon \leq 2$ угл.мин.

При втором ОГК определяется балансировочное значение новой «северной» составляющей скорости дрейфа ГП по формуле

$$\delta\omega_N'' = \delta\omega_y^I \cdot \cos \varepsilon'' + \delta\omega_x^I \cdot \sin \varepsilon'', \quad (31)$$

аналогичной (28). Это значение используется для уточнения балансировочных коэффициентов, хранящихся в вычислителе ИНС:

$$\begin{aligned} \omega_{px}^1 &= \omega_{px}^0 + \delta\omega_N^I \cdot \sin \varepsilon^I + \delta\omega_N'' \cdot \sin \varepsilon'' \\ \omega_{py}^1 &= \omega_{py}^0 + \delta\omega_N^I \cdot \cos \varepsilon^I + \delta\omega_N'' \cdot \cos \varepsilon'' \end{aligned}$$

По окончании ДГК, не скомпенсированные постоянные в запуске значения скоростей дрейфа ГП можно определить из соотношений:

$$\begin{aligned} \delta\omega_x'' &= \delta\omega_x - \delta\omega_N^I \cdot \sin \varepsilon^I - \delta\omega_N'' \cdot \sin \varepsilon'' \\ \delta\omega_y'' &= \delta\omega_y - \delta\omega_N^I \cdot \cos \varepsilon^I - \delta\omega_N'' \cdot \cos \varepsilon'' \end{aligned} \quad (32)$$

Подставив (28)-(30) в (31), получим $\delta\omega_x'' = 0, \delta\omega_y'' = 0$. Это означает, что в процессе ДГК проведена полная компенсация скоростей дрейфа в запуске. Однако, этот вывод справедлив для

их постоянных составляющих. Для случайных составляющих скоростей дрейфа СКО $\sigma_{\delta\omega} \leq 0.01$ град/час.

Продолжительность режима ДГК составляет 39 минут. Этого времени достаточно, чтобы получить точную оценку не скомпенсированной скорости дрейфа в азимутальном канале по формуле (16). Указанная оценка используется для уточнения балансирующего коэффициента $\omega_{pz}^1 = \omega_{pz}^0 + \delta\omega_z$, хранящегося в вычислителе ИНС.

Практическая часть.

Исследование методов выставки и анализ влияния погрешностей элементов ИНС на точность выставки проводится с использованием системы И-21. Система установлена на горизонтальном стенде с известной ориентацией в азимуте.

В И-21 возможно введение с клавиатуры УВИ в память БЦВМ балансирующих коэффициентов, компенсирующих систематические погрешности акселерометров и гироскопов. Введение заведомо ошибочных коэффициентов окажет на показания ИНС такое же влияние, как возникновение погрешностей в самих чувствительных элементах. Используя этот подход, будем имитировать погрешности чувствительных элементов и исследовать их влияние на точность выставки.

Тест №1. Выставка методом ОГК с точными балансирующими коэффициентами.

Цель эксперимента:

- ознакомление с этапами выставки методом ОГК;
- получение эталонных значений углов ориентации $\Psi_{ик}$, γ , θ при точных балансирующих коэффициентах $\omega_{px}^0, \omega_{py}^0, \omega_{pz}^0$ и в отсутствие смещения нуля акселерометра.

Этапы работы:

- Установить корпус ИНС на стенде на румб 0 градусов.
- Включить ИНС, установив переключатель на ПУР в положение «ВЫСТ». (Включение источников питания и их проверка осуществляется преподавателем).
- Через 5 минут с момента включения, на ПУР загорится транспарант «НЕ ГОТ». Установить переключатель «Параметры» УВИ в положение «ИК/ПГ». В нижней строке дисплея УВИ появится число 90 (этап обнуления кардана и разгон гироскопов). Через интервал времени, определяемый циклограммой (см. рис.), признак готовности станет равным ПГ=80 (этап аналогового горизонтирования).

- Установить переключатель «Параметры» УВИ в положение «ЗПУ/ПУ» и записать значения точных балансировочных коэффициентов $\omega_{px}^0, \omega_{py}^0$. В верхней строке индицируется значение ω_{px}^0 , в нижней – значение ω_{py}^0 . Установить переключатель «Параметры» УВИ в положение «W/УС» и записать значение точного балансировочного коэффициента ω_{pz}^0 . Единица младшего правого разряда на дисплее УВИ соответствует 0.0001 град/час.
- Ввести значения координат $\varphi = 55^\circ 45,9'$ и $\lambda = 37^\circ 41,4'$.
- Установить переключатель «Параметры» УВИ в положение «ИК/ПГ» и проверить соответствие моментов времени изменения ПГ циклограмме выставки по ОГК
- При ПГ=00 записать значения $\omega_{px}^1, \omega_{py}^1$ и углов $\Psi_{ик}, \gamma, \vartheta$

Тест №2. Выставка методом ОГК с ошибочным смещением нуля акселерометра.

Цель эксперимента:

- исследование влияния ошибки акселерометра на точность горизонтирования;

Не выключая ИНС, провести перезапуск БЦВМ. Для этого, установить переключатель ПУР в положение «НАВИГ», а затем вернуть его в положение «ВЫСТ».

С целью исследования влияния ошибки акселерометра на точность горизонтирования, ввести ошибочный балансировочный коэффициент, имитирующий смещение нуля акселерометра. Для этого, добавить к нулевому значению балансировочного коэффициента C_x акселерометра A_x значение $\delta \tilde{a}_x = 0.01g$. Ввести в память БЦВМ под №20 полученное значение $C_x^1 = \delta \tilde{a}_x$ в долях g, то есть $C_x^1 = 0.01$ (см. Приложение).

При ПГ=00 записать с дисплея УВИ значения $\omega_{px}^1, \omega_{py}^1$ и углов γ, ϑ и $\Psi_{ик}$

Вычислить ошибки горизонтирования по формуле (18) и сравнить их с разностью показаний ИНС по углам γ, ϑ , полученных в 1-м и 2-м тестах.

Тест №3. Выставка методом ОГК с ошибочным балансировочным значением скорости дрейфа гироскопа.

Цель эксперимента:

- исследование влияния ошибок гироскопов на точность определения курса.

Не выключая ИНС, провести перезапуск БЦВМ. Для этого, установить переключатель ПУР в положение «НАВИГ», а затем вернуть его в положение «ВЫСТ».

Обнулить значение балансирующего коэффициента смещения нуля акселерометра в памяти БЦВМ под №20, введенное в предыдущем тесте.

Для исследования влияния ошибок гироскопов на точность определения курса, ввести ошибочный балансирующий коэффициент, имитирующий не скомпенсированную скорость дрейфа гироскопа. Для этого, добавить к ω_{px}^0 значение $\delta\tilde{\omega}_x = 0.2$ град/час. Ввести в память БЦВМ полученные значения $\tilde{\omega}_{px}^1 = \omega_{px}^0 + \delta\tilde{\omega}_x$ под №21 (см. Приложение).

При ПГ=00 записать с дисплея УВИ значения $\omega_{px}^1, \omega_{py}^1$ и углов γ, ϑ и $\Psi_{ик}$ (см. Таблицу №1 Приложения).

Вычислить ошибки определения угла $\Psi_{ик}$ по формуле (24), (2), сравнить их с разностью показаний ИНС по $\Psi_{ик}, \gamma, \vartheta$, полученных в 1-м и 3-м тестах.

Требования к отчету:

1. Краткий конспект по методам выставки (ЗК, ОГК, ДГК) с приведение циклограмм выставки, формульных зависимостей погрешностей выставки от ошибок чувствительных элементов.
2. Результаты экспериментов (Тесты 1-3).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Сведения по технической эксплуатации ИНС И-21.

1. Ввод балансирующих коэффициентов.

При ПГ=80 и до ввода начальных значений координат установить вспомогательный переключатель на ПУР в положение «Б» (балансировка). Установить переключатель «Параметры» УВИ в положение «ППМ». В верхней строке дисплея УВИ отобразятся цифры «00», в нижней – знак и пять цифр значения балансирующего коэффициента №0.

Для ввода балансирующего коэффициента нажать клавишу «2/N» на наборном поле УВИ. Экран дисплея погаснет, и загорится подсветка клавиши «Ввод». Набрать номер балансирующего коэффициента и нажать клавишу «Ввод». Подсветка клавиши погаснет, и в нижней строке дисплея УВИ отобразится значение балансирующего коэффициента,

хранящееся в БЦВМ. Для ввода нового значения нажать клавишу «4/W» – если значение отрицательное, или клавишу «6/E» – если значение положительное. Слева в нижней строке отобразится знак «-» или «+». Последовательно набрать значащие цифры балансировочного коэффициента. Цифры индицируются в нижней строке дисплея. При ошибке в наборе – нажать клавишу «Сброс» и повторить набор снова. При правильном наборе – нажать клавишу «Ввод». Подсветка клавиши «Ввод» погаснет, и на УВИ отобразится значение введенного коэффициента.

Командой на запись введенных коэффициентов в память БЦВМ является ввод коэффициента №23. Если его значение не требует изменений, то следует повторить ввод коэффициента №23, хранящегося в БЦВМ. Не ранее чем через 60с после этого следует установить вспомогательный переключатель в положение «О».

2. Ввод координат.

Установить переключатель «Параметры» УВИ в положение «φ/λ».

Для ввода широты нажать клавишу «2/N» на наборном поле УВИ. Загорятся буква «N» (северная широта) в верхней строке дисплея и подсветка клавиши «Ввод». На наборном поле последовательно нажать клавиши, соответствующие градусам, угловым минутам и десятым долям минут широты места выставки. Например, для ввода $\varphi = 55^{\circ}45,9'$ следует последовательно нажать клавиши «5»-«5»-«4»-«5»-«9». Цифры индицируются в верхней строке дисплея. При ошибке в наборе – нажать клавишу «Сброс» и повторить набор снова. При правильном наборе φ – нажать клавишу «Ввод». Подсветка клавиши «Ввод» погаснет, и на УВИ отобразится значение введенной широты.

Для ввода долготы нажать клавишу «6/E» на наборном поле УВИ. Загорятся буква «E» (восточная долгота) в нижней строке дисплея и подсветка клавиши «Ввод». Вести значение $\lambda=37^{\circ}41,4'$ по методике, аналогичной вводу широты.

3. Контроль параметров ИНС в режиме «Справка».

Установить переключатель «Параметры» УВИ в положение «Контр». Для контроля параметра ИНС нажать клавишу «2/N» на наборном поле УВИ. Экран дисплея погаснет, и загорится подсветка клавиши «Ввод». Набрать номер контролируемого параметра и нажать клавишу «Ввод». Подсветка клавиши погаснет, и в нижней строке дисплея УВИ отобразится текущее значение параметра ИНС. В таблице приведены параметры ИНС с указанием их номера, максимальных значений и размерности контролируемых параметров.

Таблица 1.

№	Название параметра	Нижний ряд цифровых индикаторов							Размерность	Примечание
		зн	6	5	4	3	2	1		
0	Нескорректированное значение широты, φ		*	8	9°	5	9,	9'	град/мин	В режиме «Навигация»
1	Нескорректированное значение долготы, λ	+/-	1	7	9°	5	9,	9'		
2	Угол крена, γ		1	7	9°	5	9,	9'	град/мин	При ПГ ≤ 80; В режиме «Навигация»
3	Угол тангажа, ν	+/-	*	8	9°	5	9,	9'		
4	Гироскопический курс, $\psi_{Г}$		3	5	9°	5	9,	9'	град/мин	При ПГ ≤ 50; В режиме «Навигация»
5	Угол азимута, χ		3	5	9°	5	9,	9'		
6	Истинный курс, $\psi_{ик}$	+	3	5	9°	5	9,	9'		
...										
11	Составляющая путевой скорости по оси «x», V_x		*	1	0	2	4,	9	Импульсы в режиме «Выставка»; м/с в режиме «Навигация»	При ПГ ≤ 70; В режиме «Навигация»
12	Составляющая путевой скорости по оси «y», V_y	+/-								
13	Угловая скорость по оси «x», ω_x		*	4	9°	9	9	9	град/час	При ПГ ≤ 70; В режиме «Навигация»
14	Угловая скорость по оси «y», ω_y	+/-								
15	Угловая скорость по оси «z», ω_z									
16	Ускорение по оси «x», a_x		*	4	9,	9	9	9	м/с ²	В режиме «Навигация»
17	Ускорение по оси «y», a_y	+/-								
18	Ускорение по оси «z», a_z									
19	Значение реверсивного счетчика по оси «x»		*	*	*	1	2	7	Кол.-во импульсов	Во всех режимах
20	Значение реверсивного счетчика по оси «y»	+/-								