

УДК 629.7.058.82

Метод калибровки ДУС инерциального класса на одноосном гиросtabilизаторе

Цинь Цзыхао, аспирант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Приборы и системы навигации стабилизации и ориентации»*

Научный руководитель: Подчезерцев В.П., к.т.н., доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

bauman@bmstu.ru

Введение

Создание систем ориентации и навигации нового поколения и развитие интеллектуальных транспортных систем определяют постоянный рост требований к точности навигационных комплексов. Одним из основных способов повышения точностных характеристик инерциальных навигационных систем является адекватная калибровка первичных измерителей – акселерометров и гироскопов.

В данной работе для калибровки прецизионных датчиков угловой скорости предложен вариант конструкции стенда, использующий специализированный гироскопический стабилизатор. Описаны источники возникновения систематического дрейфа гироскопа на базе ДНГ. Сформированы параметры контура системы стабилизации и предложена методика обработки информации с измерительных каналов датчика угловой скорости. С помощью программы *Simulink (Matlab)* построена модель динамически настраиваемого гироскопа в режиме датчика угловой скорости (ДУС) и гиросtabilизатора. Проанализированы возможные погрешности данного метода.

Описание чувствительного элемента и стенда

В качестве калибруемого датчика угловой скорости рассмотрим динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ), представленный на рис.1.

Создание управляющих моментов в ДНГ осуществляется с помощью двух магнитоэлектрических датчиков момента (ДМ), по одному на каждой оси чувствительности.

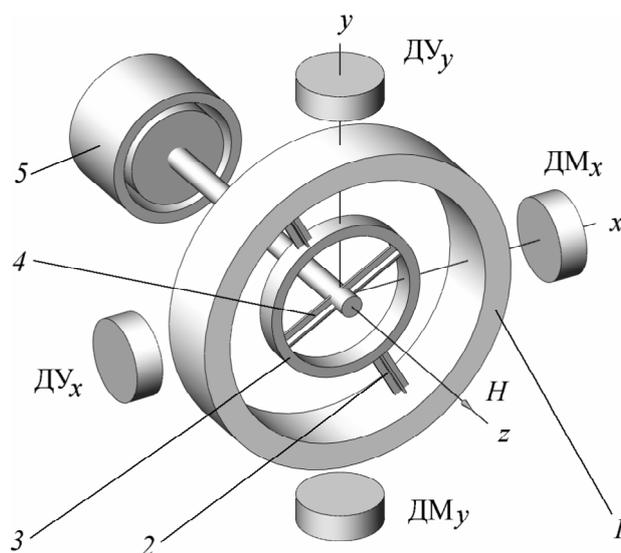


Рис.1. Кинематическая схема ДНГ:

1-ротор ДНГ, 2- наружные торсионы, 3-кольцо, 4-внутрение торсионы, 5-двигатель.

ДУ-датчик угла, ДМ-датчик момента

В индикаторных гиросtabilизаторах выходные сигналы с датчиков углов поворота ротора ДНГ относительно корпуса пропорциональны углам поворота стабилизированной платформы в абсолютном пространстве.

В данной работе предложен вариант стенда (рис.2) для калибровки гироскопа. Гироскоп устанавливается на стенде с помощью переходного устройства калибруемой осью вдоль оси вращения стенда расположенного по вертикали места испытания. Для обеспечения точности выставки корпуса гироскопа относительно задаваемой угловой скорости платформы в конструкции предусматривается возможность разнесения точек фиксации переходного устройства на платформе.

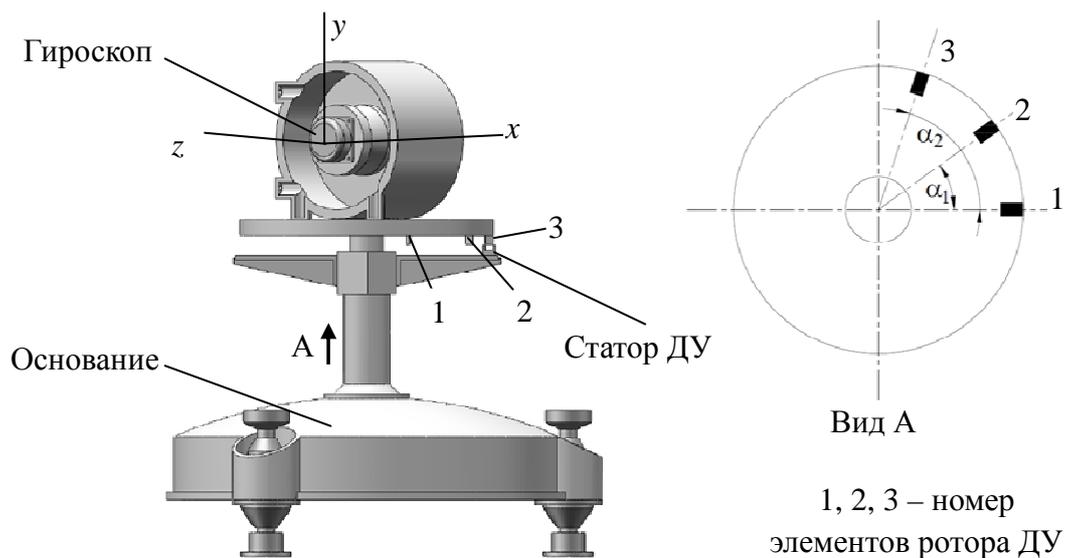


Рис.2. Одноосный поворотный стенд

Для измерения угловой скорости платформы гиросtabilизатора может использоваться датчик аналогичный датчику угла ДНГ, но работающему в импульсном режиме и частотомер-хронометр, запускаемый импульсами с датчика угла через каждый оборот платформы ($\alpha=360^\circ$) или при ее повороте на углы α_1 , и α_2 .

Разработка методики калибровки ДУС

В данной работе для определения параметров ДМ ДНГ используются два положения. В положении 1 ось y является осью стабилизации, а в положении 2 ось x является осью стабилизации, как показано на рис.3 и рис.4.

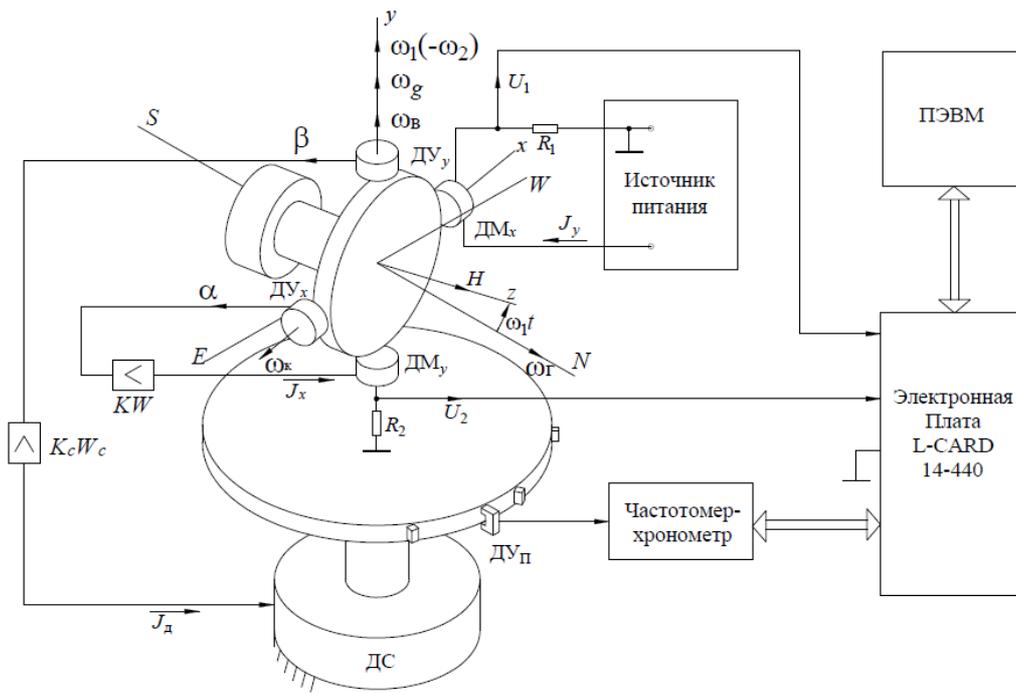


Рис. 3. Калибровка гироскопа в положении 1

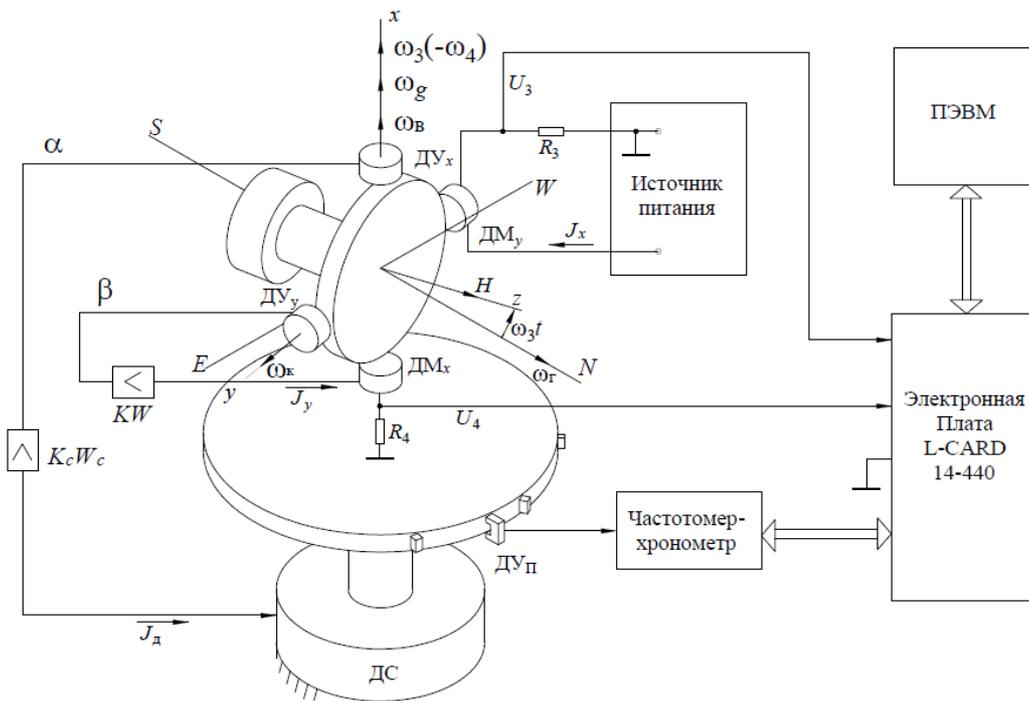


Рис. 4. Калибровка гироскопа в положении 2

где: ω_g — составляющая ССП, зависящая от смещения центра масс вдоль оси вращения гироскопа;

ω_k — квадратурная составляющая ССП;

$\omega_v = U \cos \varphi$ и $\omega_r = U \sin \varphi$ — вертикальная и горизонтальная скорость суточного вращения Земли U ;

$R_i, U_i(i=1 \dots 4)$ — измерительные сопротивления и выходные напряжения,
 $KW, K_c W_c$ — контуры обратной связи (КОС) гироскопа и гиросtabilизатора;
 $ДУ_x, ДУ_y, ДУ_n$ — датчики углов гироскопа и платформы;
 $ДМ_x, ДМ_y$ — датчики момента гироскопа по оси x и y ;
 $ДС$ — двигатель стабилизации стенда;

Электронная плата L-CARD 14-440 — плата сопряжения между стендом и компьютером, обеспечивающая аналого-цифровое преобразование измеряемого напряжения и управление стендом. Частота съема информации около 100 кГц.

Канал перпендикулярный к основному калибруемому каналу включается в режим электрической пружины для исключения возможного касания ротором упора по этим каналам из-за дрейфа гироскопа и проекции угловой скорости платформы на эту ось. Сигнал с датчика угла гироскопа расположенного вдоль оси вращения стенда через усилитель и фазовый детектор подается на усилитель-преобразователь и с него на обмотку двигателя разгрузки стабилизатора. В калибруемый датчик момента подается ток от стороннего высокостабильного регулируемого источника тока.

Под действием момента, вызываемого токами J_x и J_y в катушках $ДМ_x$ и $ДМ_y$, ротор гироскопа прецессирует со скоростью

$$\begin{cases} \omega_x = K_x J_x + K_{xy} J_y \\ \omega_y = K_y J_y + K_{yx} J_x \end{cases} \quad (1)$$

где: K_x, K_y — основная крутизна датчиков моментов $ДМ_x$ и $ДМ_y$ по скорости управления;

K_{xy}, K_{yx} — перекрестная крутизна ДМ по скорости управления обусловленная неточностью выставки углового положения катушек ДМ.

Математическая модель собственной скорости прецессии ДНГ может быть представлена следующим образом [2]:

$$\begin{pmatrix} \omega_{xp} \\ \omega_{yp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{x0} \\ \omega_{y0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_x & K_{xy} \\ K_{yx} & K_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_g & -\omega_k \\ \omega_k & \omega_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где, ω_{xp}, ω_{yp} — скорости прецессии (ССП) ротора гироскопа;

ω_{x0}, ω_{y0} — постоянные составляющие ССП;

n_x, n_y — линейные перегрузки (при вертикальной оси x : $n_x=1$ и $n_y=0$; при вертикальной оси y : $n_x=0$ и $n_y=1$).

Передаточные функции ДНГ и гиросtabilизатора

Определим передаточную функцию ДНГ с учетом контура обратной связи (КОС)

[3] в виде

$$KW(s) = K_{\text{ду}} K_{\text{ус}} \frac{T_1 s + 1}{T_1 s (T_2 s + 1)^2}, \quad (3)$$

где: в положении 1 $\frac{J_x(s)}{\alpha(s)} = KW(s)$, в положении 2 $\frac{J_y(s)}{\beta(s)} = KW(s)$.

Передаточная функция КОС стенда [3]

$$K_c W_c(s) = K_{\text{ду}}^c K_{\text{ус}}^c \frac{T_{c1} s + 1}{T_{c1} s (T_{c2} s + 1) (T_{c3} s + 1)}, \quad (4)$$

где: в положении 1 $\frac{J_d(s)}{\beta(s)} = K_c W_c(s)$, в положении 2 $\frac{J_d(s)}{\alpha(s)} = K_c W_c(s)$.

J_d — тока в катушке ДС;

$K_{\text{ду}}^c, K_{\text{ду}}^c$ — крутизна датчика угла гироскопа;

$K_{\text{ус}}^c, K_{\text{ус}}^c$ — крутизна усилителя контура обратной связи ДНГ и стенда.

На рис.5 показаны основные моменты, приложенные к ротору ДНГ, и его угловые скорости.

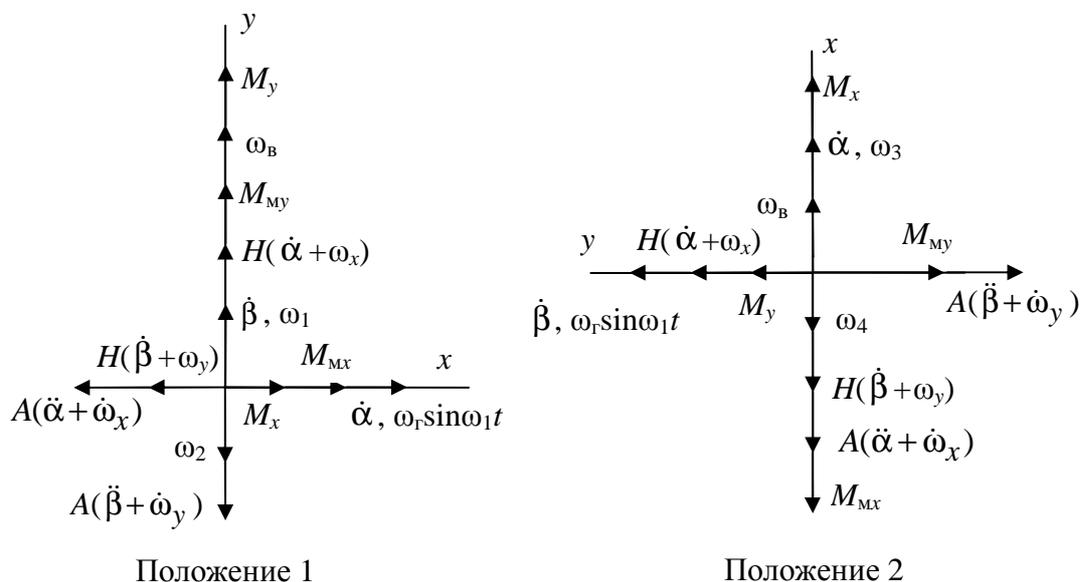


Рис. 5. Моменты приложенные к ротору ДНГ

где: хуз — система координат связанная с корпусом;

α, β — углы отклонения ротора ДНГ относительно корпуса вокруг осей

соответственно x и y ;

ω_x, ω_y — компоненты абсолютной угловой скорости движения корпуса в системе координат $хуz$.

A — экваториальный момент инерции ротора ДНГ;

H — кинетический момент ротора ДНГ;

$A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_x), A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_y)$ — инерционные моменты ротора ДНГ;

$H(\dot{\alpha} + \omega_x), H(\dot{\beta} + \omega_y)$ — гироскопические моменты ротора ДНГ;

M_x, M_y — внешние моменты, приложенные к ротору ДНГ;

$M_{mx} = K'_{xy}J_y + K'_{yx}J_x, M_{my} = K'_yJ_x + K'_{yx}J_y$ — моменты, развиваемые датчиком момента при прохождении тока по катушкам датчиков момента x и y ;

$K'_x = HK_y, K'_y = HK_x$ — крутизна датчиков моментов ДМ _{x} и ДМ _{y} по моменту;

$K'_{xy} = HK_{yx}, K'_{yx} = HK_{xy}$ — перекрестная крутизна ДМ по моменту.

Уравнения движения ДНГ в одноосном гиросtabilизаторе с контуром обратной связи имеют вид:

$$\begin{cases} A\ddot{\alpha}_1 + H\dot{\beta}_1 + M_{mx} = M_x \\ A\ddot{\beta}_1 - H\dot{\alpha}_1 - M_{my} = M_y \end{cases} \quad (5)$$

где: $-\dot{\alpha}_1 = \dot{\alpha} + \omega_x, \dot{\beta}_1 = \dot{\beta} + \omega_y$ — абсолютные угловые скорости движения ротора гироскопа,

– для положения 1 ($i = 1, 2$): $\omega_y = \omega_i + \omega_B, \omega_x = \omega_i \sin \omega_i t$;

– для положения 2 ($i = 3, 4$): $\omega_x = \omega_i + \omega_B, \omega_y = \omega_i \sin \omega_i t$.

Уравнение движения платформы гиросtabilизатора:

$$\text{– для положения 1: } J_{\Pi} \dot{\omega}_i - K_{mc} K_c W_c(s) \beta + D_c \omega_i = M_c, \quad (6)$$

$$\text{– для положения 2: } J_{\Pi} \dot{\omega}_i - K_{mc} K_c W_c(s) \alpha + D_c \omega_i = M_c, \quad (7)$$

где J_{Π} — момент инерции платформы вокруг оси вращения;

K_{mc} — крутизна датчика момента стенда;

D_c — коэффициент демпфирования стенда вокруг его оси вращения;

M_c — внешние моменты, приложенные к стенду.

Структурная схема для положения 1, соответствующая уравнениям (5) и (6), имеет вид представленный на рис.6.

где $W_{dm}(s) = \frac{1}{0.005s + 1}$ используется для исключения скачкообразного изменения тока

в моментном датчике при подаче тока от внешнего источника.

При моделировании были использованы параметры ДНГ типа МГ-4 [4], с техническими характеристиками: $A=5 \cdot 10^{-7}$ Н·м·с², $H=1.4 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с, $K_{\text{дв}}=6$ В/рад. Технические характеристики стенда (с платформой: $R=0.15$ м, $h=0.018$ м): $J_{\text{п}}=0.04$ Н·м·с², $K_{\text{мс}}=1$ Н·м/А, $D_{\text{с}}=0.01$ Н·м·с. При моделировании из условий обеспечения качества переходных процессов были определены следующие параметры КОС ДНГ (см. формулу (3)): $K_{\text{yc}}=3$ А/В, $T_1=0.015$ с, $T_2=0.001$ с, и параметры КОС стенда (см. формулу (4)): $K_{\text{yc}}^{\text{с}}=200$ А/В, $T_{\text{с1}}=0.012$ с, $T_{\text{с2}}=0.0012$ с, $T_{\text{с3}}=0.0001$ с.

На рис.7 представлены результаты моделирования движения ротора гироскопа и платформы при воздействии входного тока $J_y=50$ мА, где видно, что через 0.06 секунд углы отклонения ротора относительно корпуса ДНГ α и β практически равны нулю, угловая скорость ротора ДНГ ω_x равна нулю, а угловая скорость платформы ω_1 соответствует угловой скорости ротора ДНГ ω_y по калибруемой оси стремящейся к установившемуся значению равному $\omega=2.8$ °/с.

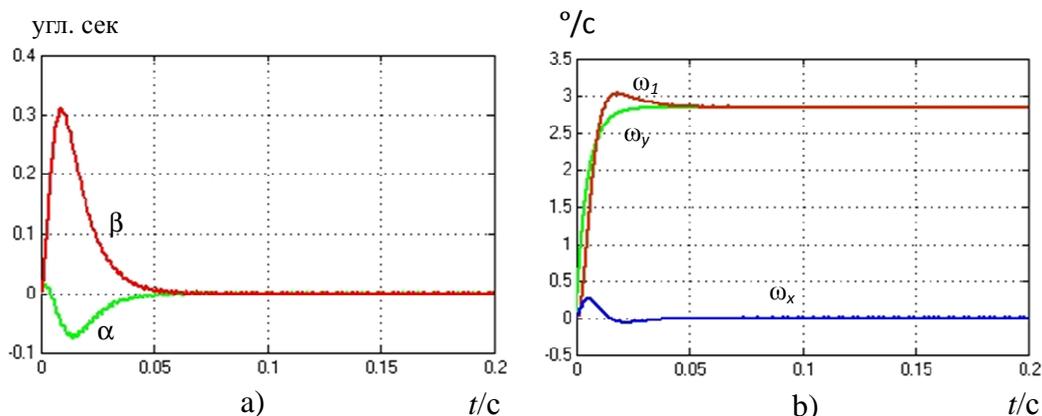


Рис.7. Переходные процессы в положении 1

Для положения 2 структурная схема, а также моделирование движения ротора ДНГ и платформы в среде *Simulink (Matlab)*, выполняются аналогично положению 1.

Алгоритм калибровки

Гироскоп устанавливается в положении 1 (ось y – вдоль оси вращения стенда). Канал x ДНГ включается в режим электрической пружины (режим ДУС) для исключения погрешности от угла разворота ротора гироскопа и исключения касания им

упора. В датчик момента канала y подается ток J_y от внешнего источника питания. Ротор гироскопа начинается прецессировать по оси y . Сигнал с датчика угла канала y через усилитель-фазовый детектор подается на усилитель-преобразователь и с него на обмотку двигателя разгрузки, который разворачивает платформу в сторону уменьшения угла поворота ротора гироскопа относительно платформы вокруг оси y . Таким образом, контур стабилизации разворачивает платформу со скоростью прецессии ротора вокруг оси стабилизации.

Измерение угловой скорости платформы осуществляется измерением как угла поворота платформы α (с помощью импульсного датчика угла платформы) так и времени разворота t на этот угол, т.е.

$$\omega_i = \frac{\alpha_i}{t_i} \text{ (в положении 1: } i = 1, 2; \text{ в положении 2: } i = 3, 4) \quad (8)$$

Так как угловая скорость ротора в установившемся движении равна угловой скорости корпуса, то уравнения движения ротора при калибровке имеют следующий вид:

В положении 1 ($i = 1, 2$)

$$\begin{cases} \omega_{x0} + K_x J_{xi} + K_{xy} J_{yi} - \omega_k = (-1)^{i+1} \omega_r \sin \omega_i t \\ \omega_{y0} + K_{yx} J_{xi} + K_y J_{yi} + \omega_g = (-1)^{i+1} \omega_i + \omega_B \end{cases} \quad (9)$$

В положении 2 ($i = 3, 4$)

$$\begin{cases} \omega_{x0} + K_x J_{xi} + K_{xy} J_{yi} + \omega_g = (-1)^{i+1} \omega_i + \omega_B \\ \omega_{y0} + K_{yx} J_{xi} + K_y J_{yi} + \omega_k = (-1)^{i+1} \omega_r \sin \omega_i t \end{cases} \quad (10)$$

Учитывая, что величины токов в каналах ортогональных оси вращения стенда из-за проекции на эту ось горизонтальной компоненты угловой скорости Земли ω_r (см. формулы (9) и (10)) изменяются с частотой вращения платформы ω_i , необходимо усреднять значение измеряемых токов за период вращения. Для средних значений токов системы уравнения (9) и (10) преобразуются к следующему виду:

$$\begin{cases} \omega_{x0} + K_x \bar{J}_{xi} + K_{xy} \bar{J}_{yi} - \omega_k = 0 \\ \omega_{y0} + K_{yx} \bar{J}_{xi} + K_y \bar{J}_{yi} + \omega_g = (-1)^{i+1} \omega_i + \omega_B \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \omega_{x0} + K_x \bar{J}_{xi} + K_{xy} \bar{J}_{yi} + \omega_g = (-1)^{i+1} \omega_i + \omega_B \\ \omega_{y0} + K_{yx} \bar{J}_{xi} + K_y \bar{J}_{yi} + \omega_k = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Из систем уравнения (11) и (12) после преобразований получаем систему уравнений, где исключены постоянные составляющие движения ротора гироскопа.

$$\begin{cases} K_x(\bar{J}_{x1} - \bar{J}_{x2}) + K_{xy}(\bar{J}_{y1} - \bar{J}_{y2}) = 0 \\ K_{yx}(\bar{J}_{x1} - \bar{J}_{x2}) + K_y(\bar{J}_{y1} - \bar{J}_{y2}) = \omega_1 + \omega_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} K_x(\bar{J}_{x3} - \bar{J}_{x4}) + K_{xy}(\bar{J}_{y3} - \bar{J}_{y4}) = \omega_3 + \omega_4 \\ K_{yx}(\bar{J}_{x3} - \bar{J}_{x4}) + K_y(\bar{J}_{y3} - \bar{J}_{y4}) = 0 \end{cases}, \quad (14)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ определяются по формуле (8);

Отсюда получаем масштабные коэффициенты датчиков момента ДНГ

$$\begin{aligned} K_{xy} &= -K_x \delta J_{xy}, & K_{yx} &= -K_y \delta J_{yx} \\ K_x &= \frac{\omega_3 + \omega_4}{\bar{J}_{y3} - \bar{J}_{y4}} \frac{1}{\Delta}, & K_y &= \frac{\omega_1 + \omega_2}{\bar{J}_{y1} - \bar{J}_{y2}} \frac{1}{\Delta} \end{aligned} \quad (15)$$

где, $\delta J_{xy} = \frac{\bar{J}_{x1} - \bar{J}_{x2}}{\bar{J}_{y1} - \bar{J}_{y2}}$; $\delta J_{yx} = \frac{\bar{J}_{y3} - \bar{J}_{y4}}{\bar{J}_{x3} - \bar{J}_{x4}}$; $\Delta = 1 - \delta J_{xy} \delta J_{yx}$.

Таким образом, алгоритм калибровки может быть представлен в виде показанном на рис.8.

Из полученных соотношений (15) следует, что точность калибровки определяется точностью измерения угловых скоростей стенда $\omega_1 \dots \omega_4$, и токов в моментных датчиках $J_{x1} \dots J_{y4}$.

Точность измерения угловой скорости платформы определяется точностью измерения угла поворота платформы $\alpha_1 \dots \alpha_4$ и времени $t_1 \dots t_4$ разворота на эти углы:

— углы поворота платформы можно измерить с помощью датчика угла аналогичного ДУ в ДНГ используя его в импульсном режиме. Эти углы можно с высокой точностью определить в процессе предварительной аттестации стенда, например, с помощью оптического теодолита типа УОМЗ ЗТ2КП имеющего точность $2''$. И таким образом можно обеспечить точность измерения δ_1 не

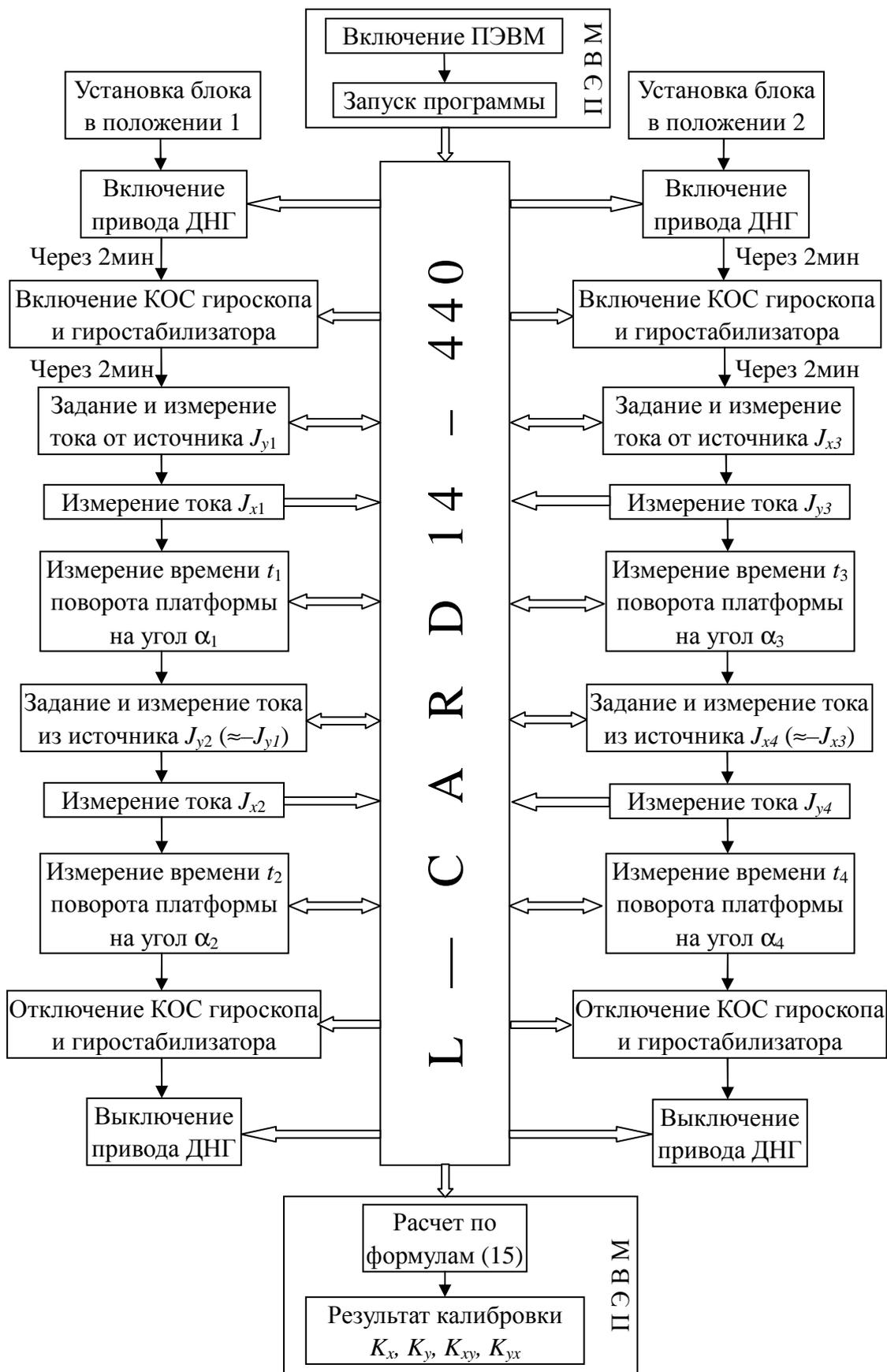


Рис.8.Алгоритм калибровки

хуже $0.5 \cdot 10^{-3}\%$ при изменении углы не меньше 120° .

— время разворота платформы на заданный угол можно измерить с помощью серийных устройств, например частотомеров типа ЧЗ-54 или ЧЗ-57 имеющих точность δ_2 не хуже $10^{-5}\%$.

Точность задания и измерения токов $J_{x1} \dots J_{y4}$ определяются стабильностью источника питания, например высокостабильного источника питания типа ВК *Precision* 9184 (диапазон: (0–1)А; стабильность тока: 0.1%) и точностью измерительного прибора, например электронного вольтметра типа НР-34420А с точностью $0.2 \cdot 10^{-3}\%$.

Таким образом, с учетом вышесказанного, погрешность определения масштабных коэффициентов может быть обеспечена не хуже $\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} < 0.001\%$.

К достоинствам предложенного метода можно отнести следующие возможности:

- задания угловых скоростей, соответствующих условиям эксплуатации,
- выявления нелинейности масштабных коэффициентов от угловой скорости,
- выявления зависимости масштабных коэффициентов от температуры ДМ, которая в свою очередь может являться функцией угловой скорости,
- определения с высокой точностью (не хуже 0.001%) масштабных коэффициентов датчиков угловой скорости.

Заключение

В данной работе предложена экономичная и простая схема высокоточного поворотного стенда для калибровки датчиков угловой скорости на базе одноосного гиросtabilизатора.

Предложен алгоритм калибровки прецизионных датчиков угловой скорости на данном стенде, обеспечивающий точность определения масштабных коэффициентов не хуже 0.001%.

Определены требования к системе измерения угловой скорости платформы и токов в калибруемых датчиках момента.

Определены параметры контуров обратной связи системы стабилизации и динамически настраиваемого гироскопа в режиме ДУС.

Список литературы

1. Подчерзцев В.П. Моделирование и испытание инерциальных навигационных систем: Курс лекций. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 33 с.

2. Подчезерцев В.П., Ластович М.Ю., Кулешов А.В., Фатеев В.В. Динамически настраиваемый гироскоп. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 23 с.
3. Матвеев В.А., Подчезерцев В.П. Погрешности динамически настраиваемого гироскопа от вибрации. // Вестник Московского государственного технического университета. Сер. Приборостроение. 1999. №1. С. 40–49.
4. Матвеев В.А., Подчезерцев В.П., Фатеев В.В., Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 103 с.
5. Подчезерцев В.П., Цинь Цзыхао. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение определения матрицы масштабных коэффициентов двухкомпонентного ДУС инерциального класса // XXXVIII академические чтения по космонавтике: труды. М.: НПО Машиностроения, 2014. С. 595.
6. Веремеенко К.К., Галай И.А. Лаборатория испытаний инерциальных навигационных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 7. С. 57-66.
7. Грязин Д.Г., Величко О.О., Чекмарев А.Б. Метрологическое обеспечение испытаний микромеханических датчиков и модулей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 7. С. 67–76.