

ДВУХСТЕПЕННОЙ ГИРОКОМПАС ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИНТЕНСИВНОЙ КАЧКЕ ОСНОВАНИЯ

Гераимчук М. Д.,
Лазарев Ю. Ф.,
Аксененко П. М.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»

Аннотация. Двухступенной гироскоп (ДГК) не используется на подвижных объектах ввиду его чрезвычайной чувствительности к угловым колебаниям основания, на котором он установлен. При этом на первый план в образовании погрешности выходит постоянное отклонение главной оси гироскопа от направления на север. Именно оно не позволяет применять ДГК в реальных условиях даже незначительной качки.

Однако жесткая зависимость постоянной составляющей погрешности ДГК от параметров качки основания позволяет надеяться на использование ее для компенсации этой погрешности. Представляет интерес исследовать, как влияет высокочастотная интенсивная угловая вибрация корпуса на параметры вынужденных колебаний ДГК.

В работе рассматривается именно эта задача. По программной модели исследовано поведение ДГК в указанных условиях, построена теоретическая модель, позволяющая определить параметры исследуемого движения. Показана хорошая совместимость теоретических и модельных результатов.

Ключевые слова: ДГК, интенсивная вибрация основания, метод баланса.

TWO-STAGE GYROCOMPASS WITH HIGH-INTENSIVE BASE PITCHING

Geraimchuk M. D.,
Lazarev Yu. F.,
Aksonenko P. M.

College of Instrument Design and Engineering,
National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

Abstract. Two-stage gyrocompass (TSG) is not used on moving objects because of its extreme sensitivity to angular fluctuations of the base on which it is installed. Thus in the forefront in error formation a constant deviation of the main gyrocompass axis from northern direction is put. It is this that does not allow the use of TSG in real conditions of even minor pitching.

However, rigid dependence of TSG error fraction on the parameters of base pitching allows to hope to use it for the error reduction. The investigation of the influence of high-intensive angular case vibration on the parameters of forced TSG oscillations is of interest.

This paper considers exactly this task. After software model TSG behavior in specified conditions is studied, theoretical model that allows to determine the parameters of the movement under test is built. Good compatibility of theoretical and modeling results is shown.

Keywords: TSG, intense base vibration, balance method.

Постановка задачи. Кинематика двухступенного гироскопа представлена на рис. 1. Ось рамки Y_1 в среднем (при незначительных угловых вибрациях корпуса ДГК) совпадает с вертикалью места η .

Уравнение движения ДГК при качке основания будем рассматривать в виде

$$J\ddot{\beta} + H[\dot{\vartheta}_E \cos \beta + (\omega_3 \cos \varphi_\Gamma + \dot{\vartheta}_N) \sin \beta] = M, \quad (1)$$

где β – текущее отклонение главной оси гироскопа от направления на север; J – момент инерции ДГК относительно оси y_1 ; H – кинетический момент гироскопа; ω_3 – угловая скорость собственного вращения Земли; φ_Γ – географическая широта места; ϑ_E и ϑ_N – углы качки основания соответственно вокруг касательной к параллели места и по-

луденной линии; M – момент сил по измерительной оси.

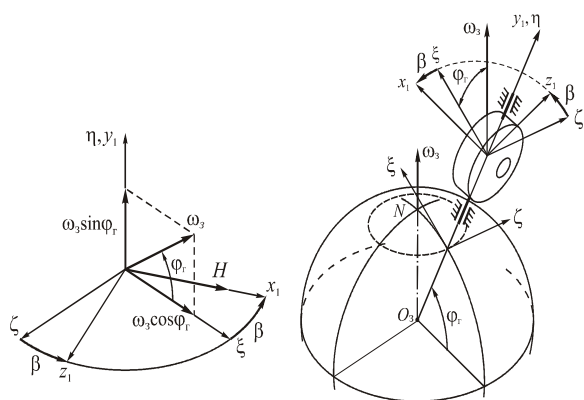


Рис. 1. Кинематика поворотов двухстепенного гирокомаса

В безразмерной форме уравнение (1) с учетом сил вязкого трения в измерительной оси удобно представить следующим образом:

$$\beta'' + 2\zeta\beta' + [1 + B'(\tau)] \sin \beta + A'(\tau) \cos \beta = 0, \quad (2)$$

где штрих обозначает производную по безразмерному времени; $\omega_0 = \sqrt{\frac{H\omega_3 \cos \varphi_\Gamma}{J}}$ –

частота собственных малых колебаний главной оси гирокомаса относительно северного направления; ζ – относительный коэффициент затухания;

$$A'(\tau) = k\vartheta'_E(\tau); \quad B'(\tau) = k\vartheta'_N(\tau);$$

$$k = \sqrt{\frac{H}{J\omega_3 \cos j_\Gamma}}. \quad (3)$$

В дальнейшем рассматривается гармоническая качка, происходящая по законам

$$\vartheta_E = \vartheta_{Em} \sin(\nu\tau); \quad \vartheta_N = \vartheta_{Nm} \sin(\nu\tau + \varepsilon) \quad (4)$$

с относительной частотой $\nu = \frac{\omega}{\omega_0}$, где ω_0 –

частота качки; амплитудами ϑ_{Em} угла качки вокруг оси запад-восток и ϑ_{Nm} – вокруг полуденной линии. В этих условиях уравнение (2) приобретает вид

$$\beta'' + 2\zeta\beta' + [1 + \nu N \cos(\nu\tau + \varepsilon)] \sin \beta + \nu E \cos(\nu\tau) \cos \beta = 0, \quad (5)$$

где $E = k\vartheta_{Em}$ и $N = k\vartheta_{Nm}$ – приведенные амплитуды качки.

Оценим возможные соотношения параметров качки основания и параметров вы-

званного ею движения главной оси ДГК относительно направления на север.

Если гирокомпас с кинетическим моментом $H_0 = 1 \text{ Н м с}$ и моментом инерции $J = 1,1607 \cdot 10^{-3} \text{ Н м с}^2$ расположен на экваторе ($\varphi_\Gamma = 0$), то период его собственных колебаний будет равен (см. [1, с. 423...438]) $T_0 \approx 25 \text{ с}$, т. е. частота его собственных колебаний составит $\omega_0 \approx 0,04 \text{ Гц}$. Частота же ω угловых колебаний корпуса ДГК на подвижных объектах обычно намного превышает эту величину, т.е. возмущения ДГК являются высокочастотными ($\nu \gg 1$). Поэтому к высокочастотным можно относить воздействия с частотами более $0,25 \text{ Гц}$.

В соответствии с [1, с. 430] качка основания с частотой $\omega = 1 \text{ Гц}$ и амплитудой всего в одну угловую минуту может привести при принятых параметрах ДГК к постоянному отклонению его главной оси от меридиана на угол около 30° , а амплитуда вынужденных колебаний главной оси гирокомаса относительно этого центра будет составлять около $2,3$. Иначе говоря, качку основания с амплитудой более угловой минуты следует рассматривать как интенсивную. При этом приведенные амплитуды при принятых параметрах гирокомаса становятся равными

$$E = 3438 \cdot \vartheta_{Em}^* = \vartheta_{Em}^*, \quad N = 3438 \cdot \vartheta_{Nm}^* = \vartheta_{Nm}^*,$$

где через ϑ_{Em}^* и ϑ_{Nm}^* обозначены соответствующие амплитуды, выраженные в угловых минутах. Итак, в этом случае приведенные амплитуды можно полагать амплитудами реальной качки, выраженными в угловых минутах. Поэтому, если приведенные амплитуды качки основания превышают единицу, то такую качку будем полагать интенсивной.

Задачей исследования является нахождение параметров возможных установившихся вынужденных колебаний устройства по углу β в условиях высокочастотной ($\nu \gg 1$) и интенсивной качки.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением движения при угловой вибрации основания вокруг неподвижной относительно Земли горизонтальной оси, составляющей с касательной к параллели места некоторый угол φ . В этом случае можно полагать

$$E = V_m \cos \varphi; \quad N = V_m \sin \varphi; \quad \varepsilon = 0,$$

где V_m – приведенная амплитуда угла качки.

1. Теоретическое исследование. Как показывает практика, для анализа поведения ДГК при интенсивной вибрации основания методы малого параметра неприменимы, так как они существенно опираются на предположение о малости внешних возмущений. Также неприменимым оказался и минимаксный метод Т. Г. Стрижак [2], хорошо показавший себя в применении к маятнику на вибрирующем основании. В этом случае методика Т. Г. Стрижак не позволяет прийти к усредненным уравнениям движения ДГК. Поэтому рассмотрим следующую последовательность операций, которую назовем методом баланса.

Компьютерное моделирование, состоящее в численном интегрировании уравнения (5), показало, что основным режимом движения рассматриваемой системы являются установившиеся вынужденные колебания оси собственного вращения ДГК относительно некоторого смещенного от направления на север центра. Поэтому частное решение уравнения (5) будем искать в виде суммы двух составляющих $\beta(\tau) = \bar{\beta} + \Delta\beta(\tau)$, где $\bar{\beta}$ предполагается медленно меняющимся средним значением угла β за период высокочастотного воздействия (центром малых колебаний маятника), а $\Delta\beta(\tau)$ – высокочастотной центрированной составляющей этого угла со средним значением, равным нулю ($\langle \Delta\beta(\tau) \rangle = 0$).

Теперь уравнение (5) можно представить так:

$$\Delta\beta'' + 2\zeta\Delta\beta' + \bar{\beta}'' + 2\zeta\bar{\beta}' + [1 + vV_m \sin \varphi \cos(v\tau)] \sin(\bar{\beta} + \Delta\beta) + vV_m \cos \varphi \cos(v\tau) \cos(\bar{\beta} + \Delta\beta) = 0 \quad (6)$$

Как показало моделирование, амплитуды вынужденных колебаний ДГК малы по величине ($|\Delta\beta| \ll 1$) даже при интенсивной вибрации основания. Это позволяет рассматривать вместо уравнения (6) его приближенную модификацию

$$\Delta\beta'' + 2\zeta\Delta\beta' + [\cos\bar{\beta} - vV_m \cos(v\tau) \sin(\bar{\beta} - \varphi)] \Delta\beta + \bar{\beta}'' + 2\zeta\bar{\beta}' + \sin\bar{\beta} + vV_m \cos(v\tau) \cos(\bar{\beta} - \varphi) = 0. \quad (7)$$

Чтобы получить уравнение для определения медленного движения $\bar{\beta}(\tau)$, усредним уравнение (7) по быстрому времени. Получим

$$\bar{\beta}'' + 2\zeta\bar{\beta}' + \sin\bar{\beta} - vV_m \sin(\bar{\beta} - \varphi) \langle \Delta\beta \cos(v\tau) \rangle = 0, \quad (8)$$

которое можно и удобнее использовать в таком виде:

$$\bar{\beta}'' + 2\zeta\bar{\beta}' + \sin\bar{\beta} + V_m \sin(\bar{\beta} - \varphi) \langle \Delta\beta'(\tau) \sin(v\tau) \rangle = 0. \quad (9)$$

Вычитая из исходного уравнения (7) усредненное уравнение (8), получим уравнение центрированных членов:

$$\Delta\beta'' + 2\zeta\Delta\beta' + \cos\bar{\beta}\Delta\beta - vV_m \sin(\bar{\beta} - \varphi) [\cos(v\tau)\Delta\beta(\tau) - \langle \Delta\beta(\tau) \cos(v\tau) \rangle] + vV_m \cos(v\tau) \cos(\bar{\beta} - \varphi) = 0$$

Пусть частота вибрации основания (а значит, и частота изменения центрированной составляющей движения ДГК) намного больше частоты собственных колебаний ДГК ($v \gg 1$). Тогда все члены левой части полученного уравнения будут намного меньше по амплитуде первого и последнего слагаемых, и ими можно пренебречь. В результате придем в первом, грубом приближении к соотношению

$$\Delta\beta'' + vV_m \cos(v\tau) \cos(\bar{\beta} - \varphi) = 0$$

или, интегрируя,

$$\Delta\beta' \approx -V_m \cos(\bar{\beta} - \varphi) \sin(v\tau). \quad (10)$$

Теперь можно конкретизировать уравнение (9) медленного движения:

$$\bar{\beta}'' + 2\zeta\bar{\beta}' + \sin\bar{\beta} - \frac{1}{4} V_m^2 \sin 2(\bar{\beta} - \varphi) = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11), в отличие от исходного нестационарного уравнения (6), является уравнением с постоянными коэффициентами.

Отличительной особенностью уравнения (11) является то, что оно позволяет исследовать не только положения равновесия, но и переходный процесс установления вынужденных колебаний. Кроме того, из соотношения (10) можно также определять амплитуду вынужденных колебаний.

Сумма последних двух слагаемых левой части уравнения (11) представляет собой безразмерный позиционный момент сил

$$P(\bar{\beta}) = \sin\bar{\beta} - \frac{1}{4} V_m^2 \sin[2(\bar{\beta} - \varphi)].$$

Равенство его нулю определяет положение β^* равновесия (т. е. центра стационарных колебаний). Итак, центры стационарных

колебаний могут быть определены решениями тригонометрического уравнения

$$\sin \beta^* - \frac{1}{4} V_m^2 \sin 2(\beta^* - \varphi) = 0. \quad (12)$$

В диапазоне $-\pi < \beta \leq \pi$ уравнение (12) может иметь от одного до четырех корней. Соответствует ли найденный корень устойчивому центру, определяется знаком функции

$$\Phi(\bar{\beta}) = \frac{\partial P(\bar{\beta})}{\partial \bar{\alpha}} = \cos \bar{\beta} - \frac{1}{2} V_m^2 \cos 2(\bar{\beta} - \varphi)$$

при найденном значении β^* корня. Если выполняется условие $\Phi(\beta^*) > 0$, то найденный центр колебаний β^* устойчив. При отрицательном значении этой величины соответствующий центр является неустойчивым.

Нетрудно видеть, что выражение $\Phi(\beta^*)$ определяет квадрат безразмерной частоты v_0^* переходных колебаний ДГК при установлении колебаний относительно центра β^* :

$$v_0^* = \sqrt{\Phi(\beta^*)} = \sqrt{\cos \beta^* - \frac{V_m^2}{2} \cos 2(\beta^* - \varphi)}. \quad (13)$$

Возвращаясь к центрированной составляющей решения, найдем из (10):

$$\Delta \beta' \approx -V_m \cos(\beta^* - \varphi) \sin(v\tau),$$

откуда следует

$$\Delta \beta \approx \frac{V_m}{v} \cos(\beta^* - \varphi) \cos(v\tau).$$

Амплитуда вынужденных колебаний ДГК определяется выражением

$$\beta_m \approx \frac{V_m}{v} \cos(\beta^* - \varphi). \quad (14)$$

1.1. Колебания основания вокруг оси север-юг

Колебаниям основания вокруг оси север-юг соответствует значение угла $\varphi = 90^\circ$. При этом формулы (12)...(14) приобретают вид:

$$\begin{aligned} \sin \beta^* (1 + \frac{1}{2} V_m^2 \cos \beta^*) &= 0; \\ v_0^* &= \sqrt{\cos \beta^* + \frac{V_m^2}{2} \cos 2\beta^*}; \beta_m \approx \frac{V_m}{v} \sin \beta^*. \end{aligned}$$

Изучение их приводит к следующим выводам:

1. *Центры, соответствующие корням $\cos \beta^* = -\frac{2}{V_m^2}$, всегда неустойчивы.*

2. *Северное положение равновесия главной оси ДГК при качке основания вокруг оси север-юг всегда устойчиво, а сами вынужденные колебания имеют амплитуду, равную нулю.*

3. *Южное положение равновесия становится устойчивым, если приведенная амплитуда V_m качки основания вокруг полуденной линии превышает величину*

$$V_m > \sqrt{2}. \quad (15)$$

Амплитуда вынужденных колебаний относительно южного положения также равна нулю.

4. *Частота переходного процесса при приближении главной оси гирокомпас к северному направлению определяется выражением*

$$n_0^* = \sqrt{1 + \frac{V_m^2}{2}}.$$

5. *Частота переходного процесса при приближении главной оси гирокомпас к южному направлению определяется выражением*

$$v_0^* = \sqrt{\frac{V_m^2}{2} - 1}.$$

На рис. 2 показаны (линиями с точками) графики зависимостей частот переходного процесса относительно северного (синяя линия) и южного (красная линия) положений равновесия ДГК от амплитуды качки основания вокруг полуденной линии. На том же рисунке квадратными маркерами показаны результаты измерения относительных частот переходных процессов, полученных компьютерным моделированием при частоте качки $v = 10$ и $v = 20$.

Нетрудно видеть, что при малых амплитудах ($V_m < \frac{v}{3}$) вибрации метод баланса (приводящий к тем же результатам, что и метод усреднения) дает удовлетворительное совпадение с модельным экспериментом. Однако при больших амплитудах ($\frac{n}{2} > V_m > \frac{n}{3}$) различие эксперимента с теорией достигает 35 %.

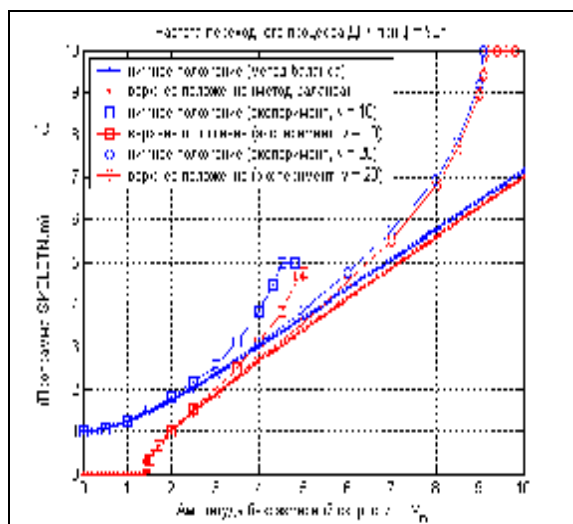


Рис. 2. Частота переходного процесу при качке вокруг полуденной линии

1.2. Колебания основания вокруг оси восток-запад

В этом случае $\varphi=0$ и формулы (12)...(14) приобретают вид:

$$\sin \beta^* (1 - \frac{1}{2} V_m^2 \cos \beta^*) = 0;$$

$$v_0^* = \sqrt{\cos \beta^* - \frac{V_m^2}{2} \cos 2\beta^*}; \quad \beta_m \approx \frac{V_m}{v} \cos \beta^*.$$

Поэтому выводы следуют такие.

1. При колебаниях основания вокруг оси запад-восток колебания ДГК относительно направления на север устойчивы, если амплитуда качки основания подчиняется условию

$$V_m < \sqrt{2}, \quad (16)$$

при этом установившиеся вынужденные колебания имеют амплитуду $\beta_m = \frac{V_m}{v}$ и становятся неустойчивыми при амплитуде скорости, подчиняющейся условию (15).

2. Частота переходного процесса относительно направления на север определяется выражением $v_0 = \sqrt{1 - \frac{V_m^2}{2}}$, т. е. уменьшается (от единицы до нуля при амплитуде $V_m = \sqrt{2}$) с ростом интенсивности вибрации основания.

3. При качке основания вокруг линии запад-восток колебания ДГК относительно южного положения равновесия всегда неустойчивы.

4. Положения равновесия, определяемые условием $\cos \beta^* = \frac{2}{V_m^2}$, располагаются в

северной горизонтальной полуплоскости симметрично относительно направления на север и имеют реальный смысл лишь при выполнении условия (15). Поэтому *при выполнении условия (15) колебания маятника около рассматриваемых положений равновесия являются устойчивыми*. Амплитуда колебаний ДГК относительно этих положений

определяется равенством $\beta_m = \frac{2}{v V_m}$, а частота

переходного процесса – соотношением

$$v_0 = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{4}{V_m^4}}.$$

График зависимости положения центра колебаний от амплитуды качки основания вокруг оси запад-восток, построенный в соответствии с формулой (12), приведен на рис. 3 (точками). Там же приведены аналогичные графики, построенные на основе применения метода возмущений (звездочками). Квадратными маркерами нанесены результаты измерения положений центров при возмущении с частотой $v=10$, полученные при программном моделировании.

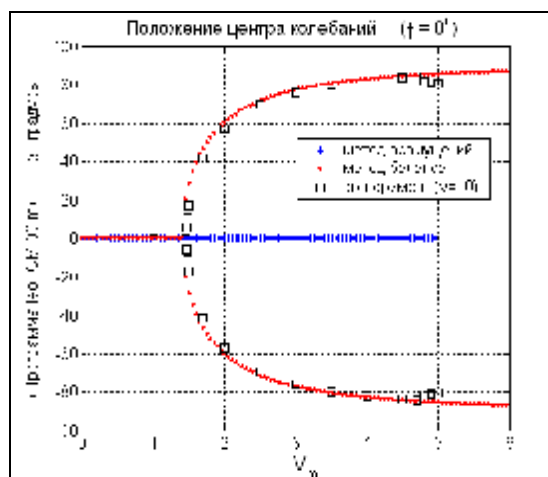


Рис. 3. Положения центров колебаний

На рис. 4 представлены зависимости амплитуд вынужденных колебаний ДГК, рассчитанные по формулам метода баланса (точками) и метода возмущений (звездочками) для частоты возмущения $v=10$. Квадратные маркеры отмечают соответствующие значения амплитуды, полученные путем программного моделирования движения маятника.

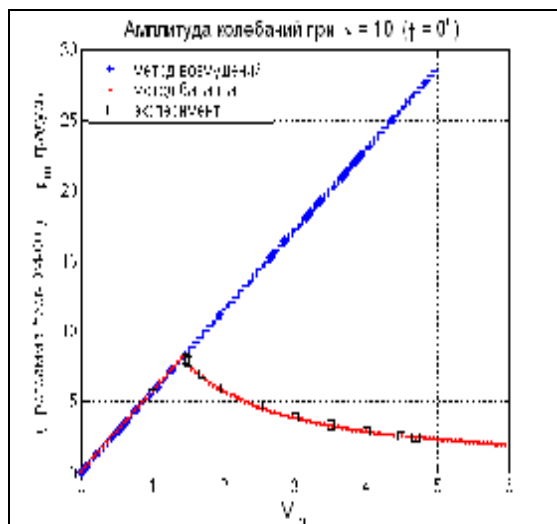


Рис. 4. Амплитуды вынужденных колебаний

Рис. 5 представляет (точками) графики теоретических зависимостей (13) частот переходного процесса ДГК относительно северного и боковых положений равновесия от приведенной амплитуды качки основания. Квадратными маркерами отмечены модельные замеры частоты переходного процесса при частоте вибрации основания $\nu = 10$.

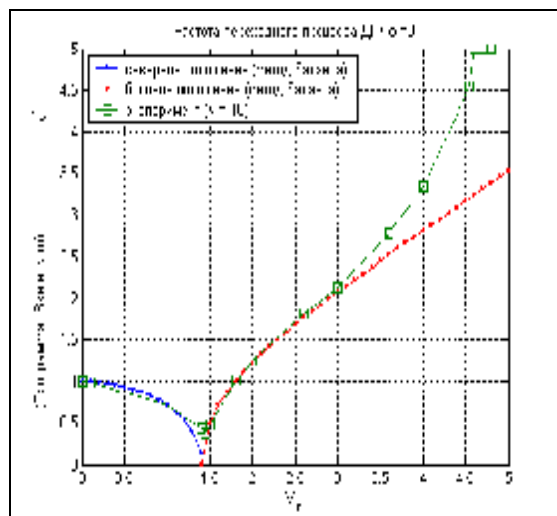
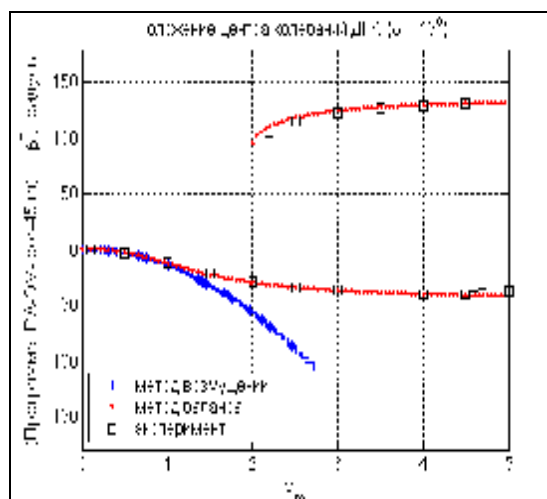
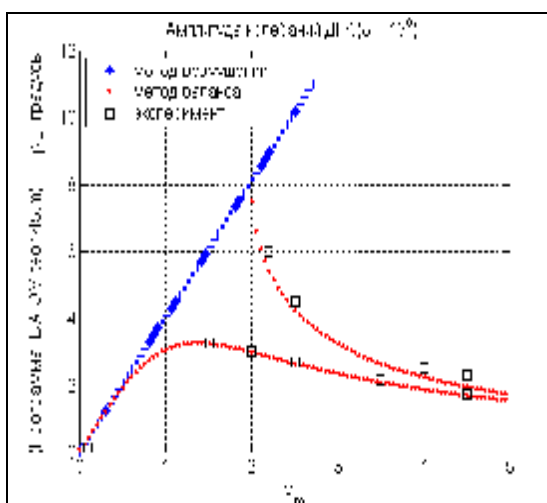


Рис. 5. Частоты переходного процесса ДГК

Результаты моделирования совпадают с предсказанными теорией во всем диапазоне существования вынужденных колебаний. Начиная со значений амплитуд $V_m \approx \frac{\nu}{2}$, вынужденные колебания, происходящие с частотой ν вибрации основания, сменяются параметрическими, частота которых вдвое меньше.

1.3. Колебания основания вокруг оси юго-восток–северо-запад

Качка основания вокруг оси, наклоненной к странам света под 45° , вызывает установление вынужденных колебаний с параметрами, графическое представление которых приведено на рис. 6 и 7. Положения устойчивых центров вынужденных колебаний, найденные различным путем, показаны на рис. 6.

Рис. 6. Центры колебаний при $\phi = 45^\circ$ Рис. 7. Амплитуды вынужденных колебаний при частоте качки $\nu = 10$

На рис. 7 представлены зависимости амплитуд вынужденных колебаний ДГК, рассчитанные по формулам метода баланса (точками) и метода возмущений (звездочками) для частоты возмущения $\nu = 10$. Квадратные маркеры отмечают соответствующие значения амплитуды, полученные путем программного моделирования движения маятника.

Как видим, в этом случае совпадение теории с модельным экспериментом практически полное. Метод возмущений приводит к удовлетворительным значениям амплитуд лишь при малых интенсивностях вибрации основания ($V_m \leq 1$).

Интересно заметить, что в соответствии с теорией и результатами моделирования положения центров вынужденных колебаний и частоты переходных процессов определяются лишь величиной V_m приведенной амплитуды угловой вибрации основания и не зависят от ее частоты. Амплитуды же вынужденных колебаний в этих условиях обратно пропорциональны частоте вибрации основания

2. Программное моделирование. Программное моделирование осуществлялось путем численного интегрирования в среде компьютерной системы Matlab дифференциального уравнения (5).

Движение ДГК при качке основания вокруг оси, касательной к параллели места, представлено на рис. 8. При $V_m > 1,41$ северное положение становится неустойчивым. Вместо него возникают два устойчивых положения равновесия, симметричные относительно направления на север. Какое из них будет средним положением вынужденных колебаний, зависит от начальных условий, как это показано на рисунках. С увеличением амплитуды качки увеличивается и частота переходного процесса.

Изменение характера движения ДГК при приближении приведенной амплитуды V_m качки к половине относительной частоты качки ($V_m \rightarrow \frac{v}{2}$) показано на рис. 9. В этом случае частота переходного процесса становится равной половине относительной частоты качки ($V_0^* = \frac{v}{2}$). А при некотором верхнем пределе амплитуды вибрации основания (на рис. 9 – при $V_m = 9,1$) вынужденные колебания ДГК сменяются параметрическими, происходящими с частотой, вдвое меньшей частоты возбуждения.

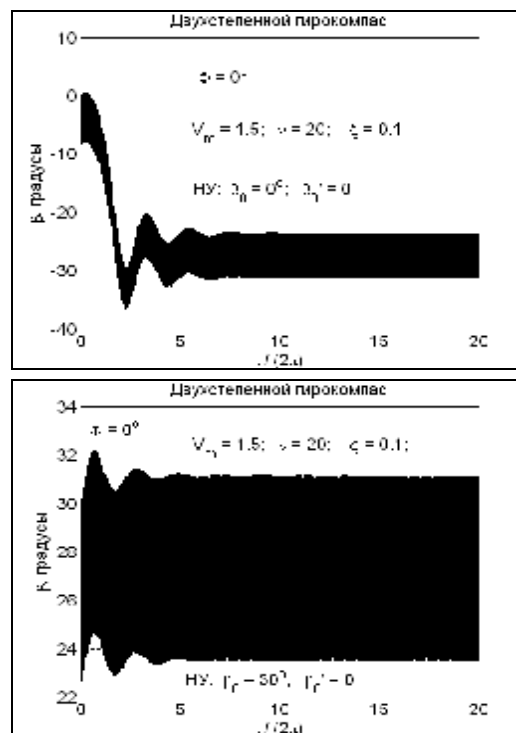


Рис. 8. Качка основания вокруг оси, касательной к параллели

В этом случае частота переходного процесса становится равной половине относительной частоты качки ($V_0^* = \frac{v}{2}$).

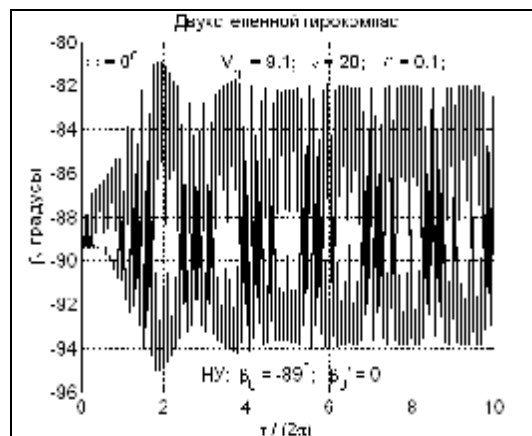


Рис. 9. Возникновение параметрических колебаний

Амплитуда установившихся параметрических колебаний резко возрастает по сравнению с амплитудой вынужденных колебаний и продолжает увеличиваться при увеличении интенсивности вибрации основания. Переходный процесс приобретает характер биений. Дальнейшее увеличение амплитуды вибрации основания приводит к возрастанию частоты биений. При частоте $v = 20$ превы-

шение амплитуды V_m значения 9,82 приводит к резкому изменению характера движения ДГК. Установившиеся колебания сменяются режимом постоянного одностороннего вращения главной оси ДГК вокруг вертикали места. Таким образом, можно прийти к выводу, что при угловой вибрации основания с амплитудой, подчиненной условию

$$\vartheta_m \geq \vartheta_m^* = \frac{J\omega}{2H}, \quad (9)$$

двухстепенной гирокомпас становится неработоспособным, совершая непрерывное вращение вокруг своей измерительной оси.

Выводы:

1. Движение ДГК резко различно в трех диапазонах изменения амплитуды угловых колебаний основания:

- 1) $0 < \vartheta_m < \sqrt{\frac{2J\omega_3 \cos \varphi_r}{H}};$
- 2) $\sqrt{\frac{2J\omega_3 \cos \varphi_r}{H}} < \vartheta_m < \frac{J\omega}{2H};$
- 3) $\frac{J\omega}{2H} < \vartheta_m.$

2. В первом диапазоне движение ДГК удовлетворительно описывается методами малого параметра. Здесь устанавливается только один центр вынужденных колебаний при любых начальных условиях.

3. Во втором диапазоне наблюдается возникновение нескольких устойчивых положений центров вынужденных колебаний, потеря устойчивости некоторых прежних центров, изменение частоты переходных процессов при изменении амплитуды вибрации основания.

4. Вблизи верхнего предела второго диапазона наблюдается стабилизация частоты переходного процесса на уровне половины частоты вибрации основания. При этом вынужденные колебания сменяются на параметрические, частота которых вдвое меньше частоты вибрации основания, амплитуда резко увеличивается с возрастанием амплитуды возмущения.

5. В третьем диапазоне колебания не устанавливаются при любых начальных усло-

виях. Главная ось гирокомпаса непрерывно вращается вокруг вертикали в одну сторону.

6. Метод баланса более универсален, чем минимаксный критерий устойчивости Т. Г. Стрижак, и приводит к результатам, значительно более близким к действительности, чем метод возмущений. Полученные методом баланса результаты находятся в согласии с известными особенностями поведения маятника и двухстепенного гирокомпаса, позволяя углубить и развить как количественно, так и качественно наши представления об этих интересных объектах.

Список литературы

1. Лазарев Ю. Ф. Основы теорії чутливих елементів систем орієнтації: підруч. / Ю. Ф. Лазарев, П. М. Бондар. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 644 с.
2. Стрижак Т. Г. Метод усреднения в задачах механики. – Киев, Донецк: Вища школа, 1982. – 250 с.
3. Лазарев Ю. Ф. Применение метода баланса для исследования поведения двухстепенного гирокомпаса при вибрации / Ю. Ф. Лазарев, П. М. Аксененко // Приладобудування: стан і перспективи: зб. тез доп. XII Міжнар. наук.-техн. конф. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 280 с.

References

1. Lazarev, Yu. F. & Bondar, P. M. (2011) The fundamentals of the theory of sensitive elements of orientation system. Kyiv: NTUU "KPI", 644 p. [in Ukrainian].
2. Stryzak, T. G. (1982) The averaging method in problems of mechanics. Kiev: Donetsk: Vyshcha shkola, 250 p. [in Russian].
3. Lazarev, Yu. F. & Aksonenko, P. M. (2013) The application of balance method for the study of two-stage gyrocompass behavior at vibration. "Instrumentation: Status and Prospects." The collection of abstracts of XII International Scientific Conference. Kyiv: NTUU "KPI", 280 p. [in Russian].