

Література

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576с.
2. Бочаров Ю.А., Прокофьев В.Н. Гидропривод кузнечно-прессовых машин. – М.: Высшая школа, 1969. – 248с.
3. Добринский Н.С. Гидравлический привод прессов. – М.: Машиностроение, 1975. – 222с.
4. Живов Л.И. Насосно-маховичный привод к гидравлическим прессам / Л.И. Живов, В.В. Щербина, В.М. Новак // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 1. – С. 19–22.
5. Баширин А.В. Управление электроприводами : [учеб. пособие для вузов] / Баширин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. Вольдек А.И. Электрические машины : [учеб. для студ. высш. техн. учебн. Заведений] / Вольдек А.И. – [3-е изд., перераб.]. – Л. : Энергоиздат, 1978. – 832 с.
7. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. Т. 2 / [под общ. ред. Копылова И.П., Клокова Б.К.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
8. Karmalita A.K., Yakymchuk D.M. Investigation of energetic parameters of electro-hydraulic press equipment // Вісник Чернігівського Державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2010. – № 42 – С.265–269.

УДК 629.7.054

# ДВУХКАНАЛЬНАЯ АВТОКОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ НА ДВУХСТЕПЕННОЙ ГИРОСКОП

**О.Я. Ковалец**

Ассистент

Кафедра биотехники и инженерии  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр-т Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056  
Контактный тел.: (044) 454-94-51  
E-mail: karachun1@gala.net

*Проводиться оцінка ефективності методу двохканальності для зменшення похибок двохступеневих гіроскопів, суть реалізації якого полягає у використанні двох електрично зв'язаних гіроскопів. Здійснюється якісний та кількісний аналіз впливу гармонічної хитавиці об'єкту на похибку вимірювань*

*Ключові слова: автокомпенсація, датчик кутової швидкості, гармонічні коливання*

*Проводится оценка эффективности метода двухканальности для уменьшения погрешностей двухступенных гироскопов, суть реализации которого заключается в использовании двух электрически связанных гироскопов. Осуществляется качественный и количественный анализ влияния гармонической качки объекта на погрешность измерений*

*Ключевые слова: автокомпенсация, датчик угловой скорости, гармонические колебания*

*The estimation of efficiency of method of twochannel is conducted for diminishing of errors of двухступенных gyroscopes, essence of realization of which consists in the use of two electrically connected gyroscopes. The high-quality and quantitative analysis of influence of the harmonic tossing of object is carried out on the error of measurings*

*Keywords: autoindemnification, sensor of angulator, harmonic vibrations*

## 1. Введение

Исследования относятся к области прикладной гироскопии и посвящены анализу уменьшения по-

грешностей двухступенных гироскопов путем автокомпенсации влияния внешних механических возмущений. Суть технической реализации заключается в использовании вместо одного – двух электрически

связанных гироскопов с противоположными направлениями вращения роторов и формировании выходного сигнала в виде разности сигналов двух приборов (рис. 1). Помимо этого, для обоих гироскопов вводится общая жесткая отрицательная обратная связь (ОС) по сумме их сигналов. Несомненным достоинством рассматриваемого метода является подавление влияния мгновенных значений возмущающих воздействий, не обязательно quasi-детерминированных.

## 2. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследований

Наиболее известными являются два метода повышения точности двухстепенных гироскопов. *Первый* основан на использовании двух гироскопов с противоположными направлениями вращения роторов и соединенных кинематически с помощью зубчатых секторов или шарнирного сочленения (антипараллелограмма). Этот метод имеет существенный недостаток. Наличие кинематической связи между гироскопами, нагруженными подавляемыми в ней моментами, приводит к увеличению моментов сил сухого трения и поэтому практически исключает применение поплавковых модификаций приборов.

*Второй метод* состоит в принудительном возврате на нуль подвижной части прибора (компенсационный метод) [1]. В этом случае устраняется только боковая чувствительность гироскопа по перекрестной угловой скорости, но, тем не менее, существенно уменьшается погрешность измерений. Основным недостатком метода состоит в необходимости ограничения угла поворота подвижной части прибора, что значительно снижает верхний предел рабочего диапазона [2]. Этот метод не уменьшает, к тому же, проявления внутренних причин – трения, дебаланса, тяжения токоподводов и др.

Установлено, что двухстепенной гироскоп неизменно имеет погрешность в виде дрейфа или сдвига нуля, вызванных качкой основания. Причем, этот факт присутствует даже при угле поворота подвижной части прибора равном нулю. Как оказалось, оба рассмотренных метода также не позволяют до конца решить задачу устранения влияния углового движения основания.

Существующие методы повышения точности гироскопов и гироскопических систем можно разделить на три группы:

*К первой группе* относятся методы конструкторско-технологических усовершенствований существующих элементов и создание новых типов подвесов, разработка гироскопов на иных физических принципах и т.п.

*Вторая группа* состоит из методов, использующих внешнюю информацию, которая позволяет компенсировать возмущающие моменты, действующие на гироскопы.

*Третья группа* – включает методы, основанные на автокомпенсации влияния инструментальных погрешностей гироскопов.

Первые две группы хорошо известны в настоящее время, теоретически достаточно полно и всесторонне изучены. Методы третьей группы – являются достижением приборостроительной техники и поэтому представляет значительный интерес.

Методы автокомпенсации предусматривают такое построение схемы прибора, при котором обеспечивается автономная, без привлечения внешней информации, компенсация влияния некоторых видов возмущающих воздействий и уменьшение соответствующих погрешностей. С физической точки зрения, в получивших наибольшее практическое применение методах автокомпенсации речь идет о создании искусственных движений гироскопа или элементов его подвеса, благодаря чему удается уменьшить влияние действующих на гироскоп возмущающих моментов и, тем самым, снизить погрешности приборов. Являясь сравнительно несложными и технически просто реализуемыми, методы автокомпенсации получили широкое практическое применение в приборах инерциальной навигации. Их внедрение в гироскопическое приборостроение можно считать одним из перспективных направлений в решении проблемы повышения точности ГУ. В связи с этим весьма актуальной представляется разработка эффективных методов автокомпенсации влияния помех на гироскоп.

Проведем оценку степени эффективности прекрасно зарекомендовавшего себя метода уменьшения погрешностей двухстепенных гироскопов на основе автокомпенсации влияния внешних механических возмущений по принципу двухканальности, сформулированного Б.Н. Петровым [3, 4].

## 3. Дифференцирующий гироскоп. Гармоническая качка

Выясним природу возмущенного движения прибора как следствие углового движения основания. Свяжем с объектом, на котором установлены оба гироскопа, систему координат  $xuz$ . Ось  $u$  направим по оси прецессии гироскопов, ось  $z$  – параллельно осям чувствительности гироскопов, ось  $x$  – таким образом, чтобы система координат  $xuz$  составляла правую тройку. Для определения проекций угловой скорости основания на эти оси воспользуемся широко применяемыми в теории качки корабля выражениями

$$\begin{aligned}\omega_x &= \dot{\theta} - \dot{\psi} \sin \psi \approx \dot{\theta} - \omega_z \psi; \\ \omega_y &= \dot{\psi} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \cos \theta \approx \dot{\psi} + \omega_z \theta; \\ \omega_z &= \dot{\psi} \cos \theta \cos \psi - \dot{\psi} \sin \theta \approx \omega_z - \dot{\psi} \theta.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь углы Эйлера  $\phi, \psi, \theta$  и их производные предполагаются малыми, а угловая скорость рыскания определяется выражением  $\dot{\phi} = \omega_z$ , причем, ее вектор принимается параллельным осям чувствительности обоих гироскопов, а входная величина считается равной нулю.

Уравнение движения датчика угловой скорости (ДУС) с автокомпенсацией влияния внешних возмущений запишем в форме Лагранжа в предположении малости постоянной времени усилителя в цепи обратной связи и кинетического момента гирокамеры. Решения ищем методом последовательных приближений. В соответствии с рис. 1 уравнения движения ДУС для первых двух приближений, запишем в виде [4]:

$$\begin{aligned}\ddot{\beta}_{11} + 2h_1 \dot{\beta}_{11} + n_1^2 \beta_{11} &= r_1 \omega_{1x} - q_1 \omega_{1z} - \dot{\omega}_{1y} - k_{01} (\beta_{11} + \beta_{12}); \\ \ddot{\beta}_{12} + 2h_2 \dot{\beta}_{12} + n_2^2 \beta_{12} &= r_2 \omega_{1x} - q_2 \omega_{1z} - \dot{\omega}_{1y} - k_{02} (\beta_{11} + \beta_{12});\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\beta}_{21} + 2h_1\dot{\beta}_{21} + n_1^2\beta_{21} &= r_1\omega_{2x} - q_1\omega_{2z} + \beta_{11}(r_1'\omega_{1x} - q_1'\omega_{1z}) + \\ &+ \frac{a_1}{2}[(\omega_{1x}^2 - \omega_{1z}^2)\sin 2\beta_{01} + 2\omega_{1x}\omega_{1z}\cos 2\beta_{01}] - \\ &- \dot{\omega}_{2y} - k_{01}(\beta_{21} + \beta_{22}) \\ \ddot{\beta}_{22} + 2h_2\dot{\beta}_{22} + n_2^2\beta_{22} &= r_2\omega_{2x} - q_2\omega_{2z} + \beta_{12}(r_2'\omega_{1x} - q_2'\omega_{1z}) + \\ &+ \frac{a_2}{2}[(\omega_{1x}^2 - \omega_{1z}^2)\sin 2\beta_{02} + 2\omega_{1x}\omega_{1z}\cos 2\beta_{02}] - \\ &- \dot{\omega}_{2y} - k_{02}(\beta_{21} + \beta_{22}) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\beta_{vi}$  – угол поворота подвижной части прибора;  $v=1,2$  – приближение,  $i=1,2$  – номер гироскопа;  $\frac{b_i}{B_i} = 2h_i$ ;  $\frac{c_i}{B_i} = k_{oi}^2$ ;  $\frac{r_{oi}}{B_i} = r_i$ ;  $\frac{q_{oi}}{B_i} = q_i$ ;  $\frac{R_i}{B_i} = a_i$ ;  $n_i^2 = k_{oi}^2$ ;  $B_i = I_{oi} + I_{yi}$ ;  $R_i = I_{oi} + I_{zi} - I_{xi}$ ;  $H_1 \approx -H_2$ ;  $r_{oi} = -H_i \sin \beta_{oi}$ ;  $q_{oi} = H_i \cos \beta_{oi}$ ;  $k_{oi} = \frac{k_i}{B_i}$ ;  $i=1,2$ ;  $I_{xi}, I_{yi}, I_{zi}$  – моменты инерции внутреннего кольца  $i$ -го гироскопа; штрихи обозначают производные по углу  $\beta_{oi}$ .

В соответствии с методом последовательных приближений, выходной сигнал прибора определяется выражением:

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots \quad (4)$$

Здесь  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – поправки к  $\beta_0$ , имеющие соответственно первый и второй порядок малости.

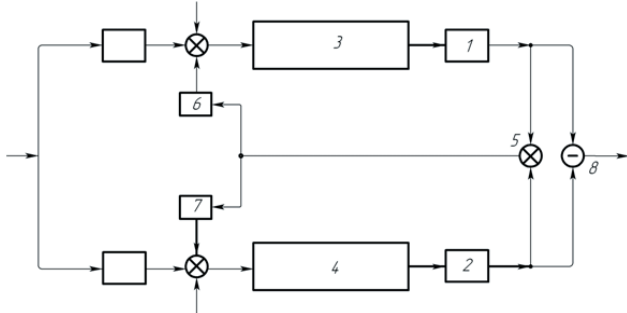


Рис. 1. Датчик угловой скорости с двухканальной автокомпенсацией влияния внешних помех: 1, 2 – датчики угла; 3, 4 – гиросмоторы; 5 – общий суммирующий усилитель; 6, 7 – датчики моментов; 8 – дифференциальный усилитель

Определим составляющие  $\beta_1$  и  $\beta_2$  выходного сигнала. Для составления передаточных функций схемы автокомпенсации воспользуемся методом направленных графов [5, 6, 7].

*Первое приближение.* Из уравнений (2) находим:

$$\begin{aligned} \beta_{11} &= \frac{r_1}{p^2 + 2h_1p + n_1^2}\omega_{1x} - \frac{q_1}{p^2 + 2h_1p + n_1^2}\omega_{1z} - \\ &- \frac{1}{p^2 + 2h_1p + n_1^2}p\omega_{1y} - \frac{k_{01}}{p^2 + 2h_1p + n_1^2}(\beta_{11} + \beta_{12}); \\ \beta_{12} &= \frac{r_2}{p^2 + 2h_2p + n_2^2}\omega_{1x} - \frac{q_2}{p^2 + 2h_2p + n_2^2}\omega_{1z} - \\ &- \frac{1}{p^2 + 2h_2p + n_2^2}p\omega_{1y} - \frac{k_{02}}{p^2 + 2h_2p + n_2^2}(\beta_{11} + \beta_{12}), \end{aligned} \quad (5)$$

В соответствии с выражениями (5), строим граф (рис. 2) и составляем его определитель

$$\begin{aligned} \Delta &= 1 + k_{01}\frac{1}{p^2 + 2h_1p + n_1^2} + k_{02}\frac{1}{p^2 + 2h_2p + n_2^2} = \\ &= \frac{1}{(p^2 + 2h_1p + n_1^2)(p^2 + 2h_2p + n_2^2)}[p^4 + (2h_1 + 2h_2)p^3 + \\ &+ (n_1^2 + n_2^2 + 2h_1 \cdot 2h_2 + k_{01} + k_{02})p^2 + \\ &+ (2h_1n_2^2 + 2h_1k_{02} + 2h_2n_1^2 + 2h_2k_{01})p + \\ &+ (n_1^2n_2^2 + k_{01}n_2^2 + k_{02}n_1^2)] = \\ &= \frac{1}{(p^2 + 2h_1p + n_1^2)(p^2 + 2h_2p + n_2^2)}\Delta_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно, необходимое условие устойчивости системы выполняется.

Определим передачи графа считая  $\omega_{1x}$ ,  $\omega_{1z}$  и  $\dot{\omega}_{1y}$  его источниками, а  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{12}$  и  $\beta_1 = \beta_{11} - \beta_{12}$  его стоками. Передачу  $i$ -го сквозного пути графа будем обозначать  $p_i$ , алгебраические дополнения  $i$ -го сквозного пути –  $\Delta_i$ .

1.  $\omega_{1x}$  – источник графа,  $\beta_{11}$  – сток.

$$p_1 = r_1 \frac{1}{p^2 + 2h_1p + n_1^2}; \quad \Delta_1 = 1 + k_{02} \frac{1}{p^2 + 2h_2p + n_2^2};$$

$$p_2 = r_2 \frac{1}{p^2 + 2h_2p + n_2^2}(-k_{01}) \frac{1}{p^2 + 2h_1p + n_1^2}; \quad \Delta_2 = 1.$$

По формуле Мэзона [8, 9] нетрудно определить передачу графа, источником которого является величина  $\omega_{1x}$ , а стоком –  $\beta_{11}$ :

$$W_{\beta_{11}}^{\omega_{1x}} = \frac{p_1\Delta_1 + p_2\Delta_2}{\Delta} = \frac{r_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + k_{02}) - r_2k_{01}}{\Delta_1}. \quad (7)$$

Аналогично составляем другие передаточные функции:

$$W_{\beta_{11}}^{\omega_{1z}} = \frac{-q_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + k_{02}) + q_2k_{01}}{\Delta_1};$$

$$W_{\beta_{11}}^{\dot{\omega}_{1y}} = \frac{-(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + k_{02}) + k_{01}}{\Delta_1};$$

$$W_{\beta_{12}}^{\omega_{1x}} = \frac{-r_1k_{02} + r_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + k_{01})}{\Delta_1};$$

$$W_{\beta_{12}}^{\omega_{1z}} = \frac{q_1k_{02} - q_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + k_{01})}{\Delta_1};$$

$$W_{\beta_{12}}^{\dot{\omega}_{1y}} = \frac{k_{02} - (p^2 + 2h_1p + n_1^2 + k_{01})}{\Delta_1};$$

$$W_{\beta_1}^{\omega_{1x}} = \frac{r_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})}{\Delta_1};$$

$$W_{\beta_1}^{\omega_{1z}} = \frac{-q_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) + q_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})}{\Delta_1};$$

$$W_{\beta_1}^{\dot{\omega}_{1y}} = \frac{-(2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) + (2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})}{\Delta_1}. \quad (8)$$

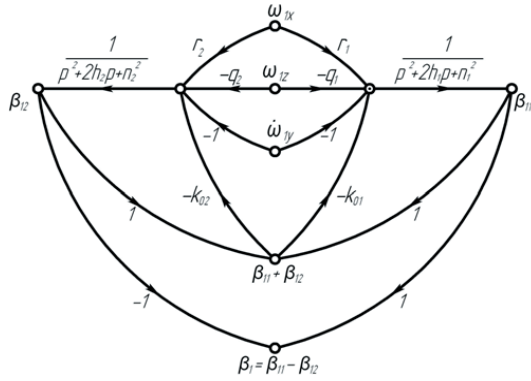


Рис. 2. Направленный граф ДУС с автокомпенсацией влияния внешних помех. Первое приближение  
В соответствии с топологическим законом передачи, имеем:

$$\begin{aligned} \beta_{11} &= W_{\beta_{11}^{\omega_{1x}}} \omega_{1x} + W_{\beta_{11}^{\omega_{1z}}} \omega_{1z} + W_{\beta_{11}^{\dot{\omega}_{1y}}} \dot{\omega}_{1y}; \\ \beta_{12} &= W_{\beta_{12}^{\omega_{1x}}} \omega_{1x} + W_{\beta_{12}^{\omega_{1z}}} \omega_{1z} + W_{\beta_{12}^{\dot{\omega}_{1y}}} \dot{\omega}_{1y}; \\ \beta_1 &= W_{\beta_1^{\omega_{1x}}} \omega_{1x} + W_{\beta_1^{\omega_{1z}}} \omega_{1z} + W_{\beta_1^{\dot{\omega}_{1y}}} \dot{\omega}_{1y}. \end{aligned} \quad (9)$$

Отсюда, с учетом найденных значений передач графа (7), (8), получаем:

$$\begin{aligned} \beta_{11} \Delta_1 &= [r_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + k_{02}) - r_2k_{01}] \omega_{1x} + \\ &+ [-q_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + k_{02}) + q_2k_{01}] \omega_{1z} + \\ &+ [-(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + k_{02}) + k_{01}] \dot{\omega}_{1y}; \\ \beta_{12} \Delta_1 &= [-r_1k_{02} + r_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + k_{01})] \omega_{1x} + \\ &+ [q_1k_{02} - q_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + k_{01})] \omega_{1z} + \\ &+ [k_{02} - (p^2 + 2h_1p + n_1^2 + k_{01})] \dot{\omega}_{1y}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta_1 \Delta_1 &= \\ &= [r_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})] \omega_{1x} + \\ &+ [-q_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) + q_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})] \omega_{1z} + \\ &+ [-(2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) + (2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})] \dot{\omega}_{1y}. \end{aligned} \quad (11)$$

Анализируя полученные выражения, нетрудно заметить, что при равенстве значений параметров обоих гироскопов правая часть уравнения (11) обращается в нуль и, следовательно, ошибка схемы автокомпенсации на качающемся основании отсутствует. В системе проявляются только собственные затухающие колебания.

Таким образом, при равенстве значений параметров обоих гироскопов, двухканальная автокомпенсация влияния внешних помех в первом приближении обеспечивает полную инвариантность выходного сигнала прибора  $\beta_1$  по отношению к внешним возмущениям.

Рассмотрим реакцию ДУС на гармонические колебания основания.

Предположим, что правая часть уравнения (11) представлена гармонической функцией  $f(t) = \rho \sin(\gamma t + \delta)$ :

$$a\beta_1^{IV} + b\beta_1^{III} + c\beta_1^{II} + d\beta_1^I + e\beta_1 = \rho \sin(\gamma t + \delta), \quad (12)$$

Тогда установившееся движение ДУС также будет гармоническим. Оно определяется из решения уравнения (12):

$$\beta_1 = \frac{\rho \sin(\gamma t + \delta + \varepsilon)}{\sqrt{(\gamma^4 - \gamma^2 c + e)^2 + (\gamma^3 b - \gamma d)^2}}, \quad (13)$$

Если в правой части уравнения (12) синус заменить на косинус, то

$$\beta_1 = \frac{\rho \cos(\gamma t + \delta + \varepsilon)}{\sqrt{(\gamma^4 - \gamma^2 c + e)^2 + (\gamma^3 b - \gamma d)^2}}. \quad (14)$$

Предположим, что колебания основания являются синхронными и происходят по гармоническому закону, т.е. углы  $\psi, \theta$  и угловая скорость  $\omega_z$  изменяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \theta &= \rho_\theta \sin(\gamma t + \delta_\theta); \quad \psi = \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi); \\ \omega_{1z} = \omega_z &= \gamma \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi). \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда уравнение (11) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \beta_1 \Delta_1 &= (p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02})(r_1\omega_{1x} - q_1\omega_{1z} - \dot{\omega}_{1y}) - \\ &- (p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})(r_2\omega_{1x} - q_2\omega_{1z} - \dot{\omega}_{1y}) = (r_2 - r_1)\gamma^3 \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta) + \\ &+ (q_1 - q_2)\gamma^3 \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi) + 2(h_1r_2 - h_2r_1)\gamma^3 \rho_\theta \sin(\gamma t + \delta_\theta) + \\ &+ 2(h_2 - h_1)\gamma^3 \rho_\psi \cos(\gamma t + \delta_\psi) + 2(h_2q_1 - h_1q_2)\gamma^2 \rho_\phi \sin(\gamma t + \delta_\phi) + \\ &+ [r_1(n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(n_1^2 + 2k_{01})] \gamma \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta) + [(n_2^2 + 2k_{02}) - (n_1^2 + 2k_{01})] \times \\ &\times \gamma^2 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi) + \\ &+ [q_2(n_1^2 + 2k_{01}) - q_1(n_2^2 + 2k_{02})] \gamma \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi). \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом найденных решений (13) и (14), определим  $\beta_1$  для случая, когда уравнение (11) представлено в виде (16):

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \{(-r_1 + r_2)\gamma^3 \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \varepsilon) + \\ &+ (q_1 - q_2)\gamma^3 \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \varepsilon) + \\ &+ 2(h_1r_2 - h_2r_1)\gamma^2 \rho_\theta \sin(\gamma t + \delta_\theta + \varepsilon) + \\ &+ 2(h_2 - h_1)\gamma^3 \rho_\psi \cos(\gamma t + \delta_\psi + \varepsilon) + \\ &+ (2h_2q_1 - 2h_1q_2)\gamma^2 \rho_\phi \sin(\gamma t + \delta_\phi + \varepsilon) + \\ &+ [(n_2^2 + 2k_{02})r_1 - (n_1^2 + 2k_{01})r_2] \times \\ &\times \gamma \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \varepsilon) + [(n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(n_1^2 + 2k_{01})] \times \\ &\times \gamma^2 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi + \varepsilon) + \end{aligned}$$

$$+[-q_1(n_2^2 + 2k_{02}) + q_2(n_1^2 + 2k_{01})] \gamma \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon) \times \left[ (\gamma^4 - \gamma^2 c + e)^2 + \gamma^2(\gamma^2 b - d) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Таким образом, качка основания приводит к появлению вынужденных колебаний выходного сигнала с частотой  $\gamma$  около значения  $\beta = \beta_0$ .

Для *асинхронных колебаний* основания, когда  $\theta = \rho_\theta \sin(\gamma_1 t + \delta_\theta)$ ;  $\psi = \rho_\psi \sin(\gamma_2 t + \delta_\psi)$ ;  
 $\omega_{1z} = \gamma_3 \rho_\phi \cos(\gamma_3 t + \delta_\phi)$  (18)

и  $\gamma_1 \neq \gamma_2 \neq \gamma_3$ , формула (17) несколько изменится

$$\begin{aligned} \beta_1 = & \{ (r_2 - r_1) \gamma_1^3 \rho_\theta \cos(\gamma_1 t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + 2(h_1 r_2 - h_2 r_1) \gamma_1^2 \rho_\theta \sin(\gamma_1 t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + [r_1(n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(n_1^2 + 2k_{01})] \gamma_1 \rho_\theta \cos(\gamma_1 t + \delta_\theta + \epsilon) \} \times \\ & \times \left[ (\gamma_1^4 - \gamma_1^2 c + e)^2 + \gamma_1^2(\gamma_1^2 b - d) \right]^{\frac{1}{2}} + \\ & + \{ 2(h_2 - h_1) \gamma_2^3 \rho_\psi \cos(\gamma_2 t + \delta_\psi + \epsilon) + \\ & + [(n_2^2 + 2k_{02}) - (n_1^2 + 2k_{01})] \gamma_2^2 \rho_\psi \sin(\gamma_2 t + \delta_\psi + \epsilon) \times \\ & \times \left[ (\gamma_2^4 - \gamma_2^2 c + e)^2 + \gamma_2^2(\gamma_2^2 b - d) \right]^{\frac{1}{2}} + \\ & + \{ (q_1 - q_2) \gamma_3^3 \rho_\phi \cos(\gamma_3 t + \delta_\phi + \epsilon) + \\ & + 2(h_2 q_1 - h_1 q_2) \gamma_3^2 \rho_\phi \sin(\gamma_3 t + \delta_\phi + \epsilon) + \\ & + [q_2(n_1^2 + 2k_{01}) - q_1(n_2^2 + 2k_{02})] \gamma_3 \rho_\phi \cos(\gamma_3 t + \delta_\phi + \epsilon) \} \times \\ & \times \left[ (\gamma_3^4 - \gamma_3^2 c + e)^2 + \gamma_3^2(\gamma_3^2 b - d) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (19) \end{aligned}$$

Из уравнений (17), (19) видно, что постоянных составляющих первое приближение не дает. К тому же, в отличие от датчика угловой скорости с использованием одного гироскопа, здесь амплитуды вынужденных колебаний выходного сигнала прибора относительно равновесного состояния  $\beta = \beta_0$  существенно меньше.

Из уравнений (10), рассуждая аналогично, получаем:

$$\begin{aligned} \beta_{11} = & \{ -r_1 \gamma^3 \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) - \\ & - \gamma^4 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) + q_1 \gamma^3 \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon) + \\ & + 2h_2 [-r_1 \gamma^2 \rho_\theta \sin(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + \gamma^3 \rho_\psi \cos(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) + q_1 \gamma^2 \rho_\phi \sin(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon)] + \\ & + (n_2^2 + k_{02}) [r_1 \gamma \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + \gamma^2 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) - q_1 \gamma \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon)] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - k_{01} [r_2 \gamma \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + \gamma^2 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) - q_2 \gamma \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon)] \times \\ & \times \left[ (\gamma^4 - \gamma^2 c + e)^2 + \gamma^2(\gamma^2 b - d) \right]^{\frac{1}{2}}; \\ \beta_{12} = & \{ -r_2 \gamma^3 \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) - \\ & - \gamma^4 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) + q_2 \gamma^3 \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon) + \\ & + 2h_1 [r_2 \gamma^2 \rho_\theta \sin(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + \gamma^3 \rho_\psi \cos(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) + q_2 \gamma^2 \rho_\phi \sin(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon)] + \\ & + (n_1^2 + k_{01}) [r_2 \gamma \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + \gamma^2 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) - q_2 \gamma \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon)] - \\ & - k_{02} [r_1 \gamma \rho_\theta \cos(\gamma t + \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + \gamma^2 \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\psi + \epsilon) - q_1 \gamma \rho_\phi \cos(\gamma t + \delta_\phi + \epsilon)] \times \\ & \times \left[ (\gamma^4 - \gamma^2 c + e)^2 + \gamma^2(\gamma^2 b - d) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (20) \end{aligned}$$

*Второе приближение.* Для вывода уравнения второго приближения, из дифференциальных уравнений (13) устанавливаем необходимые соотношения для вершин графа:

$$\begin{aligned} \beta_{21} = & \frac{r_1}{p^2 + 2h_1 p + n_1^2} \omega_{2x} - \frac{q_1}{p^2 + 2h_1 p + n_1^2} \omega_{2z} + \frac{Q_1}{p^2 + 2h_1 p + n_1^2} - \\ & - \frac{1}{p^2 + 2h_1 p + n_1^2} p \omega_{2y} - \frac{k_{01}}{p^2 + 2h_1 p + n_1^2} (\beta_{21} + \beta_{22}); \\ \beta_{22} = & \frac{r_2}{p^2 + 2h_2 p + n_2^2} \omega_{2x} - \frac{q_2}{p^2 + 2h_2 p + n_2^2} \omega_{2z} + \frac{Q_2}{p^2 + 2h_2 p + n_2^2} - \\ & - \frac{1}{p^2 + 2h_2 p + n_2^2} p \omega_{2y} - \frac{k_{01}}{p^2 + 2h_2 p + n_2^2} (\beta_{21} + \beta_{22}), \quad (21) \end{aligned}$$

где

$$Q_i = \beta_{1i} (r_i' \omega_{1x} - q_i' \omega_{1z}) + \frac{\alpha_{1i}}{2} [(\omega_{1x}^2 - \omega_{1z}^2) \sin 2\beta_{0i} + 2\omega_{1x} \omega_{1z} \cos 2\beta_{0i}], \quad i = 1, 2.$$

В соответствии с полученными выражениями (21), строим граф. Определитель графа имеет тот же вид, что и для первого приближения. Это значит, что левые части уравнений первого и второго приближений одинаковы.

Вычислим передачи графа считая  $Q_i$  ( $i=1,2$ ) его источниками, а величину  $\beta_2$  – стоком. Тогда:

$$\begin{aligned} W_{\beta_2}^{Q_1} = & \frac{p^2 + 2h_2 p + n_2^2 + 2k_{02}}{\Delta_1}; \\ W_{\beta_2}^{Q_2} = & - \frac{p^2 + 2h_1 p + n_1^2 + 2k_{01}}{\Delta_1}; \quad W_{\beta_1}^{\omega_{1x}} = W_{\beta_2}^{\omega_{2x}}; \\ W_{\beta_1}^{\omega_{1z}} = & W_{\beta_2}^{\omega_{2z}}; \quad W_{\beta_1}^{\omega_{1y}} = W_{\beta_2}^{\omega_{2y}} \quad (22) \end{aligned}$$

В соответствии с топологическим законом передачи

$$\beta_2 = W_{\beta_2}^{\omega_{2x}} \omega_{2x} + W_{\beta_2}^{\omega_{2z}} \omega_{2z} + W_{\beta_2}^{\omega_{2y}} \omega_{2y} + W_{\beta_2}^{Q_1} Q_1 + W_{\beta_2}^{Q_2} Q_2. \quad (23)$$

Отсюда, с учетом (22), получаем:

$$\begin{aligned} \beta_2 \Delta_1 = & \\ = & \left[ r_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01}) \right] \omega_{2x} + \\ & + \left[ -q_1(p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) + q_2(p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01}) \right] \times \\ & \times \omega_{2z} + \left[ -(2h_2p + n_2^2 + 2k_{02}) + (2h_1p + n_1^2 + 2k_{01}) \right] \dot{\omega}_{2y} + \\ & + (p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02})Q_1 - (p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})Q_2. \end{aligned} \quad (24)$$

Правая часть уравнения второго приближения (24) содержит гармонические слагаемые и одно постоянное слагаемое. Наибольший интерес представляет именно это постоянное слагаемое С в правой части уравнения, т.к. в установившемся движении этой постоянной С соответствует некоторый сдвиг  $\beta_2^{(0)}$  в показаниях прибора, определяемый как частное решение уравнения (24):

$$\begin{aligned} (n_1^2 n_2^2 + k_{01} n_2^2 + k_{02} n_1^2) \beta_2^{(0)} = C ; \\ \beta_2^{(0)} = \frac{1}{n_1^2 n_2^2 + k_{01} n_2^2 + k_{02} n_1^2} C. \end{aligned} \quad (25)$$

Таким образом, прибор будет выдавать сигнал  $\beta_0 + \beta_2^{(0)}$ , пропорциональный угловой скорости  $\omega_z + \Delta\omega$ , где  $\Delta\omega$  представляет собой динамическую ошибку ДУС.

Перейдем к определению этой постоянной С. Обозначим символом  $\langle x \rangle$  осредненное во времени значение  $x$ . Тогда в правой части уравнения (24) необходимо заранее выделить отдельные постоянные составляющие.

Из (9) имеем:

$$\omega_{2x} = -\omega_{1z} \psi ; \omega_{2z} = -\dot{\psi} \theta ; \dot{\omega}_{2y} = \dot{\omega}_{1z} \theta + \omega_{1z} \dot{\theta} .$$

Тогда, для синхронных колебаний основания уравнение (24) примет вид:

$$\begin{aligned} \beta_2 \Delta_1 = & (r_1 - r_2) 2\gamma^3 \rho_\psi \rho_\phi \sin(2\gamma t + \delta_\psi + \delta_\phi) - \\ & - (r_1 2h_2 - r_2 2h_1) \gamma^2 \rho_\psi \rho_\phi \cos(2\gamma t + \delta_\psi + \delta_\phi) - \\ & - \left[ r_1(n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(n_1^2 + 2k_{01}) \right] \times \\ & \times \gamma \rho_\psi \rho_\phi \sin(\gamma t + \delta_\psi) \cos(\gamma t + \delta_\phi) + \\ & + 2(q_2 - q_1) \gamma^3 \rho_\theta \rho_\psi \sin(2\gamma t + \delta_\theta + \delta_\psi) - \\ & - 2(q_2 h_1 - q_1 h_2) \gamma^2 \rho_\theta \rho_\psi \cos(2\gamma t + \delta_\theta + \delta_\psi) - \\ & - \left[ q_2(n_1^2 + 2k_{01}) - q_1(n_2^2 + 2k_{02}) \right] \times \\ & \times \gamma \rho_\theta \rho_\psi \sin(\gamma t + \delta_\theta) \cos(2\gamma t + \delta_\psi) - \\ & - (2h_1 - 2h_2) 2\gamma^3 \rho_\theta \rho_\phi \sin(2\gamma t + \delta_\theta + \delta_\phi) + \\ & + \left[ (n_1^2 + 2k_{01}) - (n_2^2 + 2k_{02}) \right] \gamma^2 \rho_\theta \rho_\phi \cos(2\gamma t + \delta_\theta + \delta_\phi) + \\ & + (p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02})Q_1 - (p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})Q_2. \end{aligned} \quad (26)$$

Выделим постоянную составляющую правой части уравнения (26) считая, что

$$\langle x \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x dt .$$

Постоянная С в этом случае определяется выражением:

$$\begin{aligned} C = & -\frac{1}{2} \left[ r_1(n_2^2 + 2k_{02}) - r_2(n_1^2 + 2k_{01}) \right] \times \\ & \times \gamma \rho_\psi \rho_\phi \sin(\delta_\psi - \delta_\phi) + \frac{1}{2} \left[ q_2(n_1^2 + 2k_{01}) - q_1(n_2^2 + 2k_{02}) \right] \times \\ & \times \left[ -\gamma \rho_\theta \rho_\psi \sin(\delta_\theta - \delta_\psi) \right] + \\ & + \left( (p^2 + 2h_2p + n_2^2 + 2k_{02})Q_1 - (p^2 + 2h_1p + n_1^2 + 2k_{01})Q_2 \right). \end{aligned} \quad (27)$$

Из выражения (25), с учетом (27), определяется величина смещения  $\beta_2^{(0)}$  выходного сигнала датчика угловой скорости, обусловленная качкой основания.

В случае синхронных колебаний основания, имеют место соотношения:

$$A_1 = A_2 = G_1 = G_2 = 0 ; F_i = -2h_j \gamma^2 \rho_\psi ;$$

$$D_i = -\gamma^2 \rho_\psi \left[ \gamma^2 - \frac{1}{B_j} (c_j + k_j) + \frac{k_j}{B_i} \right] ;$$

$$L_i = \rho_\phi \left[ \frac{H_1}{B_i} \gamma^2 - \frac{H_1}{B_i} \left( \frac{c_i}{B_i} + \frac{k_j}{B_j} \right) + \frac{k_i}{B_i} \frac{H_j}{B_j} \right] ; E_i = 2h_j \frac{H_1}{B_i} \rho_\phi ,$$

$$i = 1, 2 ; j = 2, 1$$

и формула (27) принимает вид:

$$\begin{aligned} C = & \frac{1}{2} \frac{1}{B_1 B_2} \left[ H_2(c_1 + 2k_1) + H_1(c_2 + 2k_2) \right] \times \\ & \times \gamma \rho_\psi \rho_\phi \sin(\delta_\theta - \delta_\psi) + \frac{1}{2} \frac{1}{B_1 B_2} \left[ R_1(c_2 + 2k_2) - R_2(c_1 + 2k_1) \right] \times \\ & \times \gamma^2 \rho_\theta \rho_\phi \cos(\delta_\theta - \delta_\phi) + \\ & + \frac{1}{2} \frac{1}{B_1 B_2} \left[ (\gamma^4 - \gamma^2 c + e)^2 + \gamma^2 (\gamma^2 b - d)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \gamma \rho_\theta \times \\ & \times \left\{ \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)F_1 - H_2(c_1 + 2k_1)F_2 \right] \cos(\delta_\psi - \delta_\theta + \epsilon) + \right. \\ & + \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)L_1 - H_2(c_1 + 2k_1)L_2 \right] \cos(\delta_\phi - \delta_\theta + \epsilon) + \\ & + \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)D_1 - H_2(c_1 + 2k_1)D_2 \right] \sin(\delta_\psi - \delta_\theta + \epsilon) + \\ & \left. + \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)E_1 - H_2(c_1 + 2k_1)E_2 \right] \sin(\delta_\phi - \delta_\theta + \epsilon) \right\}. \end{aligned} \quad (28)$$

Из формулы (25), с учетом величины (28), не представляет труда установить значение сдвига нуля прибора  $\beta_2^{(0)}$ .

При асинхронных колебаниях основания, сдвиг нуля отсутствует, так как правая часть уравнения (27) обращается в нуль.

Формула для определения величины ошибки в измерении угловой скорости из-за появившегося сдвига нуля  $\beta_2^{(0)}$  при синхронных колебаниях основания может быть очерчена, например, для частного случая, когда  $\omega_x = \omega_y = 0$ ,  $\omega_z = \omega = \text{const}$ . Для этого надо установить связь между установившемся значением

выходного сигнала прибора  $\beta_0$  и угловой скоростью вращения вокруг оси чувствительности гироскопов  $\omega$ . Для принятых условий уравнения движения ДУС запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}R_1\omega^2 \sin 2\beta_{01} + H_1\omega \cos \beta_{01} + c_1\beta_{01} + k_1(\beta_{01} + \beta_{02}) &= 0; \\ \frac{1}{2}R_2\omega^2 \sin 2\beta_{02} - H_2\omega \cos \beta_{02} + c_2\beta_{02} + k_2(\beta_{01} + \beta_{02}) &= 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Из (29) получаем необходимые соотношения для определения вершин графа

$$\begin{aligned} \beta_{01} &= -\frac{1}{2}R_1\omega^2 \sin 2\beta_{01} \frac{1}{c_1} - \\ &- H_1\omega \cos \beta_{01} \frac{1}{c_1} - k_1(\beta_{01} + \beta_{02}) \frac{1}{c_1} = 0; \\ \beta_{02} &= -\frac{1}{2}R_2\omega^2 \sin 2\beta_{02} \frac{1}{c_2} + \\ &+ H_2\omega \cos \beta_{02} \frac{1}{c_2} - k_2(\beta_{01} + \beta_{02}) \frac{1}{c_2} = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

В соответствии с выражениями (30), строим граф и составляем его определитель:

$$\Delta = 1 + \frac{k_1}{c_1} + \frac{k_2}{c_2} = \frac{c_1c_2 + k_1c_2 + k_2c_1}{c_1c_2} = \frac{1}{c_1c_2} \Delta_0. \quad (31)$$

Вычисляем передачи графа считая  $\omega$  и  $\omega^2$  источниками графа, а  $\beta_0$  – его стоком. Тогда

$$\begin{aligned} W_{\beta_0}^{\omega} &= \frac{-H_1(c_2 + 2k_2)\cos\beta_{01} + H_2(c_1 + 2k_1)\cos\beta_{02}}{c_1c_2 + k_1c_2 + k_2c_1}; \\ W_{\beta_0}^{\omega^2} &= \frac{-\frac{1}{2}R_1(c_2 + 2k_2)\sin 2\beta_{01} + \frac{1}{2}R_2(c_1 + 2k_1)\sin 2\beta_{02}}{c_1c_2 + k_1c_2 + k_2c_1}. \end{aligned} \quad (32)$$

В соответствии с топологическим законом передачи, имеем:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= W_{\beta_0}^{\omega} \omega + W_{\beta_0}^{\omega^2} \omega^2 = \frac{1}{c_1c_2 + k_1c_2 + k_2c_1} \times \\ &\times \left[ -H_1\omega(c_2 + 2k_2)\cos\beta_{01} + H_2\omega(c_1 + 2k_1)\cos\beta_{02} - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2}R_1\omega^2(c_2 + 2k_2)\sin^2\beta_{01} + \frac{1}{2}R_2\omega^2(c_1 + 2k_1)\sin^2\beta_{02} \right]. \end{aligned} \quad (33)$$

Решая это уравнение относительно  $\omega$ , получаем для малых углов  $\beta_{oi}$ :

$$\omega \approx -\frac{c_1c_2 + k_1c_2 + k_2c_1}{H_1(c_2 + 2k_2) - H_2(c_1 + 2k_1)} \beta_0.$$

Тогда

$$\Delta\omega = \frac{c_1c_2 + k_1c_2 + k_2c_1}{H_1(c_2 + 2k_2) - H_2(c_1 + 2k_1)} \beta_2^{(0)}. \quad (34)$$

Формула (34), с учетом (33) и (28), дает

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \frac{1}{2} \frac{1}{H_1(c_2 + 2k_2) - H_2(c_1 + 2k_1)} \times \\ &\times \left\{ \left[ H_2(c_1 + 2k_1) + H_1(c_2 + 2k_2) \right] \times \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \gamma \rho_\theta \rho_\psi \sin(\delta_\theta - \delta_\psi) + \\ &+ \left[ R_1(c_2 + 2k_2) - R_2(c_1 + 2k_1) \right] \gamma^2 \rho_\theta \rho_\psi \cos(\delta_\theta - \delta_\psi) + \\ &+ \gamma \rho_\theta \left[ (\gamma^4 - \gamma^2 c + e)^2 + \gamma^2 (\gamma^2 b - d)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times \\ &\times \left\{ \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)F_1 - H_2(c_1 + 2k_1)F_2 \right] \cos(\delta_\psi - \delta_\theta + \varepsilon) + \right. \\ &+ \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)L_1 - H_2(c_1 + 2k_1)L_2 \right] \cos(\delta_\phi - \delta_\theta + \varepsilon) + \\ &+ \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)D_1 - H_2(c_1 + 2k_1)D_2 \right] \sin(\delta_\psi - \delta_\theta + \varepsilon) + \\ &+ \left. \left[ -H_1(c_2 + 2k_2)E_1 - H_2(c_1 + 2k_1)E_2 \right] \times \right. \\ &\left. \left. \times \sin(\delta_\phi - \delta_\theta + \varepsilon) \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (35)$$

Для наглядности приведем числовой пример. Пусть

$$H_1 = 2090 \text{ Г смс};$$

$$H_2 = -2110 \text{ Г смс}; \quad C_1 = 1200 \text{ Г см}; \quad C_2 = 1200 \text{ Г см};$$

$$k_1 = k_y k_{дм1} = 3000 \text{ Г см}; \quad k_2 = 3040 \text{ Г см};$$

$$\gamma = 0,5 \text{ с}^{-1}; \quad \rho_\theta = \frac{\pi}{36} = 5^\circ; \quad \rho_\phi = \rho_\psi = 1^\circ = \frac{\pi}{180}.$$

$$\text{Тогда } \Delta\omega \approx 0,94 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1} = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ градс}^{-1}.$$

Если сравнить полученный результат с аналогичным для датчика угловой скорости с использованием одного гироскопа, то видно, что при прочих равных условиях, ДУС с автокомпенсацией влияния внешних помех методом двухканальности имеет сдвиг нуля, соответствующий ложной угловой скорости  $\Delta\omega$ , приблизительно на два порядка меньше.

### 3. Выводы

Приведенные результаты исследований двухстепенного гироскопа на подвижном основании показывают, что компенсация влияния внешних механических возмущений типа качки основания методом двухканальности позволяет существенно уменьшить (более, чем на порядок) погрешность двухстепенных гироскопических приборов – измерителей кинематических параметров. Полученные аналитические зависимости устанавливаются степень влияния параметров качки на величину погрешности схемы автокомпенсации и могут быть использованы для численного анализа.

### Литература

1. Сайдов, П. И. Теория гироскопов [Текст]: уч. пособие / П. И. Сайдов - М.: Высш. школа, 1965. – 395с.
2. Никитин, Е. А. Проектирование дифференцирующих и интегрирующих гироскопов и акселерометров [Текст]: монография / Е. А. Никитин, А. А. Балашова; МАИ. – М.: Наука, 1969. – 305 с: ил., табл. – Библиогр.: с. 299-303.

3. Одинцов, А.А. Метод автокомпенсации влияния внешних помех, действующих на гироскопы и маятниковые акселерометры [Текст] / А.А. Одинцов // Автоматика и приборостроение: Сб. научн. работ. – Киев, 1973. – С. 87-94.
4. Одинцов, А.А. Об уменьшении погрешностей гиросtabilизаторов от перекрестных связей [Текст] / А.А. Одинцов, В.В. Карачун // Прикл. механика. – 1973. Т. IX, вып. 10 – С. 112-118.
5. Сигорский, В.П. Матрицы и графы в электронике [Текст] / В.П. Сигорский // Нац. техн. ун-т Украины «КПИ». – М.: Энергия, 1968. – 244с. – Библиограф.: с. 242-243.
6. Mason, S.I. Feedback – Theory – Further properties of Signal Flow Graphs [Text] / S.I. Mason // Pros. of the JRE. – 1956. - №7. – P. 49-52.
7. Бессонов, Л.А. Линейные электрические цепи [Текст] / Л.А. Бессонов // Уч. пособие – М.: Высш. шк., 1968. – 261с.
8. Абрахамс, Д. Анализ электрических цепей методом направленных графов [Текст] / Д. Абрахамс, Д. Коверли // Пер. с англ. В. Ямненко – М.: Мир, 1967. – 153с.
9. Райцин, Т.М. Синтез систем автоматического управления методом направленных графов [Текст] / Т.М. Райцин // Моск. энерг. ин-т. – М.: Энергия, 1970. 213с. – Библиогр.: с. 210-212.

*Досліджено можливість застосування водно-паливної емульсії на двигунах внутрішнього згоряння повітряного охолодження, як у стендовому режимі, так і ходових випробуваннях*

*Ключові слова: водно-паливна емульсія, циклові температури, вприскування, низькооктанове число, карбюратор, парціальний тиск*

*Исследована возможность применения водно-топливной эмульсии на двигателях внутреннего сгорания воздушного охлаждения, как в стендовом режиме, так и ходовых испытаниях*

*Ключевые слова: водно-топливная эмульсия, цикловые температуры, впрыск, низькооктановое число, карбюратор, парціальное давление*

*The possibility of the using of water-fuel emulsion in the internal-combustion engine of air cooling was researched*

*Key words: water-fuel emulsion, cyclic temperatures, solid injection of fuel, low-octane number, carburettor, parcial pressure*

УДК 662.758

# ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНО-ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В. Ф. Гайворонский

Старший преподаватель

Кафедра "Химическая технология неорганических веществ"

Украинская инженерно-педагогическая академия  
ул. Университетская, 16, Харьков, Украина, 61003

Контактный тел.: 062-623-36-51

E-mail: uipa2005@ukr.net

## 1. Введение

В последние годы топливные смеси вновь привлекают внимание в связи с возможностью улучшения энерго-экономических показателей и расширения ресурсов топлива без необходимости значительной модификации силовой установки автомобиля.

Применение воды в рабочем процессе тепловых двигателей началось почти одновременно с их появлением. Еще в 1864 г. Гюгон для улучшения работы двигателя Ленуара подавал воду в горючую смесь [1].

В 30-е годы впрыск воды использовался для повышения степени сжатия и увеличения мощности