

УДК 531.383

С.А. Мураховский

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ГИРОТЕОДОЛИТА

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Показана актуальность задачи определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гироскопа. Рассмотрены системы стабилизации угловой скорости вращения гиromотора, которые могут быть использованы для решения такой задачи. Проведен синтез наблюдающего устройства для определения оценок параметров движения чувствительного элемента в негиростабилизированной плоскости. Рассмотрены погрешности оценивания наблюдающего устройства. Проведено моделирование работы наблюдателя.

Ключевые слова: гироскоп, гиromотор, вибрационная погрешность.

Введение. Определение параметров движения чувствительного элемента (ЧЭ) гироскопа (ГТ) вокруг главной оси гироскопа является важной задачей для реализации алгоритмической компенсации вибрационной погрешности [1, 2]. Непосредственное измерение указанных колебаний представляет собой достаточно сложную задачу и связано со значительным усложнением конструкции, поскольку в этом случае необходимо устанавливать дополнительный датчик угла. В то же время в существующих конструкциях ГТ присутствуют системы стабилизации оборотов гиromотора, информация из которых может быть использована для определения угла и угловой скорости колебаний ЧЭ относительно главной оси. Предлагаемая статья посвящена разработке метода определения дополнительных параметров движения ЧЭ гироскопа вокруг главной оси, путем использования сигналов системы стабилизации угловой скорости гиromотора.

Постановка задачи. В качестве гиromотора (ГМ) в гироскопах как правило используется асинхронный двигатель, скорость вращения которого зависит от изменения параметров питания и момента трения в опорах ротора. Для уменьшения влияния флуктуаций угловой скорости гиromотора на точность гироскопа применяются специальные системы стабилизации. Упрощенная функциональная схема такой системы

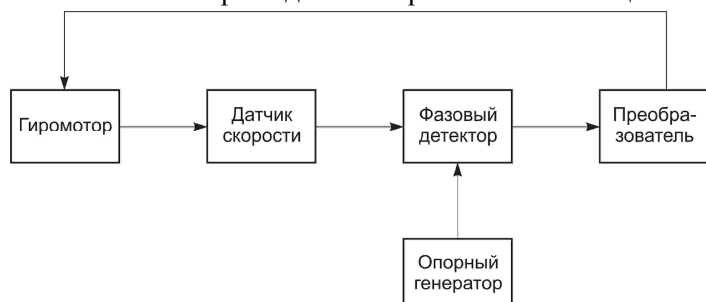


Рис.1. Функциональная схема системы стабилизации

представлена на рис.1. Датчик, закрепленный на оси двигателя, вырабатывает пропорциональный скорости вращения ротора сигнал, поступающий на один из входов фазового детектора. На другой его вход поступает сигнал с опорного генератора. Напряжение на выходе фазового детектора, зависящее от фазового сдвига между этими сигналами, подается на преобразователь,

формирующий управляющее воздействие. При изменении частоты вращения ротора на обмотки ГМ поступает компенсирующее напряжение для устранения появляющегося рассогласования [3, 4].

Математическую модель колебаний ЧЭ гироскопа в негиростабилизированной плоскости можно представить в виде:

$$\begin{cases} J_x \ddot{\gamma} + f_\gamma \dot{\gamma} + mgl\gamma = -\dot{H} + mgl \cdot n_Z(t) \\ T_{GM} \ddot{\omega} + T_{GM} \Delta \dot{\omega} + \Delta \omega = K_U \Delta U \end{cases}, \quad (1)$$

$$\Delta U = -W(p) \Delta \omega,$$

$$W(p) = \frac{K_{CC}(T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1)}.$$

где J_x – момент инерции ЧЭ относительно главной оси, γ – угол поворота ЧЭ относительно корпуса вокруг главной оси, f_γ – коэффициент вязкого трения, m – масса чувствительного элемента; l – смещение центра масс ЧЭ относительно точки подвеса, $H = J_p(\omega_0 + \Delta\omega)$ – кинетический момент гироскопа, J_p – осевой момент инерции ротора ГМ, ω_0 – номинальная угловая скорость ГМ, $\Delta\omega$ – изменение угловой скорости ГМ, T_{GM} –

постоянная времени гиromотора, K_U – коэффициент передачи ГМ по напряжению, ΔU – корректирующее напряжение, прикладываемое к гиromотору, $W(p)$ – передаточная функция системы стабилизации, K_{CC} – коэффициент передачи системы стабилизации, T_1, T_2 – постоянные времени, $n_Z(t) = n_m \sin(\varepsilon + \psi_0) \sin \omega t$ – перегрузка точки подвеса ГТ.

Предлагаемый метод основан на использовании наблюдателя для определения оценки параметров движения ЧЭ ГТ вокруг главной оси. Поскольку для алгоритмической компенсации вибрационной погрешности гиротеодолита необходимо определить значения угла γ или угловой скорости $\dot{\gamma}$, то данные параметры движения будут искомыми величинами на выходе наблюдателя.

Решение поставленной задачи. В качестве измеряемой величины принимаем сигнал $\Delta\omega$, который формируется в системе стабилизации. Перепишем систему уравнений (1) в форме пространства состояний, обозначив переменные состояния $x_1 = \gamma$, $x_2 = \dot{\gamma}$, $x_3 = \Delta\omega$, $x_4 = \Delta U$, $x_5 = \Delta\dot{U}$:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}, \quad (2)$$

где \mathbf{X} - вектор состояния, \mathbf{A} - матрица состояния, \mathbf{Y} - вектор измерения, \mathbf{C} - матрица измерения:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{mgl}{J_x - J_p} & -\frac{f_\gamma}{J_x - J_p} & \frac{J_p}{T_{GM}(J_x - J_p)} & -\frac{K_U J_p}{T_{GM}(J_x - J_p)} & 0 \\ \frac{mgl}{J_x - J_p} & \frac{f_\gamma}{J_x - J_p} & -\frac{J_x}{T_{GM}(J_x - J_p)} & \frac{K_U J_x}{T_{GM}(J_x - J_p)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_{CC} T_1 mgl}{T_2 (J_x - J_p)} & -\frac{K_{CC} T_1 f_\gamma}{T_2 (J_x - J_p)} & \frac{K_{CC} T_1 J_x}{T_{GM} (J_x - J_p)} - K_{CC} & \frac{K_U K_{CC} T_1 J_x}{T_{GM} T_2 (J_x - J_p)} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T; \quad \mathbf{C} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0].$$

Система матричных уравнений (2) записана при условии отсутствия внешних возмущений.

$$\text{Матрица наблюдаемости имеет вид: } \mathbf{Q} = \left[\mathbf{C}^T : \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^2 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^3 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^4 \mathbf{C}^T \right]. \quad (3)$$

Ранг матрицы (3) равен порядку объекта $\text{rank} \mathbf{Q} = 5$, следовательно, по измеренному выходному вектору \mathbf{Y} можно оценить все переменные состояния объекта. Наблюдающее устройство при отсутствии внешних возмущений описывается уравнением:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}\mathbf{C})\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{Y}, \quad (4)$$

где $\hat{\mathbf{X}}$ - вектор оценок переменных состояния, \mathbf{K} - матрица коэффициентов наблюдающего устройства.

$$\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2 \ \hat{x}_3 \ \hat{x}_4 \ \hat{x}_5]^T; \quad \mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5]^T.$$

Коэффициенты матрицы \mathbf{K} выбираются таким образом, чтобы собственные значения наблюдателя, описываемого уравнением (4), располагались в заданных точках на комплексной плоскости. Выберем биномиальное распределение корней характеристического уравнения, при этом должно выполняться равенство:

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C}) = (p + \omega_0)^5. \quad (5)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях p в левой и правой части выражения (5), нетрудно определить коэффициенты матрицы \mathbf{K} . Полученные таким образом выражения для коэффициентов наблюдателя включают заданные параметры гиротеодолита, гиromотора, системы стабилизации, а также значение ω_0 , которое будет определять точность и быстродействие наблюдающего устройства. Синтез проведен для случая отсутствия внешних возмущений, однако в негиростабилизированной плоскости на ЧЭ ГТ действует

поступательная вибратія с перегрузкой $n_z(t)$, поэтому для определения погрешностей оценивания рассмотрим частотные характеристики гиротеодолита. Запишем систему уравнений (2) в форме пространства состояний, с учетом внешних возмущений:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\Xi \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}, \quad (6)$$

где $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{mgl}{J_x - J_p} & -\frac{mgl}{J_x - J_p} & 0 & \frac{K_{CC}T_1 mgl}{T_2(J_x - J_p)} \end{bmatrix}^T$ – матрица передачи возмущений, $\Xi = n_z(t)$ – возмущающее воздействие.

Переходя от оригиналов к изображениям Лапласа, из первого уравнения системы (6) получим матричную передаточную функцию гиротеодолита:

$$\mathbf{W}_{GT}(p) = \frac{\mathbf{X}(p)}{n_z(p)} = (p\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{G}. \quad (7)$$

Аналогичным образом запишем матричную передаточную функцию наблюдающего устройства, для которого входной величиной является сигнал $\Delta\omega$, который формируется в системе стабилизации: $\mathbf{W}_{HY}(p) = \frac{\hat{\mathbf{X}}(p)}{\Delta\omega(p)} = (p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C})^{-1}\mathbf{K}$. (8)

Для анализа динамических свойств наблюдателя в частотной области построим логарифмические частотные характеристики (рис.2) гиротеодолита и системы гиротеодолит-наблюдатель, на основании выражений (7) и (8). Из полученных графиков видно, что графики АЧХ системы гиротеодолит-наблюдатель значительно отличаются от требуемой АЧХ ГТ при любых значениях собственной частоты полинома наблюдателя. Анализ ФЧХ показывает, что минимальных фазовых искажений можно достичь при $\omega_0 = 400 \text{ c}^{-1}$, в этом случае в частотном диапазоне от 0,1 до 100 c^{-1} фазы сигналов на выходе ГТ и наблюдателя будут практически совпадать.

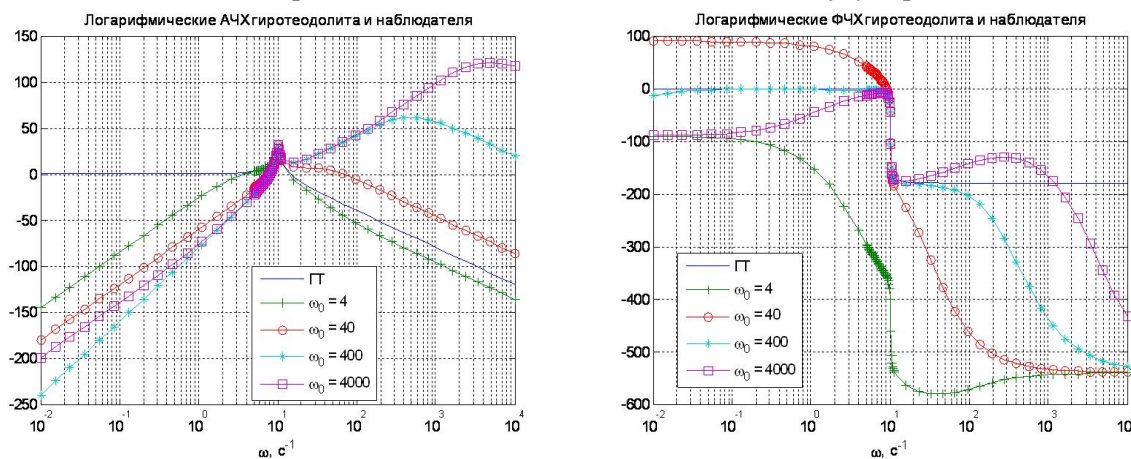


Рис.2. Графики логарифмических частотных характеристик

Начальный наклон графика амплитудно-частотной характеристики при $\omega_0 = 400 \text{ c}^{-1}$ составляет +80 дБ на декаду, следовательно, для уменьшения амплитудных искажений можно предложить последовательную коррекцию сигнала на выходе наблюдателя с помощью звена в передаточной функции: $W_{K3}(p) = \frac{K_{K3}(T_{K3}p + 1)}{p^4}$. (9)

Графики частотных характеристик при наличии коррекции приведены на рис.3. Таким образом, при $\omega_0 = 400 \text{ c}^{-1}$ и использовании корректирующего звена основные амплитудные искажения устраняются. ФЧХ изменяется незначительно, при этом наличие форсирующего звена в передаточной функции (9) улучшает фазовую частотную характеристику в области высоких частот, что достигается выбором соответствующего значения постоянной времени T_{K3} .

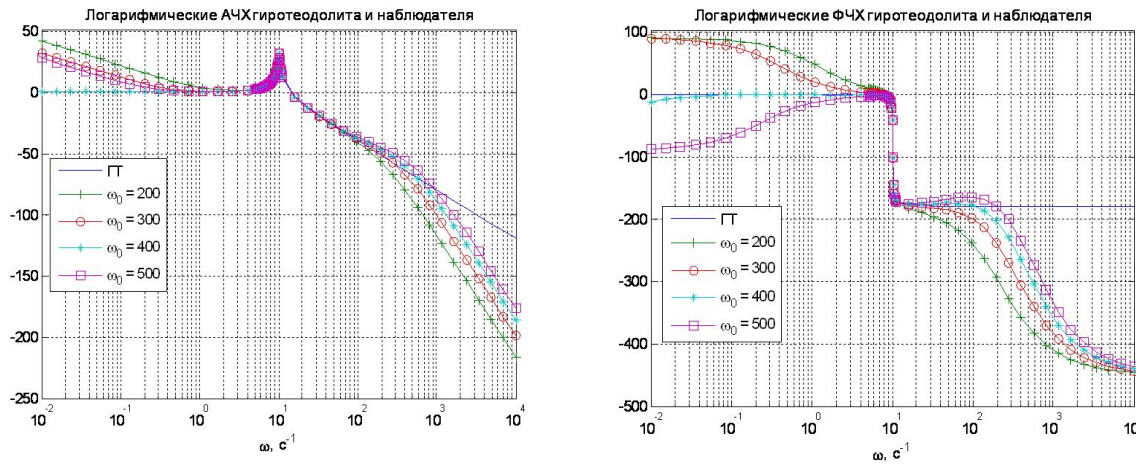


Рис.3. Графики логарифмических частотных характеристик с коррекцией

Моделирование работы наблюдающего устройства. При моделировании использовались следующие значения параметров ГТ: $H = 0.4$ Нмс, $m = 1$ кг, $l = 0.08$ м, $f_\gamma = 0.002$ Нмс, $J_x = 7.65 \cdot 10^{-3}$ кгм², $T_{ГМ} = 30$ с, $K_U = 24$ с⁻¹/В, $K_{CC} = 50$ В/с⁻¹, $T_1 = 0.5$ с, $T_2 = 0.01$ с. Параметры движения основания: $\psi_0 = 0$, $\varepsilon = 45^\circ$, $n_m = 0.001$, $\omega = 5$ с⁻¹.

Результаты моделирования представлены на рис.4. Как следует из результатов проведенного моделирования, в процессе определения оценок угла γ или угловой скорости $\dot{\gamma}$ при отсутствии коррекции выходного сигнала наблюдателя возникают существенные погрешности. В то же время введение коррекции позволяет достичь значительного уменьшения искажений сигнала оценки по сравнению с непосредственно измеренными переменными состояния. При этом угол γ оценивается практически без погрешности, а погрешность оценивания угловой скорости $\dot{\gamma}$ по амплитуде составляет не более 5%. Следовательно, полученные оценки могут быть использованы для алгоритмической компенсации вибрационной погрешности.

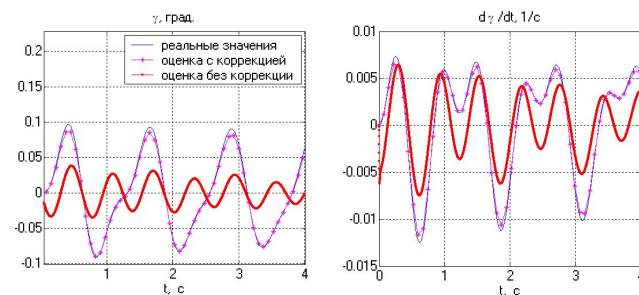


Рис. 4. Моделирование наблюдающего устройства

Выводы. Разработанный метод позволяет определять оценки угла γ или угловой скорости $\dot{\gamma}$ колебаний ЧЕ гиросеодолита вокруг главной оси. Реализация метода основана на синтезе наблюдателя, использующего информативный сигнал, формируемый в системе стабилизации оборотов гиросеодолита. Проанализированы погрешности оценивания и предложено последовательное корректирующее звено для уменьшения амплитудных искажений в выходном сигнале наблюдателя. Как показали результаты моделирования, оценки переменных состояния могут использоваться для алгоритмической компенсации вибрационной погрешности.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на исследование погрешностей алгоритмической компенсации при использовании оценок параметров движения чувствительного элемента гиросеодолита.

Список литературных источников

1. Мураховский С.А., Лазарев Ю. Ф., Мироненко П.С. Динамика наземного компенсационного маятникового гиросеодолита. // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – вип. 2. – С. 125-130.
2. Мураховский С.А., Хоца А.А. Синтез наблюдающего устройства для оценки параметров движения чувствительного элемента гиросеодолита. // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – вип. 1. – С. 151-156.
3. Воробьев В.М. О влиянии качаний ротора гидродвигателя на устойчивость движения гиросеодолита. // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2011. – вип. 6. – С. 34-58.
4. Танский Е.А. Прецизионные системы стабилизации скорости двигателей. – Л.: Энергия. – 1975. – 252 с.